

Betrachtungen über das Befüllen und Entleeren von Vorratsbehältern für Schüttgüter

Von **Heinrich Kohsiek**, Berlin

Mitteilung aus dem Institut für Landtechnik der Technischen Universität Berlin

Schon bei stationären Behältern für Schüttgut gibt es viele Probleme beim Befüllen, Lagern und Entleeren, wieviel mehr bei den fahrbaren Behältern in der Landwirtschaft. Die Erzielung eines konstanten Mengenstromes bei der Verteilung von Dünger und Saatgut, insbesondere von Feinsämereien und Pflanzenschutzmitteln, ist dadurch sehr erschwert. Die Betrachtungen sollen anhand fremder und eigener Untersuchungen einen Einblick in die Problematik der Schüttgutbewegung beim Entleeren von Vorratsbehältern geben.

Beim Befüllen und Entleeren von Vorratsbehältern für staubförmige, granuliert, brockige und plastische Güter, wie beispielsweise Getreide, Mehl, Futtermittel, Kunstdünger, Baustoffe, Kohle, können mancherlei Störungen des Betriebsablaufs auftreten, u. a. Entmischung des Gutes beim Einfüllen, Verfestigung des Gutes bei der Lagerung, ungleichmäßiger Auslauf bis zum völligen Stocken beim Entleeren sowie Bildung von Toträumen, aus denen ohne Hilfseinrichtungen kein Schüttgut auslaufen kann. Gelegentlich hilft man sich durch Stochern im Gut oder Klopfen am Behälter; gelöst wird das Problem dadurch jedoch nicht.

Im Gegensatz zu den Flüssigkeiten und Gasen ist es bei den Schüttgütern bisher nicht gelungen, eine einheitliche Theorie für das Verhalten in Vorratsbehältern und für das Ausfließen zu finden. Der Bau solcher Anlagen und ihrer Entleereinrichtungen beruht auf Erfahrungen und einer Reihe von Messungen, die an einzelnen Gütern vorgenommen wurden. Die aufgrund solcher Erkenntnisse konstruierten Behälter eignen sich nicht gleich gut für alle Schüttgüter, sondern nur für solche, für die sie entworfen wurden, bzw. für solche mit ähnlichen oder besseren Lagerungs- und Fließigenschaften.

Probleme bei der Befüllung und Lagerung

Bei der Befüllung bildet sich gewöhnlich im Behälter ein Schüttkegel unter der Einfüllstelle, über dessen Mantelfläche das Material abrutscht und abrollt. Dabei kommt es zur Trennung der groben von den feinen Bestandteilen, wenn ein größeres Korngrößenspektrum vorliegt. Die größeren Körner rollen über den von den feineren Teilchen gebildeten Kegel auf die Behälterwand zu. Beim Entleeren tritt dann zuerst Feinkorn aus, wenn

In tiefen Behältern, die man nur vom oberen Rand aus durch freien Fall befüllt, werden die Bestandteile vieler Schüttgüter abgerieben oder zerstoßen. Ferner werden sie in den unteren Schichten dichter gelagert als in den oberen. Bei einem Gemisch aus Teilchen verschiedener Dichte tritt darüber hinaus eine Trennung nach der Dichte auf.

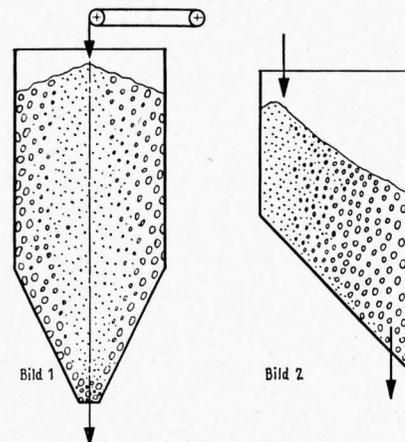


Bild 1 und 2. Verteilung eines Schüttguts mit großem Korngrößenspektrum im Vorratsbehälter bei mittlerer Befüllung und Entleerung (Bild links) und bei versetzt angeordneter Befüllung und Entleerung (Bild rechts).

Während der Lagerung eines Schüttgutes im Behälter treten Setzerscheinungen und besonders bei Salzen und salzhaltigen Granulaten Verklumpungen und Verbackungen ein. Dies hat teils physikalische und teils chemische Ursachen. Bei organischen Substanzen (z. B. Getreide) kommt es in Verbindung mit Feuchtigkeit auch zu biologischen Veränderungen, die die Entleerung erschweren.

Probleme bei der Entleerung

Füllt man verschieden gefärbtes Material schichtweise in ein Gefäß aus transparenten Wänden, dann zeigen sich beim Entleeren unter dem Einfluß der Schwerkraft typische Bewegungen

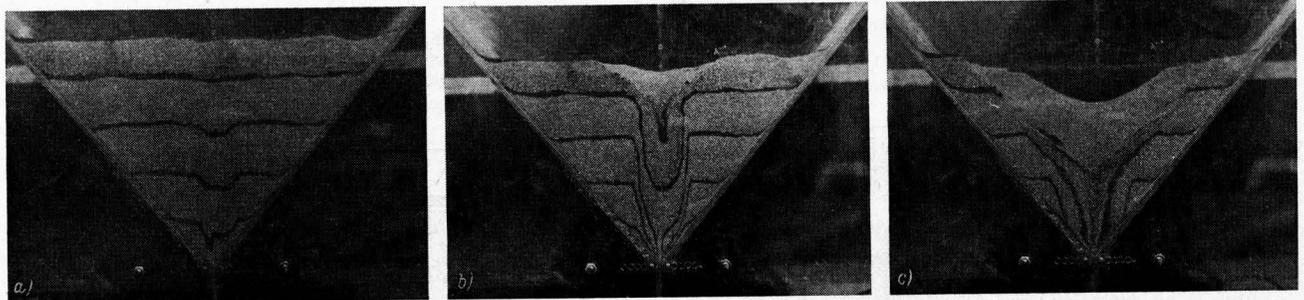


Bild 3. Auslauf unter dem Einfluß der Schwerkraft von schichtweise eingefüllten verschiedenfarbigen Gütern.

die Einfüllstelle senkrecht über dem Auslauf liegt, **Bild 1**. Sind beide Öffnungen versetzt zueinander angeordnet, **Bild 2**, dann fließt zunächst Grobkorn und später mehr der feinere Anteil aus.

Durch geeignete Befüllorgane kann man die Bildung von Füllkegeln vermeiden und damit auch die Entmischung während des Befüllens, z. B. durch beweglich angeordnete Aufgabeeinrichtungen, die die gesamte Behälterfläche gleichmäßig mit Schüttgut beschießen.

Dipl.-Ing. Heinrich Kohsiek ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Horst Göhlich) an der Technischen Universität Berlin.

im Schüttgut. Auf sie kommt es beim Auslauf an, im Gegensatz zu den Gasen und Flüssigkeiten, bei denen die Bedingungen direkt an den Austrittsöffnungen wichtig sind. **Bild 3** (a bis c) zeigt, daß das Schüttgut nur oberhalb der Austrittsöffnung in Bewegung ist; seitlich davon liegendes bleibt zunächst in Ruhe. Es wird also nicht das zuerst eingefüllte Gut auch als erstes wieder ausgetragen, sondern nur ein Teil davon. Beim Auslaufen treten Vermischungen der einzelnen Schichten auf, soweit sie an der Bewegung teilnehmen.

Brown und Hawksley [1] stellten anhand ihrer Beobachtungen beim Ausfließen von rieselfähigen Schüttgütern aus Behältern die Riesel-Rutsch-Theorie auf. Beim Öffnen des Auslaufs, **Bild 4**, beobachtet man zunächst eine Zeitlang keine Bewegung im oberen Teil des Schüttguts, obwohl der Ausfluß aus Raum D schon begonnen hat. Es ist anzunehmen, daß eine Ausdehnungswelle durch das Schüttgut geht, bevor es sich über die ganze Füllhöhe (Raum C) in Bewegung setzt. Beim ungestörten Ausfließen rollen Körner über die Schicht A, die über der Schicht B abwärtsgleitet, zum tiefsten Punkt des Schüttguttrichters.

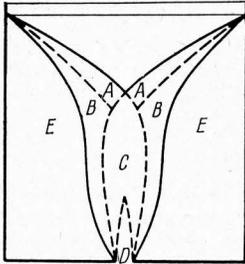


Bild 4. Auslauf unter dem Einfluß der Schwerkraft nach der Riesel-Rutsch-Theorie von Brown und Hawksley [1].

Schicht B bewegt sich gleichzeitig langsam über E. Durch diese Schichten wird Raum C aufgefüllt, in dem sich die Teilchen schneller als in den vorgenannten Schichten nach unten und zur Auslaufmittellinie bewegen. Wenn sie den Raum D erreicht haben, bewegen sie sich mit rd. $\frac{1}{100}$ der Geschwindigkeit, die sie beim freien Fall in ruhender Luft erreichen würden, zum Auslauf. Wenn die Neigung des Behälterbodens ausreicht, läuft der ganze Inhalt aus. Andernfalls entsteht ein Totraum (E). In engen Behältern mit relativ großer Auslaßöffnung wird Raum E durch die Behälterwand ersetzt. Im oberen Teil des Behälters bewegt sich das Schüttgut geschlossen abwärts, d. h., Raum C nimmt den größten Teil des Behälters ein.

Gewölbebildung

Solange eine Schüttgutsäule beim Auslaufen über der Öffnung steht, bauen sich Gewölbe auf, sogenannte Brücken. Bei normaler Bunkertätigkeit brechen sie jedoch stets wieder zusammen, und es fließt fortlaufend Schüttgut aus. Ihre Form ist nicht beeinflussbar, weil sie zufällig entstehen. Wenn der Strom abreißt, hat sich ein tragfähiges Gewölbe aus Schüttgut gebildet, in dem sich die einzelnen Teilchen keilförmig so gut gegeneinander abstützen, daß die Tragfähigkeit erhalten bleibt. Nur durch Einwirkung von außen kann es zum Einsturz gebracht werden.

Die Gewölbe müssen sich am Behälterrind oder im ruhenden Gut abstützen können. Das in **Bild 5** skizzierte Gewölbe hat eine positive Gaußsche Krümmung, d. h., in jedem Punkt der Fläche zeigt der Krümmungsradius nach der gleichen Seite.

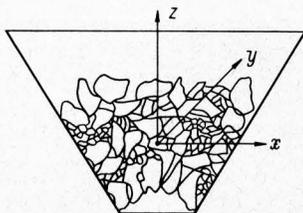


Bild 5. Aufbau einer Schüttgutbrücke nach Kvapil [5].

Dubach [2] geht von der Hypothese aus, daß Schüttgutgewölbe leichter zusammenbrechen, wenn sie eine negative Gaußsche Krümmung haben. Brauchbar wäre z. B. eine sogenannte Sattelfläche nach **Bild 6**, deren Form durch die Gleichung

$$z = \frac{x^2}{2p} - \frac{y^2}{2q}$$

(hyperbolisches Paraboloid) wiedergegeben wird. p und q sind die Parameter der Hauptschnittparabeln. Bei S müssen die Schüttgutteilchen schneller abfließen als bei L, damit die gewünschte Krümmung entstehen kann. Sie müßte sich bilden, wenn die Behälterwände aus Materialien hergestellt werden, die verschiedene Reibungskoeffizienten haben. Rechteckbunker könnte man so auslegen, daß je zwei gegenüberliegende Wände unterschiedliche Reibungskoeffizienten haben. Bei Rundbunkern müßten nebeneinanderliegende Sektoren aus Materialien mit

verschiedenen Reibungskoeffizienten gebaut werden. Das ist eventuell durch geeignete Anstriche zu erreichen. Einbauten sollte man an sich gegenüberliegenden Wänden und nicht an angrenzenden anbringen.

Häufig wird nicht nur ein dauerndes Fließen gefordert, sondern der Mengenstrom soll auch zeitlich konstant sein. Von verschiedener Wichtigkeit hierfür sind die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Schüttgutes, die Größe, Form und Lage der Austragsöffnungen und die Höhe der Schüttgutsäule.

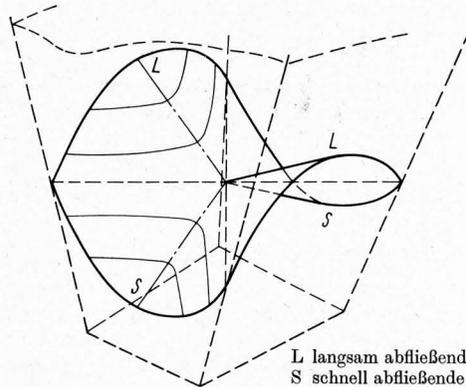


Bild 6. Sattelfläche als Schüttgutgewölbe in einem viereckigen Behälter nach Dubach [2].

Primär- und Sekundärbewegung der Schüttgutteilchen

Kvapil [5] stellt anhand seiner Untersuchungen die Ellipsoidtheorie auf. Bei der Entleerung eines Vorratsbehälters bewegt sich nach seinen Untersuchungen das Schüttgut im Bereich rotationsellipsenförmiger Körper. (Zur Vereinfachung der Rechnung werden die sich beim Ausfließen im Schüttgut zeigenden zusammenhängenden Linien als Ellipsen angesehen.) Sie sind für einzelne Schüttgüter berechenbar. Es treten Primär- und Sekundärbewegungen mit zugehörigen Ellipsoiden auf. Bei feinem Korn sind die Ellipsoide gestreckt, bei grobem gedrückt, **Bild 7 und 8**.

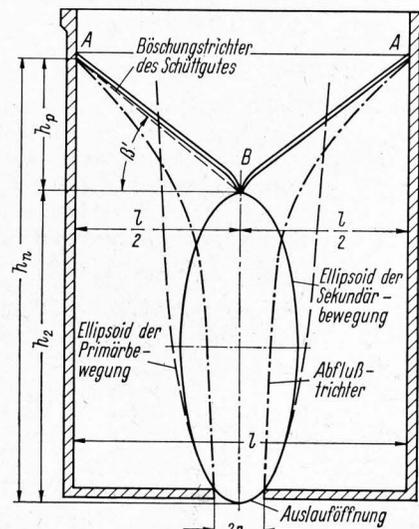


Bild 7. Bewegungselloids in einem rotationssymmetrischen Vorratsbehälter mit begrenzter Schüttguthöhe nach Kvapil [5].

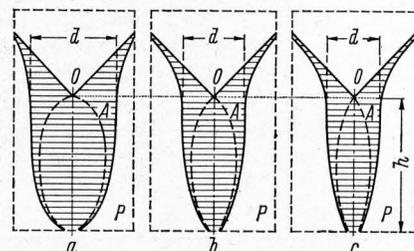


Bild 8. Verschieden geformte Bewegungselloide in Abhängigkeit von der Korngröße: a grobkörniges, b feinkörniges, c feinstkörniges Schüttgut nach Kvapil [5].

Wenn sich die Körner, der Schwerkraft folgend, auf einer gedachten Achse senkrecht nach unten bewegen und keine Drehung ausführen, wird von Primärbewegung gesprochen, **Bild 9**. Bei der Sekundärbewegung wenden und drehen sich die einzelnen Teilchen, und sie verlagern ihre angenommenen Achsen, **Bild 10**. Die Primärbewegung resultiert aus dem Eigengewicht der Körner und dem Druck des darüberliegenden Schüttgutes. Sie wird von einer Anzahl Körner gleichzeitig ausgeführt und ruft eine Verdichtung des lockeren Schüttguts hervor. Die Sekundärbewegung eines Kornes braucht sich nicht auf die Nachbarkörner zu übertragen, auch wenn es teilweise Einfluß darauf nimmt. Durch sie werden die Körner gemischt und ihr Abstand untereinander in waagerechter Richtung verkleinert, d. h., beide Bewegungen bewirken eine Kornverdichtung, aber nur die Sekundärbewegung eine Vermischung. Ihr Zusammenspiel begünstigt stetigen Schüttgutauslauf.

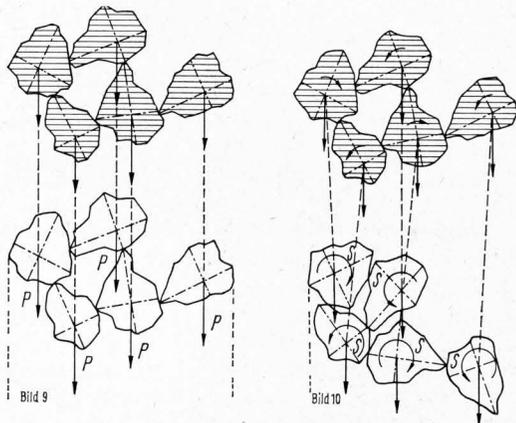


Bild 9 und 10. Primärbewegung (links) und Sekundärbewegung (rechts) der Schüttgutteilchen beim Ausfließen nach Kvapil [5].

Kvapil fand, daß bei unbegrenzter Säulenhöhe folgender Zusammenhang gilt, wenn V_1 das Volumen des Primärellipsoids und V_2 das Volumen des Sekundärellipsoids ist:

$$V_1 = 15 V_2.$$

Die Streuung der gemessenen Werte lag zwischen 4 und 5%.

Wenn die Schüttguthöhe für die Ausbildung des Ellipsoids der Primärbewegung nicht ausreicht, wächst das Ellipsoid der Sekundärbewegung schnell so weit an, bis es die Spitze des Böschungstrichters (B) erreicht, Bild 7. Mit h_n als Höhe des Ablauftrichters beträgt die maximale Länge der Hauptachse des Ellipsoids

$$h_2 = h_n - \frac{1}{2} \tan \beta'.$$

Gewöhnlich ist der Winkel β' etwas größer als der Böschungswinkel des Trichters an der Schüttgutoberfläche.

Bei bekannter Füllhöhe und Korngröße des Schüttguts gibt Kvapil folgende Formel für die Nebenhalbachse des Sekundärellipsoids an:

$$b_2 = \sqrt{\frac{V_2}{2,0944 h_2}}.$$

Volumen V_2 und Höhe h_2 können näherungsweise nach Bild 7 bestimmt werden.

Einfluß der Fläche und Form der Auslaßöffnung

Die Geschwindigkeit eines Kornes auf der Hauptachse des Sekundärellipsoids steigt von der Oberfläche des Schüttguts bis zum Auslauf an, **Bild 11**. Die Ausbildung des Sekundärellipsoids ist abhängig vom Verhältnis der Korngröße des Schüttguts zur Fläche und Form der Auslaßöffnung. Kvapil gibt für den Auslauf aus quadratischen Öffnungen als Mindestfläche

$$x_{\min} = (5 y)^2$$

an. Für sicheren Auslauf gilt

$$x = k (5 y)^2$$

und für die obere Grenze

$$x_{\max} = (3 \dots 5) (5 y)^2,$$

wobei x die Fläche der quadratischen Auslaßöffnung, y der Korndurchmesser und k der Sicherheitskoeffizient (1,4 nach Versuchen) ist. Bei Unterschreitung von x_{\min} bilden sich stabile Brücken und bei Überschreitung von x_{\max} verschwindet die Sekundärbewegung größtenteils, es tritt dann hauptsächlich Primärbewegung auf. Für kreisförmige Auslaßöffnungen benötigt man etwa 85% der Fläche für quadratische.

Hampel [3] fand, daß der mittlere Mengenstrom bei gleicher Bunkerquerschnittsfläche von der Bunkerform unabhängig ist, abhängig dagegen von der kleinsten Abmessung der Auslaßöffnung. Bei einem langen Rechteck ist er eine Funktion der kleinsten Seite, und bei Vergrößerung der kleinsten Öffnungsabmessung nimmt der Mengenstrom parabelförmig zu. Außerdem steigt er mit der Strecke an, die eine an den Rand gelegte Auslaßöffnung mit der Behälterquerschnittsfläche gemeinsam hat.

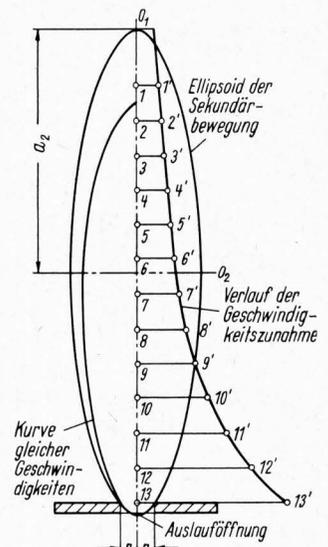


Bild 11. Geschwindigkeit innerhalb des Sekundärellipsoids nach Kvapil [5].

Einfluß der Schüttguthöhe

Über den Einfluß der Höhe der Schüttgutsäule auf den Mengenstrom werden unterschiedliche Meinungen im Schrifttum vertreten. Nur für größere Höhen findet man die einheitliche Ansicht, daß der Mengenstrom von ihr nahezu unabhängig ist.

Einfluß der Neigung des Behälterbodens

Für das Ausfließen spielt die Neigung des Behälterbodens keine Rolle, wie die oben angeführten Theorien zeigen (Bild 4 und 7), wohl aber für das restlose Entleeren. Solange der Boden weniger geneigt als der Reibungswinkel des Schüttgutes groß ist, bilden sich Toträume. Ist α die Neigung des Behälterbodens gegen die Horizontale und φ der Winkel der inneren Reibung des Schüttguts, so muß für vollständiges Ausfließen die Bedingung $\alpha > \varphi$ eingehalten werden. Zwischen dem Schüttgut und der Bunkerwand herrscht meist ein anderer Reibungskoeffizient als im Gut selbst. Man wählt deshalb α größer als φ , meist $\alpha = 60^\circ$ bis 65° , und liegt damit auf der sicheren Seite.

Bei Behältern mit großem Querschnitt ist es sinnvoll, mehrere Öffnungen anzubringen, damit möglichst viel des Inhalts an der Bewegung teilnimmt (große Bunkeraktivität) und die Auslauftrichter nicht zu groß gebaut werden müssen. Die Öffnungen sollen so eng beieinanderliegen, daß sich die einzelnen Ellipsoide gegenseitig beeinflussen können, **Bild 12**.

Hilfsvorrichtungen gegen Brückenbildung

Weitere Hilfen beim Abbau von Brücken können Rührwerke, Vibratoren oder Luft sein, **Bild 13 bis 16**. Luft läßt man von

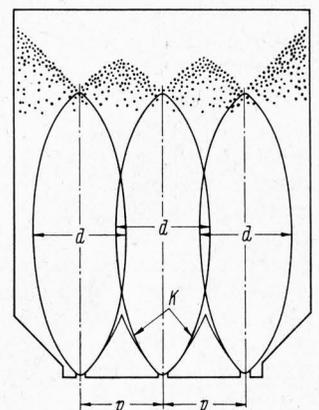


Bild 12. Behälter mit guter Aktivität nach Kvapil [5].

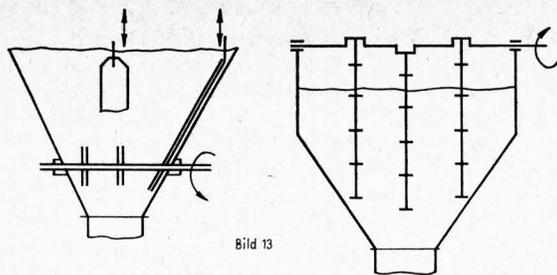


Bild 13

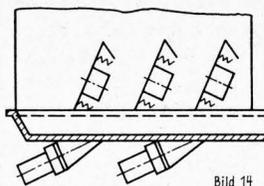


Bild 14

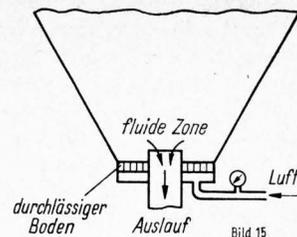


Bild 15

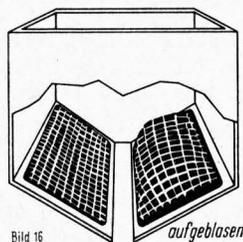


Bild 16

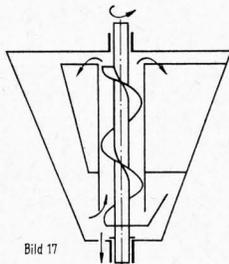


Bild 17

Bild 13 bis 17. Vorrichtungen als Ausfließhilfen.

Bild 13. Rührwerke; Bild 14. Vibratoren; Bild 15. Fließbett;
Bild 16. Pulsierende Kissen; Bild 17. Senkrechtsschnecke.

unten in das Gut eintreten, damit sich ein Fließbettzustand bilden kann, oder man läßt sie in Kissen ein- und ausströmen, wobei sich deren Bewegung auf das Schüttgut überträgt. Eine weitere Hilfe ist der Zwangsumlauf, den man mit einer senkrecht vom Behälterboden nach oben fördernden Schnecke erreichen kann, **Bild 17**. Dabei steigt das Schüttgut in der Schnecke auf und sinkt außen wieder ab.

Von Bedeutung für die Entleerung ist die Gestaltung der Bunkerverschlüsse. Häufig kommt es beim Verschließen einer Auslauföffnung, durch die ein großer Mengenstrom fließt, infolge des Verschleißimpulses in der abwärts sinkenden Schüttgutsäule zu Verdichtungen, die zur Brückenbildung und zu starken Schlägen im Behälter führen. Ferner treten bei einem großen Mengenstrom, der durch Brückenbildung unterbrochen wird, bei anschließendem Einstürzen der Brücke in größerer Höhe Stöße auf, die die Verschlüsse und die Auffangeinrichtungen beschädigen können.

Einfluß von Schwingungen auf das Ausfließen von Schüttgütern

Interessante Untersuchungen wurden von *Kroll* [4] über den Einfluß von Schwingungen auf Schüttgüter angestellt. Bei Versuchen an vertikalschwingenden Gefäßen stellte er fest, daß die Schüttgüter nicht in ihren Bewegungen den Gesetzen des Wurfes im luftleeren Raum folgen, sondern von dem Verlauf des Luftdrucks unter dem Schüttgut stark beeinflußt werden. Dieser Druck hängt aber nicht nur von der Frequenz und Amplitude der Schwingung, sondern auch von dem Schüttgewicht und der Gasdurchlässigkeit des Gutes ab, damit also neben den physikalischen Eigenschaften auch von der Füllhöhe. Mit steigendem Schüttgutstand zeigt sich zunächst bei vertikaler sinusförmiger Bewegung des Behälters eine lineare Zunahme der maximalen Unter- und Überdrücke unter dem Schüttgutpaket. Ab einer bestimmten Schütthöhe tritt aber eine Abnahme des Gasdrucks ein.

Mit mechanischen Schwingungen kann man also die Packungsdichte von Schüttgütern beeinflussen. Verdichtung tritt ein durch Herabsetzung der inneren Reibung zwischen den Teilchen, die dann z. B. mit Hilfe der Schwerkraft in eine dichtere Lage gebracht werden. Dabei muß die maximale Beschleunigung über der Erdbeschleunigung liegen.

Die Versuche von *Kroll* zeigen, daß durch Steigerung der Amplitude bei konstanter Frequenz statt einer Verdichtung auch eine Auflockerung eintreten kann. Die durch Schwingungen erzielbare Verdichtung ist um so geringer, je kleiner der ursprüngliche Winkel der inneren Reibung ist. Mit vielen Schüttgütern vorgenommene Versuche führten zu dem Ergebnis, daß optimale Schwingungsbedingungen, die bei kleiner Beschleunigung eine große Schüttgutverdichtung ergeben, vom jeweiligen Schüttgut abhängen und dafür nach unseren bisherigen Untersuchungen wahrscheinlich keine allgemeingültigen Regeln abgeleitet werden können.

Aus diesen Erkenntnissen ist der Einfluß von Schwingungen und Stößen auf das Ausfließen von Schüttgütern aus Behältern näher untersucht worden. Schwingungen führen entweder zu Verdichtungen oder zu Auflockerungen. Starke Stöße wirken sich auf das Ausfließen nur dann nicht störend aus, wenn ein hoher Grad der Auflockerung vorliegt.

Da beim Auslaufen des Schüttguts aus dem Behälter die Füllhöhe h abnimmt, ändert sich die Gasdurchlässigkeit fortwährend. Bei konstanter Amplitude a und Frequenz ω kann der Behälterinhalt je nach Größe der Beschleunigung $a\omega^2$ alle Zustände zwischen der Verdichtung und der Auflockerung durchlaufen. Über Einzelheiten hierzu wird später berichtet werden.

Bild 18 zeigt Mengenströme eines feingranulierten Pflanzenschutzmittelträgers aus einem zylindrischen Behälter mit am Behälterrand angeordneter Auslaßbohrung von 6 mm, der mit konstanter Amplitude und verschiedenen Frequenzen in lotrechte Schwingungen versetzt wurde. Die Mengenströme sind außerordentlich schwankend; mit steigender Frequenz verschieben sich ihre Maxima zu späteren Auslaufzeiten.

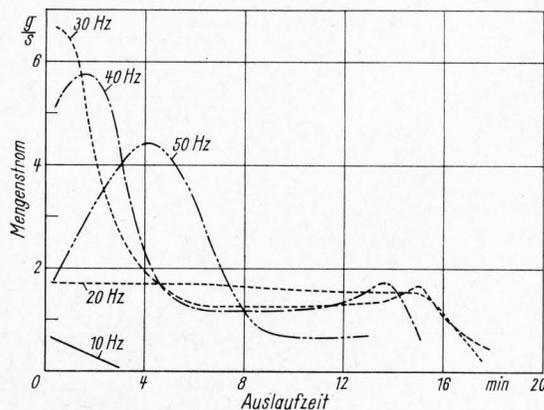


Bild 18. Ausfließen eines feingranulierten Pflanzenschutzmittelträgers unter dem Einfluß von Schwingungen aus einem zylindrischen Behälter.

Schon bei stationären Vorratsbehältern gibt es viele Probleme. Sie nehmen zu, wenn solche Behälter auch noch bewegt werden. Die Erzielung eines konstanten Mengenstroms, auf den es bei der Verteilung von Dünger, Saatgut und insbesondere Feinsämereien und Pflanzenschutzmitteln ankommt, ist hierdurch erschwert. Durch konstruktive Maßnahmen, worüber noch Untersuchungen im Gange sind, können die Ausflußbedingungen verbessert werden.

Schrifttum

- [1] *Brown, R. L., und P. G. W. Hawksley:* The internal flow of granular masses. *Fuel* **26** (1947) Nr. 6, S. 159/73.
- [2] *Dubach, P.:* Betrachtungen über die Brückenbildung in Bunkerausläufen. *Aufbereitungstechn.* **3** (1962) Nr. 10, S. 455/58.
- [3] *Hampel, H. R.:* Experimentelle Untersuchungen einiger Einflußgrößen beim Ausfließen von Schüttgütern aus Bunkern. *Bergbauwiss.* **5** (1958) Nr. 10, S. 313/27.
- [4] *Kroll, W.:* Fließerscheinungen an Haufwerken in schwingenden Gefäßen. *Chemie-Ing.-Techn.* **27** (1955) Nr. 1, S. 33/38.
- [5] *Kvapil, R.:* Theorie der Schüttgutbewegung. Berlin 1959.