

# Drukopbouw in de silo

In een productieproces waarin deeltjes worden gemaakt, bijvoorbeeld veevoederbrokjes, is het niet te vermijden dat een deel van deze producten al weer tijdens het vervolg van het proces kapot gaat. Behalve dat dit tot productieverlies en waardevermindering van het product leidt, kan het ook de processen zelf nadelig beïnvloeden.

Deze productbeschadiging kan op meerdere plaatsen tijdens het productie- of transportproces plaats vinden. In dit verhaal over opslag in silo's, kijken we naar oorzaken en reductiemogelijkheden.

Ir. Gerard Haaker

Bij de opslag in een silo ondergaat het product normaal- en schuifkrachten, en eventueel impactkrachten bij het vullen van de silo. De normaal- en impactkrachten kunnen tot breuk of fragmentatie van de deeltjes leiden. De schuifkrachten veroorzaken meer een beschadiging van het oppervlak door het ontstaan van scheurtjes of het uitbreken van kleine stukjes. Gevolg is: waardevermindering van het product; het ontstaan van stof, bedrijfsvervuiling en meer kans op stofexplosies; verandering van de stromingseigenschappen van het product met problemen tot gevolg; kans op ontmenging waardoor de problemen nog verergeren en problemen in vervolgprocessen door mogelijke wijziging van dichtheid, permeabiliteit etc. De beschadigingen die kunnen optreden door impact tijdens het vullen van de silo, blijven hier verder buiten beschouwing. Valhoogtes beperken via het aanbrengen van geschikte valbrekers in de silo, vermindert die problemen.

## Berekening

De druk die optreedt in silo's beschrijven we met de Janssen-formules. Hoewel deze methode niet exact de werkelijk optredende druk zal weergeven, vormt de uitkomst wel een goede indicatie van het drukverloop en van de factoren die de druk bepalen. Voor ons voldoende omdat we in feite meer geïnteresseerd zijn in het vergelijken van drukniveaus en deze steeds met dezelfde relatieve onnauwkeurigheid worden berekend. De standaard Janssen-formule voor de verticale druk  $\sigma_z$  in de cilinder is:

$$\sigma_z = \gamma \cdot A/U \cdot 1/\mu_w \cdot 1/\lambda \cdot (1 - e^{(-U/A \cdot \mu_w \cdot \lambda \cdot z)}) \quad (1)$$

waarin:  $A$  = oppervlak van de dwarsdoorsnede van de cilinder  
 $U$  = omtrek van de cilinder  
 $\mu_w$  = wandwrijvingscoëfficiënt  
 $\lambda$  = verhouding verticale en horizontale silodruk,  $\sigma_h / \sigma_z$   
 $\gamma$  = bulkdichtheid van het product.  
 $z$  = beschouwde diepte gerekend vanaf het vulniveau.

Uit de verticale druk kunnen de horizontale druk  $\sigma_h$  (cq de wanddruk  $\sigma_w$ ) en de schuifspanning aan de wand  $\tau_w$  als volgt worden berekend:

$$\sigma_w = \lambda \cdot \sigma_z \quad (2) \quad \text{en} \quad \tau_w = \mu_w \cdot \sigma_w = \lambda \cdot \mu_w \cdot \sigma_z \quad (3)$$

## Mogelijkheden tot verlaging

Van de factoren die volgens de Janssen-formules de druk bepalen, zijn de bulkdichtheid  $\gamma$  en de drukverhouding  $\lambda$  niet of nauwelijks te wijzigen. Blijven over de wandwrijving  $\mu_w$  en de verhouding  $A/U$ .

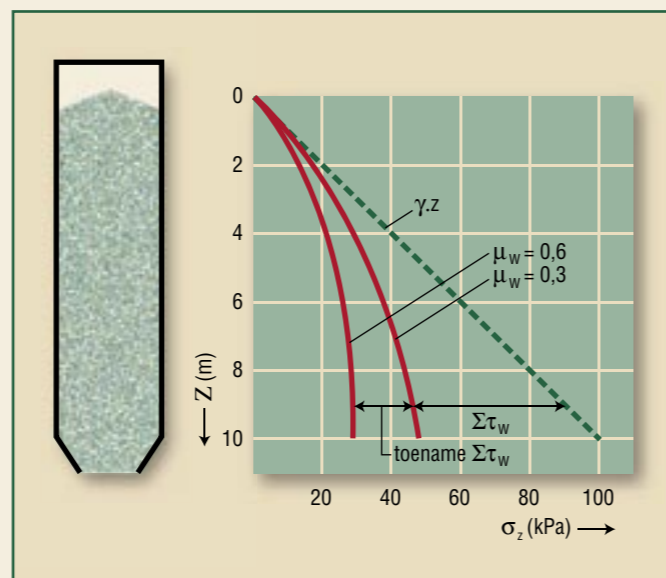
### Invloed op de silodruk door verhoging van de wandwrijving

Verhoging van de wandwrijvingscoëfficiënt  $\mu_w$  leidt tot een forse en nagenoeg lineaire verlaging van de silodruk onder in de cilinder. Bovenin is de invloed kleiner omdat de druk nu wat sneller wordt opgebouwd. Een voorbeeld van deze drukverlaging is gegeven in figuur 1, waar de opbouw van de druk is weergegeven voor een willekeurig gekozen silo met diameter  $D=3\text{m}$ ,  $z=1\text{-}10\text{m}$ , bulkdichtheid  $\gamma=10\text{ kN/m}^3$  en  $\lambda=0,4$ .

Voor de wandwrijving is aangenomen dat deze wordt verhoogd van  $\mu_w = 0,3$  tot  $0,6$ .

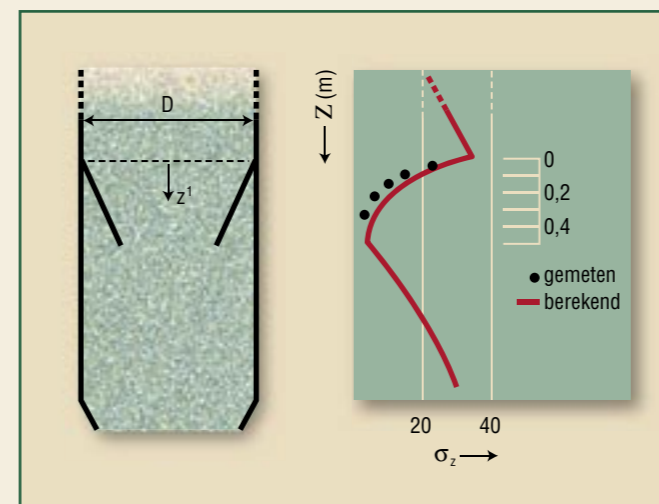
Uit de figuur is duidelijk te zien dat de waarde van de verticale druk  $\sigma_z$  vooral dieper in de silo fors afneemt. Het komt er in het gegeven voorbeeld op neer dat bij de ruwere wand pas na circa tien meter vulhoogte dezelfde druk wordt bereikt als bij de gladde

wand na circa vier meter. Ook de waarde van de horizontale of wandspanning  $\sigma_h$  neemt in dezelfde verhouding af omdat deze via de nagenoeg constante waarde van  $\lambda$  de verticale spanning volgt. De waarde van de schuifspanning aan de wand  $\tau_w$  wordt bovenin de silo fors hoger door de stijging van de wandwrijving. Dit wordt veroorzaakt doordat alle druk via de waarde van de e-macht sneller wordt opgebouwd. Dieper in de silo wordt deze verhoging van  $\tau_w$  steeds minder, en valt zelfs helemaal weg wanneer de maximale waarde van de silodrukken zou worden bereikt. Belangrijker dan de schuifspanning aan de wand op zich is echter de gesommeerde schuifspanning ( $\Sigma \tau_w$ ) langs de wand. Omdat de verticale druk afneemt tengevolge van de toename van de



Figuur 1: Wijziging van de silodrukken door verhoging van de wandwrijving  $\mu_w$

wandwrijving, zal de wand een groter deel van het totale gewicht van de vulmassa moeten opnemen via de schuifspanningen langs de wand. Hierdoor wordt de silowand in verticale zin zwaarder belast dan oorspronkelijk het geval was. De grootte van deze in de wand op te nemen last, kan op elk niveau worden gezien als het totale gewicht van de



Figuur 2: Afname van de verticale spanning  $\sigma_z$  door het inbouwen van een tussenconus in de cilinder.

bovenliggende bulk-massa  $A \cdot \gamma \cdot z$  minus de door het onderliggende stortgoed opgenomen deel  $A \cdot \sigma_z$ . Deze toename van de verticale wandlast  $\Sigma \tau_w$  is op schaal ook in figuur 1 aangegeven. De mogelijkheid om de silodruk te verlagen door toename van de wandwrijving, is in de praktijk helaas tamelijk beperkt. Veelal vereist dat een of andere coating of bekleding die de vereiste wrijvingsverhoging oplevert, geschikt is voor het betreffende product én nog voldoende slijtvast is bovendien. Daarnaast kan de ruwere wand zelf aanleiding geven tot slijtage van het product, hoewel de lagere wanddrukken hierbij weer gunstig werken. Verder zal een minder gladde wand eerder tot vervuiling van de silo kunnen leiden. Ten slotte is de toename van de wandwrijving beperkt door de waarde van de inwendige wrijving  $\varphi_i$  van het product. Bij te ruwe wanden zal de stroming niet meer langs de wand maar langs een grenslaag van het product zelf stromen, waarbij geldt  $\mu_w = \tan \varphi_i$ .

### Verlaging van de drukken via $A/U$

Uit formule 1 is direct te zien dat verlaging van de verhouding  $A/U$ , net als verhoging van de wandwrijving, zal leiden tot een verlaging van de silodruk. De verhouding  $A/U$  in een silo is in feite niets anders dan het opslagvolume van de cilinder ten opzichte van de hoeveelheid silowand waarmee het stortgoed in aanraking komt. Voor een horizontale doorsnede van de cilinder komt dit dus neer op het oppervlak van de doorsnede  $A$  en de

omtrek  $U$ , oftewel  $A/U = D/4$  bij ronde en vierkante silo's. Verkleining van de silodiameter  $D$  leidt dus anders dan bij vloeistoffen tot lagere silodruk bij eenzelfde vulhoogte. Het ligt dus voor de hand om wanneer silodruk een probleem vormt, voor meerdere kleinere cellen te kiezen. Een andere mogelijkheid is om bij bestaande silo's het wandoppervlak  $U$  te vergroten door het inbouwen van een of meerdere tussenwanden.

## Alternatieve mogelijkheden

Een andere methode is het in de cilinder inbouwen of aan de wand bevestigen van obstructies die een deel van het productgewicht opnemen. Denk daarbij aan mogelijkheden in de vorm van schuine platen, kettingen, kruisen, inserts etc. Deze elementen blijken vaak een aanzienlijke drukafname te kunnen geven. Het probleem is alleen dat zowel de drukafname als de belasting op deze constructies nauwelijks te voorspellen zijn. Ook de mogelijke invloed op het stromingspatroon is vaak niet duidelijk.

Een beter alternatief is het inbouwen van een of meer tussenconussen in de cilinder. Die staan bekend om het verminderen van de druk in het stortgoed op een snelle en redelijk voorspelbare wijze. In figuur 2 is de drukafname in een conus als functie van de hoogte van de conus weergegeven. Hieruit blijkt dat al een relatief kleine tussenconus de druk sterk kan doen afnemen. In een volgend artikel zullen enkele in de praktijk uitgevoerde methoden voor drukverlaging worden besproken. ■