

# Het ontwerpen van silo's als maatwerk (3)

Dit artikel behoort tot een serie van drie artikelen. In de vorige artikelen beschreven de auteurs een methode voor het ontwerpen van silo's met massastroming. Dat vraagt om een steile trechter. In die gevallen waar massastroming niet mogelijk of gewenst is zal een kernstroomsilo toegepast moeten worden. Ook hiervoor is een degelijk ontwerp aan te raden.

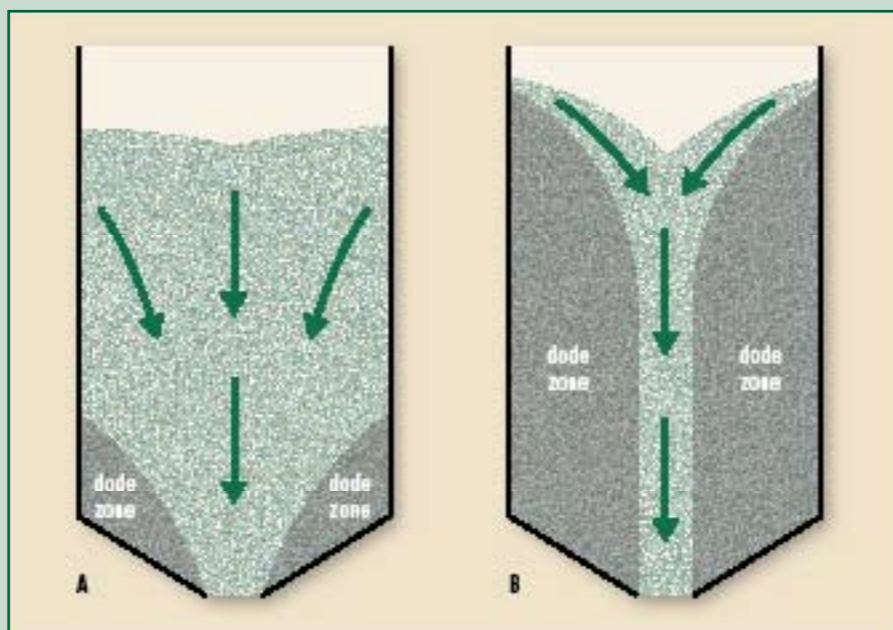
Ir. Piet van der Kooi en  
Ir. Gerard Haaker

De voordelen van massastroming variëren van geen dode zones in de silo waardoor geen bederf of veroudering van het product optreedt, via met de goed regelbare stroming bestaat weinig kans op ontmenging tot het first-in first-out-principe. Een nadeel is de benodigde steile trechter die bouwhoogte kost en de slijtage van de silowand die kan optreden bij abrasieve producten. Bij kernstroomsilo's vindt de stroming van het product niet langs de silowand plaats maar in een in het product zelf gevormd stroomkanaal, zie figuur 1a. Dit type stroming komt in diverse vormen voor, vanaf het optreden van kleine dode zones tot het extreme geval waarbij een nagenoeg verticaal stromingskanaal wordt gevormd maar het omringende stortgoed niet meer in beweging komt na leegstromen van dit stroomkanaal. We spreken in dat laatste geval van een stabiele schacht (pipe of rathole) zoals aangegeven in figuur 1b.

Ondanks de minder aantrekkelijke eigenschappen kan een kernstroomsilo in een aantal gevallen toch een goede opslagmogelijkheid bieden. We kunnen hierbij denken aan producten waarvoor bederf, veroudering of ontmenging geen rol spelen. Of producten met een zodanig hoge wandwrijving dat een absurd steile trechter nodig zijn voor massastroming. Kernstroming is ook het overwegen waard als de bouwhoogte onvoldoende is voor een massastromingstrecther, mits het product dit toestaat. Maar zonder meer spreekt voor zich dat ook bij een kernstroomoplossing het silo-ontwerp een ongestoorde werking moet opleveren.

## Het voorkomen van stabiele schachtvorming

In kernstroomsilo's kan bij cohesieve producten onder ongunstige situaties een zogenaamde stabiele schacht ontstaan.



Figuur 1: Voorbeelden van kernstroomgedrag. A: normale kernstroming. B: stabiele schachtvorming (piping).

Hierbij stagneert de verdere uitstroming van product na het leegstromen van dit stroomkanaal. De diameter van een dergelijke stabiele schacht zal nagenoeg gelijk zijn aan de grootste afmeting van de uitstroomopening. Op basis van de silotheorie en de producteigenschappen kan de kritische waarde van de uitstroomopening worden bepaald waarbij geen stabiele schachtvorming zal optreden. Analoog aan het flow/no-flow criterium bij massastroomsilo's kan ook hier voor de schacht een verstevigingsspanning  $\sigma_1$  worden bepaald met een bijbehorende eigensterkte  $\sigma_p$  van het materiaal in de schachtwand. Verder kan de grootste hoofdspansing  $\sigma_1'$  werkend op de wand van de schacht worden berekend. De schacht zal bezwijken, dus niet stabiel zijn, wanneer wordt voldaan aan de voorwaarde dat de schachtbelasting groter is dan de sterkte van de schacht, dus voor  $\sigma_1' > \sigma_p$ . De grootte van de schachtbelasting  $\sigma_1'$  is afhankelijk van de schachtdiameter  $d$  en de statische inwendige wrijvingshoek  $\varphi_i$  van het stortgoed en kan met de klassieke silotheorie worden berekend. Voor de waarde van de verstevigingsspanning  $\sigma_1$  zijn twee benaderingen mogelijk:

*De bovengrensbepijning:*

Hierbij gaan we er van uit dat  $\sigma_1$  gelijk zal zijn aan de verticale spanning op de beschouwde diepte in de silo. Voor gedrongen silo's, met een hoogte/diameter verhouding  $< 1$  kan hiervoor de onge-

steunde stortgoeddruk worden genomen, dus  $\sigma_1 = \gamma \cdot h$ , waarin  $\gamma$  het stortgewicht en  $h$  de silohoogte voorstelt.

Bij slankere silo's kan de druk  $\sigma_1$  met een algemene spanningstheorie, bijvoorbeeld de klassieke Janssen-formule, worden berekend.

De bij  $\sigma_1$  behorende waarde van de eigensterkte  $\sigma_p$  kan uit de gemeten flowfunctie van het materiaal worden bepaald. In de meeste gevallen zal hiervoor de tijdsflowfunctie  $FF_1$  moeten worden gekozen. Dit omdat het materiaal in de schachtwand langere tijd onder druk stilstaat, zelfs al is de schacht niet stabiel. Uit de voorwaarde  $\sigma_1' \leq \sigma_p$  volgt dan de benodigde diameter van de schacht, die dan tevens de diameter of bij spleetvormige openingen de diagonaal van de uitstroomopening aangeeft waarboven geen stabiele schacht zal ontstaan. In de praktijk wordt op de minimaal benodigde afmeting  $d_k$  van de uitstroomopening weer een toeslag van 25 procent gegeven.

De hier weergegeven procedure blijkt in de praktijk nog al aan de veilige kant te liggen, omdat in de meeste gevallen een trechter aanwezig is die de stabiliteit van een mogelijke schacht enigszins ondermijnt.

*De ondergrensbepijning:*

Deze berekeningswijze van de verstevigingsspanning wordt nog wel in wat oudere literatuur gevonden. Als uitgangspunt geldt dat de grootte van  $\sigma_1$  niet afhanke-

lijk is van de hoogte van het materiaal in de silo maar wordt bepaald door de spanning op de schachtwand tengevolge van het eigen gewicht van het materiaal binnen de schacht. Op basis van de materiaaleigenschappen en wat vereenvoudigingen kan dan een flowfactor voor schachtvorming  $ff_p$  worden berekend. Identiek aan de procedure voor brugvorming bij massastroming kan deze flowfactor worden uitgezet tegen de gemeten (tijds)-flowfunctie  $FF_1$ , waarbij het snijpunt de kritische waarde van  $\sigma_1'$  geeft. Uit deze waarde kan de kritische schachtdiameter en de benodigde uitstroomopening  $d_k$  worden berekend. Deze ondergrensbepijning zal echter in vele gevallen de kritische diameter  $d_k$  waarbij geen stabiele schachtvorming kan optreden, sterk onderschatten. In de praktijk wordt meestal aangeraden deze methode alleen toe te passen voor slanke kernstroomsilo's met een voldoende steile trechterhoek, als regel de trechterhoek met de verticaal  $\alpha < 40^\circ$ .

## Controle op brugvorming

Voor een ongestoorde uitstroming van de kernstroomsilo mag geen stabiele brugvorming optreden. Voor een axiaalsymmetrische stroming (dus met ronde of vierkante uitstroomopening) is bekend en kan ook worden berekend dat geen brugvorming optreedt wanneer stabiele schachtvorming wordt voorkomen. Bij een spleetvormige opening zou brugvorming over

de kleinste afmeting op kunnen treden en is controle wel nodig. Dit gaat in principe op dezelfde wijze als bij massastroming. Het probleem bij kernstroming is echter dat de uitstroming niet langs de silowand maar in een in het product zelf gevormde trechter stroomt. Hiervan is de hoek niet zondermeer bekend. In feite is hierdoor de grootte van de flowfactor niet bekend, doch in de praktijk wordt hiervoor meestal de waarde  $ff_p = 1,7$  gekozen, overeenkomend met een interne, halve trechterhoek van  $30^\circ$ . Met deze waarde voor  $ff_p$  (de flowfactor voor no-piping) wordt het snijpunt met de tijdsflowfunctie  $FF_1$  bepaald en hieruit weer de minimaal benodigde spleetbreedte. Ook hier wordt weer een toeslag van 25 procent gegeven.

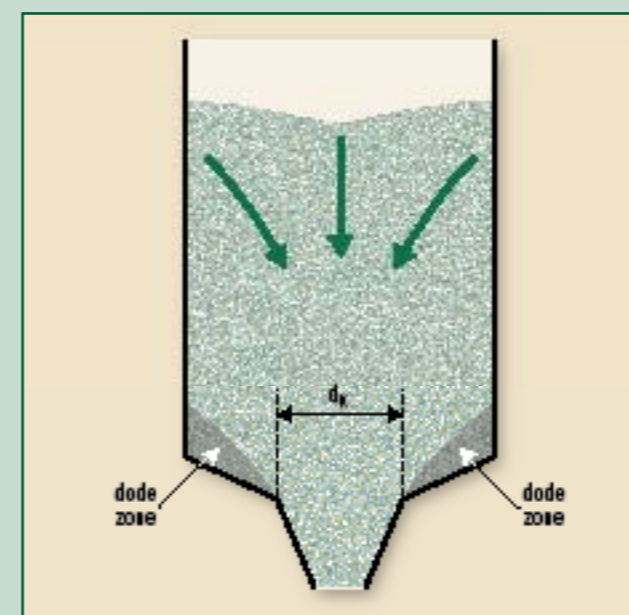
## Benodigde trechterhoek

In veel gevallen zal het nodig zijn dat een kernstroomsilo volledig leegstroomt. Bijvoorbeeld wanneer meerdere producten afwisselend moeten worden opgeslagen of bij de kans op bederf in de dode zones. Theoretisch kan volledig uitstromen optreden wanneer de helling van de trechter iets groter is dan de wandwrijving tussen stortgoed en wand. In de praktijk blijkt dit niet op te gaan. Het product ligt langere tijd onder hoge druk tegen de trechterwand aan en moet daarna onder een veel lagere druk in beweging komen. De wandwrijving die onder deze omstandigheden op kan treden, is meestal veel groter dan

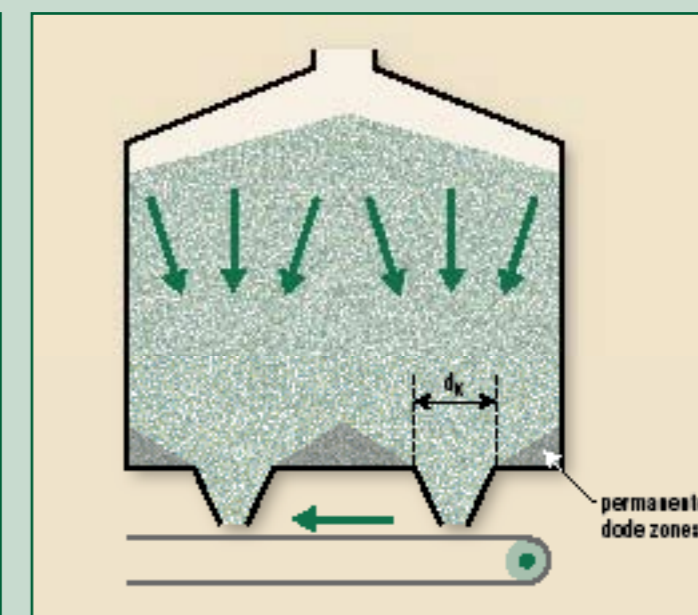
de wandwrijvingshoek  $\varphi_w$  die in de standaardmetingen wordt bepaald. In de praktijk wordt daarom aanbevolen om voor volledig uitstromen een trechterhoek met de verticaal van  $\alpha \leq (65^\circ - \varphi_w)$  te kiezen, tenzij uit metingen of ervaring bekend is dat een minder steile hoek voldoet.

## Combinaties van stromingsprofielen

Soms is het zinvol om een combinatie van een massastroom- en een kernstroomsilo toe te passen. Hierbij wordt, zie figuur 2, het bovendeel ontworpen voor kernstroming en het onderste gedeelte als massastroomtrechter. Het kernstroomgedeelte moet voldoende steil zijn om volledig te kunnen leegstromen en de overgangsdiameter  $d_k$  moet groot genoeg zijn om stabiele schachten te voorkomen. Daarnaast moet het massastroomdeel voldoende steil zijn (de trechterhoek ruim binnen het massastroomgebied) en de uitstroomopening moet groot genoeg zijn om brugvorming te voorkomen. Een dergelijke combinatie kan worden toegepast wanneer (bij silo-ombouw) de beschikbare hoogte ontbreekt voor een complete massastroomtrechter. Ook bij de inbouw van reclaimhoppers onder platbodemsilo's of stockpiles kan op deze wijze stabiele schachtvorming worden voorkomen. Dat levert dan bij een goede positionering ook voldoende vrijstromend materiaal op, zoals in figuur 3 aangegeven. ■



Figuur 2: Gecombineerd stromingspatroon, met antischachtvorming bovendeele en massastroom onderconus.



Figuur 3: Massastroom reclaimhoppers onder platbodemsilo.

Dit artikel behoort tot een reeks van drie. In Solids Processing nr. 1 van dit jaar behandelden we de standaardmethode van massastroomsilo's. En in nr. 2 kwam de invloed van tijdsversteving bij massastroomsilo's aan bod.