

STROMEN

Ir. Gerard Haaker en Ir. Piet van der Kooij

Problemen bij Solids Processing (2)

Sterkte en stabiliteit als basis

Stortgoed, droge stoffen, solids. Hoe je het ook noemt, de verwerking ervan zorgt al vele decennia voor problemen. Keer op keer blijkt in de praktijk dat processen minder efficiënt verlopen dan gepland. In twee artikelen gaan de auteurs in op de achtergronden daarvan. Er wordt een aantal problemen gesignaleerd en een oorzaak gedeut. In dit tweede artikel komen problemen rond sterkte en stabiliteit van de installatie aan de orde. Als die niet voldoen, kan dat tot ernstige beschadiging en zelfs compleet falen van de installatie leiden.

Een aantal onderzoeken in de tachtiger en negentiger jaren maakten duidelijk dat bij processen die stortgoed verwerken en/of produceren veel meer problemen optreden dan wanneer alleen gas of vloeistof wordt verwerkt. In deze situatie blijkt ook weinig verbetering op te treden, omdat door onvoldoende fundamentele research de kennis op dit vakgebied tot op heden achterblijft bij andere gebieden. Hoewel er tegenwoordig een redelijk veilige norm is voor het voldoende sterk ontwerpen van silo's, treden helaas nog geregeld calamiteiten op. Daarbij speelt de sterkte of stabiliteit van een silo of reactievat een grote rol. Er zijn diverse redenen aan te wijzen die tot dit soort problemen leiden. Een aantal van de meest voorkomende oorzaken van calamiteiten zullen we hier behandelen.

Stromingspatroon

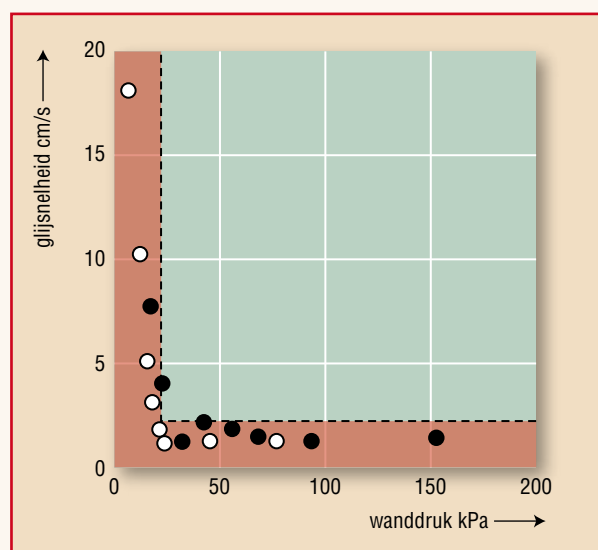
Een veel voorkomend probleem is het optredende stromingspatroon. De belasting op wanden en conus verschilt duidelijk van die bij massa- en kernstroming. Wanneer het stromingspatroon in de praktijk dus anders verloopt dan waarvoor de silo was ontworpen, liggen problemen op de loer. Met name de hoge, lokale belasting ter plaatse van de overgang van cilinder op conus die bij massastroming optreedt, zal problemen kunnen geven wanneer een voor kernstroming ontworpen silo toch massastroming vertoont.

Ook problemen bij het optreden van ongelijkmatige belastingen op de cilinderwand tengevolge van een ex-

centrisch stroomkanaal zijn niet ondenkbaar. Bijvoorbeeld bij een sleufvormige opening waar onder een schroeffeeder met constante spoed is geplaatst die in feite alleen materiaal onttrekt aan het begin van de schroef in plaats van over de volle sleuflengte. Ook bij toepassing van meervoudige hoppers, waarvan er soms maar een in werking is, kan een excentrisch stroomkanaal ontstaan. Een dergelijk kanaal leidt tot een ongelijkmatige belasting van de cilinderwand, waarbij buigende momenten optreden. Speciaal bij ronde silo's, waar dit soort belasting soms over het hoofd wordt gezien, kan dit tot beschadigingen leiden. Bij vierkante of rechthoekige silo's worden de wanden sowieso op buiging belast en berekend, zodat hier het probleem bij excentrische kanaalvorming minder groot is.

Gewelf- of schachtvorming

Soms blijken hogerop in de cilinder bij sterk cohesieve materialen min of meer stabiele gewelven of schachten te ontstaan. Die kunnen bij het instorten tot aanzienlijke schade of zelfs het bezwijken van silo's leiden. Het is zaak om wanneer er risico bestaat dat dit soort stabiele hang-ups worden gevormd, dit tijdig te signaleren zodat geen materiaal onder het gewelf wordt weggetrokken. Een niveaumeter lijkt bij het onttrekken van materiaal uit de silo onontbeerlijk zodat dat daadwerkelijk vaststaat dat het niveau ook daalt. Bij gewelven van onderaf proberen de zaak weer aan de gang te krijgen, leidde in het verleden meer dan eens tot siloschade maar soms ook tot slachtoffers. Het is in een dergelijk geval beter om het gewelf van de zijkanten te benaderen of eventueel de silo van bovenaf te lossen.



Figuur 1: Drukken en snelheden bij de wand van twee typische massastroomsilo's

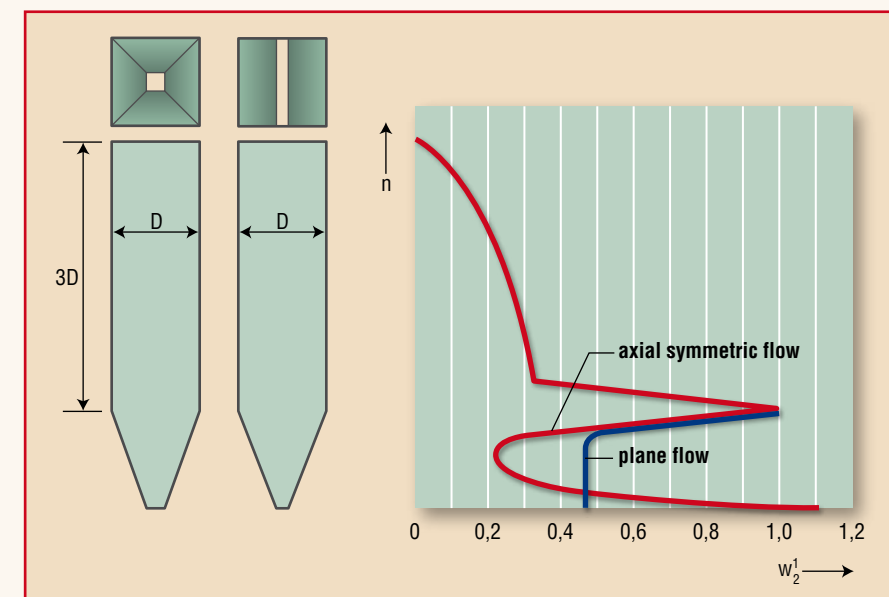
Hoge belastingen

Beschadigingen treden ook vaak op bij onderschatte belastingen op inbouw-elementen (inserts) ter bevordering van de stroming. Voorbeelden genoeg van een verbogen middenkolom, of zelfs helemaal afgescheurd, door een eenzijdige of ongelijkmatige belasting. Ook ingebouwde conussen worden wel eens zodanig belast dat de ondersteuning het begeeft. Vaak raakt hierbij niet alleen het inbouwelement beschadigd, maar treedt ook schade aan de silo-wanden of de conus op. Bij het toepassen van inserts om het stromingspatroon te verbeteren, moet rekening worden gehouden met een verandering in de wandbelastingen. Met name wanneer door de insert kernstroming overgaat in massastroming, worden de wanden terplaatse van de inbouwconus of op de overgang cilinder/conus door een piekspanning belast waar een kernstroomsilo niet voor is ontworpen. Behalve een voldoende sterke en juist ondersteunde insert moet dus tevens waar nodig een plaatselijke versterking van de silo plaatsvinden.

Slijtage en corrosie

Door het stromen van het materiaal langs de wanden van de cilinder en

de conus zal slijtage van de wand op kunnen treden. Bij deze stroming zal het wrijvingsvermogen, dat omgezet kan worden in een eventuele slijtage, worden bepaald door de glijnsnelheid van het stortgoed, de druk tussen stortgoed en wand en de wandwrijvingscoëfficiënt. In figuur 1 is een beeld gegeven van de combinatie van druk en snelheid voor twee willekeurig gekozen silo's met massastroming. Het blijkt dat er in de figuur twee duidelijke zones bestaan. De horizontale zone geeft de cilinder en het bovendeel van de hopper weer waarin de drukken toenemen van nul tot de hoge piekdrukken bij de cilinder/conusovergang, en de snelheden laag zijn en ongeveer constant. De verticale zone geeft de situatie in het onderdeel van de conus weer, waar de drukken veel lager zijn maar de snelheden duidelijk toenemen. Op basis hiervan kan voor massastroomsilo's een mogelijk slijtagepatroon worden aangegeven. In figuur 2 is het relatieve slijtagepatroon voor een axiaalsymmetrische, respectievelijk een vlakke stroming weergegeven. De slijtagewaarde W ter plaatse van de overgang is voor beide situaties gelijk en hier gemakshalve gelijk gesteld aan 1. In de figuur is te zien dat in het axiaalsymmetrische geval (ronde of vierkante conus) maximale slijtage zal optreden bij de overgang van de cilinder op de trechter vanwege de hoge piekdrukken, en onderin de conus vanwege de hoge snelheden. In het geval van vlakke stroming (wigvormige conus) zal de hoogste slijtage bij de overgang plaatsvinden omdat door de wigvorm de snelheden in de conus minder snel toenemen. De waarden in de figuur zeggen op zich niets over werkelijk optredende slijtage in de praktijk. Ze geven slechts de plekken aan waar men op slijtage verdacht moet zijn. Of er werkelijk slijtage op zal treden, hangt af van factoren als hardheid en abrasiviteit van het stortgoed en slijtvastheid van de wand. In de praktijk blijkt toch wel geregeld slijtage op te treden, vooral bij harde materialen als zand, kiezel en steenkool. Ook mogelijk gelijk op-



Figuur 2: Beeld van het relatieve slijtagepatroon van de wanden van massastroomsilo's met een axiaalsymmetrisch respectievelijk vlak stromingsprofiel

tredende aantasting door chemische inwerking op de wand kan de slijtage versterken. Een bekend voorbeeld van slijtage is het aantasten van de wanden van silo's voor ruwe kool in een zuur milieu. Voorbeelden tonen aan dat wanddiktes van 12mm staal in tien jaren plaatselijk tot minder dan 6mm kunnen afsluiten. Dat ondermijnt natuurlijk de sterkte van de silo. Het voorspellen van slijtage op basis van proeven is helaas nauwelijks mogelijk. Slijtagetesters blijken niet in staat om de situaties in de silo (qua druk, snelheid en tijd) goed na te bootsen. Wat rest is een kwalitatieve indicatie of bij een bepaalde stortgoed/wand combinatie slijtage op zal treden. Bij een verwachte slijtage, gebaseerd op ervaring, verdient het aanbeveling de silowand regelmatig op de kritieke plaatsen te testen.

Trillingen en stoten

Het optreden van trillingen en stoten is een veel voorkomend probleem bij silo-opslag. Dit loopt van het optreden van zeer lichte trillingen die voelbaar en hoorbaar zijn aan de wand ('de silo zingt', bijvoorbeeld bij maïs), tot aan zware stoten die in het gehele silogebouw en soms zelfs tot honderden meters in de omgeving voelbaar zijn. De bestrijding van dit soort problemen ligt niet zo eenvoudig als meerdere oorzaken voorhanden zijn. Denk aan stick-slipstroming langs de wand of in het materiaal zelf, waarbij meestal continue, lichte trillingen optreden. Ernstiger

trillingen of zelfs zware stoten die vaak ook in een wat onregelmatiger patroon optreden, worden meestal veroorzaakt doordat in het materiaal holle, of met zeer verdund stortgoed gevulde ruimtes worden gevormd. Deze ruimtes worden dan plotseling weer opgevuld door een van boven vallende stortgoedmassa waarbij een stoot kan optreden. De zwaarte van de stoten wordt hierbij hoofdzakelijk bepaald door de hoeveelheid materiaal die bij het instorten is betrokken en de heersende stortgoeddruk. Meestal nemen de stoten af naarmate de silo minder inhoud bevat en de druk dus lager ligt. Het inbouwen van een of meer tussensconussen in de cilinder kan hier al een drukoplossing bieden om zo de sterkte van trillingen en stoten sterk te verminderen. Maatregelen om ook de hoeveelheid vallend materiaal, die de schoksterkte beïnvloeden, te verminderen, vereisen meestal ingrijpendere maatregelen. In het algemeen ondervinden de sterkte en stabiliteit van een silo niet direct hinder van trillingen en lichte stoten. Wel kunnen er problemen optreden met regelapparatuur en kan het personeel dat in de directe omgeving van de silo moet werken, behoorlijk geïrriteerd raken. Bij zwaardere schokken, en zeker als dit op instortende gewelven gaat lijken, zal het nodig zijn om tijdig maatregelen te treffen.

Samenloop

Vaak vindt het bezwijken van een silo ook plaats doordat een aantal op



STROMEN

Sterkte en stabiliteit als basis



Figuur 3: Een aluminium silo die door het lokaal plooien van het onderste deel van de cilinderwand is omgevallen

zichzelf niet desastreus situaties gelijktijdig optreden. In figuur 3 een silo die compleet omviel. Het betreft hier een tot aan de grond doorlopende, aluminium cilinder waarin een conus is afgehangen. Het deel van de cilinder direct onder de conus is hier het zwaarst belaste deel van de silo. Toen een aantal ongunstige zaken samen kwamen, zoals een wat scheve belasting vanuit het stortgoed, een hoge windbelasting en waarschijnlijk een kleine vervorming in de cilinderwand, gebeurde het. De belasting plooidde de wand direct onder de conus inbouw en zorgde er voor dat de cilinder scheef zakte. Vervolgens viel de hele silo om. Versteving en verstijving van het onderste deel van de cilinder voorkwam bij de andere silo's dezelfde problemen.

Figuur 4 geeft een forse beschadiging aan bij een wand van een betonnen silo waarin sojaschroot was opgeslagen. Door de stroming van het materiaal

Figuur 4: Beschadiging van een wand van een betonnen silo door een combinatie van een toenemend drukk niveau en lokale piekspanningen



langs de wand bleek in de loop der tijd de wandwrijvingscoëfficiënt sterk te zijn afgenomen. Daarmee werden de drukken in de silo dus ook navenant hoger. Bovendien veroorzaakte een slecht aangepaste schroeffeeder (A) een talud in het stortgoed bij het onttrekken van materiaal.

Daar kan dus, net zoals bij de overgang cilinder/conus bij een massastroomsilo, een piekspanning op de wand ontstaan. Dit bleek ook ongeveer de plek te zijn waar de wand was bezweken.

Stofexplosies

Tenslotte leiden stofexplosies vaak tot grote schade aan silo's en andere installaties. Helaas blijken de risico's op dit soort calamiteiten nog vaak te worden onderschat. Het lekken van brandbare vloeistoffen of gas resulteert altijd direct in alarmfase rood. Maar stof wordt vaak alleen als lastig beschouwd. Het probleem bij stofexplosies is het feit dat een eerste explosie ergens anders weer stof doet opwervelen waardoor nieuwe explosies ontstaan. Die kunnen zich zo door een hele installatie voortzetten, met alle gevolgen van dien.

De Amerikaanse Chemical Safety Board (CSB) onderzocht in 2008 over een periode van circa 25 jaar 281 branden en explosies veroorzaakt door stof. Hierbij vielen 119 dodelijke slachtoffers en raakten 718 personen ernstig gewond. Er trad voor miljarden aan economische schade op: meerdere fabrieken werden geheel verwoest.

Het gevaar en het voorkomen van stofexplosies komen in een volgend artikel aan de orde.

Verder onderzoek en ontwikkeling

De in de praktijk regelmatig terugkerende problemen geven voeding aan de gedachte dat er nog wel het een en ander schort aan de ontwikkeling van het vakgebied solids processing. Dit wil niet zeggen dat er geen vernieuwingen of verbeteringen plaatsvinden, maar deze zijn toch in hoofdzaak meer toepassingsgericht en gebaseerd op bestaande of ten dele gemodificeerde kennis. Dat deel van de ontwikkeling is nuttig en zinvol en komt met veel inzet en vindingrijkheid van zowel bouwers als gebruikers van de apparatuur tot stand. Maar waar het aan ontbreekt is een fundamenteel inzicht in het gedrag van stortgoederen in hun grote verscheidenheid en veel voorkomende bedrijfsomstandigheden. Op basis daarvan zou een duidelijke leidraad voor het ontwerpen, bouwen en gebruiken van betrouwbare en renderende procesapparatuur moeten worden samengesteld.

Vanuit de hoek van de toegepaste fysica (Universiteit Twente) is onderzoek bekend naar het 'vloeistofachtig' gedrag van stortgoed. Hier wordt onder de noemer granulaire hydrodynamica gekeken naar overeenkomsten van bewegingen in aangetrilde korrelmassa's en in vloeistoffen, met hoopgevende resultaten. Maar de beperking in de procesindustrie vormt dat lang niet altijd sprake zal zijn van aangetrilde of gefluïdiseerde korrelmassa's.

Misschien dat verdere ontwikkelingen op het gebied van computersimulaties als FEM of DEM uitkomst kunnen bieden. Hoewel ook daar nog niet alle problemen uit de wereld zijn. Met name het relatief beperkte (maar in de tijd wel steeds toenemende) aantal deeltjes in de berekeningen, de noodzakelijkerwijze vereenvoudiging van de deeltjesvorm tot bolletjes, schijfjes of cilindertjes, en de verdere deeltjeseigenschappen die in het model kunnen worden meegenomen, spelen hierbij een belangrijke rol. Experimentele verificatie in hoeverre een dergelijk model de werkelijkheid nog weergeeft, een keuze welke stortgoedeigenschappen zeker in het model moeten worden meegenomen en apparatuur waarmee deze eigenschappen adequaat kunnen worden gemeten, zullen hierbij nodig zijn. Kortom, ons vakgebied kent nog een aantal zinvolle maar interessante uitdagingen. ■

