

STROMEN

Ir. Gerard Haaker en Ir. Piet van der Kooij

In een voorgaand artikel is ingegaan op het inbouwen van diverse typen inserts in silo's en de reden waarom deze inserts worden toegepast.

Al deze inserts hebben invloed op de stroming in een silo maar ondervinden ook belastingen vanuit het opgeslagen materiaal. Helaas bestaat er voor veel situaties tot op heden geen betrouwbare methode om deze belastingen te berekenen, terwijl door het onderschatten van deze lasten nog al eens aanzienlijke schades zijn opgetreden. In het huidige artikel zal op deze belastingen nader worden ingegaan.

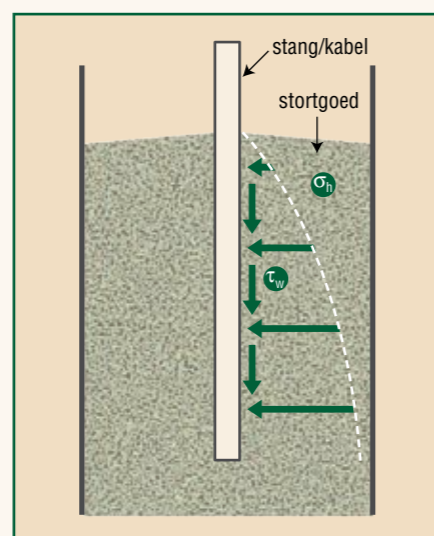
In het vorige artikel over dit onderwerp (Solids Processing 2009, nummer 5, pag. 68) kwam naar voren dat inserts vaak zijn bedoeld om de stroming van het materiaal in de silo gunstig te beïnvloeden of om de druk in te silo of de belasting op de uitdraagapparatuur te verlagen. Daarnaast worden vaak horizontale trekstangen toegepast ter ondersteuning van lange silowanden en verticale stangen of kabels om meet- of registratie-apparatuur in de silo te hangen.

Belasting op verticale stangen en kabels

Zolang de kabel of de stang redelijk glad is, dus geen echte ribbels heeft, ontstaat een vrij simpele situatie (zie figuur 1). Op de stang/kabel werken vanuit het stortgoed de horizontale normaalspanning σ_n en de schuifspanning τ_w . Van de normaalspanning zal de stang/kabel nauwelijks hinder ondervinden maar voor de schuifspanning ligt dit anders. Deze schuifspanning wordt lokaal bepaald door het product van normaalspanning σ_n en wrijvingscoëfficiënt μ tussen stang/kabel en stortgoed. Daar de spanning σ_n met de diepte toeneemt, zal voor de totale verticale kracht op de stang/kabel het product van σ en μ moeten worden geïntegreerd over de lengte van de stang/kabel in het stortgoed. Dat de waarde van de spanning σ met de diepte toeneemt, heeft tot gevolg dat een twee maal zo lange stang of kabel een veel meer dan tweemaal zo grote last krijgt te verwerken.

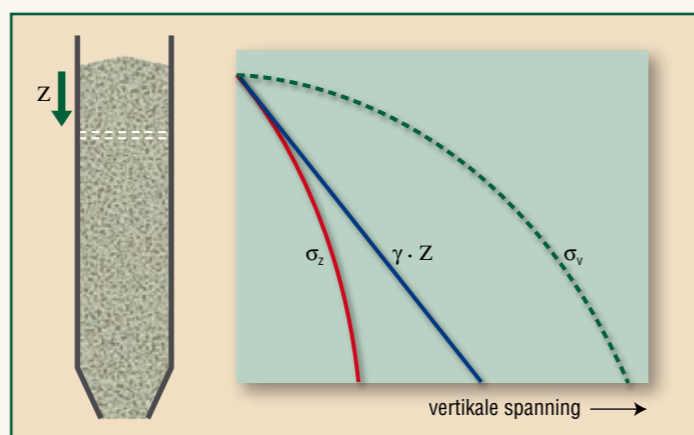
Ingebouwde elementen in silo's ondervinden belastingen

Problemen bij inserts (2)



Figuur 1: Belasting vanuit het stortgoed op een stang of kabel door een horizontale normaalspanning σ_n en een schuifspanning τ_w .

Voor de normaalspanning kan als veilige aanname de spanning volgens DIN 1055 of de Euronorm 1991-4 worden gebruikt, de waarde van μ zal in feite t.o.v. het stortgoed moeten worden gemeten. Dit is echter met name voor een kabel niet echt goed te doen, zodat beter op basis van de ruwheid een niet te lage waarde kan worden gekozen. Wanneer de stang of kabel echt ruw is en/of ribbels aanwezig zijn, zal zich een dunne stilstaande grenslaag kunnen vormen. In dit geval moet met de inwendige wrijvingscoëfficiënt worden gerekend. Bij wat grotere stortgoeddeeltjes moet dan ook een wat grotere stangdiameter ($d + 2d_p$, met d_p als deeltjesdiameter) in rekening worden gebracht.



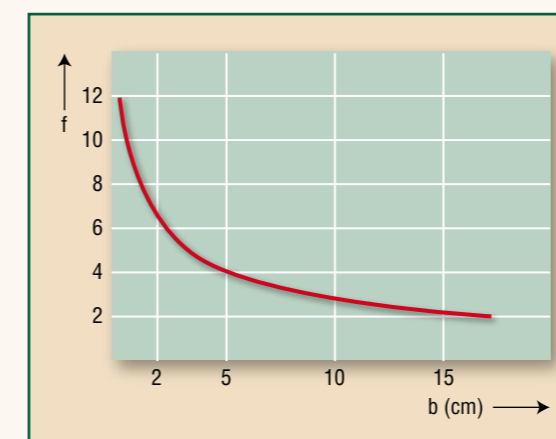
Figuur 2: Verticale belasting σ_v van een trekstang als functie van de diepte z in de silo. Deze belasting blijkt meestal veel hoger dan de normale silodruk σ_z of zelfs de hydrostatische druk $\gamma \cdot z$.

Belasting op horizontale trekstangen

Wanneer in de silo horizontale trekstangen of andere horizontale inbouw-elementen zijn aangebracht, ligt de situatie een stuk ingewikkelder. De trekstang wordt nu niet alleen verticaal door wrijving belast maar ondervindt ook een verticale belasting door het bovenliggende stortgoed die meestal aanzienlijk groter is dan de wrijvingslast.

De grootte van deze verticale belasting is afhankelijk van de diepte van de trekstang onder het vulniveau, de afmeting van het aanstroomoppervlak (in horizontale zin) en in mindere mate van de vorm van de doorsnede.

De verticale belasting σ_v op de stang als functie van de diepte heeft hetzelfde verloop als de verticale silospanning σ_z (zoals te berekenen volgens DIN 1055 of Euronorm), maar dan op een aanzienlijk hoger nivo (zie figuur 2). Dit hogere nivo wordt veroorzaakt doordat de stang een veel grotere verstoring in het materiaal geeft dan alleen het horizontale steunoppervlak. Al in de vulsituatie zal het materiaal in de silo wat inzakken naarmate de vulling toeneemt. Ter plaatse van de stang is echter geen inzakking mogelijk terwijl het materiaal rond de stang wel wat inzakt. Hierdoor ontstaat extra wrijving op het materiaal dat op de stang rust waardoor de verticale belasting dus toeneemt. In hoeverre dit al in forse mate optreedt bij de vulsituatie, hangt af van de zettingeigenschappen van het stortgoed en de silodruk ter plaatse. Bij het leegstromen zal in ieder geval beweging van het stro-

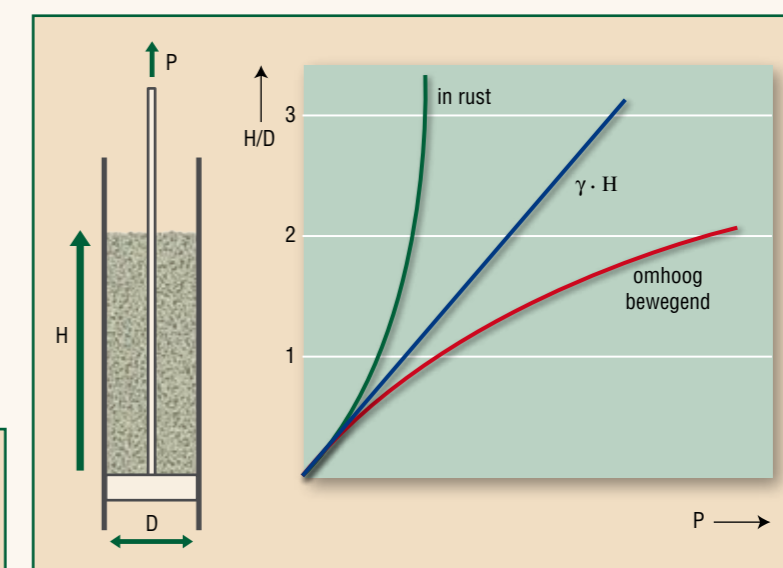


Figuur 3: Grafiek van de vergrotingsfactor f voor de belasting op trekstangen en horizontale inserts, als functie van de breedte. Deze grafiek is op basis van experimenteel onderzoek en geeft slechts een globale schatting weer.

mende materiaal langs en om de stang plaatsvinden met extra wrijving en dus toename van de belasting.

De grootte van de belasting op een aangestroomd oppervlak in een stortgoed is door meerdere onderzoekers experimenteel onderzocht maar heeft tot nogal verschillende resultaten geleid en helaas niet tot een eenduidig rekenmethode. Wel is duidelijk geworden dat de waarde van de belasting op de stang relatief kleiner wordt naarmate de afmeting van de stang toeneemt. Ook de vorm van de stang speelt hierbij een rol. Bij ronde stangen is de belasting wat lager dan bij een vierkante doorsnede met hetzelfde oppervlak. De belasting kan nog wel wat worden verlaagd door een vierkante stang over 45° te kantelen (met de punt omhoog) zodat de aanstroming wat gunstiger uitvalt.

Eind jaren tachtig voerden ze aan Universiteit Twente experimenteel en literatuuronderzoek naar de belasting op trekstangen uit. De uitkomsten hiervan kwamen het best overeen met het zeer uitgebreide werk dat in de zeventiger jaren door Kroll is uitgevoerd aan de universiteit Braunschweig. Op basis van het werk van Kroll wordt in de praktijk de belasting vaak afgeschat met behulp van de (in wat andere vorm in het Silo-Handbuch weergegeven) grafiek in figuur 3. Hierin is b de breedte van de stang en f de hiervan afhankelijke vergrotingsfactor voor de verticale



Figuur 4: Experiment voor de belasting P op een schijf in een cilinder met stortgoed. In rust is de belasting zelfs kleiner dan het vulgewicht maar bij het omhoog bewegen, neemt P exponentieel toe met de vulhoogte H .

materiaaldruk σ_z in de silo die in de berekening moet worden toegepast. De totale verticale last P op de stang kan nu worden berekend met $P = b \times L \times \sigma_z \times f$, waarbij L de stanglengte en σ_z de verticale silodruk voorstelt.

Deze laatste is te berekenen volgens DIN 1055 of Euronorm op de beschouwde diepte van de trekstang. Bij smalle en hoge trekstangen zal ook de verticale wrijving vanuit het materiaal een rol kunnen spelen en zodanig in de berekening moeten worden meegenomen via horizontale druk en wrijvingscoëfficiënt.

Belastingen op andere aangebrachte elementen

Bij belasting op andere in de silo aangebrachte elementen kan worden gedacht aan inbouw-elementen die de stroming moeten beïnvloeden zoals via de wand afgesteunde kegels of trechters maar ook de aan kabels hangende meetapparatuur. De belasting is hier in principe op dezelfde wijze te berekenen als hierboven voor trekstangen aangegeven. Ook hier is de belasting op de inbouw veel groter dan het product van aanstroomoppervlak en verticale silospanning σ_z . En ook nu geldt dat een kleiner aanstroomoppervlak een relatief grotere belasting zal ondervinden dan een groter oppervlak. Tevens speelt de vorm van de inserts een rol, waarbij een horizontaal aanstroomvlak ongunstiger zal zijn dan een spitsvormig vlak. Ook is een langwerpig vlak ongunstiger dan een ronde of vierkante vorm met hetzelfde oppervlak. Evenals bij trekstangen is ook voor dit soort inserts geen eenduidige berekening van de belasting bekend. Voor een afschatting van de belasting zou weer gebruik kunnen worden gemaakt van figuur 3. In dit geval is f de vergro-

tingsfactor voor de verticale silodruk σ_z , nu als functie van de diameter (d) of breedte (b) van de insert. De totale last op de insert kan dan worden berekend met $P = A \times \sigma_z \times f$, waarin A het horizontale aanstroom-oppervlak van de insert voorstelt.

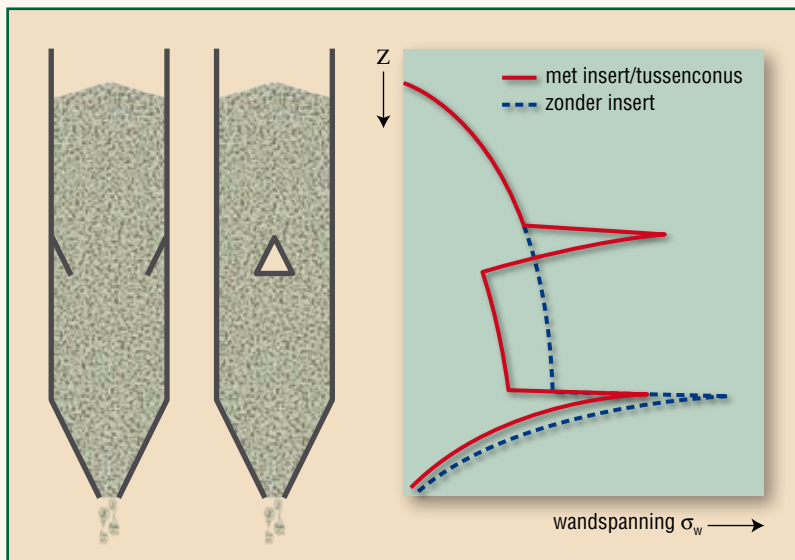
De in figuur 3 aangegeven waarden hebben uiteraard betekenis zolang de diameter d (cq breedte b) van de insert klein is t.o.v. de diameter D (dan wel breedte B) van de silo. Deze waarden zijn namelijk afgeleid van metingen waarbij de waarde van d/D steeds kleiner is geweest dan 0,25. Het zal duidelijk zijn dat bij alsmaar toenemende waarde van de insertdiameter d , de waarde van f weer zal afnemen tot bij het grensgeval $d = D$ de insert een nieuwe bodem voorstelt en dus zal gelden $f=1$.

Belasting bij omhoog trekken van inserts

Een speciaal geval doet zich voor wanneer getracht wordt een insert met een horizontaal of afgeschuind oppervlak weer uit het materiaal omhoog te trekken. De hiervoor benodigde kracht blijkt in vele gevallen nog zeer veel hoger te zijn dan de normale belasting op de insert. Een simpel experiment kan dit duidelijk maken. In figuur 4 is een cilinder getekend met daarin aan horizontale schijf die aan een kabel of touw hangt. De diameter van de cilinder is iets groter dan de schijf zodat deze laatste zonder wrijving door de cilinder kan bewegen. Wanneer nu stortgoed in de cilinder wordt gebracht, zal de totale last op de schijf kleiner zijn dan het gewicht van het bovenliggende stortgoed $\gamma \cdot H$, omdat de cilinderwand via wrijving een deel opvangt. De last op de schijf kan met een standaard siloformule worden berekend. Wanneer nu de cilinder wordt vastgehouden en de schijf omhoog wordt getrokken, zal de belasting op de schijf



STROMEN

Problemen bij inserts

Figuur 5: Invloed van het inbouwen van een tussenconus of verdringerconus op de wandspanning van een silo. Ter plaatse van de conus kunnen bij massastroming lokale piekspanningen op de wand ontstaan

stijgen omdat nu zowel de hele massa stortgoed moet worden opgetild maar ook tegen de wandwrijving in moet worden bewogen. De verticale belasting van de schijf op het stortgoed wordt nu dus hoger. Maar daarmee ook de horizontale belasting op het stortgoed want deze zijn gekoppeld via de spanningsverhouding λ . Dus ook de spanning op de wand neemt toe en hiermee weer de wrijving op het stortgoed en dus ook de kracht nodig om de schijf omhoog te bewegen. Deze laatste kracht blijkt in feite exponentieel met de materiaalhoogte toe te nemen. Met een kleine materiaalhoogte op de schijf is deze nog omhoog te bewegen. Maar bij een vulhoogte van 2,5 á 3 maal de cilinderdiameter is er eigenlijk geen beweging meer in te krijgen. Een dergelijk fenomeen zal ook op kunnen treden bij het omhoogtrekken van inserts. Hoewel in de stortgoedmassa door elasticiteit wat meer bewegingsruimte zit dan in een stijve cilinder, zullen ook hier zeer hoge inwendige wrijvingskrachten optreden die het onmogelijk maken de insert op te hijsen wanneer deze nog te diep in het materiaal zit.

Horizontale belasting van verticale inserts

In een silo aanwezige verticale inserts, bijvoorbeeld in de vorm van ontlastingspijpen of mengschroeven, worden in eerste instantie in verticale zin belast door stroopkrachten als gevolg van horizontale druk en wrijving. Deze verticale krachten vormen meestal geen probleem als drukkrachten. Hooguit dient bij dunwandige, lange inserts met knik te worden gerekend. Maar onderschat de asymmetrische horizontale krachten

niet omdat de horizontale druk in een silo nou eenmaal nooit mooi gelijkmatig zal zijn. Zeker wanneer aan een zijde van de inserts een betere, cq snellere stroming optreedt, zal de druk daar ter plaatse veel lager kunnen worden dan aan de andere kant. Het gevolg hiervan is dus een eenzijdig veel hogere spanning op de pijp, met bij wat grotere lengtes kans op hoge buigspanningen. Dit heeft in het verleden meerdere malen tot grote beschadiging van dit soort inwendige pijpen geleid. Om deze problemen te voorkomen, is het verstandig bij het dimensioneren er van uit te gaan dat er eenzijdig een volle stortgoeddruk op de pijp staat.

Belastingen op tussenconussen en tussenwanden

Tussenconussen worden vaak in de cilinder aangebracht om de maximale druk in de silo te beperken en zo mogelijke trillingen en stoten te voorkomen of te begrenzen. Een andere aanleiding kan zijn de druk op een uittrekmechanisme voldoende laag te houden. Een dergelijke tussenconus zal een aanzienlijk deel van de verticale silolast ter plaatse overbrengen op de cilinder. De verbinding tussen conus en cilinder zal dus voldoende sterk moeten worden uitgevoerd. Bij de tussenconus zelf kan men uitgaan van de belastingen zoals in de codes beschreven voor een normale conus onderaan de cilinder. Ook de cilinder zelf wordt door het aanbrengen van een tussenconus heel anders belast dan zonder tussenconus, omdat nu lokaal een grote last moet worden overgebracht. Vooral bij dunwandige, knikgevoelige uitvoeringen moet hierop worden gelet.

Het aanbrengen van tussenwanden kan ook als doel hebben om de druk te verlagen, dan wel om ontmenging te voorkomen. Bij doorlopende tussenwanden kunnen deze als normale silowanden worden berekend. De drukken hierop zullen lager zijn dan die op de wanden van de ongedeelde silo, omdat de celafmetingen nu kleiner zijn. Er moet hierbij wel vanuit worden gegaan dat een tussenwand horizontaal eenzijdig wordt belast. Mogelijk steunende

werking vanaf de andere zijde mag niet worden meegerekend. De schuifspanning op de tussenwand dient uiteraard wel tweezijdig te worden meegenomen.

Invloed van inserts op de wandspanning van silo's

Behalve rekening houden met directe belastingen telt bij het inbouwen van inserts ook de spanning in de silo zelf mee. En speciaal de belasting van de silowanden verandert hierdoor. De silocodes DIN en Eurocode geven al aan dat de invloeden op de silodrukken ten gevolge van het inbouwen van ontlastingskegels, ontlastingsbalken etc. niet door de norm worden gedekt. In de eerste plaats dient er bij het (vaak later) inbouwen van inserts om massastroming te verkrijgen, rekening mee te worden gehouden dat de silo dan ook belast wordt met massastroomdrukken die duidelijk anders zijn dan bij kernstroming. Verder zal in een massastroomsituatie bij de overgang van de cilinder op de conus een spanningsomslag in het stortgoed plaatsvinden die gepaard gaat met een spanningspiek op de wand. De silocodes tonen een voorbeeldberekening en verwerkingsmogelijkheid van deze spanningsverhoging. Door het inbouwen van een tussenconus of een verdringerconus zal nu op het nivo van de conus ook een dergelijke spanningsomslag plaatsvinden. Hier moet dus ook met een verhoogde wanddruk worden gerekend (figuur 5). Ter plaatse van de tussenconus zal de silowand dus zowel een extra verticale kracht door de dragende conus, als een piekspanning te verwerken krijgen. Wel dient hierbij opgemerkt dat een of meer tussenconussen het totale druknivo in de silo verlagen en dat dus ook de optredende piekspanningen lager zullen zijn dan de oorspronkelijke.

Globale inschatting

Uit het bovenstaande relaas is duidelijk dat u bij het toepassen van inserts rekening moet houden met zowel de belastingen die op de inserts zelf werken als met de veranderingen van de belasting op de silowanden ten gevolge van de insert. Helaas is lang niet in alle gevallen een eenduidige berekeningsmethode voor handen om de genoemde belastingen te berekenen. Op basis van uit experimenten afgeleide voorstellen is vaak niet meer dan een globale inschatting mogelijk. Misschien dat computersimulaties waarmee de stromingen en spanningen rond inserts kunnen worden bekeken, hier in de toekomst een beter, en voor de praktijk ook bruikbaar antwoord kunnen geven. ■