

Belasting van silowanden

Bij de bouw van de eerste grote silo's voor de opslag van graan in het midden van de 19e eeuw, gingen ze er nog vanuit dat bulkgoederen zich als vloeistoffen gedragen. Ze hielden dus rekening met een hydrostatisch drukverloop. Dat bleek een misverstand.

Toch bleef er een negentiende eeuwse theorie tot op de dag van vandaag bestand.

Ir. Gerard Haaker en Ir Piet van der Kooi.

Rond 1895 toonde de Duitse ingenieur Janssen met een aantal proeven aan dat door het optreden van wandwrijving in een bulksilo de druk minder dan lineair met de diepte toeneemt. Hij komt zelfs nooit boven een bepaalde maximale waarde uit. Janssen stelde een theoretisch model op voor het drukverloop en de formules die van dat model werden afgeleid, vormen tot op heden mede de basis van onze siloberekeningen.

De klassieke Janssen-theorie

Omstreeks 1895 verrichtte Janssen een aantal metingen bij vierkante houten graansilo's waarbij met verschillende vulhoogtes de druk op de vlakke bodem met een weegschaal werd bepaald. De gemeten bodemdrukken bleken hierbij minder dan lineair met de vulhoogte toe te nemen en asymptotisch naar een maximale grenswaarde te lopen. Deze grenswaarde bleek afhankelijk van de wandwrijvingscoëfficiënt μ_w en van de verhouding tussen oppervlak (A) en omtrek (O) van de dwarsdoorsnede van de silo.

In zijn theoretische analyse nam Janssen aan dat de verticale belasting σ_z gelijkmatig is verdeeld en hij bekeek het verticale evenwicht over een schijf materiaal met dikte dz, zoals aangegeven in figuur 1. Uit de evenwichtsvergelijking (1) kunnen met wat aannames de klassieke formules voor de belastingen (3, 4, 5) worden afgeleid. Hieruit blijkt dat de spanningen minder dan lineair met de diepte toenemen en bij voldoende diepte een grenswaarde z naderen die wordt bepaald door A/O, λ , μ_w en γ_b . Het toepassen van deze formules vraagt correcte waarden van μ_w , λ en γ_b om een redelijke benadering van de silodrukken te krijgen. Verder wordt in feite alleen naar de vulsituatie gekeken en geen rekening gehouden met het dynamische gedrag van het materiaal tijdens het leeglopen.

Modificaties van de silotheorie

Het Janssen-model voldeed tot ca 1950 redelijk maar daarna leidde de ontwikkeling van een betere kennis over constructiematerialen en methoden tot lagere veiligheidsfactoren. Hierdoor werd ook een betere bepaling van de belastingen noodzakelijk. Dit resulteerde in een veelvoud aan theoretisch en experimenteel onderzoek waaruit al ras bleek dat het probleem van silobelastingen erg complex was en er niet snel een exacte oplossing zou komen. De voorgestelde oplossingen waren steeds gebaseerd op vereenvoudigingen en soms simpele benaderingen. Ze hebben zeker bijgedragen tot een beter begrip van het probleem.

Duidelijk was dat er verschillen bestonden

tussen de vul- en de leegloopsituatie, dat het stromingspatroon invloed had op de belastingen en dat wijzigingen in het interne spanningsverloop gepaard konden gaan met hoge, lokale wandspanningen. Tevens werd onderkend dat door het dynamische gedrag tijdens het uitstromen, de spanningen ook grote variaties vertoonden. Deze nieuwe inzichten leiden in veel landen tot praktijkregels en normen die niet altijd eenvoudig toepasbaar bleken en bij vergelijking tot nogal verschillende resultaten leiden. Als voorbeeld is in figuur 2 de wandbelasting weergegeven zoals in de jaren 80 berekend volgens een aantal toen bekende methoden of codes. Het is duidelijk dat afhankelijk van de gekozen berekeningswijze nogal wat verschillen in de te verwachten wandbelasting optreden.

Stroming en wandbelastingen

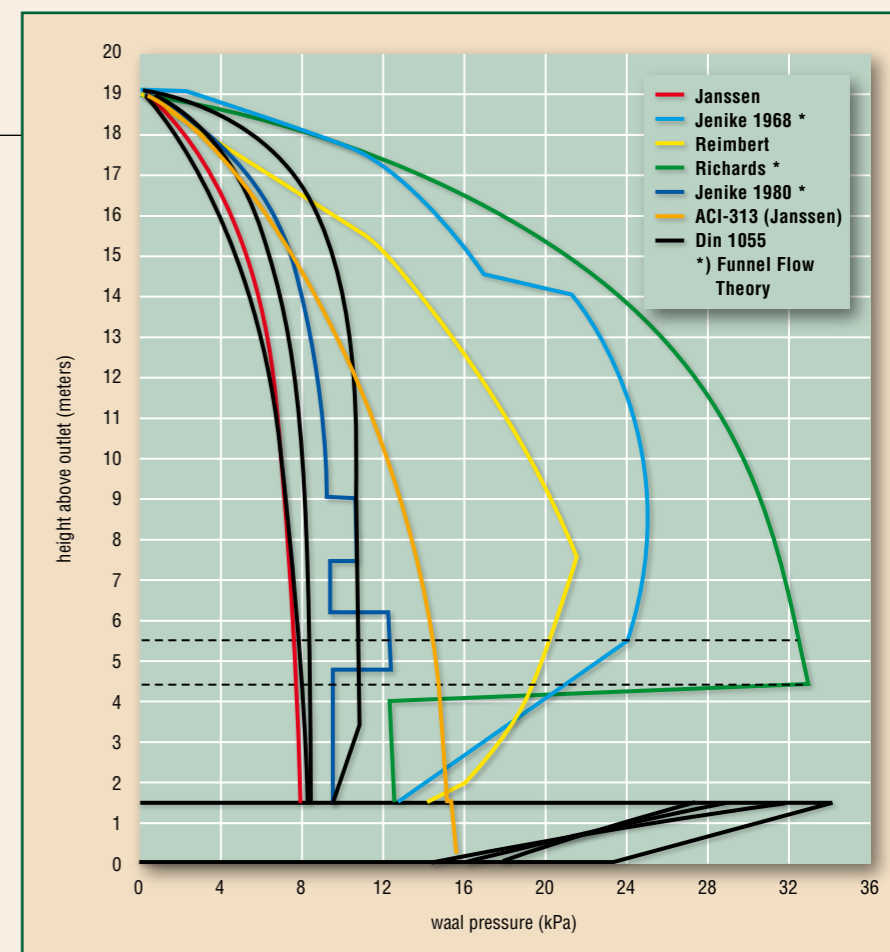
Zoals al verteld, gelden de klassieke Janssen-formules in feite alleen voor de vulsituatie. Tijdens het vullen van een silo zal het bulkmateriaal in verticale zin wat in elkaar worden gedrukt vanwege de druk van bovenliggende lagen. De grootste spanning zal in deze situatie ook verticaal gericht zijn, we spreken dan van een actief spanningsveld. Wanneer nu de uitlaatklep wordt geopend of de losapparatuur gestart, zal het materiaal in de trechter gaan stromen. Hierdoor zal het materiaal in verticale richting wat expanderen terwijl door de vorm van de trechter een contractie van het materiaal in horizontale zin zal plaatsvinden. De grootste spanning past zich bij de vervorming aan en zal nu dus horizontaal zijn, een zogenaamd passief spanningsveld. Deze omslag van actief naar passief zal onderin de trechter beginnen en doorzetten tot aan de overgang naar de cilinder. Hierbij treedt een forse, lokale piekspanning op de wand op, die ook onderin de trechter begint en bij de overgang als continue piek blijft werken, de zg. switch-belasting. Deze piekspanningen zijn ook theoretisch af te leiden uit de Janssen-vergelijkingen. Ze zijn in de praktijk experimenteel gemeten. Helaas is de exacte grootte van deze spanningspieken en het wandgedeelte waarover ze werkzaam zijn niet nauwkeurig vast te stellen. Deze piekspanningen zijn ter plaatse van de overgang cilinder/conus meestal goed in de siloconstructie op te vangen. Daar vindt ook vaak de totale silo-ondersteuning plaats. Bovenstaande

geldt vooral wanneer de gehele massa in de silo in beweging is (massastroming) maar ook in het geval van kernstroming kunnen dergelijke piekspanningen wel voorkomen. Dan wordt er meestal een trechter in het bulkmateriaal zelf gevormd. Waar deze trechter de silowand raakt, zal ook een piek optreden maar het aanwezige bulkmateriaal zal deze wat dempen zodat de silowand minder last ondervindt.

Silonormen

Meerdere landen stelden in de loop der tijd silonormen op om de belastingen te voorspellen. Er bestonden wel plannen in Nederland voor een eigen norm maar veelal wordt de Duitse norm DIN 1055 deel 6 gevolgd. Deze norm, voor het eerst uitgekomen in 1964 en gebaseerd op de theorie van Janssen, beperkte zich tot vrijstromende en licht cohesieve materialen. Maar in de praktijk komen toch veel cohesieve materialen voor. Een ander bezwaar van deze norm was dat de wandwrijvingshoek niet apart werd beschouwd maar als deel van de inwendige wrijvingshoek berekend. De norm maakte wel onderscheid tussen de vul- en de leegstroomsituatie en hield rekening met de invloed van een excentrische uitloop. In 1977 kwam voortvlopend op een complete herziening van de norm, een serie aanvullende voorschriften uit. Hierin werd nogmaals aangegeven dat organisch cohesieve materialen niet volgens de norm mochten worden berekend. De vraag bleef hoe dan wel? Bovendien werd in de voorschriften een aantal toeslagfactoren ingevoerd. In 1987 verscheen een geheel nieuwe versie waarin een redelijk bruikbare berekeningsmethode werd gepresenteerd voor zowel de cilinder als de trechter. Deze versie voorspelt een stromingspatroon met mogelijk optredende piekspanningen bij massastroming. Door een aantal toeslagen werd het dynamische gedrag tijdens uitstromen via een ongelijkvormige belasting verrekend. De norm vermeldde voor twaalf materialen de benodigde gegevens terwijl in een aanvullend commentaar nog een (niet officiële) tabel werd gegeven met de relevante waarden voor twaalf andere materialen. Belangrijk nadeel vormt de berekening van de ongelijkmatige belasting met de factor die de 'goedaardigheid' of de 'boosaardigheid' van het materiaal weergeeft. Deze factor is niet te meten aan het

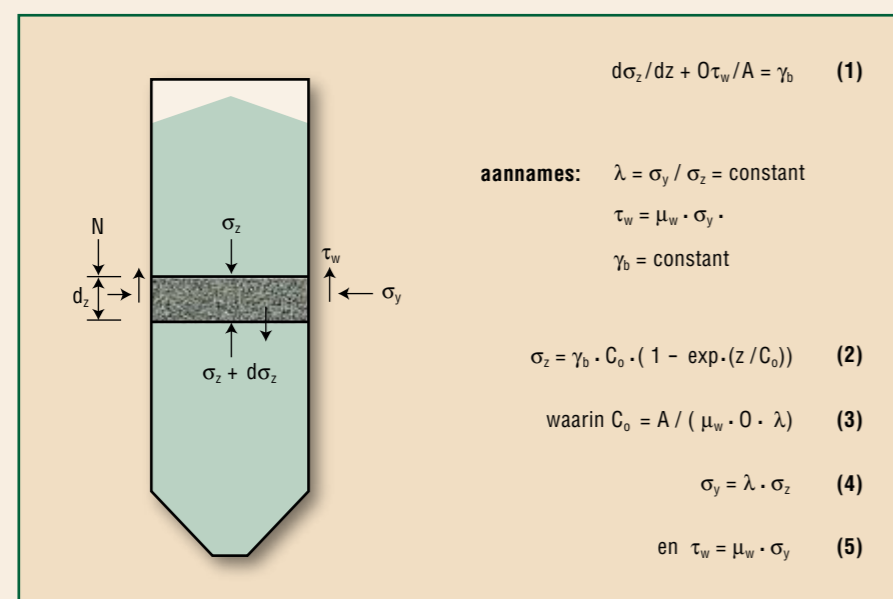
Figuur 2: Wanddrukken zoals berekend op basis van een aantal silotheorieën en codes.



materiaal maar moet met (full scale) tests of door vergelijking worden bepaald. Voor de in de tabel ontbrekende stortgoederen werd opgemerkt dat de gegevens hiervan via vergelijking met bekende producten of via meting moesten worden vastgesteld. Voor sterk cohesieve materialen mag de

silo is bezwaken door het optreden van plooi onderin de cilinderwand. Om in de veelheid van berekeningsmethoden en normen in Europa wat eenheid te brengen, startten eind jaren 80 de eerste gesprekken. Op deze Europese norm komen we een volgende keer terug. ■

Figuur 1: De silodrukformules zoals al in 1896 afgeleid door Janssen.



Figuur 3: Voorbeeld van een bezwaken silo. Ondanks toegenomen kennis over de belastingen gaat het nog wel eens mis.

