

Het ontwerpen van silo's als maatwerk

In dit verhaal wordt ingegaan op de klassieke methode voor het ontwerpen van silo's, aan de hand van het meest voorkomende type silo. Die bestaat uit een verticaal cilindrisch bovenstuk met daar onder een uitlooptrechter met als belangrijkste eis dat in die silo ongestoorde massastroming moet optreden.

Ir P. van der Kooij
en Ir G. Haaker

Het ontwerpen van een silo heeft veel weg van het werk van een goede kleermaker. Zoals de laatste moet weten wat de eisen en wensen zijn van de klant die zijn creatie zal dragen, zal ook de silo-ontwerper moeten uitgaan van de eisen van de gebruiker. En waar de kleermaker nauwkeurig de maten van zijn cliënt moet opmeten, moet ook de siloubouwer de eigenschappen weten (of meten) van het product dat zal worden opgeslagen. Afhankelijk van het gebruik van maatpak of silo, zullen beiden moeten kiezen voor een redelijk slijtvast constructiemateriaal dat tot de gewenste tijd er nog goed uitziet. Als tenslotte zowel de kleermaker als de ontwerper de kneepjes van hun vak beheersen, zal in beide gevallen een goed product ontstaan. Kortom, ook silobouw is veelal maatwerk. Bij massastroming zal al het materiaal in de silo in beweging zijn en zullen er dus geen dode zones optreden. Verder geldt

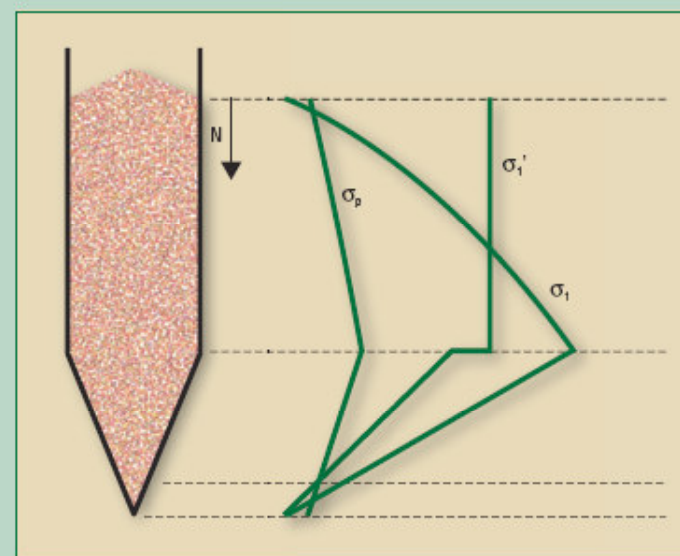
dat het product dat als eerste in de silo komt, er ook als eerste weer uitstroomt (het zogenaamde first in – first out principe), dat weinig ontmenging in de silo optreedt en er een regelmatige en goed regelbare uitstroming bestaat. Vanwege deze gunstige eigenschappen zal in veel gevallen voor massastroming worden gekozen. Zeker wanneer bederf, ongewenste vermenging of veroudering van het opslagproduct een rol spelen.

De basis voor massastroming

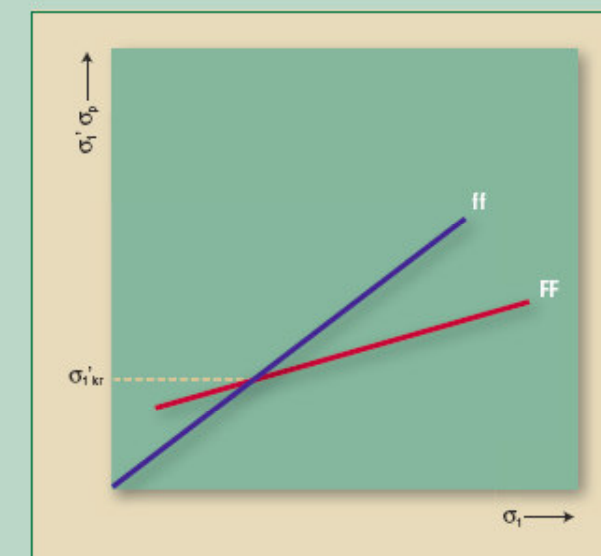
Het type stroming dat in een silo zal optreden, wordt bepaald door het gedrag van het stortgoed in de uitlooptrechter. Wanneer het product in de gehele trechter langs de wand stroomt, zal dit ook in de rest van de silo gebeuren en spreken we over een echte massastroming. Stroomt het product in de trechter slechts ten dele of in het geheel niet langs de wanden maar meer in een intern stroomkanaal, dan zal dit ook voor de rest van de silo gelden. Hooguit kan er in dit geval hoger in de cilinder een lokale vorm van massastroming optreden maar dieper in de silo zullen stilstaande of slecht stromende gebieden ontstaan. Met alle nadelen van dien.

Het stromingsgedrag van het product in de trechter wordt in hoofdzaak bepaald

door de steilheid van de trechter (in casu de trechterhoek α van de wand met de verticaal) en de wrijving tussen product en wandmateriaal, weergegeven door de wandwrijvingshoek φ_w . In de klassieke silotheorie zoals ontwikkeld door onder andere A.W.Jenike, is afgeleid voor welke combinaties van α en φ_w massastroming zal optreden. In figuur 1 is dit aangegeven voor axiaalsymmetrische stroming (met een ronde of piramidevormige uitlooptrechter) en voor vlakke stroming (bij een wigvormige trechter met sleufvormige uitlooptrechter). In deze figuur is te zien dat ook de inwendige wrijvingshoek van het stortgoed (aangegeven met φ_e) een kleine invloed heeft. Wanneer dus de wandwrijvingshoek φ_w tussen het stortgoed en het beoogde wandmateriaal bekend is, bijvoorbeeld op basis van metingen, kan de conushoek α zo worden gekozen dat massastroming zal optreden. Dit geldt zowel voor vrij stromende als voor cohesieve materialen. In het geval van axiaalsymmetrische stroming wordt in de praktijk meestal een conushoek α gekozen die ca 3° steiler is dan de grenswaarde. Dit om een eventuele afwijking in φ_w te compenseren. Bij vlakke stroming is de grenswaarde minder strikt en is geen veiligheidsmarge nodig. In de silopraktijk is gebleken dat ook bij



Figuur 2: Bepalende spanningen bij mogelijke brugvorming.



Figuur 3: Praktische bepaling van $\sigma_1^{\text{kritisch}}$, waaruit de kritische opening d_{kr} kan worden berekend

minder steile conushoeken massastroming kan optreden bij voldoende vulhoogte van het stortgoed in de cilinder. Bij silo-ontwerp wordt hier meestal geen rekening mee gehouden en worden de conservatieve grenswaarden van figuur 1 gebruikt die ook bij kleinere vulhoogten tot massastroming leiden.

Ongestoorde stroming

Na de keuze voor de geschikte conushoek voor massastroming komt de uitstroom in beeld. De voornaamste storingsbron bij massastroming is de vorming van min of meer stabiele materiaalbruggen die de stroming belemmeren of zelfs geheel laten stoppen. In het geval van vrij stromende (meestal wat grovere) materialen gaat het dan meestal om een mechanische verklemming van een aantal deeltjes direct boven de opening. Door de kleinste afmeting van deze opening tenminste vijf of zeven maal groter dan de grootste materiaaldeeltes te kiezen, wordt dit voorkomen.

In het geval van cohesieve materialen gaat het om de samenbakking van zeer veel deeltjes die tot stabiele gewelven of bruggen kan leiden. In dit geval komen we er niet met simpele vuistregels, maar is een nadere beschouwing nodig. We kijken daarvoor naar figuur 2, naar de factoren die bij brugvorming in een silo een rol spelen. De spanning σ_1 is de grootste hoofdspanning (ook wel aangeduid als consolidatiespanning) die normaal in een

gevulde silo werkzaam is. Deze zal met de diepte in de silo toenemen, maar in de conus weer afnemen vanwege de vervorming die het materiaal daar moet ondergaan. Tengevolge van deze spanning σ_1 krijgt het (cohesieve) materiaal een zekere eigen sterkte σ_p , die afhankelijk is van de grootte van σ_1 . Denk hierbij aan een sneeuwbal: hoe harder we er in knijpen, hoe sterker hij wordt. We kunnen σ_p beschouwen als de weerstand die het betreffende materiaal biedt tegen vervorming, afhankelijk van de plaats in de silo. Vervolgens beschouwen we het materiaal in de silo (of eigenlijk voornamelijk in de trechter) alsof het is opgebouwd uit een serie boven elkaar geplaatste bruggen of bogen die afsteunen op de silowand en waarbij elke brug minimaal zijn eigen gewicht draagt. Zo krijgt elke brug een spanning van σ_1 . Een dergelijke brug zal niet stabiel zijn (m.a.w. kapot gaan) wanneer deze belasting σ_1 groter zal zijn dan σ_p , de sterkte van het materiaal waaruit de brug is opgebouwd. In de figuur geldt dit dus boven het snijpunt van de beide lijnen van σ_1 en σ_p . Wanneer we onze uitstroomopening boven dit kritische punt kiezen, zal geen stabiele brugvorming optreden.

Deze beschouwing staat ook bekend als het 'Flow-NoFlow criterium'. Maar hoe werkt dat in de praktijk? Daarvoor kijken we naar figuur 3 waar de genoemde grootheden zijn uitgezet. Uit de klassieke silotheorie volgt dat de verhouding tussen

consolidatiespanning σ_1 en brugspanning σ_p voor een bepaalde combinatie van stortgoed en silotrechter (weergegeven door α , φ_w en φ_e) een constante waarde heeft, de zogenaamde Flow-factor ff. Deze waarde kan voor het beschouwde geval uit de theorie worden berekend of grafisch afgelezen. Het verband tussen consolidatiespanning σ_1 en eigen sterkte σ_p is puur een materiaaleigenschap en dient met een geschikte tester te worden gemeten. Dit verband wordt aangeduid als Flow-Functie FF. Beide lijnen zijn in figuur 3 uitgezet, en weer geldt dat een brug niet stabiel is zolang de brugbelasting groter is dan de materiaalsterkte, hetgeen het geval is rechts van het snijpunt van beide lijnen. Het snijpunt van ff en FF geeft precies de plaats aan waar de situatie kritiek is. Uit de hierbij behorende kritische waarde van σ_1 kan rechtstreeks de bijbehorende kritische uitstroomopening van de trechter d_{kr} worden berekend. In de praktijk kiezen we hierop meestal een toeslag van 25% voor de werkelijk toe te passen, minimale opening. ■

In het volgende artikel in deze reeks van drie zullen we nader ingaan op de ongewilde eigenschappen bij massastroming. Zoals de invloed van ongestoorde opslagtijd, en wat te doen als geen massastroomoplossing mogelijk blijkt.

Figuur 1: Grenswaarden voor massastroming, a) axiaalsymmetrisch b) vlakke stroming

