

Met en zonder hulpmiddelen

Bij het bepalen van de benodigde afmeting van de uitstroopening van een silo is naast de minimumafmeting om brugvorming te voorkomen, ook de gewenste uitloopstroom (meestal aangeduid met massadebiet) een belangrijk gegeven. In tegenstelling tot vloeistofstroming is dit debiet bij stortgoederen niet eenvoudig te voorspellen, daar in dit geval vele factoren een rol kunnen spelen. Hoewel in vele praktische toepassingen de regeling van de massastroom zal plaatsvinden door geschikte uittrekmechanismen als sluizen of schroeven, zal de silo zelf toch tenminste de maximaal gevraagde hoeveelheid moeten kunnen leveren via de uitstroopening.

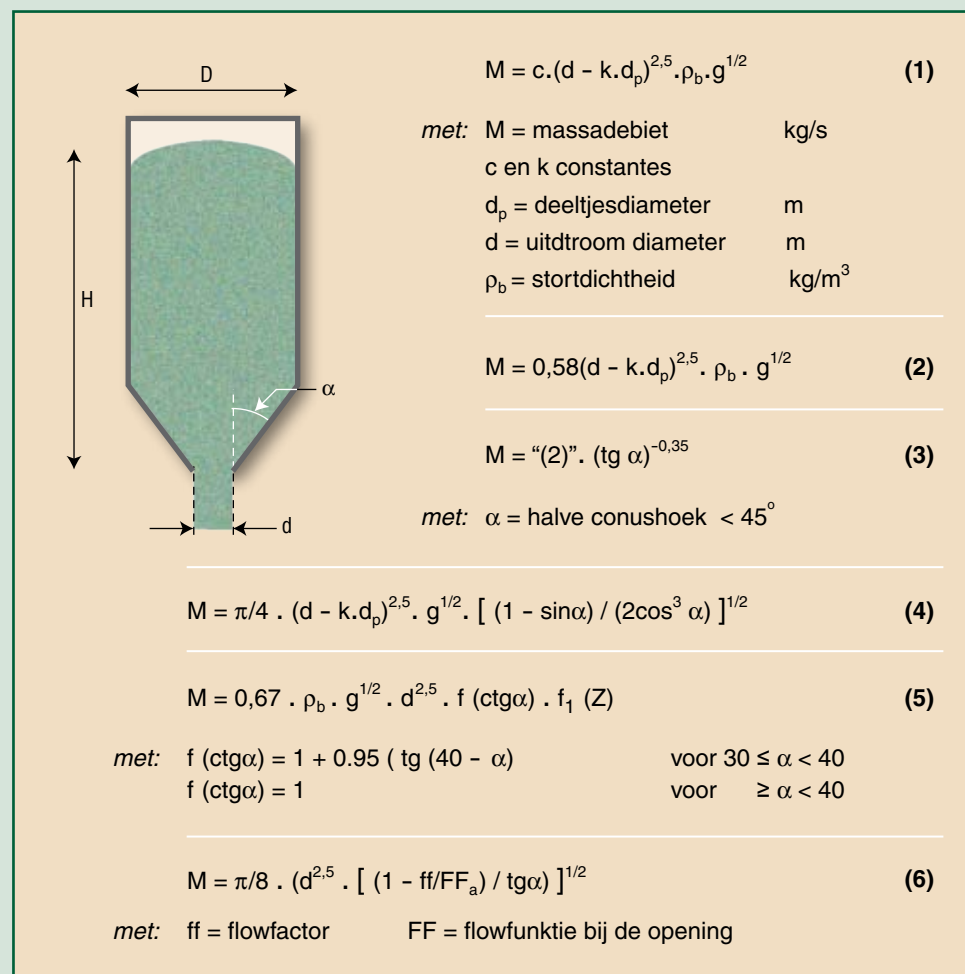
Ir. Gerard Haaker en Ir Piet van der Kooi.

Al sinds het midden van de 19^e eeuw is (meestal empirisch) onderzoek gedaan naar deze uitstroomhoeveelheden. Tot op heden is geen eenduidige theorie of benadering bekend waarmee voor alle typen stortgoed en uitloopconstructies het debiet nauwkeurig kan worden voorspeld. Wel zijn voor diverse klassen van stortgoed empirische of theoretische benaderingen afgeleid waarmee binnen de geldigheidsgebieden het debiet kan worden berekend. Een aardig voorbeeld van het uitstromen van deeltjes wordt gegeven in de bekende zandloper, zoals te zien in figuur 1. De schijnbaar rustige en mooie materiaalstroom blijkt bij nadere beschouwing eigenlijk helemaal niet zo netjes. De deeltjes botsen en rollen over elkaar bij

Figuur 1. De aloude zandloper: betrouwbaar doch niet voorspelbaar.



de uitstroopening, soms stopt de zaak zelfs even en treden er grote snelheidsverschillen tussen de deeltjes op. Toch levert dit geheel een zeer betrouwbare en reproduceerbare tijdmeting op die zich al zeer lang heeft bewezen. Ondanks dat is ook hier de uitstrooftijd (cq het debiet) niet



Figuur 2. Diverse benaderingsformules voor het uitstroomdebiet.

eenvoudig te voorspellen en is eenmalige ijking noodzakelijk.

Uitstroomdebiet voor grofkorrelig vrijstromend materiaal

Naar het uitstromen van niet al te fijn vrijstromend materiaal (deeltjesdiameter d_p groter dan 0,4mm) is in het verleden veel onderzoek gedaan en is een aantal meestal op metingen berustende vergelijkingen in de literatuur te vinden. Deze vergelijkingen stemmen qua opbouw wel overeen en kunnen worden weergegeven zoals vergelijking (1) van figuur 2. De constanten c en k zijn bij de verschillende onderzoekers nogal afwijkend en eigenlijk alleen toepasbaar voor de materialen waarmee is gemeten of die daarmee vergelijkbaar zijn. De afwijkingen worden veroorzaakt doordat verschillende parameters een rol kunnen spelen bij de uitstroming. Hierbij kan worden gedacht aan de invloed van o.a. de vulhoogte (H) in de silo, de halve conushoek (α), de inwendige wrijvingshoek (ϕ),

de wandwrijvingshoek (ϕ_w), de vorm van de deeltjes, porositeit etc. Nader onderzoek naar de invloed van deze parameters heeft aangetoond dat een aantal hiervan nauwelijks een rol speelt, zoals de vulhoogte H (zolang $H > D$). Een grotere invloed werd gevonden voor de conushoek α en de vorm van de deeltjes wanneer ze sterk van de bolvorm afwijken. Een simpele benadering die vaak wordt gebruikt om het debiet bij niet te fijne materialen te voorspellen, is de empirische formule van Beverloo (zie figuur 2, vergelijking 2). Beverloo vond in zijn metingen waarden voor de constante k van 1,3 – 2,9 en voor de meeste bolvormige materialen $k=1,6$. Uit de formule blijkt dat grotere uitstroomopeningen de waarde van k nauwelijks beïnvloeden. Opvallend is dat in deze benadering geen rekening wordt gehouden met de mogelijke invloed van de conushoek α . Dit is wel gedaan in de benadering volgens Rose en Tanaka (fig. 2 vergelijking 3), Brown

(vergelijking 4) en Lehmann (vergelijking 5). Uit deze benaderingen blijkt dat het debiet kleiner is bij stompere conussen. Boven een waarde $\alpha = 40^\circ$ treedt geen verdere afname op. De reden hiervan is kennelijk dat we dan geen massastroming meer hebben zodat de effectieve conushoek in het materiaal zelf wordt gevormd. Vergroting van de trechterhoek heeft daar geen invloed meer op. Door Lehmann wordt ook de vorm van de deeltjes in rekening gebracht via de term $f_1(Z)$. Hierin is Z de zogenaamde vormfactor die gelijk is aan het echte volume van een deeltje, gedeeld door het volume van de kleinste omschreven bol om het deeltje. Tot aan $Z=0,3$ blijkt deze term nauwelijks invloed te hebben, hoewel voor deze waarde van Z de deeltjes al vrij sterk van de bolvorm afwijken. Vergelijking van genoemde formules voor een conushoek α van $10 - 40^\circ$ geeft een maximale afwijking t.o.v. het gemiddelde van -37 procent tot +33 procent. De benadering volgens Beverloo komt redelijk gemiddeld uit met afwijkingen van -28 procent tot +nul procent. We kunnen hieruit vaststellen dat met de simpele benadering volgens Beverloo voor de meeste niet te fijne materialen een redelijke voorspelling van het uitstroomdebiet kan worden gegeven.

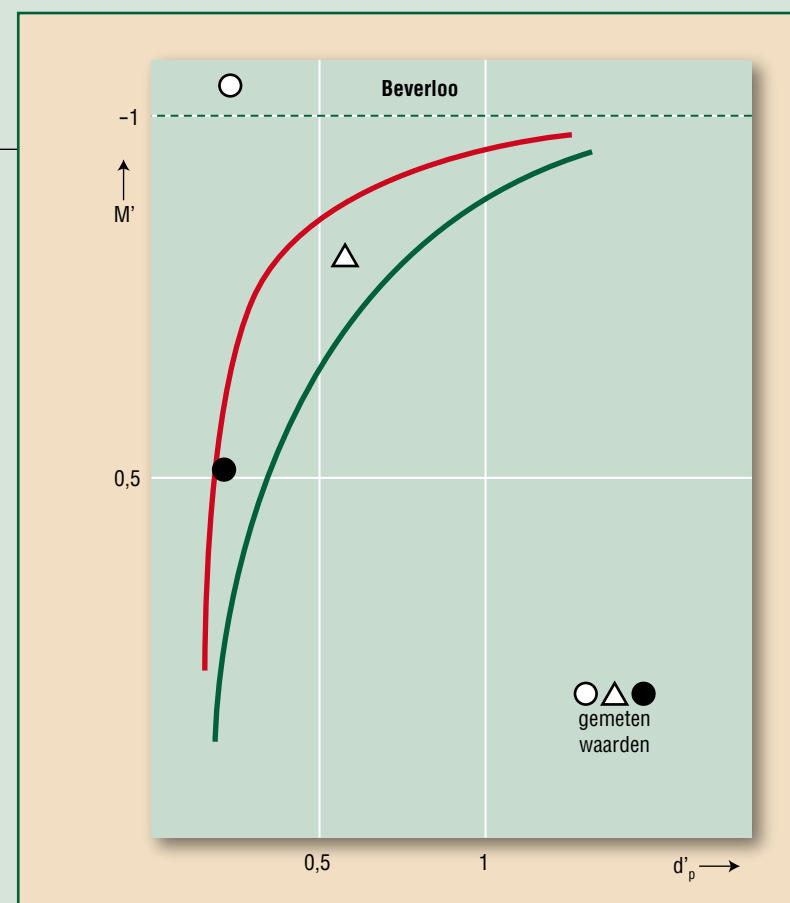
Uitstroming bij fijne vrijstromende materialen

Bij fijnkorrelige maar nog wel vrijstromende materialen (diameter d_p kleiner dan ca 0,4mm) blijkt een aanzienlijk kleiner debiet uit te stromen dan voorspeld met Beverloo. De oorzaak hiervan is de weerstand van tegenstromende lucht die belangrijker wordt naarmate de deeltjes kleiner zijn. Tijdens het naar beneden stromen in de conus, neemt de druk op het materiaal af waardoor expansie optreedt en de ruimte tussen de deeltjes toeneemt. Hierdoor daalt de luchtdruk tussen de deeltjes waardoor lucht zal toestromen via de uitstroopening, dus tegen de korrelstroom in. Deze tegenstroom is afhankelijk van de drukgradiënt van de lucht in de conus maar deze gradiënt is weer afhankelijk van de materiaaldruk in de conus, de compressibiliteit en permeabiliteit van het stortgoed, en is moeilijk te berekenen. Een indruk van de afname van het debiet (berekend en gemeten door

Thorpe en Nedderman) is te zien in figuur 3. Hier is het debiet (als percentage van de Beverloo-voorspelling) gegeven als functie van de (dimensieloze) deeltjesdiameter. De getrokken lijnen geven de grenzen waartussen de meeste materialen zullen liggen, de meetpunten geven de resultaten weer van metingen aan drie industriële silo's. Twee hiervan laten inderdaad een veel lager debiet zien dan bij grovere materialen zou optreden. Het derde is hoger dan de Beverloo-voorspelling hetgeen wordt veroorzaakt door een valpijp onder de silo. Door zo'n pijp wordt de tegenstroom van lucht belemmerd en het materiaal als ware uit de silo gezogen.

Debiet bij cohesief materiaal

Bij cohesief materiaal wordt de uitstroopening tenminste zo groot gekozen dat geen stabiele brugvorming kan optreden en wordt minder naar het debiet gekeken. Toch kan het ook hier nodig zijn om te weten wat de silo kan leveren. Johanson zette een benaderingsmethode op die nauw aansluit bij de ontwerpmethodes van massastroomsilo's voor cohesief materiaal gebaseerd op silogeometrie en gemeten materiaaleigenschappen. Hierbij gaat hij uit van continu bezwijkende bruggen in dynamisch evenwicht. De drijvende kracht voor de stroming is het verschil tussen het eigen gewicht van de brug en de wandreactie die weer samenhangt met de eigen sterkte van het stortgoed. Uit zijn beschouwing kan een benadering voor het debiet worden afgeleid zoals weergegeven in figuur 2 (vgl.6). De hierin benodigde waarden van de flowfactor ff en de flowfunctie FF_a ter plaatse van de uitstroopening zijn al bekend vanuit het ontwerpproces. De methode is volgens de auteur ook bruikbaar voor kernstroomsilo's waar dan gebruik moet worden gemaakt van een conushoek α die in het stortgoed zelf wordt gevormd. Deze hoek is niet erg nauwkeurig vast te stellen. Indien de methode van Johanson wordt



toegepast op niet cohesief materiaal, dan vervalt de ff/FF_a term en krijgt de vergelijking nagenoeg dezelfde vorm als de Beverloo-vergelijking.

Figuur 3 Een voorbeeld van het kleinere debiet bij fijnkorrelig materiaal.

Opvoering van het debiet door luchtinjectie

Bij fijnkorrelige materialen bestaat nog de mogelijkheid om via injectie van lucht de drukgradiënt in de conus te verlagen en zo het debiet op te voeren. Dit is een methode die werkt maar het resultaat is kwantitatief moeilijk te voorspellen. Wel zijn op basis van modelproeven door Williams een aantal richtlijnen opgesteld. Zo werd als beste positie voor het inbrengen van lucht een hoogte boven de opening van $h=4d$ vastgesteld. Verder heeft de in te brengen hoeveelheid lucht een bovengrens waarboven de stroming zeer onregelmatig wordt. Als beste resultaat werd een toename met een factor 3 bereikt. Hierbij moet nog worden opgemerkt dat het inblazen van lucht het risico op zogenaamd 'schieten' van het materiaal kan verhogen. Hierbij raakt het materiaal onder in de conus (ten dele) gefluidiseerd. Dit kan in sommige gevallen leiden tot een niet meer te beheersen stroming waarbij plotseling een fors deel van de silo-inhoud op de werkvloer komt te liggen. Zelfs een feeder met veel wrijving, zoals een uitdraagschroef, houdt het materiaal dan niet meer tegen. Het inblazen van lucht dient dan ook met de nodige voorzichtigheid te gebeuren. ■