

Positieve en negatieve invloed van lucht in silo's

In een vorig artikel in Solids Processing (nr.1 2009 pagina 50) kwam de functie van lucht bij bewerking of transport van solids aan de orde. Ook bij de opslag van stortgoederen in silo's kan lucht zowel in positieve als negatieve zin een factor van betekenis spelen. Deze keer voorbeelden van de invloed van lucht op het productgedrag en de voorspelbaarheid daarvan.

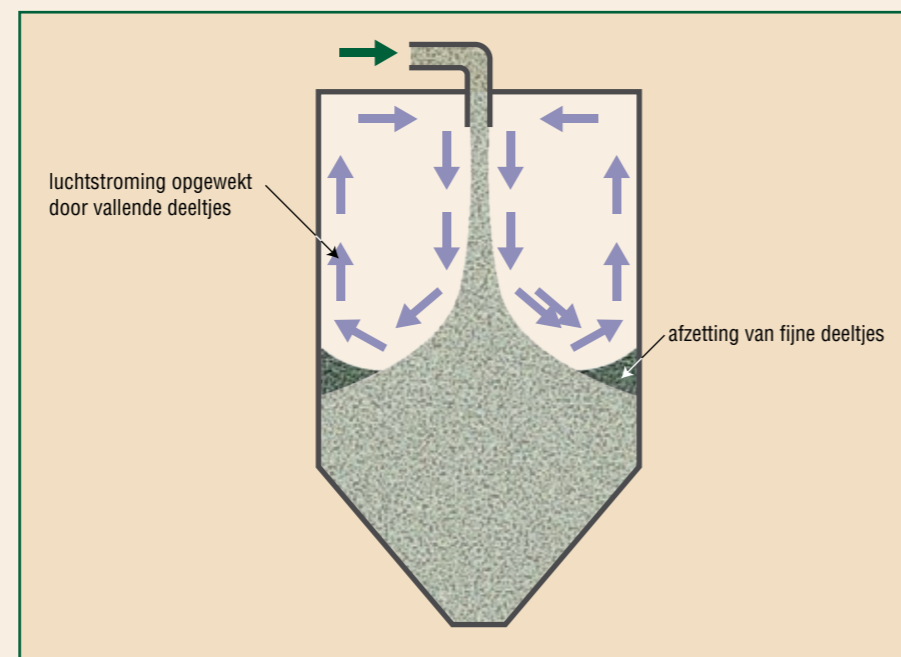
Ir. Gerard Haaker
en Ir. Piet van der
Kooi

In de loop der tijd werd de ervaring opgedaan met de invloed van lucht op de stroming van de silo-inhoud gebruikt om diverse systemen te ontwikkelen. Natuurlijk verschillen die qua werkwijze en toepassingsgebied. Een veel toegepast systeem is de zogenaamde **airslide**, vaak gebruikt voor wat grotere silo's met een licht hellende bodem. De airslide zelf bestaat uit een luchtdoorlatende of van een groot aantal lucht-nozzles voorziene wand onderin de silo. Het inblazen van lucht verlaagt de wrijving tussen stortgoed en airslide en dat vergemakkelijkt het transport naar de uitstroomopening zelfs bij kleine hellingshoeken. De luchtstroom in de transportrichting sturen, bevordert de stroming nog meer. Een andere mogelijkheid om stroming te bevorderen, zijn **luchtkanonnen of airswep-systemen**. Deze bestaan uit op meerdere plaatsen in de conuswand aangebrachte luchtkleppen die lucht onder vrij hoge druk (circa drie tot acht bar) stootsgewijs in het materiaal of langs de wand blazen. Ze worden meestal toegepast om gevormde materiaalbruggen te breken, stabiele inwendige stroomkanalen te ondergraven, of het aankleven van materiaal te voorkomen. Door de kleppen niet gelijktijdig maar in een bepaalde volgorde te laten werken, wordt het materiaal in de conus wisselend asymmetrisch belast en ontstaat automatisch beweging. Ook zal de ingeblazen lucht zowel de wandwrijving als de inwendige wrijving van het materiaal plaatselijk wat verlagen en daarmee het stromen bevorderen.

Inblazen van lucht

Een andere toepassing van stromingsbeïnvloeding is het **inblazen van lucht** in de silo. In dit geval dient het om de uitstro-

mende materiaalstroom (het zogenaamde debiet) te vergroten. Bij het naar beneden stromen in de trechter zal de druk op het materiaal kleiner worden waardoor uitzetting optreedt en de ruimte tussen de deeltjes dus toeneemt. Hiermee neemt ook de luchtdruk tussen de deeltjes af waardoor lucht zal toestromen vanaf de uitstroomopening, dus tegen de deeltjesstroom in. Grotere deeltjes ondervinden hier weinig last van maar bij fijnere materialen (kleiner dan ca 0,4mm) neemt het debiet duidelijk af. De tegenstroom van lucht kan worden voorkomen door hogerop in de conus lucht in te blazen. Onderzoek heeft uitgewezen dat een toename van het debiet tot een factor drie hierbij tot de mogelijkheden behoort. In de praktijk blijkt echter dat hoeveelheid en plaats van de in te blazen lucht moeilijk te voorspellen zijn en de uitstroming bij grotere luchthoeveelheden onregelmatig wordt. Bij alle hier genoemde mogelijkheden om met gebruik van lucht de stroming te sturen, is een waarschuwing voor dat addertje onder het gras op zijn plaats. Namelijk, sommige materialen blijken zo gevoelig voor luchtopname dat er een bijna onbeheerste stroming ontstaat, de zogenaamde flooding. Hier komen we later op terug.



Figuur 1 : Mogelijk optredende ontmenging bij het (pneumatisch) vullen van een silo.

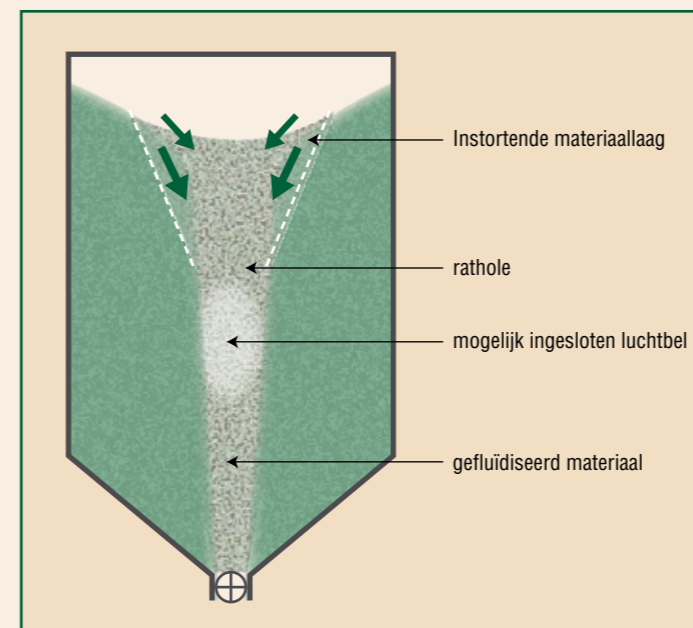
Negatieve invloed

Ontmenging

Bij het vullen van een silo zal met de materiaalstroom altijd een hoeveelheid lucht meekomen, bij pneumatische vulling natuurlijk nog wat meer. Hierdoor ontstaan luchtstromingen in de silo waarmee ook kleine deeltjes uit de materiaalstroom worden meegenomen. Figuur 1 toont dat er dan een zekere **ontmenging** van fijner en grover materiaal optreedt. Bovendien zal bij grotere luchtstromen de uit de silo stromende lucht weer moeten worden gereinigd met bijvoorbeeld een filtersysteem of een cycloon.

Flooding

Bij het onttrekken van materiaal aan een silo, neemt zoals eerder beschreven de druk en dus de dichtheid van het materiaal af op het moment dat het in de uitstroomconus zakt. Hierdoor neemt ook de luchtdruk in de ruimte tussen de deeltjes af en zal een tegenstroom van lucht vanaf de uitstroomopening optreden. Bij wat grovere materialen is de weerstand voor de lucht gering en zal de onderdruk eenvoudig worden opgeheven zonder veel invloed op de stroming. Maar bij fijne materialen zal de permeabiliteit (luchtdoorlaatbaarheid) klein zijn en de on-



Figuur 2: De kans op flooding in een kernstroomsilo door het plotseling in het stroomkanaal (rathole) schieten van instabiele materiaallagen.

derdruk dus groter blijven. Bij grote uitstroomsnelheden zal dit sterker optreden omdat er dan nog minder tijd voor luchtdruknivellering beschikbaar is. Hierdoor kan in het onderste gedeelte van de conus een zodanig sterke tegenstroom optreden, dat het materiaal gedeeltelijke fluidiseert. Daardoor neemt zowel de inwendige wrijving als de wandwrijving af en de uitstroomsnelheid nog toe. Het proces versterkt zichzelf en de fluidisatie stijgt nog meer. Dit resulteert in het plotseling uitstromen van grote hoeveelheden gefluidiseerd materiaal dat wordt aangeduid met **flooding** of het 'schieten van materiaal'. Voorbeelden uit de praktijk tonen aan dat een grote hoeveelheid materiaal als water door uitdraagschroeven heen schoot. Zo'n gefluidiseerde stroom laat zich eigenlijk alleen stoppen met een positieve afsluiter zoals een goed werkende cellenradsluis. Overigens is daarmee het gevaar van flooding geweken maar een gelijkmatige, uniforme uitstroom nog niet verzekerd. Vaak vertoont het uitstromende materiaal nog een grote variatie aan dichtheid, hetgeen bij de vraag naar een constante materiaaldosering op problemen stuit. De kans op flooding treedt bij kernstroomsilo's het vaakst op omdat daar nauwere stroomkanalen voorkomen met hogere snelheden. Bij massastroming vindt altijd stroming over de volle doorsnede plaats resulterend in lagere stroomsnelheden.

Ratholing

Een variant van flooding is ratholing. Hierbij vormt zich een vrij klein stroom-

kanaal in een kernstroomsilo. Een dergelijk kanaal is meestal niet stabiel waarbij ineens een grote hoeveelheid materiaal inclusief meegesleurde lucht van boven af in het stroomkanaal kan schieten (zie figuur 2). Als het materiaal in het kanaal fluidiseert, krijgt de lucht door de vrij grote stroomsnelheid en een lage permeabiliteit geen tijd om te ontwijken. Vervolgens bevat het materiaal bij de uitstroomopening nog zoveel lucht dat er flooding optreedt.

De derde flooding-variant treedt op bij het **snel vullen van silo's met kleine afmetingen**. Ook hier kan door de meekomende lucht een zekere mate van fluidisatie optreden. Wanneer het materiaal onvoldoende tijd krijgt om te ontluften en zeker wanneer bij het leegstromen een klein stromingskanaal ontstaat, behoort flooding tot de mogelijkheden. Daar komt bij dat door de optredende fluidisatie ook een heel andere belasting van de wanden zal optreden dan bij een normale silo-vulling. In de silocodes DIN 1055 en de Europese code EN 1991-4 geeft een ruwe schatting weer dat dit kan voorkomen bij het vullen van een silo met poeders ($d < 0,05\text{mm}$) indien het vuloppervlak sneller stijgt dan 10m/h. Indien fluidisatie kan optreden, moet bij de berekening voor de wandbelasting rekening worden gehouden met een hydrostatische druk, dus vergelijkbaar aan vulling met een vloeistof. Hierbij mag de druk een lagere dichtheid krijgen dan de gangbare rekenwaarde van het materiaal. De bij fluidisatie optredende wanddruk is meestal hoger dan de nor-

male stortgoeddruk. De schuifspanning langs de wand is dan zeer laag of zelfs nihil zolang geen stroming plaatsvindt.

Beïnvloedingsfactoren

Conclusie: de invloed van lucht op het stromingsgedrag van een stortgoed is afhankelijk van de volgende factoren:

- de permeabiliteit (luchtdoorlaatbaarheid) van het materiaal. Deze grootte geeft aan hoe makkelijk lucht door een materiaalkolom kan stromen, cq hoe moeilijk het uit het materiaal kan ontwijken. De permeabiliteit zal kleiner zijn naarmate de deeltjes kleiner zijn en een bredere deeltjesgrootteverdeling hebben;
- de actuele bulkdichtheid van het materiaal. Bij toenemende dichtheid zal de permeabiliteit in het algemeen afnemen. De dichtheid is op haar beurt weer afhankelijk van de druk op het materiaal;
- de dichtheid van de deeltjes zelf (solids density). Hoe hoger deze dichtheid, hoe minder gevoelig deze deeltjes zijn voor lucht. Vergelijk ijzerdeeltjes met bijvoorbeeld silica;
- en als laatste de verandering van de inwendige wrijving en/of de eigen sterkte van het materiaal wanneer luchtinsluitting plaatsvindt. Dit bepaalt in hoeverre betere stroming of zelfs flooding van het product zal optreden.

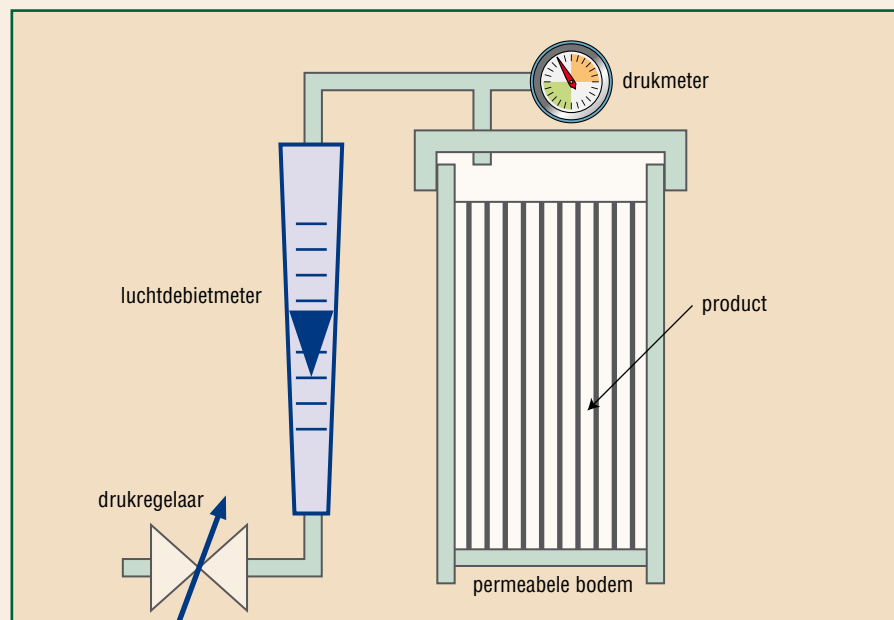
Meten

Voor het meten of om tenminste een goede indruk krijgen van de hiervoor genoemde beïnvloedingsfactoren staan een aantal instrumenten ter beschikking.

Jenike

Een methode om de permeabiliteit als functie van de dichtheid te meten, is ontwikkeld door Jenike, een van de grondleggers van het vakgebied. Het te onderzoeken materiaal wordt in een stalen testcilinder via een bovendeksel en een gewichtsjuk verdicht. Uit de te meten stand van het deksel wordt het effectieve volume berekend. Met het bekende vulgewicht volgt hieruit de dichtheid van het materiaal als functie van de opgelegde druk. Na het verwijderen van bovendeksel en gewichten wordt via een verdeelplaat aan de onderkant lucht door het monster gevoerd. De drukval Δp over de kolomhoogte h wordt wat kleiner gekozen dan nodig zou zijn om het monster te liften. De doorstromende luchtstroom Q wordt via flowmeters gemeten en hieruit wordt

Figuur 3: Principe van een permeabiliteitstester. De permeabiliteit kan bij diverse dichtheden van het monster worden berekend uit de monsterhoogte, de luchtsnelheid en de drukval over het monster.



de superficiale luchtsnelheid v door het monster berekend, betrokken op het doorstroom oppervlak van de lege testcilinder. Uit de luchtsnelheid v , monsterhoogte h en drukval Δp kan de permeabiliteitsfactor c worden berekend met $c = v \cdot h / \Delta p$. Door de meting bij diverse waarden van de dichtheid γ van het testmonster uit te voeren, ontstaat het verband tussen dichtheid en permeabiliteit. In figuur 3 is een wat aangepaste versie van het Jenike-apparaat weergegeven. De lucht stroomt hier van bovenaf door het monster en ontwijkt onderin via een permeabele bodem. Door de geringe luchtsnelheden treedt geen merkbare verdichting van het monster op. Hierdoor worden geen kleine deeltjes door de luchtstroom meegenomen.

Fluïdisatiekolom

Een wat simpelere methode om de permeabiliteit van stortgoederen te bekijken, maakt gebruik van een fluïdisatiekolom. Deze bestaat uit een verticale cilinder waarin het te onderzoeken materiaal vanaf de onderkant wordt belucht. Afhankelijk van de materiaaleigenschappen (zoals deeltjesgrootte en cohesie) zal bij toenemende luchtsnelheid het materiaal gaan expanderen en de kolomhoogte toenemen. Dit gaat door tot het materiaal volledig is geïnduseerd en geen verdere expansie meer optreedt. Na het afsluiten van de luchttoevoer, zal de in het materiaal opgenomen lucht weer ontwijken en de kolomhoogte weer terugzakken. De mate van stijging van het materiaal evenals de tijd die het kost om de lucht weer te laten ontwijken, geven een goede indicatie van

de permeabiliteit en dus de luchtgevoeligheid van het materiaal.

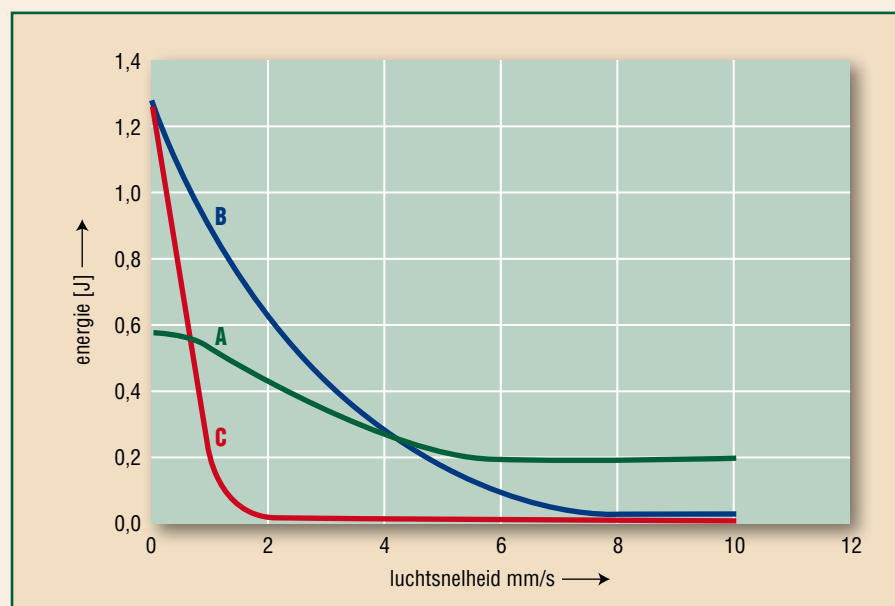
Voor het bepalen van de invloed van de opgenomen lucht op de sterkte of de wrijvingseigenschappen van het materiaal, wordt vaak gebruik gemaakt van Powder rheometers. Hiervan zijn diverse uitvoeringen op de markt.

Het principe van deze testers werkt met een schroefblad dat al roterend op of neer door een kolom van het testmateriaal beweegt en dus afschuiving in het materiaal veroorzaakt. Tegelijkertijd worden het benodigde koppel, de verticale kracht en de snelheid van het schroefblad gemeten. De rotatiesnelheid en het koppel zijn een

rechtstreekse maat voor de benodigde bezwijkenergie van het materiaal. Het monster kan worden voorverdicht of in losse toestand worden gemeten. Inblazen van lucht via de onderkant van de materiaalkolom geeft een indruk van de stromings-eigenschappen na opname van de lucht. Figuur 4 toont de resultaten van een meting met doorstromende lucht bij drie verschillende poeders. Duidelijk is de invloed van doorstromende lucht op de bezwijkenergie te zien, hoewel die voor alle drie verschillende uitpakt. Met name bij materiaal C neemt de bezwijkenergie al bij geringe luchtdoorstroming zeer sterk af en bestaat er een groot risico voor flooding.

Een factor van betekenis

De hiervoor genoemde methoden geven eigenlijk geen van allen uitsluitsel over het werkelijke gedrag van een belucht materiaal. Maar het zijn wel metingen die het mogelijk maken om wijzigingen in het materiaalgedrag te onderkennen of verschillende materialen in diverse condities onderling te vergelijken en op basis van opgedane ervaringen in te schatten in hoeverre een materiaal problemen kan geven. Inmiddels zal duidelijk zijn dat bij opslag en verwerking van (vooral fijn) stortgoed een aanzienlijke verbetering van het stromingsgedrag optreedt wanneer (al dan niet bewust toegepaste) beluchting van het materiaal plaatsvindt. Een factor waarmee zowel tijdens het ontwerp als bij het gebruik dus rekening mee moeten worden gehouden. ■



Figuur 4: Resultaat van een aantal metingen met een Powder rheometer naar de invloed van doorstromende lucht op de bezwijkenergie van een drietal materialen. Vooral materiaal C blijkt erg gevoelig voor lucht, met mogelijke kans op flooding.