

Metten is weten, maar weet wat je meet

In het eerste deel van dit tweeluik, **Solids Processing nr. 5 2008**, over het meten van stortgoedeigenschappen is een aantal meetmethoden behandeld waarmee een volledig beeld van het stromingsgedrag van een stortgoed kon worden verkregen. Dit totaalbeeld is nodig om betrouwbare opslagsystemen te kunnen ontwerpen. In dit deel zullen we ingaan op een aantal wat eenvoudiger, en meestal snellere testmethoden.

Ir. Gerard Haaker
en Ir Piet van der
Kooi

Met de hierna te behandelen testmethoden is het mogelijk om het gedrag van een aantal producten onderling te vergelijken. Maar ze zijn ook bruikbaar om na te gaan of het stromingsgedrag van een product zal veranderen door een wijziging in de productiemethode, samenstelling, temperatuur of vochtgehalte. Tevens zal een aantal testmethoden worden behandeld waarmee een of meer specifieke grootheden als bijvoorbeeld dichtheid kunnen worden gemeten.

De uniaxiaal-testers

In het eerste deel is al gebleken dat de zogenaamde ongesteunde druksterkte σ_p een belangrijke grootheid is, die een cruciale rol speelt bij mogelijke stromingsproblemen als stabiele bruggen en kanalen.

Deze sterkte wordt meestal van een gemeenten bezwijklijn afgeleid, maar kan in feite ook rechtstreeks worden gemeten via een vrije kolomtest.

Het principe van deze test is erg eenvoudig. Er wordt, meestal in een steunmal, onder een zekere verticale druk een kolom materiaal gemaakt. Daarna worden de druk en de mal weggenomen, zodat een vrijstaande kolom ontstaat, die dan weer verticaal wordt belast tot hij bezwijkt. De spanning waarbij dit bezwijken optreedt, geeft de waarde van σ_p .

In de praktijk zijn in de loop der tijd diverse apparaten ontwikkeld die in meerdere of mindere mate tot een redelijk resultaat kunnen leiden.

De simpelste methode is het gebruik van een cilindervormige mal waarin het stortgoed onder een verticale druk wordt verstevigd. De hoogte H van de mal is meestal 2,5 à 3 maal de diameter D. Een groot nadeel van deze methode is dat door de wrijving tussen stortgoed en mal de verticale druk dieper in het monster veel lager is dan bovenin, zodat geen homogeen verstevigd monster wordt verkregen. Dit kan ten dele worden voorkomen door de kolom in laagjes op te bouwen en steeds elk laagje voor te belasten. Een probleem hierbij is dat de hechting tussen de afzonderlijke laagjes de sterkte

klein zijn t.o.v. de uitwendige belasting. Een in Porsgrun (Noorwegen) ontwikkelde tester maakt gebruik van een gesmeerd rubber membraan om de wrijving tussen mal en monster zo klein mogelijk te houden, zie figuur 1. Het monster wordt hier eerst verticaal verstevigd door een belasting σ_1 die via een bovenzuijer wordt aangebracht. Daarna worden mal en rubbermembraan voorzichtig omhoog getrokken, zodat een vrijstaande kolom ontstaat. Deze wordt vervolgens belast tot bezwijken optreedt. De uit de bezwijklast volgende waarde van de ongesteunde druksterkte σ_p is afhankelijk van de opgelegde verstevigingsdruk σ_1 . Tijdens het bezwijken van de vrije kolom treden afschuifvlakken in het materiaal op in richtingen die een hoek van $(45^\circ + \phi/2)$ met de horizontaal maken, waarbij ϕ de inwendige wrijvingshoek van het materiaal is. In sommige gevallen is dit duidelijk aan een bezweken kolom te zien. Zie hiervoor figuur 2, waar een vrijstaande kolom is bezweken van een vrijstromend materiaal dat na enige tijd te zijn belast toch een eigen sterkte bleek op te bouwen.

Vrije kolomtest

De uit de verschillende vrije kolomproeven te meten combinaties van verstevigingsdruk σ_1 en vrije druksterkte σ_p leveren in principe ook een soort flowfunctie van het materiaal op, zoals ook bij de uitgebreide shearcell-metingen wordt gevonden. Vergelijking van de resultaten uit de vrije kolomtests meestal lager uitkomen. Dit wordt veroorzaakt doordat de versteviging van het materiaal bij een vrije kolomtest alleen plaatsvindt door een verticale belasting, terwijl bij sheartests de versteviging plaatsvindt in een zogenaamde steady state bezwijkconditie. Dit laatste komt beter overeen met de situatie in een silo en leidt meestal tot een grotere sterkte van het materiaal..

De gegevens uit een vrije kolomtest zijn dus op zich niet bruikbaar voor het ontwerpen van opslagapparatuur. Zij zijn daarentegen wel geschikt voor het vergelijken van materialen of als kwaliteitscontrole. Daarnaast is het bij dit type metingen ook mogelijk de invloed van de tijd, vochtgehalte en/of de temperatuur op de sterkte van het stortgoed na te gaan.

teitscontrole. Daarnaast is het bij dit type metingen ook mogelijk de invloed van de tijd, vochtgehalte en/of de temperatuur op de sterkte van het stortgoed na te gaan.

Carr-indexen

In de zeventiger jaren is door Carr een aantal vrij simpele tests gecombineerd op basis waarvan het stromingsgedrag van het materiaal kon worden gekwantificeerd. De tests zijn geschikt voor vrij stromende of licht cohesieve materialen. Het gaat in deze om een achttal metingen en twee hierop uitgevoerde berekeningen. De uit te voeren tests omvatten:

- meting van de angle of repose.

Hierbij wordt het materiaal uit een trechter op een horizontale plaat gestort en wordt de helling van de gevormde materiaalloop gemeten.

- meting van de angle of fall.

De storthoop uit de vorige test wordt aan nauwkeurig opgelegde impulsschok onderworpen. De dan gevormde taludhoek wordt gemeten.

- berekening van de angle of difference.

Deze hoek is het verschil tussen de angle of repose en de angle of fall.

- meting van de loose bulk density

Hierbij wordt een maatbeker gevuld via een (trillende) trechter of goot, en het teveel aan materiaal wordt afgeschraapt gelijk met de bovenkant van de beker. Uit het vulgewicht en het bekende beker-volume wordt de dichtheid berekend. De meting wordt een aantal keren herhaald en het resultaat wordt gemiddeld.

- meting van de tapped (of packed) bulk density.

Hierbij wordt een identieke maatbeker gebruikt maar nu met een extra opzetstuk. Dit geheel wordt weer gevuld en vervolgens een aantal malen over een vaste hoogte opgetild en weer laten vallen. Wanneer geen verandering in het nivo meer optreedt, wordt het opzetstuk eraf gehaald, afgeschraapt en het vulgewicht gemeten en de dichtheid berekend.

- berekening van de compressibility.

Deze wordt berekend uit de loose bulk density (L) en de tapped bulk density (P) volgens de formule $C = 100 (P - L) / P$.

- meting van de cohesion.

De cohesie wordt niet bij elk materiaal gemeten. Hiervoor is een keuzetabel opgesteld die aangeeft of het zinnig is de cohesie te meten. De cohesie wordt berekend uit de hoeveelheid materiaal die op een drietal voorgeschreven zeven achterblijft.

- meting van de uniformity.

De uniformiteit wordt bepaald indien de cohesie niet kan worden gemeten, dus bij wat grotere, niet-cohesieve materialen. De uniformiteit wordt berekend uit $U = d_{60} / d_{10}$, waarbij de deeltjesgroottes d_{60} en d_{10} via zeefanalyse worden bepaald.

- meting van de angle of spatula.

Hierbij bevindt zich een horizontale strip in een met materiaal gevulde bak. Deze strip wordt langzaam uit het materiaal getild, waarbij een bergje materiaal op de strip blijft liggen. De hellingshoek van dit materiaal wordt gemeten, θ_1 . Vervolgens wordt een gecontroleerde impulsschok aan de strip gegeven, waarna weer de hellingshoek wordt gemeten, θ_2 . Het gemiddelde van θ_1 en θ_2 is de angle of spatula θ .

- meting van de dispersibility.

Hierbij valt 10 gram van het testmateriaal van een vaste hoogte via een valbuis op een horlogeglas, en wordt de hoeveelheid die op het glas blijft liggen gemeten. De dispersibiliteit volgt uit: $D = (10 \text{ gr} - \text{hoeveelheid op glas}) / 10$

Aan de hierboven gemeten eigenschappen worden volgens een vaste methode vermenigvuldigingsfactoren toegekend, waarmee dan indexcijfers ontstaan die een maat moeten zijn voor de flowability en floodability van het materiaal.

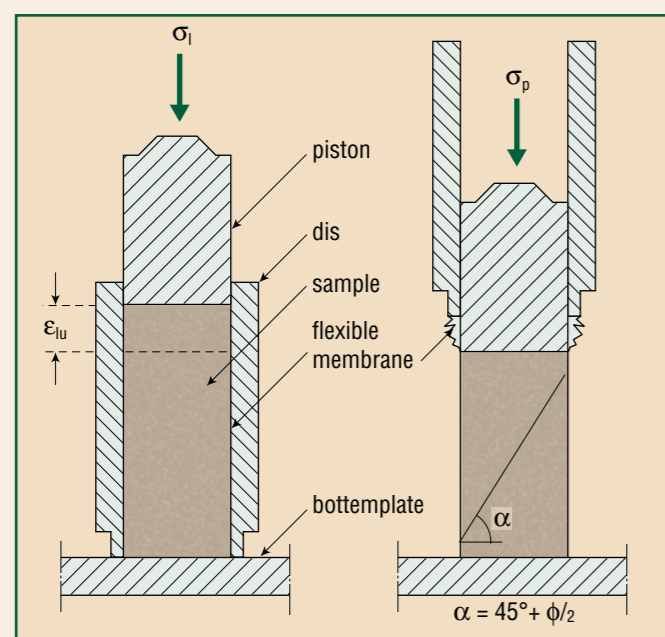
De gevonden indexcijfers hebben op zich niet direct een fysieke betekenis, maar op deze wijze kan wel een relatieve ranking van diverse producten worden opgesteld die samen met reeds opgedane praktische ervaring inzicht geeft in het stromingsgedrag of ander gedrag voor een speciale toepassing. Een nadeel is dat de resultaten wat afhankelijk zijn van de ervaring van het meetpersoneel en de gebruikte apparatuur.

Een aantal van de gemeten eigenschappen is uiteraard ook op zichzelf bruikbaar. Zo is de loose bulk density te gebruiken als benadering voor de benodigde opslagruimte in kleine silo's en bigbags, de tapped bulk density indien bij het vullen van pakken en zakken trillingen worden toegepast. De angle of repose geeft een maat voor het talud dat in silo's of bij storthopen wordt gevormd. Het is daarnaast een zeer ruwe benadering voor de inwendige wrijving van het materiaal.

Onafhankelijk

Door de firma Hosokawa Micron is in de loop der tijd een tester ontwikkeld (zie figuur 3) waarmee de hiervoor beschreven metingen volgens Carr gecontroleerd kunnen worden uitgevoerd. Door toepassing van meer geautomatiseerde meet- en rekenmethodes en geavanceerde fototech-

Figuur 1: Principe van de Porsgrun uniaxiaaltester, met links de versteviging onder spanning σ_1 , en rechts de 'vrije kolom' test met de ongesteunde druksterkte σ_p .



A)



B)



Figuur 2: Voorbeeld van een echte vrije kolom test, met A) de opgebouwde kolom, en B) de bezweken kolom.

nieken, zijn de meetresultaten in grote mate onafhankelijk van het meetpersoneel en beter reproduceerbaar geworden. Evenals bij Carr moeten de metingen leiden tot indexen die een relatieve maat aangeven voor de flowability (hoe makkelijk stroomt een product) en de floodability (hoe gevoelig is het product voor het optreden van instabiel, vloeistofachtig, oncontroleerbaar stroomgedrag). Zo kan op basis van de flowability-index en ervaring worden voorspeld in hoeverre stroombevorderende hulpmiddelen in een silo nodig zullen zijn. De poedertester biedt de mogelijkheid om alle bovengenoemde metingen uit te voeren en bepaalt via ingebouwde software zelf de uiteindelijke indices voor flowability en floodability. Volledige karakterisering van een monster vergt ca 0,5 tot 1 kg materiaal en duurt ca 30 tot 45 minuten.

Het gebruik van deze apparatuur is met name nuttig bij kwaliteitscontrole, R&D-activiteiten, en in het geval van troubleshooting.

Overige gestandaardiseerde testmethodes

In de laatste decennia is door de ASTM (American Society for Testing Materials) een aantal meetmethoden als norm opgenomen. Naast zeer uitgebreide meetvoorschriften voor de tests worden



Figuur 3: De Hosokawa Micron poedertester voor het uitvoeren van de Carr-tests.

hierin ook de te gebruiken apparatuur en mogelijke toepassingen beschreven. Het betreft hier de Carr-tests en de loose en tapped bulk density. Verder wordt een test beschreven voor het verband tussen druk en dichtheid van materialen. Hierbij wordt een ronde meetcel gebruikt (diameter $D > 3 \times$ Hoogte) die gevuld wordt met het testmateriaal. Het monster wordt

via een deksel en een gewichtsjuk belast met een toenemende belasting. Via een opnemer wordt de verplaatsing van het deksel, en dus de verandering van het volume, gevolgd. Uit het volume en de te wegen vulmassa wordt de dichtheid als functie van de opgelegde druk berekend. Een voorstelling van dit type meting geeft figuur 4.

Complex

In dit en het vorige artikel is een aantal vaak gebruikte meetmethoden beschreven waarmee eigenschappen van een stortgoed kunnen worden gemeten. Naast de hier beschreven tests zijn er nog vele andere ontwikkeld, die echter

in het beperkte kader van dit artikel niet aan de orde kunnen komen. Door veel onderzoekers wordt eigenlijk nog vaak gezocht naar een simpele test waarmee in een keer alle relevante eigenschappen kunnen worden gemeten. Dit zal ons inziens echter altijd wel een fictie blijven. Het gedrag van stortgoed is nu eenmaal zeer complex en afhankelijk van zoveel parameters dat een simpele test nooit meer dan een klein deel van de waarheid prijs zal geven. Het is dus zaak om in een gegeven situatie dié test te kiezen die de omstandigheden van het probleem zo goed mogelijk benadert en de hiermee te bepalen gegevens in de praktijk toe te passen. Het kan hierbij niet genoeg worden benadrukt dat het materiaal waaraan wordt gemeten ook werkelijk overeen moet komen met het materiaal in de praktijk, zowel in vorm en afmetingen als qua vochtgehalte en temperatuur. Het meten aan een monster dat chemisch misschien wel identiek is, maar fysisch hiervan afwijkt heeft uiteraard geen enkele zin. Ten slotte dient nog te worden opgemerkt dat alle hier behandelde testmethoden te maken hebben met situaties waarbij geen al te hoge transportsnelheden optreden en het materiaal voldoende tijd krijgt om eventuele ingesloten lucht te laten ontwijken. Indien dit niet het geval is, kunnen grote wijzigingen van het stromingsgedrag optreden. Hierop zal in een toekomstig artikel nader worden ingegaan. ■

Figuur 4: Voorbeeld van apparatuur voor het meten van het verband tussen belasting en dichtheid.

