

Meten is weten maar weet wat je meet

Er zijn de laatste vijftig jaar veel artikelen verschenen over de wijze waarop en testapparatuur waarmee diverse eigenschappen van stortgoed kunnen worden gemeten. Welke eigenschappen in een bepaald geval moeten worden gemeten, hangt af van het doel waarvoor de gevonden gegevens worden gebruikt.

Ir. Gerard Haaker
en Ir Piet van der
Kooi

In sommige gevallen gaat het bij het meten om gegevens voor het ontwerpen van opslag- en transportmaterieel. De ene keer alleen als een vorm van kwaliteitscontrole, de andere keer om vast te stellen welke van een aantal materialen de slechtste loopeigenschappen heeft. Daarnaast zijn vaak gegevens nodig als input van modelberekeningen waarmee het gedrag van het stortgoed in procesapparatuur kan worden voorspeld.

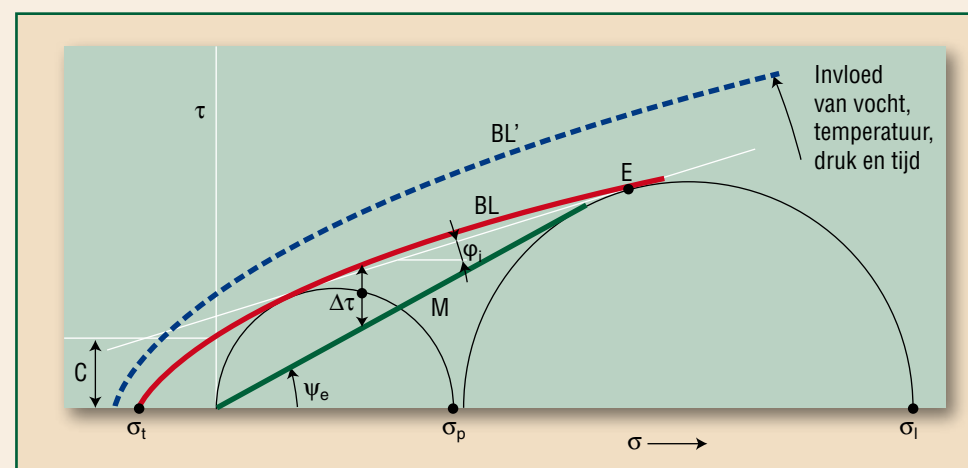
Wanneer materiaal door een silo stroomt, zal er op een gegeven moment ook beweging in het materiaal zelf moeten plaatsvinden. In het cilindrisch deel van de silo zakt het nog wel als één blok naar beneden maar eenmaal in de trechter moet het materiaal vervormen om door de steeds nauwer wordende doorgang te stromen. Dan blijkt dat in het materiaal in specifieke richtingen diverse glijvlakken ontstaan van langs elkaar schuivende lagen. We zeggen in dit geval dat het materiaal bezwijkt, dan wel stroomt. Of dit inderdaad gebeurt, met andere woorden of het materiaal echt door de trechter wil stromen, hangt enerzijds af van de krachten (of beter spanningen) die op het materiaal werken en anderzijds van de eigen sterkte van het product. Wanneer deze eigen sterkte te groot is, zal er geen beweging in het materiaal optreden en stroomt de silo dus niet, of niet meer.

Eigen sterkte

Om een voorstelling te krijgen van wat met eigen sterkte wordt bedoeld, vergelijken we het proces met dat van een sneeuwbal. Wanneer we een handje sneeuw nemen, kunnen we daar een bal van maken door de sneeuw samen te persen. Hoe harder we persen, hoe sterker ook de sneeuwbal zal worden en hoe meer moeite het zal kosten om de bal weer te vervormen of stuk te krijgen. De meeste cohesieve stortgoederen gedragen zich in een silo net zo. Door de drukken in de

silos wordt de samenhang van het materiaal sterker. Hoe hoger deze drukken, hoe hoger ook de eigen sterkte van het stortgoed. Waar we in het geval van een silo echt in geïnteresseerd zijn, is de eigen sterkte van het materiaal wanneer het een obstructie voor het stromen dreigt te vormen. Bij massastroming is dit het geval wanneer stabiele stortgoedbruggen in de conus worden gevormd. Bij kernstroming is dit de vorming van een stabiele schacht. In beide gevallen wordt de eigen sterkte van het materiaal in de mogelijke obstructie weergegeven door de ongesteunde druksterkte σ_p (unconfined yield strength). Deze druksterkte is ook weer afhankelijk van de druk waaronder het materiaal heeft gestaan, in casu de grootste hoofdspansing σ_1 . Het verband tussen σ_1 en σ_p wordt meestal aangeduid met de flow-functie FF en is dus een belangrijke grootheid die moet worden gemeten.

Hoewel het in principe mogelijk is punten van deze flow-functie rechtstreeks te meten, bestaat er geen standaardapparatuur die dit mogelijk maakt. In plaats daarvan wordt de flow-functie in de praktijk afgeleid van een serie zogenaamde bezwijklijnen (yield loci), die wel met standaardapparatuur kunnen worden gemeten. Een voorbeeld van een bezwijklijn (BL) is aangegeven in figuur 1. Deze lijn geeft de relatie tussen normaalspanning σ en schuifspanning τ waarbij beweging langs glijvlakken in het materiaal mogelijk is. Bij cohesieve materialen zijn de bezwijklijnen meestal wat gekromd en bestaat er een eindpunt van de lijn. Ook een dergelijke bezwijklijn is weer afhankelijk van de spanning die op het materiaal heeft



Figuur 1: Bezwijklijn (BL) van een cohesief stortgoed met afgeleide grootheden.

gewerkt, de grootste hoofdspansing σ_1 die behoort bij het eindpunt van de lijn. Dit eindpunt geeft de situatie aan van continu bezwijken (steady state conditie), overige punten van de lijn geven het begin van bezwijken weer.

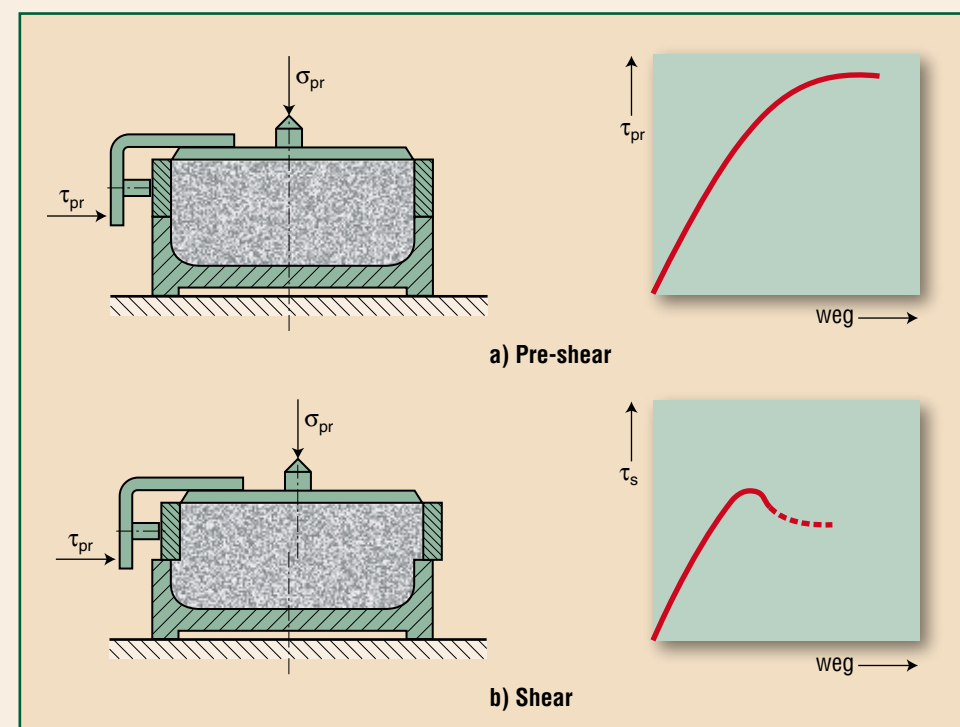
Verdere grootheden die van een bezwijklijn kunnen worden afgeleid, zijn de inwendige wrijvingshoek ϕ_i en de effectieve inwendige wrijvingshoek ϕ_e . Een andere belangrijke grootheid is de wandwrijving die het verband tussen normaal- en schuifspanning aangeeft wanneer een stortgoed langs de wand beweegt. Ook deze waarde is vaak wat drukafhankelijk. Bij sommige combinaties van stortgoed en wand treedt een verschil in wandwrijving op bij continu bewegen (dynamische wrijving) en het op gang komen van de beweging (statische wrijving). Beide waarden zullen dan moeten worden gemeten.

Meetapparatuur

In de praktijk worden twee soorten testers gebruikt om de bezwijklijnen van een stortgoed te meten. Het oudste, en tot nu toe nog het meest gebruikte type, is de zogenaamde Jenike sheartester, een translend afschuifapparaat dat is afgeleid van in de grondmechanica gebruikte apparatuur. Wat modernere uitvoeringen zijn roterende sheartesters, waarvan de Schulze-ringsheartester en de Peschl-tester de standaarduitvoeringen zijn.

De Jenike sheartester

Het principe van de Jenike tester is weergegeven in figuur 2. Het apparaat bestaat uit een vaste onderbak (diameter



Figuur 2: Principe Jenike-sheartester en testfases.

ca 100mm, hoogte ca 15mm), waarop een bovenring wordt gezet met dezelfde afmetingen. Dit geheel wordt laagsgewijs gevuld met het te meten stortgoed. Tijdens de vulprocedure wordt op de bovenring nog een extra vulring geplaatst en wordt het materiaal wat voorverdicht. Daarna wordt de vulring verwijderd, het teveel aan materiaal afgeschraapt en een bovendecksel aangebracht die met een juk waarop gewichten staan, wordt belast met een normaalkracht N_{pr} . Via een mechanische aandrijving wordt vervolgens de bovenring met materiaal verschoven ten opzichte van de onderbak zodat een horizontaal afschuifvlak in het monster ontstaat op het scheidingsvlak van bak en ring. De voor het afschuiven benodigde schuifkracht S zal hierbij aanvankelijk toenemen. Maar bij het bereiken van voldoende verplaatsing neemt deze een constante waarde S_{pr} (figuur 2a) aan. Het monster bevindt zich nu in de steady state bezwijkconditie waarbij spanningen (σ_{pr} , τ_{pr}) en dichtheid constant blijven. Deze situatie geeft het eindpunt van de bijbehorende bezwijklijn weer. (NB: De bijbehorende normaal- en schuifspanningen σ en τ kunnen worden berekend door de krachten N en S te delen door het bekende dwarsoppervlak van de testcel). Vervolgens wordt de normaalkracht ver-

laagd tot een waarde N_s en de afschuiving voortgezet. De bijbehorende schuifkracht S zal nu een maximumwaarde S_s bereiken en daarna afnemen (figuur 2b). De waarden N_s en S_s (c.q. σ_s , τ_s) geven een situatie van beginnend bezwijken weer en leveren één punt van de bezwijklijn op. Tevens wordt in elke test de hoeveelheid stortgoed in de meetcel gewogen. Samen met de bekende celinhoud levert dit de bij de bezwijklijn horende dichtheid van het materiaal op.

Voor het meten van een gehele bezwijklijn zal de totale meetprocedure met steeds verse monsters bij dezelfde waarde van N_{pr} , doch ten minste drie verschillende

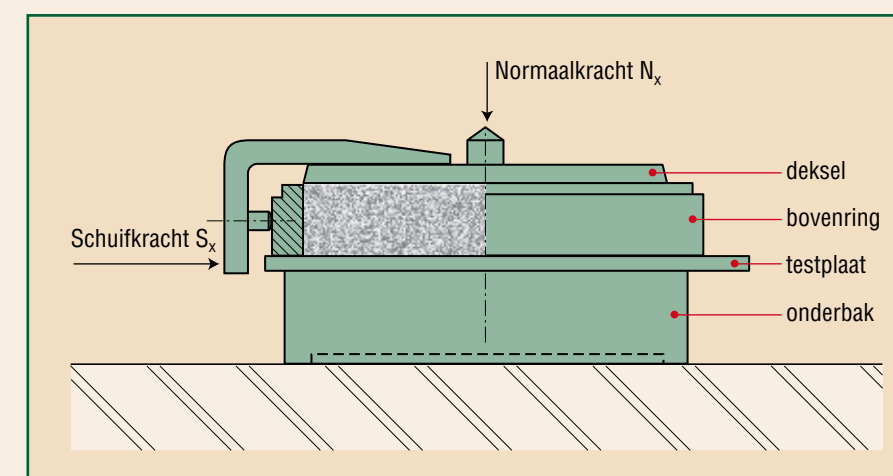
waarden van N_s moeten worden herhaald. Omdat voor het beschrijven van het bezwijkgedrag vaak drie bezwijklijnen bij verschillende waarden van N_{pr} moeten worden gemeten, lijkt evident dat voor dit soort metingen nogal wat tijd nodig is.

Wandwrijving

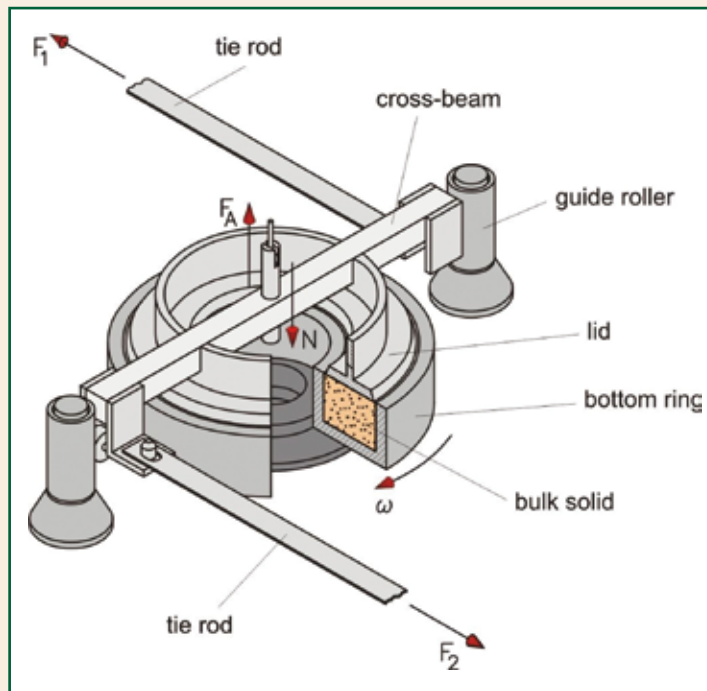
Ook de wandwrijving kan met deze tester worden gemeten. Hiertoe wordt op de onderbak een plaatje van het te onderzoeken wandmateriaal aangebracht waarop de bovenring met stortgoed komt te liggen, zie figuur 3. Via het deksel en het gewichtsjuk wordt het monster met een verticale kracht N_x belast en vervolgens over de testplaat geschoven. De benodigde afschuifkracht zal hierbij meestal snel een constante waarde S_x bereiken. De normaalkracht N_x wordt nu in een aantal stappen verlaagd, waarbij steeds de bijbehorende waarde van S_x wordt gemeten. De gevonden combinaties N_x , S_x (of beter de hieruit te berekenen spanningen σ_x , τ_x) zijn punten van de zogenaamde wandbezwijklijn (wall yield locus) die het wrijvingsgedrag tussen wand en stortgoed beschrijft. Het meten van de wandbezwijklijn gaat aanmerkelijk sneller dan het meten van een (inwendige) bezwijklijn, omdat meestal in één lange meting een complete wandbezwijklijn kan worden gemeten. Door de altijd optredende spreiding in de meetresultaten, wordt in de praktijk meestal een tweede meting uitgevoerd.

Nadelen

Hoewel de Jenike-tester een veel gebruikt apparaat is met een duidelijk beschreven standaard meetprocedure, is er in de



Figuur 3: Jenike-sheartester bij meting van de wandwrijving.



Figuur 4: Principe van de Schulze-tester.

praktijk toch een aantal problemen. De belangrijkste hiervan zijn:

- de vaststelling wanneer het testmonster precies de steady state fase heeft bereikt, is soms lastig en ook de constructie van de bezwijklijn door de gemeten punten ligt niet altijd eenvoudig. Dit is in de praktijk ten dele op te lossen door de meetsignalen rechtstreeks aan een computerprogramma toe te voeren.
- de totale afschuifweg van de bovenring is maximaal 6mm. Bij verdere afschuiving ligt de ring te excentrisch t.o.v. de onderbak en worden de resultaten onbetrouwbaar. Binnen deze 6mm is het soms nauwelijks mogelijk om zowel een steady state als een bijbehorend begin-bezwijkten te realiseren. Kunstgrepen zijn dan nodig om toch een redelijk betrouwbare meting te krijgen.
- de afmeting van de meetcel van ca 100mm maakt dat het apparaat niet geschikt is voor metingen aan materialen met deeltjes groter dan ca 4mm. In de praktijk is dit geen echt bezwaar omdat deze grote deeltjes niet de sterkte van een materiaal bepalen, zodat deeltjes groter dan 4mm meestal zonder bezwaar kunnen worden uitgezeefd. Soms worden ook wel grotere cellen toegepast, wanneer materialen met zeer veel grote deeltjes moeten worden gemeten.

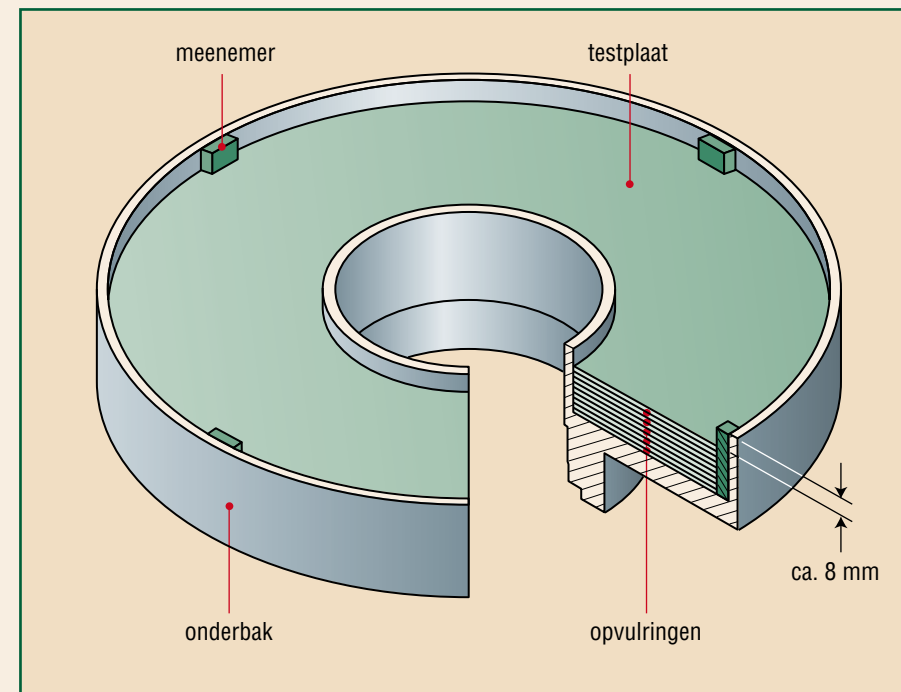
De roterende sheartesters

De meest gebruikte ring-sheartester is de Schulze tester, waarvan het principe is aangegeven in figuur 4. Het te testen

materiaal is hier opgesloten in een annulaire ruimte van een draaibare onderbak. Op het materiaal wordt een deksel geplaatst met een zeer ruwe onderkant die belet dat het materiaal langs het deksel kan schuiven. Door nu de onderbak met materiaal te roteren en het deksel vast te houden, wordt in het materiaal weer een afschuifvlak gevormd. De normaalkracht N op dit afschuifvlak volgt uit de belasting van het deksel, de afschuifkracht S wordt bepaald door de krachten te meten die nodig zijn om het deksel vast te houden.

Met een roterende sheartester worden in principe dezelfde metingen uitgevoerd als met de Jenike-tester. Alleen is hierbij de rechtlijnige verplaatsing vervangen door een rotatie. Het gevolg

hiervan is dat er nu in feite een onbeperkte afschuifweg is, in tegenstelling tot de 6mm bij de Jenike-tester. Dit biedt in de praktijk twee voordelen. De eerste is dat er altijd ruimte genoeg is om zowel een steady state als een begin-bezwijkten te realiseren. Maar ten tweede kan met dezelfde vulling van de tester een aantal tests achter elkaar worden uitgevoerd. Direct na elk punt van begin-bezwijkten kan immers de belasting weer worden verhoogd en een nieuwe steady state worden bereikt, gevolgd door een nieuwe meting.



Figuur 5: Schulze testcel zoals gebruikt voor meting van de wandwrijving.

Toch zal ook hier het testmonster geregeld moeten worden verversd omdat tijdens de meting altijd een zekere mate van slijtage, degradatie of segregatie van het materiaal kan optreden.

De wandwrijving wordt bij deze tester gemeten door in de annulaire ruimte van de onderbak een aantal opvullingen aan te brengen waarop een ringvormig plaatje van het te testen wandmateriaal wordt bevestigd (zie figuur 5). Op deze testplaat komt een ca 8mm dik laagje stortgoed te liggen met daar op het belaste ruwe bovendecksel. Door rotatie van de onderbak met de testplaat en vasthouden van het stortgoed door het bovendecksel vindt afschuiving plaats van het stortgoed langs de testplaat.

Van de Schulze tester zijn een aantal uitvoeringen beschikbaar die kunnen verschillen in celgrootte en de mate waarin de apparatuur is geautomatiseerd en/of computergestuurd.

Een beeld van een kleine tester, waarbij voor een meting slechts een hoeveelheid testmateriaal van 30 ml voldoende is, geeft figuur 6.

De Peschl tester heeft een wat andere uitvoering. Hij bestaat in principe uit een ronde onderbak met daarboven een even grote bovenbak. Het geheel wordt gevuld met het te testen stortgoed en belast via een ruw bovendecksel. Door rotatie van de onderbak en het vasthouden van bovenbak en deksel, ontstaat een afschuifvlak in het materiaal op het scheidingsvlak



Figuur 6: Schulze-tester RST-XS, ontwikkeld voor zeer kleine testmonsters.

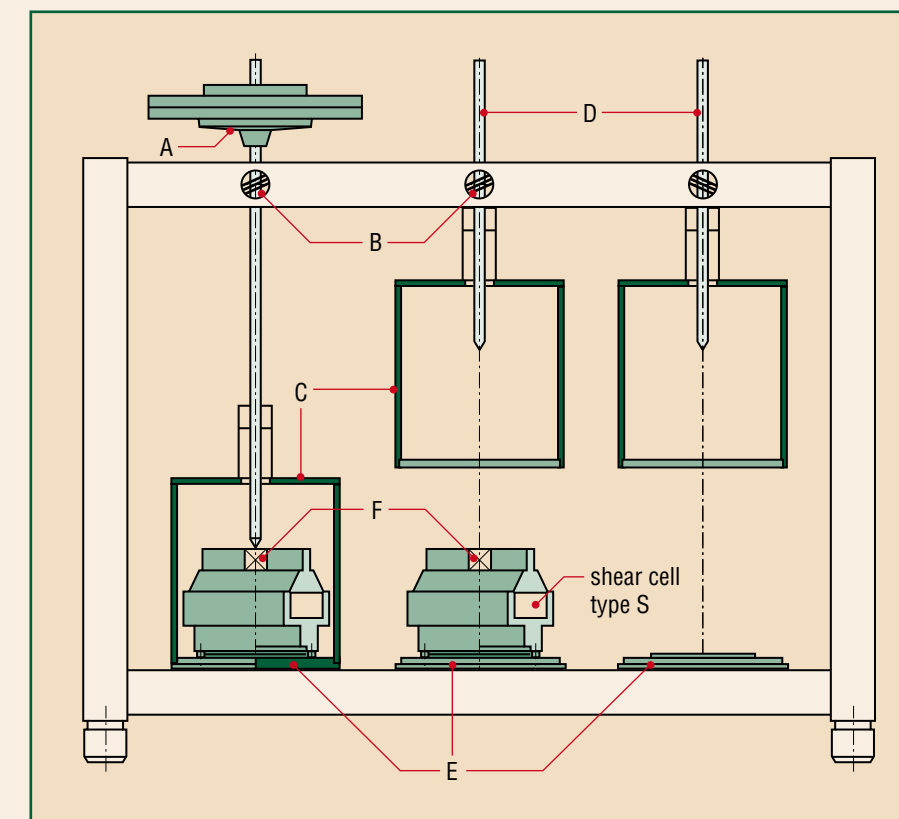
van boven- en onderbak. Uit de verticale belasting en het gemeten moment dat nodig is voor de rotatie van de onderbak, kunnen de spanningen in het afschuifvlak worden berekend. De wandwrijving kan worden gemeten door op de onderbak een testplaatje aan te brengen zodat bij rotatie dan afschuiving langs deze testplaat optreedt. Met de Peschl tester kunnen in principe dezelfde grootheden worden gemeten als met de andere testers. Ook deze tester kent verschillende uitvoeringen qua grootte.

Het bezwijkgedrag beïnvloeden

Voor alle bovengenoemde testers geldt dat de te meten grootheden door een aantal parameters worden beïnvloed. De belangrijkste hierbij zijn de korrelgrootte en -verdeling, de temperatuur en het vochtgehalte van het materiaal. Betrouwbare monsters moeten de condities van het te sileren materiaal zo goed mogelijk weergeven. Zo nodig moet hiervoor ook de meetapparatuur qua temperatuur en grootte worden aangepast en het vochtgehalte van de testmonsters geregeld worden gecontroleerd.

Een apart element is de invloed van de tijd op het gedrag van stortgoed. Wanneer een stortgoed gedurende enige tijd onder druk staat, zal vaak de bijbehorende eigen sterkte aanzienlijk groter worden. Dit is de reden van het maandagochtendgedrag van silo's die na een weekendje stilstand niet of moeilijk op gang zijn te krijgen. Met dit tijdsgegedrag moet dus ook tijdens de metingen rekening worden gehouden. Dit gebeurt in de praktijk door na de

continue afschuiffase (steady state) het monster gedurende de gewenste tijd onder dezelfde belasting te laten staan, en pas daarna bij lagere belasting een punt van begin-bezwijkten te meten. Dit gebeurt meestal in een zogenaamde tijdconsolidatie-bank (figuur 7) waar meerdere cellen gedurende verschillende tijden kunnen worden belast. Om te voorkomen dat het vochtgehalte tijdens deze langere belasting verandert, worden de cellen zonnodig met een plastic kap vocht dicht afgesloten.



Figuur 7: Tijdconsolidatiebank Schulze-tester. A: gewichten B: blokkeerschroeven C: plastic afdekkap D: belastingstang E: celplaat F: centreerpunten

Gedetailleerd

De hierboven beschreven testers worden in het algemeen alleen gebruikt in de wat grotere bedrijfslaboratoria dan wel bij consulting firma's die zich hierin hebben gespecialiseerd. Aanschaf van deze testers heeft eigenlijk alleen zin wanneer er voldoende emplooi voor deze apparatuur is, zodat er ook een redelijke know-how inzake het gebruik kan worden opgebouwd. De meetprocedures zijn zeer gedetailleerd beschreven en als standaardtests ondermeer opgenomen in de Astm-codes. ■

In dit en een volgend verhaal wordt ingegaan op de meest gangbare meetmethoden, de bijbehorende testers en wat je met de gevonden getallen wel of niet kunt doen. We beperken ons hierbij tot testers waarvan de resultaten direct bruikbaar zijn voor toepassing in de praktijk. De meer geavanceerde apparatuur, zoals bijvoorbeeld de 'true biaxial tester' zijn meer bedoeld voor algemene research naar het gedrag van stortgoed, en vallen buiten de scope van deze artikelen.

Deze eerste aflevering handelt over apparatuur en methoden waarmee een tamelijk compleet beeld van het bezwijkgedrag van een materiaal wordt verkregen. Deze gegevens zijn nodig om een qua sterkte en werking betrouwbare silo te kunnen ontwerpen. In een volgend artikel zal de nadruk meer liggen op veelal simpelere testmethoden waarmee een beperkt aantal specifieke grootheden kan worden gemeten of een algemene indruk van het stromingsgedrag kan worden gekregen.