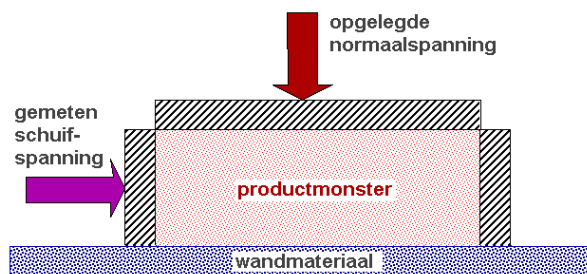


Het meten van wandwrijving

Niet zo simpel als het lijkt

Als een gezamenlijk project van de Europese Werkgroep op het gebied der Bulktechnologie, zijn door 13 laboratoria wereldwijd wandwrijvingen gemeten met een Jenike sheartester aan 9 combinaties van bulkgoed en wand. Alle gebruikte wandplaten en bulkmaterialen werden vanuit één bron gedistribueerd over de deelnemers. Verder was de te volgen testprocedure uitgebreid voorgeschreven en besproken om eventuele fouten tengevolge van afwijkende interpretaties en/of testmethodes uit te sluiten. De resultaten van deze metingen zullen in dit verhaal worden besproken. De voornaamste conclusie uit het onderzoek is dat de op deze wijze bepaalde waarden van de wandwrijving, mits met enige voorzichtigheid gehanteerd, kunnen worden gebruikt bij het ontwerpen van silos en hoppers. Tevens is duidelijk geworden dat meer onderzoek naar wrijvingsgedrag en meetmethoden nodig is om de opgetreden verschillen te kunnen verklaren.

door: ir. G. Haaker



Introductie

De wandwrijving tussen een stortgoed en de aanliggende wand speelt een belangrijke rol in de stortgoedtechnologie. Zo wordt met name het stromingspatroon dat optreedt in een opslagsilo hoofdzakelijk bepaald door de wandwrijving. Ook de belasting op silowanden en bodem, en daarmee de benodigde wandsterkte, zijn sterk afhankelijk van de optredende wandwrijving. Verder is in vele processen de wandwrijving een belangrijke factor voor het benodigde mechanische vermogen voor een proces, en in combinatie met de optredende snelheden wordt hierdoor tevens de voor slijtage beschikbare energie bepaald.

In het verleden is wandwrijving veelal als een tamelijk simpele grootheid opgevat.

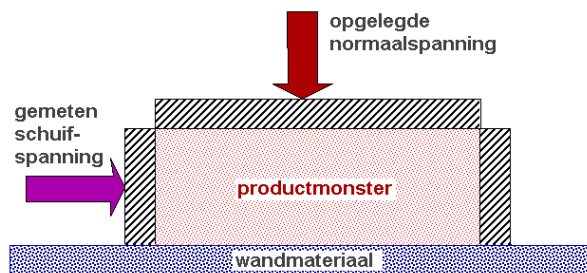
Wandwrijvingscoëfficiënten werden meestal als constanten beschouwd, die met eenvoudige sleepproeven konden worden bepaald, of zelfs als percentage uit de inwendige wrijving konden worden afgeleid. Nieuwere inzichten hebben echter aangetoond dat de wandwrijvingscoëfficiënt van een zekere stortgoed/wandcombinatie niet een unieke en constante waarde is, maar afhangt van zowel de eigenschappen van stortgoed en wand, als van de optredende omstandigheden qua snelheid, druk, temperatuur etc.. Dit impliceert dat metingen die het wrijvingsgedrag in een of ander proces moeten voorspellen, dan ook onder vergelijkbare procescondities moeten worden gemeten.

Voor het meten van wandwrijving zijn verschillende testers bekend. Deze verschillen onderling echter nogal qua meetprincipe, glijnsnelheden, spanningsniveau, invloedmogelijkheid van de tijd, inloopprocedures etc., zodat al deze apparatuur in wezen haar eigen specifieke toepassingsgebied heeft. Hoewel in de afgelopen jaren diverse publicaties over wandwrijving zijn verschenen, is er eigenlijk nooit een duidelijke vergelijking van deze methoden en hun toepassingsgebied gemaakt. Om deze reden besloot de WPMP (Working Party on the Mechanics of Particulate Solids) in 1994 om een project op dit gebied op te zetten, waarin de diverse testmethoden zouden worden onderzocht op hun betrouwbaarheid en toepassingsgebied. Als eerste stap hierin werd gekozen voor de zg. Jenike tester, die algemeen wordt beschouwd als de standaardtester voor het ontwerpen van silo's.

Testmethode en stortgoed/wand combinaties

De Jenike tester en de testprocedure

De Jenike sheartester is een translerende tester, waarin het te testen stortgoed is opgesloten in een stijve metalen ring en in verticale zin wordt belast via een bovenplaat waarop een juk met gewichten rust. Het belaste stortgoedmonster wordt vervolgens afgeschoven over zichzelf (voor het meten van inwendige wrijving) of over een wandplaat, waarbij de benodigde afschuifkracht wordt gemeten. Een schematische voorstelling van de tester is gegeven in figuur 1. De standaard testprocedure voor deze tester is uitgebreid beschreven door Jenike en in een later stadium enigszins aangepast gepubliceerd door de onderhavige Werkgroep als "Standard Shear Tester Technique" SSTT.



De Jenike sheartester (schematisch), zoals toegepast voor het meten van wandwrijving.

De testprocedure bevat in het kort de volgende stappen:

- het reinigen van de testplaat en een "inloopprocedure" waarbij de plaat handmatig met het stortgoed wordt ingewreven.
- het plaatsen van de testplaat, de ring en een extra vulring in de tester.
- het vullen van ring en vulring met het stortgoed en aanbrengen van het (speciale rotatie-) deksel.
- verticaal belasten via het deksel en homogeniseren van het monster door het belaste deksel 5 tot 10 maal over ca 45 graden te roteren (zogenaamde twisten).
- verwijderen van de gewichtsbelasting, deksel en vulring en afschrapen van het monster gelijk aan de bovenkant van de ring.
- aanbrengen van het afschuifdeksel en de verticale gewichtsbelasting σ_i , waarna de ring voorzichtig en roterend iets wordt gelift, om contact tussen plaat en ring te voorkomen.
- het starten van de aandrijving, waardoor het monster afschuift over de plaat, tot de benodigde afschuifspanning τ_i constant is geworden.
- verlagen van de gewichtsbelasting σ_i en verder afschuiven tot een nieuwe constante waarde van de afschuifspanning τ_i .
- deze stapsgewijze verlaging van σ_i wordt voortgezet tot tenminste zes $\sigma_i - \tau_i$ relaties zijn gemeten.

In ons testprogramma werd de SSTT testprocedure zo nauwkeurig mogelijk aangehouden, maar werd naast metingen met afnemende verticale belasting ook met toenemende belasting gemeten. In overeenstemming met de SSTT werden 6 waarden voor σ_i in het bereik 1 tot 15 kPa gekozen.

De gebruikte stortgoed/wand combinaties

Metingen zijn verricht met drie stortgoederen en drie testplaatjes, zodat 9 combinaties zijn gemeten. Alle stortgoedmonsters zijn vanaf één adres in gesloten vaatjes verzonden, terwijl ook de testplaatjes, steeds afkomstig uit één grotere moederplaat, vanuit hetzelfde adres naar de deelnemers zijn gestuurd.

De gebruikte materialen waren:

- fijn zand
- heavy soda ash (natrium carbonaat)
- BCR limestone (het EU referentie materiaal voor sheartests)

De testplaatjes:

- constructie staal
- roestvast staal 304 (3B finish)
- UHMWP "Perplas" (Ultra high molecular weight polyethylene)

Van alle materialen werd tijdens de metingen geregeld het vochtpercentage gemeten. Uit enkele verkennende metingen aan de polyethyleen plaatjes bleek een kleine invloed van de plaatrichting waarin werd gemeten. Op deze plaatjes waren zowel lichte groeven, als loodrecht hierop staande krasjes te zien, waarschijnlijk veroorzaakt door het productieproces van de platen. Om deze mogelijke invloed van de plaatrichting op de resultaten te elimineren werd besloten alle metingen in dezelfde plaatrichting uit te voeren.

Uitwerking van de meetresultaten

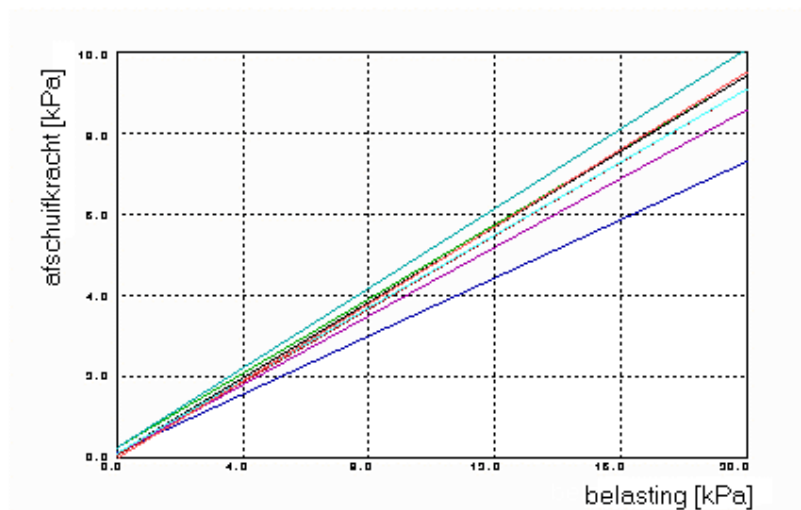
In de metingen is alleen rekening gehouden met de dynamische wrijvingswaarden. Bij een aantal combinaties trad een piek op in de waarde van de schuifspanning, alvorens een constante waarde werd bereikt. Deze maximale waarden, behorend bij de statische wrijving zijn in onze resultaten niet meegenomen. Alle metingen zijn tweemaal uitgevoerd, elke meetserie met een vers stortgoedmonster.

Enkele meetresultaten

Daar het uiteraard hier niet mogelijk is alle resultaten weer te geven, worden slechts de uitkomsten van enkele combinaties getoond, naast de algemene tendensen die uit de metingen volgen. Van alle combinaties zijn steeds de best passende rechte lijn benaderingen door de individuele laboratoriumresultaten bepaald (correlatie in alle gevallen $>0,99$) en de gemiddelde lijn (av.) door alle gezamenlijke resultaten (correlatie $>0,93$). Ter onderlinge vergelijking zijn uit deze lijnen de waarden van de wrijvingscoëfficiënt μ_W of wrijvingshoek ϕ_W afgeleid bij resp. 5 en 10 kPa.

Resultaten van constructiestaal en polyethyleen

Als voorbeeld is in figuur hieronder het resultaat weergegeven van zand tegen constructiestaal, voor afnemende belasting (down). De verschillen tussen de resultaten van de diverse laboratoria zijn duidelijk te zien, en leveren afwijkingen in de μ_W -waarden op van -22% tot +20% ten opzichte van de gemiddelde waarde.



De resultaten van de deelnemende laboratoria bij de meting van de wrijvingscoëfficiënt aan dezelfde combinatie zand/constructiestaal bij afnemende belasting.

Metingen met dezelfde combinatie maar met oplopende belasting (up) geven vergelijkbare verschillen. De verschillen tussen up en down zijn tamelijk klein: individuele resultaten maximaal 10%, gemiddeld resultaat ca 2,5 %. De down metingen geven in het algemeen de hoogste uW-waarden.

De resultaten van beide andere materialen liggen in dezelfde orde. In het algemeen blijken afnemende belastingen hogere resultaten voor de wandwrijving op te leveren met maximale verschillen van 8 tot 23% voor de diverse combinaties. Deze resultaten laten zien dat de belastingsvolgorde invloed heeft op de optredende wrijvingen, die in de meeste gevallen niet kan worden verwaarloosd.

Een overzicht van de gemeten spreiding in de resultaten van de drie stortgoederen en de twee wandsoorten constructiestaal en polyethylene is gegeven in onderstaande tabel. Hier zijn de maximale afwijkingen (zowel in positieve als negatieve zin) en de gemiddelde absolute afwijking gegeven van de afzonderlijke labresultaten (wandwrijvingscoëfficiënt uW) t.o.v. de gemiddelde waarde uW_av van de gezamenlijke resultaten van alle laboratoria.

up en down	max. afwijking t.o.v. uW_av (%)		gem. absolute afwijking (%)
Zand	-22	+20	9,1
Soda ash	-17	+22	10,3
Limestone	-10	+18	5,9

Bovenstaande resultaten laten zien dat er substantiele afwijkingen optreden. De vraag is nu of er een logische verklaring voor deze afwijkingen is te vinden, bijvoorbeeld of typische invloeden van de afzonderlijke laboratoria een rol kunnen spelen, die er toe leiden dat sommige labs altijd de hoogste resultaten vinden en andere altijd de laagste. Als dit het geval is kan worden gekeken wat dan mogelijke redenen van de verschillen kunnen zijn. Om hier achter te komen is gebruik gemaakt van rangorde-cijfers. In elke testserie kreeg elk lab een rangorde cijfer van 1 tot 13, afhankelijk van de gemeten waarde van de wandwrijving (laagste resultaat=1, hoogste =13). Deze rangorde cijfers zijn voor elk afzonderlijk laboratorium per stortgoed gemiddeld, en uit deze gemiddelde waarde kan worden afgeleid of inderdaad sommige labs (bijna) altijd de hoogste dan wel de laagste resultaten vonden.

Uit de gemiddelden blijkt dat geen van de laboratoria steeds als hoogste dan wel laagste uit de bus komt, al zijn sommigen steeds wat onder en andere wat boven het gemiddelde. Een specifieke invloed van de afzonderlijke laboratoria blijkt dus niet aantoonbaar.

Opmerking:

De metingen van soda ash en limestone t.o.v. roestvast staal bleken al in een vroeg stadium merkwaardige resultaten op te leveren. Ondanks meerdere herhalingen van de metingen en uitgebreide discussies, bleek hier weinig verbetering in te komen. Nader en diepergaand onderzoek zal worden opgezet om na te gaan wat de reden hiervan kan zijn. De resultaten van deze combinaties zijn in het onderzoek verder niet meegenomen.

Invloed van de afwijkingen op praktische toepassingen

Gezien de op het eerste gezicht niet kinderachtige verschillen in de gemeten wandwrijving, is het zinnig om te kijken naar de bruikbaarheid van dergelijke resultaten in de praktijk. Een van de belangrijkste toepassingen is hier het ontwerpen van silo's. Bij het geometrisch ontwerp van hoppers wordt normaal een veiligheidsmarge van 3 tot 5 graden aangehouden voor de benodigde conushoek voor axiaalsymmetrische massastroming. Dit ter compensatie van de mogelijk in de praktijk optredende hogere wandwrijving. Uit de toe te passen theoretische grenslijnen voor massastroming (Jenike) kan worden afgeleid dat een toename van de wandwrijvingshoek ϕ_iW met 1 graad globaal leidt tot een afname van de halve hopperhoek α_c van 1,3 graden. Derhalve zal een veiligheidsmarge van 4 graden voor α_c leiden tot een toegestane afwijking in de wrijvingshoek ϕ_iW van ca 3 graden. (NB: hierbij zijn alleen negatieve afwijkingen, d.w.z. te laag gemeten wandwrijvingen van belang). Om nu een idee te krijgen van de betrouwbaarheid van de gemeten resultaten, indien toegepast voor hopperontwerp, zijn zowel de gemiddelde waarde van de wrijvingshoeken ϕ_iW_{av} (berekend uit alle resultaten voor een combinatie), en de maximale afwijkingen t.a.v. van het gemiddelde in tabel 1 weergegeven.

Combinatie	up			down		
	ϕ_iW_{av}	Max. afwijkingen		ϕ_iW_{av}	Max. afwijkingen	
Zand / Constr. staal	23,3	+2,2	-4,5	23,7	+4,1	-4,8 (3,0)
Soda / Constr. staal	24,0	+3,9	-3,5	24,1	+4,5	-3,7 (3,5)
Limest. / Constr. staal	28,5	+2,9	-2,0	29,1	+3,3	-2,2
Zand / hd. polyeth.	24,1	+2,3	-3,1	25,3	+3,2	-4,3 (1,6)
Soda / hd. polyeth.	26,3	+2,2	-1,8	27,4	+2,1	-2,9
Limest. / hd. polyeth.	32,3	+4,4	-2,1	33,7	+3,3	-2,4
Limest. / SS 304B	29,3	+2,6	-2,5	29,5	+2,4	2,5

Gemiddelde waarden voor ϕ_iW en maximale afwijkingen voor alle beschouwde combinaties. De vetgedrukte waarden leiden tot een onjuiste voorspelling van de conushoek.

Voor hopperontwerp wordt meestal de down-waarde toegepast, overeenkomend met het afnemen van de belasting dieper in de conus. Uit de tabel kunnen we de conclusie trekken dat voor drie combinaties de maximale afwijking groter is dan -3 graden. In het geval van de combinatie soda/constructiestaal heeft ook de daaropvolgende waarde nog een afwijking groter dan -3 graden (tussen haakjes geplaatste getallen).

Aannemende dat de gemiddelde waarde ϕ_iW_{av} in goede benadering juist is, houdt dit in ons geval in dat van 84 gemeten wandwrijvingswaarden (12 laboratoria, elk metend aan 7 combinaties) slechts in vier gevallen een onjuiste voorspelling voor de benodigde conushoek α_c wordt gegeven. In de overige gevallen zal de berekende conushoek theoretisch tot massastroming leiden, hoewel de oplossing verre van optimaal zal zijn in de gevallen waar de gemeten wandwrijving te hoog is gemeten.

Bij vlakstroomhoppers is de benodigde conushoek voor massastroming α_v veel minder kritisch en zal een afwijking in de gemeten wandwrijving minder belangrijk zijn. In een aantal silocodes (o.a. Eurocode1) wordt aangeraden om wandbelastingen te berekenen op basis van gemeten wandwrijving, wanneer in de code geen wandwrijvingswaarde wordt vermeld. Dan dient men zich wel te realiseren dat de maximale waarde van de wandbelasting omgekeerd evenredig is met de wandwrijvingscoëfficiënt m_w . Dus zal een maximale afwijking in de gemeten wandwrijving ook leiden tot eenzelfde afwijking in de berekening van de silobelasting. Ondanks de veiligheidsmarges die in silocodes zijn ingebouwd, is het in deze gevallen verstandig om niet al te zeer op het randje te construeren.

Discussie en conclusies.

In dit project is door 13 ervaren stortgoedlaboratoria de wandwrijving gemeten aan 9 stortgoed/wandcombinaties, verzonden vanuit één bron, volgens een nauwkeurig omschreven en uitgediscussieerde meetmethode, gebruikmakend van (binnen zekere grenzen) standaard-apparatuur. Significante verschillen in vochtpercentages van de monsters tengevolge van mogelijke verschillen in laboratorium omstandigheden zijn niet vastgesteld. Mogelijke invloed van plaatorientatie werd uitgesloten door het aangeven van eenzelfde meetrichting. Systematische afwijkingen tussen de laboratoria werden niet geconstateerd, daar geen der deelnemers altijd de hoogste dan wel de laagste resultaten verkreeg. De correlatie-coëfficiënten voor de toegepaste rechte lijn benadering waren in alle gevallen hoog voor de individuele resultaten ($>0,99$) en redelijk voor de gemiddelde resultaten betrokken op alle laboratoria ($>0,93$).

Toch zijn, ondanks de voorzorgen die zijn genomen om alle mogelijke foutenbronnen te elimineren, de totale resultaten niet erg bevredigend. Verbetering van het totaalresultaat door het weglaten van de "slechtste" individuele resultaten is overwogen, maar verworpen, omdat daarvoor geen fysische noch statistische basis voor bleek te bestaan. De hier gepresenteerde resultaten geven in feite de "state of the art" weer van het praktische gebruik van een standaardmethode voor het meten van wandwrijving, en laten zien dat aanzienlijke verschillen op kunnen treden. Duidelijk is dat nader onderzoek van zowel de testmethode als de apparatuur nodig zal zijn, een taak die de werkgroep wel stimuleert, maar niet zelf kan uitvoeren.

Vanuit een meer praktisch standpunt beschouwd is de situatie minder somber. Wanneer we kijken naar de (meest belangrijke) toepassing voor hopper ontwerp en berekening van wandbelastingen kunnen we concluderen:

Ondanks de geconstateerde afwijkingen zal het gebruik van de gemeten resultaten voor hopperontwerp in de meeste gevallen tot een juiste voorspelling van de conushoek α_c voor massastroming leiden, zolang tenminste een veiligheidsmarge van 4 graden voor deze hoek in acht wordt genomen.

Berekening van de wandbelastingen op basis van de gemeten wandwrijving kan tot een onderschatting tot 20% leiden. Hiermee dient, in relatie tot de veiligheidsfactoren in de silocodes, rekening te worden gehouden.

Uit onze meetresultaten blijkt een (hoewel kleine) invloed van de belastingsvolgorde: toenemende dan wel afnemende belasting. In praktische berekeningen dienen dan ook bij voorkeur die waarden te worden toegepast, die overeenkomen met de beschouwde situatie.

De in dit project gevonden resultaten tonen duidelijk aan dat wandwrijving een ingewikkelder fenomeen is dan dikwijls wordt aangenomen en zeker nader onderzocht dient te worden.