

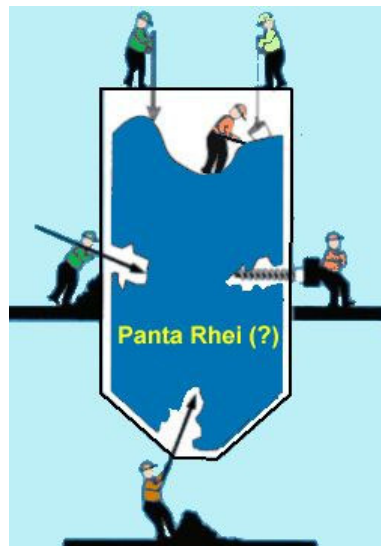
## Stortgoed heeft vele gezichten

### Inleiding mbt eigenschappen van stortgoed

Stortgoed, zelfs als het om één product gaat, heeft vele gezichten. Van de tientallen eigenschappen van stortgoed is steeds een bepaalde set verantwoordelijk voor het al dan niet functioneren van installaties.

Die set eigenschappen verandert snel en soms onvoorspelbaar met de omstandigheden. Dat maakt de handling van stortgoed tot een moeilijke, maar geen hopeloze zaak.

*door: prof. dr ir F.J.C. Rademacher*



Over de gehele wereld worden miljarden tonnen vaste stoffen getransporteerd, opgeslagen en verwerkt. En het aantal producten dat de procesindustrie op de markt brengt, neemt nog steeds toe. Het transport van die grote massa's in talloze soorten vergt erg veel van onze technische mogelijkheden en verloopt niet altijd probleemloos. Vaak zijn storingen onvoorspelbaar omdat teveel onbekende - en ook niet goed achterhaalbare - factoren een rol spelen. Er zijn echter ook veel gevallen waar achteraf is aangetoond dat de moeilijkheden hadden kunnen worden voorkomen.

### Traditie

Het transport van traditioneel stortgoed zoals granen, sojabonen en steenkolen is meestal weinig problematisch. De ontwikkeling van de hiervoor bestemde transportwerktuigen heeft dan ook zeer geleidelijk - in de loop van eeuwen - plaatsgevonden. Zo groeide om elk van deze stortgoederen een eigen transportsysteem. Hoewel deze systemen dagelijks worden toegepast en goed voldoen, berust het ontwerp ervan nog vaak op empirische gegevens die slechts ten dele in handboeken zijn terug te vinden. De algemeen basiskennis heeft lang ontbroken, zodat het moeilijk was om op andere transportmiddelen over te gaan, of om de meest geschikte transportmiddelen te ontwerpen. Zo dachten de eerste ontwerpers dat bij de sterkteberekening van silo's kon worden aangenomen dat stortgoed zich gedraagt als een vloeistof. Experimenten met modellen en silo's op ware grootte toonden echter aan dat de wanddrukken niet lineair met de diepte toenemen. Een deel van het stortgoedgewicht wordt via wrijvingskrachten op de wand overgedragen. Hierdoor zijn de drukken op bodem en wanden van een silo lager in het geval van een vloeistof met dezelfde specifieke bulkdichtheid als het stortgoed.

Problemen met bulkhandling verergerden door de excessieve toename van het aantal verschillende soorten stortgoed. Al spoedig bleek dat een groot deel daarvan niet was te vergelijken met de vrijstromende, zich goed voegende natuurproducten zoals graan, waarmee men tot 200 jaar geleden voornamelijk te maken had. Dat de handling van veel soorten stortgoed ernstige problemen oplevert, blijkt uit het grote aantal schadegevallen op dit gebied. Tegenwoordig bezwijken er in de wereld gemiddeld vijf silo's per dag.

### Deelfunctie

Een transportketen voor stortgoed bestaat niet uitsluitend uit silo's maar omvat ook componenten zoals elevatoren, kettingtransporteurs, schroeftransporteurs, triltransporteurs, bandtransporteurs, grijperkranen, weeginrichtingen, magneet-scheiders en zeef-, maal, en pallettiseerinrichtingen. De grote variëteit in het aanbod transportmiddelen kan doen vermoeden dat de selectie en inbedrijfstelling van deze werktuigen weinig problemen zal opleveren. De praktijk logenstraft deze gedachte dagelijks, wat voor Nederland neerkomt op een schadepost van rond f150 miljoen, ofwel circa tien gulden per inwoner per jaar. Wat kan er bij een transportwerktuig mis gaan en waar, onder welke omstandigheden en in welke mate? Om hierin enig inzicht te krijgen is het nuttig de functie van een transportwerktuig voor verplaatsing van stortgoed op te splitsen in drie deelfuncties:

- \* op- of innemen van het stortgoed op plaats A;
- \* transport naar plaats B (die meestal niet met A samenvalt);
- \* afgeven van het materiaal in B.

De praktijk leert dat de meeste problemen optreden aan het begin en /of einde van een transportwerktuig en zelden tijdens het eigenlijke transport.

### Parameters

Het al dan niet goed functioneren van een transportwerktuig wordt bepaald door een klein deel van een grote verzameling parameters. Na 1960 kwam onderzoek op gang naar de voor transport relevante stortgoedeigenschappen. Zo riep het 'Research Committee of The Institution of Chemical Engineers' in 1963 een "working party" in het leven die zou rapporteren over de stand van onderzoek in Engeland. Dit heeft geleid tot een classificatie waarin de onderzoekers naar naam en onderwerp werden gerangschikt. Hierdoor werd alleen maar duidelijker dat het gedrag van stortgoed een uiterst gecompliceerd onderwerp vormt, dat zich nauwelijks voor een universele aanpak leent, wat nog bevestigd werd door Palowitsch e.a [1].

Zo bleek dat de volgende eigenschappen en/of invloedsgrootheden van stortgoed een significante rol kunnen spelen: Slijt- en ploegwrijving; attritie; degradatie; vriessterkte; adhesie; beluchtbaarheid en vloeibaarheid; statische taludhoek; glijhoek; stortgoeddichtheid; werkelijke dichtheid; cohesie; corrosiviteit; stuifgevoeligheid; hardheid; inwendige wrijving; samenstelling van de deeltjes; penetreerbaarheid; plasticiteit; poriedruk; porositeit; potentiële volumeverandering; reeel contactoppervlak; segregatie; seismische golfvoortplantingssnelheid; anisotropie; deeltjesvorm; deeltjesdistributie; deeltjesgrootte; afschuifsterkte; specifieke warmte; oppervlakte-energie; oppervlakteruwheid van de deeltjes; thermische geleidbaarheid; ongesteunde bezwijkdrukspanning; watergehalte; tussenruimtefractie en volumeverandering bij afschuiving. De meeste van deze eigenschappen worden bovendien nog beïnvloed door vocht, consolidatie en temperatuur. Deze classificatie heeft dan ook geen bruikbare resultaten opgeleverd voor een algemene benadering.

## Eigenschappen

Nu blijkt het mogelijk, op grond van terreinverkennde experimenten en fysisch inzicht, de eerder gegeven willekeurige opsomming van deels vermeende stortgoedeigenschappen te vervangen door een kortere lijst die bestaat uit drie groepen van eigenschappen die van belang zijn voor transport en opslag:

### Elementaire eigenschappen van stortgoed

- korrelvorm,
- korrelgrootte en korrelverdeling,
- soortelijke massa van het korrelmateriaal,
- wrijving tussen korrels onderling bij stilstand,
- wrijving tussen korrels bij glijden,
- elasticiteit van het korrelmateriaal,
- cohesie,
- inwendige demping.

### Eigenschappen van het transportwerktuig

- vorm en afmetingen,
- verplaatsingen, snelheden en versnellingen,
- oppervlakteruwheden,
- mechanische eigenschappen.

### Eigenschappen van stortgoed en transportwerktuig samen

- wrijving tussen stortgoed en wand bij stilstand,
- wrijving tussen stortgoed en wand bij beweging,
- korrelgrootte in verhouding met afmetingen werktuig,
- adhesie tussen stortgoed en werktuig

Omdat voor een bepaald geval niet alle genoemde eigenschappen van belang zijn, heeft deze ordening voordelen. Zo kan de korrelgrootte betekenis hebben bij stortgoed dat uit een silo stroomt. Indien de korrels klein zijn ten opzichte van de uitstroomopening, doch niet zo klein dat cohesie ontstaat, wordt het stroomgedrag nauwelijks beïnvloed. De korrelgrootte kan echter wel bepalend zijn bij (te) grote korrels, die zelfs tot blokkade kunnen leiden.

## Geen vloeistof

Bij mechanisch transport kan het stortgoed inwendig in beweging zijn en in beweging zijn ten opzichte van de wand van het werktuig. Beide bewegingen kunnen met lage en hoge snelheden plaatsvinden en van aard verschillen. Men moet zich daarbij bewust zijn dat ogenschijnlijk vloeistof-analoga stromingen zeer misleidend kunnen zijn en wel om de volgende redenen: Stortgoederen kunnen in statische toestand schuifspanningen opnemen en overbrengen terwijl dat bij vloeistoffen niet het geval is;

Veel soorten stortgoed verkrijgen gedurende consolidatie cohesieve sterkte en kunnen goeddeels hun vorm behouden onder mechanische belasting, afhankelijk van de grootte en samenstelling daarvan;

De schuifspanningen in een langzaam vervormend stortgoed zijn doorgaans niet afhankelijk van de afschuifgradient, maar wel van de gemiddelde druk die in het stortgoed heerst.

Bij een vloeistof is de situatie omgekeerd; de schuifspanningen hangen af van de afschuifgradient en zijn nagenoeg onafhankelijk van de druk.

## Consolidatie

De genoemde verschillen wijzen erop dat een stortgoed eerder als een plastisch dan een visco-elastisch medium zou moeten worden opgevat. Een extra complicatie vormt de consolidatie-gevoeligheid van stortgoed. Deze eigenschap leidt tot een verhoging van de mechanische sterkte wanneer het materiaal bijvoorbeeld onder druk heeft gestaan. Bekende voorbeelden uit het dagelijks leven zijn oorspronkelijk vormeloze massa's zoals, meel, cement en sneeuw. Na samenpersing in een handpalm kunnen deze stoffen al zodanig verstevigen dat zij als min of meer

vast voorwerp op tafel kunnen worden gelegd. Nu blijkt deze versterking nog afhankelijk te zijn van het vochtgehalte, de stapeldichtheid en de temperatuur van het stortgoed alsook van de tijdsduur van de consolidatiedruk. Een ander voorbeeld van de twee eerstgenoemde invloeden ervaart een badgast aan het strand, die zowel in de duinen als tijdens het pootje-baden in zee ongeveer tot zijn enkels in het zand wegzakt. Tussen duin en zee echter treft hij tijdens eb een strook verhard zand aan waarover hij moeiteloos kan worden gewandeld. Wanneer een uitgestoken monster van dit verharde zand wordt verhit, verdampt het aanwezige water waardoor weer vormloos rul zand wordt verkregen. In dit geval heeft de temperatuurverhoging tot verzwakking geleid. Het omgekeerde vindt plaats bij materialen die bij verhoogde temperatuur chemische of fysische bindingen vormen op de onderlinge aanrakingspunten van de korrels. Een langere consolidatietijd tenslotte werkt meestal versterkend.

### **Cohesie**

Nu dient een korreltechnoloog die transport-, opslag-, overslag-, verwerkings-, of zelfs bewerkingswerktuigen ontwerpt, te weten of hij heeft te maken met een vrijstromend stortgoed of met een cohesief stortgoed. In het laatste geval is de mate van cohesie en/of adhesie veelal bepalend voor de selectie en dimensionering van de werktuigen, terwijl de chemische eigenschappen en/of de slijtende werking de materiaalkeuze bepalen. Bij deeltjes van nagenoeg gelijke afmetingen zal over het algemeen geen cohesief gedrag worden geconstateerd als de deeltjes groter zijn dan 1 cm. Dit komt niet omdat de deeltjes elkaar niet aantrekken, maar omdat deze krachten zo klein zijn dat ze door het eigen gewicht van de deeltjes verre worden overtroffen. Bij vermaling ontstaan kleinere deeltjes waarbij de eigen gewichtskrachten zodanig kunnen afnemen dat het omgekeerde wordt bereikt. De krachten als gevolg van het eigen gewicht van de deeltjes zijn dan te verwaarlozen in vergelijking met de cohesieve krachten tussen de deeltjes onderling. Dit laatste is in het algemeen het geval voor deeltjes kleiner dan 10 micrometer. Daartussen komen overgangsgebieden voor waarbij de gewichts- en aantrekkingskrachten van vergelijkbare grootte zijn. Bij sommige soorten stortgoed loopt de deeltjesgrootte zeer uiteen. Daarbij kan dan bovendien hinderlijke segregatie ontstaan tijdens transport en/of opslag wat onder meer kan leiden tot kwaliteitsproblemen. Het zal duidelijk zijn dat cohesieve eigenschappen van een stortgoed in de eerste plaats worden bepaald door de kleine deeltjes ('fines'). Verreweg de meeste technische moeilijkheden bij transport en opslag worden veroorzaakt doordat ontwerpers onvoldoende kennis hebben van stortgoedeigenschappen; in het bijzonder waar het de invloed van cohesie betreft. Het cohesief gedrag wordt veroorzaakt door een combinatie van de volgende verschijnselen:

- elektrostatische oplading;
- Van der Waalskrachten;
- vloeistofbruggen.

Gelukkig kan worden aangetoond dat de invloed van de vloeistofbruggen voor de meeste praktijkgevallen van mechanische transport doorslaggevend is. In het geval van pneumatisch transport echter kunnen de beide overige verschijnselen van belang zijn. Het is duidelijk dat het transport en de opslag van stortgoed geen eenvoudige zaak is. Een handicap is dat deze kennis zeer verspreid in een groot aantal wetenschappelijke en technische tijdschriften voorkomt. Toch zijn de essenties samengevat in een boekje [2] waarin zowel de fundamentele aspecten van stortgoed worden behandeld als verschillende toepassingen ervan.

### **Literatuur**

- [1] Palowitsch, E.R., en Goode, C.A., 'State of the Art of Bulk Materials Systems', Bulk Material Handling, Vol. 1, Univ. of Pittsburg, 1971 (Editor, Minor C. Hawk)
- [2] Rademacher, F.J.C., Haaker, G. en Kruyt, N.P., 'Silo's en Feeders', boek, Uitgave: 'The Bulkholics', 2e druk 1990.st