

Het laatste woord over belastingen van silo's

Sinds het begin van de jaren negentig wordt er in Europees verband gewerkt aan een serie normen over belastingen op constructies en bouwwerken om eenheid te brengen in de technische grondslagen en veiligheidseisen in de EU. In dit kader zal ook een norm voor de belastingen op silo's en opslagtanks moeten ontstaan.

Ir Gerard Haaker
en Ir Piet van der
Kooi.

Nadat in de loop der jaren een aantal voorlopige versies van normen over belastingen op constructies en bouwwerken voor commentaar werd uitgegeven, is in mei 2006 een geheel vernieuwde versie gepubliceerd die naar verwachting definitief zal worden. Deze norm is intussen als Nederlandse norm NEN-EN 1991-4 aanvaard. Officieel moet nog worden gewacht op de uitgave van de Nederlandse vertaling en de zogenaamde nationale bijlage. De norm wordt echter al wel aanbevolen om alvast aan

de voorgeschreven methodes te wennen en om programmatuur en eventueel benodigde cursussen te ontwikkelen.

In dit artikel zal in hoofdlijnen de inhoud van deze norm worden aangegeven en zal zo goed mogelijk de vraag worden beantwoord of hiermee nu een eenduidige berekeningsmethode voor silobelastingen wordt aangereikt.

Toepassingsgebied en beperkingen

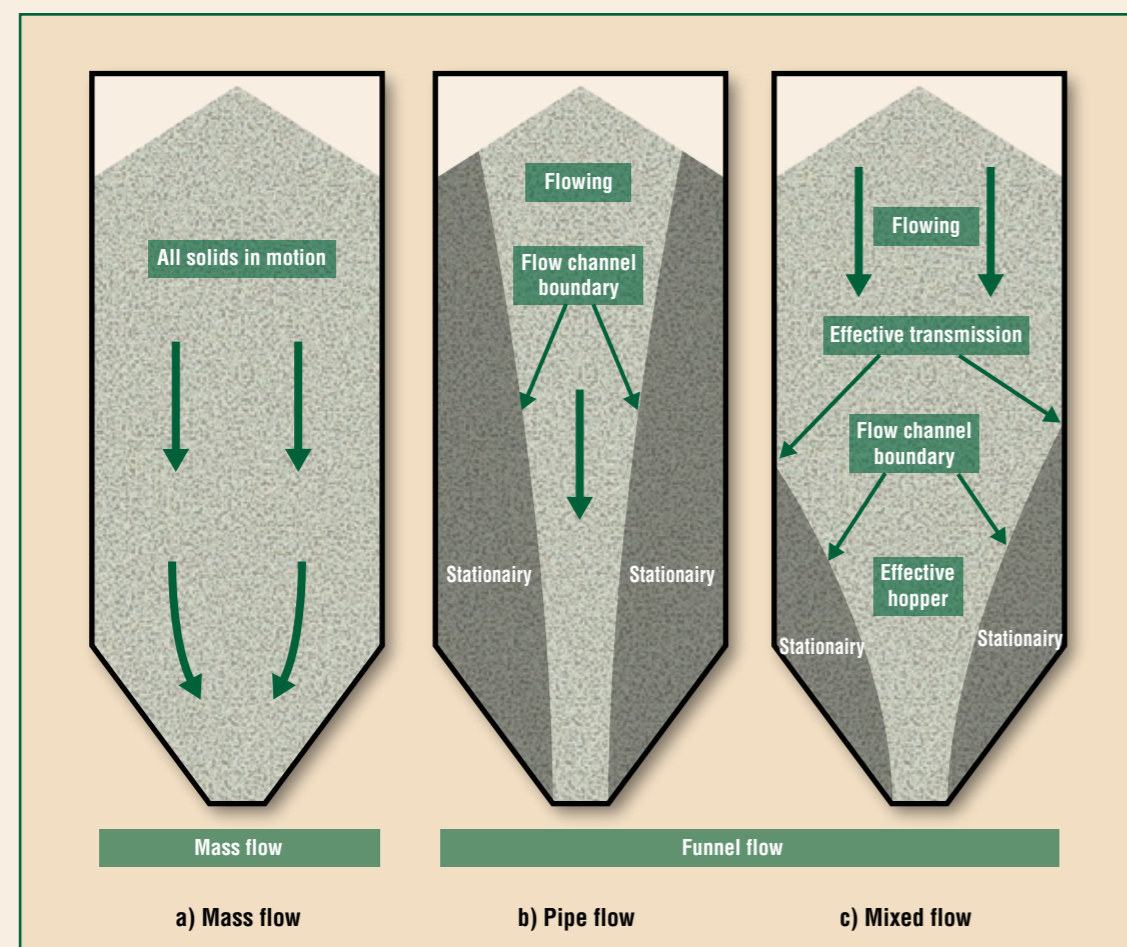
De norm zal moeten worden toegepast in samenhang met de overige Euronormen uit de serie EN 1991 tot EN 1999 waarin andere aspecten, zoals materiaalkeuze en algemene veiligheidseisen, aan de orde komen.

De norm geeft algemene richtlijnen voor het op sterkte en stijfheid ontwerpen van silo's voor opslag van stortgoed (particulate solids) en van tanks voor de opslag van vloeistoffen. In dit verhaal laten we tanks verder buiten beschouwing en be-

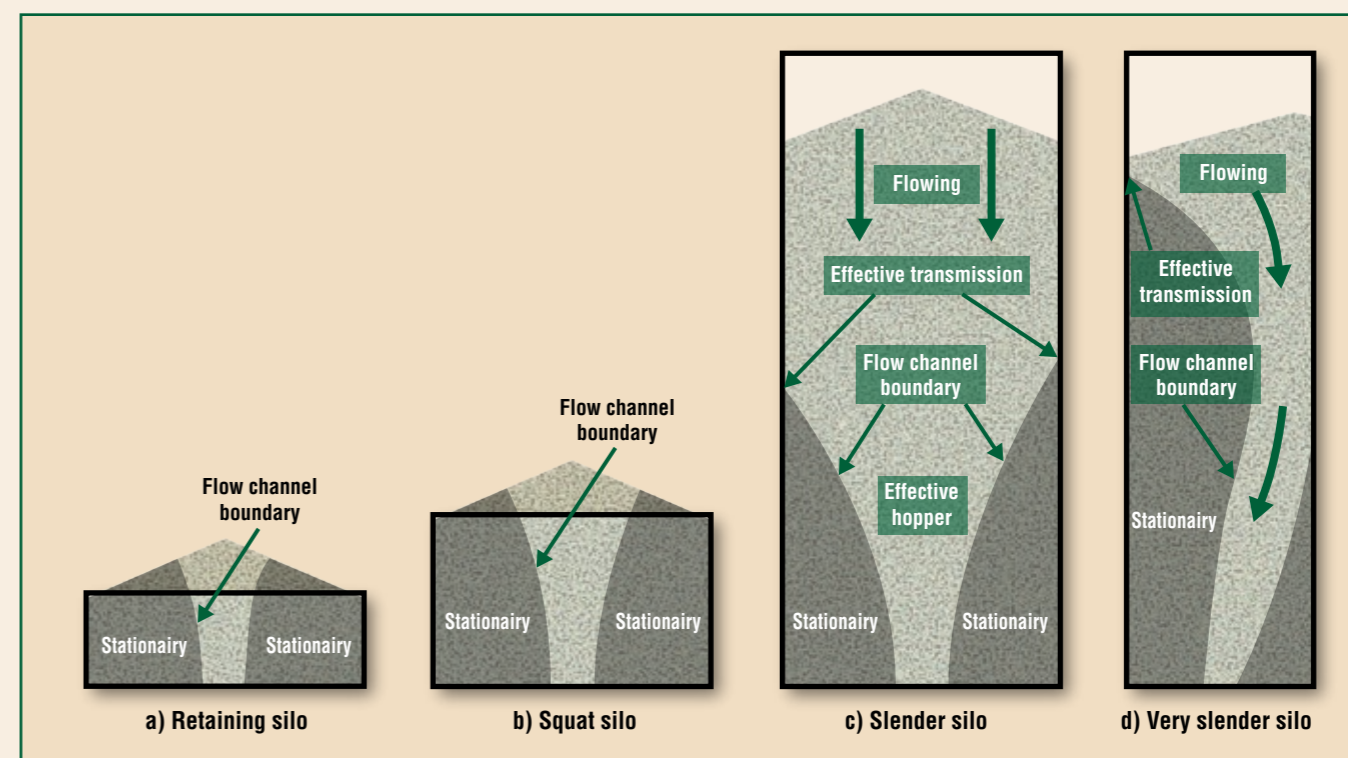
perken we ons tot silo's.

Toepassing van de norm is wat de geometrie betreft beperkt tot:

- ▶ silo's waarvan de dwarsdoorsnede rond, vierkant, rechthoekig of zeskantig is. Kleine afwijkingen van deze vormen zijn toegestaan voorzover met de gevolgen voor de spanningen rekening wordt gehouden.
- ▶ silo's waarvoor geldt dat de hoogte niet meer dan tien maal de diameter (ofwel ingeschreven cirkel) is.
- ▶ de silodiameter moet onder de 60 m blijven, terwijl de totale hoogte niet groter moet zijn dan 100 meter.
- ▶ De overgang van cilinder naar trechter moet in één horizontaal vlak liggen.
- ▶ De silo's mogen geen ingebouwde elementen, zoals een omgekeerde conus of piramide of interne dwarsbalken, hebben. Alleen in rechthoekige silo's zijn wel spandraden / trekstangen toegestaan.



Figuur 1:
Hoofdstromingspatronen
zoals in de norm onderscheiden.



Figuur 2:
Indeling van kernstroomsilo's op basis van slankheid. (slenderness).

- ▶ De trechter dient conisch, piramidevormig of wigvorming (wedge-shaped) te zijn. Bij andere vormen en bij ingebouwde elementen moet extra aandacht worden gegeven.
- ▶ Verder wordt er nog een aantal eisen aan het stortgoed en het gebruik van de silo gesteld:
 - elke silo wordt ontworpen voor een afgebakende groep stortgoederen.
 - de stortgoederen zijn vrijstromend of het ontwerp is zodanig dat vrije stroming kan worden gegarandeerd in de silo.
 - de maximale deeltjesdiameter van het stortgoed mag niet groter zijn dan drie procent van de silodiameter
 - bij het vullen of legen van de silo mogen geen merkbare traagheids- of impactbelastingen optreden.

Ten slotte wordt nog aangegeven dat invloeden van aardshokken, interne schokken of trillingen niet door de norm worden gedekt. De norm kan ook niet worden gebruikt om een silo qua stromingsgedrag te ontwerpen.

Bovengenoemde beperkingen kwamen in eerdere normen ook voor en zijn dusdanig ruim dat de meeste silo's wel onder de norm zullen vallen. Wel valt op te merken dat van lang niet alle in de praktijk gebruikte soorten stortgoed de eigenschappen bekend zijn. Ook is het lastig dat bijvoorbeeld interne schokken op voorhand niet te voorspellen zijn.

Classificatie en ontwerpsituaties

Bij de berekening van de belastingen op een silo zal volgens de norm moeten worden uitgegaan van de silovorm, de eigenschappen van het stortgoed en het optredende stromingspatroon. De stortgoedlast wordt in de norm opgebouwd uit een symmetrisch deel en een onsymmetrische deellast (patch load). Bij grote excentriciteiten zal ook de hoofdlast als niet symmetrisch worden beschouwd. In de norm wordt verder een indeling naar veiligheidsklassen aangegeven, gebaseerd op grootte en excentriciteit. Silo's met een opslagcapaciteit groter dan 10.000 ton, of met grote excentriciteiten vallen onder klasse 3. Silo's met opslagcapaciteit kleiner dan 100 ton vallen in klasse 1. De overige silo's zijn klasse 2. Deze classificatie hangt samen met de algemene veiligheidseisen voor constructies zoals neergelegd in de normen EN 1992 en EN 1993.

Op een silo dienen de normaal- en schuifbelastingen op de cilinderwand, de trechterbelastingen en de maximale bodembelasting te worden bepaald. Hiervoor gelden: de wandwrijving op de betreffende wand, de soortelijke massa (bulkdichtheid, stortgewicht), de inwendige wrijving, en de spanningsfactor K (verhouding tussen horizontale en verticale belasting) van het stortgoed. Elk van deze (gemeten) grootheden kent in principe een onder- en bovengrens. Voor elke belastingssituatie geeft de norm aan

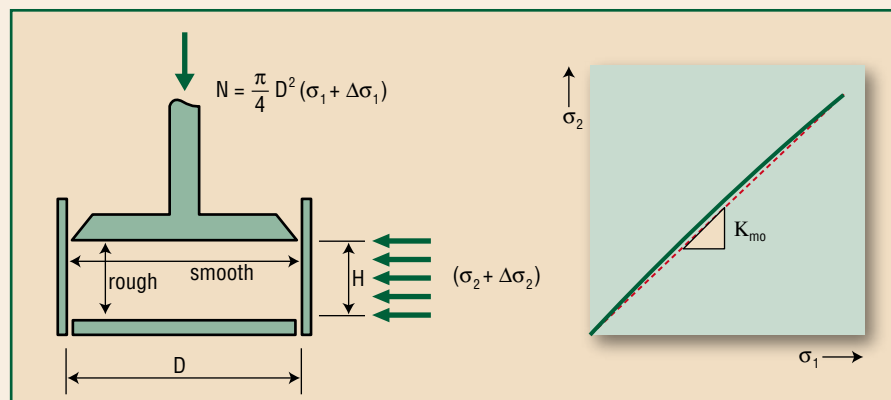
van welke combinatie van grenswaarden moet worden uitgegaan om tot de hoogste belasting te komen. Voor silo's in veiligheidsklasse 1 (dus kleiner dan 100 ton) mag echter voor de genoemde parameters (behalve voor de dichtheid) in alle gevallen van een gemiddelde waarde worden uitgegaan.

Verder wordt rekening gehouden met het type stroming dat optreedt in de silo. Onderscheid wordt gemaakt in massastroming (mass flow, plug flow), pijpstroming (kernstroming, core/funnel flow) en gemengde stroming, zie figuur 1, waarbij voor de gemengde en de pijpstroming weer een indeling naar de mate van excentriciteit wordt gemaakt. Een verdere indeling is die naar de vorm van de silo, zie fig 2. Onderscheiden worden hier horizontale silo's, waarbij de wanden als keermwand fungeren, vlakke silo's en slanke tot zeer slanke silo's, de laatste met de mogelijkheid van kanaalvorming (ratholing) door asymmetrische vulling. Als laatste wordt nog gekeken naar bijzonderheden als pneumatisch vullen, luchtinjectie of interne mechanische uitdraagsystemen. Voor al deze categorieën wordt in de norm aangegeven op welke wijze de belastingen moeten worden berekend.

Toepassing van de stortgoedeigenschappen

De norm noemt twee mogelijkheden voor de bepaling van de in de berekeningen

Figuur 3:
Voorgestelde
testmethode voor
het bepalen van
de spannings-
verhouding K .



benodigde stortgoedeigenschappen. De eerste is het op een voorgeschreven wijze meten (of laten meten) van een representatief monster van het opslagproduct. Een tweede methode impliceert gebruik van de in een bijlage gegeven tabel, waarin voor 24 wat bekendere materialen de benodigde waarden en eventuele toeslagfactoren zijn vermeld.

In deze tabel staan tevens de gegevens voor een zogenaamd standaardmateriaal (default material), die kunnen worden gebruikt indien de kosten voor het testen van de werkelijke producten niet goed zijn te rechtvaardigen. Gebruik hiervan wordt alleen aangeraden bij kleine silo's. Bij grotere systemen ontstaan op deze basis wel erg oneconomische ontwerpen (er wordt bijvoorbeeld gerekend met een maximaal stortgewicht van 2200 kg per kubieke meter). Indien het om opslagproducten gaat die niet in de materiaaltabel voorkomen, zullen in de meeste gevallen de eigenschappen dus moeten worden gemeten.

Het meten van de wandwrijving

De norm onderscheidt vier typische wandmaterialen:

- ▶ gladde wanden (slippery), zoals rvs, coatings, Uhdpe of gepolijst aluminium.
- ▶ middelgladde wanden (smooth), zoals glad constructiestaal, geoxideerd aluminium
- ▶ ruwe wanden (raspy), zoals beton, geroest staal, keramische tegels.
- ▶ onregelmatige wanden, zoals gegolfde of damwanden.

De te volgen testmethode wordt beschreven in een bijlage bij de norm en komt overeen met een standaard sheartest. De nadruk wordt gelegd op het meten bij de juiste drukken en aan de juiste wandmaterialen. In geval van bijvoorbeeld een damwand kan de wandwrijving als een gewogen gemiddelde van gemeten wand-

wrijving en inwendige wrijving worden berekend.

Het meten van de inwendige wrijving en de bulkdichtheid

Voor het meten van de inwendige wrijving wordt ook gebruik gemaakt van een standaard sheartester. Toe te passen normaaldruk en de te volgen testmethode worden in de norm aangegeven.

De bulkdichtheid kan worden gemeten door het materiaal in een niet te hoge cilinder (diameter circa tweemaal de hoogte) via een bovendeksel te belasten en het volume te meten. Ook hier worden methode en toe te passen drukken aangegeven.

Het meten van de spanningsfactor K

De factor K geeft de verhouding tussen de horizontale en verticale spanning in een silo. Deze factor kan in principe worden gemeten met een apparaat zoals getekend in figuur 3. Hierin wordt een stortgoedmonster verticaal belast met een spanning σ_1 en wordt de horizontale spanning σ_2 gemeten. Dit laatste gebeurt door de rek in de dunwandige cilinder te meten met rekstrookjes. Het is duidelijk dat de methode voor het meten van K nu niet direct simpel is. Sterker: Het is ons bekend dat een tester die dit kan meten, erg moeilijk te maken is en de meting zelf is tijdrovend en slecht reproduceerbaar. Resultaat is een wolk van meetpunten zodat deze factor net zo goed op een andere manier kan worden geschat. Gelukkig wordt dit in de norm ook onderkend. Een benaderde waarde van K kan als alternatief uit de inwendige wrijving worden berekend. Voor alle bovengenoemde metingen geldt verder dat bij voldoende metingen statistisch een gemiddelde en een boven- en ondergrens moet worden vastgesteld. Indien het aantal metingen hiervoor te klein is, kan worden gebruik gemaakt van in de norm gegeven factoren.

Gebruik van de norm voor belastingen

Eenmaal in het bezit van de juiste gegevens van het stortgoed, kunnen op basis van de silovorm, de grootte, het stromingspatroon en mogelijke speciale voorzieningen alle relevante silobelastingen worden berekend. In de norm staan nagenoeg voor alle gevallen de te volgen berekeningsmethoden nauwkeurig omschreven. In een aantal gevallen zijn ook toelaatbare alternatieven gegeven. Voor producten waarbij mogelijk stofexplosies op kunnen treden, volgen ten slotte nog een aantal adviezen voor een zo veilig mogelijk ontwerp.

Adequate berekeningsmethode

We concluderen dat deze norm voor bijna alle voorkomende gevallen een adequate berekeningsmethode geeft voor het bepalen van de silobelastingen. Er zitten echter nog wel wat addertjes onder het gras. In de eerste plaats is het gebruik van de norm niet bepaald eenvoudig. Mede door de nagestreefde compleetheid (de norm bedraagt ca 110 pagina's!) is het geheel nogal uitgebreid en complex geworden. Het is makkelijk in de doolhof van mogelijkheden de weg kwijt te raken. Verder lijkt meten van de stortgoedeigenschappen bijna altijd onafwendbaar. Zelfs voor de 24 producten die in de norm zijn gegeven, moet de type stroming bekend zijn zodat stromingsproblemen kunnen worden uitgesloten. Met de gegevens in de norm valt hier weinig over te zeggen. Alleen op basis van ervaring met het product of via andere metingen kan meer zekerheid worden gekregen.

Ook de voorgestelde methode om spanningsverhouding K rechtstreeks te meten, lijkt niet erg gelukkig. Deze apparatuur is voor zover wij weten namelijk nergens voorhanden.

Ten slotte nog twee opmerkingen:

- * De norm voorziet in een aantal keuzemogelijkheden om de afzonderlijke landen de mogelijkheid te bieden ze aan te passen aan de nationale situatie en zo eventuele richtlijnen voor het gebruik te geven. Dit gebeurt dan via een zogenaamde NAD (National Application Document). Een dergelijk document kreeg Nederland in 2000, maar dat komt bij de huidige versie van de norm niet meer voor. Of hier nog iets nieuws voor zal verschijnen, is de auteurs niet bekend.
- * De beschreven norm is in Duitsland in maart 2005 als DIN 1055-6 ingevoerd. ■