



Promotieonderzoek naar
met vacuüm voorgespannen
(draag)constructies

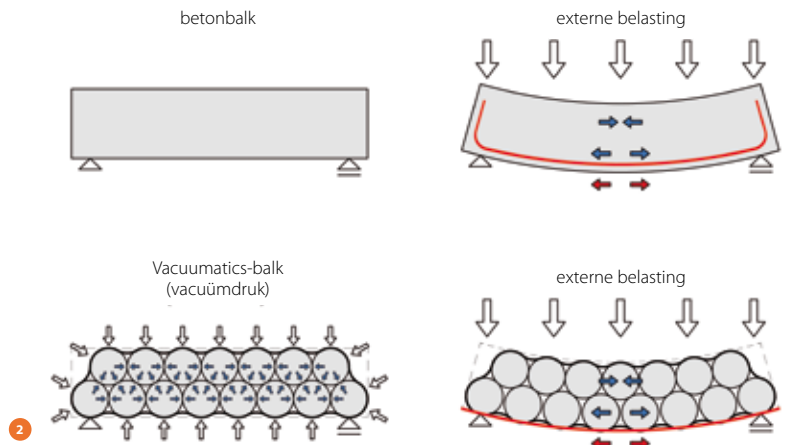
Vacuüm als constructief bindmiddel

'Ongebonden' granulaat kan nagenoeg elke geometrische vorm beschrijven. Dit biedt perspectief voor de maakbaarheid van 'vrije vormen' in de huidige architectuur. Door dit granulaat in een flexibele, luchtdichte omhulling te brengen en het pakket vacuüm te zuigen ontstaat een constructieve binding (of beter gezegd voorspanning), waardoor krachten door het granulaat kunnen worden overgedragen.

- 1 Beproeving vacuüm constructie
- 2 Constructieve werking Vacuumatics
- 3 Opstelling vierpuntsbuigproef

De sterkte en stijfheid van het systeem zijn naast de mate van onderdruk (vacuüm) sterk afhankelijk van de specifieke eigenschappen van het granulaat en de omhulling. Aan de Technische Universiteit te Eindhoven (TU/e) wordt promotieonderzoek gedaan naar deze in vorm aanpasbare, door vacuüm voorgespannen (draag)constructies, ofwel Vacuumatics. Met dit onderzoek wordt onder meer nagegaan of Vacuumatics effectief kunnen worden toegepast als een driedimensionaal aanpasbaar bekistingssysteem voor de productie van complexe vormen in beton [1]. Dit artikel beschrijft een deelonderzoek dat als Masteronderzoeksproject aan de TU/e is uitgevoerd, waarbij op een systematische manier de buigstijfheid van Vacuumatics is onderzocht.

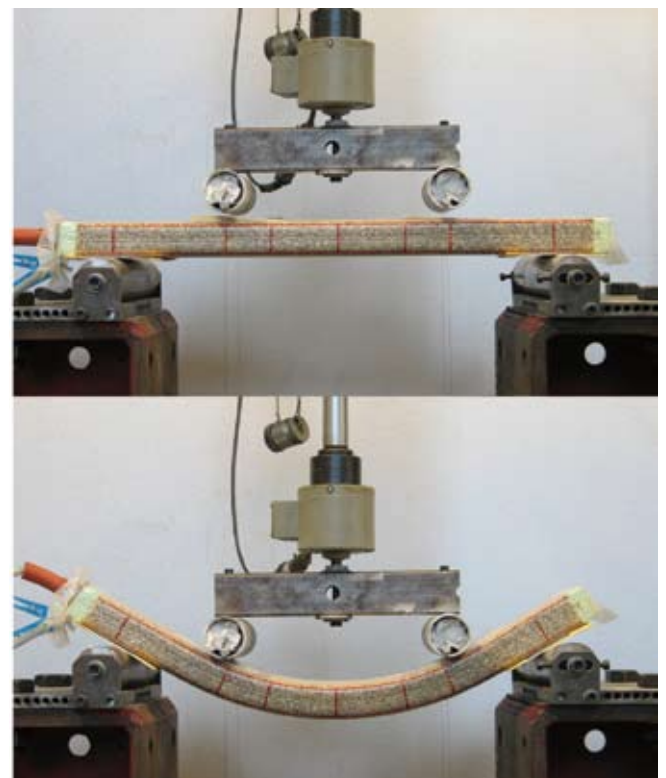
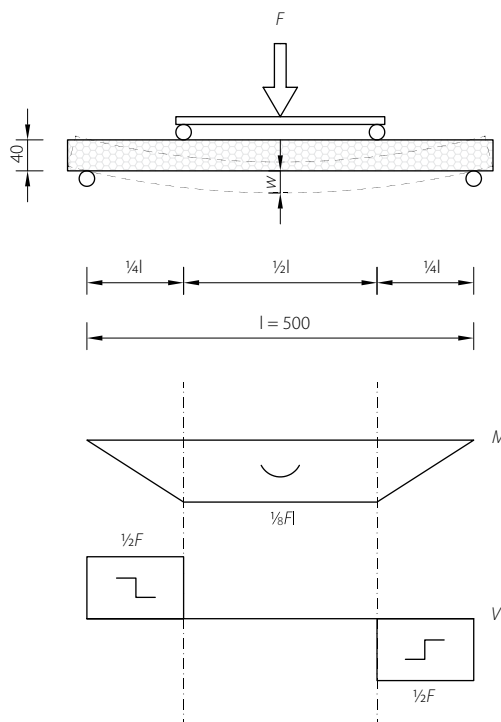
De constructieve samenhang van Vacuumatics ontstaat doordat granulaat in een gesloten omhulling wordt voorgespannen. Deze voorspanning ontstaat wanneer lucht uit de poriën wordt 'afgezogen', wat resulteert in een onderdruk of vacuüm. Het idee om op deze manier draagconstructies te ontwerpen stamt uit de jaren 70 [2]. Hoewel er sindsdien verschillende (met name proefondervindelijke) onderzoeken hebben plaatsgehad [3, 4], is de constructieve werking van Vacuumatics niet eerder op een systematische wijze onderzocht. Zo is er nog weinig bekend over de onderlinge krachtsverdeling tussen de deeltjes van het granulair vulmateriaal en de invloed van verschillende materiaaleigenschappen van de flexibele omhulling en het vulmateriaal op de buigstijfheid van Vacuumatics (fig. 2).



Voor een Masteronderzoeksproject is een serie buigproeven uitgevoerd in het Pieter van Musschenbroeklaboratorium aan de TU/e. Primair doel van deze buigproeven is niet het ontwerpen van de constructief meest sterke of stijve toepassing van Vacuumatics, maar het ontdekken van 'trends' met betrekking tot het constructieve gedrag van Vacuumatics. Hiermee zal fundamenteel inzicht worden verkregen in de krachtswerking van Vacuumatics, zodat het gedrag van dergelijke systemen nauwkeurig kan worden voorspeld.

Aanpak

Om de invloed van een externe belasting op een balkelement met afmetingen van 120 x 40 mm en een overspanning van 500 mm te onderzoeken, is gebruikgemaakt van een vierpuntsbuigproef (fig. 3). Hierdoor kan inzicht worden verkregen in het



gedrag van het systeem onder zuivere buiging, zonder neveneffecten ten gevolge van afschuiving. Met dit onderzoek is geprobeerd de buigstijfheid van Vacuumatics te beschrijven aan de hand van de parameters 'vacuümdruk' en 'korrelgrootte van de vulling'. Tevens is gekeken naar de invloed van de toevoeging van een 'wapeningslaag' in de trekzone van het systeem (fig. 4). Zand is een materiaal dat past in de ideologie van Vacuumatics. Het is goedkoop, ruim voorradig en kan gemakkelijk worden hergebruikt. Hiermee kan een systeem worden gecreëerd dat goedkoop en herbruikbaar is. Om de invloed van de korrelgrootte op de buigstijfheid van het systeem te onderzoeken is gebruikgemaakt van zand met drie korrelgroottespreidingen. Met het reduceren van de vacuümdruk zal meer inzicht worden verkregen in de buigstijfheid van het systeem bij een lagere voorspanning. Voor de wapening zijn drie materialen geselecteerd die licht in gewicht en eenvoudig vervormbaar zijn en een hoge elasticiteitsmodulus bezitten. Weefsels zijn hier uitermate geschikt voor en daarom is gebruikgemaakt van staalgaas, katoentextiel en geweven polypropyleen. Om de eigenschappen van de wapeningsmaterialen onder trekbelasting in kaart te brengen zijn aanvullende trekproeven uitgevoerd. Hiervoor zijn strips van elk type wapeningsmateriaal in een trekbank belast tot bezwijken. De resultaten van deze trekproeven zijn vergeleken met de resultaten uit de buigproeven om een uitspraak te kunnen doen over de optredende rekken (en dus krachten) in het Vacuumatics-systeem.

Vanwege de kwetsbaarheid van de proefstukken en de kans om bij metingen de meetresultaten te verstoren, zijn 'reguliere' meetmethoden niet geschikt om in dit onderzoek toe te passen. Daarom is gebruikgemaakt van een laser, die de middenverplaatsing van het proefstuk registreert. Hiermee kan zonder aantasting van het proefstuk de doorbuiging worden bepaald. Om de optredende buigrekken te kunnen meten is bij het

uitvoeren van de proeven ook gebruikgemaakt van fotoanalyse. Hierbij zijn op de zijkant van elk proefstuk markeringslijnen aangebracht en is het proefstuk tijdens het belasten gefotografeerd met een vooraf ingestelde tijdsinterval. Met behulp van een computerprogramma zijn de verplaatsingen van de markeringspunten geregistreerd, waardoor er een uitspraak kan worden gedaan over de kromming van het proefstuk bij doorbuiging en dus de buigrekken die optreden in het gedeelte tussen de puntlasten.

Resultaten

Voor de analyse van de resultaten is gebruikgemaakt van kracht-verplaatsingsdiagrammen. Omdat in de buigproeven is gebleken dat de wet van Bernoulli van toepassing is op dit systeem ('vlakke doorsneden blijven vlak'), kan met behulp van de kracht-verplaatsingsdiagrammen een kwalitatieve indicatie worden verkregen van de buigstijfheid van het proefstuk. Ook is hieruit af te leiden dat het systeem een lineaire spanningsverdeling ondergaat.

Invloed van korrelgrootte

Voor de korrelgroottes van het zand (SA) zijn de spreidingen 0,2-0,63 mm, 0,5-1,0 mm en 1,0-2,0 mm geanalyseerd (fig. 5). Voor de grootste korrelgrootte geldt in dit geval de hoogste stijfheid en de hoogste maximale belasting. Voor de kleinste korrelgrootte geldt het omgekeerde. Ondanks dat er in de grafiek een verschil te zien is tussen de buigstijfheden van het balkelement bij verschillende korrelgroottes, is dit verschil erg klein en lijkt de buigstijfheid nauwelijks afhankelijk van de korrelgrootte. Eerdere experimenten met glazen ballen vertoonden vergelijkbare resultaten [5].

- 4 Toevoeging van 'wapeningslaag' (PP) tussen de korrels en het folie (aan de trekzijde)
- 5 Kracht-verplaatsingsdiagram bij variatie van korrelgrootte
- 6 Kracht-verplaatsingsdiagram bij variatie van vacuümdruk
- 7 Trekproeven wapeningsmaterialen
- 8 Kracht-verplaatsingsdiagram bij variatie van wapening

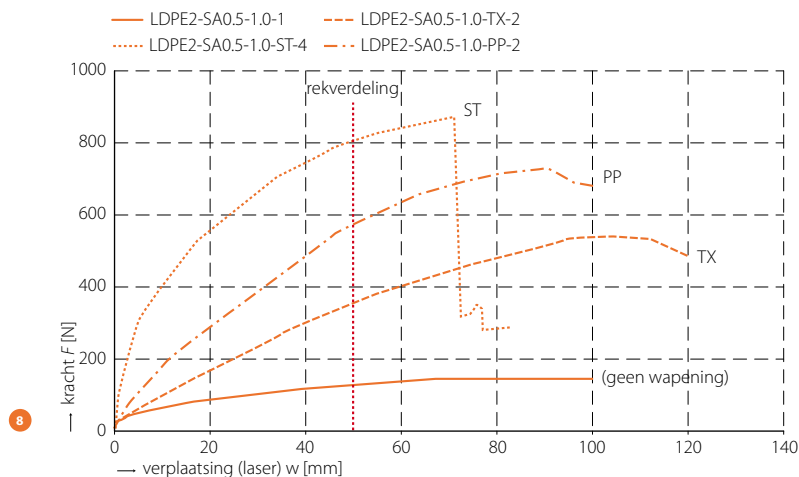
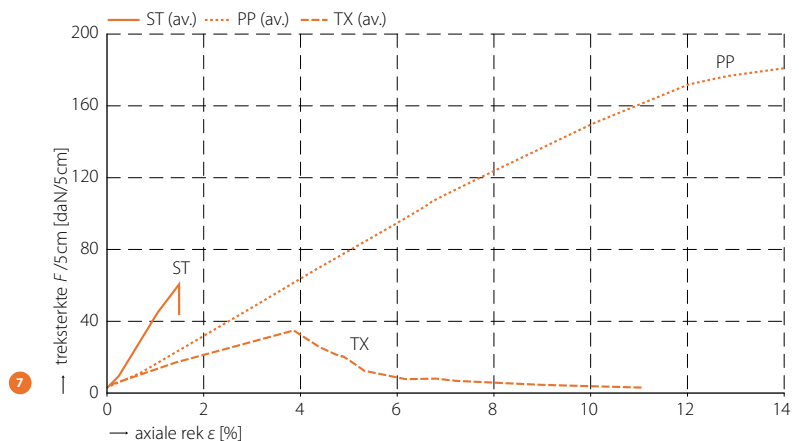
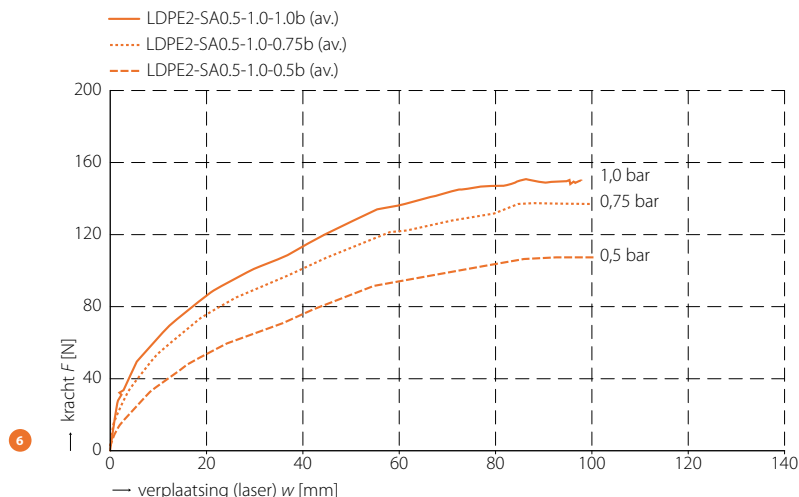
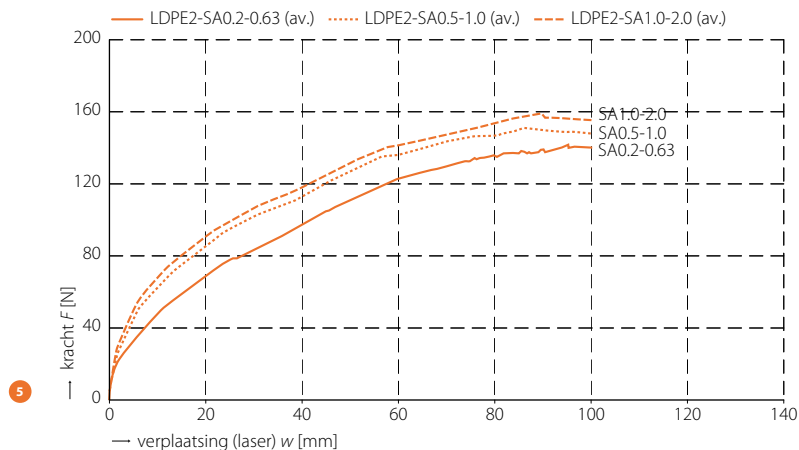
Invloed van de vacuümdruk

De hoogte van de vacuümdruk heeft naar verwachting een grote invloed op de stijfheid van het systeem. Hiervoor zijn de waardes 0,5, 0,75 en 1,0 bar geanalyseerd. Deze waardes zijn in de buigproeven bij benadering gehaald (theoretisch is het niet mogelijk 1,0 bar te bereiken). De hoogste onderdruk zorgt voor de hoogste maximale belasting en de hoogste buigstijfheid. Het omgekeerde geldt voor de laagste onderdruk. De verklaring hiervoor is erg voor de hand liggend. Een hogere vacuümdruk zorgt voor een grotere voorspanning op het proefstuk. Door deze voorspanning krijgen de deeltjes een bepaalde samenhang. Wordt de druk en dus de voorspanning verlaagd, dan neemt deze mate van samenhang af. Het gevolg is dat de stijfheid van het proefstuk zal afnemen. De verhouding tussen deze drukverschillen is te zien in figuur 6.

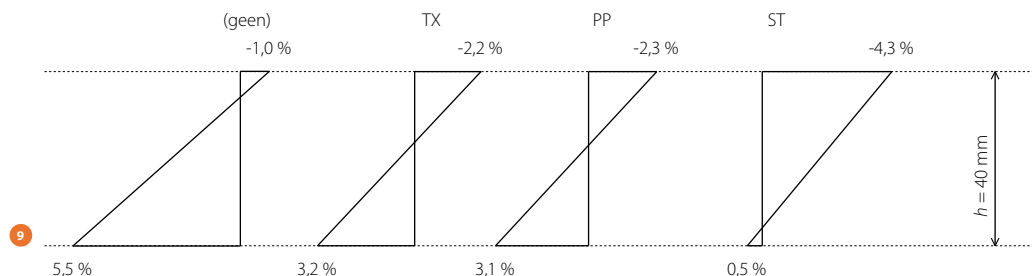
Invloed van de wapening

Uit de trekproeven van de typen wapeningsmateriaal (fig. 7) is af te leiden dat het staalgaas (ST) een relatief hoge kracht kan opnemen bij een relatief kleine rek. Het is echter ook een materiaal met het meest brose bezwijkgedrag. Het textiel (TX) kan daarentegen een relatief lage kracht opnemen bij een relatief grote rek. Het polypropyleen (PP) kenmerkt zich door zijn hoge treksterkte.

De buigproeven geven verder inzicht in de invloed van de eigenschappen van het wapeningsmateriaal op het gedrag van het systeem. Uit de kracht-verplaatsingsdiagrammen van de buigproeven met gewapende balkelementen (fig. 8) is te concluderen dat de verschillende wapeningsmaterialen grote variaties tonen in buigstijfheid van het systeem. Het systeem met staalgaaswapening kent de hoogste buigstijfheid, maar ook een min of meer brose bezwijkgedrag, wat ook te herleiden is uit de trekproeven van dit materiaal. Opmerkelijk echter is de grafiek van het systeem met polypropyleenwapening. Hoewel



9 Buig-rekdiagrammen bij variatie van wapening (zie ook fig. 8)



de verwachte buigstijfheid overeenkomt met de gevonden waarden (in het gebied tussen het staalgaas en textiel), komt de sterkte van dit materiaal in het systeem niet tot zijn recht. Hier zijn duidelijk andere factoren van invloed. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de hechting van het (gladde) gewezen polypropyleen met de andere delen van het systeem (de korrels en de huid) bij hogere spanningen niet optimaal is. Hierdoor kan het materiaal niet optimaal worden benut en bezwijkt het systeem voordat de maximale sterkte van de wapening is bereikt.

Uit de resultaten van de fotoanalyse is de rekverdeling over de doorsnede in het midden van het proefstuk af te leiden. In de rekverdeling van de buigproeven zonder wapening is een relatief kleine drukzone te zien. Het granulaat wordt dus niet effectief gemobiliseerd. In de rekverdeling van de buigproeven met wapening is te zien dat de drukzone aanzienlijk wordt vergroot (fig. 9). Aan de hand van het rekverloop over de hoogte van het proefstuk en de resultaten uit de trekproeven is de spanningsverdeling in het granulaat en de wapening verder af te leiden.

Conclusies

De experimenten hebben geleid tot een beter inzicht in het gedrag van Vacuumatics. Uit de testresultaten kan worden geconcludeerd dat de korrelgrootte nauwelijks invloed heeft op de buigstijfheid van het systeem. De hoogte van de vacuüm-druk daarentegen heeft een relatief grotere invloed op de buigstijfheid. Het toepassen van wapening blijkt de meest effectieve manier om de buigstijfheid van het systeem te vergroten. De buigproeven laten zien dat verschillende combinaties van parameters dezelfde resultaten kunnen opleveren. De verschillende parameters zouden elkaar dus kunnen versterken of juist afzwakken.

Bij systemen waarbij wapening wordt toegepast geldt, dat (vergelijkbaar met gewapend beton) een hogere trekstijfheid van de wapening leidt tot een hogere buigstijfheid van het systeem. De treksterkte heeft hierop geen invloed. Wel is de buigsterkte van het systeem afhankelijk van de treksterkte van de wapening. Bij een lagere treksterkte zal de wapening eerder

bezwijken en daarmee ook het proefstuk. Bovendien is de sterkte van het systeem waarschijnlijk afhankelijk van de structuur en de flexibiliteit (buigzaamheid) van de wapening. Een gladde structuur kan er mogelijk voor zorgen dat de wapening bij grote krachten zijn invloed op het systeem verliest.

Vervolg

Om Vacuumatics zo effectief mogelijk te kunnen ontwerpen en toe te passen als flexibel bekistingsstelsel voor complex gevormde betonconstructies, is het van belang de geometrische en constructieve randvoorwaarden van Vacuumatics systematisch in kaart te brengen. Dit Masteronderzoeksproject levert hieraan vanuit constructief oogpunt een waardevolle bijdrage. Aanvullend (numeriek) onderzoek is echter nodig om het constructieve gedrag van Vacuumatics nauwkeurig te kunnen voorspellen en beschrijven. Door het opstellen van constructieve richtlijnen zal uiteindelijk de meest efficiënte Vacuumatics-constructie kunnen worden ontworpen voor de gewenste toepassing. Om de praktische aspecten van Vacuumatics-bekistingen aan het licht te brengen (onder meer met betrekking tot het vormingsproces) zullen in de volgende fase van het onderzoek diverse prototypes worden gebouwd, waarmee geometrisch complexe betonnen elementen zullen worden vervaardigd. Het effectief toepassen van Vacuumatics als bekistingsstelsel komt hiermee voor de praktijk beter binnen handbereik. ☒

LITERATUUR

- Huijben, F. & van Herwijnen, F., 3D Vormen in Beton - Onderzoek naar Vacuumatics 3D-Bekistingsystemen. *Cement* 2009/5.
- Gilbert, J., M. Patton, C. Mullen, S. Black, Vacuumatics, 4th year research project. Queen's University, Department of Architecture and Planning, Belfast 1970.
- Knaack, U., T. Klein, M. Billow, *Imagine 02 - Deflateables*. 010 Publishers, Rotterdam 2008.
- Schmidt, T., Lemaitre, C., Haasse, W. & Sobek, W., Vacuumatics - Deflated Forms of Construction. *Detail* 2007/10.
- Huijben, F., van Herwijnen, F. & Nijssen, R., VACUUMATICS; Systematic Flexural Rigidity Analysis. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2010, Spatial Structures - Permanent and Temporary, Shanghai, 8-12 november 2010.