



Vacuümconstructies voor 'vrije' vormen en texturen in beton

'Flexibel' bekisten met vacuumatics

Om vrije vormen in beton mogelijk te maken, kan gebruik worden gemaakt van zogenoemde 'vacuümconstructies' (ofwel vacuumatics). Deze kunnen worden ingezet als een in vorm aanpasbaar bekistingssysteem. Aan de Technische Universiteit Eindh-

ven (TU/e) wordt momenteel een promotieonderzoek uitgevoerd naar de constructieve eigenschappen en de geometrische randvoorwaarden van deze constructies. In een deelonderzoek is gekeken naar de vormgeving, de draagkracht en de realiseerbaarheid.

- 1 Gerealiseerde 'vrij' gevormde betonconstructie met klantgerichte oppervlaktetextuur
- 2 Houten bekisting voor de Cement Hall te Zurich, ontworpen door Robert Maillart, uit 1938
- 3 Houten bekisting voor de ingang van de fietsenstalling op het 18 septemberplein te Eindhoven, ontworpen door Massimiliano Fuksas, uit 2009

Sinds de jaren negentig is de (moderne) bouwindustrie naarstig op zoek naar manieren om 'vrije vormen' te realiseren, anticiperend op een van de meest toonaangevende trends van de laatste twee decennia, namelijk 'free form design'. Deze vrije vormen in de gebouwde omgeving (tevens bekend onder de verzamelnaam 'blobs') onderscheiden zich van andere gebouwen door hun vloeiende vormen, veelal met (dubbel)gekromde vlakken. Door de snelle ontwikkeling van digitale ontwerpssystemen zijn tegenwoordig nagenoeg alle denkbare bouwvormen eenvoudig te modelleren (zowel teken- als rekentechnisch) met behulp van geavanceerde CAD- en FEM-software. Echter, het realisatieproces van deze vrije vormen lijkt niet een zelfde sprong in technologische ontwikkeling te hebben doorgemaakt.

Waar in de praktijk de draagconstructie van complex vormgegeven gebouwen of bouwdelen veelal wordt opgebouwd uit (al of niet voorgevormde) stalen segmenten, leent juist een van origine vloeibaar materiaal als beton zich uitermate goed voor de realisatie van deze vloeiende vormen. Dit wordt onderstreept door het brede scala aan nieuwe mogelijkheden vanuit materiaaltechnologisch oogpunt (denk aan vezelversterkt beton, zelfverdichtend beton en ultra-hogesterktebeton). Op dit moment blijkt de flexibiliteit van het bekistingssysteem (lees: maakbaarheid en in zekere mate de aanpasbaarheid) maatgevend voor een succesvolle realisatie van vrije vormen in beton.

Sinds het begin van de vorige eeuw worden de bekistingen van (dubbel)gekromde vlakken veelal vervaardigd uit houten stijlen en regels bekleed met houten latten of beplating. Het uittimmeren van een dergelijke bekisting kost echter veel tijd, vergt rela-

tief veel materiaal en mankracht en leidt bovendien tot een bekisting die moeilijk aanpasbaar is en waarvan veelal slechts beperkte onderdelen herbruikbaar zijn. In grote lijnen lijkt er de laatste 70 jaar vrij weinig te zijn veranderd. Dit wordt geïllustreerd door de bekistingmethoden voor de Cement Hall te Zurich uit 1938 (foto 2) en de ingang van de fietsenstalling op het 18 septemberplein te Eindhoven uit 2009 (foto 3).

Met vacuumatics als flexibel bekistingssysteem kan hier in de nabije toekomst wellicht verandering in komen. In een deelonderzoek aan de TU/e is een eerste aanzet gedaan om de praktische toepasbaarheid van vacuumatics als bekistingssysteem te onderzoeken voor de realisatie van (enkel)gekromde betonschalen met een op maat gemaakte (of liever gezegd: klantgerichte) oppervlaktetextuur.

Vacuumatics

Het constructieve principe van vacuumatics kan het best worden omschreven aan de hand van een verzameling van losse korrels in een luchtdicht flexibel omhulsel (of membraan). Deze korrels verkrijgen hun (constructieve)

¹⁾ Frank Huijben voert momenteel namens ABT een promotieonderzoek uit aan de TU Eindhoven (TU/e) getiteld 'Vacuumatics 3D Formwork Systems'. Promotoren zijn prof.ir. Frans van Herwijnen (ABT bv / TU/e) en prof.ir. Rob Nijssen (ABT bv / TU Delft). Dit artikel beschrijft een deelonderzoek dat als masteronderzoeksproject aan de TU/e is uitgevoerd door Roy van Heugten, onder begeleiding van Frank Huijben.



samenhang door het aanbrengen van een onderdruk (ofwel: vacuüm). De korrels worden uitwendig 'voorgespannen' doordat de atmosferische druk een kracht op ze uitoefent (via het membraan), zodat de vorm waarin de korrels zijn gebracht als het ware wordt bevroren. Deze techniek leidt tot vormvaste draagconstructies die onder andere kunnen worden toegepast als zelfdragende bekistingen. Een introductie van dit principe is beschreven in het artikel '3D vormen in beton' in *Cement* 2009/5 [1].

Een krachtig ontwerpuitgangspunt van vacuumatics is dat de (buig)stijfheid kan worden beïnvloed door te variëren in de mate van onderdruk, ook wel 'vacuümdruk' genoemd. Deze vacuümdruk wordt overigens veelal uitgedrukt in een percentage van de atmosferische luchtdruk, variërend tussen 0 en 100%, wat overeenkomt met een luchtdruk van respectievelijk 0 en 1 bar. Bij 0% vacuüm (dus zonder onderdruk) vertonen de korrels in het omhulsel geen samenhang en is de constructie geheel flexibel. Door de vacuümdruk te verhogen zullen de korrels strakker tegen elkaar worden gedrukt en zal de (buig)stijfheid van de constructie toenemen. Daarbij ontstaat bij een relatief lage onderdruk (van circa 10% vacuümdruk) een min of meer kneedbaar materiaalgedrag. In deze 'plastische' fase kan de constructie relatief gemakkelijk worden gevormd en tevens zijn nieuwe vorm vasthouden. Bij een maximale vacuümdruk (nagenoeg 1 bar) ontstaat een relatief stijve en stabiele draagconstructie. Omdat dit principe omkeerbaar is, is het mogelijk vacuümconstructies veelvuldig te vervormen. Overigens is naast de mate van onderdruk tevens de materialisatie van de korrelvulling en het omhullende membraan van invloed op de 'uiteindelijke' constructieve sterkte en stijfheid van vacuumatics [2].



4

Aanpak en resultaten

Om de effectiviteit van vacuumatics als bekistingssysteem te onderzoeken, is in het genoemde deelonderzoek gekeken naar de vormgeving (morfologisch onderzoek), de draagkracht (constructief onderzoek) en de realiseerbaarheid (prototype-onderzoek) van vacuumaticsbekistingen.

Morfologisch onderzoek

In het morfologisch deelaspect is onderzocht hoe vacuumatics op een eenvoudige manier kunnen worden vormgegeven. Om de initiële (gelijkmatige) verdeling van de losse korrels in de flexibele omhulling hierbij beheersbaar te houden, wordt het vormingsproces van vacuumatics steeds gestart vanuit een plat vlak. Vanuit uitvoeringstechnisch oogpunt is het bovendien wenselijk de beoogde vorm met zo min mogelijk manipulatiepunten, zogenoemde 'control points', tot stand te brengen vanuit het platte vlak. Hoewel het mogelijk is om vacuumatics

5



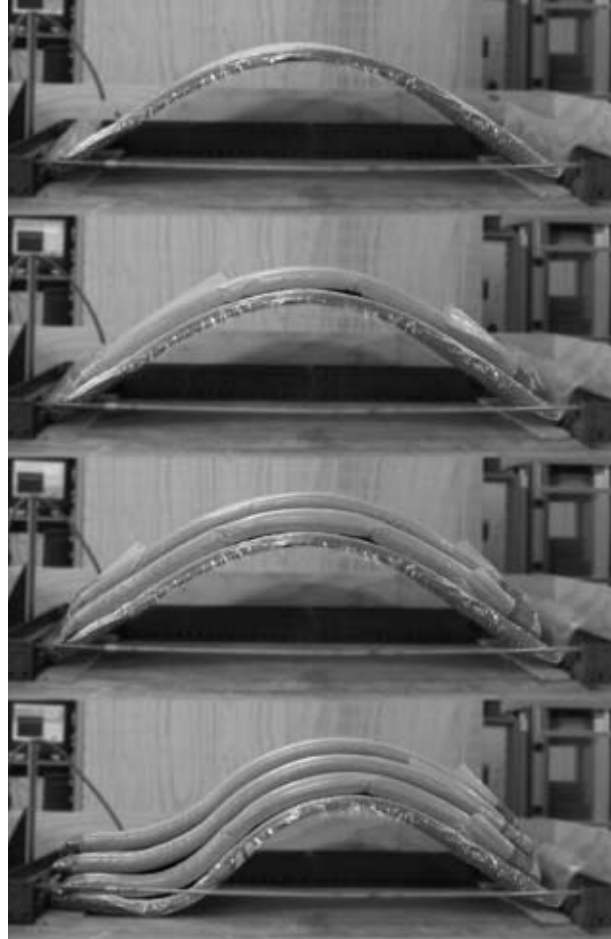
- 4 Initiële vlakke vacuümconstructie, samengesteld uit lichtgewicht kleikorrels (Liapor) en een plastic folie (LDPE) als omhulling
- 5 Het vormen van vacuumatics middels de 'hangmethode'
- 6 Bezwijkmechanisme van een boogvormige vacuümconstructie gelijkmatig belast door middel van cilindrische zandzakken

in nagenoeg elke gewenste vorm te brengen, is deze studie erop gericht om (enkel)gekromde vormen te realiseren, waarbij een externe belasting kan worden opgenomen door schaalwerking van de (zelfdragende) vacuumaticsbekisting. Uit eerder onderzoek is namelijk gebleken dat de buigsterkte van vacuumatics over het algemeen relatief gering is, in tegenstelling tot de druksterkte [2]. Om deze reden zal in dit geval een kettinglijn (of een parabool bij benadering) als referentie worden genomen voor de beoogde boogvorm, aangezien dit de ideale vorm is voor het afdragen van een gelijkmatig verdeelde belasting per eenheid van lengte (lees: het eigen gewicht van de bekisting, inclusief het gewicht van het pas gestorte beton).

Voor dit onderzoek bestaat de vacuümconstructie uit een vulling van lichtgewicht kleikorrels (Liapor) en een plastic folie (LDPE) als omhulling (foto 4). De grootte van het proefstuk meet in het platte vlak circa 2300 x 700 mm² met een pakketdikte van circa 60 mm en weegt totaal circa 40 kg. Verschillende vervormingstechnieken zijn onderzocht. Bij de zogenoemde 'hangmethode' (foto 5) wordt de vacuümconstructie slechts beperkt op onderdruk gebracht, zodat de constructie nog grotendeels buigslap is. Na vervorming wordt de vacuümdruk verhoogd tot een maximale onderdruk (van circa 1 bar), zodat de constructie in zijn geheel kan worden omgedraaid alvorens het beton wordt aangebracht. Met het oog op een mogelijke schaalvergroting van het principe is dit wellicht onpraktisch.

Bij een meer praktische benadering, de 'liftmethode', worden de uiteinden van de vacuumaticsbekisting verticaal gefixeerd door middel van gewichten, waarna het midden van de constructie wordt opgetild (gelift) met behulp van een kraan. Het feit dat vacuumatics over het algemeen relatief buigslap zijn, zorgt ervoor dat de constructie relatief eenvoudig kan worden gevormd. De gecreëerde boogconstructie kan vervolgens eenvoudig worden gestabiliseerd door de eindpunten van de constructie in horizontale richting te fixeren.

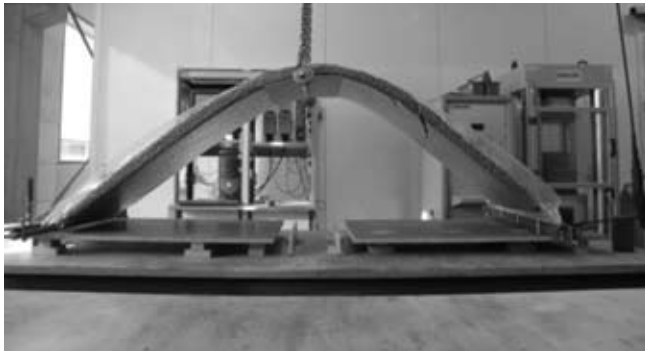
In het Pieter van Musschenbroeklaboratorium van de TU/e is vervolgens een aantal identieke vormingsproeven volgens deze liftmethode uitgevoerd, waarbij onder andere is onderzocht in hoeverre de mate van onderdruk invloed heeft op de vervormbaarheid van de constructie. Bij deze experimenten is de constructie steeds opgetild tot op het moment waarop



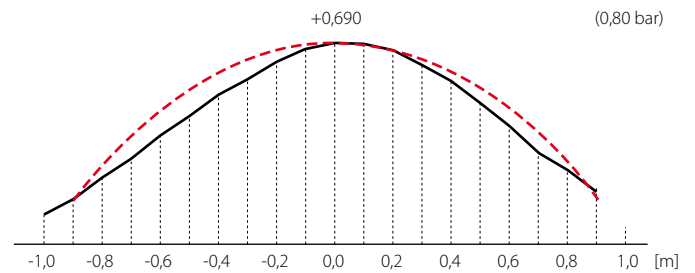
6

de uiteinden van de constructie los kwamen van de ondergrond. Uit deze experimenten is gebleken dat de mate van onderdruk (variërend tussen 0,25 bar en 0,85 bar) nauwelijks effect heeft op de uiteindelijke boogvorm. Daarnaast blijkt de constructie het meest lokaal te vervormen ter plaatse van het hijspunt, terwijl de uiteinden nagenoeg ongekromd blijven (foto / fig. 7).

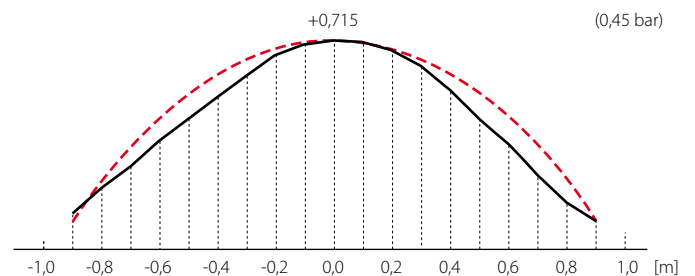
Het verlagen van de vacuümdruk heeft daarentegen wel tot gevolg dat de kracht die nodig is om de constructie te (ver)vormen kleiner wordt (geïllustreerd door het verschil in booghoogte). Om tot een betere benadering van de beoogde paraboolvorm te komen, is ervoor gekozen een 'wapeningslaag' aan te brengen aan de bovenkant, in de trekzone van de constructie tussen de korrels en het membraan. Deze wapening verhoogt de buigsterkte, of liever gezegd: de vloeigrens, van de vacuümconstructie, zodat deze minder snel (lokaal) plastisch zal vervormen. Als wapening kan in principe elk flexibel (maar trekstijf) materiaal worden toegepast. Doordat de wapeningslaag ten gevolge van de atmosferische druk tegen de korrels wordt gedrukt (via het membraan), is deze wapeningslaag in staat trekkrachten over te dragen aan de korrels via onderlinge wrijving. Afhankelijk van de materialisatie van de wapeningslaag kan een verhoging van de buigsterkte tot circa 600% worden gerealiseerd. Dit principe is in detail beschreven in het artikel 'Vacuüm als constructief bindmiddel' in *Cement* 2010/8 [3]. Bij deze morfologische studie zijn overigens, naast verschillende posities en lengtes van de wapeningslaag, tevens verschillende wapeningsmaterialen onderzocht, waaronder dun betonplex, karton en olypropyleenweefsel (PP). Polypropyleenweefsel, zoals onder andere



7a



7b



toegepast voor Bigbags, blijkt hierbij uitermate geschikt. Dit mede vanwege de hoge mate van flexibiliteit (wat gunstig is met het oog op de 'vrije' vormbaarheid van vacuumatics), de relatief hoge trekstijfheid en de hoge treksterkte van dit materiaal. De uiteindelijk verkregen boogvorm (met PP wapening) benadert vrij goed de beoogde parabolvorm (foto / fig. 8).

Constructief onderzoek

Om de draagkrachtcapaciteit van de vacuümbekisting te bepalen, is de gecreëerde schaalvorm belast met cilindrische zandzakken (2,1 m lang en 25,5 kg per stuk) om de gelijkmatig verdeelde belasting door het pas gestorte beton na te bootsen. Deze zandzakken zijn stap voor stap aangebracht tot aan bezwijken. Theoretisch kan de vacuumaticsboogconstructie op diverse manieren bezwijken. Een daarvan is het wegvallen van de vacuümdruk, waarmee de constructie direct zijn buigstijfheid verliest. Daarnaast spelen uiteraard de materiaaleigenschappen van de korrelvulling en het membraan een rol. Aan de hand van eerdere constructieve analyses van de afzonderlijke materialen [2] en de gunstige boogvorm wordt echter verwacht dat de sterkte van de constructie niet maatgevend zal zijn en dat de constructie zal bezwijken op instabiliteit, namelijk knik.

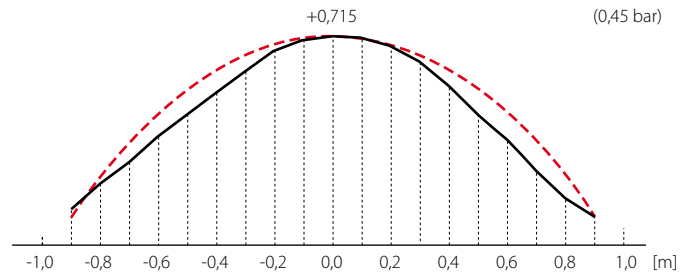
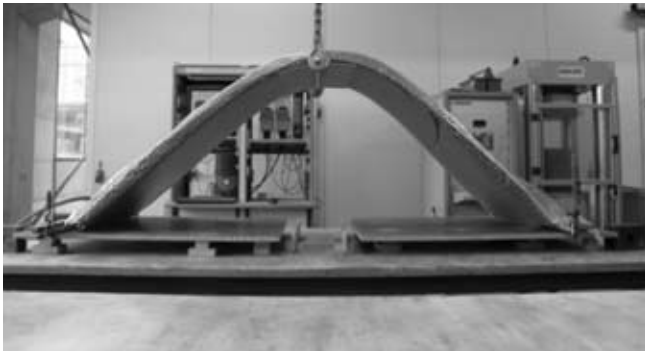
Het experiment is drie keer uitgevoerd waarbij de boogconstructie telkens bezweek op asymmetrische knik in het vlak (foto 6). De minimale opneembare belasting is 229,5 kg (negen zandzakken) gebleken. Dit komt overeen met een vlaklast van

1,6 kN/m², ofwel een laag beton van circa 65 mm dikte. Bij een overspanning van circa 2 m resulteert dit in een dikte-overspanningsverhouding van 1:30. In vergelijking met de (weliswaar dubbelgekromde) betonschalen zoals gerealiseerd in de jaren vijftig door onder andere Heinz Isler (met een verhouding van circa 1:360) lijkt deze draagcapaciteit ruim voldoende voor de realisatie van dunne betonschalen. Aanvullende experimenten zullen echter moeten uitwijzen of vacuumatics eveneens geschikt zijn voor grotere overspanningen. Het aangetoonde minimale draagvermogen van de vacuumaticsbekisting van circa zes keer het eigen gewicht biedt overigens perspectief.

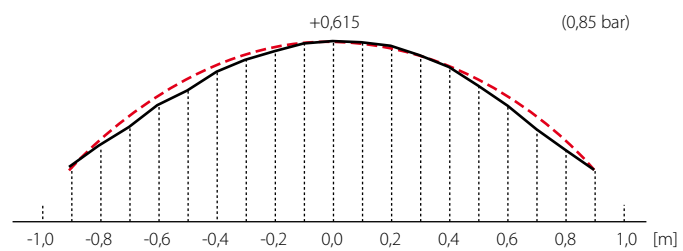
Prototype-onderzoek

Om voorgaande bevindingen te toetsen in de praktijk, is een enkelgekromde betonnen schaal gerealiseerd met een overspanning van 1,5 m en een hoogte van 70 cm. Hierbij is tevens een ander voordelig aspect van vacuumatics onderzocht, namelijk de aanpasbaarheid van de oppervlaktetextuur. Door bepaalde objecten (zoals in dit geval kartonnen belettering) aan de vacuumaticsbekisting toe te voegen tussen de korrelvulling en het membraan, kan een klantgerichte oppervlaktetextuur van het betonnen object worden gerealiseerd. In dit geval zijn twee lagen van ongeveer 2 cm beton handmatig op deze bekisting aangebracht, met daartussen een wapeningsnet van glasvezel om onvoorziene belastingen tijdens transport of asymmetrische belastingen op te kunnen vangen. Na een uithardingsperiode van ongeveer vier dagen is de betonschaal ontkist door

- 8 Gevormde vacuümconstructie vergeleken met een parabool, waarbij PP weefsel is toegepast als 'wapening' bij een onderdruk van 0,85 bar



7c



8

simpelweg de vacuümpomp los te koppelen, die gedurende het uithardingsproces een constante onderdruk verzorgde. Zonder vacuümdruk wordt de constructie namelijk weer volledig flexibel, waardoor de vacuumaticsbekisting 'zichzelf' vrijwel direct ontkist onder invloed van haar eigen gewicht. Het olieachtige oppervlak van het folie zorgt er tevens voor dat het niet hecht aan het beton. In het uiteindelijke betonoppervlak van de gerealiseerde 'vrije' vorm is nu de afdruk van de toegepaste belettering goed zichtbaar.

Conclusies en bruikbaarheid in de praktijk

Verwacht wordt dat de toepassing van vacuumatics een nieuwe impuls zal geven aan het realisatieproces van vrije vormen in beton. Aan de hand van dit masteronderzoeksproject kan worden geconcludeerd dat vacuumatics als lichtgewicht flexibel bekistingssysteem verschillende voordelen heeft ten opzichte van traditionele bekistingmethoden. Zo is de vormvrijheid zeer hoog: zonder al te veel mankracht en materiaalkosten kunnen 'vrije vormen' vrij snel worden gerealiseerd. Daarnaast is de bekisting gemakkelijk aanpasbaar en zijn de benodigde basismaterialen (korrels, membraan en mogelijke wapeningslaag) volledig herbruikbaar.

De mogelijkheid om de oppervlaktetextuur van vacuumatics (en dus van het betonnen object) aan te passen aan de wensen van de klant biedt tevens nieuwe mogelijkheden voor het vervaardigen van een hoogwaardige afwerking van diverse betonproducten. Zeker in combinatie met de laatste betontechnologische ontwikkelingen zoals ultra-hogesterktebeton, zelfverdichtend beton en vezelbeton.

Nader onderzoek is echter nodig om de nauwkeurigheid van de gewenste vorm te bepalen, alsmede de consequenties bij het opschalen van dit principe voor de realisatie van relatief grotere betonschalen. De materialisatie van de vacuumaticsbekisting (lees: sterkte- en stijfheidseigenschappen) kan hierbij overigens worden geoptimaliseerd voor de beoogde toepassing. Een directe toepassing van vacuumaticsbekisting zal op korte termijn wellicht worden gevonden door het toevoegen van een zekere 'vacuumatics laag' aan reguliere bekistingstechnieken. Hierbij kunnen klantgerichte oppervlaktetexturen of geringe (dubbele) krommingen worden gerealiseerd zonder dat daarvoor kostbare en complexe aanpassingen aan de reguliere bekisting nodig zijn. ☒

LITERATUUR

- Huijben, F.A.A., Herwijnen, F. van, 3D vormen in beton. *Cement* 2009/5.
- Huijben, F.A.A., Herwijnen, F. van & Nijse, R., Vacuumatics – Systematic Flexural Rigidity Analysis. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Shanghai, November 2010.
- Tas, L., Huijben, F.A.A., Vacuüm als constructief bindmiddel. *Cementonline*, december 2010.