

MAAKBAARHEID

Praktijkcase Fabric formwork



OP ZOEK NAAR MAAKBARE COMPLEXITEIT

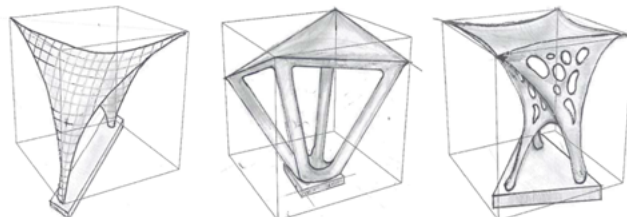
Betonnen elementen worden al decennia lang voornamelijk gemaakt met traditionele bekistingen in hout en staal. Met deze bekistingen kunnen eenvoudige elementen gemakkelijk worden gerealiseerd. Complexe betonelementen zijn echter moeilijk te maken. In de zoektocht naar alternatieve, minder arbeidsintensieve bekistingsmethoden lijken textielmallen, ofwel fabric formwork, uitkomst te bieden. Al in de 19e en begin 20e eeuw zijn er proeven gedaan en daadwerkelijk betonconstructies gerealiseerd met fabric formwork. De interesse in de techniek is echter vooral in de laatste jaren enorm toegenomen, mede dankzij de snelle ontwikkeling van parametrische ontwerpsoftware waarnaar op veel universiteiten wereldwijd onderzoek wordt gedaan.

INTEGRAAL ONTWERPPROCES

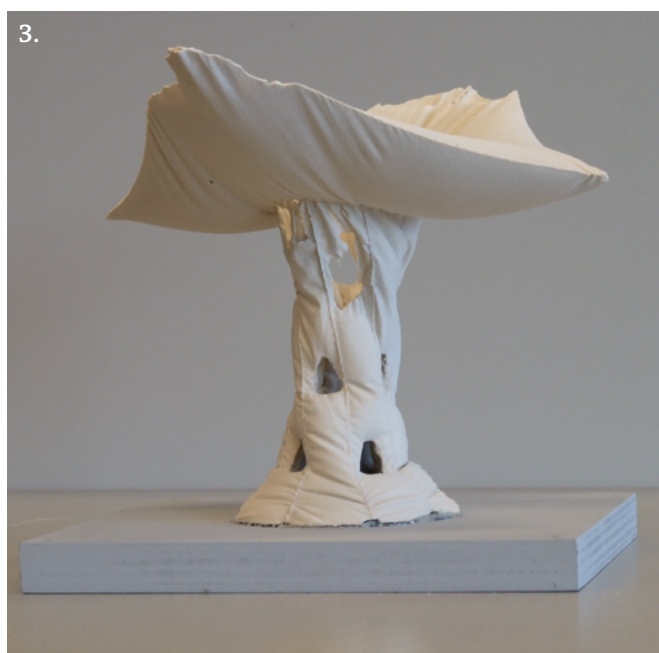
Bij fabric formwork moet worden uitgegaan van een compleet andere ontwerpfilosofie dan bij traditionele bekistingen. Ontwerp van de bekisting en dat van het betonelement zijn bij fabric formwork inherent aan elkaar. Het gedrag van de

1. De Organica Hyparbolica is 2,4 m hoog en weegt inclusief voetstuk 7000 kg. Foto: Robbert de Smet
2. Ontwerpschetsen uit fase 1.
3. Schaalmodel in gips uit fase 1.

2.



3.



bekisting tijdens het storten moet worden meegenomen in het ontwerp. Vervormingen van het textiel door de stortedruk beïnvloeden het uiteindelijke ontwerp. Dit kan enigszins worden ondervangen door het textiel voor te spannen. In het ontwerp moet een evenwicht worden gezocht, zodat de gewenste interactie tussen het vloeibare beton en de textielmal ontstaat. Dit vereist een integraal ontwerpproces. Eerst een constructie ontwerpen en dan de textielmal, is bij fabric formwork nauwelijks uitvoerbaar.

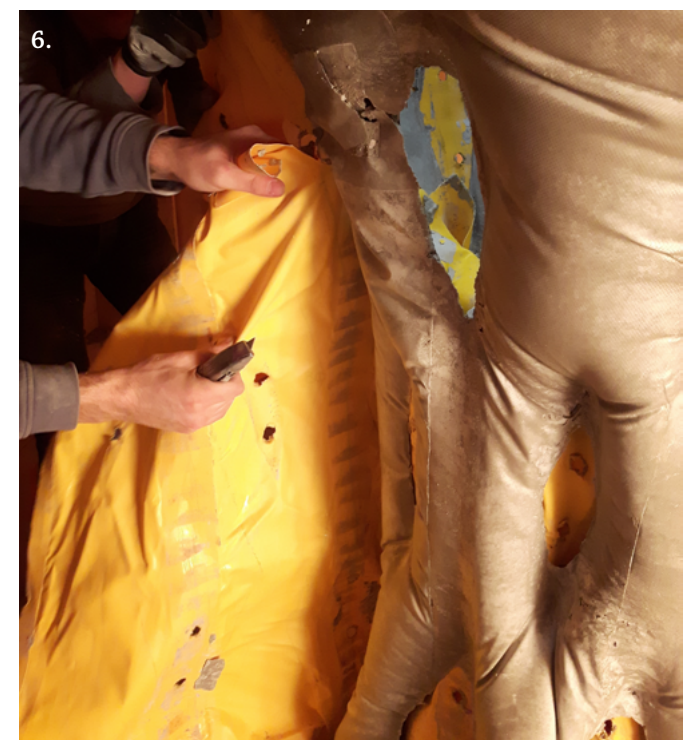
CONSTRUCTIEVE EFFICIËNTIE

De invloed van het vloeibare beton op de textielmal hoeft niet als negatief gezien te worden. De zwaartekracht kan positief worden gebruikt, zodat een constructie ontstaat waarbij beton aanwezig is daar waar de grootste belasting zich manifesteert. Er vindt een interactie plaats tussen het textiel, de zwaartekracht en het vloeibare beton. Het vloeibare beton veroorzaakt vervormingen in het textiel die kunnen leiden tot constructieve efficiëntie. Constructieve efficiëntie wordt bereikt doordat buigende momenten worden gereduceerd. Er ontstaat een samenspel tussen het natuurlijk krachtenverloop in de constructie en het fabric formwork. Naar dit onderwerp wordt door Mark West en Kenzo Unno sinds de jaren '80 van de vorige eeuw onderzoek gedaan (University of Manitoba, Canada en Umi Architectural Atelier, Japan) [1]. Aan ETH Zurich doet de *Block Research Group* onderzoek naar fabric formwork. Zeer recent heeft Diederik Veenendaal daar zijn promotieonderzoek afgerond. Ook interessant is zijn artikel *Optimalisatie van textielgevormde constructies* (Tektoniek, november 2015).

FABRIC FORMWORK-PROJECT TU EINDHOVEN EN GEELLEN BETON

Ook aan de TU Eindhoven is inmiddels de nodige expertise opgebouwd met fabric formwork. In het vervolg van dit artikel wordt het Fabric formwork-project beschreven, waaraan één van de twee groepen studenten Structural Design, onder leiding van docenten Arno Pronk en Arjan Habraken, in het academisch jaar 2015-16 hebben gewerkt. De studenten in deze groep zijn: Gido Dielemans, Lia de Mooij, Pavlo Kuzin, Robbert de Smet en Tom Godthelp. Dit project is opgeknipt in twee fasen (verdeeld over twee studieblokken), die beide zijn afgesloten met de daadwerkelijke realisatie van een betonnen object. Het finale prototype is gerealiseerd in de fabriek van

4. De textielmallen van het eindmodel zijn gemaakt van PVC-gecoat polyester vanwege de hoge treksterkte en het relatief lage smeltpunt, ten behoeve van het lassen van de snijpatronen met een heteluchtpistool.
5. Er is gekozen voor een zelfverdichtend betonmengsel, omdat verdichten met de trilnaald vanwege de complexe vorm niet mogelijk was.
6. Ontkisten van het fabric formwork: er is extreem weinig bekistingsmateriaal nodig om toch complexe vormen te kunnen maken.



Geelen Beton in Wanssum. Verderop in dit artikel wordt deze 2,4 m hoge, elegant gevormde betonkolom nader beschreven.

FASE 1

In fase 1 is een eerste kennismaking gedaan met de techniek en specifieke eigenschappen van fabric formwork. De studenten hebben ontwerpen gemaakt voor overkappingen van een fictieve parkeergarage. Deze zijn op kleine schaal uitgevoerd in gips. De fase is afgesloten met de hands-on Tektoniek-workshop die plaatsvond op de TU Eindhoven tijdens de Dutch Design Week 2015 (oktober). Samen met studenten Architecture hebben de studenten Structural Design, in multidisciplinaire teams en in een kleine week tijd, negen betonnen elementen ontworpen en gemaakt. Daarbij kwam de ervaring met parametrische ontwerpsoftware en Lycra¹ schaalmodellen, opgedaan met de gipsmodellen voor de parkeergarage, goed van pas. Fenomenen als vouwen in het textiel en het bollen van het textiel als gevolg van de stortbelasting werden direct zichtbaar in de praktijk, terwijl ze werden verkend op het gebied van esthetica, constructief gedrag en maakbaarheid.

FASE 2

In fase 2 zijn twee betonelementen uit de Tektoniek-workshop uitgekozen om verder uit te werken op grote schaal. Op initiatief van Arno Pronk werd medewerking gezocht en gevonden bij prefab-betonproducent Geelen Beton. De studenten Structural Design hebben in de fabriek een groot deel van de werkzaamheden kunnen uitvoeren en mogen profiteren van het vakmanschap van het personeel. Nadat de studenten de ontwerpen hadden gepresenteerd aan Niels van der Hulst, technisch directeur, volgden enkele weken van detaillering en verfijning daarvan. Het vervolg van dit artikel beschrijft de uitwerking van één van de twee ontwerpen, de zogenaamde Organica Hyparbolica.

PRAKTIJKCASE: ORGANICA HYPARBOLICA

Het ontwerp voor het finale, boomvormige, prototype – gedurende het project omgedoopt tot Organica Hyparbolica – kenmerkt zich door een hyperbolische kolom die de ondersteuning vormt voor een hyparschaal. Om de constructie zo efficiënt mogelijk te maken, is zoveel mogelijk gewicht bespaard. Het ontwerp is parametrisch bepaald: het is 3D gemodelleerd in Rhinoceros in combinatie met Grasshopper en de plug-in Kangaroo Physics voor het simuleren van het elastisch gedrag van het textiel. Door te variëren in geometrie, positie van de vaste punten (anchorpoints), trekkracht en stijfheid van het textiel, kon de uiteindelijke, optimale vorm van het fabric formwork worden bepaald. De te verwachten rek van het textiel door toedoen van de stortdruk, is vooraf

¹ Lycra is een gangbare merknaam voor een elastomeer dat uit polyurethaan (PUR) bestaat en gebruikt wordt in de textielindustrie als een synthetisch rubber.



7. In het beton is 35 kg/m³ staalvezelwapening toegevoegd.

bepaald op basis van materiaalproeven. In het ontwerp is hiermee rekening gehouden.

Zowel in de kolom als schaal is de doorsnede van de constructie zo slank mogelijk gehouden en voorzien van openingen. De posities daarvan zijn eveneens parametrisch bepaald. Tussen de openingen is het fabric formwork in diagonale ‘kanalen’ vormgegeven. Deze lopen over het oppervlak van het object in twee, elkaar kruisende richtingen (soort netkous). Om er zeker van te zijn dat het beton bij het gieten de hele textiemaal zou vullen, moesten de kanalen een zekere minimale doorsnede hebben. De openingen zijn gemaakt door de twee lagen textiel, waartussen het beton is gestort, tegen elkaar te klemmen met behulp van multiplex plaatjes in de vorm van de sparingen. De textiemaal is opgebouwd uit verschillende snijpatronen van PVC-gecoat polyester. Dit materiaal heeft een hoge treksterkte en een relatief laag smeltpunt. Hiervoor was gekozen, zodat de snijpatronen aan elkaar konden worden gelast met een heteluchtpistool.

ZELFVERDICHTEND BETON

Vanwege de complexe, vaak organische en dubbelgekromde vormen die ontstaan bij geoptimaliseerde betonconstructies met fabric formwork, is verdichten van het beton geen optie. Er is immers nauwelijks of geen ruimte voor de trilnaald. Bovendien zou hiermee de bekistingsdruk worden verhoogd, met mogelijk bezwijken van het textiel tot gevolg. Ook het aanbrengen van wapening is praktisch onmogelijk vanwege de complexe geometrie. In de praktijkcase is daarom gebruikgemaakt van een zelfverdichtend betonmengsel met druksterkteklasse C50/60 en een maximale korreldiameter van 8 mm. Hierbij trad enige vorm van ontmenging op (het naar beneden zinken van zware korrels, waardoor een niet-homogeen mengsel ontstaat), hetgeen aandacht vereist bij zeer vloeibare meng-



8. In het voetstuk zijn traditionele wapening toegepast en voorzieningen opgenomen om het betonelement per heftruck verplaatsbaar te maken.

sels. Dit had echter geen nadelige constructieve of esthetische gevolgen voor het eindresultaat.

STAALVEZELS

Aan het beton is 35 kg/m³ staalvezelwapening toegevoegd. Hierdoor krijgt het beton een nascheurtreksterkte en kunnen relatief kleine momenten worden opgenomen. Dit was bij het ontwerp noodzakelijk, aangezien er trekkrachten optreden in de constructie. Er is gekozen voor het type staalvezel Dramix 5D 65/60 GG. Daarbij staat de ‘codering’ voor: vezels met een lengte/dikte-verhouding van 65, een lengte van 60 mm, die thermisch verzinkt (galvanized) zijn om roestvorming te voorkomen en die als nietjes zijn verlijmd (glued). Dit verlijmen wordt gedaan om klitvorming van de vezels in de verpakking te voorkomen. De lijm is oplosbaar in water (tijdens het mengen). Om klitvorming van de vezels tijdens het verwerken van het betonmengsel te voorkomen, was het noodzakelijk een zekere minimale doorsnede van het beton aan te houden. Aan het betonoppervlak worden de staalvezels bedekt door een hele dunne cementlaag, waardoor ze niet meer zichtbaar of voelbaar zijn. Dat is verrassend in positieve zin en wellicht ook deels te verklaren doordat op veel plekken later handmatig met een cementpasta is ‘gestuukt’ om de minder fraaie plekken te herstellen. Alleen ter plaatse van de stortnaad tussen de boom en het voetstuk is traditionele wapening toegepast, zodat de daar optredende krimp en buigende momenten effectief worden opgevangen.

10. De vouwen, gebolde doorsneden en het tactiele oppervlak van het beton tonen de elegante vormtaal van fabric formwork. Foto: Robbert de Smet



9. De houten hulpconstructie, waaraan de textiellmallen waren gespannen, worden verwijderd.



ON TOUR

De totale afmetingen van de Organica Hyparbolica zijn binnen een kubus van $2,4 \times 2,4 \times 2,4 \text{ m}^3$ gebleven, zodat het betonelement eenvoudig te transporteren is over de weg. Het totale gewicht bedraagt inclusief bodemplaat ongeveer 7000 kg. In de bodemplaat zijn voorzieningen opgenomen om het betonelement per heftruck verplaatsbaar te maken. Inmiddels heeft de markante boomkolom zijn eerste tours erop zitten. Tijdens de Dutch Design Week 2016 was hij te zien in het Klokgebouw. De volgende stop was Materia Xperience 2017, tijdens de BouwBeurs (6 t/m 10 februari, Jaarbeurs Utrecht). Inmiddels hebben dus al een heleboel mensen kennisgenomen van fabric formwork en de mogelijkheden die de techniek biedt voor constructief efficiënte betonconstructies.

DANKWOORD

De studenten Gido Dielemans, Lia de Mooij, Pavlo Kuzin, Robbert de Smet en Tom Godthelp willen de partijen die het project Fabric formwork mogelijk hebben gemaakt bedanken voor de mooie ervaring die zij hebben opgedaan met de techniek en beton in het algemeen. Deze partijen zijn:

- de vakgroep Structural Design van TU Eindhoven voor de extra inspanningen om van dit project een bijzondere, praktijkgerichte ervaring te maken;
- Geelen Beton en in het bijzonder Niels van der Hulst, voor de praktische kennis, faciliteiten in de fabriek, de hulp bij de uitvoering van het finale prototype en het zorgen voor het beton en bekistingsmateriaal;

- Bekaert en in het bijzonder Anne Hoekstra, voor de sponsoring van de staalvezels;
- Cement&BetonCentrum, bureaubakker en Weber Beamix, voor de co-organisatie en ondersteuning van de Tektoniek-workshop waarin een eerste inspirerende hands-on kennismaking is gedaan met fabric formwork en beton.

LITERATUUR

[1] Diederik Veenendaal, Mark West en Philippe Block.

History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting. Structural Concrete 12, 15 mei 2011.

PROJECTGROEP

Begeleiding

Arno Pronk en Arjan Habraken, TU Eindhoven, Structural Design.

Studenten

Op de foto van links naar rechts: Tom Godthelp, Pavlo Kuzin, Robbert de Smet, Lia de Mooij en Gido Dielemans.

Externe ondersteuning tijdens Tektoniek-workshop (in fase 1)

Siebe Bakker, bureaubakker; Coen Smets, Cement&BetonCentrum; Weber Beamix (materiaalsponsor).

Externe ondersteuning tijdens realisatie finale prototypes bij

Geelen Beton (in fase 2)

Niels van der Hulst, technisch directeur Geelen Beton, en collega's.

