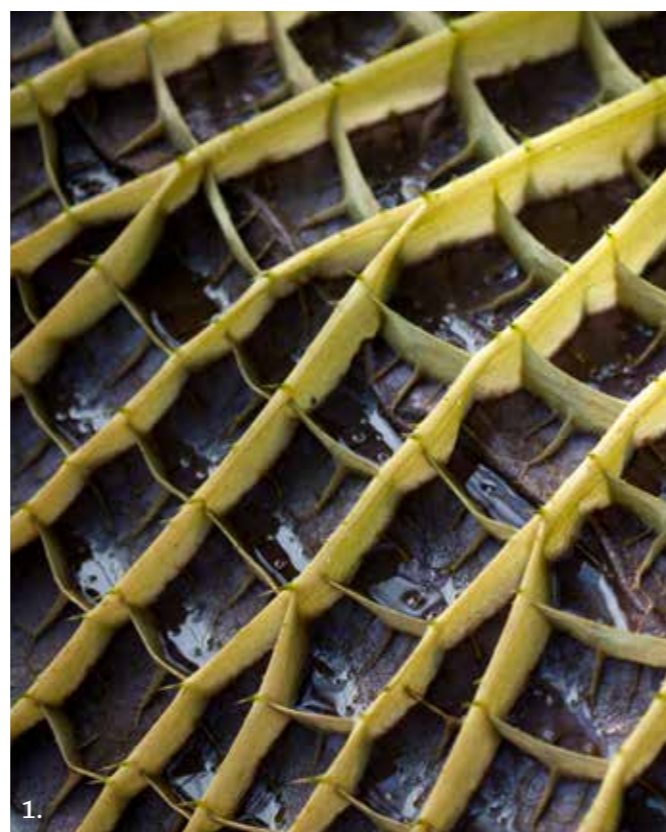


MAAKBAARHEID

Vacuüm-gestabiliseerde zandmallen

FRANK HUIJBEN - ABT



1. Topologie-geoptimaliseerde bladeren van de Amazone-waterlelie.

ARTIKELENSERIE FLEXIBELE MALSYSTEMEN

In de [Tektoniek-workshop](#) van 16 augustus 2015 in Amsterdam, georganiseerd door de International Society of Flexible Formwork (ISOFF) in samenwerking met het Cement&BetonCentrum, is hands-on gewerkt met drie recent ontwikkelde flexibele malsystemen. Dit artikel is het eerste in een serie van drie op [www.tektoniek.nl](#). Het tweede artikel van Roel Schipper en Peter Eigenraam beschrijft de flexibele herbruikbare mal van TU Delft. Het derde artikel van Arno Pronk beschrijft de flexibele 'acrylaat'-mal van TU Eindhoven. Op de constructeur toegepaste versies van deze drie artikelen verschijnen in de loop van 2016 voor abonnees van [Cement](#), het kennisplatform over betonconstructies.

LEREN VAN DE NATUUR

De topologie van een constructie beschrijft de precieze plaatsing van materiaal binnen de totale vorm. Zogenaamde topologie-geoptimaliseerde constructies komen veel voor in de natuur (foto 1). De natuur streeft er namelijk naar om krachten zo efficiënt mogelijk (met zo min mogelijk materiaal) over te dragen. Het leren van de natuur en het nabootsen van haar principes (biomimicry [1]) kan op grote fascinatie reke-

nen vanuit de architectuur. De vormen zijn naast efficiënt en duurzaam, vaak ook 'organisch' en daarmee bijzonder elegant. Er is voldoende software op de markt om dergelijke vormen te bepalen aan de hand van vooraf gedefinieerde randvoorwaarden en belastingcondities [2]. Maar zulke vormen moeten ook eenvoudig te maken zijn.

TOPOLOGIE-GEOPTIMALISEERDE BETONCONSTRUCTIES

Het adopteren van natuurlijke principes en vormtaal heeft in de architectuurgeschiedenis geleid tot innovatieve toepassingen in diverse materialen. Op het gebied van metselwerk heeft meesterbouwer Antoni Gaudí (1852-1926) een belangrijke rol gespeeld [3]. Architect/onderzoeker Frei Otto (1925-2015) deed dat op het gebied van lichte draagconstructies (kabelnetten en membranen) [4]. Op het gebied van betonconstructies gaat de eer naar constructeur/bouwer Pier Luigi Nervi (1891-1979). Nervi ontwikkelde en patenteerde in 1949 een constructiesysteem dat bestaat uit een relatief dunne betonnen schil met daaronder organisch gevormde ribben voor sterkte en stijfheid. Hij stuitte op deze verrassende expressieve vormen door de krachtswerking in platen en schalen te vertalen naar de topologie van de constructie (de plaatsing van de ribben) [5]. Aan de hand van deze techniek ontwierp en bouwde Nervi vele betonconstructies, waarbij de topologie van de constructie zowel constructief efficiënt als esthetisch fascinerend is (foto 2).



2. Topologie-geoptimaliseerde ribconstructies ontworpen door Pier Luigi Nervi; Gatti wolfabriek (Rome, 1951).

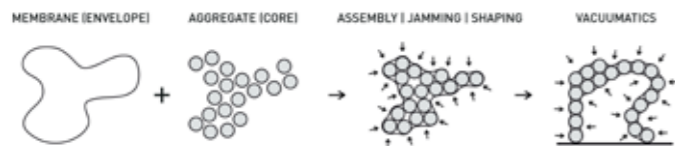
Een opvallend feit is dat Nervi in staat was om deze geribde constructies te realiseren, simpelweg omdat het de goedkoopste methode was (in die tijd in Italië) om grote ruimtes te overspannen met zo min mogelijk materiaal [6]. Nervi gebruikte daarvoor dunne geprefabriceerde bakvormige ferro-cement-elementen, die als permanente bekisting op een steigerwerk werden geplaatst. Door over de ferro-cement-elementen een (constructieve) laag beton aan te brengen, ontstaat de ribstructuur (foto 3).

RENDABELE, DUURZAME PRODUCTIE

Ook in de hedendaagse architectuur zijn er tal van toepassingsmogelijkheden voor dergelijke geribde betonconstructies denkbaar, zoals lichtgewicht vloeren en schaaldaken, maar ook open structuren voor bijvoorbeeld gevels, wanden, of zelfs kolommen. Het is echter relatief tijdrovend, arbeidsintensief en nauwelijks duurzaam om topologie-geoptimaliseerde (geribde) betonconstructies, zoals het werk van Nervi, te produceren met traditionele bekistingmethoden. Weliswaar kunnen tegenwoordig prachtige resultaten worden bereikt met door robots gevormde mallen van geëxpandeerde polystyreen (EPS). Echter, deze high-techtechniek is niet voor elk project een haalbare optie. Een relatief nieuwe productietechniek lijkt uitkomst te bieden voor een potentieel meer rendabel en duurzaam low-tech alternatief: vacuüm-gestabiliseerde zandmallen.



3. De bouw van de sporthal Palezzetto dello Sport, ontworpen door Pier Luigi Nervi (Rome, 1959).



4. Het constructieve principe van vacuümconstructies (vacuumatics) [7].

VACUÛM-GESTABILISEERDE ZANDMALLEN

Vacuüm-gestabiliseerde zandmallen ('vacuumatic formwork') benutten de vormvrijheid van beton optimaal door gebruik te maken van een vacuümconstructie als tijdelijke en aanpasbare ondersteuningsconstructie (figuur 4). Onderzoek aan de Technische Universiteit Eindhoven [7] heeft aangetoond dat vacuumatic formwork vele mogelijkheden biedt voor de productie van uiteenlopende oppervlaktetexturen en complexe vormen in beton (foto 5).

De toepassing van vacuumatic formwork voor de productie van topologie-geoptimaliseerde betonconstructies borduurt voort op bestaande zandmal-technieken die in de metaalindustrie worden toegepast, waarmee complexe vormen te realiseren zijn met een hoge maatnauwkeurigheid (foto 6) [8].



5. Boven uiteenlopende oppervlaktetexturen en onder complexe vormen in beton, geproduceerd met vacuumatic formwork [7].



6. Een complexe aluminium vorm met een hoge maatnauwkeurigheid (geproduceerd volgens de V-process-methode).

Zand wordt gestabiliseerd en dient als tijdelijke ondersteuning voor het nog vloeibare metaal of in dit geval beton. Dit stabiliseren gebeurt door het creëren van een interne onderdruk (vacuüm) in het zandpakket dat omhult is met een rekbaar folie (V-process-methode) [9]. Het zand is na het lossen van de mal opnieuw te gebruiken. Bij het gieten van metaal gaat de folie verloren wegens de hoge temperaturen van het gegoten metaal. Bij de toepassing van beton blijft de folie echter behouden.

HAALBAARHEID GETEST TIJDENS WORKSHOP

De technische en praktische haalbaarheid van de productie van organisch gevormde betonnen ribconstructies is getest tijdens de Tektoniek-workshop 'Flexibele malsystemen' op 16 augustus 2015 in Amsterdam, georganiseerd door de International Society of Flexible Formwork (ISOFF) in samenwerking met het Cement&BetonCentrum.

Voor het gebruik van vacuüm-gestabiliseerde zandmallen is een moedervorm nodig waarvan meerdere identieke afdraken gemaakt kunnen worden. Het voordeel van het gebruik van een moedervorm is dat deze 'mock-up' nog kan worden verfijnd voordat het daadwerkelijke object wordt gefabriceerd. Voor seriematige toepassingen is het daarnaast goed mogelijk om de (oneindig herbruikbare) moedervorm te vervaardigen met behulp van geavanceerde digitale productiemethoden, zoals CNC-frezen, draadsnijden of zelfs 3D-printen. Voor deze workshop is ervoor gekozen om het productieproces zo toegankelijk mogelijk te maken (foto's 7 t/m 14), door onder

andere gebruik te maken van gangbare materialen uit een bouwmarkt. Zo is de moedervorm te snijden uit EPS-platen en is er verder gebruikgemaakt van een stofzuiger (als vacuümpomp), relatief fijn zilverzand, een folie met een hoge rekcapaciteit (polyolefine co-polymeer) en een getimmerde houten randbekisting.

Zodra de moedervorm is vormgegeven, wordt de folie met behulp van een vacuümpomp over de vorm gespannen. Dit principe wordt ook wel vacuümvormen of dieptrekken genoemd (foto 8). De rekcapaciteit van de folie wordt vergroot door deze kort te verwarmen. Bij de workshop is daarvoor gebruikgemaakt van een terrasverwarmer. Na het opwarmen en respectievelijk het vacuümvormen wordt een laag zand over de gespannen folie uitgespreid (foto 9), waarna de met zand gevulde randbekisting luchtdicht wordt afgesloten om deze vervolgens te kunnen omkeren. In dit geval is de randbekisting afgesloten met een houten plaat, speciale sealing-tape en een aantal draadeinden om het zand voldoende op te sluiten. Dit maakt het mogelijk om de bekisting om te keren, zonder dat het geheel op onderdruk hoeft te blijven (wat normaliter wel het geval zou zijn).

De betonnen elementen hebben afmetingen van 700 x 700 mm² met een maximale ribhoogte van circa 100 mm. Voor industriële toepassingen zijn er weinig beperkingen ten aanzien van de afmetingen. In de metaalindustrie wordt bij het luchtdicht afsluiten veelal een tweede laag folie gebruikt die gemakkelijk en snel is aan te brengen. De zandmal blijft op onderdruk tijdens het omkeren. Hiervoor wordt een eenvoudig kantelmechanisme gebruikt waarin de mal simpelweg roteert om zijn centrale as. Het zand blijft in de randbekisting 'hangen' als gevolg van de vacuümdruk. Er wordt veelal gewerkt met mallen tot 1 m hoog en enkele meters lang.

In de workshop is de zandmal na het omkeren op onderdruk gebracht. Hiervoor wordt het zand gestabiliseerd, zodat het in zijn vorm blijft. Na het verwijderen van de moedervorm, is te zien dat deze een afdruk heeft achtergelaten in het zand (foto 10). Vervolgens kan het betonmengsel worden aangebracht (foto 11). Voor deze workshop is een mengsel in ultrahogesterktebeton toegepast met kunststofvezels (UHPFRC) en wit pigment. Er was een relatief snelle uitharding noodzakelijk om de betonnen objecten de volgende ochtend te kunnen ontkisten. Hierop is het mengsel specifiek voorbereid.

7 - 10. Van boven naar beneden: De uit EPS gesneden moedervorm. Het vacuümvormen (dieptrekken) van de folie over de moedervorm. Het opvullen van de randbekisting met zand. De moedervorm laat een afdruk achter in de vacuüm-gestabiliseerde zandmal.





Normaliter zou de vacuümpomp aangesloten dienen te blijven gedurende het uitharden van het betonmengsel, maar vanuit praktische overwegingen (transport van de mal vóór het ontkisten) is daar in deze workshop van afgezien. De zandmal is overigens ook zonder vacuüm voldoende stabiel gebleken, zodat het betonmengsel prima heeft kunnen uitharden.

ONTKISTEN

Het ontkisten van het betonnen element de volgende ochtend is bijzonder eenvoudig gebleken. Doordat de folie zich niet hecht aan het betonnen oppervlak, is het element simpelweg uit de mal te tillen (foto 12). Eventueel zou het mogelijk zijn om de zandmal (tijdelijk) op overdruk te zetten (opblazen), waardoor het betonnen element uit de mal wordt gedrukt. In deze workshop was dit niet noodzakelijk.

Het zand is niet in aanraking geweest met het beton. De zandmal is na het ontkisten dus volledig herbruikbaar voor de productie van een volgend element (foto 13).



EINDRESULTAAT

Tijdens de workshop hebben drie afzonderlijke teams van circa vijf deelnemers in één middag gewerkt aan de productie van een geribde betonnen plaalement (de randbekisting was al eerder voorbereid). Daarbij hebben zij gebruikgemaakt van identieke hulpmiddelen. De workshop heeft aangetoond dat het technisch en praktisch haalbaar is een grote verscheidenheid aan topologie-geoptimaliseerde (geribde) betonconstructies te realiseren door gebruik te maken van een (identieke) vacuüm-gestabiliseerde zandmal (foto 14 en 15).

De gedetailleerdheid van de betonnen ribben is met name afhankelijk van de korrelgrootte van het toegepaste aggregaat (voor een glad oppervlak), de vloeibaarheid van het betonmengsel (voor een goede verdichting van slanke doorsneden) en de rekbaarheid van de folie in combinatie met de mate van interne onderdruk (voor precieze aftekening van de moeder-vorm). De beperkte vacuümdruk van de stofzuiger (circa 25% ten opzichte van een vacuümpomp) en de beperkte opwarming van de folie hebben bij de workshop geresulteerd in de vloeiende vormen van de ribben. Door met bovengenoemde variabelen te 'spelen' is echter een grote variëteit aan zowel vloeiende als strakke ribvormen realiseerbaar.

Ten behoeve van de praktische benadering van de workshop is er gekozen voor een bekistingstoepassing met een enkelzijdige zandmal. Het gebruik van vacuüm-gestabiliseerde zandmallen maak het echter zeer goed mogelijk om een dubbelzijdige zandmal toe te passen, waarbij twee helften ieder een aparte vorm kunnen hebben (vergelijkbaar met de V-process-metho-

11 - 13. Het aanbrengen van het betonmengsel (UHPCFRC). Ontkisten van het betonnen element bleek bijzonder eenvoudig. Het zand is na het ontkisten direct herbruikbaar.



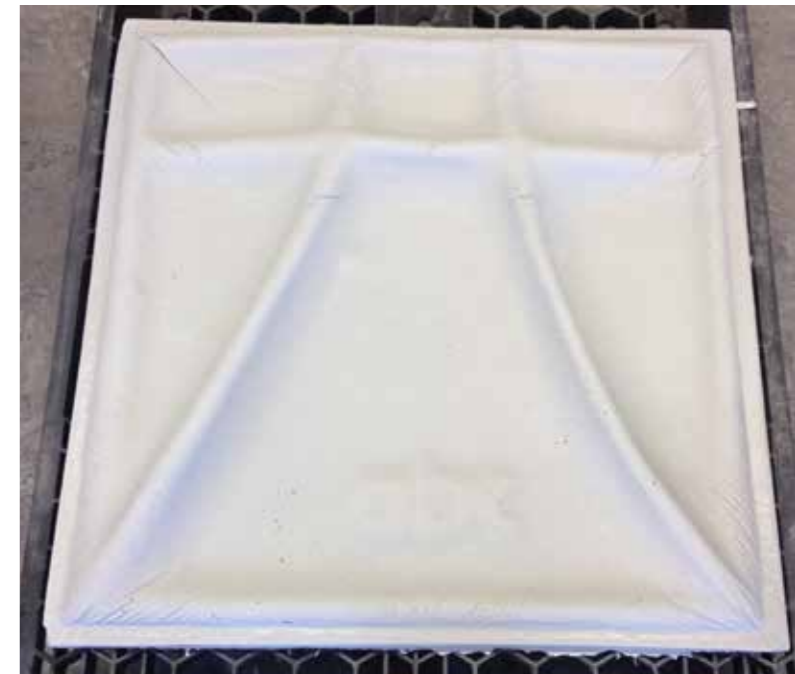
de). Het beton dient dan via één of meerdere openingen in de gesloten mal gegoten te worden.

BINNEN HANDBEREIK

Voor de productie van complexe topologie-geoptimaliseerde betonnen vormen bieden vacuüm-gestabiliseerde zandmallen enkele grote voordelen ten opzichte van andere bekistingsmethoden, zoals getimmerde bekistingen en EPS-mallen. De belangrijkste zijn de toegankelijkheid van de techniek en gebruikte materialen (low-tech), de volledige herbruikbaarheid van alle onderdelen, de intrinsieke vormvrijheid van het granulaat (zand), de maatnauwkeurigheid van het eindproduct en het gemak van het ontkisten. Met vacuüm-gestabiliseerde zandmallen lijkt een praktische, economische en duurzame realisatie van topologie-geoptimaliseerde betonconstructies binnen handbereik.

REFERENTIES

1. Pawlyn, M., *Biomimicry in Architecture*. RIBA Publishing, London, 2011.
2. Ohmori, H., *Computational Morphogenesis - Its current state and possibility for future*. Proceedings of the 6th International Conference on Computational of Shell and Spatial Structures, 2008.
3. Crippa, M.A., Antoni Gaudí - Van Natuur naar Architectuur. Nederlandse vertaling, Taschen GmbH, Köln, 2010.
4. Bach, K., Bereiter-Hahn, J., Gutmann, W.F., Helmcke, J.-G., Nachtigall, W., Otto, F., Raccanello, R., Schaur, E. & Schill, R. *IL9 Pneu - Pneus in Nature and Technics*. Institut für leichte Flächentragwerke (IL), Stuttgart, 1976.
5. Halpern, A.B., Billington, D.P. & Adriaenssens, S. *The Ribbed Floor Slab Systems of Pier Luigi Nervi*, J. Int. Assoc. Shell Spat. Struct. Symp. 2013, vol. 54, no. 176-177, pp. 127-136, 2013.
6. Kato, A., Nicoletti, G., Gregotti, V., Grandori, G., Ueda, A. & Kawasaki, K. *Process Architecture - Pier Luigi Nervi*, 1981.
7. Huijben, F. *Vacuomatics - 3D Formwork Systems*, Eindhoven University of Technology, 2014.
8. Ravi, B., *Metal Casting - Computer-Aided Design and Analysis*. Prentice-Hall of India, New Delhi, 2005.
9. Shengping, Y., Lei, W. & Dehan, L. *The EVA plastic film for V-process and steel castings by V-process in China*. China Foundry, vol. 5, no. 2, pp. 77-81, 2008.
10. Pemberton, J.M., *Ferrocement - An Insight and Review - So What Is New?*. Ferrocement 6 - Lambot Symposium, Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrocement, 1998.



14. Door de beperkte onderdruk en rekbaarheid van de folie tonen de geproduceerde elementen een vloeiende ribstructuur.



15. Het eindresultaat van de workshop laat een grote verscheidenheid aan topologie-geoptimaliseerde (geribde) betonelementen zien.