

MAAKBAARHEID

Flexibele herbruikbare mal

ROEL SCHIPPER – TU DELFT, FAC. CITG
PETER EIGENRAAM – TU DELFT, FAC. CITG

1.

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 recente flexibele malsystemen. Dit artikel is het tweede in een serie van drie op www.tektoniek.nl. Het eerste artikel van Frank Huijben beschrijft vacuüm-gestabiliseerde zandmallen. Het derde artikel van Arno Pronk beschrijft de flexibele ‘acrylaat’-mal van TU Eindhoven.

Op de constructeur toegespitste versies van deze drie artikelen verschijnen in de loop van 2016 voor abonnees van [Cement](#), het kennisplatform over betonconstructies.

WAAROM EEN FLEXIBELE MAL?

In tegenstelling tot wat gebruikelijk is bij de massaproductie van auto's, smartphones of koffiezetapparaten, wordt in de bouwwereld vaak maar één enkel exemplaar van een gebouw ‘gefabriceerd’. Dit maakt dat veel fabricageprocessen in de bouw geschikt moeten zijn voor unieke producten in kleine oplages. In de traditionele architectuur maakten platte en rechthoekige vormen het mogelijk om op een slimme manier

toch nog redelijk wat repetitie van gebouwelementen mogelijk te maken. Denk aan allerlei producten in standaardmaten van veelvouden van 60 centimeter. Echter, door de ontwikkeling van krachtige 3D-modelleergereedschappen in tekensoftware is het voor industrieel ontwerpers, automotive-designers en ook voor architecten vandaag de dag simpel om compleet vrije vormen te ontwerpen.

Wat opvalt is dat in de (meer exclusieve) architectuur vormen in opkomst zijn die vergelijkbaar zijn met vormen uit de automotive-industrie. Die overeenkomst beperkt zich niet alleen tot de (dubbele) krommingen. Ook de opbouw in elementen en met name de aansluitingslijnen waarop deze elementen aan elkaar worden verbonden, zien we in beide bouwwijzen terug. Enkele voorbeelden zijn de [Mobile Art Chanel Contemporary Art Container](#) van Zaha Hadid Architects en de nieuwe stations voor het [Crossrail metro-project](#) in Londen van diverse architecten. Naast de belangrijkste functie van deze aansluitingslijnen, het opdelen in kleinere prefab-elementen, wordt hierdoor de vorm ook ‘leesbaar’. Een egaal vlak zou tot een minder geprononceerde vorm leiden.

In ontwerp en gebruikte CAD-software komen we gelijkenissen tussen de automotive-industrie en de meer exclusieve architectuur nog tegen. Maar in productiewijze zijn beide werelden sterk afwijkend. Voor een auto kan hetzelfde carrosseriedeel in honderden of duizenden exemplaren worden

gereproduceerd, terwijl - als we denken aan beton - voor een gebouw ieder uniek element in een aparte mal zal moeten worden gemaakt. Hierna wordt de mal direct overbodig als het element maar één keer wordt uitgevoerd. Dit maakt niet-repetitieve, (dubbel)gekromde vormen in de bouw tot een erg dure aangelegenheid.

KINE-MOULD

De Kine-Mould, de flexibele herbruikbare mal die is ontwikkeld aan de TU Delft in samenwerking met TU Eindhoven, kan hierin verbetering brengen. Deze mal heeft veel weg van een ‘rapid prototyping’-techniek. Dat houdt in dat met de Kine-Mould kleine series of zelfs unieke elementen met veel vormvrijheid kunnen worden gemaakt, met behoud van de snelheid, herbruikbaarheid en economie van het traditioneel storten van betonelementen in platte mallen.

Het onderzoek met de flexibele mal werd gestart met de intentie gevelpanelen te produceren. Gedurende het onderzoek werd duidelijk dat de toepassing ook breder kan zijn. Geschikte toepassingsmogelijkheden zijn o.a.:

- gekromde bekledingselementen voor gebouwen, reservoirs, silo's, tunnels;
- verloren bekistingen voor gekromde vloeren of civiel-technische kunstwerken;
- prefab-segmenten van dragende dubbelgekromde schaal(achtige) constructies.

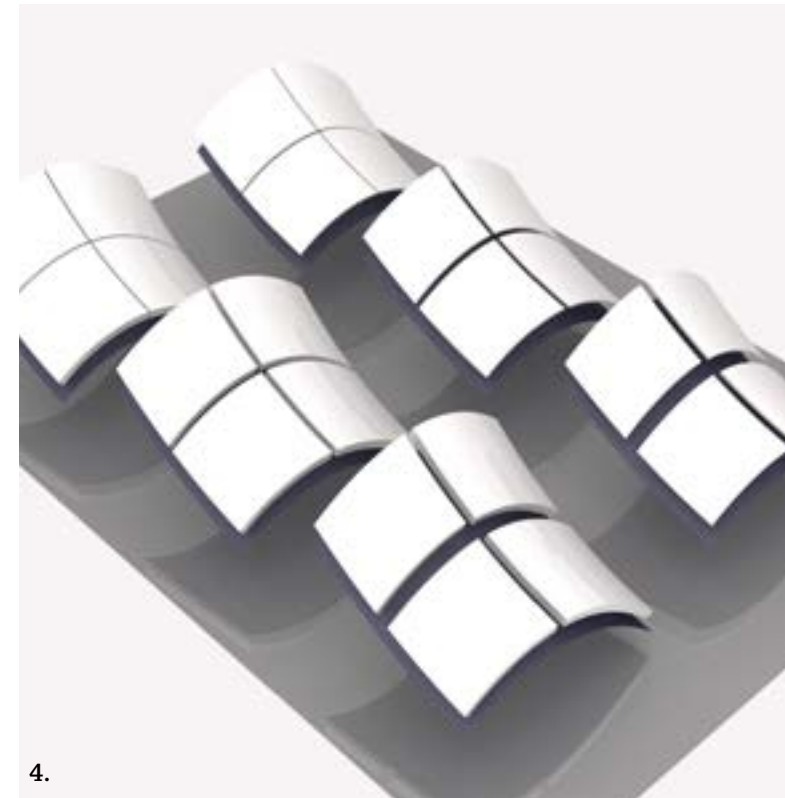


1. Dakelementen Arnhem OV Terminal

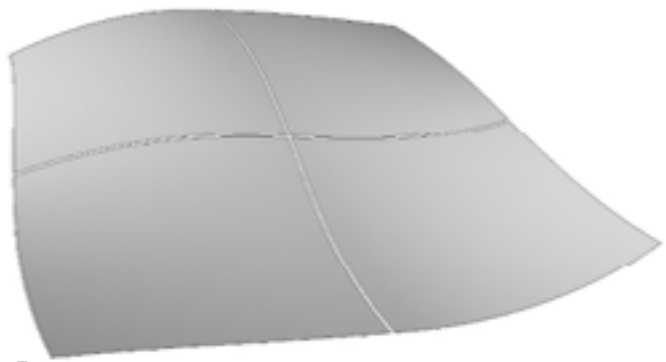
2. Fragment carrosserie van een moderne auto.



3. ‘Leesbare’ vormen in de Mobile Art Chanel Contemporary Art Container van Zaha Hadid Architects.



4. Rendering van dubbelgekromde panelen gegoten in zelfverdichtend beton met extreem gladde oppervlaktetextuur en verfijnde randdetailering.



5.



6.



7.

5. Model van de te realiseren dubbelgekromde panelen in de Tektoniek-workshop.

6. Het storten van een element vindt plaats in vlakke toestand. De mal wordt pas later vervormd.

7. De tijdens de workshop gestorte en vervormde elementen worden ontlast en aan elkaar gepast.

De techniek is geschikt voor een grote variëteit aan betonmengsels. Hierdoor is naast vormvrijheid ook een bijna onbeperkte variatie mogelijk in kleur en oppervlaktetextuur (gepolijst, waterafstotend, gezandstraald). In Nederland is de techniek kort geleden voor het eerst toegepast voor de [Arnhem OV Terminal](#), (foto cover) waarvan de dakelementen op een flexibele mal zijn geproduceerd door mbX in Bergen op Zoom. De aan de universiteiten ontwikkelde Kine-Mould beoogt zelfs nog grotere vormvrijheid te bieden dan de door mbX gebruikte techniek.

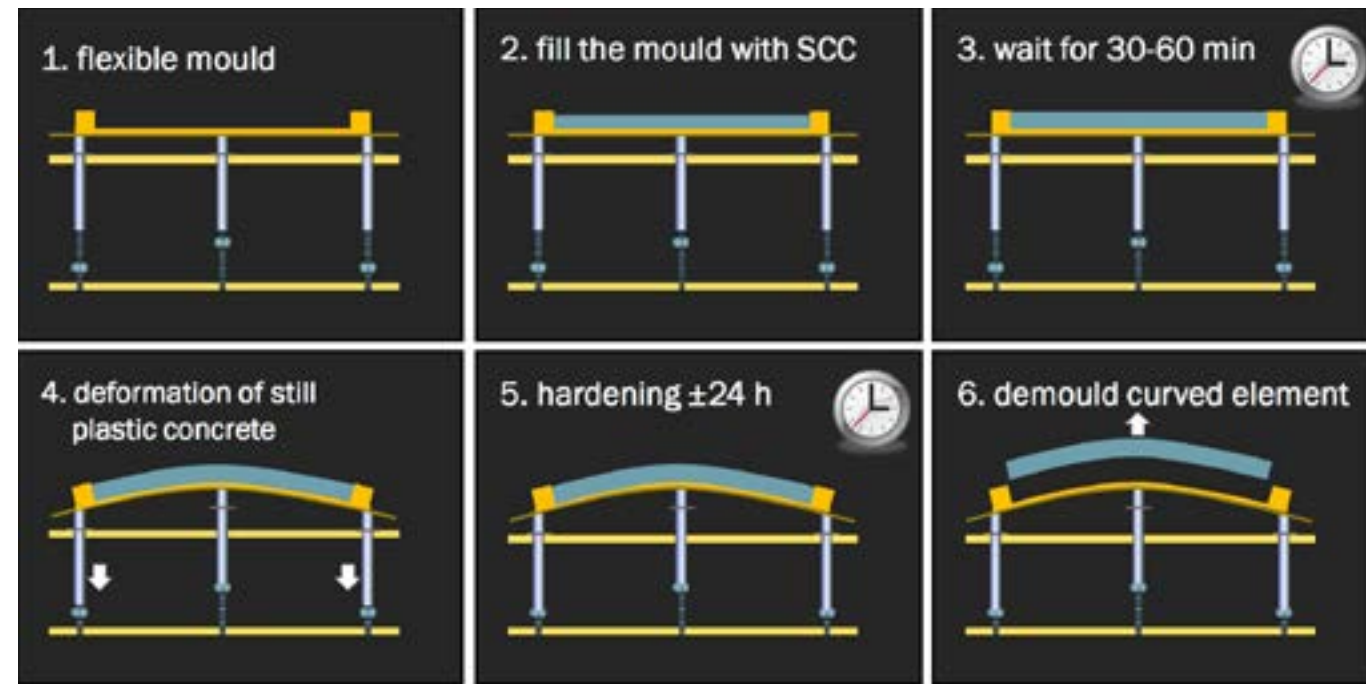
WORKSHOP

De technische en praktische haalbaarheid van de Kine-Mould is gedemonstreerd tijdens de Tektoniek-workshop van 16 augustus 2015 in Amsterdam, georganiseerd door de International Society of Flexible Formwork (ISOFF) in samenwerking met het Cement&BetonCentrum (zie kader). Door drie groepen werd een element voorbereid, gestort en ontlast (foto's 6 en 7). Deze elementen waren gebaseerd op het ontwerp weergegeven in figuur 5 en moesten 'naadloos' op elkaar aansluiten. Ondanks de behoorlijke kromming sluit de randgeometrie inderdaad goed aan. Dankzij het gebruikte kunststofmembraan in de mal en het witte betonmengsel is er een mooie glanzende oppervlaktetextuur ontstaan. Overigens is nog niet bekend of deze glanzende textuur ook onder buitencondities blijvend zou zijn.

HOE WERKT DE METHODE?

Figuur 8 toont schematisch de methode van de Kine-Mould. De laag waarop het beton wordt gestort, bestaat uit een flexibel membraan. Deze membraan wordt ondersteund door een vervormbaar vlak. Dit vlak bestaat uit samengestelde lineaire elementen, bijvoorbeeld strips of staalweefsel. Tot nu toe lijkt een geweven vlak van draden van verenstaal de beste optie. Het is goed vervormbaar en veert ook weer terug. Het vlak rust op in hoogte verstelbare buizen* (stap 1). Het beton wordt in de mal gestort wanneer deze horizontaal is (stap 2). Het beton moet daarna gedurende 30 tot 60 minuten tot rust komen en enige sterkte opbouwen voordat de mal vervormd kan worden (stap 3). Een goede timing is essentieel: bij te vroeg vervormen zal het beton uit de mal lopen; als te lang wordt gewacht kunnen scheuren ontstaan. Uit onderzoek aan de [Technische Universiteit Delft](#) [1] is gebleken dat dit proces goed kan worden beheerst door het uitvoeren van vloe- en zetmaat-proeven. De mal wordt daarna vervormd (stap 4) door gebruik te maken van het eigen gewicht van het beton. Het vlak beweegt hierdoor langzaam naar beneden toe, totdat het wordt 'opgevangen' door de van tevoren op de juiste hoogte ingestelde ondersteunende buizen. Nadat het beton voldoende is uitgehard (stap 5), normaliter na circa 24 uur, kan het uit de bekisting worden getild (stap 6). Daarna kan de mal opnieuw worden gebruikt (stap 1).

*) De hoogtes werden in het voor de workshop gebruikte prototype handmatig ingesteld met behulp van draadeinden en moeren.



7. Schematische weergave van de flexibele-mal-methode (SCC = beton).

WAT KAN DEZE MAL?

De Kine-Mould is specifiek ontwikkeld als eenzijdige bekisting. Het voordeel hiervan is het eenvoudige productieproces, dat gebruikmaakt van de wetenschap dat er bij veel toepassingen sprake is van een niet-zichtbare zijde. De zichtzijde (malzijde) is van esthetisch hoge kwaliteit, terwijl de achterzijde (het afwerkvlak) wat ruwer mag blijven, en ook de plaats is waar verankeringen worden geplaatst. Voorbeelden van toepassingen waarbij dit prima werkt zijn gevelpanelen, of - indien toegepast als constructief element - verloren bekistingselementen. De met de flexibele mal geproduceerde panelen hebben een relatief gelijkmatig verloopende kromming in twee richtingen. De minimale radius (en dus maximale kromming) die tot nu toe is getest bedraagt ongeveer 1,5 m in twee richtingen. Lokale meer extreme krommingen of scherpe hoeken zijn momenteel niet mogelijk. Bij de ontwikkeling is wel onderzoek gedaan naar hoe extra vormaanpassingen gerealiseerd kunnen worden, bijvoorbeeld via inlays of [inflatables](#) [2]. De dikte van het paneel is constant omdat het beton al in de mal wordt gestort wanneer deze nog in onvervormde, vlakke staat is. Hierdoor wordt niet onnodig veel materiaal gebruikt. Na het vervormen verandert de dikte nauwelijks. Tot nu toe is succesvol getest met elementen tussen 10 en 50 mm dikte.

HOE VAAK IS DE MAL HERBRUIKBAAR?

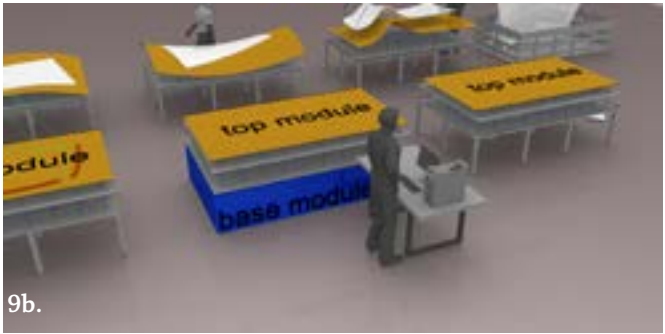
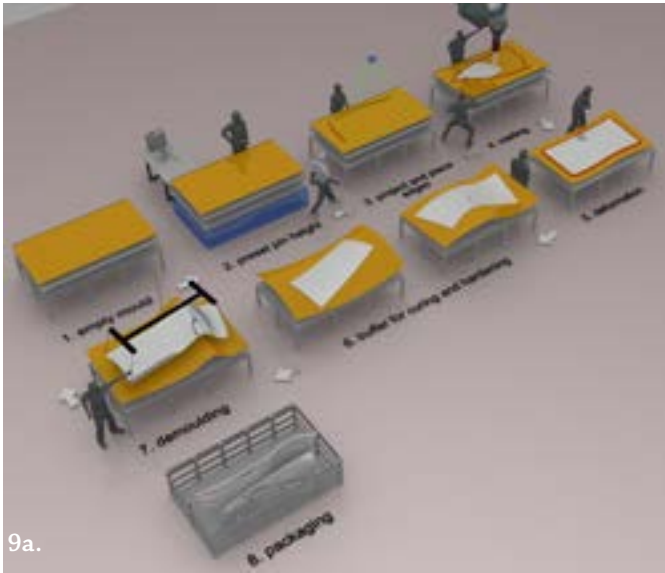
De maximaal haalbare oplage van elementen per mal is nog onduidelijk. Wel is duidelijk dat het malsysteem veelvuldig herbruikbaar is. Het malvlak waar het beton op wordt gestort is echter onderhevig aan slijtage. In eerste prototypes werd gebruik gemaakt van siliconen. Deze leverden een mooie oppervlaktekwaliteit, maar alleen bij het eerste element. Mo-

menteel wordt daarom gebruikgemaakt van PVC-matten. Deze zijn na gebruik eenvoudig schoon te maken en lijken bijna niet onderhevig te zijn aan slijtage. Meer storten zullen nodig zijn om een inschatting van de herbruikbaarheid te maken. Een andere overweging bij het bepalen van het materiaal van het malvlak is de belasting op het milieu. Daarbij spreekt het voor zich dat een dergelijk materiaal niet (snel) vervangen zou moeten worden. Anders zou het tegenstrijdig zijn met de potentie om elementen te produceren zonder afval te veroorzaken.

TOEPASSING IN INDUSTRIE

Voor een bouwproject van enige omvang moeten honderden tot soms duizenden elementen binnen afzienbare tijd kunnen worden geproduceerd. De benodigde cyclustijd van de flexibele mal moet om die reden zo kort mogelijk blijven. Dit is een economische noodzaak. Als het totaal aantal benodigde mallen niet wordt beperkt tot bijvoorbeeld tussen de 10 en 20 exemplaren, dan zouden de malkosten alsnog erg hoog worden. Voor het economisch functioneren van de mal is daarom onderscheid gemaakt tussen een vervormingsmechanisme (basismodule) en een flexibele bekisting (topmodule). Met het oog op een efficiënte productie zullen deze onderdelen ook fysiek van elkaar gescheiden moeten worden.

De basismodule is het meest kostbare onderdeel van de flexibele mal. Eén computergestuurde basismodule zorgt voor een accurate 'programmering' van de gewenste vervormingen. Nadat alle hoogte-instellingen van de basismodule zijn gedaan, worden deze overgebracht op de topmodule. Daarna wordt de topmodule ontkoppeld van de basismodule. De daadwerkelijke vervorming van het malvlak op de topmodule vindt echter niet direct plaats, en bovendien op een andere locatie in de productielijn. Eerst worden de malranden aangebracht en wordt het beton gestort (in een plat vlak). De vervormingen



9. Productieproces in een carrousel-systeem.

worden vervolgens aangebracht door het met beton gevulde malvlak op de vooraf ingestelde posities te laten zakken. De topmodule kan relatief goedkoop blijven, waardoor in één productielijn meerdere topmodules kunnen worden gebruikt. Het hele proces is toegelicht in figuur 9.

BEWEGENDE ONDERDELEN

De topmodule bestaat uit bewegende onderdelen die samen moeten zorgen voor een soepele en nauwkeurige vervorming van de mal. Deze verschillende onderdelen zijn: het ondersteunende malvlak, pendelstaven en scharnierverbindingen (fig. 10). Het malvlak wordt ondersteund door pendelstaven. Deze staven kunnen op en neer en heen en weer verplaatsen terwijl een verticale kracht uitgeoefend kan worden ter ondersteuning van het malvlak. Uit experimenten blijkt dat de stabiliteit van de pendelstaven een interessant probleem vormt: bewegingsvrijheid waar mogelijk, maar precies zoveel beperkingen als nodig. Bovendien zit er een maximum aan de mogelijke horizontale verplaatsingen van de steunpunten bij het vervormen van het element van vlak naar gekromd. Bij overschrijding van dat maximum loopt de basismodule vast. Meer hierover is te lezen in [3].

De verbinding tussen de pendelstaaf en het vlak moet kunnen scharnieren in twee richtingen. Hoewel in het verleden met staven met scharnieren is gewerkt, wordt nu geëxperimen-

teerd met vervormbare enkelvoudige staven (zonder scharnieren). Een cardan-verbinding is daar geschikt voor. Deze verbinding kan de nodige krachten overdragen en maakt de vervorming van het geheel relatief voorspelbaar. Het ontwerp van de mal kan daarmee eenvoudiger en robuuster worden.

WELK BETON WORDT ER GEBRUIKT?

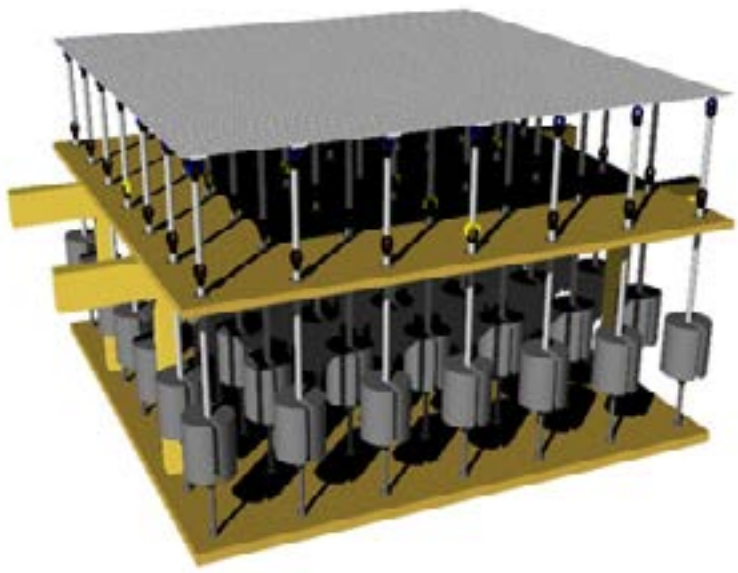
Betonelementen in vergelijkbare dubbelgekromde vormen worden doorgaans gefabriceerd met spuitbeton, gewapend met korte meegespoten glasvezels. Het spuiten vindt dan plaats op CNC-gefreesde mallen van kunststofschuim of hout. Het innovatieve concept van de flexibele mal is echter – zoals hierboven uitgelegd - om de elementen te gieten op een in eerste instantie vlak liggende mal, en deze pas later te vervormen. Dit stelt wel eisen aan het gebruikte betonmengsel. Voor de workshop is het zelfverdichtend hogesterktebetonmengsel uit tabel 1 gebruikt, met daarin een fijngemalen witte cement en kalksteenmeel. De grootste gebruikte zeefmaat voor het zand is 1 mm.

Tabel 1: Betonmengsel zoals gebruikt tijdens de workshop*

component	kg/1000 liter
cement CEM I 52,5 R, wit (HeidelbergCement)	600
wit kalksteenmeel (Beto-flow D, Omya)	180
wit pigment	6,0
PVA vezels L=8 mm (Kuraray)	5,2
superplastificeerder Glenium 51 (BASF)	3,2
water	228
zand 0,125-0,25 mm	229
zand 0,25-0,5 mm	408
zand 0,5-1 mm	637

**) Dit mengsel kan worden gekarakteriseerd als een zelfverdichtend hogesterktebeton. De gemiddelde kubusdruksterkte (28 dagen, kubus met 150 mm rib) bedroeg 76 MPa. De gemiddelde prismabuigtreksterkte (28 dagen, prisma's 40x40x160 mm³) bedroeg 13 MPa.*

Om de vloeibaarheid en de afname van het mengsel in de tijd te meten, zijn diverse reologische tests gedaan. De vloeimaat is bepaald door op diverse tijdstippen een direct na het mengen gevulde Abrams-kegel op te tillen. Merkbaar is dat direct na het mengen de mix nog zeer vloeibaar is, terwijl gedurende de eerste 45 minuten na het mengen - onder invloed van rust - de hoge vloeimaat (550 tot 650 mm diameter) overgaat in een lage zetmaat (slechts enkele centimeters inzakking van de Abrams-kegel). Dit is het gevolg van snelle thixotrope sterkteontwikkeling in het verse mengsel. De ontwikkeling van de vloeibaarheid in de tijd kan beïnvloed worden door de dosering superplastificeerder. Het thixotrope karakter van het mengsel is het directe resultaat van het gebruikte cement met fijne maling en het eveneens fijngemalen kalksteenmeel.



10. Ontwerptekening van de flexibele mal met scharnierende pendelstaven en extra gewichten.

Door de vloeï- c.q. zetmaat regelmatig te meten kan het juiste moment van vervorming van de flexibele mal worden gekozen. De juiste waarde hangt af van twee aspecten: de steilheid van de mal na het vervormen en de in het element aanwezige kromtestraal. Meer achtergronden hierover zijn te vinden in andere publicaties van de auteurs [1]. Als alternatief voor meegemengde vezels is eerder ook met succes gebruikgemaakt van textielwapening (maaswijdte 8 mm, textiel bestaande uit bundels glasvezel) en van dunne stalen draden (diameter 3 mm).

WAT KAN BETER?

In de afgelopen jaren is de nauwkeurigheid van de mal sterk verbeterd (toleranties liggen binnen enkele mm). Desondanks zou deze nog verder kunnen worden geoptimaliseerd. Hierbij moet de vraag worden gesteld welke nauwkeurigheid vanuit de

praktijk nodig is. Dit is sterk afhankelijk van de toepassing en wensen van de ontwerper. Er ligt verder nog een aantal constructieve vraagstukken, zoals toepassing als draagconstructie, optimalisatie van diktes, materiaalgebruik, verankeringen en verbindingen. Deze zijn onderdeel van huidig onderzoek. De methode staat op de drempel van toepassing in projecten. Voor de dakelementen van [Arnhem OV Terminal](#) is deze reeds geïntroduceerd.

De ontwikkelde concepten en technieken zijn getest en blijken functioneel. De grote stappen zijn gezet. Een professionaliserings-slag in de praktijk samen met bedrijven is nu nodig om de techniek toegepast te krijgen. Een concreet project waarvoor recent is onderzocht of de flexibele mal een geschikte productietechniek is, is het eerder genoemde Crossrail metro-project in Londen. Op de IASS-conferentie is een publicatie gepresenteerd die dit onderzoek beschrijft [4]. Op dit moment wordt door hetzelfde team gekeken naar de haalbaarheid van de toepassing van de flexibele mal voor een [luchthaventerminal](#) in Koeweit naar een ontwerp van Foster + Partners.

REFERENTIES

1. Flexible Mould Project, TU Delft. Lopend R&D-project met als basis de PhD-thesis: Schipper, H.R., Double-curved precast concrete elements - Research into technical viability of the flexible mould method. TU Delft, september 2015.
2. Schipper, H.R., Eigenraam, P. et al., Kine-Mould: Flexible mould system opens up wide range of possibilities. SPOOL, 1(2), pp.25-30, 2014, [spool.tudelft.nl](#).
3. Eigenraam, P., Schipper, H.R., Concepts and prototypes for flexible moulds for production of double curved elements. Proceedings of the International Society Of Flexible Formwork (ISOFF) Symposium, Amsterdam, The Netherlands, 16-17 August 2015.
4. Schipper, H.R., Eigenraam, P., et al., Kine-Mould: Manufacturing technology for curved architectural elements in concrete. Proceedings of the International Society Of Flexible Formwork (ISOFF) Symposium, Amsterdam, The Netherlands, 16-17 August 2015.



11. Voor de luchthaventerminal Koeweit, een ontwerp van Foster + Partners, wordt gekeken naar de haalbaarheid van de toepassing van de flexibele-maltechniek.