

## Vrije vormen met vacuüminfusie-beton

**Citation for published version (APA):**

Slotoom, M., Sarfatij, O., & Huijben, F. A. A. (2013). Vrije vormen met vacuüminfusie-beton. *BouwIQ*, 23-01-2013, 1-7.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2013

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Vrije vormen met vacuüminfusiebeton

23-1-2013

De vraag naar vrijevormarchitectuur of free-form architecture, blijft vanuit de markt toenemen, evenals de toepassing van steeds lichtere draagconstructies en multifunctionele bouwdeelen. Het ideale bouw materiaal dat nodig is om deze architectonische trends (letterlijk) vorm te geven, zal dus nagenoeg elke gewenste vorm moeten kunnen aannemen. Hierbij moet het tevens beschikken over voldoende draagkracht, stijfheid en isolerend vermogen tegen diverse externe factoren zoals wind, temperatuur en geluid. Wellicht bestaat dit ideologische materiaal echter al: beton.

Tekst Mark Slotboom, Omar Sarfatij (TU/e, faculteit Bouwkunde, leerstoel Innovative Structural Design) en Frank Huijben (TU/e, ABT bv)



Toch wordt de huidige toepassing van beton niet gekenmerkt door de genoemde eigenschappen. Maar als we de gunstige (vormgevings) aspecten van beton nu op een slimme manier benutten, in combinatie met de natuurlijke eigenschappen van cellulaire materialen die ook nog eens eenvoudig te vervaardigen zijn, dan komen we dicht in de buurt van dit 'perfecte' materiaal. Aan de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) is onderzoek gedaan naar de technische haalbaarheid van dit idee, in het kader van een master onderzoeksproject binnen de leerstoel Innovative Structural Design (ISD). Dit innovatieve onderzoek, uitgevoerd door studenten Omar Sarfatij en Mark Slotboom, vormt een deelonderzoek

van het lopende promotieonderzoek naar vacuumatics, ofwel vacuümconstructies, dat momenteel door Frank Huijben aan de TU/e wordt uitgevoerd in opdracht van ABT bv.

## De uitdaging

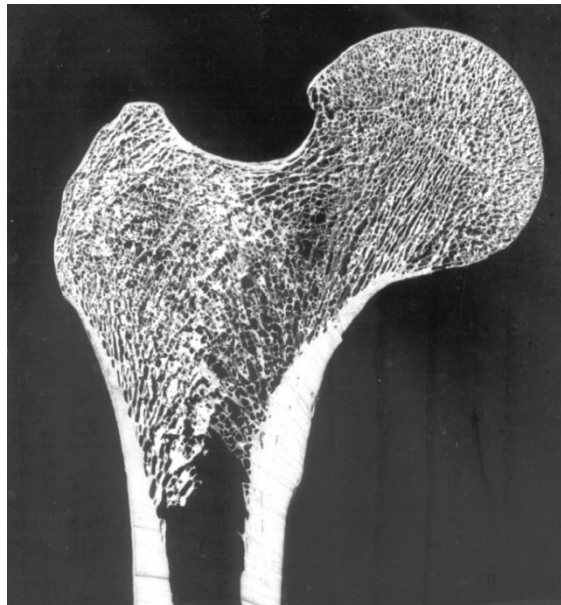
In de architectuur is sinds de jaren negentig de tendens naar vrije vormen ontstaan, de zogenoemde free-form designs en tevens bekend als blobs. Deze zijn in hoog tempo

populairder worden en ook voor lichte draagconstructies en multifunctionele of zelfs aanpasbare bouwdelen, groeit de interesse. Maar met alleen interesse redden we het niet, want het moet ook nog uitvoerbaar en financieel aantrekkelijk zijn.

Al sinds het ontstaan van deze trends is de bouwindustrie op zoek naar manieren om 'vrije vormen' te realiseren. Het aangewezen materiaal voor deze complexe vormen lijkt beton te zijn, vanwege het plastische karakter van het materiaal voordat het is uitgehard. Hierdoor is met beton in theorie elke gewenste vorm realiseerbaar. Echter, momenteel vormen de flexibiliteit en aanpasbaarheid van het bekistingssysteem de beperkende factoren. Daarnaast zijn betonconstructies veelal zwaar en wordt het materiaal inefficiënt toegepast. Er wordt namelijk veel beton toegepast op plaatsen van de constructie waar het qua sterkte en gewicht niet strikt noodzakelijk is. Dit gebeurt vooral ten gunste van een (economisch interessante) eenvoudige uitvoering. De oplossing voor deze uitdaging is dus een eenvoudig en materiaalbesparend bekistingssysteem.

## De oplossingen

Materiaal efficiënt toepassen resulteert veelal in een lager algemeen materiaalgebruik van een constructie, met daardoor een geringer eigen gewicht en dus lagere materiaal-, transport- en funderingskosten tot gevolg. Dit alles terwijl er kwalitatief geen significant verlies van sterkte of stijfheid hoeft op te treden. De natuur bedacht in de afgelopen miljoenen jaren een dergelijke optimalisatie, namelijk cellulaire opvulling. Een cellulair materiaal is een materiaal dat bestaat uit een samenstelling van open cellen met vormvaste randen en/of wanden. Deze celstructuren komen onder andere voor in natuurlijke materialen zoals hout, kurk en spons.



Afbeelding 1. Trabeculair (poreus) bot  
Bron: [ring.geoscienceworld.org](http://ring.geoscienceworld.org)



Afbeelding 2. Betonnen schaalconstructie van Heinz Isler te Ratstätte, Deitingen Süd (Zw, 1968). Bron: [fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org)

Vanuit constructief oogpunt kan bij natuurlijke cellulaire materialen gedacht worden aan botten (afbeelding 1). Deze hebben namelijk aan de buitenzijde een harde schil en binnenin een celstructuur, waardoor ze tegelijkertijd licht en sterk zijn. Tegenwoordig kunnen kunstmatige celstructuren worden geproduceerd door polymeren op te schuimen. Deze geschuimde celstructuren zie je

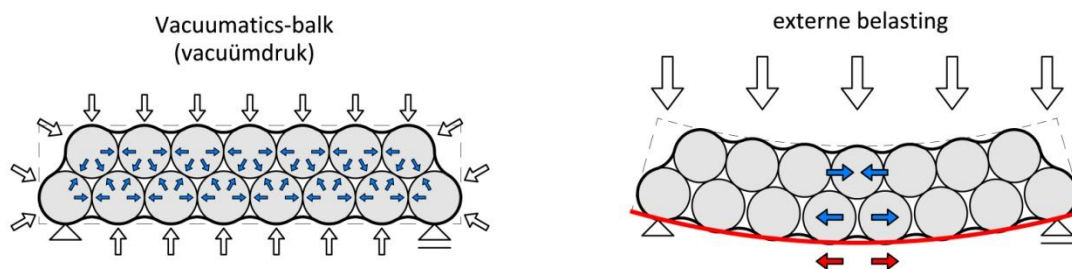
bijvoorbeeld terug in isolerende koffiebekers, maar ook in sandwichelementen. Naast de sterkte van de celstructuur wordt ook gebruikgemaakt van de isolerende werking van het materiaal. Deze ontstaat doordat de celstructuur stilstaande, en dus isolerende, lucht vasthoudt.

Een efficiënte materiaalverdeling is de eerste stap. De volgende stap is het creëren van materiaalefficiënte vormen. Zoals enkele bekende architecten en/of ingenieurs als Antoni Gaudí, Frei Otto en Heinz Isler hebben laten zien, is het goed mogelijk om zogenaamde 'natuurlijk vormgegeven' constructies te ontwerpen en zelfs te vervaardigen. Hierbij resulteert de vorm van de constructie in een (natuurlijke) efficiënte krachtsafdracht. Zo resulteert een opgehangen membraan, welke na verharding wordt omgedraaid, in een constructie met overwegend drukkrachten ten gevolge van het eigen gewicht van de constructie. De betonnen schaalconstructie te Deitingen Süd (Zw) is op een dergelijke manier ontworpen door Heinz Isler (afbeelding 2).

## De technieken

Om de plasticiteit van beton, de efficiënte materiaaltoepassing van een cellenstructuur en eenvoudige uitvoerbaarheid van een flexibele bekisting te combineren, zijn meerdere technieken nodig. Deze worden kort toegelicht.

### *Vacuomatics*



Afbeelding 3. Het constructieve-principe van vacuumatics, F. Huijben.

Als flexibele mal is het mogelijk om gebruik te maken van de zogenoemde vacuumatics-bekisting. Momenteel voert Frank Huijben namens ABT een promotieonderzoek uit aan de TU/e, naar de constructieve eigenschappen en vormtechnische mogelijkheden van vacuumatics. Deze vacuümconstructies zijn in feite te beschouwen als een verzameling van ongebonden granulaat dat wordt omsloten door een luchtdicht flexibel membraan, en vormvast wordt gemaakt door toedoen van de omringende atmosferische (lucht)druk. Door de lucht namelijk uit de flexibele omhulling te halen, ontstaat er een onderdruk, oftewel een vacuüm, waardoor de losse korrels worden samengedrukt tot een vormvast geheel. Op deze manier worden de korrels als het ware voorgespannen door de atmosferische luchtdruk (afbeelding 3). Deze in vorm aanpasbare draagconstructies kunnen vervolgens worden toegepast als zelfdragende flexibele bekisting. Een introductie van dit (constructieve) principe is beschreven in het artikel '3D vormen in beton' in *Cement 2009/5*<sup>1</sup>.

## Vacuüminfusie

Vacuüminfusie, ook wel bekend onder de term Resin Transfer Moulding, is een productietechniek die voornamelijk gebruikt wordt in de auto-, boot- en luchtvaartindustrie voor de vervaardiging van composieten. Hierbij wordt gebruikgemaakt van een vacuüm in de mal om een enigszins vloeibaar materiaal (veelal hars) in de mal te kunnen ‘trekken’, zonder dat daarbij luchtbellens ontstaan welke mogelijk opgesloten worden in het materiaal. Hierdoor



worden zwakke plekken in het uitgeharde product maximaal beperkt. Afbeelding 4 laat het proces zien van vacuüminfusie bij de complete romp van een zeilboot.

Diverse lagen van droog opvulmateriaal (wapening) worden geplaatst in een mal. De mal wordt afsloten met een plastic folie en hars stroomt door de mal en impregneert de wapening. Een drukverschil tussen de binnen- en buitenkant van de mal (een onderdruk) levert de kracht die nodig is om de hars te laten stromen.

Afbeelding 4. Het vacuüminfusie-proces van een bootromp.  
Bron: boatdesign.net

Bij dit soort vacuüminfusie-technieken wordt veelal gebruikgemaakt van glas- of koolstofvezelnetten als opvulmateriaal. Deze zorgen voor een hoge treksterkte en werken dus tegelijkertijd als wapening. Deze techniek is, zover bekend, nog niet eerder gebruikt in combinatie met beton. De reden hiervoor is mogelijk dat traditioneel beton (in plastische fase) niet vloeibaar genoeg is om door de relatief kleine poriën te stromen. Bij een eendimensionale stroming is de wet van Darcy (in geïntegreerde vorm) van kracht. Deze stromingswet geeft een duidelijk beeld van de parameters die van invloed zijn. Verder in dit artikel zal ingegaan worden op de specifieke invloeden.

$$t = \frac{\phi \cdot \eta \cdot l^2}{2 \cdot k \cdot \Delta P}$$

Met:

- $t$  : injectie tijd (s)
- $\phi$  : porositeit van het opvulmateriaal (-)
- $k$  : permeabiliteit van het opvulmateriaal (m<sup>2</sup>)
- $\eta$  : viscositeit van het injectie materiaal (Pa\*s)
- $l$  : stroom afstand (m)
- $\Delta P$  : toegepaste drukverschil (Pa)

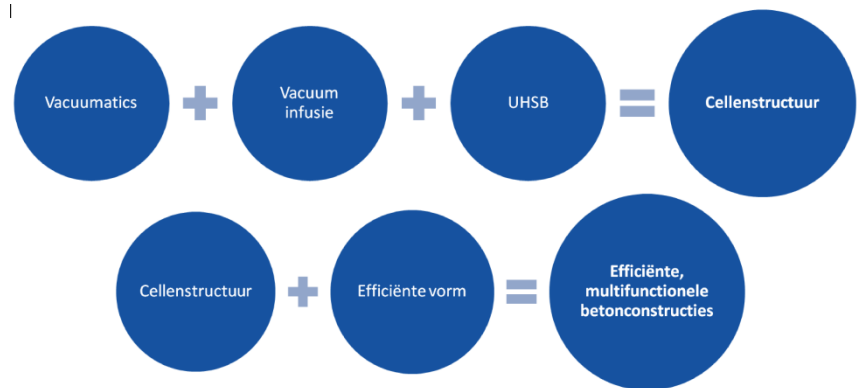
## Ultra-hogesterktebeton

Beton ontstaat door water te mengen met een bindmiddel (cement), granulaat (zand en grind) en overige vulstoffen en toeslagmaterialen als super plastificeerders en bindingsvertragers. Bij ultra-hogesterktebeton (UHSB) is de homogeniteit verbeterd, de pakdichtheid verhoogd en de microstructuur geoptimaliseerd, wat onder andere resulteert in

een aanzienlijk grotere druk- en treksterkte. Daarnaast zijn zogenoemde zelfverdichtende mengsels verkrijgbaar met een lagere viscositeit (lees: het beton is vloeibaarder), waardoor het mogelijk wordt om het betonmengsel door zeer kleine openingen en poriën te laten vloeien.

### De combinatie

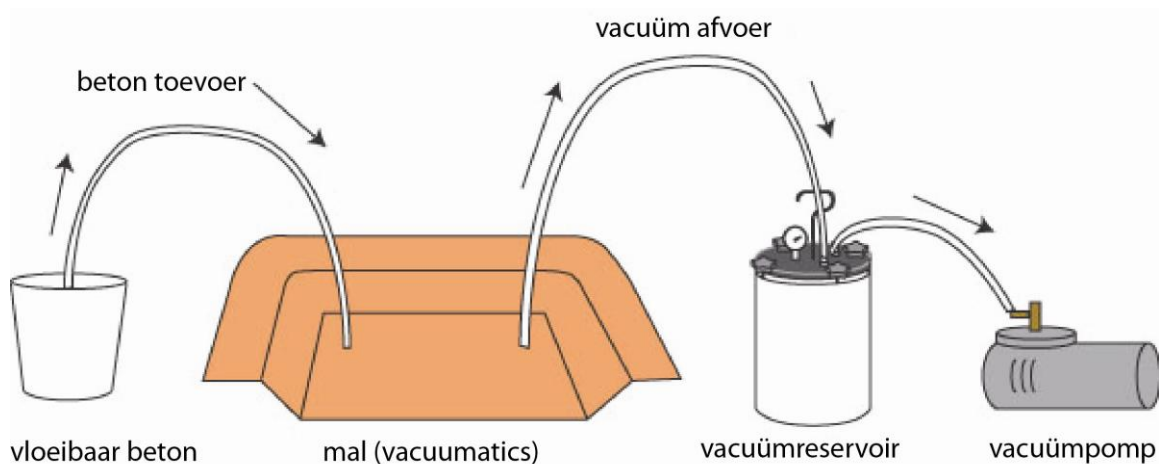
De technieken vacuüminfusie en UHSB kunnen prima op elkaar aansluiten als gevolg van de relatief lage viscositeit van de innovatieve betonmengsels. Bij vacuumatics is het mogelijk om een lichtgewicht vulmateriaal toe te passen (bijvoorbeeld geëxpandeerde kleikorrels), dat wanneer dit omsloten wordt door UHSB resulteert in een soort open cellenstructuur. Verder kan het vulmateriaal van vacuumatics dienen als het granulaat voor beton. Bovendien is er bij vacuumatics per definitie een drukverschil aanwezig (vacuüm), dat noodzakelijk is bij vacuüminfusie. Vacuumatics biedt daarnaast de mogelijkheid om vrije en efficiënte bekistingvormen te maken (afbeelding 5).



Afbeelding 5. Overzicht van de te combineren technieken.

### Het onderzoek

Door de kennis van celstructuren, het vacuüminfusieproces, UHSB en de voorgaande studies naar vacuumatics met elkaar te combineren, is onderzocht of het mogelijk is om efficiënte, multifunctionele betonconstructies te realiseren. In het Pieter van Musschenbroek-laboratorium van de TU/e zijn daartoe diverse experimenten uitgevoerd. De proefopstelling is weergegeven in afbeelding 6.



Afbeelding 6. De proefopstelling van het vacuüminfusie-proces. Bron: advancedcomposites.com, aangepast door Mark Slotboom

Door middel van het aanbrengen van een onderdruk wordt het beton in de mal 'getrokken', of liever gezegd, door de mal geduwd, door de atmosferische druk die een kracht uitoefent op het vloeibaar beton (vergelijkbaar met het drinken door een rietje). De betreffende mal was een vacuümconstructie, zoals deze eerder onderzocht zijn door diverse masterstudenten in het kader van het lopende promotieonderzoek van vacuumatics<sup>2,3</sup>.

Het doel van dit onderzoek is om te bekijken of het technisch mogelijk is, om een dun betonmengsel met behulp van vacuüminfusie in een vacuumatics-mal te krijgen. Door te zorgen voor een zo vloeibaar mogelijk betonmengsel en dit constant te houden, konden verschillende vulmaterialen getest worden. Hierbij wordt de variant met de geëxpandeerde kleikorrels als belangrijkste verondersteld. Dit in verband met de gunstige eigenschappen voor toepassing in een vacuumatics-bekisting<sup>2</sup>.



Afbeelding 7. Gedurende het vacuüminfusie-proces wordt betonmengsel door de holtes in het granulaat 'getrokken'.

### De resultaten

Al tijdens de proeven bleek dat vacuüminfusie met beton nog steeds niet geheel vanzelfsprekend is. De droge en van zichzelf poreuze kleikorrels zorgden al snel voor een toename van de viscositeit, doordat het betonmengsel uitdroogde en vervolgens niet meer stroomde door de mal. Ook de overgang van de toevoerslang naar de vacuumatics-mal zorgde wel eens voor opstoppingen, wat te wijten is aan de abrupte afname van de permeabiliteit door het systeem. Hiermee wordt de vernauwing van de doorsnede bedoeld waar het mengsel doorheen stroomt.

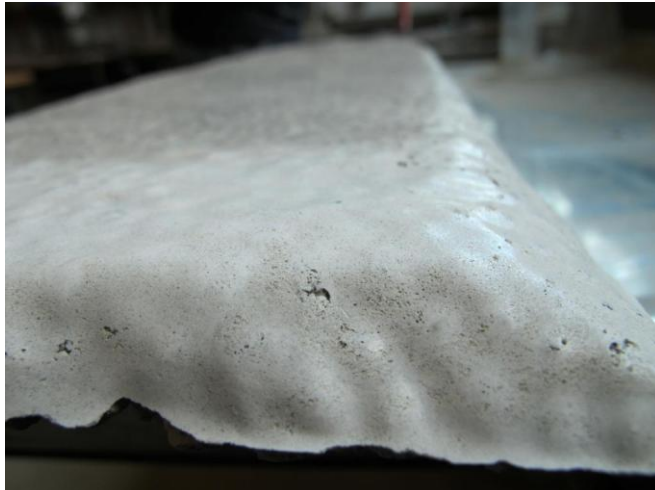
Desalniettemin is gebleken dat zowel met kalkzandsteencement-water als met betoncement-water het mengsel door de gehele mal kan vloeien met behulp van de aangebrachte onderdruk van 0,7 bar (dus 70 procent van de atmosferische druk). Hiermee is aangetoond dat het principe werkt en dat vacuüminfusie mogelijk is met beton. Echter, het is cruciaal om de juiste combinatie van de viscositeit van het

betonmengsel, en de porositeit en permeabiliteit van het granulair vulmateriaal (inclusief de toevoerslangen en aansluitstukken) te vinden. De beperkte tijdsduur van dit onderzoeksproject heeft ertoe geleid dat de juiste combinatie gedurende dit onderzoek helaas niet gevonden is. Om een succesvol vacuüminfusie-proces met beton te krijgen, zal aan de ene kant meer gevarieerd moeten worden met de viscositeit (en de uithardtijd van het beton) en aan de andere kant met de porositeit en permeabiliteit van het opvulmateriaal.

Een aantal proefstukken, waarbij het beton is uitgehard, geeft een impressie van de hierdoor gerealiseerde celstructuur (afbeeldingen 7 en 8). Doordat gedurende het uithardingsproces de vacuümpomp is stopgezet, is de vacuümdruk weggevallen en is het betonmengsel naar de 'bodem' van het proefstuk gezakt. Hierdoor is echter duidelijk te zien dat het granulaat volledig omringd is geweest door het betonmengsel. Vervolgonderzoek zal nodig zijn om tot een uitvoerbaar en financieel aantrekkelijk eindresultaat te komen.

## Conclusies

Met dit onderzoek is aangetoond dat het mogelijk lijkt om vacuüminfusie uit te voeren met beton, waarbij het verkregen eindproduct de eigenschappen bezit van een cellulair materiaal. Door dit toe te passen met de eenvoudig vervormbare vacuumatics-bekistingsmallen, kunnen efficiënte en multifunctionele betonconstructies op een relatief eenvoudige manier gerealiseerd worden. De potentie is volgens de theorie groot en de haalbaarheid is getoetst. Echter, aanvullend onderzoek zal nodig zijn voordat deze techniek in de bouwpraktijk kan worden toegepast.



Afbeelding 8. Onderzijde van het proefstuk, waarbij de vacuümpomp is stilgezet gedurende de uitharding.

## Bronvermelding

1. Huijben, F.A.A., Herwijnen, F. van, 3D vormen in beton, *Cement* 2009/5, Uitgeverij Æneas.
2. Tas, L., Huijben, F.A.A., Vacuum als constructief bindmiddel, *Cementonline* december 2010, Uitgeverij Æneas.
3. Heugten, R. van, Huijben, F.A.A., 'Flexibel' bekisten met vacuumatics, *Cementonline* juni 2012, Uitgeverij Æneas.

## Aanbevelingen

Voor het vacuüminfusie-proces met beton is meer onderzoek nodig naar de toepassing van verschillende typen vulmateriaal (zowel granulair als 3D-weefsels), het betonmengsel en het behouden van de onderdruk tijdens het uitharden. Ook moet onderzocht worden welke invloed de afmeting en vorm van de vacuumatics-bekisting heeft op het vacuüminfusie-proces. Ten slotte dienen de eigenschappen van de verkregen elementen onderzocht te worden op onder andere sterkte, stijfheid en isolerend vermogen.

## Nadere informatie

De (beton)mengsels die gedurende deze experimenten zijn gebruikt, zijn beschikbaar gesteld door Hurks Beton te Veldhoven. Voor meer informatie over dit onderzoek en het promotieonderzoek naar vacuumatics, kan contact op worden genomen met Frank Huijben ([f.huijben@abt.eu](mailto:f.huijben@abt.eu)).