

STUBECO

3D-printen in beton

Studiecel C-11

Auteur: ir. Rob Cornelis
Kenmerk: 'Open' rapport
Datum: 20 januari 2020
Versie: 03
Status: Definitief

3D-PRINTEN IN BETON

Stubeco-studiecel C-11

- Koko-coördinator,
tevens redacteur: ir. Rob Cornelis Hakron Nunspeet B.V.
- Medewerkenden: ir. Jordy Vos Witteveen + Bos B.V.
Theo Voogd Bruil B.V.
Berry Hendriks CyBe Construction B.V.
ir. Johan Bolhuis BAM Infra B.V.
Volker Ruitinga Vertico
prof.dr.ir. Theo Salet T.U. Eindhoven
ing. Cor de Bruijn Rohaco



De Studievereniging Uitvoering Betonconstructies (Stubeco) en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het verwerken van de in deze publicatie vervatte gegevens. Nochtans moet niet de mogelijkheid worden uitgesloten dat er zich toch onjuistheden in deze publicatie kunnen bevinden. Degene die van deze publicatie gebruik maakt, aanvaardt daarvan het risico. De Stubeco sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze gegevens.

Gehele of gedeeltelijke overname van de inhoud is alleen toegestaan met schriftelijke toestemming van het Stubeco-bestuur.

*Deze publicatie is verkrijgbaar bij:
Stubeco, Büchnerweg 3, Postbus 411, 2800 AK Gouda
tel.nr. (0182) 53 92 33, fax (0182) 53 75 10
e-mail: info@stubeco.nl - website: www.stubeco.nl*

Inhoudsopgave

1	Voorwoord	4
2	Inleiding	5
3	Definities begrippen	6
4	Ontwikkeling	8
4.1	De eerste stappen	8
4.2	Snelle evolutie	8
4.3	Uitdagingen	10
5	Ontwerp en engineering	13
5.1	Parametrisch ontwerpen	13
5.2	Wet- en regelgeving	13
5.3	Rekenmodellen	14
6	Productie en duurzaamheid	15
6.1	Printers en technieken	15
6.2	Materiaal	16
6.3	Levensduur en onderhoud	16
6.4	Kosten	16
7	Realisatie	17
8	Toekomstbeeld	21
8.1	Fijne huizen voor bewoners printen	21
8.2	Geopolymeerbeton	22
8.3	Slotopmerking	23
9	Literatuurlijst	24

1 Voorwoord

3D-printen is meer dan alleen een productiemethode. Het heeft ook een enorme invloed op het ontwerp (design, engineering, productie).

Nederland heeft een goede en zelfs vooraanstaande positie in de ontwikkeling van 3D-betonprinten, wereldwijd gezien.

In 2016 is binnen Stubeco al een eerste aanzet gegeven voor een studiecél over dit onderwerp. Het is tenslotte een technische innovatie in de uitvoering van beton. De inzet en het enthousiasme van de verzamelde celleden was groot en de indruk was dat we een mooi rapport hierover zouden kunnen maken, binnen een relatief kort tijdsbestek.

Vanwege de snelle ontwikkelingen op dit gebied, was de opzet om hiervan een "dynamisch rapport" van te maken (digitaal), dat regelmatig zou kunnen worden geactualiseerd.

De samenstelling en uitwerking van dit rapport is echter gedurende het proces gestrand, omdat de ontwikkelingen zó snel gingen dat de celleden alle aandacht nodig hadden voor hun eigen positie daarin en er nauwelijks mogelijkheden overbleven om hiervoor samen te komen en verder te komen.

Cor de Bruijn (eerst vanuit T.U. Eindhoven, later vanuit Rohaco), die als voorzitter deze cel heeft getracht te leiden, heeft in oktober 2018 uiteindelijk besloten om het voorzitterschap aan Stubeco terug te geven, omdat hij geen voortgang meer kon bereiken, helaas.

Als KoKo-coördinator, voelde ik mij toch wel enigszins verantwoordelijk en ook omdat ik het onderwerp als zeer interessant en belangwekkend voor de sector beschouw, heb ik het als mijn taak gezien om toch een overzichtsrapportage te maken als een soort "status quo", waarop mogelijk in een later stadium door anderen weer zou kunnen worden voortgebouwd en aangevuld. Ik prijs mij gelukkig dat ik hiervoor medewerking heb gekregen, zowel van enkele oud-celleden als van andere betrokkenen met kennis van zaken, om de kar weer vlot te trekken.

Het bedoelde rapport heeft u nu voor u, deels gebaseerd op het reeds uitgevoerde studiewerk, aangevuld dankzij de toonaangevende sprekers op de Stufib-bijeenkomst bij BAM in Gouda op 16 mei 2019 en gecompleteerd met verzamelde foto's en voorbeelden uit literatuur en van Internet.

Ik hoop dat dit rapport een aanzet mag zijn voor een waardevol vervolg.

Was getekend,

ir. Rob Cornelis,
senior engineer, Hakron Nunspeet B.V.,
namens Stubeco / KoKo.

20 januari 2020.

2 Inleiding

De architectuur staat aan de vooravond van een enorme verandering.

Waar de invloed van de architect de afgelopen decennia steeds kleiner geworden is, maakt het 3D-printen het weer mogelijk om onderscheidende ontwerpen te maken die ook betaalbaar gerealiseerd kunnen worden.

3D-betonprinten staat sinds enkele jaren stevig in de belangstelling van de bouwwereld. Het onderzoek van de universiteit van California onder leiding van Dr. Berokh Khoshnevis wordt in het algemeen als inspiratiebron gezien. Hij startte in 2001 zijn onderzoek 'Contour Crafting' en presenteerde dit in 2014. De wereld zag voor het eerst een geprinte muur.

Voor verschillende andere universiteiten, start-ups en bedrijven was dit onderzoek aanleiding om ook de mogelijkheden van het 3D-betonprinten te verkennen. De bekendste voorbeelden in het buitenland zijn WinSun uit China, Xtree uit Frankrijk en Total Custom uit America.

Ook in Nederland is het onderzoek van Khoshnevis voor universiteiten en bedrijven aanleiding geweest om onderzoek te verrichten naar toepassing van deze nieuwe bouwmethode. CyBe uit Oss, TU/e uit Eindhoven en Bruil uit Ede beschikken over een zelfontwikkelde printer. Ook de firma Vertico uit Amersfoort, een relatief bescheiden speler in de markt, blaast met eigen ontwikkelingen een mooi deuntje mee!

Wereldwijd is de interesse in 3D-printen, zowel voor beton als voor andere materialen, erg groot vanwege de technische ontwikkelingen en de praktische voordelen in toepassingen. Nederland wil hierin haar vooraanstaande positie goed benutten en waar mogelijk uitbouwen. Met de aanwezige vakkennis, inmiddels opgedane praktische ervaring en de grote aandacht voor het kunnen berekenen en daarmee veilig construeren, zal ons land hierin zeker deze rol kunnen blijven vervullen.

De huidige bouw wordt gedictieerd door de modaliteiten in de bouw. Producenten leveren producten in systemen of produceren alles op standaardmaten. Architecten ontwerpen op basis van deze seriematigheid. Aannemers hebben een dominante rol in de productkeuze en hebben van bezuinigen op het ontwerp vaak het belangrijkste verdienmodel gemaakt.

Door de toenemende bouweisen op het gebied van gezondheid, energieverbruik en comfort wordt engineering van gebouwen steeds complexer en duurder. Ook de toepassing van vele lagen materialen in één gebouw, de beschikbare alternatieven en bezuinigingsronden leiden tot een inefficiënte supply chain met hoge faalkosten. Het antwoord van de aannemers en maakindustrie is een verregaande standaardisatie, waardoor er een wel efficiënte productieketen ontstaat. Het nadeel is echter dat er nauwelijks ruimte is voor de klantwensen van de eindgebruiker.

3D-betonprinten is een disruptieve techniek; het zal de verhoudingen in de bouwkolom en de gebruikelijke werkwijze in de bouw drastisch veranderen. Waar nu de bouw gedomineerd wordt door massaproductie (mass production), zal in intrede van digitale productietechnieken zoals 3D-betonprinten de industrie veranderen naar het seriematig produceren van unieke producten en gebouwen (mass customization).

Het seriematig produceren van unieke producten en gebouwen wordt dan zeer betaalbaar. Robots kunnen elke gewenste vorm produceren, zonder dat dit leidt tot een aanzienlijke verhoging van de kosten. Daardoor is een ronde vorm weer net zo betaalbaar als een rechte vorm. De ontwerper maakt daardoor weer zelf de keuze. Mallen of verspanende technieken zijn niet nodig, waarmee tijd en afval bespaard wordt. Het seriematig produceren van gelijkvormige gebouwen is daardoor geen noodzaak meer om betaalbaar te bouwen.

3 Definities begrippen

3D-betonprinten is een vorm van 'Additive Manufacturing'. Met behulp van industriële robots worden gebouwen of bouwcomponenten laagje voor laagje opgebouwd. Er zijn geen maltechnieken of verspanende technieken nodig om een product of gebouw te maken. De 3D-printer wordt direct aangestuurd vanuit digitale 3D-modellen. Producten en gebouwen worden zo digitaal ontworpen en geproduceerd. Hierdoor ontstaat er zeer een korte en efficiënte keten tussen enerzijds de klant en de ontwerper en anderzijds de producent.

Het beton, dat uit een printkop wordt gegoten, heeft geen bekisting of latere trilling nodig. Binnen 3D-betonprinten zijn er drie verschillende productiemethoden: concrete printing, contour crafting en D-shape, welke op verschillende manieren kunnen worden ingezet. De gebruikte mortel wordt relatief erg snel hard.

- **Concrete printing:** methode waarmee solide objecten worden gemaakt - vergelijkbaar met het FDM-printen zoals een Ultimaker, waarbij hele elementen worden geprint. Het gevolg is wel dat hier geen materiaalbesparing mogelijk is. Echter: hier kunnen wel openingen worden gecreëerd voor het plaatsen van faciliteiten. Met deze methode worden niet veel elementen geprint, omdat dit zowel technisch als economisch geen grote voordelen biedt.



Afbeelding 1: concrete printing door Universiteit van Loughborough (2012)..

- **Contour crafting:** bij contour crafting gaat het om het printen van de contouren van elementen als bijvoorbeeld wanden met een infill. Dit kan enerzijds gedaan worden door de manier / het type Bherokh Khaosinecivch. Contour crafting heeft 1 nozzle waarbij de twee randen, buiten- en binnenrand tegelijk - per laag - worden geprint. De essentie is dat zo de contouren van een element worden geprint, waarbij de cavities (binnenste contouren) eventueel kunnen worden gebruikt voor faciliteiten zoals bijvoorbeeld koppelingen of hijspunten.



Afbeelding 2: contour crafting door Universiteit van Zuid-Californië (2014).

- D-shape: D-Shape is een grote driedimensionale printer die binder-jetting, een laag-voor-laag-drukproces, gebruikt om zand te binden met anorganisch zeewater en magnesiumbinder om steenachtige objecten te maken. Uitgevonden door Enrico Dini. Bij het eerste model van de D-Shape-printer werd epoxyhars gebruikt, wat vaak gebruikt wordt als lijm bij het vervaardigen of repareren van ski's, auto's en vliegtuigen. Dini heeft dit model in 2006 gepatenteerd. Nadat ze problemen ondervonden met de epoxy, veranderde Dini het bindmiddel naar de huidige magnesium-gebaseerde variant en heeft zijn printer opnieuw gepatenteerd in september 2008.



Afbeelding 3a en 3b: D-shape door Enrico Dini (2014).

In de toekomst streeft Dini naar een printer om full-scale gebouwen te maken. Inmiddels heeft Dini met deze technologie verschillende objecten vervaardigd, waaronder een voetgangersbrug in Assiona, Spanje, eind 2016. Zie afbeelding 4.



Afbeelding 4: voetgangersbrug Assiona, Spanje.

- Keteneliminatie: bij additieve manufacturingtechnieken zoals 3D-betonprinten, wordt het productieproces direct aangestuurd vanuit het 3D-ontwerp. Hierdoor ontstaat er zeer een korte en efficiënte keten tussen enerzijds de klant en de ontwerper en anderzijds de producent. Gespecialiseerde dienstverleners zoals constructeurs of overheden zullen zich aansluiten of hun dienstverlening integreren in deze nieuwe keten. Zo ontstaat er een volledige digitale supply chain, waarin de ontwerper en de klant weer een dominante(re) rol krijgen. De traditionele rolverdeling zal vervagen of verschuiven. De klant of constructeur kan ook de ontwerper zijn. De architect of producent kan aannemer worden of vice versa.

4 Ontwikkeling

Het produceren van unieke producten en gebouwen is was altijd relatief kostbaar. Een ontwerp maken voor een grote serie producten is meestal goedkoper, omdat de kosten over een groot aantal producten kunnen worden omgeslagen.

Bij 3D-printen wordt een ontwerp direct in 3D gemaakt en vanuit de computer wordt direct de printer aangestuurd. Er zijn dan geen mallen nodig, evenmin als verspanende technieken. Het maakt dan geen verschil meer of er sprake is van unieke producten of grote series. Daardoor wordt ook kleinschaligheid zeer betaalbaar. Robots kunnen elke gewenste vorm produceren, zonder dat dit leidt tot een aanzienlijke verhoging van de kosten. Daardoor is een ronde vorm weer net zo betaalbaar als een rechte vorm. De ontwerper maakt hiermee weer zelf de keuzes die hij/zij wil.

Het seriematig produceren van gelijkvormige gebouwen is door de mogelijkheden van 3D-printen in beton geen noodzaak meer om betaalbaar te bouwen.

Bovendien wordt er veel tijd en afval bespaard met deze nieuwe techniek, ook omdat alleen op die plaatsen materiaal kan worden aangebracht waard dat ook werkelijk nodig is.

4.1 De eerste stappen

In 2001 startte de Amerikaanse professor Dr. Berokh Khoshnevis van de universiteit van California met wat wordt beschouwd als het eerste onderzoek naar 3D-printen van beton ('Contour Crafting'). Er werd al met 3D-printers geëxperimenteerd en gewerkt, maar tot dat moment nog niet met een materiaal dat op beton leek.

Al in 2009 verschenen er filmpjes van op YouTube, die natuurlijk wereldwijd interesse en verwachtingen wekten. Het zou nog tot 2014 duren voordat hij zijn onderzoek publiceerde. De reacties waren in eerste instantie verbaasd bij het zien van een geprinte muur, maar dit heeft wel een groot aantal ontwikkelingen in gang gezet!

Beelden gingen in 2014 de hele wereld over, toen de toenmalige Amerikaanse president Barack Obama samen met de Nederlandse premier Mark Rutte en de burgemeester van Amsterdam van toen, Eberhard van der Laan, naar de maquette stond te kijken van het 3D-Print Canalhouse in het Rijksmuseum. Het was het moment waarop het 3D-printen van gebouwen voor het algemene publiek een serieuze optie werd en Nederland zich mondiaal presenteerde als gidsland.

De initiatiefnemers van het 3D-grachtenpand, DUS Architects, werkten met kunststof en doen dat nog steeds. Hun 'kamermaker' legde laagje voor laagje draden van gesmolten kunststof op elkaar. Printen van beton leek toen nog een droom die mijlenver was verwijderd van de realiteit. Beton hardt immers niet snel uit, vloeit weg en heeft wapening nodig om serieuze krachten te kunnen opnemen.

4.2 Snelle evolutie

Amper vijf jaar later staat de wereld er heel anders bij!

In China worden al huizen van meerdere verdiepingen geprint, Apis Cor heeft in Rusland al in één dag een 'tiny house' neergezet, dat verder overigens op traditionele manier werd afgewerkt. Het Nederlandse bedrijf CyBe uit Oss heeft in Dubai een 3D-geprint laboratoriumgebouw 'R&Drone' met een voetafdruk van 14 bij 12 meter gerealiseerd. Zie afbeelding 5.



Afbeelding 5: R&Drone, Dubai (CyBe).

Zodra de robot van CyBe teruggekeerd was naar Nederland, ging deze direct aan de slag met het printen van een grillig gevormd vergadergebouw “De Vergaderfabriek” in Teuge (afbeelding 6 en 7).



Afbeelding 6: De Vergaderfabriek, Teuge, bijna gereed in 2019 (CyBe; bron: Mediavisie).

Om een koudebrug te voorkomen, moest het buitenspouwblad worden onderbroken van het binnenspouwblad en constructie. Hiertoe is tijdens de productie per aantal printlagen een inkeping in het nog niet uitgeharde beton gemaakt, waartussen isolatieplaatjes zijn geplaatst. Verder is ook de buitenste schil van de wand op een blok foamglas geprint.

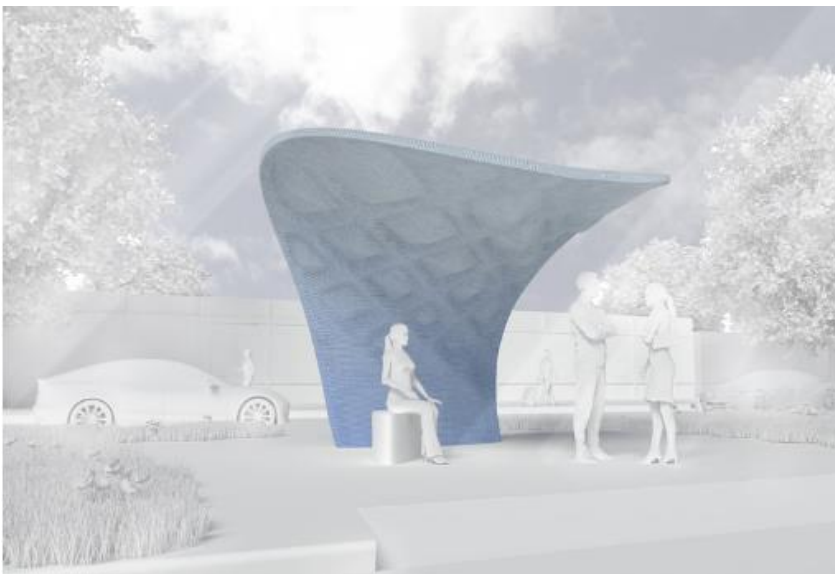


Afbeelding 7: onderzijde geprinte wanden met uitstekende stekeinden, buitenste schil op foamglas en een isolatieplaat (bron: Mediavisie)

Het zwaartepunt van het 3D-printen voor de bouw is verschoven van kunststof naar beton. Ook daarin speelt Nederland dus flink mee in de wereldtop. Van de tien partijen in de wereld die meer kunnen dan een muurtje printen van beton, zijn er drie Nederlands!

Bruil heeft in samenwerking met Studio RAP en Movares een 3D-geprinteabri ontwikkeld voor de Rotterdamse watertaxi. De gekromde 4,5 meter brede luifel heeft een uitkragend dak van 3,5 meter. Dat bleek mogelijk dankzij voorspanstrengen, waarvan de kanalen worden meegeprint. Zie afbeelding 8.

De decoratieve trompetstukken waarmee de strengen op spanning worden gebracht komen op hun beurt ook uit een 3D-(metaal-)printer. Hiermee is opnieuw een grens verlegd in deze nog prille technologie, want deze vorm realiseren is enorm lastig tot vrijwel onmogelijk in traditioneel gestort beton na eindeloos timmeren van een bekisting.



Afbeelding 8:abri voor watertaxi in Rotterdam (Studio Rap).

Ook volgens hoogleraar prof.dr.ir. Theo Salet van de TU Eindhoven worden de grenzen van het 3D-betonprinten momenteel flink verder opgerekt. Salets vakgroep bouwde al in 2015 een grote 3D-printer volgens het Gantry-model. Dat is geen robot uit de auto-industrie, waarmee verschillende andere partijen werken, maar een printer met een kop die zich langs drie assen beweegt.

Theo Salet zelf hierover: “Belangrijk is dat we inmiddels hebben aangetoond dat we onze muurtjes constructief kunnen belasten. Aan de buitenkant zie je al die laagjes, maar zaag je zo’n muurtje door, dan vormt het beton in het midden echt één geheel, mits er nat-in-nat wordt geprint. De eigenschappen zijn niet wezenlijk anders dan die van gestort beton. We hebben de hechting van de laagjes op verschillende manieren onderzocht. Daarvoor hebben we eerst nieuwe testmethoden moeten ontwikkelen, omdat de standaardproeven uit de betonindustrie niet werken bij printbeton.”

4.3 Uitdagingen

Zo blijken er in de praktijk nog wel meer zaken rond 3D-printen nog onbekend terrein te zijn, waarnaar nog volop onderzoek wordt gedaan. Een ander voorbeeld daarvan is wapening. Momenteel experimenteren meerdere onderzoekers met het wapenen van 3D-geprint beton. Wapeningsstaven parallel aan de printlaagjes leggen is al geen probleem meer, maar met staven haaks daarop worden volgens de betrokkenen nu ook al aansprekende resultaten geboekt. Dan

is er dus ook weer sprake van gewapend beton. Voeg je er vezels aan toe, dan neemt ook nog eens de taaheid van het materiaal toe en openen zich weer nieuwe mogelijkheden. Bij BAM Infra, zo geeft woordvoerder ir. Johan Bolhuis aan, wordt geprint met draad (wapening), vanuit een constructieve benadering.

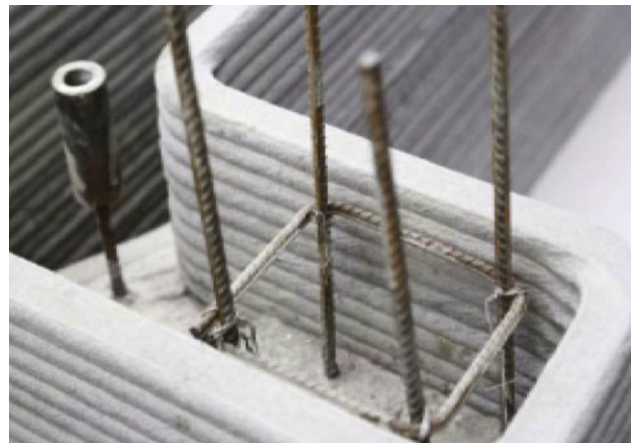
Tot voor kort lag de focus primair bij het op locatie printen van een bouwdeel of gebouw, maar echt grote impact zal 3D-printentoch waarschijnlijk gaan krijgen via de prefab-industrie. Daar kunnen bouwdeelen en componenten worden geproduceerd met een grotere verscheidenheid aan vormen en maten dan op locatie mogelijk is.

Bij prefabricage komen wel weer andere problemen om de hoek kijken, zoals het transport van de geproduceerde delen en het samenvoegen tot een gebouw.

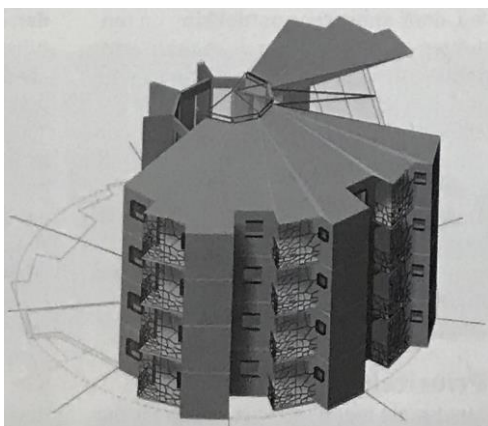
Hijssankers vormen een lastig obstakel voor de printkop die telkens over de gelegde laagjes gaat om weer een nieuw laagje aan te brengen.

Er zal dan bijvoorbeeld (zie afbeelding 9) een ander idee moeten worden gevonden, zoals een inkassing die met betonmortel wordt gevuld.

Sinds de Tweede Wereldoorlog is de bouw enorm succesvol geïndustrialiseerd, maar tegelijkertijd hebben we onszelf in een keurslijf gedrongen van standaardmaten en details. We kunnen ons nu eindelijk weer bevrijden van traditionele beukmaten van 5,40 meter en vele andere beperkende standaarden.



Afbeelding 9: wand met instortvoorzieningen zoals een hijspunt (China).



Afbeelding 10: ontwerp van 4-laags te printen woongebouw in India (CyBe).

Ook de Nederlandse betonprintpionier CyBe zet nu de tanden in prefab, met een vierlaags woongebouw in India. Geen icoon, maar een regulier gebouw dat moet concurreren met lokale bouwtechnieken ter plaatse. Najaar 2019 is hiermee gestart (zie afbeelding 10).

De printer gaat hier 'semi-precast' werken; dat betekent dat hij niet het gebouw uit één stuk print, maar in een hoekje van de bouwplaats trappen, panelen en wanden print die vervolgens met een kraan op hun plek worden gezet en verbonden met de prefab-betonvloeren.

De leidingen worden zoveel mogelijk al voorafgaand aan de montage in de holle wanden geplaatst. Aan de binnenkant worden de wanden afgewerkt, maar aan de buitengevel zullen de laagjes, die zo kenmerkend zijn voor de printtechniek, veelal in zicht blijven.

Vanuit Oss worden de mensen in India opgeleid in het bedienen van de printrobot. Zo vergt elk project en elke regio zijn eigen aanpak.

Ook het werken met kleuren is bij prefabricage beter uitvoerbaar en in hoge kwaliteit te realiseren! Voorbeelden daarvan zijn er inmiddels legio. Zie afbeeldingen 11 en 12.



Afbeelding 11: kunstwerk met naam van fotografe Gerda van Ekris (Bruil).

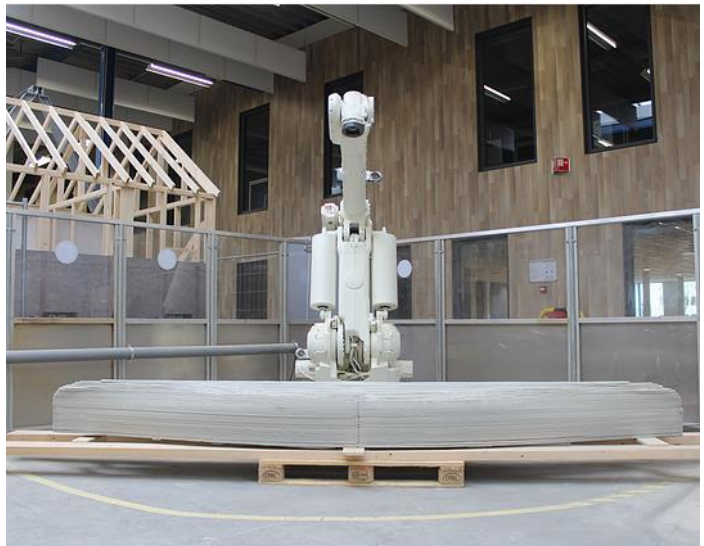


Afbeelding 12: gekleurde prefab-objecten (Bruil).

Voordeel is bijvoorbeeld de constantere kleurintensiteit, omdat de kleurstof niet meer in een grote betonmenger wordt toegevoegd aan het grijze basismateriaal, maar via de printkop in een constante dosering naar buiten komt. Door de veel snellere uitharding van 3D-geprint beton ten opzichte van traditioneel beton is ook het probleem van kalkuitslag (uitbloeiing) minder groot.

Van de relatief kleine firma Vertico uit Amersfoort geeft Volker Ruitinga aan dat men werkt met een grote printeropstelling, waarmee grote ontwerpen te realiseren zijn. De printerkop werkt met een rechthoekige printmond, waardoor vlakke laagjes met rechte uiteinden mogelijk zijn. Het uiterlijk van een 3D-geprint gebouw kan op die manier erg strak ogen! Hoeken zijn ook goed mogelijk. Deze firma hanteert hiervoor een afwijkende printtechniek, Daarover iets meer in hoofdstuk 6.

Een andere afwijkende techniek, die "poederprinten" wordt genoemd, wordt bijvoorbeeld gehanteerd door Concr3de uit Rotterdam.



Afbeelding 13: grote robotprinter (met 6-assige printkop-techniek) van Vertico.

5 Ontwerp en engineering

5.1 Parametrisch ontwerpen

Geïnformeerd of parametrisch ontwerpen is een ontwerpproces waarbij op basis van data of relaties tussen onderdelen een ontwerp kan worden gegenereerd.

Parametrisch ontwerpen betekent eigenlijk dat je in het ontwerp parameters (ofwel variabelen) gebruikt als input voor een berekening of, meer in het algemeen, een algoritme (een serie bewerkingen). Hiervoor worden specifieke applicaties ofwel 'parametrische software' gebruikt. Bij parametrische software is het voor de gebruiker mogelijk om zelf expliciet de parameters te definiëren. Je geeft als invoer dus niet alleen de waarde op, maar je kunt ook bepalen welke invoer wordt ingegeven. Bij een balk definieer je bijvoorbeeld de lengte van de balk als een parameter en het type profiel. Bij een vloer kunnen de parameters de overspanningen in twee richtingen en de dikte van de vloer zijn. De gebruiker mag dit zelf verzinnen en de computer 'begrijpt' dat deze parameters invoer zijn voor het model.

Met parametrisch ontwerpen kunnen dezelfde voordelen worden bereikt als waar men vroeger voor moest programmeren: automatiseren, genereren en optimaliseren. En dit allemaal zonder de pijn van programmeertalen, zoals de welbekende 'syntax errors' en eindeloze zoektochten naar bugs en denkfoutjes. Ook voor het engineeringproces biedt parametrisch ontwerpen talloze mogelijkheden: modellen of ontwerpen kunnen automatisch worden gegenereerd op basis van parameters als maten, materiaaldikte of geometrie. Op deze manier kunnen haast eindeloos veel alternatieven voor complexe geometrie en constructies worden afgewogen. Hierdoor is optimalisatie nauwkeurig en relatief eenvoudig mogelijk, ook voor complexe constructies zoals bij 3D-printen. Ook kunnen flinke stappen in efficiency worden gezet, als modellen worden gekoppeld aan productie. In feite wordt dan de productie rechtstreeks aangestuurd vanuit het model. Eigenlijk is parametrisch ontwerpen een vorm om eigen logica uit te drukken in software en deze naar eigen inzicht vorm te geven en uit te voeren. Het is een vorm van visueel programmeren. Het voordeel ten opzichte van tekstueel programmeren is dat de interactie met de software relatief eenvoudig en speels is. Dit is dan ook een belangrijke reden waarom diverse partijen die zich met 3D-printen bezighouden zelf hun software maken om de printers aan te sturen.

5.2 Wet- en regelgeving

Een praktisch probleem dat opduikt bij het fenomeen 3D-printen in beton is het ontbreken van goede voorschriften, normen en rekenregels waaraan met deze techniek tot stand te brengen constructies aan moeten voldoen.

Verschillende constructiebureaus houden zich inmiddels hiermee bezig, zoals IOB uit Hellevoetsluis en Witteveen+Bos uit Deventer.

Volgens architect Pim van Wylick van The Form Foundation, is niet zozeer de print- of beton-techniek, maar de regelgeving de voornaamste bottleneck bij de realisatie van 3D-printontwerpen. "We steken heel veel energie in het overtuigen van Bouw- en Woningtoezicht dat het allemaal kan en voldoet aan de eisen van het Bouwbesluit." De beste manier om de toezichthouders te overtuigen is echter nog niet eenduidig bepaald.

Er is intussen al wel ervaring opgedaan door het simpelweg "te doen"! Met name in een land als China zijn al kleine en ook grotere bouwwerken gerealiseerd en zelfs in gebruik, terwijl pas naderhand de kennis ontstond om eraan te kunnen rekenen. Controles achteraf zijn dan wel mogelijk, maar goede praktijktests uiteraard niet!

Belangrijk basisgegeven blijft vanzelfsprekend de veiligheid en daarvoor kan de praktijk ook prima dienen. Want op basis van modellen komen ook de tests en beproevingen aan de orde, waarop vervolgens bouwregels en methodieken kunnen worden ontwikkeld. Hieruit kan men al relatief snel concluderen wat kan en wat mag.

Ir. Johan Bolhuis, integraal ontwerpmanager bij BAM Infraconsult, nauw betrokken bij het 3D-printen met de TU-printer in Eindhoven, noemt als belangrijk voordeel van 3D-printen de betaalbare vormvrijheid. Niet alleen omdat tekenwerk overgeslagen kan worden, maar ook omdat alleen daar materiaal wordt gebruikt waar het constructief nodig is; dus met open stukken waar het niet nodig is. Een belangrijke besparing op bouw materiaal en minder verspilling.

De architect moet gaan denken vanuit printtechnologie en de mogelijkheden. Continu leren en verbeteren is het devies. En "design by testing" sluit ook aan op het geschetste beeld van het maken van regels en voorschriften op basis van kennis en ervaring.

Centraal staat nu het ontwerp en het krachtenspel. Door de computer wordt vervolgens een materiaalschets gegenereerd, zodanig dat er geen materiaal wordt geplaatst waar dat voor de krachtafdracht niet nodig is. "Topologische optimalisatie" wordt dat genoemd.

5.3 Rekenmodellen

Zoals al in de vorige paragrafen naar voren kwam, zijn er op dit moment nog geen eenduidige rekenregels en dus ook nog geen algemeen geldende rekenmodellen.

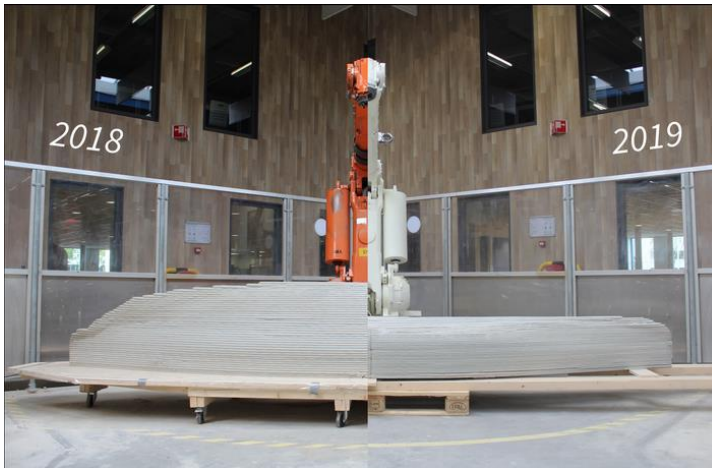
Dat wil overigens geenszins zeggen dat er nog helemaal niets is. De verschillende bureaus die zich hiermee bezighouden hebben uiteraard niet stilgezeten. Het uitwerken van testresultaten levert interessante inzichten op en met het zogenoemde "parametriseren van het ontwerp" komt men al tot interessante berekeningen. Maar ook bestaande rekenmodellen worden erop losgelaten, waaruit ook weer nieuwe inzichten en uitkomsten ontstaan.

6 Productie en duurzaamheid

6.1 Printers en technieken

3D-printers worden vaak voorgesteld als machines van magnetron-afmetingen, die plastic modellen produceren of reproducen. Dit gaat weliswaar voor een groot gedeelte op voor de meeste consumenten-3D-printers, maar er is intussen ook een geheel ander niveau van 3D-printtechnologie ontwikkeld en toegepast voor industriële doeleinden, waaronder de bouw. Grote 3D-betonprinters, ontworpen voor grotere projecten, worden steeds gewoner en beter betaalbaar. De introductie van 3D-printers in de industrie zal zeker kunnen leiden tot lagere arbeidskosten, minder materiaalgebruik en efficiëntere bouwmethoden.

Bij de firma Vertico hanteert men een andere techniek, op basis van smelten, en deze handelingen herhalen in laagjes. Hierdoor is het mogelijk om tot een minimum van 8 mm dikte te printen. Die ontwikkeling is duidelijk te zien in twee opeenvolgende jaargangen van de Betonkanorace, zie afbeelding 14: links de versie van 2018 en rechts die van 2019.



Afbeelding 14: betonkano's geprint door Vertico, Amersfoort.

Tot de firma's die al goed werkende prototypes van grootformatige 3D-betonprinters hebben, behoort Apis Cor uit Boston, U.S.A.. Zij werken met een printer die een woning met een grondvlak van bijna 40 m² binnen 24 uur kan printen.

Dit project heeft slechts iets meer dan \$ 10.000,= gekost om te bouwen, inclusief arbeidskosten en materiaal.

Hoewel deze printer zelf de betonnen wanden creëerde, was er nog wel steeds menselijke arbeid nodig om het dak, bedrading, loodgieterswerk en isolatie aan te brengen om het huis bewoonbaar te maken.

Op de website van Apis Cor wordt al aangekondigd dat hun 3D-printer niet alleen voor aardse bouw is



Afbeelding 15: grootformaat 3D-printer (Apis Cor).

bedoeld, maar dat er ook al met concepten wordt gewerkt om 3D-geprint te bouwen op de maan of op Mars.

6.2 Materiaal

In tegenstelling tot de fotopolymeer-harsen die in de meeste 3D-printers worden toegepast, gebruiken de geïndustrialiseerde printers voor bouwconstructies andere materialen. De meest gebruikelijke zijn betoncomposieten.

Bij CyBe heeft men, als ontwikkelaars van printers en software, ook een speciale, eigen mortel ontwikkeld, welke binnen drie minuten hard wordt en een droogtijd heeft van slechts één uur. Veel firma's gebruiken of ontwikkelen momenteel een betonmix die gemaakt wordt van gerecyclede materialen. Zo werkt de firma Cazza's Construction uit San Francisco met een mix die voor bijna 80% uit gerecycled materiaal bestaat.

6.3 Levensduur en onderhoud

Uiteraard is er nog relatief weinig langeduur-ervaring met het fenomeen "3D-geprint beton" opgedaan, waardoor over de levensduur nog niet zoveel bekend is. Omdat de basis gevormd wordt door materiaal dat in grote lijnen dezelfde basis heeft als normaal beton, mag gesteld worden dat er weinig onderhoud nodig is.

Omdat er veelal geen normale wapening wordt toegepast, maar (verzinkte) staalvezels, kunststofvezels, glasvezels, koolstof (carbon), textiel of een combinatie daarvan, is de kans op wapeningscorrosie geringer dan bij normale betonconstructies.

Zeker wanneer het object wordt voorzien van een coating, bijvoorbeeld om aan de eisen van luchtdicht bouwen te voldoen, zal de levensduur die van beton zeker kunnen evenaren.

6.4 Kosten

Er zitten grote voordelen aan betonprinten ten opzichte van de traditionele bouw. Zo hoeft er niet eerst een bekisting gemaakt te worden en is er tot 25% minder restafval, omdat de printer alleen die grondstoffen gebruikt die nodig zijn. Omdat er ook geen massieve muren meer gestort hoeven te worden, is circa 50% minder beton nodig, wat de constructie ook een stuk lichter maakt. De computer zal minder fouten maken dan mensen en kan daarnaast een oplossing zijn voor het tekort aan vakmensen in de bouw. Prof. Theo Salet schat in dat daardoor de totale kostenpost van het bouwen van een huis 15 tot 20% gunstiger kan uitvallen.

Een ander voordeel van de betonprinter is de snelheid waarmee hij werkt. Een 3D-printer kan een eengezinswoning fabriceren binnen een week, waarna nog twee maanden nodig zijn om het huis af te bouwen. In de traditionele bouw zijn ongeveer zes bouwmaanden nodig nadat de fundamenteen geplaatst zijn. Daarnaast kan de printer vrijwel iedere vorm printen, zodat in een grote verscheidenheid gebouwd kan worden.

Het is nog de vraag of betonprinten voor hoogbouw een oplossing gaat worden. Er moet dan extra wapening toegepast worden en dat maakt het proces weer duurder. Tevens zijn de printers vrij zwaar en kunnen niet zomaar op een eerder geprinte verdieping geplaatst worden.

7 Realisatie

Dat de ontwikkelingen niet stilstaan en ondertussen ook al flink wat resultaten hebben opgeleverd, moge blijken uit het volgende overzicht van, naast al eerder in dit rapport genoemde objecten, nog een aantal toonaangevende projecten.

Op 11 oktober 2019 werd, door een selecte groep in een bijeenkomst die was georganiseerd door de Vakgroep Civiele Beton van Bouwend Nederland en Stubeco gezamenlijk, de 3D-betonprint-fabriek in Eindhoven bezocht. Deze ontwikkeling is het resultaat van een nauwe samenwerking van BAM Infra en Weber Beamix. Het was in dit fabrieksbezoek duidelijk te zien dat de verschillende geprinte lagen voor het oog blijven weliswaar bestaan, maar dat het materiaal van binnen 100% monolithisch is. Het 3D- betonprintstelsel zelf is hier opgebouwd uit bestaande systemen: een silo met droge mortel, pomp, slang en een printkop die zich op een robotarm bevindt welke ook veelvuldig in de automotive-wereld wordt ingezet.

Door BAM zijn al verschillende 3D-betonprintprojecten gerealiseerd en is een groot aantal projecten onder handen. Voorbeeld is de voetgangers- en fietsersbrug in Gemert die al in 2017 in 3D werd geprint (wereldprimeur)! Deze brug is opgebouwd uit verschillende blokken die voorzien zijn van voorspankabels.

Van grotere omvang is de brug waaraan werd gewerkt voor een park in Nijmegen. Deze ruim 28 meter lange brug is op het moment van dit bezoek de langste 3D-geprinte brug ter wereld.



Afbeelding 16: 3D-printfabriek BAM/Weber.



Afbeelding 17: Brugdelen voor brug Nijmegen.

Op 12 december 2019 heeft Bruil Prefab Printing in Veenendaal een innovatieve, tevens de grootste 3D-betonprintfabriek van Europa op dat moment geopend. Een nieuwe flexibele robot gaat in deze fabriek complete betonnen gevelelementen, balustrades en kolommen printen. Niet rechttoe-rechtaan, maar met glooiende, ronde vormen. Bruil, Kokon Architectuur & Stedenbouw en Helder Vastgoed realiseren hiermee samen een opmerkelijke project aan de Baskeweg in Den Helder. Volgens Bruil gaat het om wereldwijd het grootste project tot dusver op 3D-betonprintgebied. Twee gedateerde flatgebouwen van elk zeven verdiepingen, gebouwd aan het begin van de jaren '70, krijgen daarmee een moderne, mediterrane uitstraling à la Gaudi.

Hierbij bleek de uitvoering in 3D-geprint beton betaalbaarder én aanzienlijk sneller qua productietijd dan traditioneel. Uitvoerige proeven toonden bovendien aan dat de geprinte betonelementen qua sterkte niet onder doen voor traditioneel vervaardigde producten.

AANSPREKENDE PROJECTEN:

Balustrades voor balkons in Den Helder: voor renovatie van appartementencomplex.



*Afbeelding 18a: opgesteld model en
18b: nieuwe printer in de
printfabriek van Bruil in
Veenendaal.*



Afbeelding 19: artist impression van het gerenoveerde gebouw in Den Helder.



Afbeelding 20: aanzicht balkons met de ronde balustrades (Bruil).

"3D-Housing 05" in Milaan, Italië:
woningbouw in 2,5 week, totale proces in 2,5 maand gereed, all-in. Normaliter 25 weken.



Afbeelding 21: 3D-Housing 05, Milaan.

"3D-studio 2030" in Sharjah, Saoedi-Arabië:
in 5 weken gebouwd.



Afbeelding 22: 3D-Studio 2030, Sharjah.

“ICON”-huis in Austin, Texas: binnen 24 uur gebouwd en met totale kosten van nog geen 4000 euro.



Afbeelding 23: “ICON”-huis, Austin, Texas.

Fietsbrug in Gemert: eerste in 3D-betonprint gemaakte brug ter wereld.



Afbeelding 24: fietsbrug (wereldprimeur) in Gemert (BAM).

Voetgangers- en fietsersbrug in Nijmegen: op het moment van Plaatsen de langste 3D-geprinte betonnen brug ter wereld met afmetingen van 28 x 3,6 meter.



*Afbeelding 25: ontwerp van de 3D-brug in Nijmegen (BAM).
Beeld: Pim Feijen/Rijkswaterstaat.*

Betonnen kano's voor de jaarlijkse Betonkanorace van de Betonvereniging: voor de Utrechtse Technische Vereniging UTV. Door voortschrijdende techniek bij Vertico uit Amersfoort was de kano van 2019 de helft lichter dan die van 2018.



Afbeelding 26: deelnemers aan de Betonkanorace 2019.



Afbeelding 27: de betonkano 2019 van de UTV (geprint door Vertico, Amersfoort).

8 Toekomstbeeld

8.1 Fijne huizen voor bewoners printen

Onder de bezielende leiding van professor Theo Salet (TU/e) is eind 2018 begonnen met de bouw van vijf woningen in Eindhoven. In de als Milestone-project ontwikkelde woningen gaat het om de eerste 5 ècht bewoonbare woningen ter wereld die uit een 3D-betonprinter komen! Ze worden gesitueerd in de wijk Meerhoven in Eindhoven-West.



Afbeelding 28: impressie Project Milestone, Eindhoven (architectenbureau Houben/Van Mierlo).

Theo Salet werkt daarbij samen met de gemeente en een consortium van bedrijven, waaronder BAM Infra, Weber Beamix en de commerciële woningbelegger Vesteda. De printer is die van de TU in Eindhoven en gebouwd wordt er door bouwmaatschappij Van Wijnen. De huizen zijn geen vierkante dozen, maar hebben een organische vorm die aan zwerfkeien doet denken en ze gaan daarom mooi op in de groene omgeving van deze Eindhovense wijk.

Salet hierover: "We hebben twee uitdagingen. We moeten huizen bouwen die voldoen aan het Bouwbesluit en we moeten huizen opleveren waar mensen fijn in kunnen wonen. Dat ze geprint zijn met beton is voor de bewoners bijzaak, die willen een prettige woning hebben." De buitenzijde heeft veel afgeronde vormen, maar de binnenmuren zijn gewoon recht. Een antieke kast kan dus gewoon tegen de muur worden geplaatst.

De panden zijn allemaal anders. Het eerste huis dat geprint wordt heeft maar één woonlaag en een houten dak. Het volgende huis heeft een extra woonlaag en daar wordt ook de vloer meegeprint. Zo komt de lat steeds hoger te liggen en kunnen ondertussen de woningen getest worden. De woningen zijn ook daadwerkelijk verkocht.

Ook al wordt er op dit moment nog steeds divers onderzoek naar het betonprinten met een 3D-printer gedaan, toch is al wel duidelijk dat dit in de nabije toekomst veel toegepast zal worden in de bouw. Zo streeft Dubai ernaar om al in 2030 een kwart van alle gebouwdelen voor nieuwbouw uit de 3D-printer te laten rollen.

8.2 Geopolymeerbeton

Hoe snel de ontwikkelingen ook gaan, we zijn er nog niet. Nog lang niet alle mogelijkheden van 3D-betonprinten zijn onderzocht bovenal moeten we in kunnen staan voor een veilige constructie. Maar uiteindelijk wordt het een heel elegante techniek waarbij je het materiaal alleen daar aanbrengt waar het nodig is, zodat je zo min mogelijk verspilt en heel weinig afval produceert. En dat is in de betonwereld met haar hoge CO₂-footprint een niet te onderschatten voordeel.

Bij conventioneel beton bestaat het bindmiddel uit water en cement; bij geopolymeerbeton bestaat het bindmiddel uit vulstoffen, bijvoorbeeld slak of vliegashoudend (bijproducten van allerlei industrieën) en een zogenoemde alkalische activator, bijvoorbeeld waterglas of natriumhydroxide.



Afbeelding 29: uitleg geopolymeerbeton.

De naam geopolymeerbeton heeft betrekking op de polymeerstructuur die wordt gevormd als een calciumarme vulstof (bijv. vliegashoudend) alkalisch-geactiveerd is.

In andere landen wordt geopolymeerbeton al langer toegepast. In Australië zijn met dit materiaal bijvoorbeeld prefab-vloerelementen en een dek voor een fietsbrug gemaakt. Al is geopolymeerbeton dan misschien veelbelovend op het gebied van milieu, het materiaal is in Nederland nog niet vaak (constructief) toegepast. Redenen hiervoor zijn dat er geen normen en regelgeving beschikbaar zijn, het materiaal relatief nieuw is en het aantal onderzoeken naar constructief gedrag van geopolymeerbeton nog beperkt is.

Nogmaals prof. Theo Salet (TU/e): "In Singapore ben ik betrokken bij een project waar we gaan printen met geopolymeerbeton. Dan wordt de CO₂-voetafdruk echt drastisch kleiner. Maar tegelijkertijd beschik je over bijna ongelimiteerde vormvrijheid."

Kortom: we zijn nog niet klaar!

8.3 Slotopmerking

Stel, je hebt best veel verstand van huizen bouwen, je bent ook nog architect én hebt de technische skills om je eigen 3D-printer te bouwen. De Amerikaanse architect Andrey Rudenko heeft jaren gewerkt aan een 3D-printer met als doel een kasteel te bouwen in zijn achtertuin. Van beton. Laagje voor laagje. En het is gelukt!



Afbeelding 30: met 3D-betonprinter gemaakt kasteeltje van Andrey Rudenko, Minnesota.

Uit de diverse ontwikkelingen en technologieën kunnen we concluderen dat het realiseren van betonnen of beton-gerelateerde bouwwerken met een 3D-printer geen science-fiction meer is. Het zijn dan ook niet langer luchtkastelen, maar ook daadwerkelijk echte kastelen die werkelijkheid kunnen worden!

Hoe de toekomst er ook zal uitzien, het 3D-printen van beton heeft een veelbelovende toekomst! Dit Stubeco-rapport beoogt dan ook niet een samenvattend en compleet overzicht te zijn. Publicatie van dit rapport zal in basis alleen digitaal gebeuren en het document wil van harte uitnodigen om hierop aanvullingen, uitbreidingen, correcties en dergelijke aan te brengen. Vanzelfsprekend zal dit altijd met toestemming van de uitgever (Stubeco) moeten gebeuren, maar de uitgever alsmede degenen die aan de totstandkoming van dit document hebben meegewerkt staan hiervoor open!

9 Literatuurlijst

"3D Betonprinten - ambities en potenties"

Artikel door de redactie van "Tektoniek" (oktober 2015).

"Betonprinten lijkt definitief de klieperfase voorbij"

Artikel door de redactie van vakblad "Cobouw" (10 mei 2017).

"Rolt er zomaar een voorgespannen fietsbrug uit de betonprinter"

Artikel door de redactie van "Cobouw" (juni 2017).

"Netherlands to build world's first habitable 3D printed houses"

Artikel in "The Guardian" (juni 2018).

"3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research"

R.A. Buswella (*School of Architecture, Building and Civil Engineering, Loughborough University, UK*),
W.R. Leal de Silva (*The Concrete Centre, The Danish Technological Institute, Denmark*),
S.Z. Jones (*Engineering Laboratory, National Institute of Standards and Technology, USA*)
en J. Dirrenberger (*Laboratoire PIMM, Arts et Métiers-ParisTech, Cnam, CNRS, Paris, France / XtreeE, Rungis, France*).

Een publicatie van Elsevier (14 juni 2018).

"Digitalisering van ontwerp tot productie"

Artikel door ir. Cindy Vissering van Betonhuis / redactie "Cement" (december 2019).