

3D-betonprinten

Technologieën, uitdagingen, kansen
en toepassingen



Voorwoord

Deze publicatie heeft tot doel om de huidige kennis inzake 3D-printing voor de uitvoering van elementen, constructies en verloren bekistingen uit mortel te verzamelen. Deze techniek kan immers op alsmear meer belangstelling rekenen en dit, zowel bij producenten, architecten, studie bureaus als bouwondernemingen.

De term '3D-betonprinten' wordt in de literatuur en in de gebruikspraktijk in ruimere zin gehanteerd om te verwijzen naar projecten die uitgevoerd worden met cementgebonden materialen ('beton') als inkt en dit, ondanks het feit dat dergelijke inkten technisch gezien eigenlijk mortels zijn omwille van de beperkte maximale korrelgrootte van de gebruikte granulaten (max. 2 à 4 mm). In het voorliggende document zullen we om praktische redenen de term '3D-betonprinten' blijven gebruiken.

Bij dit 3D-extrusieprintprocedé, ook wel additieve productie of *additive manufacturing* genoemd, wordt het materiaal (mortel) in opeenvolgende lagen gedeponed met behulp van een printmachine (gemotoriseerd portaal of industriële robot) die aangestuurd wordt door *software*. Tegenwoordig vinden veel 3D-printmachines voor de bouwsector geleidelijk hun weg naar de prefabricagewerkplaatsen en naar de bouwplaats.

Getrouw aan zijn missie als innovatiecentrum wil Buildwise de sector begeleiden bij het implementeren van digitale technologieën (3D-printen, cobots, drones ...). De onderzoeks- en ontwikkelingsprojecten met betrekking tot 3D-printing vermenigvuldigen zich gestadig, waardoor dit procedé alsmear efficiënter wordt. Deze vooruitgang maakt het mogelijk om te anticiperen op de groeiende vraag naar een technologie waarbij er geen bekisting meer nodig is en die de weg opent voor het ontwerpen en uitvoeren van complexe geometrische vormen met minder materiaal. Tegen deze achtergrond heeft Buildwise verschillende projecten rond de technologie van printbare mengsels (samenstelling, mechanische prestaties en duurzaamheid) opgezet, evenals demonstratieactiviteiten die doorgaan in een hal die een 3D-mortelprinter herbergt.

Het tweede doel van dit document bestaat erin om een overzicht te geven van de belangrijkste kansen die de technologie van het 3D-printen te bieden heeft voor de bouwprofessioneel en om dieper in te gaan op de meest relevante toepassingen en uitdagingen. Gelet op het feit dat het 3D-printen in de bouwsector onderhevig is aan een constante evolutie, willen we benadrukken dat de informatie uit dit document op (al dan niet korte) termijn achterhaald kan zijn.

Deze Innovation Paper kwam tot stand in het kader van C-Tech en de Normen-Antenne Mortel-Beton-Granulaten.

Auteur: Khadija El Cheikh

Hebben eveneens hun medewerking verleend aan de opstelling van dit document:

Angelo Buttafuoco, Laurent Clabots, Stefan Danschutter, Yves Grégoire, Niels Hulsbosch, Josse Jacobs, Laurent Lassoie, Yves Martin, Julie Piérard, Valérie Pollet, Gaëtan Wégria, Jörg Wijnants en Eric Winnepenninckx (Buildwise).

Damien Duvivier en Benoit Parmentier (ex-Buildwise).



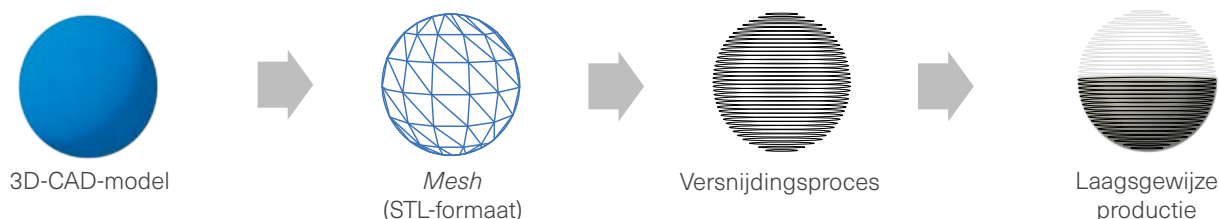
Inhoud

| | |
|--|----|
| VOORWOORD | 3 |
| 1. WAT IS 3D-PRINTING? | 7 |
| 2. KORT HISTORISCH OVERZICHT VAN HET BOUWEN DOOR 3D-PRINTING | 8 |
| 3. 3D-PRINTPROCEDÉS IN DE BOUWSECTOR | 11 |
| 3.1 Extrusie | 11 |
| 3.2 Poederverbinding of -verlijming | 13 |
| 3.3 Additief lassen | 15 |
| 4. POTENTIEEL VAN HET 3D-PRINTEN IN DE BOUWSECTOR | 16 |
| 4.1 Snellere uitvoering en vrijheid van architecturaal ontwerp | 16 |
| 4.2 Economische impact | 18 |
| 4.3 Ecologische impact | 20 |
| 4.4 Beperking van de risico's en de menselijke fouten op de bouwplaats | 22 |
| 5. UITDAGINGEN DIE GEPAARD GAAN MET DE IMPLEMENTATIE VAN HET 3D-PRINTEN IN DE BOUW | 24 |
| 5.1 Hoge initiële investering | 24 |
| 5.2 Gedeeltelijk geautomatiseerde constructie | 25 |
| 5.3 Structurele wapening | 26 |
| 5.4 Oppervlakteafwerking en reproduceerbaarheid | 33 |
| 5.5 Klimatologische omstandigheden | 34 |
| 5.6 Gebrek aan wetten en reglementen | 35 |
| 6. 3D-BOUWMATERIALEN | 37 |
| 6.1 Samenstellingen voor printbare mortels | 37 |
| 6.2 Gewenste karakteristieken voor de printbare mengsels | 38 |
| 6.3 Karakterisering van de printbare mengsels in verse toestand | 41 |
| 6.4 Mechanische prestaties van de geprinte elementen | 43 |
| 7. PRINTMACHINES TEN DIENSTE VAN HET 3D-BOUWEN | 45 |
| 8. VOORBEELDEN VAN TOEPASSINGSGEBIEDEN | 50 |
| 8.1 Verloren bekistingen | 50 |
| 8.2 Niet-structurele toepassingen | 51 |
| 8.3 Structurele toepassingen | 55 |

| | |
|--|----|
| 9. CONFORMITEIT EN INTELLECTUELE EIGENDOM BIJ HET 3D-PRINTEN | 59 |
| 9.1 Het op de markt brengen en conformiteit | 59 |
| 9.2 Octrooien | 60 |
| 10. BESLUIT EN PERSPECTIEVEN | 62 |
| LITERATUURLIJST | 64 |

1. Wat is 3D-printing?

3D-printing, ook aangeduid als additieve productie of *additive manufacturing*, verwijst naar het geheel van procedés waarbij er objecten gecreëerd worden door verschillende materiaallagen opeen te stapelen met behulp van een 3D-printer. Al deze machines werken volgens hetzelfde basisprincipe. Eerst wordt er een driedimensionaal, digitaal model (3D-bestand of 3D-model) gecreëerd door een ontwerpsoftware. Dit model wordt virtueel in opeenvolgende lagen versneden door een *slicingssoftware* (*slicer*). De informatie die aan de hand hiervan naar de printer verzonden wordt, zorgt ervoor dat de printkop kan bewegen om het materiaal op de juiste plaats te deponeren. In afbeelding 1 worden de belangrijkste fasen van additieve productie samengevat.



Afb. 1 Algemeen principe van additieve productie [B15].

Het concept van de industriële additieve productie omvatte anno 2023 zeven genormaliseerde families van procedés met opeengestapelde lagen (zie afbeelding 2). De technologieën voor het 3D-betonprinten vallen hier vooralsnog buiten.

| Vloeibaar materiaal | Poedervormig materiaal | Vast materiaal |
|--|--|---|
| 1 – Spuiten van druppels | 3 – Spuiten van bindmiddel | 6 – Extrusie van materiaal |
| MJM – <i>Multi-Jet-Modeling</i> | 3DP – <i>3D Printing</i> | FDM – <i>Fused Deposition Modeling</i> |
| 2 – Vatpolymerisatie | 4 – Poederbedfusie | 7 – Laaglamineren |
| SLA – <i>Stereo Lithography Apparatus</i> DLP – <i>Digital Light Processing</i> | SLM – <i>Selective Laser Melting</i> EBM – <i>Electron Beam Melting</i> | LOM – <i>Laminated Object Manufacturing</i> |
| | 5 – Deponeren van materiaal onder geconcentreerde energie | |
| | CLAD – <i>Construction Laser Additive Directe</i> LMD – <i>Laser Metal Deposition</i> | |

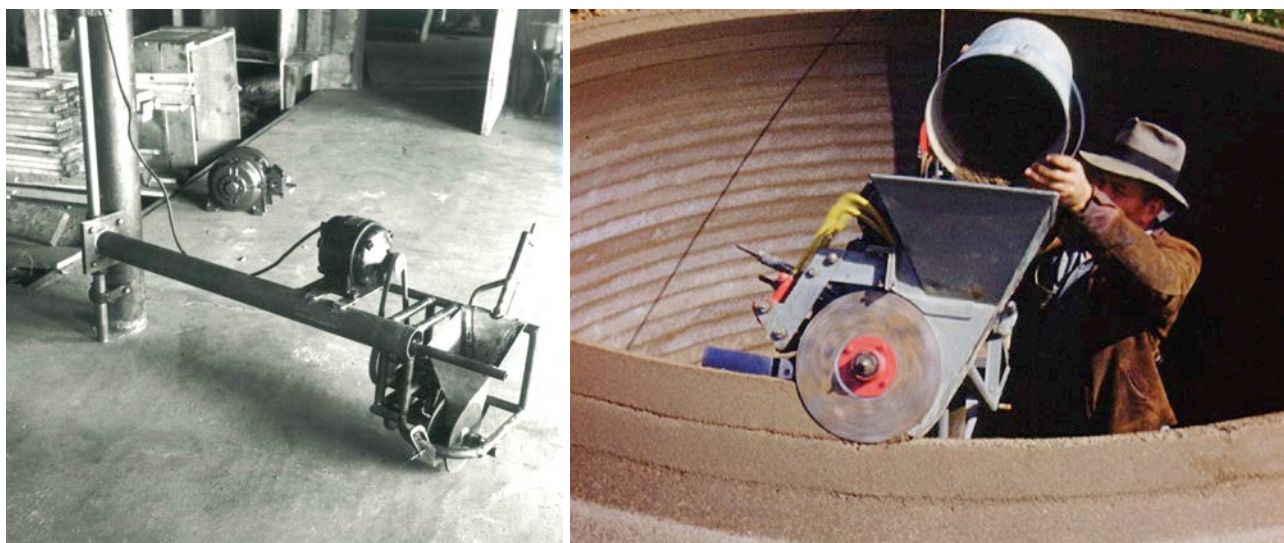
Afb. 2 De zeven families van additieveproductieprocedés die gedefinieerd worden in de norm NBN EN ISO 17296-2 [B15].

De technologie van het 3D-printen was lange tijd beperkt tot klassieke materialen zoals kunststof, maar omvat tegenwoordig een breed spectrum aan materialen zoals metalen, was, koolstofvezels en, meer recent, mortel. Deze techniek heeft tal van toepassingen in verschillende domeinen waaronder luchtvaart, automobielenindustrie, robotica, gezondheidszorg, burgerlijke bouwkunde en dergelijke meer. De geproduceerde elementen kunnen bijvoorbeeld over specifieke fysische (kleur, vorm enz.) en mechanische (stijfheid, hittebestendigheid enz.) eigenschappen beschikken.

In de bouwsector worden er ook nog een aantal alternatieve termen gebruikt zoals grootschalige additieve productie (LSAM – *Large Scale Additive Manufacturing*) of vrij bouwen (FC – *Free Construction*).

2. Kort historisch overzicht van het bouwen door 3D-printing

Eerst en vooral willen we eraan herinneren dat 3D-printing, ondanks de recent toegenomen interesse vanuit de bouwsector, niet nieuw is. In 1941 vroeg William E. Urschel in de Verenigde Staten een octrooi aan voor zijn *machine for building walls*, die het mogelijk maakte om betonnen muren op te trekken zonder bekisting. Deze machine was voorzien van een grote trechter waarlangs beton met een geringe korrelgrootteverdeling gestort werd (zie afbeelding 3). Daaronder bevond zich een draaiende wals die zorgde voor de aanvoer en verdichting van het beton. De machine werd ondersteund door een bakmechanisme dat de vanuit de trechteropening afkomstige betonspecie net zoals een schop tegen de draaiende wals naar voren duwde.



© Dave Tipold, Creative Solutions Manager, Urschel Laboratories, Inc.

Afb. 3 Prototypen van William E. Urschels *machine for building walls*.

Hoewel de techniek van het 3D-printen reeds verschillende decennia bestond in de verwerkende nijverheid, drong ze pas tegen het einde van de jaren 1990 door tot in de bouwsector. Bij de eerste pogingen om de technologie van het 3D-printen te gebruiken in de geautomatiseerde bouw werden er twee methodes gehanteerd. De eerste bestond erin om stoom te gebruiken om het materiaal selectief laagsgewijs te binden. De machine begon met het deponeren van een dunne laag silica (zand), gevolgd door een laag bindmiddel (Portlandcement). Vervolgens werd er stoom verstuift om het bindmiddel te doen verharderen en de gewenste vorm te produceren [P1]. De tweede methode, aangeduid als *Contour Crafting* (CC), werd ontwikkeld aan de *University of Southern California* (Verenigde Staten) en kende een zekere populariteit [K2]. Bij deze extrusiemethode werd er gebruikgemaakt van cementgebonden pasta's om elementen te 3D-printen [K1]. Het systeem was opgebouwd uit een kraan en een computergestuurd portaal (zie afbeelding 4, p. 9). Deze techniek liet toe om enkel de omtrek van een element te printen, waarna de binnenuimte opgevuld kon worden met vloeibaar beton. Het belangrijkste doel van *Contour Crafting* lag in het vermijden van een conventionele bekisting.

Vanaf de jaren 2000 kende de evolutie van het 3D-printen in de bouwsector een nieuwe bloei. Zo werd de *Freeform Construction Group* van de *Loughborough University* (Verenigd Koninkrijk) opgericht met als oogmerk om de bestaande 3D-printtechnieken aan te passen aan printbare mortelmengsels. Uit de eerste resultaten van deze groep kwam naar voren dat het essentieel is om voor deze technologie te komen tot een realistische rendabiliteitsdrempel. Vervolgens bouwde hetzelfde team een grootschalige 3D-printmachine door verschillende aspecten – waaronder het pompsysteem, het spuitbeton en het portaalconcept – te combineren. Met behulp van de aldus ontwikkelde printer was het niet alleen mogelijk om de omtrek uit te voeren, maar ook volledige elementen. Ongeveer tegelijkertijd zag in Italië de *D-Shape*-technologie het licht (zie § 3.2, p. 13). Deze verlijmingstechnologie met bindmiddelen werd toegepast in verschillende bouwprojecten. Deze vooruitgang luidde het begin van de toepassing van deze techniek in de bouwsector in.



Afb. 4 Het *Contour Crafting*-proces (links) en principe van het bouwen op grote schaal met dit procedé (rechts) [K1].

Vanaf 2010 begon het 3D-betonprinten de interesse van verschillende bouwbedrijven op te wekken en werden er wereldwijd tal van projecten op basis van deze techniek gelanceerd. De afgelopen jaren zette deze groei zich nog verder door, mede dankzij het onderzoek dat rond deze innovatieve thematiek gevoerd werd. Sinds het concept van de 3D-geprinte mortel meer dan 20 jaar geleden naar voren geschoven werd, hebben het onderzoek naar en de toepassingen van deze technologie een gestage ontwikkeling gekend en dit, ondanks het feit dat het beperkte aantal projecten voornamelijk onderzoeksgerelateerde demonstratiesites betreft.

Vandaag de dag heeft het 3D-printen een zekere maturiteit bereikt, gezien de vele 3D-mortelprinters die op de markt beschikbaar zijn (zie hoofdstuk 7, p. 45). Het is tegenwoordig niet alleen mogelijk om te printen in een gecontroleerde fabrieksomgeving en de aldus vervaardigde elementen te assembleren op de bouwplaats, maar ook om rechtstreeks te printen *in situ*. Hoewel de bestaande technologieën en materialen reeds tal van voordelen te bieden hebben, vertonen ze echter ook een aantal uitdagingen en beperkingen. Vanuit een marktperspectief lijken de bedrijven met elkaar te wedijveren om het extrusieproces van de materialen zo veel mogelijk te automatiseren teneinde de meest praktische, de meest betrouwbare of de goedkoopste bouwmethode te kunnen aanbieden. Daarnaast is het nodig om de toepassingen waarvoor 3D-betonprinting een echte toegevoegde waarde biedt ten opzichte van de traditionele methodes nog beter af te bakken (zie de hoofdstukken 4, p. 16, en 8, p. 50, voor enkele voorbeelden).

De mondiale markt van het 3D-betonprinten is gesegmenteerd in functie van het aanbod, de technologie en de eindgebruikers. De verhoogde investeringen in de onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten en de opkomst van nieuwe technologieën zijn de voornaamste groeifactoren voor de markt. Zo zijn er tal van bedrijven die investeren in het onderzoek naar en de ontwikkeling van meer gesofisticeerde 3D-printmachines die in staat zijn om grotere constructies te creëren. Het vermogen van de printsystemen om alsmaar geavanceerdere ontwerpen te realiseren en de toenemende bouwactiviteiten in opkomende economieën zoals China, zijn deels verantwoordelijk voor de groei van de mondiale markt voor het 3D-betonprinten. Daarnaast heeft de snelle toename van de verstedelijking geleid tot een sterkere interesse in 3D-printing voor de bouw van huizen. De marktspelers leveren een belangrijke bijdrage aan deze groei door hun toevlucht te nemen tot verschillende strategieën zoals partnerschappen, samenwerkingen, financiering en de lancering van nieuwe producten om concurrentieel te blijven. Het hoge prijskaartje dat verbonden is aan bepaalde 3D-printers, hun onderhoud en hun besturingssoftware en het gebrek aan geschoolde arbeidskrachten zijn daarentegen factoren die de groei van de mondiale markt van het 3D-betonprinten kunnen belemmeren. De beperking van de printoppervlaktes en printhoogtes is een ander nadeel dat zowel de marktgroei als de ontwikkeling van de technologie op wereldschaal in de weg staat.

Geografisch is de markt verdeeld tussen Noord-Amerika, Europa en Azië-het Stille Oceaan gebied. Deze laatste regio zal naar alle waarschijnlijkheid de snelste groei kennen op de mondiale markt van het 3D-betonprinten. De groeiende belangstelling van de overheden en regelgevende instanties voor 'groene' bouwactiviteiten in de opkomende economieën (India en China) en de snelle industrialisatie en verstedelijking zijn enkele van de belangrijkste factoren die bijdragen aan de groei van de markt van het 3D-betonprinten in dit deel van de wereld.

De gestage toename van de ervaring van de sector met computerondersteunde productie en het maken van digitale bouwmodellen (BIM) in het bijzonder heeft de evolutie van het 3D-printen vergemakkelijkt. Het geheel van pogingen en onderzoeksprojecten rond het 3D-printen van betonconstructies heeft het mogelijk gemaakt om talrijke technologische uitdagingen te overwinnen, het bijzondere potentieel ervan aan te tonen en een solide expertise op dit gebied op te bouwen. Om te kunnen overgaan tot het 3D-printen van mortel moet men kunnen beschikken over een geschikt materiaal, een 3D-printsysteem en specifieke *software*. Al deze aspecten zullen aan bod komen in het vervolg van dit document.

3. 3D-printprocedés in de bouwsector

Tot nu toe konden er al een aantal 3D-printprocedés gedemonstreerd worden, waaronder de *onsite*- en *offsite*productie van bouwelementen of volledige gebouwen, met behulp van industriële robots en portaalsystemen. Er bestaan verschillende 3D-printprocedés die gebruikt kunnen worden voor de bouw. De belangrijkste zijn:

- extrusie (zie § 3.1)
- poederverbinding of -verlijming (zie § 3.2, p. 13)
- additief lassen (zie § 3.3, p. 15).

Extrusie is het meest representatieve 3D-betonprintprocedé. Het additieve lassen kan dan weer goed van pas komen bij het produceren van wapening.

Ook de zogenoemde glijbekistingstechniek (*Slip Forming* of *Smart Dynamic Casting*) wordt soms opgenomen in de familie van 3D-betonprintingsprocedés. Bij dit geautomatiseerde proces wordt een dynamische bekisting continu verplaatst en opgevuld met beton tegen een snelheid die toelaat om het materiaal te vormen in zijn jonge uithardingsfase (bv. voor de productie van kolommen). In tegenstelling tot de andere 3D-printprocedés is de glijbekistingstechniek echter een continu proces dat niet gebaseerd is op de extrusie van lagen. Ze kan bijgevolg niet geclassificeerd worden als een 3D-extrusieprintprocedé.

Het 3D-betonprinten door laagsgewijze extrusie is de methode die het vaakst gebruikt wordt op de bouwplaats en maakt gebruik van grootschalige 3D-printers. In het vervolg van dit document (zie hoofdstuk 4, p. 16), zullen we nader ingaan op de techniek van het 3D-betonprinten door extrusie.

3.1 Extrusie

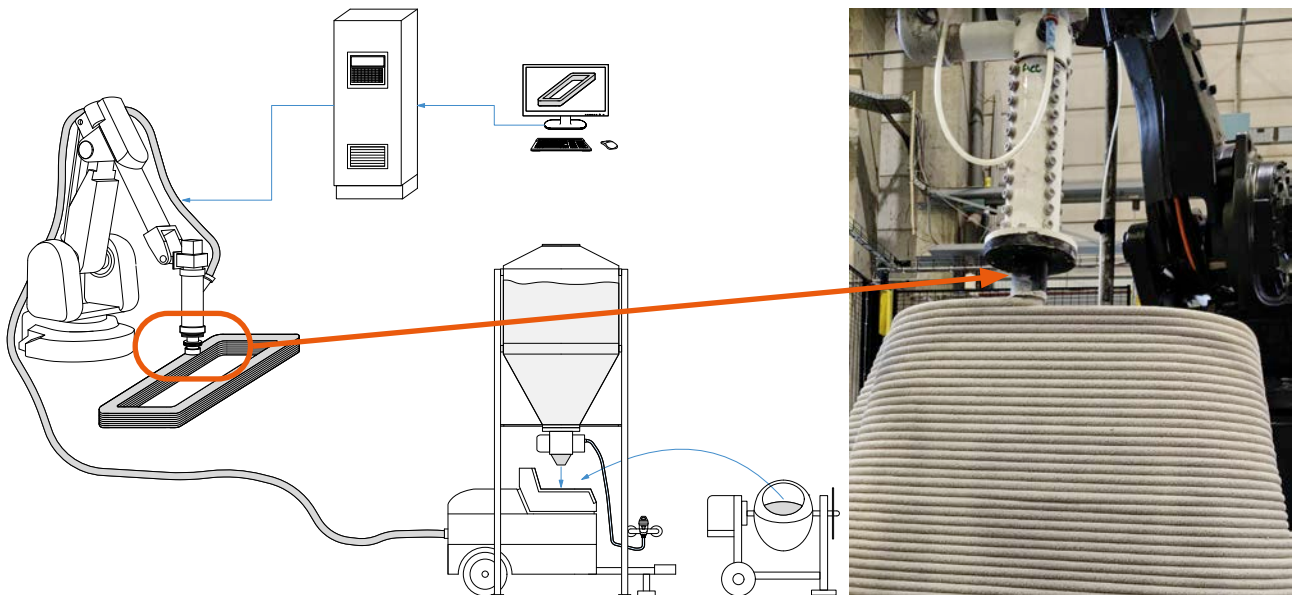
Het **extrusieprocedé** bestaat erin om een specie die bereid werd door vermenging door een buis te pompen en naar een printkop te sturen die aan zijn uiteinde voorzien is van een spuitmond (zie afbeelding 5 links, p. 12). Na het extruderen van het materiaal doorheen de spuitmond, worden de lagen op een printplatform opeengestapeld om het uiteindelijke object te vormen (zie afbeelding 5 rechts, p. 12). De lagen hebben gewoonlijk een dikte die begrepen is tussen 5 millimeter en enkele centimeters. De printkop kan in verschillende richtingen bewegen in functie van een 3D-model. Het afgewerkte (zij)oppervlak van het volgens het extrusieprocedé geprinte element is redelijk ruw als gevolg van het zichtbare lagenpatroon. De extrusiespuitmond kan uitgerust worden met een troffelachtig gereedschap dat de 3D-geprinte lagen afplat en de groeven aan het raakvlak tussen de lagen bedekt, wat resulteert in een glad oppervlak (zie ook § 5.4, p. 33). De kwaliteit van het geprinte object hangt zowel af van de reologische⁽¹⁾ en de thixotrope⁽²⁾ eigenschappen van het materiaal (verwerkbaarheid, consistentie enz.) als van de voorgeprogrammeerde parameters van de machine (printsnelheid, debiet, laagdikte, spuitmondvorm). Het materiaal moet gedurende alle printfasen over specifieke eigenschappen beschikken om het vloeien ervan tijdens het pompen te waarborgen enerzijds en de stabiliteit ervan na het deponeren te verzekeren anderzijds.

3D-extrusieprinten is de populairste vorm van additief bouwen, gelet op het feit dat dit procedé compatibel is met een uitgebreid gamma bouwmaterialen zoals mortel, klei enzovoorts. De materiaalverspilling die hierbij optreedt, kan sterk beperkt worden indien de **printbaarheid**⁽³⁾ ervan vooraf beproefd werd.

⁽¹⁾ Reologie is de studie van het vloeien (plasticiteit, elasticiteit, viscositeit en vloeibaarheid) van vervormbare materialen.

⁽²⁾ Thixotropie uit zich met name door een structurering (of vlokvorming) van de cementpasta wanneer het beton in rust is of langzaam vloeit (verhoging van de vloedrempel).

⁽³⁾ De printbaarheid van cementgebonden materialen omvat drie aspecten: de verpompbaarheid (verwerkbaarheid), de extrudeerbaarheid (het vermogen om verwerkt te worden door extrusie) en de bouwbaarheid (opeenstapeling van stabiele lagen).



Afb. 5 Principe van het 3D-extrusieprinten van beton (links) en opeenstapeling van de lagen door extrusie (rechts).

Er bestaan drie klassieke categorieën van 3D-extrusieprintmachines (zie ook hoofdstuk 7, p. 45):

- machines met een portaal (*Gantry-systemen*)
- machines met hendels
- machines met een robotarm.

De **machines met een portaal** zijn opgebouwd uit een printkop die bevestigd is aan een mobiel kader. Dit portaal verplaatst zich via rails volgens een Cartesiaans coördinatenstelsel (x-, y- en z-assen). Dit printertype wordt voornamelijk gebruikt voor grootschalige projecten (bv. kleine huizen) omwille van zijn afmetingen, zijn beperkte draagbaarheid en vooral de complexe montage en demontage ervan. Het laat toe om de elementen in delen of in hun geheel te printen. De **machines met hendels** zijn uitgerust met een printkop die opgehangen is aan kraanachtige hendels. Deze verplaatsen zich over het algemeen via zes assen (zes vrijheidsgraden). Hierdoor is het mogelijk om complexere vormen te printen en een betere oppervlakteafwerking te verkrijgen dan met een portaal. De **machines met een robotarm** ten slotte zijn voorzien van een printkop die bevestigd is aan het uiteinde van een robotarm die zich via zes assen verplaatst, waardoor de bewegingen van een menselijke arm nagebootst worden. Dergelijke printers zijn echter nog steeds duurder dan de machines met een portaal. Bepaalde bedrijven, zoals het Nederlandse Twente Additive Manufacturing (TAM), hebben een systeem met een portaal en een systeem met een robotarm gecombineerd om te komen tot een printer met negen assen (zes standaardassen en drie hef- en terugkeerassen voor het portaal) (zie afbeelding 6, p. 13).

Hoewel ze bepaalde overeenkomsten vertonen, zijn deze printers bedoeld voor verschillende specifieke toepassingen en hebben ze hun eigen sterke en zwakke punten, die beschreven worden in tabel 1. De robotarm vormt het belangrijkste verschilpunt, gelet op het feit dat deze over het algemeen moeilijk te programmeren is en slechts over een beperkt bereik beschikt (geringe printbare oppervlakte). Dit beperkt de toepassing ervan op de bouwplaats en impliceert dat deze technologie enkel gebruikt kan worden om unieke elementen te printen (die echter wel complexer en gedetailleerder zijn qua vorm). Aan de andere kant bieden dergelijke

Tabel 1 Vergelijking tussen de drie categorieën van 3D-extrusieprintmachines.

| | Met een portaal | Met hendels | Met een robotarm |
|-------------------------------------|---|--|--|
| Geprivilegieerde plaats van gebruik | <i>Onsite</i> (op de bouwplaats) | <i>Onsite</i> (op de bouwplaats) | <i>Offsite</i> (prefabricage of in het laboratorium) |
| Printbaar volume en toepassingen | Laat toe om een volledig gebouw <i>onsite</i> te printen, hoge productiviteit | Laat toe om kleine huizen met complexe vormen te printen | Bepaalde volumes (bereik van de robotarm), mogelijkheid om de printzone te vergroten (bv. robot op rails) Laat toe om unieke elementen met complexe vormen te printen, grote mobiliteit |



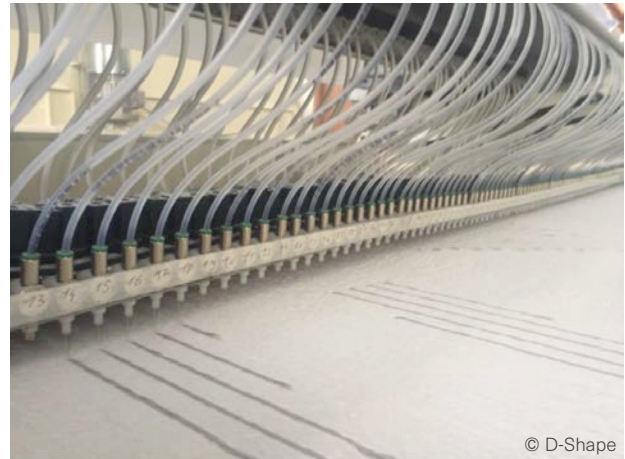
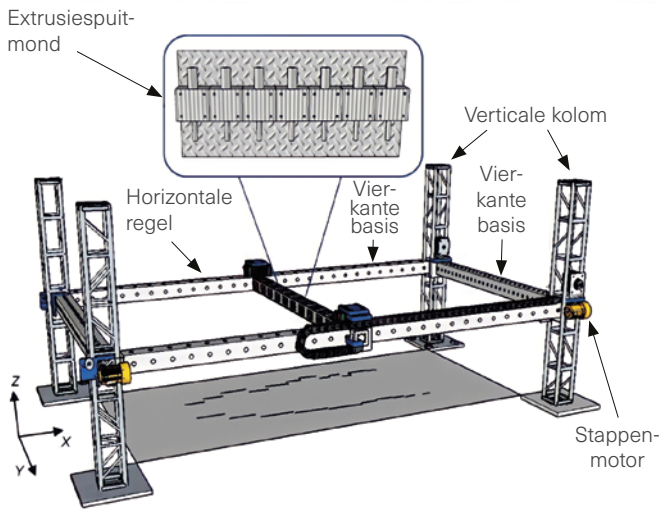
Afb. 6 Machine met een portaal (A), machine met hendels (B), machine met een robotarm met zes assen (C) en printer met negen assen met een op een portaal aangebrachte robotarm (D).

printers dankzij hun rails en wielen het voordeel dat ze mobieler zijn dan machines met een portaal. Ze zijn vooral geschikt voor de fabrieksmatige productie van elementen die eventueel geassembleerd kunnen worden vóór hun installatie op de bouwplaats. Machines met een portaal kunnen daarentegen grotere afstanden overbruggen, wat toelaat om grotere volumes zoals huizen met een beperkte oppervlakte *onsite* te printen.

Het op de markt beschikbare gamma aan 3D-extrusieprintmachines wordt in detail beschreven in hoofdstuk 7 (p. 45).

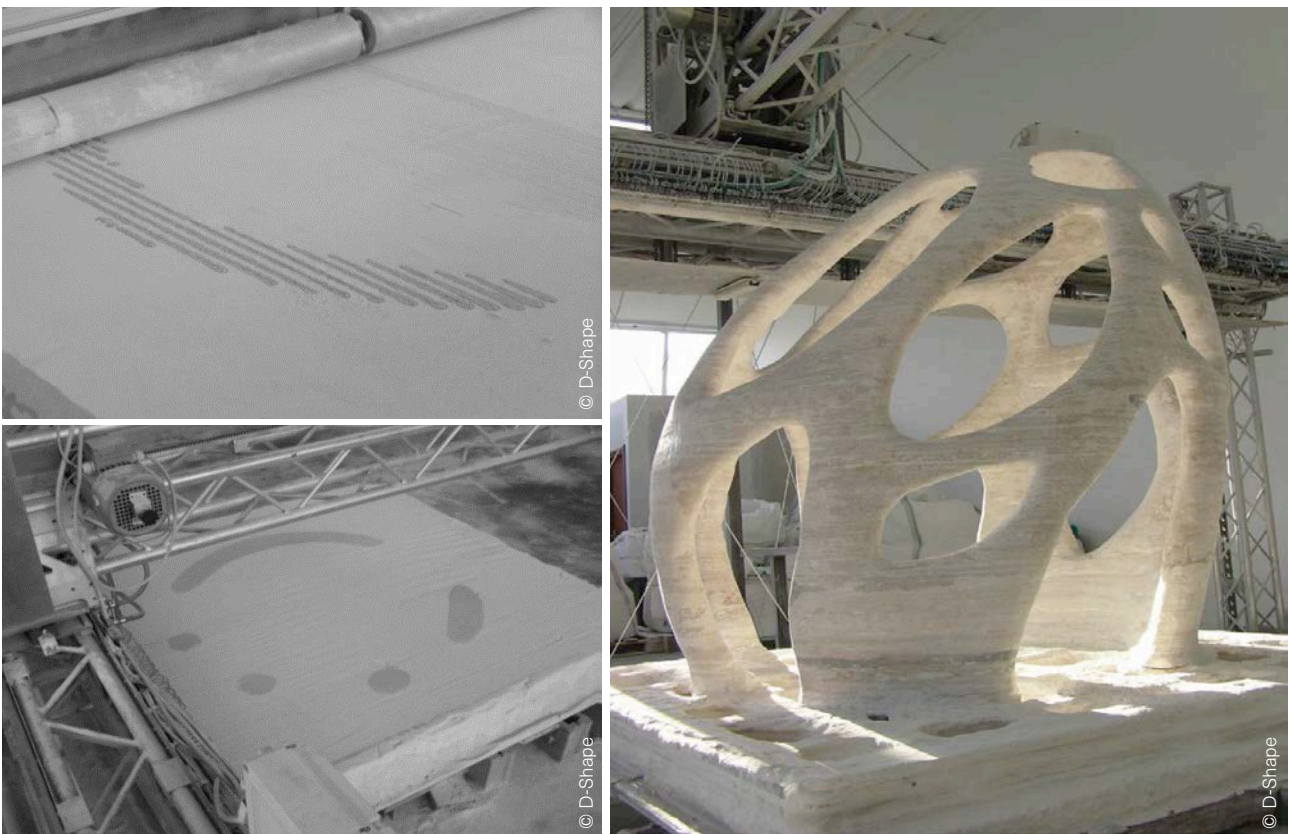
3.2 Poederverbinding of -verlijming

In Europa heeft de Italiaanse ingenieur Enrico Dini een procedé onthuld dat voortvloeit uit de ontwikkeling van een 3D-printer met een portaal in de vorm van een kubus met zijden van vier meter lang, genaamd *D-Shape*. Het kader is opgebouwd uit een vierkante basis die in verticale richting langs vier kolommen kan bewegen (zie afbeelding 7 links, p. 14).



Afb. 7 3D-printprocedé door poederverlijming met een *D-Shape*-printer (links) en printkop, samengesteld uit verschillende spuitmondjes (rechts).

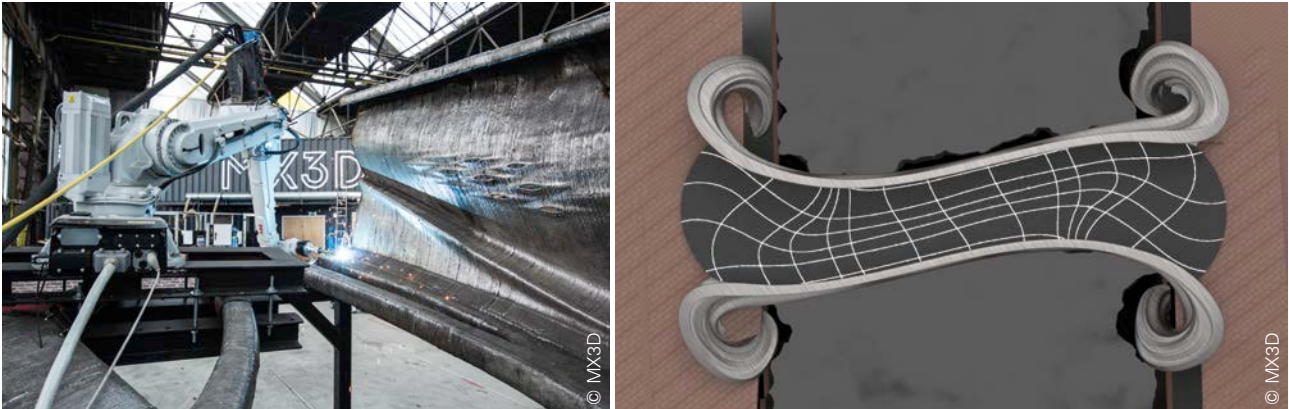
Het principe van de *D-Shape*-techniek berust op twee acties. De printer spreidt eerst een zandlaag met de gewenste dikte uit en injecteert hier vervolgens plaatselijk druppeltjes *Ink Binder*-bindmiddel in om het materiaal te doen verharden. Dit gebeurt met behulp van een printkop die samengesteld is uit honderden spuitmondjes (zie afbeelding 7 rechts, p. 14). Deze twee handelingen worden voor elke laag herhaald. Na afloop van het printen wordt de overmaat aan (ongebonden) zand verwijderd om de geprinte constructie te ontsluiten. Deze techniek werd aanvankelijk ontwikkeld om gebruikt te worden met een bindmiddelsysteem van het type epoxyhars. Vervolgens werd ze aangepast om toegepast te kunnen worden met anorganische bindmiddelen teneinde grotere volumes te kunnen printen. Afbeelding 8 stelt het Radiolaria-paviljoen voor dat in 2007 geprint werd met de *D-Shape*-techniek, met behulp van een industriële printer met een zijde van zes meter lang.



Afb. 8 Het Radiolaria-paviljoen dat gebouwd werd met de *D-Shape*-techniek.

3.3 Additief lassen

Bij de techniek van het **additieve lassen**, die ook bekend is onder de benaming WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*) en voornamelijk bedoeld is voor metalen elementen, wordt er als toevoegmetaal gebruikgemaakt van lasdraad. Dit procedé is gebaseerd op het vlambooglassen en leidt tot de productie van metalen elementen door verschillende lasnaden laagsgewijs open te stapelen. Hoewel het 3D-printen door additief lassen beperkt is tot constructies uit metaal, zou dit principe ook gebruikt kunnen worden om complexe, massieve constructies te realiseren. In afbeelding 9 is er een voorbeeld van een 3D-geprinte roestvrij stalen brug uit Amsterdam voorgesteld die uitgevoerd werd door de Nederlandse firma MX3D. Deze techniek wordt ook, zij het op beperktere schaal, gebruikt voor het printen van de wapening voor betonelementen.



Afb. 9 Fasen van het 3D-printprocedé van een stalen brug door middel van additief lassen.

4. Potentieel van het 3D-printen in de bouwsector

Uit verschillende 3D-extrusieprintprojecten is naar voren gekomen dat dit procedé een aantal voordelen te bieden heeft ten opzichte van de traditionele bouwmethodes. Uit contacten met de sector blijkt dat de acties van Buildwise de implementatie van automatisering en robotica faciliteren, zodanig dat de bedrijven kunnen profiteren van de potentiële winsten die voortvloeien uit deze technologieën. Sommige architecten tonen een sterke interesse in dit nieuwe bouwprocedé. 3D-printing opent immers nieuwe perspectieven en maakt het mogelijk om complexe vormen te creëren die zo goed als onmogelijk te produceren zijn met traditionele methodes.

Dit printprocedé heeft een hele reeks voordelen te bieden, waaronder:

- een snellere uitvoering
- de mogelijkheid om complexe vormen te creëren
- de potentiële beperking van de kosten en het afval
- arbeidsvriendelijkheid en de beperking van het risico op werkongevallen en menselijke fouten.

4.1 Snellere uitvoering en vrijheid van architecturaal ontwerp

Het bekende gezegde 'tijd is geld' is een argument dat op bouwplaatsen vaak aangehaald wordt. De snelheid van uitvoering is immers van groot belang voor de aannemer. In de context van 3D-printing bestaan er verschillende factoren die de bouwtermijnen kunnen verkorten: het gebruik van een snelbindende mortel die geen bekisting vereist, het continu printen en de uitvoering van extra werkzaamheden tijdens het printproces. De traditionele bouwmethodes vereisen een termijn van enkele dagen alvorens men kan starten met het ontkisten van de betonnen elementen. Door het achterwege laten van de bekisting kan men dus tijd winnen en de hiermee gepaard gaande kosten uitsparen. Deze laatste kunnen immers, naar gelang van de complexiteit van het project, zo'n 25 tot 75 % van de totale kostprijs van het betonnen bouwwerk vertegenwoordigen. Bovendien kunnen de elementen met een 3D-printer continu vervaardigd worden, waardoor de wachttijden verkorten, zelfs al varieert de printsnelheid (verplaatsingssnelheid van de printkop) in functie van de machine (zie hoofdstuk 7, p. 45). De bouwtermijnen kunnen eveneens ingekort worden dankzij de extra werkzaamheden die uitgevoerd kunnen worden tijdens het printen, zoals het leggen en isoleren van leidingen, het plaatsen van contactdozen enzovoorts. Normaalgesproken vinden deze werken pas plaats na de voltooiing van de ruwbouw. 3D-printen laat dus toe om tijd te besparen, een besparing die des te groter wordt wanneer men vergelijkt met de traditionele methode in plaats van met een fabrieksmatige prefabricage.

De snelheid van uitvoering die bekomen wordt met 3D-printers werd bevestigd door meerdere concrete demonstratieprojecten uit verschillende landen. Zo werd er bij Kamp C (België) in drie weken tijd een huis met twee verdiepingen en een oppervlakte van 90 m² opgetrokken met behulp van 3D-printing (zie afbeelding 10, p. 17). Voorlopig handelt het zich bij dit project echter louter om een prototype. Sommige persartikelen maken melding van huizen die in slechts 24 uur opgetrokken zouden zijn, maar deze termijn is niet altijd representatief voor de realiteit en houdt doorgaans geen rekening met de funderingen, het buitenschrijnwerk, de loodgieterswerken ...

Bij de traditionele bouwmethodes is de keuze voor een bekisting onder meer afhankelijk van het bouwwerk en zijn gebruik, van de complexiteit van de uit te voeren vorm en van de graad van hergebruik. Bij het vormgeven van het beton dient men in de mate van het mogelijke te vermijden dat er hiervoor een complexe, dure en niet-herbruikbare bekisting nodig is. Dergelijke bekistingen op maat zijn immers vaak verre van rendabel voor de industrie. Dit neemt niet weg dat architecten tegenwoordig dikwijls de neiging hebben om beton met onverwachte vormen te creëren teneinde constructies met perceptieve effecten te verkrijgen. Dit kan evenwel gepaard gaan met grote uitvoeringsmoeilijkheden. Om dit probleem te verhelpen, werden er diverse initiatieven op poten gezet, zoals het gebruik van textielbekistingen om betonelementen met complexe vormen te verkrijgen.



Afb.10 Huis met twee verdiepingen dat geprint werd bij Kamp C in Westerlo.

Hoewel dergelijke bekistingen veel architecturale mogelijkheden bieden, zijn de vormen die ermee gerealiseerd kunnen worden eerder beperkt. Dankzij 3D-printing is het tegenwoordig mogelijk om complexe elementen uit te voeren zonder gebruik te hoeven maken van een bekisting. Dit is een enorm voordeel voor ontwerpers en architecten die ongebruikelijke, innovatieve geometrieën zoals organische vormen in hun projecten willen integreren. Bij wijze van voorbeeld is er in afbeelding 11 een kolom met een complexe vorm voorgesteld. Deze vier meter hoge kolom werd geprint door het Franse bedrijf XtreeE om de nieuwe luifel van een klein tertiair gebouw in Aix-en-Provence (Frankrijk) te ondersteunen. Om deze kolom te kunnen realiseren, werd er een verloren bekisting 3D-geprint die vervolgens gevuld werd met vezelversterkt ultrahogesterktebeton (UHSB).

Het 3D-printen van (holle) stadsmeubilair-elementen kan het productieproces door vormgieten vervangen. De Belgische firma Urbastyle, die gespecialiseerd is in dit domein, heeft een nieuw gamma 3D-geprinte banken op de markt gebracht (zie afbeelding 12). 3D-betonprinting laat bijgevolg niet alleen toe om tijd te winnen bij het optrekken van woningen, maar ook voor de productie van allerlei andere niet-lineaire elementen.



© Métropole d'Aix Marseille, Territoire du Pays d'Aix, Marc Dalibard, EZCT Architecture & Design Research (Philippe Morel en Felix Agid), XtreeE, Artelia, Fehr Architectural, LafargeHolcim, AD Concept, Lisa Ricciotti.

Afb. 11 Door het bedrijf XtreeE 3D-geprinte kolom.



Afb.12 Bank die gedeeltelijk geprint werd door de firma Urbastyle.

4.2 Economische impact

In bepaalde gevallen biedt 3D-printen de mogelijkheid om goedkoper te bouwen dan met traditionele methodes. Deze kostenbesparingen vloeien niet alleen voort uit het wegvallen van de bekistingskosten en de transportkosten tussen het productiecentrum en het logistieke centrum indien er *onsite* geprint wordt (bv. printen op de schaal van een huis), maar ook uit de beperking van de gebruikte materiaalhoeveelheid dankzij het geoptimaliseerde ontwerp (zie § 4.3, p. 20) en de besparing op het aantal arbeidskrachten. In tegenstelling tot de traditionele methodes die berusten op het gebruik van een bekisting en meer werkrachten vereisen, is er bij 3D-printing geen bekisting nodig, wat toelaat om te besparen op de mankrachten en de kostprijs voor de gebruikte materialen te beperken. De initiële investeringskosten blijven daarentegen hoog (zie § 5.1, p. 24).

Zoals geportretteerd in een aantal persberichten, werden er inconsistenties vastgesteld op het vlak van de bouwkosten van 3D-geprinte huizen. Aangezien de huizen die met dit procedé opgetrokken worden zich nog in de experimentele fase bevinden, is het moeilijk om sluitende cijfers te verkrijgen over de totale kostprijs ervan. Deze varieert naar gelang van de gebruikte grondstoffen, de complexiteit van het ontwerp, de printtermijn, het land of zelfs de regio waar het project zich bevindt, het type printer enzovoorts. Er werden verschillende projecten met geprinte woningen onderzocht om een schatting te kunnen maken van hun gemiddelde kostprijs. In bepaalde gevallen werd er in de vermelde prijs geen rekening gehouden met de prijs van de funderingen, het dak, de binnen- en buitenafwerkingen, de isolatie van de muren, het buitenschrijnwerk, het verlaagde plafond of de vloer van de woning.

Het huis dat in de Verenigde Staten 3D-geprint werd door de firma SQ4D werd naar verluidt verkocht aan de helft van de prijs van de nieuwe woningen die in dezelfde regio op traditionele wijze opgetrokken werden (zie afbeelding 13). Het volledige skelet van het huis en ook een deel van het meubilair werden 3D-geprint.

In de wijk Meerhoven te Eindhoven (Nederland) is er het Milestone-project, dat gesteund wordt door de gemeente en verschillende academische en industriële partners. Het gaat hier om een sociaal woningbouw-



Afb. 13 Het huis dat 3D-geprint werd door de firma SQ4D.



Afb. 14 De vijf huizen van het Milestone-project.

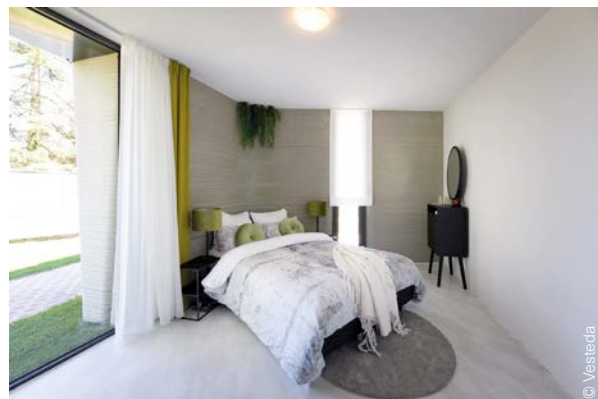
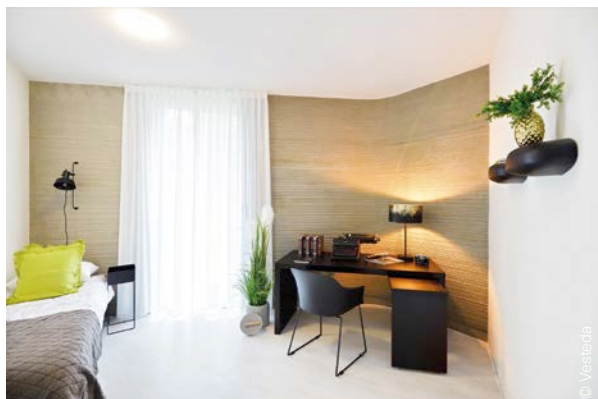
project dat bestaat uit vijf huizen met verschillende vormen die bestemd zijn om opgetrokken te worden door 3D-printing (zie afbeelding 14, p. 18).

Het eerste (en ook eenvoudigste) huis met een oppervlakte van 95 m² is reeds gebouwd en wordt sinds april 2021 verhuurd (zie afbeelding 15). De muren werden aan de Technische Universiteit Eindhoven (Nederland) geprint met een kringloopbeton, waarna ze geassembleerd en op de funderingen geplaatst werden. Vervolgens werden het dak, het timmerwerk en de afwerkingen uitgevoerd. De totale kostprijs van de constructie werd nog niet vrijgegeven.

Het Italiaanse bedrijf WASP (*World's Advanced Saving Project*) heeft van zijn kant een ecologisch huis – Gaïa genaamd – geprint, met behulp van lokale materialen en de nieuwe *Crane WASP*-technologie (zie ook § 4.3, p. 20), waardoor het mogelijk was om de bouwkosten aanzienlijk te verlagen (zie afbeelding 16, p. 20). Het printen nam tien dagen in beslag en de totale kostprijs van de grondstoffen voor de muren zou 900 € bedragen.



Afb. 15 Het in het kader van het Milestone-project geprinte en verhuurde huis.





Afb. 16 Het Gaïa-huis dat geprint werd door de *Crane WASP*.

Uiteindelijk tonen deze verschillende scenario's aan dat de 3D-printtechnologie nog in haar kinderschoenen staat, wat verklaart waarom de kosten voor het 3D-printen van een element nog steeds vrij hoog zijn. Ondanks het bestaan van verschillende prototypes, zijn er voornamelijk maar weinig 3D-geprinte huizen op de markt. Bovendien lijkt het nog steeds moeilijk om de kostprijs van 3D-geprinte woningen te vergelijken met deze van woningen die volgens een traditionele methode opgetrokken werden. Bij het merendeel van de totnogtoe 3D-geprinte woningen werd er immers geen gebruikgemaakt van beton zoals bouwtechnisch gedefinieerd (bv. in de norm NBN EN 206 [B8]), maar wel van mortels (granulaten met een maximale korrelafmeting van ongeveer vier millimeter) met een hoog cementgehalte (doorgaans zo'n 500 tot 800 kg/m³). Tot op heden werd er geen enkel 3D-printproject uitgevoerd met een traditioneel beton. Met dit materiaal zouden er aanzienlijke besparingen gerealiseerd kunnen worden ten opzichte van stortklare mortels. Ook het gebrek aan regelgeving en normen voor 3D-geprinte huizen staat de toepassing van dit procedé in de sector voornamelijk in de weg. Gelet op het groeiende aantal bedrijven dat de stap naar 3D-printing zet en de grootschalige industrialisatie van dit procedé, zouden de prijzen op termijn echter kunnen beginnen te dalen.

4.3 Ecologische impact

Beton is het meest gebruikte gefabriceerde materiaal ter wereld. Het is daarom essentieel om het op de meest geschikte manier aan te wenden, afhankelijk van de behoeften. De exacte hoeveelheid materiaal die nodig is om een complex element te ontwerpen, zou beter ingeschat en beheerst kunnen worden met 3D-printen. Bij een klassieke prefabricage is het eveneens mogelijk om de vormen te optimaliseren, maar dit vereist de productie van complexe bekistingen. In dit geval zou er een materiaalbesparing behaald kunnen worden door een ideale verdeling van het materiaal binnen het volume, met minder afval tot gevolg. Dit voordeel zou versterkt kunnen worden door zijn toevlucht te nemen tot een digitale methode die aangeduid wordt als **topologie-optimalisatie**. Bij deze methode wordt er gebruikgemaakt van een optimalisatie*software* die de zones met lage en hoge spanningen identificeert door een 3D-model te creëren waarop de belastingen toegepast worden. Zodoende kan de gebruiker de delen selecteren die essentieel zijn en de overbodige delen verwijderen teneinde te besparen op de hoeveelheid te gebruiken materiaal. Voor organische en complexe vormen kan de topologie-optimalisatie een aanzienlijke impact hebben op de kostprijs van het element en op de productietermijn. Ze laat tevens toe om geoptimaliseerde vormen te printen met een betere geometrische beheersing en dit, terwijl de gebruikte materiaalhoeveelheid beperkt kan worden.

Er zijn een aantal voorbeelden van 3D-geprinte realisaties in de media verschenen die het potentieel van topologie-optimalisatie bij het 3D-bouwen in de verf zetten, waaronder de kolom, geprint door XtreeE (zie afbeelding 11, p. 17) en de voetgangersbrug, geprint door de Nederlandse firma Vertico, in samenwerking met de Universiteit Gent (zie afbeelding 17, p. 21). In dit laatste geval hebben de twee partners bij het ontwerp van de voetgangersbrug gebruikgemaakt van topologie-optimalisatie om de hoeveelheid overbodig materiaal te beperken. Bij deze twee realisaties hebben de ontwerpers een verloren bekisting 3D-geprint die vervolgens gevuld werd met een vezelversterkt ultrahogesterktebeton (UHSB) (kolom) en een zelfverdichtend beton⁽⁴⁾ (voetgangersbrug).

Hoewel 3D-betonprinten een technologie is die vaak als materiaalzuinig omschreven wordt, is het belangrijk te benadrukken dat er een zeker materiaalverlies optreedt bij de bepaling van de optimale printparameters

⁽⁴⁾ Ultravloeibaar beton dat zijn plaats inneemt louter onder invloed van de zwaartekracht en zonder verdichting.



Afb. 17 Resultaten van de topologie-optimalisatie op een gelijkmatig belaste balk met een enkele overspanning (boven, [O1]) en 3D-printing van de geoptimaliseerde voetgangersbrug (onder).

(vloei-debiet, printsnelheid, wachttijd tussen de lagen), vooral in de fase van het eerste gebruik van de machine. Deze parameters zijn in hoofdzaak afhankelijk van de reologische karakteristieken van de materialen en het volume van het te printen element.

Het is niet alleen mogelijk om de milieu-impact te verminderen door de materiaalhoeveelheid te beperken, maar ook door zijn toevlucht te nemen tot milieuvriendelijkere materialen. Volgens de GCCA (*Global Cement and Concrete Association*) is de productie van cement – het meest gebruikte bouwmaterial – een zeer vervuilende activiteit die goed is voor ongeveer 7% van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen. Bij het merendeel van de 3D-printprojecten wordt er gebruikgemaakt van (Portland)cementrijke mortels die een grotere koolstofvoetafdruk hebben dan een gewoon beton. Er is namelijk een grote hoeveelheid snelbindend cement nodig om de lagen te kunnen opeenstapelen (zie § 6.1, p. 37). Het verminderen van de hoeveelheid Portlandcement in de printbare mengsels vormt tegenwoordig dé prioriteit om het 3D-bouwen milieuvriendelijker te maken. Er zijn vandaag de dag een aantal initiatieven aan de gang waarbij er gestreefd wordt naar de ontwikkeling van printbare mengsels op basis van lokale grondstoffen of zelfs industriële bijproducten teneinde de milieu-impact van het 3D-printen te verminderen zonder afbreuk te doen aan de kwaliteit van de geprinte elementen.

De koolstofvoetafdruk van het snelbindende cement, dat vaak gebruikt wordt bij het 3D-printen, kan bijvoorbeeld verkleind worden door zijn toevlucht te nemen tot alternatieve bindmiddelen met een lagere milieu-impact, zoals alkali-geactiveerde materialen of andere cementerende industriële bijproducten. De *start-up* Renca, die deel uitmaakt van het samenwerkingsprogramma *Dubai Future Accelerators*, heeft bijvoorbeeld *Geopolymer 3D ink* op de markt gebracht, een 3D-printmateriaal, gemaakt op basis van industriële reststromen. We willen erop wijzen dat alkali-geactiveerde materialen, waaronder geopolymeren, een zeer diverse groep van bindmiddelen met sterk uiteenlopende milieu-impactindicatoren vormen.

Daarnaast werden er een aantal initiatieven op poten gezet rond ecologisch en recycleerbaar additief bouwen om het hoofd te kunnen bieden aan de schaarste aan natuurlijke grondstoffen. Zo werd er in het kader van het Europese CIRMAP-project door verschillende partners, waaronder de Universiteit van Luik, onderzoek gevoerd met het oog op de valorisatie van gerecycleerd zand, afkomstig uit gesloopte gebouwen, door het te integreren in de samenstelling van printbare mortels (zie afbeelding 18, p. 22). CIRMAP bouwt voort op enkele coöperatieve onderzoeksprojecten, met name de projecten SeRaMCo (Interreg North-West Europe) en MATRICE (FEDER, Hauts de France).

3D-printing opent dan ook nieuwe perspectieven voor het gebruik van lokale natuurlijke materialen. In het kader van het ecowoningproject TECLA van het architectenbureau Mario Cucinella Architects en het Italiaanse bedrijf WASP werden er een aantal koepelvormige constructies (bv. eengezinswoningen) geprint met behulp van lokale, goedkope en gerecycleerde materialen (zie afbeelding 19, p. 22). De bedoeling van WASP is om duurzame woningen op te trekken dankzij additieve productie. Hiertoe heeft het Italiaanse bedrijf een

bijzondere printer, de *Crane WASP*, ontwikkeld, die werkt op zonne-energie, windenergie of hydraulische energie. Op deze manier zouden ook de regio's die zwaarder getroffen worden door elektriciteitstekorten milieuvriendelijke constructies kunnen optrekken met lokale grondstoffen. Uit dit project (en vele andere) komt duidelijk naar voren dat deze techniek zich goed leent voor het gebruik van alternatieve materialen (bv. klei), die in overvloed beschikbaar zijn op de plaats van printen (zie § 6.1, p. 37).



Afb. 18 Printen van een mortel op basis van gerecycleerd Belgisch zand, aangeleverd door het recyclegecentreum voor inert afval RECYMEX (proef uitgevoerd bij Buildwise in samenwerking met de Universiteit van Luik).



Afb. 19 Koepels die geprint werden met ruwe aarde in het kader van het TECLA-project.

4.4 Beperking van de risico's en de menselijke fouten op de bouwplaats

De bouw is één van de meest risicovolle activiteitensectoren. Bouwplaatswerkzaamheden staan bekend om hun arbeidsonvriendelijkheid en om de ongelukken die er gebeuren. De arbeidsomstandigheden en het thema risicopreventie stonden centraal in de ergonomische studies en interventies die gevoerd werden in het kader van diverse bouwplaatsen en openbare werken. In 2021 werden er in de Belgische bouwsector niet minder dan 8.300 werkongevallen die gepaard gingen met minstens één dag werkonbekwaamheid opgetekend.

De vermindering van de menselijke tussenkomsten en van de tijd die doorgebracht wordt op de bouwplaats dankzij geprogrammeerd en geautomatiseerd bouwen, laat toe om het zware karakter van de werken en de hiermee gepaard gaande risico's te beperken. Hoewel er menselijke tussenkomsten nodig zijn om de machine te installeren, te voeden, te besturen en te programmeren enerzijds en om de voortgang van de verschillende printfasen te controleren anderzijds, is het 3D-printproces volledig geautomatiseerd en vereist het merendeel van de handelingen geen menselijke ingrepen. De automatisering van de bouw van betonconstructies zou het mogelijk moeten kunnen maken om het aantal arbeidskrachten en de arbeidsonvriendelijkheid te beperken

en dit, zowel voor wat het 3D-printen als het dragen van zware lasten betreft. Om geautomatiseerd te kunnen bouwen is er digitale, gestandaardiseerde, nauwkeurige en volledige gebouwinformatie vereist. 3D-printing is bijgevolg preciezer en gaat gepaard met een kleiner risico op menselijke fouten.

Er werd echter ook reeds bezorgdheid geuit, met name over de vervanging van geschoolde bouwvakkers door robots en het massale banenverlies dat hieruit zou voortvloeien. De robots zouden evenwel voornamelijk gebruikt moeten worden voor de uitvoering van gevaarlijke en zware taken, zoals het geval is bij 3D-extrusie-printen. Verder spreekt het voor zich dat het 3D-bouwen zal leiden tot de creatie van nieuwe functies, gelet op de specifieke competenties die vereist zijn voor het besturen, programmeren en onderhouden van de 3D-printers. Het is dus niet de bedoeling om geschoolde werknemers te vervangen, maar veeleer om ze te heroriënteren, rekening houdend met de vereiste competenties. Het printstelsel (mengen, pompen en printen door de robot) moet gecontroleerd en bewaakt worden om zich te vergewissen van het correcte verloop van de taken en het goede gedrag van het materiaal. Deze nieuwe functies moeten de bouwprofessionelen dus in staat stellen om hun competenties uit te breiden, terwijl de bouwbedrijven hun activiteiten kunnen diversifiëren.

Kort samengevat lijkt het tegenwoordig mogelijk te zijn om (kleine) woningen, stadsmeubilair of voetgangersbruggen te printen. Eén van de grote voordelen van 3D-printen ligt in de vrijheid van ontwerp die erdoor geboden wordt. Dankzij dit procedé beginnen complexe vormen, die niet uitgevoerd konden worden met de traditionele methodes, tot de mogelijkheden te behoren. Een goede beheersing van de 3D-printtechniek en van de topologie-optimalisatie zou moeten toelaten om de hoeveelheid afval, het materiaalgebruik en de bouwkosten te drukken. De toepassing van 3D-printing zou eveneens het risico op werkongevallen kunnen verminderen. Tot op heden wordt er in het merendeel van de 3D-printprojecten gebruikgemaakt van mortel met een hoog gehalte Portlandcement. Dit hoge gehalte aan snelbindend cement zorgt niet alleen voor een toename van de koolstofvoetafdruk van de printbare mengsels, maar werkt ook het verschijnen van krimp-scheuren in de hand, wat op zijn beurt kan leiden tot een vermindering van de duurzaamheidsprestaties van de geprinte elementen. Het gebruik van andere, duurzamere materialen, gefabriceerd op basis van industrieel afval of gerecycleerd beton, is een prioriteit voor printbare mengsels. Ondanks de vele voordelen van 3D-printen vormt dit bouwprocedé nog steeds een ware uitdaging voor de sector en roept het veel vragen op.

5. Uitdagingen die gepaard gaan met de implementatie van het 3D-printen in de bouw

Gemotiveerd door de flexibiliteit die deze techniek te bieden heeft in vergelijking met de conventionele methodes, wordt er in de bouwsector almaar meer gebruikgemaakt van 3D-printen. Er zijn echter nog een aantal obstakels en uitdagingen die deze keuze in de weg staan. De initiële investering, de installatie op de bouwplaats, de ontwikkeling van printbare mengsels (zie hoofdstuk 6, p. 37), de structurele wapening, de oppervlakteafwerking, de klimatologische omstandigheden en het gebrek aan regels en voorschriften zijn slechts enkele voorbeelden.

5.1 Hoge initiële investering

Hoewel het met 3D-printen mogelijk is om te besparen op de productiekosten van bepaalde elementen, vergt deze techniek wel een aanzienlijke investering, met name in machines, verbruiksgoederen, *software* en soms ook nabehandeling. Van alle factoren die de kostprijs van het 3D-bouwen beïnvloeden, vertegenwoordigt de printer de grootste initiële investering. Hoewel deze investering op middellange termijn gerendabiliseerd kan worden, blijft het hier wel gaan om een aanzienlijk bedrag. In het geval van 3D-printing kan de rendabiliteitsberekening nog verfijnd worden in functie van factoren zoals de materiaalhoeveelheid en de esthetische meerwaarde. Ook de beoogde markt heeft een rol te spelen, aangezien het 3D-printprocedé vooralsnog niet gebruikt wordt voor het printen van gebouwen met meerdere verdiepingen. Het vormt echter wel een aantrekkelijk alternatief voor traditionele methodes in een aantal nichetoepassingen zoals de uitvoering van elementen met complexe vormen.

De prijzen voor de printers blijven zeer variabel, afhankelijk van factoren zoals het printvolume, de precisie, de prestaties enzovoorts. De bodemprijs van een grootschalige printer ligt over het algemeen rond de 75.000 € en kan oplopen tot enkele miljoenen euro's (voor het gamma op de markt beschikbare machines, verwijzen we naar hoofdstuk 7, p. 45). De prijs van een printer wordt bovendien ook beïnvloed door zijn compatibiliteit met de materialen. Bepaalde machines zijn immers enkel verenigbaar met materialen met specifieke eigenschappen die ontwikkeld werden door de producent van de printer. De printer vertegenwoordigt overigens niet de enige kostenpost op het gebied van de machines. Het printstelsel vergt immers ook een menger en een pomp om de materialen tot aan de printmachine te voeren, wat goed kan zijn voor enkele tienduizenden euro's. Aan het onderhoud van al deze machines hangt evenzeer een kostenplaatje vast, dat kan oplopen tot enkele (tien)duizenden euro's per jaar. Aanhoudende, *softwarematige* opleidingen en vergoedingen van gespecialiseerde productie-operatoren zijn andere voorbeelden van kosten die de initiële factuur kunnen verhogen.

Elk 3D-geprint element is gebaseerd op een model dat gecreëerd werd met een *modellersoftware*. Beginnende aannemers kunnen hiertoe een breed scala aan gratis *tools* gebruiken, waaronder *opensourcesoftware*, die voortdurend geüpdatet en verbeterd wordt (3D-modeller- en *slicingsoftware*, zie hoofdstuk 1, p. 7). Alvorens men overgaat tot de aankoop van een printer is het ten stelligste aanbevolen na te gaan welke bestanden met de verschillende printmachines verenigbaar zijn. De te kiezen *software* is eveneens afhankelijk van de complexiteit van het te printen element. Er bestaan bovendien tal van platformen waarop men gratis verschillende reeds ontwikkelde modellen kan downloaden. Na de installatie van het model zal er steeds een *slicingsoftware* nodig zijn om te kunnen starten met printen. Elke modeller- en *slicingsoftware* heeft zijn eigen bijzonderheden en specificiteiten. De betalende *softwares* bieden doorgaans bijkomende functionaliteiten zoals de precieze regeling van de spuitmonden (*extruders*) en voorafgaandelijke printsimulaties teneinde de zwakke punten te identificeren die zouden kunnen leiden tot het falen van het proces. Indien de gebruiker opteert voor dergelijke betalende *tools*, dan kan de prijs voor de jaarabonnementen oplopen tot meerdere duizenden euro's. Men kan ook zijn toevlucht nemen tot andere, optionele *tools*, zoals topologie-optimalisatiesoftware die toelaat om materiaal te besparen (zie § 4.3, p. 20) en *software* voor *workflow* automatisering die toelaat om informatie te versturen en acties binnen een bepaald tijdsbestek uit te voeren. Dergelijke *tools* zijn bijzonder duur.

Naast de machines zorgen ook de 3D-bouwmaterialen ervoor dat de kosten sterk kunnen oplopen, vooral indien het gaat om printbare mengsels op basis van Portlandcement. Er zijn ook printklare mengsels op de markt, waaronder deze die aangeboden worden door fabrikanten zoals Weber, Vicat, Sika en Cantillana. Hoewel ze over het algemeen duurder zijn dan mengsels, ontwikkeld op basis van lokale grondstoffen, laten ze in principe toe te waarborgen dat het product compatibel is met de meeste machines en dat de geprinte elementen de gewenste mechanische eigenschappen vertonen.

De prijs van de printsystemen en de technische expertise die nodig is om ze te implementeren, kunnen het gebruik ervan in de bouwsector beperken. 3D-bouwen kan echter wel een aanzienlijke toegevoegde waarde bieden, wat de hogere initiële investeringskosten in vergelijking met de traditionele bouwmethodes rechtvaardigt.

5.2 Gedeeltelijk geautomatiseerde constructie

Hoewel 3D-printers toelaten om de termijnen te verkorten en het materiaalverbruik te verminderen, is het hiermee enkel mogelijk om woningen met een beperkte oppervlakte te printen. Bovendien zijn de machines vooralsnog niet in staat om alle wonelementen te printen. De technologie biedt dus slechts een gedeeltelijk antwoord op de automatisering van de keten, aangezien het 3D-printen zich doorgaans beperkt tot de ruwbouw en soms ook tot een deel van de isolatie en het meubilair. De andere elementen zoals het dak, de afwerkingen (vloerbedekkingen, verf ...), het binnen- en buitenschrijnwerk, de loodgieterij, de elektriciteit of de wapeningsstaven worden afzonderlijk geïnstalleerd, ofwel door het printproces te onderbreken, ofwel na het printen van de ruwbouw. Tijdens het ontwerp kunnen er meerdere elementen in beschouwing genomen worden om bepaalde technieken te vergemakkelijken. Een geprinte spouwmuur vereist bijvoorbeeld minder materialen en laat toe om de isolatie en de waterleidingen in te bouwen. Bovendien kan de printkop specifiek aangepast worden om het beton automatisch te wapenen (zie ook § 5.3.1, p. 26).

Op termijn hopen de onderzoekers en ontwerpers het 3D-printen uit te breiden naar andere bouwelementen, zelfs indien er hiervoor nog meer onderzoek en ontwikkeling nodig is.

In het kader van zijn evolutie heeft het Franse bedrijf ERB een huisconcept ontwikkeld dat in de eerste plaats een collaboratief innovatieproject is, gevoerd door meer dan 20 partners (kmo's en *start-ups* uit de Franse regio Pays de la Loire) die erop gebrand zijn om digitalisering te gebruiken in elke fase van het bouwproces (van *augmented reality* tot bouwen met 3D-printing). Het geheel van technieken en materialen werd geselecteerd op basis van een uiterst precies bestek dat zowel parameters uit de circulaire economie als energie- en milieuprestatiegerelateerde parameters omvat. In plaats van de isolatie te integreren in een element uit 3D-geprinte mortel, worden er twee wanden uit gerecycleerd polyurethaanschuim geprint, waartussen het beton gestaag gestort wordt naarmate het printen vordert. De idee is om te komen tot verloren isolerende bekistingen. Het schuim doet dus dienst als mal en als thermische isolatie langs de binnen- en de buitenzijde. Aan de hand van deze methode werd er in het Franse Beaucauzé een eengezinswoning opgetrokken die de naam Empreinte kreeg (zie afbeelding 20).



Afb. 20 Twee 3D-geprinte wanden uit polyurethaanschuim waartussen het beton gestort wordt (links) en de woning Empreinte (rechts).

De Zweedse firma BLB Industries heeft een machine ontwikkeld die toelaat om deuren en vensterstijlen met een hoogte van 2,5 meter en een breedte van 1,5 meter te printen op basis van polymeer- of harskorrels. Dit project en de andere initiatieven vormen belangrijke mijlpalen op weg naar de meer veralgemeende automatisering van het bouwproces.

5.3 Structurele wapening

Gelet op het feit dat de plaatsing van wapeningen maar moeilijk geïntegreerd kan worden in het 3D-print-procedé, geniet het gebruik van gewelfde vormen de voorkeur teneinde de trekbelastingen te beperken. Daar waar niet-gewapend beton in staat is om aanzienlijke drukbelastingen op te nemen, is het daarentegen veel zwakker wanneer het onderhevig is aan trekbelastingen (spanningen of buigingen). Het is tot op heden nog niet mogelijk om uitkragende elementen zoals vloeren te printen. Daarom is het 3D-printen vooralsnog beperkt tot kleine constructies zoals paviljoenen of muren.

Om het 3D-printen op grotere schaal in de praktijk te kunnen toepassen, moet het geprinte element gewapend worden om zijn treksterkte te verbeteren en het de juiste mechanische eigenschappen te verlenen. In tegenstelling tot bij de traditionele wapeningsmethodes (bv. beton dat in en rond stalen wapeningskooien gestort wordt), is er voor het wapenen van 3D-geprinte mortel een flexibele en uiterst controleerbare techniek vereist.

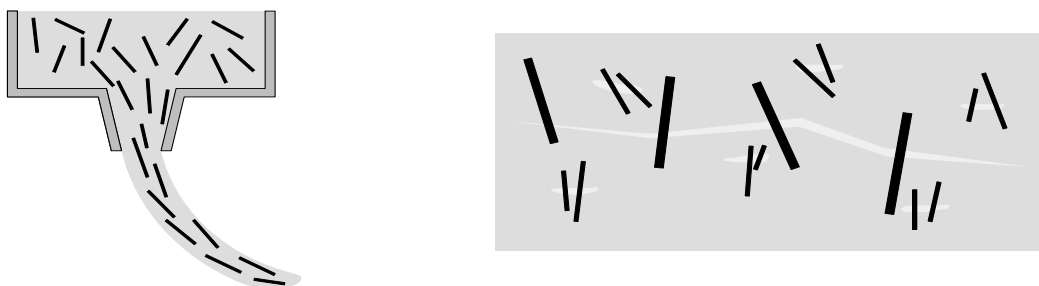
Recentelijk werd er onderzoek gevoerd dat gericht was op het verbeteren van de structurele prestaties van de geprinte elementen. Er werden verschillende wapeningsstrategieën voorgesteld en onderzocht, waaronder:

- het gebruik van vezels
- continue geautomatiseerde methodes om wapening in te brengen
- de toevoeging van (inwendige of uitwendige) wapeningsstaven
- de inwerking van kabels (tijdens het extruderen of erna in het geval van voorspankabels).

Hoewel deze verschillende mogelijkheden uitgeprobeerd werden tijdens het laboratoriumonderzoek en op een paar pilootwerven, worden ze vooralsnog niet breed toegepast.

5.3.1 Wapening tijdens het 3D-printen

Eén van de onderzochte methodes was een wapening met vezels van verschillende afmetingen en verschillende aard (staal, kunststof, glas ...). De toevoeging ervan gebeurt ofwel tijdens het mengen van het printbare mengsel, ofwel in de printkop teneinde het pompsysteem niet te beschadigen. Deze vezels kunnen de mechanische buigkarakteristieken van het geprinte element verbeteren en de plastische krimp ervan verminderen. Zodoende kan de scheurvorming beperkt worden en de mortelkwaliteit verbeterd. De toevoeging van vezels zorgt er echter ook voor dat de verwerkbaarheid van het mengsel, wat vereist is voor een goede printbaarheid, afneemt. Bovendien verlenen ze de mortel een anisotroop gedrag, aangezien de eigenschappen ervan afhangen van de vezelrichting, die op haar beurt beïnvloed wordt door de voorkeursoriëntatie die veroorzaakt wordt door de extrusie (zie afbeelding 21). Indien er zich aanzienlijke trekspanningen voordoen, dan kan de toevoeging van de vezels bovendien ontoereikend blijken.



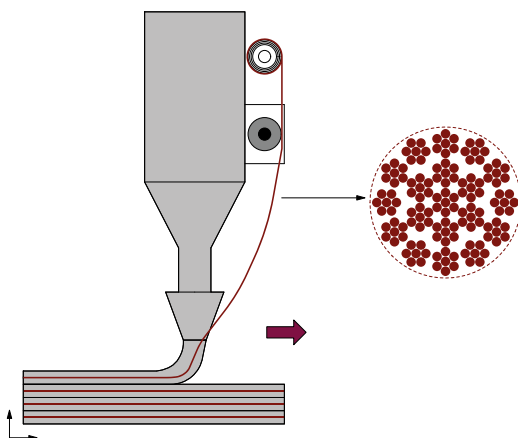
Afb. 21 Schema's van het 3D-printprincipe met vezelversterkt beton. Vezels georiënteerd in de printrichting (links) en illustratie van het belang om de vezels over verschillende richtingen te verdelen ter beperking van de scheurvorming (rechts).

Er kan ook gewapend worden door manueel wapeningsstaven tussen de lagen aan te brengen. De wapeningsstaven kunnen horizontaal gedeponeerd worden na het printen van de laag, zoals voorgesteld in afbeelding 22.

Binnen de Technische Universiteit Eindhoven (Nederland) werd er een continue wapeningsmethode door het inbrengen van stalen microkabels in de geëxtrudeerde mortellagen ontwikkeld. Hoewel er bij deze methode een bijkomende voorziening voor het inbrengen van de microkabels tijdens het printen vereist is, is dit een eerste stap op weg naar een continue geautomatiseerde wapening (zie afbeelding 23). De toevoersnelheid is regelbaar om het betonprinten en het inbrengen van de stalen microkabels te synchroniseren. Een belangrijk aandachtspunt bij deze methode is het verglijden van de kabels wanneer het element aan belastingen onderworpen wordt.



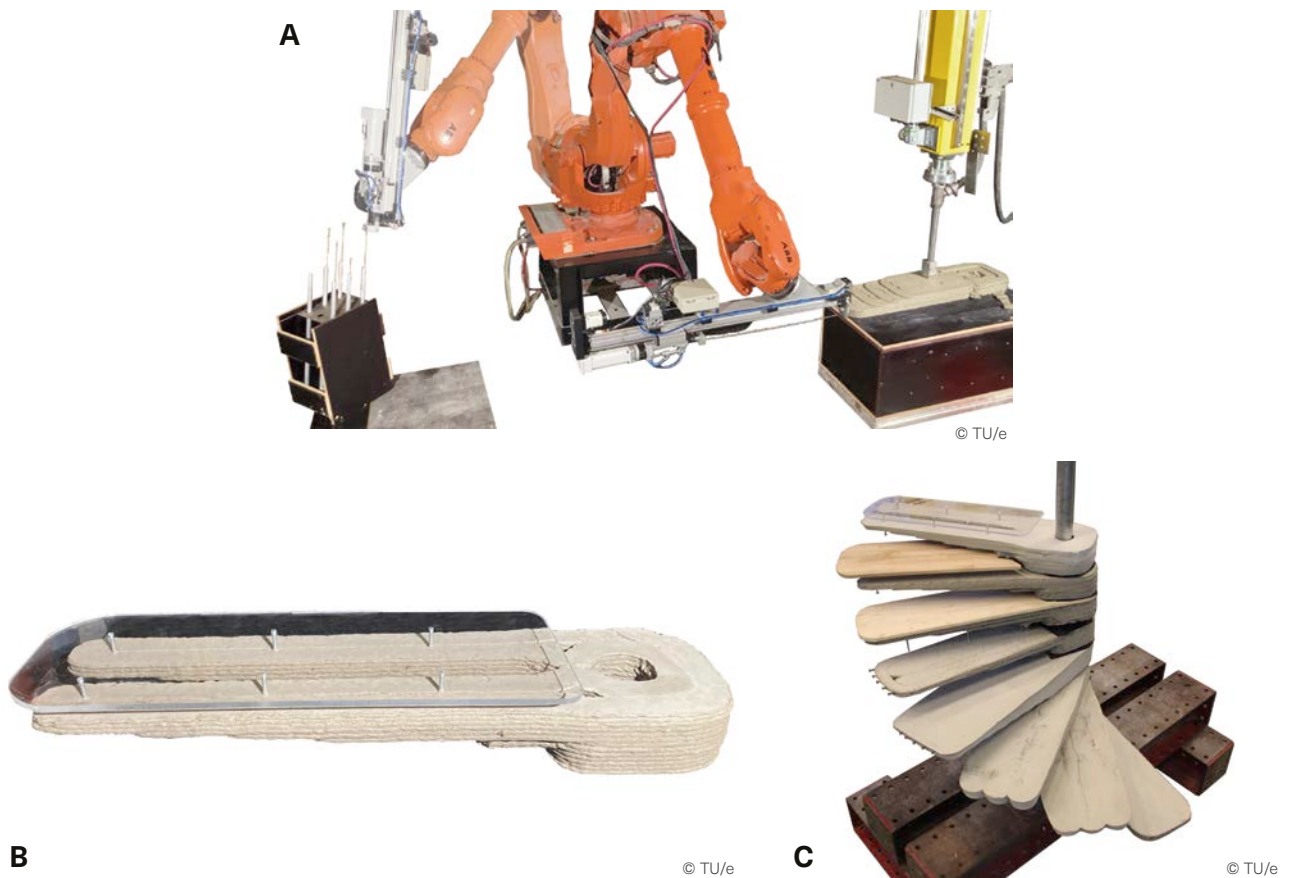
Afb. 22 Manuele toevoeging van wapeningsstaven tussen de geprinte lagen (element geprint bij Buildwise in samenwerking met de KU Leuven).



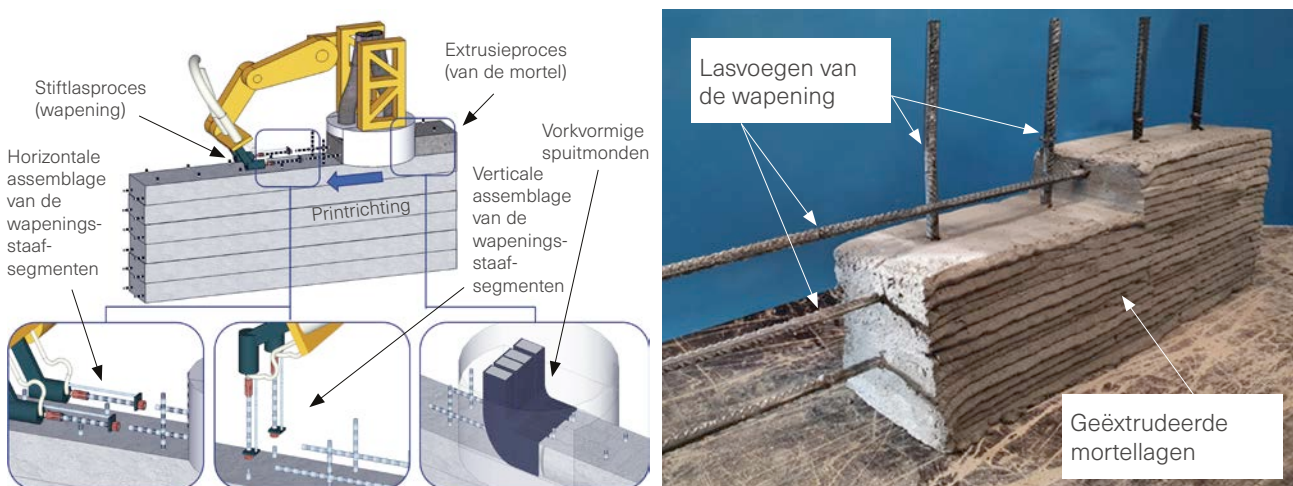
Afb. 23 Continue wapening tijdens het printen. Principeschema (links, [M1]) en wapening met stalen microkabels (rechts).

Onderzoekers van de Technische Universiteit Eindhoven (Nederland) bekijken ook de mogelijkheid om een tweede robot te gebruiken, geprogrammeerd voor het multidirectioneel inbrengen van wapeningsstaven in een element uit geprinte mortel. Deze techniek werd gebruikt voor de wapening van de treden van een spiraalvormige trap (zie afbeelding 24A, p. 28). De robot maakte het bovendien mogelijk om schroeven aan te brengen teneinde de verschillende tredeonderdelen te assembleren (zie afbeeldingen 24B en 24C, p. 28).

Er is een nieuw hybride 3D-printprocedé voor gewapende constructies in ontwikkeling aan de KU Leuven, in samenwerking met de Universiteit van Aken (Duitsland). Het procedé wordt aangeduid als additieve productie van gewapend beton (*Additive Manufacturing of Reinforced Concrete* of AMoRC). Bij hybride AMoRC wordt er gebruikgemaakt van een intermitterend stiftlasprocedé en een extrusieprocedé (zie afbeelding 25, p. 28). De stalen wapeningssegmenten worden met behulp van het lasprocedé geassembleerd tot een driedimensionaal



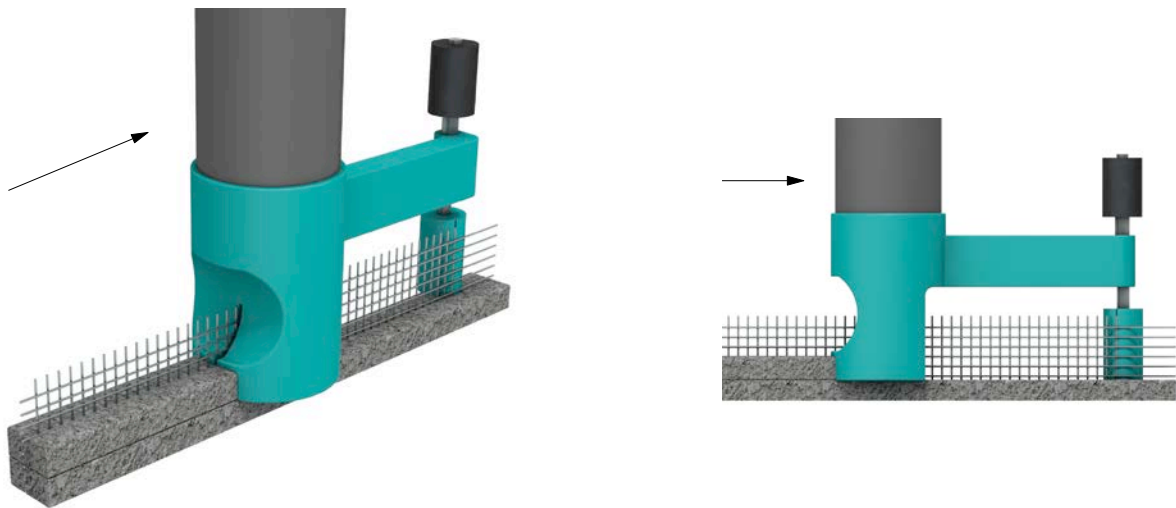
Afb. 24 Gebruik van een tweede robot om de wapeningen of de schroeven in te brengen in een geprint element [H1].



Afb. 25 Principe van het AMoRC-procedé en met behulp van dit procedé geprint prototype [C1].

raster en tegelijkertijd omhuld met geëxtrudeerde mortel. Het belangrijkste voordeel van deze wapeningstechniek ten opzichte van de vorige benaderingen is dat de las- en extrusieprocedures zodanig aangepast kunnen worden dat ze kunnen werken met een identieke toevoersnelheid. Door de twee procedures te synchroniseren, kunnen ze gecombineerd worden in een hybride printkop voor de productie van een gewapend element. Er is echter nog onderzoek nodig naar de structurele prestaties van dergelijke elementen.

Het geautomatiseerde wapeningsprocedé dat ontwikkeld werd door de *Swinburne University of Technology* (Australië) is vergelijkbaar met het AMoRC-procedé. Hierbij worden de lagen gewapend met een wapeningsnet dat toegevoegd wordt tijdens de extrusie. Deze netten worden loodrecht ten opzichte van de lagen ingevoegd en overlappen elkaar om een continue wapening te simuleren (zie afbeelding 26, p. 29).



Afb. 26 Invoeging van het wapeningsnet en omhulling ervan met behulp van een op maat gemaakte spuitmond [M2].

5.3.2 Vooraf geïnstalleerde wapening

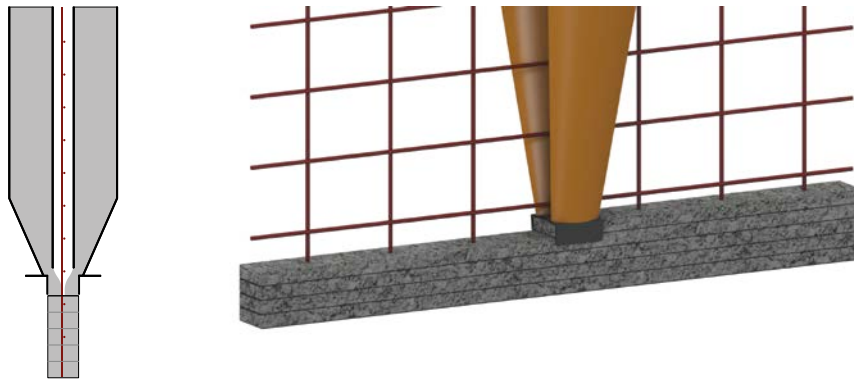
Het printen van holle elementen vormt een andere wapeningsoplossing. Een verloren bekisting printen, biedt het voordeel dat er manueel traditionele wapeningsstaven of wapeningkooien in aangebracht kunnen worden. Vervolgens wordt er een zelfverdichtend beton in de hiertoe voorziene holtes gestort (zie afbeelding 27) zodat de uiteindelijke constructie gewapend is. In dit geval kan het geprinte element beschouwd worden als een verloren bekisting en niet als een element dat tot taak heeft om belastingen op te nemen. Het tweede voordeel ligt in het feit dat men elektrische kabels en buizen door de holtes kan laten lopen.



Afb. 27 Hol 3D-geprint element dat dienst doet als verloren bekisting (links) en beton dat gestort wordt in een geprinte kolom die dienst doet als verloren bekisting (rechts).

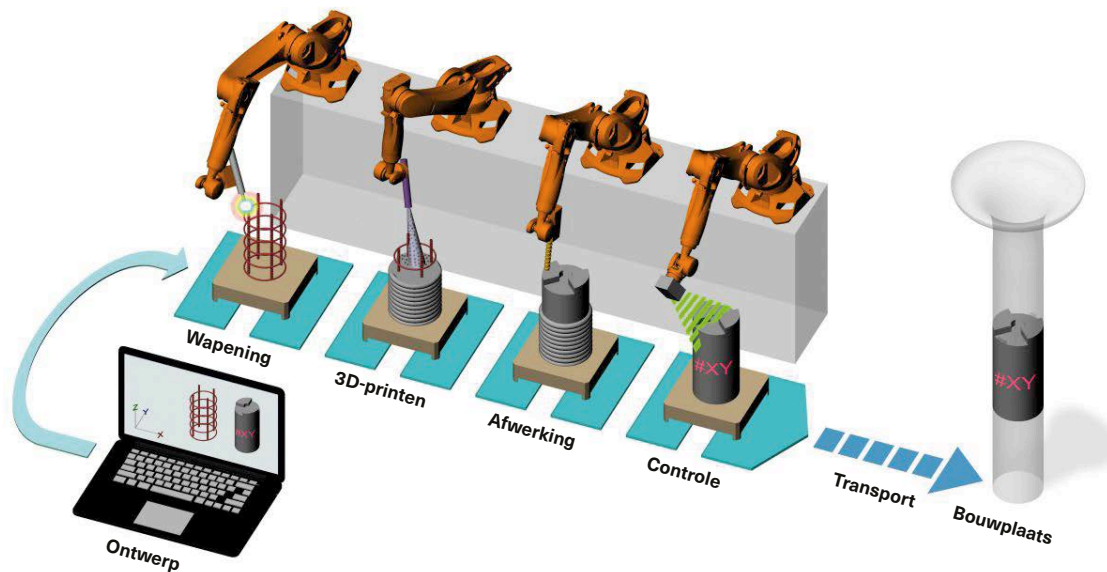
Er werd ook een nieuwe printmethode voor gewapend beton ontwikkeld door het Chinese bedrijf HuaShang Tengda. Bij hun aanpak worden de verticale en horizontale stalen wapeningsstaven vooraf ter plaatse vastgezet terwijl een op maat gemaakte printkop met twee spuitmonden de mortellagen aan weerszijden van het wapeningsnet deponeert (zie afbeelding 28, p. 30). Deze methode laat voornamelijk toe om volledig gewapende 3D-geprinte elementen op te trekken en werd reeds in enkele projecten toegepast. Ze beperkt echter wel de conceptuele vrijheid voor wat de vorm betreft.

Tot slot werd er aan het ETH Zürich (Zwitserland) een procedé ontwikkeld met de naam *Mesh Mould*. *Mesh Mould* maakt gebruik van een industriële robot die uitgerust is met een speciaal ontworpen voorziening om



Afb. 28 Principeschema van de methode die ontwikkeld werd door het Chinese bedrijf HuaShang Tengda en die erin bestaat om mortellagen te printen langs weerszijden van een vooraf geïnstalleerd wapeningsnet.

automatisch een dichte wapeningskooi te fabriceren door het snijden, buigen en lassen van stalen staven. Na de productie van het wapeningsnet wordt de betonspecie gestort waarna er een betondekkingslaag toegevoegd kan worden. Door de mortel in één enkele arbeidsgang te spuiten, kunnen de gelaagdheidsproblemen die inherent zijn aan de andere digitale productiemethodes beperkt of geëlimineerd worden. Bovendien fungeert het wapeningsnet als een functionele bekisting die ter plaatse blijft. Binnen de Technische Universiteit van Braunschweig (Duitsland) werd er een gelijkaardig procedé met de naam *Shotcrete 3D Printing (SC3DP)* ontwikkeld. Hierbij wordt er door een robot een wapeningskooi geassembleerd, waarop vervolgens mortel gespoten wordt om het element te produceren. Dit procedé wordt geïllustreerd voor een gewapende kolom (zie afbeelding 29).



Afb. 29 Productiestappen van een gewapende kolom met de SC3DP-methode.

5.3.3 Wapening na het 3D-printen

Het is eveneens mogelijk om de wapeningen manueel in te brengen langs de buitenkant van het geprinte element. Afbeelding 30 toont een balk die opgebouwd is uit segmenten die geassembleerd werden met externe staven. Voor de verankering van de staven in de segmenten wordt er gebruikgemaakt van een verzegeling. We willen erop wijzen dat dit type externe wapening de toepassing van wapeningsstaven vereist die beschermd zijn tegen corrosie (epoxycoating, galvanisatie, roestvast staal ...). Deze zijn echter duurder dan traditioneel betonstaal.



Afb. 30 Balk die gewapend werd door het assembleren van externe wapeningsstaven.

Een andere oplossing ligt in de wapening van de geprinte elementen door de voorspanmethode. Deze techniek bestaat erin om holtes te creëren in de geprinte elementen die later dienst zullen doen als doorgang voor de voorspankabels. Ze werd toegepast op een brug uit mortel die geprint werd door de Technische Universiteit Eindhoven (Nederland). Deze fietsersbrug van acht meter lang werd geplaatst in Gemert (Nederland) en werd gewapend door het invoegen van microkabels in de printtrichting. De brug werd bovendien voorgespannen in de langsrichting (zie afbeelding 31) met behulp van stalen kabels die verankerd werden in eindblokken. Ze maakt deel uit van een groot wegenbouwproject (het Noord-Om-project) onder leiding van de firma BAM Infra en in opdracht van de provincie Noord-Brabant (Nederland).



Afb. 31 Brug uit 3D-geprinte mortel in Gemert (Nederland).

Aan de Universiteit Gent werd er een voetgangersbrug op laboratoriumschaal ontworpen door middel van topologie-optimalisatie (zie ook § 4.3, p. 20). De verschillende elementen waaruit de voetgangersbrug opgebouwd is, werden 3D-geprint in samenwerking met Vertico, een Nederlands bedrijf dat een mobiele 3D-printer gemaakt heeft, en het Technion (Israël). De vorm van de brug en het traject van de stalen kabel aan de voet van de brug werden geoptimaliseerd om de spanningen te beperken (zie afbeelding 32, p. 32).



Afb. 32 Stappen van de wapening met behulp van voorspankabels van een 3D-geprinte brug.

Tabel 2 vat de bijzonderheden en de nadelen van de verschillende wapeningsmethodes voor geprinte mortel samen.

Tabel 2 Bijzonderheden en nadelen van de verschillende wapeningsmethodes voor geprinte mortel.

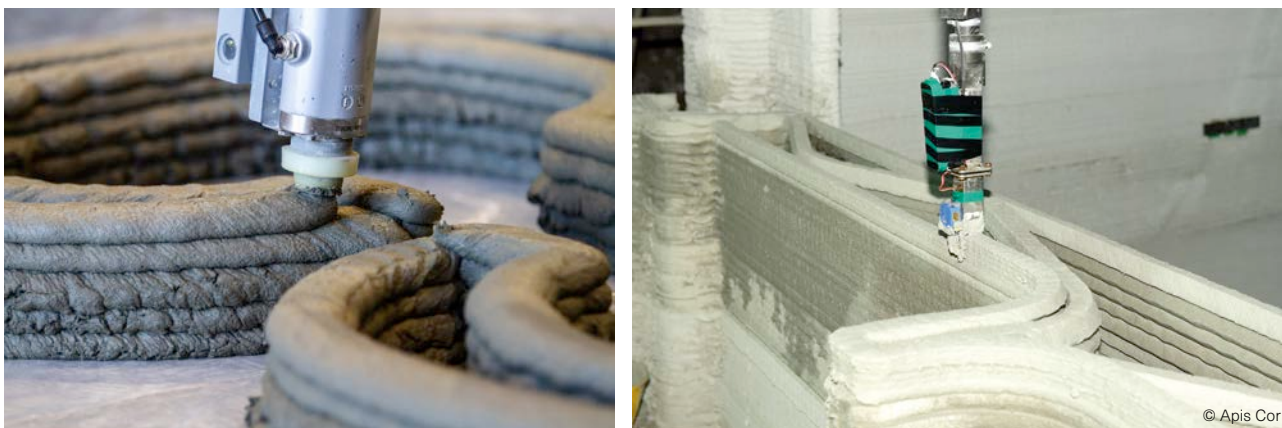
| | Wapeningsmethode | Bijzonderheden | Nadelen |
|--------------------------------|--|---|--|
| Wapening tijdens het printen | Discontinue wapening (bv. staalvezels) | Verbetering van de mechanische prestaties en beperking van de scheurvorming | Ontoereikende wapening voor elementen die onderhevig zijn aan hoge spanningen, voorkeursoriëntatie van de vezels |
| | Continue wapening (bv. stalen kabels) | Verbetering van de mechanische prestaties en de ductiliteit, beperking van de scheurvorming | Vereist een op maat gemaakte printkop |
| | Manueel tussen de lagen gedeponeerde wapeningsstaven | Verbetering van de mechanische prestaties | Vereist mankracht tijdens het printen, risico op menselijke fouten |
| Vooraf geïnstalleerde wapening | Geprefabriceerde staalconstructie (bv. <i>Mesh Mould</i>) | Verbetering van de mechanische prestaties en de stabiliteit | De toepassing is beperkt tot spuitmortel |
| Wapening na het printen | Wapeningskooi die in een geprint hof element geplaatst wordt | Verbetering van de mechanische prestaties van de constructie | Het geprinte element wordt enkel gebruikt als verloren bekisting |
| | Voorspanning door naspanning | Verbetering van de mechanische prestaties | Men moet in het ontwerp in de nodige plaats voor de kabels voorzien |
| | Externe wapening | Verbetering van de mechanische prestaties | Gebruik van corrosiebestendige wapeningen |

5.4 Oppervlakteafwerking en reproduceerbaarheid

Omwille van het additieve karakter van 3D-printen zijn de zijvlakken van de geprinte elementen niet zo glad (gelaagdheidseffect) als die van elementen die op traditionele manier geproduceerd worden door vormgieten. De oppervlakteafwerking van een geprint element is voornamelijk afhankelijk van de laagdikte en de vorm van de spuitmond. De dikte van de lagen is een belangrijke parameter die de printtermijn, het visuele uitzicht en de fysische en mechanische eigenschappen van het geprinte element beïnvloedt.

De geprinte elementen kunnen ook een zekere residuele porositeit vertonen die moeilijk met het blote oog te detecteren is, maar die wel tot problemen kan leiden. Bovendien kan het raakvlak tussen twee lagen een preferentiële doorgang vormen voor water of agressieve stoffen. Het is dan ook nodig om de goede hechting tussen de lagen te waarborgen teneinde het materiaal goede mechanische eigenschappen en een goede duurzaamheid te verlenen. Sterker hechtende oppervlakken zullen ook sneller vervuilen in een buitenomgeving (stof, mos ...).

Men kan een gladder oppervlak bekomen door een nabehandeling met traditionele afwerkingsprocedures. Een andere manier om het zijvlak van de geprinte lagen glad te vlianderen, is door troffels te bevestigen aan de zijanten van de spuitmond, zoals getoond in afbeelding 33. Dankzij de gekartelde vorm van deze spuitmond kan men het bovenvlak van de mortel overigens ook enigszins ruwer maken om de hechting tussen de lagen te verbeteren.



Afb. 33 Gelaagd zijvlak (links) en vlianderen van het oppervlak met aan de zijanten van de spuitmond bevestigde troffels (rechts).

Voor betonelementen die met de traditionele methode vervaardigd werden, staan de geometrische toleranties, de fabricagetoleranties en de plaatsingstoleranties vermeld in de Europese norm NBN EN 13670 [B14], aangevuld door zijn nationale bijlage, de norm NBN B 15-400 [B5]. In de norm NBN EN 13369 [B13] zijn ook enkele algemene bepalingen voor geprefabriceerde betonproducten opgenomen. Het uitzicht, de kleur en de textuur van het beton zijn voornamelijk afhankelijk van de samenstelling, van de aard van de bekisting (glad of getextureerd, d.w.z. met een opgeruwd oppervlak) en van de eventuele behandeling (wassen, boucharderren ...) na het ontkisten. De bijzonderheden voor (ter plaatse gestort) zichtbeton dat aan bepaalde esthetische eisen moet voldoen, staan beschreven in de Belgische norm NBN B 15-007 [B4] en de [TV 268](#) [B2]. Voor (geprefabriceerd) architectonisch beton zijn de Technische Voorschriften (PTV) 21-601 [P3] van toepassing.

In de context van 3D-printing verwijst de term tolerantie in principe naar het verschil tussen de theoretische afmetingen (aangegeven op een technische tekening of in een CAD-model) en de werkelijke afmetingen van een element na de productie ervan. Er bestaat vooralsnog geen enkele norm waarin de esthetische eisen of de geometrische toleranties voor 3D-bouwen gedefinieerd zijn.

Ten slotte is er ook nog het probleem van de reproduceerbaarheid bij het 3D-printen van huizen of andere bouwwerken. De materialen kunnen van één printbeurt tot de andere anders gaan reageren in functie van de externe parameters en aldus variabele karakteristieken vertonen. Elke laag houdt een risico op onnauwkeurigheden in. De regelmaat van de gedeponeerde lagen blijft bijgevolg moeilijk te waarborgen doorheen het printproces. De specificaties van de 3D-printer en de gebruikte materialen zijn de doorslaggevende parameters

voor de uiteindelijke precisie van het geprinte element. Op termijn zal er onderzoek gevoerd moeten worden om beter te kunnen beantwoorden aan de verwachtingen op het vlak van de precisie en de herhaalbaarheid van het 3D-betonprinten.

5.5 Klimatologische omstandigheden

De klimatologische omstandigheden hebben een niet te verwaarlozen invloed op het 3D-bouwen. Het weer is bijvoorbeeld erg droog en warm in het Midden-Oosten, maar erg koud en vochtig in Noord-Europa. De parameters voor het 3D-printen moeten dus aangepast worden aan het klimaat in kwestie, wat verschillende uitdagingen met zich meebrengt. Er zijn nog voorafgaandelijke onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten nodig om de technologie, de uitrustingen en vooral de mengsels aan te passen aan moeilijke klimatologische omstandigheden (warmte, koude, wind, regen). Uit een aantal 3D-printprojecten die uitgevoerd werden in extreme weersomstandigheden is gebleken dat het procedé aangepast kan worden voor zover er voorzorgsmaatregelen getroffen worden.

Bij enkele *onsite* printprojecten werd de printzone overdekt met een tent om de temperatuur binnen redelijke grenzen te houden. Dit was onder meer het geval bij het printen van een kantoor in Kopenhagen door het Deense bedrijf COBOD (zie afbeelding 34 links). In Saoedi-Arabië verliep het volledige proces daarentegen in een niet-overdekte zone waar de temperaturen opliepen tot meer dan 40 graden (zie afbeelding 34 rechts). In dit geval werd het mengsel echter ontworpen, rekening houdend met deze hoge temperaturen.



Afb. 34 3D-bouwprojecten, uitgevoerd met COBOD-printers. Onder een tent geprint kantoor in Denemarken (links) en 3D-geprinte villa met drie verdiepingen in een niet-overdekte zone in Saoedi-Arabië (rechts).

Bij ongunstige weersomstandigheden, zoals hevige regen, vormt de installatie van een tent de meest efficiënte oplossing voor het printen op de bouwplaats. Indien de weersomstandigheden daarentegen goed zijn, dan kan men het gebruik ervan achterwege laten. PERI, een producent en leverancier van bekistings-, ondersteunings- en steigersystemen, heeft het initiatief genomen om tijdens de zevendaagse Bauma-beurs in München (Duitsland) over te gaan tot het 3D-printen van de muren van een kleine woning (zie afbeelding 35). Het printen gebeurde buiten, zonder tent, en werd ook voortgezet bij regenweer.



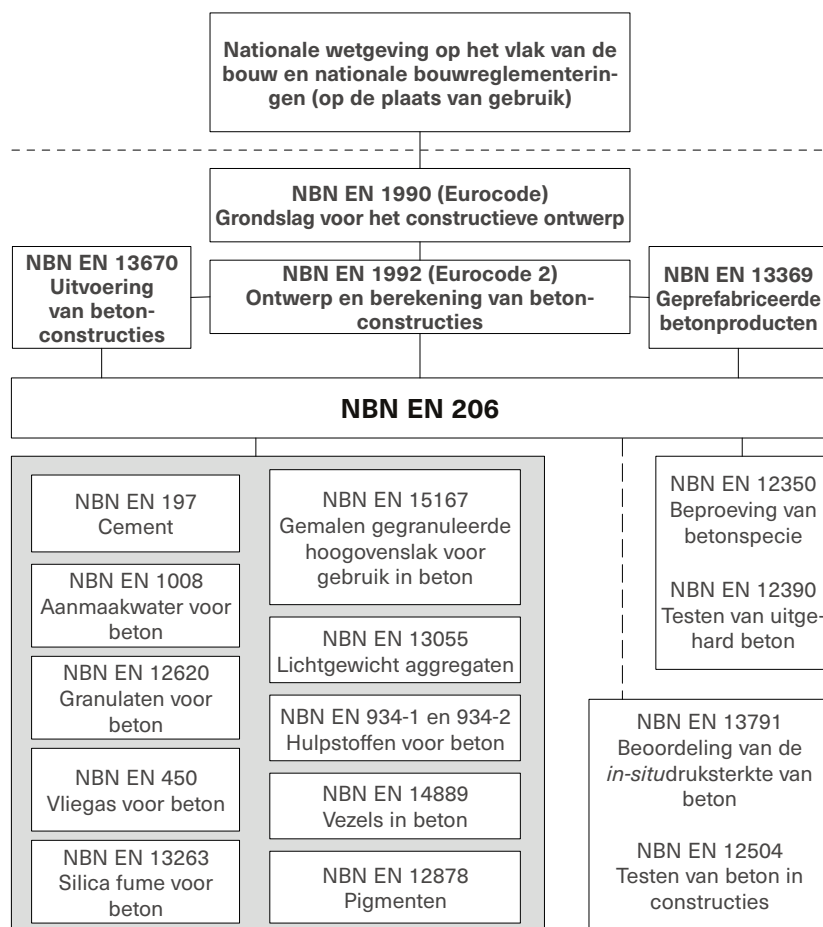
Afb. 35 3D-printen van de muren van een kleine woning in buitenomstandigheden, tijdens de Bauma-beurs in Duitsland.

5.6 Gebrek aan wetten en reglementen

Het is belangrijk om te benadrukken dat normen geen wetten zijn, maar regels voor de goede praktijk die vrijwillig toegepast worden door de betrokkenen (producenten, leveranciers, klanten enzovoorts). Ze hebben van nature dus geen bindend karakter. Het is echter wel mogelijk dat een norm verplicht wordt in het kader van de CE-markering of wanneer ernaar verwezen wordt in wetten, reglementeringen (bv. EPB) en contracten (bv. het bijzondere bestek). In geval van geschillen of schade worden de normen steeds beschouwd als de regels waaraan men zich bij voorkeur zou moeten houden.

Voor beton bestaat er wel een normatief en reglementair kader dat tot doel heeft om de kwaliteit en de duurzaamheid van de bouwwerken te verbeteren. Voor constructief beton voor gebouwen en andere bouwwerken uit de burgerlijke bouwkunde zijn de specificaties opgenomen in de Europese norm NBN EN 206 [B8] en zijn nationale bijlage, de norm NBN B 15-001 [B3]. Deze normen bevatten precieze regels met betrekking tot de specificatie, de prestaties, de vervaardiging en de conformiteitscontrole van beton. Ze zijn van toepassing op beton voor ter plaatse gestorte constructies en geprefabriceerde constructies voor gebouwen. Er kunnen bijkomende eisen of verschillende proefprocedures gedefinieerd worden voor specifieke betontypes en toepassingen, onder meer voor beton met een maximale korrel diameter (D_{max}) van minder dan of gelijk aan vier millimeter (mortel). Voor geprefabriceerde producten zijn er bijkomende eisen opgenomen in de norm NBN EN 13369 [B13] evenals in de specifieke productnormen voor de verschillende types elementen.

De naleving van de normen NBN EN 206 [B8] en NBN B 15-001 [B3] wordt opgelegd door de dimensioneringsnormen voor betonconstructies (de Eurocodes en, in het bijzonder, de norm NBN EN 1992 [B11] of Eurocode 2) evenals door de uitvoeringsnormen voor betonnen bouwwerken en betonconstructies (de normen NBN EN 13670 [B14] en NBN B 15-400 [B5]) (zie afbeelding 36). De constructieve Eurocodes en de hieraan verwante normen (uitvoering, materialen, proefmethodes) vormen dus de grondslag voor het ontwerp en de uitvoering van constructies.



Afb. 36 Verbanden tussen de norm NBN EN 206 [B8] en de reken- en uitvoeringsnormen, de normen met betrekking tot de bestanddelen en de proefnormen voor beton op Europees niveau.

Eén van de belangrijkste functies van normen is hun rol als hulpmiddel om de duurzaamheid en prestaties van constructies uit de burgerlijke bouwkunde en gebouwen te waarborgen. Vandaag de dag is het technisch mogelijk om huizen te printen. Er blijven echter een aantal vragen en onduidelijkheden bestaan omtrent het normatieve kader voor het 3D-bouwen.

Het gebrek aan normalisatie vormt tegenwoordig een belemmering voor de doorbraak van 3D-printing in de sector. De prestatiecriteria voor printbare bouwmaterialen worden vooralsnog namelijk niet gedekt door normen of technische aanbevelingen, wat impliceert dat dit bouwprocedé nog niet als dusdanig erkend wordt. Aangezien geprinte constructies afwijken van traditionele constructies zijn de sterkte- en duurzaamheidsberekeningen hier bovendien moeilijk op toe te passen. Een technische beoordeling is daarom essentieel (bv. een Technische Goedkeuring of ATG is één van de manieren om innovaties in België te promoten) (zie ook § 9.1, p. 59).

Het gebrek aan normen voor 3D-printing heeft ertoe geleid dat er binnen bepaalde projecten bekistingen of spouwmuren geprint werden, waarin vervolgens een traditioneel beton gestort werd en waaraan in bepaalde holtes een wapeningsnet toegevoegd werd teneinde aan de huidige normen te kunnen beantwoorden (zie ook § 5.3.2, p. 29). Bij Batiprint 3D werd er bijvoorbeeld voor gekozen om de spouwmuren van het studentenwoningcomplex Yhnova te 3D-printen met polyurethaan (een isolerend materiaal) en er vervolgens traditioneel beton tussen te storten. Gelet op het feit dat deze technologie gecertificeerd is, onderzoekt de *start-up* momenteel manieren om meerdere verdiepingen aan zijn woningen toe te voegen.

In een aantal landen, zoals Frankrijk en Nederland, hebben bepaalde ontwerpers bovenop de bouwvergunningen ook geopteerd voor certificeringen met het oog op de uitvoering van 3D-printprojecten zoals woningen. Aangezien de bouwvergunning afgeleverd wordt door de gemeente, wordt het project lokaal beheerd. Om de veiligheid te waarborgen en de vergunning te verkrijgen, is er een intensieve samenwerking vereist. Veelal is het de aannemer die zorgt voor de technische uitvoering en het doorgeven ervan aan de autoriteiten, die de structurele keuzes en de onderbouwing ervan op hun beurt toetsen aan een aantal beoordelingscriteria. De veiligheidsgaranties berusten voornamelijk op proeven en op proefmethodes die (deels) recent ontwikkeld werden. Deze aanpak is vaak duur omwille van de bijkomende intensieve proeven die ermee gepaard gaan. Het is dus aan de gemeente om te bepalen of het project voldoende veilig is. Wanneer het bouwwerk voldoet aan alle van kracht zijnde stedenbouwkundige en constructieve eisen, dan wordt de vergunning afgeleverd. In het kader van het Franse Viliaprint-project werd er een nieuwe op 3D-betonprinting gebaseerde bouwmethode gecertificeerd door het CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*) en dit, volgens de ATEX-procedure (*Appréciation Technique d'Expérimentation*). Deze certificatie attesteert dat er voldaan is aan bepaalde functionaliteiten, die specifiek zijn voor de beoogde toepassing (isolatie, veiligheid, ondoorlaatbaarheid, duurzaamheid, mechanische sterkte enzovoorts). In 2022 huldigde Plurial Novilia zijn eerste vijf huizen in die opgetrokken werden door het *offsite* 3D-printen van de betonnen muren te combineren met de prefabricage van traditionele elementen. Het gaat hierbij niet om muren die dienst doen als verloren bekistingen, maar om echte draagmuren.

De Eurocode 0 [B10] erkent de noodzaak om innovaties een potentiële weg naar de bouwmarkt te bieden en laat toe om structurele ontwerpen te ontwikkelen die gedeeltelijk gebaseerd zijn op projectspecifieke in plaats van algemene experimentele proeven. Bijlage D 'Experimenteel ondersteunde dimensionering' beschrijft het type proeven dat uitgevoerd kan worden en geeft een overzicht van de reglementeringen rond de statistische evaluatie van de resultaten. Op basis van de aldus door de Eurocode geboden mogelijkheden om af te wijken van de algemene rekenregels, kan er een proefprotocol uitgewerkt worden. Dit is het geval voor de 3D-geprinte fietsersbrug in Nederland. Aanvankelijk werd er een mechanische proefcampagne uitgevoerd om een beeld te krijgen van de belangrijkste eigenschappen van het constructiemateriaal (bijlage D, categorie b) zoals de druksterkte, de buigsterkte en de elasticiteitsmodulus. De mechanische karakteristieken van het toegepaste materiaal, een door Weber aangeboden printbare mortel, werden vastgelegd in een uitgebreid experimenteel programma. Deze gegevens werden vervolgens gebruikt om de uiteindelijke afmetingen en het voor de kabels vereiste voorspanningsniveau te kunnen bepalen. De uiterste grenstoestand (UGT) werd berekend op basis van de algemene belastingsfactoren uit de norm NBN EN 1992-1-1 [B12] en de mechanische karakteristieken.

De ontwikkeling van normen voor geprinte mortel of geprint beton en van de bijbehorende *software* voor het berekenen en analyseren van de toekomstige geprinte constructies, is essentieel voor de professionelen die verantwoordelijk zijn voor het ontwerp van 3D-gebouwen en -constructies. Sinds kort wordt deze kwestie onderzocht door een aantal commissies en werkgroepen, waaronder de RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*) en het ACI (*American Concrete Institute*), teneinde deze lacunes geleidelijk op te vullen.

6. 3D-bouwmaterialen

6.1 Samenstellingen voor printbare mortels

Stortklare mortels vertonen specifieke eigenschappen in functie van het type en de dosering van de gebruikte grondstoffen en hulpstoffen. De meeste van deze mortels kunnen samengesteld worden om te voldoen aan de bijzondere vereisten van elke toepassing (bindingstijd, verpompbaarheid, verwerking, draagvermogen, duurzaamheid ...). De aanwezigheid van grote granulaten laat toe om de mechanische sterkte van de mortel te verhogen, zijn duurzaamheid te verbeteren (vermindering van de totale krimp) en de kostprijs te drukken omwille van de beperktere cementhoeveelheid.

Stortklaar beton dat bestemd is om op traditionele wijze uitgevoerd te worden (door storten) beantwoordt echter niet aan de specifieke eisen die gesteld worden aan materialen voor 3D-printing. Omwille van de beperkte afmetingen van de spuitmond en de beoogde oppervlakteafwerking, mogen de printbare mengsels geen grote granulaten bevatten. Een maximale korrelgrootteverdeling van twee millimeter is een courante keuze voor de meeste 3D-geprinte projecten. De printbare mengsels zouden dus beter aangeduid worden met de termen 'printbare mortels' of 'printbaar microbeton' dan als 'printbaar beton'.

Om een antwoord te kunnen bieden aan de verschillende reologische beperkingen wordt er in de printbare mengsels gebruikgemaakt van een grote hoeveelheid snelbindend cement. Zodoende is het materiaal voldoende vloeibaar om verpompt te kunnen worden en voldoende stijf om niet in te zakken onder zijn eigengewicht en het gewicht van de volgende lagen (zie § 6.2, p. 38). In bepaalde gevallen kan de toevoeging van een bindingsversneller ter hoogte van de printkop noodzakelijk blijken om aan het mengsel de nodige stijfheid te verlenen.

Dit is de reden waarom de meeste huidige demonstratieprojecten niet geprint werden met echt beton, maar met stortklare mortels (al dan niet met toevoeging van hulpstoffen) waaraan enkel water toegevoegd moet worden (en eventueel een aantal andere hulpstoffen die de viscositeit en de binding wijzigen). Deze mortels werden specifiek ontwikkeld voor deze toepassing en worden doorgaans gekarakteriseerd door een zeer hoog cementgehalte (vooral Portlandcement CEM I 52,5 R). Ze hebben echter een hoge koolstofvoetafdruk en zijn duurder dan een gewoon beton. Er zijn al een paar printbare mortels op de markt, maar het aanbod is nog steeds vrij beperkt. Men dient eveneens in het achterhoofd te houden dat bepaalde printers enkel verenigbaar zijn met de mengsels die ontwikkeld werden door de producent van de machine, wat de keuze nog verder beperkt.

De afwezigheid van grote granulaten en het hoge gehalte aan snelbindend cement kunnen bovendien de krimpproblematiek verhogen en zodoende de duurzaamheidsprestaties van de geprinte elementen in het gedrang brengen. Bepaalde stortklare mengsels bevatten vezels (bv. polypropyleen) om de plastische krimp-scheuren onder controle te houden (zie § 5.3.1, p. 26). Teneinde het uitdrogen van het geprinte element te voorkomen of te beperken, is het mogelijk om een nabehandelingsproduct te verstuiven, om het element gedurende de volledige verhardingsperiode te beschermen met een plasticfolie of om het te printen in een omgeving met een gecontroleerde temperatuur en vochtigheid. Het gebruik van krimpreducerende hulpstoffen zou een mogelijkheid kunnen vormen om de krimp van de printbare mortel te verminderen. Er zijn nog geen onderzoeken of ervaringen die aantonen dat geprinte woningen even goed of beter zouden presteren dan woningen die opgetrokken werden volgens traditionele methodes. Gelet op het feit dat het 3D-printen nog in volle ontwikkeling is, is het moeilijk om de levensduur van een 3D-geprinte woning nauwkeurig in te schatten.

De huidige prioriteit om het 3D-printen milieuvriendelijker te maken, bestaat erin de hoeveelheid Portlandcement in de printbare mengsels te verminderen en te vervangen door andere cementtypes met een lagere koolstofvoetafdruk (binair of ternair cement met een lager klinkergehalte, alkali-geactiveerde materialen ...). Hoewel cementgebonden materialen nog steeds de overheersende keuze zijn voor veel 3D-bouwprojecten, kan het soms ook de moeite waard zijn om zijn toevlucht te nemen tot lokaal beschikbare natuurlijke materialen en hun compatibiliteit met de printmachine te onderzoeken.

Er werden intussen al verschillende initiatieven rond milieuvriendelijk 3D-printen op poten gezet teneinde de koolstofvoetafdruk van de printbare mengsels te verminderen en het hoofd te bieden aan de schaarste aan

natuurlijke hulpbronnen (zie ook § 4.3, p. 20). Er zijn meerdere moeilijkheden verbonden met de vervanging van het bindmiddel en het granulaire skelet. De minerale toevoegsels kunnen de mortel meer of minder vloeibaar maken dan aanvankelijk en kunnen bijgevolg de extrudeerbaarheid en bouwbaarheid ervan beïnvloeden. De mechanische sterkte en de duurzaamheid kunnen ook een belangrijke invloed hebben, naar gelang van de aard van het gebruikte materiaal en het vervangingspercentage van het cement.

Het is in deze optiek dat verschillende onderzoekslaboratoria zich momenteel aan het toelagen zijn op het optimaliseren van de integratie van industriële bijproducten en minerale toevoegsels in combinatie met Portlandcement in printbare mortels. Het gaat hier bijvoorbeeld om kalksteenfiller, een coproduct van de granulaat- en kalksector, hoogovenslak, een reststroom van de staalindustrie, en vliegafkomstig van de verbranding van verpulverde steenkool in de stookketels van thermische centrales, hoewel de laatste twee alsnog schaarser aan het worden zijn. Al deze materialen worden gebruikt in de 3D-printmengsels om het Portlandcement geheel of gedeeltelijk te vervangen. Naast bepaalde composietcementen die al goed ingeburgerd zijn op de Belgische markt (bv. hoogovencement van het type CEM III), effent dit onderzoek het pad voor nieuwe 'koolstofarme' ternaire cementtypes zoals gedefinieerd in de norm NBN EN 197-5 [B7]. Het gaat hier om Portlandcomposietcement CEM II/C-M en om composietcement CEM VI.

Er werd ook onderzoek gevoerd naar vervangingsmaterialen voor het granulaire skelet van de mortel, dat veelal opgebouwd is uit natuurlijk zand. Het Europese CIRMAP-project streeft er bijvoorbeeld naar om het natuurlijke zand volledig te vervangen door gerecycleerd zand, dat meestal gewonnen wordt uit het gebroken beton, afkomstig van de sloop van gebouwen (zie afbeelding 18, p. 22). Tot slot hebben onderzoekers van de Universiteit van Texas (Verenigde Staten) een nieuw gamma bouwmaterialen van natuurlijke oorsprong op basis van aarde voorgesteld, die omgevormd kunnen worden tot extrudeerbare formuleringen en verenigbaar zijn met de additieve productie van gebouwen [B1].

6.2 Gewenste karakteristieken voor de printbare mengsels

Naast de capaciteiten van de 3D-printer en de printparameters is ook de keuze van het materiaal van primordiaal belang voor het welslagen van het 3D-bouwen. Daarom werden er verschillende onderzoeken gevoerd naar de formulering en de karakteristieken van mengsels, geschikt voor gebruik in een 3D-bouwprocedé. Alle materialen beschikken over specifieke karakteristieken die het eindresultaat kunnen beïnvloeden. Er zijn drie parameters die in aanmerking genomen moeten worden bij de ontwikkeling van 3D-printmaterialen:

- de reologie
- de mechanische prestaties
- de duurzaamheid.

De reologie omvat het gedrag van de materialen in verse toestand, meer bepaald de verwerkbaarheid, de hanteerbaarheid en de verharding. De mechanische karakteristieken en de duurzaamheid worden bepaald in functie van de eindtoepassing in het project (dragend element, risicozones, blootstellings- en omgevingsklassen ...).

De ontwikkeling van microbeton of mortel voor gebruik in een 3D-printprocedé is een ware uitdaging. Het printbare mengsel is een bijzondere samenstelling die de voordelen van een spuitbeton en een zelfverdichtend beton op ideale wijze combineert. Het mengsel moet eerst en vooral de juiste consistentie hebben (vloeibaarheid en stabiliteit onder druk) zodat het door middel van een pomp doorheen een buis gestuwd kan worden en via een opening met een welbepaalde doorsnede (spuitmond) geëxtrudeerd kan worden zonder tekenen van ontmenging of risico op blokkering. De vorm van de spuitmond is sterk afhankelijk van de materiaalparameters (maximale korreldiameter). Na het extruderen via de spuitmond moet het mengsel voldoende stevig zijn om niet in te zakken onder invloed van zijn eigengewicht en niet te vervormen onder het gewicht van de volgende lagen.

De verwerkbaarheid van het mengsel moet dus aangepast zijn aan het pompproces, het extrusiedebiet na het verlaten van de printkop en de printsnelheid. Bovendien moet het voldoende snel verharden om het instorten

van de constructie te vermijden en het continu printen van een verticaal bouwwerk toe te laten. Om aangeduid te kunnen worden als printbaar, moet het mengsel dus **verpompbaar**, **extrudeerbaar** en **bouwbaar** zijn (zie afbeelding 37c). Het moet met andere woorden gaan om een vloeibaar, snelhardend mengsel. Deze tegenstrijdige (vloeibaar vóór de extrusie en stevig erna) en complexe karakteristieken hebben geleid tot de ontwikkeling van verschillende soorten printkoppen (zonder menger of met een statische of dynamische menger, met de mogelijkheid om hulpstoffen toe te voegen), de beperking van de hoeveelheid grote granulaten in de samenstelling van het mengsel (maximale diameter bepaald door de afmeting van de spuitmond) en de toevoeging van hulpstoffen en toevoegsels om een geschikte consistentie te verkrijgen (superplastificeerder, bindingversneller, viscositeitshulpstoffen ...).



Afb. 37a 3D-printproeven die uitgevoerd werden bij Buildwise. Injectie van een bindingsversneller in de printkop die uitgerust is met een dynamische menger.



Afb. 37b 3D-printproeven die uitgevoerd werden bij Buildwise. Mengsel dat te vloeibaar geacht wordt (sterke inzakking, niet-bouwbaar mengsel).



Afb. 37c 3D-printproeven die uitgevoerd werden bij Buildwise. Printbaar mengsel dat aanvaardbaar geacht wordt (verpompbaar, extrudeerbaar en bouwbaar).



Afb. 37d 3D-printproeven die uitgevoerd werden bij Buildwise. Mengsel dat te stevig geacht wordt (niet-extrudeerbaar).

Een vlotte, stabiele en niet-wrijvende vloeï van het mengsel tijdens het pompen kan bereikt worden door het integreren van minerale toevoegsels zoals kalksteenfiller of vliegas, door het gebruik van een korrelfractie met beperkte afmetingen (D_{max} doorgaans begrepen tussen twee en vier millimeter) en door het toevoegen van hulpstoffen zoals superplastificeerders en viscositeitshulpstoffen. Men kan ook nog zijn toevlucht nemen tot andere minerale materialen om aan een aantal bijzondere gevraagde karakteristieken te voldoen (bv. leem of bentoniet tot wijziging van de thixotropie). De verhardingsnelheid van de mengsels na de extrusie blijft echter een grote uitdaging bij het 3D-printen. Het is immers niet mogelijk om de gewenste verstijving na de extrusie van het materiaal te bekomen louter op basis van de structurering⁽⁵⁾ en de hydratatie van het cement. De mortel moet snel van een vloeibare toestand naar een stevigere toestand overgaan. Hiertoe wordt er vaak een bindingsversneller toegevoegd aan de stortklare mortel (in droge vorm) of geïnjecteerd en gemengd met de vloeibare mortel in de printkop (zie afbeelding 37a, p. 39). Bij de keuze van het type versneller moet er voldoende rekening gehouden worden met de verenigbaarheid ervan met de andere bestanddelen. De hoeveelheid moet aangepast worden aan het cementtype, de vorm en grootte van het te printen element, het extrusiedebiet, de printsnelheid (verplaatsing van de kop) en de printtermijn tussen twee lagen (in functie van de lengte van de strook). Voor het printen van kleine oppervlakken is de termijn tussen twee opeenvolgende lagen beperkt. De gedeponeerde mortellaag heeft soms niet de tijd om voldoende te verharden en het gewicht van de volgende laag op te nemen (zie afbeelding 37b, p. 39). In dit geval dient men de in de printkop geïnjecteerde hoeveelheid bindingsversneller te verhogen. Aan de andere kant kan een hoge verstijving ten gevolge van een te grote hoeveelheid bindingsversneller of een zeer lange wachttijd tussen twee opeenvolgende lagen (bv. tijdelijke stopzetting van de machine) leiden tot een blokkering in de printkop (zie afbeelding 37d) en tot mogelijke hechtingsproblemen tussen de lagen. Bij snelhardende mortel moet de reologie dus zeer goed beheerst worden.

Er werden Portlandcementvervangers gebruikt (met name speciale cementen en composietcementen) om te kunnen beschikken over cementgebonden producten met een hoge reactiviteit en een snelle sterktoename. Zo versnelt aluminaatcement op basis van calciumaluminaten de verharding van de mortellagen, wat de verticale bouwsnelheid verhoogt. Er kan ook gebruikgemaakt worden van speciale cementsoorten voor het 3D-printen van beton wanneer het materiaal onderhevig is aan een strenge blootstelling of aan bijzondere omgevingsomstandigheden. In tabel 3 (p. 41) worden er een aantal cementsamenstellingen voor gebruik bij 3D-printing voorgesteld die geoptimaliseerd werden door de firma Vicat, evenals hun reologische en mechanische eigenschappen.

Kort samengevat laat het gebruik van snelbindend en snelhardend cement en van andere bestanddelen (vliegas, silica fume, bindingsversnellers of andere hulpstoffen) toe om het reologische gedrag te regelen en de bindingstijd van de te printen materialen te verkorten. Er moeten echter wel nog een aantal uitdagingen overwonnen worden om snel zeer hoge constructies te bouwen, aangezien het gewicht van de opeenvolgende lagen een grote druk op de onderliggende lagen uitoefent. Bovendien vereist het 3D-printen een continue materiaaltoevoer. Onderbrekingen van de extrusie en de consistentie van het mengsel kunnen de hechting

⁽⁵⁾ Het gaat hier om een omkeerbaar fysisch fenomeen van colloïdale oorsprong dat niet verward mag worden met de verharding van het materiaal, wat een onomkeerbaar chemisch fenomeen is (thixotroop gedrag, zie § 3.1, p. 11).

tussen de lagen beïnvloeden en aanleiding geven tot de vorming van poreuze zones die de langetermijnduurzaamheid van het geprinte bouwwerk in het gedrang zouden kunnen brengen. Ten slotte dient men de krimp van de mortel in het geval van een te snelle droging te vermijden om het risico op scheurvorming te beperken (zie ook § 6.1, p. 37).

Tabel 3 Voorbeelden van cementsamenstellingen die geotrooieerd werden door Vicat (internationaal octrooipublicatienummer: WO2020/021202A1).

| Referentie van het mengsel | Bestanddeel | | Proportie [massapercent] | Vloeimaat zonder schokken volgens de NBN EN 1015-3 [B9] [mm] | Druksterkte na 28 dagen [MPa] |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|--|-------------------------------|
| E-1 | Premix | Portlandcement CEM I 52,5 R | 28,1 | 175 (zonder bindingsversneller) | 92,1 (met bindingsversneller) |
| | | Kalksteenfiller | 33,2 | | |
| | | Metakaolien | 0,5 | | |
| | | Zand | 38,3 | | |
| | Vloeibare hulpstoffen | Superplasticiserder | 1,6 (bindmiddelpercentage) | | |
| | | Bindingsversneller | variabel | | |
| Water | W/C-factor = 0,48 | | | | |
| E-2 | Premix | Portlandcement CEM I 52,5 R | 17,5 | 152,5 (zonder bindingsversneller) | 86,2 (met bindingsversneller) |
| | | Sulfoaluminaatcement | 7,5 | | |
| | | Kalksteenfiller | 20 | | |
| | | Metakaolien | 5 | | |
| | | Zand | 50 | | |
| | Droge hulpstoffen | Bindingsvertrager | 0,5 (bindmiddelpercentage) | | |
| | | Bindingsversneller | 0,4 (bindmiddelpercentage) | | |
| | Vloeibare hulpstoffen | Superplasticiserder | 1,5 (bindmiddelpercentage) | | |
| | | Bindingsversneller | variabel | | |
| | Water | W/C-factor = 0,55 | | | |

6.3 Karakterisering van de printbare mengsels in verse toestand

Bij gebrek aan genormaliseerde proeven werden er talloze onderzoeken uitgevoerd om een printbare mortel te definiëren en te karakteriseren. Het is van vitaal belang om de printbaarheid van het mengsel vooraf te testen teneinde te controleren of het geschikt is en aldus een blokkering of instorting te voorkomen. Een blokkering in de pompbuis kan namelijk leiden tot aanzienlijke economische verliezen (onverwachte stopzetting van het printproces, demontering van de buizen en materiaalverspilling). Deze onderzoeken bleven beperkt tot de beproefde mengsels en machineparameters. Hieruit kwam naar voren dat de gebruikte printer, de vorm van de spuitmond, het extrusiedebiet en de printsnelheid een invloed hebben op de kwaliteit van de geprinte laag. Aan de hand van het laboratoriumonderzoek was het mogelijk om methodes voor te stellen ter controle van de printbaarheid van de ontwikkelde mengsels op kleine schaal. Elke proefmethode laat toe om één of meerdere karakteristieken van de printbare mortel te verifiëren, zoals de verpompbaarheid, de extrudeerbaarheid of de bouwbaarheid.

Om het debiet en de vloedrempel van het mengsel aan de uitgang van de spuitmond (extrudeerbaarheid) te beoordelen, heeft het Franse laboratorium Navier een test op punt gesteld. Deze bestaat erin om de

vloedrempel van een mengsel te bepalen aan de hand van het gewicht van de druppel die uit de spuitmond komt (zie afbeelding 38). Deze druppel vloeit immers weg en breekt af wanneer de druk van zijn eigengewicht groter wordt dan zijn vloedrempel. Naarmate de massa van de druppel groter is, zal dus ook de vloedrempel van het materiaal hoger zijn. Vervolgens wordt de vloedrempel gecorreleerd met de printbaarheid van het materiaal. Aan de hand van deze proef kan men de printparameters aanpassen in functie van de aan de spuitmonduitgang gemeten vloedrempel teneinde een geslaagde print te waarborgen. Het onderzoek liet tevens toe om theoretische modellen, gebaseerd op de evolutie van de vloedrempel te ontwikkelen, met het oog op de voorspelling van de printbaarheid ervan [P2].

$$\tau_0 = mg/\sqrt{3\pi r^2}$$

waarbij τ_0 staat voor de vloedrempel (in Pa),
 m voor de massa van een druppel (in kg) en
 r voor de straal van de spuitmond (in m)



Afb 38 Principe van de *Slugs-test* ter bepaling van de vloedrempel van de mortel.

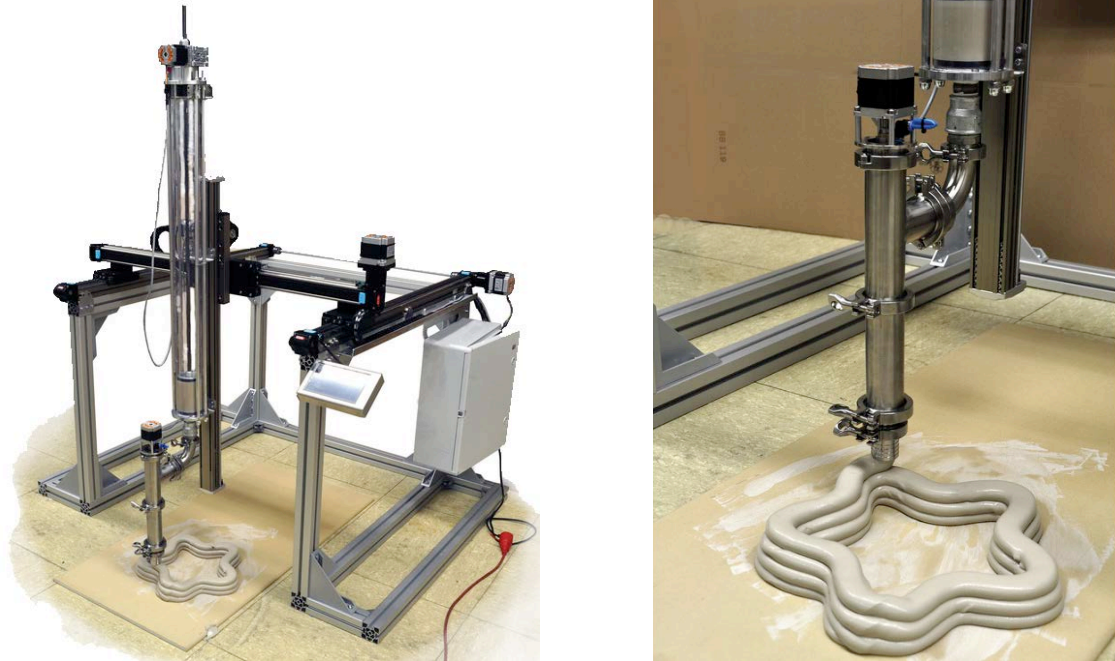
Er zou ook een eenvoudig siliconenpistool gebruikt kunnen worden om de extrudeerbaarheid van een mengsel via een spuitmond met een vooraf gedefinieerde afmeting manueel te controleren, zoals voorgesteld in afbeelding 39.

Daarnaast kan er een penetratietest (Fall cone, Vicat ...) uitgevoerd worden om de bouwbaarheid van een mengsel te beoordelen. De Vicat-proef bestaat er bijvoorbeeld in om de bindingstijd te bepalen aan de hand van de penetratiediepte van een naald in de mortel. De naald dringt na verloop van tijd alsmaar minder diep in de mortel door, wat de hydratatiekinetiek van het cement weerspiegelt.



Afb. 39 Siliconenpistool, gebruikt om de extrudeerbaarheid van het printbare mengsel te testen (links) en voorbeeld van lagen die met dit pistool geprint werden (rechts).

Binnen bepaalde laboratoria werden er kleine printers ontwikkeld om de extrudeerbaarheid en de bouwbaarheid van een mengsel te onderzoeken vóór het printen ervan op grote schaal. Afbeelding 40 illustreert de printer op laboratorioschaal die gebruikt wordt bij Buildwise.



Afb. 40 3D-printer op laboratorioschaal die gebruikt wordt bij Buildwise.

Aan de hand van alle gevoerde onderzoeken was het mogelijk om twee bijkomende specifieke termen te koppelen aan de mortels die bestemd zijn voor 3D-printing, met name de **printbaarheidsgrens** en de **blokkeringsgrens**. De printbaarheidsgrens is de langste periode gedurende welke een mengsel geprint kan worden met een aanvaardbare printkwaliteit. De blokkeringsgrens is de langste periode gedurende welke een mengsel in de spuitmond kan blijven vooraleer de mortel stijf wordt en de extrusie blokkeert. Deze twee grenswaarden zouden idealiter voor elk specifiek mengsel gemeten en gerapporteerd moeten worden.

6.4 Mechanische prestaties van de geprinte elementen

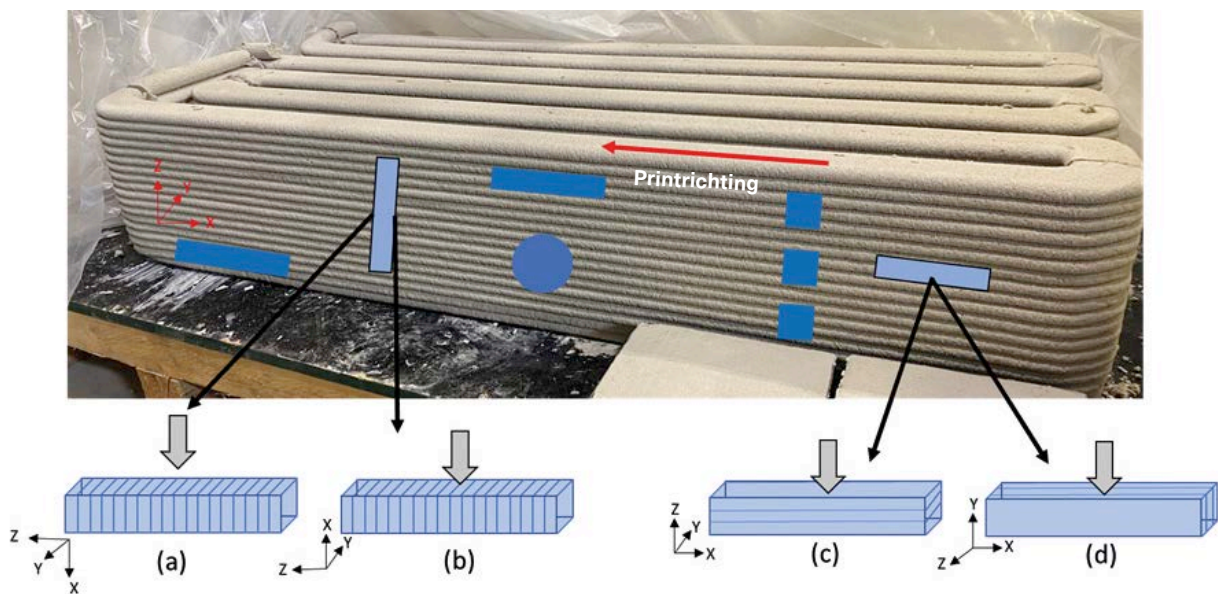
Ter plaatse gestort beton vertoont een redelijk isotroop mechanisch gedrag⁽⁶⁾. Elementen uit geprinte mortel worden daarentegen gekarakteriseerd door een anisotroop mechanisch gedrag, wat betekent dat de mechanische prestaties afhankelijk zijn van de belastingsrichting ten opzichte van de printrichting. Deze anisotropie is te wijten aan de heterogeniteiten ten gevolge van de luchtholtes en de hechting tussen de opeenvolgende lagen. Indien de hechting tussen de lagen van goede kwaliteit is, dan zou dit de anisotropie kunnen minimaliseren en kunnen leiden tot een quasi-isotroop gedrag. De mechanische prestaties van de geprinte elementen hangen bijgevolg af van de machineparameters (snelheid van verplaatsing van de printkop, debiet ...).

Bovendien zorgt de gelaagde structuur ten gevolge van het laagsgewijs printen voor een variatie van de mechanische prestaties (druksterkte, buigsterkte en treksterkte) in de drie assen die respectievelijk gedefinieerd worden door de depositierichting, de breedte van de laag en de hoogte van het geprinte element (respectievelijk x, y en z in afbeelding 41, p. 44). De karakteristieken binnen de gedeponeerde strook verschillen immers van de karakteristieken tussen de stroken, wat ertoe leidt dat de mechanische prestaties, gemeten op stalen

⁽⁶⁾ Isotropie kenmerkt de onveranderlijkheid van de fysische eigenschappen van een medium in functie van de richting.

die genomen worden op verschillende plaatsen in een geprint element en volgens verschillende richtingen, van elkaar kunnen afwijken. De geprinte mortel vertoont dus ook een orthotroop gedrag⁽⁷⁾.

Het gebruik van de genormaliseerde proefmethodes voor traditioneel beton en traditionele mortel is niet noodzakelijk geschikt voor geprinte constructies. Het is dus noodzakelijk om de bestaande normen te herzien of om nieuwe reglementeringen in te voeren teneinde de mechanische prestaties van geprinte mortel te kunnen bestuderen. Daarnaast is de mate van orthotropie van een geprinte constructie van essentieel belang bij de beoordeling van het globale mechanische gedrag ervan. Daarom is het essentieel om stalen of boorkernen te nemen op verschillende plaatsen en in verschillende richtingen en deze te beproeven volgens verschillende oriëntaties, zoals geïllustreerd in afbeelding 41. De aldus gemeten karakteristieken zouden vervolgens vergeleken kunnen worden met deze, verkregen op hetzelfde materiaal dat uitgevoerd werd door vormgieten (isotroop gedrag).



Afb. 41 Ontnemen van boorkernen in een geprint element voor het onderzoeken van de mechanische en duurzaamheidskarakteristieken ervan.

De geprinte mortels zouden hogere mechanische prestaties kunnen vertonen dan dezelfde in mallen gestorte mortels. Dit zou verklaard kunnen worden door het positieve effect van de extrusie op de dichtheid van de mortel (vermindering van de totale porositeit).

In het algemeen worden de hoogste druksterktes opgemeten wanneer de belasting loodrecht aangrijpt op de printrichting bij prisma's die ontnomen werden in de stortrichting (zie afbeelding 41(c)). De porositeit van het hechtingsvlak tussen twee lagen is immers hoger dan deze in de printlaag. De geprinte elementen uit stortklare mortel vertonen in principe een hogere druksterkte (50 tot 90 MPa) dan elementen uit traditioneel beton (30 tot 45 MPa). De buigsterkte vertegenwoordigt ongeveer 10 à 15 % van de druksterkte. Geprinte elementen die onderhevig zijn aan buiging of aan trek moeten dus gewapend worden, wat moeilijk te integreren is in het printproces (zie § 5.3, p. 26).

⁽⁷⁾ Bijzonder geval van anisotropie. Een materiaal is orthotroop wanneer het drie onderling loodrechte symmetrievlakken heeft. De mechanische karakteristieken ervan zijn verschillend en onafhankelijk in deze drie onderling loodrechte richtingen.

7. Printmachines ten dienste van het 3D-bouwen

De belangrijkste functie van de printmachine is om de printkop te leiden volgens de in een besturingssoftware geprogrammeerde instructies (specifiek traject en welbepaalde precisie en printsnelheid). In de regel wordt de opstelling vervolledigd door een silo met droog materiaal en een mortelpomp. Er bestaan drie types extrusieprintmachines (zie ook § 3.1, p. 11): machines met een portaal, met hendels en met een robotarm.

Tegenwoordig zijn deze printers verkrijgbaar in verschillende formaten:

- kleine machines. Deze zijn speciaal ontworpen voor laboratoriumwerk (zie afbeelding 40, p. 43) en laten toe om elementen van slechts enkele centimeters groot te printen. Ze worden voornamelijk gebruikt voor pedagogische en wetenschappelijke doeleinden (bv. om printbare samenstellingen te ontwikkelen of bepaalde machineparameters te testen)
- grote machines. Deze zijn bestemd voor het printen op grote schaal in de fabriek of op de bouwplaats. In dit laatste geval moet de printer transporteerbaar en redelijk gemakkelijk te monteren en te demonteren zijn.

Wat het printen op grote schaal betreft, zijn er op de markt een aantal machines beschikbaar waarvan de keuze voornamelijk afhankelijk is van de toepassingen, hun mobiliteit op de bouwplaats, hun printbereik en de complexiteit van de te printen vormen.

In tabel 4 worden er een aantal machines voorgesteld die gebruikt worden bij het 3D-bouwen. Naast deze machines (gemaakt door Concrenetics, CyBe Construction, Constructions-3D, WASP, COBOD en Apis Cor), zijn er nog andere producenten zoals BetAbram, Batiprint3D, MudBots 3D Concrete Printer, BAAM, AMT, XtreeE, Vertico en ICON die machines aanbieden voor het 3D-printen van beton.

Tabel 4 Voorbeelden van 3D-extrusieprintmachines en hun voornaamste karakteristieken.

| Bedrijf (land) | Machine | Type | Printbare oppervlakte (printvolume) | Verenigbare materialen | Maximale verplaatsings-snelheid van de printkop [mm/s] | Toepassingen |
|--------------------------------------|--------------|-------------------------------|---|--|--|---|
| Concrenetics (België) | One-X | Robotarm met 6 assen | Overspanning 3,2 m en printvolume 2,4 x 2,4 x 3,0 m ³ | Printbare premix Cantillana en andere mortels | 600 | Geprefabriceerde elementen (bv. stadsmeubilair) |
| CyBe Construction (Nederland) | G | Met een portaal | 7 (lengte) x 10 (breedte) x 4 (hoogte) m ³ | Printbare premix CyBe Construction (CyBe MORTAR) en andere mortels | 250 | Redelijk grote geprefabriceerde elementen (bv. huizen) |
| | GR | Met een portaal | 7 (lengte) x 10 (breedte) x 4 (hoogte) m ³ | | | <i>In situ</i> printen van redelijk grote elementen (bv. huizen) |
| | R | Robotarm met 6 assen | 2,65 m (omtrek) x 3,2 m (hoogte) | | 500 | Redelijk kleine geprefabriceerde elementen (bv. stadsmeubilair) |
| | RC | Robotarm met 6 assen | 5 m (omtrek) x 3,2 m (hoogte) | | | <i>In situ</i> printen van redelijk kleine elementen (bv. stadsmeubilair en kleine volumes) |
| | RT | Robotarm met 6 assen | 5 (minimale lengte) x 2,5 (breedte) x 4 (hoogte) m ³ | | | Redelijk kleine geprefabriceerde elementen (bv. stadsmeubilair) |
| Constructions-3D (Frankrijk) | Maxi Printer | Telescopische arm met 4 assen | 10 m (hoogte) en 9,5 m (lengte van de arm/straal) | Mortel | 300 | Huizen en constructies <i>in situ</i> |
| WASP (Italië) | Big Delta | Delta | 12 m (hoogte) x 6 m (omtrek) | Natuurlijke en cementgebonden materialen | 400 | Huizen en constructies <i>in situ</i> |
| COBOD (Denemarken) | BOD2 | Met een portaal | 49,4 (maximale lengte) x 14,6 (breedte) x 8,1 (hoogte) m ³ | Cementgebonden materialen: mortel en microbeton (D _{max} = 10 mm) | 1000 | Huizen en constructies <i>in situ</i> |
| Apis Cor (VS) | Frank | Kraan | 3,2 m (hoogte) en 5,5 m (straal) | Mortel | 333 | Huizen en constructies <i>in situ</i> |

Concrenetics: *One-X industry*

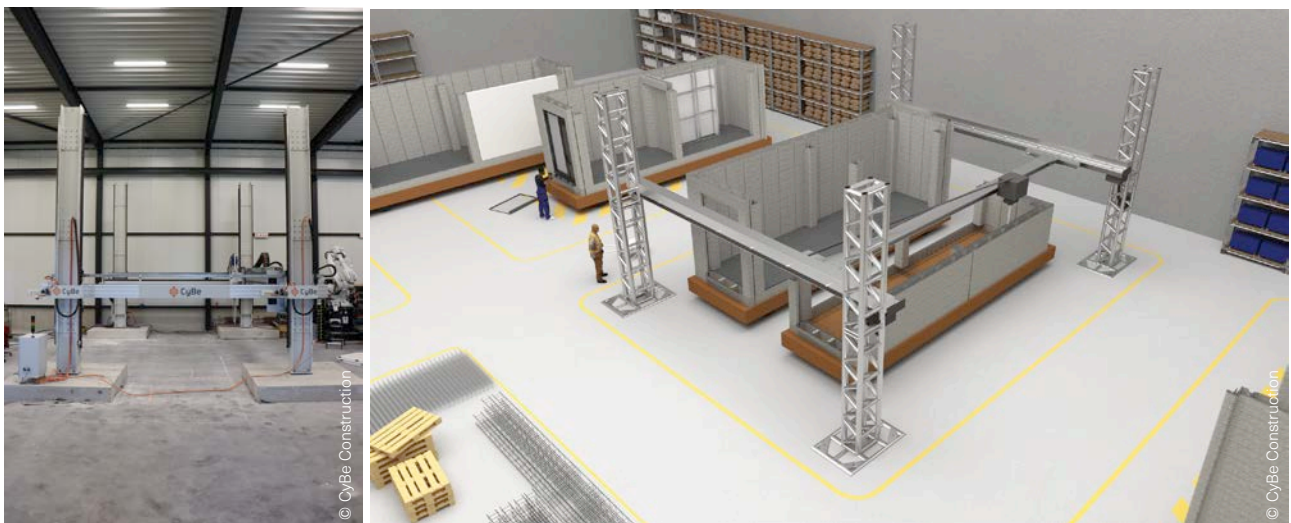
Het Belgische bedrijf Concrenetics heeft een machine ontwikkeld die toelaat om geprefabriceerde elementen zoals elementen voor stadsmeubilair in de fabriek te printen (zie afbeelding 42). Het gaat hier om een robotarm met zes assen (ABB IRB6700) met een overspanning van 3,2 m die geïntegreerd is in het *One-X*-systeem. Dit laatste bestaat uit een silo die tot 1200 kilo droog materiaal (printbaar mengsel) kan bevatten en aldus toelaat om tot 600 liter geprinte mortel te produceren, een mortelpomp, een robotarm en een printkop. Deze kop is uitgerust met een dynamische menger en biedt de mogelijkheid om een hulpstof (bindingsversneller) toe te voegen vlak vóór de extrusie. Het systeem is voorzien van een barrière met toegangscontrole om in alle veiligheid te kunnen werken. Het printvolume bedraagt 2,4 x 2,4 x 3,0 m³. Er is een optionele railverlenging verkrijgbaar om de capaciteit van het systeem te vergroten (bredere printzone).



Afb. 42 *One-X Industry*-systeem (links) en voorbeeld van een element dat met dit systeem geprint werd bij Buildwise (rechts).

CyBe Construction: systemen *G*, *GR*, *R*, *RC* en *RT*

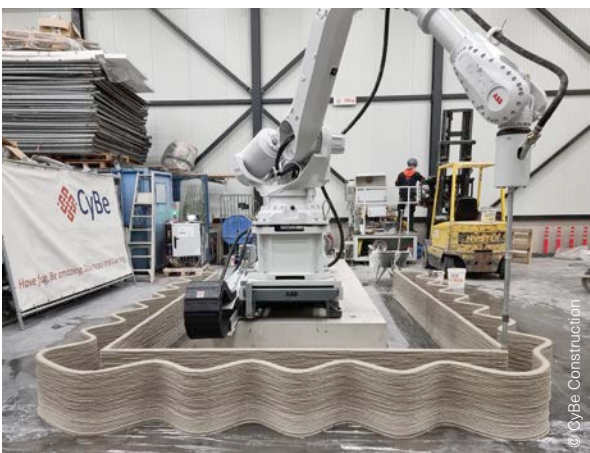
Het Nederlandse bedrijf CyBe Construction biedt printers van verschillende types aan: met een portaal (*G* en *GR*) en met een robotarm (*R*, *RC* en *RT*) (zie afbeeldingen 43a, 43b (p. 47) en 43c (p. 47)). De printers met een portaal en de printer met een robotarm *R* zijn vast. De gerobotiseerde printers beschikken over een robotarm met zes assen (ABB). De modellen *RC* en *RT* zijn mobiel, omdat ze respectievelijk op rupsbanden (*RC*) en op een rail (*RT*) geplaatst zijn, waardoor ze gemakkelijk van de ene bouwplaats naar de andere verplaatst kunnen worden. CyBe Construction heeft bovendien *CyBe MORTAR* ontwikkeld, een speciaal mengsel dat aangepast is aan hun printers. Dit neemt echter niet weg dat hun machines ook compatibel kunnen zijn met andere mortels.



Afb. 43a De printers *CyBe G* (Gantry) en *CyBe GR* (Gantry Robot) van CyBe Construction – <https://cybe.eu/>.



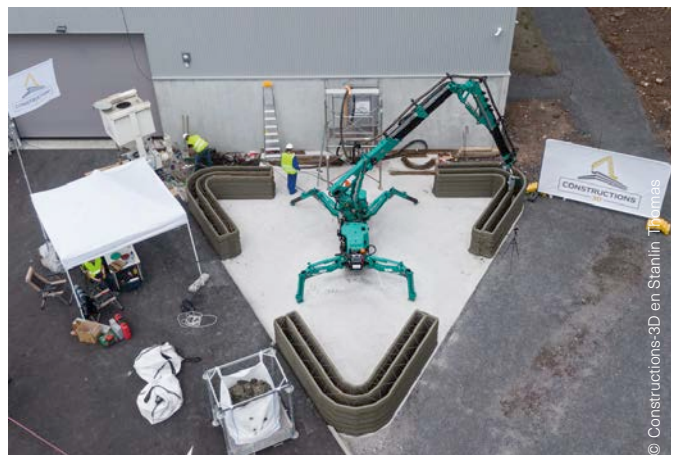
Afb. 43b De printers *CyBe R (Robot)* en *CyBe RC (Robot Crawler)* van CyBe Construction – <https://cybe.eu/>.



Afb. 43c De printer *CyBe RT (Robot Track)* en voorbeeld van een constructie die in Nederland geprint werd door de robot *CyBe RC* – <https://cybe.eu/>.

Constructions-3D: *Maxi Printer*

De 3D-printer *Maxi Printer* werd ontwikkeld door het Franse bedrijf Constructions-3D (zie afbeelding 44). Het gaat hier om een printer op grote schaal die opgebouwd is uit een telescopische arm met vier assen en die geoptimaliseerd werd voor gebruik op de bouwplaats. Voor onderzoeks- en ontwikkelingswerk biedt het bedrijf een kleinere machine, de *Mini Printer*, aan. Deze laat toe om bouwelementen met afmetingen tot 66 x 52 x 70 cm³ te printen.



Afb. 44 De printmachine *Maxi Printer* die ontwikkeld werd door Constructions-3D.

WASP: *Big Delta*

Het Italiaanse bedrijf WASP (*World's Advanced Saving Project*) heeft twee printmachines op grote schaal ontworpen: de *Crane* (zie § 4.2, p. 18 en afbeelding 16, p. 20) en de *Big Delta*. De *Big Delta* is een printmachine van 12 meter hoog met een omtrek van zes meter (zie afbeelding 45). Ze ziet eruit als een grote stelling die in haar midden een printkop ondersteunt. De robot heeft een mobiel uiteinde dat geleid wordt door drie parallellogrammen en de motoren zijn bevestigd aan het kader. Dit is een groot verschil ten opzichte van de traditionele seriële robots, waarbij de aandrijfmotoren met de verschillende geledingen mee verplaatsen, wat de bewegingen sterk vertraagt. In het geval van de *Big Delta* zorgen de aan het kader bevestigde motoren ervoor dat het mobiele gedeelte lichter wordt. Zodoende kan de machine zich verplaatsen met minder krachtige motoren. Hoewel de machine ontworpen werd om te printen met lokaal beschikbare natuurlijke grondstoffen zoals klei en modder, is ze ook verenigbaar met cementgebonden materialen.



Afb. 45 3D-printmachine *Big Delta*.

COBOD: *BOD2*

De Deense firma COBOD heeft recentelijk de *BOD2* voorgesteld, een verbeterde versie van de printer *BOD1*. Het gaat hier om een printer met een portaal die speciaal ontworpen werd om te printen op de bouwplaats (zie afbeelding 46). Het systeem kan in alle richtingen uitgebreid worden met modules, tot een maximum van 49,4 meter lang, 14,6 meter breed en 8,1 meter hoog. Kamp C, het provinciale centrum voor duurzame ontwikkeling en innovatie in de bouw, heeft deze machine gebruikt om in Westerlo een huis met twee verdiepingen te printen.



Afb. 46 *BOD2*-printer (links) en huis dat door de *BOD2* geprint werd bij Kamp C (rechts).

Apis Cor: Frank

De Amerikaanse *start-up* Apis Cor heeft een mobiele printer met de naam *Frank* ontwikkeld waarmee het mogelijk is om huizen *in situ* te printen (zie afbeelding 47). Het gaat hier om een draagbare printer die leverbaar is op de bouwplaats. De machine ziet eruit als een kraan die op een mobiel platform (rups) gemonteerd is. Ze is voorzien van een verwijderbare arm die een maximale hoogte van 3,2 meter en een printstraal van 5,5 meter kan bereiken. Om hogere gebouwen te printen, kan de machine verplaatst worden naar een hogere verdieping of geïnstalleerd worden op een verhoogd platform.



Afb. 47 De printer *Frank* die ontwikkeld werd door Apis Cor.

8. Voorbeelden van toepassingsgebieden

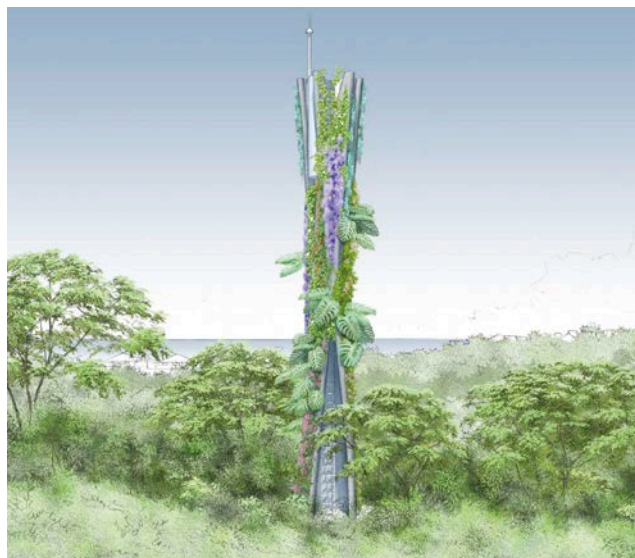
Uit verschillende projecten en realisaties is gebleken dat er in de bouw talloze toepassingsmogelijkheden zijn voor het 3D-extrusieprinten van cementgebonden materialen. Dankzij de ontwikkeling van 3D-printers op grote schaal werd het mogelijk om constructies op ware grootte te printen. Op enkele uitzonderingen na, bleef het 3D-printen in de bouw echter steeds beperkt tot niet-structurele toepassingen. Bepaalde projecten, zoals kleine en middelgrote huizen en kantoren, kunnen ter plaatse geprint worden met behulp van transporteerbare printers (zie hoofdstuk 7, p. 45). Andere projecten, zoals stadsmeubilair, trappen en gevelementen, kunnen in de fabriek geprint worden in een gecontroleerde omgeving (geprefabriceerde elementen) waarna ze op de bouwplaats geïnstalleerd of geassembleerd kunnen worden. Naast de structuur van huizen (buiten- en binnenmuren), een aspect dat reeds uitvoerig belicht werd in de voorgaande hoofdstukken, worden er hierna een aantal 3D-geprinte elementen en bouwwerken voorgesteld om het gebruik van deze innovatieve technologie op grote schaal te illustreren. De voorbeelden kunnen in drie categorieën ingedeeld worden:

- verloren bekistingen
- niet-structurele toepassingen (ingegraven constructies, stadsmeubilair, gevelementen, kunstmatige riffen ...)
- structurele toepassingen (dragende muren, voetgangersbruggen, trappen, sokkels voor windmolens ...).

8.1 Verloren bekistingen

De 3D-geprinte elementen uit mortel kunnen dienen als bekisting waarin het beton met wapening gestort kan worden. Ze maken dus integraal deel uit van de structuur onder de vorm van een verloren bekisting.

Deze techniek kan toegepast worden op pylonen, zoals deze die gebruikt worden ter ondersteuning van – door gaans stalen – telecommunicatieantennes. Zo werd er een 12 meter hoge boomvormige pyloon gerealiseerd door het printen en samenvoegen van zes bekistingen met segmenten van telkens twee meter (zie afbeelding 48). De segmenten zullen voorzien worden van een beplanting zodanig dat ze kunnen opgaan in het landschap. Om de volledige structuur te vormen, worden de verschillende in de fabriek geprinte modules op elkaar gestapeld. Het geheel wordt samengehouden door stalen kabels die ingebracht worden via met een vezelversterkte ultrahogesterktebetonspecie verzegelde kokers, en die maximaal aangespannen worden door vijzels. De verloren bekisting blijft ter plaatse en doet dienst als een beschermende huid voor het ingestorte beton.



Afb. 48
12 meter hoge pyloon die gerealiseerd werd door het printen en samenvoegen van zes bekistingen met segmenten van twee meter.

© Art&Fact Innovation, XtreeE, Lamoureux, Ricciotti Ingénierie, LafargeHolcim, Jardins de Babylone, Freyssinet.

Afbeelding 49 toont de mallen die gebruikt werden voor de buitenkolommen van de gevel van de YRYS-woning in Alençon (Frankrijk). Deze mallen werden in de fabriek geprint, naar de bouwplaats getransporteerd en vervolgens opgevuld met ultrahogesterktebeton om hun structurele functie te waarborgen.



© Maison France Confort, LafargeHolcim, XtreeE, Coste Architecture, Fehr Architectural.

Afb. 49 3D-geprinte mallen voor buitenkolommen.

8.2 Niet-structurele toepassingen

In samenwerking met Point P Travaux Publics en SADE heeft XtreeE ingegraven constructies ontwikkeld met behulp van 3D-geprinte mortel. Het gaat om een stormoverloop (zie afbeelding 50) en toezichtsputen. De elementen werden geprint in de ateliers van XtreeE en vervolgens vervoerd naar en geïnstalleerd op de bouwplaats. In Rouen (Frankrijk) heeft XtreeE, in samenwerking met GTM Normandie Centre, een aanzetplaat voor een tunnelboormachine in mortel geprint. Dergelijke platen worden traditioneel uitgevoerd in metaal (zie afbeelding 51, p. 52). De plaat zelf werd deels in de fabriek vervaardigd en deels ter plaatse gestort. Er werd een ring in de exacte vorm geprint die voorzien werd van uitsparingen of 'oren' om het storten van het gewapende beton en de inwerking ervan in een geprefabriceerde betonplaat toe te laten. Deze plaat werd vervolgens op haar definitieve positie geplaatst, waarna de ruimte tussen de uitgegraven wanden en de plaat opgevuld werd met stortbeton.

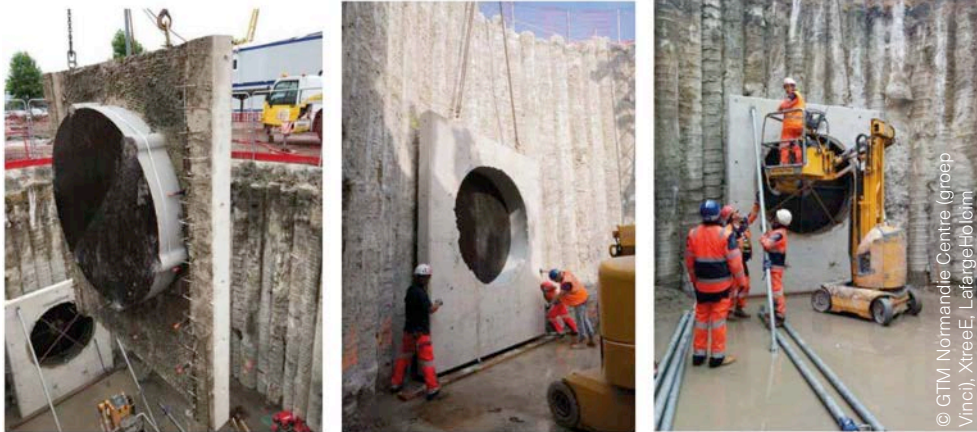


© Métropole européenne de Lille (MEL), Point P TP (groep Saint-Gobain), XtreeE, Artelia, SADE (groep Veolia), LafargeHolcim.

Afb. 50 Stormoverloop die geïnstalleerd werd bij La Madeleine in Lille (Frankrijk).



© GTM Normandie Centre (groep Vinci), XtreeE, LafargeHolcim

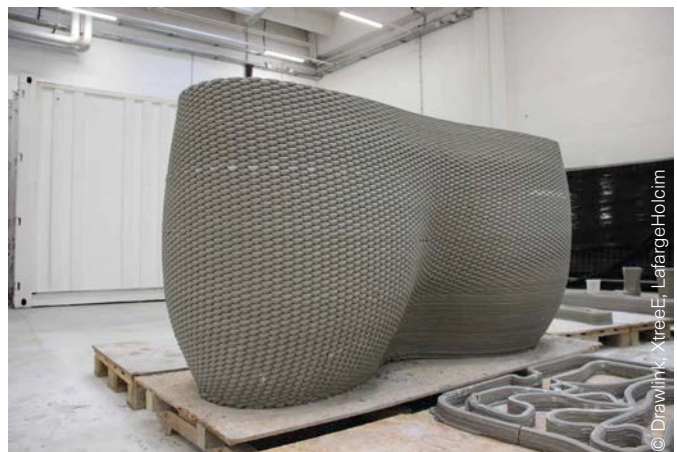


© GTM Normandie Centre (groep Vinci), XtreeE, LafargeHolcim

Afb. 51 Aanzetplaat van een tunnelboormachine in Rouen (Frankrijk).

Eén van de populairste toepassingen van 3D-printen is het maken van meubels, decoraties met complexe vormen en stadsmeubilair. In de afbeeldingen 52a en 52b (p. 53) worden er een aantal voorbeelden van in de fabriek geprinte en vervolgens binnenshuis geplaatste elementen voorgesteld.

In de afbeeldingen 53a (p. 53) en 53b (p. 54) worden dan weer voorbeelden gegeven van 3D-geprinte elementen die buitenshuis op openbare plaatsen opgesteld zijn.



© Drawink, XtreeE, LafargeHolcim

Afb. 52a Receptiebalie.



Afb. 52b Door Buildwise geprinte en in het Buildwise-gebouw in Zaventem geïnstalleerde elementen. Plantenbak met een diameter van 1,1 meter (links) en tafelhoet (rechts).



A



B



C



D

Afb. 53a Voorbeelden van 3D-geprint stadsmeubilair en van 3D-geprinte decoratieve elementen. Bloempotten (A), moestuin (B), plantenbakken en stadsbanken (C) en picknicktafel (D).



Afb. 53b Voorbeelden van 3D-geprint stadsmeubilair en van 3D-geprinte decoratieve elementen.

Buildwise wou voor de omgeving van zijn nieuwe demonstratiegebouw (gewijd aan het stimuleren van de toepassing van digitale technologieën in de bouwsector) ruimtes met een natuurlijke uitstraling creëren door gebruik te maken van moderne organische vormen. Zestien elementen uit mortel, waarvan er een aantal geprint werden bij Buildwise en bepaalde andere bij Concrenetics, omkaderen de buitentrap van het gebouw (zie afbeelding 54). Het ontwerp gebeurde door het architectenbureau AAVA. Deze holle elementen doen dienst als plantenbakken en banken.



Afb. 54 Elementen ter omkadering van de buitentrap van het nieuwe Buildwise-gebouw te Limelette.

Gevelelementen zijn andere voorbeelden van niet-structurele 3D-geprinte constructies. Zo heeft BESIX 3D de gevel van de uitbreiding van zijn zetel in Dubai geprint. Deze gevel is opgebouwd uit 290 panelen die in een laboratorium geprint en ter plaatse geassembleerd werden (zie afbeelding 55).

Een ander project, geleid door Ifremer (het Franse onderzoeksinstituut voor de exploitatie van de zee), was gericht op het creëren van kunstmatige kweekplaatsen voor vissen in de haven van Toulon (Frankrijk). Hiertoe werden er kunstmatige wierbanken (in polypropyleen nagebootste *posidonia*) geplaatst op mortelblokken die door het Franse bedrijf Seaboost 3D-geprint werden. De blokken fungeren als holtes ter beschutting van kleine vissen en ter herstelling van de biodiversiteit in ontwikkelde zeegebieden. Naast deze kweekplaatsen heeft Seaboost in het kader van het project Récif'Lab voor de kust van Agde (Frankrijk) een aantal biomimetische kunstmatige onderzeese 3D-riffen ingehuldigd om het ecologische herstel en de herwinning van de mariene biodiversiteit aan te moedigen (zie afbeelding 56). In dit project werden het 3D-mengsel van Vicat en de 3D-printtechnologie van XtreeE toegepast.

Tot slot wordt er binnen een onderzoeksproject onder leiding van de Universiteit Gent, het bouwbedrijf BESIX, de *start-up* ResourceFull en het ingenieursbureau Witteveen+Bos gewerkt aan de ontwikkeling van duurzame betonmengsels die geschikt zijn voor het printen van golfbrekerblokken. Het belangrijkste voordeel van het *in situ* printen van dergelijke elementen is dat deze werkwijze de kosten die gepaard gaan met de logistieke middelen voor hun vervoer van het productieatelier naar de bouwplaats zo goed als volledig tenietdoet. Bovendien laat het 3D-printen toe om golfbrekers op maat te maken, met complexere vormen die perfect aangepast zijn aan de lokale golfpatronen en zeestromingen. De grootste uitdaging ligt in het verzekeren van de duurzaamheid van de elementen in een zoutbelaste omgeving.



Afb. 55
3D-geprinte gevel uit mortel.



Afb. 56
Riffen uit 3D-geprinte mortel voor de kust van Agde (Frankrijk).

© Aire marine protégée du Cap d'Agde, Seaboost, XtreeE, Vicat

8.3 Structurele toepassingen

In het kader van het universitaire onderzoeksproject Démocrite, dat op poten gezet werd door het Franse bedrijf XtreeE, werd er een 1,6 meter hoge dragende muur en een generiek element met structurele en akoestische prestaties geprint met behulp van een hogesterktebeton (zie afbeelding 57, p. 56). De muur heeft een dubbele sinusoidale inwendige structuur: de eerste, op een dwarsas, doet denken aan een sandwichpaneel. De tweede, die de verticale as volgt, zorgt voor een vermindering van de koudebruggen door de contactpunten te beperken.



© Clément GOSSSELIN: diploma 2015 ENSAPM Digital Knowledge, in samenwerking met Philippe ROUX, Romain DUBALLET en Nadja GAUDILLIERE. Philippe MOREL en Jean Aimé SHU. Onderzoeksproject Démocrite, EZCT Architecture & Design Research, Lafarge, PIMM, ENSAM, HAL, Nicolas Lecoq, XtreeE

Afb. 57 3D-geprinte elementen uit hogesterktebeton.

Binnen het Nederlandse bedrijf Twente Additive Manufacturing werden er dan weer steunmuren geprint in een fabrieksomgeving die aangepast waren aan de bestaande natuurlijke contouren. Deze steunmuren werden vervolgens naar de bouwplaats getransporteerd (zie afbeelding 58).



© Twente Additive Manufacturing

© Twente Additive Manufacturing

Afb. 58 3D-geprinte steunmuren.

In Nijmegen (Nederland) werd er ten slotte een 3D-geprinte voetgangers- en fietsersbrug in gebruik genomen (zie afbeelding 59, p. 57). Dit project is het resultaat van een samenwerking tussen Witteveen+Bos, de Technische Universiteit Eindhoven (Nederland), het Nederlandse Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en ontwerper Michiel van der Kley. De brug is 29 meter lang en bestaat uit 30 elementen die geprint werden in het 3D-printcentrum van Saint-Gobain Weber Beamix. Deze werden vervolgens ter plaatse geassembleerd en met staalkabels bij elkaar gehouden. Het gaat hier niet om vaste, uniforme materiaallagen, maar om vermaasde structuren. Het ontwerp gebeurde aan de hand van een parametrische ontwerpsoftware (creatie van een model waarbij verschillende parameters gewijzigd kunnen worden) wat onder meer toeliet om het materiaal en de printtijd te optimaliseren in functie van de aangrijpende belastingen (verkeer, gewicht ...).

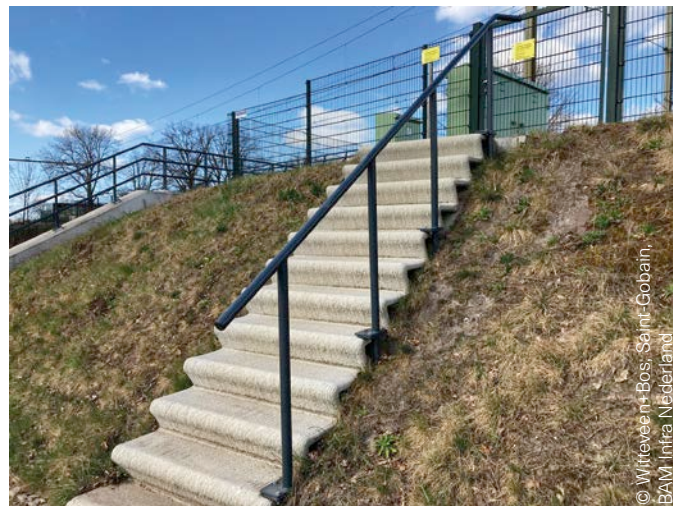
Net zoals het geval is voor bruggen, lijkt er tegenwoordig ook veel belangstelling te zijn voor 3D-geprinte trappen. De oppervlaktetextuur (aanwezigheid van lagen) die inherent is aan het 3D-extrusieprintprocedé zorgt voor een natuurlijke antisliplaag die het risico op vallen vermindert. Zo heeft BAM Infra Nederland enkele 3D-geprinte trappen geïnstalleerd (zie afbeelding 60, p. 57). Dit project werd uitgevoerd in samenwerking met Saint-Gobain Weber Beamix, Bekaert en het Nederlandse advies- en ingenieursbureau Witteveen+Bos. Het gaat hier om trappen die aangebracht moesten worden op een talud en waarvoor een parametrisch ontwerp bijzonder geschikt leek te zijn. Zo biedt de 3D Printing Business Unit van Saint-Gobain Weber bijvoorbeeld een nieuwe digitale *tool* aan waarmee de klanten zelf trappen op maat kunnen ontwerpen. Deze kunnen dan

nauwkeurig gereproduceerd worden en vervolgens opgetrokken worden in om het even welke natuurlijke hellende omgeving. De parametrische modellering die in dit geval gebruikt werd, zou kunnen leiden tot een bredere toepassing van deze *tool* in de additieve productie.

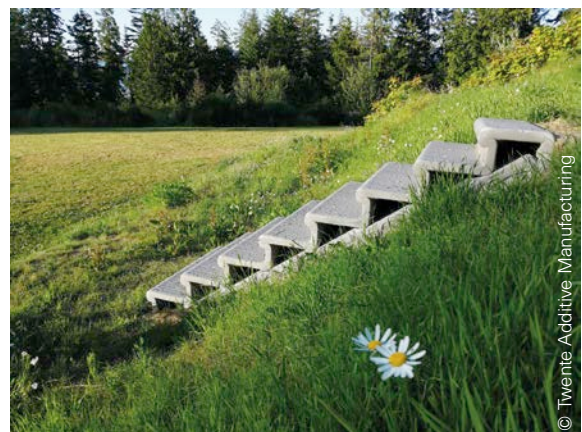
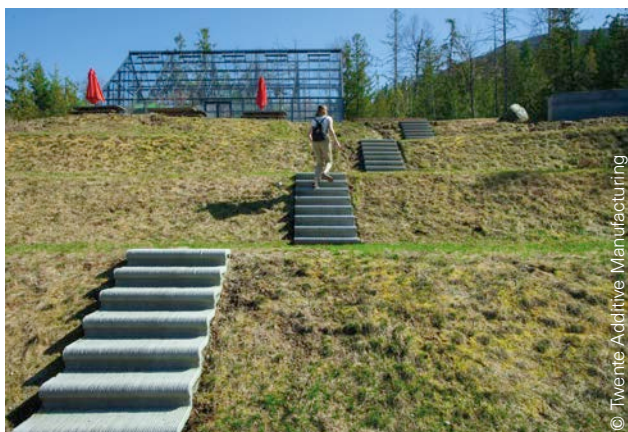
Een ander voorbeeld is de trap die geprint werd door het Nederlandse bedrijf Twente Additive Manufacturing (zie afbeelding 61).



Afb.59 3D-geprinte voetgangers- en fietsersbrug in Nijmegen (Nederland).



Afb. 60 Trap uit geprinte mortel.



Afb. 61 Trap uit geprinte mortel.

In Malawi is er reeds lang een groot gebrek aan scholen. In het kader van zijn gezamenlijke project met 14Trees, een *joint venture* tussen Holcim en de CDC Group, heeft het Deense bedrijf COBOD met zijn 3D-printer *BOD2 in situ* de structuur van een school geprint (zie afbeelding 62). Het uiteindelijke gebouw heeft een oppervlakte van 56 m².

Omdat de sokkels van windmolens doorgaans over de weg vervoerd worden, mogen deze niet groter zijn dan 4,5 meter, waardoor de hoogte van de turbinemasten beperkt blijft tot minder dan 100 meter. Door ter plaatse geoptimaliseerde sokkels voor windmolens te printen, moet het mogelijk worden om masten van 150 tot 200 meter hoog te bouwen teneinde sterkere winden op te vangen en zodoende hun rendement te verhogen. Momenteel genereert een turbine van vijf megawatt met een hoogte van 80 meter 15,1 GWh per jaar. Dezelfde turbine met een hoogte van 160 meter zou 20,2 GWh kunnen produceren, wat 33 % meer is. In Kopenhagen (Denemarken) werd er een prototype van een tien meter hoge sokkel geprint (zie afbeelding 63).



Afb. 62 School in Malawi die opgetrokken werd door 3D-printing.



Afb. 63 3D-geprinte sokkel voor een windmolen.

9. Conformiteit en intellectuele eigendom bij het 3D-printen

9.1 Het op de markt brengen en conformiteit

De CE-markering op bouwproducten geeft aan dat ze beoordeeld werden en dat de producent een prestatieverklaring opgesteld heeft. Deze stelt de lidstaten in staat om te controleren of de prestaties van het product voldoen aan de reglementaire criteria die zij voor hun bouwwerken gespecificeerd hebben. Deze markering is verplicht voor het op de markt brengen en het vrije verkeer van bouwproducten binnen de Europese Unie. De uitwerking van technische regels voor deze producten heeft geleid tot de introductie van geharmoniseerde normen met een bijlage ZA m.b.t. de CE-markering (zie de [CEN](#)-website). Voor producten die niet onder geharmoniseerde normen vallen of die hiervan afwijken, d.w.z. de meeste innovatieve, unieke of complexe producten en kits, kunnen de producenten een Europese Technische Beoordeling aanvragen (zie de [EOTA](#)- en [BUtgb](#)-websites).

Elk gefabriceerd product dat reeds onder een geharmoniseerde norm valt (bv. de norm NBN EN 197-1 [B6] voor cement) moet de CE-markering dragen wanneer het op de markt gebracht wordt. Dit is echter zelden het geval voor innovatieve producten die nog geen tijd hebben gehad om zichzelf te bewijzen. Gelet op het feit dat ze sterk verschillen van de traditionele producten, is het gebruik ervan in bouwsystemen meestal niet gedocumenteerd. Printbare premix is bijvoorbeeld een product dat vooralsnog niet onder een norm valt. Indien de producent zijn materiaal op de markt wil brengen in één of meerdere lidstaten van de Europese Unie, dan kan hij stappen ondernemen om een Europese Technische Beoordeling (ETB)⁽⁶⁾ te verkrijgen. Een dergelijke ETB wordt afgeleverd door een technische beoordelingsinstantie en laat toe om de CE-markering voor innovatieve producten te verkrijgen. Ze bevat de productprestaties die overstemmen met de essentiële karakteristieken die de producent en de technische beoordelingsinstantie overeengekomen zijn voor het beoogde gebruik, evenals de technische details die nodig zijn voor de implementatie van het beoordelingssysteem en de verificatie van de prestatiebestendigheid. De essentiële karakteristieken maken het voorwerp uit van een *Declaration of Performance* (DoP), waardoor de CE-markering op het product aangebracht kan worden.

Geprefabriceerde producten die onder een geharmoniseerde Europese norm vallen, moeten dus de CE-markering dragen. Betonnen afsluitingen waren de eerste geprefabriceerde betonproducten waarop deze markering aangebracht mocht worden. De CE-markering voor deze producten is echter gebaseerd op een loutere verklaring van de producent, zonder tussenkomst van een aangemelde instantie. De norm NBN EN 13369 [B13], getiteld 'Gemeenschappelijke regels voor prefab betonproducten', specificeert de eisen voor de bestanddelen en het beton, evenals de algemene toepassingsvoorwaarden van de Eurocodes voor de dimensionering van geprefabriceerde betonproducten. De gemeenschappelijke regels dienen ook als referentietekst voor producten die niet onder normen of Europese Technische Goedkeuringen vallen. Deze norm is echter niet van toepassing op elementen die in de fabriek geprefabriceerd worden door 3D-printing, aangezien het mengsel niet in overeenstemming is met de norm NBN EN 206 [B8].

In België is het BENOR-label een vrijwillig kwaliteitsmerk dat toegekend wordt aan bouwmaterialen die voldoen aan de eisen uit de Belgische normen en technische voorschriften. Zo mag stortklaar beton dat in overeenstemming is met de normen NBN EN 206 [B8] en NBN B 15-001 [B3] het BENOR-label dragen. In de bouwsector wordt dit label beheerd door de certificatie-instellingen die gegroepeerd zijn binnen de BUCP (*Belgian Union of Certification and Attestation Bodies for Construction Products*). Het printbare materiaal voor 3D-printing valt daarentegen niet onder de norm NBN B 15-001 [B3], zodat het BENOR-label niet op dit product aangebracht mag worden. In dit geval kan het ATG-label (Technische Goedkeuring) een alternatief bieden. Dit label geeft aan dat een innovatief product of een product dat afwijkt van de normen in overeenstemming is met een technische goedkeuring en wordt beheerd door de Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw (BUtgb). Het is belangrijk om te weten dat de ATG enkel geldig is voor een specifiek bouwproduct, van een specifieke producent en voor een specifieke periode.

⁽⁶⁾ In België wordt er meestal gebruikgemaakt van de afkorting ETA (*European Technical Assessment*) in de plaats van ETB (Europese Technische Beoordeling).

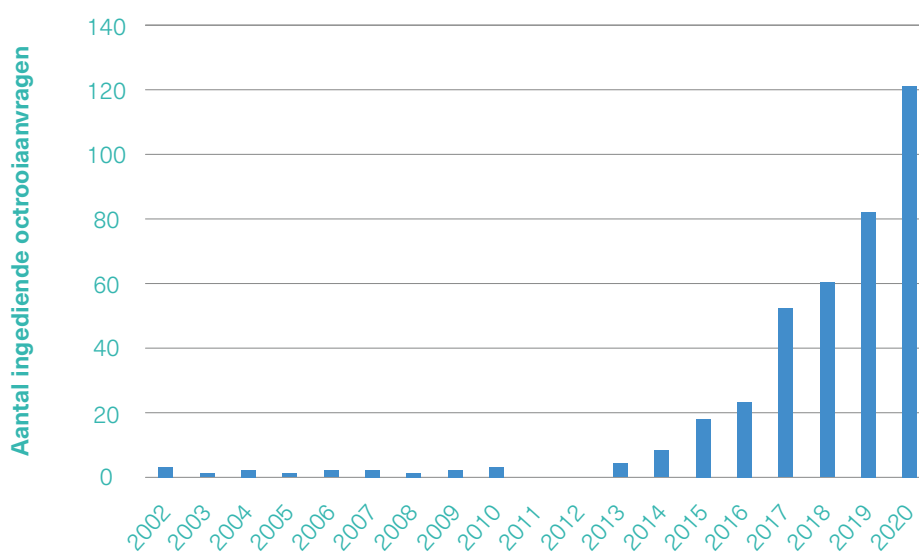
Frankrijk beschikt ook over een *Appréciation Technique d'Expérimentation* (ATEX). Het gaat hier om een snelle technische beoordelingsprocedure die door een groep experts uitgevoerd kan worden op innovatieve producten of procedés. De ATEX is echter enkel geldig voor één (of meerdere) specifieke experimentele bouwplaats(en). Een recent voorbeeld is de ATEX die afgeleverd werd door het CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*) voor het Viliaprint-project in Reims (Frankrijk), een project voor de bouw van vijf woningen dat gekenmerkt werd door de combinatie van *offsite* 3D-betonprinting en geprefabriceerde elementen (zie ook § 5.6, p. 35). België beschikt vooralsnog niet over een systeem dat gelijkwaardig is aan de ATEX.

De CE-markering heeft kortom betrekking op het op de markt brengen van bouwproducten. Het gaat hier om een instrument dat producenten kunnen gebruiken om de prestaties van hun producten aan te tonen naar de andere lidstaten toe. De ATG- en BENOR-labels en de ATEX zijn gericht op marktacceptatie zonder het op de markt brengen te beïnvloeden. Het gaat hier dus om instrumenten die bedoeld zijn om de spelers in de sector (architecten, bestekschrijvers, aannemers, investeerders...) ervan te overtuigen dat de producten geschikt zijn voor het beoogde gebruik, dat ze betrouwbaar zijn en dat hun eigenschappen en prestaties voldoen aan de vereisten.

9.2 Octrooien

Een octrooi geeft de octrooihouder (een uitvinder of een bedrijf) exclusieve rechten op zijn uitvinding, wat betekent dat hij kan verhinderen dat iemand anders deze uitvinding gebruikt, produceert of verkoopt zonder zijn toestemming. Een analyse van de octrooiaanvragen op het gebied van 3D-printing laat toe om een beeld te krijgen van de ontwikkeling van deze technologie. De octrooien worden geklasseerd volgens verschillende classificatiesystemen. Om octrooien voor concrete technologische ontwikkelingen op het gebied van 3D-printing te vinden, dient men de juiste classificaties te selecteren en te combineren teneinde tot de meest relevante resultaten te komen (<https://worldwide.espacenet.com>). De analyse van materialen voor additieve productie in de bouwsector zou bijvoorbeeld uitgevoerd kunnen worden door de twee CPC-classificaties B33Y70/00 **Materials specially adapted for additive manufacturing** en E04 **General building constructions** te combineren. Om andere innovaties te vinden, zoals cementmengsels die speciaal aangepast zijn voor 3D-printing, additieven ... kunnen er andere classificaties toegepast worden.

Een meer algemene zoekopdracht, uitgevoerd door de Cel Octrooien van Buildwise (OCBC), waarbij de twee CPC-classificaties B33Y **Additive manufacturing technologies** en E04 **General building constructions** gecombineerd worden, levert tussen 2002 en 2020 385 resultaten op (zie afbeelding 64). Uit de analyse van de jaren waarin de geselecteerde octrooien ingediend werden, blijkt dat het aantal octrooien op het gebied van 3D-bouwen sinds 2013 gestaag aan het groeien is. Het aantal ingediende octrooiaanvragen zou in de loop van de komende jaren dan ook logischerwijze moeten stijgen. We willen erop wijzen dat de octrooiaanvraagprocedure 18 maanden in beslag neemt, wat verklaart waarom de jaren 2021 en 2022 niet in de grafiek opgenomen zijn.



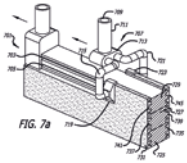
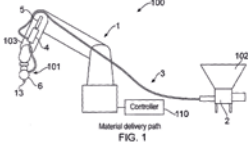
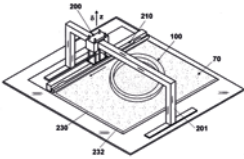


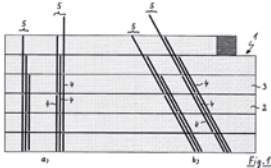
Afb. 64 Aantal octrooiaanvragen die tussen 2002 en 2020 ingediend werden op het gebied van 3D-bouwen.

De octrooien met betrekking tot 3D-printing in de bouw behoren over het algemeen tot één van de volgende subcategorieën:

- het materiaal
- de 3D-printtechniek
- de wapening.

Tabel 5 stelt enkele voorbeelden van octrooien voor, die willekeurig gekozen werden uit de bovenstaande lijst.

Tabel 5 Voorbeelden van octrooiaanvragen die ingediend werden in het domein van 3D-printing.

| Octrooinummer | Beschrijving | |
|---------------------------|---|--|
| MATERIAAL | | |
| EP4151409 A1 | In deze door Holcim ingediende octrooiaanvraag worden printbare mortelsamenstellingen beschreven. | |
| WO 2020/021202 A1 | Nieuwe door Vicat geïmproviseerde cementsamenstelling voor beton voor 3D-printing (zie § 6.2, p. 38) | |
| EP3738941 A1 | Composiet constructie-element dat geproduceerd werd met behulp van een additieve extrusieproductietechniek (ETH Zürich) | |
| PRINTECHNIEK | | |
| US 2010/0257792 A1 |  | <i>Contour Crafting</i> (zie hoofdstuk 2, p. 8) |
| EP 2773492 B1 |  | Meerlaags extrusiebouwprocedé voor een cementgebonden materiaal doorheen een spuitmond |
| WO 2011/021080 A2 |  | Productieprocedé voor constructies door het deponeren van een granulair materiaal en een bindmiddel, verdicht door middel van een wals (<i>selective binding</i>) (zie § 3.2, p. 13) |
| EP 3501769 A1 |  | Geautomatiseerd productieprocedé waarbij er gebruikgemaakt wordt van een gijbekisting (<i>slip forming</i>) (zie hoofdstuk 3, p. 11) |
| WAPENING | | |
| WO 2021/175580 A1 |  | Printkop die uitgerust is met een systeem voor het deponeren van wapeningskabels gedurende het printproces (zie § 5.3.1, p. 26) |
| WO 2019/092178 A1 |  | Wapening van 3D-geprinte constructies door de toevoeging van staven doorheen de verschillende betonlagen (zie § 5.3.3, p. 31) |

10. Besluit en perspectieven

De afgelopen jaren werden er overal ter wereld 3D-betonprintprojecten op poten gezet. Deze projecten lieten onder meer toe om eengezinswoningen op te trekken, waarvan sommige nu bewoond zijn. In België werd er door Kamp C en in samenwerking met Buildwise een pilootproject uitgevoerd dat in 2020 ingehuldigd werd. Het ganse skelet van dit huis (gelijkvloers + 1 verdieping) en een deel van het meubilair werden volledig in mortel geprint, een mooi voorbeeld van het potentieel van de technologie die vandaag beschikbaar is.

De belangstelling voor 3D-printen groeit en dit, zowel bij architecten als bij producenten en aannemers. Deze technologie kan immers een antwoord bieden op enkele belangrijke uitdagingen voor de sector, zoals de goedkopere uitvoering van constructies met complexe vormen, tijdswinst bij de uitvoering, lager grondstofverbruik, beter afvalbeheer en grotere arbeidsvriendelijkheid. Vandaag de dag laat 3D-printen toe om het bouwproces te rationaliseren. In het geval van de ruwbouw kan dit zelfs volledig geautomatiseerd verlopen dankzij digitalisering, productiesturing (beheerd door een digitaal model) en robotica.

3D-printen zou voor een aantal toepassingen snel de plaats kunnen innemen van meer conventionele methodes. Voorbeelden van dergelijke toepassingen zijn onder meer stadsmeubilair, balkons, trappen, gebogen muren, segmenten van voetgangersbruggen, bepaalde ingegraven constructies of verloren bekistingen. De technologie staat echter nog niet helemaal op punt voor uitvoeringen *in situ* die onderhevig zijn aan de weersinvloeden. We willen er daarentegen wel op wijzen dat bepaalde elementen in de fabriek geprint kunnen worden in een gecontroleerde omgeving, waarna ze op de bouwplaats geassembleerd kunnen worden.

3D-printers, die technologisch almaar geavanceerder worden, zouden op termijn het aantal arbeidsintensieve en repetitieve taken op de bouwplaats kunnen verminderen en tegelijkertijd een reeks nieuwe economisch interessante en architectonisch innovatieve projecten kunnen waarmaken. Een gloednieuwe uitdaging voor de bouwsector!

Maar, hoewel er reeds prototypes geproduceerd zijn, is de industrialisatiefase nog ver weg. De grootste zorg is of de sterkte van 3D-geprinte constructies stabiel en duurzaam is alsook aangepast is aan de buitenomgeving. Er moeten bovendien nog veel uitdagingen overwonnen worden voordat de technologie gebruikt kan worden voor de productie van structurele elementen. De belangrijkste hiervan is de wapening, vooral voor gebouwen met meerdere verdiepingen. Daar waar in mortel geprinte elementen een goede druksterkte blijken te vertonen, moeten mortelelementen die onderhevig zijn aan buiging of trekspanningen daarentegen versterkt worden met wapeningen die slechts moeilijk in het printproces te integreren zijn. In deze context worden er tegenwoordig verschillende benaderingen, gaande van manueel aangebrachte tot geautomatiseerde wapeningen, onderzocht.

Verder bestaan er maar weinig betrouwbare en onafhankelijke economische studies waarin de kosten aan de orde gesteld worden. Het lijkt echter duidelijk dat 3D-geprinte elementen niet altijd een goedkopere optie zijn dan elementen die op een traditionele manier vervaardigd worden (*in situ* of door prefabricage). In bepaalde gevallen, zoals voor rechte muren uit metselwerk en dergelijke, blijft het gebruik van 3D-printing voor het optrekken ervan *a priori* duurder (investering, grondstoffen enz.) dan de klassieke benaderingen. Voor andere toepassingen, zoals een op maat gemaakte trap op een talud of gebogen muren, zou deze technologie daarentegen een goedkopere innovatieve oplossing kunnen bieden. Het 3D-printen van complexe vormen blijkt inderdaad uiterst rendabel te zijn voor de productie van bekistingen of zelfs volledige elementen.

Wat de koolstofvoetafdruk betreft, werden de meeste industriële projecten tot op heden uitgevoerd met Portlandcementrijke mortels en dit, ondanks de initiatieven om te bouwen met materialen met een lagere milieu-impact. Dit cementtype stoot een grote hoeveelheid CO₂ uit tijdens de productie en kan leiden tot duurzaamheidsproblemen indien de krimp ervan niet onder controle gehouden wordt. Daarom moet er bijzondere aandacht besteed worden aan de nabehandeling van 3D-geprinte elementen.

Tot slot laten de normen nog niet toe om 3D-printing te beschouwen als een erkende methode voor de uitvoering van betonconstructies. In Europa en de rest van de wereld worden er steeds meer initiatieven genomen om de talrijke facetten van deze baanbrekende technologie te bestuderen met het oog op de opname ervan in de normen voor beton en betonconstructies. In afwachting hiervan kunnen vrijwillige kwaliteitslabels een

oplossing bieden om de verschillende spelers gerust te stellen omtrent de betrouwbaarheid van deze innovatieve materialen en methodes.

Hoewel het 3D-printen nog in zijn kinderschoenen staat en er nog veel uitdagingen overwonnen moeten worden, verdient deze werkwijze onze aandacht, vooral vanwege de perspectieven die ze te bieden heeft op het gebied van architecturaal ontwerp, materiaaltechnologie en het bouwproces. Het is weinig waarschijnlijk dat 3D-printing in de nabije toekomst de traditionele methodes zal vervangen. Deze technologie zou echter wel toepassingen kunnen vinden in bepaalde nichemarkten. Het opschalen van de technologie naar bredere markten zal afhangen van de antwoorden die het onderzoek kan bieden op de verschillende uitdagingen die in deze publicatie aangehaald en geïllustreerd werden. De vooruitgang op het vlak van robotica en automatisering gaat echter zo snel dat het onmogelijk is om het potentieel ervan in de komende jaren te negeren.

Er staan diverse demonstratieprojecten in de steigers die ons in staat moeten stellen om de werkelijke toegevoegde waarde van deze technologie, die door sommigen als dé belangrijkste potentiële innovatie van het afgelopen decennium voorgesteld wordt, op ware grootte te kunnen beoordelen.

Literatuurlijst

B

Bajpayee A. et al.

- B1** In situ Resource Utilization and Reconfiguration of Soils Into Construction Materials for the Additive Manufacturing of Buildings, *Frontiers in Materials*, vol. 7, 2020.

Buildwise (Brussel, www.buildwise.be)

- B2** Zichtbeton. Brussel, Buildwise, Technische Voorlichting, nr. 268, 2019.

Bureau voor Normalisatie (Brussel, NBN, www.nbn.be)

- B3** NBN B 15-001 Beton. Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. Nationale aanvulling bij NBN EN 206.
- B4** NBN B 15-007 Zichtbeton. Classificaties en specificaties.
- B5** NBN B 15-400 Uitvoering van betonconstructies. Nationale aanvulling bij NBN EN 13670.
- B6** NBN EN 197-1 Cement. Deel 1: samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gewone cementsoorten.
- B7** NBN EN 197-5 Cement. Deel 5: Portlandcomposietcement CEM II/C-M en composietcement CEM VI.
- B8** NBN EN 206 Beton. Specificatie, prestaties, productie en conformiteit.
- B9** NBN EN 1015-3 Proeven voor metselmortel. Deel 3: bepalen van consistentie van verse mortel (met de schoktafel).
- B10** NBN EN 1990 ANB Eurocode 0. Grondslag voor het constructief ontwerp. Nationale bijlage.
- B11** NBN EN 1992 Eurocode 2. Ontwerp en berekening van betonconstructies.
- B12** NBN EN 1992-1-1 Eurocode 2. Ontwerp en berekening van betonconstructies. Deel 1-1: algemene regels en regels voor gebouwen.
- B13** NBN EN 13369 Gemeenschappelijke regels voor prefab betonproducten.
- B14** NBN EN 13670 Uitvoering van betonconstructies.
- B15** NBN EN ISO 17296-2 Additieve fabricage. Algemene principes. Deel 2: overzicht van procescategorieën en grondstoffen.

C

Classen M., Ungermann J. en Sharma R.

- C1** Additive Manufacturing of Reinforced Concrete. Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement, *Applied Sciences*, vol. 10, nr. 111, 2020.

H

Hass L., Nefs K., Bos F.P. en Salet T.A.M.

- H1** Application potential of combining strain hardening cementitious composites and helical reinforcement for 3D concrete printed structures: case study of a spiral staircase, *Journal of Building Engineering*, vol. 80, 2023.

K

Khoshnevis B.

- K1** Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies, *Automation in Construction*, vol. 13, pp. 5-19, 2004.

Khoshnevis B. en Dutton R.

- K2** Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials, *Materials Technology*, vol. 13, pp. 53-56, 1998.

M

Ma G., Li Z., Wang L. en Bai G.

- M1** Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing, *Materials Letters*, vol. 235, p. 144 - 147, 2019.

Marchment T. en Sanjayan J.

- M2** Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing, *Automation in Construction*, vol. 109, 2020.

O

Ooms T. et al.

- O1** The Production of a Topology-Optimized 3D-Printed Concrete Bridge. In: Buswell R., Blanco A., Cavalaro S., Kinnell P. (eds), *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. DC 2022. RILEM Bookseries, vol 37. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06116-5_6, 2022.

P

Pegna J.

- P1** Exploratory investigation of solid freeform construction, *Automation in Construction*, vol. 5, pp. 427 - 437, 1997.

Perrot A., Rangeard D. en Pierre A.

- P2** Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques, *Materials and Structures*, vol. 49, pp. 1213-1220, 2016.

Probeton

- P3** PTV 21-601 Geprefabriceerde elementen van architectonisch beton, *Probeton*.

Dit is een uitgave van Buildwise (voordien het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf), een inrichting erkend bij toepassing van de besluitwet van 30 januari 1947.

Verantwoordelijke uitgever: Olivier Vandooren

Buildwise, Kleine Kloosterstraat 23

B-1932 Zaventem

D/2024/0611/01

Dit is een publicatie van wetenschappelijke aard. De bedoeling ervan is de resultaten van het bouwonderzoek uit binnen- en buitenland te helpen verspreiden.

Het, zelfs gedeeltelijk, overnemen of vertalen van de tekst van deze publicatie is slechts toegelaten mits schriftelijk akkoord van de verantwoordelijke uitgever.

Vertaling en lay-out: D. Van de Velde

Illustraties: G. Depret

Buildwise-foto's: M. Sohie et al.

Buildwise Zaventem **Maatschappelijke zetel en kantoren**

Kleine Kloosterstraat 23
B-1932 Zaventem
Tel. 02 716 42 11
E-mail : info@buildwise.be
Website: buildwise.be

- Technisch advies – Publicaties
- Beheer – Kwaliteit – Informatietechnieken
- Ontwikkeling – Valorisatie
- Technische goedkeuringen – Normalisatie

Buildwise Limelette

Avenue Pierre Holoffe 21
B-1342 Limelette
Tel. 02 655 77 11

- Onderzoek en innovatie
- Vorming
- Bibliotheek

Buildwise Brussels

Dieudonné Lefèvrestraat 17
B-1020 Brussel
Tel. 02 233 81 00

Na meer dan een halve eeuw spreken we niet langer over het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), maar over Buildwise. Die nieuwe naam brengt ook een nieuwe richting met zich mee, met extra aandacht voor innovatie, samenwerking en een meer geïntegreerde aanpak met verschillende disciplines. Omdat Buildwise hoofdzakelijk gefinancierd wordt met de bijdragen van meer dan 100.000 Belgische bouwbedrijven, bepalen deze ook mee de werking, onder andere door hun betrokkenheid bij het vaststellen van de prioriteiten en het sturen van de acties via de Technische Comités.

Van onderzoekscentrum naar innovatiecentrum

Dankzij de kennis die het in de loop van de jaren verworven heeft, is Buildwise uitgegroeid tot hét referentie- en expertisecentrum in de bouwsector. Buildwise is er om alle actoren in de waardeketen te ondersteunen. Ons doel? Kennis doorgeven die de kwaliteit, productiviteit en duurzaamheid daadwerkelijk verbetert en de weg vrijmaken voor innovatie op werven en in bouwbedrijven.

Een katalysator voor kennisdeling en verbinding

Het bouwproces is erg complex en gefragmenteerd. Daarom wil Buildwise zijn verbindende rol versterken. We kunnen de sectorale en maatschappelijke uitdagingen alleen het hoofd bieden door de hele sector in beweging te zetten en door onze bedrijfsmodellen en manier van samenwerken te herbekijken.

Van multidisciplinaire naar transdisciplinaire expertise

Buildwise onderscheidt zich door zijn pragmatische en multidisciplinaire aanpak. Om solide oplossingen te vinden, is een alomvattende, geïntegreerde aanpak nodig. Daarom zijn onze ambities opgebouwd rond drie pijlers: digitale technologie, duurzaamheid en vakmanschap (vertegenwoordigd door de aannemers binnen de Technische Comités).