

---

# Constructief gedrag 3D-geprint beton

---

Promotieonderzoek geeft meer inzichten in constructieve eigenschappen, zoals sterkte, stabiliteit en hechting, zowel tijdens het printproces als gedurende de levensduur van een geprint object

**De ontwikkelingen rondom het 3D-printen van betonconstructies hebben de afgelopen jaren een enorme vlucht genomen.** Waar zo'n vier jaar geleden een handvol geprinte objecten de kroon spanden (denk aan het geprinte kasteeltje van Andrey Rudenko en de prefab huizen van WinSun), gaat er vandaag de dag geen maand meer voorbij zonder dat een 3D-geprinte 'primeur' het nieuws haalt. Vaak hebben deze projecten vooral een showcasekarakter, en bovendien wordt het geprinte beton lang niet altijd constructief gebruikt. Anders dan de krantenkoppen soms doen geloven, is de techniek nog volop in ontwikkeling. Om deze ontwikkeling te ondersteunen, voerde Rob Wolfs een promotieonderzoek uit naar het constructieve gedrag van 3D-geprinte betonnen constructies.

## 3D-printen van betonconstructies

Het 3D-printen van betonconstructies is een Additive Manufacturing (AM)-techniek, waarbij objecten -- gestuurd vanuit een

auteur



**DR.IR. ROB WOLFS**

Assistant Professor  
TU Eindhoven, faculteit  
Bouwkunde, sectie  
Betonconstructies

digitaal model – door een robot laagje voor laagje worden opgebouwd. De voordelen van deze techniek zijn duidelijk: het materiaalgebruik gaat omlaag, doordat beton alleen dáár wordt geprint waar nodig. Bovendien biedt het laagsgewijze maakproces een grotere vormvrijheid, waarmee complexe geometrieën of extra functionaliteit kunnen worden gerealiseerd. De noodzaak tot bekisting verdwijnt en fysieke arbeid wordt sterk verminderd door deze geautomatiseerde maakmethode.

Het is dus niet gek dat de bouwindustrie, op zoek naar manieren om de toenemende vraag naar duurzaam bouwen en een hogere productiviteit te beantwoorden, de mogelijkheden van deze techniek verkent. Van straatmeubilair tot bruggen, en van kunstriffen tot huisjes: het toepassingsgebied van het 3D-printen van betonconstructies is breed. Na een verkennende periode door voornamelijk start-upbedrijven, heeft ook de gevestigde orde deze nieuwe techniek opgepakt en verschijnt een toenemend aantal showcaseprojecten in de praktijk.



## Complexiteit

Hoewel de potentie van het 3D-printen van betonconstructies duidelijk is, brengt de toepassing van deze nieuwe techniek ook extra complexiteit met zich mee. Vanwege de afwezigheid van bekisting moet het versgeprinte beton zelf voldoende sterk en stabiel zijn gedurende het gehele printproces, om te voorkomen dat een object vroegtijdig bezwijkt. Daarnaast bestaat een geprint object uit een opeenstapeling van geprinte laagjes, die voldoende moeten hechten om een constructief veilig object te garanderen.

Om aan beide voorwaarden te voldoen, moet het materiaal enerzijds snel genoeg sterkte opbouwen of verharden om niet om te vallen tijdens het printproces. Anderzijds moet dit ook weer niet te snel gebeuren, om te voorkomen dat de hechting tussen de lagen onvoldoende is. En wat het extra complex maakt, is dat deze gevoelige balans voor elke vorm weer anders is.

## Onderzoek

Het promotieonderzoek is uitgevoerd om de extra complexiteit van het 3D-printen van

betonconstructies weg te nemen, door het constructieve gedrag in zowel de verse als verharde materiaaltoestand te beheersen. Hiertoe is allereerst een unieke onderzoeksfaciliteit gerealiseerd in het Structures Laboratory Eindhoven: een grootschalige 3D-betonprinter (foto 2). Deze printer bestaat uit een gantry (portaal) robot met een printbed van 9 bij 4,5 bij 2,8 m, gekoppeld aan een meng-pompsysteem en een motion controller die het geheel vanuit 3D-modellen bestuurt. Met deze 3D-printer kunnen zowel op kleine schaal proefstukken voor experimenteel onderzoek, alsook op grote schaal constructieve elementen voor toepassingen in de praktijk worden gemaakt.

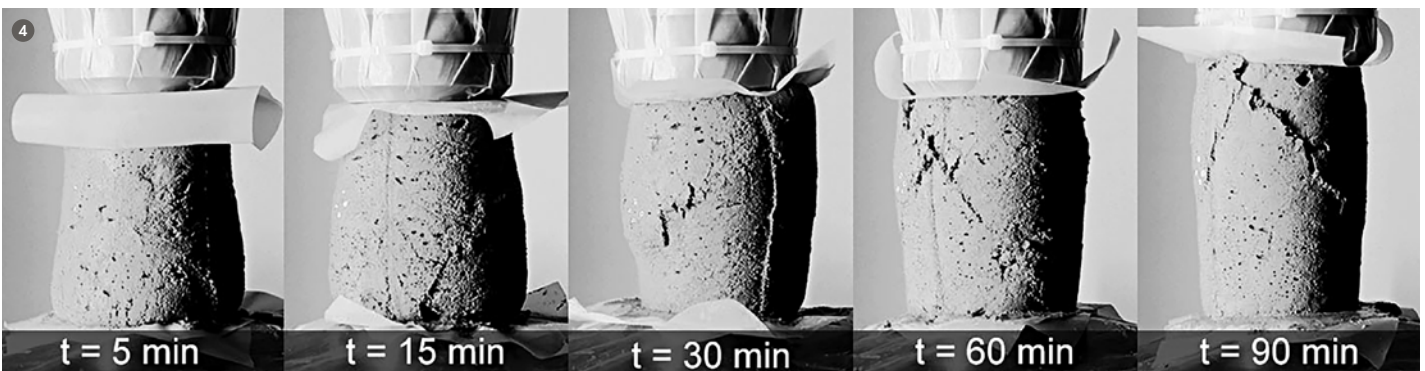
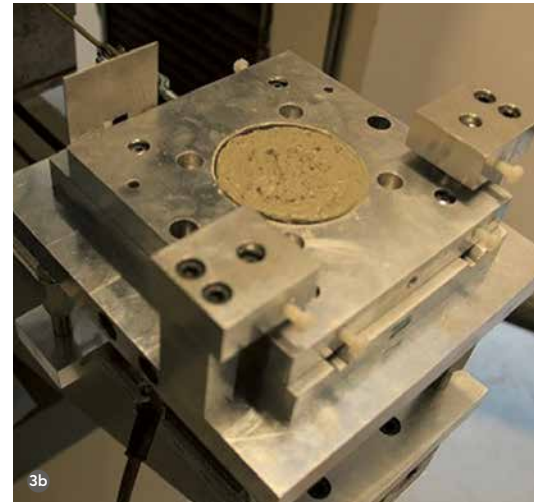
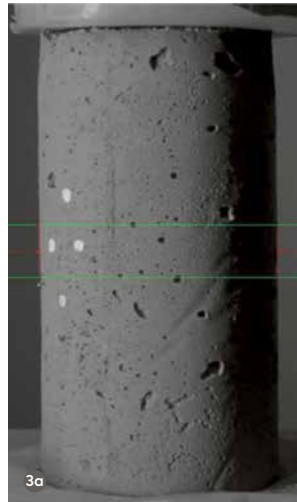
Met behulp van deze faciliteit zijn de belangrijkste bezwijkmechanismen vastgesteld die kunnen optreden ten gevolge van het 3D-printproces en zijn de maatgevende materiaaleigenschappen onderzocht. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen de verse materiaaltoestand en de verharde toestand. Het doel is gesteld om experimentele procedures te ontwikkelen om zulke eigenschappen vast te stellen, en om (nu →

## PROMOTIEONDERZOEK

Rob Wolfs is op 12 september 2019 gepromoveerd aan de TU Eindhoven (faculteit Bouwkunde, sectie Betonconstructies). Titel van zijn proefschrift is 'Experimental characterization and numerical modelling of 3D printed concrete – Controlling structural behaviour in the fresh and hardened state'. Een link naar het proefschrift staat op [cementonline.nl](http://cementonline.nl). Eerste promotor was prof.dr.ir. T.A.M. Salet (TU/e) en tweede promotor prof.dr.ing. P.M. Teuffel (TU/e). Aan het onderzoek is het predicaat cum laude toegekend.



*Met behulp van een grootschalige 3D-betonprinter zijn de belangrijkste bezwijkmechanismen vastgesteld en zijn de maatgevende materiaaleigenschappen onderzocht*



merieke) tools te realiseren om de bezwijkmechanismen te kunnen voorspellen en te voorkomen.

### **Vers beton**

In de verse materiaaltoestand zijn twee belangrijke bezwijkmechanismen geïdentificeerd die kunnen optreden tijdens het printproces: bezwijken door instabiliteit (knik) en het overschrijden van de sterkte van het materiaal. Om te kunnen voorspellen of en hoe een object bezwijkt tijdens het printen, is een FEM-model van het printproces ontwikkeld. In dit model wordt de laagsgewijze opbouw van een geometrie gesimuleerd, waarbij de printstrategie, zoals de snelheid van de printer en de afmetingen van de laagjes, wordt meegenomen. Belangrijke input voor deze simulaties zijn de materiaaleigenschappen van beton tijdens het printproces. Om beide bezwijkmechanismen te kunnen voorspellen, moeten zowel de elastische materiaaleigenschappen (E-modulus en Poisson's ratio) als een vloeicriterium worden vastgesteld. In dit onderzoek is een Mohr-Coulomb-criterium aangehouden om de vloedgrens van het materiaal te bepalen, en daarmee zijn de cohesie en de hoek van interne wrijving de benodigde materiaaleigenschappen.

Al deze materiaaleigenschappen zijn afhankelijk van de ouderdom van het materiaal. Tijdens het printproces kunnen de materiaaleigenschappen dus flink veranderen, afhankelijk van de afmetingen van het object, de snelheid van de printer, en het type materiaal.

**Druk- en afschuifproef** Om de materiaaleigenschappen en hun ontwikkeling in de tijd te bepalen, zijn er verschillende experimentele procedures voor versgeprint beton ontwikkeld [2, 3 en 4]. Zo is er gebruikgemaakt van een uniaxiale drukproef in combinatie met een afschuifproef (foto 3a en b). Door de drukproef op verschillende ouderdommen uit te voeren, kan de toename in de tijd van de E-modulus en de Poisson's ratio worden bepaald. In de afschuifproef wordt gebruikgemaakt van verschillende combinaties van normaalkracht en afschuiving. Daarmee kunnen zowel de cohesie als de hoek van in-

terne wrijving worden vastgesteld. Ook deze proef is op verschillende ouderdommen herhaald om hun ontwikkeling in kaart te brengen.

De uitdaging bij deze proeven volgt uit de verse staat waarin het materiaal verkeert. Het is namelijk niet mogelijk om meetapparatuur aan het proefstuk te bevestigen, omdat die het gedrag van het relatief slappe materiaal kan beïnvloeden. Een oplossing is gevonden in het gebruik van optische meetmethoden. Bovendien zijn alle testen zo ontworpen dat deze zo snel mogelijk kunnen worden uitgevoerd, om te voorkomen dat het thixotrope gedrag van beton de individuele proeven zou beïnvloeden.

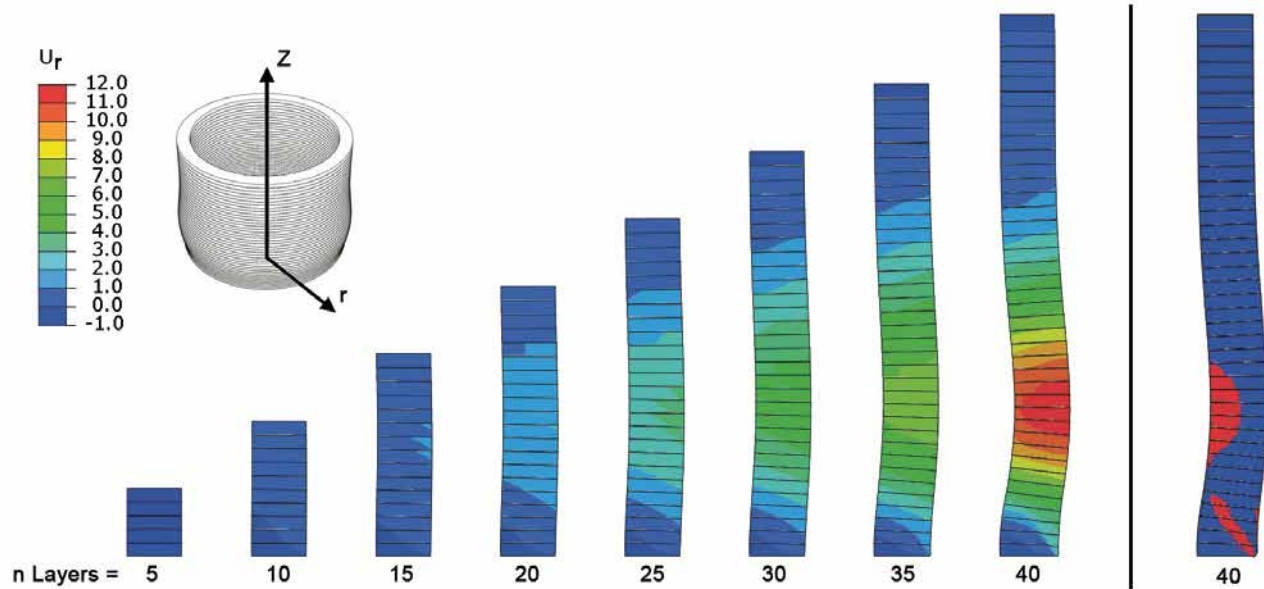
**Resultaten** Uit de resultaten van dit experimentele programma bleek dat in de eerste 90 min na extrusie uit de printkop, een lineaire toename van zowel de sterkte als stijfheidsparameters plaatsvindt. Bovendien verandert het materiaal van bezwijkgedrag (foto 4). Het jongste materiaal gedraagt zich nog bijna als een vloeistof en wordt samengedrukt tot bezwijken. Naarmate het proefstuk ouder wordt, verandert het materiaal langzaam richting een vaste stof en ontstaat er een steeds meer discrete scheur, waarbij het proefstuk bros bezwijkt. Deze proeven bevestigen bovendien dat een tijdsafhankelijk Mohr-Coulomb-criterium kan worden beschouwd als een geschikt bezwijkcriterium voor vers 3D-geprint beton.

**Triaxiale drukproef** Om het experimentele programma verder te optimaliseren, is een triaxiale drukproef ontwikkeld. In deze test wordt eerst het gehele proefstuk onder druk gezet, waarna het verticaal tot bezwijken wordt gebracht. Door met verschillende combinaties van voordrukken te werken, kunnen met één proefopstelling zowel de elastische materiaaleigenschappen als het vloeicriterium worden vastgesteld.

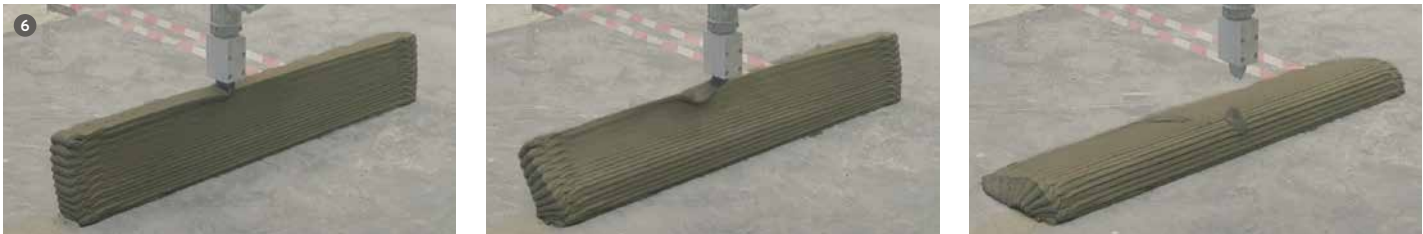
**Numerieke simulaties** De resultaten van de experimentele programma's vormden de basis voor numerieke simulaties van het printproces van verschillende geometrieën. Zo zijn er studies uitgevoerd op het bezwijkgedrag van betonnen cilinders tijdens het →

*Resultaten van experimentele programma's vormden de basis voor numerieke simulaties van het printproces*

5



6



printproces (fig. 5), en een verscheidenheid aan rechte wandstructuren. Uit deze studies bleek dat voor het gehanteerde materiaal en printproces, het knikgedrag maatgevend was voor deze constructies. Het numerieke model kan bovendien ook het plastisch bezwijken goed voorspellen. Deze numerieke resultaten zijn vervolgens gevalideerd met printexperimenten (foto 6) en vergeleken met een parametrisch mechanistisch model ontwikkeld door Suiker [5]. Uit deze studies is geconcludeerd dat het numerieke model een efficiënt hulpmiddel is om het constructieve gedrag tijdens het printproces te beheersen.

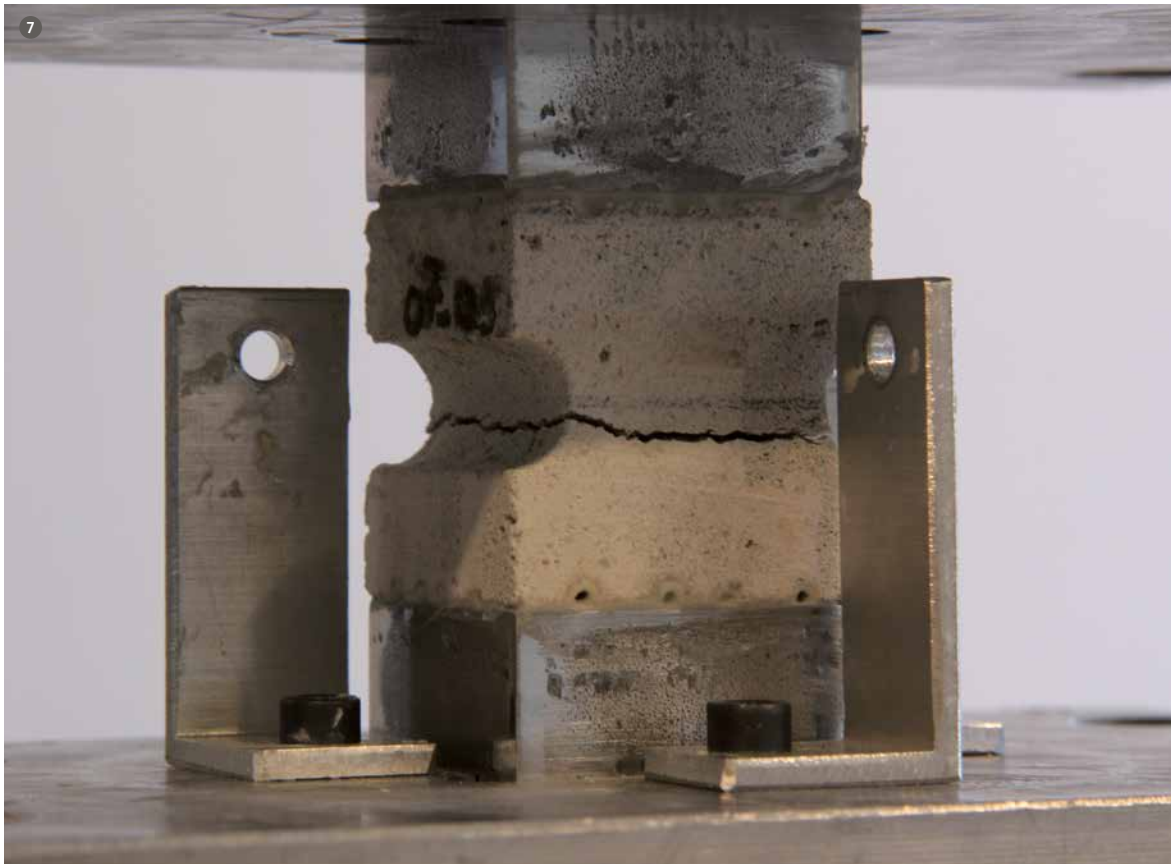
### Verhard beton

In de verharde materiaaltoestand is de hechtsterkte tussen de geprinte lagen geïdentificeerd als een belangrijke factor om het constructieve gedrag van een geprint object te beheersen. De sterkte kan echter worden beïnvloed door een verscheidenheid aan parameters, zoals de intervaltijd tussen

opeenvolgende lagen en de omgevingstoestand van het printproces.

**Druk-, slijt- en buigproeven** Om deze invloed te bepalen, is een uitgebreid experimenteel programma uitgevoerd op geprinte proefstukken, bestaande uit druk-, slijt- en buigproeven [7]. Hierbij is zo veel mogelijk gebruikgemaakt van voorgeschreven testprocedures voor verhard beton, maar waar nodig zijn aanpassingen gemaakt die passen bij de relatief kleine afmetingen en de laagde opbouw van de proefstukken.

De resultaten van dit experimentele programma tonen een duidelijke impact van het printproces op de hechtsterkte: isotrope materiaaleigenschappen kunnen alleen worden gegarandeerd bij korte intervaltijden tussen de lagen. Als de tijd tussen het printen van opeenvolgende lagen toeneemt, kan de hechting sterk afnemen als de oppervlakte van het geprinte materiaal niet wordt afgedekt tijdens deze tussenpoos. De resultaten van dit experimentele pro-



programma kunnen worden gebruikt voor constructieve analyses, maar bieden ook een handvat om het printproces te optimaliseren om een afname van hechtsterkte te voorkomen. Zeker voor het op locatie printen in ongecontroleerde omstandigheden is het van groot belang de consequenties voor de hechtsterkte te voorzien.

**Trekproef** In een tweede experimenteel onderzoek op verhard beton werd een directe trekproef toegepast (fig. 7). Deze proef is een stuk complexer dan die uit het voorgaande programma, maar biedt wel een uitgebreidere karakterisering van het mechanische gedrag en daarmee de mogelijkheid tot geavanceerde constructieve analyses van 3D-geprinte betonconstructies.

### Toepassing

Gedurende het promotietraject zijn verschillende grootschalige valorisatieprojecten gerealiseerd, in samenwerking met een groep industriële partners. In deze projecten zijn

de eerder beschreven numerieke en experimentele methoden al toegepast. Zo werd de geometrie van de wanden die zijn geprint voor studentenhuysvesting in Nyborg [8] aangepast om de weerstand tegen bezwijken door instabiliteit te verhogen (foto 1).

Voor de 3D-geprinte fietsbrug geplaatst in Gemert [9] was er geen risico van bezwijken tijdens het printproces, onder meer vanwege het relatief lange printpad. Hier werden echter wel verschillende lagen tegen elkaar aan geprint. Om de hechting tussen deze horizontale interfaces in kaart te brengen, is de directe trekproef toegepast. De resultaten van deze test vormden de basis voor de printstrategie van de brugelementen.

Voor een nieuwe, geprinte fietsbrug die wordt geplaatst in Nijmegen [10] is de vormvrijheid verkregen door het printproces verder opgezocht. De sterk gekromde elementen van zowel de brugliggers als ondersteunende kolommen waren daardoor echter wel gevoelig voor instabiliteit tijdens →

*De beschreven numerieke en experimentele methoden zijn toegepast in grootschalige valorisatieprojecten*

het printproces. Het numerieke model is gebruikt om die gevoeligheid te onderzoeken (fig. 8). Op basis van deze numerieke studies is de geometrie ietwat gewijzigd en is bepaald op welke plekken ondersteuningsmateriaal tijdens het printproces noodzakelijk is. Hierna zijn de elementen succesvol geprint (foto 9).

### Conclusies

Het 3D-printen van betonconstructies heeft grote potentie voor de bouwindustrie en biedt de mogelijkheid objecten te maken met minder materiaalgebruik en een hogere functionaliteit. Deze nieuwe techniek brengt echter ook nieuwe uitdagingen met zich

mee: de afwezigheid van bekisting en de laagde opbouw van constructies vraagt inzicht in het constructieve gedrag van geprint beton, zowel tijdens het printproces als gedurende de levensduur van een geprint object. Gedurende het promotieonderzoek dat hier is beschreven, zijn verschillende experimentele en numerieke methoden ontwikkeld om het constructieve gedrag van geprint beton te beheersen. De resultaten kunnen worden gebruikt om het ontwerpproces te ondersteunen en de geometrie van geprinte objecten (verder) te optimaliseren, de ontwikkeling van printbare materialen te sturen, en printprocessen zo efficiënt mogelijk in te richten. ●

### LITERATUUR

Bos, F.P., Wolfs, R.J.M., Ahmed, Z.Y., Salet, T.A.M., Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping* 11(3), 2016, pp. 209-225.

Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M., Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research* 106, 2018, pp. 103-116.

Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M., Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. *Construction and Building Materials* 181, 2018, pp. 447-454.

Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M., Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites* 104, 2019.

Suiker, A.S.J., Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments. *International Journal of Mechanical Sciences* 137, 2018, pp. 145-170.

Wolfs, R.J.M., Suiker, A.S.J. Structural failure during extrusion-based 3D printing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019.

Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M., Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research* 119, 2019, pp. 132-140.

Bos, F.P., Wolfs, R.J.M., Ahmed, Z.Y., Salet, T.A.M., Large Scale Testing of Digitally Fabricated Concrete (DFC) Elements. In T. Wangler and R. J. Flatt, editors, *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete*, 2018, Zurich, Switzerland.

Salet, T.A.M., Ahmed, Z.Y., Bos, F.P., Laagland, H.L.M. Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping* 13(3), 2018, pp. 222-236.

Green Capital Nijmegen krijgt 's werelds langste 3D-geprinte brug, *Cementonline*, 28 maart 2019.

