

BY

BRUGONTWERP VOOR 3D PRINTEN

Met de ontwikkelingen van automatische productie ligt er een grote hoeveelheid nieuwe kansen voor ons. Een machine neemt niet alleen het menselijke werk over, het zorgt ook voor een de verbreding van mogelijkheden omtrent complexe en vrije vorm architectuur en bouw mogelijkheden, zonder enig afval materiaal. Deze ontwikkelingen zijn belangrijke stappen richting automatisch ontwerp en productie voor bruggen. Voor ons als ingenieurs is het daarom van belang om een nieuwe manier van werken te ontwikkelen om automatisch ontwerp en constructieve analyse toe te passen.

1a



1b





1c

GENERATIEF ONTWERP VOOR BRUGGEN.

Ontwerpen voor automatische productie (3d printen) wordt voornamelijk beïnvloed door de restricties en mogelijkheden van de 3d printer die wordt toegepast. Generatief ontwerp is een geautomatiseerde optimalisatie tool om ideale constructie principes te vinden binnen de kaders van het productie proces en materiaal. Er kunnen twee niveaus van automatische optimalisatie worden onderscheiden van elkaar:

- **Generatief constructief ontwerp**

De ontwerper voert de ontwerpdoelen en randvoorwaarden als input in, waarna de tool met alle mogelijke ontwerpen komt. Voor het generatief ontwerpen van bruggen bestaat de input uit; opleg condities, krachtswerking, belastingsgevallen, ontwerprijmte en de materiaaleigenschappen.

- **Integraal constructief ontwerp**

Hierbij wordt tijdens het ontwerpproces direct constructieve feedback gegeven.

Voor dit onderzoek zijn twee materialen gekozen, één isotroop materiaal, beton, en één orthotroop materiaal, vezelversterkt kunststof (VVK). De toegepaste software, in dit geval Autodesk generative design, werkt alleen met isotrope materialen. Orthotrope materialen moeten worden vereenvoudigd tot isotrope materialen. Verder is voor dit onderzoek een vijftien meter brug gebruikt als 'testobject' om de mogelijkheden van het generatieve ontwerp proces te ontdekken. De enige handmatige inputs zijn de obstakelobjecten (waar de software geen materiaal mag genereren), de belastingsgevallen en de opleg condities. In dit geval is de brug opgelegd op vier steunpunten, vrij in translatie aan één zijde van de brug.

GENERATIEF CONSTRUCTIEF ONTWERP

De uitkomsten van het generatieve ontwerp proces voor VVK en beton zijn weergegeven in figuur 2. Beide studies zijn opgezet met identieke randvoorwaarden, wat resulteert in gelijksoortige geometrien: een dek dat wordt ondersteund door twee bogen. Het constructieve principe van een boogbrug is heel duidelijk te herkennen, maar nu in een meer arbitraire geometrie. Deze twee brug uitkomsten zijn gebaseerd op 3d print eigenschappen waarin de printkop in alle assen vrij kan bewegen, zonder dat er support materiaal nodig is om de prints te kunnen maken (fig 1a,b)

Omdat elke printer zijn eigen randvoorwaarden en restricties heeft, is een zelfde studie uitgevoerd met een printkop die slechts in drie assen vast kan bewegen, en met een maximale vrije uitkragingshoek van 45 graden, wat resulteert in andere uitkomsten (fig 1c). De bulk achtige solide uitkomsten zijn niet toepasbaar met VVK. Vvk staat bekend om haar perfecte werking in 2D lichtgewicht plaatwerking, en is daarom niet toepasbaar met grove solide uitkomsten. Een solide geometrie moet worden vereenvoudigd met naar een 2d plaat – spaceframe structuur. Dit kan nog niet automatisch worden gegenereerd.

INTEGRAAL CONSTRUCTIEF ONTWERP

Geïntegreerd constructief ontwerp vereist een handmatige aanpak voor de startvorm. De startvorm kan worden ontwikkeld op basis van de materiaaleigenschappen, het 3D-print proces en de constructieve typologie. Hierin is geen hiërarchie vereist, echter in dit onderzoek is er wel voor één specifiek materiaal

gekozen. De print orientatie en de brug typologie hangen sterk af van de printrichtingen die de 3D printer kan maken. Voor VVK bruggen is het belangrijk dat de vezel orientatie in de richting van de printpaden wordt ontworpen om zo goed mogelijk de axiale belasting van verkeerslasten te weerstaan. In dit onderzoek is de startvorm een lens-achtige vorm, wat voortkomt uit de combinatie van de momentenlijn van een eenvoudig opgelegde brug. Het gekromde bovenvlak zorgt voor extra toegewerking en goede afwatering op het brug dek. De stijfheid van VVK is significant lager in vergelijking met staal en beton. Om toch een slank ontwerp te behouden is er gekozen voor een monocoque brug typologie. Om te compenseren voor de lagere stijfheid wordt er een grove buiten schil met een lichte binnenconstructie ontwikkeld. Daarbij kan met een monocoque vorm een grote vormvrijheid worden behaald en kan het in één print worden geproduceerd zonder post-assemblage.

Omdat de printer laag voor laag opbouwd is er gekeken naar een sectie van de brug, en is deze constructie geanalyseerd. Het plotten van de hoofdspanningslijnen laat zien waar de grootste trek en druk spanning optreden. De grootte en locatie van deze hoofdspanningen zijn gebruikt als materiaal topology voor de binnenconstructie. De binnenconstructie wordt voornamelijk blootgesteld aan normaal krachten, waarbij schuifspanning wordt geminimaliseerd. De extrusie van deze hoofdspanningslijnen vormen de start geometrie van deze studie. Op basis van de spanningsgrootte kan materiaal worden verwijderd of toegevoegd, wat resulteert in een topologisch geoptimaliseerde constructie. Er zijn delen van de brug die onder druk spanning komen

te staan. Deze zijn geanalyseerd op stabiliteit en knik. Daarbij zijn er ook geanalyseerd op stijfheid en comfort (dynamische belastingen).

De uitkomsten zijn het resultaat van deze analyses en baseren hun geometrie op een handmatig gevormde startvorm, wat het direct printbaar maakt. Een 1:10 schaal model van deze brug is getest op printbaarheid en constructief gedrag (fig2). Handmatige topologische optimalisatie is een iteratief proces zonder specifieke generatieve software. Het weghalen van materiaal in gebieden waar de spanningen laag zijn, slaat wel op de principes van generatief ontwerp.

CONCLUSIE EN TOEKOMST PERSPECTIEF

MATERIAAL

Het doel van dit onderzoek is om een brug te ontwerpen voor 3D printen met gebruik van automatische materiaal topologie technieken. Generative design is een bijzonder goede tool om het ontwerp en de engineering te automatiseren. Het genereert honderden uitkomsten tegelijk, waarmee een groot deel van de repeterende taken worden overgenomen door de software. Op dit moment is Autodesk generative design nog niet volledig geschikt voor het ontwerp van bruggen. Hierdoor is het niet mogelijk om te genereren met isotrope materialen zoals VVK, en isotro-

pe materialen met verschillende druk en trek spanningscapaciteiten. Een 3D printer introduceert altijd orthotroop gedrag in de brug.

CONSTRUCTIEVE ANALYSE

Dit onderzoek is één van de eerste stappen richting een volledig geautomatiseerd constructief ontwerp en productie proces. Generatief constructief ontwerp kan worden toegepast met behulp van bepaalde print criteria. Nog niet alle criteria die nodig zijn voor brug ontwerp kunnen worden ingevoerd in generatieve software. Het integrale constructieve ontwerp is een manier om deze criteria te ontdekken en te leren begrijpen.

De data die voortkomt uit de ontwerpen die zijn geprint helpen bij het verifiëren van de simulaties van 3D print modellen. Deze verificatie is essentieel voor proof of concept op langer termijn.

DE TOEKOMST VAN AUTOMATISCH ONTWERP EN PRODUCTIE

Van de vele beschikbare constructieve materialen springt VVK eruit op duurzaamheid. De functie van een brug is echter minder duurzaam. In plaats van het denken in concepten voor een brug die 200 jaar blijft bestaan, is automatisch ontwerp en productie en de recycle mogelijkheden van VVK een uiterst geschikte combinatie voor korte levensduur van bruggen. Eisen met betrekking tot veiligheid en comfort veranderen per decennium. De vraag is dan waarom een brug voor 200

jaar ontworpen moet worden met extra materiaal wat de eerste 50 jaar niet nodig zal zijn, terwijl je ook een brug voor 20-30 jaar kunt bouwen en kan herbouwen met hetzelfde materiaal voor een andere functie. Waar dit naartoe gaat is nu nog niet duidelijk, maar nieuwe constructieve materialen en ontwerpmethoden brengen ons nieuwe manieren van werken voor de infrastructuur en de bebouwde omgeving.

LITERATUUR

1. Blok, L. G., Woods, B. K. S., Yu, H., Longana, M. L., & Potter, K. P. 3d Printed Composites – Benchmarking The State-Of-The-Art. In *21st International Conference on Composite Materials*. 2017.
2. Teizer, J., Blickle, A., King, T., Leitzbach, O., & Guenther, D. Large scale 3D-printing of complex geometric shapes in construction. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. Vol. 33, pp. 1. 2016.
3. 2019 Autodesk Inc. "Generative design." Internet: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design>, May. 18, 2018. [May. 08, 2019].
4. 2019 MX3D. "Bridge design." Internet: <https://mx3d.com>, Sept, 08, 2017. [Juli. 01, 2019].
5. Joosten, S.K. "Printing a Stainless Steel Bridge An exploration of structural properties of stainless steel additive manufactures for civil engineering purposes". M.A. thesis. Delft University of Technology, Delft, 2015.
6. Beghini, L. L., Beghini, A., Katz, N., Baker, W. F., & Paulino, G. H. (2014). Connecting architecture and engineering through structural topology optimization. *Engineering Structures*, 59, 716-726.

