

Vrije vorm: stabiele 3D-prints van beton

Het printen van beton biedt architecten nieuwe mogelijkheden. Maar beton is geen gemakkelijk materiaal om mee te werken. Blijft een ontwerp tijdens het printen stabiel? Dat wil leverancier van (prefab)beton en mortels Bruil weten van de deelnemers aan de Studiegroep Wiskunde met de Industrie.

Een treurig hoopje beton ligt op de grond, een geslaagd voorbeeld van een mislukt experiment. Als een plumpudding is het beton onder zijn eigen gewicht in elkaar gezakt. “Dit is wat er gebeurt als ons ontwerp niet goed is. Onze vraag aan jullie: hoe voorkomen we dit?”, vraagt innovatie-ingenieur Elise Buiten de wiskundigen die meedoen aan de studiegroep.

Het is nieuw, en het biedt fantastisch nieuwe mogelijkheden. Buiten werkt bij betonbedrijf Bruil aan 3D-prints met beton, een jonge technologie. Een robotarm met spuitmond plaatst banen van beton in een vooraf bepaald patroon. Laagje op laagje, tot het element af is. De methode maakt het mogelijk ronde vormen te maken, zoals een gekromd balkon dat Buiten in haar presentatie laat zien. “Architecten vinden het geweldig, het geeft ze betaalbare vormvrijheid.”



Geprint beton biedt nieuwe mogelijkheden, zoals dit gekromd balkon. Foto: Bruil.

Niet alle vormen zijn printbaar. Als er teveel overhang is, kan het beton plaatselijk inzakken. Ook kan de hele constructie onder haar eigen gewicht bezwijken. Halverwege uitbulken, plastische vervorming in jargon, gebeurt ook van tijd tot tijd. Bij Bruil zijn ze inmiddels ervaringsdeskundig: ze hebben gevoel gekregen voor wat wel en niet kan. Het bedrijf heeft op basis van ervaring een maximum gesteld aan de overhang in een ontwerp. Daarnaast weten ze goed bij welke printsnelheid het resultaat het beste is. Maar liever nog zou Bruil een meer gedegen en onderbouwde check kunnen doen om vooraf te bepalen of een ontwerp stabiel blijft tijdens het printen. “Verspilling kost geld en is belastend voor het milieu, dus als we printen, willen we het goed doen. Ons doel is het aantal foute prints tot nagenoeg nul te reduceren”, aldus Bouter.

De wiskundigen besloten om eerst een aantal aanvullende eisen op te stellen voor een ontwerp, die de kans op succes vergroten. De eerste twee bleken inkoopertjes: de uitstroomsnelheid van het beton moet hoog genoeg zijn, anders hardt het al uit in de spuitmond. Ook de maximale capaciteit van de printer is een harde grens. Twee andere eisen hingen samen met de ‘hoogtegroei’ van het beton, de juiste snelheid om de laagjes op te bouwen. De eerste eis was dat er snel genoeg een nieuwe laag op de vorige komt. Gebeurt dat niet, dan vormt het beton geen homogene massa meer en verzwakt. Maar de lagen te snel aanbrengen, is ook niet goed. Dan is er te weinig tijd om uit te harden, en dat levert instortingsgevaar. Uit de literatuur haalden de wiskundigen een maximum voor de hoogtegroei: niet meer dan 1,5 meter per uur. Zo kwamen er een maximale padlengte per omgang en een maximum hoogtegroei per minuut bij op de eisenlijst voor een goed ontwerp.

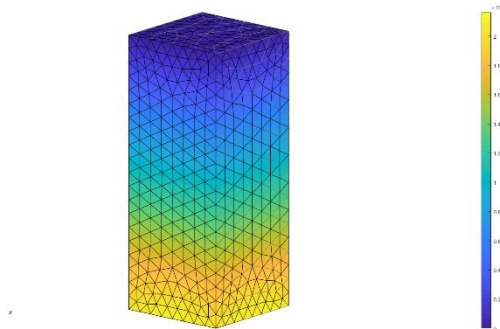
Daarnaast keken de wiskundigen naar het massazwaartepunt van de constructie. “Een ontwerp valt om wanneer het massazwaartepunt buiten het vloervlak valt”, legt Lense Swaenen uit. Hij is wiskundige bij Sioux LIME en deed mee aan de Studiegroep. “Wanneer je zorgt dat het massazwaartepunt tijdens het printen niet buiten het vloeroppervlak komt, dan weet je dat

de constructie niet omtuimelt. Je kunt een extra veiligheidsmarge inbouwen door het vloeroppervlak nog met tien procent in te krimpen.”

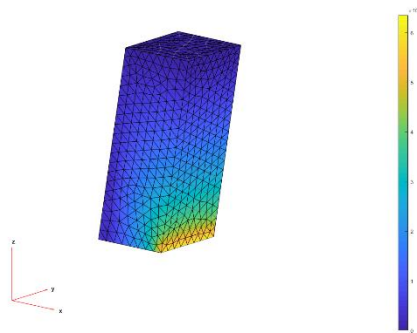
Buiter: “Met dit eisenlijstje zijn we heel blij, omdat het direct toepasbaar is. We ontwikkelen nu software om het printen van ontwerpen te automatiseren. Deze eisen gaan we in die software implementeren.”

Een eisenlijstje kan het aantal fouten verkleinen, maar het garandeert nog niet dat een ontwerp daadwerkelijk stabiel is. Dus wilden de wiskundigen ook graag een methode ontwikkelen die Bruil die zekerheid wel geeft. De manier om dat te doen is de krachtenbalans tijdens de print volledig door te rekenen. Een structurele analyse dus, zoals dat bij de bouw van bruggen of gebouwen ook wordt gedaan. “Die zou je dan voor iedere laag moeten doen”, legt Swaenen uit.

Doordat beton uithardt tijdens en na het printen, veranderen de eigenschappen door de tijd. Swaenen: “In de tijd vanaf het begin van de print tot het eind kan het beton wel tien keer sterker worden. Daar moet je bij het modelleren rekening mee houden.” Nat beton gedraagt zich als een zogeheten binghamvloeistof, vertelt Swaenen. Dat betekent dat het in dezelfde categorie valt als mayonaise, pindakaas, behanglijm en klei: het is stevig en vloeit pas vanaf een bepaalde druk. “In onze simulaties beschouwden wij het als een elastisch materiaal, tot het punt dat het breekt”, vertelt Swaenen. De wiskundigen gebruikten de eindige-elementenmethode (FEM) voor een statische, structurele analyse. “Dat betekent dat je de structuur opdeelt in elementen, waarbij op ieder element de zwaartekracht werkt en de krachten vanuit de buurelementen”, legt Swaenen uit. Die krachten mogen dan niet zo uitvallen, dat het element ‘breekt’ en het beton begint te vloeien. “Voor iedere nieuwe laag doen we dan een nieuwe berekening; iedere toevoegde laag verandert immers het krachtenspel.” Voor een aantal snelle analyses gebruikten de wiskundigen standaard FEM-software van MATLAB.



Resultaten van de FEM-analyses voor verschillende structuren.



Resultaat van de FEM-analyse van een schuine pilaar.

Bruil wil graag een methode die snel is, zeker niet langer dan een paar minuten. Buiten: “Architecten willen maximale vrijheid. Ze zullen steeds met andere ontwerpen komen die de grenzen opzoeken. Daarom zullen we wel toe moeten naar een methode om nieuwe ontwerpen snel helemaal door te rekenen.” De wiskundigen keken naar de rekestijd van een aantal eenvoudige structuren, zoals een rechte en een schuine pilaar. Die simulaties duurden een halve minuut. De rekestijd zal bij ingewikkeldere constructies verder oplopen. “De vraag die we ons nu stelden, was hoe we de rekestijd konden beperken”, zegt Swaenen. Eén

mogelijkheid om de simulatie klein te houden is door bij de berekeningen een grid te kiezen dat nauw aansluit bij de gewenste geometrie. “Voor printen kun je beter een rechthoekig grid dan een driehoekig kiezen”, licht Swaenen toe. Een slimme besparing van de rekentijd is daarnaast om niet het hele grid door te rekenen, maar alleen het deel waar daadwerkelijk beton zit. “Anders is de computer aan het rekenen met een groot stuk waar nog niets is – waar dus alleen maar nullen staan. Die nullen vergroten de rekentijd, je kan hiermee de rekentijd met een factor 10 tot 100 verkorten.”

Een deel van de groep keek ook of ze met vergelijkingen de fysica van de constructie konden benaderen. Met eenvoudige fysica is een aantal standaardvormen goed door te rekenen. Swaenen: “We valideerden met eenvoudige fysische modellen eerst een aantal basisvormen, zoals een rechte muur, een schuine muur en een divergerende cilinder. Het idee is dat je dat uit zou kunnen bouwen naar willekeurige vormen.” De fysische modellen gaven ook extra inzicht in de criteria, die je voor een stabiel systeem kan opstellen.

Tijdens de week gingen de wiskundigen ook op excursie naar Bruil, om de prints in het echt te zien. Buiten: “Dat was niet alleen leuk, maar ik merkte dat ze daarna ook beter begrepen welke vormen er allemaal mogelijk zijn.” De wiskundigen presenteerden hun resultaten na afloop van de week ook nog bij het management van Bruil. Buiten: “Dat was prettig, dan weten zij ook goed waar wij mee bezig zijn geweest.”

Buiten is ervan overtuigd dat Bruil de uitkomsten gaat gebruiken. “Met de eisenlijst kunnen we meteen aan de slag. De structurele analyse vraagt meer tijd. Er loopt bij ons een onderzoek van civiele techniekstudenten, dat ook die kant opgaat.” Zij is ervan overtuigd dat de stabiliteit van de ontwerpen in de toekomst zeker helemaal doorgerekend zal worden. “Dat is ons inmiddels wel duidelijk. We weten nog niet, of wij die analyses zelf gaan doen, of dat we ze aan een constructeur zullen uitbesteden. Maar deze week heeft ons hoe dan ook meer inzicht gegeven in welke kant we op moeten”, besluit Buiten.