

# PARAMETRISCHE OPZET 3DPB-BRUG<sup>1</sup>

Karel van Dongen MSc, ir. Johan Bolhuis RO | BAM Infraconsult  
ir. Herman Oogink, Gino Vanstraelen | SCIA

Dankzij ontwikkelingen als parametrisch ontwerpen en 3D-printen in beton (3DPB) is het mogelijk om zowel het ontwerp- als het productieproces van betonconstructies te automatiseren. In de praktijk wordt daar al veel ervaring mee opgedaan. Een belangrijke stap is het koppelen van een parametrisch ontwerpmodel aan een eindige-elementenanalyse (EEA). Als testcase van die koppeling is de 3DPB-brug in Gemert gebruikt, waarbij gebruik is gemaakt van de combinatie Rhinoceros en Grasshopper voor het parametrische model, SCIA Engineer voor de EEA en Python voor het automatiseren van het proces.



In beton geprinte brug in Gemert

<sup>1</sup> Onderstaand artikel is eerder gepubliceerd in *Cement*. Omdat het een afstudeeronderzoek betreft, dat lezers van Bruggen Young zal interesseren, is voor publicatie binnen deze rubriek gekozen om een breder publiek te kunnen bereiken. Red.

De mate van automatisering van processen in de bouwwereld loopt achter op andere industrieën. Dit heeft te maken met een complex systeem van onderling afhankelijke activiteiten en processen [1]. Dit heeft geleid tot vergaande specialisatie met een scheiding tussen ontwerp en uitvoering.

Door recente ontwikkelingen in de bouwsector, zoals Building Information Modeling (BIM) en Computer-Aided Design/Engineering (CAD/CAE), kunnen de complexe relaties binnen het bouwproces tegenwoordig goed in kaart worden gebracht. Het wordt mogelijk de ontwerpinput parametrisch te koppelen aan voorspellingen voor de output, waarmee het ontwerpproces kan worden geautomatiseerd. In combinatie met het onlangs ontwikkelde 3D-printen van beton is het mogelijk om een dergelijk geautomatiseerd ontwerpproces te koppelen aan een geautomatiseerd productieproces. Deze opzet kan worden gezien als één van de eerste beginselen van een op BIM gebaseerd geautomatiseerd bouwproces.

In dit artikel wordt de koppeling beschreven tussen een geautomatiseerd, parametrisch ontwerpmodel voor een 3D-geprinte betonnen (3DPB) brug en een EEA model. Hierbij worden de CAD/CAE-programma's Rhino 5.0 en Grasshopper 0.9.0076 gebruikt. Voor het EEA-model wordt SCIA Engineer 17.01 gebruikt. De opzet van het model en de referentiewaarden zijn gebaseerd op de 3DPB-brug in Gemert (zie foto blz. 30), gerealiseerd door o.a. BAM Infra en TU Eindhoven.

## STAP 1: PARAMETRISCHE OPZET GEOMETRIE

Vóór het model wordt opgezet, is het verstandig te beginnen met het definiëren van wat de gewenste output is van het model, ofwel de "simulatie-intentie". Door de simulatie-intentie vooraf te bepalen kan tijd worden bespaard op het ontwikkelen en bij het gebruik van het model [2].

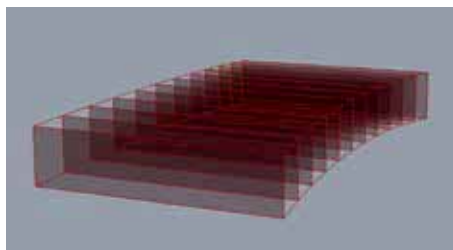
Het doel van het parametrische model is, in het project beschreven in dit artikel, het genereren van een 3D model waaruit dwarsdoorsnede-eigenschappen berekend kunnen worden en het visualiseren van de geometrie.

Het model dat is beschreven in dit artikel, maakt gebruik van een vergelijkbare geometrie en doorsnede als het ontwerp van de 3DPB in Gemert (zie pagina 30). Het modelleren van – en het rekenen met – de

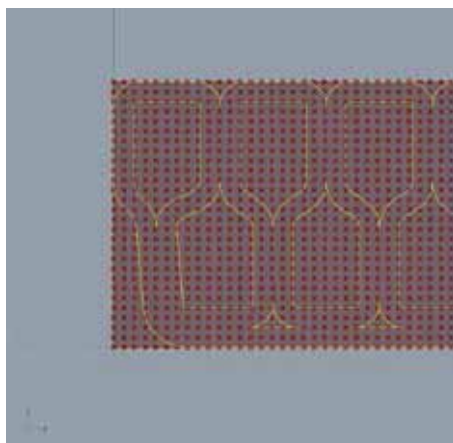
exacte doorsnede van de Gemert-brug is een tijdrovend proces. Om die reden gaat het model uit van een simplificatiemethode die gebaseerd is op een gesimplificeerde weergave van de doorsnede. Dit houdt het volgende in (fig. 1a, b en c):

- 1a Identificeren van de hoekpunten van de doorsnede. Deze worden gebuikt voor het opzetten van een rechtlijnige vorm van de doorsnede (simplificatie).
- 1b Het verbinden van de hoekpunten om de doorsnede te visualiseren. Deze doorsnede wordt geplaatst op een aantal locaties in de overspanningsrichting om de doorsnedewaarden te bepalen (deze kunnen variëren door het aanpassen van de globale geometrie).
- 1c Gesimplificeerde weergave van het representatieve model dat kan worden gebruikt voor analyse in SCIA Engineer. Het representatieve model gebruikt afmetingen gebaseerd op de dwarsdoorsnede-eigenschappen van het print pad maar dan zonder uitsparingen.

Deze opzet van het model komt overeen met de simulatie-intentie: het eindresultaat wordt gevisualiseerd en de doorsnede-waarden worden bepaald op verschillende punten in de spanrichting. In dit artikel ligt de nadruk op de koppeling met een EEA waardoor de geometrie niet verder wordt beschreven.



1a Identificatie van hoekpunten



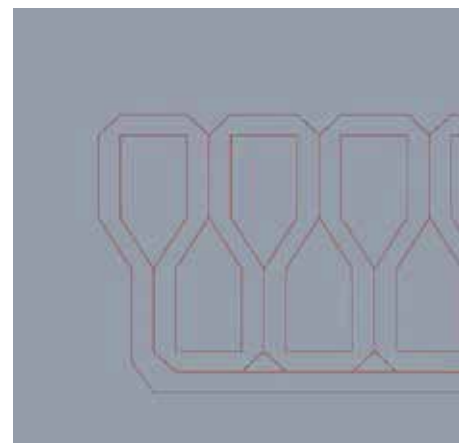
1b Gesimplificeerde weergave van de doorsnede

## STAP 2: KOPPELING MET EINDIGE ELEMENTENANALYSE

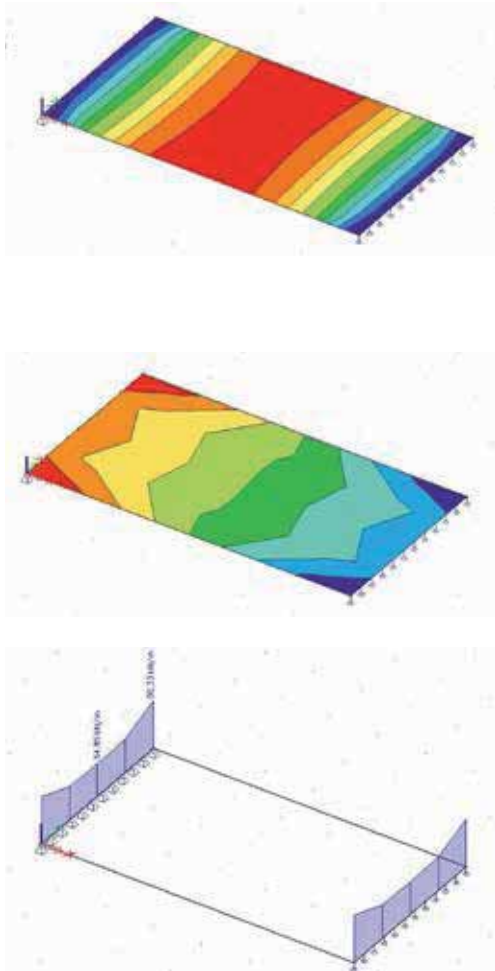
Voor de koppeling met een EEA-softwarepakket is het van belang de benodigde input te bepalen. Het model dat wordt beschreven in dit artikel, wordt lineair-elastisch berekend als een plaatligger op twee steunpunten. Voor de analyse in SCIA Engineer is het noodzakelijk de volgende informatie te specificeren:

- 1 algemene informatie over opzet van het model (vrijheidsgraden) en de gehanteerde norm (Eurocode);
- 2 materiaaleigenschappen die worden gebruikt in het model;
- 3 belastingcombinaties en waarden van de belasting op het model;
- 4 knopen die worden gebruikt om vlakken te definiëren;
- 5 elementen, welke knopen per element en welke materiaaleigenschappen;
- 6 type oplegging met betrekking tot de restrictie van vrijheidsgraden van de plaat.

In het parametrische model wordt de bovenstaande informatie gegenereerd, met behulp van aanpasbare input, op basis van het gesimplificeerde model. De belastingen en de belastingcombinaties op het brugdek worden gedefinieerd op basis van de geldende normen. De knopen en plaalementen worden gegenereerd door het model in stukken te delen en deze stukken te specificeren als onderling stijf verbonden platen.



1c Solide weergave van het representatieve model voor EEA



2 van boven naar onder  
Moment verdeling – Dwarskracht verdeling –  
Opleg krachten [Gegenereerd in SCIA  
Engineer]

Als de benodigde informatie is gegenereerd, wordt deze informatie gesorteerd en in XML-formaat gestructureerd. Daarna wordt het volledige model weggeschreven in een XML-bestand. Dit bestand kan daarna door SCIA Engineer worden ingelezen. Dit proces is volledig geautomatiseerd in Grasshopper met behulp van een Python plug-in. Hierin wordt achtereenvolgens het XML-bestand geschreven en SCIA Engineer aangeroepen om dit rekenmodel in te laden en te berekenen. Na het doorrekenen van de constructie worden de moment- en dwarskrachtverdeling in de spanrichting en de oplegkrachten en momenten gegenereerd (fig. 2). Al deze stappen staan beschreven in de Python-module.

Om het exporteren van het XML-bestand te automatiseren kan in Python 2.7 de 'operating system' module worden gebruikt. De juiste datastructuur kan worden gedefinieerd door gebruik te maken van de

'codecs' module in Python 2.7. Na het exporteren van het XML-bestand kan het worden ingelezen in SCIA Engineer. Het voordeel van het importeren met XML is dat het model direct wordt opgezet aan de hand van de gespecificeerde onderwerpen. Hierdoor is het niet nodig handmatig verdere informatie in te voeren met behulp van de SCIA Engineer interface. Uiteraard moet dan wel het XML-bestand correct en volledig zijn opgesteld.

### STAP 3: AUTOMATISEREN VAN DE KOPPELING TUSSEN EEA EN GRASSHOPPER

SCIA Engineer kan worden gebruikt als 'rekenkernel' om de link tussen Grasshopper en de EEA te automatiseren. Dat wil zeggen dat de EEA wordt aangeroepen zonder interface en dat het programma kan worden aangestuurd met commando's. Door het gebruik van commando's kan een standaardbestand (template) worden geopend waarin het XML-bestand, beschreven in de vorige stap, wordt ingeladen zonder handmatige input. SCIA Engineer gebruikt een lijst met commando's voor verschillende typen analyse waaronder een lineair-elastische berekening, die in het beschreven model wordt gebruikt. Na het uitvoeren van de analyse moet worden gespecificeerd hoe de uitvoer van de resultaten wordt weggeschreven. Dit kan in een SCIA Engineer bestand maar ook in andere bestandsformaten zoals XML, HTML en TXT.

In totaal zijn er vier commando's nodig voor een analyse in SCIA Engineer zonder interface:

- 1 een beginbestand (templatefile),
- 2 een XML-bestand met invoer,
- 3 een analysetype en
- 4 een uitvoerbestand.

Een manier om de commando's achter elkaar uit te laten voeren is het gebruik van een CMD-file (bestand waarin een aantal computercommando's zijn geplaatst die na

elkaar worden uitgevoerd), waarin de gewenste reekscommando's in volgorde staan beschreven (fig. 3).

### STAP 4: INTERPRETATIE RESULTAAT

Omdat het model een gesimplificeerde versie is van de realiteit, is het noodzakelijk de verkregen resultaten uit de analyse te verwerken. In het proces, zoals beschreven in dit artikel, is dat gedaan in Grasshopper. De waarden gegenereerd in de EEA worden geëxporteerd als interne plaatkrachten in de knooppunten van het Eindige-Elementen Mesh. Dit wil zeggen dat de resultaten plaatsgebonden zijn en een intensiteit aangeven per eenheid lengte van de elementen in het EEM. Om die reden is de eerste stap het verkrijgen van de waarden van de representatieve krachten op het model (zie vergelijking 1).

$$M_{i,j} = m_{x,i,j} \times b_{i,j}$$

$$V_{i,j} = v_{x,i,j} \times b_{i,j}$$

$$R_{z,i} = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} [(v_{x,i,j} + v_{x,i,j+1}) \times b_{i,j}/2]}{\sum_{j=1}^n b_{i,j}}$$

Vergelijking 1; van boven naar beneden – Rep. waarde moment – Rep. waarde dwarskracht – Rep. waarde van de reactiekracht [alle op locatie i en sublocatie j]. [b]=breedte van het element, [M]=moment, [V]=dwarskracht en [R]=reactiekracht

De waarden van de representatieve krachten op het model kunnen worden gebruikt om de spanning in de doorsneden te bepalen. Naast de krachtverdeling is de spanning in de doorsnede afhankelijk van de na-spanning in het model, het traagheidsmoment van de doorsnede, de excentriciteit van de doorsnede en de excentriciteit van de na-spanning. De waarden van de spanning moeten worden geverifieerd in de uiterste vezels, aan de boven en onderkant, van de

```
> set esaprog="SPECIFY THE LOCATION OF THE esa_xml.exe FILE"
> C:
> cd "FILE DIRECTORY OF XML FILE AND OUTPUT"
>
> %esaprog% NOC "_Template.esa" "SCIA Export.xml" -o"GH_Model.esa"
> %esaprog% LIN "GH_Model.esa" -o"GH_Model_Results.esa"
> %esaprog% NOC "GH_Model_Results.esa" -tTXT -o"GH_Model_Results.txt"
```

3 Voorbeeld van een CMD-bestand voor het automatisch uitrekenen van het gegenereerde xml bestand aan de hand van de beschreven commando's. [NOC=geen berekening, LIN=lineair elastisch]

doorsneden in alle knopen van het EEM. Indien de breedte van de plaat kleiner is dan de helft van de lengte, dan kan een min of meer constant spanningsverloop worden verwacht over de breedte van het tweezijdig opgelegde model (zie vergelijking 2). Indien de plaat niet voldoet aan dit criterium of meer opleg- punten/zijdes heeft dient ook het verloop in de breedte te worden bepaald [3].

$$\sigma_{c,i,j} = \frac{P_m}{A_{c,i}} + \frac{P_m \times z_i \times e_{p,i}}{I_{c,i}} + \frac{M_i \times z_i \times e_{p,i}}{I_{c,i}} \geq f_{cd}$$

$$\sigma_{c,i,j} = \frac{P_m}{A_{c,i}} + \frac{P_m \times z_i \times e_{p,i}}{I_{c,i}} + \frac{M_i \times z_i \times e_{p,i}}{I_{c,i}} \leq f_{ctd}$$

Vergelijking 2; van boven naar beneden – Spanning in het model is groter dan de maximaal toelaatbare drukspanning in het model (druk is negatief) – Spanning in het model is lager dan de maximaal toelaatbare trek in het model (trek is positief). [P]=na-spanning in kN, [A]=oppervlakte van de doorsnede in m<sup>2</sup>, [z]=hoogte coördinaat van de vezel in m, [e]=excentriciteit na-spanning en [I] is het traagheidsmoment. Allen op locatie i in de overspanningsrichting.

## NAUWKEURIGHEID VAN DE RESULTATEN

De waarden verkregen uit het model moeten worden geverifieerd aan de hand van referentie-projecten. In dit geval het referentiemodel en rapport van de 3DPB-brug in Gemert [4]. De extreme waarden uit het model worden vergeleken met de gecontroleerde waarden uit het referentieproject (fig 4). Aan de hand van deze vergelijking kan de nauwkeurigheid van het model worden bepaald. De resultaten van de vergelijking tonen aan dat het beschreven model waarden genereert die de referentiewaarden nauwkeurig benaderen en aan de veilige kant zijn. Dit wil zeggen dat de resultaten uit het model minder gunstig zijn dan de referentie waarden, wat resulteert in een betere uitnutting van het materiaal. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het beschreven model resulteert in een veilige benadering van de kracht- en spanning-verdeling in het ontwerp.. De spanning in de onderste vezel van de doorsnede wijkt meer af van de referentie-

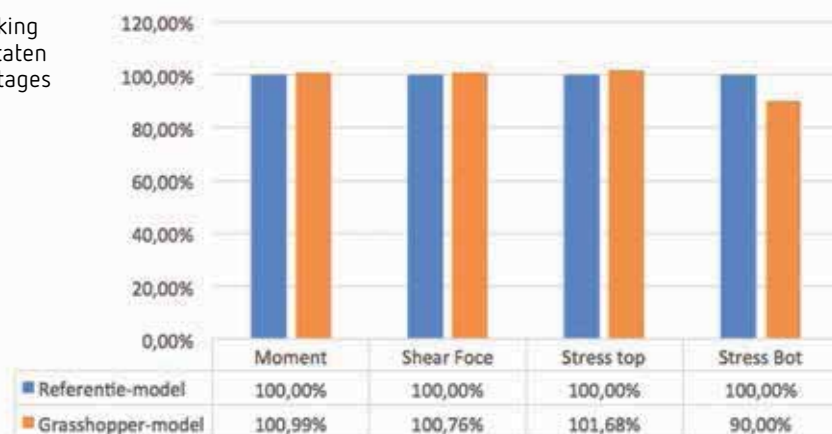
waarde dan de andere waarden. Dit heeft te maken met de lage waarden van de lokale spanning. Een van de eisen aan het beschreven model is namelijk dat er geen trekspanningen mogen voorkomen in de doorsnede. Hierdoor is de optimale waarde van de spanning in de onderste vezel een negatief getal zo dicht mogelijk bij nul. Omdat de spanning in de onderste vezel een waarde dichtbij nul heeft, is de procentuele afwijking hoger in vergelijking met andere waarden.

## CONCLUSIES EN DISCUSSIE

Aan de hand van de vier stappen beschreven in dit artikel is een geautomatiseerd ontwerp- en analysemodel gemaakt voor een 3D-geprinte betonnen brug. De waarden die het beschreven model genereert, zijn getoetst met een referentieproject, namelijk de 3D-geprinte betonnen brug in Gemert. In vergelijking met het referentieproject blijken de resultaten een veilige benadering te zijn van de kracht- en spanning-verdeling in het ontwerp. Hierdoor kan worden geconcludeerd dat de beschreven methodiek correct is en resulteert in een veilige berekening.

Het exacte materiaalgedrag kan echter niet worden bepaald met het model. Dit komt door de complexiteit van de doorsnede van het oorspronkelijke model. Ten behoeve van simplificatie is gekozen om het model te analyseren als een aaneenschakeling van 2D platen met variërende afmetingen in de richting van de overspanning. Om het exacte materiaalgedrag te analyseren moet de exacte vorm van de doorsnede worden geconverteerd naar een eindige-elementenmodel, inclusief de inhomogene vorm/samenstelling van de doorsnede en het materiaal.

4 Vergelijking van resultaten in percentages



De methodiek beschreven in dit artikel, kan worden gebruikt om het proces en de benodigde stappen te automatiseren en te besturen vanuit één software-interface. Een mogelijke vervolgstap kan zijn het koppelen van dit model aan optimalisatie-algoritmes. Die kunnen aan de hand van de input en een optimalisatiecriterium een optimale combinatie tussen parameters genereren. Met deze vervolgstap wordt het mogelijk het bouwproces aan te sturen vanuit één software-interface in de optimale samenstelling, gebaseerd op het criterium van de opdrachtgever. In combinatie met 3D-printen van beton kan deze methode worden gebruikt als aanloop naar het automatiseren van het totale bouwproces.

Echter, hiervoor is meer onderzoek nodig naar de combinatie tussen ontwerpproces & bouwproces, het automatiseren van het geheel, het optimaliseren van het proces en de nauwkeurige analyse van complexe vormen.

## REFERENTIES

- 1 Dubois, A. and L.-E. Gadde, *The construction industry as a loosely coupled system: implications for productivity and innovation*. Construction Management & Economics, 2002. 20(7): p. 621-631.
- 2 Nolan, D.C., et al., *Defining simulation intent*. Computer-aided design, 2015. 59: p. 50-63.
- 3 Blaauwendraad, J., *Theory. Plate analysis, theory and application* Vol. 1. 2006, Delft: Technical University Delft. 96.
- 4 Uitvoeringsontwerp van de 3DCP brug Gemert, 24/07/2017 kenmerk 100640/17-010.181. 2017: Witteveen+Bos, Deventer.