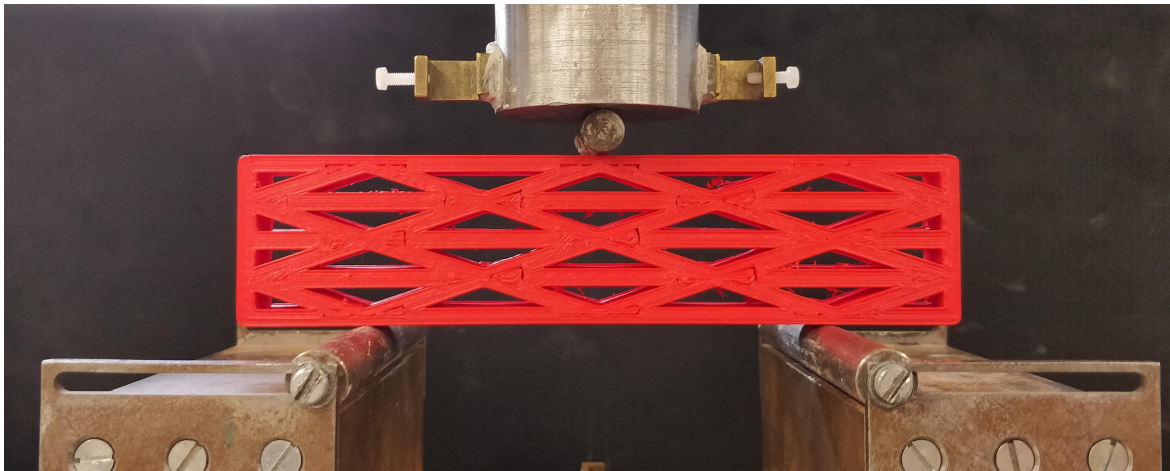


Een ontwerpmethode voor het additief produceren van geoptimaliseerde wapening door middel van rekenmodellen en een genetisch algoritme

BSc-eindwerk

David Benjamin Ninfa
4488040



Ter afronding van de studie Civiele Techniek aan de TU Delft.



Faculty of Civil Engineering and Geosciences
TU Delft
Nederland
Oktober 2019

Voorwoord

Dit verslag is geschreven door David Benjamin Ninfa, student BSc Civiele Techniek aan de TU Delft.

Aanleiding van dit onderzoek is de verplichting om een scriptie te schrijven ter afronding van de studie en mijn interesse in de toegepaste mechanica en computergestuurde optimalisaties.

De doelgroep wordt gevormd door medestudenten, personen werkzaam op een van eerdergenoemde vakgebieden of geïnteresseerden.

Alle digitale bestanden zijn beschikbaar gesteld op de TU Delft Repository.

Dit onderzoek is begeleid of ondersteund door de volgende personen, waarvoor dank.

- **Dr. ir. P.C.J. Hoogenboom**
Structural Mechanics
- **Dr. ir. B. Šavija**
Experimental micromechanics
- **Yading Xu M.Sc.**
Experimental micromechanics
- **Ir. L.P.L. van der Linden**
Building Engineering

Samenvatting

De traditionele wapening biedt ruimte tot verbetering: het doel van dit onderzoek is een ontwerpmethode te beschrijven die leidt tot een meer optimale, additief te produceren wapening door middel van rekenmodellen en een genetisch algoritme. Daarnaast dient de werking te worden aangetoond door middel van proeven.

Het proces is als volgt.

1. Spanningen van een constructie-element worden inzichtelijk gemaakt door een berekening in SCIA Engineering.
2. Deze spanningen worden in Rhinoceros-model aangebracht op een wapeningsstructuur en vervolgens geoptimaliseerd. Het doel van de optimalisatie is met minder gewicht dezelfde belasting te kunnen dragen.
3. Het geoptimaliseerde grid wordt geëxporteerd naar autoCAD waar het klaar wordt gemaakt voor additieve productie.

Dit proces is succesvol doorlopen waarvan de uitkomsten zijn te vinden in dit verslag.

Om de optimalisatie te valideren is middels hetzelfde proces een vakwerk geoptimaliseerd, geproduceerd en getest in een driepuntsbuigproef. Helaas tonen verkregen resultaten niet de werking van de optimalisatie aan maar worden wel erg nuttige bevinden gedaan, te gebruiken in vervolgonderzoeken.

Door de methodiek en te ondernomen stappen duidelijk te beschrijven en digitale bestanden beschikbaar te maken, zal dit verslag dienen als naslag en solide basis voor komende onderzoeken op dit gebied.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Theoretisch kader	6
2.1	Relevante mechanica	6
2.1.1	Spanning	6
2.1.2	Spanningen in een vakwerk	7
2.1.3	EEM	8
2.2	Materiaaleigenschappen	8
2.2.1	Beton en scheurvorming	8
2.3	Traditionele wapening (en -dimensionering)	9
2.3.1	Langswapening	9
2.3.2	Dwarskrachtwapening	9
2.4	Additieve productie	9
2.5	Evolutionaire optimalisatie	10
3	Onderzoek	11
3.1	Software en databewerking	11
3.2	Spanningstoestanden in SCIA Engineering	11
3.3	Structuur-optimalisatie in Rhinoceros	12
3.3.1	Grasshopper	13
3.3.2	Karamba 3D	14
3.3.3	Galapagos	16
3.4	Gridconstructie in autoCAD	16
3.5	Productie en toetsing	17
4	Resultaten	20
4.1	Ontwerpproces	20
4.2	Validatie aan hand van driepuntsbuigproef	20
5	Discussie	23
6	Conclusie en aanbevelingen	24
6.1	Conclusie	24
6.2	Aanbevelingen	24
	Literatuurlijst	25
	Lijst van figuren	26

1 Inleiding

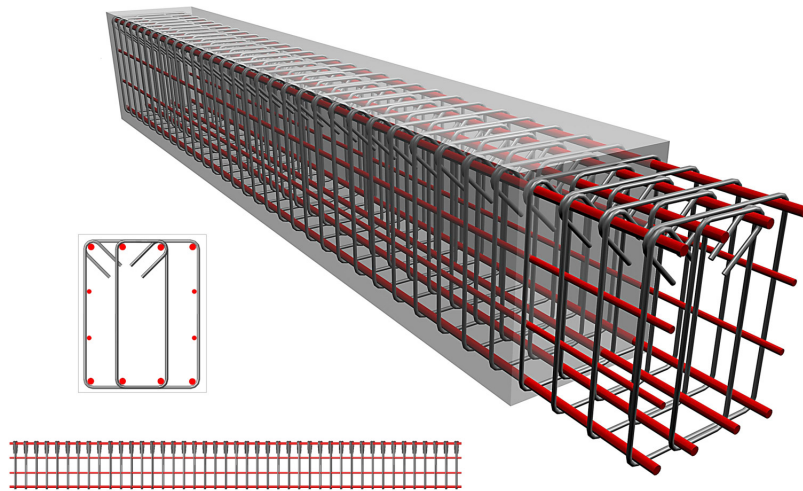
Beton is een van de meestgebruikte bouwmaterialen ter wereld [10]. Hoewel het materiaal goede weerstand biedt tegen drukkrachten, toont het materiaal zich relatief zwak tegenover trekkrachten. Om alsnog deze weerstand te bieden, wordt er in het beton stalen wapening toegepast: de weerstand van het staal wordt gemobiliseerd zodra het beton bezwijkt onder de trekkrachten.

Ondanks dat de wapening omgeven is door het beton, kan het tijdens de levensduur toch voorkomen dat deze wapening bloot komt te liggen door slijtage of chemische processen. Gevolg hiervan is dat het staal zal corroderen: de sterkte en daarmee weerstand tegen trekkrachten neemt af wat ertoe leidt dat het beton alsnog zal scheuren [16] en de dekkingslaag om de wapening zal worden afgeworpen [17].

Een misvatting is dat betonnen constructie-elementen niet mogen scheuren: dit is noodzakelijk om de wapening te activeren. De scheurwijdtes moeten echter worden beperkt.

Traditioneel zijn in een balk de volgende twee soorten wapening te onderscheiden:

- Langswapening: staalkabels in de langsrichting van een betonnen balk, bieden weerstand tegen trekkrachten door buiging; in figuur 1 de rode staven.
- Dwarswapening: beugels van staal in dwarsrichting, bieden weerstand tegen trekkracht-componenten van dwarskrachten; in figuur 1 de grijze staven.



Figuur 1: Traditionele wapeningsstructuren in een betonnen ligger. [7]

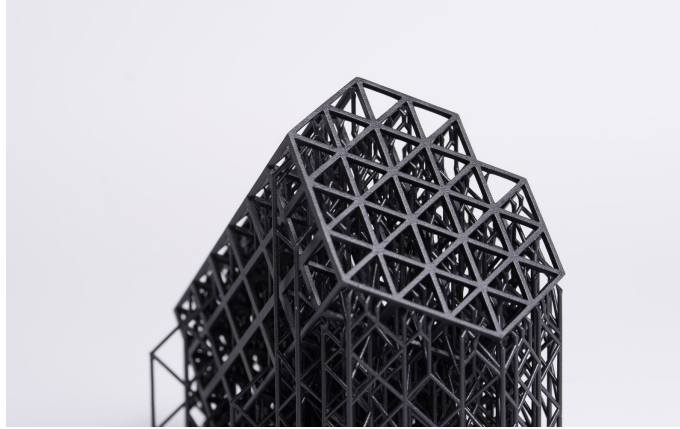
De traditionele stalen wapening wordt gedimensioneerd aan hand van maatgevende doorsnedes in de balk: veelal is dit een overschatting ten opzichte van het gemiddelde.

Additief geproduceerde wapening zou qua geometrie kunnen verlopen qua geometrie in één richting: dit zou de overschatting en daarmee deficiëntie die komt kijken bij traditionele wapening kunnen wegnemen.

Recente ontwikkelingen in additieve productietechnieken met polymeren ("3D-printen") maken het mogelijk complexe structuren te produceren waarvan een voorbeeld is te zien in figuur 2.

Dit doet de vraag opbrengen of de traditionele langs- en dwarswapening niet tot één kunnen worden gemaakt, wat zou leiden tot efficiënter gebruik van massa.

Daarnaast zijn de kunststoffen beter bestand tegen eerder genoemde corrosie [11].



Figuur 2: Een voorbeeld van complexe additieve productie. [5]

Hoewel onderzoeken en resultaten naar additieve productie ter versterking van beton veel belovend zijn, blijkt nog maar weinig onderzoek te zijn gedaan naar de geometrie en topologie van deze structuren.

Het doel van dit onderzoek is om tot een ontwerpmethodiek te komen die gebruik maakt van computationele modellen en additieve productie opdat een meer optimale wapening voor beton wordt verkregen. De bevindingen moeten dienen als vertrekpunt voor komende onderzoeken. Mocht het proces leiden tot een succesvol resultaat, dan wordt dat nog getoetst. Hierbij is van belang dat gedurende het proces de ondernomen stappen worden gedocumenteerd opdat het concept gevalideerd kan worden. Het is namelijk onduidelijk of dit onderzoek zal leiden tot een succesvol resultaat maar mocht dit niet het geval zijn, dan doet het tenminste dienst als naslag voor verder onderzoek.

Deze studie zal zich beperken tot een balk belast met een puntlast in het midden. Daarnaast moet opgemerkt worden dat eventueel testen van een geproduceerde wapening niet zal zijn op werkelijke schaal daar gangbare maten niet te produceren zijn voor dit onderzoek.

De methodiek bestaat uit vier stappen:

1. **spanningstoestanden**

Er dient een model verkregen te worden van de spanningstoestanden in het constructie-element.

2. **structuuroptimalisatie**

De wapening zal bestaan uit een grid. Dit grid wordt opgedeeld en vervolgens per deel geoptimaliseerd aan de hand van de werkende spanningen op het bijhorende gebied.

3. **gridconstructie**

De delen worden samengevoegd en vormen één structuur; deze wordt klaar gemaakt om te produceren.

4. **productie en toetsing**

Een teststuk wordt geproduceerd en getoetst om de methodiek te valideren.

2 Theoretisch kader

In dit hoofdstuk zal kort relevante informatie worden gegeven, benodigd om dit onderzoek te valideren.

2.1 Relevante mechanica

Wat betreft mechanica.

2.1.1 Spanning

Spanning (σ) is de kracht die wordt uitgeoefend per eenheid van oppervlakte. Volgende vier soorten zijn te onderscheiden:

1. drukspanning
2. trekspanning
3. schuifspanning
4. wringing

Afhankelijk van de soort spanning, trek- of drukspanning, kan een materiaal uitgerekt worden of ingedrukt. Wordt de belasting weggenomen binnen het elastische traject, dan keert het materiaal terug naar de oorspronkelijke geometrie.

De elasticiteitsmodulus (E) bepaalt ten dele deze rek (ϵ) bij een trekspanning (+) of de compressie bij drukspanning (-), dit is een lineair verband.

De rek is de vervorming van het materiaal in axiale richting en een dimensieloos getal aangezien het de verhouding is tussen de lengteverandering (Δl) en de oorspronkelijke lengte (l_0).

$$E = \sigma * \epsilon \quad \text{met} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{en} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Buiging is een combinatie van een trek- en drukspanningen. Voor buiging geldt dat de axiale spanning wordt bepaald door:

$$\sigma = \frac{Mz}{I} \quad \text{met} \quad M = \frac{1}{4}Fl, \quad I = \frac{1}{12}bh^3 \quad \text{voor rechthoekige doorsneden}$$

en z de afstand van de neutrale lijn tot de vezel in beschouwing.

In geval van pure buiging valt de neutrale lijn samen met de horizontaal door het midden van de balk.

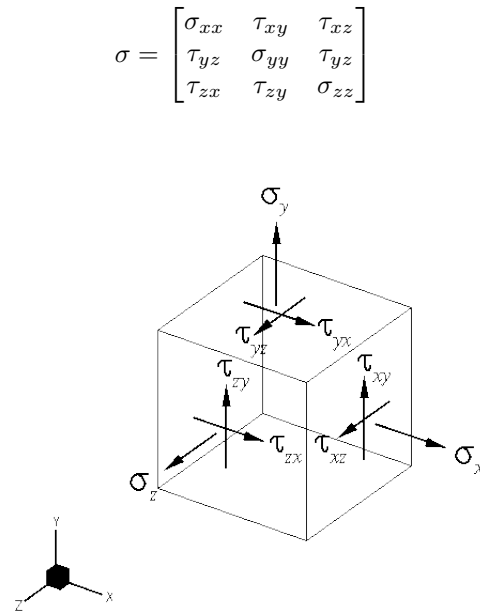
Er zit een maximum aan het evenredige rekgedrag van materialen onder trekkracht: als deze grens (lees: spanning) wordt bereikt, kan het materiaal een plastische vervorming tonen. Het materiaal smeert dan uit en keert niet terug naar de oorspronkelijke geometrie bij wegnemen van de belasting. De constructieve werking van het materiaal is hierbij verloren. Deze grens wordt de "vloei grens" of "treksterkte" genoemd en is kenmerkend voor een materiaal. Overigens is dit niet het geval bij alle materialen: sommige zijn bros en bezwijken na de elastische grens.

Alhoewel er bij een sterkteberekening moet worden gecontroleerd op overschrijding van zowel druk- als treksterkte leert de praktijk dat veelal de treksterkte kleiner is dan de druksterkte en daarom maatgevend.

Uiteraard is ook de manier waarop belast wordt van belang: bij een drukproef treden alleen drukspanningen op en is de druksterkte maatgevend; bij pure buiging treedt evenveel trek- als drukspanning op.

Spanningen worden gedefinieerd als normaalspanning, dat wil zeggen dat de spanning loodrecht op het oppervlakte staat. Dit is meestal niet het geval: de kracht en daarmee de spanning staat onder een hoek op het oppervlakte en kent daarom nog een langscomponent in het vlak. Daarom

worden spanningen beschreven als driedimensionale tensoren met componenten in x-, y- en z-richting. Deze definitie is als volgt, waarbij de eerste letter staat voor de richting loodrecht op het vlak waarop de spanning werkzaam is en tweede letter voor de richting. Tevens uitgebeeld in figuur 3.



Figuur 3: De grafische definitie van een driedimensionale spanningstensor. [1]

2.1.2 Spanningen in een vakwerk

Vakwerken zijn liggers vervaardigd uit staven die driehoeken vormen. De staven zijn scharnierend met elkaar verbonden en de driehoekvorm maakt de constructie onvervormbaar.

Bij de beschouwing van een vakwerk worden drie aannames gedaan:

1. *Het eigen gewicht van de staven is verwaarloosbaar ten opzichte van de belasting.*

Horizontale staven produceren geen zwaartekracht in het midden van het veld: er treden geen dwarskrachten en momenten op.

2. *De staven zijn scharnieren verbonden in de knooppunten.*

Beide uiteinden van een staaf zijn scharnieren verbonden: de staven worden beschouwd als pendelstaven. Er treden geen momenten op.

3. *Belasting grijpt alleen aan in knooppunten.*

Er grijpt geen belasting in het veld van een staaf: er treden geen dwarskrachten op; ook geen momenten doordat de werklijnen van de belastingen door de scharnierende knooppunten gaan.

In een vakwerk worden krachten bij benadering dus alleen axiaal afgedragen: de staven worden belast op trek- of drukspanningen.

De term "vakwerk" wordt gebruikt als het gaat om liggers: constructies bedoelt om een overbrugging te maken, waarvan de lengte in verhouding veel groter is dan de hoogte. Voor een vierkant deel van de wapening is dit niet het geval, daarom zal hiervoor de term "grid" worden aangehouden.

Ook voor het grid geldt de benadering dat alleen axiale spanningen optreden.

2.1.3 EEM

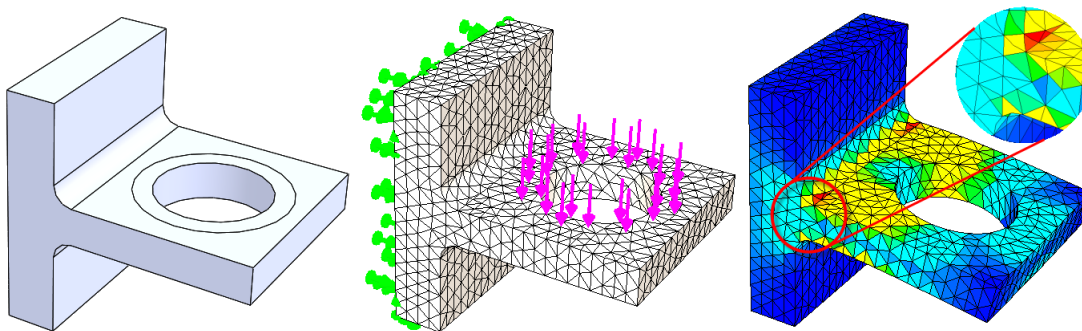
EEM staat voor 'eindige elementen methode' en is een veelgebruikte rekenmethodiek bij ingenieurswetenschappen.

Wetten en formules, waaronder die van warmte en doorbuiging, zijn bepaald voor standaardvormen en omvatten veelal differentiaalvergelijkingen. In de praktijk komt echter complexe en afwijkende geometrie voor, geen standaardvorm. Een dezelfde berekening uitvoeren voor zulke complexe structuren vergt veel rekenkracht en blijkt soms onmogelijk.

EEM deelt een continuüm op in een bepaald aantal (eindige) elementen. Deze partities zijn verbonden in zogenoemde knooppunten. Per element wordt dan alsnog de standaardvergelijking toegepast. Hoe kleiner deze elementen, hoe nauwkeuriger de oplossing maar de benodigde rekenkracht neemt daarmee meer dan evenredig toe; bij oneindig kleine elementen convergeert de uitkomst naar de analytische oplossing [12].

Naburige elementen worden gekoppeld door middel van randvoorwaarden in vergelijkingen opdat het object een continuüm blijft. Hiermee zijn de berekeningen per element gecombineerd tot een oplossing; dit proces is te zien in figuur 4.

In dit onderzoek worden SCIA Engineer en Rhinoceros gebruikt: deze programma's maken gebruik van EEM.



Figuur 4: Een complex object wordt geanalyseerd middels EEM.

2.2 Materiaaleigenschappen

Wat betreft materiaaleigenschappen.

2.2.1 Beton en scheurvorming

De treksterkte van beton is aanzienlijk lager, $\frac{1}{10}$ tot $\frac{1}{15}$, dan de druksterkte. De gemiddelde treksterkte van beton f_{ctm} is als volgt afhankelijk van de karakteristieke cilinderdruksterkte f_{ck} en gemiddelde cilinderdruksterkte f_{cm} [6].

$$\begin{cases} f_{ctm} = 0.7 * (0.30 f_{ck}^{\frac{2}{3}}), & \text{voor sterkteklassen} \leq C50/60 \\ f_{ctm} = 0.7 * (2.12 \ln(1 + \frac{f_{cm}}{10})), & \text{voor sterkteklassen} > C50/60 \end{cases}$$

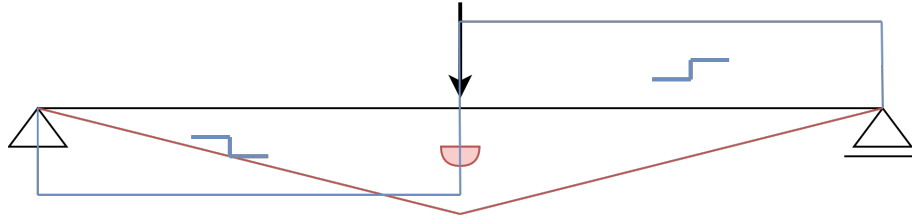
Het beton heeft dus een versterking nodig wat betreft de weerstand tegen trekspanning.

In de praktijk komt de axiale belasting van de versterking niet eens in de buurt van de eigen treksterkte omdat de maatgevende ontwerpconditie de scheurlengte is [6].

Er zijn gesteld aan deze scheuren omdat deze de bruikbaarheid van constructie-elementen aantasten en het mogelijk wordt voor materie tussen de scheuren te komen en de wapening aan te tasten. Deze voorwaarde vertaalt zich naar een maximaal toelaatbare rek van de versterking.

2.3 Traditionele wapening (en -dimensionering)

Bij een driepuntsbuigproef is er momentwerking en treden er dwarskrachten op: het verloop van deze krachten is gegeven in figuur 5.



Figuur 5: Het verloop van moment (rood) en dwarskracht (blauw) bij een driepuntsbuigproef.

2.3.1 Langswapening

De langswapening biedt weerstand tegen de eerder genoemde axiale trekspanning die optreedt bij buiging en bestaat uit een stalen kabel of meerdere kabels, te zien in figuur 1.

De axiale spanning in de doorsnede is gerelateerd aan het moment: dit momentverloop is zelden constant. Ergens in de balk treedt dus een maximum moment op dat een maximale trekspanning levert. Op basis van dit maximum wordt de doorsnede van de langswapening gedimensioneerd. Dit leidt tot een over-dimensionering voor doorsnedes elders in de balk waar een kleinere trekspanning heerst: dit is overdimensionering.

2.3.2 Dwarskrachtwapening

Door aanwezigheid van dwarskracht ontstaan in de balk ook schuinlopende trekspanningen, deze maken een hoek van 30° tot 45° met de liggeras [6]: een extra bezwijkmogelijkheid.

Daarom worden verticale beugels in balken toegepast, te zien in figuur 1.

De beugels zijn verticaal georiënteerd de trekspanning werkt onder een hoek: toepassing van additieve productie maakt wapening in die richting mogelijk.

2.4 Additieve productie

Er zijn verschillende mogelijkheden wat betreft additief produceren. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van Fused Deposition Modeling (FDM): een thermoplast wordt gesmolten gevoerd aan een printkop die vervolgens laagje voor laagje het model vervaardigd. Bij een hoek van meer dan 45° met de ondergrond moet een ondersteuning worden gebruikt.

Toegepast thermoplast is ABS-plastic en heeft een treksterkte van 30 MPa [2]: deze waarde wordt aangehouden in de te gebruiken programma's.

2.5 Evolutionaire optimalisatie

Een genetisch algoritme is gebaseerd op de natuurlijke selectie in de evolutie. Er zijn twee benodigdheden:

1. *Genetische representatie van de oplossingsruimte*

In dit geval alle mogelijke wapeningsstructuren.

2. *Fitness-functie om deze oplossingsruimte te interpreteren*

Het spreekt voor zich dat deze 'fitness' wordt bepaald aan de hand van mechanische prestaties van de wapening.

Er wordt gestart met een populatie bestaande uit individuele oplossingen en het betreft een iteratief proces: elke iteratie wordt de populatie veranderd, generaties genoemd.

In een generatie wordt de fitness van elk individu (lees: structuur) geëvalueerd. Op basis van deze waarden worden de individuen gewogen ingedeeld en kunnen door een stochastisch selectie-algoritme vervolgens individuele oplossingen worden gekozen voor de volgende iteratie. Dit kan op twee manieren:

1. *Recombinatie*

Oplossingen worden gecombineerd en vormen zo nieuwe oplossingen. Een voorbeeld van recombinate is crossover, waarbij de oplossingen worden opgedeeld in delen en deze delen onderling uitgewisseld.

2. *Mutatie*

Onderdelen van een individuele oplossing worden stochastisch veranderd [4]. Bij de komende optimalisatie wordt een genetisch algoritme gebruikt.

3 Onderzoek

In deze studie wordt een methode opgezet om additief geproduceerde wapening vorm te geven. De te ondernemen stappen en bevindingen vormen de onderzoeksopzet en leiden hopelijk tot een te valideren resultaat.

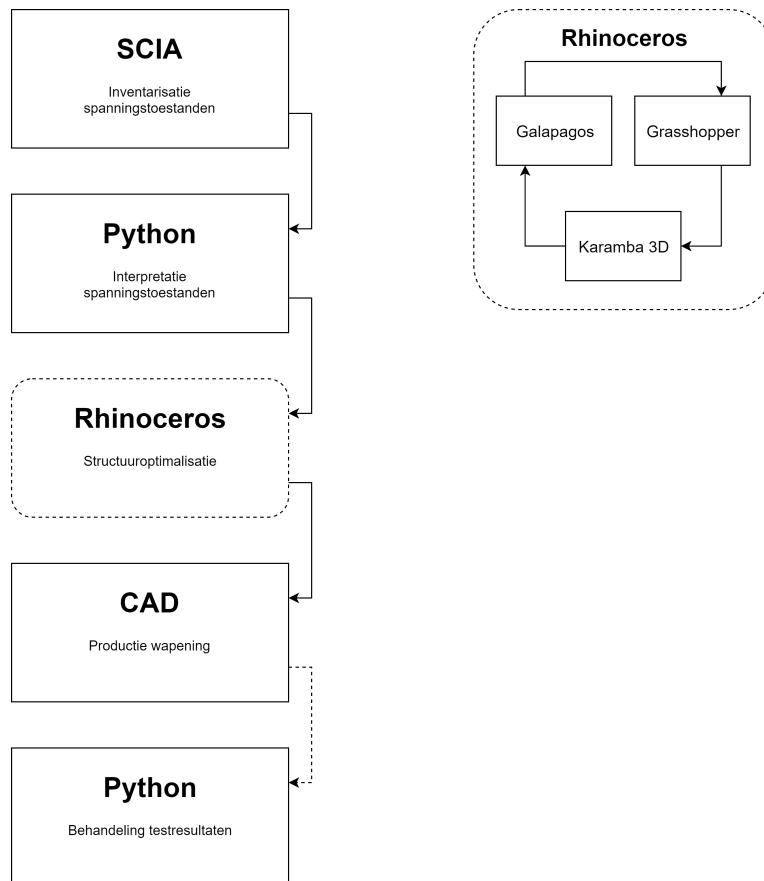
Komend hoofdstuk beschrijft deze stappen in volgorde.

3.1 Software en databewerking

In figuur 6 is het stroomdiagram te zien dat is aangehouden wat betreft de computerkunde.

Omdat de programma's onderling niet communiceren en API's moeilijk doorgrondbaar of toegankelijk zijn, betreffen enkele koppelingen tussen de programma's handmatige verrichtingen.

Het derde blok wordt in beslag genomen door Rhinoceros: er worden hierin drie plug-ins toegepast, te zien in figuur 6 aan de rechterkant.



Figuur 6: Links: aaneenschakeling van programma's. Rechts: plug-ins voor Rhinoceros

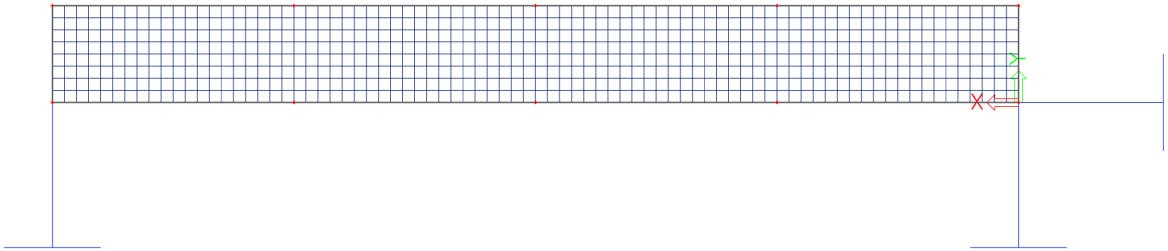
3.2 Spanningstoestanden in SCIA Engineering

SCIA Engineer [18] is een geïntegreerde software om constructies bestaande uit verschillende materialen te analyseren en ontwerpen.

In deze eerste stap wordt het programma ingezet om een balk van twee meter lang en twintig centimeter hoog te modelleren als tweedimensionale schijf. De balk wordt aan de uiteinden eenvoudig

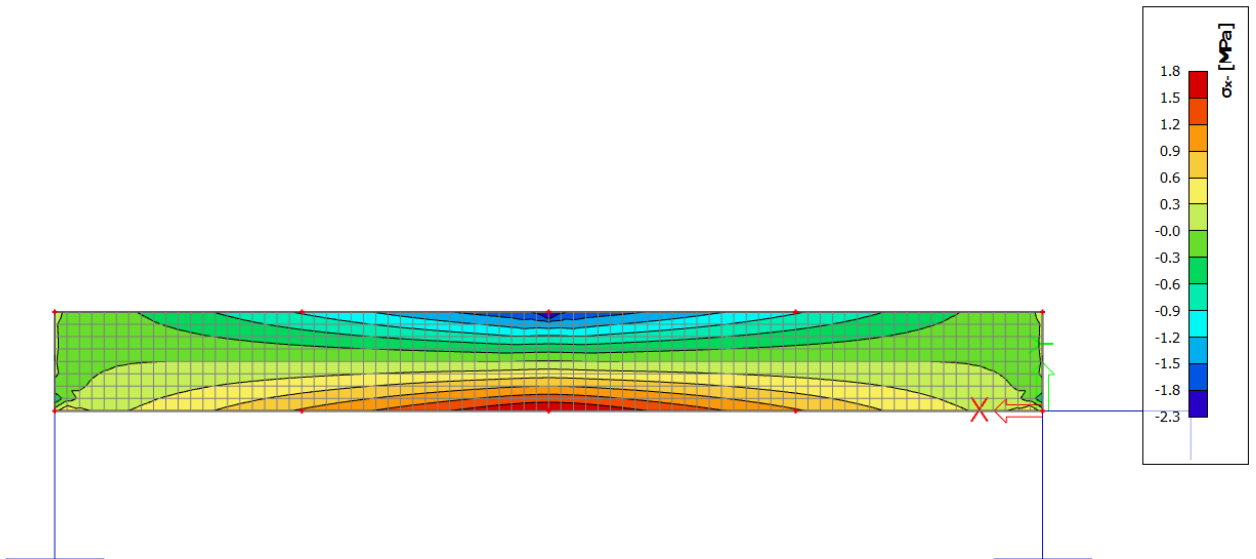
ondersteund door middel van een rol- en scharnieroplegging.

In het model wordt een puntlast op het midden van de balk aangebracht ter grootte van vijf kN. Tot slot moet er gekozen worden voor een netgrootte ter behoeve van de EEM-berekening: hoe dichter het net, hoe nauwkeuriger het resultaat maar dit vertraagt de berekening aanzienlijk. In dit onderzoek wordt een net aangehouden van 25 mm, te zien in figuur 7.



Figuur 7: De balk in SCIA met de ondersteuning en netdefinitie

De berekening met het gedefinieerde net geeft de visualisatie van het spanningsverloop in de x-richting in de balk, te zien in figuur 8.



Figuur 8: Grafische weergave van de spanningsberekening in x-richting door SCIA Engineering

Op dezelfde manier is het mogelijk de spanningen in y-richting en schuifspanningen te berekenen.

Deze data wordt geëxporteerd naar Excel en middels een Python-module voor een bepaald deel, afhankelijk van het werkbare gebied van de te ontwerpen wapening, geladen in Rhinoceros.

3.3 Structuur-optimalisatie in Rhinoceros

Rhinoceros is een programma voor het ontwerpen van driedimensionale voorwerpen. Daarnaast is het mogelijk het programma uit te breiden met software.

In dit onderzoek zijn de volgende uitbreidingen voor Rhinoceros toegepast en worden dadelijk toegelicht.

- Grasshopper [9]: parametrisch ontwerpen
- Karamba 3D [14]: mechanische interpretatie
- Galapagos [8]: optimalisatie door middel van genetisch algoritme

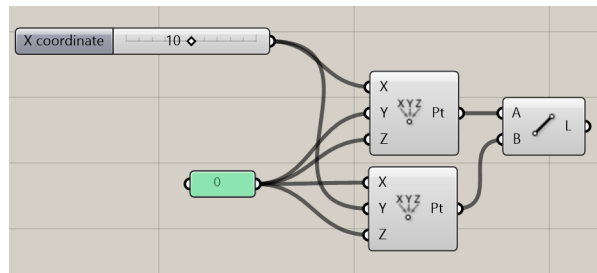
3.3.1 Grasshopper

Normaliter worden driedimensionale objecten beschreven door vaste coördinaten in de ruimte. Bij parametrisch ontwerpen zijn de componenten van deze coördinaten én andere waarden die ruimtelijke elementen beschrijven, te variëren.

Door deze variabelen toe te kennen, wordt het mogelijk een object (lees: constructie) geheel te wijzigen aan hand van de ruimtelijke definities of relaties die de andere ruimtelijke elementen hebben tot het variabele element.

Als voorbeeld is in figuur 9 de beschrijving van een lijn gegeven waarvan x-coördinaat van het beginpunt als variabele is toegekend. Hiermee is de lengte en het beginpunt van de lijn afhankelijk van één variabele.

De blokken zijn stukken voorgedefinieerde code, de bedrading in- en outputs: vanwege deze opbouw wordt er ook naar het programma verwezen met 'visueel programmeren'.



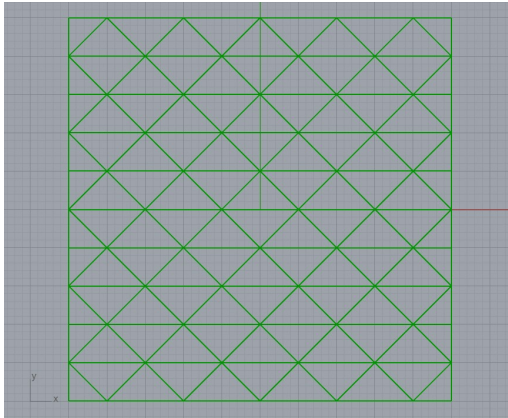
Figuur 9: Een Grasshopper-script waarin een lijn parametrisch is gedefinieerd

In Grasshopper is de geometrie van een vierkant wapeningsdeel gedefinieerd, te zien in figuur 10. Hierin is al één variabele toegekend, namelijk de hoogte van horizontale lijnelementen.

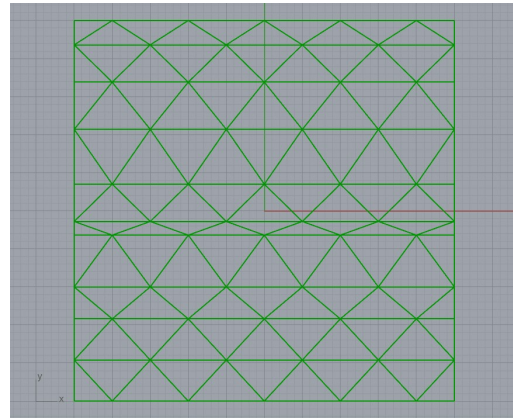
De z-coördinaten van de punten die een horizontaal lijnelement definiëren zijn afzonderlijk te variëren, met uitzondering van de onderste en bovenste lijn. Deze waarden zijn constant zodat de afmetingen van het vierkant behouden blijft. Dit is belangrijk voor de aansluiting op de andere wapeningsdelen en het inpassen in de balk.

Daarnaast zijn deze uitwijkingen gelimiteerd door de eis dat de verticale hiërarchie van de lijnelementen behouden blijft.

Ter illustratie zijn de hoogtes willekeurig verzet, te zien in figuur 11.



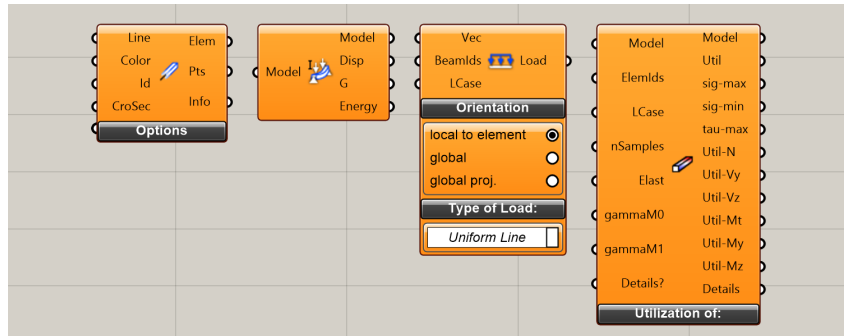
Figuur 10: Visualisatie van het grid door Rhinoceros op basis van parametrische definities in Grasshopper



Figuur 11: Visualisatie van het verzette grid door Rhinoceros op basis van parametrische definities in Grasshopper

3.3.2 Karamba 3D

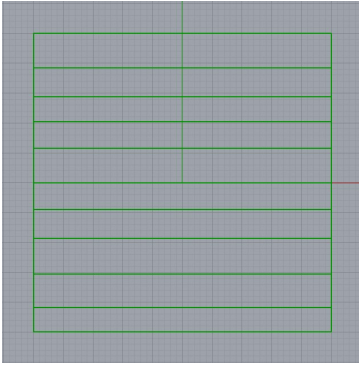
Het object is nu ruimtelijk bekend maar heeft nog geen betekenis in de constructieve zin: er moeten mechanische eigenschappen worden toegekend en als dusdanig worden geïnterpreteerd. Dit wordt gedaan middels de uitbreiding Karamba 3D: de eerder beschreven geometrie wordt verbonden aan componenten die de ruimtelijkheid mechanische interpreteren, te zien in figuur 12.



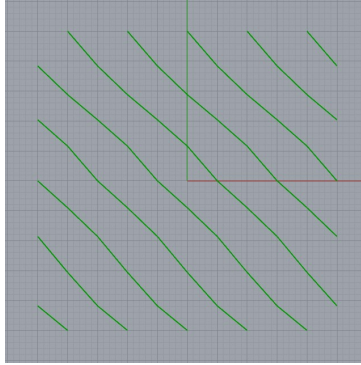
Figuur 12: Een selectie van componenten in Karamba 3D, van links naar rechts: *LineToBeam*, *Analyze*, *Loads*, *Utilization*

Bij deze omzetting worden drie variabelen toegekend, de hoogte (in de z-richting) van de doorsneden van de constructie-elementen die horizontaal gericht zijn, diezelfde hoogte voor links- en rechts gerichte elementen, Respectievelijk te zien in de figuren 13, 14 en 15. Deze hoogte mag niet kleiner worden dan de printkop-diameter maar ook niet dusdanig groot dat lijnelementen elkaar overlappen.

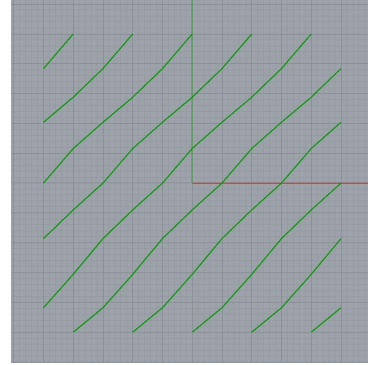
Dit omdat het mogelijk is dat er een overheersende richting geldt voor de belastende krachten: de doorsnede aanpassen voor de staven in die richting zal effectiever zijn dan dezelfde aanpassing voor staven gelegen in een andere richting. Het is dus van belang om de diktes in zoveel mogelijk richtingen afzonderlijk te kunnen variëren: met de eis van onvervormbaarheid door toepassing van driehoeken komt dit op drie richtingen.



Figuur 13: Horizontale lijnelementen onderscheiden in Grasshopper.



Figuur 14: Elementen gericht naar links onderscheiden in Grasshopper.



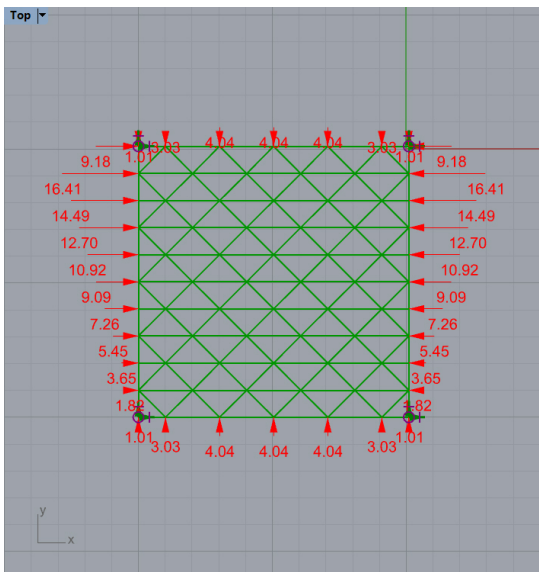
Figuur 15: Elementen gericht naar rechts onderscheiden in Grasshopper.

Tot slot moet een statisch schema worden gedefinieerd. De wapening wordt uiteindelijk in het beton gegoten, en zal daarmee deels ingeklemd zijn. Het is onduidelijk hoe deze situatie het beste benaderd kan worden wat betreft opleggingen in het model. De te modelleren oplegging in het beton is namelijk afhankelijk van de scheurvorming en de ligging van het wapeningsdeel in het beton.

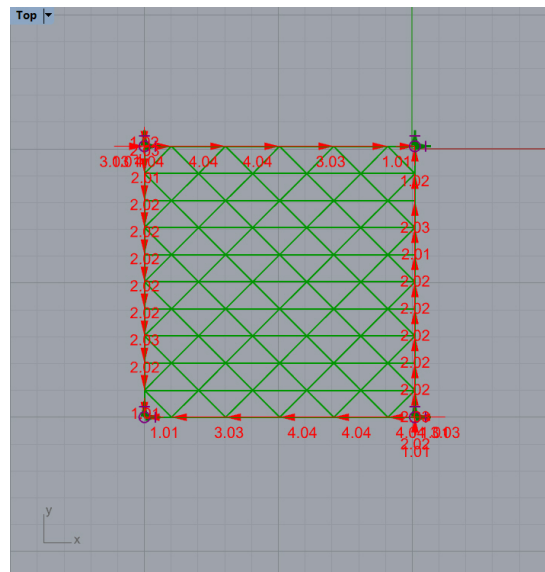
In dit model wordt een standaardoplegging aangehouden, dat is in de vier hoeken volledig ingeklemd.

Daarnaast worden de krachten opgelegd: deze representeren het krachten spel rechts van het midden uit het model in figuur 8.

De horizontale lijnelementen variëren afzonderlijk in de hoogte waardoor de verticale afstand tussen knopen verandert: het script zal bij optimaliseren telkens deze krachten schalen afhankelijk van de afstand tussen knopen.



Figuur 16: De spanningen in x- en y-richting grijpen aan in knooppunten en worden automatisch geschaald naar de afstand tussen de knooppunten.



Figuur 17: De schuifspanningen grijpen aan in knooppunten en worden automatisch geschaald naar de afstand tussen de knooppunten.

Het is nu mogelijk de constructie te analyseren en allerlei uitkomsten te bemachtigen waaronder de maximaal optredende trekspanning.

3.3.3 Galapagos

De eerder genoemde variabelen en de uitkomsten van de mechanische analyse vormen de input voor Galapagos, waarvan de componenten zijn te zien in figuur 18.

Wat betreft de optimalisatie in constructies zijn er twee te onderscheiden:

- topologisch: de positie van elementen is variabel
- geometrisch: de vorm (lees: doorsneden) van elementen is variabel

Beide worden dus toegepast.



Figuur 18: De componenten van Galapagos, van links naar rechts: *Gene Pool*, *Evolutionary Solver*, *Fitness Landscape*

Het genetische algoritme dat toegepast wordt bij optimalisatie moet de 'goedheid' van een tussentijdse oplossing kennen om de volgende stap te bepalen.

Er zijn veel mogelijkheden voor de opbouw van zo een *fitness function*: voor dit onderzoek is de volgende functie aangehouden.

```
mass if max. tension < yield strength and mass < mass start else mass*100
```

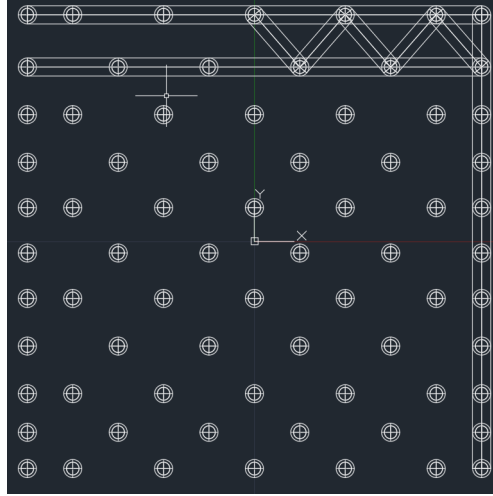
De machine wordt dus als het ware gestraft voor een oplossing waarvan de massa hoger is dan de massa waarmee werd begonnen of de maximaal optredende trekspanning wordt overschreden. Deze functie leidt tot een oplossing waarbij de treksterkte wordt genaderd met een zo klein mogelijke massa van het grid.

Verder wordt er gekozen voor een populatie van vijftig oplossingen waarbij twee oplossingen worden gekozen voor reproductie.

De topologie van knooppunten en geometrie van lijnelementen in het grid zijn dus veranderd na optimalisatie: dit is de geoptimaliseerde structuur.

3.4 Gridconstructie in autoCAD

De coördinaten van de geoptimaliseerde structuur zijn nu bekend en worden met behulp van een script geladen in autoCAD [3]: Computer Aided Design (CAD) software voor driedimensionale objecten geschikt voor additieve productie.



Figuur 19: De coördinaten van het geoptimaliseerde griddeel worden verwerkt in autoCAD

Na digitale extrusie en conversie naar een driedimensionaal model is deze partitie van het grid gereed. Dit proces wordt opnieuw doorlopen voor andere delen en zo ontstaat een te produceren grid in autoCAD.

Notitie: Hoewel het mogelijk is om CAD-omgevingen te combineren, is het aanbevolen om de coördinaten van alle partities te combineren en deze als geheel te laden in autoCAD.

3.5 Productie en toetsing

Het proces is nu doorlopen waarmee gestart kan worden met de additieve productie van de wapening.

Een balk van twee meter met daarin de additief geproduceerde wapening vervaardigen, is in dit onderzoek praktisch niet mogelijk.

Ook de toetsing van alleen de additief geproduceerde wapening is zeer bewerkelijk: de wapening wordt gebaseerd op een statisch schema waarvan een voorbeeld is zien in figuur 16 en 17. Deze krachten zijn vrijwel niet te simuleren.

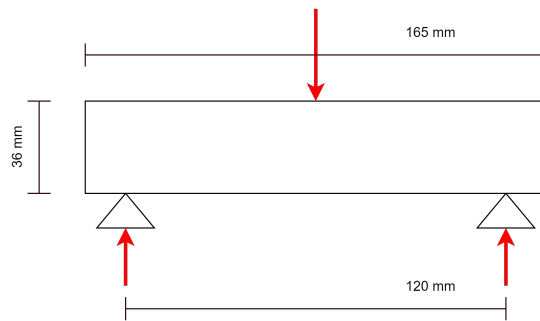
De balk en wapening op kleinere schaal printen is niet wenselijk: er is een limiet aan de print-resolutie met als gevolg dat de driehoekstructuur verloren dreigt te gaan doordat de elementen in het grid te dicht op elkaar komen. Hiermee gaat de vakwerk-werking verloren en veranderen de mechanische eigenschappen van de wapening.

Om toch de werking van de optimalisatie aan te tonen, is ervoor gekozen twee additief geproduceerde vakwerken te vervaardigen en deze te testen met een driepuntsbuigproef, zie figuur 21. Er wordt gebruikt gemaakt van de Ultimaker 2+ [19]. Het printen is gebeurd onder volgende omstandigheden.

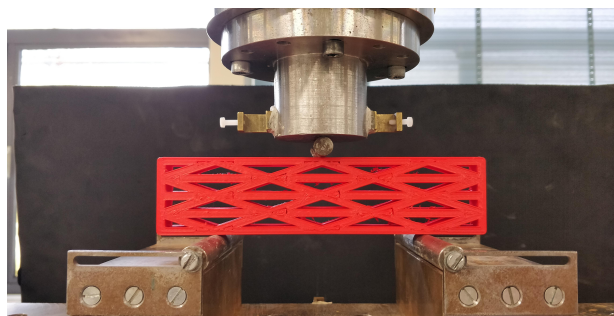
Printing parameter	Configuration
Printkop-diameter (mm)	0.8
Temperatuur (°C)	260
Laaghoogte (mm)	0.2
Lijnbreedte (mm)	0.7
Vulpercentage (%)	100
Vulpatroon	Lijnen
Printsnelheid (mm/s)	40

Omwille van werkbaarheid is hier dus ontdaan van de relatie tot het beton maar het vakwerk is op dezelfde manier ontworpen als zou worden gedaan met één grid-deel, op twee punten na:

- Het frontale oppervlakte is gewijzigd naar 165 mm bij 36 mm; de balk is 20 mm dik.
- Het statisch schema in Karamba is gewijzigd naar dat van een driepuntsbuigproef, waarvan het statische schema is te zien in figuur 20 en een foto van de opzet in figuur 21.



Figuur 20: Het statisch schema van een driepuntsbuigbelasting



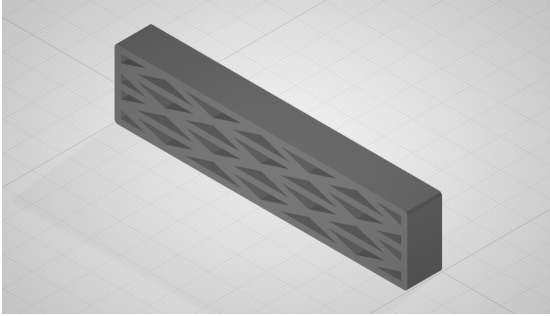
Figuur 21: Een additief geproduceerd vakwerk van 165 mm in een driepuntsbuigproef-opstelling

De test wordt uitgevoerd door een vakwerk te definiëren in Karamba 3D dat twee kN moet houden voordat de vloeispanning van dertig MPa in een trek-element wordt bereikt. Hierbij zijn de horizontale elementen nog niet verschoven en alle hoogtes van de doorsnedes gelijk, zie figuur 22 en 24.

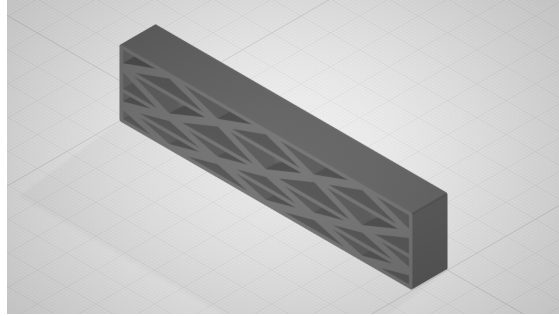
Dat vakwerk wordt vervolgens geoptimaliseerd met als optimalisatiedoel de massa te minimaliseren maar wel nog in staat zijn de twee kN te dragen. Dit gebeurt dus door zowel de horizontale lijnelementen afzonderlijk te verplaatsen én de clusterdiktes aan te passen.

Uitkomsten zijn te zien in figuur 23 en 25.

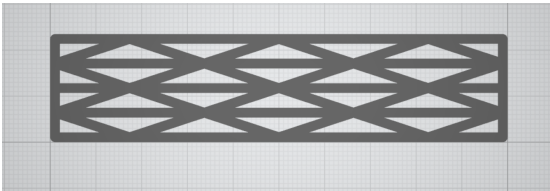
Het oorspronkelijke werk woog 74,6 gram; het geoptimaliseerde 58,6 gram. Dit is een massareductie van $\frac{74,6-58,6}{74,6} * 100\% = 21,4\%$.



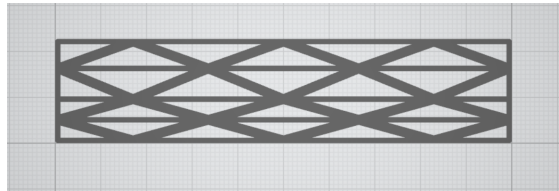
Figuur 22: 3D-model van het niet-geoptimaliseerd vakwerk



Figuur 23: 3D-model van het geoptimaliseerde vakwerk



Figuur 24: Vooraanzicht van het niet-geoptimaliseerde vakwerk



Figuur 25: Vooraanzicht van het geoptimaliseerde vakwerk

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten besproken.

4.1 Ontwerpproces

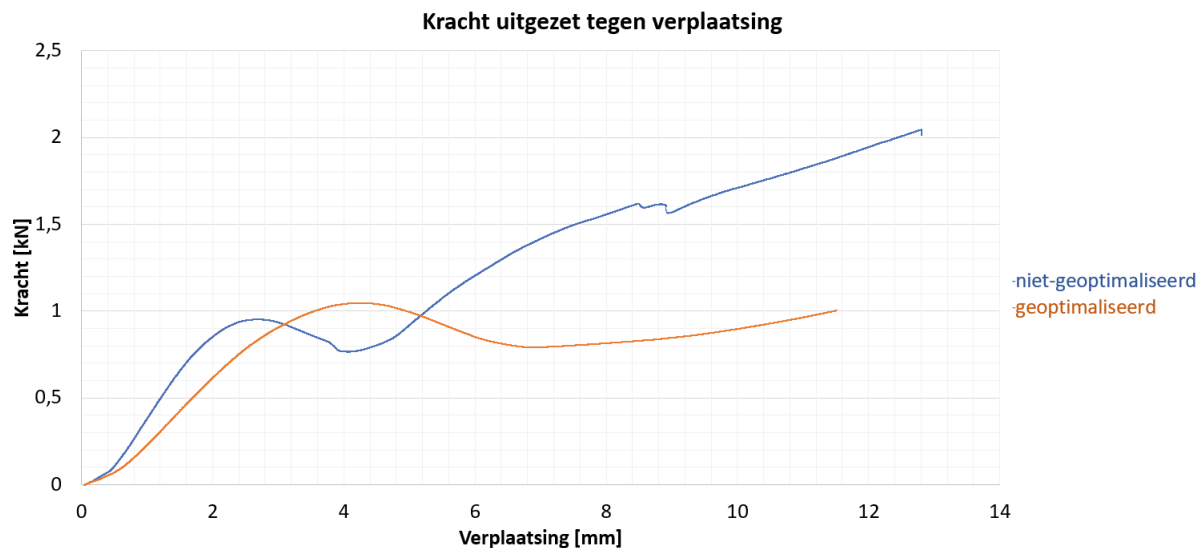
Het ontwerpproces is doorlopen voor één deel van de wapening. Hiermee is de werkbaarheid aangetoond en wordt dit proces in dit onderzoek ook gerekend als resultaat.

4.2 Validatie aan hand van driepuntsbuigproef

Er wordt nu verder gegaan op het additief geproduceerde vakwerk. Deze proef is vijf keer gedaan:

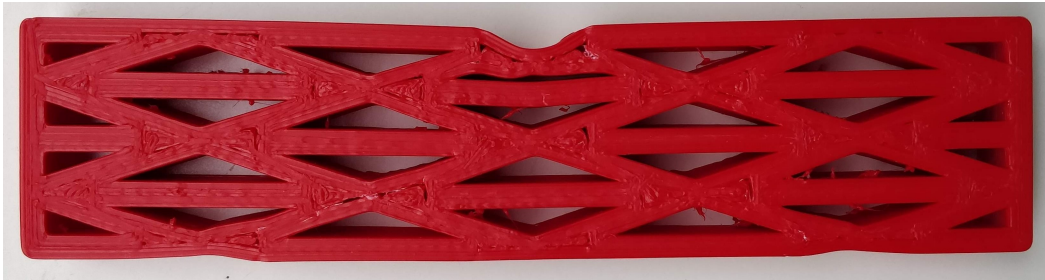
1. Een niet-geoptimaliseerd vakwerk met een direct opgelegde puntlast
2. Een geoptimaliseerd vakwerk met direct opgelegde puntlast

Het verplaatsingsgedrag van (1) en (2) is te vinden in figuur 26.



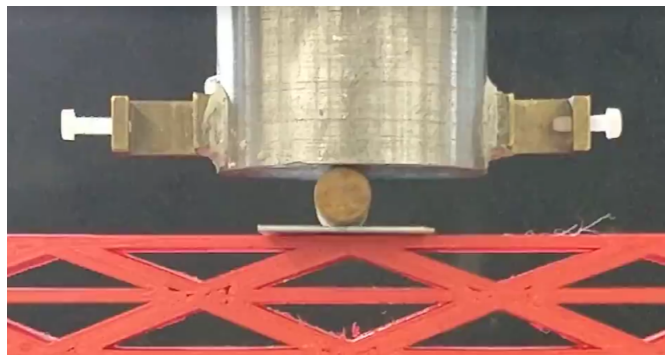
Figuur 26: Verplaatsingsgedrag van de wel- en niet-geoptimaliseerde vakwerken, belast met een direct opgelegde puntlast

De richtingscoëfficiënt van het lineaire begin van de grafieken stellen de elasticiteitsmoduli $E = \frac{\text{kracht}}{\text{verplaatsing}}$ voor. Te zien is dat het niet-geoptimaliseerde vakwerk een grotere buigstijfheid heeft dan het geoptimaliseerde vakwerk. Dit is logisch daar de geometrie en topologie van het vakwerk zijn veranderd en het vergroten van de buigstijfheid niet tot het optimalisatiedoel behoorde. Hoewel duidelijk te zien is dat een plastische vervorming heeft plaats gevonden, op de plaats waar de lijnen overgaan op een niet-lineair verloop, was dit niet de beoogde manier van bezwijken. Het computermodel is namelijk gebaseerd op vakwerk-werking waarbij volgens de theorie de maatgevende trek-doorsnede aan de onderkant van het vakwerk zit maar de vakwerken zijn lokaal bezweken bij de krachtoplegging, te zien in figuur 27.



Figuur 27: Het niet-geoptimaliseerde vakwerk is lokaal bezweken bij de krachtoplegging

Daarom is besloten de puntlast aan te brengen met tussenkomst van een stalen plaatje: de kracht wordt hiermee meer verdeeld over de constructie. Dit is te zien in figuur 28.

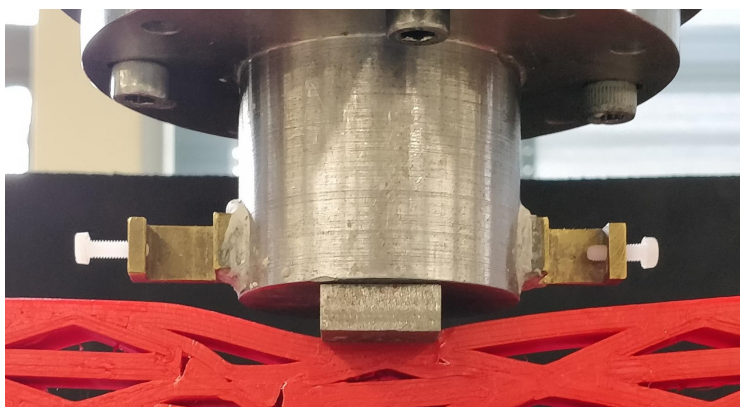


Figuur 28: Een stalen plaatje wordt aangebracht tussen belasting en oplegging om lokaal plastisch bezwijken tegen te gaan.

3. Een niet-geoptimaliseerd vakwerk met puntlasten aangebracht door tussenkomst van een metalen plaat

Opnieuw bleek (3) op dezelfde ongewenste manier te bezwijken en is daarom niet meegenomen in deze resultatenbeschouwing.

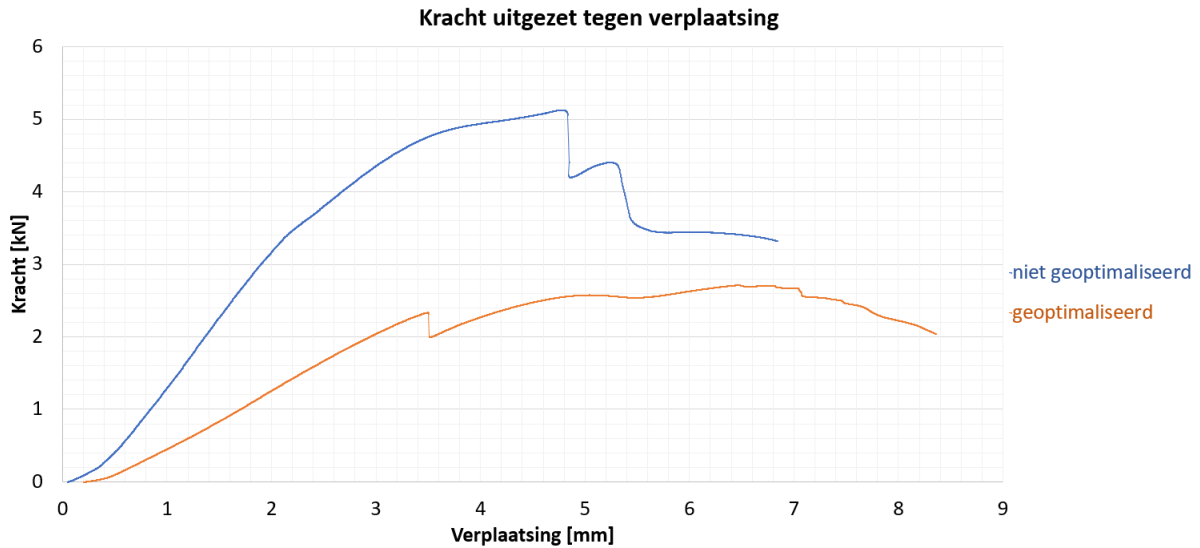
Er is besloten een nog dikkere plaat te gebruiken, te zien in figuur 29.



Figuur 29: Een dikkere plaat wordt aangebracht.

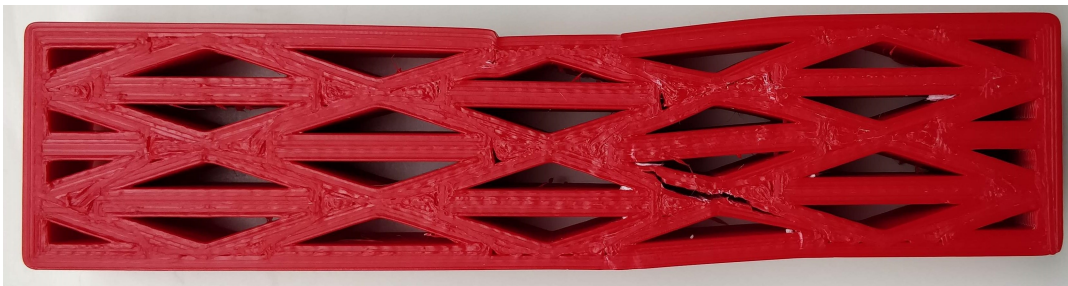
4. Een niet-geoptimaliseerd vakwerk met puntlasten aangebracht door tussenkomst van een metalen blok
5. Een geoptimaliseerd vakwerk met puntlasten aangebracht door tussenkomst van een metalen blok

Het verplaatsingsgedrag van (4) en (5) is te vinden in figuur 30.



Figuur 30: Verplaatsingsgedrag van de wel- en niet-geoptimaliseerde vakwerken, belast met een indirect opgelegde puntlast

Ook bij deze test is na optimalisatie een afname in de buigstijfheid waarneembaar. Tot slot trad opnieuw een lokaal plastische vervorming op aan de bovenkant, te zien in figuur 31. Dit leidde niet tot bezwijken; uiteindelijk was er een plastische deformatie zichtbaar aan de onderkant, daar waar volgens het model de grootste trekspanning zou moeten optreden. Tot slot is in figuur 31 zien dat het model scheurt loodrecht op de verbinding tussen de vezels. Dit duidt op de inhomogene mechanische eigenschappen van additieve productie.



Figuur 31: Het niet-geoptimaliseerde vakwerk toont opnieuw een plastisch vervorming bij oplegging van de puntlast; daarnaast ook bezwiken op verbinding tussen vezels.

5 Discussie

Er wordt nu een discussie gegeven over de validiteit van dit onderzoek.

Ten eerste zijn veel verschillende programma's gebruikt: deze software is maar deels toegankelijk en kent eigen definities en regels. Hoewel de algehele werking om tot een ontwerp te komen is aangetoond, is het moeilijk te verifiëren of dit ontwerp is gebaseerd op de gewenste regels omtrent mechanica en of dezelfde regels consequent worden aangehouden bij de verschillende programma's. Voorbeeld hiervan is dat de maximale verplaatsing in Karamba 3D valt op te vragen maar niet bekend wordt gemaakt welke knoop onderhevig is aan deze verplaatsing: hierdoor valt geen accurate berekening te maken voor de buigstijfheid in het rekenmodel is het ook niet mogelijk deze te vergelijken met daadwerkelijke ondervonden buigstijfheid.

Ten tweede is het onderschat hoeveel moeite en tijd het kost om deze programma's te leren besturen en doeltreffend in te zetten. De kwaliteit van resultaten is daarmee niet in verhouding met het verzette werk: de uitslagen waren te weinig informatief om de optimalisatie aan te tonen of te corrigeren.

Daarnaast is de traditionele wapening vervangen door de additief geproduceerde: staal is veel sterker en dus is er meer plastic nodig om dezelfde weerstand te leveren. Daarom zal de verhouding wapening en beton toenemen: het effect hiervan is niet meegenomen in dit onderzoek.

In tegenstelling tot het staal is het gebruikte materiaal niet homogeen. Dit komt door het printen in lagen: gevoelsmatig valt te beweren dat de sterkte loodrecht op deze lagen kleiner is dan in de richting van de lagen. Ofwel moet deze maatgevende sterkte overal in rekening gebracht worden, of moet er een model worden ontwikkeld dat de minder zo inpast daar waar dit mogelijk is. Het was onjuist te veronderstellen dat het een homogeen materiaal betrof; dit is wel zo aangenomen in de berekening van Karamba 3D.

Zoals te zien in figuur 25 leidde de optimalisatie tot de correcte, triviale oplossing, namelijk: het versterken van de drukregels en het afslanken van de horizontale lijnelementen want alleen deze konden de benodigde verticale weerstand leveren. Daarbij werd ook de treksterkte volgens doel benaderd tot op twee decimalen nauwkeurig. Maar dit was een simpel optimalisatieprobleem: het is niet te zeggen dat dezelfde optimalisatie-parameters en fitness function leidt tot de meest optimale oplossing bij statische schema's zoals in de figuren 16 en 17.

6 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt een conclusie getrokken uit het onderzoek en een aanbeveling gedaan voor komende onderzoeken.

6.1 Conclusie

Er is een schakeling aan programma's opgezet en dit proces is succesvol doorlopen. De werking van de optimalisatie is echter nog niet aangetoond. Hiermee is deels voldaan aan het doel: *Tot een ontwerpmethodiek te komen die gebruik maakt van computationele modellen en additieve productie opdat een meer optimale wapening voor beton wordt verkregen.*

Weliswaar is na optimalisatie een reductie van de buigstijfheid waarneembaar maar buigstijfheid is niet benodigd bij wapening. Dit is dus geen probleem.

Het ABS-plastisch gedroeg zich niet zoals werd verspeld door de rekenmodellen: er ontstonden lokaal-plastische vervormingen en scheuren loodrecht op de vezels. Dit wordt toegeschoven aan de onjuiste aanname dat het een homogeen materiaal betrof.

Algemene conclusie is dat deze ontwerpmethodiek veelbelovend is mits uitgebreid met vervolgonderzoeken aan hand van de eerdere discussie.

6.2 Aanbevelingen

Hoewel een werkbare methodiek is aangetoond en daarmee de mogelijkheid tot additief produceren, is de meerwaarde van deze versterking nog niet aangetoond. Daarom wordt het aanbevolen deze methodiek toch toe te passen in beton om het optreden van lokaal-plastische defecten te voorkomen en de invloed van de ratio beton en versterking te bemachtigen.

Met deze ontwerpmethode is alleen gekeken naar axiale spanningen maar een dergelijke ruimtelijke wapening biedt tevens de mogelijkheid weerstand te leveren tegen schuifkrachten of torsie. Een aanbeveling zou zijn deze parameters toe te voegen aan de methodiek.

Daarnaar is bij de gebruikte software nog geen mogelijkheid om een correctie aan te brengen voor het feit dat materiaal loodrecht op de vezels een zwakte toont. Een nieuw onderzoek waarin deze zwakte mechanisch wordt uitgedrukt en aansluitend een berekeningsmethode wordt opgezet, zou een handig vervolg zijn.

Tot slot zijn er al driepuntsbuigproef uitgevoerd met additieve geproduceerde versterking in betonnen liggers, op een kleine schaal. Hoewel deze structuren niet zijn geoptimaliseerd, kunnen die ontwerpen deels worden onderworpen aan de methodiek in dit verslag en de resultaten worden vergeleken om een dergelijke optimalisatie aan te tonen.

Hierbij wordt verwezen naar de volgende onderzoeken:

- *Development of strain hardening cementitious composite (SHCC) reinforced with 3D printed polymeric reinforcement: Mechanical properties* [15]
- *Using 3D-printed polymeric meshes as reinforcement in mortar bars* [13]

Literatuurlijst

- [1] *3-D stress state represented by axes parallel to X-Y-Z*. URL: <http://www.engapplets.vt.edu/Mohr/java/nsfapplets/MohrCircles2-3D/Theory/theory.htm>.
- [2] *Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer*. URL: <https://www.britannica.com/science/acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer>. (accessed: 10.10.2019).
- [3] *autoCAD*. URL: <https://www.autodesk.nl/products/autocad/overview>. (accessed: 10.10.2019).
- [4] Thomas Back. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*. Oxford University Press, 1996. ISBN: 9780195356700.
- [5] *Complex and intricate designs can easily be produced by some 3D printing technologies*. URL: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/benefits-3d-printing/photo6.jpg>.
- [6] dr. ir. drs. C.R. Braam en ir. P. Lagendijk. *Constructieer Gewapend Beton*. Cement en Beton-reeks. Aeneas, 2011. ISBN: 9789461040060.
- [7] *Designed beam with detailed reinforcement*. URL: <https://theconstructor.org/wp-content/uploads/2013/11/Designed-beam-with-detailed-reinforcement.jpg>.
- [8] *Galapagos*. URL: <https://www.grasshopper3d.com/>. (accessed: 10.10.2019).
- [9] *Grasshopper*. URL: <https://www.grasshopper3d.com>. (accessed: 10.10.2019).
- [10] *Het meest gebruikte materiaal ter wereld*. URL: <https://www.tudelft.nl/citg/onderzoek/stories-of-science/het-meest-gebruikte-materiaal-ter-wereld>.
- [11] H. Hojo e.a. *Corrosion of plastics and composites in chemical environments*. 6. 1998, p. 1191–1197.
- [12] T. J. R. Hughes. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Courier Corporation, 2012. ISBN: 9780486135021.
- [13] Vincent Huigen. *Using 3D-printed polymeric meshes as reinforcement in mortar bars*. 2018.
- [14] *Karamba 3D*. URL: <https://www.karamba3d.com>. (accessed: 10.10.2019).
- [15] B. Šavija en Yading Xu. *Development of strain hardening cementitious composite (SHCC) reinforced with 3D printed polymeric reinforcement: Mechanical properties*. 2019.
- [16] B. Šavija e.a. *Corrosion induced cover cracking studied by X-ray computed tomography nanoindentation, and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS)*. 2015.
- [17] B. Šavija e.a. *Cracking of the concrete cover due to reinforcement corrosion: a two-dimensional lattice model study*. 2013.
- [18] *SCIA Engineer*. URL: <https://www.scia.net/nl/software/scia-engineer>. (accessed: 10.10.2019).
- [19] *Ultimaker 2+*. URL: <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-2-plus>. (accessed on: 12.10.2019).

Lijst van figuren

1	Traditionele wapeningsstructuren in een betonnen ligger. [7]	4
2	Een voorbeeld van complexe additieve productie. [5]	5
3	De grafische definitie van een driedimensionale spanningstensor. [1]	7
4	Een complex object wordt geanalyseerd middels EEM.	8
5	Het verloop van moment (rood) en dwarskracht (blauw) bij een driepuntsbuigproef.	9
6	Links: aaneenschakeling van programma's. Rechts: plug-ins voor Rhinoceros	11
7	De balk in SCIA met de ondersteuning en netdefinitie	12
8	Grafische weergave van de spanningsberekening in x-richting door SCIA Engineering	12
9	Een Grasshopper-script waarin een lijn parametrisch is gedefinieerd	13
10	Visualisatie van het grid door Rhinoceros op basis van parametrische definities in Grasshopper	14
11	Visualisatie van het verzette grid door Rhinoceros op basis van parametrische definities in Grasshopper	14
12	Een selectie van componenten in Karamba 3D, van links naar rechts: <i>LineToBeam</i> , <i>Analyze</i> , <i>Loads</i> , <i>Utilization</i>	14
13	Horizontale lijnelementen onderscheiden in Grasshopper.	15
14	Elementen gericht naar links onderscheiden in Grasshopper.	15
15	Elementen gericht naar rechts onderscheiden in Grasshopper.	15
16	De spanningen in x- en y-richting grijpen aan in knooppunten en worden automatisch geschaald naar de afstand tussen de knooppunten.	15
17	De schuifspanningen grijpen aan in knooppunten en worden automatisch geschaald naar de afstand tussen de knooppunten.	15
18	De componenten van Galapagos, van links naar rechts: <i>Gene Pool</i> , <i>Evolutionary Solver</i> , <i>Fitness Landscape</i>	16
19	De coördinaten van het geoptimaliseerde griddeel worden verwerkt in autoCAD	17
20	Het statisch schema van een driepuntsbuigbelasting	18
21	Een additief geproduceerd vakwerk van 165 mm in een driepuntsbuigproef-opstelling	18
22	3D-model van het niet-geoptimaliseerd vakwerk	19
23	3D-model van het geoptimaliseerde vakwerk	19
24	Vooraanzicht van het niet-geoptimaliseerde vakwerk	19
25	Vooraanzicht van het geoptimaliseerde vakwerk	19
26	Verplaatsingsgedrag van de wel- en niet-geoptimaliseerde vakwerken, belast met een direct opgelegde puntlast	20
27	Het niet-geoptimaliseerde vakwerk is lokaal bezwaken bij de krachtoplegging	21
28	Een stalen plaatje wordt aangebracht tussen belasting en oplegging om lokaal plastisch bezwijken tegen te gaan.	21
29	Een dikkere plaat wordt aangebracht.	21
30	Verplaatsingsgedrag van de wel- en niet-geoptimaliseerde vakwerken, belast met een indirect opgelegde puntlast	22
31	Het niet-geoptimaliseerde vakwerk toont opnieuw een plastisch vervorming bij oplegging van de puntlast; daarnaast ook bezwaken op verbinding tussen vezels.	22