

Topologie optimalisatie als ontwerptool voor bouwkundige toepassingen

Gieljan Vantighem

Promotor: prof. dr. ir. Wouter De Corte

Begeleider: Arne Jansseune

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Industriële Technologie en Constructie
Voorzitter: prof. Marc Vanhaelst
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2014-2015



Voorwoord

Dit eindwerk is het laatste onderdeel van het masterprogramma industrieel ingenieur bouwkunde. Het behoort ook tot één van mijn laatste inspanningen als student aan de Universiteit Gent. Tijdens mijn architecturale vooropleiding aan Sint-Lucas te Gent werd ik mede door de lessen van Dhr. Patrick Lints geïnspireerd om structuur als basis van een architecturaal ontwerp te zien. Dit was ook één van de redenen waarom ik heb gekozen om verder te studeren. Bovendien heb ik in deze opleiding een ware fascinatie ontwikkeld voor parametrisch ontwerp en 3D-printing. Dat laatste heeft mij bijzonder geholpen bij het maken van maquettes, waardoor ik de grenzen van de complexiteit van mijn ontwerpen kon verleggen. Het onderwerp van deze masterproef spreekt mij hierdoor ook ontzettend aan. Topologie-optimalisatie vormt naar mijn mening een brug tussen structuur en architectuur. Meer hierover uiteraard later. Allereerst zou ik graag dit voorwoord gebruiken om mijn promotor Dr. Ir. Wouter De Corte te bedanken om mij de kans te bieden mij te verdiepen in dit uiterst interessant onderwerp. Zijn begeleiding en motivatie waren van onschatbare waarde. Mijn scriptiebegeleider Ir. Arne Jansseune zou ik graag willen bedanken voor de feedback en kennis over Abaqus, die hij met mij heeft gedeeld. Dr. Ing. Nils Wagner en Ir. Oded Amir verdienen het ook om in dit voorwoord vermeld te staan voor het beantwoorden van mijn vragen betreffende topologie-optimalisatie, ook al zullen zij deze nederlandse masterproef waarschijnlijk niet kunnen lezen. Een extra dank aan mijn ouders voor de vele jaren waarin ze mij in alles hebben gesteund en de kans die ze me hebben geboden om deze tweede master te behalen. Als laatste zou ik mijn vriendin willen bedanken om mij tijdens dit avontuur te blijven motiveren en om mij uit te dagen het beste van mijzelf te geven.

Gieljan Vantghem, mei 2015

Toelating tot bruikleen

“De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.”

Gieljan Vantighem, mei 2015

Topologie optimalisatie als een ontwerptool voor bouwkundige toepassingen

door

Gieljan VANTYGHM

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
MASTER OF SCIENCE IN DE INDUSTRIËLE WETENSCHAPPEN: BOUWKUNDE

Academiejaar 2014–2015

Promotor: prof. dr. ir. Wouter DE CORTE

Begeleider: Arne JANSSEUNE

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Universiteit Gent

Vakgroep Industriële Technologie en Constructie

Voorzitter: prof. Marc VANHAELST

Samenvatting

Structurele topologie-optimalisatie wordt de dag van vandaag reeds in veel industrieën (auto-industrie, lucht- en ruimtevaart, geneeskunde) aangewend. De link met de bouwkundige realiteit is echter nog steeds beperkt. In dit eindwerk wordt in de eerste plaats een overzicht gegeven van de theoretische grondbeginselen van klassieke topologie-optimalisatie en de mogelijke uitbreidingen hierop. De kern van deze masterproef onderzoekt vervolgens de relevantie van het gebruik van topologie-optimalisatie software als ontwerptool voor bouwkundige toepassingen aan de hand van meerdere casestudies. Om af te sluiten wordt ook de link gelegd naar de structurele werking van deze software gegenereerde resultaten en het belang van moderne ontwerpmethoden en productietechnieken.

Trefwoorden

Topologie-optimalisatie, Abaqus, 3D-printing

Topology optimization as a design tool in structural engineering applications

Gieljan Vantighem

Supervisor(s): Wouter De Corte, Arne Jansseune

Abstract— Structural topology optimization is used in many industries (automotive design, aerospace, medicine). However, the link with the architectural reality is still very limited. The first chapter in this dissertation gives an overview of the theoretical fundamentals of classical topology optimization and its possible extensions. Next, the relevance of the use of topology optimization as a design tool for structural engineering applications is being analyzed. Furthermore, the performance of some of these generated structures is also studied and the link with modern design methods and production techniques is being investigated.

Keywords— Topology Optimization, Abaqus, 3D Printing

I. INTRODUCTION

3D PRINTING is a concept that has gotten a lot of media attention in the past years. The idea appeals to many as it gives room to imagination and makes people dream about a more futuristic world. Several industries also look at the possibilities. 3D printing is different from the traditional methods such as CNC and assembly because the complete component is being built from scratch. This means there is no waste of material. Due to the nature of the process, very complex geometries can be produced. In addition, the process has many advantages and the possibilities seem limitless. 3D-printed models or prototypes of structural components often look very impressive and ingenious. The question remains: “How to deal with these forms as a designer or engineer?”.

Topology optimization delivers one way of creating optimal structures. It is a mathematical principle that exists for quite a while now, but it has only recently come back into focus. This is

because the resulting optimal structures tended to have such a high complexity that the results were unable to be produced. The uprising of 3D printing production technologies changed this. Today there are many topology optimization software packages that are relatively simple to use and often free. These packages are fit to solve simple design problems. Most of these optimization methods search for a structure with the best compromise between the performance (strength, stiffness) and the cost (material consumption). Of course finding the best possible structure is driven by many other different factors including mass, buckling load, frequency and available materials. Therefore the use of commercial structural optimization software has increased significantly in recent years as it is able to handle topology optimization with multi-objectives.

II. TOPOLOGY OPTIMIZATION

Topology optimization solves the fundamental problem of spreading a limited amount of material in a design space. The problem is solved by dividing the design domain into a finite number of elements (FE-mesh). After this, the degrees of freedom and constraints are determined. By performing both a finite element analysis and a sensitivity analysis, the optimization algorithm updates the design variables. These last steps will repeat themselves until the results are adequate. This way the available material is distributed optimally over the available elements. As a result a 0-1, or black-and-white, topology is desired. This means the domain consists solely of elements that exist (1) or do not exist (0). Depending on the design variables, different solutions can be produced.

A. Compliance Method

The most common topology optimization problem is formulated as a procedure with the purpose to minimize the influence of the external loads and the corresponding displacement, defined as the compliance of the structure. This is equivalent to the minimization of the total strain energy or the maximization of the stiffness of the structure. When optimizing the design domain, the best solution is not to remove any elements. That is why we need constraints. For example when the amount of material available is limited, optimal structures are being produced. Due to the simple form of the compliance minimization problem it has become the most widely used method. Therefore most of the case studies discussed in this dissertation are subjected to this method.

B. Extensions

Despite its simplicity, the compliance minimization problem offers limited optimum solutions. If topology optimization is to be used with more advanced engineering applications, other objective functions and constraints are to be used or combined. For example it is possible to optimize the natural eigenfrequencies, the fundamental buckling loads or internal stresses. Also geometrical non-linear problems, non-linear material behavior and design-dependent loads can be considered.

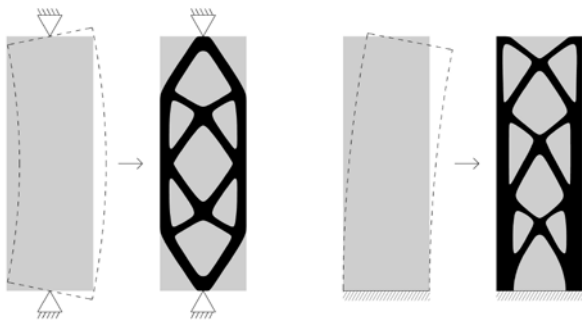


Fig. 1. Optimized topology for maximization of the fundamental eigenfrequency. Extracted from Abaqus and displayed without any post-processing techniques.

C. Software

In this dissertation three different software packages are used. The most sophisticated one is Abaqus. Its topology optimization module (or in short: ATOM) is utilized when high resolution or detailed results are needed. When the computation time is of bigger importance, the relatively easy to use 88-line Matlab code by Andreassen et al., or in some cases the interactive topopt webplayer, is used.

III. STRUCTURAL ENGINEERING APPLICATIONS

A. Strut-and-Tie Models

A first application discussed in this dissertation involves the use of topology optimization in the creation of strut-and-tie models of reinforced concrete structures. The classical minimum compliance optimization method proves to be a simple way in providing reliable and high-quality results in a fast period of time. The freely accessible interactive topopt webplayer was also suitable for finding these models. The biggest advantage is that little to no knowledge with regard to finite element analysis software is required. Using multiple load groups were not discussed in this dissertation but could be added easily if the design should require it.

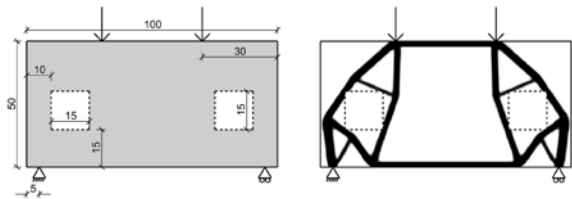


Fig. 2. Optimized layout for a supported beam with openings with the purpose of finding a strut-and-tie model.

B. Bridge Design

In another section, the use of topology optimization as a tool for designing bridge-like structures is being studied. Despite that the study is restricted to the analysis of simple design problems, results often look great and promising. They truly show that topology optimization is able

to produce realistic structures. The results of the topology optimizations are however strongly dependent on the chosen algorithm and the many different input parameters. Paying attention to this is highly recommended.

This section includes three case studies: a rectangular design domain supported on the sides resulting in arch-like bridges, the optimization of a pylon of a suspension bridge and the redesign of a steel node for a light weight structure.

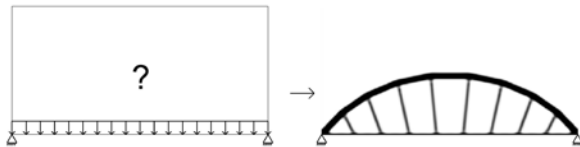


Fig. 3. Optimized layout of the given design domain (left). Resulting form resembles an arch-tied bridge (right).

Future research could analyze some specific designs in detail. That is, a design problem in which all of the combinations of loads, material properties and other design-related conditions are known. Such optimization could bring added value and produce realistic structural designs. Furthermore, topology optimization results can encourage the development of optimal shapes and have an inspiring impact on designers to make them more aware of the shape of the structure.



Fig. 4. Perspective view on an optimized 3D design domain. Model extracted from Abaqus and rendered in Rhinoceros.

C. High-rise Building and Skyscraper Design

High-rise buildings or skyscrapers are the icons of our society. They are progressive, sophisticated and innovative. The next section of this chapter focusses on one case study: the optimization of a free-form superstructure. Topology optimization

methods are used to find optimal structures in a non-standard architectural form. They have the ultimate purpose of establishing a solid relationship between structure and architectural design in the initial design process.



Fig. 5. Image showing the possibilities of topology optimized high-rise structures in early stage concept designs. Post-processed in Photoshop.

D. Reinforcement of Shell Structures

Shell structures are characterized by their small thickness in relation to their other dimensions. The use of these structures can be found in parts of aircrafts and boats, but they also have important structural applications. This section will only focus on one example: silo constructions. These cylindrical steel structures are locally supported and their structural behaviour is studied. Whereafter the topology optimization tries to find the optimal positioning of the transverse stiffeners. The study is not very detailed but the results are nevertheless interesting.

E. Design of Auxetics ([1],[2])

A final structural application shortly discussed in this dissertation, is the use of topology optimization in the design of materials with extreme elastic properties. These materials consist

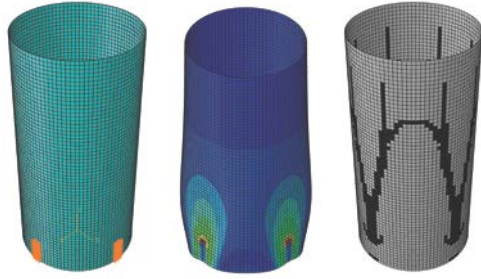


Fig. 6. Illustration showing the design domain, the static general analysis and the resulting material layout.

of topology optimized microstructures and can be designed so that they have negative Poisson ratios in the outcome. The biggest advantage of having negative Poisson ratios is that when the materials are being compressed, they densify in the direction of the load, causing the materials to have a very high energy absorption level and great resistance to fracture. These relatively new materials are mostly being used in non-structural applications like bulletproof vests, packaging materials and knee and elbow pads or sponges. Structural applications include shock absorbing structural parts like a joint connection in a bridge deck.



Fig. 7. Image of microstructures with negative Poisson ratio. Courtesy of [3].

IV. STRUCTURAL ANALYSIS

The next chapter in this dissertation shortly discusses the structure efficiency of optimized models. Three topics are studied: the influence of the volume fraction on the performance of the structure, the influence of the resolution of the result on the performance of the structure and the influence of the algorithm used on the performance of the structure. One of the conclusions is that reducing the volume of the structure does not have a large effect on the

stresses but it has an exponential effect on the displacement.

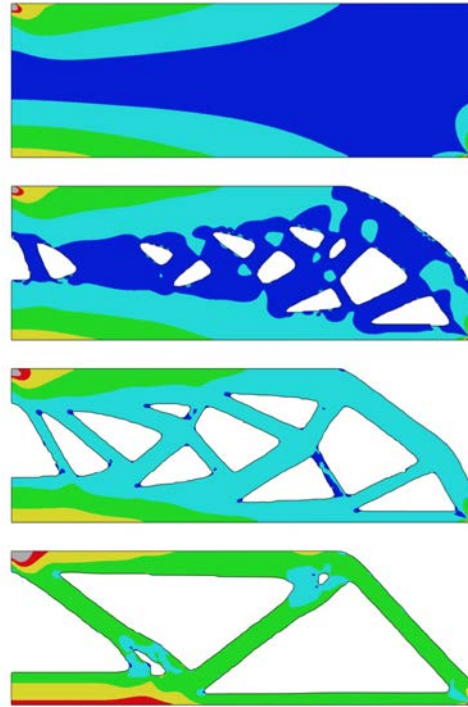


Fig. 8. This figure shows that when the optimization process reduces the volume of a design space, there is almost no increase of the maximum stresses. The design becomes more fully-stressed instead.

V. PARAMETRIC DESIGN & DIGITAL FABRICATION

As was discussed in the introduction, topology optimization has a strong connection with new digital fabrication techniques such as 3D printing. The reality of producing complex optimized forms is closer than ever. In architecture there are already many uses of making prototypes and scale models with this technology. The impact on structural applications is also great. Instead of using standardization and modular systems to reduce price, custom-made complex components could be created in the same amount of time.

Parametric oriented design software is another growing field that has a strong link with topology optimization. It is used many times to design complex shapes that contain many different and unique parts and thus are difficult to be standardized or mass-produced. Optimizing these

components the traditional way is time-consuming as every component can be unique. Parametric design software ensures a mathematical relationship between the input and output parameters, so that they could be optimized individually without losing time.



Fig. 9. 3D-printed node for a tensegrity structure. Courtesy of Arup [4].

VI. CONCLUSION

The use of topology optimization as a design tool for structural applications has certainly proven its value. Most of the results obtained from simple known design problems were very recognizable and similar to the existing ones. The solutions seemed to be intuitively reasonable and definitely material efficient. The application of strut-and-tie models was one of the most known and interesting ones. As was discussed and examined further, topology optimization could also be used in an early design stage and could be of help in the development of efficient structures. Also in more final design stages it can be used as a more specific detailed optimization technique. This way, using topology optimization algorithms gives great possibilities to save time. Furthermore it delivers a way of producing innovative designs that no one could ever think of.

The Abaqus ATOM package was found to be very capable of delivering high quality design solutions in all case studies. Without any compromise on design specifications such as geometry, discretization and optimization setup. One remark that has to be made is that using topology optimization in an early design phase,

requires a close cooperation between the different parties. Interpreting the results of topology optimization is not always a simple task and asks for some experience and knowledge of structural engineering but also of manufacturability.

In this dissertation not every case study or design problem was investigated in detail. This is because it was not part of the research plan. The dissertation does give an answer to the following question: “Can topology optimization be used as a design tool in structural engineering?”. The answer is yes. Especially when used in combination with the more advanced production techniques. The future of using topology optimization looks very promising. Algorithms and software packages are getting better, faster and more efficient each year. I hope that I have succeeded in my goal and that my dissertation will be used as a guide for further research.

REFERENCES

- [1] Larsen, U. D. and Sigmund, O. and Bouwstra, S., Design and Fabrication of Compliant Mechanisms and Material Structures with Negative Poissons Ratio, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997
- [2] Auxetics, *Negative Poisson's ratio materials: possible uses*, <http://silver.neep.wisc.edu>.
- [3] Bendse, M. P. and Sigmund, O., *Topology optimization: theory, methods, and applications*, Springer, Berlin ; New York, 2003
- [4] Arup, *Construction steelwork makes its 3D printing premiere*, <http://www.arup.com/News/>

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Toelating tot bruikleen	v
Overzicht	vii
Extended abstract	ix
Inhoudsopgave	xiv
Gebruikte afkortingen	xvii
1 Inleiding	1
1.1 De rol van structuur in de bouwkunde	2
1.2 Op zoek naar een optimale structuur	4
1.2.1 Algemene optimalisatie	4
1.2.2 Structurele optimalisatie	6
1.3 Afgrenzing van dit eindwerk	8
2 Structurele topologie optimalisatie	9
2.1 Probleemstelling	9
2.2 Compliantie methode	13
2.3 Uitbreidingen	17
2.3.1 Eigenfrequenties en -trillingen	17
2.3.2 Eulerknik	18
2.3.3 Spanningen	19
2.3.4 Geometrische niet-lineariteit	21
2.3.5 Niet-lineair materiaalgedrag	23
2.3.6 Ontwerp-afhankelijke belastingen	25
2.4 Opmerkingen	26
2.5 Conclusie	27

3	Topologie optimalisatie software	29
3.1	Commercieel verkrijgbare software	29
3.2	Andere software pakketten	30
3.3	Vergelijkende studie	31
4	Mogelijke bouwkundige toepassingen	35
4.1	Staaferkmodellen	36
4.2	Bruggenbouw	44
4.3	Hoogbouw en wolkenkrabbers	58
4.4	Dunwandige schaalstructuren	65
4.5	Auxetics	67
5	Structurele werking	69
5.1	Invloed van de volumefractie	69
5.2	Invloed van de resolutie	72
5.3	Invloed van het algoritme	73
6	Parametric design & Digital fabrication	75
6.1	Parametrisch ontwerpmethoden	75
6.2	Digitale productietechnieken	77
7	Besluit en toekomstperspectieven	79
	Extra informatie	81
	Klassiek voorbeeld (tutorial)	81
	Bibliografie	89
	Lijst van figuren	95

Gebruikte afkortingen

AM	Additieve Manufacturing
BESO	Bidirectional Evolutionary Structural Optimization
BIM	Building Information Model
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
DIY	Do It Yourself
(B)ESO	(Bi-directional) Evolutionary Structural Optimization
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
HPFRC	High Performance Fiber Reinforced Concrete
ISE	Isotropic Solid or Empty
MBB	Messerschmitt-Bölkow-Blohm
MMA	Method of Moving Asymptotes
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
RAMP	Rational Approximation of Material Properties
SERA	Sequential Element Rejection and Admission
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalisation

Hoofdstuk 1

Inleiding

3D-printing is een begrip dat het afgelopen jaar sterk in de media aan bod gekomen is. Deze nieuwe technologie spreekt voor velen tot de verbeelding en doet dromen over een futuristische toekomst. Ook verschillende industrieën zien er de mogelijkheden van in. 3D-printing verschilt van de traditionele productiemethoden (zoals cnc en assemblage) doordat het materiaal er uit het niets wordt opgebouwd waardoor bij deze methode geen materiaal verspild wordt. Bovendien kunnen ook zeer complexe geometrieën worden geproduceerd. Daarnaast heeft het proces vele andere voordelen en de mogelijkheden lijken voorlopig onbegrensd. Geprinte prototypes van structurele componenten zien er vaak zeer indrukwekkend en ingenieus uit. De vraag is nu hoe je hier als ontwerper, ingenieur of producent mee omgaat? Topologie-optimalisatie is één van de methoden waarmee optimale structuren worden gecreeërd. Het is een wiskundig principe dat al langer dan vandaag bestaat, maar toch pas sinds kort terug in de aandacht gekomen is. Dit komt doordat geoptimaliseerde structuren de neiging hebben een hoge complexiteit te bezitten waardoor het gebruik van topologie-optimalisatie pas sinds de opkomst van 3D-printing interessant is geworden. Tegenwoordig bestaan veel, relatief eenvoudig te gebruiken, en goed toegankelijke softwarepakketten die het grote publiek kan gebruiken bij eenvoudige problemen. De meeste van deze optimalisatiemethodes zoeken naar een structuur met het beste evenwicht tussen de prestatie-eigenschappen zoals sterkte en stijfheid en het materiaalverbruik. Het vinden van de best mogelijke structuur wordt natuurlijk ook gedreven door vele andere factoren. Deze kunnen zijn: gewicht, kostprijs, milieu-impact, beschikbare materialen, enz... Het gebruik van commerciële structurele optimalisatie software is hierdoor de laatste jaren sterk gestegen. In deze inleiding wordt kort besproken wat de rol is van structuur in de bouwkunde en waarom de zoektocht naar een optimale structuur noodzakelijk is.

1.1 De rol van structuur in de bouwkunde

Als in deze masterproef gesproken wordt over ‘structuur’ dan gaat dit over het constructief dragend deel van een bouwwerk. Anders gezegd, het deel dat verantwoordelijk is voor de stabiliteit van een woning, flatgebouw, brug, enz... De ontwerper van een woning is normaal gezien een architect. Wanneer daarentegen een brug wordt ontworpen dan wordt in vele gevallen een bouwkundig ingenieur aangesproken. De laatste jaren worden projecten van enige omvang steeds vaker door grote bouwbureaus gerealiseerd, waardoor de grens tussen de ontwerpende disciplines soms niet helemaal duidelijk meer is. Architect en ingenieur werken dus steeds vaker samen onder eenzelfde dak. Helaas heerst er in vele van deze bureaus toch een overwegend traditionele aanpak waarbij de architect zich vooral richt op de vormgeving (het ontwerp), het technisch concept en de administratieve taken, waardoor pas in een volgende fase de bouwkundig ingenieur zich focust op de stabiliteit en de structurele efficiëntie onderzoekt.

Doordat de ingenieur pas in een latere fase op het project wordt geplaatst is de ‘vorm’ van de structuur meestal reeds vastgelegd door de architect. De taak van de ingenieur wordt dus beperkt tot het dimensioneren van een reeds bestaande structuur waardoor van enige algemene optimalisatie geen sprake meer is. De samenwerking tussen deze disciplines kan voor sommige situaties net zeer voordelig zijn en leiden tot vernieuwende en geïntegreerde ontwerpen.

Enkele zeer gekende ontwerpers die sterk door structuur werden geïnspireerd zijn: Buckminster Fuller, Félix Candela en Otto Frei. Hun in die tijd sterk innovatieve constructies worden tot op de dag van vandaag hoog aangeschreven. De prachtige samenhang tussen architectuur en structuur komt er perfect tot zijn recht. Zoals door Uihlein [1] wordt omschreven is de term ‘architectural engineer’ op deze ontwerpers perfect van toepassing. Recente voorbeelden van zogenaamde architect-ingenieurs zijn onder andere Peter Rice en Ove Arup. Beiden gebruikten ze techniek om architectuur beter te maken.

Met de opkomst van BIM software (**B**uilding **I**nformation **M**odel) is de samenwerking tussen architect en ingenieur er wel wat op verbeterd. BIM software zorgt er namelijk voor dat een ontwerp, bestaande uit een intelligent 3d-model, door de betrokken partijen eenvoudiger kan worden gedeeld en compatibel is met de verschillende softwarepakketten waardoor het de efficiëntie en betrokkenheid van de externe partijen ten goede komt. Het is echter niet helemaal correct om te zeggen dat hierdoor een meer structureel geïnspireerde architectuur ontstaat. Meer zelfs: de architecten van vandaag laten zich

1.2 Op zoek naar een optimale structuur

1.2.1 Algemene optimalisatie

Genoeg over de vorm van architectuur en terug naar structuur. De zoektocht naar een optimale structuur is iets waar de mens sinds zijn ontstaan mee bezig is. Wanneer een constructie op een goedkopere manier en/of met minder materiaal kan worden geconstrueerd, dan noemt men dit structurele optimalisatie. De dag van vandaag is het de ingenieur die de structuur in bouwwerken berekent. Hij kiest er de meest efficiënte en economische oplossing uit. De komst van de computer als rekeninstrument heeft voor een grote vooruitgang gezorgd. Waar het voordien een lastige taak was om complexe geometrieën te berekenen, zorgen de nieuwe rekentechnieken, waaronder de eindige elementen methode (FEM), ervoor dat er heden ten dage veel meer mogelijk is.

Het basisprincipe van ‘optimalisatie’ staat gelijk aan het vinden van de best mogelijke oplossing onder de gegeven voorwaarden, of anders gezegd de variabele zo dicht mogelijk houden bij een vooropgestelde waarde [6]. Een voorbeeld van een optimalisatie is bijvoorbeeld een persoon die van locatie A zo snel mogelijk naar locatie B wil door enkel gebruik te maken van het openbaar vervoer. Het doel van de optimalisatie is om van alle mogelijke routes er de snelste uit te kiezen met als voorwaarde dat enkel het openbaar vervoer kan worden gebruikt. Indien deze persoon bekend is met de omgeving zal een zeer efficiënte route kunnen worden bepaald aan de hand van zijn voorkennis en ervaring. In sommige gevallen zal het gebruik van een routeplanner aan te raden zijn.

Vervangen we nu het vinden van de snelste route door het vinden van een optimale materiaalverdeling van een structuur en vervangen we de routeplanner door de software die de ingenieur gebruikt, dan bekomen we een mooie vergelijking. De ingenieur kan de structuur optimaliseren met behulp van zijn eigen kennis en expertise. Echter hoe ingewikkelder het probleem wordt, hoe sneller en efficiënter het gebruik van softwareprogramma’s zal zijn. Een combinatie van beiden levert het meest betrouwbare optimale resultaat.

Mathematisch kunnen we het optimalisatieprobleem omschrijven als een doelstelling (objective) die wordt geminimaliseerd of gemaximaliseerd en wordt beperkt door één of meerdere voorwaarden (constraints). We schrijven dit als volgt [7]:

$$\begin{aligned} \text{Vindt } \mathbf{x} &= \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{cases} \quad \text{waarvoor } \mathbf{f}(\mathbf{x}) \text{ de kleinste waarde heeft} \\ \text{met} &\begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ h_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Hier is x de ontwerpvariable van $f(x)$ de doelstelling. De functies g_i en h_j zijn hier de voorwaarden van de optimalisatie.

In sommige gevallen zijn er meerdere doelstellingen. Wanneer iemand bijvoorbeeld een auto wil kopen (voorbeeld gebaseerd op Ehrgott [8]), dan heeft die persoon graag de goedkoopste maar ook de meest krachtige en de meest zuinige wagen tegelijkertijd. Het is haast onmogelijk een type auto te vinden dat als beste presteert in al deze variabelen. Het pareto-optimaal kan in zo'n gevallen worden gebruikt om een optimum te vinden tussen deze verschillende doelen. De grens van dit optimum is bereikt indien er geen oplossing meer bestaat die door daling van de ene doelstelling ervoor zorgt dat een andere doelstelling stijgt. Het resultaat is een reeks oplossingen waar nadien uit gekozen kan worden. In dit voorbeeld zal een wagen die iets goedkoper is, maar minder zuinig, gelijk gesteld worden aan een duurdere wagen die zuiniger is. Dit is het pareto-front. In sommige gevallen zullen bepaalde doelstellingen zwaarder doorwegen dan andere. Het gewicht w_k van iedere doelstelling wordt dan voorgesteld door volgende formule.

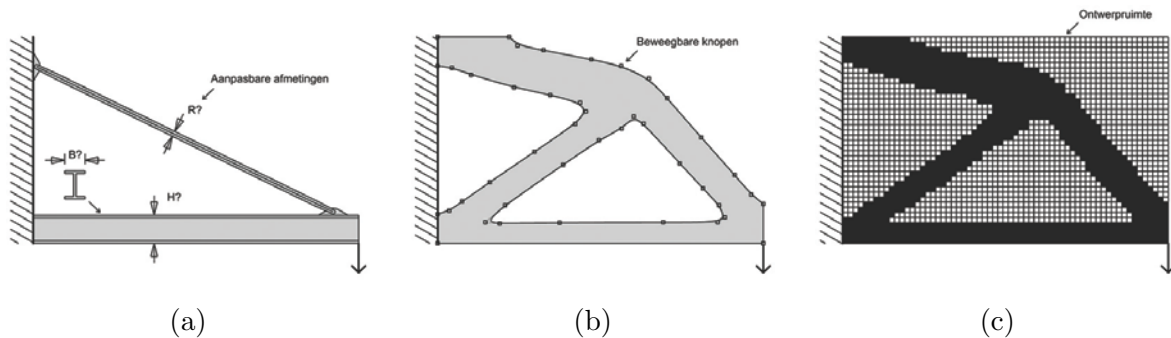
$$\min_x \sum_{k=1}^p w_k f_k(\mathbf{x}), \quad \text{waar } f_1, \dots, f_k \text{ de doelstellingen zijn} \quad (1.2)$$

Een andere methode is om slechts één doelstelling te gebruiken en alle andere als voorwaarden te begrenzen. Als voorbeeld kan worden gezocht naar de zuinigste wagen met als voorwaarden dat de prijs niet meer dan 20 000 euro mag bedragen en het maximaal vermogen niet lager mag liggen dan 60kW. Op deze manier kan er op een meer eenvoudige manier een optimum gevonden worden. De waarde van de voorwaarden heeft hier wel een grote invloed op het resultaat en dient dus met de nodige voorzorg gekozen te worden.

1.2.2 Structurele optimalisatie

Structurele optimalisatie is één van de toepassingsgebieden van optimalisatie. Structurele optimalisatie was traditioneel een manueel proces waarbij, met behulp van wiskundige rekentechnieken, een zeker ontwerpprobleem werd geanalyseerd en aangepast. Indien na een tweede analyse aan alle eisen werd voldaan, dan was het proces afgerond. Indien dit niet het geval zou zijn werd er een nieuw ontwerp voorgesteld en herhaalde het proces zich gewoon opnieuw. Deze iteratieve werkwijze wordt de dag van vandaag nog steeds vaak toegepast maar is voor meer geavanceerde toepassingen minder aan te raden wegens te tijdrovend. Ook is dit proces sterk afhankelijk van de kennis en ervaring van de persoon beladen met de taak. Met behulp van hedendaagse software pakketten worden grote tijds- en kostenbesparingen verwezenlijkt.

Er bestaan tegenwoordig vele soorten structurele optimalisaties. Volgens Christensen en Klarbring [9] kan er een onderscheid worden gemaakt tussen drie grote groepen: dimensioneringsoptimalisatie, vormoptimalisatie en topologie-optimalisatie. Respectievelijk in het Engels worden deze size, shape en topology optimization genoemd.

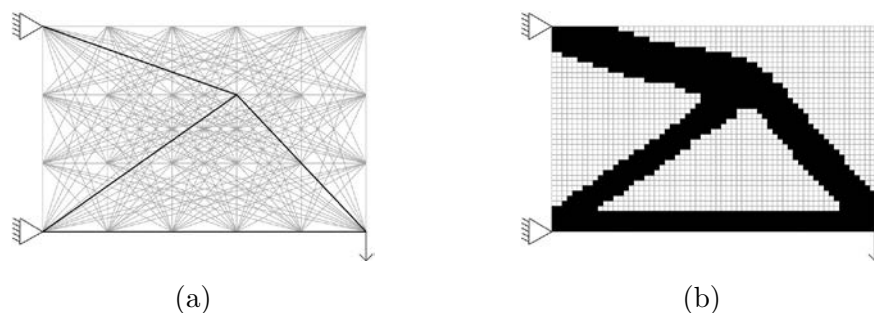


Figuur 1.3: De drie soorten structurele optimalisaties volgens Christensen en Klarbring [9] (a) dimensioneringsoptimalisatie, (b) vormoptimalisatie en (c) topologie-optimalisatie.

Dimensioneringsoptimalisatie is de eenvoudigste en meest gekende vorm van structurele optimalisatie. De algemene ‘vorm’ van de structuur is hier reeds gekend en het doel is om de afmetingen van de verschillende elementen zo te wijzigen dat er een optimaal resultaat wordt bekomen. De ontwerpvariabelen zijn in dit geval de afmetingen van de elementen. Bij een balk zijn de breedte en de hoogte bijvoorbeeld gezocht; bij een staaf zijn dit de diameter of de straal (zie figuur 1.3c).

Bij vormoptimalisatie is, net zoals bij het vorig type van optimalisatie, de topologie of algemene vorm reeds gekend. Hierdoor zal vormoptimalisatie er niet voor zorgen dat er nieuwe gaten ontstaan in de structuur, maar dat lokaal de grenzen en/of knooppunten worden verlegd. De dikte en grootte van bepaalde onderdelen, of de begrenzing en algemene vorm van de openingen, kunnen hierdoor wel worden gewijzigd. Een recente toepassing van vormoptimalisatie werkt met behulp van **non-uniform rational B-splines** (NURBS) die de grenzen van een structuur vertegenwoordigen. Door de beweegbare knooppunten van de NURBS te verschuiven kan een optimale vorm worden gevonden. Meer informatie hierover is te vinden in het werk van Herskovits en collega's [10].

Topologie-optimalisatie lost het fundamentele probleem van het verspreiden van een beperkte hoeveelheid materiaal in een ontwerpruimte op en is hierdoor de meest rudimentaire vorm van structurele optimalisatie. De afgelopen twee decennia zijn verschillende soorten topologie-optimalisaties bestudeerd: de zogenaamde 'ground' en 'continuum' structuren. Bij het type 'ground structuren' wordt het structurele domein in een eindig aantal knooppunten gediscetiseerd en wordt er een vakwerkachtige structuur bekomen waarbij na optimalisatie enkel de meest essentiële elementen worden behouden met betrekking tot de voorgeschreven belastingen en prestatiecriteria (zie figuur 1.4a). Het nadeel van deze methode is dat de rekentijd exponentieel toeneemt wanneer het aantal knooppunten toeneemt. Hierdoor is het slechts beperkt tot eenvoudige problemen. Het ontstaan van deze vorm van optimalisatie is terug te leiden tot 1904 wanneer Michell de formules afleidde voor structuren met een minimaal gewicht onder een gegeven spanning. Deze structuren worden Michell-vakwerken genoemd en hebben een maximale stijfheid voor het beschikbare volume. Ze werden toen als globaal optimum beschouwd [11].



Figuur 1.4: Twee verschillende soorten topologie-optimalisatie: (a) discreet ontwerp domein en (b) een continuüm ontwerp domein.

1.3 Afgrenzing van dit eindwerk

Topologie-optimalisaties zoals we die nu hoofdzakelijk kennen (continuüm structuren, zie figuur 1.4b), werden voor het eerst geïntroduceerd door Bendsoe en Sigmund en worden uitvoerig behandeld in [12]. Toepassingen beperken zich niet enkel tot het gebied van structurele optimalisaties maar bieden zich ook aan voor mechanische, multifysische, thermische, elektromagnetische en vloeistof/stroom probleemgevallen. Deze laatste komen hier echter niet aan bod. De focus van deze masterproef ligt op de structurele, bouwkundige toepassingen. Hoofdstuk 2 geeft allereerst een overzicht van de mogelijkheden van klassieke structurele topologie-optimalisaties en de theoretische grondbeginselen. Mogelijke uitbreidingen en enkele opmerkingen komen ook aan bod.

Structurele topologie-optimalisatie wordt in de auto-, lucht- en ruimtevaart industrie reeds enkele jaren intensief toegepast. De opkomst van complexe materialen zoals composieten, HPFRC of hoogwaardig staal heeft hierbij zeker ook geholpen. Als voorbeeld werd bij het ontwerp van de Airbus A380 topologie-optimalisatie toegepast om het gewicht van de vleugels en de romp te verminderen. De gewichtsbesparing bedroeg maar liefst 1000 kg per vliegtuig [13]. Ook bij het ontwerp van de NASA Altair Lunar Lander werd topologie-optimalisatie gebruikt bij het ontwerp van het landingsstel [14]. In de auto-industrie wordt topologie-optimalisatie onder andere gebruikt bij het ontwerp van lichtere en veiligere constructies.

De link met de architecturale en bouwkundige realiteit is nog steeds erg beperkt. Hoofdstuk 4 van deze masterproef probeert hier dan ook een antwoord op te geven. Er wordt hoofdzakelijk gebruik gemaakt van de Abaqus software, waarbij de relevantie van de Abaqus topologie-optimalisatie module als ontwerptool voor bouwkundige toepassingen wordt onderzocht.

Hoofdstuk 5 spreekt over de structurele werking van software gegenereerd structuren en deze masterproef eindigt met een laatste hoofdstuk waarin topologie-optimalisatie gelinkt wordt aan parametrische ontwerpmethoden en de nieuwste productiemogelijkheden zoals 3D-printing.

Hoofdstuk 2

Structurele topologie optimalisatie

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de theoretische grondbeginselen van klassieke structurele topologie-optimalisatie en enkele essentiële, hoofdzakelijk niet-lineaire, uitbreidingen.

2.1 Probleemstelling

Zoals eerder vermeld lost topologie-optimalisatie het fundamentele probleem van het verspreiden van een beperkte hoeveelheid materiaal in een ontwerpruimte op.

Het oplossen van dit probleem gebeurt op de volgende manier: in een eerste fase wordt de ontwerpruimte opgedeeld in een eindig aantal elementen (FE-mesh). Hierna worden de vrijheidsgraden en randvoorwaarden bepaald. Het beschikbaar materiaal wordt uiteindelijk optimaal verdeeld over de elementen. Deze verdeling gebeurt met behulp van verschillende optimalisatie-algoritmen. Als resultaat is in de meeste gevallen een 0-1 of zwart-wit oplossing gewenst waarbij elementen bestaan (1) of niet bestaan (0). Dit noemt men ISE elementen (**I**sotropic **S**olid or **E**mpy elements). Eén manier om de ideale materiaalverdeling te vinden kan zijn door alle mogelijke combinaties te onderzoeken en deze te analyseren op efficiëntie. Het aantal combinaties dat zo kan worden gemaakt is 2^N waarbij N staat voor het aantal elementen waaruit de mesh bestaat. Het is vanzelfsprekend dat deze methode onbruikbaar wordt wanneer het aantal elementen toeneemt. Bepaalde strategieën zijn nodig om de materiaalverdeling op een zo efficiënt mogelijke manier te laten verlopen. De twee meest bekende strategieën zijn de SIMP- en ESO-methode.

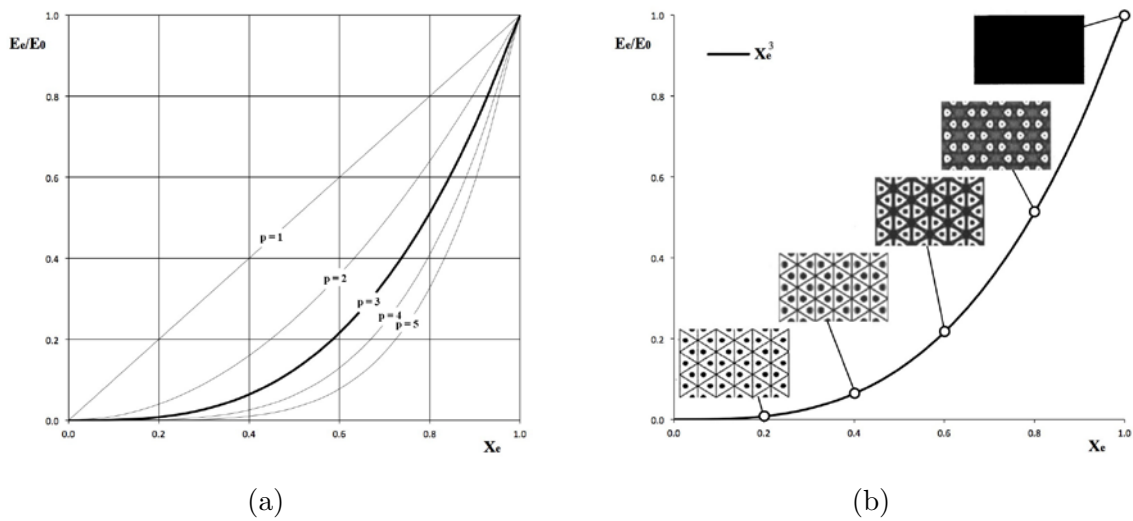
SIMP

De SIMP-methode of **S**olid **I**sotropic **M**icrostructures with **P**enalisation methode is de op heden meest gekende methode om topologie-optimalisaties mee uit te voeren. De methode werd door Bendsoe in 1989 voor het eerst voorgesteld als manier om, met behulp van de dichtheid van het materiaal, niet-discrete ontwerpproblemen op te lossen [12]. Hierbij is de enige ontwerpvariabele die wordt gebruikt de dichtheid van het element x_e , waarbij de minimale dichtheid van een element 0 is en de maximale dichtheid 1. Ieder element heeft een variabele dichtheid die bij de start van de eerste FE analyse dikwijls op 0,5 wordt geplaatst. Na een eerste iteratie zal de dichtheid van ieder element worden aangepast met behulp van de ‘**M**ethod of **M**oving **A**symptotes’, beschreven door Svanberg in 1987 [15]. Na een eerste analyse zullen de elementen zich nog niet in een 0-1 (zwart-witte) toestand bevinden, maar zullen ze een tussenliggende waarde aannemen (grijze elementen). Om een ISE topologie te bekomen is het noodzakelijk een bestraffing (penalisation) toe te passen waardoor de optimalisatiemodule dergelijke grijze elementen liever niet behoudt. Hierdoor wordt een zwart-witte oplossing als resultaat afgedwongen. De meest gebruikte waarde van de bestraffing is 3 maar andere waarden groter dan 1 kunnen ook worden gebruikt. Figuur 2.1a toont mogelijk waarden voor de bestraffing (p). Andere penalisatiemodellen die soms worden gebruikt zijn het RAMP-model (voor dynamische situaties) en het SINH-model. Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar Deaton en Grandhi [16].

Dan rest nog de vraag hoe de dichtheid van de elementen in verband wordt gebracht met de FE-analyse. Het antwoord is eenvoudig: de elasticiteitsmodulus wordt afhankelijk gesteld van de dichtheid van het element en wordt per element als volgt bepaald:

$$E_e(x_e) = E_{min} + x_e^p(E_0 - E_{min}), \quad x_e \in [0, 1] \quad (2.1)$$

Hierbij is E_0 de elasticiteitsmodulus van het basismateriaal en E_{min} de fictieve elasticiteitsmodulus die wordt toegewezen aan de lege ruimte in het ontwerp. Deze laatste heeft een waarde die dicht bij 0 ligt, maar er niet gelijk aan is. Zo wordt voorkomen dat de stijfheidsmatrix singulier wordt. Het onderzoek van Bendsoe en Sigmund [12] kwam overigens tot het opmerkelijke resultaat dat elementen met tussenliggende dichtheden als realistische microstructuren kunnen worden gezien. Hierdoor kan het SIMP-model fysisch worden gerealiseerd en dus theoretisch gelinkt worden aan de realiteit. Figuur 2.1b toont de microstructuren van het SIMP-model van een basismateriaal met poisson-factor $1/3$ en een bestraffingswaarde van 3.

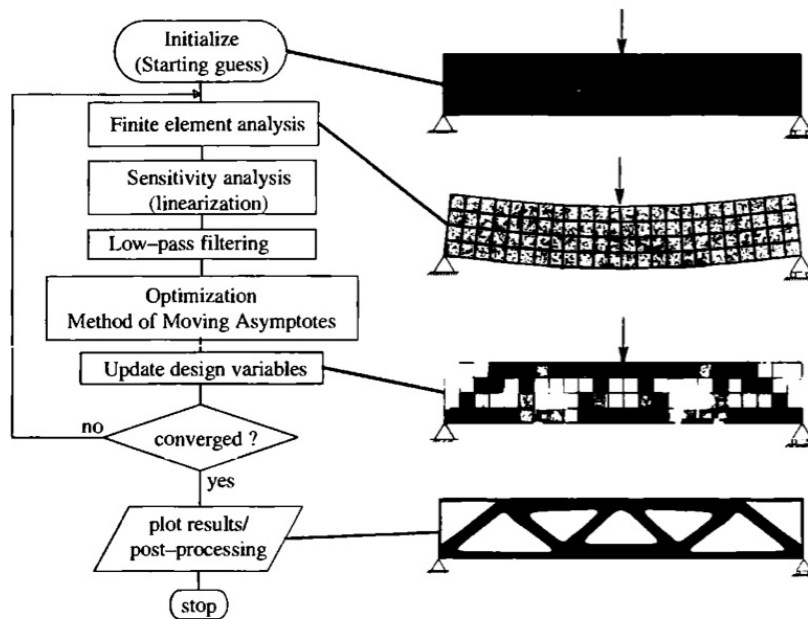


Figuur 2.1: (a) De waarde van de relatieve stijfheid tegenover de dichtheid van het element volgens de verschillende bestraffingscurven en (b) microstructuren volgens het SIMP-model met $p=3$ en poisson-factor $1/3$. Illustraties gebaseerd op [12].

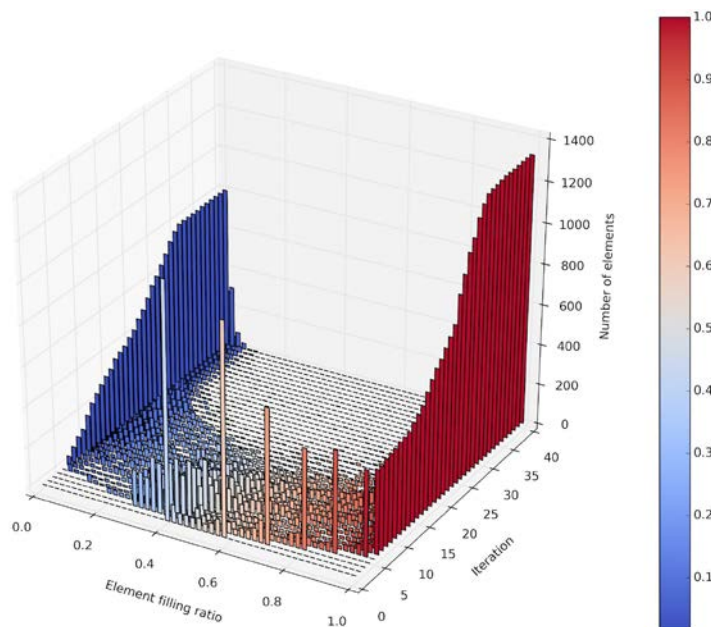
ESO

Een andere populaire strategie is de zogenaamde ESO-methode. Deze methode staat voor ‘**E**volutionary **S**tructural **O**ptimization’ en werd oorspronkelijk ontwikkeld door Xie en Stephen in 1993 [17]. In deze strategie wordt systematisch materiaal weggenomen uit het ontwerpdomein, waar het materiaal het minst noodzakelijk lijkt. Het grootste probleem met de ESO-methode is dat elementen verwijderd uit de structuur niet terug te halen zijn. Daarom wordt er naar deze methode verwezen als de hard-kill methode. De zogenaamde BESO-methode (**B**i-directional ESO) verhelpt dit probleem doordat in dit geval de elementen wel terug te halen zijn. Deze methode noemt dan ook de soft-kill methode. Volgens een befaamde paper van Rozvany uit 2009 kunnen voor deze methoden geen bewijzen gevonden worden dat de resultaten van dergelijke optimalisatie-algoritmes werkelijk optimaal zijn [18]. Volgens deze paper zou de benaming SERA (**S**equential **E**lement **R**ejection and **A**dmission) een beter keuze zijn. Volgens Rozvany heeft de (B)ESO-methode daarenboven een inefficiënte rekenwijze en uiterst chaotische convergentiemethode waardoor dit model de dag van vandaag iets minder gebruikt wordt dan de SIMP-methode. In deze masterproef worden deze methoden niet verder onderzocht.

Tot slot geven de figuren 2.2 en 2.3 schematische voorstellingen weer van het klassieke iteratieve proces van een topologie-optimalisatie.



Figuur 2.2: Het iteratieve proces van een standaard topologie-optimalisatie die gebruik maakt van de SIMP-methode en de ‘Method of Moving Asymptotes’ [12].



Figuur 2.3: Verdeling van materiaal in een klassieke topologie-optimalisatie. Het uiteindelijke resultaat bevat bijna uitsluitend 0-1 elementen. Illustratie werd verzorgd door dr. ing. Nils Wagner.

2.2 Compliantie methode

Het klassiek topologie-optimalisatieprobleem wordt geformuleerd als een procedure waarvan het doel is de invloed van de externe belastingen en de bijbehorende verplaatsingen, gedefinieerd als de compliantie van de structuur, te minimaliseren. Dit komt overeen met het minimaliseren van de totale elastische energie (strain energy) in de evenwichtstoestand of het maximaliseren van de stijfheid van de structuur.

De meest stijve structuur is een volledig gevuld ontwerpdomain, maar wanneer slechts een beperkte hoeveelheid materiaal beschikbaar is, wordt de optimale indeling gezocht. De methode wordt ook wel de compliantiemethode (compliance method) genoemd.

Mathematische wordt de formulering als volgt opgesteld [19]:

$$\begin{aligned}
 \min_x \quad & c(\mathbf{x}) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N E_e(x_e) \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \\
 \text{met} \quad & V(\mathbf{x})/V_0 = f \\
 & \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \\
 & 0 \leq \mathbf{x} \leq 1
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Hierin is c de compliantie, U en F zijn respectievelijk de elastische verplaatsingen en krachten en K is de globale stijfheidsmatrix. u_e is de lokale verplaatsing van het element, k_0 is de stijfheidsmatrix voor een element met een eenheids elasticiteitsmodulus, x is de ontwerp variabele (de dichtheid), N is het aantal elementen waaruit het ontwerpdomain bestaat, $V(x)$ en V_0 zijn respectievelijk het beschikbare materiaalvolume en het totale volume en f is de voorgeschreven volumefractie.

Een gekend probleem in topologie-optimalisatie is dambord-patroonvorming (checkerboarding) dat verwijst naar een resultaat met elementen met opeenvolgende 0-1 dichtheden. Dambordpatronen ontstaan doordat de microstructuren enkel in de hoeken van elk element met elkaar in verbinding staan. Dambordpatronen bezitten hierdoor een onrealistisch hoge stijfheid. Het ontstaan van deze patronen kan echter worden onderdrukt door bepaalde voorzorgsmaatregelen in acht te nemen. Het gebruik van een hoger aantal eindige elementen of elementen van een hogere orde (elementen met acht knopen in plaats van vier) kunnen een oplossing bieden. In de meeste software wordt dit probleem verholpen door het toepassen van filters.

Verscheidend soorten filters bestaan maar de meest gebruikte laten de dichtheden van naburige elementen in elkaar overvloeien. Hierdoor kan er niet in één stap van een wit (0) element worden overgegaan naar een zwart (1) element.

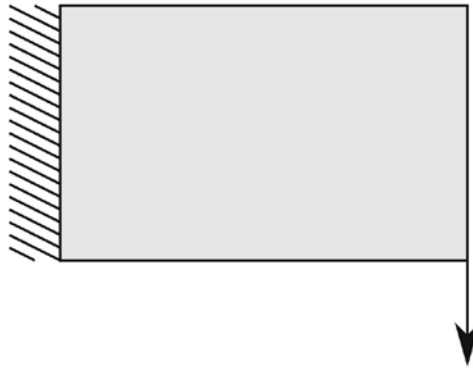


Figuur 2.4: Dambord-patroon vorming wanneer geen filter wordt gebruikt

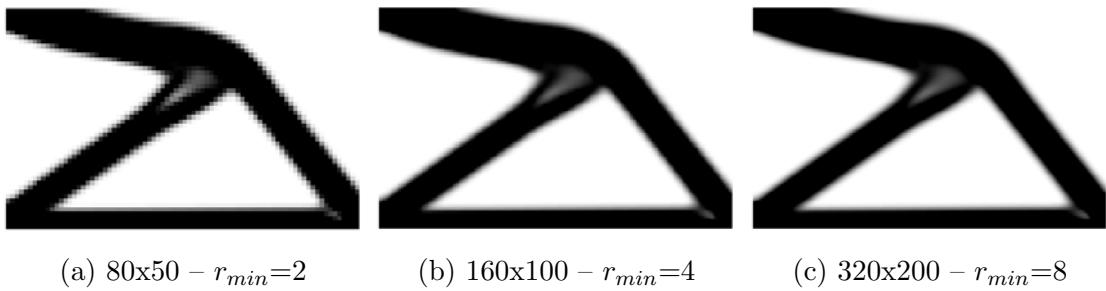
De waarde die aan de filter wordt toegekend heeft echter wel een grote invloed op het resultaat dat wordt bekomen. Indien men het werkelijk optimum wil vinden, moet men er op letten deze filters op de correcte manier te gebruiken. Ook het aantal elementen waaruit het ontwerpdomein bestaat, zorgt voor een verschil in resultaten. Figuren 2.6, 2.7 en 2.8 tonen een studie van verschillende topologie-optimalisaties waarbij het ontwerpprobleem voorgesteld op figuur 2.5 wordt behandeld. In een eerste reeks worden mesh-onafhankelijke resultaten bekomen door de filter evenredig aan de meshgrootte te laten toenemen. Vervolgens wordt de waarde voor de filter vastgezet en als laatste wordt de invloed van de bestraffing op het resultaat voorgesteld. In alle gevallen werd een volumefractie van 0,4 vooropgesteld en werd gebruikt gemaakt van de 88-line Matlab code [19].

Mesh-onafhankelijke resultaten voorkomen resultaten met hoge resolutie. Oplossingen met lage resolutie kunnen verantwoord worden wanneer de rekestijd van groot belang is of wanneer de maakbaarheid een rol speelt zoals in industriële toepassingen. Met de komst van high-tech productietechnieken en micro- en nanotechnologie worden resultaten met hoge resolutie steeds belangrijker. Het gebruik van filters wordt in deze gevallen dan best niet toegepast.

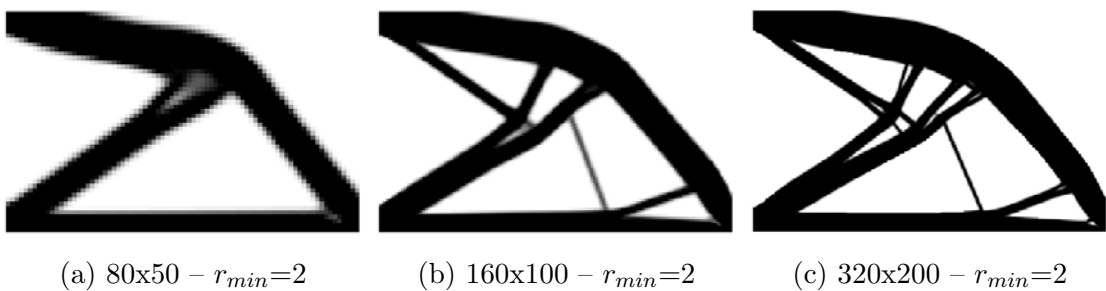
Figuren 2.9 en 2.10 tonen de resultaten van een geoptimaliseerde MBB balk gebruikmakend van de Abaqus software. Twee situaties worden gepresenteerd: één resultaat met een grove mesh en één met een fijne mesh. De resultaten werden nabewerkt in Rhinoceros.



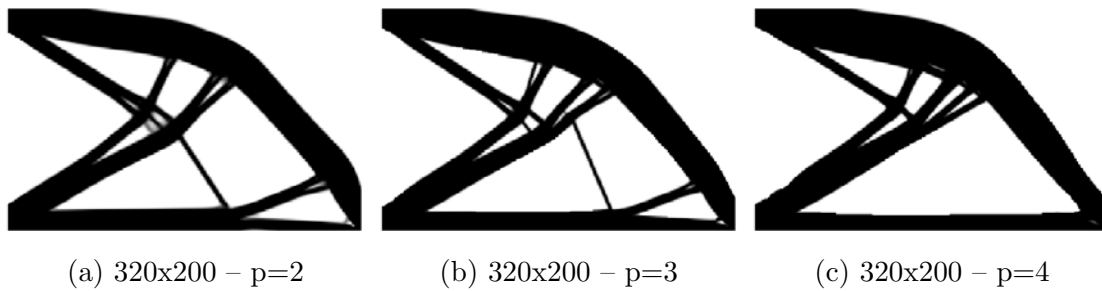
Figuur 2.5: De ontwerpruimte, randvoorwaarden en externe belasting voor de optimalisatie van een uitkragend balk.



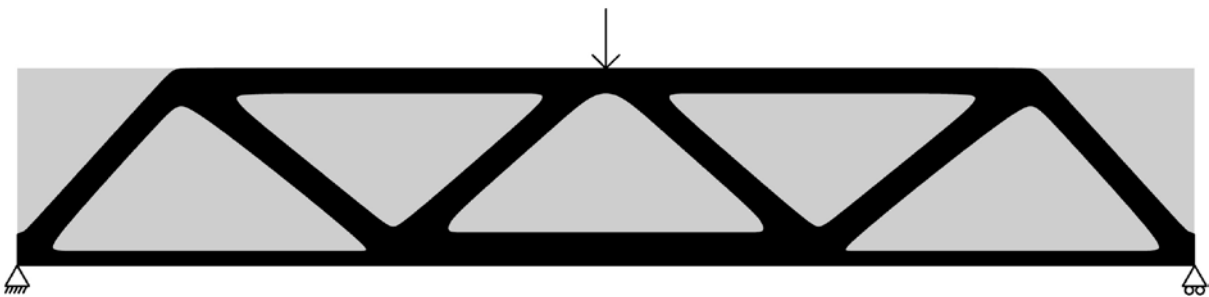
Figuur 2.6: De mesh-onafhankelijke optimale resultaten bekomen met behulp van de 88-line Matlab code. De filterwaarde (r_{min}) stijgt evenredig met de meshgrootte.



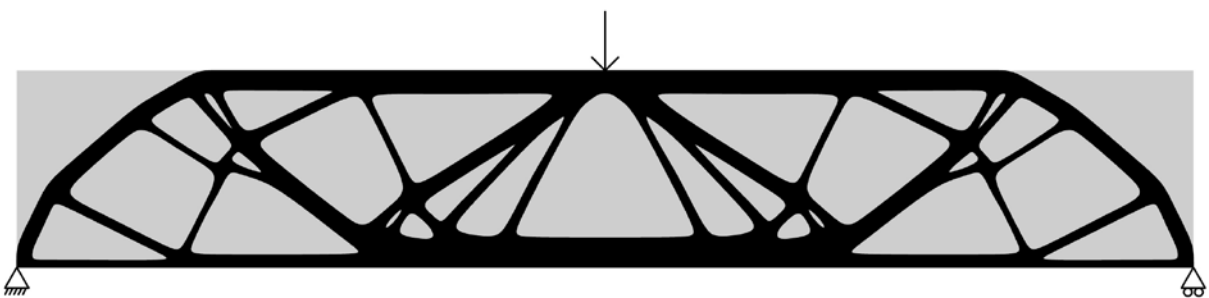
Figuur 2.7: De mesh-afhankelijke optimale resultaten bekomen met behulp van de 88-line Matlab code. De filterwaarde (r_{min}) wordt op 2 vastgehouden en is dus onafhankelijk van de meshgrootte.



Figuur 2.8: De optimale resultaten bekomen met behulp van de 88-line Matlab code. De filterwaarde (r_{min}) wordt op 2 vastgehouden maar de bestraffing (p) wordt per ontwerp gewijzigd.



Figuur 2.9: Topologie-optimalisatie van een MBB-balk met 65% volumereductie. Resultaat uit Abaqus uitgevoerd met een grove mesh. Het resultaat is nabewerkt in Rhinoceros.



Figuur 2.10: Topologie-optimalisatie van een MBB-balk met 65% volumereductie. Resultaat uit Abaqus uitgevoerd met een fijne mesh. Het resultaat is nabewerkt in Rhinoceros.

2.3 Uitbreidingen

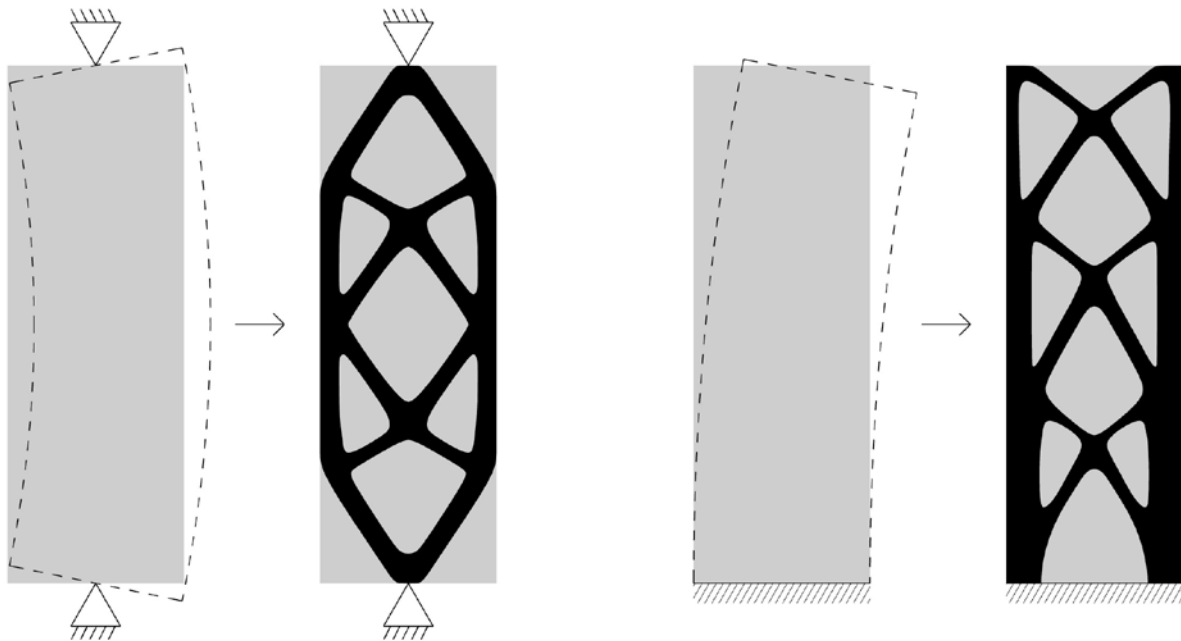
Het klassieke topologie-optimalisatieprobleem werd in het vorige onderdeel besproken. Deze op compliantie gebaseerde topologieoptimalisaties zijn eenvoudig uit te voeren maar bieden slechts een beperkt aantal mogelijkheden voor de gebruiker. Om topologie-optimalisaties te gebruiken bij meer geavanceerde bouwkundige toepassingen, zullen ook andere voorwaarden en probleemstellingen moeten worden opgenomen. Enkele voorbeelden hiervan zijn de eigenfrequenties en -trillingen, eulerknik en spanningen. Ook geometrische niet-lineariteit, niet-lineair materiaalgedrag en ontwerp-afhankelijke belastingen worden in dit onderdeel in beschouwing genomen.

2.3.1 Eigenfrequenties en -trillingen

Eigen trilling is de trilling die een lichaam ondergaat nadat de evenwichtstoestand is verbroken en het lichaam aan zichzelf wordt overgelaten. De bijbehorende frequentie wordt de eigenfrequentie genoemd. Naast de op compliantie gebaseerde optimalisaties vond de optimalisatie van eigenfrequenties en -trillingen als eerste aanvullende toepassingen. Het doel van deze optimalisaties is ervoor te zorgen dat de eigenfrequenties niet gelijk zullen zijn aan de voorkomende frequenties of dat de waarde van de fundamentele eigenfrequenties zich ver boven de resonerende frequenties bevinden.

Enkele onderzoeken hebben ook aangetoond dat structuren met hoge fundamentele eigenfrequenties relatief stijf blijken te zijn voor meerdere verschillende belastingsgevallen. Waardoor topologie-optimalisatie met als doel de maximalisering van de fundamentele eigenfrequenties goede resultaten hebben voor statische ontwerpproblemen [12].

Zoals besproken in het onderzoek van Bendsoe en Sigmund kan er in principe een oneindig hoge eigenwaarde bekomen worden indien de volledige structuur wordt verwijderd [12]. Dit is natuurlijk niet de bedoeling. Om dit probleem te verhelpen worden bij eigenfrequentie-optimalisaties vaak bepaalde delen van het ontwerpdomein als vast beschouwd, waardoor het resterende volume wel wordt geoptimaliseerd. Meer hierover in hoofdstuk 4.

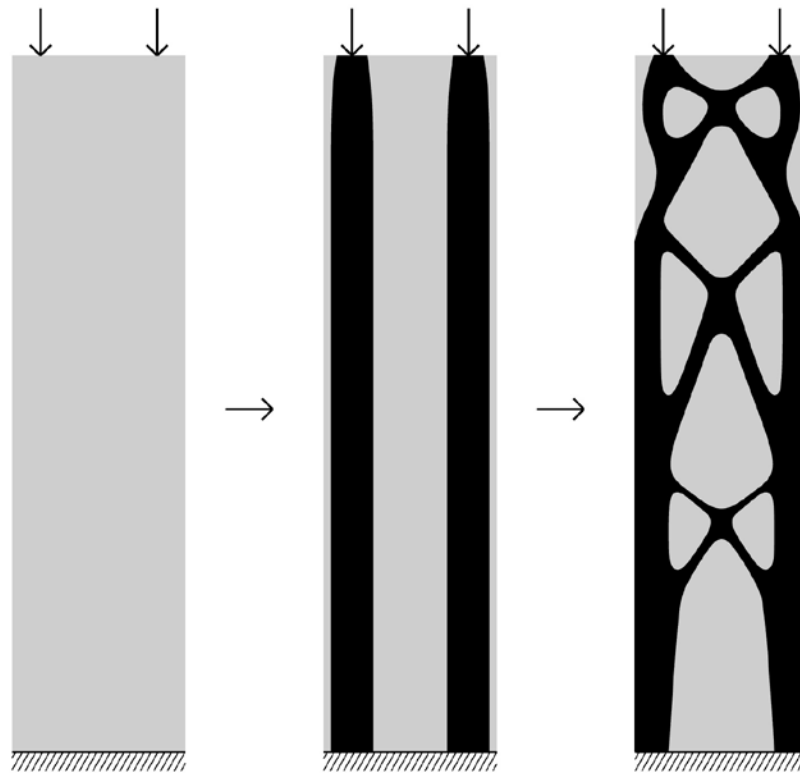


Figuur 2.11: Topologie-optimalisatie waarbij de 1ste eigenfrequentie wordt gemaximaliseerd.

2.3.2 Eulerknik

Knik is het ongecontroleerd buigen van een staaf veroorzaakt door een erop aangebrachte kracht in de lengterichting. Eulerknik is het verschijnsel waarbij een staaf zonder imperfecties op zuiver druk wordt belast totdat de knikgrens wordt overschreden. Zodra de knikgrens van een staaf wordt bereikt, zal de staaf in één of meerdere sinusgolven loodrecht op de staaf-as uitbuigen. Deze vorm van instabiliteit leidt tot het bezwijken van de staaf alvorens de volledige materiaalcapaciteit is bereikt. Dit verschijnsel komt voornamelijk voor bij slanke constructies, waarbij de buigstijfheid veel kleiner is dan de axiale stijfheid. [20]

Bij topologie-optimalisaties waarbij het volume door de formulering wordt beperkt, zullen in vele gevallen slanke structuren ontstaan. Het klassiek optimalisatie-proces houdt geen rekening met het ontstaan van eventuele knik in deze regionen. Figuur 2.12 illustreert het verschil tussen een compliantie-geoptimaliseerd resultaat en een optimalisatie met knikvoorwaarden van een rechthoekig ontwerp domein dat op druk wordt belast.



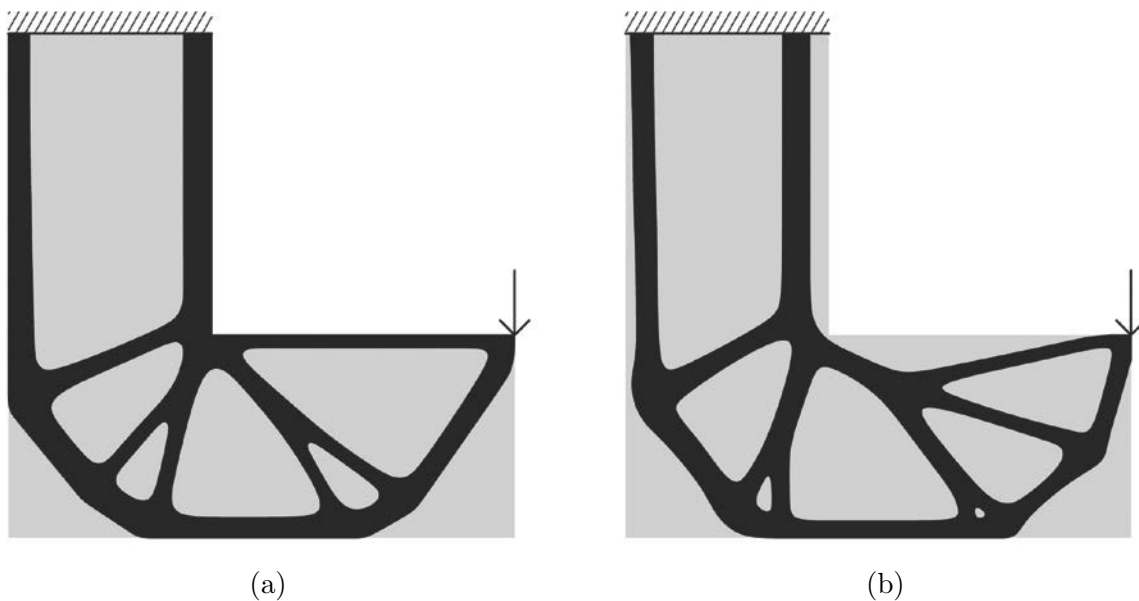
Figuur 2.12: Optimale indeling van materiaal volgens minimale compliantie (midden) en maximalisatie van de knikkracht (rechts). Illustraties zijn ter verduidelijking van het concept en gebaseerd op [12]. De volumefracties zijn in beide resultaten gelijk.

2.3.3 Spanningen

Wanneer een ontwerp wordt geoptimaliseerd naar minimale compliantie dan verkrijgt men een resultaat met optimale stijfheid. Daarenboven blijken de spanningen in de meeste situaties goed verdeeld te zijn. In sommige gevallen is dit laatste echter niet helemaal van toepassing. Wanneer bijvoorbeeld meer dan één lastengroep aanwezig is of indien de ontwerpruimte scherpe hoeken vertoont, kunnen de spanningen een minder goede verdeling vertonen en kunnen spanningsconcentraties zich voordoen. Een topologie-optimalisatie wordt in deze gevallen dus beter geoptimaliseerd met spanningsvoorwaarden (stress-constraints) of een formulering met als doel de minimalisatie van de spanningen. Deze soort van optimalisatie heeft vooral in de bouwkunde een belangrijke meerwaarde. Soms is een maximaal stijf ontwerp helemaal niet noodzakelijk en zijn het de spanningen die bepalend zijn. Wanneer bijvoorbeeld vermoeiing een belangrijke rol speelt in het ontwerp kunnen spanningsoptimalisaties een ideale oplossing bieden.

Figuur 2.13 illustreert mooi het verschil tussen een op compliantie gebaseerde optimalisatie en een spanningsoptimalisatie. Het ontwerpdomein wordt in dit voorbeeld gekenmerkt door een rechte hoek waardoor er in het eerste resultaat grote piekspanningen ontstaan ter hoogte van deze discontinuïteit. In het resultaat waar de spanningen werden beperkt, is dit niet het geval. De doorbuiging is er wel wat groter. Een kleine opmerking die kan worden gemaakt is dat indien bij het eerste resultaat de scherpe hoek wordt afgerond, een resultaat wordt bekomen waar de stijfheid en de spanningen beiden extreem goed presteren. Er wordt in dit geval wel buiten de beschikbare ontwerpruimte gewerkt, wat niet altijd mogelijk is.

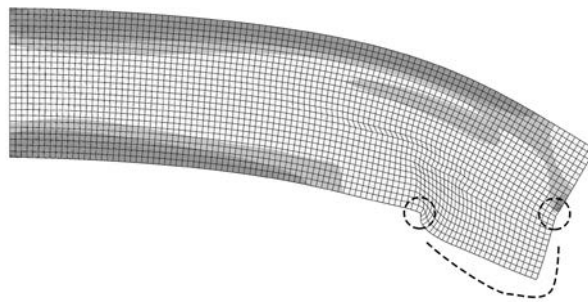
In de meeste situaties wordt het Von Mises-criterium gebruikt bij deze optimalisaties. Dit is echter niet de enige mogelijkheid. De laatste jaren is hieromtrent wat onderzoek gaande. Spanningsoptimalisaties vormen hierdoor een mooie en veelbelovende aanvulling op het klassieke probleem. Meer uitgebreide informatie over de theoretische formuleringen van dergelijke topologie-optimalisaties kan worden teruggevonden in het werk van Le en collega's [21] en Holmberg en collega's [22] en [23].



Figuur 2.13: Verschil tussen (a) een compliantie gebaseerde topologie-optimalisatie en (b) een topologie-optimalisatie met spanningsvoorwaarden.

2.3.4 Geometrische niet-lineariteit

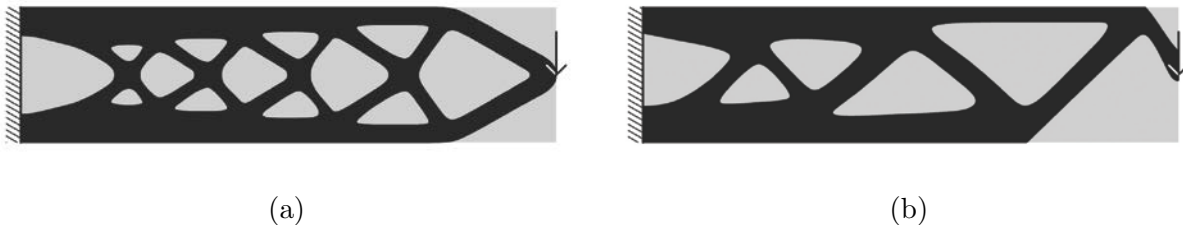
Normaal gezien worden topologie-optimalisaties uitgevoerd zonder rekening te houden met geometrische niet-lineariteit. Dit wil zeggen dat de vervorming van de structuur in belaste toestand wordt verwaarloosd. In sommige situaties kan de verwaarlozing van deze vervormingen er echter wel voor zorgen dat de resultaten niet perfect optimaal zijn. Om rekening te houden met deze vervormingen kunnen in de meeste commerciële softwareprogramma's gemakkelijk enkele parameters worden aangepast. Echter grote vervormingen creëren dikwijls problemen wanneer de SIMP-methode wordt gebruikt waardoor het optimalisatieproces vroegtijdig wordt stopgezet. Het probleem situeert zich ter plaatse van de elementen met zeer kleine stijfheid/dichtheid. Plaatselijk ontstaat een uiterst zwakke plaats waar de elementen schijnbaar uit het ontwerpdomein worden geperst. Dit probleem wordt op figuur 2.14 weergegeven.



Figuur 2.14: Illustratie van de overmatige vervormingen van bepaalde elementen door rekening te houden met geometrische niet-lineariteit bij topologie-optimalisaties.

Bruns en Tortorelli [24] stelden voor om gebruik te maken van hyperelastische materialen om de elementen stijver te maken voor grote vervormingen. Volgens Buhl en collega's was deze methode negatief in de zin dat de invoering van de hyper-elastisch materialen het probleem niet leek te stabiliseren [25]. Een andere methode om de problemen met geometrische niet-lineaire optimalisaties op te lossen is een methode eerst voorgesteld door Cho en Jung [26]. Het idee was om de kracht te vervangen door een gelijkwaardige verplaatsing. Het vervangen van de kracht lost het probleem gedeeltelijk op doordat de vervorming in initiële fase beperkt blijft tot de vooropgestelde vervorming. Via deze methode kon in bepaalde gevallen een optimum worden gevonden. Wanneer echter de vervorming nog steeds te groot was, bleef het probleem bestaan. De beste manier om dit probleem te omzeilen werd gevonden door de elementen met minimale dichtheid tijdelijk uit het optimalisatieproces te verwijderen. In het programma Abaqus (ATOM) is hier een aparte functie voor aanwezig.

Figuur 2.15 toont het verschil tussen een topologie-optimalisatie waarbij slechts kleine vervorming optreedt enerzijds en waar grote vervorming in rekening wordt gebracht anderzijds. De vervormde toestand van de optimale structuur van dit resultaat is te zien op figuur 2.16. De staaf aan het uiteinde wordt hierbij niet langer op buiging belast. Er dient opgemerkt te worden dat dit enkel geldt voor de aangebrachte ontwerpbelasting. Slechts een kleine wijziging van de grootte van deze belasting is nodig om een zwakkere schakel te creëren in deze structuur. Men dient dus zeker en vast op te letten dat men de werkelijke situatie goed benadert indien men rekening wil houden met geometrische niet-lineariteiten. Meerdere lastengroepen kunnen ook een oplossing bieden. De optimalisaties die geen rekening houden met geometrische niet-lineariteit hebben dit probleem dan weer niet. Deze presteren over het algemeen goed voor meerdere variaties van de belasting.



Figuur 2.15: Verschil tussen een topologie-optimalisatie die rekening houdt met (a) kleine verplaatsingen en (b) grote verplaatsingen.

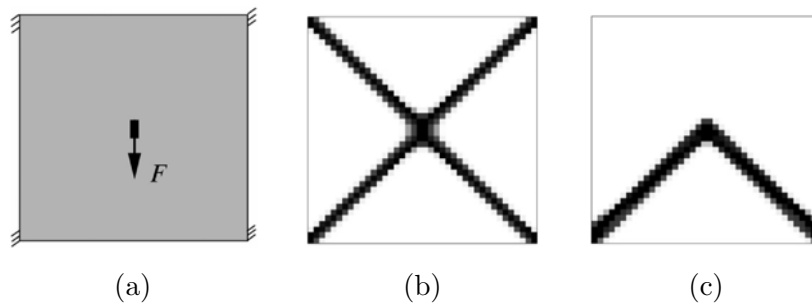


Figuur 2.16: Optimale resultaat van figuur 2.15b in de vervormde toestand. Gebaseerd op [25].

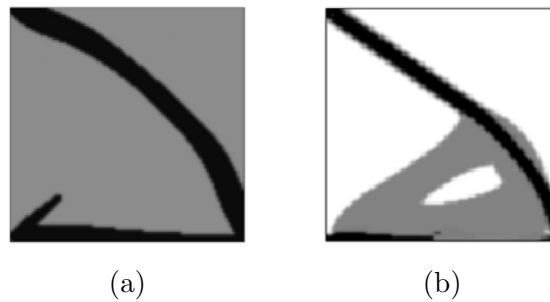
Er kan geconcludeerd worden dat in topologie-optimalisaties zeker en vast rekening kan worden gehouden met geometrische niet-lineariteit maar dat de invloed ervan niet altijd even doeltreffend is. Dit sluit evenwel niet uit dat bepaalde toepassingen hier hun meerwaarde kunnen vinden.

2.3.5 Niet-lineair materiaalgedrag

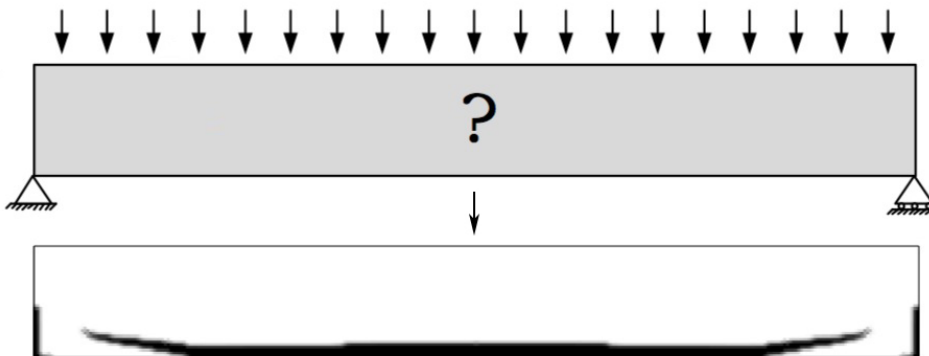
Tot nu toe wordt in de verschillende methoden steeds rekening gehouden met lineair-elastische materiaal. De invloed van verschillende materiaaleigenschappen kan echter een grote invloed hebben op de optimale materiaalverdeling. Een ontwerp probleem dat zal uitgevoerd worden in beton zal er bijvoorbeeld helemaal anders uitzien dan een optimalisatie uit staal. Enkele onderzoeken houden ook rekening met meerdere soorten materialen binnen één ontwerpdomein waardoor nog geavanceerdere toepassingen mogelijk worden. Figuur 2.17 illustreert het concept waarbij de eigenschappen van het materiaal invloed kunnen uitoefenen op het resultaat [27] en [28]. In deze masterproef wordt de invloed van het gebruik van dit niet-lineair materiaalgedrag niet verder onderzocht, hoewel de mogelijkheden zeker en vast van groot belang kunnen zijn voor de bouwkunde. Het is niet opgenomen omdat dit het onderzoek te ver zou leiden en omdat de implementatie van dergelijke optimalisaties nog niet helemaal op punt staan. Toch worden in de figuren 2.18, 2.19 en 2.20 de bijzonder mooie resultaten uit het onderzoek van Odid Amir en Michael Bogomolny [29] voorgesteld.



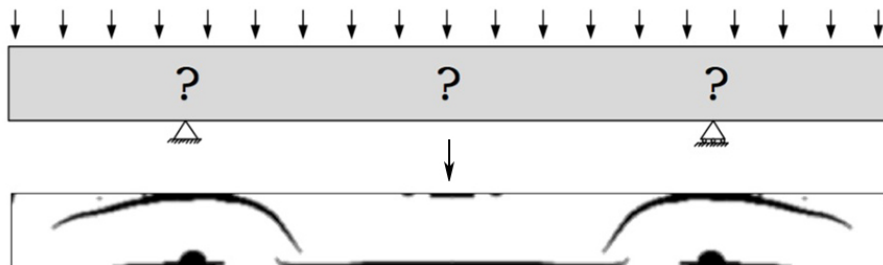
Figuur 2.17: Optimale indeling van een (a) vierkant ontwerpdomein dat wordt ingevuld met (b) lineair-elastisch materiaal en (c) een materiaal dat hoofdzakelijk op druk werkt [27].



Figuur 2.18: Optimale verdeling van een ontwerp met (a) 80% beton (grijs) en 20% staal (zwart) en (b) 30% beton (grijs), 10% staal (zwart) en 60% lege ruimte (wit) [29].



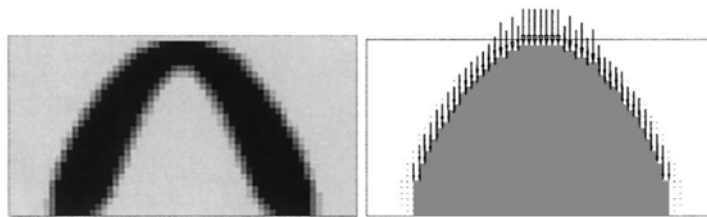
Figuur 2.19: Optimale plaatsing van wapening in een betonnen balk na 150 iteraties [29].



Figuur 2.20: Optimale plaatsing van wapening in een betonnen balk met tussensteunen na 300 iteraties [29].

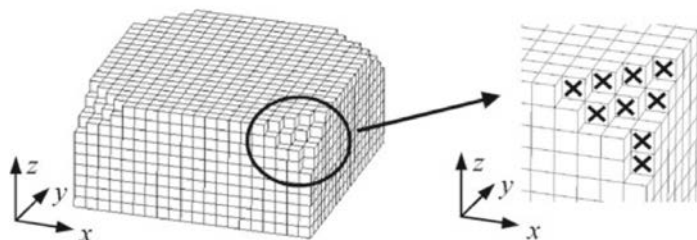
2.3.6 Ontwerp-afhankelijke belastingen

Een beperking van de meest gebruikte topologie-optimalisatiesoftware is dat vaak enkel onbeweeglijke belastingen kunnen worden aangebracht. In de realiteit zijn bepaalde belastingen echter afhankelijk van de uiteindelijk structurele topologie. Een voorbeeld hiervan is: de zoektocht naar de optimale vorm van een hoogspanningsconstructie. Hoe wordt dan de wind- en sneeuwbelasting op de initiële ontwerpruimte aangebracht? Het is immers de geoptimaliseerde structuur die de belastingen opneemt.



Figuur 2.21: Illustratie van een geoptimaliseerd boogvormige structuur met ontwerp-afhankelijke sneeuwlast [30].

De richting en locatie van de ontwerp-afhankelijke belastingen kunnen dus variëren als de vorm van de structuur verandert. In de literatuur worden verschillende oplossingen gegeven. In de meeste situaties wordt er gebruik gemaakt van een hydrostatische vloeistof die de lege ruimte inneemt en aan de hand van een fictieve temperatuursbelasting de krachten overbrengen op de geoptimaliseerde structuur (figuur 2.21). Andere methoden herdefiniëren de randen van de structuur om op deze manier de belasting aan te passen aan de nieuwe begrenzing (figuur 2.22).

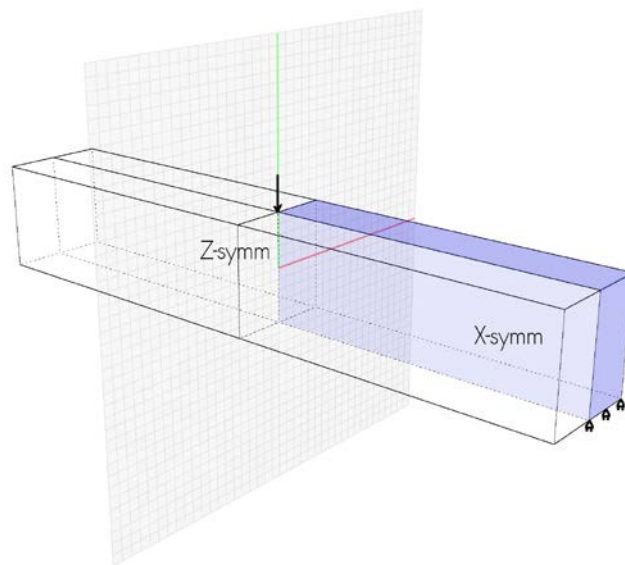


Figuur 2.22: Illustratie van een y-as georiënteerde belasting [31].

2.4 Opmerkingen

Als extra aanvulling wordt in dit onderdeel gesproken over de symmetrie en het niet-unieke karakter van topologie-optimalisaties.

Wanneer in een ontwerpprobleem de randvoorwaarden en de belastingen rond één of meerdere assen gespiegeld kunnen worden, en er dus een zekere symmetrie terug te vinden is, dan brengt men die symmetrie ook meestal in rekening bij het opstellen van het FE-model. Er kan hierdoor sprake zijn van een sterke reductie van het aantal te berekenen FE-elementen. Een bekend voorbeeld is de topologie-optimalisatie van de MBB-balk. In de meeste literatuur wordt slechts de helft van het ontwerpdomein in rekening gebracht waardoor het aantal elementen van de ‘mesh’ gehalveerd kan worden. Een 3-dimensionale MBB-balk heeft twee symmetrievlakken waardoor voor een balk bestaande uit 6 miljoen elementen er slechts 1,5 miljoen in rekening worden gebracht. Wanneer men de rekestijd wil beperken, houdt men hier best rekening mee. Ook wat betreft de productiemogelijkheden heeft een symmetrisch resultaat vele voordelen.

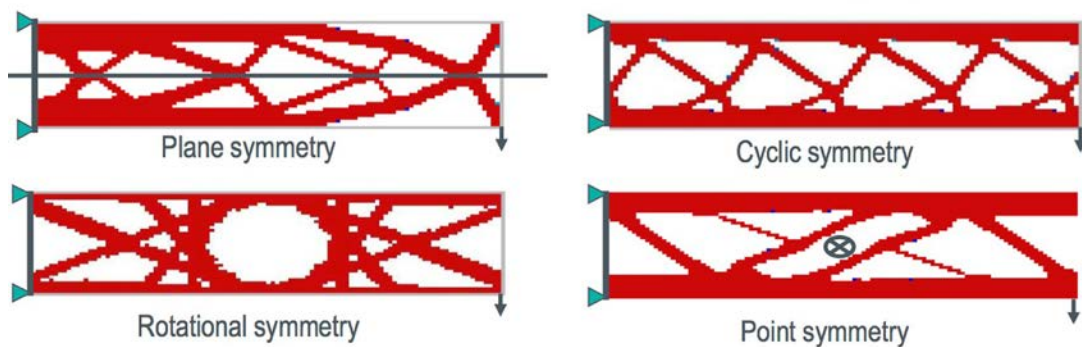


Figuur 2.23: Illustratie van een 3-dimensionale MBB-balk.

In tegenstelling tot wat hierboven vermeld is, toonde Stolpe in 2010 aan dat de optimale resultaten van symmetrische ontwerpproblemen niet noodzakelijk zelf ook symmetrisch zijn [32]. Als reactie hierop werden onder andere door Rozvany [33] en Watada en collega's [34] verschillende onderzoeken verricht naar de ‘non-uniqueness’ en ‘non-symmetry’ van topologie-optimalisaties.

Rozvany kwam tot de conclusie dat wanneer het ontwerpprobleem symmetrisch is er ten minste één optimale structurele indeling is die ook symmetrisch is en slechts in een aantal zeer bijzondere gevallen, er een oneindig aantal andere symmetrische en/of niet-symmetrische optimale topologieën bestaan. De meeste symmetrische ontwerpproblemen hebben dus een optimale oplossing die uniek en symmetrisch is. In dit eindwerk wordt hier dan ook vanuit gegaan.

Commerciële softwareprogramma's die topologie-optimalisaties uitvoeren kunnen vaak ook geometrische beperkingen opleggen. Deze beperkingen kunnen vervolgens worden gebruikt om symmetrieën op te leggen of minimale afmetingen van onderdelen te verzekeren, onafhankelijk van het ontwerpdomein. Ook kunnen productie-eisen worden opgelegd waardoor het gieten van het uiteindelijke ontwerp en het maken van mallen mogelijk wordt. Ook het ontstaan van holtes in bepaalde onderdelen kan worden voorkomen.



Figuur 2.24: Enkele geometrische beperkingen die kunnen worden opgelegd in Abaqus 6.12 [35].

2.5 Conclusie

Een algemeen overzicht werd gegeven van de theoretische grondbeginselen van structurele optimalisatie en de meest voorkomende doelstellingen en voorwaarden. Zoals kan worden opgemerkt is er dus heel wat mogelijk. Zeker door het groot aantal mogelijke uitbreidingen en de vele extra softwaregestuurde parameters wordt ervoor gezorgd dat ontwerpproblemen zeer gedetailleerd de werkelijkheid kunnen benaderen. Hierdoor zouden in principe de resultaten zeer goed kunnen worden afgestemd. De volgende hoofdstukken gaan hier dieper op in.

Hoofdstuk 3

Topologie optimalisatie software

3.1 Commercieel verkrijgbare software

Commerciële topologie-optimalisatiesoftware bestaat nog niet lang. De eerste uitgave kwam met de nieuwe release van Hyperworks Optistruct in 1994. Het heeft echter een heel eind geduurd vooraleer andere programma's volgden. De dag van vandaag bevat de meeste high-end CAE-software een topologie-optimalisatie module. De meeste modules focussen zich voorlopig nog steeds op de klassieke probleemstellingen zoals de compliantie methode. Onderstaande lijst geeft de drie meest geavanceerde commercieel verkrijgbare softwarepaketten weer, waar 2D- en 3D-topologie-optimalisaties mee kunnen worden uitgevoerd. Een lijst met andere topologie-optimalisatiesoftware is terug te vinden op: <http://www.topology-opt.com/software-list/>.

ALTAIR - Hyperworks Optistruct

Optistruct van Altair wordt door velen gezien als de grondlegger van topologie-optimalisatiesoftware. Ze kwamen er als eersten mee op de markt in 1994. Hun software wordt door vele industrieën op grote schaal aangewend en levert zijn gebruikers tot op vandaag de meeste mogelijkheden.

DASSAULT SYSTEMES - Simulia Abaqus

Abaqus wordt hoofdzakelijk gebruikt in de auto- en luchtvaartindustrie. Omwille van het sterk materiaal-technisch vermogen is het product zeer populair in de academische wereld. Bij de uitgave van Abaqus 6.11 in 2011 kwam hun eerste topologie-optimalisatie module genaamd ATOM. Deze module maakt het mogelijk om met behulp van de Abaqus-software, topologie- en vormoptimalisaties uit te voeren.

SIEMENS NX (Unigraphics) - MSC Nastran

Nastran is een eindige-elementen-analyse (FEA) programma dat oorspronkelijk werd ontwikkeld voor de NASA in de late jaren 1960 in het kader van de ruimtevaartindustrie. Het product werd later overgenomen door Siemens NX. In 2005 kon de Nastran software voor het eerst topologie-optimalisaties uitvoeren.

3.2 Andere software pakketten

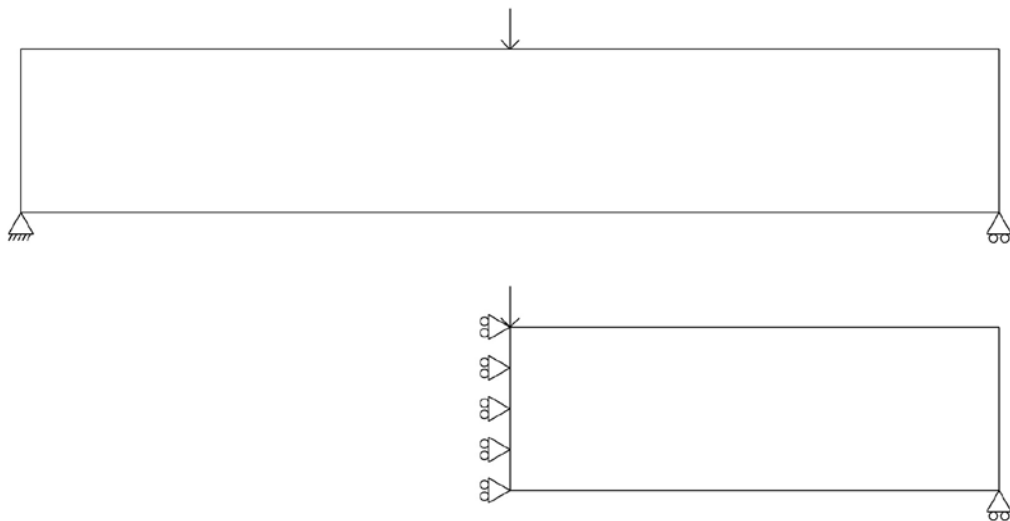
Onderzoek naar meer efficiënte en meer geavanceerde topologie-optimalisatie-algoritmen wordt in vele gevallen niet in commerciële softwarepakketten uitgevoerd. Dit komt omdat de code die de optimalisatie uitvoert, vaak geen aanpassingen toelaat. Wanneer men dus echt algoritmen wil gaan schrijven, dient men die te coderen aan de hand van speciaal hiervoor ontwikkelde programma's. Dit kan bijvoorbeeld in het programma Matlab waarmee de gebruiker zo goed als onbeperkte mogelijkheden heeft. Het meest gekende algoritme dat hiermee werd geschreven is de '99-line Matlab code' door Sigmund in 2001 [36] en zijn opvolger '88-line Matlab code' door Andreassen en collega's in 2010 [19]. Deze scripts of codes zijn vrij beschikbaar voor academisch gebruik en bieden een mooi uitgangspunt van waaruit verder kan worden gewerkt. Matlab is zeer gebruiksvriendelijk, maar is niet het enige programma dat het coderen van topologie-optimalisaties toelaat. Bepaalde programmeertalen zoals Fortran of C kunnen ook worden gebruikt. Sommige softwareprogramma's kunnen ook worden gecombineerd: het gebruik van het commerciële programma COMSOL voor de eindige-elementen-analyse (FEA) waarna het optimalisatie-proces wordt uitgevoerd door Matlab.

De laatste jaren zijn er ook enkele kleine gebruiksvriendelijke 'applets' verschenen die door het grote publiek kunnen worden gebruikt. Enkele van deze apps zijn beschikbaar in de 'google play' en 'app store' waar onder andere real-time visualisaties van topologie-optimalisaties op een speelse manier kunnen worden uitgevoerd. Het voordeel van deze kleine programma's is dat eenvoudige ontwerpproblemen vaak zeer snel kunnen worden opgelost. Hiernaast is er geen enkel wiskundig inzicht vereist waardoor het concept van topologie-optimalisatie zichzelf verduidelijkt. Meer info over deze apps en tal van andere informatie over topologie-optimalisatie kan gevonden worden op de zeer interessante website: <http://www.topopt.dtu.dk>

3.3 Vergelijkende studie

Iedere programma heeft zijn voor- en nadelen. In dit onderdeel wordt kort de invloed van meshgrootte op de rekentijd besproken, waarbij gebruik wordt gemaakt van de Abaqus topologie-optimalisatie module (ATOM) en de 88-line Matlab code.

Deze studie beschrijft de optimalisatie van het meest klassieke studieobject in topologie-optimalisaties, namelijk de MBB-balk. Dit studie-object heeft zijn oorsprong in een studie waarbij de romp van een passagiersvliegtuig (geproduceerd door Messerschmitt-Bölkow-Blohm) werd geoptimaliseerd. De oorspronkelijke ontwerpruimte was 2400 mm lang en 400 mm hoog met een in het midden aangrijpende puntlast van 20 kN. De balk wordt aan de randen glijdend ondersteund en de maximale doorbuiging mocht niet meer dan 9,4 mm bedragen. De dag van vandaag spreekt men van een MBB-ontwerpruimte wanneer een rechthoekig ontwerpdomein wordt belast met een puntlast. Omwille van de symmetrie moet in principe slechts een halve balk worden geoptimaliseerd. Dit wordt hier dan ook toegepast.



Figuur 3.1: Volledig ontwerpdomein van de MBB-balk (boven) en het symmetrisch alternatief (onder) met bijhorende randvoorwaarden.

(1) Een eerste test vergelijkt de resultaten van een ontwerpruimte bestaande uit 60×20 elementen met een Young's modulus van 210 GPa en Poisson ratio van 0,3. De penalisatiefactor bedraagt 2, de filterwaarde 1,3 en de volumefractie is gelijk aan 0,3.

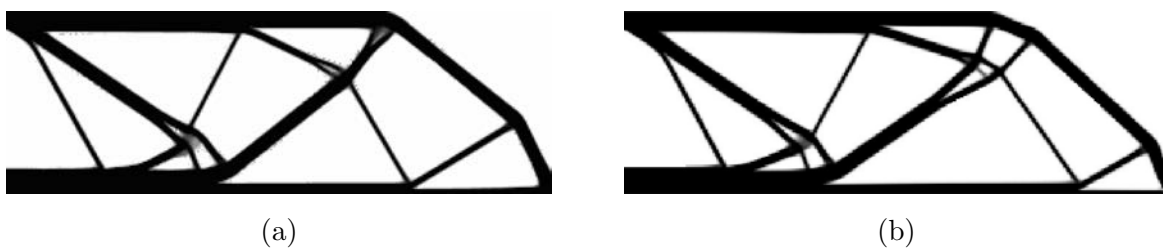


Figuur 3.2: Geoptimaliseerde resultaten geproduceerd met behulp van (a) Abaqus en (b) Matlab.

Gedetailleerde gegevens van de optimalisatie:

- Abaqus : 630 seconden (38 iteraties) Time/it : 16,58 sec
- Matlab : 1,450 seconden (38 iteraties) Time/it : 0,04 sec

(2) Een tweede test vergelijkt de resultaten van een ontwerpruimte bestaande uit 300×100 elementen met een Young's modulus van 210 GPa en Poisson ratio van 0,3. De penalisatiefactor bedraagt 2, de filterwaarde 1,3 en de volumefractie is gelijk aan 0,3.



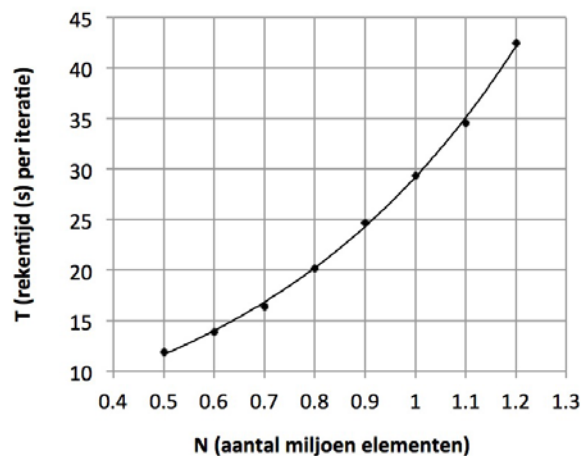
Figuur 3.3: Geoptimaliseerde resultaten geproduceerd met behulp van (a) Abaqus en (b) Matlab.

Gedetailleerde gegevens van de optimalisatie:

- Abaqus : 3060 seconden (51 iteraties) Time/it : 60,00 sec
- Matlab : 55,389 seconden (100 iteraties) Time/it : 0,55 sec

We bemerken dat de snelheid waarmee de optimalisaties werden uitgevoerd erg afhankelijk zijn van het gebruikte programma. De reden waarom Abaqus een hogere rekentijd heeft, is omdat de optimalisatiemodule extern geraadpleegd dient te worden door Abaqus. Abaqus en ATOM werken bij wijze van spreken naast elkaar waardoor gegevens telkens heen en weer dienen te worden verplaatst. Daarenboven wordt door Abaqus veel meer informatie verwerkt in vergelijking met het Matlab-algoritme. Het Matlab-algoritme beperkt zich namelijk tot het optimaliseren van 2D-ontwerpdomeinen waar verder niet echt iets mee kan worden gedaan. Abaqus kan dus in principe veel meer. De resulterende doorbuigingen, spanningen, reactiekrachten, enz... kunnen worden opgevraagd. Ook kunnen er tal van gedetailleerde beperkingen worden opgelegd en bovendien zijn 3D-optimalisaties mogelijk. Beide programma's hebben zo hun voor- en nadelen.

Aan de andere kant was ook de meshgrootte een bepalende factor voor de rekentijd. Logischerwijze stijgt de rekentijd wanneer het aantal elementen toeneemt. Figuur 3.4 toont een studie hiervan uitgevoerd in Matlab. De relatie tussen de rekentijd in seconden per iteratie en het aantal elementen van het ontwerpdomein wordt weergegeven. De studie betreft de optimalisatie van een halve MBB balk.



Figuur 3.4: Relatie tussen rekentijd en meshgrootte uitgevoerd in Matlab met behulp van de 88-line Matlab code.

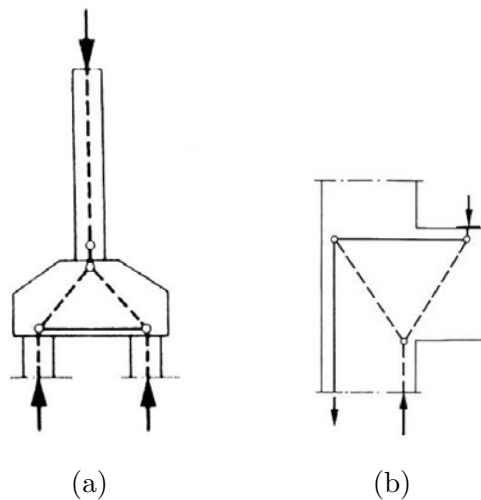
Hoofdstuk 4

Mogelijke bouwkundige toepassingen

Dit hoofdstuk behandelt het belangrijkste onderdeel van deze masterproef. Het behandelt namelijk de onderzoeksvraag: ‘Kan topologie-optimalisatie aangewend worden als ontwerptool bij bouwkundige toepassingen?’. Zoals reeds eerder werd vermeld, wordt topologie-optimalisatie reeds veelvuldig gebruikt in andere industrieën terwijl het gebruik in bouwkundige toepassingen nog niet veel voorkomt. Dit kan worden verklaard doordat de economische factor in de bouwkunde van belang is, waardoor de resultaten van dergelijke optimalisaties niet altijd voldoende voordelen bieden. Standaardisatie en modulaire bouwsystemen zijn de dag van vandaag uitermate populair. Nochtans kennen ook 3D-printing en andere digitale productietechnologieën een opmars. De relatief grote schaal waarmee in de bouw wordt gewerkt, zorgt ervoor dat de invloed van deze laatste ontwikkelingen nog redelijk beperkt blijft. De combinatie van topologie-optimalisatie met deze digitale productietechnologieën wordt in een volgend hoofdstuk behandeld. Allereerst tracht dit hoofdstuk het belang van topologie-optimalisatie aan te duiden. Bepaalde toepassingen kunnen de dag van vandaag een grote invloed hebben terwijl andere toepassingen eerder futuristisch lijken. De software die werd gebruikt is in eerste instantie Abaqus 6.12 met bijhorende module genaamd: ‘Abaqus Topology Optimization Module’ of kortweg ATOM. Deze software werd in het begin van het thesisjaar aangeleerd en werd het basisprogramma voor deze masterproef. Zoals reeds vermeld heeft de Abaqus-module het grote nadeel een erg grote rekentijd te hebben, daarom werd voor bepaalde toepassingen ook gebruik gemaakt van de 88-line Matlab code en de interactieve webplayer te vinden op <http://www.topopt.dtu.dk>. Deze webplayer heeft het grote voordeel zeer snel een eerste zicht te bieden op bepaalde concepten waarna vervolgens in Abaqus of Matlab een gelijkaardig resultaat kon worden bekomen met hogere resolutie.

4.1 Staafwerkmodellen

Een eerste toepassing waarbij topologie-optimalisatie kan worden aangewend is bij het ontwerp van staafwerkmodellen voor gewapende betonconstructies. Figuur 4.1 toont het principe van een staafwerkmodel dat wordt gebruikt bij de dimensionering van een paalfundering en een console.

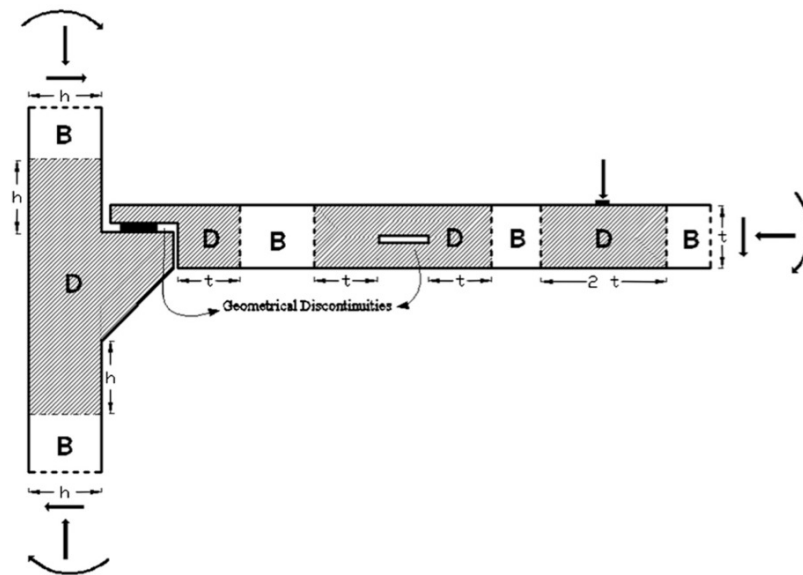


Figuur 4.1: Staafwerkmodellen: (a) paalfundering en (b) console [37].

Inleiding

Staafwerkmodellen (strut-and-tie models (STM)) worden gebruikt als basis voor het dimensioneren van de structurele elementen in gewapend beton voor gebieden met spanningsconcentraties waar het gebruik van de hypothese van Bernoulli niet langer geschikt is. Prof. J. Schlaich en collega's hebben in 1987 voor het eerst deze regio's omschreven en een dimensioneringsmethode op basis van vakwerkmodellen aangebracht [37]. Een vakwerkmodel bestond uit een reeks interne isostatische driehoeken opgebouwd uit beton-drukstangen, staal-trekstangen en knooppunten. De laatste jaren wordt gesproken over een staafwerkmodel waarbij de knooppunten stijf worden verondersteld. Volgens prof. J. Schlaich en collega's kan elke betonconstructie in twee soorten gebieden worden onderverdeeld: De 'B'-gebieden en de 'D'-gebieden. De letter 'B' staat voor 'Bernoulli' wat wil zeggen dat deze gebieden met behulp van de buigingstheorie (hypothese van Bernoulli) kunnen worden gedimensioneerd.

De letter ‘D’ staat voor ‘discontinuïteit’ en staat symbool voor de gebieden waar volgens hem gebruik moet worden gemaakt van een vakwerkmodel. Volgens [38] kan een staafwerkmodel in principe ook worden toegepast in de ‘B’-gebieden. Voorbeelden van dergelijke ‘D-gebieden’ zijn ligger-kolom verbindingen, funderingszolen op palen, openingen in balken en wanden, wandliggers en consoles. Deze discontinuïteïten worden verondersteld een invloed te hebben op een zone gelijk aan de breedte van het element. Figuur 4.2 geeft hiervan een verduidelijking.



Figuur 4.2: Aanduiding van de ‘B’ en ‘D’ gebieden volgens [37].

Het bepalen van een staafwerkmodel gebeurt traditioneel op volgende manier: men bepaalt het spanningsverloop in de niet-gescheurde toestand met behulp van druk- en trektrajectoriën die aan de hand van foto-elastisch onderzoek of de eindige-elementen-methode zijn bepaald. Daarna ontwerpt men een staafwerkmodel bestaande uit drukstangen(beton) en trekstangen(staal) die zo goed als mogelijk dit spanningsverloop volgen en waarbij wordt gestreefd naar een model met een minimumvervormingsenergie. Het is vaak geen eenvoudige taak het spanningsverloop en de bijhorende trajectoriën op een correcte manier te interpreteren.

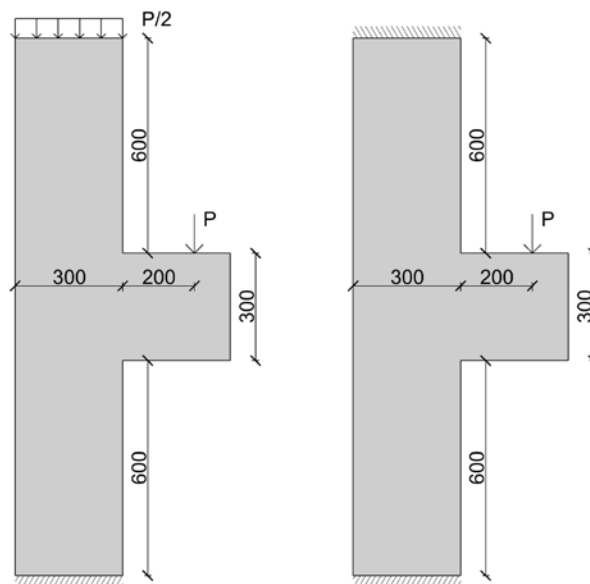
In deze masterproef wordt topologie-optimalisatie voorgesteld als de oplossing voor het ontwerp van staafwerkmodellen. Het klassieke topologie-optimalisatie-algoritme streeft namelijk naar een minimale compliantie en dit maakt het een uitermate geschikte oplossing voor dit probleem. Goede resultaten worden bekomen wanneer de volumefractie van de optimalisatie laag wordt gehouden.

In de volgende voorbeelden worden de resultaten, verkregen aan de hand van topologie-optimalisatie, vergeleken met gekende staafwerkmodellen. De onderzochte voorbeelden zijn de console, de ingangligger, de wandligger met openingen en de paalkop. In de resultaten worden de trekstangen weergegeven als volle lijnen en de drukstangen met streepjeslijnen. Enkel het gebruik van topologie-optimalisatie wordt toegelicht. Er wordt niet dieper ingegaan op het bepalen van de theoretische trekwapening, alsook de weerstand van het beton wordt niet gecontroleerd. Meer uitleg hierover is te vinden in [38].

Casestudies

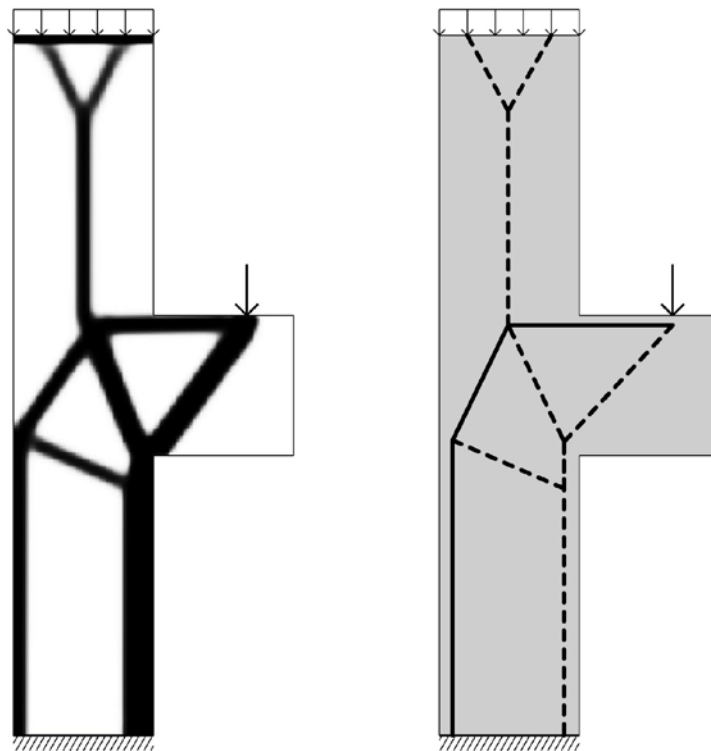
De console

Een console is een kort uitkragend en dragend constructiedeel dat krachten van het ene constructie-element overbrengt naar het ander. Een gekend voorbeeld van een console is de oplegging van een balk of plaat op een console die aangesloten is aan een doorgaande kolom of wand [38]. Volgens NBN B 15-002 (1999) par. 2.5.3.7.2 mag een console worden gedimensioneerd met een staafwerk van druk- en trekstangen indien de waarde van a_c voldoet aan de voorwaarde: $0.4h_c \leq a_c \leq h_c$. Ook de hoogte minstens gelijk zijn aan drie keer de breedte zoals in figuur 4.2 eerder al werd voorgesteld. Voor deze casestudie werd gewerkt met volgende afmetingen en randvoorwaarden:

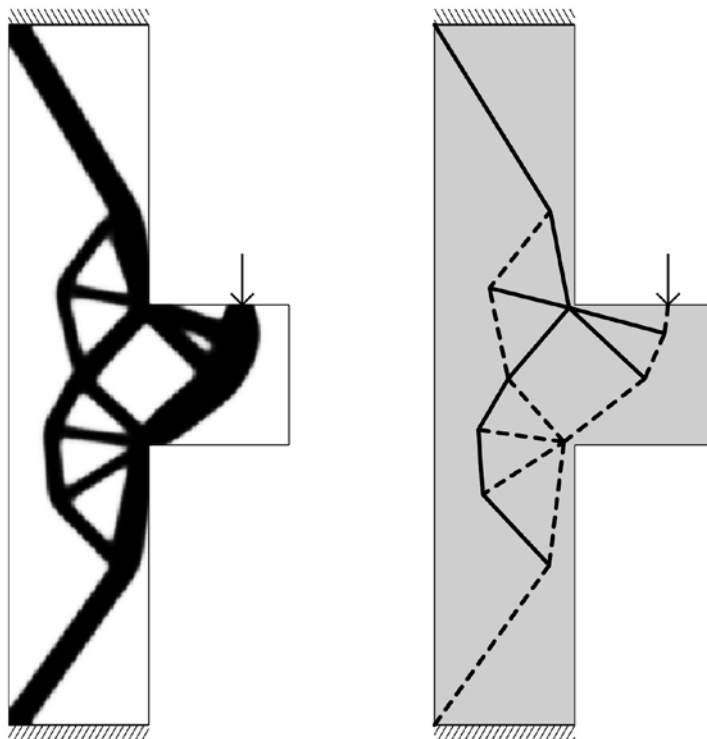


Figuur 4.3: Voorstelling afmetingen, randvoorwaarden en belastingen van en op de console.

Er worden twee verschillende situaties onderzocht. Een eerste situatie levert een kracht P op de console en een kracht $P/2$ op de kolom. Een tweede situatie levert enkel een kracht P op de console. De optimalisaties werden uitgevoerd met behulp van de interactieve topopt webplayer en dus uitgevoerd met behulp van de compliantmethode. De volumefractie werd op $\pm 20\%$ ingesteld om een duidelijk resultaat te bekomen. Figuur 4.4 geeft de resultaten van situatie 1 weer en figuur 4.5 toont de resultaten van de tweede situatie. De eerste situatie levert resultaten op die sterk gelijken op de bestaande staafwerkmodellen voor consoles. De resultaten van de tweede situatie zijn iets minder herkenbaar. Dit model werd bestudeerd omdat het niet altijd zeker is dat de bovenliggende belasting voldoende druk zal kunnen uitoefenen. Wanneer een zeer lichte bovenbelasting optreedt in combinatie met een sterke windzuiging, zou deze situatie kunnen optreden. Hier wordt niet gedetailleerder op ingegaan.



Figuur 4.4: Situatie 1: (a) resultaat van topologie-optimalisatie en (b) het afgeleide staafwerkmodel.

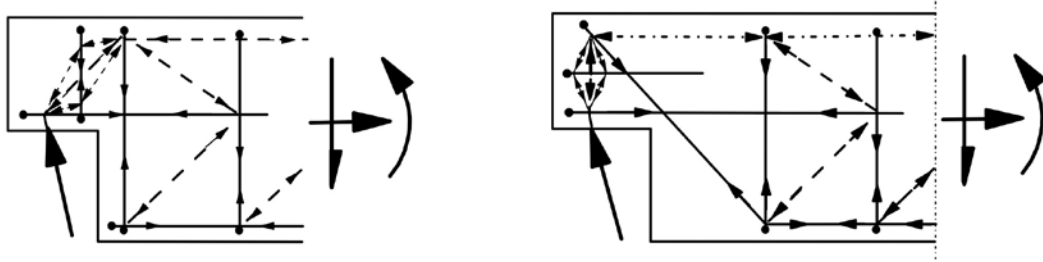


Figuur 4.5: Situatie 2: (a) resultaat van topologie-optimalisatie en (b) het afgeleide staafwerkmodel.

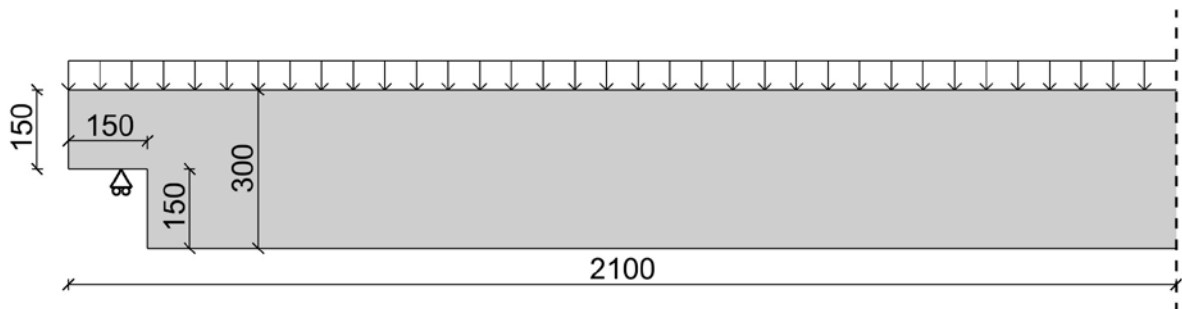
De ingangligger

Ingangliggers of tandopleggingen komen regelmatig voor bij ligger-kolom verbindingen. Ter hoogte van de steunpunten vermindert men de hoogte van de balk waardoor er een esthetisch aangename verbinding gevormd wordt met de ligger en diens console of kopplaat (bij bruggen). Ter plaatse van het steunpunt is er immers geen volledige hoogte meer vereist omdat het moment naar nul komt. Er dient echter wel rekening gehouden te worden met de dwarskracht. Om afscheuring van de tand te voorkomen, dient bijkomende wapening te worden geplaatst.

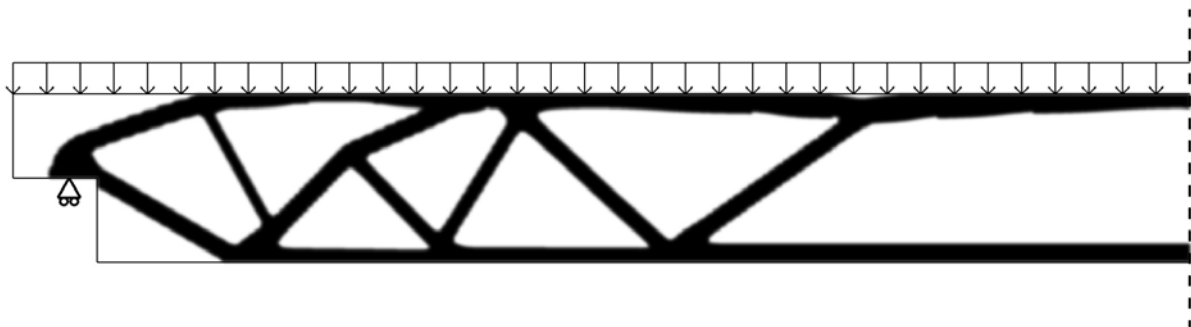
Tandopleggingen worden doorgaans berekend met een staafwerkmodel volgens Eurocode 2. De Eurocode stelt twee modellen voor die eventueel kunnen worden gecombineerd. Figuur 4.6 toont deze modellen. Met behulp van topologie-optimalisatie wordt in deze masterproef een gelijkaardig probleem onderzocht. Er wordt geopteerd voor de volledige balk, dus niet enkel de tand, te bestuderen. De afmetingen zijn te zien op figuur 4.7. De resultaten van de topologie-optimalisatie worden weergegeven op figuur 4.8. Het resultaat van de optimalisatie werd bekomen met behulp van Abaqus.



Figuur 4.6: Staafwerkmodellen voorgesteld in Eurocode 2 (NBN EN 1992-1-1, fig. 10.4)



Figuur 4.7: Ontwerpdomein van de ingangligger rekening houdend met symmetrie.

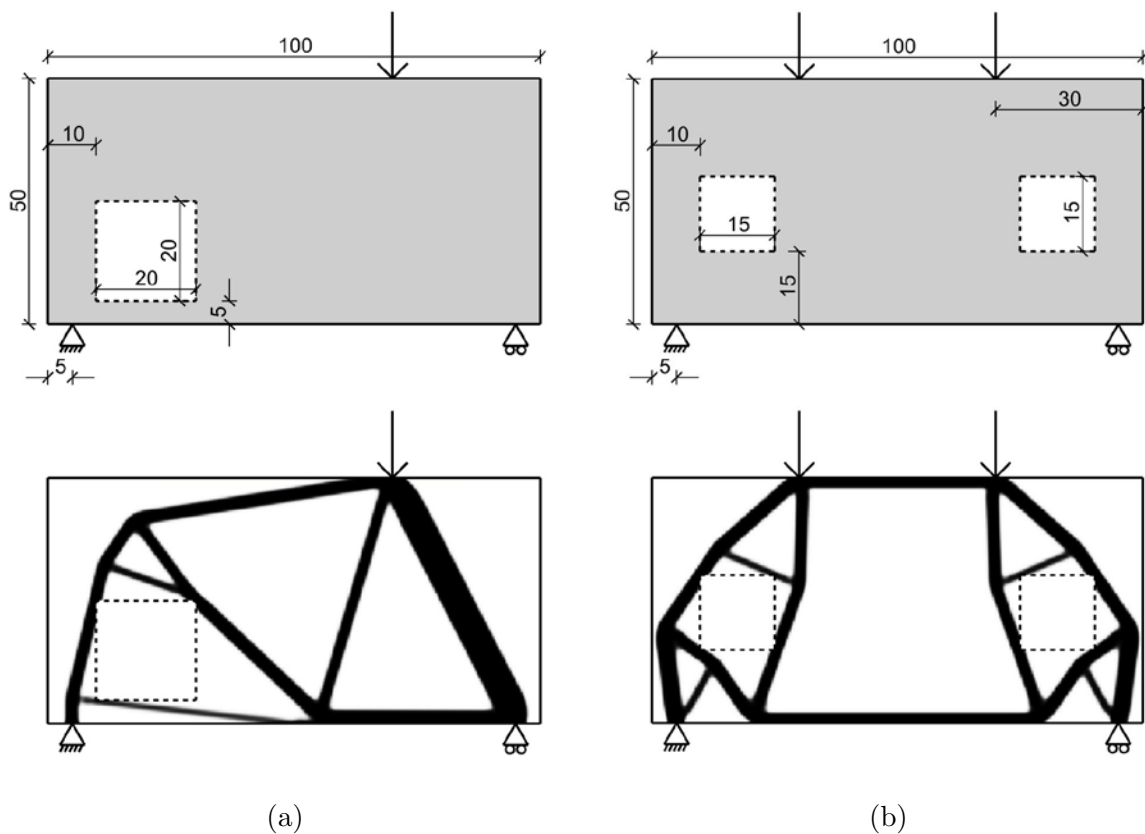


Figuur 4.8: Resultaat topologie-optimalisatie van de ingangligger.

De wandligger

De vorige twee casestudies bespraken telkens ontwerpruimtes waar reeds gekende staafwerkmodellen voor bestonden. Het gebruik van topologie-optimalisatie heeft het grote voordeel dat het ook voor ongekende situaties oplossingen kan genereren. Men kan bovendien kleine aanpassingen invoeren die het ontwerp mogelijk verbeteren. Deze casestudie bestudeert een wandligger met openingen. Figuur 4.9 toont de resultaten van twee studies uitgevoerd met de interactieve topopt webplayer.

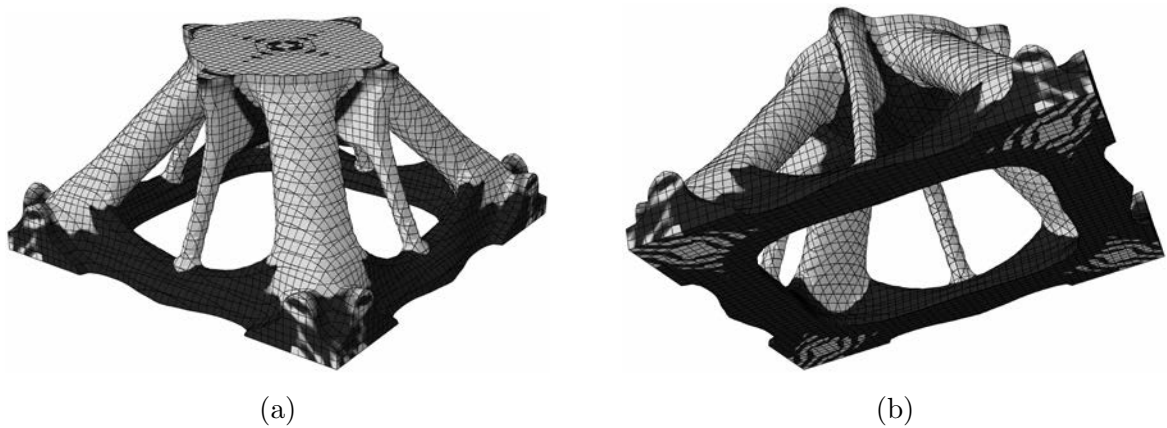
In het eerste ontwerp wordt een opening voorzien in de linkeronderhoek. De resultaten van de optimalisatie duiden indirect ook de plaats aan waar wapening zal moeten worden geplaatst. De berekening van de vereiste wapening wordt in deze masterproef niet besproken. In het tweede ontwerp worden vervolgens twee openingen geplaatst, symmetrisch ten opzichte van het midden. Ook hier zou een staafwerkmodel eenvoudig kunnen worden afgeleid.



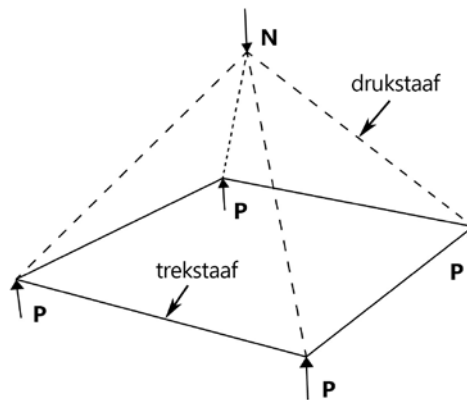
Figuur 4.9: Casestudie van de wandligger met openingen.

De paalkop (3D)

Een ander voordeel van topologie-optimalisatie is dat ook complexe drie-dimensionale probleemgevallen kunnen worden onderzocht. Hier wordt het relatief eenvoudig probleem van de paalkop met vier palen bestudeerd. De resultaten (figuur 4.10) werden uitgevoerd met behulp van Abaqus en komen grotendeels overeen met het gekende staafwerkmodel (figuur 4.11).



Figuur 4.10: Optimale indeling van het beperkt beschikbaar materiaal van de paalkop. (a) kijk van bovenaf en (b) kijk van onderen.



Figuur 4.11: principe van een staafwerkmodel voor een paalkop met 4 palen.

Conclusie

In dit hoofdstuk werd het gebruik van topologie-optimalisatie als ontwerptool voor staafwerkmodellen besproken. Het klassieke algoritme dat werkt met behulp van de complantiemethode lijkt op een eenvoudige wijze betrouwbare en kwalitatieve resultaten te leveren op een zeer snelle tijd. Er werd gewerkt met het commerciële softwarepakket Abaqus (ATOM) en de 88-line Matlab code voor topologie-optimalisatie. Ook de vrij toegankelijke interactieve topopt webplayer kon worden gebruikt bij het vinden van staafwerkmodellen. Het grote voordeel van deze laatste twee programma's is dat weinig of zelfs geen kennis met betrekking tot FEA vereist is om resultaten te bekomen. Het gebruik van meerdere lastengroepen werd hier niet besproken maar kan eenvoudig worden toegevoegd zou het ontwerp dit vragen.

4.2 Bruggenbouw

Een tweede toepassing van topologie-optimalisatie is terug te vinden in de bruggenbouw. In deze paragraaf wordt in de eerste plaats getracht met behulp van topologie-optimalisatie de initiële fase van het brugontwerp te versnellen. Ook het gebruik als optimalisatietool voor bepaalde kleinere brugonderdelen wordt onderzocht. Figuur 4.12 toont allereerst een beeld van de Juscelino Kubitschek-brug, ontworpen door architect Alexandre Chan en bouwkundig ingenieur Mário Vila Verde [39]. Een mooi voorbeeld van een hedendaagse brug door de “society of engineers of Pennsylvania” uit de Verenigde Staten uitgeroepen tot mooiste brug ter wereld [40].



Figuur 4.12: De Juscelino Kubitschek-brug [39]

Inleiding

De dag van vandaag bestaan tal van verschillende types van bruggen en zowat alle bekende bouwmaterialen worden gebruikt. Doorheen de jaren werden bruggen onder andere uit hout, steen, gietijzer, smeedijzer, staal en gewapend beton geconstrueerd. Recent worden bruggen ook uit vezelversterkte kunststof of composiet vervaardigd. Typisch aan de meeste brugstructuren is dat er uitstekend wordt omgegaan met het materiaalgebruik. Bruggen zijn namelijk puur technische structuren die vaak slechts één doel hebben het transport over een zekere hindernis mogelijk maken (verbinding) en dit vaak op een zo goedkoop mogelijke manier.

De esthetische factor zal in vergelijking met andere bouwwerken hier veel minder van belang zijn. Hierdoor zal bij de meeste bruggen de krachtswerking na voltooiing van de brug zichtbaar blijven.

Er bestaan verschillende manieren om het brugtype te bepalen. Het eerste structureel brugontwerp kan vaak met behulp van enkele eenvoudige rekenregels, technische theorieën en ervaring van de ingenieur worden bepaald. Nadien volgt de structurele analyse die de sterkte, stijfheid, stabiliteit en frequentievereisten van de brugconstructie controleert. Het ontwerp wordt indien nodig aangepast en er volgt een nieuwe analyse. De controle wordt opnieuw uitgevoerd. Deze laatste twee stappen worden herhaald tot er aan de controlevoorwaarden wordt voldaan. Ideaal wordt er voor gezorgd dat het eerste ontwerp het uiteindelijke resultaat reeds zo goed mogelijk benaderd. Hierdoor zijn er minder iteraties nodig. Door de snelle ontwikkeling van geavanceerde computertechnologieën kunnen er steeds meer veilige en economische bruggen worden ontworpen. Zo worden de grenzen van het optimale steeds verder gelegd.

Topologie-optimalisatie kan hierbij een rol spelen. Rekeninghoudend met bepaalde randvoorwaarden zou er aan de hand van topologie-optimalisatie een allereerste structurele vorm verkregen kunnen worden. Er worden in deze masterproef enkele casestudies onderzocht met als voornaamste doel het aantonen van de toepasbaarheid en de mogelijkheden van topologie-optimalisatie. Een eerste casestudie bespreekt een klassiek ontwerpdomein: een overspanning tussen twee vaste steunpunten waarbij de hoogte van het ontwerpdomein geen invloed mag hebben op de optimalisatie. Topologie-optimalisatie bepaalt vervolgens wat de ideale vorm van de structuur zou moeten zijn. Het boogbrug-principe zal in de meeste gevallen het meest efficiënt zijn.

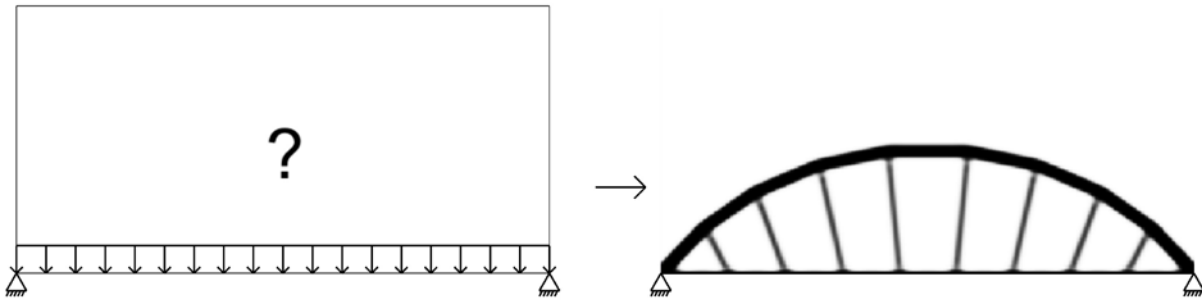
In een tweede casestudie wordt de hangbrug bekeken. De structurele optimale vorm van pylonen wordt onderzocht en vergeleken met enkele bestaande ontwerpen.

De laatste casestudie bespreekt een bestaande tensegrity brug en behandelt de rol die topologie-optimalisatie speelt in bepaalde structurele verbindingselementen aan de hand van een experiment uitgevoerd door Arup.

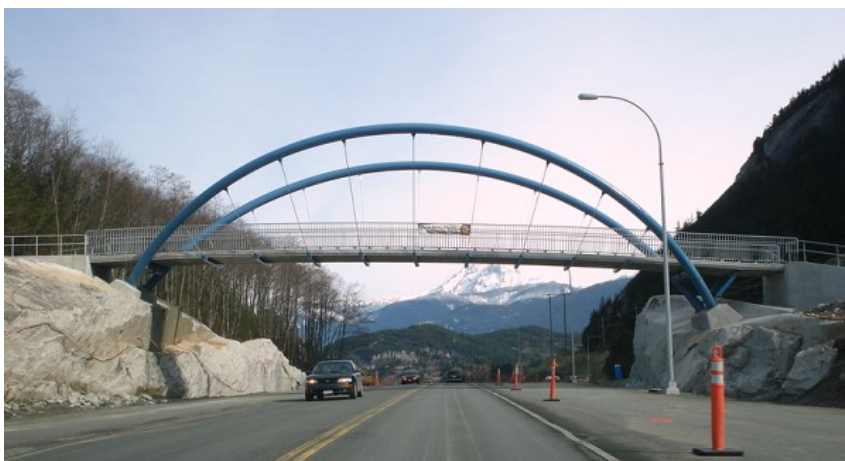
Casestudies

De boogbrug

Zoals reeds vermeld, vertrekt een eerste casestudie vanuit een rechthoekig ontwerpdomein waarvan de onderste hoekpunten vastgehouden worden. De onderzijde wordt belast met een eenparig verdeelde eenheidsbelasting en het doel van de topologie-optimalisatie streeft naar een zo stijf mogelijke structuur waarbij slechts 10% van het oorspronkelijk materiaal kan worden gebruikt. Figuur 4.13 illustreert dit ontwerpdomein met bijhorend resultaat: een boogbrug met laaggelegen rijvloer waarvan de spatkrachten worden opgenomen door de steunpunten. Bemerk de opvallende overeenkomsten met de bestaande Squamish voetgangersbrug, te zien op figuur 4.14.

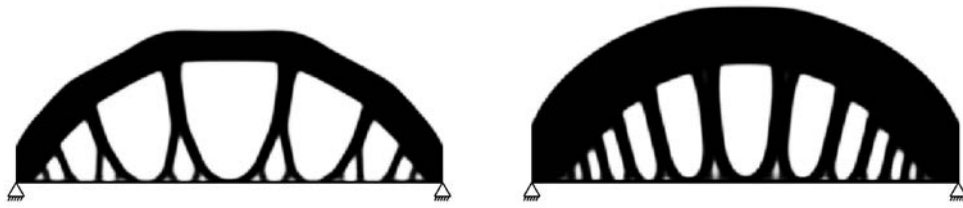


Figuur 4.13: De ontwerpruimte van de casestudie (links) en de optimale materiaalindeling (rechts).



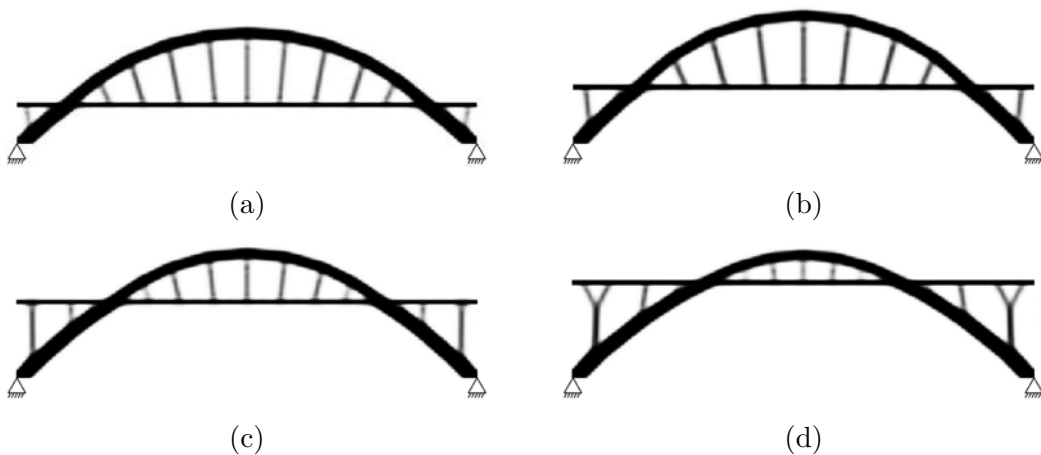
Figuur 4.14: Squamish Footbridge [41]

Deze allereerste en eenvoudige optimalisatie levert iets schijnbaar bruikbaar op. Een volgende test gaat van hetzelfde ontwerpdomein uit, maar verhoogt de resterende volumefractie van 10% naar 30% en 50%. De resultaten hiervan zijn te vinden op figuur 4.15. De uitvoering van dergelijke zwaardere structuren ligt iets minder voor de hand en doet hierdoor minder denken aan gekende types van bruggen. Bruggen hebben in het algemeen een zeer laag materiaalvolume in verhouding tot hun omhullende ruimte (boundig box). Dit is de hoofdreden waarom de volumefractie laag wordt gehouden in de volgende experimenten.



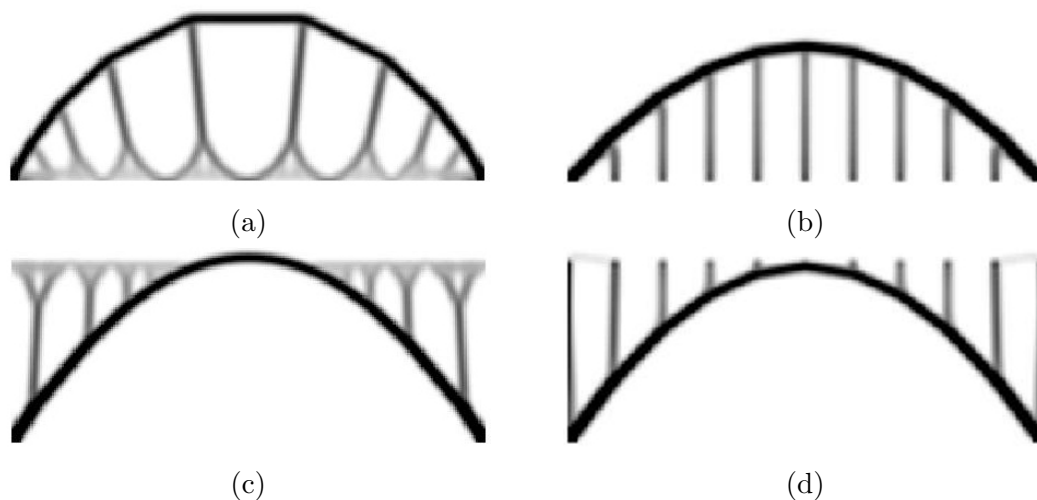
Figuur 4.15: Optimale invulling van het ontwerpdomein met volumefracties 30% en 50%.

Vervolgens werd de hoogte van de ontwerpbelasting verhoogd met als doel de invloed op de optimalisatie te bestuderen. Onderstaande afbeeldingen illustreren de overgang van een boogbrug met laaggelegen rijvloer naar een boogbrug met hooggelegen rijvloer. De resultaten zijn erg herkenbaar. Opmerkelijk is dat de vorm van de boog verandert van een eerder cirkelvormige naar een parabolische boog.



Figuur 4.16: Complantie gebaseerde topologie-optimalisaties waarbij de ontwerpbelasting op verschillende hoogtes wordt aangebracht.

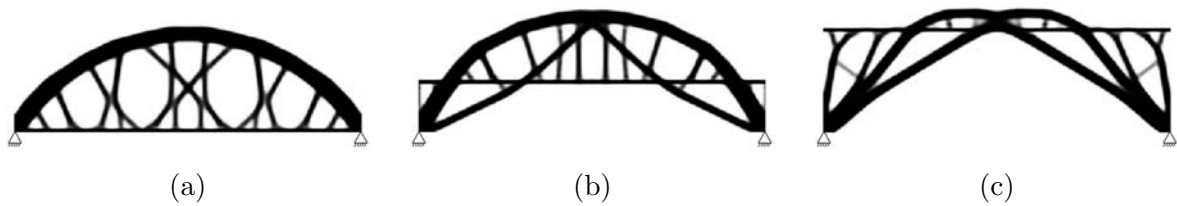
Het is verder ook opvallend dat de hangers in schuine stand staan en de drukpijlers rechtop. Er moet worden bijvermeld dat de software waarmee deze optimalisatie werd uitgevoerd, de elementen waar de belasting op aangrijpt bevriest. Deze elementen kunnen dus niet worden verwijderd waardoor de rijvloer als het ware deel uitmaakt van de 10% resterende elementen. Met behulp van de matlab code werd een gelijkaardige optimalisatie uitgevoerd, met als verschil dat hier op geen enkele plaats elementen werden bevroren. Het resultaat is te zien op figuren 4.17a en c. De rijvloer is hier duidelijk niet echt meer aanwezig en de optimalisatie heeft het moeilijk om de overgang van hanger naar rijvloer goed te optimaliseren naar een 0-1 (wit-zwart) oplossing. De verschillen in scheefstand tussen de hangers en drukpijlers zijn wel nog steeds aanwezig. Er kan een verschil in pijl worden waargenomen door het toepassen van de verschillende optimalisatie-algoritmen: een pijl van 0,23 werd verkregen in de eerste situatie (figuur 4.13) en een pijl van 0,34 en 0,29 in de tweede. Een echte boogbrug heeft een pijl die meestal ligt tussen de 0,18 à 0,20. De reden waarom dit verschilt wordt niet verder onderzocht.



Figuur 4.17: Optimale resultaten voor een ontwerpdomein met enerzijds verdeelde belastingen en anderzijds negen gelijkmatig verdeelde puntlasten.

Figuren 4.17b en 4.17d tonen een aangepaste versie waarbij de eenparig verdeelde belasting werd onderverdeeld in negen gelijke puntenlasten. Op deze wijze werd geprobeerd de werking van een reële boogbrug, bestaande uit verschillende gekoppelde liggers, na te bootsen. Het grote verschil met de vorige optimalisatie is dat ook de hangers hier nu ook als rechte lijnen worden geoptimaliseerd.

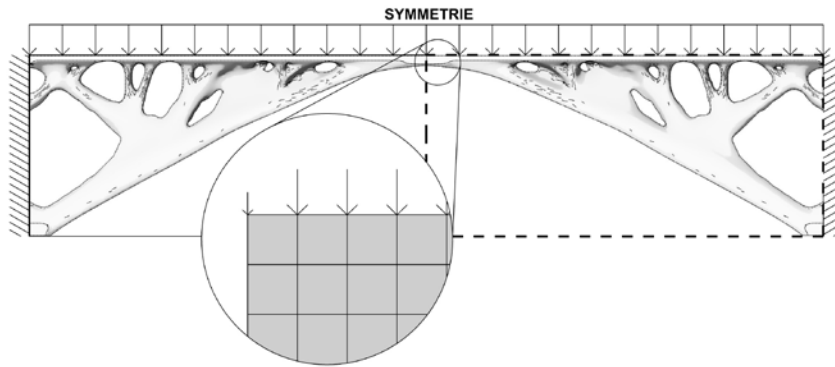
Een laatste experiment dat werd uitgevoerd op dit ontwerpdomein had als functie de invloed van meerdere lastengroepen te onderzoeken. Een drietal situaties werden opgesteld waarbij telkens drie lastengroepen werden aangebracht. Lastengroep 1 plaatst de gelijkmatig verdeelde belasting over de volledige lengte. Lastengroep 2 en 3 werden respectievelijk enkel op de linker- en rechterhelft aangebracht. Figuur 4.18 toont de resultaten van de optimalisatie. Enkel de meest linkse vertoont nog gelijkenissen met gekende structuren (boogbrug met kruisende hangers). De andere twee optimalisaties zijn meer vernieuwend van aard.



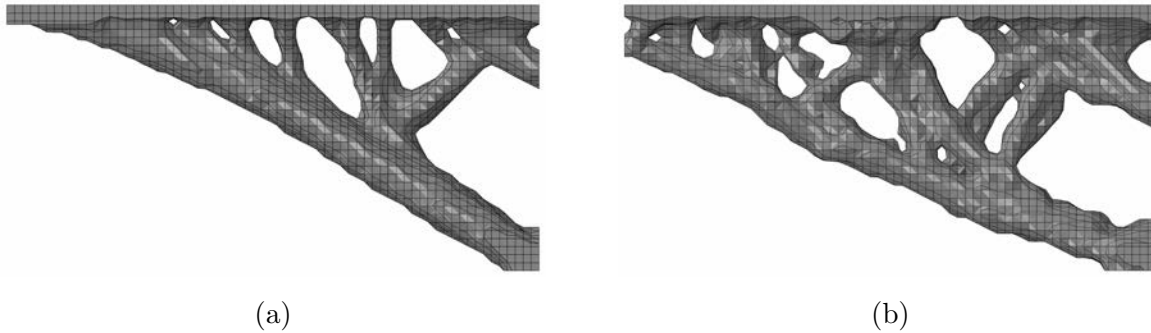
Figuur 4.18: Optimale resultaten voor een ontwerpdomein met meerdere lastengroepen.

Om af te sluiten werden ook enkele experimenten uitgevoerd op een 3D-ontwerpruimte. De ontwerpruimte die werd onderzocht is de boogbrug met hooggelegen rijvloer tussen een canyon, waarbij de zijkanten over de volledige hoogte worden gesteund. Verschillende parameters werden getest waaronder het verschil tussen de compliantie gebaseerde optimalisatie en de optimalisatie met als doel het minimaliseren van de spanningen (figuur 4.20). Ook de invloed van geometrisch opgelegde beperkingen (figuur 4.21) werd geanalyseerd. In het eerste geval werd slechts $1/4$ van de ontwerpruimte geoptimaliseerd om de rekentijd te beperken. Hierdoor kon niet gerekend worden met behulp van meerdere lastengroepen. Zoals op figuur 4.19 is aangeduid, is het ook van belang de belastingen op de correcte wijze aan te brengen. Zo moesten alle belastingen gelegen op een symmetrievlak, gedeeld worden door twee. Deze belastingen worden omwille van de symmetrie namelijk verdubbeld. In het tweede geval werden wel verschillende belastingsgevallen beschouwd. De resultaten hiervan zijn te zien op figuur 4.24.

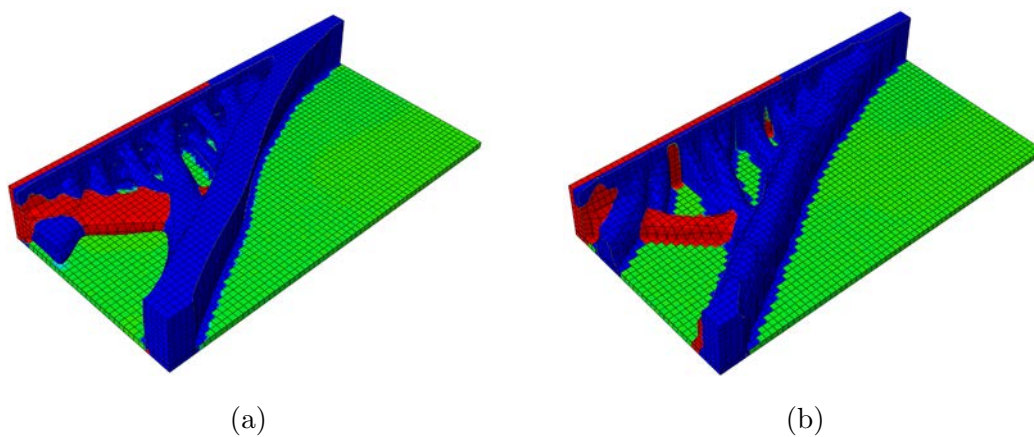
In deze experimenten werden geen gedetailleerde randvoorwaarden of specifieke belastingsgevallen gebruikt. De casestudies waren slechts bedoeld om de mogelijkheden van topologie-optimalisatie te illustreren en de zoektocht naar meer efficiënte en gedetailleerde algoritmes te stimuleren. De mate van detaillering heeft natuurlijk wel enige invloed hierop waardoor een verdere studie relevant kan zijn. Meer info hierover is terug te vinden in het besluit.



Figuur 4.19: Principe van halvering van de ontwerpbelasting op de plaatsen waar symmetrie in acht wordt genomen.



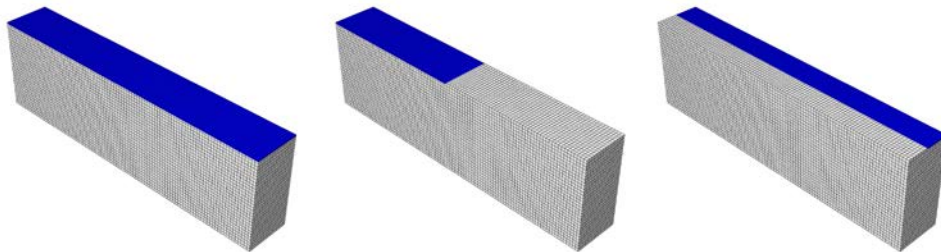
Figuur 4.20: Topologie-optimalisatie met als doelstelling (a) maximale stijfheid en (b) minimale spanningen.



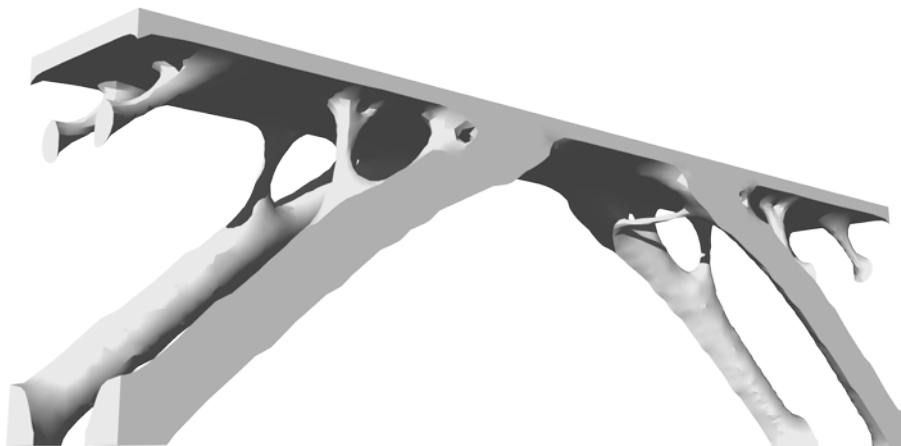
Figuur 4.21: Topologie-optimalisatie (a) zonder geometrische beperkingen en (b) met geometrische beperkingen. (Er kan enkel materiaal weggenomen worden naar boven toe.)



Figuur 4.22: Topologie-geoptimaliseerde boogbrug met hooggelegen rijvloer (incl. geometrische beperking). 3D-model rechtstreeks uit Abaqus.



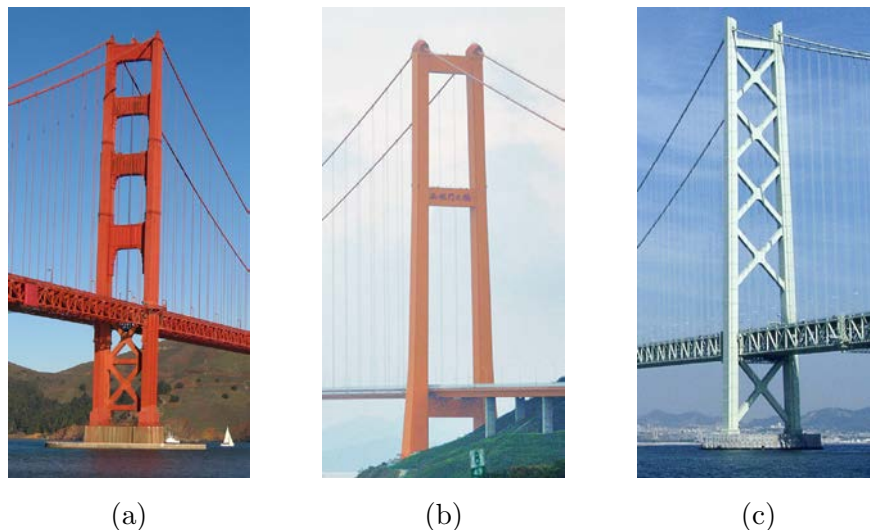
Figuur 4.23: Aanduiding van de verschillende belastingsgevallen wanneer het volledige ontwerpdomein wordt beschouwd.



Figuur 4.24: Topologie-geoptimaliseerde boogbrug met hooggelegen rijvloer zonder geometrische beperkingen. 3D-model uit Abaqus met volumefractie 10%.

De hangbrug

Een tweede casestudie behandelt het ontwerp van pylonen van hangbruggen. Pylonen hebben als functie een basis te vormen waar de hoofddraagkabels van de brug op rusten. Ze worden tevens meestal vervaardigd uit hogesterktebeton of hogesterktetaal omdat het gebruik van deze materialen gerechtvaardigd wordt omdat de optredende krachten hoofdzakelijk naar beneden gericht zijn [42]. Het woord pyloon komt van het Griekse woord puloon wat poortgebouw of vestibule betekent. De decoratieve functie die pylonen hadden, is de dag van vandaag voor een groot deel verdwenen. Hedendaagse pyloonstructuren bestaan in de meeste gevallen uit twee slanke kolommen aan weerszijden van het wegdek. Bovenaan, maar soms ook op andere hoogtes, wordt er een verbinding gemaakt om onder andere knik in de kolommen te vermijden. Figuur 4.25 toont hiervan enkele voorbeelden.



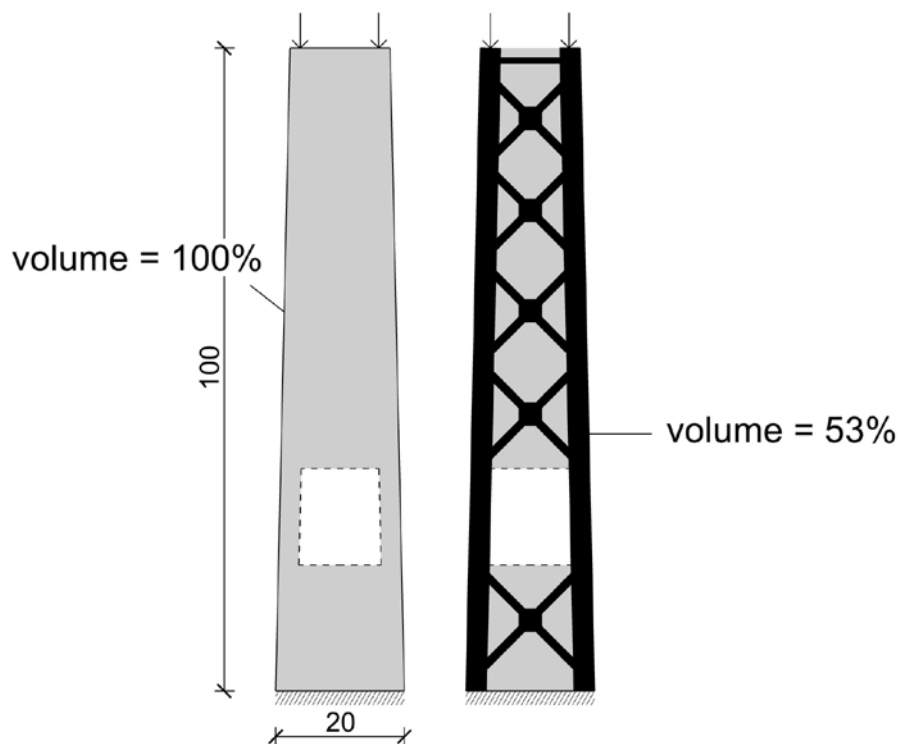
Figuur 4.25: Voorbeelden van pylonen bij hangbruggen. (a) Golden Gate Bridge [43] (b) Xihoumen Bridge [44] (c) Akashi Kaikyo Bridge [45].

Dit luik onderzoekt wat topologie-optimalisatie als invloed kan hebben op het ontwerp van pyloonstructuren. Zoals reeds eerder vermeld, zal het gebruik van de compliantmethode hier niet aan te raden zijn omdat er geen grote discontinuïteiten aanwezig zijn. Deze methode zou een onbruikbaar ontwerp opleveren waarbij enkel twee slanke kolommen zouden ontstaan zonder rekening te houden met knik. In een ideale situatie zou men hier een optimalisatie-algoritme gebruiken die de knikbelasting maximaliseert of de kniklast begrenst.

Maar omdat Abaqus als optimalisatiesoftware werd gebruikt voor deze casestudie kon dit jammer genoeg niet. Als alternatief werd gekozen om de eigenfrequenties van de structuur te maximaliseren. Meer bepaald werden de eerst vijf eigenfrequenties in rekening gebracht.

Figuur 4.26 illustreert het ontwerpdomein van de besproken casestudie: een rechthoekig domein met verhoudingen van ongeveer 100 x 20. Er wordt ook een opening voorzien voor passerend verkeer. Dit ontwerpdomein is gebaseerd op een bestaande pyloon. Door het volume van deze pyloon te berekenen kon de volumefractie voor de optimalisatie worden bepaald.

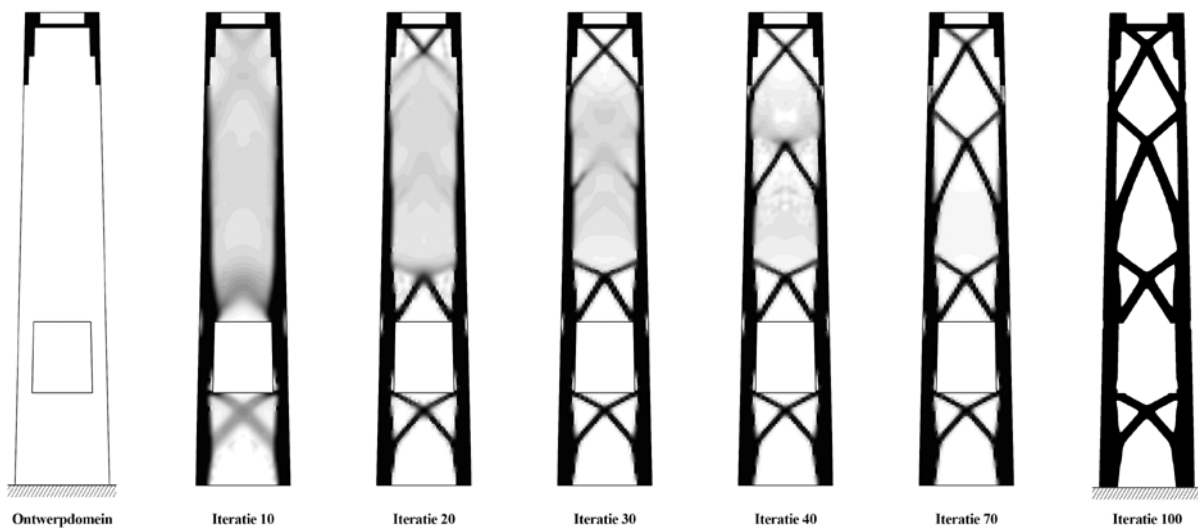
Doordat er in een frequentie-optimalisatie geen belastingen op het ontwerp kunnen aangebracht worden, werd de aanwezigheid van deze krachten gesimuleerd door middel van niet-structurele massa's toe te voegen aan enkele elementen aan de top van de pyloon. Ook werden de elementen waarop de hoofddraagkabels rusten, bevroren zodat Abaqus verplicht is de pyloon tot aan de top te optimaliseren.



Figuur 4.26: Ontwerpdomein van de casestudie (links) en de vorm van de pyloon van de Akashi Kaikyo brug (rechts).

De resultaten van de optimalisatie zijn te zien op figuur 4.27 en vertonen zeer sterke gelijkenissen met de bestaande pyloon.

Links onderaan op figuur 4.27 wordt het ontwerpdomein met de bevrozen elementen nogmaals weergegeven. De andere iteraties illustreren het optimalisatieproces: iteratie 10, 20, 30, 40, 70 en 100. De boven- en onderzones van de pyloon worden zoals figuur 4.27 illustreert eerder geoptimaliseerd dan het middendeel. Het proces weet vooraf niet hoeveel windverbanden er zullen overblijven. Dit geeft soms problemen binnen het proces omdat windverbanden terug kunnen verdwijnen na enkele iteraties. Hierdoor ontstaan lege zones die weer moeten dichtgroeien.



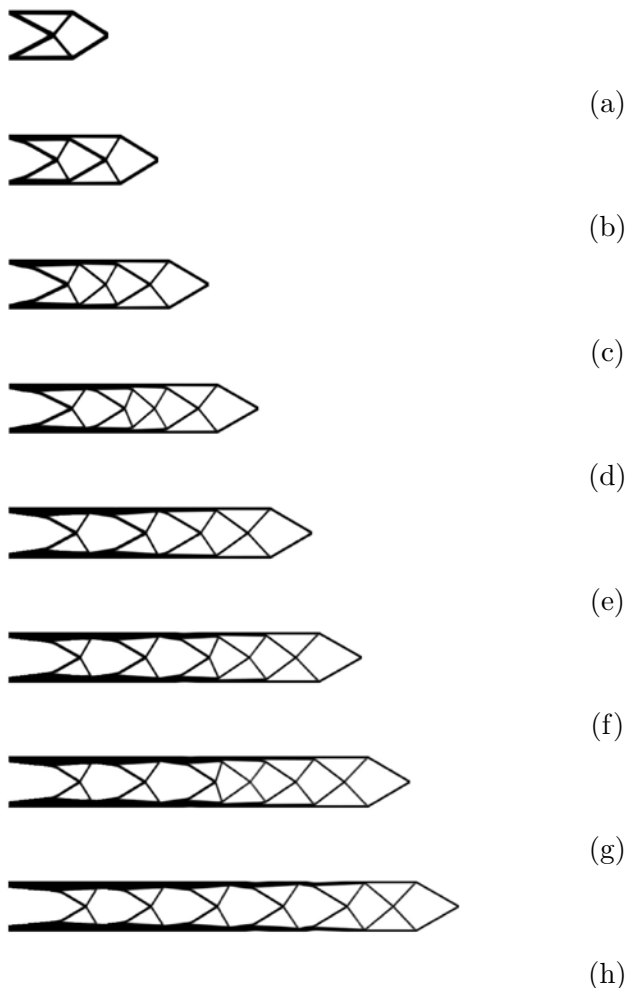
Figuur 4.27: Optimalisatie van een pyloon. Van initiële fase tot het eindresultaat.

Algemeen kan er worden geconcludeerd dat, ondanks dat het ideale optimalisatie-algoritme (knik-optimalisatie) niet kon worden gebruikt, er toch bruikbare en vooral herkenbare resultaten worden gecreëerd. Toekomstig onderzoek zou het verschil in prestatie tussen de twee pylonen kunnen testen. Met dezelfde methoden zouden andere gelijkaardige structuren kunnen worden ontworpen zoals een pyloon waar slechts één hoofddraagkabel is of waarbij omwille van architecturale redenen de pyloon scheef dient te staan. In plaats van pylonen zouden ook de pijlers van bepaalde brugtypes kunnen worden onderzocht.

We zien bovendien ook dat de resultaten gelijkenissen vertonen met de resultaten van de optimalisatie van een uitkragende balk, weliswaar 90° gedraaid (zie Hoofdstuk 2). Omdat dit ontwerpdomein kan worden uitgevoerd met behulp van Matlab, worden resultaten veel sneller verkregen.

Voor de volledigheid werd daarom een experiment uitgevoerd dat de invloed van de hoogte van de pyloon op de positiebepaling van de kruisende verbanden beschouwd. Hierdoor kan er een beter inzicht verkregen worden in hoe het algoritme omgaat met deze positiebepaling. Wanneer ontstaat er een extra verband en wanneer niet? Figuur 4.28 illustreert dit.

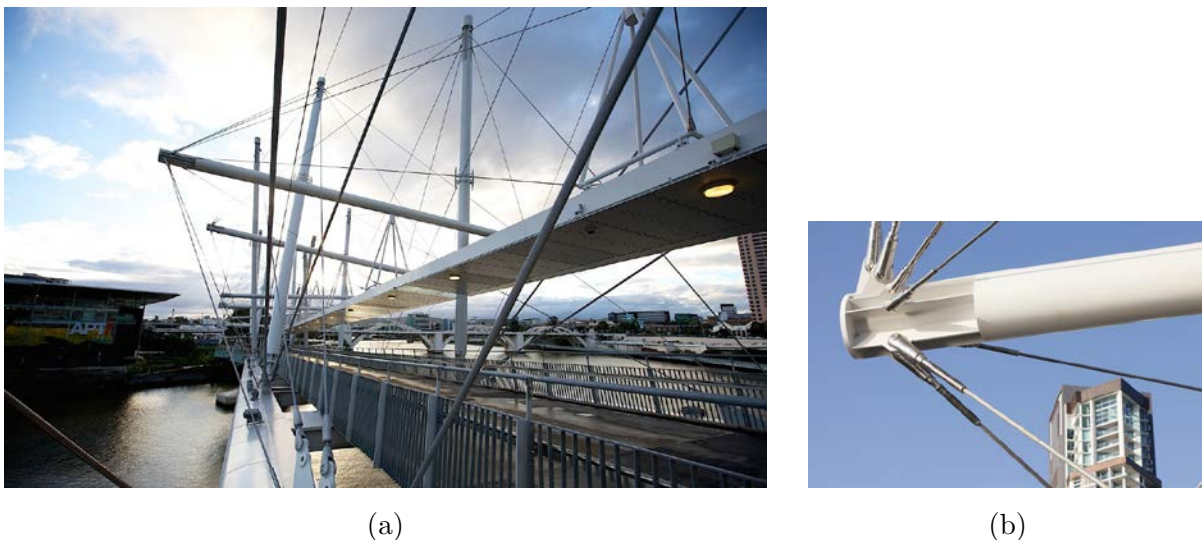
Er werd gerekend met een ontwerpdomein van 100 elementen in de hoogte en 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 en 900 elementen in de lengte. De kracht grijpt aan op het midden van de rechterzijde. De penalisiatiewaarde bedraagt 3, de volumefractie 0,3 en de filterwaarde 3.



Figuur 4.28: Invloed van de lengte op de optimalisatie. (a) 200x100 (b) 300x100 (c) 400x100 (d) 500x100 (e) 600x100 (f) 700x100 (g) 800x100 (h) 900x100.

De tensegrity brug

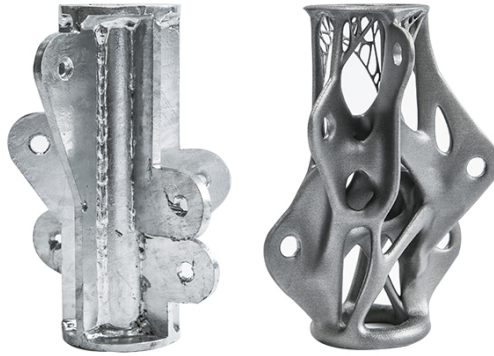
Het gebruik van topologie-optimalisatie als ontwerptool in de bruggenbouw beperkt zich niet enkel tot het vinden van de meest geschikte brugvorm. In een verdere ontwerpfase zou topologie-optimalisatie ook zijn nut kunnen bewijzen. Om dit aan te tonen werd gebruik gemaakt van een geprint stalen verbindingselement dat werd geproduceerd en gepubliceerd door Arup, het wereldwijd opererende ingenieurbureau. Zij hebben dit stalen element, dat zorgt voor de verbinding in een lichtgewicht constructie, herontworpen met behulp van topologie-optimalisatie. De complexe geometrie van dit type verbindingen vormt het perfecte voorbeeld van waarom topologie-optimalisatie zo interessant kan zijn in de bouwsector. Een voorbeeld waar dergelijke geoptimaliseerde verbindingselementen zouden kunnen worden gebruikt is de tensegrity brug. Figuur 4.29 toont de Kurilpa brug gelegen in Australië.



Figuur 4.29: (a) afbeelding van de Kurilpa brug [54] en (b) detail van een knoopverbinding [55].

De belangrijkste reden waarom topologie-optimalisatie een perfecte oplossing zou kunnen zijn, wordt heel mooi verwoord door senior designer en projectleider bij Arup, Salomé Galjaard: “Aan de hand van ‘additive manufacturing’ (3D-printing) kunnen we veel verschillende unieke en complexe elementen op een efficiëntere manier produceren. Deze nieuwe productietechniek maakt ook een verfijnd ontwerp mogelijk, zonder dat dit in een later stadium gesimplificeerd hoeft te worden om de kosten terug te dringen”.

Het onderzoek toonde bovendien ook aan dat deze vervaardigingsmethode kosten kan besparen, minder afval met zich meebrengt en de CO₂-uitstoot van de bouwsector drastisch kan verminderen. Figuur 4.30 toont de originele en de geoptimaliseerde knoopverbinding. Tot slot nog een quote uit het artikel: “Een traditioneel geproduceerde verbinding is momenteel misschien nog goedkoper te leveren, maar naar verwachting zal dat op korte termijn veranderen [46].”



Figuur 4.30: Originele en ge3Dprinte stalen knoopverbinding van een tensegrity brug geproduceerd door Arup [46].

Conclusie

In dit onderdeel werd het gebruik van topologie-optimalisatie als ontwerptool voor brugstructuren onderzocht en voorgesteld. Het onderzoek bleef tot spijt beperkt tot het bestuderen van eenvoudige ontwerpproblemen. De resultaten van de verschillende optimalisaties waren in vele gevallen wel erg herkenbaar en de algoritmen presteerden beter dan verwacht. De resultaten van de topologie-optimalisaties waren wel sterk afhankelijk van het gekozen algoritme en de vele verschillende input parameters. Aandacht besteden hieraan is belangrijk. Toekomstig onderzoek zou enkele specifieke ontwerpen in detail kunnen analyseren. Dit wil zeggen: een ontwerpprobleem waarbij alle belastingscombinaties, de materiaaleigenschappen en andere ontwerpgebonden voorwaarden gekend zijn. Zo'n optimalisatie kan een meerwaarde betekenen en realistische structuren produceren. Topologie-optimalisatie kan verder als doel hebben om ontwerpers meer bewust te laten worden van de invloed van de vorm van de structuur en aan te zetten tot het uitwerken van optimale vormen die daarenboven inspirerend kunnen zijn bij het ontwerp.

4.3 Hoogbouw en wolkenkrabbers

Een volgende bouwkundige toepassing waarbij topologie-optimalisatie zou kunnen worden gebruikt is het ontwerp van de dragende uitwendige structuur van torenflats en wolkenkrabbers. Figuur 4.31 toont een panoramisch zicht op Londen waarbij de 30 St Mary Axe, ontworpen door Norman Foster en Arup, kan worden waargenomen. De opmerkelijke kegelvorm zou de windturbulentie rond het gebouw verminderen [47].

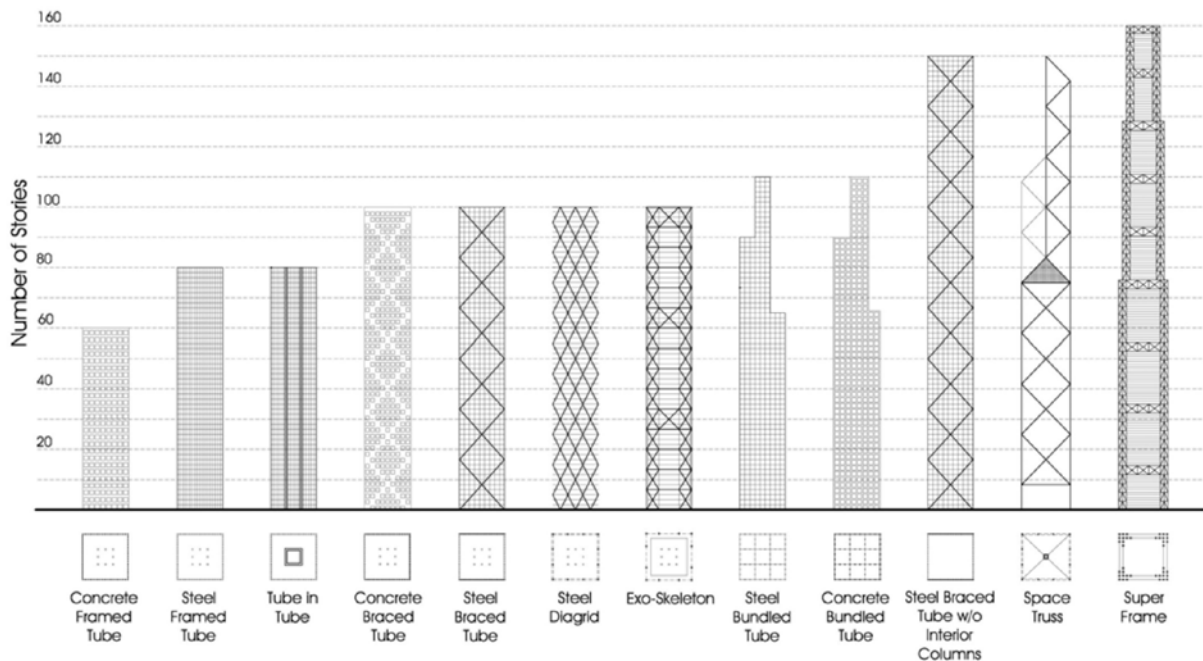


Figuur 4.31: Panoramisch zicht op Londen [48].

Inleiding

Torengebouwen zijn losstaande gebouwen of andere structuren die zeer hoog zijn in verhouding tot hun breedte. Tegenwoordig worden steeds meer hoogbouwprojecten gerealiseerd. Er valt in de toekomst niet te ontkomen aan hoogbouw omwille van de steeds schaarser wordende vrije grondoppervlakte. Voorlopig worden deze complexe structuren het meest gebouwd in gebieden met een hoge grondprijs en bevolkingsdichtheid. De bouw van dergelijke constructies heeft een grote invloed op onder andere de ecologische voetafdruk en stedelijke ontwikkelingen. Op deze maatschappelijke vragen wordt niet verder op in gegaan. Deze masterproef focust zich primair op de structuur van extreme hoogbouw, de zogenaamde wolkenkrabbers. Het is het type gebouw dat opvalt en mag opvallen. Ze vormen de iconen van de samenleving: toekomstgerichte ontwerpen die onverwachts uit de hoek kunnen komen.

Het werk van Ali en Moon bespreekt de verschillende soorten inwendige en uitwendige dragende structuren die voorkomen bij torenflats en wolkenkrabbers (figuur 4.32) [49]. Het bespreekt onder andere wanneer welke structuur zou moeten worden gebruikt en wanneer een bepaalde soort niet economisch meer is. Deze masterproef gaat hier verder niet dieper op in. Het bespreekt wel de mogelijkheden van het gebruik van topologie-optimalisatie als ontwerptools van deze ‘superstructuren’.



Figuur 4.32: De verschillende soorten uitwendige hoogbouw-structuren volgens Ali en Moon [49].

Vooraleer er kan worden overgegaan naar de verschillende casestudies dient er vermeld te worden dat het gebruik van topologie-optimalisatie in de hoogbouwstructuren reeds werd onderzocht door Stromberg en collega's in [50] en [51] en door Beghini in [52]. In deze publicaties werd primair het ontwerp van structureel geschoorde raamwerkpatronen besproken. Een overzicht van enkele van deze efficiënte patronen is te zien op figuur 4.33. Het eerste van deze patronen bleek de meest praktische en werd dan ook uitgebreid bestudeerd. Ook in verschillende casestudies van deze masterproef komt dit patroon regelmatig terug. Een voorbeeld is te vinden in het vorige luik waar de windverbanden van het pyloon-ontwerp gelijkaardig zijn. Omwille van deze bestaande studie probeert deze masterproef op een alternatieve werkwijze de zoektocht naar de optimale structuur van wolkenkrabbers toe te passen.



Figuur 4.33: Optimale geschoorde raamwerkenpatronen volgens [51].



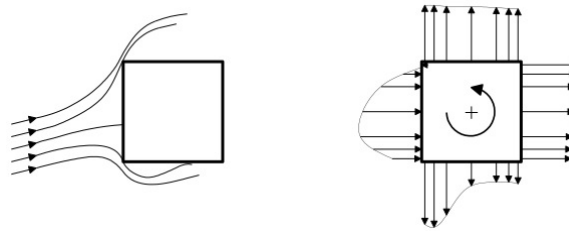
Figuur 4.34: Het gebruik van optimale geschoorde patronen in hoogbouwstructuren [51].

Casestudie

De casestudie in dit luik bespreekt de structurele optimalisatie van de uitwendige schil van een iconische torenvorm. Deze torenvorm is een eigen creatie maar kan in principe om het even welke vorm aannemen. Topologie-optimalisatie zou hier een meerwaarde kunnen zijn doordat er bij dergelijke vloeiende vormen geen vastbestaande patronen of standaard modules kunnen worden gebruikt.

Het ontwerp van superstructuren is niet eenvoudig. Het is bijgevolg niet evident voor deze casestudie om alle randvoorwaarden en belastingsgevallen te vertalen in een ontwerpprobleem dat met behulp van topologie-optimalisatie kan worden onderzocht. Er dienen met verschillende doelstellingen rekening gehouden te worden.

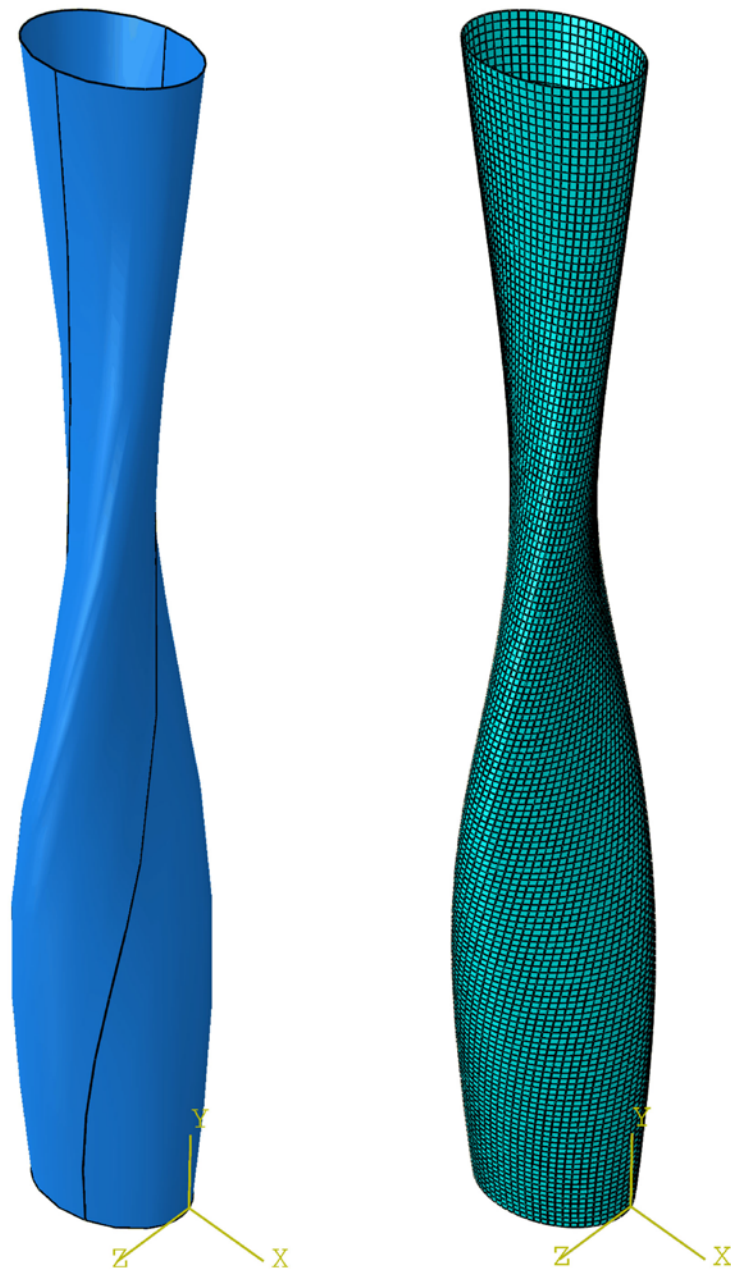
De algemene compliantie van de structuur vormt één van die voorwaarden, maar ook de stabiliteit, natuurlijke frequenties, ‘interstory drifts’ en extreme windbelastingen kunnen een grote invloed hebben [53]. Ook torsie is een verschijnsel dat zich voordoet bij hoogbouw. De oorzaken hiervan zijn de vorm van de toren, de interferentie-effecten en de dynamische respons. Ingenieurs hebben volgens Boggs en collega’s geringe invloed op het eerste, geen enkele op het tweede, maar veel op het derde. ”Torsie kan niet worden uitgesloten, maar kan mogelijk worden geminimaliseerd. Windtunnel studies vormen tot op heden bijna de enige manier om torsie te identificeren.” [53] Figuur 4.35 illustreert dit fenomeen.



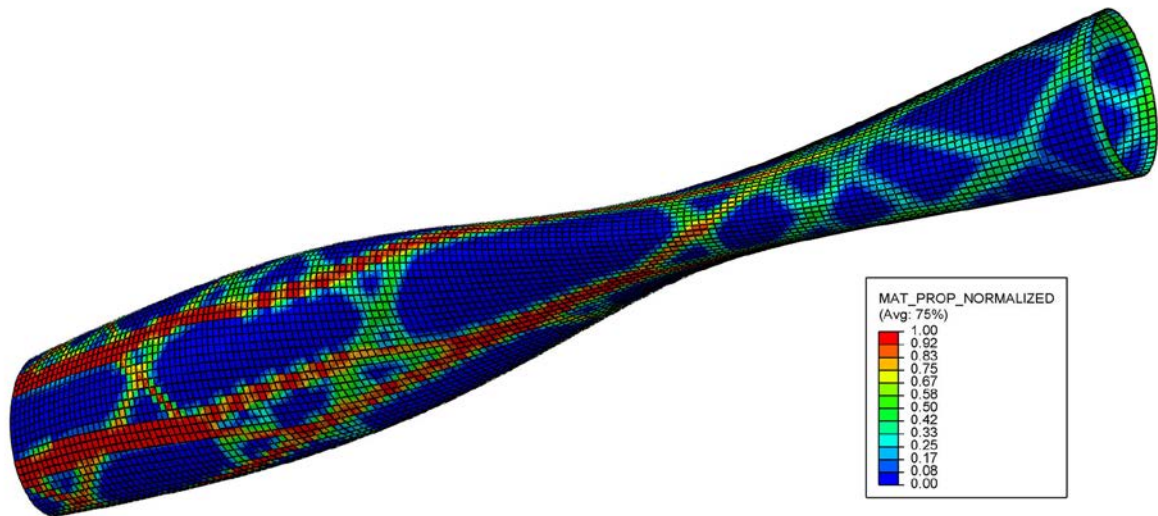
Figuur 4.35: Het ontstaan van torsie in hoge gebouwen [53].

De wolkenkrabber

Voor de optimalisatie van dit ontwerp werd de krachtswerking sterk vereenvoudigd. Enkel horizontale krachten werden op de schil van de toren aangebracht op regelmatige hoogtes. Er werd vervolgens gebruik gemaakt van het compliantie-algoritme. Er was bovendien een noodzaak aan meerdere lastengroepen doordat symmetrie niet kon worden toegepast. Figuur 4.36 toont het model van de casestudie en figuur 4.37 het resultaat.

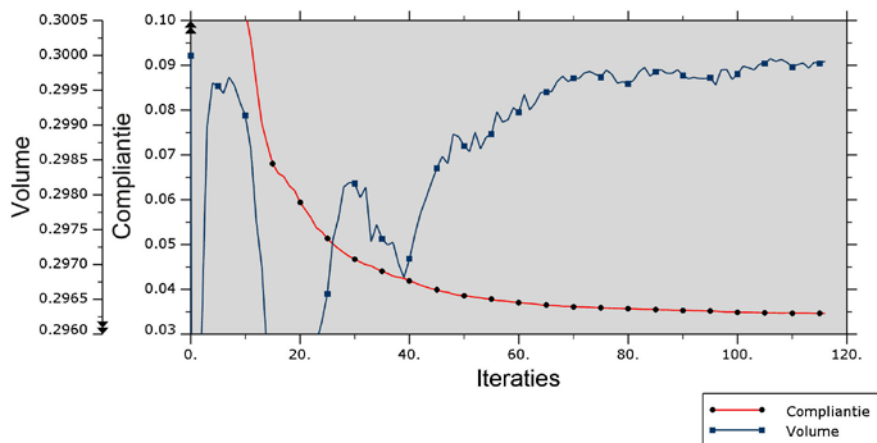


Figuur 4.36: Het ontwerpdomein (links) en bijhorende mesh (rechts).



Figuur 4.37: Het optimale resultaat van een topologie-optimalisatie van een wolkenkrabber.

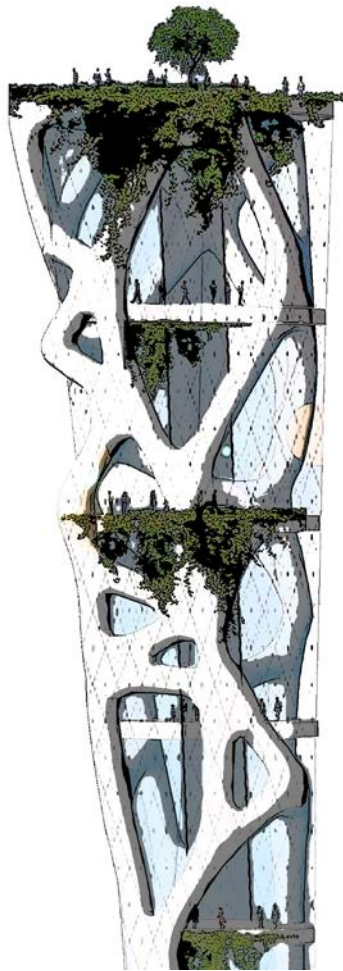
Het resultaat heeft geen perfecte 0-1 verdeling (hier: blauw-rood verdeling). Toch kan de vorm van de structuur al duidelijk waargenomen worden. Een betere materiaalindeling kon bekomen worden door de volumefractie iets te verhogen of gebruik te maken van een fijnere mesh. Dit was nu niet echt nodig omdat het resultaat duidelijk te interpreteren was. Figuur 4.38 toont het grafisch verloop van het optimalisatieproces.



Figuur 4.38: Het iteratief verloop van de doelstelling (compliance) en de voorwaarde (volume) van de casestudie.

Conclusie

Het grote voordeel van topologie-optimalisatie is misschien nog niet helemaal duidelijk. Maar de resultaten tonen wel aan dat realistische structuren kunnen gevonden worden die zeker en vast als inspiratie kunnen dienen in een initiële ontwerpfase. Hierdoor wordt er een stevige relatie gelegd tussen structuur en architectuur die het ontwerp enkel positief kan beïnvloeden. De resultaten van figuur 4.39 worden ter illustratie met behulp van de ‘exoskeleton tool’ (grasshopper-script ontworpen door Daniel Piker en David Stasiuk) omgezet naar een 3D-achtige constructie en opgewerkt in Photoshop. De auteur van deze masterproef ziet er alvast de mogelijkheden van in!



Figuur 4.39: Een opgewerkte versie van het bovenste deel van de wolkenkrabber.

4.4 Dunwandige schaalstructuren

Dit hoofdstuk bespreekt kort hoe door middel van topologie-optimalisatie de ideale positionering van dwarse verstijvers op stalen silo's zou kunnen worden bepaald.

Inleiding

Dunwandige schaalstructuren zijn terug te vinden in delen van vliegtuigen en boten, maar ook in de bouwkunde. Daken van grote gebouwen worden er soms uit vervaardigd en ook bij silo-constructies worden ze volop gebruikt. Schaalstructuren worden gekenmerkt door hun zeer kleine dikte in verhouding tot hun andere afmetingen. Door de beperkte stijfheid in het vlak worden ze vaak gebogen of glooiend uitgevoerd en soms worden ook dwarse verstijvers aangebracht.

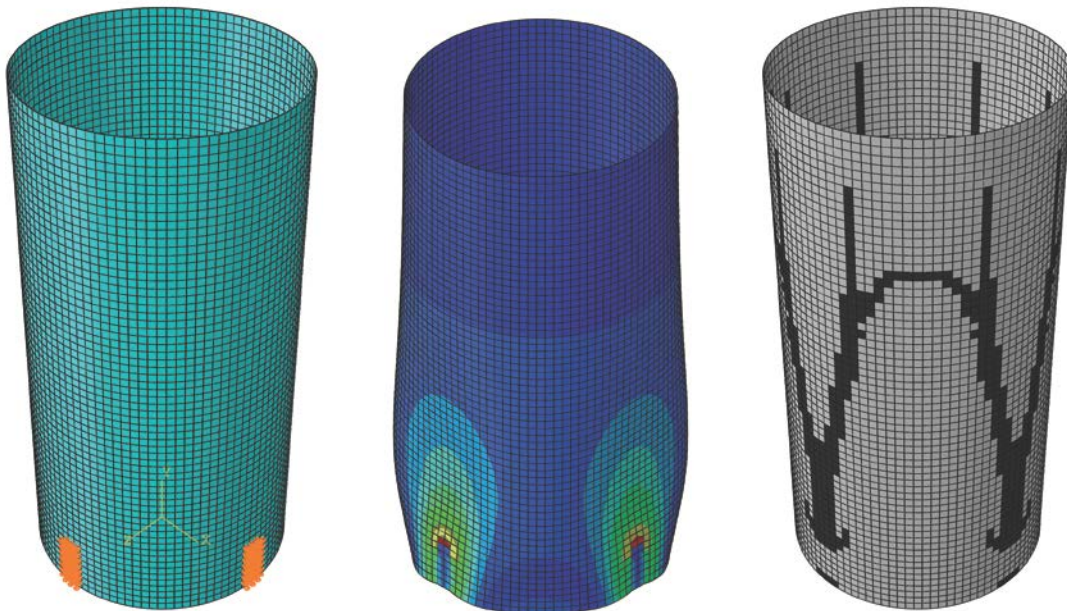


Figuur 4.40: Illustratie van enkele silo's [56].

Casestudie

De stalen silo

Als onderzoeksdomein werd een cilinder gebruikt met afmetingen straal 5 en hoogte 20. De silo wordt in deze casestudie ondersteund door vier starre steunpunten en als belasting wordt op alle knopen een neerwaartse kracht verondersteld. De resultaten van de optimalisatie zijn te zien op figuur 4.41. Rechts is te zien hoe de optimalisatie, aangeduid in het zwart, de dwarse verstijvers zou plaatsen.



Figuur 4.41: Het ontwerpdomein (links), Static General analyse (midden) en resultaten van de optimalisatie (rechts).

Conclusie

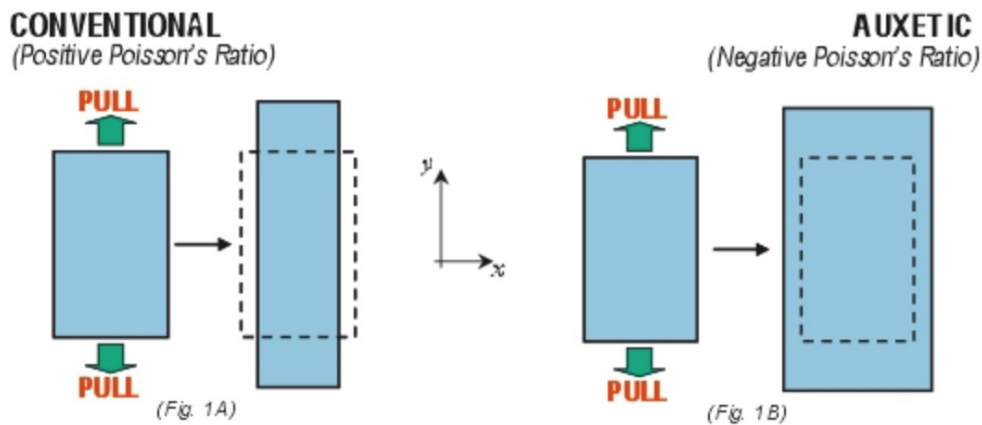
Hoewel de probleemstelling niet echt gedetailleerd werd bestudeerd, werden op een relatief korte tijd toch schijnbaar bruikbare resultaten bekomen. Een meer uitgebreid onderzoek zou dit verder kunnen bestuderen.

4.5 Auxetics

Een laatste bouwkundige toepassing die in deze masterproef wordt aangehaald, maar niet echt werd onderzocht, is het gebruik van topologie-optimalisatie als ontwerptool voor materialen met extreme elastische eigenschappen waaronder materialen met negatieve poisson ratio's. Het gebruik van dergelijke materialen zou de bouwsector vele voordelen kunnen bieden en bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden als voegmateriaal bij een brugdek. Er wordt hier enkel een algemene inleiding gegeven.

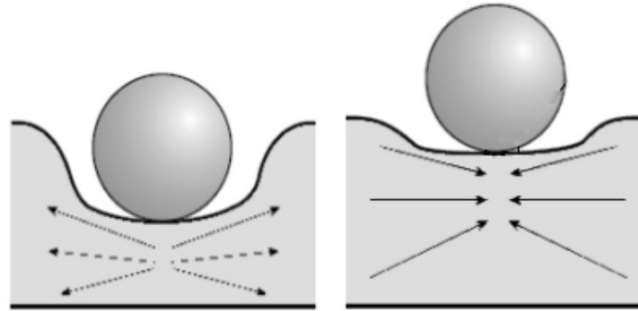
De poisson-factor (ook wel poisson-ratio, factor van Poisson of dwarscontractiecoëfficiënt genaamd) is een materiaalconstante genoemd naar Siméon Poisson die beschrijft hoe een materiaal reageert op een trek- of drukbelasting. Wanneer het materiaal in één bepaalde richting samengedrukt wordt, heeft het materiaal in de meeste gevallen de neiging in de andere twee richtingen te gaan uitzetten [57].

De meeste natuurlijke materialen hebben een waarde tussen 0 en 0,5. De waarde 0,5 betekent dat het materiaal vrijwel niet samendrukbaar is terwijl materialen met een factor 0 een afschuifmodulus hebben die neigt naar oneindig. Een speciale familie van materialen hebben een negatieve poisson-ratio. Deze materialen worden auxetic's genoemd. De negatieve ratio zorgt ervoor dat deze materialen bijvoorbeeld groeien wanneer er aan wordt getrokken. Figuur 4.42 illustreert dit fenomeen.



Figuur 4.42: Principe van materialen met positieve (links) en negatieve poisson-ratio (rechts) [57].

Wanneer deze materialen worden belast, verdicht het materiaal zich naar de belasting toe (zie figuur 4.43). Hierdoor bezit het materiaal een zeer hoge energie-absorptie en verhoogde weerstand tegen breuk. Voorbeelden van niet-bouwkundige toepassingen zijn kogelvrije vesten, verpakkingsmateriaal, knie- en elleboogbeschermers, schokabsorberend materiaal, sponzen en vaatdoeken [59].



Figuur 4.43: De reactie van een traditioneel materiaal (links) en een materiaal met negatieve poisson-ratio (rechts) op een drukbelasting [58].

Idealiter wordt de meest geschikte poisson-factor bepaald en zo een optimale microstructuur geconstrueerd. Met behulp van topologie-optimalisatie is dit mogelijk. Een voorbeeld hiervan wordt op figuur 4.44 weergegeven. Enkele jaren geleden heeft men zelfs aan de Universiteit van Michigan een hierop gebaseerd model met behulp van 3D-printing technologie geproduceerd en getest. Meer informatie omtrent het ontwerp en de productie van dergelijke microstructuren is terug te vinden in [60].



Figuur 4.44: Materiaal met een negatieve poisson-ratio [12].

Hoofdstuk 5

Structurele werking

In het vorige hoofdstuk werden enkele toepassingen waar topologie-optimalisatie als ontwerptool kan worden gebruikt besproken. De focus van het onderzoek lag hier op de bruikbaarheid. Wat nu juist de structureel verbeterde efficiëntie is, werd tot nu toe nog niet onderzocht. Dit hoofdstuk gaat hier iets dieper op in.

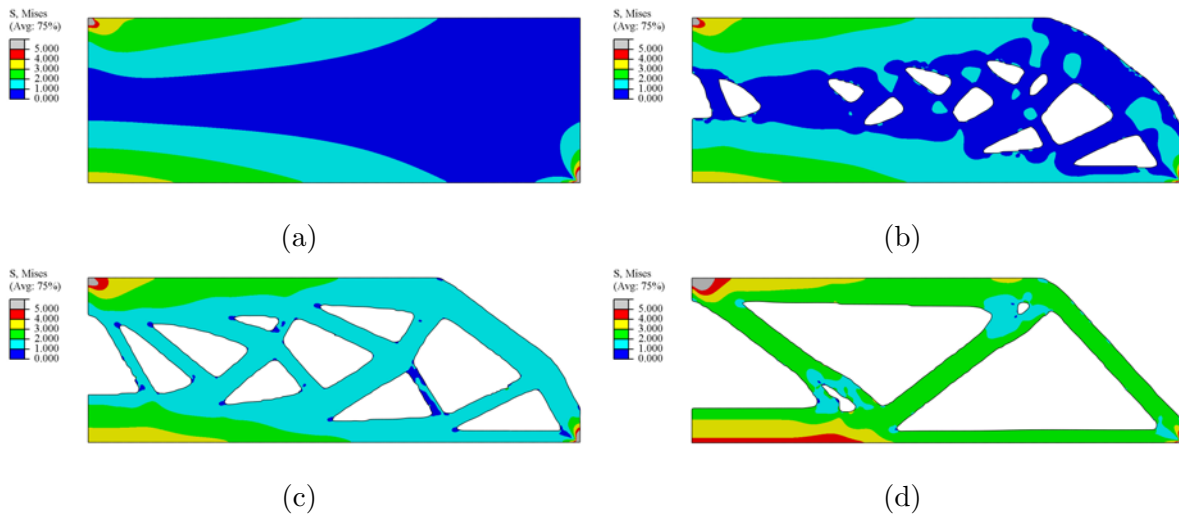
De resultaten van een topologie-optimalisatie van een bepaald probleem zijn steeds optimaal. Ze zijn echter enkel optimaal voor de gegeven doelstellingen en voorwaarden (zie hoofdstuk 2). Maar deze liggen in de realiteit niet altijd op voorhand 100% vast en de keuze van het geschikte algoritme is altijd een onzekerheid. Dit hoofdstuk probeert zodoende een link te leggen tussen de structurele werking van de topologie-geoptimaliseerde structuren en de doelstellingen en ontwerpvoorwaarden. Drie thema's komen aan bod:

- de invloed van de volumefractie op de prestatie van de structuur
- de invloed van de resolutie van het resultaat op de prestatie van de structuur
- de invloed van het gebruikte algoritme op de prestatie van de structuur

5.1 Invloed van de volumefractie

Een eerste experiment toont op eenvoudige wijze aan dat door middel van topologie-optimalisatie volume kan worden weggelaten uit het ontwerpdomein zonder dat dit een grote invloed heeft op de spanningen van de structuur. De MBB-balk werd als voorbeeld onderzocht en de resultaten zijn te zien op figuur 5.1.

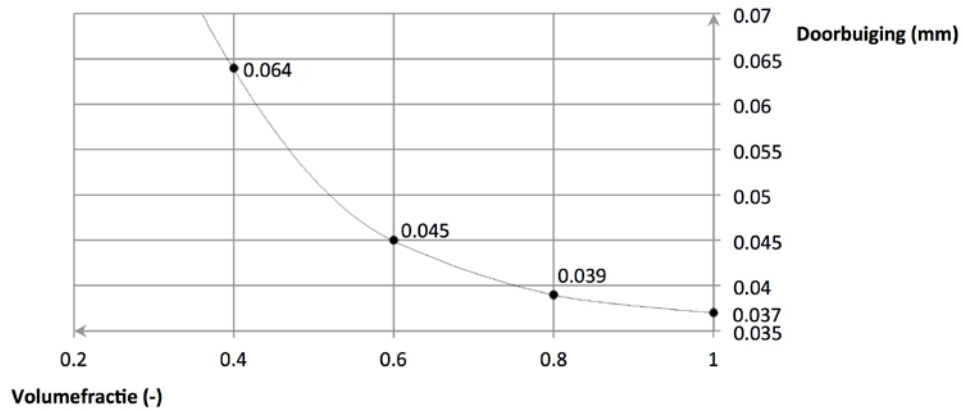
De topologie-optimalisatie werd uitgevoerd met behulp van de 88-line Matlab code en de structurele prestatie werd in Abaqus geanalyseerd. Als materiaal werd voor deze berekening en alle nog te komen onderzoeken gekozen voor aluminium (1mm dikte) met een Young's modulus van 70GPa en een Poisson-factor van 0,334. Er werden enkel lineair-elastische berekeningen uitgevoerd.



Figuur 5.1: De spanningen in halve MBB-aluminium plaatjes van 300mm x 100mm. (a) volumefractie: 1 - (b) volumefractie: 0,8 - (c) volumefractie: 0,6 - (d) volumefractie: 0,4. Aangrijpende kracht 20kN (linkerbovenhoek).

Op figuur 5.1(a) is te zien dat de maximale spanningen ongeveer 4MPa bedragen. Met de piekspanningen wordt geen rekening gehouden omdat deze niet significant zijn. In een groot deel van de structuur treden spanningen op die lager zijn dan 1MPa. Op figuur 5.1(c) is te zien dat na een volumereductie van 40% nog steeds dezelfde maximale spanningen terug te vinden zijn. Op figuur 5.1(d) werd 60% van het volume verwijderd en is er slechts een beperkte toename van de spanningen te zien.

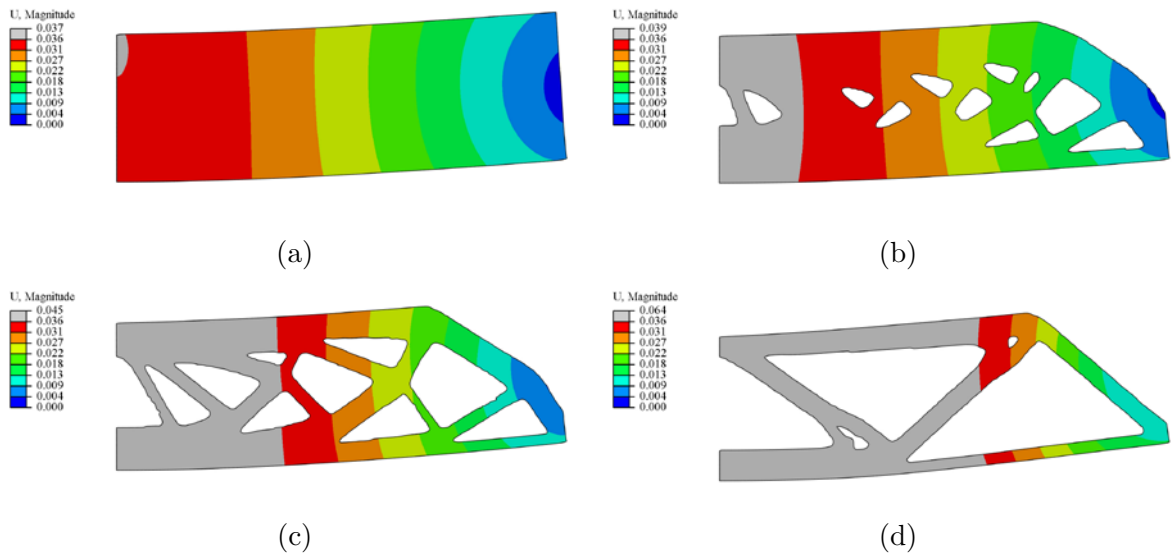
Veroorzaakt de reductie van materiaal dan geen enkele verandering? Op figuur 5.3 is te zien dat hoewel de spanningen weinig gewijzigd worden, de stijfheid van de structuur wel in bepaalde mate afneemt. De doorbuiging heeft in het geval (a) een maximale waarde van 0,037, terwijl geval (d) een maximale doorbuiging van 0,064 ondergaat. Figuur 5.2 toont de grafiek van het verloop van deze doorbuiging in functie van de volumefractie.



Figuur 5.2: Invloed van volumefractie op de doorbuiging.

Samenvattend:

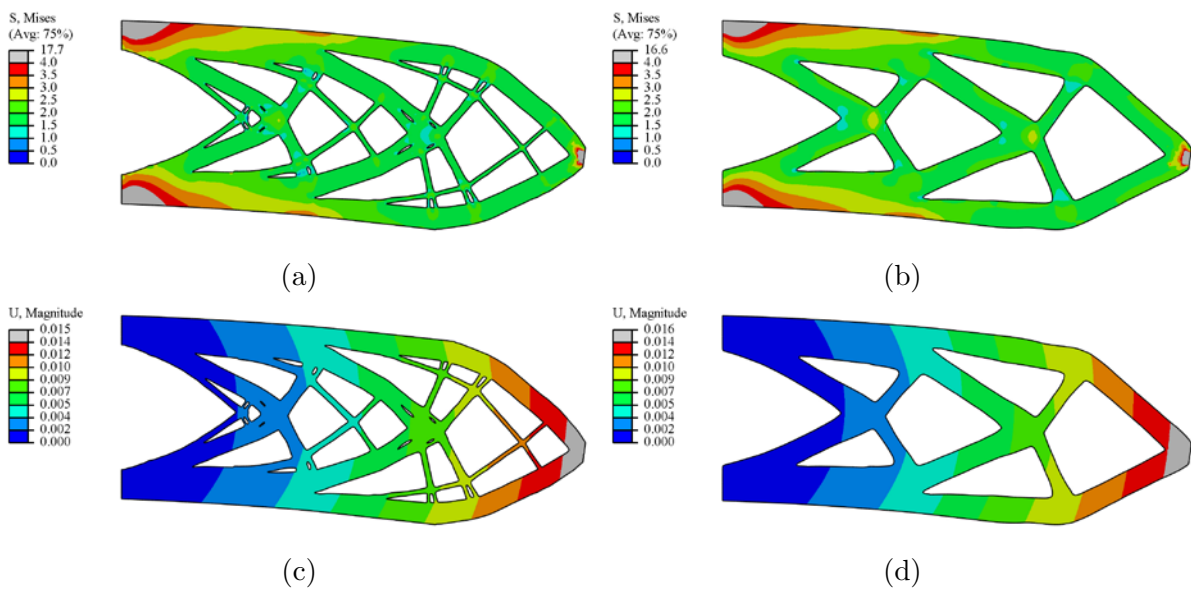
- volumereductie van 20% > toename doorbuiging van 5%
- volumereductie van 40% > toename doorbuiging van 22%
- volumereductie van 60% > toename doorbuiging van 73%



Figuur 5.3: De maximale doorbuigingen van halve MMB-aluminium plaatjes van 300mm x 100mm. (a) volumefractie: 1 - (b) volumefractie: 0,8 - (c)volumefractie: 0,6 - (d) volumefractie: 0,4. Aangrijpende kracht 20kN (linkerbovenhoek).

5.2 Invloed van de resolutie

Met resolutie wordt de grootte van de mesh of de straal van de filter, gebruikt bij de optimalisatie, bedoeld. Hierdoor ontstaan, zoals besproken in hoofdstuk 2, meer gedetailleerde resultaten. In dit experiment wordt de invloed op de structurele prestatie onderzocht. Het ontwerpprobleem dat wordt besproken is dat van een uitkragende balk van 100mm x 40mm en een dikte van 1mm. De topologie-optimalisatie werd uitgevoerd in Matlab en de mesh bevatte 500 x 200 elementen. Het fijnere resultaat past een filter toe met waarde 1,1 en het grove resultaat heeft een filterwaarde van 5,1. De kracht die aangrijpt op het midden van de rechterzijde bedraagt 10N.



Figuur 5.4: De spanningen en maximale doorbuigingen van een uitkragend aluminium plaatje van 100mm x 40mm. Volumefractie 0,5.

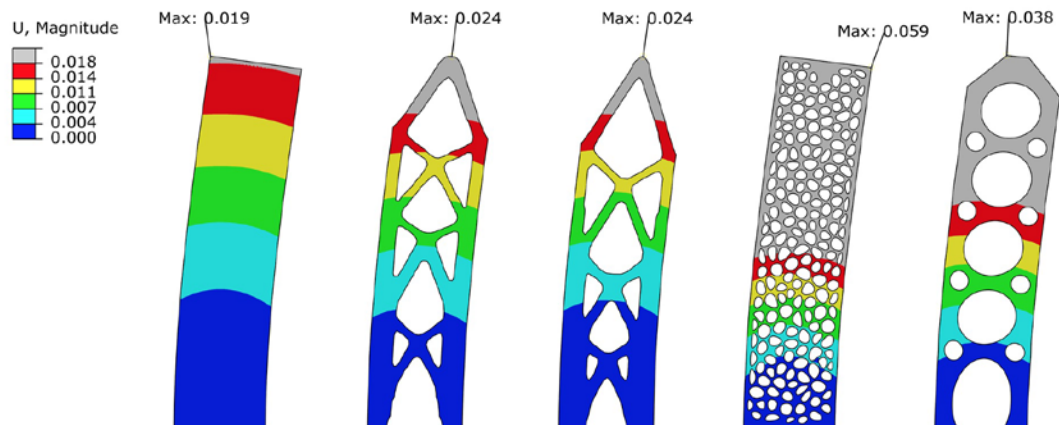
Op de resultaten is duidelijk te zien dat de invloed van de resolutie op de prestatie minimaal is.

5.3 Invloed van het algoritme

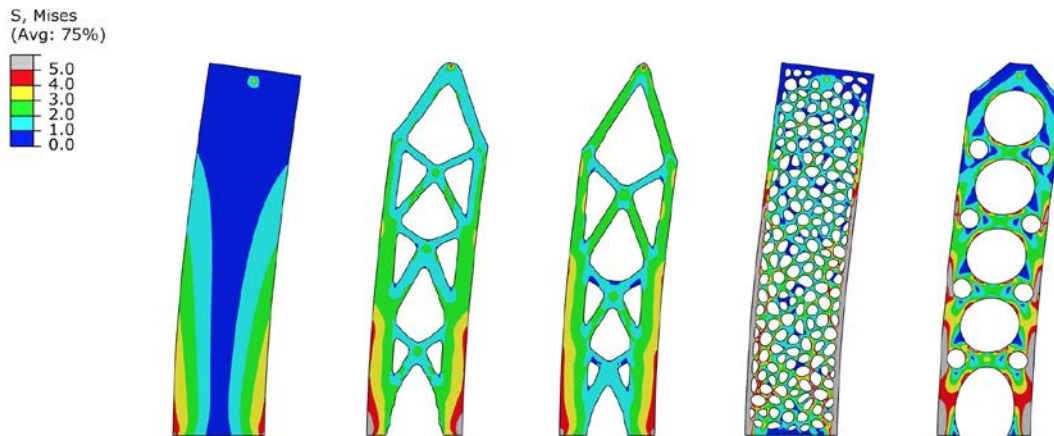
Een laatste thema onderzoekt de invloed van het topologie-optimalisatie-algoritme op de structurele prestatie. Op eenzelfde ontwerpdomein worden twee verschillende algoritmes toegepast en twee willekeurige structuren ontworpen. Het eerste algoritme gebruikt de compliantiemethode en de tweede minimaliseert de spanningen. De volumefractie heeft voor alle oplossingen een waarde van 0,5. Een structurele analyse wordt uitgevoerd op deze structuren en ter vergelijking wordt ook het volledige ontwerpdomein geanalyseerd. Figuur 5.5 illustreert de absolute doorbuiging van iedere structuur en figuur 5.6 toont de spanningen. Van links naar rechts komen aan bod:

1. volledig ontwerpdomein
2. minimalisatie van de compliantie
3. minimalisatie van de spanningen
4. sponsstructuur
5. willekeurig ontwerp

Alle structuren hebben een afmeting van 100mm x 25mm en zijn 1mm dik. Een kracht van 5N werd aan de top op iedere structuur aangebracht.

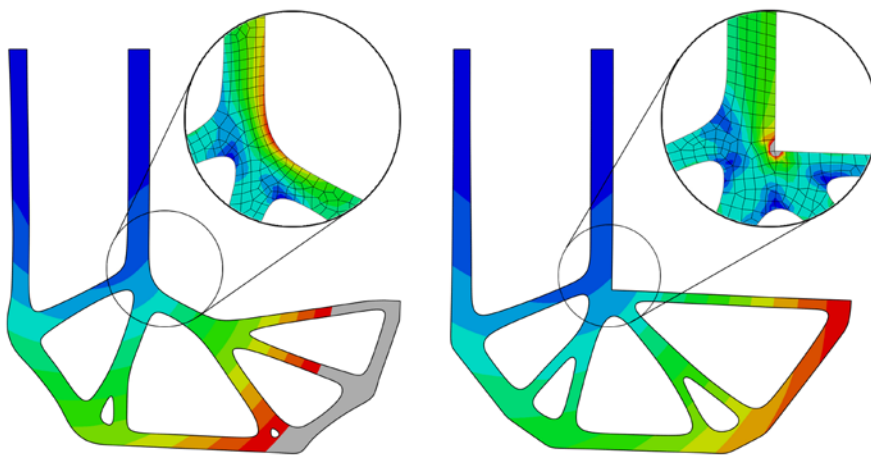


Figuur 5.5: De maximale doorbuigingen van de verschillende structuren.



Figuur 5.6: De spanningen in de verschillende structuren.

Er kan worden opmerkt dat het gebruik van topologie-optimalisatie betere resultaten oplevert dan de willekeurige structuren. De sponsstructuur presteert verrassend slecht wat betreft de doorbuiging en ook de spanningen lopen hoog op. Wat betreft het verschil tussen de twee gebruikte optimalisatie-algoritmen, is te zien dat voor dit ontwerprobleem, de maximale doorbuigingen gelijk zijn. De spanningen zijn wel iets lager bij het spanningsoptimalisatie-algoritme. Hieruit zou kunnen geconcludeerd worden dat spanningsoptimalisaties betere resultaten leveren. De structurele analyse van de optimale structuren van figuur 2.13 uit hoofdstuk 2 toont echter aan dat dit niet altijd het geval is. Hier heeft het resultaat van de spanningsoptimalisatie namelijk een grotere doorbuiging.



Figuur 5.7: De doorbuigingen en spanningsconcentraties uitgevoerd op de optimale structuren van figuur 2.13 uit hoofdstuk 2.

Hoofdstuk 6

Parametric design & Digital fabrication

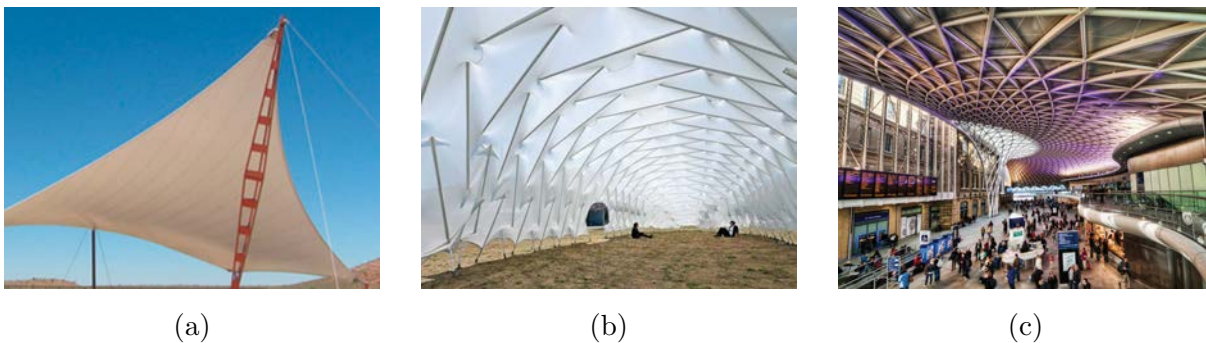
Deze masterproef wordt afgesloten met een kort hoofdstuk over parametrische ontwerpmethoden en digitale productietechnieken. Topologie-geoptimaliseerde structuren hebben een sterke band met deze twee begrippen.

6.1 Parametrisch ontwerpmethoden

Traditionele ontwerpsoftware kan meestal enkel lineair teruggaan in de tijd (undo/redo). Parametrisch-ondersteunde ontwerpsoftware zorgt voor een relatie tussen de ontwerpparameters (input) en het uiteindelijke resultaat (output). Hierdoor kan op elk moment het resultaat worden gewijzigd door de inputparameters van het ontwerpproces aan te passen. De term ‘parametrisch’ verwijst naar het gebruik van deze parameters, die ook wel variabelen worden genoemd [61].

Parametrisch ontwerp introduceert het systeemdenken in het ontwerpproces. De focus van de ontwerper verschuift van het maken van één enkele ontwerp-oplossing naar het maken van een model waarmee verschillende ontwerpvarianties kunnen worden onderzocht. Hieruit kan nadien de meeste geschikte variatie worden gekozen. Parametric design wordt ook vaak gelinkt aan form-finding technieken. Hier wordt de algemene vorm van een ontwerp gelinkt aan zekere voorwaarden. Deze kunnen worden vertaald in een goede vorm van de structuur, gelijkaardig aan het concept van topologie-optimalisatie. Voorbeelden van dergelijke optimalisatietechnieken zijn de ‘Transient stiffness method’, de ‘Force density method’ en de ‘Dynamic relaxation method’.

Een voorbeeld van een parametrisch architecturaal ontwerp, waarbij aandacht is voor het structurele spanningsverloop en waarbij topologie-optimalisatie in de toekomst kan worden aangewend, zijn de zogenaamde tensegrity structuren. Het principe hiervan werd reeds eerder in deze masterproef aangehaald in hoofdstuk 4, paragraaf 2. Andere structuursoorten die met behulp van deze form-finding technieken kunnen worden gevonden zijn membraan- en schaalstructuren. Deze drie structuren worden geïllustreerd op figuur 6.1).



Figuur 6.1: Voorbeelden van form-finding constructies: (a) membraan- [62], (b) tensegrity- [63] en (c) schaalstructuur [64].

Typisch aan deze parametrische ontwerpen is dat complexe vormen vaak worden bekomen. Deze vormen bevatten vele unieke onderdelen en zijn hierdoor eerder ongewild doordat ze niet kunnen worden gestandaardiseerd of in massa kunnen worden geproduceerd. In traditionele situaties probeert men in het ontwerp het aantal verschillende onderdelen te minimaliseren zodat minder verschillende componenten dienen te worden geproduceerd. Een ander probleem is dat men als ingenieur liever één type onderdeel berekent en optimaliseert dan vele verschillende. Echter doordat de form-finding software deze onderdelen parametrisch heeft gegenereerd, bestaan wiskundige verbanden tussen deze onderdelen waardoor deze ook parametrisch kunnen worden geanalyseerd en geoptimaliseerd. Ook kunnen nadien de nodige wijzigingen relatief efficiënt worden doorgevoerd en sluit het eindresultaat beter aan bij hetgeen de ontwerper voor ogen had.

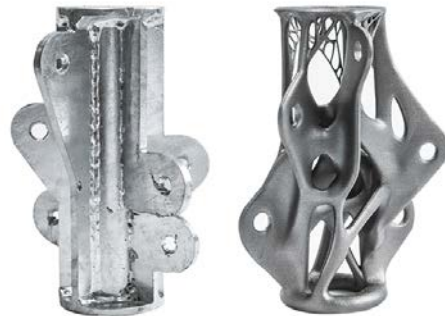
6.2 Digitale productietechnieken

Het machinaal produceren van maquettes, prototypes en zelfs onderdelen van gebouwen op ware grootte, vindt steeds meer toepassingen in de architectuur. Er bestaan verschillende technieken: bepaalde technieken nemen het materiaal weg (frezen, laserwater- en plasmasnijden) en anderen bouwen het materiaal op (3D-printing, machinale assemblage). De mogelijke impact van deze technologieën in de praktijk is groot: de industriële logica van standaardisatie en modulaire bouwsystemen kan worden uitgebreid met niet-standaard componenten die op maat gemaakt worden. Structureel opent dit mogelijkheden voor het realiseren van constructies die met traditionele middelen moeilijk of niet te ontwikkelen zijn.

De belangrijkste vernieuwing die een invloed zou kunnen hebben op het gebruik van topologie-optimalisatie is 3D-printing. Zoals reeds eerder aangehaald, werd de productie van een stalen verbindingselement reeds verwezenlijkt door Arup. Deze complexe knoop werd geoptimaliseerd en vervolgens ge3Dprint. Figuur 6.2 toont dit nogmaals.



(a)



(b)

Figuur 6.2: (a) Onderdeel van de Kurilpa-brug en (b) ge3Dprinte knoopverbinding [46].

Hoofdstuk 7

Besluit en toekomstperspectieven

In deze masterproef werd structurele topologie-optimalisatie voorgesteld, een relatief recent concept dat steeds meer wordt aangewend. Na een korte inleiding werden de theoretische grondbeginselen en de meest gebruikte doelstellingen en ontwerpvoorwaarden besproken. In dit deel kwamen volgende zaken aan bod: de SIMP- en de ESO-methode als strategie om tot een 0-1 materiaalverdeling te komen, de compliantiemethode als klassieke doelstelling en de invloed van filterwaarden en penalisatiefactoren. Het onderdeel ‘Uitbreidingen’ besprak achtereenvolgens de eigenfrequentie-, knik- en spanningsoptimalisaties. Ook geometrische niet-lineariteit, niet-lineair materiaalgedrag en ontwerp-afhankelijke belastingen werden aangehaald.

Een derde hoofdstuk besprak de verschillende commerciële en niet-commerciële softwarepakketten. Er werden tevens een aantal experimenten uitgevoerd waarbij de invloed van de meshgrootte, de rekentijd en de gebruikte software op het resultaat werden bepaald. Uit dit onderzoek kon worden opgemerkt dat Abaqus, in tegenstelling tot de 88-line Matlab code, een zeer hoge rekentijd had. Hoewel Abaqus meerdere mogelijkheden heeft kan het een meerwaarde zijn om beide programma’s te gebruiken. Ook de interactieve topopt webplayer leverde voor bepaalde problemen bruikbare resultaten.

De kern van deze masterproef behandelde de onderzoeksvraag ‘Kan topologie-optimalisatie aangewend worden als ontwerptool bij bouwkundige toepassingen?’. Een eerste toepassing van topologie-optimalisatie was het ontwerp van staafwerkmodellen voor gewapende betonconstructies. Er kon verrassend genoeg gewerkt worden met de vrij toegankelijke interactieve topopt webplayer.

Het klassieke algoritme (compliantiemethode) kon op een eenvoudige wijze betrouwbare en kwalitatieve resultaten leveren op een kort termijn. Een tweede toepassing van topologie-optimalisatie was terug te vinden bij bruggenbouw. De invloed op het initieel brugontwerp werd bestudeerd en het gebruik bij brugcomponenten werd besproken. Vervolgens werd topologie-optimalisatie ook gebruikt in het ontwerp van een iconische wolkenkrabber als superstructuur en positionering van dwarse verstijvers bij dunwandige silo's. Hoofdstuk 4 eindigt met een discussie over auxetics: materialen met negatieve poisson-ratio.

Hoofdstuk 4 is slechts het begin van een onderzoeksdomein met ontelbare mogelijkheden. Er kwamen veel bouwkundige toepassingen aan bod, maar er zijn er zoveel meer. De resultaten waren zowel bruikbaar als interessant. Doordat de onderzoeksvraag, behandeld in deze masterproef, relatief wijd werd ingekaderd, kon er niet altijd gedetailleerd ingegaan worden op bepaalde casestudies. Sommige casestudies zouden bij een meer gedetailleerde studie sterkere resultaten kunnen bekomen, die uiterst relevant zijn in reële situaties.

De laatste hoofdstukken bespraken de structurele werking van software-geoptimaliseerde structuren en de link van topologie-optimalisatie met parametrisch ontwerp en digitale productie.

Topologie-optimalisatie-algoritmen en -softwarepakketten worden ieder jaar beter, sneller en efficiënter. Omwille staat het onderwerp van deze masterproef een veelbelovend toekomst te wachten. Het opzet van deze masterproef was de bijdrage en het belang van topologie-optimalisatie in de bouwsector. Ik hoop dan ook dat ik in mijn opzet ben geslaagd en dat mijn masterproef zal kunnen worden gebruikt als basisdocument of handleiding voor verder onderzoek.

Bijlage A

Extra informatie

A.1 Klassiek voorbeeld (Tutorial)

Deze tutorial geeft een korte maar volledige opsomming van alle inputparameters die nodig zijn om een standaard topologie-optimalisatie uit te voeren in Abaqus 6.12.

Inleiding

- > Open Abaqus CAE
- > Create Model Database > With Standard/Explicit Model

Parts

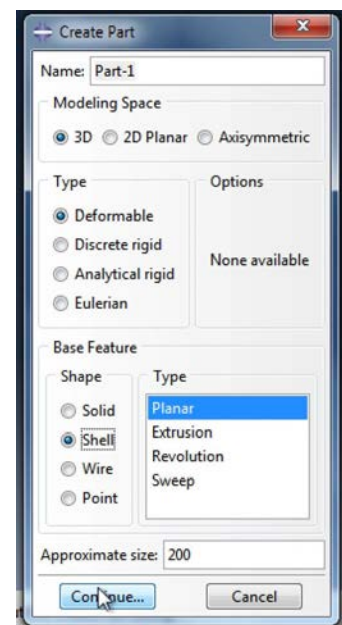
- > Create Part:
 - Modeling space: 3D
 - Type: Deformable
 - Base Feature: Shell, Planar
- > Create lines: Rectangle
 - 0,0
 - 30,10

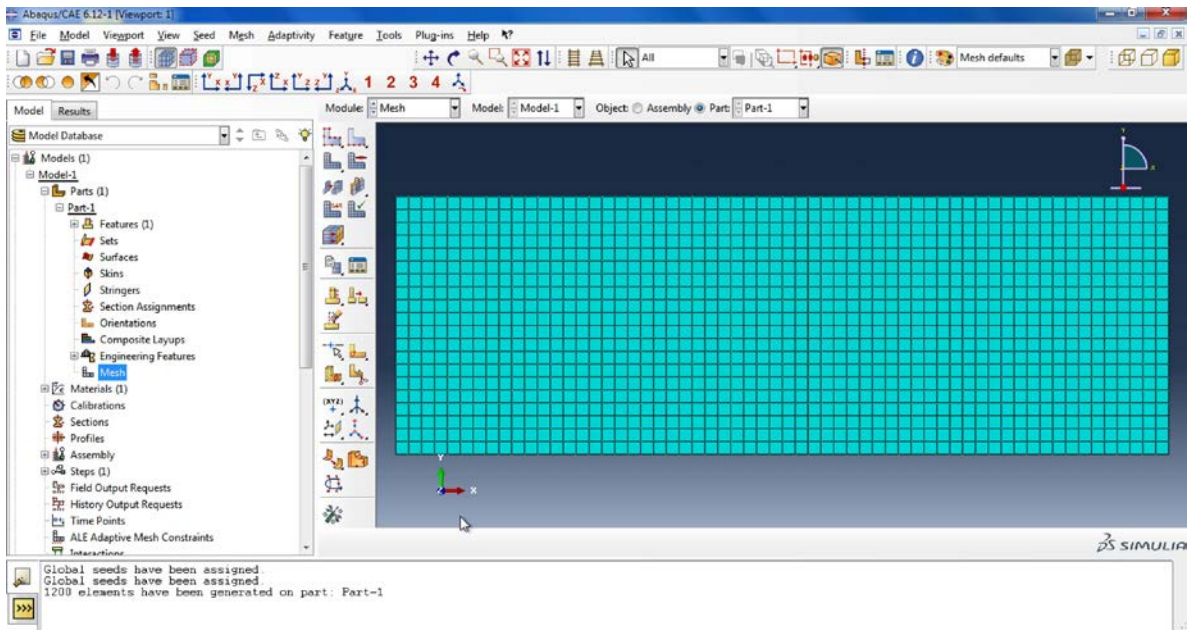
Material

- > Create Material:
 - Mechanical > Elasticity > Elastic
 - Young's Modulus: 210000
 - Poisson's Ratio: 0.3

Part-1 uitvouwen

- > Mesh > Seed Part
 - Approximate global size: 0.5
- > Mesh Part





Voorlopig resultaat: Mesh bestaande uit 1200 elementen.

> Section Assignments > Create Section

Shell > Homogeneous

Shell thickness: 3

> Material-1 > OK

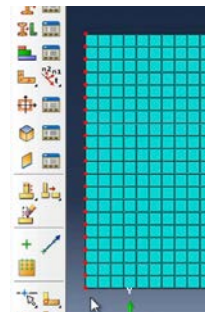
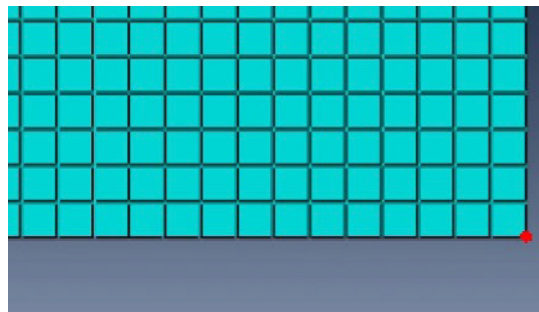
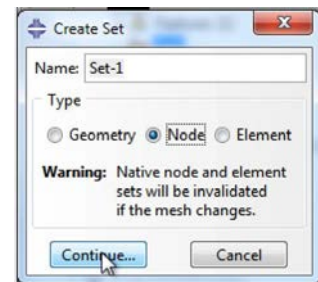
> Sets > Create Set

Type: Node

> Set-1: Linker bovenhoek

> Set-2: Rechter onderhoek

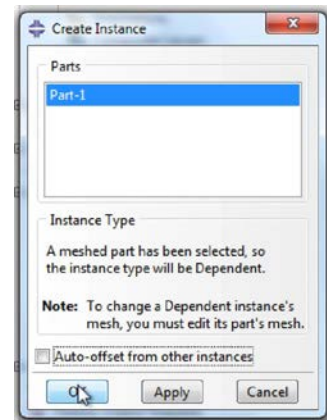
> Set-3: Volledige linkerkant



```
The set 'Set-1' has been created (1 node).
The set 'Set-2' has been created (1 node).
The set 'Set-3' has been created (21 nodes).
```

Assembly uitvouwen

> Instance Part > OK



Steps (1) uitvouwen: (+ dubbelklikken)

> Create Step

Static, General > Continue... > OK

Step-1 uitvouwen

Dubbelklikken op BC's

Create Boundary Condition > Displacement/Rotation

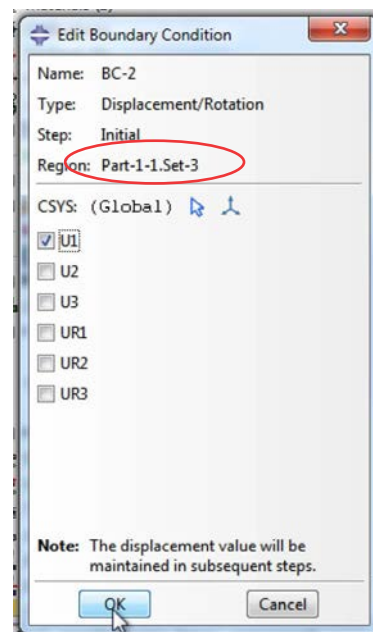
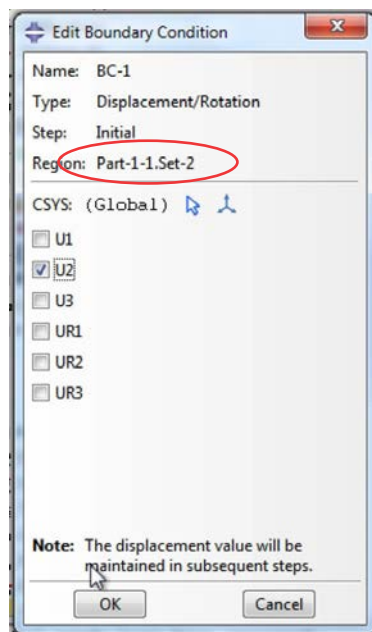
Select: Sets...



>Aanmaken van BC-1 en BC-2

BC-1: U2 vast (set-2)

BC-2: U1 vast (set-3)



Dubbelklikken op Loads

Create Load > Concentrated force

> Aanmaken van Load-1

Load-1: CF2: -1 (Set-1)

Dubbelklikken op Optimization Task

> Create Optimization Task

Topology optimization

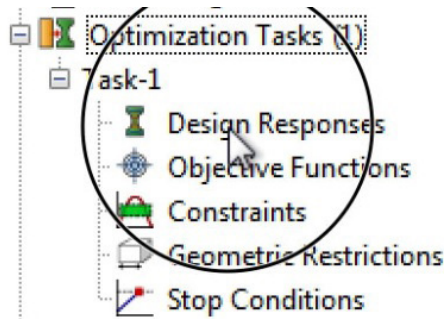
Continue... > OK

Volgende stap is het aanmaken van...

Design Responses (2)

Objective Function (1)

Constraints (1)



- Design Response

D-Response-1: Single-term: Strain Energy

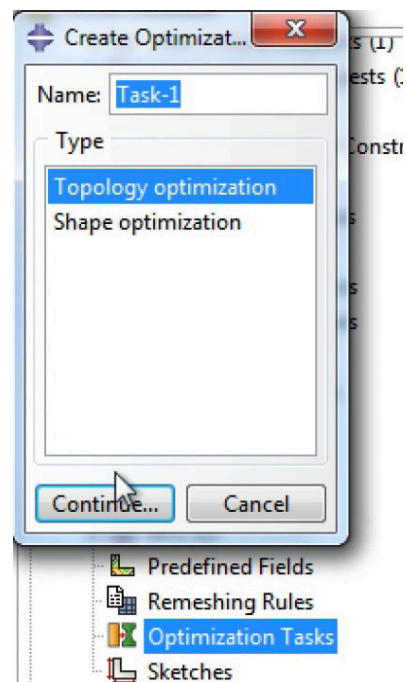
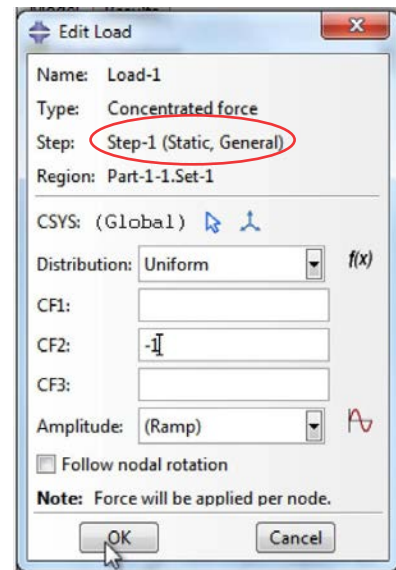
D-Response-2: Single-term: Volume

- Objective Function

Objective-1: Minimize D-response-1 (Strain Energy)

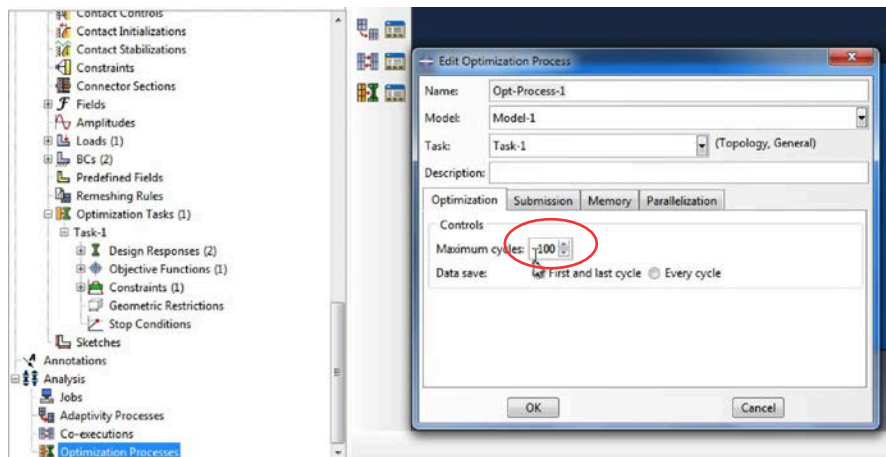
- Optimization Constraint

Opt-Constraint-1: A fraction of the initial value of D-response-2 ≤ 0.3 (Volume)

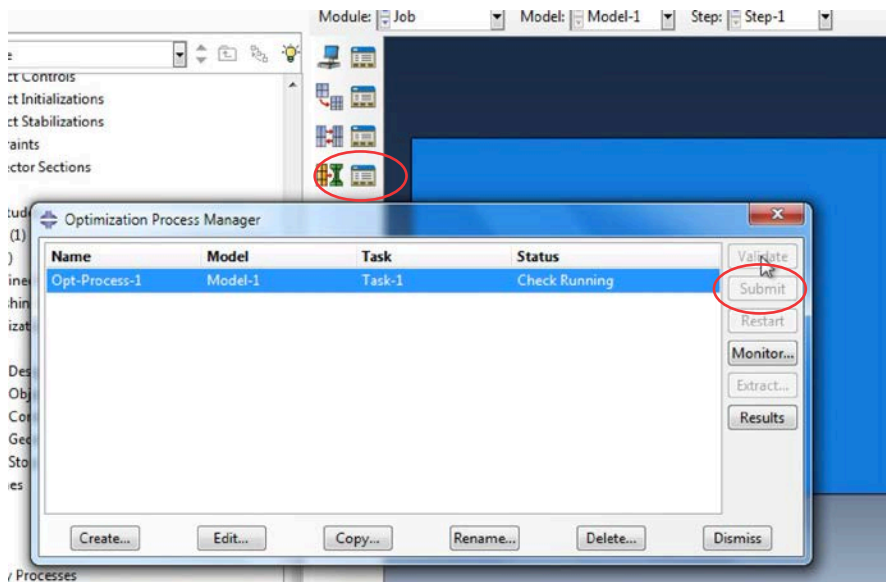


Laatste stap is het maken van een Optimization Process.
Hiervoor dubbelklik je op 'Optimization Processes'.

> Controls > Maximum cycles: 100



> Optimization Process Manager
> Submit



In de monitor 'Output tab' vind je de filter value terug.

```

Opt-Process-1 Monitor
Optimization process: Opt-Process-1 Status: Running Current job: Monitor...
Log Errors Warnings Output File
[INFO] [18:37:42] [fea_include] Abaqus/ATOM fea_include - version 6.12-1 - build '1_120227-041600' 64 bit
[INFO] [18:37:42] [fea_include] Abaqus/ATOM fea_include finished successfully
[INFO] [18:37:42] [atom_per1] Elapsed time of fea_include : 00:00:00 - current time: 18:37:42
[INFO] [18:37:42] [atom_per1] Converting FEM input files to optimization neutral format (ONF)
[INFO] [18:37:42] [atom_per1] Calling(1544): "C:\SIMULIA\Abaqus\6.12-1\code\bin\SMAExternal\ATOM\bin\fea2onf" --
[INFO] [18:37:42] [fea2onf] Abaqus/ATOM fea2onf - version 6.12-1 - build '71_120229-041600' 64 bit
[INFO] [18:37:42] [fea2onf] Translating the Abaqus input file Opt-Process-1-Job.inp to the optimization neutral
[INFO] [18:37:42] [fea2onf] Writing ONF group file Opt-Process-1-Job_grp.onf
[INFO] [18:37:42] [fea2onf] Writing ONF input file Opt-Process-1-Job_fea.onf
[INFO] [18:37:42] [fea2onf] Abaqus/ATOM fea2onf finished successfully
[INFO] [18:37:42] [atom_per1] Elapsed time of fea2onf : 00:00:00 - current time: 18:37:42
[NOTICE] [18:37:42] [atom_per1] Starting Abaqus / ATOM pre-processor
[INFO] [18:37:42] [atom_per1] Calling(1954): "C:\SIMULIA\Abaqus\6.12-1\code\bin\SMAExternal\ATOM\bin\atom_prep"
[INFO] [18:37:42] [atom_prep] Abaqus/ATOM prep - version 6.12-1 - build '71_120229-041600'
[INFO] [18:37:42] [atom_prep] Logging in fortran module has been initiated
[INFO] [18:37:43] [atom_prep] Checking authorization : FEM_INPUT
[INFO] [18:37:43] [atom_prep] Reading coasand : DRESP
[INFO] [18:37:43] [atom_prep] Reading coasand : DRESP
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] OPTIMIZATION system checked out the ADVANCED_NONLINEAR feature
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Reading coasand : DV_TOPO
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Reading coasand : OBJ_FUNC
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Reading coasand : CONSTRAINT
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Reading coasand : OPTIMIZE
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Reading coasand : OPT_PARAM
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Reading coasand : STOP
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Reading coasand : CONFIG
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] automatic definition of checkerboard filter
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] SYSTEM defined a checkerboard filter
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] automatically to prevent checkerboards
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Filter radius: 0.450000
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Filter diameter: 0.900000
[INFO] [18:37:44] [atom_prep] Abaqus/ATOM prep finished successfully
[INFO] [18:37:44] [atom_per1] Elapsed time of atom_prep : 00:00:02 - current time: 18:37:44
[INFO] [18:37:44] [atom_per1] Modifying solver input files
[INFO] [18:37:44] [atom_per1] Calling(1992): "C:\SIMULIA\Abaqus\6.12-1\code\bin\SMAExternal\ATOM\bin\fea_modif"
[INFO] [18:37:44] [fea_modif] Abaqus/ATOM fea_modif - version 6.12-1 - build '71_120229-041600' 64 bit
[INFO] [18:37:44] [fea_modif] Reading ONF Mod file Opt-Process-1-Job_grp.onf
  
```

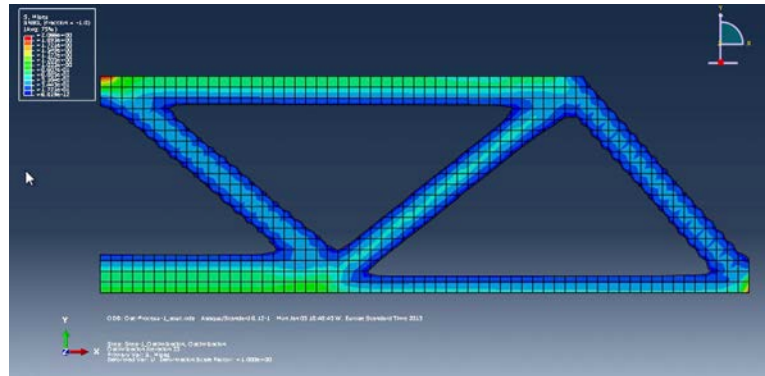
In de monitor 'Log tab' bevindt zich een overzicht van de vooruitgang.

```

Optimization process: Opt-Process-1 Status: Running Current job: Monitor...
Log Errors Warnings Output File
Submitted: Mon Jan 05 18:37:40 2015
Started: Optimization process has started.
Starting Abaqus/CAE Topology Optimization Module - version: Abaqus 6.12-1
The directory "Opt-Process-1" exists and will be deleted
Logfile: Opt-Process-1\atom.out
Starting jobname: "Opt-Process-1"
Starting Abaqus / ATOM pre-processor
Starting Abaqus analysis - design cycle 0
Starting Abaqus / ATOM optimization module - design cycle 0
Starting Abaqus analysis - design cycle 1
Starting Abaqus analysis - design cycle 33
Starting Abaqus / ATOM optimization module - design cycle 33
Abaqus / ATOM ended successfully
Completed: Mon Jan 05 18:48:49 2015
  
```

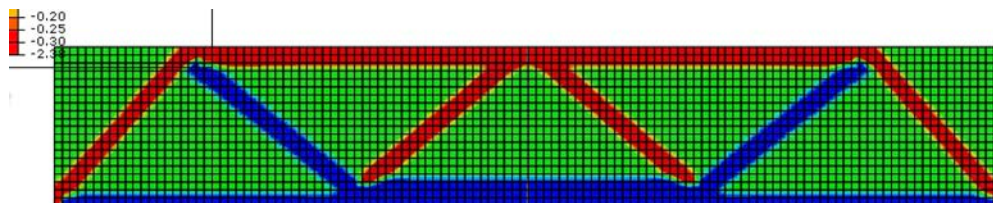
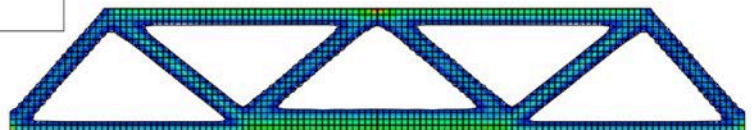
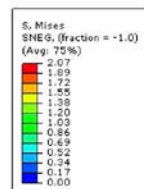
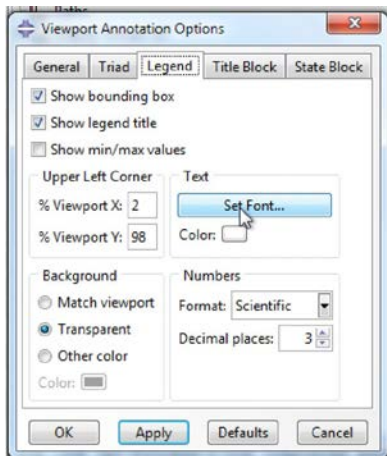
Search Text
Text to find: Match case

Door op 'Results' te klikken kom je in een nieuwe venster terecht: 'Visualizations'
Hierdoor wordt het resultaat van de optimalisatie zichtbaar.



Hier kunnen allerlei zaken worden aangepast waaronder:

- > Viewport > Viewport Annotation Options (legende, fonts, achtergrond...)
- > View > ODB Display Options (spiegelen...)
- > Contour Options (kleur, stijl, limieten...)



EINDE

Bibliografie

- [1] Uihlein M.S. Examining the architectural engineer. *Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges*, pages 1799–1806, 2013.
- [2] Dome / richard buckminster fuller. Retrieved 18/04, 2015, from: www.design-museum.de.
- [3] L'oceanogràfic. Retrieved 18/04, 2015, from: en.wikipedia.org.
- [4] Frei otto obituary. Retrieved 18/04, 2015, from: www.theguardian.com.
- [5] E. Stach. Structural morphology and self-organization. *Design and Nature V: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, 138:29–40.
- [6] Optimaliseren, definitie. Retrieved 18/04, 2015, from: <http://www.encyclo.nl>.
- [7] Singiresu S. Rao. *Engineering optimization : theory and practice*. Wiley, New York, 1996.
- [8] M. Ehrgott. Multicriteria optimization. (second edition), 2005.
- [9] A. Klarbring and P. W. Christensen. An introduction to structural optimization. *Solid Mechanics and its Applications*, 2009.
- [10] J. Herskovits, G. Dias, G. Santos, and C. M. M. Soares. Shape structural optimization with an interior point nonlinear programming algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 20(2):107–115, 2000.
- [11] M. Save, William Prager, G. Sacchi, and William H. Warner. *Structural optimization*. Mathematical concepts and methods in science and engineering. Plenum Press, New York, 1985.
- [12] M. P. Bendsøe and O. Sigmund. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer, Berlin ; New York, 2003.

-
- [13] L Krog, A Tucker, M Kemp, and R Boyd. Topology optimization of aircraft wing box ribs. *Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, page 2004–4481, 2004.
- [14] I. Simpson. Improving nasa altair lunar lander design. *Altair Engineering*, 2009.
- [15] K. Svanberg. The method of moving asymptotes - a new method for structural optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(2):359–373, 1987.
- [16] J. D. Deaton and R. V. Grandhi. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49(1):1–38, 2014.
- [17] Y. M. Xie and G. P. Steven. A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures*, 49(5):885–896, 1993.
- [18] G. I. N. Rozvany. A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 37(3):217–237, 2009.
- [19] E. Andreassen, A. Clausen, M. Schevenels, B. S. Lazarov, and O. Sigmund. Efficient topology optimization in matlab using 88 lines of code. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(1):1–16, 2011.
- [20] Knik (constructieer). Retrieved 18/04, 2015, from: nl.wikipedia.org.
- [21] C. Le, J. Norato, T. Bruns, C. Ha, and D. Tortorelli. Stress-based topology optimization for continua. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(4):605–620, 2010.
- [22] E. Holmberg, B. Torstenfelt, and A. Klarbring. Stress constrained topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(1):33–47, 2013.
- [23] E. Holmberg, B. Torstenfelt, and A. Klarbring. Fatigue constrained topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 50(2):207–219, 2014.
- [24] T. E. Bruns and D. A. Tortorelli. Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(26-27):3443–3459, 2001.
- [25] T. Buhl, C. B. W. Pedersen, and O. Sigmund. Stiffness design of geometrically nonlinear structures using topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 19(2):93–104, 2000.

- [26] S. Cho and H. S. Jung. Design sensitivity analysis and topology optimization of displacement-loaded non-linear structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192(22-24):2539–2553, 2003.
- [27] Y. J. Luo and Z. Kang. Topology optimization of continuum structures with drucker-prager yield stress constraints. *Computers & Structures*, 90-91:65–75, 2012.
- [28] Y. J. Luo and Z. Kang. Layout design of reinforced concrete structures using two-material topology optimization with drucker-prager yield constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 47(1):95–110, 2013.
- [29] M. Bogomolny and O. Amir. Conceptual design of reinforced concrete structures using topology optimization with elastoplastic material modeling. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 90(13):1578–1597, 2012.
- [30] B. C. Chen and N. Kikuchi. Topology optimization with design-dependent loads. *Finite Elements in Analysis and Design*, 37(1):57–70, 2001.
- [31] H. Zhang, S. T. Liu, and X. O. Zhang. Topology optimization of 3d structures with design-dependent loads. *Acta Mechanica Sinica*, 26(5):767–775, 2010.
- [32] M. Stolpe. On some fundamental properties of structural topology optimization problems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(5):661–670, 2010.
- [33] G. I. N. Rozvany. On symmetry and non-uniqueness in exact topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(3):297–317, 2011.
- [34] R. Watada, M. Ohsaki, and Y. Kanno. Non-uniqueness and symmetry of optimal topology of a shell for minimum compliance. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(4):459–471, 2011.
- [35] Topology and shape optimization with abaqus. Retrieved 18/04, 2015, from: www.3ds.com.
- [36] O. Sigmund. A 99 line topology optimization code written in matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21(2):120–127, 2001.
- [37] J. Schlaich, K. Schafer, and M. Jennewein. Toward a consistent design of structural concrete. *Journal Prestressed Concrete Institute*, 32(3):74–150, 1987.
- [38] A. van Gysel, L. Van Hooymissen, Spegelaere M., and W. De Vylder. *Gewapend beton*.

- [39] Juscelino kubitschek bridge. Retrieved 18/04, 2015, from: www.memrise.com.
- [40] De juscelino kubitschek-brug. Retrieved 18/04, 2015, from: izi.travel.
- [41] Rapid span pictures. Retrieved 18/04, 2015, from: www.tallbridgeguy.com.
- [42] W. De Corte. *Civiele Technieken II*. 2013.
- [43] San francisco golden gate bridge. Retrieved 11/05, 2015, from: derinconarincon.files.wordpress.com.
- [44] Xihoumen bridge in zhoushan. Retrieved 11/05, 2015, from: www.constructionglobal.com.
- [45] Le pont akashi kaikyo japon. Retrieved 11/05, 2015, from: soocurious.com.
- [46] Primeur: geprinte stalen verbindingen voor gebruik in de bouwsector. Retrieved 18/04, 2015, from: www.arup.com/News.
- [47] 30 st mary axe. Retrieved 18/04, 2015, from: nl.wikipedia.org.
- [48] London, london, england. Retrieved 18/04, 2015, from: www.goodfon.su/wallpaper.
- [49] M. M. Ali and K. S. Moon. Structural developments in tall buildings: Current trends and future prospects. *Architectural Science Review*, 50:205–223, 2007.
- [50] L. L. Stromberg, A. Beghini, W. F. Baker, and G. H. Paulino. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements. *Engineering Structures*, 37:106–124, 2012.
- [51] L. L. Stromberg, A. Beghini, W. F. Baker, and G. H. Paulino. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(2):165–180, 2011.
- [52] L. L. Beghini, A. Beghini, N. Katz, W. F. Baker, and G. H. Paulin. Connecting architecture and engineering through structural topology optimization. *Engineering Structures*, 59:716–726, 2014.
- [53] D. W. Boggs, N. Hosoya, and Cochran L. Sources of torsional wind loading on tall buildings: Lessons from the wind tunnel. *Advanced Technology in Structural Engineering*, 2000.
- [54] Kurilpa bridge. Retrieved 18/04, 2015, from: www.theaustralian.com.au.

- [55] Liam kidston, kurulpa bridge paves the way. Retrieved 18/04, 2015, from: galleryhip.com/kurilpa-bridge.
- [56] Why renting a cement silo makes more sense. Retrieved 18/04, 2015, from: www.allstarluxuryhome.com.
- [57] Auxetic materials - picture 1. Retrieved 18/04, 2015, from: home.um.edu.mt/auxetic.
- [58] Auxetic materials - picture 2. Retrieved 18/04, 2015, from: home.um.edu.mt/auxetic.
- [59] Poissonuses. Retrieved 12/05, 2015, from: silver.neep.wisc.edu.
- [60] U. D. Larsen, O. Sigmund, and S. Bouwstra. Design and fabrication of compliant mechanisms and material structures with negative poisson's ratio. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 6:99–106, 1997.
- [61] parametric design digital fabrication. Retrieved 18/04, 2015, from: www.mmblog.be.
- [62] Tensile fabric structures. Retrieved 09/05, 2015, from: glarfab.com.
- [63] Ephemeral tensegrity. Retrieved 09/05, 2015, from: 40.media.tumblr.com.
- [64] King's cross station. Retrieved 09/05, 2015, from: thinkjamesphoto.com.

Lijst van figuren

1.1	Voorbeelden van constructies door ontwerpers met sterk innovatieve structurele concepten: (a) Buckminster Fuller [2], (b) Félix Candela [3], (c) Otto Frei [4].	3
1.2	Ontwerpproces in natuur en architectuur. Gebaseerd op [5].	3
1.3	De drie soorten structurele optimalisaties volgens Christensen en Klarbring [9] (a) dimensioneringsoptimalisatie, (b) vormoptimalisatie en (c) topologie-optimalisatie.	6
1.4	Twee verschillende soorten topologie-optimalisatie: (a) discreet ontwerp domein en (b) een continuüm ontwerpdomein.	7
2.1	(a) De waarde van de relatieve stijfheid tegenover de dichtheid van het element volgens de verschillende bestraffingscurven en (b) microstructuren volgens het SIMP-model met $p=3$ en poisson-factor $1/3$. Illustraties gebaseerd op [12].	11
2.2	Het iteratieve proces van een standaard topologie-optimalisatie die gebruik maakt van de SIMP-methode en de ‘Method of Moving Asymptotes’ [12].	12
2.3	Verdeling van materiaal in een klassieke topologie-optimalisatie. Het uiteindelijke resultaat bevest bijna uitsluitend 0-1 elementen. Illustratie werd verzorgd door dr. ing. Nils Wagner.	12
2.4	Dambord-patroon vorming wanneer geen filter wordt gebruikt	14
2.5	De ontwerpruimte, randvoorwaarden en externe belasting voor de optimalisatie van een uitkragend balk.	15
2.6	De mesh-onafhankelijke optimale resultaten bekomen met behulp van de 88-line Matlab code. De filterwaarde (r_{min}) stijgt evenredig met de meshgrootte.	15
2.7	De mesh-afhankelijke optimale resultaten bekomen met behulp van de 88-line Matlab code. De filterwaarde (r_{min}) wordt op 2 vastgehouden en is dus onafhankelijk van de meshgrootte.	15

2.8	De optimale resultaten bekomen met behulp van de 88-line Matlab code. De filterwaarde (r_{min}) wordt op 2 vastgehouden maar de bestraffing (p) wordt per ontwerp gewijzigd.	16
2.9	Topologie-optimalisatie van een MBB-balk met 65% volumereductie. Resultaat uit Abaqus uitgevoerd met een grove mesh. Het resultaat is nabewerkt in Rhinoceros.	16
2.10	Topologie-optimalisatie van een MBB-balk met 65% volumereductie. Resultaat uit Abaqus uitgevoerd met een fijne mesh. Het resultaat is nabewerkt in Rhinoceros.	16
2.11	Topologie-optimalisatie waarbij de 1ste eigenfrequentie wordt gemaximaliseerd.	18
2.12	Optimale indeling van materiaal volgens minimale compliantie (midden) en maximalisatie van de knikkracht (rechts). Illustraties zijn ter verduidelijking van het concept en gebaseerd op [12]. De volumefracties zijn in beide resultaten gelijk.	19
2.13	Verskil tussen (a) een compliantie gebaseerde topologie-optimalisatie en (b) een topologie-optimalisatie met spanningsvoorwaarden.	20
2.14	Illustratie van de overmatige vervormingen van bepaalde elementen door rekening te houden met geometrische niet-lineariteit bij topologie-optimalisaties.	21
2.15	Verskil tussen een topologie-optimalisatie die rekening houdt met (a) kleine verplaatsingen en (b) grote verplaatsingen.	22
2.16	Optimale resultaat van figuur 2.15b in de vervormde toestand. Gebaseerd op [25].	22
2.17	Optimale indeling van een (a) vierkant ontwerpdomein dat wordt ingevuld met (b) lineair-elastisch materiaal en (c) een materiaal dat hoofdzakelijk op druk werkt [27].	23
2.18	Optimale verdeling van een ontwerp met (a) 80% beton (grijs) en 20% staal (zwart) en (b) 30% beton (grijs), 10% staal (zwart) en 60% lege ruimte (wit) [29].	24
2.19	Optimale plaatsing van wapening in een betonnen balk na 150 iteraties [29].	24
2.20	Optimale plaatsing van wapening in een betonnen balk met tussensteunen na 300 iteraties [29].	24
2.21	Illustratie van een geoptimaliseerd boogvormige structuur met ontwerp-afhankelijke sneeuwlast [30].	25
2.22	Illustratie van een y-as georiënteerde belasting [31].	25
2.23	Illustratie van een 3-dimensionale MBB-balk.	26

2.24	Enkele geometrische beperkingen die kunnen worden opgelegd in Abaqus 6.12 [35].	27
3.1	Volledig ontwerpdomein van de MBB-balk (boven) en het symmetrisch alternatief (onder) met bijhorende randvoorwaarden.	31
3.2	Geoptimaliseerde resultaten geproduceerd met behulp van (a) Abaqus en (b) Matlab.	32
3.3	Geoptimaliseerde resultaten geproduceerd met behulp van (a) Abaqus en (b) Matlab.	32
3.4	Relatie tussen rekentijd en meshgrootte uitgevoerd in Matlab met behulp van de 88-line Matlab code.	33
4.1	Staafterkmodellen: (a) paalfundering en (b) console [37].	36
4.2	Aanduiding van de ‘B’ en ‘D’ gebieden volgens [37].	37
4.3	Voorstelling afmetingen, randvoorwaarden en belastingen van en op de console.	38
4.4	Situatie 1: (a) resultaat van topologie-optimalisatie en (b) het afgeleide staafterkmodel.	39
4.5	Situatie 2: (a) resultaat van topologie-optimalisatie en (b) het afgeleide staafterkmodel.	40
4.6	Staafterkmodellen voorgesteld in Eurocode 2 (NBN EN 1992-1-1, fig. 10.4)	41
4.7	Ontwerpdomein van de ingangligger rekening houdend met symmetrie. . .	41
4.8	Resultaat topologie-optimalisatie van de ingangligger.	41
4.9	Casestudie van de wandligger met openingen.	42
4.10	Optimale indeling van het beperkt beschikbaar materiaal van de paalkop. (a) kijk van bovenaf en (b) kijk van onderen.	43
4.11	principe van een staafterkmodel voor een paalkop met 4 palen.	43
4.12	De Juscelino Kubitschek-brug [39]	44
4.13	De ontwerpruimte van de casestudie (links) en de optimale materiaalindeling (rechts).	46
4.14	Squamish Footbridge [41]	46
4.15	Optimale invulling van het ontwerpdomein met volumefracties 30% en 50%.	47
4.16	Compliantie gebaseerde topologie-optimalisaties waarbij de ontwerpbelasting op verschillende hoogtes wordt aangebracht.	47
4.17	Optimale resultaten voor een ontwerpdomein met enerzijds verdeelde belastingen en anderzijds negen gelijkmatig verdeelde puntlasten.	48
4.18	Optimale resultaten voor een ontwerpdomein met meerdere lastengroepen.	49

4.19	Principe van halvering van de ontwerpbelasting op de plaatsen waar symmetrie in acht wordt genomen.	50
4.20	Topologie-optimalisatie met als doelstelling (a) maximale stijfheid en (b) minimale spanningen.	50
4.21	Topologie-optimalisatie (a) zonder geometrische beperkingen en (b) met geometrische beperkingen. (Er kan enkel materiaal weggenomen worden naar boven toe.)	50
4.22	Topologie-geoptimaliseerde boogbrug met hooggelegen rijvloer (incl. geometrische beperking). 3D-model rechtstreeks uit Abaqus.	51
4.23	Aanduiding van de verschillende belastingsgevallen wanneer het volledige ontwerpdomein wordt beschouwd.	51
4.24	Topologie-geoptimaliseerde boogbrug met hooggelegen rijvloer zonder geometrische beperkingen. 3D-model uit Abaqus met volumefractie 10%.	51
4.25	Voorbeelden van pylonen bij hangbruggen. (a) Golden Gate Bridge [43] (b) Xihoumen Bridge [44] (c) Akashi Kaikyo Bridge [45].	52
4.26	Ontwerpdomein van de casestudie (links) en de vorm van de pyloon van de Akashi Kaikyo brug (rechts).	53
4.27	Optimalisatie van een pyloon. Van initiële fase tot het eindresultaat.	54
4.28	Invloed van de lengte op de optimalisatie. (a) 200x100 (b) 300x100 (c) 400x100 (d) 500x100 (e) 600x100 (f) 700x100 (g) 800x100 (h) 900x100.	55
4.29	(a) afbeelding van de Kurilpa brug [54] en (b) detail van een knoopverbinding [55].	56
4.30	Originele en ge3Dprinte stalen knoopverbinding van een tensegrity brug geproduceerd door Arup [46].	57
4.31	Panoramisch zicht op Londen [48].	58
4.32	De verschillende soorten uitwendige hoogbouw-structuren volgens Ali en Moon [49].	59
4.33	Optimale geschoorde raamwerkenpatronen volgens [51].	60
4.34	Het gebruik van optimale geschoorde patronen in hoogbouwstructuren [51].	60
4.35	Het ontstaan van torsie in hoge gebouwen [53].	61
4.36	Het ontwerpdomein (links) en bijhorende mesh (rechts).	62
4.37	Het optimale resultaat van een topologie-optimalisatie van een wolkenkrabber.	63
4.38	Het iteratief verloop van de doelstelling (compliantie) en de voorwaarde (volume) van de casestudie.	63
4.39	Een opgewerkte versie van het bovenste deel van de wolkenkrabber.	64
4.40	Illustratie van enkele silo's [56].	65

4.41	Het ontwerpdomein (links), Static General analyse (midden) en resultaten van de optimalisatie (rechts).	66
4.42	Principe van materialen met positieve (links) en negatieve poisson-ratio (rechts) [57].	67
4.43	De reactie van een traditioneel materiaal (links) en een materiaal met negatieve poisson-ratio (rechts) op een drukbelasting [58].	68
4.44	Materiaal met een negatieve poisson-ratio [12].	68
5.1	De spanningen in halve MBB-aluminium plaatjes van 300mm x 100mm. (a) volumefractie: 1 - (b) volumefractie: 0,8 - (c)volumefractie: 0,6 - (d) volumefractie: 0,4. Aangrijpende kracht 20kN (linkerbovenhoek).	70
5.2	Invloed van volumefractie op de doorbuiging.	71
5.3	De maximale doorbuigingen van halve MMB-aluminium plaatjes van 300mm x 100mm. (a) volumefractie: 1 - (b) volumefractie: 0,8 - (c)volumefractie: 0,6 - (d) volumefractie: 0,4. Aangrijpende kracht 20kN (linkerbovenhoek).	71
5.4	De spanningen en maximale doorbuigingen van een uitkragend aluminium plaatje van 100mm x 40mm. Volumefractie 0,5.	72
5.5	De maximale doorbuigingen van de verschillende structuren.	73
5.6	De spanningen in de verschillende structuren.	74
5.7	De doorbuigingen en spanningsconcentraties uitgevoerd op de optimale structuren van figuur 2.13 uit hoofdstuk 2.	74
6.1	Voorbeelden van form-finding constructies: (a) membraan- [62], (b) tensegrity- [63] en (c) schaalstructuur [64].	76
6.2	(a) Onderdeel van de Kurilpa-brug en (b) ge3Dprinte knoopverbinding [46].	77

