

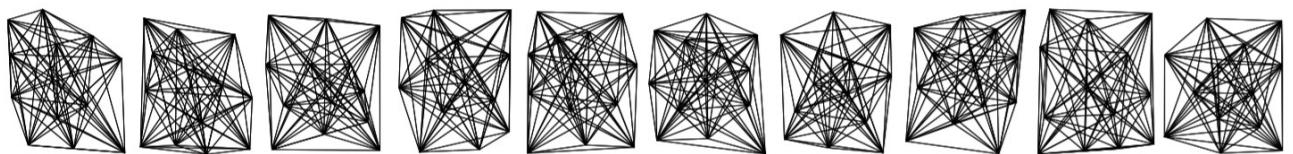
Casestudy af optimeringsalgoritmer i designfasen

Carl Emil Ejlskov Jensen & Simon Muff Laporte

Bachelorprojekt i Bygningsdesign

Ingeniørhøjskolen Aarhus Universitet

2019





A handwritten signature in black ink.

Carl Emil Ejlskov Jensen

Studienummer: 201505600

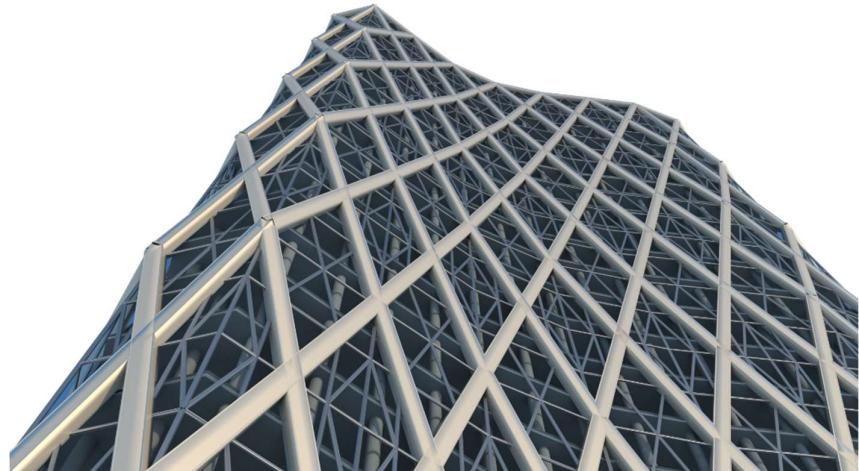
Belastningsgrad: 15 ECTS point

A handwritten signature in black ink.

Simon Muff Laporte

Studienummer: 201509792

Belastningsgrad: 15 ECTS point



Abstract

Project title: Case study of *Algorithmic Optimization* in the design phase

Students: Carl Emil Ejlskov Jensen & Simon Muff Laporte

Supervisors: Peter Olsen & Morten R. Knudsen

Keywords: *Computational Workflow, Structural Optimization, Algorithmic Optimization, Braced tall buildings, Architectural Decision-making*

This report aims to examine how structural optimization algorithms can be integrated in a large-scale design process. This will be exemplified through the design of a tall building utilizing an optimizable truss as its main lateral supporting system. The optimizations of the truss will be conducted using the bi-directional evolutionary optimization (BESO) and genetic optimization (GA) algorithms. These algorithms are applied to a wide range of different optimizable parameters that are in turn compared with each other using architectural decision-making based on an evaluation matrix.

The best designs are then applied to a context-based case in the heart of Aarhus and a final architectural design solution is found. When evaluated, the design using the BESO algorithm was found to be the best in terms of structural effectiveness, architectural design, and buildability. It is architecturally analyzed in the context of Aarhus C. This truss was then structurally designed in accordance to Eurocode and an outline for the design of the structural connections was given.

We evaluated the design process after finishing the design. Evidently, for this type of process to be suitable for real projects, good communication between architects and engineers is required because structural optimization of architectural elements creates many cross-disciplinary interfaces

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion.....	1
2	Problemformulering	2
3	Metode.....	3
4	Teori	4
4.1	Computational design	4
4.2	Strukturel form finding	4
4.3	Strukturel optimering.....	5
4.4	Generativt design med BESO-algoritme.....	7
4.5	Parametrisk gitter-optimering med genetiske algoritmer (GA).....	10
4.6	GA vs. BESO.....	14
4.7	Generel højhuse teori	15
4.8	Strukturelle systemer i højhuse	17
5	Analytisk model	20
5.1	Software og algoritmer	20
5.2	Geometri.....	22
5.3	Laster	22
5.4	Efterbehandling	24
6	Kriterieanalyse	25
6.1	Strukturel Effektivitet.....	25
6.2	Design.....	25
6.3	Bygbarhed	26
7	Præsentation af optimeringsparametre.....	27
7.1	Original.....	27
7.2	Interconnected	28
7.3	Rammer	29
7.4	Skråstænger	30
7.5	Node Move.....	31
7.6	Voronoi	32
7.7	Phyllotaxis.....	33

7.8	BESO-shell	35
8	Evaluering af optimeringsalgoritemer.....	36
8.1	1. Optimeringsrunde	36
8.2	2. Optimeringsrunde	37
9	Evaluering af optimeringsparametre.....	41
9.1	Interconnected (BESO).....	41
9.2	Skråstænger (BESO/GA)	44
9.3	Rammer (BESO/GA)	46
9.4	Node Move (GA)	47
9.5	Voronoi.....	49
9.6	Phyllotaxis (GA)	50
9.7	BESO-shell	51
10	Opsummering af kriterieanalyse	53
11	Delkonklusion	54
11.1	Proces	54
11.2	Parametre	54
12	Præsentation af 3D Optimering	55
12.1	Case	55
12.2	Løsningsforslag.....	56
13	Evaluering af 3D Optimering	58
13.1	Løsning 1	58
13.2	Løsning 2	63
13.3	Opsummering af kriterieanalyse	66
14	Designanalyse af løsningsforslag	67
14.1	Konteksten.....	67
14.2	Sigtelinjer og proportioner	69
14.3	Byrum i gadeplan	71
14.4	Løsning 1	73
14.5	Løsning 2	76
14.6	Delkonklusion	78
15	Strukturel eftervisning af optimeret gitter.....	80

15.1	Forudsætninger	80
15.2	Vandret statisk system	81
15.3	Lastgrundlag.....	83
15.4	ULS eftervisning	86
15.5	SLS-eftervisning	88
15.6	Ikke-betragtede eftervisninger	92
15.7	Samlingsprincip.....	93
15.8	Udførselsprincip	95
16	Evaluering af proces.....	97
16.1	Evaluering af script.....	97
16.2	Evaluering af algoritmer	99
17	Konklusion.....	102
18	Perspektivering	104
19	Bilag	106
20	Referencer	107
20.1	Bibliografi	107
20.2	Billedhenvisning.....	109

1 Introduktion

Som computere bliver en markant mere integreret del af arkitekt- og ingeniørfaget, bliver computer-genererede designs og løsninger en stadig større del af arbejdsgangen i ingeniørvirksomheder verden over. Dette foregår helt ned i meget lille skala med automatiserede excel-ark specifikt designet til en enkelt problemstilling, til krydsplatform automatiseret ingeniørarbejde helt ud i dokumentationsarbejdet. De mange nye muligheder og løsninger betyder et ocean af nye begreber og teorier, samt løsningsmuligheder. I en branche som ikke har ændret sig grundlæggende i et par hundrede år siden Euler-Bernoulli ligningerne, kan de mange muligheder synes overvældende. Dog er de fleste moderne danske ingeniørvirksomheder i større eller mindre grad i gang med at vænne sig til at have BIM og parametrisme som en del af deres dagligdag. Der er nemlig penge at hente i form af effektivitet, og i nogle tilfælde er det endda et krav fra bygherrer.

Dette projekt lægger sig i forlængelse af denne udvikling. Her undersøges det nye paradigme hvor ingeniøren er en del af den tidlige designfase og formgivning med computational design som formgivningsredskab. Projektet vil tage udgangspunkt i afstivende gitterkonstruktioner, specifikt i forbindelse med højhusbyggerier. Dette fokus er valgt, da gitterkonstruktioner er enormt lovende som optimeringsmedium og derved tillader generering af store løsningsrum, hvilket kan give bedre løsning i den indledende designfase. Derudover behandler rapporten også hvordan man med computational design kan effektivisere en designproces, så den ikke længere skal være skarpt inddelt mellem arkitektur og struktur, men at begge parter kan arbejde sammen i et kombineret workflow.

2 Problemformulering

1. Generer og vurder forskellige parametre til optimering af stålgitre

En række optimeringsmodeller opstilles og optimeres med algoritmerne BESO og GA. Resultaterne af optimeringerne bliver vurderet og sammenlignet ved hjælp af tre vægtede kriterier i en kriterieanalyse så to parametre kan udvælges til resten af rapporten.

2. Benyt viden om optimeringer til design af afstivende system i højhus

På baggrund af en case designes et afstivende stålgitter til et højhus. Her inkorporeres viden fra rapportens første del om optimeringer.

Højhuset designes både fra et ingeniørfagligt og et arkitektfagligt udgangspunkt. Der benyttes randbetingelser fra Aarhus City Tower til at designe optimeringskriterier og til at foretage arkitektoniske analyser.

3. Evaluér optimeringsproces og perspektiver til almindelig projektering

På baggrund af arbejdet foretaget i de foregående afsnit opsummeres pointer vedrørende arbejdet med optimeringer igennem rapporten, så der dannes en forståelse for hvordan et design baseret på optimeringer vil skulle indgå i et almindeligt projekteringsprojekt.

Fokus og afgrænsning

På trods af at lægge i naturlig forlængelse af rapporten behandles følgende emner IKKE:

- Højhusets lodrette system
- Design af afstivende dækskiver
- Design af højhusets indre arkitektur og konstruktioner
- Udvidet projektering af gitter med udmattelse, temperaturpåvirkning mm.
- Brug af MOGA-optimeringer

3 Metode

Videnskabsteoretisk metode

Rapporten er opbygget til at simulere en designproces inddelt i flere faser, som følger hinanden lineært.

Rapporten er derfor ikke direkte bygget på klassisk eksperimentel naturvidenskabelig metode, med en bundet hypotese og bekræftelse eller forkastelse heraf. Et designprojekt kan sjældent underlægges denne metode.

Designmetode

Projektet tager sit udgangspunkt i algoritmenerne *bi-directional-structural-optimization* (BESO) og *genetic algorithm* (GA), disse algoritmer vil danne grundlaget for gitterdesign som bliver anvendt i projektet.

Algortimerne virker sammen med *finite element analysis* (FEA) som er den anerkendte metode for behandling af statik i computeren. FEA ligger til grund for størstedelen af rapportens kvantitative analyser. Databehandling og følgende kvantitative analyser benytter data fra optimeringerne og FEA-resultater.

Vurderingsmetode

Der benyttes en kombineret ingeniør- og arkitektfaglig metode til at evaluere løsninger. Her benyttes både FEA-baseret kvantitativ metode samt kvalitativ metode i form af arkitektoniske vurderinger. Til slut bliver hele processen vurderet i et meta-afsnit, som vurderer hele processen som helhed kvalitativt

4 Teori

4.1 Computational design

Siden opfindelsen af finite-element teori, har computere i stigende grad været en del af ingeniørarbejdet. Computeren har nemlig en lang række fordele i forhold til mennesket.

Nogle af de store fordele computeren har i forhold til mennesket er at den:

- Kan foretage millioner af præcise beregninger i sekundet
- Kan gentage den samme proces mange gange uden fejl
- Kan kommunikere 24 timer i døgnet gennem internettet med andre systemer
- Kan huske og hurtigt fremkalde enorme biblioteker af data

Hver af disse egenskaber giver uanede muligheder inden for ingeniørarbejdet, især hvis egenskaberne kombineres. Dette har mundet ud en lang række nye emner inden for hovedområdet *computational design*. Hvoraf de mest kendte og benyttede er 2D og 3D CAD-programmerne, FE-programmer samt BIM-implementering. Disse koncepter er dog langt fra det fulde potentiale for hvad computere kan hjælpe ingeniører med. Nye områder er i løbet af de seneste par år begyndt at springe frem baseret på ny software, nyere research eller villighed blandt bygherrer til at implementere nye metoder.

4.2 Strukturel form finding



Figur 4-1 Giza Pyramiderne, Eiffeltårnet, Sagrada familia model, Frei Otto model. [1],[2],[3],[4]

Form og strukturel funktion har altid hængt sammen, dette gælder for alle byggerier, da alle byggerier er underlagt de samme kræfter. Giza pyramiderne fik deres ikoniske form, da dette tillod oldtidens bygmestre at opnå en størrelse aldrig set før. Ikke alle konstruktioner er dog så simple og klare som pyramiderne, og det er ikke altid formålet at bygge så stort som muligt. Der har derfor altid været kamp mellem struktur og arkitektonisk udtryk, mellem ingeniøren og arkitekten. Det behøver dog ikke være sådan. Siden oplysningstidens teknologioptimisme, forekommer en række pragteksempler, hvor strukturen er blevet værktøj for arkitekturen. Dette ses i teknologioptimistiske værker som Eiffeltårnet og det nedbrændte Crystal Palace der begge tager udgangspunkt i fornuftens. Mere dramatisk er pragteksemplet Sagrada Familia, som kombinerede fysik, arkitektur og det meget moderne parametrisme, men

uden den snusfornuft som ellers var kendetegnet for tidens ingeniørskabte design. Siden har den arkitektoniske modernisme og Bauhaus bevægelsen skabt grobund og paradigme for sammensmelting af struktur og form, en udvikling som fortsatte gennem det 20. århundrede, hvor arkitekter som Frei Otto og hans eksperimentbaserede modeller var med til at åbne op for nye former baseret på ingeniørfaglighed. Sammen med udviklingen af computeren fortsatte disse tanker ind i det nye årtusinde, hvor *computational design* nu har muliggjort nye metoder til at finde form baseret på funktion.

4.3 Strukturel optimering

En af metoderne, som vender form findingsprocessen på hovedet er strukturel optimering, hvor form findes efter en optimering af strukturelle egenskaber.

Der har altid været et ønske og stolthed blandt ingeniører om at finde det optimale design, helt tilbage til Michells analytiske optimal-geometri i 1904. Disse problemstillinger blev i lang tid angrebet fra en analytisk indgangsvinkel, denne indgangsvinkel falder dog hurtigt til jorden, når problemstillingerne bliver for komplekse. I 90'erne begyndte strukturelle optimerings-algoritmer eller topologi-optimering at springe frem blandt maskiningeniører i luftfartsindustrien, hvor strukturel optimering er en nødvendighed.

Mange maskiningeniører tog hurtigt metoden til sig, da mange produkter serieproduceres på samlebånd, hvilket tillader højere grad af tilpasning og optimering. Metoden har dog været sværere at overføre til byggeriet, da geometrien ofte er mere låst af randbetingelser, og en løsning bliver i mange tilfælde kun opført en enkelt gang, hvilket mindsker efterspørgslen på en optimal strukturel løsning.

Blandt de første projekter til at benytte den algoritmiske tilgang var Akutgawa River Side Station i Japan i 2004 som benyttede sig af en generativ algoritme.



Figur 4-2 Akutgawa River Side Station. [5]

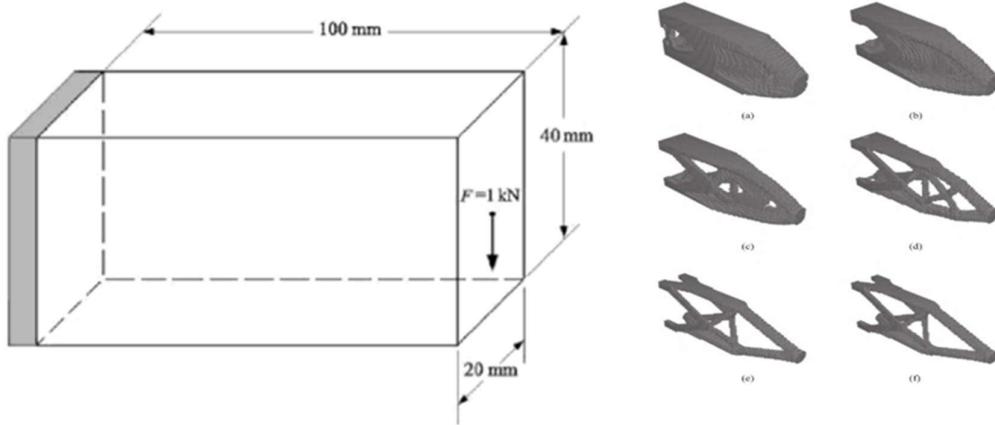
Siden har blandt andet Florence New Station i Italien og Sagrada Familia i Spanien gjort brug af metoden i større og mindre skala. (Huang et al., 2010)

Generativ design metode behandler et designrum og prøver at finde en optimal struktur inden for designrummet. Det gøres ved hjælp af en algoritme som gentager sig selv i mange iterationer. Der findes algoritmer som kan optimere for alle former for geometriske betingelser, om det er lysindfald, isoleringsevne eller som i denne rapport; strukturelle egenskaber.

Alternativt til et generativt design anvendes en række parametre i en eksisterende geometri optimeres oftest ved hjælp af en genetisk algoritme (GA) baseret på evolutions-princippet.

Stokastiske optimeringsproblemer har en lang række indgangsvinkler, hvoraf de fleste baseres på en variation af de genetiske algoritmer.

4.4 Generativt design med BESO-algoritme



Figur 4-3 Topologisk optimering. [6]

For at opnå en mere optimal geometri og derved spare materiale kan man benytte sig af topologiske optimeringsalgoritmer.

Topologisk optimering er en matematisk metode, som kan optimere en struktur ud fra et designrum, en række randbetegnelser og fysiske love.

Normale optimeringsproblemer bliver typisk beskrevet som et finite element problem defineret som (Huang et al., 2010):

$$\text{Minimize} \quad C = \frac{1}{2} f^t u \quad [4-1]$$

$$\text{Subject to} \quad V^* - \sum_{i=1}^n V_i x_i = 0 \quad [4-2]$$

Hvor f er lastvektoren, u er deformationsvektoren, hvilket giver deformationsenergien i strukturen C .

V^* er volumefraction, altså hvor stor en del af materialet som skal forblive når optimeringen er slut. V_i er volumen af et element, mens x_i har værdien 1 eller 0, fungerende som en "tænd/sluk" knap for det givne element.

En af de mest populære nuværende topologisk optimerings-algoritme er Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) først foreslået i 1998. (Xie et al., 1998) Algoritmen er en videreudvikling af ESO-algoritmen fra 1992. (Xie et al., 1992)

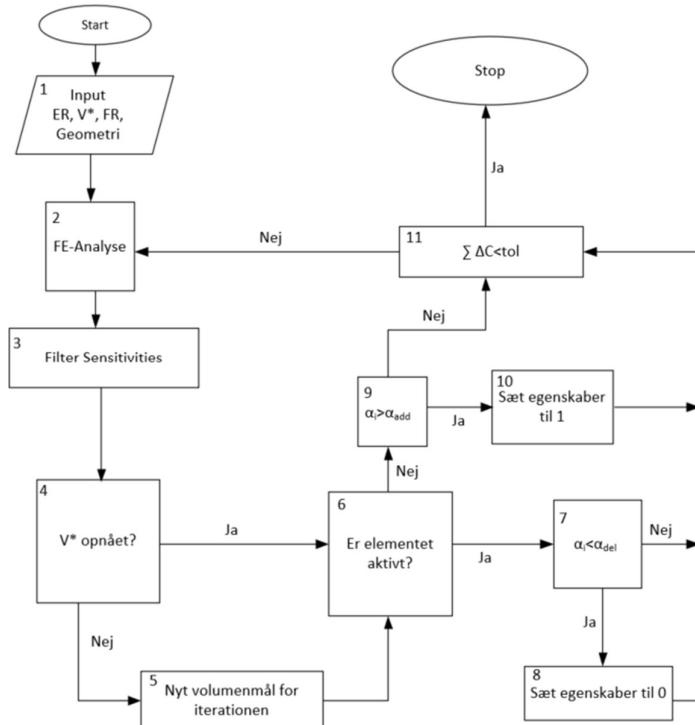
ESO/BESO algoritmens indgangsvinkel er en smule anderledes.

Her betragtes et “sensitivity number” som beskriver hvor stor ændringen i deformationsenergi hvis det betragtede element fjernes eller tilføjes. (Huang et al., 2010)

$$\alpha_i^e = \Delta C_i = \frac{1}{2} u_i^T K_i u_i \quad (\text{Chu et al., 1996}) \quad [4-3]$$

Hvor K er det i'te elements stivhedsmatrice.

BESO kan som de fleste andre algoritmer bedst forklares gennem et flowchart. Mange BESO-algoritmer varierer en smule i deres opbygning, så den følgende flowchart skal ses som et eksempel. Opbygningen vist følger (Aremu et al., 2010)



Figur 4-4 BESO flowchart [7]

- Input parametre vælges
- Evolution Rate (ER) beskriver hvor stor en andel af det samlede antal elementer som ændres per iteration

- Volume Fraction (V^*) beskriver hvor stor en andel af det samlede materiale der ønskes fjernet når optimeringen er slut. Kaldes også Target Ratio (TR) i denne rapport.
- Filter Radius (FR) skal sikre at der ikke opnås skakbræt-lignende topologier (checkerboard solutions) for optimering af mesh. Dette sikres ved at tage gennemsnit af elementer inden for en given radius
- Geometri bruges typisk fine mesh i 2d eller 3d, hver inddeling i mesh'et bliver betragtet som et element. I denne rapport vil algoritmen hovedsageligt blive brugt til at undersøge stangsystemer, hvor hver stang betragtes som et individuelt element.
- 2 - Finite Element Analyse: Systemet analyseres for at finde sensitivity i alle elementer.
- 3 - Filter sensitivities: Sensitiviteter bliver udglattet over områder med radius FR
- 5- Ny Volumen: Volumen for den næste iteration bliver bestemt ud fra ER og volumen fra den tidligere iteration. Antallet af elementer der skal fjernes bestemmes på baggrund af dette
- 7 og 8 - Materiale fjernes: Hvis sensitiviteten i et givent element er lavere end en værdi defineret i skridt 5, fjernes materiale, ved at gange alle materialeegenskaber med 0
- 9 og 10 Materiale tilføjes: Hvis sensitiviteten i et givent element er højere end en værdi defineret i skridt 5, tilføjes materiale, ved at gange alle materialeegenskaber med 1.
- 11 Er optimeringen Konvergeret?

Hvis den samlede ændring af deformationsenergi i forhold til den tidligere iteration er mindre en grænseværdi som defineres betragtes konstruktionen som konvergeret, hvilket slutter analysen. Alternativt startes næste iteration af algoritmen med en ny FE

analyse og nye sensitiviteter

Langt størstedelen af BESO-algoritmerne fokuserer på mesh, dette er nyttigt da det kan skabe en *pseudo-kontinuær* kompleks geometri som f.eks. kan laserskæres eller 3D printes. Denne indgangsvinkel er dog sværere at implementere i byggeriet, og derfor kan det være nødvendigt at overføre algoritmen til et stangsystem. (Preisinger, 2011)

Fordele

Algoritmen kan producere ekstremt effektive strukturer inden for hvilken som helst randbetingelse. Algoritmen er mere alsidig end andre ESO-algoritmer til generation af geometri (Xie et.al, 2016), og er derfor sprunget flere variationer af algoritmen op i løbet af de seneste år, både til brug i research og kommersielt.

Ulemper

Geometrier som produkt af algoritmen er meget specialiserede for de opstillede randbetingelser, dette kan være et problem i en kompleks verden, hvor randbetingelser kan ændre sig over tid. Specielt forskellige kritiske lasttilfælde er svært at behandle i algoritmen, da der ofte ønskes en konstruktion, som har en vis grad af generalitet.

Dette kan løses som designer ved at opstille de korrekte randbetingelser.

Metoden har traditionelt svært ved at indgå i et designforløb da algoritmen tidligere har været implementeret ved hjælp af manuel kode, uden brugervenlige user interfaces, som tillader den almene ingeniører og arkitekter at angribe optimeringsproblemstillingerne. Derudover kræver det en specialiseret viden og erfaring at håndtere randbetingelserne på en fornuftig måde.

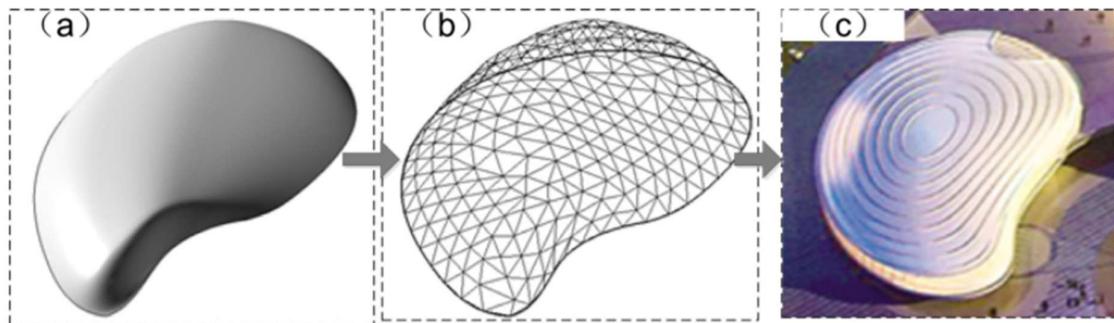
I mange tilfælde vil løsningerne være geometrisk komplekse, hvilket sænker løsningernes bygbarhed, hvilket kan gøre de algoritmiske løsninger dyrere, på trods af en større effektivitet.

En anden ulempe er at det er svært at evaluere instabilitetsproblemer i analysen.

4.5 Gitter-optimering med genetiske algoritmer (GA)

Som computerkraften blev bedre i løbet af 00'erne betød det at komplekse 3D volumen kunne modellers for hver en tegnestue verden over. Som strukturel ingeniør er det vores opgave at gøre disse volumen mulige på en fornuftig måde. Til dette formål er en af de mest brugte metoder brugen af en *grid-shell* (gitter skal), så enhver hvert volumens overflade kan blive diskretiseret til simple stænger i et gitter som undersøgt af Pete

Winslow. (Winslow et al., 2008) Metoden for underinddeling af den komplekse flade til et 2D gitter er essentielt for gitterets udseende samt strukturelle egenskaber



Figur 4-5 Free-form grid Daishan Sports Stadium, Daishan City, China [8]

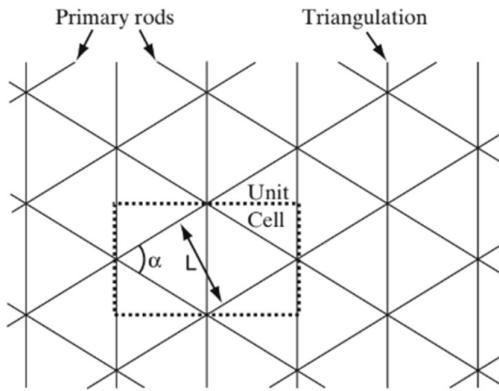
Med udviklingen af nyere parametrisk software er underinddeling af en volumen til et mesh af stænger blevet nemt tilgængeligt uden brug af kompleks matematik og viden om NURBS-geometri. Denne metode er blevet taget i brug i talrige succesfulde projekter og er generelt den mest benyttede metode, når komplekse overflader skal behandles.



Figur 4-6 Gitterskal British museum [9]

Dog er det svært intuitivt at gennemskue, hvorledes den valgte opdeling er optimal eller tæt på optimal. For at optimere løsningen, er det derfor nødvendigt at foretage en parametrisk analyse, altså en analyse af hvordan strukturens effektivitet ændrer sig, som geometrien ændrer sig.

I 2009 foreslår Winslow at vinklen mellem stænger som et godt parameter at optimere. (Winslow et al., 2009)



Figur 4-7 Optimerings parametre for grid [10]

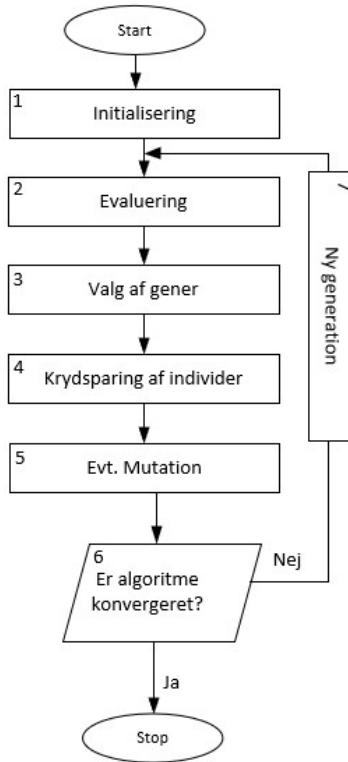
Til at foretage sådan en parametrisk analyse benyttes ofte en genetisk algoritme (GA).

Disse typer algoritmer har været kendt siden 1960'erne og har været brugt i en lang række forskellige sammenhænge i alt fra computer science til finans. Men er i den seneste tid vundet stærkt frem i den designende del af byggeriet.

De genetiske algoritmer imiterer den evolutionære proces ved at producere en generation bestående af en række individer med varierende parametre eller gener. Hele population evalueres gennem en fitness funktion, som er et succeskriterie for optimeringen.

Derefter vælges de bedste individer stokastisk (selv dårligere individer har en chance for at blive valgt, gode individer har dog en større chance) i generationen, deres gener (parametre) blandes, herefter kan man vælge også at mutere generne. En mutation er blot en tilfældig ændring af gener, så algoritmen fortsætter med at undersøge hele løsningrummet, blandet med generne fra de bedste individer.

Der kan nu laves en ny generation med de nye gener, og processen gentages indtil fitness funktionen konvergerer, et defineret antal generationer er produceret, eller at algoritmen stoppes manuelt.



Figur 4-8 Flowchart for genetisk algoritme

Essentielt i arbejdet med GA er valget af en fornuftigt fitness funktion. En god fitness funktion skal afspejle hvad man vil opnå i designet kogt ned til et enkelt tal, som helst varierer kontinuert med generne.

Multi-objective GA

Til tider ønsker man at optimere på flere funktioner, dette kan ske ved at kombinere flere forskellige udtryk ved at vægte værdier sammen eller ved brug af en numerisk straf ved ugunstige kombinationer af parametre. Et alternativ til at skulle skrive alle designkriterier ned til et enkelt tal er at benytte en multi-objective genetic algorithm eller MOGA, som kan optimere på flere forskellige fitness-funktioner på samme tid. Dette giver dog ikke en enkelt løsning af algoritmen, men mange løsninger, som illustrerer forskellige dele af løsningsrummet, hvor de enkelte fitness-funktioner er optimeret i forhold til hinanden. (Winslow et al., 2009) Denne metode har vundet indpas de seneste år, nu hvor flere brugervenlige redskaber er blevet tilgængelige.

Fordeler

GA-algoritmen er meget robust, da den kan bruges på alle typer parametre så længe de kan omformuleres til tal. Dette rækker langt ud over strukturel optimering.

Algoritmen kan nemt evaluere en stort antal parametre, hvor optimalløsningen kan være svær at finde uden brug af algoritmer

Algoritmen er allerede bredt udbredt og benyttet både i videnskaben og i erhvervslivet, og har derfor mange brugervenlige programmer som ikke kræver stor ekspertise for at benytte.

Ulemper

Analysen af hvert individ i en generation skal kunne skrives om til en fitness-funktion bestående af et enkelt tal. Algoritmens resultat bliver ikke bedre end dens fitness-funktion.

Det er umuligt at reproducere en optimering, da tilfældighederne ikke kan reproduceres.

Alle parametre skal kunne repræsenteres af et enkelt varierende tal, modsat BESO-algoritmen, hvor der arbejdes med geometri.

Algoritmen er stokastisk, så i komplekse analyser kan der være chance for kun at finde et lokalt maksimum, og det kan være svært at vurdere, om dette er det reelle maksimum for optimeringen.

4.6 GA vs. BESO

De to algoritmer adskiller sig markant i deres indgangsvinkel til optimering, da de kræver markant forskellige input. Det er op til designeren at afgøre, hvilken af algoritmerne der ønskes. Valget er dog typisk meget klart når opgavens type undersøges.

BESO kræver typisk meget specifikke tilfælde med mange elementer, som kan fjernes og tilføjes for at opnå en fornuftig måde, typisk i situationer hvor der endnu ikke er en defineret geometri og blot randbetingelser. GA kan bruges på næsten alle problemstillinger, men har meget svært ved at behandle geometri på samme måde som BESO, der indbygget tager udgangspunkt i en FE analyse.

Derfor kan BESO normalt kun bruges tidligt i form findingsfasen for at bestemme geometri ud fra en topologisk optimering. GA er meget mere alsidig, da det udoover form finding og strukturel optimering kan bruges til at optimere parametre i eksisterende geometri.

4.7 Generel højhuse teori

Som befolkningstætheden i byer bliver større, skyder byggeriet i byen op imod himlen, så bygherrer vil få flest mulige kvadratmeter ud af deres grunde. Dette giver en række ingeniormæssige udfordringer, hvis løsning muliggør stadig højere og højere byggerier.

Lodret last

Den lodrette last virker ikke meget anderledes end et normalt byggeri, dog giver et større antal etager en større total last, hvilket i sidste ende resulterer i større eller flere søjler. Ofte optages den lodrette last i en forskydningskerne og søjler i bygningens periferi.

Vandret last

Den store forskel når der bygges i højden er den vandrette last, som har markant større konsekvenser når udkragningen bliver længere. Den vandrette last udgøres af vindlast og seismisk last, denne rapport vil dog kun fokusere på vindlasten, da seismisk last typisk ikke er lige så kritisk for højhuse i Danmark.

Da vindlasten har øget betydning, og da højhuse typisk er dyre byggerier, øges kompleksiteten af betragtningerne markant i forhold til husbyggeri. Dog er Eurocode stadig gældende op til 200m, og præsentere en procedural metode til bestemmelse af laster og konstruktions-faktorer.

Udover en simpel ULS betragtning er vindlast hovedsageligt kritisk for SLS-betragtninger, som total udbøjning og udbøjning over en enkelt etage ved lokalt virkende vind, dette er vigtig for at undgå visuelle brud i sekundære elementer samt for at undgå en stor excentricitet, hvilket kan give en kritisk 2. ordens lodret last.

Derudover kan svingninger ved en dynamisk betragtning være et problem for høje og slanke bygninger, disse svingninger forårsager en acceleration, hvilket kan være meget ubehageligt for brugere af bygningen. Hvis svingningerne falder sammen med bygningens egenfrekvens kan farlige resonanser forekomme.

Generelt betragtes den dynamiske vindpåvirkning, som afhænger af en række parametre.

- Området omkring bygningen, dens typografi, bygningstæthed og geografiske placering er med til at bestemme den vindhastighed som påvirker bygningen

- Afhængigt af bygningsaerodynamiske egenskaber, skaber disse vindhastigheder et tryk på bygningen. Dette definerer lasten på bygningen.
- Bygningens strukturelle egenskaber bestemmer, hvordan bygningen reagerer på denne påvirkning. Bygningen resonerer i nogle frekvenser, hvilket forstærker belastnings- og svingningsamplituden.

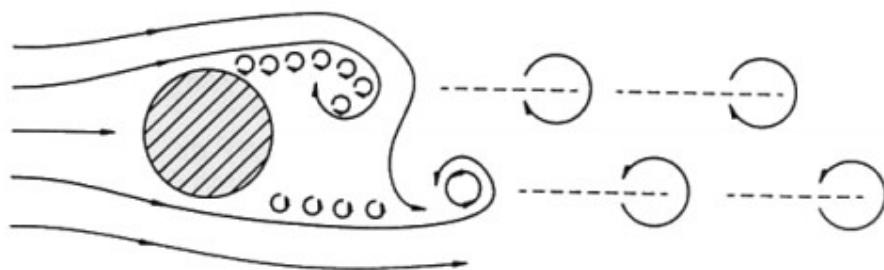
Hvert af disse tre skridt kan betragtes som spektrum, der alle matematisk foldes sammen, hvilket giver en samlet vindpåvirkning. (Smith and Coull, 1991)

I mange tilfælde vil det være nødvendigt at foretage et skaleret vindtunnelforsøg, for at få de rette geometriske faktorer, da Eurocode metoden ikke kan bestemme disse præcist. Dette skyldes den høje kompleksitet i væskedynamik, og de i mange tilfælde uforudsigeligt hvirveldannelser.

Hvirveldannelserne er specielt kritiske for højhuse, da fænomenet hvirvelafløsning (vortex shedding), kan forårsage stor dynamisk belastning vinkelret på vindretningen

Figur 4-9 Her forekommer der skiftevis en hvirvel på hver side af bygningen, så lastens retning skifter med et givent interval. Hvis frekvensen af denne falder sammen med bygningens fundamentale frekvens, kan der opstå en stor resonans.

Hvirvelafløsning hænger dog tæt sammen med bygningens geometri, og kan derfor løses i form af geometriske ændringer.



Figur 4-9 Skitse for hvirvelafløsning [11]

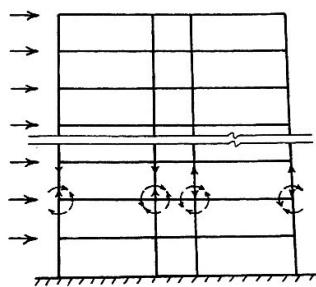
4.8 Strukturelle systemer i højhuse

For at føre de vandrette laster til fundament samt for at modvirke dynamiske belastninger kan en række forskellige løsninger tages i brug.

Rammesystem (Rigid Frame)

Rammesystemer i højhuse, bliver typisk lavet som søjele-bjælke rammer, der bliver samlet i momentstive samlinger. Stivheden i systemet afhænger af bøjningsstivheden i de forskellige elementer. Fordelen ved en bygning i et rammesystem er den rektangulære opbygning, der gør det nemt at placere døre og vinduer i facaden. Denne løsning er dog ikke længere økonomisk ved højere byggerier, da det vil kræve enorme og uøkonomiske dimensioner. Den højde ligger på omkring de 25 etage, hvor en etage er 3,3 m. (Smith and Coull, 1991)

Rammesystemer er gode i betonbyggerier hvor samlingerne mellem søjler og bjælker i beton nemt kan opnå en tilstrækkelig stivhed. Det kan også laves i stål, men der vil de momentstive samlinger hurtigt blive for store og dyre at lave. En anden af ulempene er at alt last skal føres ned gennem søjlerne og bjælkerne og derfor vil søjlerne i de nederste etager blive meget store i en høj bygning. Man kan dog kombinere rammesystemer med andre systemer og derved få et mere optimalt byggeri på over 25 etager.

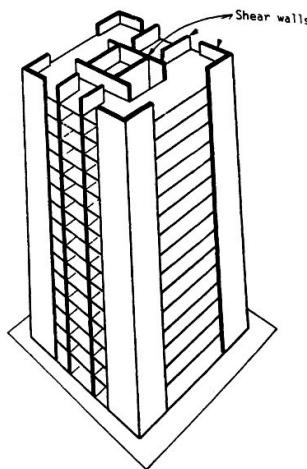


Figur 4-10 Rigid Frame [12]

Afstivende kerne (Shear core)

En af de mest brugte måder at opbygge et højhus er ved at have en eller flere stabiliserende kerner i konstruktionen. Konstruktionen er opbygget med en lodret bærende facade samt en lodret bærende og vandret stabiliserende kerne. Kernen vil oftest være opbygget i beton, hvor det bærende system i facaden, både kan være stål og betonkonstruktioner. Dette er en enormt god løsning til byggerier der er ens i udtrykket

og hvor der kan gå en uafbrudt kerne op gennem byggeriet. Til gengæld kan der i bygninger hvor der ikke er mulighed for en uafbrudt kerne, eller hvor bygningens form ikke gør det muligt at afstive med en kerne, vær brug for at kigge på andre løsninger. Det gode ved løsningen er at man ikke behøver at afstive i facaden og man kan derfor få en let og åben facade. Løsningen låser dog på indretningen bag, da der skal være en lukket kerne på alle etager.

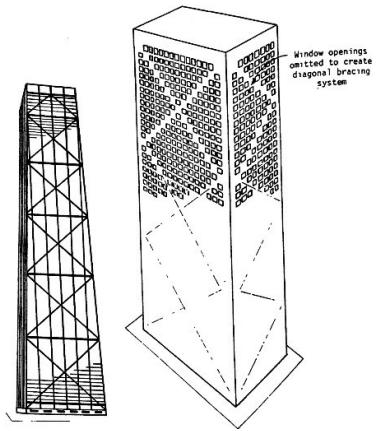


Figur 4-11 Shear wall [13]

Gittersystemer (Braced system)

I højhus konstruktioner, ser man også at der laves udvendige gittersystemer til at stabilisere konstruktionen. Ved at have et gitter udvendigt, gør man det unødvendigt at bruge indvendigt stabiliserende kerner. Det gør at man kan have store åbne rum indvendigt og stadig have en stabil bygning. Gitterkonstruktionen vil som oftest være udført i stål, da man der opnår den største stivhed i konstruktionen. Det smarte ved et udvendigt gitter er at man får en meget høj stivhed i konstruktionen og samtidig vil man kunne bruge færre søjler i facaden, da søjler og vægge i bygningen ikke længere skal kun stabilisere bygningen, men kun bære lodret. En af ulemperne ved et udvendigt gitter er at det er meget synligt og vil blokere for udsyn set indefra. Man kan ved at rykke gitterkonstruktionen ind bag en facade skjule gitteret mere udefra, hvis det er nødvendigt.

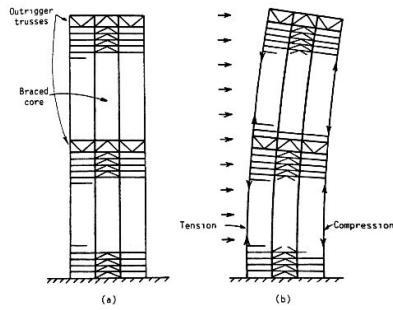
En gitterkonstruktion kan være oplagt til højhuskonstruktioner med udfordrende udformninger, for eksempel konstruktioner med skybridges, konstruktioner med hul igennem eller roterende konstruktioner. I disse tilfælde kan det være ligetil at forme et gitter efter konstruktionen.



Figur 4-12 Braced tube [14]

Outrigger-systemer

Et outrigger-system består af en centralet placeret kerne bestående af enten gitter eller vægge. Søjlerne i facade er forbundet med den afstivende kerne med en *outrigger*. En outrigger laves typisk som enten bjælker eller som gitterbjælker. På den måde bliver de ydre søjler sammensat med den indre kerne og derved aktiveret ved en vandret påvirkning. Bygningen bliver holdt stabil ved at outrigger-søjlerne virker som tryk og træk stænger, grundet søjlernes store afstand kan de nemmere danne et kraftpar.



Figur 4-13 Outrigger-system [15]

5 Analytisk model

I det næste afsnit vil modellen og metoden for undersøgelse af de parametriske optimeringer blive gennemgået.

Der udvælges en række optimeringsparametre og tilhørende optimeringsalgoritmer. Disse bliver testet med en standardiseret model, som bliver defineret i dette afsnit. Derefter bliver der udvalgt en optimeret gittergeometri fra hver optimeringsparameter, som bliver sammenlignet indbyrdes samt med en kontrolgeometri fra et kendt design. Disse bliver sammenlignet ved hjælp af en kriterieanalyse forklaret i Afsnit 6. Enkelte optimeringsparametre bliver udvalgt til videre behandling i et 3D case.

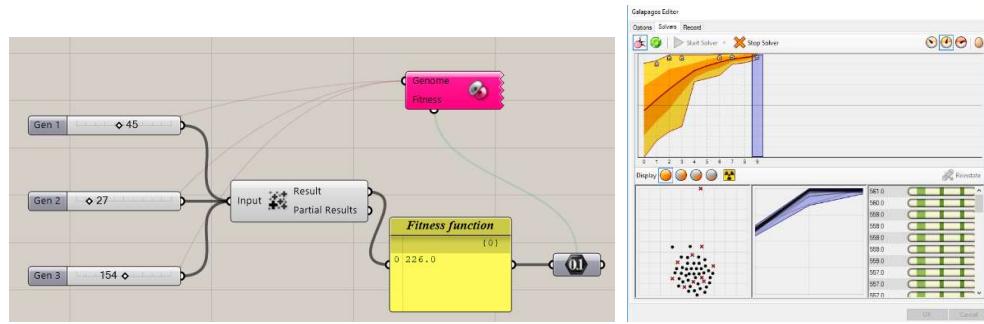
Der bliver foretaget to runder af optimeringer en med punktlast og helt fri geometrisk optimering og en forfinet model med trekantslast og delvist fastlåst geometri. Det er kun anden optimeringsrunde som bliver behandlet i dybden, og det er denne som sammenligningen kommer til at tage udgangspunkt i. Den første optimeringsrunde bliver dog stadig kort præsenteret, da resultaterne blev meget anderledes.

Optimeringen tager udgangspunkt i randbetingelserne i de følgende afsnit som sammen definerer testen. Optimeringsparametrene bliver redegjort i Afsnit 7.

5.1 Software og algoritmer

Optimeringerne behandles parametrisk i Grasshopper, som er et visuelt programeringsplug-in til CAD-programmet Rhino. I Grasshopper benyttes der en lang række free-ware plug-ins samt Karamba3D som er et FE redskab med indbyggede BESO-algoritmer for bjælke- og plademodeller. Karamba3D vil blive brugt igennem rapporten til at illustrere snitkræfter i illustrationer. I gitterkonstruktionerne symboliseres tryk med rød og træk med blå i Karamba3D.

Derudover har Grasshopper en indbygget genetisk algoritme: "Galapagos". Denne kan optimere en enkelt fitness-funktion med et hvilket som helst antal parametre.

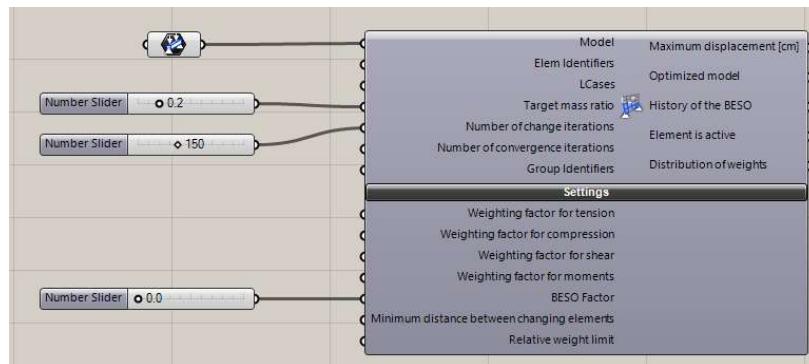


Figur 5-1 Eksempel på Galapagos script

Til tider hjælpes algoritmen på vej ved at indstille manuelle startindstillinger, eller ved at finjustere parametrene efter optimeringen er konvergeret. Dette giver et hurtigere workflow og finder ofte bedre løsninger end en ren algoritmisk betragtning.

Der findes en række free-ware alternativer til Galapagos, som også tilbyder MOGA kapaciteter, dog vurderes Galapagos tilstrækkelig til denne opgave.

Derudover benyttes Karamba3D komponentet "BESO for beams"



Figur 5-2 Karambas BESO for beams komponent

"Target mass ratio" svarende til *volume fraction* forklaret i Afsnit 4.4

"Number of change iterations" antal skridt, hvor der fjernes og tilføjes masse

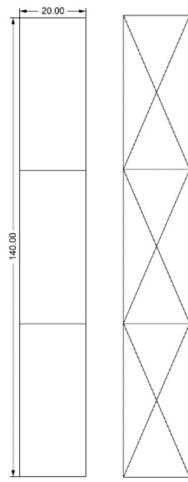
"BESO Factor" hvor mange stænger der tilføjes per skridt, kontra hvor mange der fjernes.

Disse værktøjer er valgt, da de er fleksible og effektive både ved generering af geometri og ved optimeringer og analyser. Databehandling foretages i Excel, ved at optage data fra optimeringerne og indsætte i Excel.

5.2 Geometri

Geometrien er defineret ud fra to hovedgeometrier; en ramme, som ikke kan optimeres eller fjernes, samt et gitter genereret fra justerbare parametre. Rammen simulerer andre bygningselementer, som den optimerede geometri skal virke i samspil med, herunder vandrette dækskiver, som kan fordele laster uanset lastretningen, enkelte optimeringen benytter dog ikke disse simulerede dækskiver.

Gitterets form bliver optimeret og ud fra de definerede randbetingelser.



Figur 5-3 Ramme (tv) Ramme med optimerbar geometri (th)

Rammen har en bredde på 20 m og en højde på 140 m. Alle tværsnit i strukturen er ens svarende til et 300x200x20 RHS-profil. En tværsnitsoptimering bliver ikke betragtet.

Der benyttes to typer understøtninger i geometrierne.

Alle knuder som møder fundament bliver simpelt understøttet i x,y,z

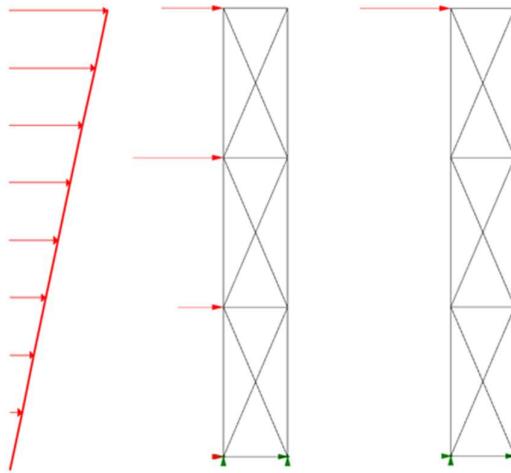
Restende knuder bliver understøttet i y-retning, da evt. 3D instabiliteter derved elimineres.

5.3 Laster

I første version af optimeringerne blev der **påført** en stor vandret punktlast i toppen af gitteret.

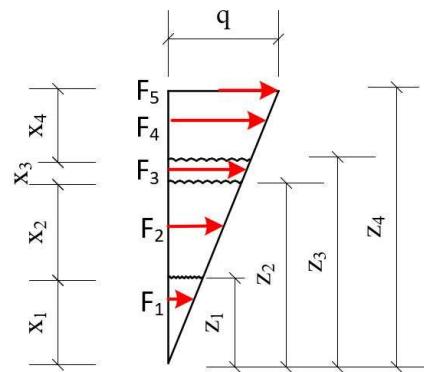
For at holde optimeringen mere virkelighedstro bliver lasten i anden version ændret så det ligner en trekantslast fordelt ud på samtlige knuder. På den måde kommer lasten til at virke mere tro mod en ægte vindsituation. Lastens størrelse er ikke relevant i

optimeringen, da der er linearitet mellem last og udbøjning. I begge tilfælde benyttes en total last på 100kN.



Figur 5-4 Trekantslast(tv) og Punktlast(th)

Trekantslasten bliver diskretiseret som punktlaster i gitterets møder med rammen. Størrelsen af punktlasterne bliver udregnet ud fra et integrale der diskretiserer lasten ud i de knuder der ligger på vindretnings siden.



Figur 5-5 Diskretisering af trekantslast

Hvor z_i er en den i 'te knudes højde, x_i er udstrækningen af en knudes lastoplade. q er lastens intensitet i toppen af bygningen, således at summen af trekantslasten er 100 kN
Ud fra trekantsindelingen over er følgende integrale stillet op:

$$F_i = \frac{q}{h} \cdot \int_{z_{i-1} + \frac{x_i}{2}}^{z_i + x_{i+1}} x \cdot dx \quad [5-1]$$

Denne betragtning er ikke 100% korrekt, men afvigelsen mellem det fungerende moment i strukturen og det reelle moment ligger under 3%, hvilket er tilstrækkeligt lavt for denne type optimering. For at sikre at konstruktionerne analyseres i den mest kritiske retning evalueres udbøjningen for både en positiv og negativ vindretning.

5.4 Efterbehandling

Når algoritmen har optimeret gittergeometrien, analyseres den ved brug af Grasshopper plug-in Karamba3D. Efter konstruktionen er analyseret af Karamba3D er der opstillet et effektivitetsparameter som de forskellige gittersystemer kan sammenlignes ud fra. For at kunne analysere på de forskellige modeller og algoritmer bliver alt relevant data optaget i Grasshopper til databehandling Excel og evalueret baseret på den opstillede kriterieanalyse.

Verificering af modellen

For at sikre at modellen opfører sig som forventet bliver **udbøjningen i en udvalgt model** eftervist ved en håndberegning baseret på virtuelt arbejde. Beregningen kan findes i Bilag 4.A.

6 Kriterieanalyse

Når de forskellige gitterdesigns er optimeret, skal der fortages en sammenligning for at vurdere dem. For at kunne foretage denne sammenligning gives en karakter til hvert design i en række kategorier, som derefter bliver vægtet forskelligt og summeret til en samlet karakter.

Målet er ikke nødvendigvis at finde det bedst strukturelle gitter, men det bedste gitter for bygningen.

Alle kategorier bedømmes 1-5

6.1 Strukturel Effektivitet

Dette parameter vægtes 100%

Ved hjælp af FE analyse evalueres effektiviteten som stivhed per vægt.

$$\eta = \frac{F}{\delta} \cdot \frac{W}{\Sigma W} \quad [6-1]$$

Denne værdi kan kun sammenligne gitre med samme fordeling af last. En konstruktion med dobbelt effektivitet vil kunne opnå en materialebesparelse på 50%.

Den strukturelle effektivitet bedømmes udelukkende ud fra dette tal. Til sammenligning er den strukturelle effektivit af gitteret i det kendte design "original" $\eta = 1.433 \cdot 10^{-6} \frac{kN}{kg \cdot m}$

En løsning med samme effektivitet som kontrolgitteret får karakteren 3. Alle effektiviteter igennem rapporten benytter enheden $10^{-6} \frac{kN}{kg \cdot m}$

6.2 Design

Dette parameter vægtes 70%

Der foretages en simpel kvalitativ analyse af hvert gitter.

Analysen skal tage stilling og give karakter på baggrund af følgende ting:

Æstetik

Hvordan spiller gitteret sammen med bygnings generelle udtryk. Skal bygning/kontekst bruge et kaotisk gitter, rytmisk gitter, stor/lille maskestørrelse osv.

Lysindfald

Har bygningen brug for et stort eller lavt lysindfald

Pladskrav

Hvis der benyttes et internt gitter, hvor stor del af gulvarealet forsvinder ved installation af gitteret

Forstyrrelse af sekundær aktivitet

Er der specifikke områder af byggeriet som kræver specielt stort udsyn og derfor kræver færre stænger.

De fleste af disse analyser kan ikke evalueres for 2d eksemplerne uden kontekst i en rigtig case, men vælges alligevel inddraget, da den samme metode bruges senere i projektet.

6.3 Bygbarhed

Dette parameter vægtes 60%

For at evaluere bygbarheden af løsninger kan analyser af følgende kvantiteter benyttes

- Antal elementer
- Antal unikke elementer
- Antal samlinger
- Antal unikke samlinger
- Moduliserbare gentagelser

En løsning med samme bygbarhed som kontrolgitteret får karakteren 5

Økonomi er ikke et parameter, da denne allerede indgår skjult i strukturel effektivitet samt bygbarhed.

Miljøpåvirkning er ikke et parameter, da dette allerede indgår skjult under design og strukturel effektivitet.

7 Præsentation af optimeringsparametre

I projektet bliver der arbejdet med forskellige 2D-modeller, der sammenlignes efter den opstillede kriterieanalyse. Der er valgt at undersøge bredt og evaluere mange forskellige optimeringsparametre da vi ikke umiddelbart kan gennemskue hvilket parameter som er det bedste.

7.1 Original

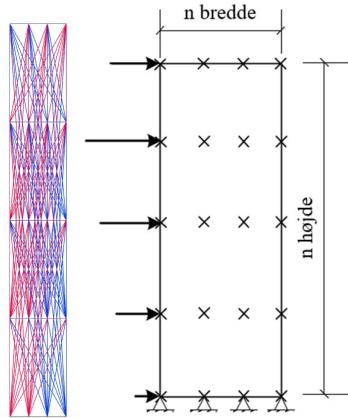


Figur 7-1 Original model - John Hancock bygningen i Chicago [16]

Modellen med navnet “Original” er ikke en model der optimeres på, men et kendt gitterdesign, der bruges til sammenligningen af de forskellige designs. Et kendt design benyttes for at give kontekst til løsninger fundet igennem optimering. Specielt effektivitetsparametret kan nemt sammenlignes.

Denne type design er tidligere blevet brugt i byggerier i alle størrelser og endda større end de dimensioner, som udforskes i denne rapport. På billedet ses det nok mest kendte eksempel på brug af et X-gitter i højhuse, nemlig John Hancock Center i Chicago.

7.2 Interconnected



Figur 7-2 Interconnected

I modellen "Interconnected" defineres en række punkter, som hver især forbindes med alle andre punkter, hvilket danner et net af alle mulige gittergeometrier. Dette passer godt til BESO-algoritmen, da løsningsrummet i gittergeometrien er bredt nok til at algoritmen kan producere fornuftige resultater.

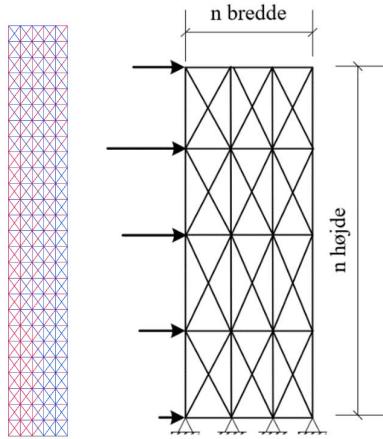
I denne model vælges $n \text{ bredde}=3$ og $n \text{ højde} = 5$, et så højt tal som muligt at foretrække, da det giver flere løsningsmuligheder, dog er man begrænset af computerkraft, da BESO skal igennem mange iterationer for en optimering og antallet af stænger øges eksponentielt for hver yderligere række punkter.

Derudover fjernes stænger som er længere end 139m, hvilket gav bedre resultater.

Optimeringsmuligheder:

- BESO

7.3 Rammer



Figur 7-3 Rammer

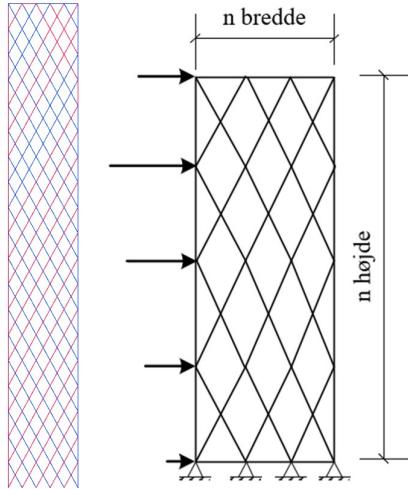
“Rammer” bliver diskretiseret af en række firkantede kasser, som bliver underinddelt af diagonaler. Dette er et standarddesign svarende til en parametrering af gitteret i ”original”. Hvilket gør modellen velegnet til optimering med Galapagos. Hvis et tilstrækkeligt højt antal elementer benyttes, vil BESO også være velegnet till optimering.

Der er mulighed for at benytte BESO på alle elementer, eller blot på diagonalerne.

Optimeringsmuligheder:

- Galapagos
 - o N højde
 - o N bredde
- BESO
 - o Alle elementer
 - o Diagonaler

7.4 Skråstænger



Figur 7-4 Skråstænger

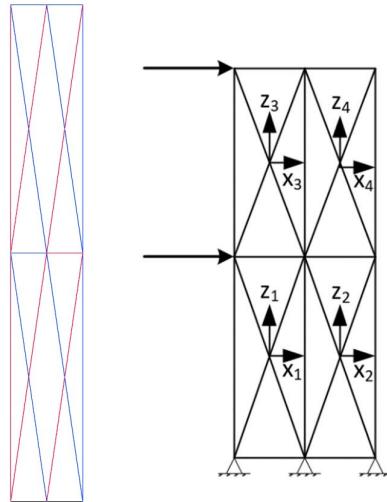
”Skråstænger” er en model udelukkende bestående af diagonaler og derfor ingen vandrette eller lodrette inddelinger. Dette parameter er en videreudvikling af ”Rammer” uden de vandrette elementer. Dette tillader firkantede gitterceller, hvilket kan betyde et bedre lysindfald i bygningen samt enklere gittergeometri.

Modellen afhænger af to parametre: antal knuder i højden og antal knuder i bredden. Modellen er ligesom ”Rammer” velegnet til optimering med Galapagos, dog kan BESO også benyttes ved et tilstrækkeligt antal stænger.

Optimeringsmuligheder:

- Galapagos
 - o N højde
 - o N bredde
- BESO

7.5 Node Move



Figur 7-5 Node Move

”Node Move” er en model bestående af 4 punkter, som er forbundet med de forskellige hjørner.

I ”Node Move” kan, som navnet hentyder, ethvert punkt bevæge sig frit rundt i deres egne kvadranter.

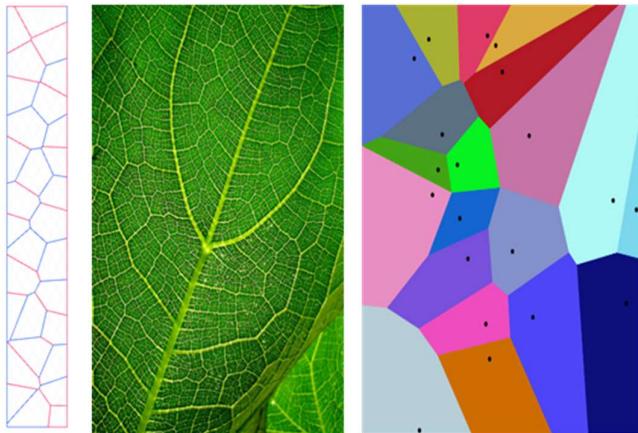
Dette gør den interessant at optimere med Galapagos, som grundet opbygningen har 8 parametre at optimere på, nemlig x og z koordinaten for hvert punkt. De mange parametre kan nemlig resultere ud i et design som ikke blev forventet.

Modellen kan udvides til flere eller færre punkter afhængigt af hvilket udtryk man ønsker.

Optimeringsmuligheder:

- Galapagos
 - o Z placering for hvert punkt
 - o X placering for hvert punkt

7.6 Voronoi



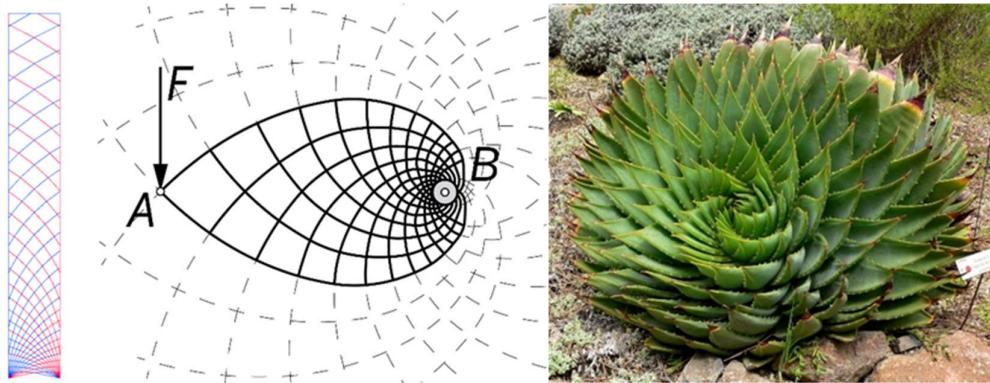
Figur 7-6 Voronoi – Voronoi i naturen - Voronoi diagram [17],[18]

“Voronoi” er baseret på Voronoi-diagrammet som er et geometrisk princip fundet i naturen. En vilkårlig flade fyldes med tilfældigt placerede punkter. Hørende til hvert enkelt punkt er al materiale som er tættest til netop dette punkt **Figur 7-6**. Dette materiale danner en “celle”, som er omkranset af stænger. Dette imiterer hvordan celler vokser fra en kerne i naturen.

Dette parameter er interessant da det følger biomimicry tankegangen, som tager naturens skjulte algoritmer som er blevet optimeret af evolutionen over millioner af år i brug. Dog er Voronoi-diagrammer fundet i naturen ikke et udsagn om en strukturel optimeret model, men snarere for en intern logik for voksende celler.

Dette parameter kan hverken optimeres ved hjælp af BESO eller Galapagos, og kræver derfor manuel analyse ved at kigge på en lang række tilfælde punktplaceringer samt antal af punkter.

7.7 Phyllotaxis



Figur 7-7 Phyllotaxis - Michell gitter – Phylotaxis i Naturen [19],[20]

Baseret på Fibonnaccisekvensen fundet overalt i naturen, ligesom Voronoi-diagrammerne, opstår mønstrene som konsekvens af en intern biologisk logik.

Parameteret er valgt, da der er en geometrisk lighed med Michell-gitteret for en udkragede bjælke med punktlast, som er et analytisk optimalgitter, og kan derfor betragtes som et globalt optimum.

Dog forhindrer de slanke randbetingelser fuld udnyttelse af et Michell-gitter.

Phyllotaxis forløbet approximeres ved hjælp af trigonomiske funktioner efter script skrevet af co-de-it¹.

X-koordinaten beskrives som funktion af i som

$$\sin\left(\frac{i}{k}\right) \cdot i = x \quad [7-1]$$

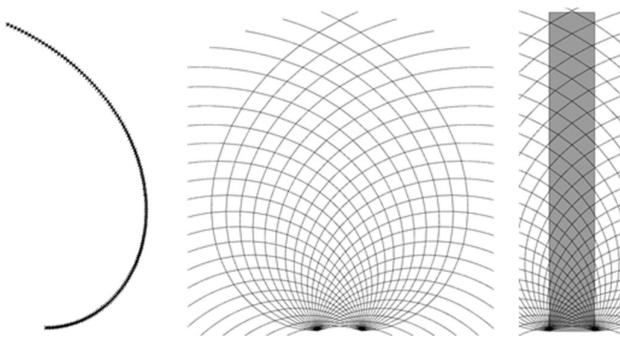
Z-Koordinaten

$$\cos\left(\frac{i}{k}\right) \cdot i = z \quad [7-2]$$

“i” defineres som alle naturlige tal

K er en konstant som beskriver kurvens forløb.

¹ Computational Design Italy - <http://www.co-de-it.com/wordpress/code/grasshopper-code>

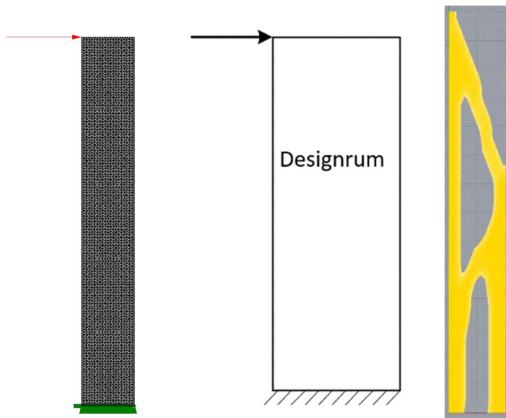


Figur 7-8 Princippet bag Phyllotaxis modellen

Dette skaber en kurve som spejles og roteres n gange med vinklen a
Randbetingelserne lægges over linjerne, og linjerne rettes til ud fra rammen.
Optimeringsmuligheder:

- Galapagos
 - o k- kurvens konstant
 - o n- Antal rotationer
 - o Vinklen mellem rotationer

7.8 BESO-shell



Figur 7-9 - BESO-shell plade optimering

”BESO-Shell” benytter sig af den oprindelige BESO-algoritme ved at optimere på et mesh. Mesh’et bliver fortolket som en plade af BESO-shell-algoritmen, som ændrer tykkelser i mesh’et, hvilket giver den optimerede geometri som en plade med varierende tykkelser. Dette kan fortolkes med et højhus som kontekst som en vejledende overordnet geometri for gitteret, snarere end en 1:1 overførsel som afstivende system, grundet løsningens kontinuere natur. Det kan derfor være interessant at sammenligne de andre løsninger med løsningen for ”Plademodel”

Optimeringsmuligheder:

- BESO-Shell

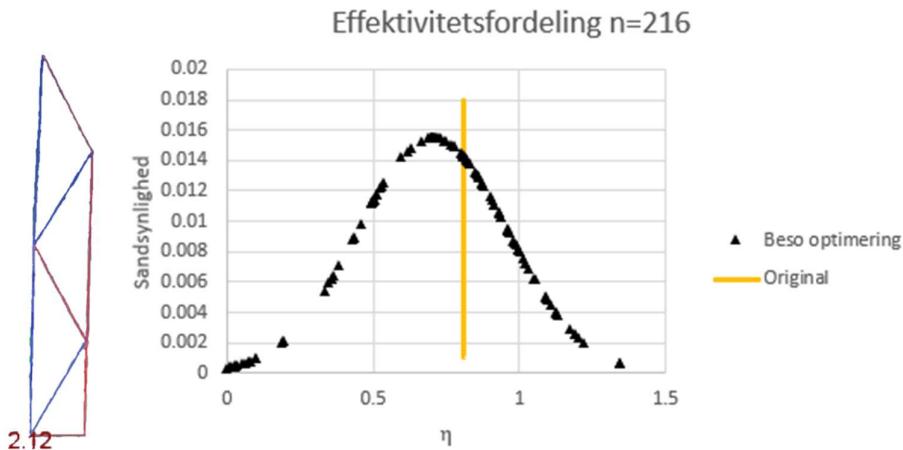
8 Evaluering af optimeringsalgoritmer

8.1 1. Optimeringsrunde

Der blev foretaget to optimeringsrunder med markant forskellige resultater. Viden omkring algoritmerne blev øget markant i 2. runde. Der er derfor i rapporten fokuseret på optimeringsrunde 2. Resultater fra optimeringsrunde 1 kan ses i Bilag 2.A. Vi vil kommentere kort på resultaterne fra første runde for "Interconnected" herunder, da BESO-optimeringen gav nogle interessante resultater. Den samme type resultater blev også oplevet i "Skråstænger". De andre optimeringer gav omrentligt de samme resultater i begge optimeringsrunder.

Interconnected

Første runde gav geometrier tættere på kendte design, grundet de friere



Figur 8-1 Interconnected geometri efter optimeringsrunde 1 (tv) Normalfordeling af effektiviteter efter optimering med den samme inputgeometri (th)

randbetingelser. Optimeringerne var mere ukontrollerede, og ikke lige så dokumenterede grundet en lavere forståelse for algoritmen. Derudover opførte algoritmen sig stokastisk, og gav et nyt resultat i hver simulering. De stokastiske løsninger findes ikke beskrevet i litteraturen, men vi antager at det var grundet et lavt antal elementer og frie randbetingelser, da det lykkedes os at genskabe de stokastiske løsninger. Da vi ikke har direkte adgang til koden i Karamba3D komponentet, er det svært at specificere grunden til dette fænomen præcist.

Udvikleren af Karamba3D er blevet gjort opmærksom på dette og beskriver det som en

bug. Disse løsninger bliver ikke inddraget i projektet, da vi ikke vil have et projekt, som bygger på en *bug*².

Det skal bemærkes at effektivitetsparametret blev omskrevet mellem første og anden optimeringsrunde, og vi vælger derfor ikke at kommentere på resultaterne.

8.2 2. Optimeringsrunde

Evaluering af algoritmer

For at kunne vurdere validiteten af optimeringerne foretages en undersøgelse af "BESO for beams"-algoritmen og Galapagos-algoritmen baseret på data optaget i Grasshopper interfacet og behandlet i Excel.

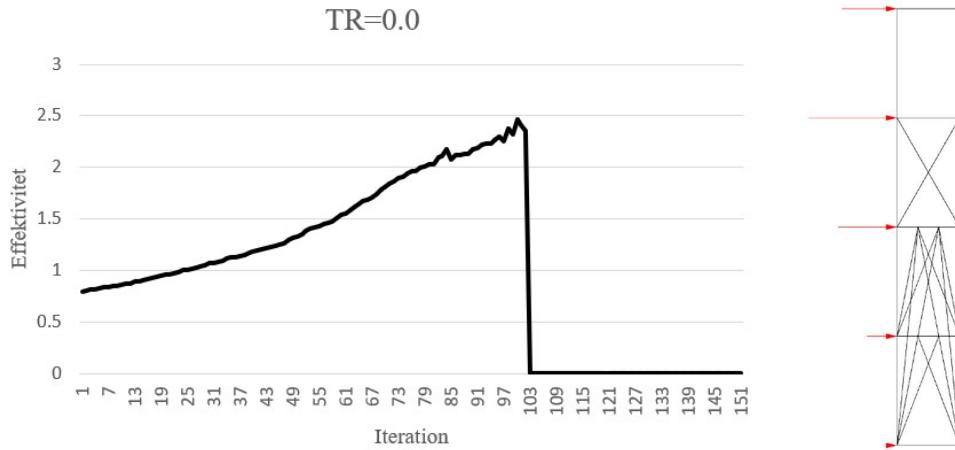
BESO/ESO

I evalueringen af BESO-algoritmen tages udgangspunkt i "Interconnected" modellen. Der blev i optimeringen brugt en BESO-faktor (BF) på 0, da dette gav de bedste indledende resultater, der bliver derfor ikke tilføjet materiale igennem optimeringen, hvilket gør at algoritmen effektivt virker som en ESO-algoritme. Bedre resultater kunne være opnået ved at foretage en yderligere optimering af BESO-faktoren.

Over en optimering, kan det ses at konstruktionen bevæger sig imod en optimeret geometri, hvorefter modellen ikke længere kan opfylde ligevaegtsligningerne, hvilket giver ekstremt lav effektivitet **Figur 8-2**. Ved en lav *target ratio* (TR, kaldes også *volume fraction*) er skridtstørrelsen højere og en ikke statisk konstruktion opnås derfor hurtigere.

En højere BESO-faktor kunne have hjulpet på dette problem i nogle tilfælde, da der er en chance for at den nødvendige stang kunne blive tilføjet igen ved et senere tidspunkt.

² Grasshopper forum - <https://www.grasshopper3d.com/group/karamba3d/forum/topics/beso-for-beams-underlying-algorithm>

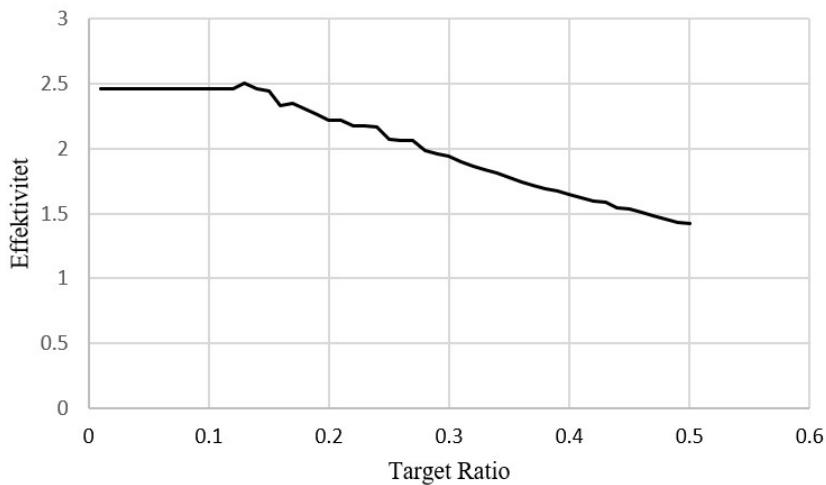


Figur 8-2 Effektivitet over optimeringens iterationer (tv) Geometri ved iteration 103 (th)

Det er derfor sjældent resultatet af optimeringen, som er den bedste model og det er derfor essentielt at kigge på effektivitet/iterationskurven for den givne optimering.

Ændring i geometri per iteration i en optimering kan ses i Bilag 2.C.

For at vælge en fornuftig *target ratio*, blev sammenhængen mellem *target ratio* og effektivitet undersøgt. Effektivitetsværdien for den bedste iteration for hver *target ratio* er plottet i **Figur 8-3**



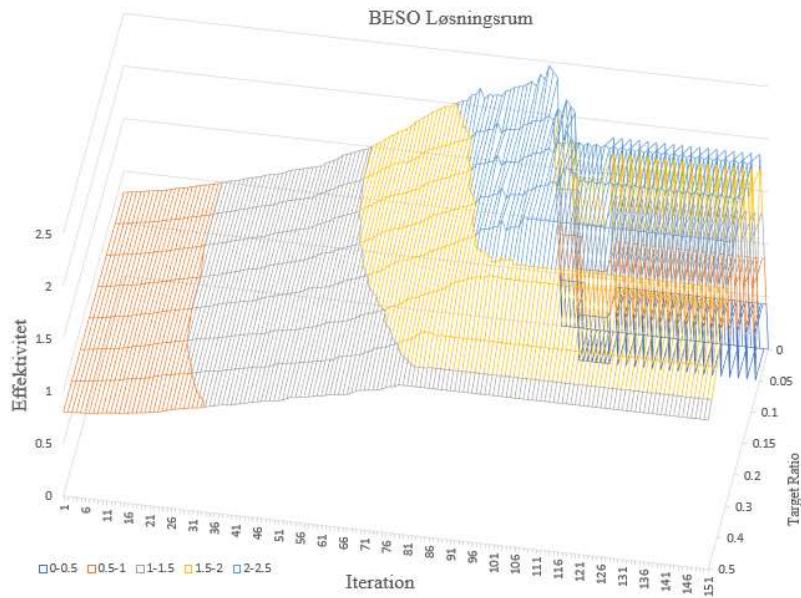
Figur 8-3 Effektivitet i forhold til *target ratio* (Interconnected)

Det ses i dette tilfælde opnås ved en *target ratio* omkring 0.1

Optimalgeometrier for hver *target ratio* kan ses i Bilag 2.E

Hvis de to overstående grafer plottes sammen i 3d rum, fremkommer en visualisering af det fulde løsningsrum for dette parameter.

Her er det tydeligt at der opstår en ”kløft”, hvor geometrien ikke længere kan opfylde ligevægtsligningerne grundet et lavt antal stænger. Dette er altså et lokalt optimum for optimeringen. Punktet er dog ikke nødvendigvis det globale optimum for konstruktionen, grundet BESO-algoritmens begrænsninger.



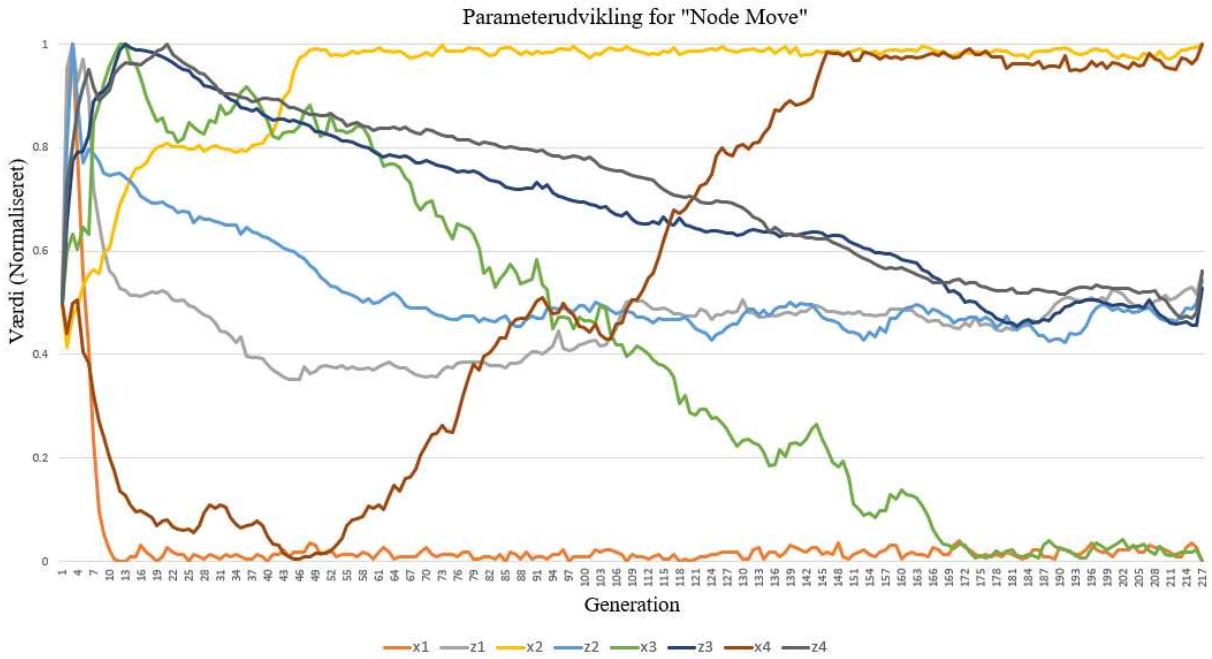
Figur 8-4 Graf over 3D løsningsrum for Interconnected

Der blev derfor valgt en *target ratio* på 0.0 for at sikre at den optimale løsning findes.

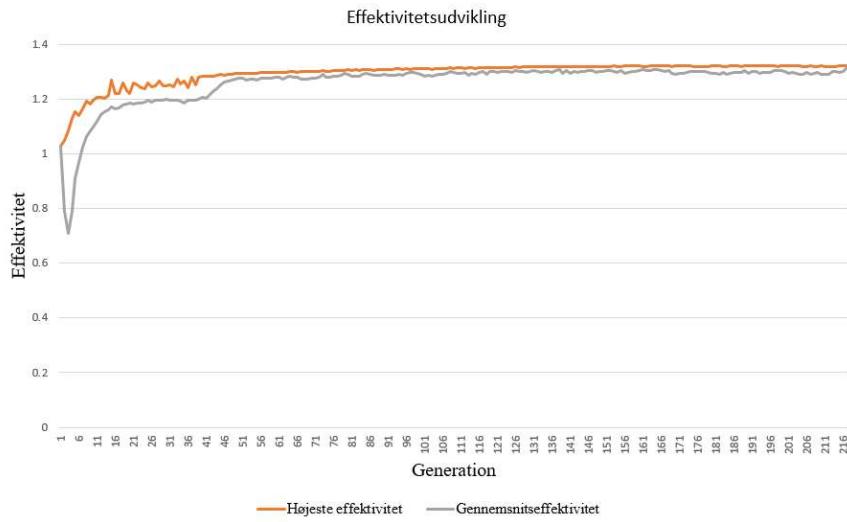
Galapagos

Evaluering af Galapagos-algoritmen tager udgangspunkt i modellen ”Node Move”.

Dette parameter visualiserer Galapagos-algoritmens optimering af parametre og konvergering godt illustreret i **Figur 8-5**.

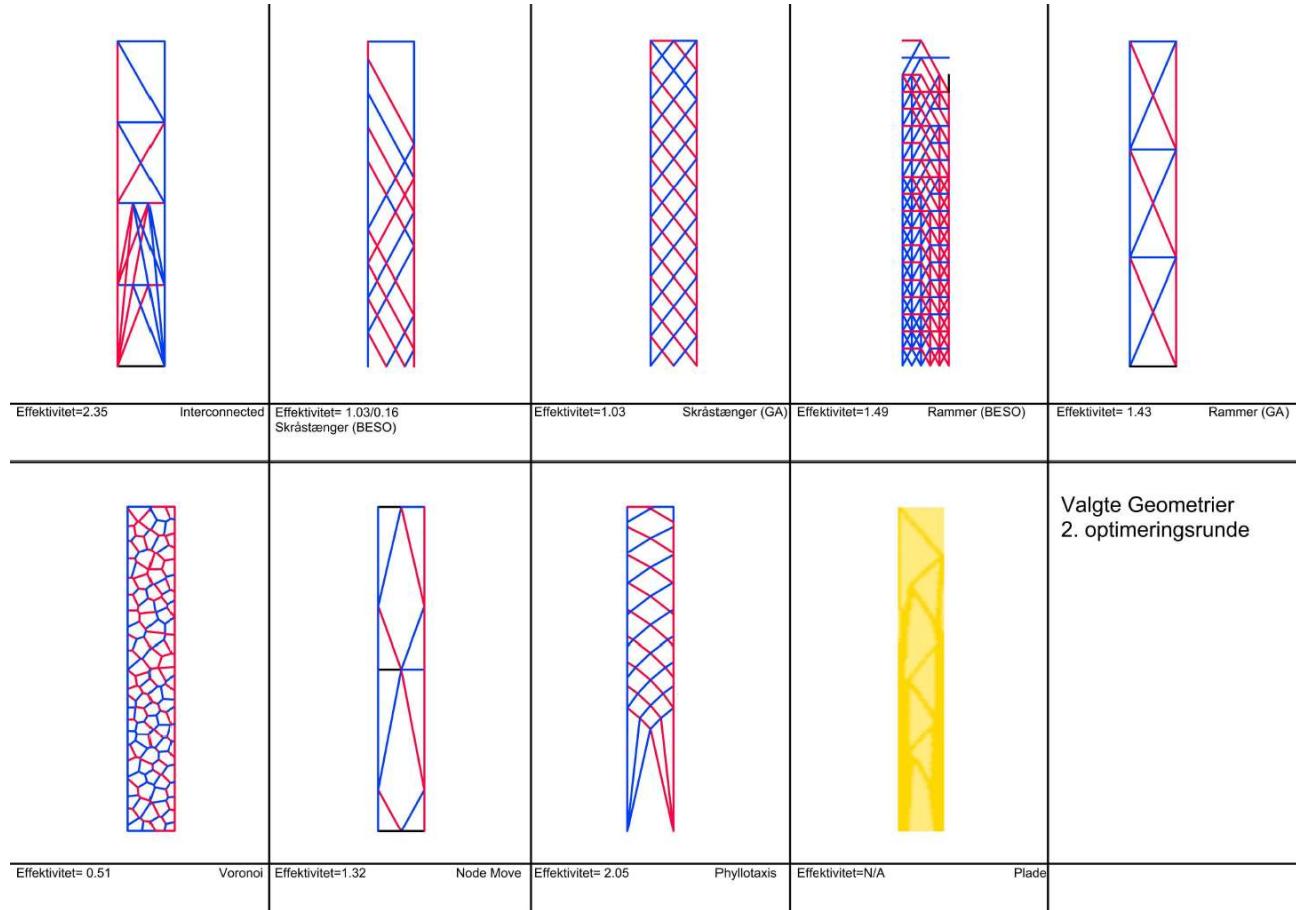


Figur 8-5 Variation af standardiserede x og z koordinater for "Node Move" over alle generationer i en optimering. Optimeringen betragtes som konvergeret når parametrene ikke længere ændrer sig markant



Figur 8-6 Udvikling af modellens effektivitet igennem optimeringens generationer.

9 Evaluering af optimeringsparametre



Figur 8-1 Udvalgte optimerede løsninger

I dette afsnit evalueres resultaterne fra optimeringerne ved hjælp af kriterieanalysen præsenteret i Afsnit 5

9.1 Interconnected (BESO)

Generelt

Der er blevet benyttet startbetingelserne til optimeringen:

Parameter	Værdi
n-bredde	3
n-højde	4
Target Ratio	0.0
Iterationer	150
BESO-faktor	0

Tabel 9-1 Startbetingelser for Interconnected optimering

Et så højt antal punkter som muligt er at foretrække, da dette giver en mere præcis optimering, dog er computerkraft en begrænsning grundet det høje antal af iterationer. I dette tilfælde er der benyttet 150 iterationer for at sikre at modellen konvergerer uden at der bliver fjernet for mange stænger mellem hver iteration, hvilket sikrer et bedre resultat.

Strukturel effektivitet

Dette parameter giver den højeste effektivitet sammenlignet af alle parametrene.

Dette skyldes de at de mange mulige gitterkonfigurationer tillader BESO-algoritmen at udnytte sit fulde potentiale.

Effektivitet 2.56

Karakter: 5

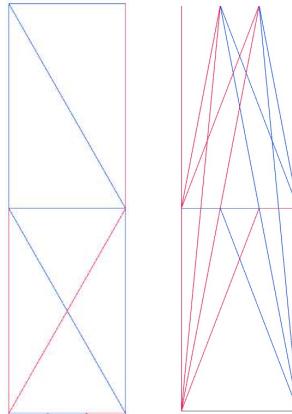
Design

Gitre designet med stænger som er sat sammen på kryds og tværs har en tendens til at gå i to forskellige æstetiske retninger.

Typisk er det kaotiske meget øjnefaldende, da mange elementer, krydses i en logik, som ikke er umiddelbart synlig. Dette kan ses i de to nederste felter i det valgte gitter.

Dette udtryk er vidne om maskinens upersonlige fremgangsmåde, og er et perfekt eksempel på et overmenneskeligt design og synliggør tydeligt det valgte optimeringsparameter.

Samtidig er der en række matematiske sammenhænge i form af vinkler og optimalgeometri, som algoritmen kan finde i dette parameter. Denne logiske og strukturelle systematik er synlig i de to øverste felter i den valgte geometri se **Figur 9-2**. Endnu mere synlig er dette i første optimeringsrunde, hvor geometrien konvergerede som et kendt strukturelt design.



Figur 9-2 Interconnectets optimerede design

Det samlede æstetiske udtryk findes et sted mellem disse indgangsvinkler. Dette stiller krav til udformningen og rytmen i facadens vinduesinddelinger, som skal spille sammen med gitrene, men giver samtidig også et markant udtryk, som kan spille sammen med en facade.

Det valgte design er kendtegnet ved en høj densitet af stænger i de to nederste felter, hvilket kan have en stor indflydelse udsynet på de nedre etager afhængigt af stængernes dimension.

Karakter: 4

Bygbarhed

Antal elementer: 46

Antal samlinger: 30

Gitterets kaotiske natur sænker bygbarheden.

Udover at have et stort antal elementer er mange af samlingerne unikke og med mange elementer forbundet i mange retninger. Dog giver symmetri mulighed for gentagelser.

Karakter: 2

I stærk kontrast til den endelige geometri står geometrien fra 1. optimering, som i kraft af den ikke-generaliserede optimering kunne opnå en markant simplere løsning, lig et kendt design.

9.2 Skråstænger (BESO/GA)

Generelt

"Skråstænger" er blevet bygget ud fra to parametre, n-højde og n-bredde. De to parametre danner et grid af skrål stænger med samme vinkel, som kan optimeres med både BESO og Galapagos.

Parameter	Værdi
n-bredde	5
n-højde	20
Target Ratio	0
Iterationer	150
BESO-faktor	0

Tabel 9-2 Startværdier for Skråstænger BESO-optimering

Strukturel effektivitet

Der var tydelig forskel mellem de to optimeringsalgoritmer. I **Figur 8-1** ses hvordan BESO laver specialiseret løsning da den altid optimerer for den fungerende lastretning. Galapagos er derimod bundet af optimeringsparametrene og kan derfor kun lave en symmetrisk løsning. Galapagos får derfor en mere optimal løsning på en virkelig bygning, da vinden kan komme fra flere sider, hvilket løsningen a BESO-optimeringen ikke kan håndtere.

Det ses at BESO-algoritmen er bundet af lastens angrebspunkter, som alle skal understøttes. Dette gør at algoritmen ikke understøtter for punktlast på modsatte side, hvilket gør modellen ustabil i den modsatte retning. Dette kan løses ved at indføre et sekundært afstivende system, som kan fordele laster mere dynamisk rundt igennem optimeringen.

Galapagosoptimeringen er defineret ud fra parametre som i alle tilfælde er symmetriske. Dog ses det at hverken BESO eller Galapagos får en særlig høj effektivitet og der giver derfor en lav bedømmelse på effektiviteten.

Effektivitet BESO: 1.03

Effektivitet Galapagos: 1.03

Karakter BESO: 1

Karakter Galapagos: 2

Design

Designet med skrå stænger der krydser i ens vinkler, er et kendt design, der er set i flere forskellige bygninger. Der giver et æstetisk flot og rent udtryk, med mulighed for integration af gitteret i facaden.

I de endelige Galapagos design er optimeringen ikke en del af facadens udtryk, da udtrykkene bliver så rent at det næsten ser uberørt ud. I BESO-designet er det nemmere at gennemskue hvad optimeringen gør ved designet, da man tydeligt kan se at algoritmen fjerner stænger og kun optimere i en retning. Hvilket giver to tydeligt forskellige design, men med samme hovedtræk.

BESO-resultaterne ved punktlasten i optimeringsrunde 1 var til gengæld markant anderledes end ved trekantslasten i runde 2.

Her ses det at designet er symmetrisk og derfor lige godt i begge retninger. Derudover får det et design uden særlig mange stænger og derfor en høj effektivitet, da udbøjning ikke var så stor. Problemet var dog at når trekantslasten blev sat på i optimeringsrunde 2, kunne samme løsning ikke opnås.

Det smarte ved designet med skræststænger er at det er nemt at inkorporere vinduerne i designet da man kan lave vinduerne ud fra skræststængernes kryds, og hvis vinduerne blev for store, ville man kunne under inddæle krydsene yderligere, med et curtain-system.

Karakter BESO: 3

Karakter Galapagos: 4

Bygbarhed

Da ”Skræststænger” er en model der kun bygger på stænger med samme vinkel, har modellen en høj bygbarhed, da der selv med mange elementer er mange gentagelser i modellen. I BESO er alle vinkler den samme og selvom der er man samlinger er de alle ens.

BESO:

Antal elementer: 103

Antal samlinger: 76

Karakter: 5

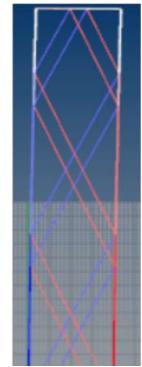
I Galapagos modellen er der både mange elementer og samlinger, til gengæld er alle længder og vinkler ens i hele konstruktionen derfor er det også en meget bygbar model.

Galapagos:

Antal elementer: 62

Antal samlinger: 53

Karakter: 4



Figur 9-3 Eksempel på Skræststænger efter optimeringsrunde 1

Modellen fra 1. optimerings runde har dog en endnu bedre opbygning da den har færre stænger og samlinger.

9.3 Rammer (BESO/GA)

Generelt

"Skråstænger" og "Rammer" er to meget ens parametre, dog gav optimeringerne forskellige optimalgeometrier.

Parameter	Værdi
n-bredde	5
n-højde	20
Target Ratio	0
Iterationer	150
BESO-faktor	0

Tabel 9-3 Startbetingelser for Rammer BESO-optimering

Strukturel effektivitet

På trods af at have en geometri lignende "Skråstænger" blev effektiviteten af de optimerede geometrier markant anderledes. Særligt bemærkelsesværdig var Galapagos-optimeringen, da den gav en geometri præcis magen til originalgeometrien.

BESO-optimeringen viser en delvis optimering, da der ses et forløb i densiteten af elementer og bygningens højde. Det er dog tvivlsomt at bygningen er kommet i nærheden af et globalt optimum.

Karakter BESO: 3

Karakter Galapagos: 3

Design

Geometrien svarende til originalgeometrien er selvfølgelig et klassisk bud på et gitter og et kendt design.

BESO er markant mere uelegant. Ligesom i "interconnected" er den strukturelle logik synlig, dog forekommer ikke symmetriske stænger som ødelægger gitterets balance og gør gitteret uoverskueligt.

Karakter BESO: 1

Karakter Galapagos: 2

Bygbarhed

Denne løsning kræver et højt antal elementer for at opnå en god stivhed. Alle samlingerne er relativt simple, dog forekommer forholdsvis mange typer samlinger hvor mellem 3 og 8 stænger mødes i samme knude, hvilket ikke umiddelbart er tænkes når man ser gitteret.

BESO:

Antal elementer: 335

Antal samlinger: 220

Karakter: 2

Denne udformning ligner originalgeometriken, hvilket betyder høj bygbarhed

Galapagos:

Antal elementer: 16

Antal samlinger: 11

Karakter: 5

9.4 Node Move (GA)

Generelt

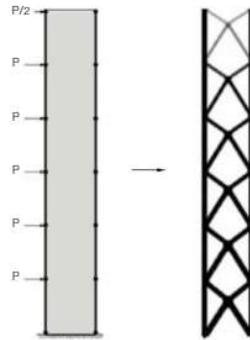
Parameteret blev optimeret med 4 bevægelige "nodes". Antallet af disse kan øges, men kræver et større program, da de alle skal modelleres manuelt. Modellen optimeres ved Galapagos for at finde den lokale optimum, derefter blev modellen undersøgt manuelt for at finde et estimeret globalt optimum. Dette gav et løsningsrum som kan ses i Bilag 2.B.

Strukturel effektivitet

Optimeringen gav en forholdsvis god effektivitet.

Løsningen vurderes derudover til at have en stor grad af robusthed over for forskellige lasttilfælde grundet symmetri. Gitterets geometri ligner meget den optimalgeometri præsenteret af ingeniørselskabet Skidmore, Owings and Merrill i Details 4 som blev

fundet ved topologisk optimering. (Schittich et al., 2015) Ligheden lægger i at begge optimeringer konvergerer i forskudte X-gitre.



Figur 9-4 Resultatet af strukturel optimering i Details 4 [21]

Kontinuiteten mellem de to optimeringer kan bruges som argument for en global optimal løsning. Hvorfor er effektiviteten af ”Node Move” så ikke højere? Dette kan hænge sammen med at der ikke er brugt en tværsnitsoptimering eller at vinkler og proportioner ikke stemmer overens. Det vidner dog om at parameterets potentielle ikke er brugt fuldt ud i denne optimering.

Effektivitet: 1.32

Karakter: 3

Design

Optimeringen gav et simpelt og symmetrisk gitter med en indbygget strukturel logik, dog uden at ty til klassiske vindkryds. Derudover var der forskel på proportionerne af diamantformen i det øverste og nederste felt, hvilket kan komme et facadedesign til gunst.

Karakter: 5

Bygbarhed

Antal Samlinger: 13

Antal Stænger: 23

Gitterets lave antal stænger og simple samlinger gør gitteret nemt at bygge. Dog er halvdelen af alle samlinger unikke.

Karakter: 5

9.5 Voronoi

Generelt

Grundet algoritmens tilfældige natur blev optimeringen foretaget ved at evaluere en lang række *seeds* (tilfældige udgangspunkter) for at finde den bedste af disse. Dette blev gjort ved flere forskellige antal punkter som ses i Bilag 2.E, det var tydeligt at flere punkter skabte en bedre struktur, hvilket dog gav en trade-off mellem bygbarhed og effektivitet.

Strukturel effektivitet

Der var ikke de store forventninger til dette gitter, der på trods af at gøre brug af biomimicry har den ikke samme strukturelle logik i gitterets udformning som Phyllotaxis.

Dette parameter var klart det dårligste, dette skyldes at mange samlinger angriber hinanden med en excentricitet, hvilket giver unødvendigt moment i stængerne, hvis vinkler i forvejen ikke er optimale.

Effektivitet: 0.51

Karakter: 1

Design

Ligesom ”Phyllotaxis” tager dette gitter udgangspunkt i naturen, hvilket giver et unikt udtryk, som både virker kaotisk i form af tilfældighederne og bekendt, da alle kan genkende mønsteret fra naturen og derfor kan danne en relation til designet.

Et så specifikt design kræver nøje valg af materialer, facademønstre og kontekst, da et så markant mønster med meget markante relation nemt kan virke malplaceret i på en facade.

Dog kan man også opnå gennemdesignede og gode løsninger som Parlament Francophone i Bruxelles.

Karakter: 5

Bygbarhed

Antal stænger: 600

Antal samlinger: 401

For at opnå en højere effektivitet benyttes et højt antal punkter, dette giver dog et højt antal samlinger, uden et gennemgående mønster, hvilket gør samlingerne unikke, og giver en meget lav bygbarhed.

Karakter: 1

9.6 Phyllotaxis (GA)

Strukturel effektivitet

Idet parameteret kan generere en geometri som ligner et Michell-gitter, forventes der en høj effektivitet, dog er skal understøtningernes placering også give mulighed for, at buerne ikke brydes af siderne på bygningen, hvilket ikke er muligt ved denne bygnings højde/bredde forhold.

Dette var det næstmest effektive parameter, dog med en strukturel udformning, som ikke var forventet før optimeringen.

Effektivitet: 2.05

Karakter: 4

Design

Designet tager udgangspunkt i et udtryk i naturen, og har derfor en veldefineret udtryk, dog kræver det et specielt facadedesign, til at spille sammen med det markante mønster.

Den optimerede model bryder dog med det naturlige udtryk, da algoritmen fandt måde at bryde med det agtede design, ved at bevæge sig i parametrenes ekstremer, hvilket muliggør designs "ben" som ellers ikke var forventet.

Designet er uddover benene karakteriseret af firkanter med varierende størrelse over bygningens højdeforløb.

Karakter: 4

Bygbarhed

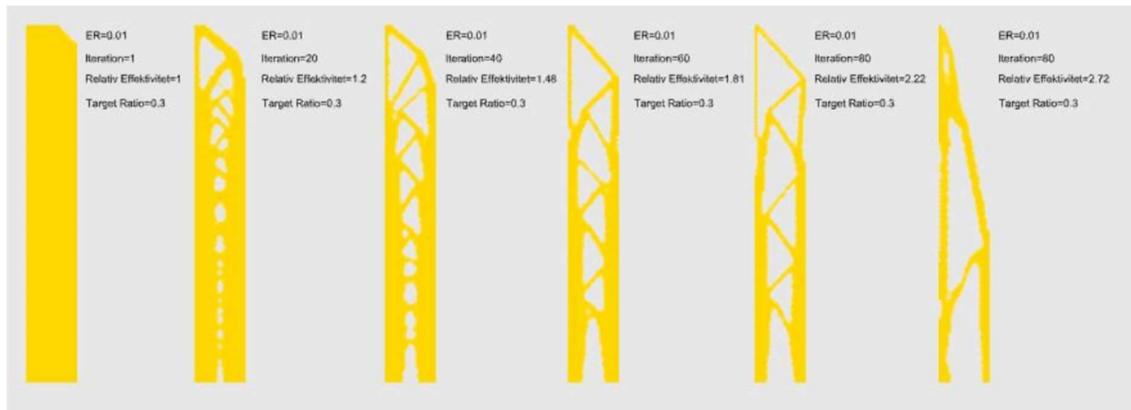
Antal stænger: 165

Antal samlinger: 138

Dette parameter har en meget lav bygbarhed, da der er et stort antal stænger og samlinger, hvoraf langt størstedelen er unikke.

Karakter: 2

9.7 BESO-shell



Figur 9-5 Udvikling af BESO-Shell optimering over iterationer

Generelt

Dette optimeringsparameter adskilles sig grundlæggende fra de andre, da der i dette tilfælde optimeres på et mesh og ikke på diskrete stænger.

Dog kan denne form for topologisk optimering betragtes som tættere på et globalt optimum for randbetingelserne, da optimeringsprocessen ikke bliver holdt tilbage af stængernes geometriske opbygning.

Parameter	Værdi
Mesh-størrelse	1 m ²
Evolution Rate	0.01
Target Ratio	0.3
Iterationer	100

Tabel 9-4 Startbetingelser for BESO-shell optimering

Indflydelsen af parametrene kan ses i Bilag 2.E

Modellen virkede dog ikke med trekantslasten, da materiale blev fjernet i lastens angrebspunkt, dette kunne skyldes en for ufint mesh, hvilket er kendt problem(Huang et al., 2010). Modellen blev derfor kun optimeret for en punktlast og med en linjeunderstøtning.

Strukturel effektivitet

Vi har ikke sammenlignet effektiviteten direkte til de stangbaserede algoritmer. Dog antager vi at effektiviteten af denne metode er god, da dette er BESO-algoritmens oprindelige formål, og er en af de mest benyttede fremgangsmåder inden for topologisk optimering. Dog har vi stadig valgt at inkludere denne metode i rapporten da den kan give bud på hvad et mere globalt optimum for effektiviteten af strukturen kunne være,

hvilket giver perspektiv til de andre gitterparametre

Karakter: 5*

Design

Designet udtrykker en høj grad af optimering, hvilket giver strukturer, som ikke ligner de er designet af mennesker, hvilket synliggør den algoritmiske proces i designet.

Kræfternes forløb ses tydeligt og gitteret gør derfor opmærksom på sig selv og derved ærligt viser sin strukturelle funktion.

Den varierende tykkelse giver et forløb varierende over gitterets højde, hvilket muliggør ekstra spil i facaden.

Det meget optimerede gitter giver et markant design, som i mange tilfælde vil virke som en dominerende del af facadedesignet, da det en anskuer vil bemærke det fremmede i designet. Dette gitterets udseende er derfor essentielt at tænke i sammenhæng med facade. Dog giver denne metode ikke stor fleksibilitet, da løsningen altid bliver meget specifik, og giver derfor et lille løsningsrum.

Karakter: 3

Bygbarhed

Denne metode behandler ikke stænger på den samme måde som de andre, og kan derfor ikke sammenlignes direkte. Vi kan derfor ikke give parameteret en troværdig karakter.

Dog kan topologien i gitteret benyttes, til at danne grund for et stangsystem. Hvilket kan give en række relativt simple og bygbare løsninger.

10 Opsummering af kriterieanalyse

Herunder ses resultatet af de forskellige optimeringsparametre og algoritmer.

Kriterie	Vægt	Original	Interconnected	Skråstænger	Skråstænger	Rammer	Rammer
Algoritme			BESO (beam)	BESO (beam)	Galapagos + manuel	BESO (beam)	Galapagos + manuel
Effektivitet	100%	3	5	1	2	3	3
Design	70%	2	4	3	4	1	2
Bygbarhed	60%	5	2	5	4	2	5
Samlet vægtet		2.47	3.00	2.03	2.40	1.63	2.47

Tabel 10-1 Resultater for kriterieanalyse del. 1

Kriterie	Vægt	Voronoi	Node Move	Phyllotaaxis	BESO-Shell
Algoritme		Manuel	Galapagos +manuel	Galapagos + manuel	BESO (shell)
Effektivitet	100%	1	3	4	5*
Design	70%	5	5	4	3
Bygbarhed	60%	1	5	1	N/A (1)
Samlet vægtet		1.70	3.17	2.47	2.57

Tabel 10-2 Resultater for kriterieanalyse del. 2

11 Delkonklusion

11.1 Proces

Dette afsnit viste brugbarheden af de forskellige algoritmer, når de blev sammenlignet i et standardiseret tilfælde. Derudover blev processen illustreret for at vise en intuitiv forståelse for de to algoritmers processer, hvilket kan hjælpe med at undgå evt. faldgruber.

Afsnittet samt tilhørende bilag illustrerer løsningsrummet for alle parametre, som i denne fase er at foretrække fremfor en enkelt superoptimeret løsning. Det fulde løsningsrum giver nemlig flere valg og giver alle de andre løsninger kontekst.

Ændringen over de to optimeringsrunder viser, hvor vigtigt det er at have skarp kontrol med randbetingelserne, da dette kan lede til markant forskellige løsninger alt efter optimeringsmetode. I en reel design-proces kan denne fase af projektet bruges til at danne “proof of concept” af parametre til brug videre i designforløbet og til præsentation for arkitekten.

11.2 Parametre

På baggrund af vurderingen i Afsnit 10 udvælges følgende parametre som brugbare i den videre rapport. Valget er foretaget på baggrund af deres samlede score.

- Interconnected
- Skråstænger (GA)
- Rammer (GA)
- Node Move
- Phyllotaxis

”BESO-Shell” udvælges ikke, da den ikke kan sammenlignes direkte med de andre parametre.

De valgte parametre vil blive testet på en af to 3d volumen i næste del af rapporten.

12 Præsentation af 3D Optimering

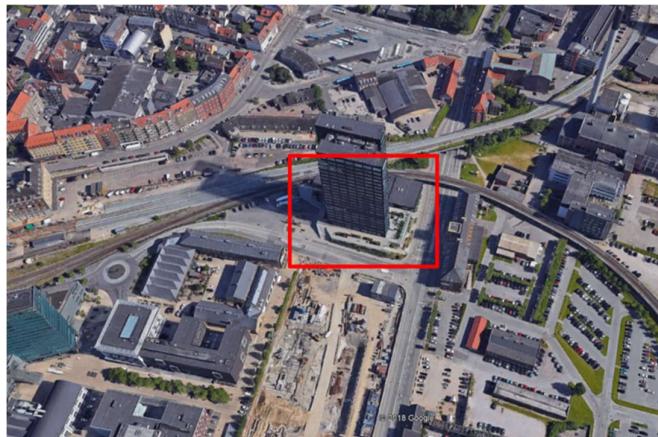
I denne del af rapporten bliver gitterparametrene eksemplificeret gennem to forskellige 3d volumener med hver deres strukturelle udfordring. Dette undersøger robustheden for de valgte parametre, og simulerer næste fase i en tænkt design-proces efter undersøgelsen af parametre i standardiserede 2d eksempler.

Derefter følger en design-proces, hvor designet blevet forfinet og løsningsrummet indsnævret.

Først vil de 5 udvalgte parametre blive analyseret, to for den ene volumen og tre på den anden. Derefter udvælges det bedste parameter for hver af de to volumener, så de kan indgå i bygningens videre design-proces.

Til slut udvælges et af de to volumener med tilhørende vindgitter på baggrund af kriterieanalySEN inklusiv en kontekstanalyse med baggrund i en defineret case, for at give et endeligt design, som kan dimensioneres efter Eurocode i næste del af rapporten.

12.1 Case



Figur 12-1 Placering af Aarhus City Tower [22]

Der tænkes et fiktivt case for at eksemplificere algoritmernes inddragelse i et rigtigt projekt. Der forestilles at grunden hvor Aarhus City Tower ligger ikke er bebygget og skal have projekteret et højhus i højden omkring 140m. Bygherren ønsker et samlet bygningsareal på 23335.8 m² svarende til de samlede gulvarealer af det eksisterende Aarhus City Tower.

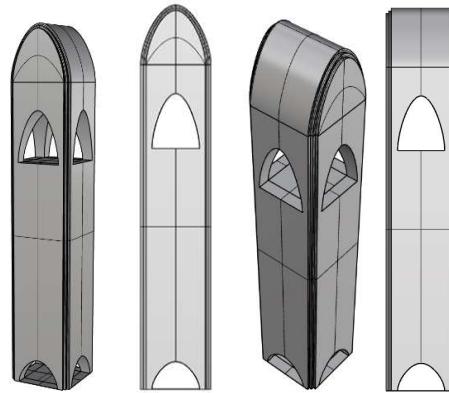
Aarhus C som kontekst bruges som vejledning i udformning af et design samt til at foretage en differentiering mellem de to design til videre dimensionering.

Igennem design-processen betragtes plateauet fra Aarhus City Tower som en del af

byggeriet og case-bygningen placeres derpå. Der skal fastlægges et facadedesign, som kan komplimentere det afstivende system. Casen skal tænkes som en eksemplificering af en design-proces og ikke som en endelig løsning for den udvalgte grund.

12.2 Løsningsforslag

Efter en indledende designproces og undersøgelse af højhus-volumener i Bilag 1.A blev to volumener udvalgt til videre design, disse to volumener giver hver deres strukturelle udfordring. Efter næste designiteration vil designet af de to volumener blive begrundet og forklaret i Afsnit 14, som giver et overblik over de to design og den tilhørende design-proces.

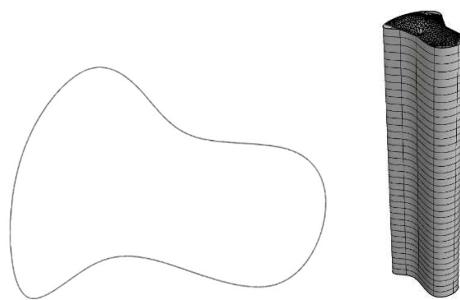


Figur 12-2 Volumen for løsning 1

Løsning 1

Denne volumen har to stort set ens sider, som næsten kan betragtes som 2d planer, hvoraf den ene af siderne buer ind i en spids. Derudover skal en optimering tage højde for det store hul som er placeret midt på bygningen, hvilket kræver et robust optimeringsparameter.

Til denne volumen undersøges “Interconnected”, “Node Move” og “Phyllotaxis” Da disse kan overføres til 2d flader på en fornuftig måde.



Figur 12-3 Volumen løsning 2

Løsning 2

Denne volumen stiller krav til et vindgitter, som har mulighed for at diskretisere en afrundet bygning på en fornuftig måde. Derudover bliver der stillet krav til optimeringens opsætning, da der skal defineres en optimeringsmodel som kan give en fornuftig løsning for to lastretninger. Den valgte grundplan bærer præg af en forskel på længde- og bredderetningen samt indhug i siderne.

Til denne volumen undersøges parametrene “Skråstænger (GA)” og “Rammer (GA)”. Da disse nemt tillader en diskretisering af en buet konstruktion.

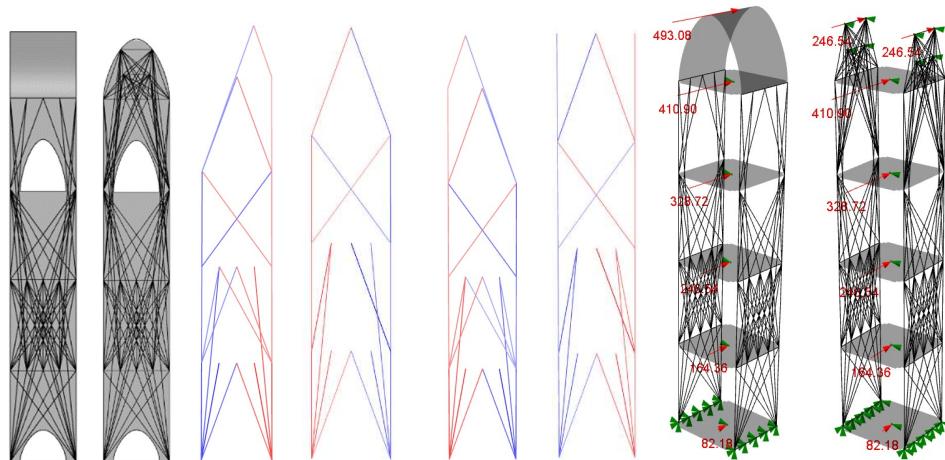
13 Evaluering af 3D Optimering



Figur 13-1 Volumener med 3D gitre

I dette afsnit gennemgås resultaterne af 3d analyserne, samt tilhørende kriterievurdering heraf. Der er aktivt valgt ikke at inkludere værdien for strukturelle effektivitet i dette afsnit, men denne værdi er stadig grundlæggende for karakteren. 3D modeller til dette afsnit kan findes i Bilag 1.C.

13.1 Løsning 1



Figur 13-2 Startgeometri – Optimeret gittergeometri – Analytisk model

Interconnected

Denne version af “interconnected” fjerner muligheden for at stænger kan gennemløbe hullerne, og skaber dermed en yderligere randbetingelse for optimeringen.

For at opnå de bedste og mest brugbare resultater blev de længste stænger fjernet.

Toppen blev yderligere erstattet af en stiv skalkonstruktion, som i forvejen var tænkt som et sekundært system.

Metoden fra Afsnit 7.2 kunne nemt overføres til løsning 1, det krævede dog optimering af randbetingelserne for at opnå de bedste løsninger.

Det skal stadig bemærkes at der kan forekomme elementer, som ligger samme sted.

Modellen optimeres over to omgange, med hver side isoleret.

For at sikre at simuleringen forløber fornuftigt er pladerne modelleret som stive og der er indført en understøtning på tværs af lastretningen i punktlasternes angrebspunkt for at simulere understøtningen fra den anden side af vindgitteret. Dette sikrer også de ikke-ønskede konsekvenser som forekommer, hvis algoritmen på grund af skridtstørrelsen på optimeringen ikke fjerner lige meget materiale fra begge sidder og derved skaber ubalance, hvilket leder til vridning.

Strukturel effektivitet

Denne metode giver stadig den bedste effektivitet af alle undersøgte metoder. Metoden har ikke problemer med at inkorporere hullets geometri i løsningen.

Spredningen af normalkræfter i alle elementer er 112 kN. Dette tal giver en indikation, hvor optimeret løsningen er. En spredning på 0 kan ikke optimeres yderligere.

Design

Pointer fra Afsnit 9 gælder stadig.

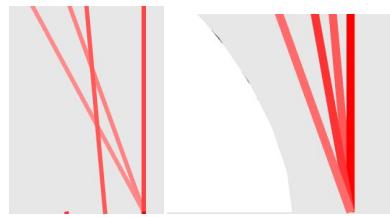
Bygbarhed

Antal stænger: 93

Antal samlinger: 66

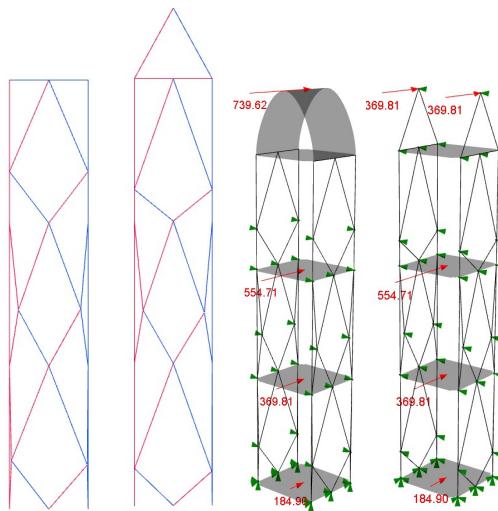
Antal stænger per side er markant reduceret i forhold til 2d versionen af parameteren.

Dette skyldes optimering af randbetingelserne. En yderligere reduktion af antal elementer vil måske kunne opnås ved at afprøve flere værdier for BESO-faktoren (BF).



Figur 13-3 Samling ved 2. lag (tv) Samling ved bygningens fod (th)

Der forekommer dog stadig en række komplikerede samlinger og langt størstedelen af samlingerne er unikke. Dette er dog ikke så slemt som det ser ud ved første øjekast. Den mest komplikerede samling er ved mødet med bunden, hvor 4 stænger mødes i tætte vinkler som ses til højre i **Figur 13-3**



Figur 13-4 Node Move optimeret geometri(tv) Analytisk model (th)

Node Move

Den øverste del af gitteret bliver konfigureret således at gitterstænger ikke løber gennem øverste hul.

stænger igennem det nederste hul tillades for at fortsætte det løbende design.

Igen bliver modellen fastholdt på tværs af lastretningen. I denne model er alle gitterpunkter fastholdt på tværs af lastretningen for at sikre at modellen ikke udbøjer om den ikke-betragtede akse. Effektivt virker modellen ligesom et 2D gitter.

Med viden fra 2d simuleringer indstilles startbetingelserne for Galapagosoptimeringen, som finder det lokale optimum inden for få generationer.

Optimeringen giver samme resultat som i den indledende optimering, da gitterstængerne i forvejen ikke går igennem hullet.

Strukturel effektivitet

Modellen har en høj effektivitet, dog ikke så høj som "Interconnected". Normalkræften har en spredning på 604 kN, hvilket vidner om en stor gevinst hvis der foretages en tværnsnitsoptimering.

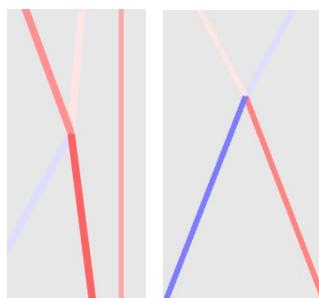
Design

Samme pointer som i Afsnit 9 gælder også for denne model

Bygbarhed

Antal stænger: 125

Antal samlinger: 75

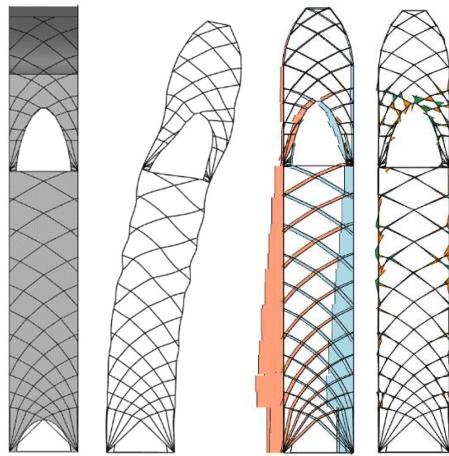


Figur 13-5 Node move samlinger

På trods af det simple design er de fleste samlinger unikke, dog samler de mest komplicerede samlinger kun 4 stænger i en facon, som giver plads til en gittersamling.

Phyllotaxis

Denne model voldte markant flere problemer end de to foregående efter hullet blev introduceret. For at kunne behandle diskontinuiteten, blev der introduceret et ekstra gitter, som skulle understøtte bygningens øverste del. Disse to gitre blev optimeret med hver deres parametre.



Figur 13-6 Phyllotaxis 3D optimering

Ikke alle bygningens stænger kunne opfylde ligevægtsligningerne, og vi tilladte derfor bøjning i stænger for at sikre konstruktionens virkning.

Det betyder at der opstår store momenter lokalt omkringuen, samt langs lodrette stænger, hvilket vil løses i en dimensioneringsproces, da det kun er en lille del af elementerne, som bliver utsat for en stor relativ belastning.

Strukturel effektivitet

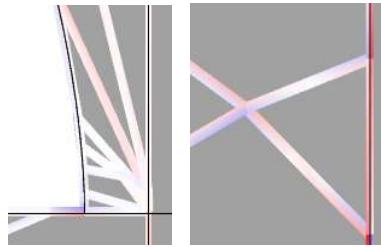
Modellen har en effektivitet markant lavere end den indledende undersøgelse.

Derudover forekommer en relativ stor spredning af normalkræfter på 566 kN, hvilket vidner om en ikke-optimeret konstruktion, før momentet overhovedet er betragtet.

Design

Pointet fra Afsnit 9 gælder stadig.

Volumens form med kantede hjørner står i kontrast til de bløde kurver fra vindgitteret, hvilket skaber et interessant mønster. Hullet bliver understreges med et brud i gitterrytmen.



Figur 13-7 Phyllotaxis samlinger

Bygbarhed

Antal stænger: 1264

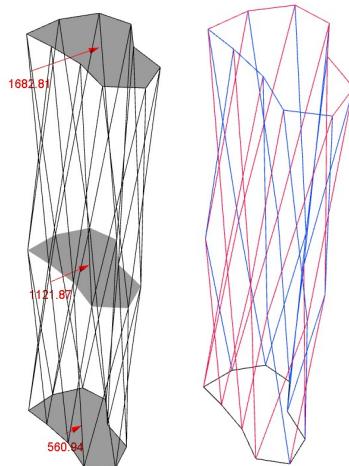
Antal samlinger: 716

Udover et højt antal stænger, hvoraf de fleste er unikke forekommer et meget højt antal unikke samlinger. Derudover er flere af samlingerne ekstra komplicerede da de også skal overføre bøjning. Dette giver sammenlagt en meget ugunstig konstruktion.

13.2 Løsning 2

Denne model analyseres som et 3d gitter.

Da der ikke bruges en multi-objective genetic algorithm (MOGA), skal konstruktionen evalueres på baggrund af et enkelt parameter. Her bruges effektivitetsparametre fremstillet i afsnittet Kriterieanalyse evalueret i dækkets svageste retning, ud fra dækkets hovedakser. Modellerne er understøttet lodret og vandret ved alle møder med nederste dæk.



Figur 13-8 Skråstænger 3D optimering

Skråstænger (*Galapagos*)

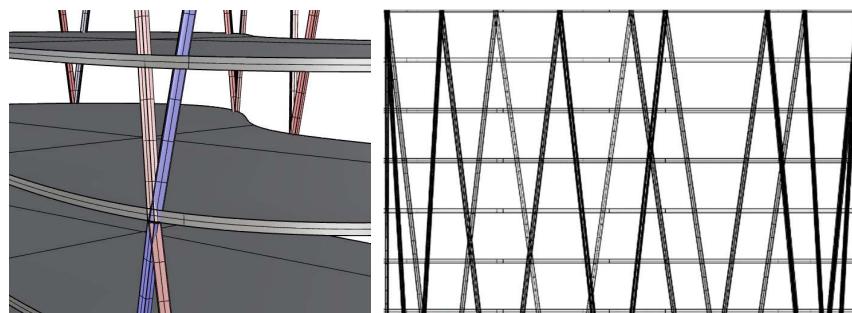
”Skråstænger” bliver lavet som et net af gitterstænger, der lægger sig rundt om en 3D figur og det bliver derfor et 3D gitter. Det er et kendt gitterdesign og har en udmærket effektivitet og er nem at tilpasse en hvilken som helst grundplan. Gitteret er optimeret med Galapagos, hvor der er sat en nedre grænse hvor få stænger der skal til for at grundplanens form skal kunne genkendes. Derefter har Galapagos ændret på antal inddelinger i konstruktionens højde, samt antal inddelinger langs grundplanen.

Strukturel effektivitet

Gitterets effektivitet afhænger kraftigt af grundplanen, og det kan derfor være gavnligt at ændre grundplanen til så de strukturelle egenskaber bliver bedre.

Design

Point fra Afsnit 9 gælder stadig.



Figur 13-9 Skråstænger samling (tv)
Gitter set igennem bygningen (th)

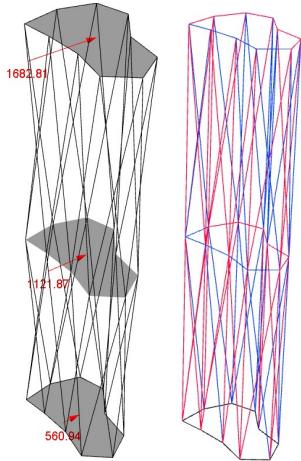
Bygbarhed

Antal stænger: 60

Antal samlinger: 50

Bygningen har et lavt antal unikke samlinger, da vinklen igennem gitteret er ensartet.

Derudover forekommer et lavt antal stænger i forhold til bygningens geometri.



Figur 13-10 Rammer 3D optimering

Rammer (*Galapagos*)

”Rammer” laves på samme måde som ”Skråstænger”, den eneste forskel der er på de to modeller, er at der i rammer også er vandrette og lodrette inddelinger. Hvilket gør at der er lidt mere materiale i ”Rammer” modellen. Dette resulterer også i at de to modellers giver samme resultat. Pointer fra afsnittet om ”Skråstænger” gælder derfor også i dette afsnit.

Strukturel effektivitet

Samme pointer som ”Skråstænger” gælder også her. De vandrette stænger kan dog hjælpe med at aflast dækket for normalkræfter en anelse.

Design

Pointer fra Afsnit 9 gælder stadig

Bygbarhed

Antal stænger: 90

Antal samlinger: 50

Samme pointer som i ”skråstænger” gælder.

13.3 Opsummering af kriterieanalyse

Kriterie	Vægt	Interconnected	Node Move	Phyllotaxis
Algoritme		BESO (beam)	Galapagos +manuel	Galapagos + manuel
Effektivitet	100%	5	4	2
Design	70%	4	4	5
Bygbarhed	60%	3	4	1
Samlet vægtet		3,2	3,06	2,03

Tabel 13-1 Resultater for kriterieanalyse løsning 1

Kriterie	Vægt	Skråstænger	Rammer
Algoritme		Galapagos	Galapagos
Effektivitet	100%	3	3
Design	70%	4	3
Bygbarhed	60%	5	4
Samlet vægtet		2,93	2,5

Tabel 13-2 Resultater for kriterieanalyse løsning 2

Konklusion

På baggrund af kriterieanalysen udvælges parametrene “Interconnected” og “Skråstænger” til designanalysen.

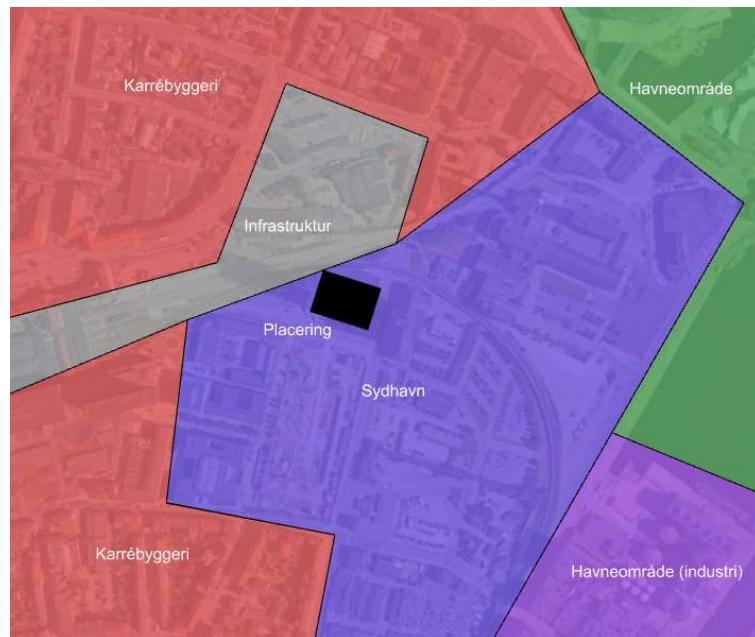
14 Designanalyse af løsningsforslag

Denne del af rapporten analyserer de to forslag igennem deres kontekst som skyskraber i Aarhus. Dette gøres for at kunne foretages et valg mellem de to designs. Gitteret i det valgte design vil derefter blive dimensioneret, og samlingerne eksemplificeret.

14.1 Konteksten

Området omkring grunden grænser op til Frederiksberg mod syd, jernbanen og rutebilstationens mod nord, Bruuns galleri og hovedbanegården mod vest og Kødbyen/Sydhavn mod øst.

Dette betyder at området er uden for Aarhus' klassiske karrébyggeri, og er af Aarhus Kommune udpeget til et af de steder i byen, hvor højhusbyggeri kan accepteres under en række forudsætninger defineret i byens højhusmanual. (Århus-kommune, 2001) Herunder tilstrækkelig hensyntagen til byrummet i form af lokalt klima, byrum ved højhusets fod, trafikale forhold, sigtbarhedslinjer, orienteringspunkter samt byens overordnede arkitektur og proportioner. Der undersøges ikke trafikale forhold og lokalt klima i dette projekt.



Figur 14-1 Bytypologi omkring bygningen [23]

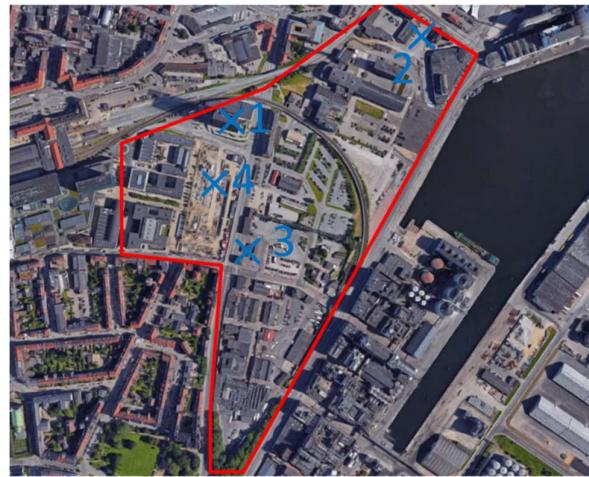
Sydhavn

Området nærmest omkring bygningen, er et af de mest underudviklede områder i Aarhus, når områdets potentiale tages i betragtning. Specielt det tidligere industri og havneområde Kødbyen øst for Spanien, som i øjeblikket hovedsageligt bruges som parkeringspladser og har en lav bygningsdensitet, bestående af virksomhedsdomiciler for mindre virksomheder.



Figur 14-2 Sydhavns området

Den manglende udvikling af området står i kontrast til den eksplosive befolkningstilvækst Aarhus fortsat oplever, samt gode transportmuligheder, og havudsigt. Der er derfor i de seneste år påbegyndt en række projekter, som vil udvikle området en til en ny og moderne bydel i Aarhus.



Figur 14-3 Kommende prestigebyggerier [24]

På billedet ses et lille udpluk af de kommende prestigebyggerier i området omkring grundten.

- 1 – Tårnets placering
- 2 - Mindet 6, som bliver blandt de højeste bygninger i Danmark med sine 144m.
- 3 - Kommende hovedsæde for Danske Bank.
- 4 - Frederiks Plads, hvis højeste byggeri er 24 etager eller 82 meter.

Byggeriet vil altså komme til at indgå i en kontekst med andre høje tårne, og en moderne hovedsageligt kommerciel bydel, som en Aarhusiansk pendant til domicilbyggerierne ud til Københavns havn. Det kommende tårn vil stå som et af ikonerne på denne nye moderne bydel.

Omkringliggende områder

Områderne omkring case-grunden er vist i **Figur 14-1**.

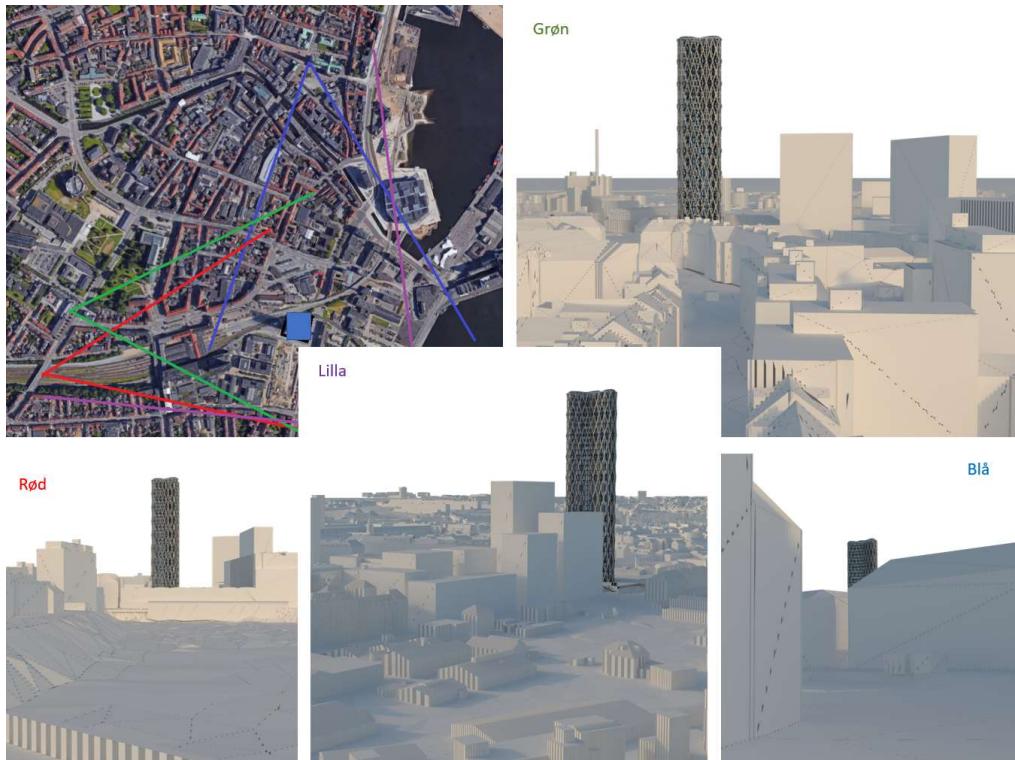
Området nord for byggeriet er hovedsageligt kendtegnet af det lavest mulige byggeri i form af jernbanebyggeri og busterminalen. Jernbanen vil ikke ændre sig markant inden for en overskuelig fremtid. Dette betyder at området vil være fastlåst.

Dog kan Busterminalen forventes som en frihedsgrad. Da den sandsynligvis vil blive udviklet yderligere inden for en overskuelig fremtid grundet den eksplorative vækst i langdistance busrejser både indenrigs og udenrigs, som det er set i de seneste år. Vigtigst af alt er måske området umiddelbart vest for byggeriet, som består af klassiske karrébyggerier, som kan betragtes som kernen i aarhusianske byarkitektur. Det er derfor vigtigt at et evt. kommende byggeri skal tage hensyn til denne kontekst. Området mod øst er irrelevant da det ligger mod industrihavnen og vandet, og ikke har store udsigter for byudvikling.

Tårnet ligger altså i en position som forbinder flere forskellige byrumstypologier, hvor karrébyggeri, domicilbyggeri og infrastrukturbyggeri alle giver kontekst til byggeriet, og en optimalløsning vil kunne fungere som hjørnesten mellem disse forskellige områder.

14.2 Sigtelinjer og proportioner

Som defineret i højhusmanualen er bygningens forhold til proportioner og sigtbarhedslinjer essentielt for at få lov til at bygge et højhus i Aarhus kommune. Der er derfor blevet foretaget en analyse af disse på baggrund af den offentligt tilgængelige 3D bymodel.



Figur 14-4 Synligheden af løsning 2 fra byrummet

Det ses at bygningen vil være synligt fra alle de valgte sigtelinjer og samtidig bryde med de normale byproportioner i Aarhus. Bruddet er dog ikke ligeså markant som man ville forvente af et 140m højhus midt i byen. Dette skyldes bl.a. byggeriet på Frederiksplads, som giver en fortætning omkring på bygningens sydlige side. Dog ligger nordsiden mod det åbne infrastrukturområde, hvilket giver en nøgen facade ud mod byen som kan ses bl.a. ses i den lilla sigtelinje.

Byggeriet vil være synligt fra de fleste af Aarhus' åbne udsigtslinjer, større gader og øvre etager.

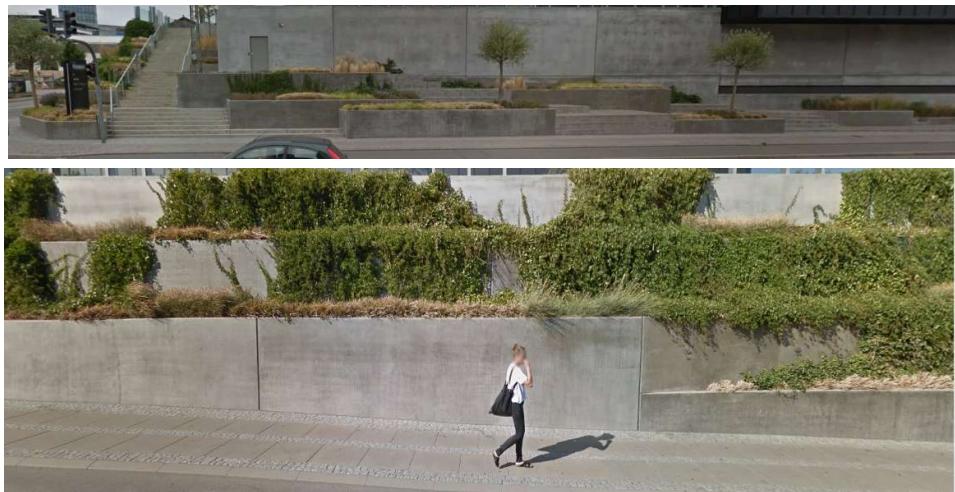
Byggeriet får derfor position som et symbol på Aarhus' udvikling, en position som den skal dele sammen det kommende Lighthouse byggeri og Mindet 6. Der bliver dog stillet endnu højere krav til dette byggeri i forhold til de to andre højhuse i forhold til sammenhængen med den eksisterende byarkitektur. Dette giver derfor mulighed for et projekt som kan definere Aarhus.

14.3 Byrum i gadeplan

Det umiddelbare byrum omkring byggeriet er kendetegnet ved at være særligt fodgængerfjendsk. Dette skyldes to ting; der er ikke umiddelbart meget grund til at bevæge sig rundt i området som fodgænger, da der hverken er tæt boligbyggeri eller attraktive rekreationsmuligheder. Derudover er adgangsveje for fodgængere markant reduceret grundet jernbanen, som ikke blot lukker af med sine skinner, men også gør det forbudt at bevæge sig på fod mod Bruuns Galleri og Hovedbanegården, hvor hovedstrømmen af fodgængere ellers skulle komme fra.

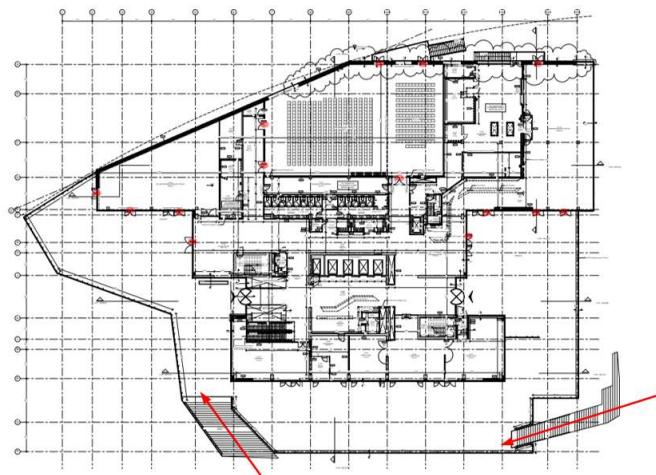
Da disse forhold kan forestilles at ændre sig, er det stadig relevant at tage hensyn til byrummet.

Som randbetingelse for projektet er det valgt at beholde den eksisterende platform.



Figur 14-5 Platformen set fra gadeniveau

Facaden af platformen mod gadeplan vidner om et introvert byggeri. De store betonelementer danner en mur mellem fodgængerens og byggeriets. Muren er opbygget i plateauer som muliggør for grønning af gadeplan, som opbløder facaden, men bevoksningen er tæt og indbyder ikke til ophold.

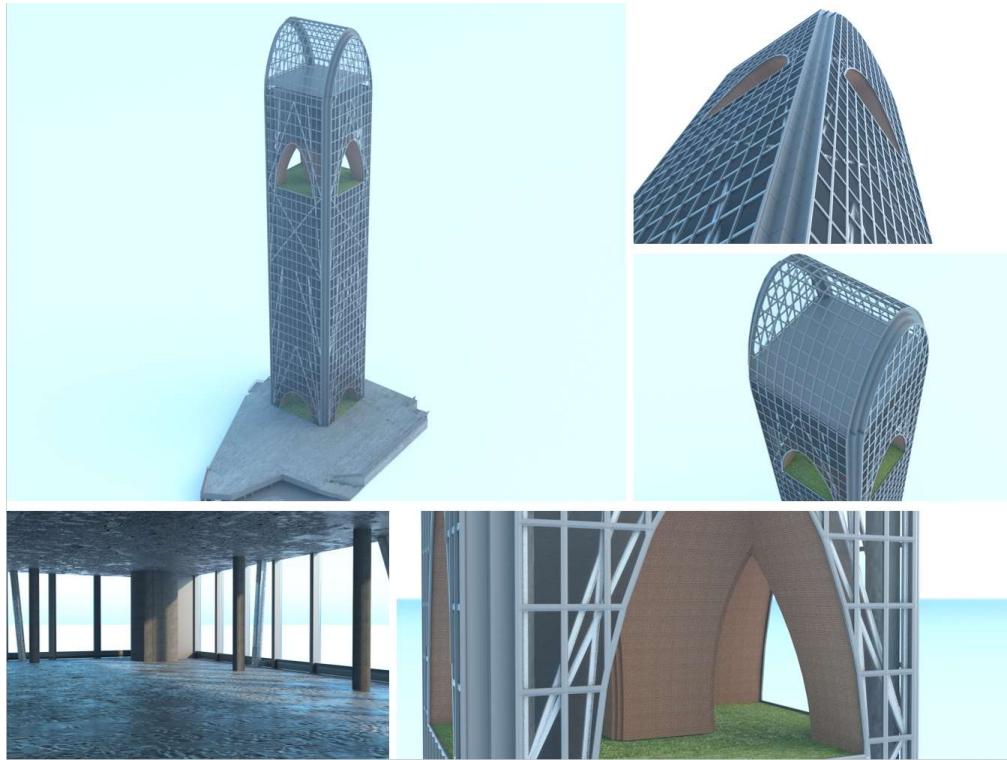


Figur 14-6 Adgangsveje til platformen

Der er adgang til plateauet fra to hovedtrapper, dog kan det ikke ses fra gaden hvad trappen fører op til grundet en stor forskel i højde og hele plateauets funktion ender med at opdele bygningen fra gadeplanet, hvilket fremmedgør fodgænger'en.

Et fuldendt design skal inkorporer plateauet med det omkringliggende gader, dette er dog svært at opnå grundet plateauets introverte funktion.

14.4 Løsning 1



Figur 14-7 Indvendigt og udvendigt design

Tårnet har et kvadratisk plan med "trappehjørner". Denne grundplan trækkes opad indtil den afrundes i en rumlig bue som dannes af to plane buer. Trappehjørnerne afhjælper hvirvelafløsning, som forekommer ved vind på høje og slanke bygninger, lignende hjørner er benyttet på Taipei 101 bygningen i Taipei, Taiwan. Trapperne danner bånd som løber langs siden af bygningen og skaber en tydelig inddeling mellem de ellers flade og diskrete sider.

Som et kommende symbol på Aarhus og med en krone som er synlig i det meste af Aarhus, vil bygningens design stå og falde med bygningens afslutning.

Buen skal opbløde bygningens øvre stop, hvilket smelter bygningen bedre sammen med omgivelserne. Buen skaber et unikt rum på bygningens top med ovenlys samt en uovertruffen 360 graders udsigt.

Bygningen defineres derudover af to åbninger i facaden, som skaber en kontrast mellem det interne og eksterne udtryk. Den ene åbning placeret i bygningens øvre del og den anden er placeret ved tårnets fod. Begge åbninger definerer et rum, beklædt med mursten lig de klassiske aarhusianske karrébyggerier samt en tung kerne. Åbningerne er

dannet af buede former, som er et nik til et andet aarhusiansk ikon nemlig Aarhus Domkirke, der indvendigt har det meget genkendelige hvælvet loft, som ofte ses i middelalderkirker, samt ses der også ved døren bure med trappe indhug rundt om, som i konstruktionen.



Figur 14-8 Inspirationer til design fra Aarhus Domkirke [25],[26]

Dette giver en legefuld kontrast mellem den moderne glasfacade og de klassisk inspirerede åbninger i bygningen.



Figur 14-9 Rendering af øvre tårnhave

Åbningerne danner ramme omkring to haver, hvor mursten og beplantning mødes for at skabe et udsigts- og pauserum i højden for tårnets brugere. Den massive størrelse af den øverst åbning gør hullet til en definerende del af tårnets udseende udadtil. Rummet i stueplanen skal byde velkommen til bygningen og skal ligeledes fungere som pauserum. Idet tårnet kommer til at blive en konstant del af bybilledet, har bygningen også et ansvar for at bidrage positivt til aarhusianerne, som ikke i det daglige er brugere af bygningen. Den grønne åbning skal være synligt igennem Aarhus så bygningen ikke blot er til for brugerne, men kommer til at indgå som en del af Aarhus.

Bygningens facade er opdelt af rektangulære vinduer som inddelt med etagehøjden 3.7m samt en bredde på 2m. Dette design er afdæmpet og repetitivt.

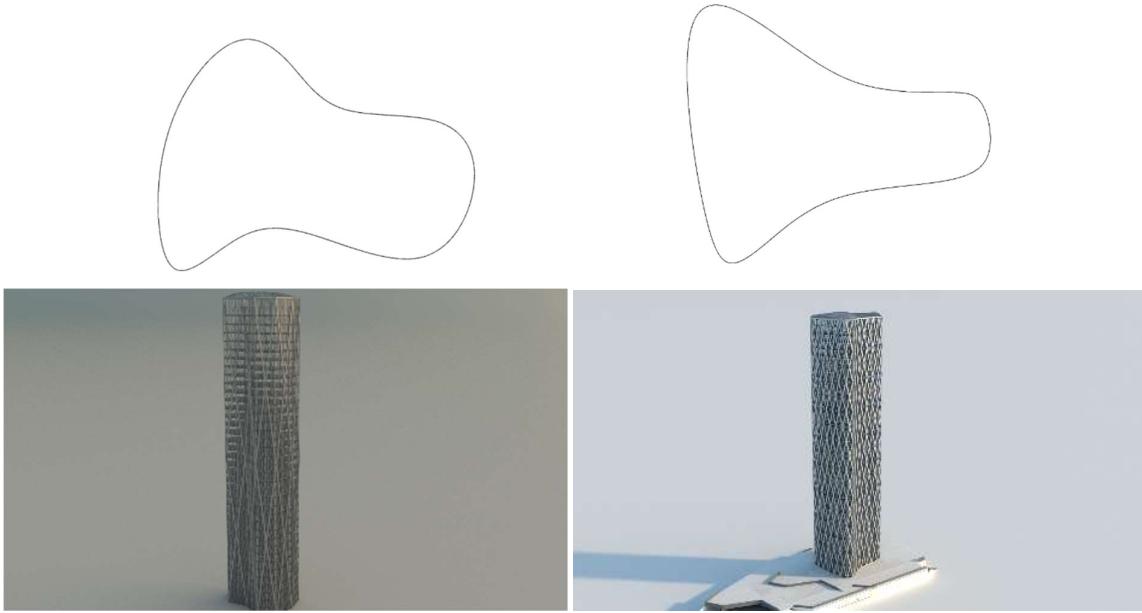


Figur 14-10 Gitterdesign løsning 1

Gitteret er placeret på facadens inderside, hvilket gør gitteret mindre synligt fra lang afstand, men vil være mere synlig des tættere man kommer på bygningen, grundet rudens refleksivitet. Gitteret afslører derfor sig selv jo tættere man kommer på bygningen. Rudernes refleksivitet er en funktion af indeklimaet.

Herved afsløres gitterets kaotiske natur, som står i kontrast til de ellers simple og kvadratiske vinduesmønster. Gitterets geometriske udtryk er forklaret i Afsnit 9.1. Gitteret er også synligt inde fra bygningen, hvor gitterets kaotiske natur vil stå i overraskende kontrast til facadesøjernes rolige rytme, specielt når man ikke kan se hele gitterets geometri kan dette skabe forundring og nysgerrighed hos brugeren. Gitteret pakkes ind i brandbeskyttende materiale som vælges i matchende farve til interiør.

14.5 Løsning 2

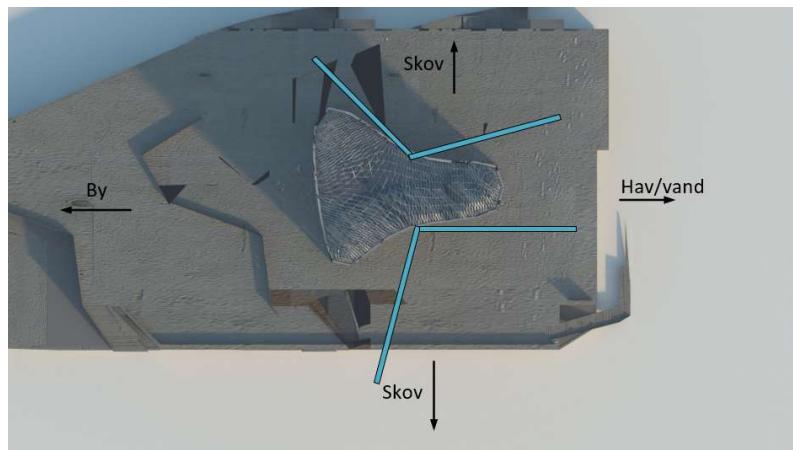


Figur 14-11 Indledende design og grundplan
(tv) Endeligt design og grundplan (th)

Efter optimeringen, blev der fundet frem til en bygning med en grundplan inspireret af trekanten dog opblødt med afrundede kanter og ikke-lineære sider. Formen er derefter blevet diskretiseret af gitteret efter optimering.

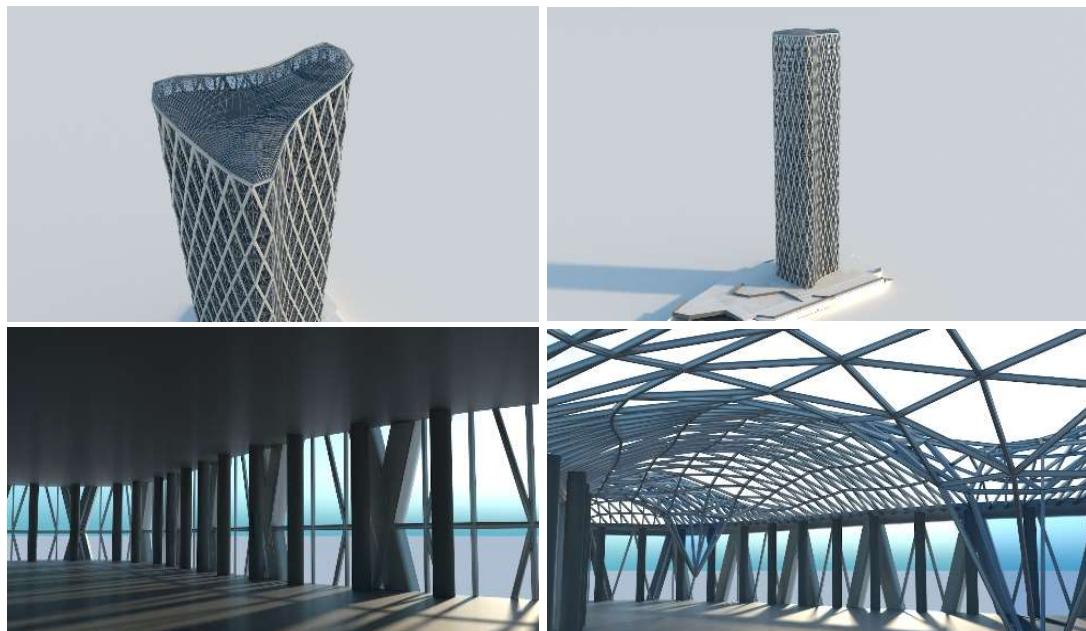
Denne grundplan har to formål.

1. At optimere udsigten mod hav og skov for den største del af brugerne som muligt, da denne udsigt er vurderet mere attraktiv. Dette opnås ved at øge det procentvise overfladeareal som vender mod disse områder.
2. Den trekantede grundplan har markante strukturelle fordele, hvilket muliggør rumeffekt for det vindafstivende gitter. Grundplanen er markant bredere end tidligere, hvilket giver et markant højere global stivhed.



Figur 14-12 Udsigt fra løsning 2

Bygningens facade bliver defineret af et udvendigt gitter med markant geometri, som følger bygningens form. Optimeringen fandt et tæt gitter som optimalt for denne grundplan. Vinduerne bliver underinddelt i trekantede med udgangspunkt i samspil med romberne dannet af det vindafstivende gitter. Gitteret pakkes ind i en kombineret korrosion og brandbeskyttelse. For brugere af bygningen giver det tætte gitter solafskærming.



Figur 14-13 Indvendigt og udvendigt design
NB. Gitter ikke dimensioneret

Den øverste etage i bygningen skal afslutte den lodrette facade. Her benyttes et gittertag med bløde former fundet ved formfindings princippet dynamic relaxation, som danner en skalstruktur ud fra fysiske principper deformationsprincipper.

Formen findes ved at tage et mesh (trianguleret mesh) og påfører en lodret fladelast samt to modsatrettede punktlaster som danner sjæler, derefter bliver der fundet en form der er i statisk ligevægt ved brug af Newtons 2. lov. Systemet bliver derefter transformeres til et massefjeder system, hvor stængerne i mesh'et betragtes som fjedre, og lasten bliver placeret i mesh'ets knuder. Da fjedrene ingen bøjningsstivhed har, opnår man et system hvor der kun kan optages aksiale kræfter. Mesh'et bøjer derfor ud efter de påførte laster, og den deformerede geometri danner gittersystemmet.

Etagen giver en slående afslutning på bygningen, men er ikke synligt for andre end bygningens brugere. Dette er et gennemgående tema for bygningens arkitektur. Bygningen er optimeret for brugeren og ikke i forhold til den almene aalborgianer. Bygningens samlede udtryk er fokuseret på brug af strukturelt stål i gitteret og den afrundede grundplan, hvilket står i kontrast til den ældre del af Aarhus, men byder en ny tid velkommen. Dette vil gøre bygningen til et ikon på Aarhus' skyline. Et ikon som varsler en ny tid for Aarhus, men samtidig også repræsenterer et brud på byens gennemgående arkitektur. For en ikonisk og definerende bygning vil det synergi være at foretrække frem for kontrast.

14.6 Delkonklusion

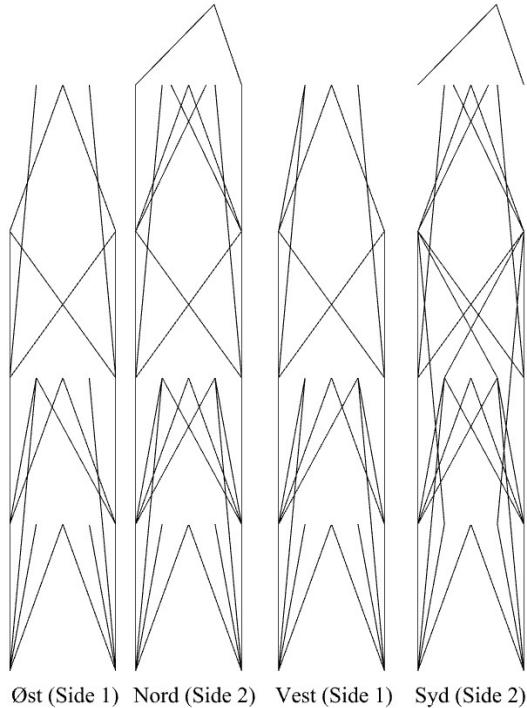
Begge løsninger har fordele og ulemper, og ved højhusbyggerier er det svært at opnå et perfekt design, derfor er det vigtigt at opveje alle fordele og ulemper. Bygningens proportioner bryder ikke markant med resten af Aarhus grundet den store udvikling som kommer til at foregå i området omkring byggeriet i de kommende år, hvilket gør begge forslag sandsynlige.

Løsning 2, bryder med den eksisterende byarkitektur, da den er mere futuristisk og teknologioptimistisk i sit udseende. Dog er denne løsning mere opmærksom på sine brugere og hvordan de kommer til at opleve byen, hvis der kigges ud fra bygningen. Løsning 1 integrerer mere af Aarhus' arkitektur i sit design, og repræsenterer ikke i lige så høj grad et brud med kontinuiteten. Løsningen trækker mere af byen ind i bygningen ved at omdanne åbningerne til haver.

På baggrund af denne løsning vurderes det at Løsning 1 er at foretrække for Aarhus. Dette er begrundet på baggrund af parametre som stiller krav til opførsel af et højhus opstillet i højhusmanuale. Der er blevet argumenteret for at bygningen er en forlængelse af byens generelle arkitektoniske udtryk og giver en yderligere berigelse af bylivet sammenlignet med Løsning 1. Konklusioner omkring sigtelinjer og proportioner er ens for begge bygninger.

15 Strukturel eftervisning af optimeret gitter

I dette afsnit vil gitteret fra Løsning 1 blive dimensioneret efter Eurocode og et eksempel på en samling vil blive eftervist. Derudover fremføres et forslag til opførelsesprocedure.



Figur 15-1 De 4 gittergeometrier

15.1 Forudsætninger

Eftervisningen tager udgangspunkt i snitkræfter og udregninger fundet i Bilag 1.D – Afsnit 5.

Da casen omhandler et stålgitteret der skal bruges til stabiliteten, er det vigtigt at få fastsat materialeegenskaberne for stålet.

Materiale	Stål 355
Karakteristisk styrke,	355
f_{yk} [MPa]	
Elasticitetsmodul, E[MPa]	$0,21 \cdot 10^6$
Rumvægt, ρ [kg/m ³]	7850
Poissons forhold, ν [-]	0,3
Partialkoefficienter, γ [-]	
	γ_{M0} 1,1
	γ_{M1} 1,2

Tabel 15-1 Materialeegenskaber for stål

For at få fordelt kræfter til gitteret bruges der betondæk til at før kræfterne ud til gitteret. Derfor skal materialeegenskaberne for betondækkene også fastsættes. Disse bliver ikke dimensioneret men har haft indflydelse på fordelingen af kræfterne i til gitteret

Materiale	C35 Beton
Karakteristisk styrke, f_{yk} [MPa]	35
Elasticitetsmodul, E[MPa]	$34 \cdot 10^3$
Rumvægt, ρ [kg/m ³]	2400
Poissons forhold, ν [-]	0,2
Partialkoefficienter, γ [-]	
γ_c	1,45
γ_s	1,2

Tabel 15-2 Materialeegenskaber for beton

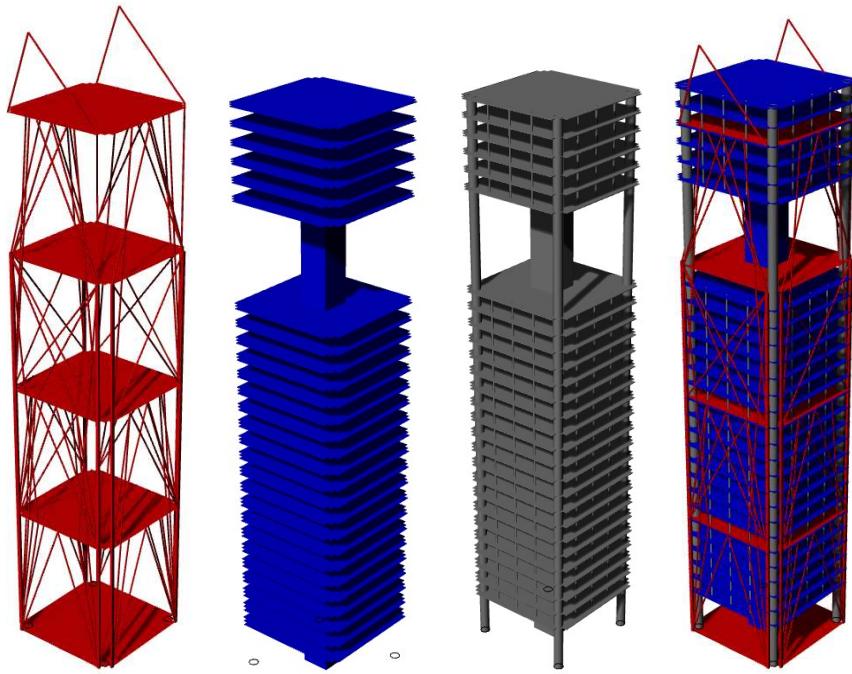
15.2 Vandret statisk system

Tårnet bliver afstivet af to statiske systemer, et primært og et sekundært.

Det primære afstivende system er vindgitteret, hvis formål er at flytte vindlaster fra en række udvalgte dæk til fundamentsoverkant.

Det sekundære afstivende system er en betonkerne, hvis formål er at overføre kræfter fra samtlige etagedæk, til de etager, hvor vindgitteret optager kræfter.

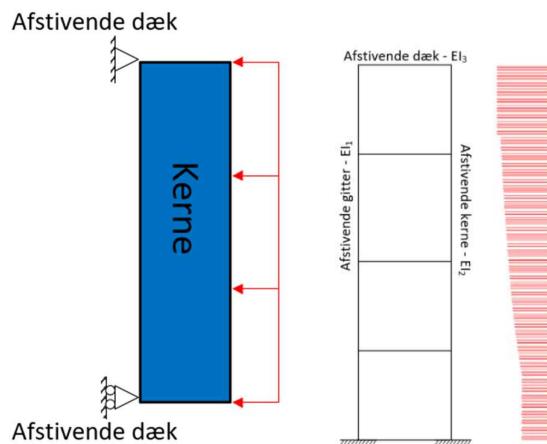
Facaden kan betragtes som det tertiære statiske system, som skal overføre vindlast gennem facadesystemet til etagedæk. Lodret system er ikke betragtet i denne rapport.



Figur 15-2 Primært system (Rød), sekundært system(blå) og Lodret system (grå)

Sekundært system

Kernen regnes ikke i dette projekt, men betragtes som en høj bjælke understøttet af det primære afstivende system.



Figur 15-3 statisk system for det sekundære system
(tv) Evt. Forfining af model (th)

Ved videre projektering kan de to systemer betragtes som koblede med dækket som bindelede. Det antages at gitterets stivhed er markant større end kernens.

Det afstivende system i den øverste kuppel dimensioneres separat. I dette afsnit betragtes den blot som et stift element.

15.3 Lastgrundlag

Vindhastigheden er beregnet som terrænkategori IV svarende til tæt bebyggelse (CEN, 2007a, Anneks A). Middelvindhastigheden beregnes til $v_m = 18,1 \frac{m}{s}$ Bilag 3.A

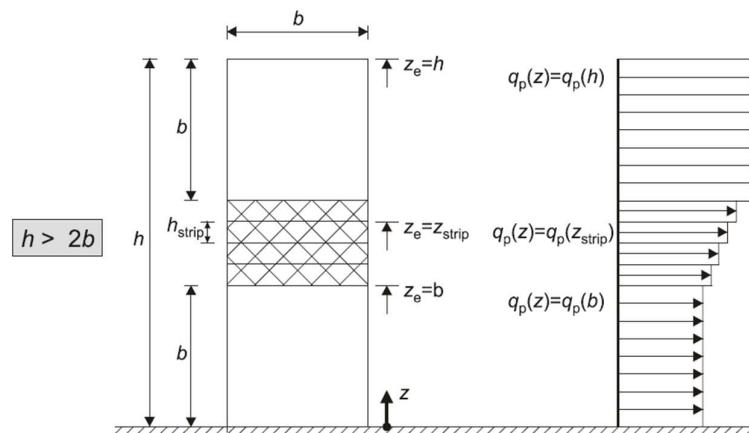
Vindlast virkende på facade beregnes efter den generelle formel som gælder op til 200m

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (\text{EC1991-1-4 5.3})$$

[15-1]

Denne formel inkluderer bygningens strukturelle respons i form af svingninger ved dynamisk turbulens ved at regne $c_s c_d$ ud fra Eurocode afsnit 6.1. (CEN, 2007a)

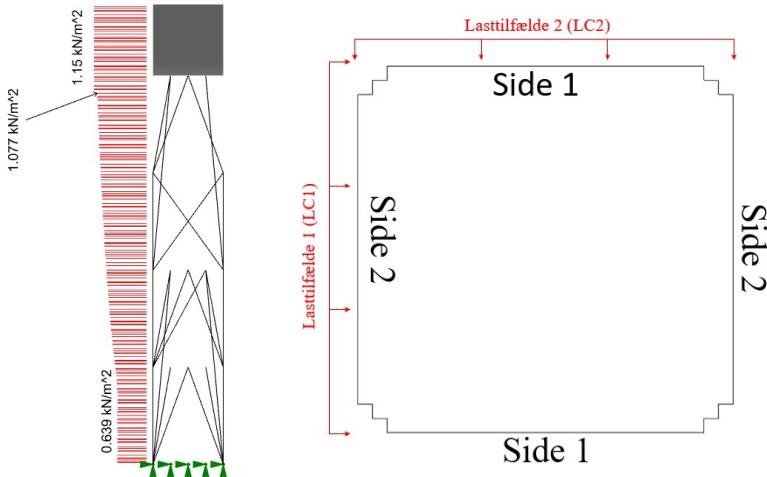
Denne beregning tager udgangspunkt i den forsimplede grundfrekvens defineret i Anneks F.



Figur 15-4 Vindlastens virkemåde på høje konstruktioner [27]

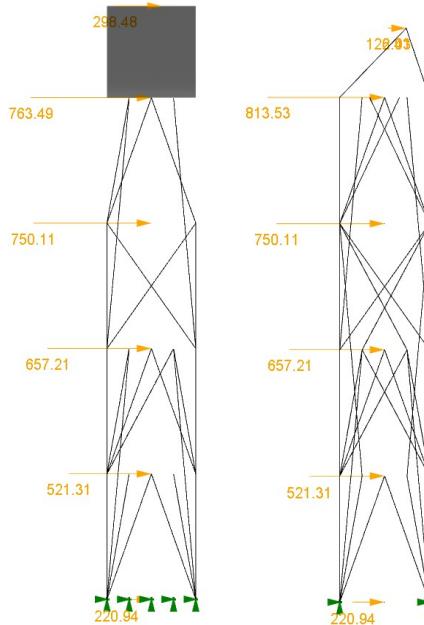
Z [m]	Placering	Fw [kN/m ²]
140	Bygning top	1,15
115	Øverst varierende del	1,077
25	Nederst varierende del	0,639

Tabel 15-3 Vindlast i forskellige højder

**Figur 15-5** Vindlast på konstruktionen

Konstruktionen behandles i to vindretninger vinkelret ind på de to facader. Dette tillader at de to gitre betragtes isoleret.

Bygningens hul betragtes som lukket og vinden virker på en firkantet overflade på den sikre side. Fladelasterne bliver projekteret ind på det primære afstivningssystem i pladernes tyngdepunkt.

**Figur 15-6** Side 1 (tv) og Side 2 (th) (med karakteristiske vindlaster)

Vortex-Shedding Bilag 3.B

Ud fra beregninger baseret på en kvadratisk grundplan og Eurocodes forsimppling af egenfrekvensen vurderes *vortex-shedding* ikke sandsynligt baseret på Eurocodes krav (CEN, 2007a, Anneks E.1)

$$v_m \cdot 1,25 > v_{crit}$$

[15-2]

CFD og vindtunnelforsøg

Det er vigtigt at bemærke at disse betragtninger ikke vil være tilstrækkelige i et virkeligt projekt, da en mere præcis eftervisning af vindens forløb omkring konstruktionen er nødvendig. I de fleste tilfælde vil dette foregå med reelle vindtunnelforsøg, dog kan en CFD-analyse også benyttes. Denne type eftervisning vil specielt være nødvendig for at bestemme lokal komfort og eftervisning af enkelte facadeelementer.

Lastkombination

Der regnes med lastkombination 2.3 iflg. Teknisk Ståbi version 23 (Dominerende Vindlast)

Bygningen er i konsekvensklasse 3. Hvilket giver kombinationsfaktor 1.65.

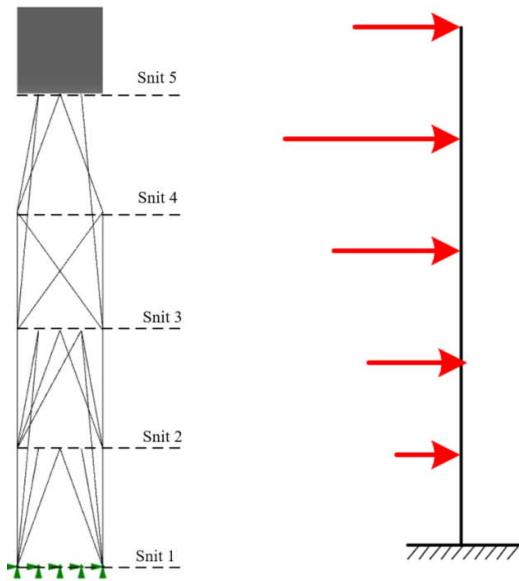
Modelverificering

For at verificere Karamba-modellen foretages to verificeringer udover en momentligevægt som er indbygget i scriptet. En for snitkræfter og en for udbøjning.

Snitkræfter

Der foretager en række snit i gitteret, hvorfra momenterne sammenlignes med en momentet i en udkraget bjælke som er påført den samme last og med samme dimensioner. Kun side 1 betragtes.

Beregningerne i scriptet kan findes i Afsnit 5.2 i Bilag 1.D



Figur 15-7 Statiske systemer for snitkrafts sammenligningen

Snit	Moment i model [kN · m]	Moment i bjælke [kN · m]
1	$2,54 \cdot 10^5$	$2,54 \cdot 10^5$
2	$1,69 \cdot 10^5$	$1,65 \cdot 10^5$
3	$9,17 \cdot 10^4$	$9,17 \cdot 10^4$
4	$3,79 \cdot 10^4$	$3,80 \cdot 10^4$
5	$7,67 \cdot 10^3$	$6,47 \cdot 10^3$

Tabel 15-4 Snitkræfter i model og bjælke til sammenligning

Beregningerne for moment i udskraget bjælke findes i Bilag 4.C

15.4 ULS eftervisning

Løsningen af optimeringen placerede flere stænger på samme sted i de lodrette stænger. I stedet blev alle lodrette stænger erstattet af et stærkere profil for at simulere denne virkning.

Element ID:	Tværsnit (RHS)
0-11 (S1) (Kantstænger side 1)	700x500x20
12-51 (S1) (Andre stænger side 1)	300x200x20
0-11 (S2) (Kantstænger side 2)	700x500x20
12-61 (S2) (Andre stænger side 2)	300x200x20

Tabel 15-5 Tværsnitsdimensioner

Alle stænger dimensioneres med søjleudknæk efter Eurocode metoden som sjæletilfælde a.

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma m_1} \quad [15-3]$$

Alle stænger er fastholdt af dæk i hver etage, hvilket giver en søjlelængde svarende til deres spænd mellem etager

Dette giver følgende udnyttelser for udvalgte stænger (værste for de to tværsnit):

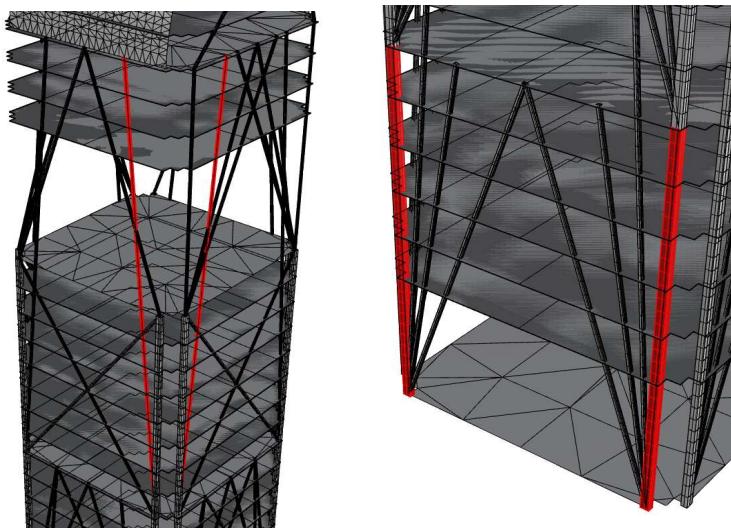
Stang ID:	Søjlelængde [m]	Bæreevne [kN]	Designlast [kN]	Udnyttelse [%]
3	3,7	13512	5902	44
21	3,93	4612	3211	70

Tabel 15-6 Udnyttelser gitterside 1

Stang ID:	Søjlelængde [m]	Bæreevne [kN]	Designlast [kN]	Udnyttelse [%]
0	3,7	13512	5245	39
29	3,93	4612	3148	66

Tabel 15-7 Udnyttelser gitterside 2

Beregningerne kan ses i Bilag 1.D Afsnit 5



Figur 15-8 Placering af de højest udnyttet gitterstænger

15.5 SLS-eftervisning

I SLS-undersøgelsen bliver der både undersøgt for udbøjning og acceleration i konstruktionen.

Udbøjning

Selve optimeringen er lavet ud fra udbøjningen og derfor overholder bygningen krav til udbøjningen. Udbøjningskravene er taget fra Code of Practice for Structural Use of Steel 2011 en af byggereglementerne i Hong Kong. (Buildings-Department, 2011)

Udbøjningkravet i toppen af et højhus af stål er ifølge reglementet $h/500$ for vindlast, dette krav varierer alt efter, hvilket materiale der bliver benyttet. Grunden til at der bruges retningslinjer fra Hong Kong er at der i Eurocode ikke er nogle retningslinjer for udbøjning i højhuse. (Smith, 2011) I en endelig eftervisning vil den relative flytning mellem etager, eller "storey drift", også skulle eftervises.

For at verificere den udbøjning vi får fra Karamba3D, laves der en beregning af virtuelt arbejd i gittersystemet efter **Eq. 15-4**

$$u_b = \sum_{j=1}^n S_{j1} \cdot \frac{S_j}{A_j \cdot E} \cdot L_j \quad [15-4]$$

I beregning, bruges de fundne stangkræfter fra modellen, samt virtuelle stangkræfter, fra en virtuel last placeret i toppen af konstruktionen for udregninger se Bilag 4.B.

Retningslinje = h/500	Udbøjning (Grasshopper)	Udbøjning (Virtuelt arbejde)
28 cm	27,1 cm	25,8 cm

Tabel 15-8 Udbøjnings verificering

Det kan ses at både udbøjningen fra Grasshopper og virtuelt arbejde ligger under retningslinjen. Derudover kan ses at der ikke er særlig stor forskel på udbøjningen fra Grasshopper og udbøjningen fra virtuelt arbejde. Denne sammenligning verificerer udbøjningen af Karamba3D-modellen.

Acceleration

En yderlig undersøgelse der skal laves for at eftervise bygningskomfort, er en undersøgelse af bygningens acceleration. Bygningens acceleration er vigtig at holde lav, da den ellers kan mærkes af bygningens brugere og ved lang tid udsættelse eventuelt føre til bevægelsesssyge.

For at kunne vurdere hvor høj accelerationen for konstruktionen må være skal bygningens egenfrekvens udregnes. Egenfrekvensen er udregnet efter EC 1991-1-4 2007

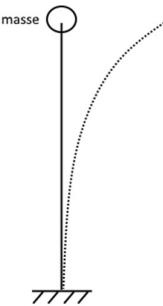
Eq. 15-5

$$n = \frac{46}{h} \quad [15-5]$$

Til at sammenligne egenfrekvensen fra Eurocode har vi i FEM-design opstillet et forsimplet et-frihedsgradssystem i form af en udkraget bjælke/søjle med samme stivhed som højhuset. I enden af bjælken er der så placere en ækvivalent masse der svarer til konstruktionens masse Eq. 16-6

$$m_{\text{ækvivalent}} = m \cdot \int_0^h \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta dz \quad [15-6]$$

Hvor $\zeta = 1,5$ i høje slanke konstruktioner og kan findes i EC 1991-1-4 og m er masser per meter.

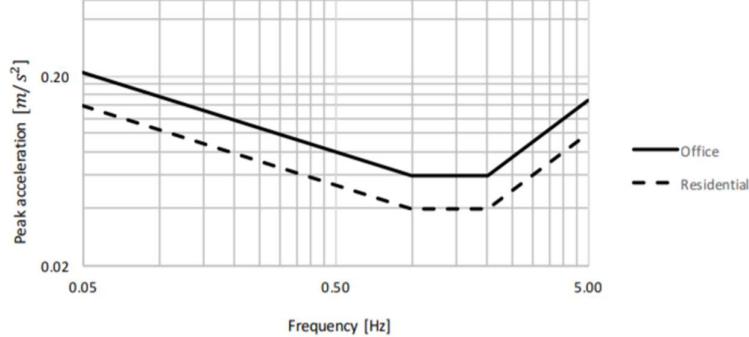


Figur 15-9 Statisk system for bjælke med ækvivalent masse

Egenfrekvens EC	0.32 Hz
Egenfrekvens FEM	0.45 Hz

Tabel 15-9 Sammenligning af egenfrekvenser

Ifølge ISO 10137 ser sammenhængen mellem kravet for acceleration og frekvens ud som set på ovenstående figur. Da vores frekvens er 0.32, kan det ses at peak acceleration maksimalt må ligge i intervallet mellem 0.1 m/s^2 og 0.06 m/s^2 . (2007d)



Figur 15-10 Komfortkrav for bygningsacceleration [28]

For at regne peak accelerationen skal man først beregne standardafvigelsen af konstruktionens karakteristiske acceleration i vindens retning i højden z **Eq. 15-7** (CEN, 2007a, B.10)

$$\sigma(z) = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot l_v(z_s) \cdot v_m^2(z_s)}{m_e} \cdot R \cdot K_x \cdot \phi_x(z) \quad [15-7]$$

Hvor R er en resonansfaktor, K er en dimensionsløs formfaktor og ϕ_x er grundsvingningsformen.

Der er forskellige måder at finde K på og de kan findes i enten Eurocode eller anneks. Grundsvingningsformen findes ved at slå op i Eurocode og derefter finde ud af hvilken svingningsform der passer til konstruktionen. Resonansfaktoren R er den vigtige del af formlen da denne tager højde for den dynamiske amplifikation. Her indgår bl.a. det logaritmiske dæmpningsdekkrement. For at finde R, skal man uddover det logaritmiske dæmpningsdekkrement også bruge den dimensionsløse spektrale tæthedsfunktion og de aerodynamiske admittansfunktioner som forholder sig til vindpåvirkning og strukturel virkemåde. Formlerne kan findes i Eurocode 1-1-4 Anneks B-F (CEN, 2007a) og i Bilag 3.C.

Det logaritmiske dæmpningsdekkrement findes **Eq. 15-8**

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad [15-8]$$

Hvor δ_s er konstruktionens logaritmiske dæmpningsdekkrement, som kan finde i tabel F.2 i Eurocode 1-1-4 Anneks F (CEN, 2007a)

δ_a er det logaritmiske dæmpningsdekkrement for aerodynamisk dæmpning ved grundsvingningen **Eq. 15-9**

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} \quad [15-9]$$

δ_d er det logaritmiske dæmpningsdekkrement for påførte dæmpninger, hvilket kan være *tuned mass damper* eller en viskøs dæmper.

For at regne peak accelerationen skal, standardafvigelsen ganges med peakfaktoren K_p hvor man sætter opkrydsningsfrekvensen lig med den naturlige egenfrekvens af konstruktionen.

I vores tilfælde fås:

Peakacceleration	0,255 m/s ²
Komfortkrav for acceleration	0,06 m/s ² til 0,1 m/s ²

Tabel 15-10 Accelerations tabel

Værdien ligger for højt i forhold til de komfortkrav der bliver stillet i ISO 10137 og derfor ville der skulle laves nogle ændringer. Man kunne enten give bygningen en højere vægt da massen indgår i nævneren i standardafvigelsen og det aerodynamiske

dekrement. Ellers skal man søge en anden form for yderligere dæmpning, som der bliver brugt i mange slanke højhuse. Dette kan forekomme i form af enten en *tuned mass damper* eller en viskøs dæmper. Yderligere kan bygningens stivhed optimeres i således at egenfrekvensen og dermed accelerationskravene bliver ændrede.

Hvis bygningen skulle dæmpes, er der regnet en nødvendig dæmpningsgrad for at accelerationen ville lægge sig under grænsen. For at udregne dæmpningsgraden er der taget udgangspunkt i **Eq. 15-10**

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad [15-10]$$

For at finde dæmpningsgraden bliver formlen skrevet om, da der sættes et dekrement for dæmpningen så acceleration ligger under grænsen **Eq. 15-11**:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \delta}} \quad [15-11]$$

Ud fra formlerne fås følgende værdier for den nødvendige dæmpning:

Acceleration	0.255 m/s ²
Nødvendig dæmpningsgrad	6.4%
Dæmpningskoefficient	770.25kNsm

Tabel 15-11 Nødvendig dæmpning

Udregningen for dæmpningskoefficienten kan findes i Bilag 3.C

En dæmpningsgrad på 6.4% er mulig at opnå med viskøse dæmpere. I følge et forskningsprojekt lavet af Arup er det muligt med viskøse dæmpere typisk indbygget i dæk at opnå en dæmpningsgrad på mellem 5-10% (Smith and Willford, 2008)

15.6 Ikke-betragede eftervisninger

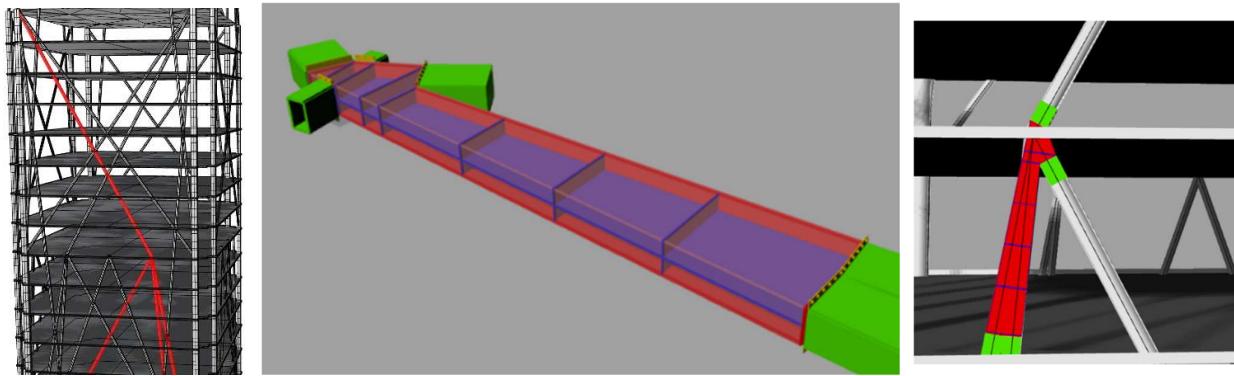
Brandedeftervisning for gitteret er nødvendigt, men er dog ikke betragtet i dette projekt. Eftervisning af tvangslaster fra temperatursvingninger er nødvendigt, men er ikke betragtet i dette projekt. Derudover skal ud mattelse af stålgitteret ved cyklisk belastning eftervises.

15.7 Samlingsprincip

Der forekommer to hovedkategorier af samlinger i gitteret.

1. Lastoverførende samling som overfører laster fra dækket til gitteret i det primære statiske system.
2. Afstivende samling, som sikrer mod søjleudknæk for gitteret i mødet med hver etage.

I dette afsnit eksemplificeres samlingskategori 1 ved følgende markerede samling.



Figur 15-11 Betragtede stænger – Strukturelt opdeling for samling – Samling set med gitter

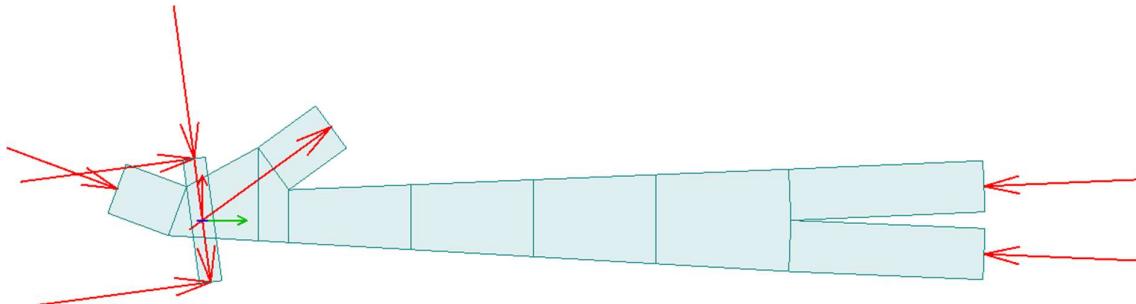
Samlingen består af en svejst stålkasse (rød), interne afstivere (blå), stangprofiler som mødes (grøn) samt en boltet samling mellem stålkassen og profillerne (gul).

Samlingen skal primært optage vandrette kræfter fra dækket. Denne overførsel af kræfter sikres ved at indstøbe armering, som bliver afsluttet i en stålplade. Derudover skal stangkræfterne fra den øvre del af konstruktionen føres igennem samlingen, hvilket bedst løses ved at lade stængernes centerlinjer mødes.

Element	Tykkelse [mm]
Ydre plader	20
Indre plader	8

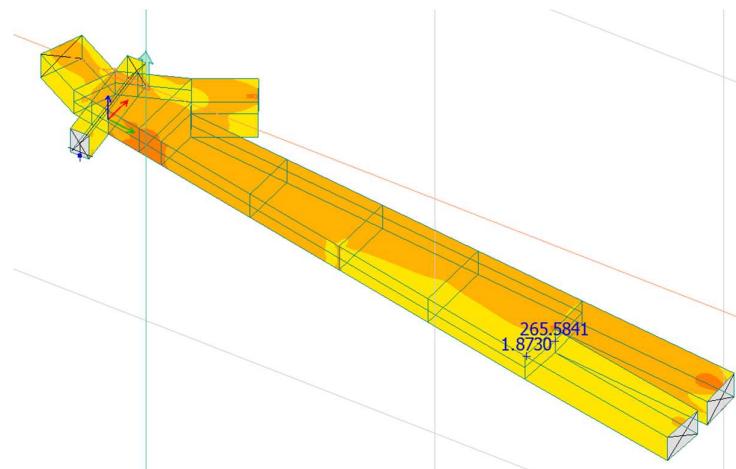
Tabel 15-12 Tykkelser af plader i samlingen NB. tykkelser er ikke optimeret

Grundet kompleksiteten bliver samlingen analyseret med FEM-design som en plademodel med stangkræfter fra den globale FEM model i Bilag 1.D.



Figur 15-12 Samling med påførte stangkræfter fra den globale model

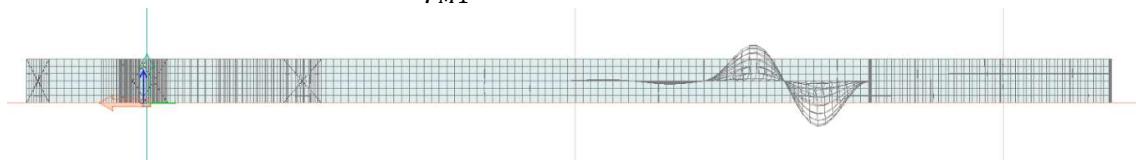
Brudanalyse foretages ud fra von Mises spændinger, her er den højeste og laveste von Misesspænding vist.



Figur 15-13 Von Mises spændinger i samlingen

Det ses at den højeste spænding forekommer i den midterste afstivning.
Spændingen skal holde sig inden for grænsen.

$$\frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}} = 295,8 \text{ MPa}$$



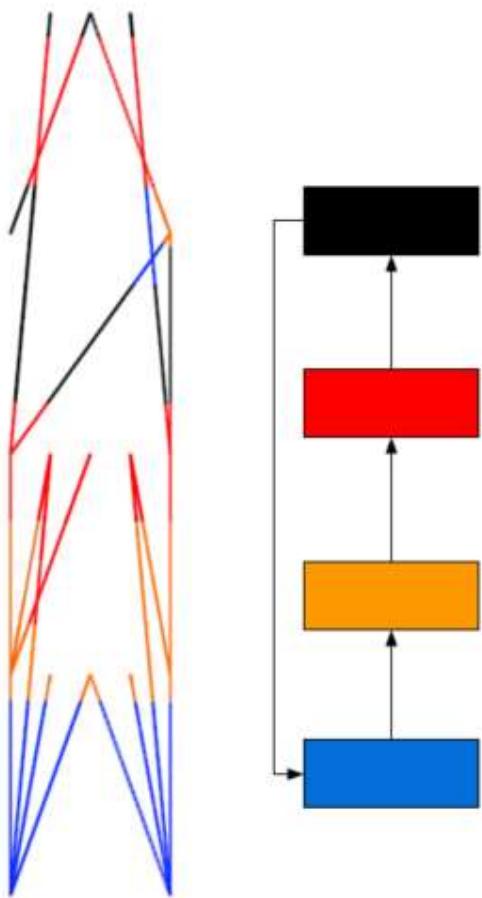
Figur 15-14 Samlingens kritiske instabilitet: foldning i samlingselementet

Instabilitetsanalysen viser at der sker foldning ved den kritiske last = 5,92 i forhold til den virkende last på samlingen efter lastkombination. Dette forekommer i det største pladestykke i den midterste afstivning.

15.8 Udførselsprincip

Ved opførsel af stålgitteret foreslås følgende fremgangsmåde:

1. Afstivning og stålkasse samles og svejses hos producenten, som ved hjælp af BIM-data kan producere alle de komplekse samlinger. Interface mellem samlingen og resten af gitteret løses med plader som kan boltes fast til resten af konstruktionen, hvilket gør samlingen nem at samle på byggepladsen og giver mulighed for at efterjustere.
2. I betondækkene indstøbes armering som skal overføre vandrette kræfter til samlingen. Armeringen afsluttes af en stålplade som senere skal låses på samlingerne med boltene.
3. Montageplanen **Figur 15-15** udføres for at fuldende gitteret. Bjælkerne og samlingerne skal kunne klare deres egen vægt som udkraget bjælke indtil de bliver monteret på dækket. Stangstykker samles ved boltede samlinger.



Figur 15-15 Farverne på montageplanen angiver hvilken rækkefølge elementerne skal monteres.
Konstruktionen bliver bygget nedefra og op. Elementer monteres følgende farvekoderne. Elementerne, bestående af en række stangstykker monteret per etage, indtil en samling nås, hvorefter samlingen monteres og næste skridt i monteringen begynder.

16 Evaluering af proces

16.1 Evaluering af script



Figur 16-1 Flowchart af projektprocessen

Projektet kan overordnet deles ind i skridt som illustreret i **Figur 16-1**, hvor de grønne bokse refererer til hvad der typisk vil være arkitektarbejde og de blå bokse refererer til hvad der typisk vil være ingeniørarbejde.

Opsummering af proces

1. Find viden

- Viden inden for optimeringsalgoritmer
- Viden inden for højhusbyggeri

2. Indledende design/Randbetingelser

- Arealkrav og maksimal slankhed defineret
- Oprettelse af Grasshopper-model til indledende design

3. 2D Optimering

- Undersøgelse af optimeringsparametre
- Kriterieanalyse og valg af 2D parametre

4. 3D Model

- Videre udformning af designmodel

5. 3D Optimering

- Grasshopper scripts fra skridt 3 og skridt 4 kombineres og
- Kriterieanalyse og valg af 3D parametre

6. Endeligt Design

- Konkretisering af design ud fra de optimerede gitre fra 5
- Designanalyse for valg af design
- Visualisering

7. Eftervisning

- Strukturel analyse mm.

Antallet af løsninger var stort i starten og blev formindsket for hvert skridt der blev taget af processen. Dette vurderer vi til at være essentielt, da det ikke var til at forudsige, hvilke af de indledende parametre og designs, som ville ende ud i det bedste

produkt. Vægtningen i kriterieanalyesen havde stor betydning for det endelige design og det er derfor essentielt at afstemme forventninger i forhold til denne vægtning.

Redskabet var nødvendigt i vores arbejde med større løsningsrum og eventuelt mere automatisk genererede designs.

Projektet havde en klar vekselvirkning mellem ingeniør- og arkitektarbejde, som blev en naturlig forlængelse af et workflow, hvor ingeniør- og arkitektarbejde foregik i samme program. Dog blev processen hele tiden understøttet af beregninger og tegninger i andre programmer.

Det parametriske workflow gav mange fordele i form af hurtige rettelser af ændringer og nye betragtninger. Den parametriske indgangsvinkel var overraskende effektiv og fleksibel i forhold til de ændringer der opstod, og kan bruges en lang række tilfælde som strækker sig langt ud over hvad der er behandlet i denne rapport.

Derudover tillod Grasshopper manipulation af data, hvilket simplificerede databehandling og tillod hurtigt og effektiv verificering af modellen med simple håndberegninger.

Dog skulle der været foretaget en mere dybdegående indledende beregning sammen med randbetingelserne. Dette kunne have fundet de nødvendige randbetingelser, som kunne sikre bygningen mod vindpåvirkede vibrationer og accelerationsproblemer.

Arbejde med optimeringsalgoritmer kan nemt overføres til et rigtigt projekt ved at opdele arbejdsopgaverne mellem aktører som illustreret groft i **Figur 16-2**

Aktør	Indledende fase		Projekterende fase
Arkitekt	Randbetingelser	3D Model	Endeligt design
Arkitekt eller ingeniør	2D Optimering	3D Optimering	
Ingeniør			Eftervisning

Figur 16-2 Faseindeling efter aktører

Dette projekt har haft fokus på de parametriske optimeringer af de arkitektoniske elementer, hvis optimering af ikke-arkitektoniske elementer ønskes, kan optimeringsdelen rykkes til senere i projektet og være rent ingeniørfokuseret.

En designproces som fungerer på denne måde, har ekstra mange bindeledd mellem arkitekt og ingeniør i forhold til et normalt projekt. Dette kræver at der er ekstra styr på interfaces, som eventuelt kan styres som med IFC-formatet. Derudover stiller det også krav til at beslutte hvornår man opstiller en parametrisk *gate*, altså et punkt hvor geometrien bliver fastlåst, så en lille parametrisk ændring ikke får store konsekvenser for utilsigtede parter.

Designproces

Grove skitser som viser et indblik i designprocessen er samlet i drejebogen Bilag 5.A

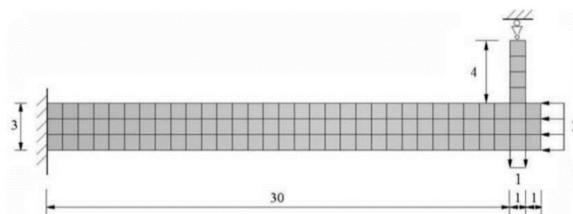
16.2 Evaluering af algoritmer

BESO/ESO

Ved de rigtige randbetegnelser kunne BESO/ESO-optimeringen opnå meget effektive konstruktioner.

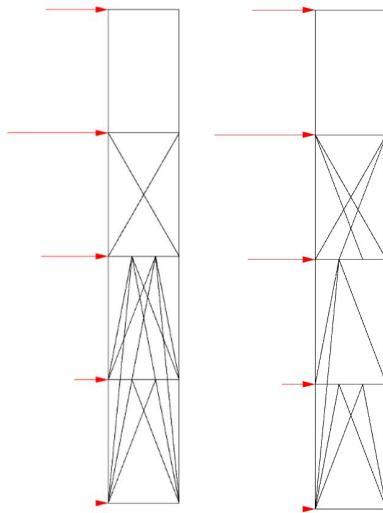
Dog viser Afsnit 9 at algoritmen ofte ikke undersøgte hele løsningsrummet, ved gå i stykker under optimeringen, dette kunne hindre at det globale optimum blev opnået. Dette kan skyldes at både ESO-algoritmen og BESO-algoritme, udelukkende kigger på deformationsenergien i et element og ikke hvorvidt stangen er nødvendig statisk.

Zhou-Rozvanny problemet, er et kendt problem for mange optimeringsalgoritmer, da de fleste algoritmer fjerner de fire lodrette elementer, når de bliver utsat for dette problem. Dette ændrer det statiske system til en udkraget bjælke, hvilket giver en meget ugunstig løsning



Figur 16-3 Zhou-Rozvanny problemet [29]

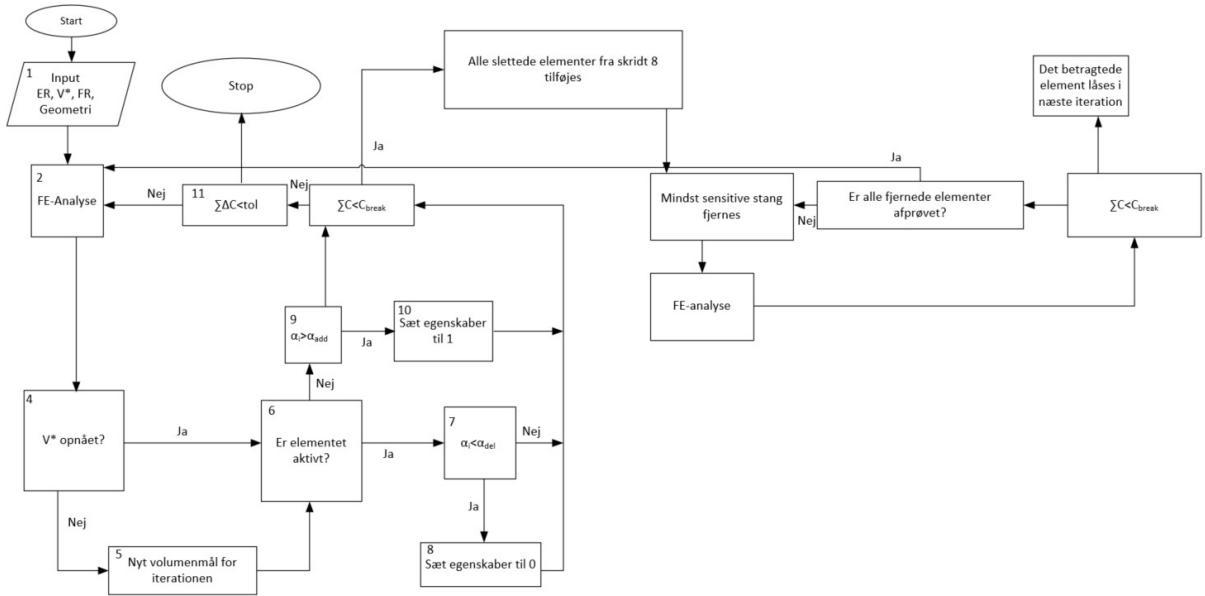
Dette problem er defineret i forhold til skalmodeller³, og en afart af problemet kan findes i den benyttede algoritme som set i Afsnit 9 med en endnu mere dramatisk effekt, da modellen gik til ikke længere at virke, da den blev statisk utiladelig i stedet for blot at finde en meget ugunstig løsning.



Figur 16-4 BESO iteration 103 ud af 150 med BESO-factor=0 (tv)
BESO iteration 147 ud af 150 med BESO-factor=0.5 (th)

En robust BESO/ESO for stænger algoritme skal løse dette problem. Specielt er ESO-optimeringen kritiske for disse situationer, da den nødvendige stang ikke kan tilføjes senere igen. Problemets kan løses ved at ændre tilgangen til optimeringen fra en endimensionel optimering som fokuserer på deformationsenergi til en todimensionel optimering, hvor hver af stængerne ikke kun bliver evalueret på dens effektivitet, men også, hvorvidt den er statisk nødvendig for optimeringen, hvilket skal trumfe effektiviteten.

³ Det skal bemærkes at problemet er blevet løst i skalmodeller (Xia et al., 2016)



Figur 16-5 Flowchart af forslået forbedring af BESO-algoritmen

Rent praktisk kan dette gøres ved at tilføje et ekstra loop til algoritmen, hvis modellen går i stykker. Dette loop bestemmer den nødvendige stang og låser den så den ikke kan blive fjernet i næste iteration. For så ikke at låse konstruktionen fuldstændig, skal stangen så låses op efter næste iteration, da det ikke er sikkert at stangen er kritisk i iterationen efter. Målet med dette ville være at øge algoritmens robusthed yderligere.

Galapagos

Algoritmen virkede som forventet og var nemt at implementere i projektet, dog med svært succes. Bedre resultater vil dog kunne opnås med MOGA-algoritmer, hvor der kan sættes flere objektiver som algoritmen skal optimere på. Dog kunne Galapagos-komponentet forbedres måden hvorpå dataen omkring optimeringen bliver afbilledet, og gør det nemmere at trække dataen ud af programmet til analyser.

17 Konklusion

Selvom *computational design* for os var et forholdsvis nyt begreb, blev der hurtigt dannet forståelse og med Grasshopper var det nemt, at få implementeret optimeringer i en designprocessen.

Der blev draget stor nytte at benytte et meget bredt løsningsrum i starten af processen. Det er nemlig sjældent muligt at sige hvilken metode som i sidste ende giver de bedste resultater. Dette er også vigtigt, hvis der indgår flere parter i et optimeringsprojekt, da en arkitekt og en ingeniør ikke vil have den samme forståelse af hvad den optimale løsning vil være.

For at indsnævre dette løsningsrum var den opstillede kriterieanalyse et effektivt redskab til at sortere dårlige løsninger fra. For at kunne lave optimeringerne, blev der brugt to algoritmer, BESO og en Galapagos, en GA.

Den bedste løsning ifølge analysen var en BESO-optimering på et input med punkter som alle er forbundet. En genetisk optimering skal dog ikke fraskrives, da disse viste sig som meget alsidelige og kunne behandle mange forskellige typer parametre. Der er forskellige måder at optimere gitre, alt efter konstruktionens formål. Man kan enten optimere i 2D og dermed simplificere optimeringen eller optimere i 3D, hvis man har en konstruktion hvor det er nødvendigt.

I dette specifikke projekt gav det mening at fokusere på 2D modeller i starte af designprocessen, da det gav en mere intuitiv forståelse for parametervariation og løsningsrummet. Dette kunne hurtigt konverteres til 3D situation eller med mere specifikke randbetingelser, dog viste det også at ikke alle optimeringer præsenterede ens i mere avancerede cases, og man kan derfor ikke stole blindt på 2D-modellerne.

For at kunne differentiere mellem designs og for at gøre projektet mere realistisk blev der foretaget en dybere analyse af de to cases. Denne arkitektoniske analyse er nødvendig for at kunne placere et større byggeri i en kontekst, hvor det har en kraftig indvirkning på andre mennesker.

Eftersom projektet var opstillet som et parametrisk script var det hurtigt og nemt at gå fra design og form finding, til analyse og eftervisning da geometrien og snitkræfter allerede er tilgængelige til statiskanalyse efter optimeringen.

Den statiske analyse gav en indsigt i hvordan et stålgitter performer som afstivende system i et højhus. Generelt kan der opnås en høj stivhed med et stålgitter, dette påvirker dog egenfrekvensen for bygningen ugunstigt. I dette specifikke case, blev komfortkravene ikke overholdt grundet denne øgede stivhed i forhold til en mere konventionel betonkerne i en slank bygning. Det kunne dog eventuelt løses ved at dæmpe konstruktionen med viskøse dæmpere.

Til slut blev projektet sat i perspektiv i forhold til en designproces. Her vises det at projektet er et skiftevis ingeniør- og arkitektprojekt. Det kræver derfor en stor synergimellem begge parter for at lave et effektivt projekt som inkorporer strukturel optimering af arkitektoniske elementer. Dette er et workflow som er oplagt, hvis der tages baggrund i Grasshopper-programmering, da et løbende script kan inkludere begge faggrupper. De mange interfaces gør kommunikation og bindeled mellem de to parter vigtigt. Her kan kryds-platform IFC-link indtænkes i projektet fra start.

Arbejdet med optimeringsalgoritmer i arkitektoniske strukturelle elementer kan nemt indgå i en designproces, hvis der benyttes et parametrisk workflow. For at opnå gode løsninger kræves at der undersøges en række optimeringsparametre, hvilket kræver viden inden for både arkitektur og strukturer. Optimeringerne skal også inkorporeres tidligt i processen, mens frihedsgraderne stadig er store, da optimeringerne ofte laver radikale indgreb i en bygnings udseende og kan give den et helt nyt udtryk. Derfor er der mange muligheder ved at bruge optimeringer i design processen, da det kan samle det arkitektoniske og det strukturelle i bygningen i ét design.

18 Perspektivering

Computational design bliver hvert år en mere attraktiv mulighed i både den indledende fase og i den projekterende fase. Dette medfører at optimeringsprocesser i højere grad bliver benyttet. Dette projekt har vist at disse processer nemt kan indgå i selv større projekter, hvor en bred vifte af optimeringsparametre kan evalueres nemt og effektivt til at danne grundlag for en beslutning som påvirker det videre projekt, hvilket ultimativt kan gavne både projektets økonomi og arkitektur.

Projektet viser også at for at sådan en proces skal kunne fungere optimalt stiller det krav til både ingeniører og arkitekter til samarbejde både på et teknisk plan i form af fuld udnyttelse af IFC-formater, men også på blødere områder, hvor en fælles forståelse for hvad der bliver defineret for ”godt” i begge faggrupper, er nødvendig for klar kommunikation og optimale løsninger.

Byggebranchen står dog kun helt i starten af rejsen ind i *computational design*, hvilket står klart for os efter vores arbejde med projektet. Projektet kan fungere som grundlag for videre arbejde og åbner en række muligheder i arbejdet med *computational workflow* og optimering.

Her er den nok mest oplagte udvikling at fortsætte automatiseringstanken og udvikle et script som parametriserer kriterieanalysen yderligere og automatiserer optimeringsprocessen. Dette vil gøre det muligt at generere en lang række optimaldesign hurtigt, som kan sorteres efter hvert af de undersøgte kriterier og en vægtet gennemsnitsscore. Her er et af hovedproblemerne hvordan en designscore skal automatiseres da arkitektur ikke er direkte kvantificerbar. Der kan selvfølgelig programmeres en række ”hårde” parametre. Dog vil det være oplagt hvis man på længere sigt kan inkludere *machine learning* til at evaluere design med en statistisk indgangsvinkel, dette er dog kun en mulighed, hvis der kan fremskaffes et troværdigt datasæt for hvad der kan betragtes som et ”godt” design af en bred vifte mennesker.

Et andet punkt på rejsen ind i *computational workflow* og en naturlig forlængelse af projektet vil være en automatiseret generering og eftervisning af samlingsdetaljer ved hjælp af IFC-link, som benyttet i Morpheus tårnet af Zaha Hadid og Buro-Happold. Dette kan sænke arbejdsbyrden som opstår i forbindelse med arbejde kompleks gittergeometri.

Udpluk af andre mulige emner til videre arbejde

- Udvidet optimering af gittersystem med inklusion af lodret last og svingningskriterier
- Brug af multi-objective optimeringer i gittergeometri.
- Kombineret BESO og Galapagos optimering – Her kan man bruge Galapagos til at optimere på randbetingelserne og optimeringsparametrene til BESO-algoritmen.
- Forbedret BESO for bjælker evt. ud fra forslag fremstillet i rapporten
- Optimeringer i beton

19 Bilag

Bilag 1 - Grasshoppermodeller

- 1.A Volumener (.gh)
- 1.B 2D optimeringer (.gh)
- 1.C 3D optimeringer (.gh)
- 1.D Endeligt design og optimering (.gh)

Bilag 2 – Optimerede geometrier

- 2.A 1. Optimeringsrunde (samlet) (.pdf)
- 2.B Galapagos (samlet) (.pdf)
- 2.C BESO (samlet) (.pdf)
- 2.D Valgte geometrier (.pdf)
- 2.E Andre geometrier (.pdf)
- 2.F 3D geometrier (.pdf)

Bilag 3 – Vindberegninger

- 3.A Vindhastighed og lastgrundlag (.xlsx)
- 3.B Vortex-shedding (.pdf)
- 3.C Dynamisk vindpåvirkning (.pdf)
- 3.D Estimering af masse (.pdf)

Bilag 4 – Eftervisning af model

- 4.A Virtuelt arbejde – Indledende geometri (.xlsx)
- 4.B Virtuelt arbejde – Endelig geometri (.xlsx)
- 4.C Moment i udkraget bjælke (.pdf)

Bilag 5 – Designproces

- 5.A Designdrejebog (.pdf)
- 5.B Tegninger af endeligt design (.pdf)
- 5.C 3D model – Endeligt design (.3dm)

20 Referencer

20.1 Bibliografi

2007d. ISO 10137. Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations.

AREMU, A., ASHCROFT, I., HAGUE, R., WILDMAN, R. & TUCK, C. 2010. Suitability of SIMP and BESO topology optimization algorithms for additive manufacture.

BONNERUP, B., JENSEN, B. C. & PLUM, C. M. 2015. Stålkonstruktioner efter DS/EN 1993, Odense, Praxis - Nyt Teknisk Forlag.

BUILDINGS-DEPARTMENT, H.-K. 2011. Code of practice for the structural use of steel. Hong Kong Buildings Department.

CEN, E. C. F. S. 2007a. DS/EN 1991-1-4:2007 - Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner – Del 1-4: Generelle laster – Vindlast. European Committee for Standardisation CEN.

CEN, E. C. F. S. 2007b. DS/EN 1993-1-1 + AC:2007 - Eurocode 3: Stålkonstruktioner – Del 1-1: Generelle regler samt regler for bygningskonstruktioner. European Committee for Standardisation CEN.

CEN, E. C. F. S. 2007c. DS/EN 1993-1-8 + AC:2007 - Eurocode 3: Stålkonstruktioner – Del 1-8: Samlinger. European Committee for Standardisation CEN.

CHOI, H. S. 2012. Outrigger dessign for high-rise buildings, Chicago, CTBUH.

CHU, D. N., XIE, Y. M., HIRA, A. & STEVEN, G. P. 1996. Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. Finite Elements in Analysis and Design, 21, 239-251.

HUANG, X., XIE, Y. M. & DAWSONERA 2010. Evolutionary topology optimization of continuum structures methods and applications.

JENSEN, B. C. F. & HANSEN, S. O. F. 2014. Bygningsberegninger, Kbh., Praksis - Nyt Teknisk Forlag.

JENSEN, B. C. F. & MOHR, G. 2015. Teknisk ståbi, Kbh., Nyt Teknisk Forlag.

- PREISINGER, C. 2011. Evolutionary Structural Optimization Revisited.
- SCHITTICH, C., SKIDMORE, O. & MERRILL 2015. SOM Structural Engineering, Detail - Institut für Internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Company KG.
- SMITH, B. S. & COULL, A. 1991. Tall building structures : analysis and design, New York, Wiley& Sons.
- SMITH, R. 2011. Deflection Limits in Tall Buildings—Are They Useful?
- SMITH, R. & WILLFORD, M. 2008. Damping in tall buildings – uncertainties and solutions.
- TAMBOLI, A. R. 2014. Tall and supertall buildings: planning and design, New York, McGraw-Hill Education.
- WINSLOW, P., PELLEGRINO, S. & SHARMA, S. 2009. Multi-objective optimization of free-form grid structures.
- WINSLOW, P., PELLEGRINO, S., SHARMA, S. & HAPPOLD, B. 2008. Free form grid structures.
- XIA, L., XIA, Q., HUANG, X. & XIE, Y. 2016. Bi-directional Evolutionary Structural Optimization on Advanced Structures and Materials: A Comprehensive Review.
- XIE, Y. M., QUERIN, O. M. & STEVEN, G. P. 1998. Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm. *Engineering Computations*, 15, 1031-1048.
- XIE, Y. M., STEVEN, G. P. & CENTRE, U. O. S. F. E. A. R. 1992. A Simple Evolutionary Procedure for Structural Optimization, Finite Element Analysis Research Centre, University of Sydney.
- ÅRHUS-KOMMUNE 2001. Højhuspolitik for Århus Kommune. In: MILJØ, Å. K. T. (ed.).

20.2 Billedhenvisning

- [1] By Ricardo Liberato - All Gizah Pyramids, CC BY-SA 2.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2258048>
 - [2] photo taken by Rüdiger Wölk, Münster, Germany, CC BY-SA 2.5,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1255936>
 - [3] <http://dataphys.org/list/gaudis-hanging-chain-models/>
 - [4] Courtesy of FAR Frohn & Rojas
 - [5] https://www.researchgate.net/figure/Akutagawa-River-Side-in-Takatsuki-Japan-2004_fig6_320860235
 - [6] (CEN, 2007a)
 - [7] (Chu et al., 1996)
 - [8] GAO, B., LI, T., MA, T., YE, J., BECQUE, J. & HAJIRASOULIHA, I. 2018. A practical grid generation procedure for the design of free-form structures. *Computers & Structures*, 196, 292-310, Fig 2.
 - [9] By Diliff - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29904221>
 - [10] (Winslow et al., 2009)
 - [11] Mendis, Priyan & Ngo, Tuan & Haritos, N & Hira, Anil & Samali, Bijan & Cheung, John. (2007). Wind loading on tall buildings. *Electronic Journal of Structural Engineering*. Volume 7. 41-54.
 - [12] (Smith and Coull, 1991, Fig.4.6)
 - [13] (Smith and Coull, 1991, Fig.4.8)
 - [14] (Smith and Coull, 1991, Fig.4.14 & Fig4.15)
 - [15] (Smith and Coull, 1991, Fig.4.16)
 - [16] By Joe Ravi, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9948188>
 - [17] All rights reserved by [O*] 'BharaT
<https://www.flickr.com/photos/12x/1064398625/sizes/z/in/photostream/>
 - [18] By Balu Ertl - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38534275>
 - [19] Michell, A. G. M. (1904) The limits of economy of material in frame-structures, *Philosophical Magazine*, Vol. 8(47), p. 589-597, Public Domain
 - [20] By Stan Shebs, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=925941>
 - [21] (Schittich et al., 2015)
 - [22] Google Maps
 - [23] Google Maps
 - [24] Google Maps
 - [25] Af Nico-dk - Eget arbejde, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=43393>
-

- [26] Af Jürgen Howaldt - Egen affotografering, CC BY-SA 3.0 de,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6104026>
 - [27] (2007a) – Eurocode 1991-1-4
 - [28] (2007d)
 - [29] (Xia et al., 2016)
-