



OSLO METROPOLITAN UNIVERSITY  
STORBYUNIVERSITETET

Institutt for Bygg- og energiteknikk - Bygg  
Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo  
Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

GRUPPE NR. 28

TILGJENGELIGHET

Telefon: 67 23 50 00  
www.oslomet.no

# BACHELOROPPGAVE

BACHELOROPPGAVENS TITTEL  Topologioptimalisering i byggebransjen	DATO 26.05.2023
	ANTALL SIDER / ANTALL VEDLEGG 116
FORFATTERE Qassed Mahmood                      Suzana Ismail Hani Alsosi                                Maad Al-Mogahed	VEILEDER Aase Rayes

UTFØRT I SAMARBEID MED OsloMet	KONTAKTPERSON
-----------------------------------	---------------

<p><b>SAMMENDRAG</b></p> <p>Denne rapporten, "Hvordan kan topologioptimalisering anvendes i byggebransjen?", har som mål å forklare prinsippene bak topologioptimalisering og hvordan denne teknikken kan implementeres i byggebransjen. Topologioptimalisering er en metode som søker å optimalisere materialets utforming og plassering innen en forhåndsdefinert plass, basert på pålagte laster og begrensninger, for å forbedre ytelser som styrke, stivhet eller vekt.</p> <p>Som en del av denne undersøkelsen ble det utført en spørreundersøkelse for å analysere bruken av topologioptimalisering i norsk byggebransje. Resultatene ga verdifull innsikt i den nåværende anvendelsen og potensielle fremtidige bruk av topologioptimalisering i bransjen.</p> <p>I tillegg til spørreundersøkelsen ble det gjennomført et praktisk eksperiment for å demonstrere prosessen med topologioptimalisering, fra designfase til produksjon. Eksperimentet innebar bruk av 3D-utskriftsteknologi, som er en viktig komponent i implementeringen av topologioptimalisering i praksis.</p>
---

3 STIKKORD
Materialforedling
3D-teknologi
Topologioptimalisering



## Forord

Denne bacheloroppgaven fremstiller avslutningen på vårt studium ved Byggingeniør linjen ved OsloMet, studieretning konstruksjonsteknikk, våren 2023. Rapporten er utarbeidet i samarbeid med OsloMet.

Vi valgte å skrive om temaet topologioptimalisering, en effektiv teknikk for materialforedling innenfor byggkonstruksjon. Denne oppgaven har gitt oss en dypere forståelse av temaet, og vi håper at det vil kunne gjøre det samme for leserne. Målgruppen for rapporten er hovedsakelig medstudenter og andre med en interesse for eller et ønske om å lære mer om dette spennende emnet. Rapporten kan også være til hjelp for alle som er interessert i de nyeste utviklingene innen bygg- og konstruksjonsteknikk.

Vi ønsker å rette en stor takk til 3D-net, som har 3D-printet forsøksbjelkene i SLS. Vi takker også Tor Tollnes for hjelpen med å gjennomføre den praksisdelen av oppgaven. Ikke minst ønsker også vi å takke vår interne veileder Aase Rayes.

for hennes verdifulle veiledning, støtte og tilbakemeldinger gjennom hele oppgaveskrivingen.

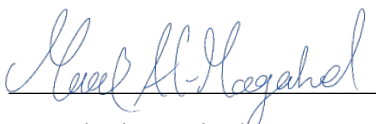
Til slutt vil vi gjerne takke til alle som deltok i spørreundersøkelsen, som ga oss en solid forståelse for resultatene som er presentert i denne oppgaven.

Takk for at du tar deg tid til å lese vår oppgave.

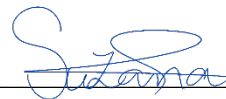
Oslo, 26 mai, 2023



Qased Mahmud



Maad Almogahed



Suzana Ismail



Hani Alsosi

## Sammendrag

Rapporten, "Hvordan kan topologioptimalisering anvendes i byggebransjen?", gir en omfattende forståelse av prinsippene bak topologioptimalisering, en prosedyre for å optimere materialefordelingen i et definert designrom, basert på spesifiserte laster og begrensninger, med mål om å forbedre produktets ytelse. Rapporten starter med å utforske hvordan topologioptimalisering kan implementeres i byggebransjen, idet det gir eksempler på praktiske anvendelser og potensial for fremtidig bruk. Den setter også fokus på viktigheten av teknologiske fremskritt, spesielt innen 3D-printteknologi, som gir mulighet for å realisere de komplekse designene som genereres gjennom topologioptimalisering.

Et sentralt aspekt av denne rapporten er en spørreundersøkelse som ble gjennomført for å vurdere den nåværende bruken av topologioptimalisering i norsk byggebransje. Deltakernes respons ga verdifull innsikt i deres forståelse av topologioptimalisering, dens anvendelse i deres respektive arbeid, og synspunkter på potensialet for fremtidig bruk. I tillegg til teoretisk analyse, gir rapporten også en praktisk demonstrasjon av topologioptimaliseringsprosessen, fra designfase til produksjon, ved å benytte 3D-utskriftsteknologi. Eksperimentet inkluderte utforming av forskjellige prototyper, bruk av to ulike produksjonsmetoder, og evaluering av hvert design basert på deres bøyning og vekt toleranse.

Resultatene fra både spørreundersøkelsen og det praktiske eksperimentet gir sterk indikasjon på at topologioptimalisering har et stort potensial innen byggebransjen. Rapporten konkluderer med at en utbredt bruk av topologioptimalisering krever ytterligere forskning og utdanning i feltet, samt en fortsatt utvikling av teknologi som støtter denne prosessen.

## **Abstract**

The report, "How can topology optimization be applied in the construction industry?", provides a comprehensive understanding of the principles behind topology optimization, a procedure for optimizing material distribution within a defined design space, based on specified loads and constraints, with the aim of enhancing the performance of the product. The report begins by exploring how topology optimization can be implemented in the construction industry, providing examples of practical applications and potential for future use. It also emphasizes the importance of technological advancements, especially in 3D printing technology, which allows for the realization of complex designs generated through topology optimization.

A central aspect of this report is a survey conducted to assess the current use of topology optimization in the Norwegian construction industry. The participants' responses provided valuable insight into their understanding of topology optimization, its application in their respective work, and views on the potential for future use. In addition to theoretical analysis, the report also provides a practical demonstration of the topology optimization process, from design phase to production, utilizing 3D printing technology. The experiment included the creation of various prototypes, use of two different production methods, and evaluation of each design based on their bending and weight tolerance.

The results from both the survey and the practical experiment strongly indicate that topology optimization has a significant potential in the construction industry. The report concludes that widespread use of topology optimization requires further research and education in the field, as well as continued development of technology to support this process.

# Innholds

Forord.....	I
Sammendrag.....	II
Innholds.....	IV
Forkortelser .....	VII
Figure table.....	VIII
Tabeller.....	X
1 Innledning.....	1
1.1 Introduksjon.....	1
1.2 Bakgrunn .....	2
1.3 Hensikt.....	2
1.4 Problemstilling.....	2
1.5 Avgrensinger.....	3
1.6 Motivasjon.....	3
1.7 Gruppearbeid .....	4
2 Metode.....	5
2.1 Drøfting av metoder.....	5
2.2 Valget metode .....	6
2.3 Metodekritikk .....	6
3 Bakgrunn .....	7
3.1 Definisjon av topologioptimalisering (TO).....	7
3.2 Historie .....	7
3.3 Størrelsesoptimalisering og formoptimalisering .....	9
4 Teori.....	10
4.1 Materialeegenskaper.....	10
4.1.1 Elastisitetsmodul .....	10
4.1.2 Tverrkontraksjon forholdstall.....	11
4.1.3 Tøyningsenergi (strain energy).....	12
4.1.4 Isotropisk og Anisotropiske materialer .....	13
4.2 Finite element method (FEM) .....	14
4.2.1 FEA (Finittelementanalyse).....	14
4.2.2 Diskreditering og elementtype .....	15
4.2.3 Elementstørrelse .....	16
4.2.4 Spenningsanalyse .....	16
4.3 Topologioptimalisering.....	18
4.3.1 Introduksjon til topologioptimalisering.....	18
4.3.2 Topologi.....	19
4.3.3 Topologioptimalisering .....	19
4.3.4 Objektiv funksjon og Begrensinger (Objective function constraints).....	20
5 Metode og algoritmer for topologioptimalisering .....	22
5.1 Elementbasert Topologioptimalisering problemstilling .....	23
5.2 SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) (19).....	24

5.3	Rational Approximation and Material Penalization - RAMP.....	26
5.4	Level set-metoden (21).....	26
5.5	Evolutionary Structural Optimization (ESO) .....	28
5.6	Bi-directional Evolutionary Structural Optimization – BESO .....	28
6	Anvendelser av topologioptimalisering i konstruksjonsteknikk .....	29
6.1	Topologi optimalisering i høybygg strukturell design.....	29
6.2	The Gherkin.....	31
6.3	Topologi optimaliser bruk i andre bygg områder .....	32
6.4	Akutagawa Riverside Office Building.....	33
6.5	Optimalisering av fasade .....	34
6.6	Arkitektur og topologi optimalisering .....	37
6.7	Optimalisering av brukonstruksjoner for lange spenn.....	37
6.8	Bruk av topologioptimalisering i betongkonstruksjoner .....	39
6.8.1	Utforming av armering.....	40
6.8.2	Utforming av betongelementer som dekker og fundamenter.....	43
7	Additiv produksjon.....	46
7.1	FDM.....	46
7.1.1	Slicing.....	46
7.1.2	Overheng .....	47
7.1.3	Utfyllingsmønster og tetthet.....	47
7.1.4	SLS .....	48
8	Programvaretesting.....	49
8.1	TopOpt 3D .....	49
8.1.1	Bru.....	50
8.2	Ansys Discovery.....	52
8.3	Ameba.....	56
9	Etterbehandling .....	57
9.1	Etterbehandling av topologioptimalisering .....	57
9.2	Utjevning (smoothing).....	57
9.3	Manuell rekonstruksjon .....	58
9.4	Automatisert rekonstruksjon.....	59
10	Topologioptimalisering i Abaqus .....	60
10.1	Innføring i abaqus .....	60
10.1.1	Enheter .....	60
10.1.2	Moduler .....	60
10.1.3	Komponent og materialelegenskaper.....	61
10.1.4	Last, randbetingelse og mesh .....	61
10.2	Oppsett av topologioptimalisering i abaqus“ .....	61
10.2.1	Optimaliseringsoppgave.....	62
10.2.2	Designrespons .....	63
10.2.3	Objektiv funksjon og begrensing .....	65
10.2.4	Geometriske restriksjoner .....	66
10.3	Eksempler på topologioptimalisering i Abaqus.....	68
10.3.1	Terning.....	68

Resultat.....	69
10.3.2 Bru.....	70
Resultat.....	71
10.3.3 Bjelke .....	72
11 Forsøk.....	75
11.1 Hensikt.....	75
11.2 Metode.....	75
11.2.1 Bjelkedesign .....	75
11.2.2 Produksjonsmetoder .....	76
11.2.3 3D-printer .....	82
11.2.4 Gjennomføringsmetode av Lab.....	84
11.3 Resultater og observasjoner.....	86
11.3.1 Resultat fra Lab : .....	86
11.3.2 Resultat fra Simulering i Abuqus : .....	91
12 Spørreundersøkelsen om bruk av topologioptimalisering i byggebransjen .....	92
12.1 Innledning.....	92
12.2 Metode.....	92
12.3 Resultater .....	94
13 Diskusjon.....	96
13.1 Kartlegge bruken av TO i byggebransjen.....	96
13.2 Prosessen bak TO .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
13.3 Topologioptimalisering i Norge: diskusjon for spørreundersøkelse.....	98
14 Konklusjon .....	99
15 Videre arbeid .....	100
Referanser.....	101



## Forkortelser

TO	Topologioptimalisering
FEM	Finite element method
FEA	Finitt elementanalyse
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
STL	Standard Tessellation Language
CAD	Computer Aided Design
RAMP	Rational Approximation of Material Properties
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
ESO	Evolutionary Structural Optimization
BESO	Bidirectional Evolutionary Structural
PDE	Partial Differential Equation
MRF	Masonry Reinforced Frame
STM	Strut-and-tie-modeller
SKB	Selvkomprimerende betong
SLS	Selective Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
UiO	Universitetet i Oslo
LSM	Level Set Method
NURBS	Nom-Uniform Rational B-Splines
B1	Massiv bjelke som er selve designdomenet (original geometri)
B2	Bjelken som har blitt topologioptimalisert i Abaqus (volume fraction 0,40)
B3	Bjelken vi har designet selv som er inspirert av den topologioptimaliserte bjelken i Abaqus (bjelke 2).

## Figure table

Figur 3-1(a), (b) Michell frame bridge structures. ....	8
Figur 3-2 Sammenlignende illustrasjon av størrelse, form og topologi optimalisering. ...	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figur 4-1 : Illustrere en bjelke som ble satt for elastikk energi og som har fått deformasjon..	12
Figur 4-2 Elementtype.....	15
Figur 4-3 Stress and tractions in 3D Finite Element Analysis – Kolbein Bell.....	17
Figur 4-4 Eksempel på bruk av den endelige elementmetoden Finittelementanalyse .....	17
Figur 4-6:Alle elementene er fyll med material .....	18
Figur 4-6 noen alternativer for best mulig form.....	18
Figur 5-1 TO metoder.....	22
Figur 5-2 Level set-metoden .....	26
Figur 5-3 Gradient Level Set-metoden.....	27
Figur 6-1 bilde illustrerer den arkitektoniske ambisjonen til Bionic Tower.....	30
Figur 6-2 : Elementtetthetsplott av optimaliseringsresultatene for minimering av strukturen	30
Figur 6-3 bilde av the Gherkin som viser utsende til bygging.....	31
Figur 6-4 Qatar National Convention Centre utsende.....	32
Figur 6-5 Akutagawa River Side Office Building.....	33
Figur 6-6 Design av MRF for en høyhusbygning .....	34
Figur 6-7 MRF-design av en høyhusbygning .....	35
Figur 6-8 MRF-design til et tusen Museum bygningen, .....	36
Figur 6-9 MX3D Bridge en hel bru i stål i Amsterdam .....	37
Figur 6-10 Osman Gazi-broen med en konvensjonell og tolket bjelkedesign. ....	38
Figur 6-11 Resultatet av topologioptimaliseringen .....	39
Figur 6-12 utforme armerings konfigurasjoner i betongkonstruksjoner .....	41
Figur 6-13 TO analyse ved IDEA StatiCa.....	41
Figur 6-14 fiberforsterkningen i betongdekke .....	42
Figur 6-15 betongarmerte bjelker designet med strut-and-tie-modeller .....	42
Figur 6-16 betongelementer som dekker og fundamenter .....	43
Figur 6-17 betongelementer som dekker og fundamenter .....	43
Figur 6-18 bilder av deker mer RAW topologioptimalisert form.....	44
Figur 6-19 Data analyse av modellen.....	44
Figur 6-20 SIMP-topologioptimaliseringsalgoritmen til Simulia ABAQUS av en dekke.....	45
Figur 7-1 last plassering og lag i FDM 3D-printing .....	46
Figur 8-1 Simulator av topologioptimalisering fra TopOpt .....	49
Figur 8-2 installasjon in Bru.....	50
Figur 8-3 Design fase for bruene og fordeling av last .....	50
Figur 8-4 Resultat av bru fra TopOpt 3D .....	51
Figur 8-5 Hyllebrakett som skal optimaliseres .....	52
Figur 8-6 Plan tening Hyllebraketten i Ansys .....	53
Figur 8- last posisjon hyllebraketten i Ansys .....	54
Figur 8- hyllebraketten i Ansys .....	54
Figur 8- definere bruk området i hyllebraketten .....	55
Figur 8- Resultatet er en topologioptimalisert brakett .....	55
Figur 8-11 Resultat av hyllebraketten fra Ansys .....	56

Figur 9-1 Etterbehandling av topologioptimalisering eksempler .....	57
Figur 9-2 eksempel på utjevning prosess av hyllebraketten .....	58
Figur 9-3 Manuell rekonstruksjon etterbehandlingsstadiet .....	58
Figur 9-5 Automatisert rekonstruksjon inn PolyNURBS .....	59
Figur 9-5 Resultatet inn PolyNURBS .....	59
Figur 10-1 av topologioptimalisering i abaqus .....	61
Figur 10-2 tening av en massive element .....	62
Figur 10-7 Sett inn tøyningsenergi .....	65
Figur 10-8 Optimization constraint .....	66
Figur 10- Tening av Terning .....	68
Figur 10- Last og opplegg på Terning .....	69
Figur 10- Resultat av TO Terning .....	69
Figur 10- design av TO BRU .....	70
Figur 10- lastfordeling for TO BRU .....	71
Figur 10- Resultat av TO av bru .....	71
Figur 10- tening egen design basert på TO .....	73
Figur 10- tening egen design basert på TO .....	73
Figur 10-19 Resultat av tening .....	74
Figur -1 Figuren av bjelkene B1, B2 og B3 .....	75
Figur -2 SLS 3D-printet bjelkene B1 og B2 .....	76
Figur -3 FDM 3D-printet bjelkene B1,B2 og B3 .....	77
Figur -4 viser STL-filer i PrusaSlicer .....	78
Figur -5 PrusaSlicer figur .....	79
Figur -6 Støttestruktur .....	80
Figur -7 FDM 3D-printing prosess .....	82
Figur -8 SLS printermaskin .....	83
Figur -9 Hydraulisk verkstedpress .....	84
Figur -10 Oppsett av presse forsøk .....	84
Figur -11 bildet fra lab Kraft fordeling .....	85
Figur -12 Brud grense for alle bjelkene .....	87
Figur -13 Stivhet forsøk resultatene for FDM 100% .....	88
Figur -14 Stivhet forsøk resultatene for topologioptimaliserte prototyper FDM (venstre er 40% RAW og Høyre er 40% videre behandlet) .....	88
Figur -15 Stivhet forsøk resultatene for prototyper SLS (Venstre er 100% and høyre topologioptimalisering 40%) .....	89
Figur -16 FDM massiv .....	90
Figur -17 FDM optimalisert bjelke .....	90
Figur -18 SLS optimalisert og massiv bjelke .....	90
Figur -19 Forhold mellom lab og Abaqus resultat .....	91
Figur -1 logikken bak skjema som bruket i spørreundersøkelsen .....	93

## Tabeller

Tabell 10-1 Enheter av Abaqus .....	60
Tabell -1 Bjelker produsert for forsøk .....	77
Tabell -2 Valgt innstillinger i PrusaSlicer .....	81
Tabell -3 Produksjon tid og mengde .....	81
Tabell -4 Forhold på volum redaksjon (Abqwas/Lab) .....	86
Tabell -5 Forskyvning fra lab forsøk .....	87
Tabell -6 gjennomsnitt forsyvning av lab lab og Abaqus .....	91

# 1 Innledning

## 1.1 Introduksjon

I den moderne industrien som preges av sterk konkurranse og store ressursbehov, er det viktig å utvikle produkter som er effektive, lette og kostnadseffektive. Dette krever optimalisering av design- og materialbruk for å kunne ha de økende kravene til ytelse, holdbarhet og bærekraft. Topologioptimalisering (TO) har vist seg å være en betydelig viktig metode for å oppnå slike mål og har derfor fått økende oppmerksomhet innen ingeniørvitenskapen.

I denne bacheloroppgaven vil vi utforske topologioptimalisering som en metode for å optimalisere materialutformingen og byggkonstruksjoner. Gjennom en generell gjennomgang av teori, prinsipper og algoritmer bak TO, vil vi se på hvordan denne prosessen kan brukes i byggebransjen for å redusere vekt, forbedre styrke og stivhet, samt skape effektive designløsninger for ulike konstruksjonselementer. Oppgaven vil dekke en rekke temaer, inkludert generell forståelse av matematiske algoritmer for TO, bruk av dataprogrammer for å designe elementer ved hjelp av TO, og finittelementanalyse (FEA) i TO-prosessen. Oppgaven vil også inneholde praktiske eksempler på bygg som har benyttet TO. Vi vil også gjennomføre en spørreundersøkelse for å kartlegge kjennskapen til TO i den norske byggebransjen, samt et eksperiment som sammenligner en ikke-optimalisert bjelke med en optimalisert bjelke under samme belastningsforhold.

Ved å kombinere teoretisk kunnskap med og erfaringer fra eksisterende TO-prosjekter, vil denne bacheloroppgaven gi en forståelse av topologioptimalisering og hvordan det kan benyttes for produktutvikling.

## 1.2 Bakgrunn

Topologioptimalisering (TO) har som mål å finne optimale materialfordeling og strukturer som oppfyller ønskede krav til ytelse, holdbarhet og bærekraft, samtidig som vekt og kostnader reduseres. Forskning og utvikling innen TO er påvirket av flere faktorer, som inkluderer fremskritt innen additiv produksjon (kjent som 3D-printing). Additiv produksjon gir større frihet i design av komplekse og lettvekts strukturer, noe som gjør TO stadig mer relevant og interessant for industrien. Samtidig har forbedringer i datateknologi og programvare gjort det mulig å håndtere mer komplekse TO-problemer og simulere strukturer med høy nøyaktighet og effektivitet.

## 1.3 Hensikt

Formålet med denne oppgaven er å undersøke hvordan topologioptimalisering kan bidra til å redusere vekten og materialbruken i konstruksjonselementer i byggebransjen og hvordan denne metoden kan gjennomføres i praksis. Målet er å bidra til utviklingen av mer bærekraftige og effektive konstruksjoner i byggebransjen ved å optimalisere deres design og redusere materialbruk og vekt, samtidig som man opprettholder eller forbedrer deres funksjonalitet.

## 1.4 Problemstilling

Denne oppgaven fokuserer på å undersøke topologioptimalisering innen bygge bransjen. Vi ønsker å kartlegge bruken av topologioptimalisering i Norge og identifisere potensielle anvendelser innen byggebransjen. I tillegg vil vi lære den praktiske prosessen med topologioptimalisering, fra design til produksjon og testing. Målet er å forstå og demonstrere effektiviteten og nytten av topologioptimalisering. Problemstillingen kan formuleres som følger:

Hvordan kan topologioptimalisering anvendes i byggebransjen?

- 1- Hvordan er topologioptimalisering for øyeblikket anvendt i byggebransjen i Norge?
- 2- På hvilke måter kan topologioptimalisering implementeres innen byggebransjen?
- 3- Hvordan kan vi utføre topologioptimalisering av et objekt, fra design til testing?

## 1.5 Avgrensinger

Avgrensningen for denne bacheloroppgaven kan defineres som følger:

Selv om det ble gjennomført en litteraturstudie for å forstå grunnleggende prinsipper for topologioptimalisering, lå det utenfor oppgavens omfang å fordype seg i alle de ulike tilgjengelige algoritmene og matematikken. Fokuset var primært rettet mot generelle prinsipper og metoder som kan bidra til å forstå topologioptimaliseringens grunnkonsept. I den praktiske delen av forskningen konsentrerte vi oss om to produksjonsmetoder, SLS og FDM. Det var imidlertid begrenset hvor mange prototyper vi kunne teste, og vi kunne ikke inkludere alle tilgjengelige materialer i våre tester. Vi hadde heller ikke mulighet til å gjennomføre tester på ekte konstruksjoner, for eksempel betongdekker, noe som kunne ha gitt mer realistiske og relevante resultater. En annen begrensning var at testmaskinen var ikke designet for spesifikt fordelt belastning, derfor vi måtte tilnærme oss dette på en annen måte. Dette fører til mindre nøyaktige resultater og gjør det vanskelig å trekke en absolutt konklusjon. Spørreundersøkelsen vi designet hadde til hensikt å kartlegge kjennskapen til topologioptimalisering i den norske bygge bransjen. På grunn av det begrensede antallet respondenter, kan vi ikke trekke absolutte konklusjoner basert på disse resultatene.

Det er viktig å merke at denne oppgaven ikke dekker andre potensielle metoder for optimalisering, eller anvendelse av topologioptimalisering i andre sektorer enn byggindustrien. Selv om disse avgrensningene eksisterer, gir denne oppgaven verdifull innsikt i topologioptimaliseringens mulige anvendelser innenfor byggbransjen, og peker på områder for videre forskning.

## 1.6 Motivasjon

Med fremskritt innen digitale teknologier og datavitenskap, kan vi nå integrere topologioptimalisering i designprosessen. Dette har potensialet til å produsere en mer effektiv og kostnadsbesparende design, som reduserer materialbruk og vekt, samtidig som styrke og ytelse forbedres. Ved å implementere topologioptimalisering i byggeprosjekter, kan bransjen revolusjonere byggdesign og konstruksjon, med fordeler som økonomiske besparelser og bidra til mer bærekraftige og energieffektive bygg.

## 1.7 Gruppearbeid

Suksessen til et prosjekt avhenger av effektiv kommunikasjon. Derfor innførte gruppen tidlig i prosjektet et strukturert kommunikasjonssystem, noe som ble formalisert gjennom en avtale som fastsatte grunnleggende retningslinjer for møter, tilstedeværelse og fravær. Videre ble en "standardavtale" undertegnet for å sikre rettighetene til de involverte partene. I løpet av forprosjektfasen vurderte vi å utvikle en prototype. Denne kunne ha vært gunstig for praktiske tester. Imidlertid konkluderte vi med at ressursene som ville være nødvendige for å skape en prototype, ville overstige mulige fordeler. For å sikre at avhandlingen var innenfor de fastsatte rammene, ble det holdt regelmessige møter med vår veileder. Dette foregikk annenhver uke for å oppdatere fremdriften i arbeidet, samt motta tilbakemeldinger på forbedringsområder.

Oppgaven var omfattende og det kreves en betydelig mengde teorilesing for å forstå topologioptimalisering. Det første stadiet av arbeidet innebar derfor et dypdykk i relevant teori. Gjennom gruppemøter sikret vi en felles forståelse og effektiv informasjonsdeling. Videre utformet vi en innholdsliste for oppgaven.

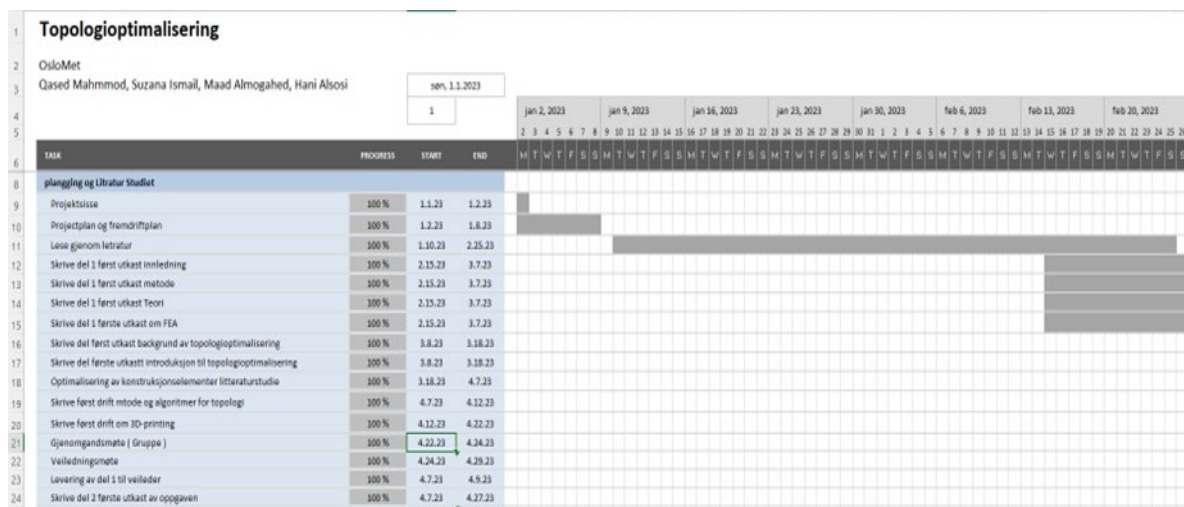
Vi delte opp arbeidsperioden i fire faser:

1. Litteraturstudie og teori
2. Skrive om 3D-printing og de programmene vi brukte til å optimalisere objektene vi eksperimenterte med
3. Besvare hovedproblemstillingen og undersøke hvordan byggeindustrien bruker topologioptimalisering i sine prosjekter
4. Utforme og gjennomføre en spørreundersøkelse og forsøk

Utvelgelsen av respondenter til spørreundersøkelsen ble gjort med fokus på de som jobber med dimensjonering. Vi gjennomførte også en grundig planlegging av forsøket, inkludert utvelgelse av riktig maskin for problemstillingen vår, og identifisering av personer som kunne hjelpe oss.

Til slutt inkluderte vi en fremdriftsplan, hvor vi planla arbeidet gjennom hele prosjektperioden for å sikre at vi kunne fullføre avhandlingen innen fristen. Vi tildelte hverandre individuelle arbeidsoppgaver for selvstendig arbeid, men sørget for å holde regelmessige gruppemøter for å diskutere og forklare det vi hadde skrevet og lært underveis.





I vedlegg er mer detaljer om bearbeidet og skriving av selv oppgaven med timeliste.

## 2 Metode

### 2.1 Drøfting av metoder

Det finnes en rekke forskningsmetoder for å finne løsninger til en gitt problemstilling, inkludert kvantitative, kvalitative, litteraturstudie og blandet metode. Kvantitativ metode representerer en forskningsstrategi som søker å samle og analysere målbare data i form av numeriske verdier. Metoden anvender statistikk og tall for å beskrive og besvare problemstillingen ved å involvere spørreundersøkelser, eksperimenter og statistiske analyser. Dette gir en systematisk tilnærming for å undersøke sammenhenger mellom variabler og teste hypoteser. På den annen side, kvalitative metoder representerer en motsatt forskningsstrategi og søker å samle og analysere data i form av tekst, bilder eller lyd. Dette involverer intervjuer, observasjoner og case-studier for å beskrive, forstå og forklare problemstillingen. (1)

En annen forskningsmetode er litteraturstudier som innebærer en metode for å samle og analysere eksisterende informasjon om et fenomen fra skriftlige kilder, for eksempel bøker, artikler og rapporter. Litteraturstudier kan være en effektiv måte å få oversikt over eksisterende forskning og kunnskap om et emne, samt å identifisere eksisterende kunnskapshull. (2)

## 2.2 Valget metode

I vår tilnærming benytter vi en kombinert metode, som integrerer både kvantitative og kvalitative metoder og litteraturstudier, for å belyse vår problemstilling. Spørreundersøkelser ble valgt som en kvantitativ metode fordi de gir oss muligheten til å samle inn data og gi bredt bilde av byggebransjens kjennskap til og bruk av topologioptimalisering i Norge. I tillegg har vi gjennomført eksperiment for å sammenligne elementer som er optimalisert med elementer som ikke er optimalisert. På den andre siden har vi valgt å bruke case-studie som en kvalitativ metode for å utfylle den kvantitative datainnsamlingen. Case-studier gir oss muligheten til å dykke dypere ned i spesifikke tilfeller og gir oss en dypere forståelse av hvorfor og hvordan topologioptimalisering brukes i praksis. En litteraturstudie er et essensielt verktøy som her brukes til å legge grunnlaget for vår oppgave. Ved å gå gjennom eksisterende litteratur kan vi identifisere hva som allerede har blitt oppdaget. Det hjelper oss også å unngå duplisering av eksisterende forskning, og gir oss en mulighet til å bygge videre på det arbeidet som allerede har blitt gjort innen feltet.

## 2.3 Metodekritikk

Blandede metoder som innpasser både kvantitative og kvalitative tilnærminger, samt litteraturstudier, har blitt brukt for å besvare problemstillingen i denne studien. Selv om denne tilnærmingen kan gi et bredere perspektiv og mer omfattende data, er det også viktig å vurdere noen kritikker og begrensninger ved metoden.

**Valget av kvantitative metoder:** Spørreundersøkelser gir en bred oversikt over feltet, men de kan også være begrensende. Noen ganger svarer ikke alle mottakerne på en undersøkelse. Dette kan være fordi de ikke er interessert, de har ikke tid, eller de glemmer å svare. En lav responsrate kan føre til skjevhet i dataene.

**Bruk av eksperimentell sammenligning:** Selv om eksperimentet gir en direkte sammenligning av optimaliserte og ikke-optimaliserte elementer, kan det være at resultatene ikke er overførbare til virkelige byggeprosjekter siden det brukes ikke ekte konstruksjonselementer.

**Litteraturstudie:** denne metoden er verdifullt verktøy for å kartlegge eksisterende forskningslandskap, men de er begrenset av tilgjengeligheten av publisert litteratur. Potensielt viktig forskning eller data som ikke er offentliggjort, eller som er publisert på steder vi ikke

har tilgang til, kan dermed bli glemt fra studien. I vårt spesifikke tilfelle kan det også være en bekymring at noen av kildene vi brukte kanskje ikke var strengt forskningsbaserte. Dette kan medføre en risiko for at informasjonen vi samlet inn ikke er helt nøyaktig eller representerende for det totale kunnskapslandskapet innen feltet. Dette understreker behovet for kritisk evaluering av kilder og deres relevans og pålitelighet når man utfører en litteraturstudie.

Til slutt kan integreringen av kvantitative og kvalitative metoder i seg selv være utfordrende. Det krever en balanse for å sikre at hver metode bidrar med verdifull innsikt, og at resultatene fra de ulike metodene kan sammenlignes på en meningsfull måte. Disse kritikkpunktene betyr ikke nødvendigvis at metoden er feil, men de er viktige å ta hensyn til når man tolker resultatene og vurderer hvor sikre konklusjonene kan være

## **3 Bakgrunn**

### **3.1 Definisjon av topologioptimalisering (TO)**

Topologioptimalisering er en metode innenfor strukturell optimalisering som søker å finne den beste materialdistribusjonen innenfor et gitt designområde, gitt en rekke begrensninger, for å oppnå en forhåndsbestemt målfunksjon. Med andre ord, topologioptimalisering er prosessen med å finne den "beste" mulige formen for struktur gitt visse kriterier, som for eksempel minimal vekt eller maksimal stivhet, samtidig som visse begrensninger opprettholdes, som for eksempel materialbruk eller lastekapasitet.

### **3.2 Historie**

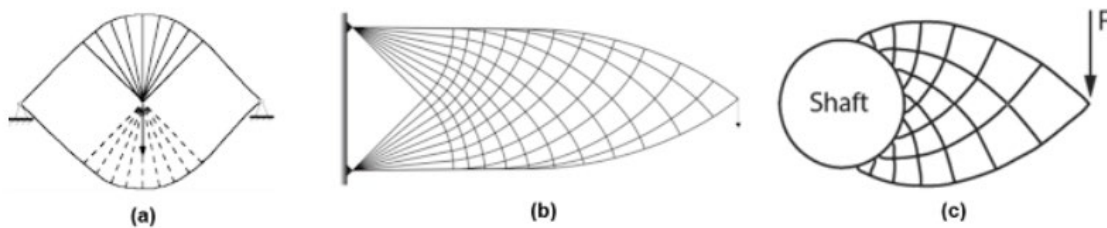
Strukturell optimalisering er en omfattende forskningsdisiplin innen ingeniørfag som har som mål å forbedre strukturens ytelse og effektivitet. Det er verdt å merke seg at startdatoen for strukturell optimalisering ikke kan fastslås nøyaktig, men det kan spores tilbake til 1500- og 1600-tallet, da Galileo Galilei utforsket bruddprosessen til sprø kropp og vurderte kroppens form med hensyn til styrke i sin bok "Discorsi". (3) (4)

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) kan tilskrives å ha lagt grunnlaget for enhver analytisk prosedyre innen matematikk og naturvitenskap. Leonard Euler (1707-1783) bidro til teorien om ekstremer, som la grunnlaget for beregning av variasjonsutvikling. Bidrag fra Euler,

Lagrange (1736-1813) og Hamilton (1805-1865) hjalp til med å fullføre variasjonsregningen, som er grunnlaget for flere optimeringsutfordringer.

I 1870 fokuserte Maxwell (Maxwell, 1870) på problemstillinger innen det sivile ingeniørfaget og foreslo en metode for å designe broer som bruker færrest mulig materiale. Han benyttet elastisitetsteori for å finne den optimale fordelingen av materialer gjennom hovedspenningsfeltet. (3)

I 1904 publiserte Michell (Michell, 1904) den første artikkelen om topologioptimalisering som utledet gunstige kriterier for å finne den letteste vektfordelingen av fagverk. Michell fortsatte Maxwells studier og arbeidet med å skape optimale strukturer (Figur 3-1). På den tiden ble Michells strukturer ansett som svært vanskelige å produsere og ble kun brukt som referanse for akademiske studier. I dag kan disse strukturene imidlertid brukes som en analytisk referanse for todimensjonale topologioptimaliseringsproblemer når volumet nærmer seg null. (3)



Figur 3-1(a), (b) Michell frame bridge structures. (c) Michell optimal crank structure. (Michell, 1904)

Omtrent 70 år senere publiserte Rozvany og hans forskningsgruppe artikler som utvidet Michells teori til å omfatte bjelkesystemer (Rozvany, 1972a, 1972b). Basert på disse artiklene formulerte Prager og Rozvany (Prager & Rozvany, 1977) den første generelle teorien om topologi-optimalisering, kalt "optimalt layout theory". Teorien ble primært brukt til den nøyaktige analytiske optimaliseringen av rutenett-strukturer, men har også viktige implikasjoner for numeriske metoder og kontinuum-strukturer. (3, 5)

I 1988 presenterte Bendsø og Kikuchi (Bendsø & Kikuchi, 1988) homogeniseringsmetoden, som regnes som en milepæl innenfor topologioptimalisering. Metoden gjør det mulig å representere en kompleks struktur med en enklere, homogenisert versjon som kan optimaliseres mer effektivt. Siden denne artikkelen, har feltet tiltrukket seg stor interesse både fra industrien og academia på grunn av sitt enorme potensial i ingeniørapplikasjoner. (3, 6)

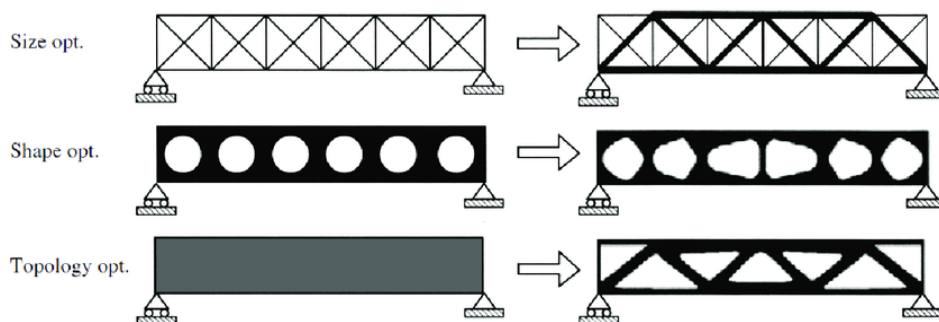
### 3.3 Størrelsesoptimalisering og formoptimalisering

I det følgende avsnittet skal vi se hvordan forskjellige optimaliseringsmetoder kan brukes for å optimalisere konstruksjonselementer på en mer effektiv måte. Det inkluderer tre hovedtyper av optimalisering: Størrelsesoptimalisering, formoptimalisering og topologioptimalisering. (7)

Form- og størrelsesoptimalisering (size and shape optimization) er metoder som er brukt for å øke styrken og optimalisere konstruksjonselementer for å oppnå ønsket form med lavere vekt, samtidig som de beholder de mekaniske egenskapene. Disse metodene er basert på å finne den mest effektive formen for et konstruksjonselement, basert på belastningen det utsettes for. En vanlig numerisk metode som brukes for dette formålet er finite element method (FEM), som løser partielle differensiallikninger og integrallikninger for å finne ut spenninger og deformasjoner i et konstruksjonselement.

Størrelsesoptimalisering omhandler endringer i størrelse, tykkelse eller arealet til et element, mens formoptimalisering fokuserer på å forbedre form, krumning eller endring av geometriske egenskaper til elementet. Formoptimalisering skiller seg fra størrelsesoptimalisering, hvor størrelsesoptimalisering omhandler å endre størrelsen på et element, mens formoptimalisering handler om å endre formen på strukturen(7) (8)

Topologioptimalisering (TO) er en metode som brukes til å skape objekter på en meget effektiv måte ved å redusere bruken av materiale. Den grunnleggende hensikten med TO er å fjerne unødvendig materiale fra de minst kritiske områdene av objektet, samtidig som man opprettholder ønsket funksjonalitet. Gjennom denne prosessen oppnår man en optimal topologi som maksimerer effektiviteten og reduserer mengden materiale som kreves, og det som skiller TO fra andre metoder.



Figur 3-2 Sammenlignende illustrasjon av størrelse, form og topologi optimalisering. De første problemene vises til venstre og de optimale løsningene som bruk av forskjellige optimalisering metodene vises til høyre.

## 4 Teori

### 4.1 Materialelegenskaper

Materialelegenskaper spiller en avgjørende rolle i topologioptimalisering (TO), ettersom valg av materialer kan ha betydelig innvirkning på produktets ytelse og funksjon. TO er en metode som benyttes for å identifisere den beste mulige produkttopologien, basert på et definert sett av belastninger og geometriske begrensninger. I denne sammenheng er det nødvendig å gjennomføre en TO-analyse, hvor det legges vekt på en grundig forståelse av relevante materialelegenskaper.

En av de primære materialeegenskapene som vurderes i TO, er styrke, som representerer materialets evne til å motstå deformasjon og brudd. TO-teknikken muliggjør en undersøkelse og sammenligning av styrkeegenskapene til ulike materialer, med mål om å identifisere det mest hensiktsmessige materialet for et spesifikt bruksområde. I tillegg er det viktig å vurdere stivhet i materialeegenskapene, da dette angir materialets evne til å motstå deformasjon under en påført belastning. Stivhet er en kritisk faktor som bidrar til å sikre at det resulterende elementet er sterkt og kraftig. Valg av materiale er en nøkkelfaktor i TO-prosessen for å oppnå et element med optimal ytelse og holdbarhet. Valg av materiale er en avgjørende faktor for å oppnå et sterkt og kraftig element. Derfor er det viktig å ha en grundig forståelse av materialelegenskaper.

Noen av de mest sentrale materialeegenskapene i TO inkluderer:

- Tøyningsenergi
- Flytspenning.
- Elastikk modul.
- Isotropisk materialer og anisotropiske materialer.
- Poissons forholdstall.

(9) (10).

#### 4.1.1 Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul er en fysisk egenskap som måler materialets stivhet og evne til å motstå deformasjon under påført belastning. Denne egenskapen har en betydelig betydning for evaluering av stivheten til forskjellige materialer og om det vil påvirke optimaliseringen av strukturen. Jo høyere elastisitetsmodulen er, jo stivere er materialet. Dermed kan det føre til en

mer optimal og stivere struktur. I tillegg til elastisitetsmodulen, er det viktig å vurdere andre mekaniske egenskaper når man velger materialer. Strekkfasthet (yield strength) og flytespenning (tensile strength) er to viktige faktorer som må vurderes, da de beskriver materialets evne til å motstå stress før det deformeres eller brytes.

Strekkfasthet er et mål for det maksimale spenningsnivået som et materiale kan tåle før det bryter eller svikter under belastning. Strekkfastheten er en indikator på materialets motstandsdyktighet mot brudd og er viktig for å vurdere materialets ytelse og levetid under forskjellige driftsforhold. I tillegg er strekkfastheten en nøkkelfaktor i beregning av sikkerhetsfaktorer for konstruksjoner og komponenter for å sikre at de ikke vil svikte under normale eller ekstreme driftsforhold.

Flytespenning, også kjent som flytestress eller flytepunkt, er en kritisk materialegenskap som angir det maksimale spenningsnivået et materiale kan tåle før det begynner å deformeres plastisk, noe som betyr permanent deformasjon. Når et materiale når sin flytespenning, vil det ikke lenger gå tilbake til sin opprinnelige form når belastningen fjernes. (11) (12).

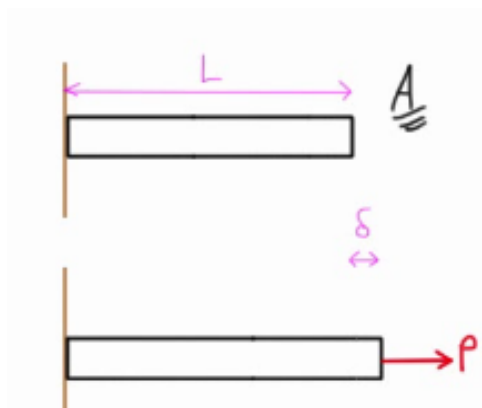
#### **4.1.2 Tverrkontraksjon forholdstall**

Tverrkontraksjon forholdstall representerer en dimensjonsløs verdi som beskriver forholdet mellom tverrsammentrykningen og lengdeendringen for et objekt ved små deformasjoner, og indikerer dermed hvor mye et materiale vil krympe eller utvide seg i bredden når det utsettes for strekk eller trykk langs lengderetningen.

Tverrkontraksjon forholdstall er en karakteristisk størrelse for de elastiske egenskapene til materialer, definert som forholdet mellom sidestørrelsen og lengdeendringen med motsatt fortegn, og ofte uttrykt som et negativt tall. Verdien for Poissons forholdstall kan variere fra 0 til 0,5 og avhenger av materialets egenskaper. Det er en avgjørende faktor å ta hensyn til i design og analyse av strukturer utsatt for spenninger. Poissons forholdstall gir også informasjon om hvordan materialet vil deformere seg ved belastning, spesielt med hensyn til sidelengs deformasjon som oppstår ved strekking eller bøyning. Isotropiske materialer har en tverrkontraksjon forholdstall mellom -1 og 0,5, mens anisotropiske materialer som avhenger av retningen, vil Poissontallet angi både negative og positive verdier. (13)

### 4.1.3 Tøyningsenergi (strain energy)

Tøyningsenergi er en form for potensiell energi som er lagret innenfor et materiale når det blir deformert på grunn av en påført kraft. Når denne kraften fjernes, vil det elastiske materialet gå tilbake til sin opprinnelige form. Deretter frigjøres den lagrede elastiske energien. Dette kan sees i for eksempel en fjær som er strukket eller sammenpresset, og det lagres elastisk energi i fjæren. Denne energien kan frigjøres når kraften som har medført deformasjonen, deretter fjernes, og fjæren vil gå tilbake til sin opprinnelige form.



Figur 4-1 : Illustrere en bjelke som ble satt for elastikk energi og som har fått deformasjon.

Mengden av elastisk energi som er lagret i et materiale er avhengig av mengden av deformasjonen det gjennomgår. Jo større deformasjon, jo mer elastisk energi blir lagret.

Mengden av elastisk energi som blir lagret i et materiale, kan beregnes ved bruk av denne formelen:

$$U = (1/2) k\Delta x^2.$$

Tøyningsenergi =  $(1/2) \times$  kraft  $\times$  deformasjon, der kraft er den kraften som er påført til materialet og deformasjonen er mengden av deformasjon som er blitt lagt til. Tøyningsenergi er vesentlig å ha kunnskap om fordi den spiller en avgjørende rolle i oppførselen og egenskapene til materialer når det utsettes for belastning. Forståelse av mengden elastisk energi som et materiale kan lagre og frigjøre, er bestemmende for utformingen og analysen av strukturer og maskiner som er underlagt eksterne krefter.



#### 4.1.4 Isotropisk og Anisotropiske materialer

Isotropiske materialer er materialer som har like fysiske og mekaniske egenskaper i alle retninger. Dette betyr at deres egenskaper, som for eksempel elastisitet, styrke og tetthet, er uavhengige av retningen de måles i. Matematisk sett betyr dette at isotropiske materialer har samme verdi på sine fysiske og mekaniske egenskaper uansett hvilken retning man måler i. De fleste homogene og enkle materialer, som metaller, glass, keramikk og noen polymerer er isotropiske materialer. Anisotropiske materialer, derimot, har forskjellige fysiske og mekaniske egenskaper i ulike retninger. Dette betyr at deres egenskaper er avhengige av retningen de måles i, og kan variere betydelig fra retning til retning. Anisotropiske materialer kan ha en kompleks struktur og oppførsel, og deres egenskaper kan variere avhengig av retning og forholdene de blir utsatt for. Eksempler på anisotropiske materialer inkluderer trefiber, kompositter, og krystallinske materialer.

Anisotropiske materialer er ofte mer komplekse å modellere og analysere enn isotropiske materialer, og krever ofte avansert testing og modellering for å forstå deres mekaniske og fysiske egenskaper. (14) (15)

## 4.2 Finite element method (FEM)

### 4.2.1 FEA (Finittelementanalyse)

Topologioptimalisering avhenger av FEA, og det er derfor viktig å gi en oversikt over hva FEM er og hovedsammenhengen mellom de to. Denne delen kommer ikke til å fordype seg i studiet av FEA-algoritmen, men forklare prinsippet bak metoden.

*" Finit element metoden er en numerisk metode for å løse problemer innen ingeniørfag og matematisk fysikk. Typiske problemområder av interesse innen ingeniørfag og matematisk fysikk som kan løses ved bruk av finit element metoden inkluderer strukturanalyse, varmeoverføring, fluidstrømning, masseoverføring og elektromagnetisk potensial."*

(A First Course in the Finite Element Method - Daryl L. Logan - University of Wisconsin-Platteville)

Finite Element Method (FEM) er en numerisk metode som brukes til å løse likevektslikninger og etablere sammenhenger mellom en rekke variabler, inkludert stress, belastning, deformasjon, temperatur og strøm, samt andre elementer. Metoden fungerer ved å bryte ned et stort system eller en struktur til mindre elementer, som deretter samles i en såkalt "diskretisering". Disse mindre elementene er koblet sammen av noder, og løsninger for hvert element beregnes individuelt. Deretter kombineres disse løsningene for å oppnå en helhetlig løsning for det store systemet eller strukturen.

FEM har flere bruksområder, inkludert strukturanalyse, fluidmekanikk, elektromagnetiske feltanalyser og termisk analyse. FEM kan modellere systemer og strukturer med forskjellige geometriske former og materialer, og kan simulere ulike typer påkjenninger. FEM gir muligheten til å inkludere detaljer og finne løsninger med høy nøyaktighet, noe som kan være avgjørende for å designe effektive og pålitelige systemer. FEM har også noen begrensninger, inkludert valg av elementtyper og grensebetingelser. Valg av elementtyper og grensebetingelser kan ha stor innvirkning på nøyaktigheten og påliteligheten av FEM-analyser. En annen utfordring med FEM er behovet for avansert maskinvare og programvare. FEM krever stor datamaskinkapasitet og programvareverktøy for å kjøre simuleringer og analysere resultater.

FEM har flere bruksområder, inkludert strukturanalyse, fluidmekanikk, elektromagnetiske feltanalyser og termisk analyse. FEM kan modellere systemer og strukturer med forskjellige geometriske former og materialer, og kan simulere ulike typer påkjenninger. FEM gir muligheten til å inkludere detaljer og finne løsninger med høy nøyaktighet, noe som kan være

avgjørende for å designe effektive og pålitelige systemer. FEM har også noen begrensninger, inkludert valg av elementtyper og grensebetingelser. Valg av elementtyper og grensebetingelser kan ha stor innvirkning på nøyaktigheten og påliteligheten av FEM-analyser. En annen utfordring med FEM er behovet for avansert maskinvare og programvare. FEM krever stor datamaskinkapasitet og programvareverktøy for å kjøre simuleringer og analysere resultater.

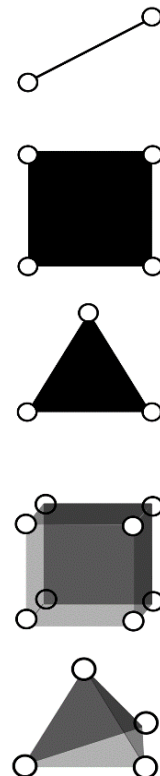
(3)

#### 4.2.2 Diskreditering og elementtype

Diskreditering er en betegnelse som brukes innen numerisk analyse for å beskrive en struktur som er bygget opp av mindre elementer som er satt sammen. Dette konseptet kan anvendes i en rekke ulike sammenhenger, men innenfor numerisk analyse og spesielt FEA, refererer diskreditering til en representasjon av en mekanisk struktur som er brutt ned i mindre elementer som kobles sammen av noder.

Det finnes forskjellige elementtyper som brukes i FEA for å representere forskjellige geometrier og materialer. Her er noen vanlige typer elementer:

1. Lineære elementer: Dette er enkle elementer som brukes til å representere rette linjer eller kurver.
2. Triangulære elementer: Disse er flate, trekantede elementer som brukes til å representere todimensjonale geometrier.
3. Rektangulære elementer: Disse er flate, firkantede elementer som brukes til å representere todimensjonale geometrier.
4. Tetraederelementer: Dette er tredimensjonale elementer som brukes til å representere små, uregelmessige volumer.
5. Pyramideelementer: Disse er også tredimensjonale elementer som brukes til å representere større, uregelmessige volumer.



Figur 4-2 Elementtype

Det er viktig å velge riktig type elementer for en gitt applikasjon, avhengig av geometrien til objektet som analyseres og materialeegenskapene. Valg av riktig type elementer kan bidra til å øke nøyaktigheten og påliteligheten til FEA-resultatene.

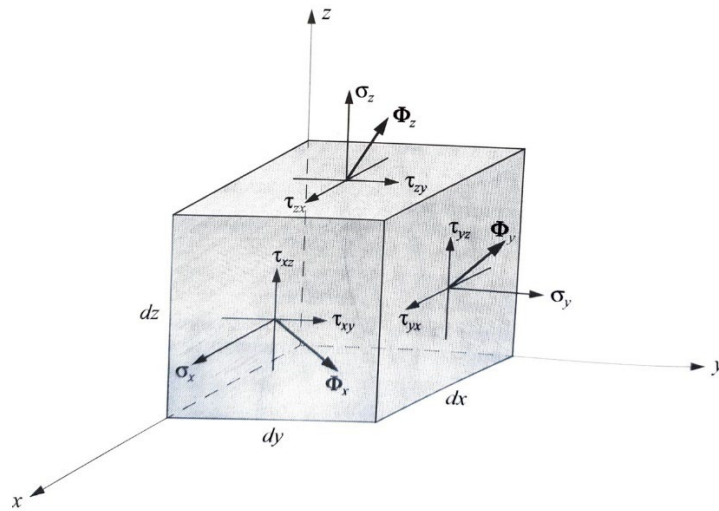
### 4.2.3 Elementstørrelse

Elementstørrelse i FEA refererer til størrelsen på de mindre elementene som en stor modell er delt inn i for å utføre analyser og simuleringer. Disse elementene er som nevnt tidligere, koblet sammen av noder. Størrelsen på disse elementene kan variere avhengig av kompleksiteten til problemet som skal løses, og kravene til nøyaktighet i analysen. Generelt sett er større elementer raskere å beregne, men kan føre til upresise resultater. Mindre elementer gir mer nøyaktige resultater, men krever mer beregningskraft og øker dermed tiden det tar å utføre analysen. Derfor er elementstørrelsen en viktig faktor å vurdere når man utfører en FEA, og det må velges en passende størrelse som gir tilstrekkelig nøyaktighet uten å øke beregningstiden unødige mye.

### 4.2.4 Spenningsanalyse

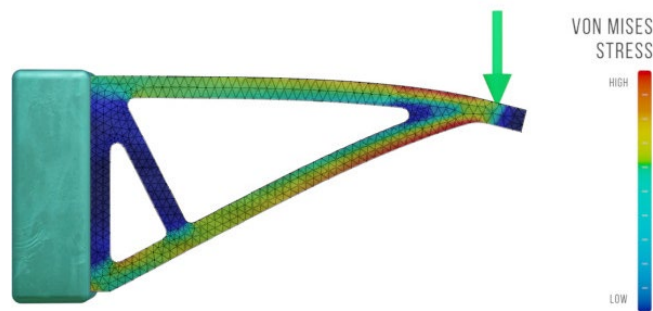
FEA undersøker hvordan en struktur oppfører seg under ulike belastninger. Vi kan beregne ulike typer spenninger for å vurdere sikkerheten og påliteligheten til strukturen. En viktig type spenning å måle er den ekvivalente spenningen i materialet. Denne tar hensyn til alle de tre hovedspenningskomponentene, vanligvis kalt  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  og  $\sigma_z$ , samt  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  og  $\tau_{yz}$ . Beregning av den ekvivalente spenningen hjelper oss med å finne materialets flytegrense og forutsi svikt på grunn av plastisk deformasjon. Det er svært viktig å vite når strukturen vil svikte på grunn av deformasjon for å sikre trygg oppførsel under påkjenning.

Figuren viser et uendelig lite volumelement  $dx$   $dy$   $dz$  med påtrykte krefter, og deres tilhørende spenningskomponenter som virker på "positive" flater, som vil si flater med normalvektorer i retning av positive akser. De tre normale spenningskomponentene betegnes med  $\sigma$  og en indeks som angir retningen. De seks skjærspenningkomponentene betegnes med  $\tau$  og to indekser, hvor den første angir retningen til flatenormalen og den andre angir retningen til spenningskomponenten selv. Kraftvektorene på de tre flatene betegnes med  $f$  og en indeks som angir retningen til flatenormalen.(16)



Figur 4-3 Stress and tractions in 3D Finite Element Analysis – Kolbein Bell

En kombinasjon av alle spenningskomponentene i elementene kan integreres i en simulator og gi en strukturanalyse for hele det diskretiserte elementet. Figur (4-4) illustrerer spenningene i et enkelt element og viser hvordan noen små elementer kan være mer kritiske enn andre når det gjelder belastning og deformasjon.



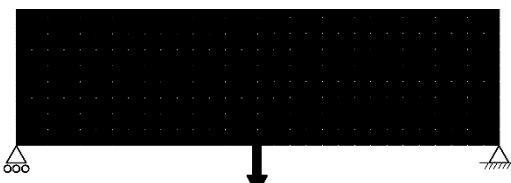
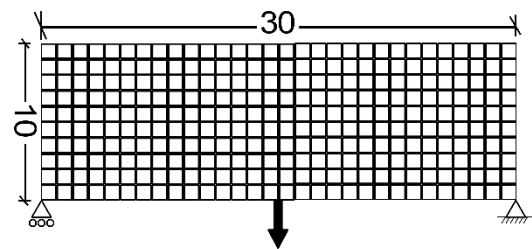
Figur 4-4 Eksempel på bruk av den endelige elementmetoden  
Finittelementanalyse for å bestemme von Mises-  
ekvivalente spenninger i en brakett

## 4.3 Topologioptimalisering

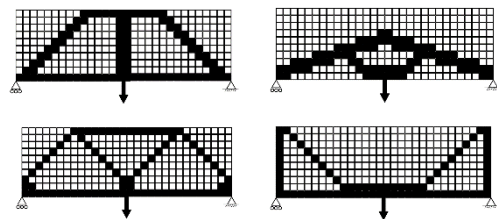
### 4.3.1 Introduksjon til topologioptimalisering

For å illustrere konseptet med topologioptimalisering, kan vi bruke et eksempel med en bjelke som er festet i endene og har en enkelt last i midten. Bjelken er delt inn i små elementer som er samlet i en mesh med en størrelse på 30x10 elementer, som gir et totalt antall på 300 elementer i domenet. Målet med det er å velge hvilke elementer som skal fylles med materiale for å oppnå best mulig kapasitet for bjelken, altså å finne maks stivhet.

Dersom vi holder fast ved målet uten noen begrensninger, vil det kun eksistere en enkelt løsning, som vil være å fylle alle elementene i figur (4-6). Dersom vi begrenser oss til kun å fylle 90 elementer, vil det være mange alternative løsninger som kan oppnå dette målet.



Figur 4-6: Alle elementene er fyll med material



Figur 4-6 noen alternativer for best mulig form

Figur (4-6) viser noen av de mulige alternativene for å oppnå dette målet. Det er viktig å merke seg at antallet av alternative løsninger ikke kan fastslås nøyaktig, da det vil avhenge av flere faktorer, slik som størrelsen på elementene.

I forhold til denne problemstilling, antall alternativer er

$$C(300,90) = \frac{300!}{90! (300 - 90)!} = 1.57 * 10^{536}$$

Det er utfordrende å teste alle alternativer for å finne den mest optimale løsningen, derfor er det behov for å utvikle en matematisk formel. Formålet er primært å maksimere stivheten innenfor begrenset volum eller materialbruk.

*(Dette eksempelet er inspirert av Jun Wus presentasjon, Introduction to topology optimization )*

### 4.3.2 Topologi

Topologi er en type matematikk som omhandler plassering og form, men størrelse er ikke nødvendig. Den kan se på alt fra flate (som et papir) til tredimensjonale gjenstander (som en ball), også gjenstander med flere dimensjoner. Topologi ser på hvordan disse kan endre seg.

I topologi kan du endre objekter på mange forskjellige måter, som å vri, snu, strekke, klemmer og bøye dem, uten at de grunnleggende egenskapene endrer seg. Men du kan ikke rive dem i stykker, lage hull, klippe eller lime dem.

Dermed står topologien som et unikt område innen matematikk, som gir en mer generell og abstrakt forståelse av form, struktur og rom, uavhengig av konkrete geometriske konsepter som lengde og størrelse.

### 4.3.3 Topologioptimalisering

Topologioptimalisering kan defineres som en prosess som har et mål å optimalisere et element ved å redusere eller fjerne unødvendig materiale. TO benytter seg av matematikk og bruker også FEM for å forbedre geometrien til elementet og identifisere områder der materialet ikke bidrar til produktets effektivitet. Gjennom bruk av matematikk og FEM, kan prosessen startes ved å definere elementet og de belastningene som strukturen vil bli utsatt for. Programvaren vil deretter foreslå ulike designideer ved å redusere materialet til objektet mens det beholder styrken som kreves for å tåle eksterne krefter. Deretter vil algoritmen sjekkes for hver iterasjon om objektet fortsatt vil fungere eller ikke under belastningene den er testet for. Programvaren gir også et sett med mulige materialoppsett, og evaluerer deretter disse oppsettene basert på funksjonen til elementet for å velge det beste alternativet som oppfyller designkriteriene.

Målet med TO er å skape et objekt på en mest mulig effektiv måte ved å redusere så mye materiale som mulig. Dette oppnås ved å fjerne materiale fra de minst kritiske områdene til ønsket funksjon er oppnådd. TO representerer dermed en metode for å optimalisere designet av et element ved å identifisere og eliminere unødvendig materiale, samtidig som det opprettholder tilstrekkelig styrke og funksjonalitet. (17)

#### 4.3.4 Objektiv funksjon og Begrensinger (Objective function constraints)

Følgende funksjon og variabler er alltid finnes i et strukturelt optimeringsproblem:

- objektivfunksjonen ( $f$ ): En funksjon som brukes til å klassifisere design. For hvert mulige design, returnerer  $f$  et tall som indikerer kvaliteten på designet. Vanligvis velger vi  $f$  slik at en liten verdi er bedre enn en stor (en minimerings problemstilling). Ofte måler  $f$  vekt, deformasjon eller effektivt stress.
- Designvariabel ( $x$ ): En funksjon eller vektor som beskriver designet, og som kan endres under optimalisering. Den kan representere geometri eller valg av materiale. Når den beskriver geometri, kan den relatere til en sofistikert interpolasjon av form eller den kan være areal av en stang eller tykkelsen.
- Tilstand variabel ( $y$ ): For en gitt struktur, det vil si for et gitt design  $x$ , er  $y$  en funksjon eller vektor som representerer responsen til strukturen. For en mekanisk struktur betyr respons deformasjon, stress, strain eller kraft. **(18)**

$$SO \begin{cases} \text{Minmasere } f(x, y) \text{ med hensyn til } x, y \\ \text{begrensings ved } \begin{cases} \text{begrensning på tilstand variabel } (y) \\ \text{begrensning på Designvariabel } (x) \\ \text{equilibrium begrensning} \end{cases} \end{cases}$$

I ovenstående formel finnes to begrensninger. Første er  $y$  som er en forskyvningsfunksjon av  $g(y) \leq 0$ . Denne kan vi konfigurere som forskyvningsvektor  $g(u(x))$ . I tillegg til begrensning  $x$ . De to føres til equilibrium hvis:

$$k(x) * u = F(x) \quad \text{de vil se at} \quad u(x) = k^{-1}(x) * F(x)$$

Når det gjelder topologioptimalisering, begrenses volumet av strukturen, og den objektive funksjonen er å maksimere stivheten. Dette føres:

$$TO \begin{cases} \text{Minmasere } f(x, u(x)) \text{ med hensyn til } x, u(x) \\ \text{Begrensning } g(x, u(x)) \leq 0 \end{cases}$$

Vi får dette ved å minimalisere elastiskenergi som føres til maksimal stivhet. Elastiskenergi er gitt vi formel:

$$U = \frac{1}{2} V \sigma \epsilon$$

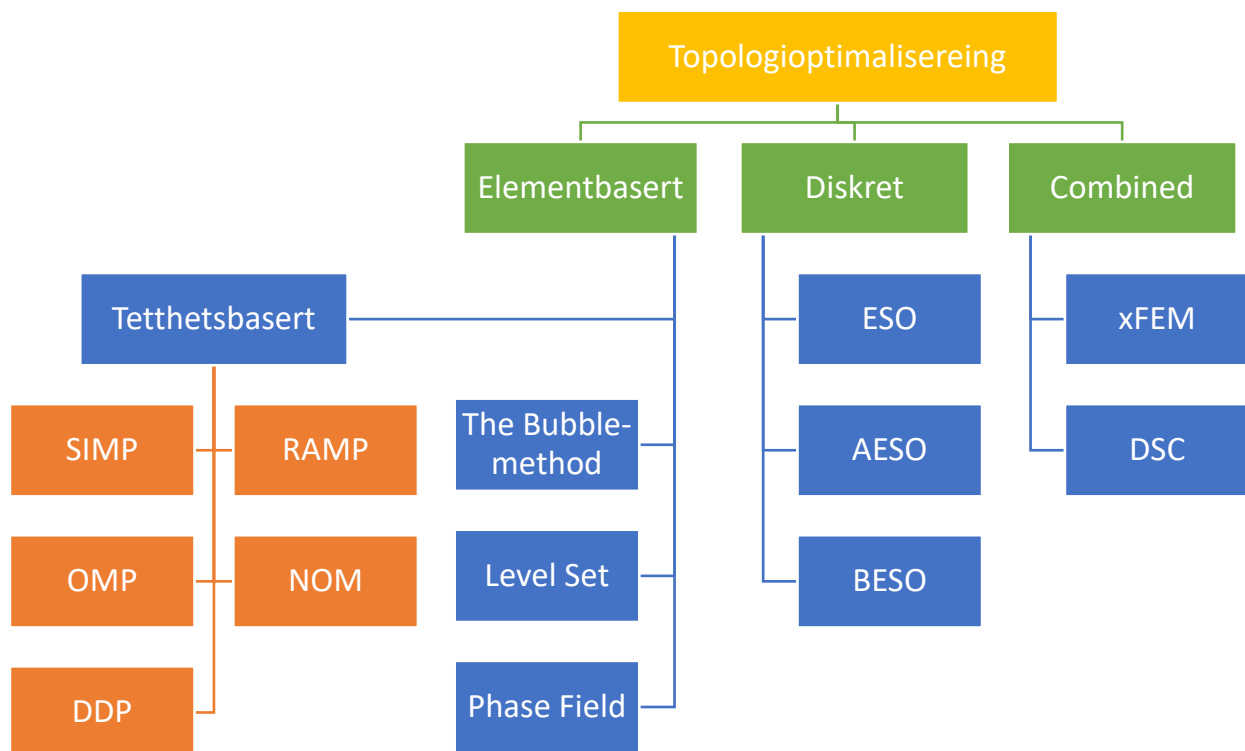


Dette kan vi også fører med flere variabler på like måte:

$$\text{minimize } f_1(x, y), f_2(x, y), \dots, f_n(x, y)$$

## 5 Metode og algoritmer for topologioptimalisering

Det finnes flere metoder for topologioptimalisering som søker å finne den optimale geometriske utformingen av en struktur i henhold til gitte belastnings- og ytelseskrav. Elementbaserte metoder er en vanlig tilnærming og kan deles inn i to hovedtyper for topologioptimalisering. Tetthetsbaserte tilnærminger, som for eksempel SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) og RAMP (Rational Approximation and Material Penalization), samt Level Set-metoden, er eksempler på slike elementbaserte metoder. En annen tilnærming er diskrete metoder som ESO (Evolutionary Structural Optimization) og BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization). Ved å endre tetthetsverdiene i elementene kan man kontrollere materialets tilstedeværelse og oppnå en optimal geometri. Disse metoder og algoritmer for topologioptimalisering har vist seg å være svært effektive for å oppnå lette og sterke strukturer i ulike ingeniørproblemer. Figur (5-1) viser den mest kjente metoder for topologioptimalisering.



Figur 5-1 TO metoder

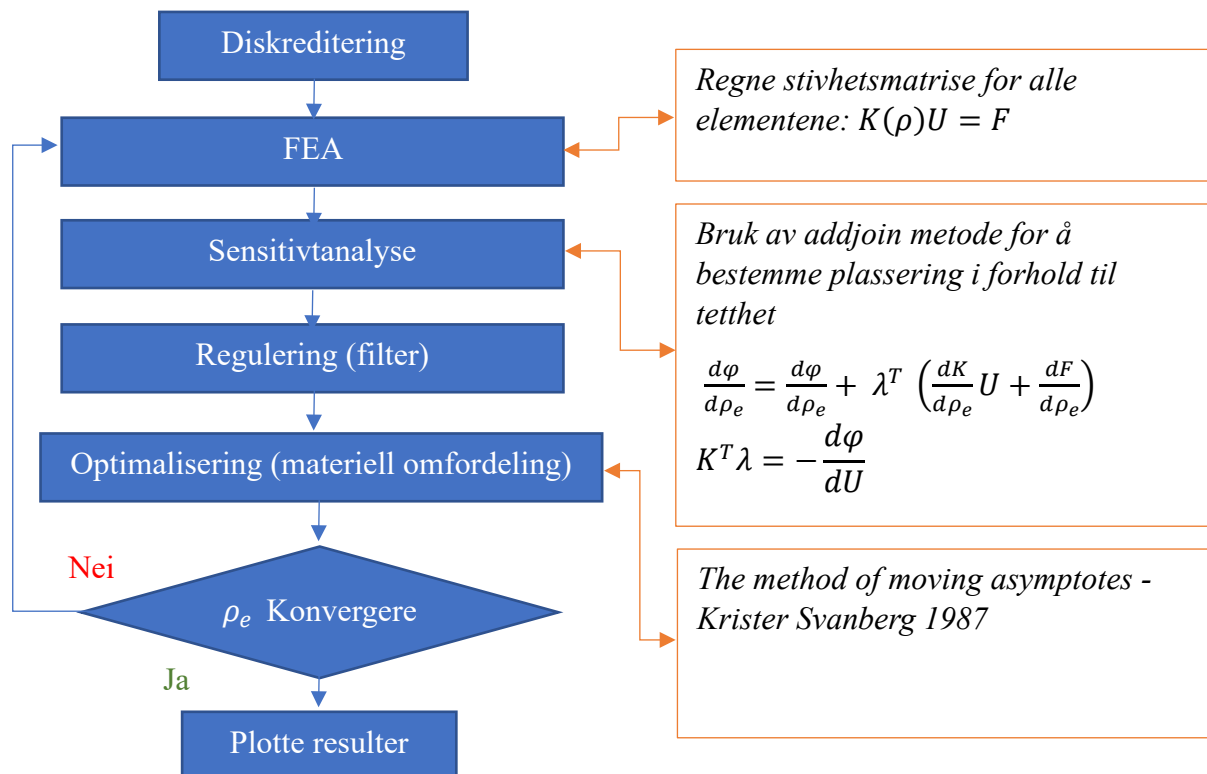
## 5.1 Elementbasert Topologioptimalisering problemstilling

Objektivfunksjonen er minimerings problemstilling elastisk energi og begrensinger kan være definert som volumet. Sammen med likevekts betingelsene kan dette formuleres som:

$$TO \left\{ \begin{array}{l} \text{Minmasere}(\rho) \text{ ved } \varphi(\rho, U(\rho)) \\ SE(P) \left\{ \begin{array}{l} \sum_{e=1}^N v_e \rho_e = v^T \rho \leq V^* \\ g_i(\rho, U(\rho)) \leq g_i^*, i = 1, \dots, M \\ 0 < \rho_{min} < \rho_e \leq 1 \text{ and } K(\rho)U = F \\ E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

SE = strain energy, P = optimization parameters, e = element, N = number of elements,  $\rho$  = density, p = penalty factor  $> 1$ , ue = nodal displacement vector, ke = stiffness matrix,  $V^*$  = target volume

Deretter kjøres dataalgoritme for løse likning for hvert små element basset på denne kort:



## 5.2 SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) (19)

SIMP er en metode som brukes i topologioptimalisering. SIMP-metoden introduserer en delvis funksjon som skaper en gradvis overgang fra et fast materiale til et porøst materiale. SIMP-metoden gjør det mulig å finne den optimale formen ved å redusere materialet i områder der det ikke er nødvendig for å oppnå ønskede egenskaper. Bendsoe og Kikuchi (1988) og Rozvany og Zhou (1992) introduserte SIMP-metoden; "SIMP-metoden forutsier en optimal materialfordeling innenfor et gitt designrom, for gitte lasttilfeller, grensebetingelser, produksjonsbegrensninger og ytelseskrav".

Den tradisjonelle tilnærmingen til topologioptimalisering er diskreditering av et domene til et rutenett av endelige elementer kalt isotrope solide mikrostrukturer. Hvert element er enten fylt med materiale for områder som krever materiale, eller tømt for materiale for områder hvor du kan fjerne materiale (som representerer tomrom). Tetthetsfordelingen av materiale innenfor et designrom  $\rho$  er diskret, og hvert element er tildelt en binær verdi:

$\rho(e) = 1$  der materialet er nødvendig (svart)

$\rho(e) = 0$  der materialet fjernes (hvit)

Introduksjonen av en kontinuerlig relativ tetthetsfordelingsfunksjon unngår den binære av problemet. For hvert element kan den tilordnede relative tettheten variere mellom en minimumsverdi  $\rho_{\min}$  og 1, noe som tillater tildeling av mellomliggende tettheter for elementer (karakterisert som porøse elementer):

$\rho_{\min}$  er den minste tillatte relative tetthetsverdien for tomme elementer som er større enn null. Denne tetthetsverdien sikrer den numeriske stabiliteten til finittelementanalysen.

Siden materialets relative tetthet kan variere kontinuerlig, kan materialets E-modul også variere kontinuerlig på hvert element. For hvert element  $e$ , blir forholdet mellom materialets relative tetthetsfaktor  $\rho_e$  og elastisitetsmodul til den tildelte isotrope materialet modellen  $E_0$ , beregnet ved hjelp av potensloven:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0$$

Penaliseringsfaktoren  $p$  reduserer bidraget fra elementer med mellomliggende tettheter (grå elementer) til den totale stivheten. Penaliseringsfaktoren styrer optimaliseringsløsningen til elementer som enten er solide svarte ( $\rho_e = 1$ ) eller tomme hvite ( $\rho_e = \rho_{\min}$ ).

Reduksjon av et elements elastiske modul fører til en reduksjon av elementets stivhet. Ifølge SIMP-metoden moduleres den globale stivheten i henhold til:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{\min} + (1 - \rho_{\min}) \rho_e^p] K_e$$

$\rho_{\min}$  er den minste relative tettheten,  $\rho_e$  er elementets relative tetthet,  $p$  er penaliseringsfaktoren og  $N$  er antall elementer i designområdet.

En utfordring med SIMP-metoden er at den kan føre til unøyaktige resultater hvis materialetettheten blir for lav. Dette kan føre til problemer med stivhet og bæreevne, samt påvirke påliteligheten til systemet. SIMP-metoden kan også føre til at optimal design får en grov overflate, som kan føre til økt materialforbruk. Derfor er det utfordrende å produsere.

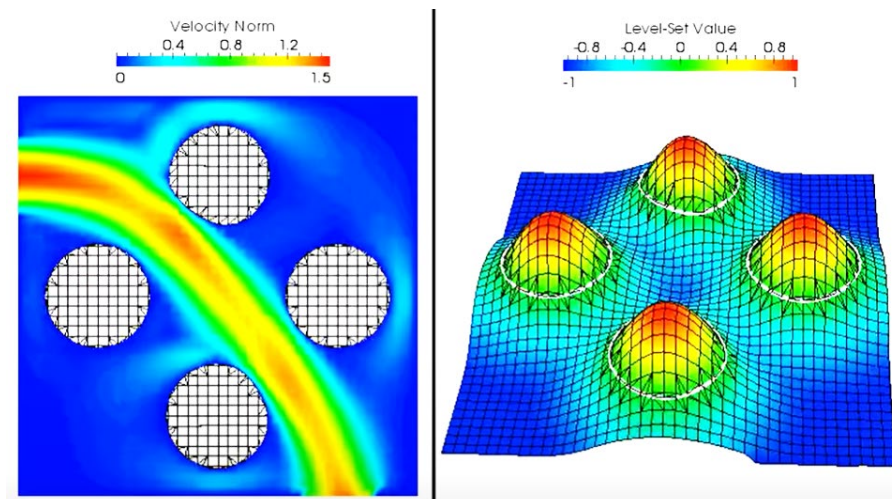
### 5.3 Rational Approximation and Material Penalization - RAMP

RAMP-metoden bruker en tilnærming for å modellere materialegenskapene. Denne tilnærmingen gjør at materialet kan bli representert på en mer realistisk måte ved hjelp av skalariseringsteknikker for elastiske moduler. Ved å justere skalariseringsteknikker kan man kontrollere materialegenskapene og dermed oppnå ønsket stivhet og styrke i strukturen.

I tillegg benytter RAMP-metoden materialstraffingsteknikker, som innebærer å tildele høyere straffeverdier til områder med lav tetthet. Dette skaper insentiver for optimaliseringsalgoritmen til å redusere materialet i disse områdene, og dermed oppnå en lettere struktur. Ved å kombinere den fornuftige tilnærmingen med materialstraffing, bidrar RAMP-metoden til å oppnå optimale geometriske konfigurasjoner som oppfyller de ønskede ytelseskravene.(20)

### 5.4 Level set-metoden (21)

Level set-metoden er en annen metode som brukes i topologioptimalisering. Level set-metoden benytter en kurve eller overflate til å representere grensen mellom et fast materiale og et porøst materiale. Kurven eller overflaten kan bevege seg for å endre formen på det faste materialet og dermed finne den optimale formen.



Figur 5-2 Level set-metoden

Level set-metoden bruker en PDE (Partial Differential Equation) for å beregne hastigheten til kurven eller overflaten. PDE-en inkluderer en objektiv funksjon som representerer ønskede

egenskaper for det faste materialet, for eksempel styrke eller stivhet. Kurven eller overflaten beveger seg deretter i retning av størst økning i objektivfunksjonen.

Algoritme bak Level Set-metoden definert ved  $\phi(x)$ , hvor det verdi av funksjon er knyttet til materialet i det sett:

$$\phi(x) = 0 \text{ in materialgrense}$$

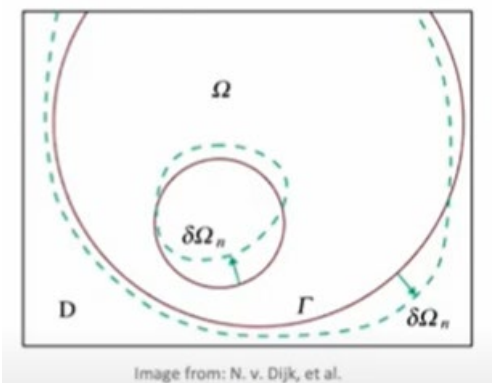
$$\phi(x) < 0 \text{ er tomt av material}$$

In level-set metoden brukes vanlig in signed avstand funksjon med input av posisjon av en punktet inne domen og output blir avstand mellom dette punktet til det materialgrense. Signd avstand funksjon vil si om dette punktet legger inne eller ut av grensen.  $\phi(x) = \sqrt{x^2 + y^2 + 1}$  sirkal funksjon og betingelse at  $\nabla\phi(x)$  må vær =1 og finne det ved å bruke Hamilton-Jacobi ligning

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} - v_n \|\nabla\phi\| = 0$$

Ved å bruket hastighetsfelt  $v_n$  som definere en grensevariasjon møt den optimaliserte, ved hastighet går mot null betyr at den har oppnå topologioptimalgeometri. Dette er på grunn av  $\phi(x)$  har møtet grense og stopper å endre seg ved tid.

Grensen som regel finnes ved en objektiv funksjon som bruket for å gjennomføre en sensitivitet analyse. For å finne den optimal design må minimalisere den elastisk energi.



Figur 5-3 Gradient Level Set-metoden

$$\Pi = \int_{\Omega} \frac{1}{2} H(\phi) \varepsilon^T C \varepsilon d\Omega - \int_{\Gamma} u^T t d\Gamma$$

I tillegg til en begrensnes funksjon for volum redaksjon

$$\int_{\Omega} H(\phi) d\Omega = V_0$$

Akuratt som SIMP må vi definere svart og hvit for at matiral finnes i en punkte :

$$H(\phi) = \begin{cases} 0 & \text{hvis } \phi < 0 \\ 1 & \text{hvis } \phi \geq 0 \end{cases}$$

Ved å bruke Lagrang metode og En utfordring med Level set-metoden er at det kan være vanskelig å finne den optimale løsningen, spesielt for komplekse design. Metoden krever også avanserte numeriske teknikker og kan være tidkrevende å kjøre.

## **5.5 Evolutionary Structural Optimization (ESO)**

Xie og Steven introduserte en tilnærming kalt ESO i 1993. Denne metoden benytter et designområde konstruert ved hjelp av FE-metoden, der eksterne belastninger og støttebetingelser påføres elementmodellen. Materialet kan fjernes ved å tildele de tilsvarende elementene en relativt lav elastisitetsmodul eller tykkelsesverdi, for eksempel 1/106 av den opprinnelige verdien. Elementfjerning baseres vanligvis på elementenes spenningsverdier, men også elementenes energi basert på belastningskriterier har blitt benyttet. Den iterative ESO-proseduren gjentas til avvisningskriterieverdiene for alle elementene er innenfor en gitt rekkevidde. Evolusjonære optimeringsmetoder kan brukes både på grunnstrukturutfordringer og kontinuumproblemer, men de brukes oftere til å løse sistnevnte enn førstnevnte. (22)

## **5.6 Bi-directional Evolutionary Structural Optimization – BESO**

Bi-retning Evolutionary Structural Optimization (BESO) er en numerisk metode for strukturell optimalisering som er integrert med endelig elementanalyse (FEA). Denne metoden skiller seg fra den tradisjonelle ESO-metoden ved å starte med en minimal mengde materiale i strukturen, kun det som er nødvendig for å støtte belastninger og støttetilfeller. Deretter tillater BESO-metoden at strukturen vokser og utvikler seg mot den optimale designen ved å legge til elementer der det er høyest belastning og fjerne elementer der belastningen er lavest.



## 6 Anvendelser av topologioptimalisering i konstruksjonsteknikk

Innenfor byggebransjen kan topologi brukes på ulike måter, blant annet til å optimalisere designet av bygninger og infrastruktur. I det følgende avsnittet vil vi se på eksempler der topologioptimalisering som har blitt brukt i byggebransjen, for å forbedre bygningers konstruksjons- og designelementer.

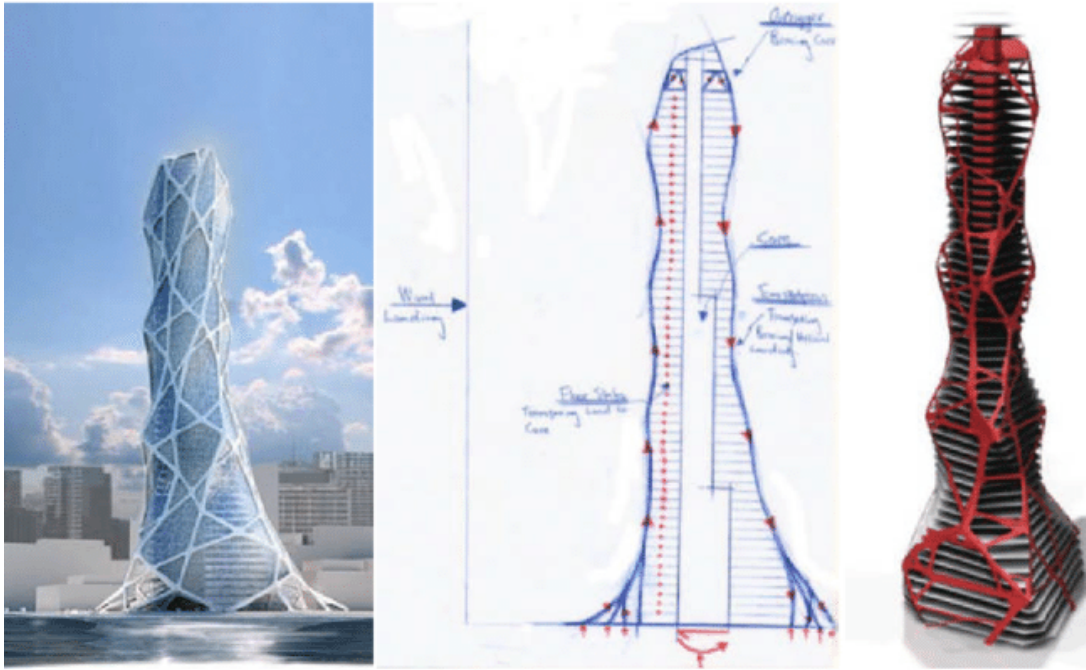
### 6.1 Topologi optimalisering i høybygg strukturell design

Stabilitetssystemet er avgjørende for bygningsstrukturer på grunn av påvirkningen fra eksterne faktorer som vind og jordskjelv, i tillegg til de uunngåelige ufullkommenhetene i selve bygningen. Disse effektene er spesielt viktige i design av høye bygninger, og kravet til sideveis stabilitet kan styre utformingen av hele bygningen.

Bionic Tower er et arkitektonisk forslag til et høyhustårn i Abu Dhabi, som var ment å demonstrere bruken av topologioptimaliseringsteknikken i den tidlige fasen av strukturelt konseptdesign. Prosjektet hadde en "fri form" arkitektonisk hensikt, altså et designkonsept som ikke er begrenset av tradisjonelle geometriske former eller mønstre, og ble valgt for å vise hvordan topologioptimalisering kunne brukes til å designe en geometrisk kompleks høyhusstruktur. For å styrke Bionic Tower ble det valgt en utkragingsstruktur der den strukturelle kjernen blir stabilisert av elementer langs bygningens omkrets.

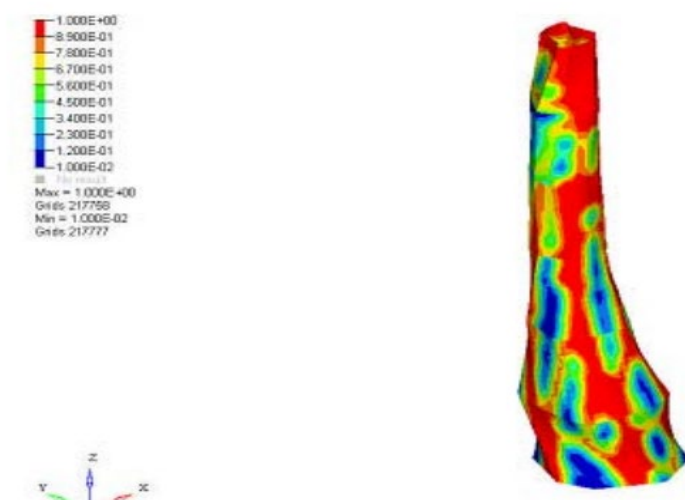
Tårnets stabilitet og styrke ble testet ved å påføre en sidelast. Deretter ble topologioptimaliseringsteknikken brukt til å utføre studier på hele ytterflaten og på fagverkene som kobler kjernen til omkretsen. Formålet med studiene var å optimalisere bygningens form og plassering av materialet, for å oppnå maksimal styrke og stivhet med minst mulig materialbruk.

Optimalisering av designet avhenger helt av hvordan problemet er definert, og strukturen som oppstår fra topologioptimaliseringen vil være avhengig av dette. For å oppnå optimale resultater, ble definisjonen av designrommet, målfunksjoner og begrensninger nøye utarbeidet. Basert på dette ble det gitt anbefalinger for hvordan man kan produsere en detaljert topologioptimalisert struktur.



Figur 6-1 bilde illustrerer den arkitektoniske ambisjonen til Bionic Tower, Forsterket utkragsstruktur konseptet for Bionic Tower der også vises resultatene av en topologi optimaliseringsstudie som vurderer til å bruke på utseendet av Bionic Tower.

En forsterket utstikkstruktur er gjennomført for å hindre rotasjon og bøyning av kjernen ved å overføre kreftene til omkretskolonnene. For å finne den optimale løsningen, ble det satt en begrensning på hvor mye toppen av kjernen kunne bøye seg. Dette bidro til å minimere bruken av materiale på den ytre overflaten..



Figur 6-2 : Elementtetthetsplott av optimaliseringsresultatene for minimering av strukturen

Elementtetthetsplottet viser tettheten til de endelige elementene i den optimale løsningen. Et blått element har lav tetthet (som representerer et hulrom, ingen material), mens et rødt element har høy tetthet (som representerer et fast stoff). Deretter kan man analysere resultatet for å finne den beste optimale løsningen for å begrense størrelsen av stresset på elementet.

Bionic Tower-prosjektet ble ikke fullført, men den illustrerte hvordan topologioptimalisering kan brukes til å forbedre designet av komplekse strukturer. (23)

## 6.2 The Gherkin

Bruken av regelmessige mønstre som gjentar seg på en roterende måte, kan være en effektiv strategi for å bringe mer variasjon og estetikk i bygningsdesign, spesielt for strukturer som har aksesymmetrisk geometri. Et kjent eksempel på en bygning som benytter denne designmetoden, er "The Gherkin" i London, designet av Norman Foster, som illustrert i figur (6-3). Dette bygget er kjent for å ha benyttet topologioptimalisering, en metode for designoptimalisering, både på bygningens innside og utside. Ved å bruke topologioptimalisering kunne ingeniørene finne den mest effektive strukturen som kunne motstå vindkrefter og belastninger, samtidig som de reduserte bruken av materialer. Dette var spesielt viktig fordi bygningen har en unik form og er plassert i et område med høye vindbelastninger.



*Figur 6-3 bilde av the Gherkin som viser utsende til bygging som har benyttet topologi optimalisering.*

På utsiden av bygningen var topologioptimalisering avgjørende i utformingen av de karakteristiske diagonale fagverk som går langs bygningens ytre fasade. Disse ribbene er ikke bare et estetisk trekk ved bygningen, men de ble også designet med tanke på funksjonalitet og styrke. Topologioptimalisering ble brukt for å finne den mest effektive formen og materialfordelingen for ribbene, slik at de kunne tåle vindkrefter og redusere vekten og materialbruken samtidig. På samme måte ble topologioptimalisering brukt i utformingen av bjelkene og søylene som utgjør bygningens indre struktur. Ved å bruke denne teknikken kunne arkitektene og ingeniørene finne den mest effektive formen og materialfordelingen for disse strukturene, slik at de kunne opprettholde styrken og stabiliteten til bygningen.

### 6.3 Topologi optimaliser bruk i andre bygg områder

Qatar National Convention Centre, som var ferdigstilt i 2011, ble designet av Arata Isozaki. Topologioptimalisering ble benyttet for utforming av tak, som er støttet av tre kraftige søyler. Bygningen har et design som etterligner et forgrenet tre, slik det er vist på figur (6-4).



*Figur 6-4 Qatar National Convention Centre utsende*

Designet av strukturen var en stor utfordring, da hver komponent måtte overholde optimale måter å overføre belastninger på samtidig som de oppfylte bygningens funksjonelle krav. Ingeniører brukte topologi optimalisering for å oppnå både en sterk og stabil struktur, og en visuelt imponerende form. Resultatet var en kompleks struktur som demonstrerte vellykket bruk av avansert design-teknologi i arkitekturen. (24)

## 6.4 Akutagawa Riverside Office Building

Akutagawa River Side Office Building er en fire-etasjes kontorbygning som ble ferdigstilt i 2004. Dette bygget var et av de første eksemplene på at ESO (Evolutionary Structural Optimization) ble brukt i praksis for å optimalisere strukturen. ESO-metoden ble brukt til å bestemme formen på to av bygningens yttervegger som var vendt mot vest og sør. Disse veggene ble optimalisert ved hjelp av ESO og bygget med armert betong. Dette ble gjort ved å ta hensyn til nytt- og egenlast, samt dynamisk jordskjelvlaster.

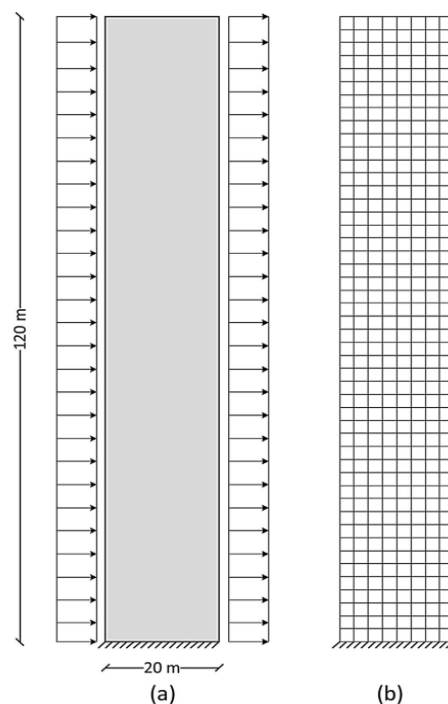


*Figur 6-5 prosessen for topologioptimalisering som ble brukt i utformingen av veggene til Akutagawa River Side Office Building*

analyse som tok hensyn til laster og krav fra byggeforskrifter. Deretter ble en topologioptimalisering utført ved hjelp av matematiske algoritmer, som gradvis fjernet unødvendig materiale fra strukturen og etterlot bare det best mulige materialet i henhold til lastene som ble påført bygningen. I Akutagawa River Side Office Building-prosjektet resulterte topologioptimalisering i en effektiv og bærekraftig struktur med redusert materialforbruk og høy stivhet. Dette eksempelet viser hvordan topologioptimalisering kan brukes til å utvikle innovative og effektive strukturer. ESO har vist seg å være et effektivt verktøy for å redusere materialforbruket i bygninger, samtidig som man tar hensyn til alle relevante laster og krav til byggt teknisk standard. Bruken av ESO i Akutagawa River Side Office Building-prosjektet var et viktig skritt i utviklingen av denne teknologien og dens potensielle anvendelser innen konstruksjon. (24)

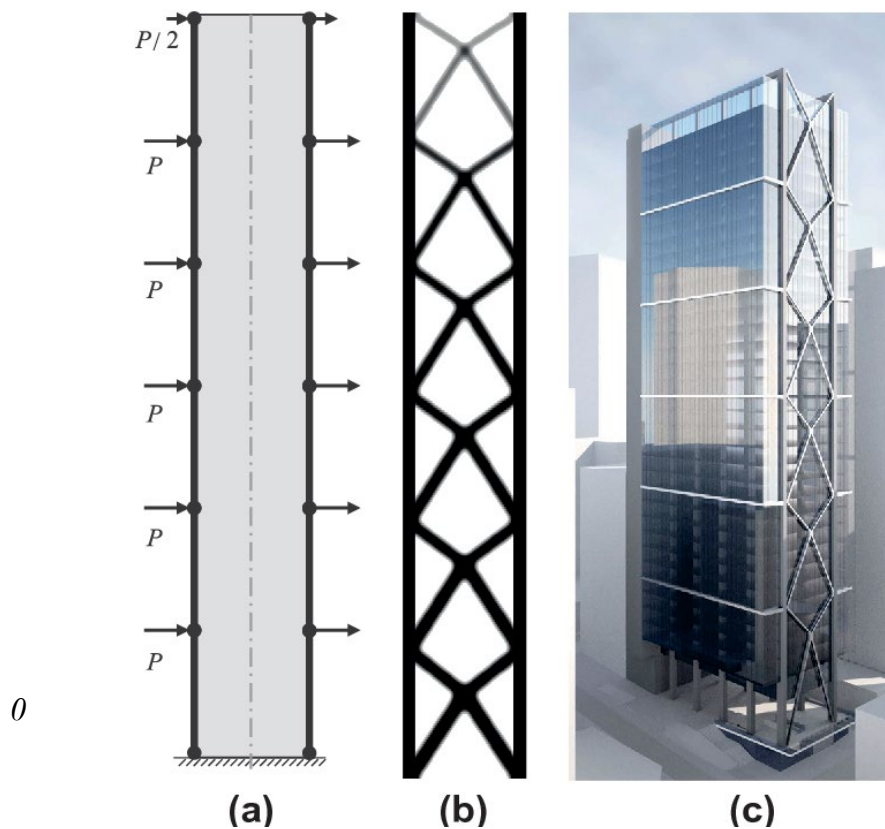
## 6.5 Optimalisering av fasade

I denne delen blir det presentert eksempler på optimaliserte layouts for konstruksjonssystemer ved bruk av topologi-optimalisering. For å gjøre dette brukes en spesiell type konstruksjon, kalt en MRF (Masonry Reinforced Frame). Denne brukes som et eksempel og FE-mesh-diskretiseringen som også er avbildet, vises i figur (6-6). Det blir laget forskjellige alternativer for design ved hjelp av topologioptimalisering. Grensebetingelsene og belastningene blir også undersøkt i tre forskjellige tilfeller. For å oppnå dette bruker man topologioptimalisering for å skape flere designalternativer. Diskretiseringen består av 80 elementer i horisontal retning og 480 elementer i vertikal retning. Dette gir 38.400 kvadratiske arealelementer. Grensebetingelsene som brukes, er en fast støtte på bunnen av strukturen.



Figur 6-6 Design av MRF for en høyhusbygning: (a) domene og (b) mesh-diskretisering

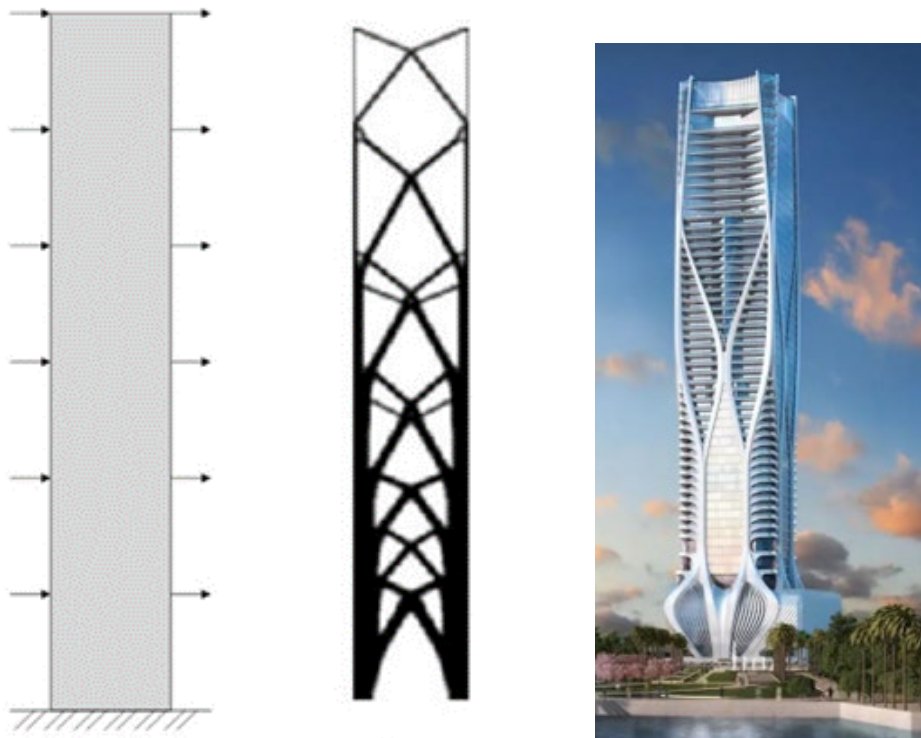




Figur 6-7 MRF-design av en høyhusbygning: (a) Konsentrert nodale krefter - Symmetrisk struktur (b) resultater av topologi-optimalisering, (c) visualiseringer av designet

For illustrasjonen presentert i figur (6-7), er denne bygget på den eksisterende bygningsmassen og påfører belastninger på sidene. Resultatene viser en optimal struktur med kryssavstivning. Denne visualiseringen presenterer imidlertid en alternativ vinkel enn den tradisjonelle tilnærmingen, der et enkelt fagverk vanligvis brukes. I dette tilfellet er sentrum av fagverk plassert omtrent tre fjerdedeler opp fra gulvhøyden. Disse resultatene ble tatt i bruk av et strukturelt ingeniørfirma som benyttet dem til å utforme en bygning i Chicago. Som vist under, er dette bracing-designet, der sentrum av fagverk er plassert omtrent 3/4 opp, implementert på siden av bygningen.

En annen illustrasjon som vises i figuren er designprosessen for et bygnings skall som er utsatt for belastninger fra venstre retning der resultatet blir en optimal struktur med kryssavstivning i uvanlige vinkler, noe som gir forbedret effektivitet og stabilitet. Et ekte eksempel på bruk av denne teknikken er et tusen Museum bygningen i Miami, der kurvede former og et innovativt bracing-design vitner om bruken av en slik optimaliseringsprosess.



*Figur 6-8 MRF-design til et tusen Museum bygningen,*



## 6.6 Arkitektur og topologi optimalisering

Arkitekten kan bruke topologioptimalisering som inspirasjon til å skape unike design. TO er en metode for å bestemme den mest effektive bruken av materialer i en konstruksjon under visse grenseforhold som styrke, stivhet og volum. Teknikken kan brukes til å lage komplekse og organiske former som kan inspirere arkitekter i designprosessen.



*Figur 6-9 MX3D Bridge en hel bru i stål i Amsterdam*

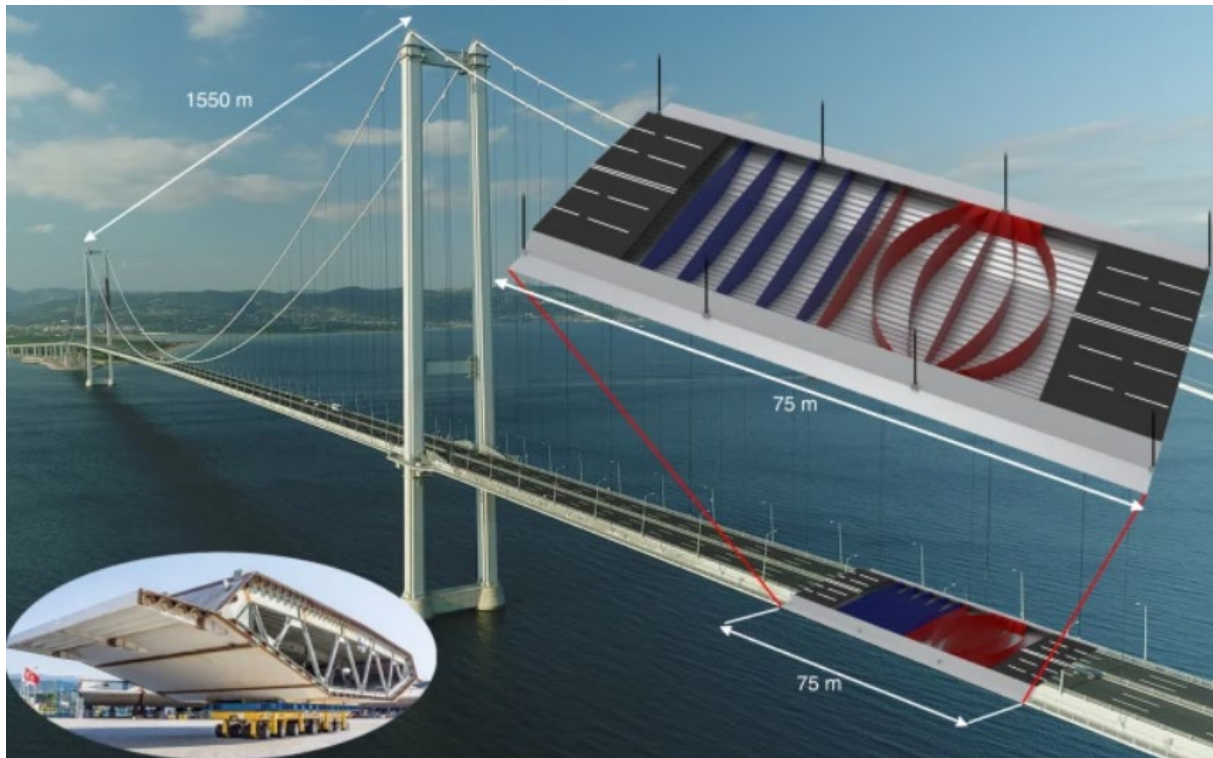
Denne broen i Amsterdam, kjent som MX3D Bridge, er et fascinerende eksempel på anvendelsen av 3D-printing. Ved å bruke roboter som bygger opp broens struktur direkte i kanalen, som viser den nye muligheter for konstruksjonsmetoder. I tillegg er broen et interessant forsøk på å bruke topologisk optimalisering som inspirasjon, noe som gir den et unikt og kreativt design.

Arkitekter kan bruke TO i planleggingsfasen for å formidle ulike designmuligheter. Dette spesielt nyttig når man håndterer komplekse strukturelle problemer, ettersom TO kan tilby løsninger selv om de er uvanlige eller kontraintuitive, er ekstremt effektive. {bygg, 11. apr. 2018 #46}

## 6.7 Optimalisering av brukonstruksjoner for lange spenn

Optimeringsstudiene basert på Osman Gazi-broen i Tyrkia, har en lengde på 2682 meter (Fig. 19). Ved åpningen i juli 2016, var broen utstyrt med verdens fjerde lengste hovedspenn på 1550 meter, og ble designet av COWI. Broens ortotropiske lukkede stålboksdrager er topp moderne. Det er derfor et passende grunnlag for å finne og utvikle nye brodesign. Siden en brobjelke er

en gjentakende struktur, representerer en enkelt seksjon, definert av spennet mellom to tilstøtende sett med hengere (25 m), hele strukturen. Dermed modelleres tre seksjoner (75 m × 30,1 m × 4,75 m) av brobjelke for å legge til kantkrav og helhetlige belastninger. En 3D-modell med endelige elementer er opprettet som designområde.



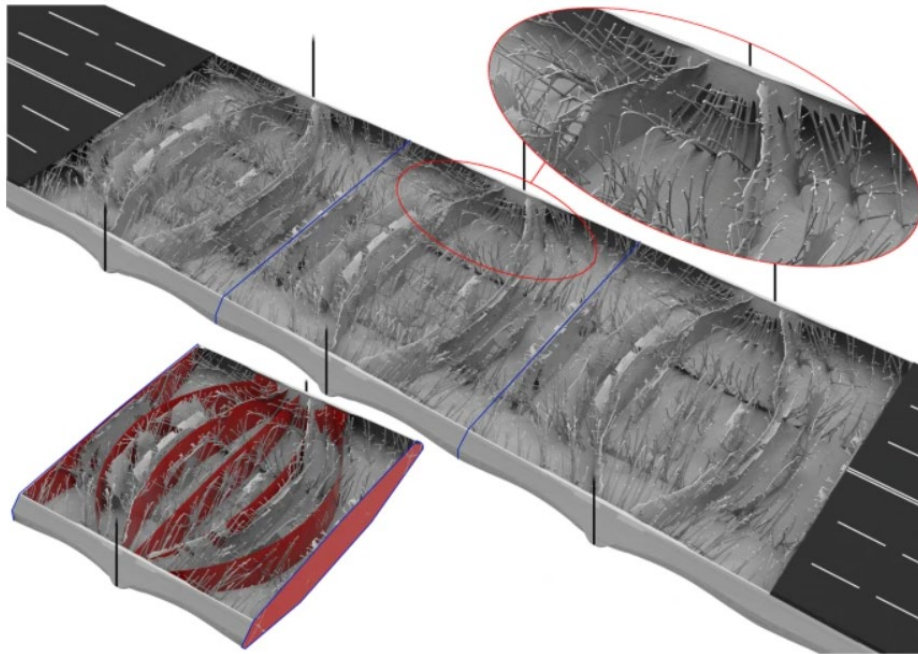
Figur 6-10 Osman Gazi-broen med en konvensjonell og tolket bjelkedesign.

Muligheten for å endre den strukturelle utformingen ble undersøkt med håp om å oppnå betydelige besparelser. Dette ble gjennomført ved bruk av topologioptimalisering, dette innebærer å fjerne alle eksisterende elementer fra bærebjelken for å gi full frihet til å velge en ny design. Det innvendige volumet av bjelken blir da delt opp i en struktur bestående av svært små voxler (3D-pikslar), lik små terninger. Topologioptimalisering blir deretter brukt til å optimalisere hver enkelt voxel og bestemme om de skal bestå av luft eller stål.

Resultatet er et brobjelkedesign som bruker minst mulig stål, uten å miste den strukturelle styrken. Spesifikt ble et broelement på 30 x 5 x 75 meter analysert og inndelt i to milliarder voxler på maksimalt et par centimeter hver. En superdatamaskin ble brukt til å utføre en svært omfattende beregning. Hvis en tradisjonell datamaskin hadde blitt brukt, ville det ha tatt 155 år for å utføre disse beregningene.

Resultatene fra databeregningene ble brukt til å avgjøre den mest effektive strukturelle utformingen av brodekket. Dette betyr blant annet at noen av de tidligere rette tverrsnittene ble

bøyd, noe som fjernet 28 prosent av materialet som tidligere ville ha blitt brukt i brodekkene (Fig. 20). På den måten oppnås en tilsvarende reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp skapt under produksjon og transport av betong og stål.



Figur 6-11 Resultatet av topologioptimaliseringen. Den nye utformingen av brobjelken gir vektbesparelser på over 28 prosent

Beregningene ble justert for å sikre en best mulig utforming av strukturen i brobjelkene som kan gjennomføres uten bruk av kostbare produksjonsmetoder. Dette kan resultere i en vekt- og CO<sub>2</sub>-reduksjon på opptil 20 prosent for hele broen. Både det tradisjonelle designet og det tolkede designet, modelleres med skall-elementer i den kommersielle finittelementprogramvaren Abaqus (av Simulia<sup>TM</sup>). Modellene inneholder ytterplater, gangbaneplater og tverrgående skilleveggspaneler. De har samme mengde materiale, og platetykkelsen for de forskjellige delene finnes i en ekstra tabell. Det tolkede designet viser seg å være 12,7 prosent stivere enn det tradisjonelle designet for de fem belastningstilfellene, noe som kan oversettes til en tilsvarende endring i volum eller vekt. (25)

## 6.8 Bruk av topologioptimalisering i betongkonstruksjoner

Betong er et av de mest brukte materialene i byggindustrien på grunn av dens allsidighet og gode strukturelle egenskaper. Men betongproduksjon fører til høye CO<sub>2</sub>-utslipp og har derfor en stor miljøpåvirkning. For å redusere disse utslippene, fokuseres det på to hovedstrategier;

materialoptimalisering og strukturoptimalisering. Materialoptimalisering omhandler å forbedre sammensetningen av betongen og bruke mer miljøvennlige materialer, som eksempelvis sement med lavere karbonavtrykk og alternative forsterkningsmaterialer som karbonfiber. Strukturoptimalisering innebærer å endre betongstrukturens indre og ytre design ved hjelp av topologioptimalisering.

Fordi topologioptimalisering brukes til å finne den mest effektive strukturen for en gitt belastning og begrensning, kan dette føre til betydelige reduksjoner i materialbruken og dermed redusere CO<sub>2</sub>-utslippene fra betongkonstruksjoner. Det finnes forskjellige tilnæringer for å iverksette topologioptimalisering i betongkonstruksjoner, for eksempel utforming av armering, og utforming betongelementer som dekker og fundamenter.

### **6.8.1 Utforming av armering**

Topologioptimalisering har vist seg å være en effektiv metode for å utforme armeringskonfigurasjoner i betongkonstruksjoner. Forskningen har vist at optimalisert armeringsutforming kan føre til mer effektive og sterke strukturer, med bedre lastfordeling og forbedret bæreevne. Topologioptimalisering hjelper med å finne den beste måten å fordele armering i betongelementer, for å gjøre dem sterke og holdbare. Ved å bruke datamaskiner til å regne ut den beste formen og plasseringen av armeringen, kan vi lage betongkonstruksjoner som er mer effektive og økonomiske. Denne metoden gjør det mulig for ingeniører å lage forbedrede betongstrukturer som er stive og tåler tyngre belastninger. Topologioptimalisering kan endre måten vi designer armeringsbetong og bidra til bedre bygg og infrastrukturer.

I James K. Guest's(26) artikkelen sammenlignes tradisjonell fordeling av armering med TO-basert (topologioptimalisering) fordeling av armering i forskjellige betongelementer. Artikkelen viser at topologioptimaliserte betongkonstruksjoner kan oppnå bedre ytelse når det gjelder styrke og stivhet sammenlignet med tradisjonelle konstruksjoner. Ved å bruke TO-teknikker for å bestemme den ideelle armeringsfordelingen, blir betongelementene mer effektive og økonomiske i forhold til materialbruk og ressursforbruk. Basert på dette ble det utviklet flere verktøy som benyttes til å designe armerende elementer, basert på TO . Et eksempel på et programverktøy er IDEA StatiCa, som benyttes sammen med en bestemt volumreduksjonsfaktor. Dette verktøyet brukes for å visualisere fordelingen av trykk og strekk i elementene og bistår i prosessen med å finne den optimale løsningen. Ved å bruke samme programverktøy kan man kombinere optimaliseringsprosessen med flere materialegenskaper.

Dette gjør det mulig å studere hvordan plasseringen av armering påvirker betongelementene. Ved å bruke verktøyet kan man enkelt analysere og vurdere ulike scenarier og parametere for å oppnå best mulig ytelse og styrke i betongkonstruksjonene. Dette kan forenkle designprosessen og føre til mer effektive og bærekraftige konstruksjoner. (27)

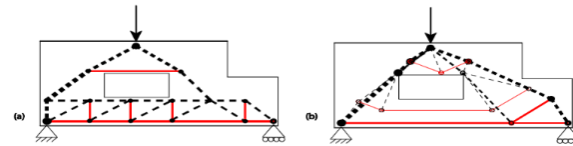


Figure 3. Compare (a) traditional truss model to (b) a minimum compliance truss model for a deep beam with a hole.

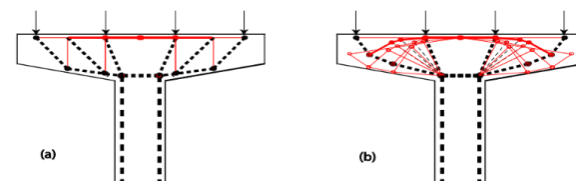
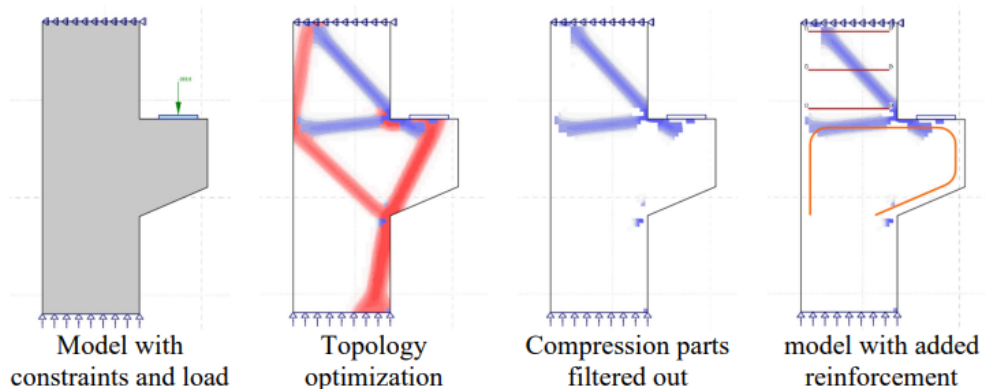


Figure 4. Compare (a) traditional truss model to (b) a minimum compliance truss model for a hammerhead pier supporting four girder lines.

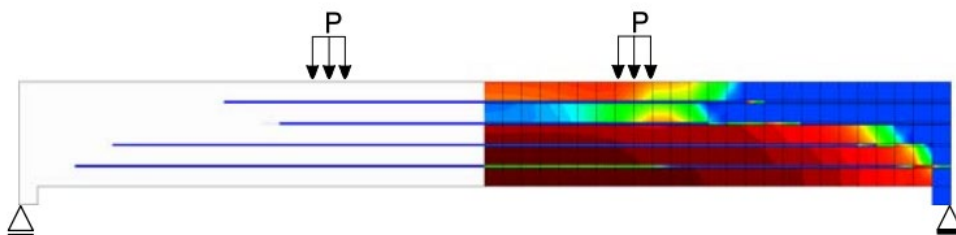
Figur 6-12 utforme armerings konfigurasjoner i betongkonstruksjoner



Figur 6-13 TO analyse ved IDEA StatiCa

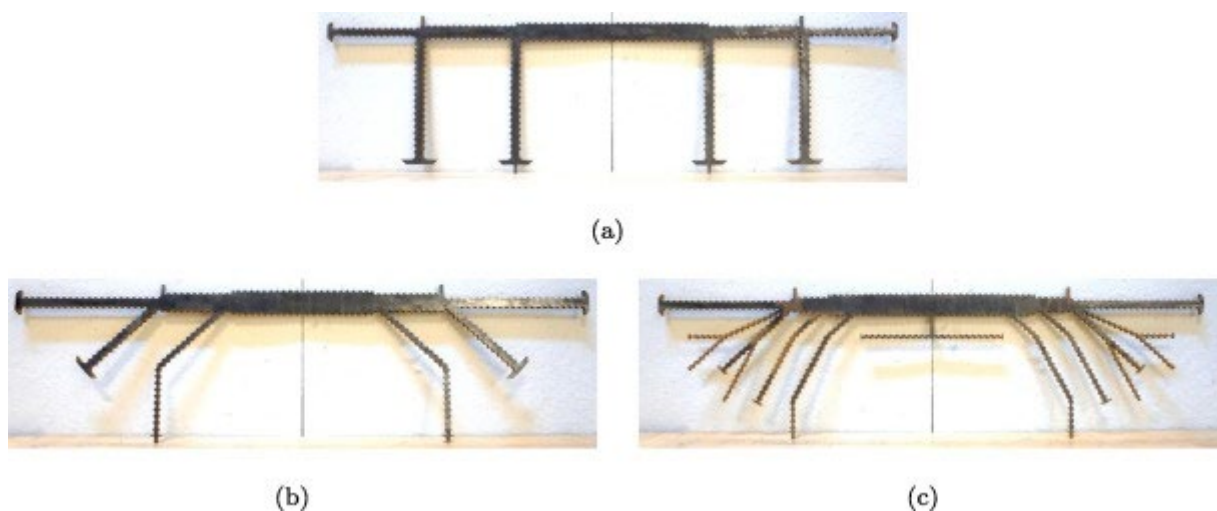
Et eksempel er presentert av Kato (2008) (30), som utvikler en ny formulering av SIMP-metoden (Solid Isotropic Material with Penalization) for å optimalisere fiberforsterkningen i betongdekke. Denne metoden benytter seg av ulike materialegenskaper for å adressere forholdet mellom duktilitet og den optimale løsningen for å integrere glassfiberforsterkning i betongdekket. Gjennom denne tilnærmingen kan man oppnå en bedre forståelse av de ulike egenskapene. Denne forskningen bidrar til et solid fundament for videre studier innen materialvitenskap og konstruksjonsteknikk. Dette gir lovende resultater og har stor mulighet for bedre kvaliteten og holdbarheten av betongdekke vi bruker i dag.





Figur 6-14 fiberforsterkningen i betongdekke

Arbeidet til Jewett og Carstensen (2019) presenterer en eksperimentell studie av betongarmerte bjelker designet med strut-and-tie-modeller (STM) ved hjelp av en standard prosedyre og STM med ikke-lineær og topologioptimaliserings fagverk (tross). Studiet inneholder design av tre betongarmerte-bjelker med samme last- og knutepunkter. Den første bjelken ble designet ved bruk av en standard STM, den andre bjelken ble designet med en STM-layout som ble optimalisert ved bruk av TO med en høyere pålitelighetsfaktor, noe som resulterte i utforsking av færre antall stenger. På den annen side ble den tredje bjelken designet med en STM-layout optimalisert ved bruk av TO med en lavere pålitelighetsfaktor, som utforsket et større antall stenger. Studien fant at de optimaliserte STM-ene hadde en betydelig innvirkning på ytelsen til armertbetong og forbedret den strukturelle stivheten. Studien fant også at ytelsesforbedringen ble oppnådd med tredje som hadde større antall stenger.

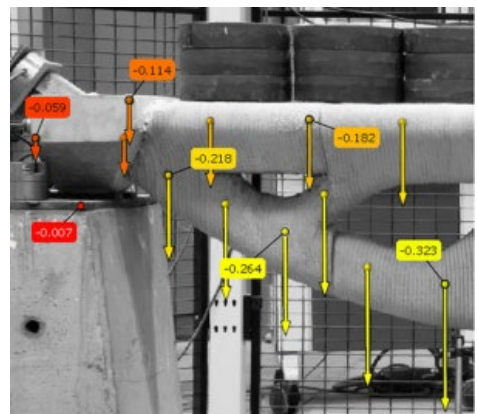


Figur 6-15 betongarmerte bjelker designet med strut-and-tie-modeller

## 6.8.2 Utforming av betongelementer som dekker og fundamenter

Forskningen har vist at TO kan brukes til å utforme betongelementer som dekker fundamenter på en mer effektiv måte. Dette inkluderer blant annet utvikling av optimaliserte konstruksjoner med redusert materialbruk og forbedret styrke under belastning.

Vantyghe (2020) presenterte en digital utviklet produksjonsprosess som kombinerer topologioptimalisering, 3D-betongprinting og etterspent armering. Ved å kombinere teknikker som topologioptimalisering og 3D-printing, kan man redusere materialforbruket. Studien demonstrerer gjennom en modell at det er mulig å produsere en bærekraftig betongbjelke ved å dele designet opp i deler som kan printes og settes sammen med etterspent armering, tross utfordringer knyttet til 3D-betongprinting og begrensninger i materialene. Resultatene viser at bruken av etterspent armering reduserer utfordringene knyttet til innføring av stålarmatur i 3D-printet betong. Basert på design til bjelken kunne man oppnå reduksjon i materialforbruk på rundt 20%. Imidlertid gir ikke studien noen økonomiske fordeler. Mulige fordeler inkluderer reduksjon i betongforbruk og mulighet for auto-robotproduksjon. Forskningen avslørte avvik mellom numeriske modeller og målte deformasjoner når det gjaldt å bestemme materialegenskapene for strukturer. Det er behov for videre forskning når det kommer til forbedring av byggbarheten av printable byggematerialer og utvikling av virtuelle simuleringsmodeller for 3D-betongprinting. Hvis utfordringene kan overvinnes, vil det være et stort potensial i å bruke denne designmetodologien for produksjon av store betongbroer med post-spenn(28).



Figur 6-16 betongelementer som dekker og

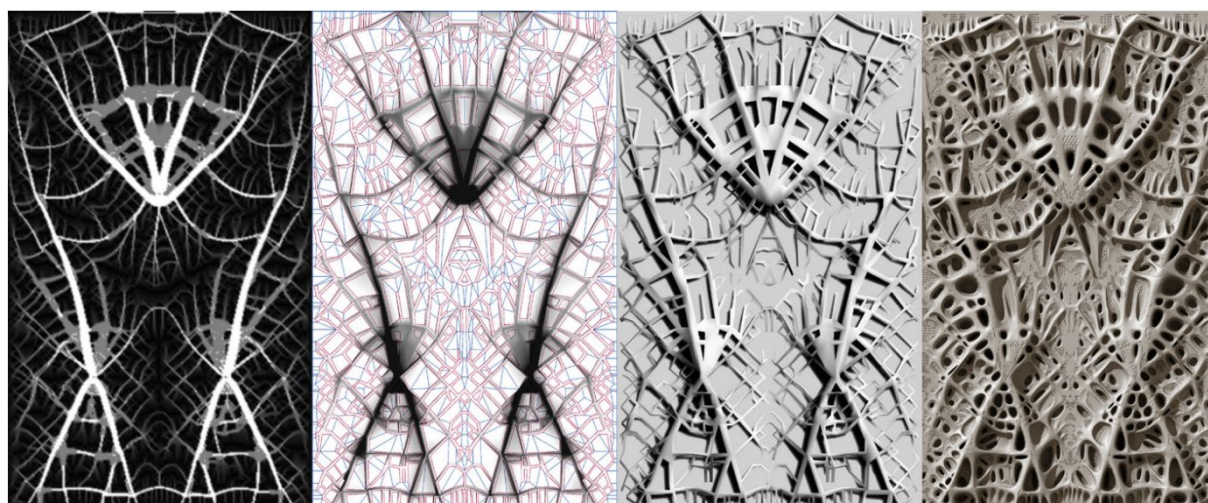


Figur 6-17 betongelementer som dekker og fundamenter

Et annet eksempel er studien av Jipa, Andrei (2016), som viste hvordan topologioptimalisering kan brukes til å redusere materialet og vekten av betongdekker. Forskerne utførte en topologioptimalisering av et spennarmert betongdekk og sammenlignet den optimaliserte utformingen med en tradisjonell utforming. Prøvemodell "A" ble utviklet gjennom en hybridprosess basert på topologioptimalisering. Hovedmålet med optimaliseringsprosessen var å redusere materialet til en mengde som tilsvarte 0,2 av den opprinnelige mengden, samtidig som deformasjoner av platen under en jevn fordelt last ble minimert. Dekke er spennet over tre knutepunkter. (29)



*Figur 6-18 bilder av deker mer RAW topologioptimalisert form*



*Figur 6-19 Data analyse av modellen*



En antent Prøvemodell "B" ble utviklet gjennom SIMP-topologioptimaliseringsalgoritmen til Simulia ABAQUS. Hovedmålet med optimaliseringsprosessen var å redusere materialet til en mengde som tilsvarer 0,18 av det opprinnelige volumet, Samtidig med minimalisering av spenningene i en jevnt fordelt last under en plate, ble knutepunktene plassert som fire enkle støttepunkter nær hjørnene. Dette resulterte i en unik og naturlig design av dekket. Metoden som ble benyttet involverte 3D-printing av en form og støping av fiberarmert betong. (29)



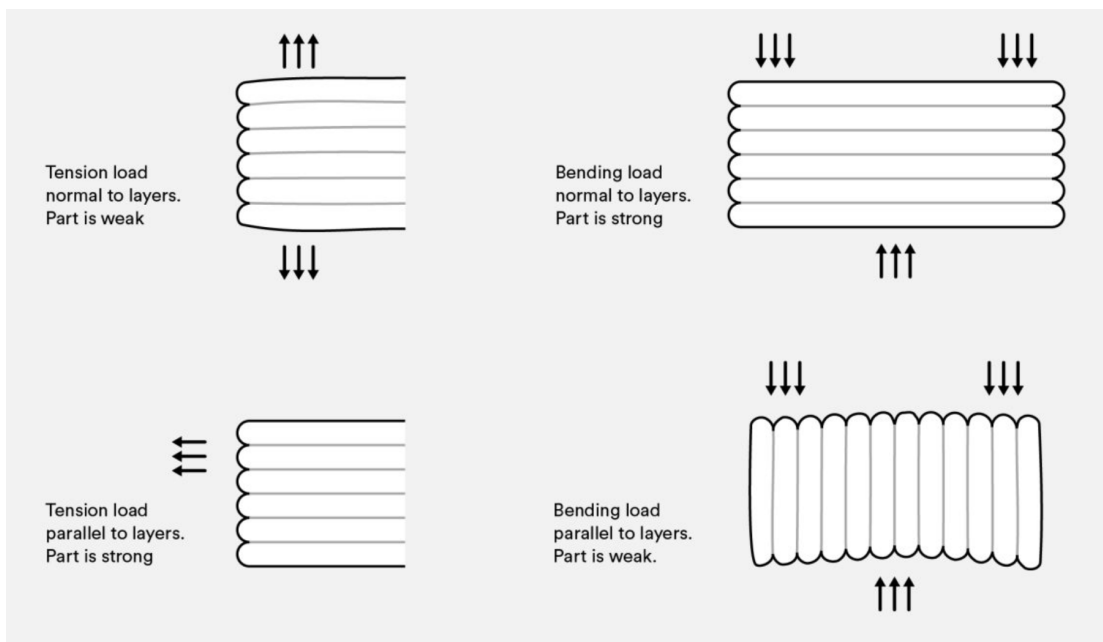
*Figur 6-20 SIMP-topologioptimaliseringsalgoritmen til Simulia ABAQUS av en dekke*

## 7 Additiv produksjon

"Additiv produksjon, også kjent som 3D-printing, er en teknologi som produserer tredimensjonale objekter ved å bygge dem opp lag for lag (30). Det som gjør 3D-printing særlig nyttig, er at komplekse geometrier kan produseres da de blir strukturert lag for lag. Det finnes mange forskjellige 3D-printteknologier, men i denne delen skal vi fokusere på Fused Deposition Modeling (FDM) og Selective Laser Sintering (SLS).

### 7.1 FDM

FDM er en av de mest brukte 3D-printteknikkene. Den fungerer ved at et filament smeltes og ekstruderes gjennom en dyse, lag for lag (31). Filament er en termoplastisk tråd som kommer i mange ulike materialer, deriblant PLA, ABS og TPU. Denne teknikken fører til at objektet blir anisotrop, likt trevirke. Strekk normalt på lagene utgjør et svakt punkt(32). Dette må tas i betraktning når man bestemmer orientering, som er godt illustrert i Figur (7-1), som viser hvordan man bør orientere modellen avhengig av lastens plassering.



Figur 7-1 last plassering og lag i FDM 3D-printing

#### 7.1.1 Slicing

Når man har en 3D-modell, trenger man et program, kjent som en slicer, for å bearbeide denne informasjonen. Slicer-programmet oversetter 3D-modellen til en serie instruksjoner

som 3D-printeren kan forstå, kjent som G-kode. Slicer-programvaren deler 3D-modellen i tynne lag og bestemmer samtidig hvordan hvert lag skal printes (33).

### **7.1.2 Overheng**

3D-printeren bygger opp objektet lag for lag, noe som innebærer at printeren må skrive på et fundament. Ellers vil printeren ende opp med å printe i tomrom. Generelt kan FDM-printere håndtere overheng på opptil 45 grader uten støttestrukturer (34). For overheng større enn 45 grader, må man vanligvis legge til støttestrukturer som fjernes etter at printen er ferdig.

Ulempen med støttestrukturer er at de kan være tidkrevende å fjerne og øker materialbruken. Avhengig av hvilken slicer man bruker, er støttestrukturer noe man selv kan velge. Slicere som PrusaSlicer og Ultimaker genererer støttestrukturer der det er nødvendig, men kan i noen tilfeller legge til støtte der det ikke er nødvendig. Derfor kan man også legge til støttestrukturer manuelt.

### **7.1.3 Utfyllingsmønster og tetthet**

Utfyllingsmønster og tetthet er parametere som spiller en stor rolle for objektets styrke.

Utfyllingsmønsteret bestemmer den indre strukturen, og det finnes mange ulike strukturer å velge mellom avhengig av hva man ønsker. Noen vanlige mønstre inkluderer grid, triangel, honeycomb, og flere. Forskjellige utfyllingsmønstre kan påvirke styrken, vekten og utskriftstiden til objektet.

Tetthet refererer til prosentandelen av det indre volumet som er fylt med materiale. En tetthet på 100% betyr at objektet er helt massivt. I PrusaSlicer kan man også øke antall perimetere til det gir en massiv struktur. I de aller fleste tilfeller printer man imidlertid ikke med 100 prosent tetthet, men heller rundt 20 prosent, kombinert med et utfyllingsmønster (35).

#### 7.1.4 SLS

SLS, eller Selective Laser Sintering, er en annen populær 3D-printteknikk. Den benytter en laser for å smelte sammen polymerpulver, lag for lag. Fordelen med SLS ligger i dens evne til å produsere objekter med høy detaljnøyaktighet, og det er ikke nødvendig med støttestrukturer som i FDM (7). En annen vesentlig forskjell er at deler printet med SLS er tilnærmet isotropt. I motsetning til deler printet med FDM, er SLS-deler alltid massive (36) .

## 8 Programvaretesting

I denne oppgaven har vi hovedsakelig benyttet oss av Abaqus. I startfasen utforsket vi flere programvarer for å oppnå en bedre forståelse av topologioptimalisering (TO). I denne delen gir vi en kortfattet fremstilling av våre erfaringer med testingen. Det er mange forskjellige programvarer for topologioptimalisering på markedet, vi har undersøkt 3 programvarer.

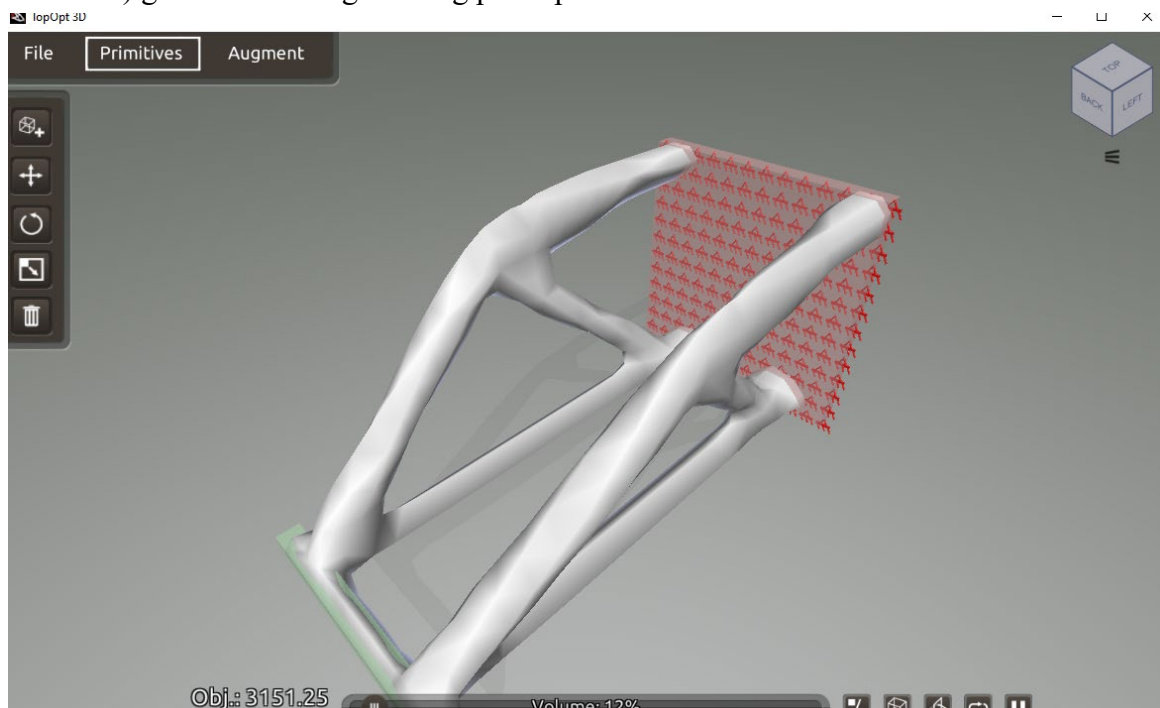
### 8.1 TopOpt 3D

Den første programvaren vi testet var TopOpt 3D. Denne programvaren er tilgjengelig på følgende plattformer

- iOS: Kan lastes ned i appstore
- Windows
- Mac OSX

(37)

TopOpt 3D tilbyr et brukervennlig og intuitivt grensesnitt, noe som gjør det enkelt for de som ønsker å lære seg programmet. Dette er et relativt enkelt program med begrensede funksjoner, og er ment som en introduksjon til de som ønsker å lære seg topologioptimalisering. Figur (8-1) viser brukergrensesnittet. Programmet starter med en utkraget bjelke som har blitt topologioptimalisert, med mål om å minimere den elastiske energien (det vil si maksimere stivheten) gitt en volumbegrensning på 12 prosent.



Figur 8-1 Simulator av topologioptimalisering fra TopOpt

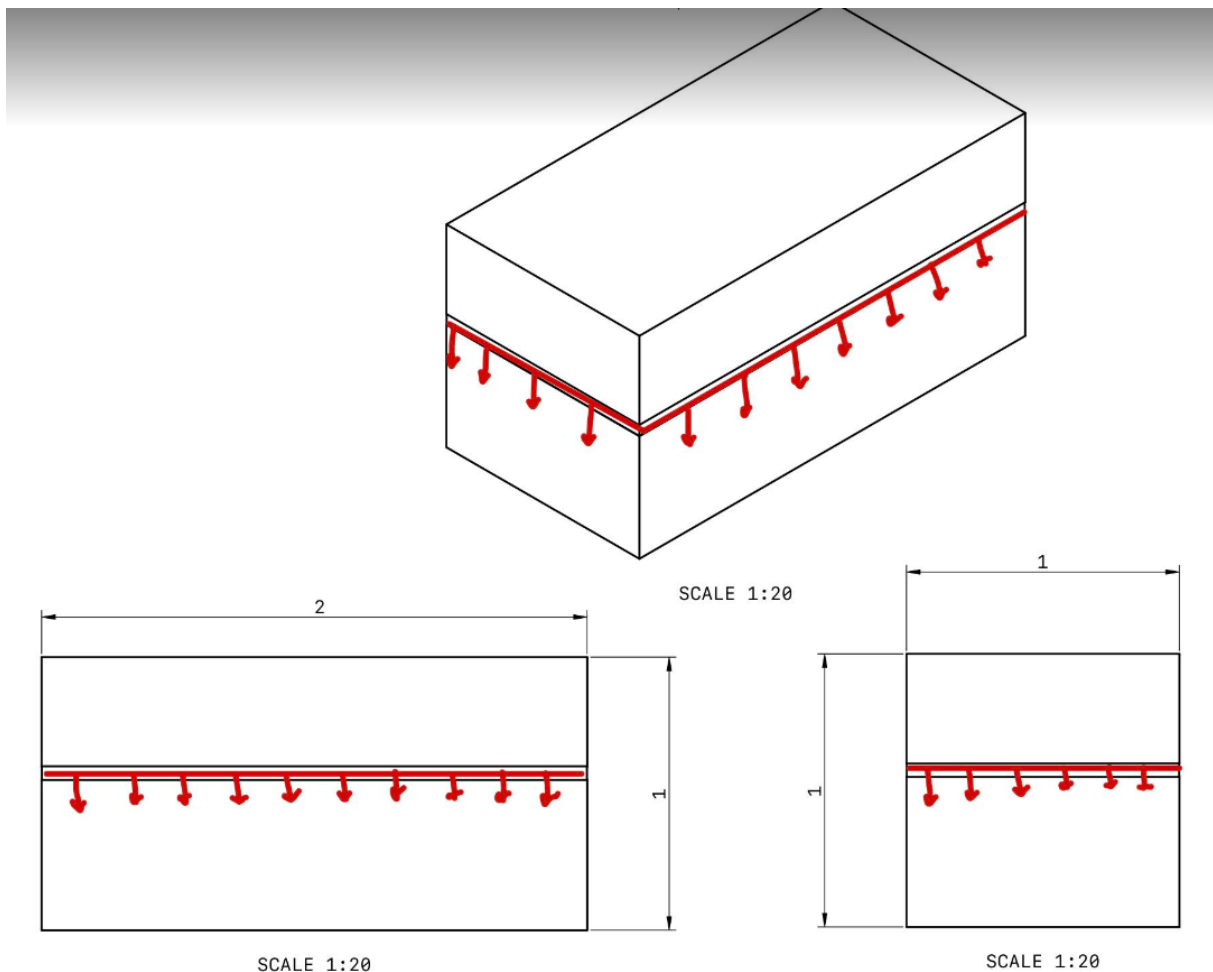
Det er mulig å endre på designdomenet. Standard er en rektangulær boks med dimensjoner 2x1x1, som illustrert i figur. Opplagsforholdene og lastens plassering kan lett justeres

### 8.1.1 Bru

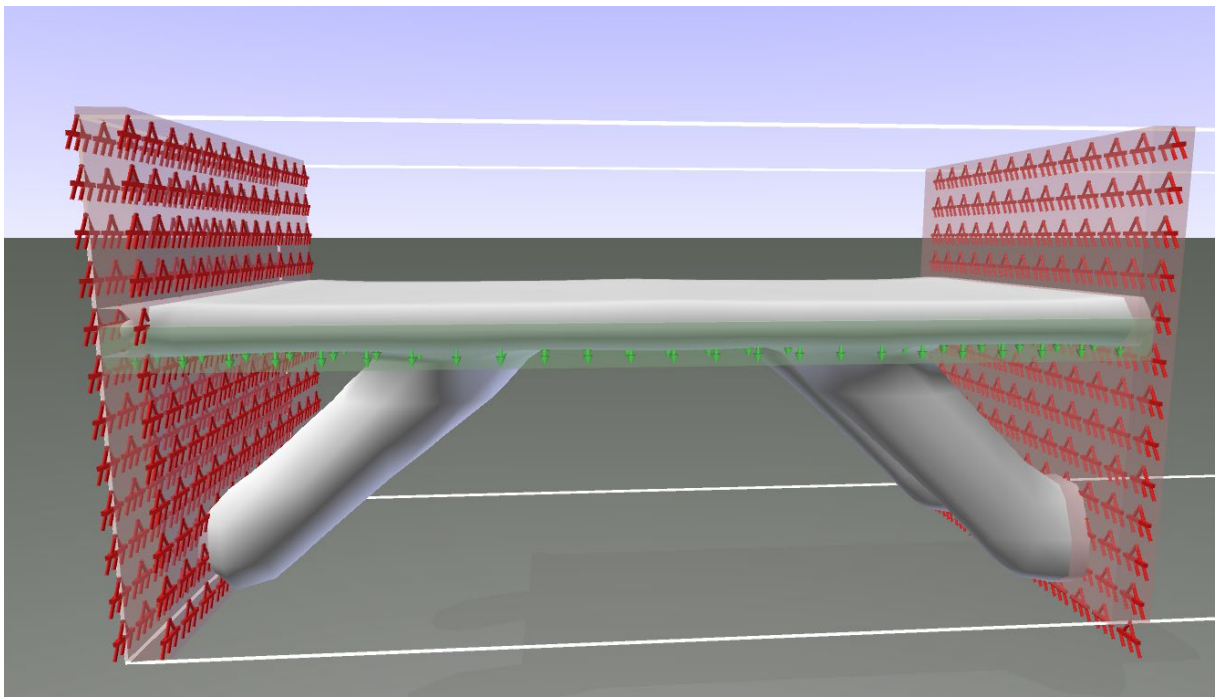
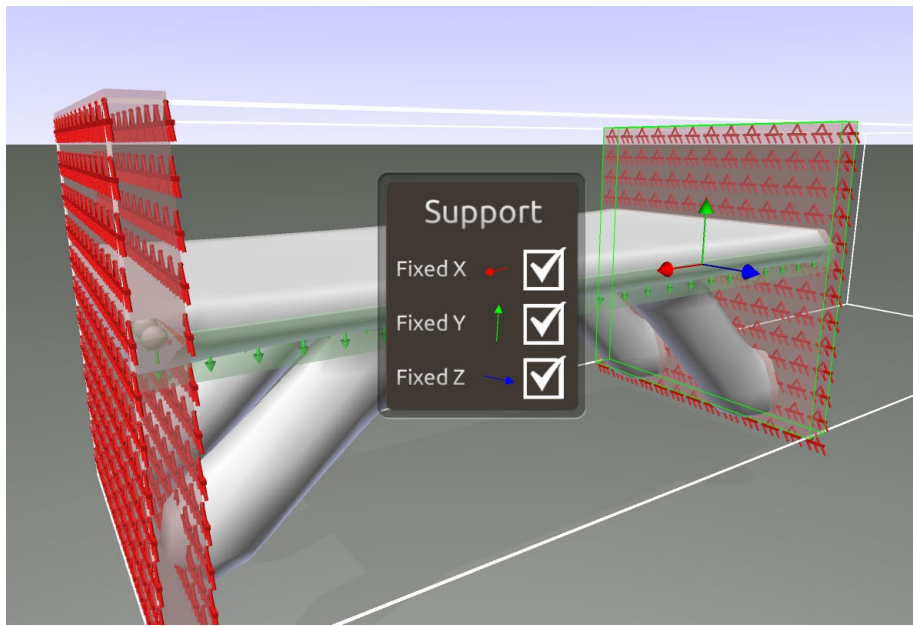
Vi har forsøkt å optimalisere en bru, hvor vi har et designdomene på 2x1x1. Vi påført bruene en flatelast, som er plassert i midten slik som figur (8-2) illustrerer. Bruene er fastholdt i x, y, z-retning på begge sider, som vist i figur (8-3). Med en volumbegrensning på 16 prosent får vi den optimaliserte geometrien som er illustrert i figur (8-4)."



Figur 8-2 installasjon in Bru



Figur 8-3 Design fase for bruene og fordeling av last

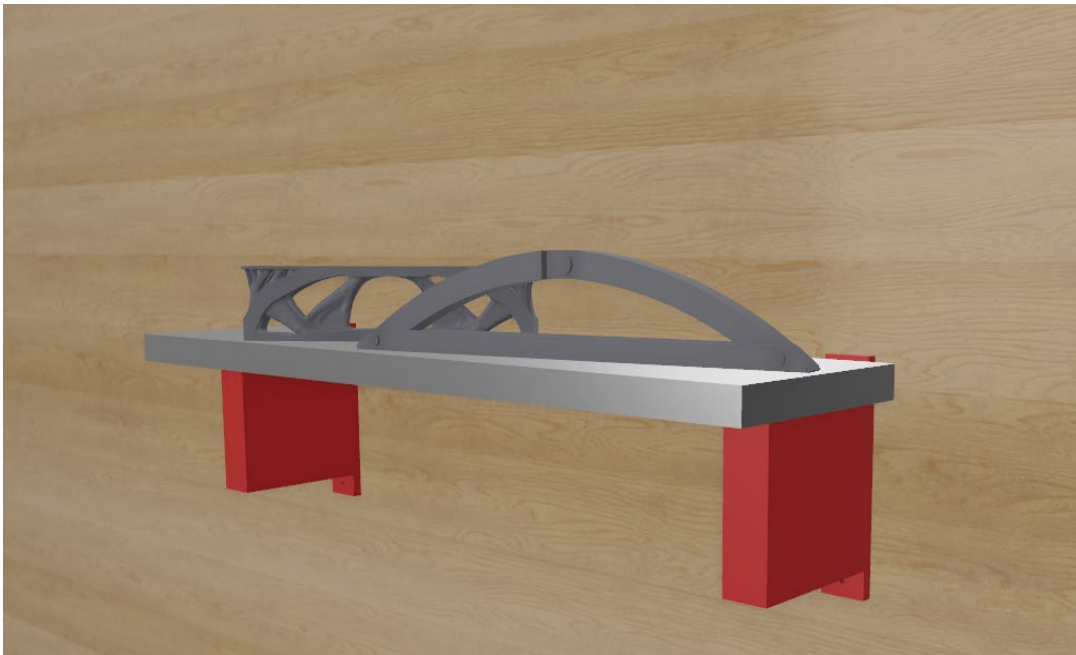


Figur 8-4 Resultat av bru fra TopOpt 3D

## 8.2 Ansys Discovery

Vi testet også Ansys Discovery 2022, en 3D-simuleringsprogramvare som tilbyr topologioptimalisering (38). I Ansys Discovery har vi gjort et forsøk på å optimalisere en hyllebrakett. Først lager vi geometrien som skal optimaliseres (designdomenet), og det er ofte fordelaktig å lage et stort designdomene. Et større designdomene gir mer "frihet" for programvaren til å finne den optimale løsningen, siden det er flere muligheter for hvordan materialet kan distribueres. Vi har brukt Shapr3D, et CAD-verktøy, for å lage modellen som skal optimaliseres. Figur (8-5) illustrerer hyllebraketten som skal optimaliseres.

I denne programvaren har vi gjort et forsøk på å optimalisere en hyllebrakett. Aller først, lager

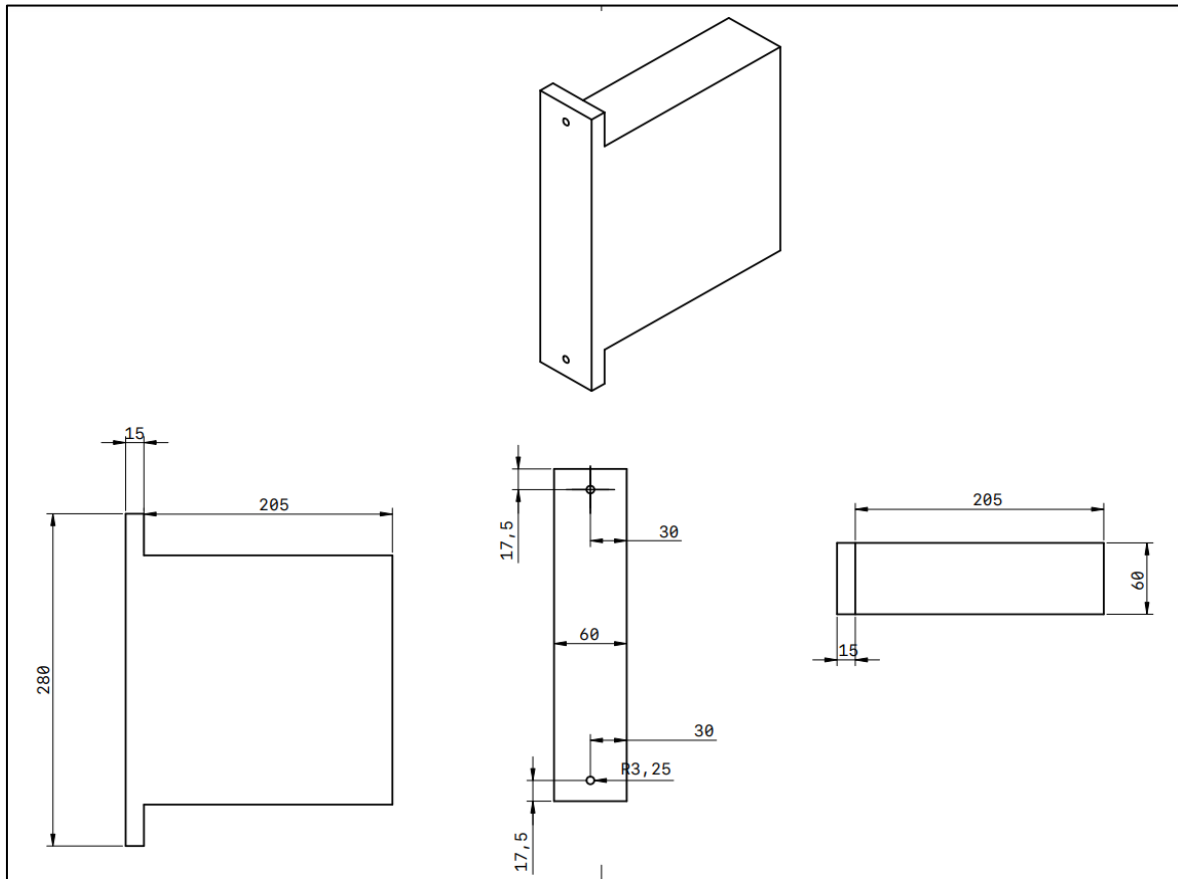


Figur 8-5 Hyllebrakett som skal optimaliseres

Proessen videre for å utføre topologioptimalisering er relativt rett frem i denne programvaren. Først importerte vi hyllebraketten i Ansys (se figur 8-6). Først importerte vi hyllebraketten i

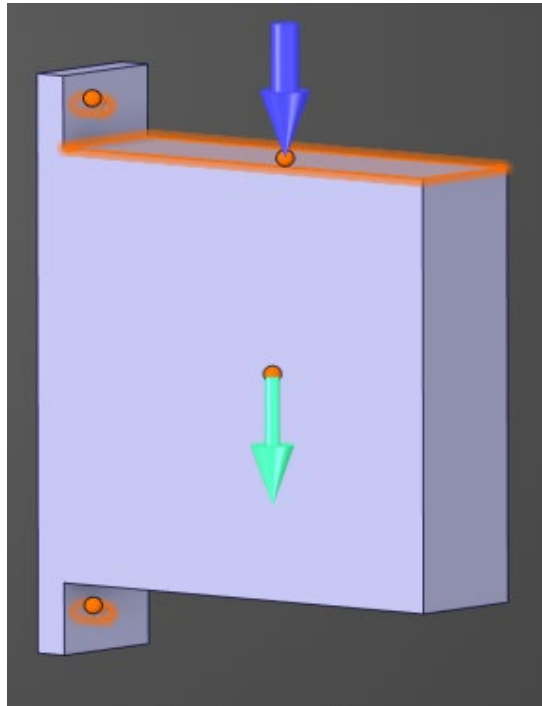


Ansys (se figur (8-6)). Det er også mulig å lage denne geometrien direkte i programvaren, men vi bruker et CAD-verktøy som vi er kjent med fra før.

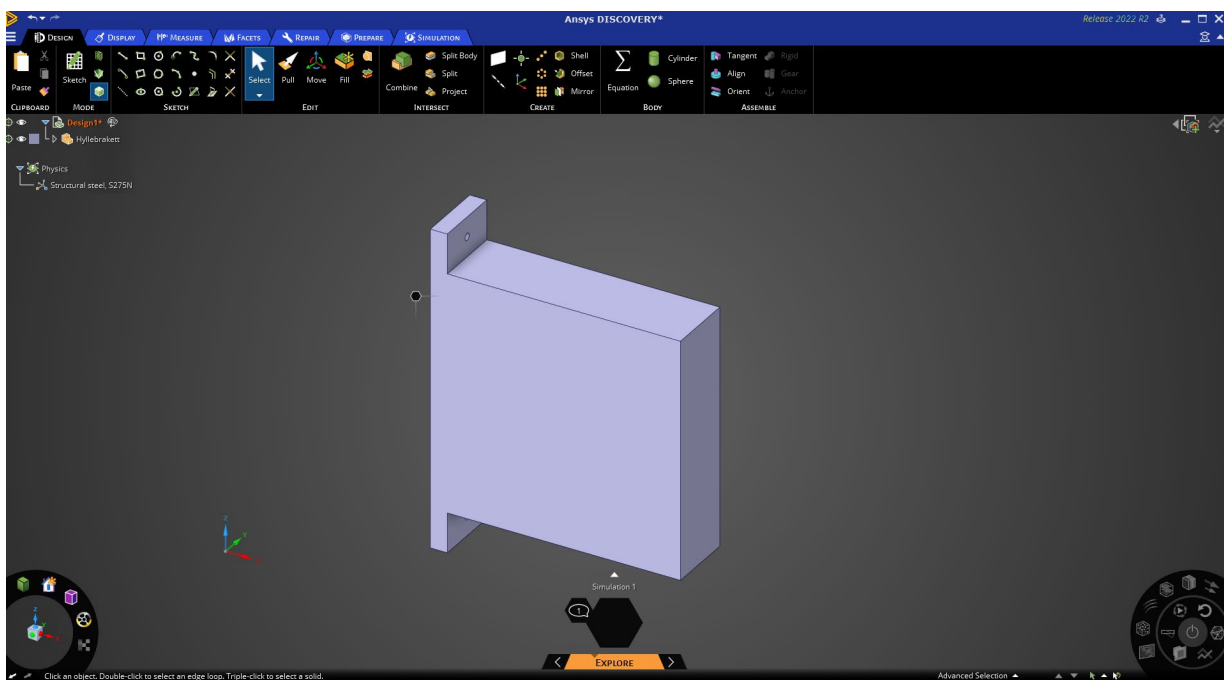


Figur 8-6 Plan tening Hyllebraketten i Ansys

Fra menyen, valgte vi «Simulation» for å legge inn all nødvendig informasjon. Første steg er å velge materialet, hvor vi i dette tilfellet valgte structural steel S275N. Deretter påførte vi en last på 5000N, fordelt over hele flaten, i tillegg til egenvekt, som illustrert i figur 4. I denne modellen har vi betraktet sylindringen i braketten som fixed. Dette er en forenkling, siden det i virkeligheten er overflaten som er i kontakt med bolthodet som bør være definert som fixed.

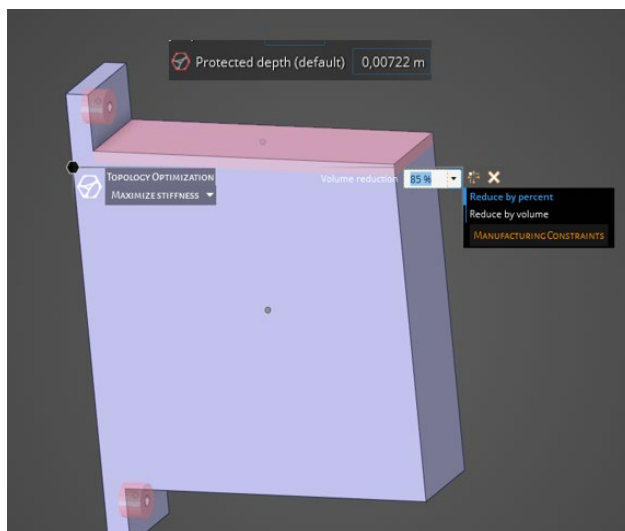


Figur 8-7 last posisjon hyllebraketten i Ansys

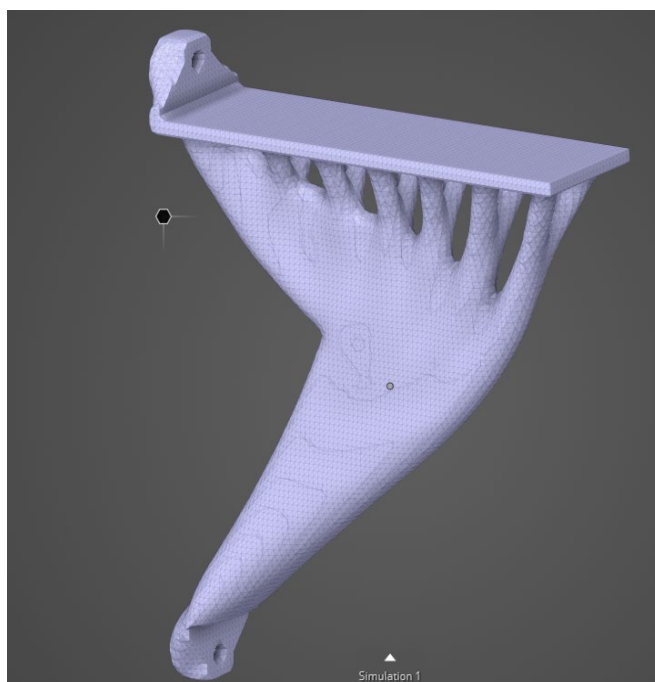


Figur 8-8 hyllebraketten i Ansys

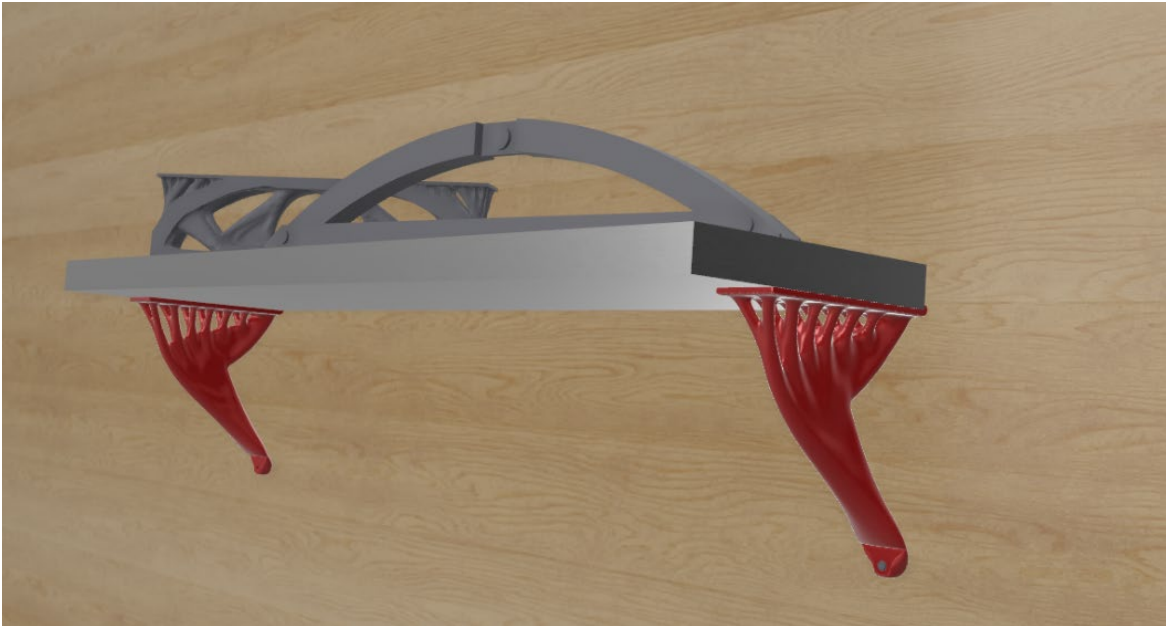
Det siste steget er å definere ønsket volumreduksjon, som i dette tilfellet settes til 85 prosent. Den objektive funksjon er å minimere elastisk energi (maksimere stivhet). Programvaren legger automatisk til et beskyttet område som ikke kan endres på, se figur 8-7



Figur 8-9 definere bruk området i hyllebraketten



Figur 8-10 Resultatet er en topologioptimalisert brakett



*Figur 8-11 Resultat av hyllebraketten fra Ansys*

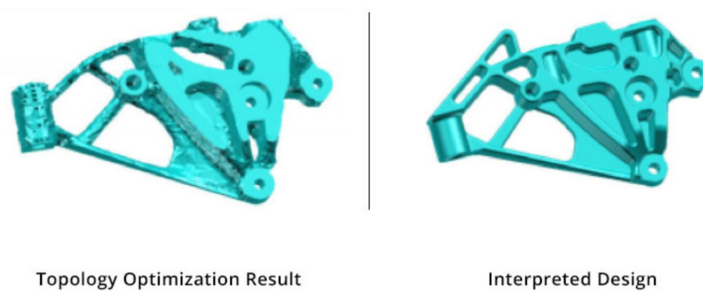
### **8.3 Ameba**

Til slutt installerte vi Ameba, et verktøy for topologioptimalisering basert på BESO-metoden. Ameba er en utvidelse til Rhino, et populært programvareverktøy for 3D-modellering (39). Vi fulgte brukermanualen for å lære oss programvaren, men dessverre klarte vi ikke å få den til å fungere. Vi bestemte oss derfor for å legge de

## 9 Etterbehandling

### 9.1 Etterbehandling av topologioptimalisering

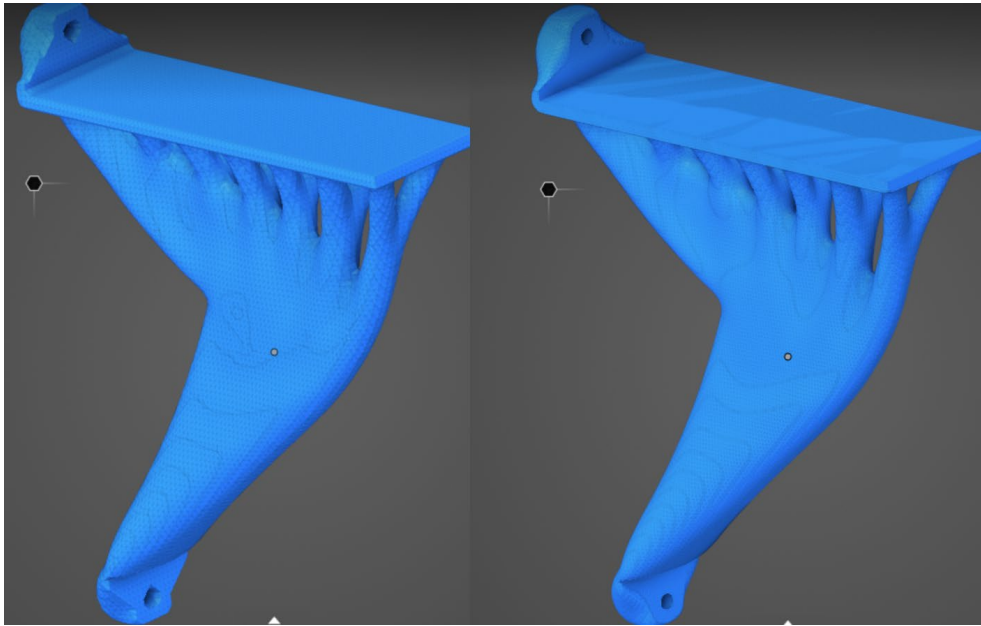
Resultatet fra topologioptimalisering (TO) utgjør vanligvis ikke det endelige designet. TO blir primært benyttet som et verktøy for å indikere hvor materiale er nødvendig for å møte gitte ytelseskrav. Det nødvendiggjør tolkning av resultater, noe som krever ingeniørinnsikt for å ta hensyn til ulike faktorer som produserbarhet, kostnader, og produksjonstid. TO resulterer i komplekse geometrier som krever etterbehandling for effektiv bruk. Dermed er etterbehandlingsprosessen et nødvendig steg i anvendelsen av TO-resultater for å bearbeide og tilpasse den genererte geometrien. Flere teknikker kan benyttes i denne prosessen og det vil gis en kort presentasjon av disse i det følgende. Figur 3 viser et eksempel på et TO-resultat og ingeniørens fortolkning av dette.



Figur 9-1 Etterbehandling av topologioptimalisering eksempel

### 9.2 Utjevning (smoothing)

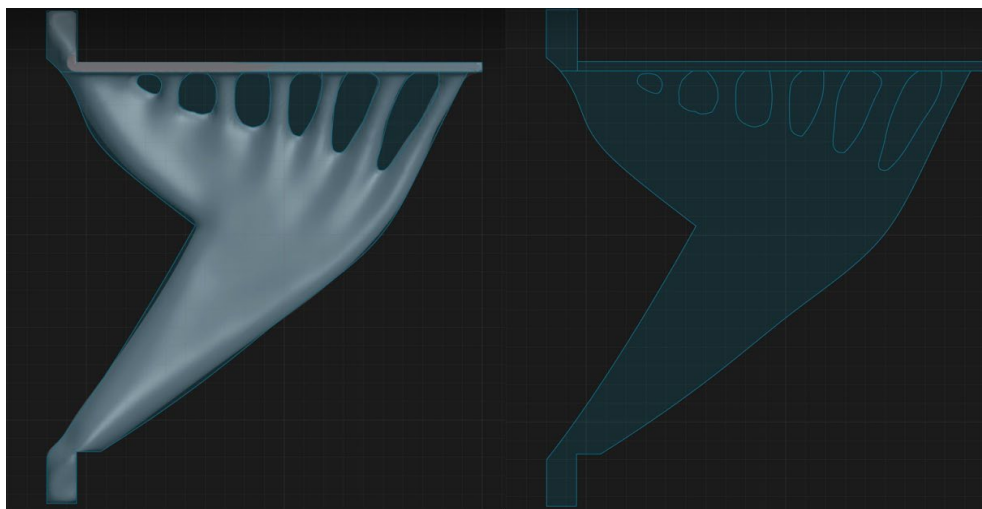
En mulig prosedyre innebærer eksport av geometrien som en STL-fil, etterfulgt av videre behandling, som for eksempel utjevning av polygoner. En STL-fil er et format som representerer overflaten av et tredimensjonalt objekt ved å definere en serie av trekantformede polygoner, kjent som facets. Disse polygonene kombineres for å danne den tredimensjonale overflaten til objektet som modellen representerer (40). Det finnes flere programvarealternativer som SolidWorks, Ansys Discovery og Ansys SpaceClaim, som kan jevne ut disse polygonene, og dermed skape en jevnere overflate på optimaliserte modellen. Dette er illustrert i Figur 1, hylleknekten til venstre er ikke etterbehandlet, mens hylleknekten til høyre er behandlet med Ansys Discovery. Det kan observeres at hylleknekten uten etterbehandling har ujevne og skarpe kanter, noe som er uønsket i en produksjonssammenheng."



Figur 9-2 eksempel på utjevning prosess av hyllebraketten

### 9.3 Manuell rekonstruksjon

Manuell rekonstruksjon er en ofte brukt prosedyre i etterbehandlingsstadiet av topologioptimalisering. Denne metoden innebærer å tolke og rekonstruere topologioptimalisert (TO) geometri ved å eksportere den genererte STL-filen til et CAD-verktøy, deretter brukes TO-modellen som en mal for å forme den endelige modellen. Etter at modellen er fullført, kan den lagres som en IGES-fil og deretter importeres til Abaqus for videre analyser. Figuren nedenfor viser en topologi optimalisert hylleknekt som er importert i et CAD-verktøy. I dette tilfellet, er TO-modellen anvendt som grunnlag for å forme den nye geometrien.



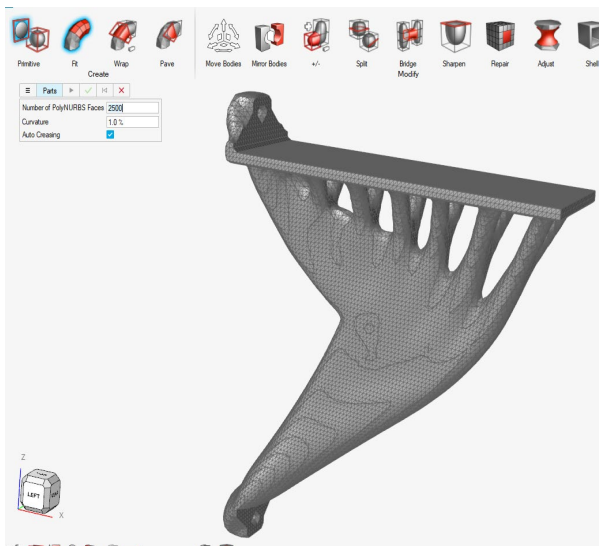
Figur 9-3 Manuell rekonstruksjon etterbehandlingsstadiet av topologioptimalisering på

## 9.4 Automatisert rekonstruksjon

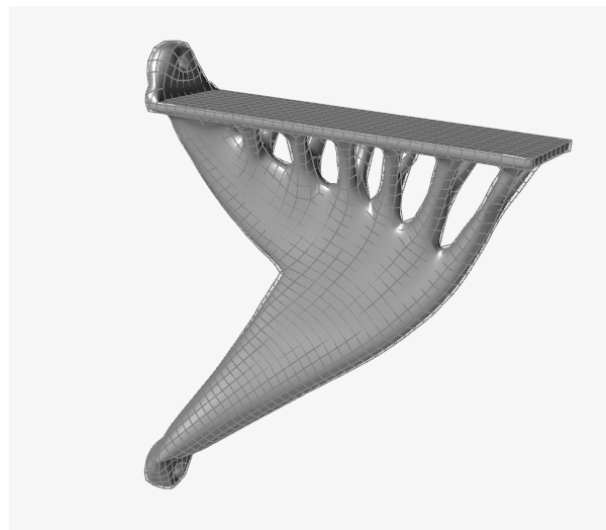
Det eksisterer en metode som muliggjør automatisk rekonstruksjon av geometrien. Et eksempel på en slik løsning er Altair SolidThinking Inspire, som inneholder en funksjon kalt PolyNURBS. I motsetning til polygoner, representerer NURBS en matematisk beskrivelse av 3D-geometrien. Et PolyNURBS-objekt representerer geometrien som NURBS (41). I denne programvaren er det et verktøy kalt 'Fit' som automatisk genererer en ny PolyNURBS-del på en eksisterende mesh-geometrien. Resultatet er en ny geometri hvor flatene er glatte/jevne. Denne geometrien blir gjort om til en solid body og kan lagre som en IGES-fil. I enkelte tilfeller kan det være nødvendig å gjøre manuelle justeringer for å reparere PolyNURBS-delen.

Figur x viser den importerte hylleknekten i programvaren, mens figur 3 viser det endelige resultatet. Ved bruk av 'Fit'-verktøyet kan man justere tre parametere:

1. **Number of PolyNURBS Faces:** Dette representerer antallet flater som dannes på PolyNURBS-objektet. Ved å øke dette antallet, vil overflatene bli mer detaljerte.
2. **Curvature:** Dette er en parameter som indikerer graden av krumning. En høyere prosentandel for krumning vil fange opp flere detaljer.
3. **Auto Creasing:** Dette er en funksjon som opprettholder skarpe kanter i modellen (42).



Figur 9-5 Automatisert rekonstruksjon inn



Figur 9-5 Resultatet inn PolyNURBS

## 10 Topologioptimalisering i Abaqus

Målet med denne delen er å forklare hvordan man kan sette opp topologioptimalisering i Abaqus. Det vil først gis en kort innføring i Abaqus som tar for seg noen av stegene for å sette opp modellen.

### 10.1 Innføring i abaqus

#### 10.1.1 Enheter

Abaqus har ikke noe fast enhetssystem. Det betyr at brukeren selv må definere hvilket enhetssystem som skal benyttes. Det er viktig å konsekvent bruke det samme enhetssystemet. For eksempel, hvis man bruker SI-systemet (mm), må lengder oppgis i mm og krefter i N. Hvis man følger enhetssystemet konsekvent, vil man i dette tilfellet få spenninger i  $\text{N/mm}^2$ . Manglende konsekvens kan føre til at man misforstår resultater, da de er enhetsløse (43). Figur viser en oversikt over SI-systemet.

Tabell 10-1 Enheter av Abaqus

Quantity	SI	SI(mm)	SI	US Unit(ft)	US Unit(inch)
Length	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>ft</i>	<i>in</i>
Force	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>kN</i>	<i>lbf</i>	<i>lbf</i>
Mass	<i>kg</i>	<i>tonne (10<sup>3</sup>kg)</i>	<i>tonne</i>	<i>slug</i>	<i>lbf s<sup>2</sup>/in</i>
Time	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>
Stress	<i>Pa (N/m<sup>2</sup>)</i>	<i>MPa (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>kPa</i>	<i>lbf/ft<sup>2</sup></i>	<i>psi (lbf/in<sup>2</sup>)</i>
Energy	<i>J</i>	<i>mJ (10<sup>-3</sup>J)</i>	<i>KJ</i>	<i>ftlbf</i>	<i>inlbf</i>
Density	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	<i>tonne/mm<sup>3</sup></i>	<i>tonne/m<sup>3</sup></i>	<i>slug/ft<sup>3</sup></i>	<i>lbf s<sup>2</sup>/in<sup>4</sup></i>

#### 10.1.2 Moduler

Abaqus består av totalt 11 moduler hvor hver modul kommer i en rekkefølge som bygger modellen steg for steg. Figur viser de ulike modulene i abaqus. Abaqus består av totalt 11

- Part
- Property
- Assembly
- Step
- Interaction
- Load
- Mesh
- Optimization
- Job
- Visualization
- Sketch



### 10.1.3 Komponent og materialelegenskaper

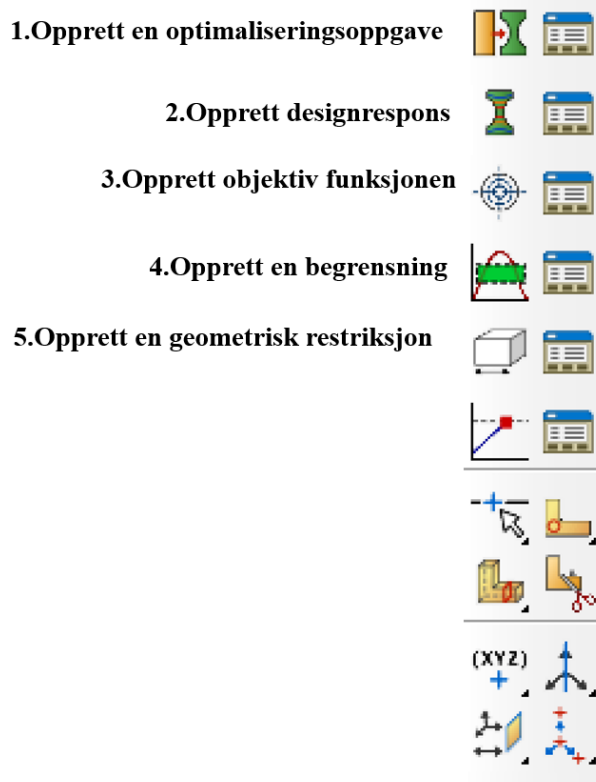
I Abaqus kan man lage komponenten ved å tegne geometrien direkte i programmet, eller man kan importere en komponent fra et CAD-verktøy. Abaqus støtter flere filformater, de mest brukte er IGES, STEP og Parasolid. Når komponenten er importert eller laget, er neste steg å definere materialelegenskaper.

### 10.1.4 Last, randbetingelse og mesh

Last og randbetingelser defineres i modulen «load». Neste steg er å lage en mesh. Med et finere mesh får man en gunstigere geometri, men dette øker også beregningstiden. Når dette er gjort, er alt klart for en statisk analyse.

## 10.2 Oppsett av topologioptimalisering i abaqus

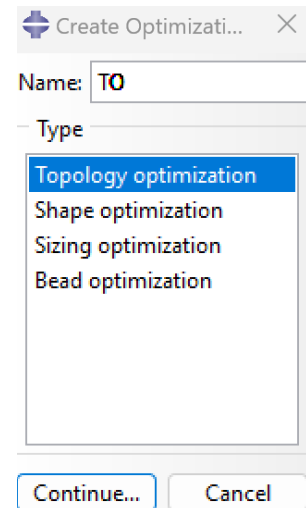
Denne delen omhandler hvordan man setter opp topologioptimalisering i Abaqus. Vi vil se på hvordan man kan minimere tøyingsenergi underlagt en volumbegrensning, dvs. å finne den beste balansen mellom ytelse (stivhet) og vekt. Man starter med å velge optimaliseringsmodulen. Her får man opp en verktøylinje, se giur



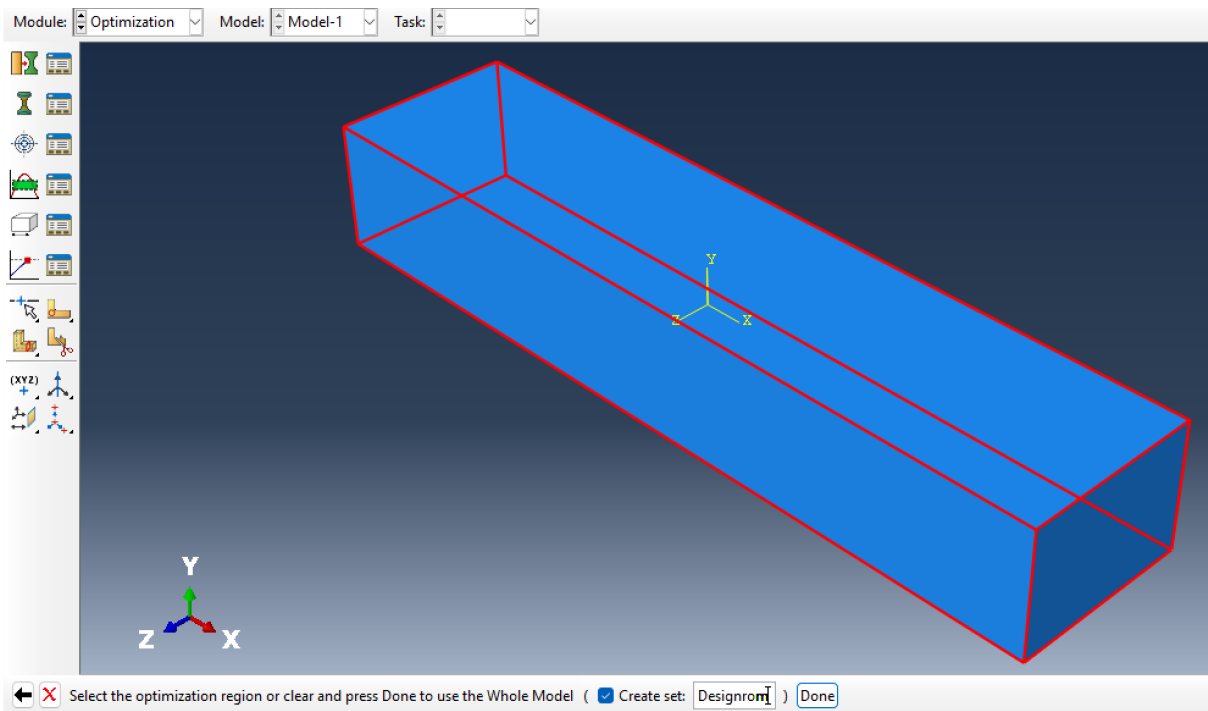
Figur 10-1 av topologioptimalisering i abaqus

## 10.2.1 Optimaliseringsoppgave

Verktøylinjen er logisk oppbygget. Man følger sekvensen som er satt opp. Steg 1-4 er nødvendige for å sette opp topologioptimalisering, og steg 5 er en valgfritt. Man starter med å opprette et optimaliseringsproblem, hvor man har fire forskjellige alternativer tilgjengelig.

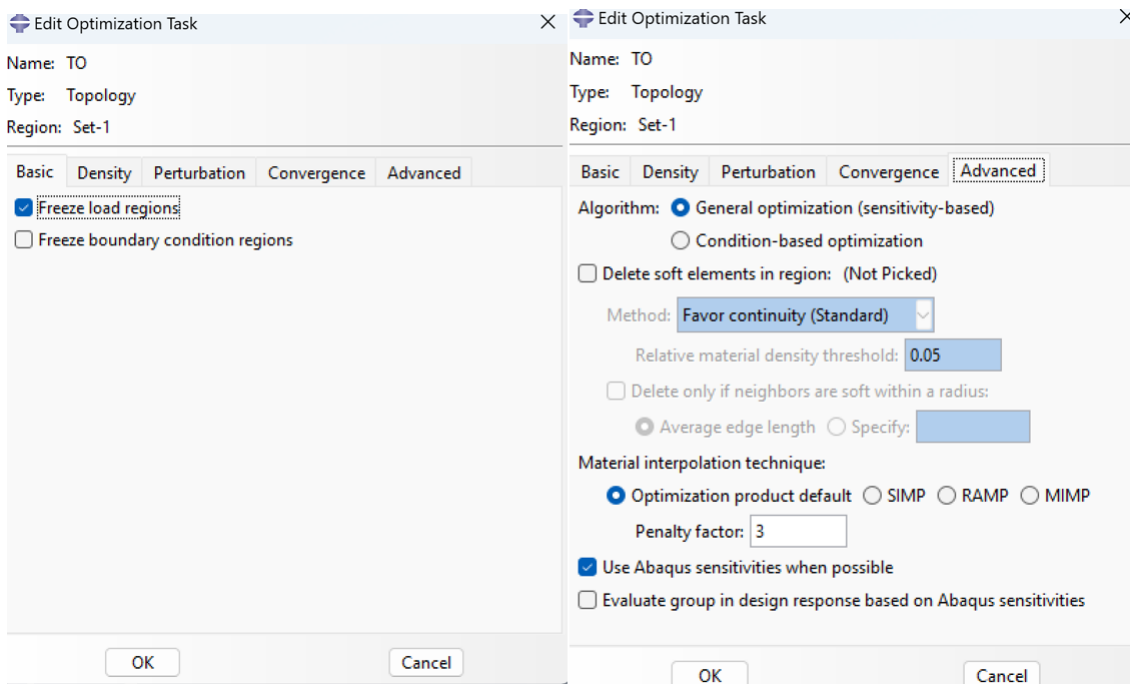


Man velger topologioptimalisering og får muligheten til å spesifisere hvilken del av modellen man ønsker å optimalisere. Optimalisering kan gjennomføres for hele modellen. Hvis det er spesifikke områder som ikke skal inkluderes i optimaliseringen, kan man velge de bort.



Figur 10-2 tening av en massive element

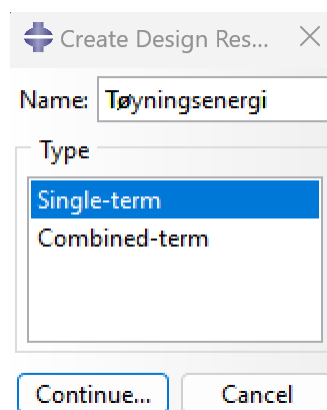
Deretter får man opp en fane hvor man kan justere forskjellige innstillinger for optimaliseringen. For eksempel, kan man låse lastområdet slik at dette området forblir uendre og endre interpolasjonsteknikken.



Figur 10-3 Op

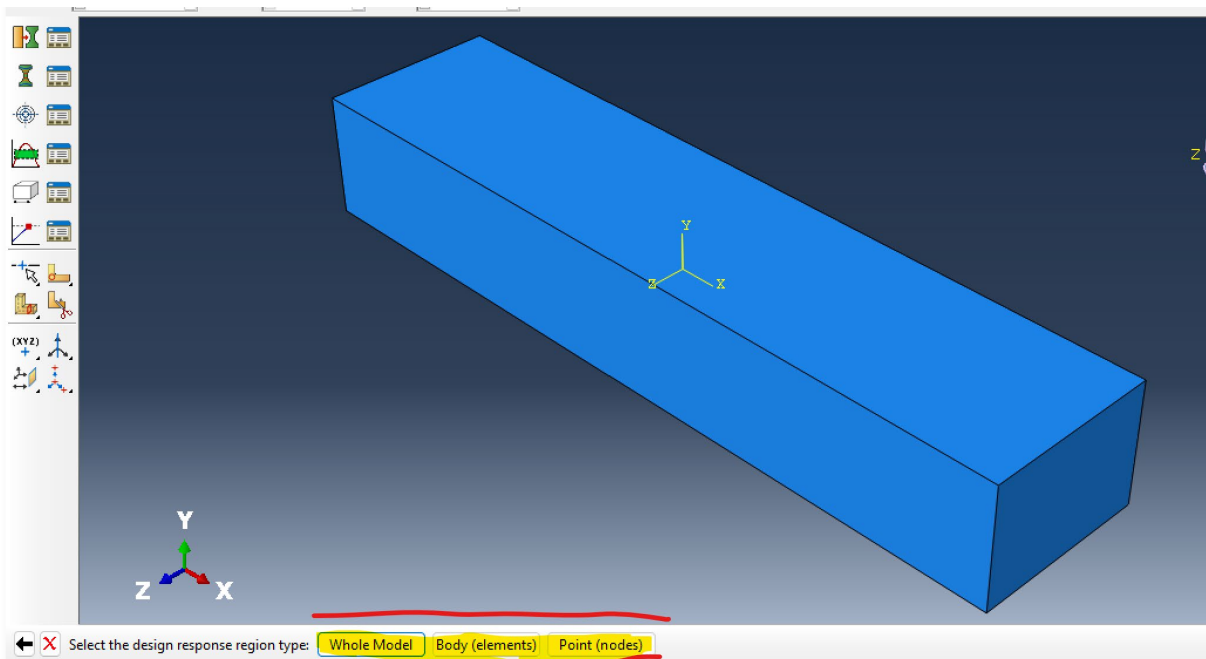
## 10.2.2 Designrespons

Det neste trinnet involverer opprettelse av designrespons. Dette er parametere som skal spesifiseres før definisjon av objektivfunksjon og begrensninger. I dette tilfellet, er det to designrespons: tøyingsenergi og volum. Disse opprettes ved å følge steg 2 i verktøylinjen, der man skriver inn navnet på designresponsen og velger 'single-term', som illustrert i figur 2.



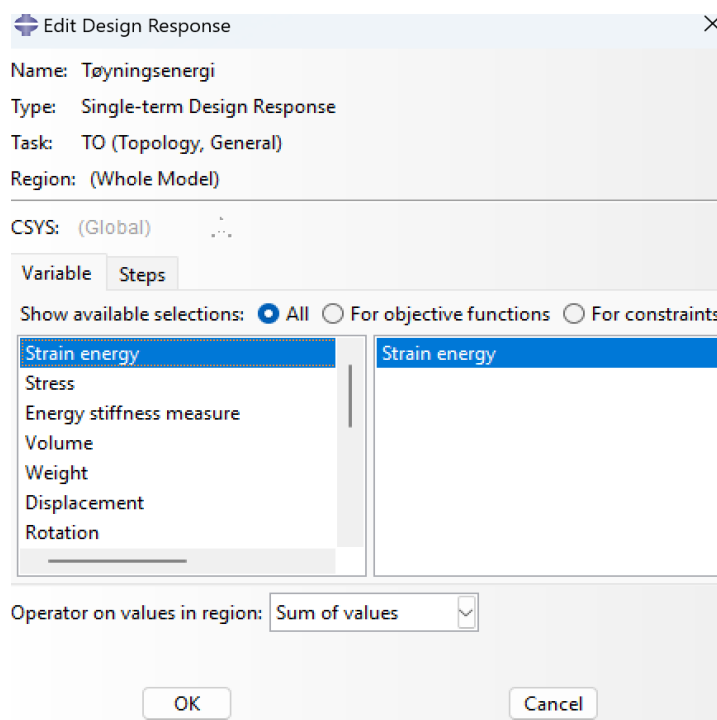
Figur 10-4

Etter dette presenteres tre alternativer: «whole model», «body (elements)» og «point (nodes)». For å beregne designresponsen for hele modellen, velger vi 'whole model'.



Figur 10-5

videre kommer det opp en fane hvor man velger designresponsen og trykker ok, slik som det er illustrert på figur

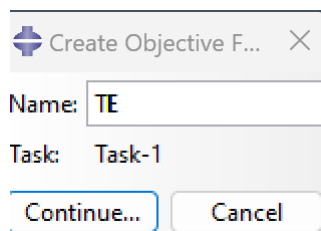


Figur 10-6

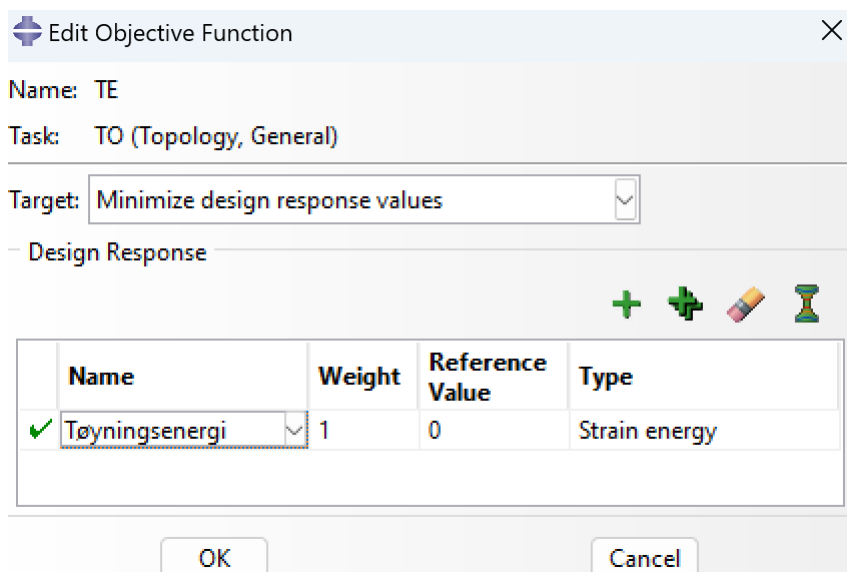
Den samme prosessen gjentas identisk for den andre designresponsen, volum.

### 10.2.3 Objektiv funksjon og begrensing

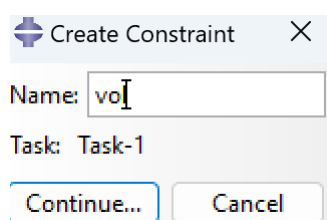
For å definere topologioptimalisering (TO), gjenstår nå trinn 3 og 4, som handler om å opprette den objektive funksjonen og definere begrensninger. Først setter vi opp den objektive funksjonen. I den første fanen som vises, skal denne funksjonen gis et navn. Siden formålet med den objektive funksjonen er å minimere tøyingsenergi, kaller vi den for TE (Tøyingsenergi). Etter å ha klikket på 'fortsett', dukker et nytt vindu opp.



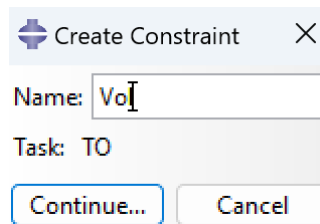
Et nytt vindu kommer deretter opp, der målet (target) skal velges. I dette tilfellet er målet å minimere designresponsen, og den riktige designresponsen skal velges under 'navn' i første kolonne, som vist i figuren.



Figur 10-7 Sett inn tøyingsenergi

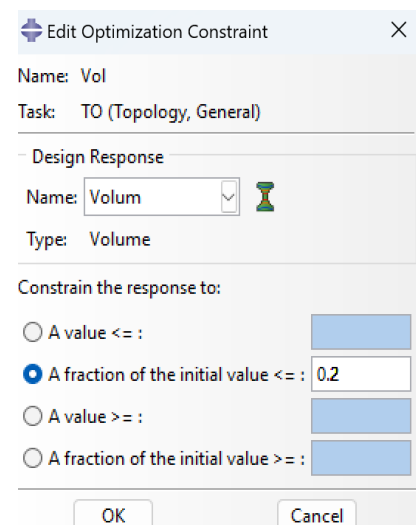


På samme måte kan vi trykke på trinn 4 og det første vi må gjøre er å navngi begrensningen, som i dette tilfellet er vol (volum)



Etter dette vises et nytt vindu. Her må vi igjen velge riktig designrespons og bestemme hva vi ønsker. I dette tilfellet er volumbegrensningen satt til å være lik en brøkdel av den opprinnelige verdien, nemlig 20 prosent. Dette betyr at vi fjerner 80 prosent av volumet, som illustrert i figur 4.

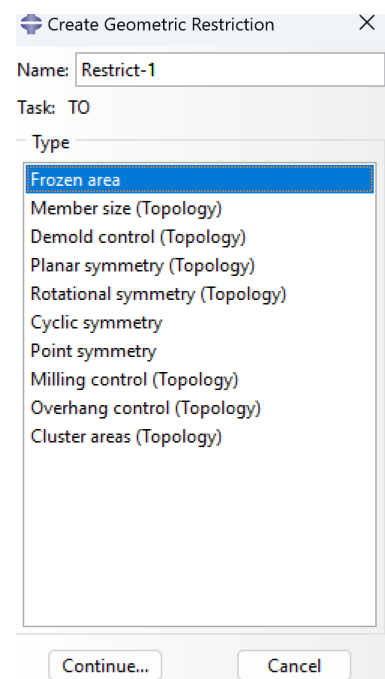
Når er alt klar for TO. På neste side er det en flow chart som viser oppsummerer denne prosessen.

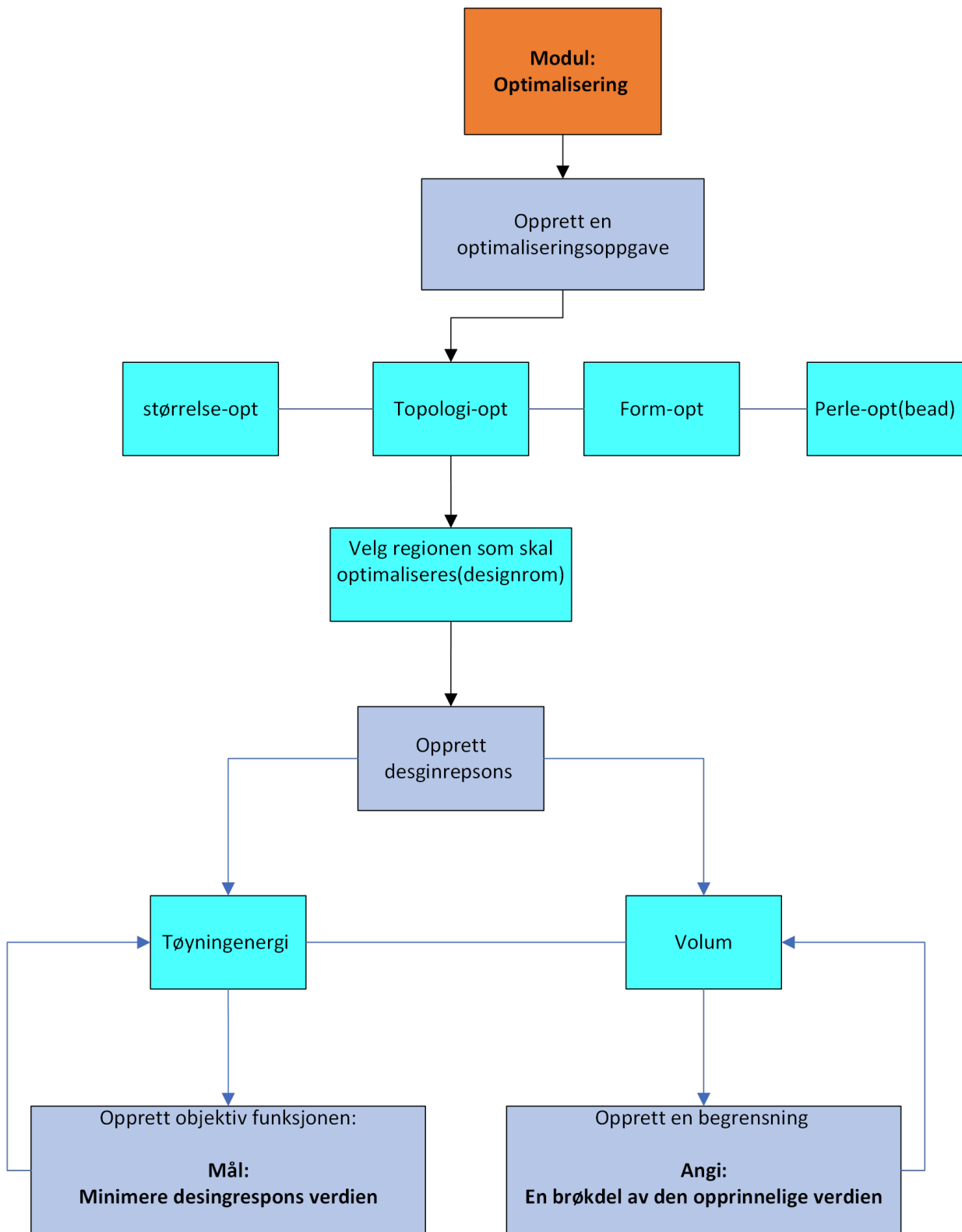


Figur 10-8 Optimization constraint

#### 10.2.4 Geometriske restriksjoner

Geometriske Restriksjoner Det er også mulig å legge til andre restriksjoner, som «frozen area», «planar symmetry» og «overhang contro». Dersom det er noen områder som programvaren ikke skal endre, kan dette oppnås ved å velge frozen area. Overhang control kan være nyttig med tanke på 3D-printing(44). Alle restriksjonene er illustrert i figur 5

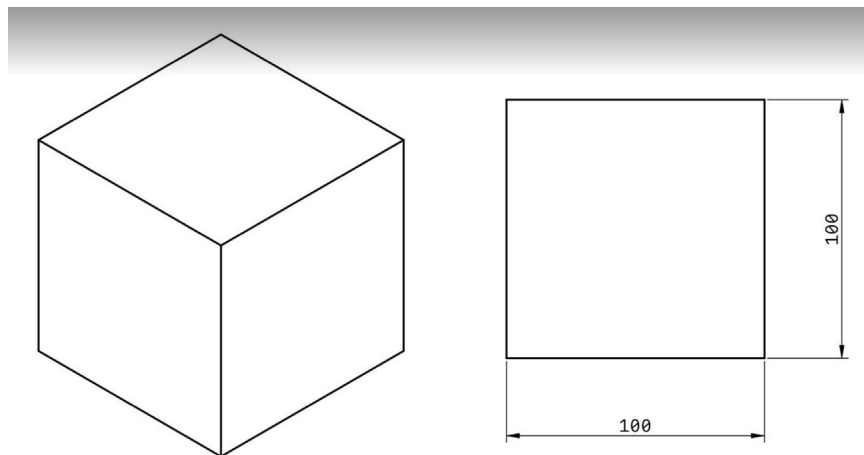




## 10.3 Eksempler på topologioptimalisering i Abaqus

### 10.3.1 Terning

Første eksempel er en terning med målene 100mm x 100mm x 100mm som skal topologioptimaliseres.

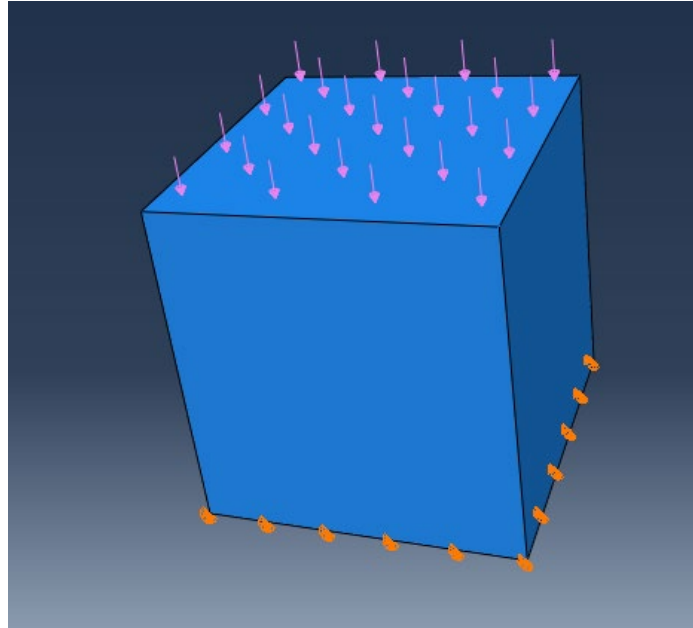


Figur 10-9 modell av terningen

Parametere	Verdier	Enhet
E-modul	200000	N
Tverrkontraksjon forholdstall	0,3	
Tetthet	$7.89 \cdot 10^{-9}$	Tonne/mm <sup>3</sup>
Last	1	N/mm <sup>2</sup>
Randbetingelse	U1=0, U2=0, U3=0 (fastholdt i x, y og z retning)	
Volumbegrensning (prosent)	14	
Penaliseringsfaktor(SIMP)	3	

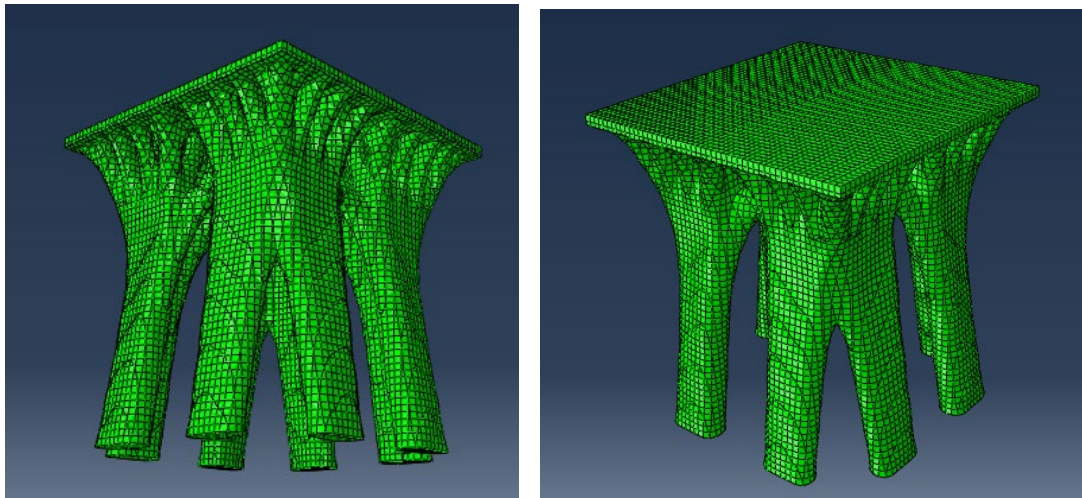


..



*Figur 10-10 Last og opplegg på Terning*

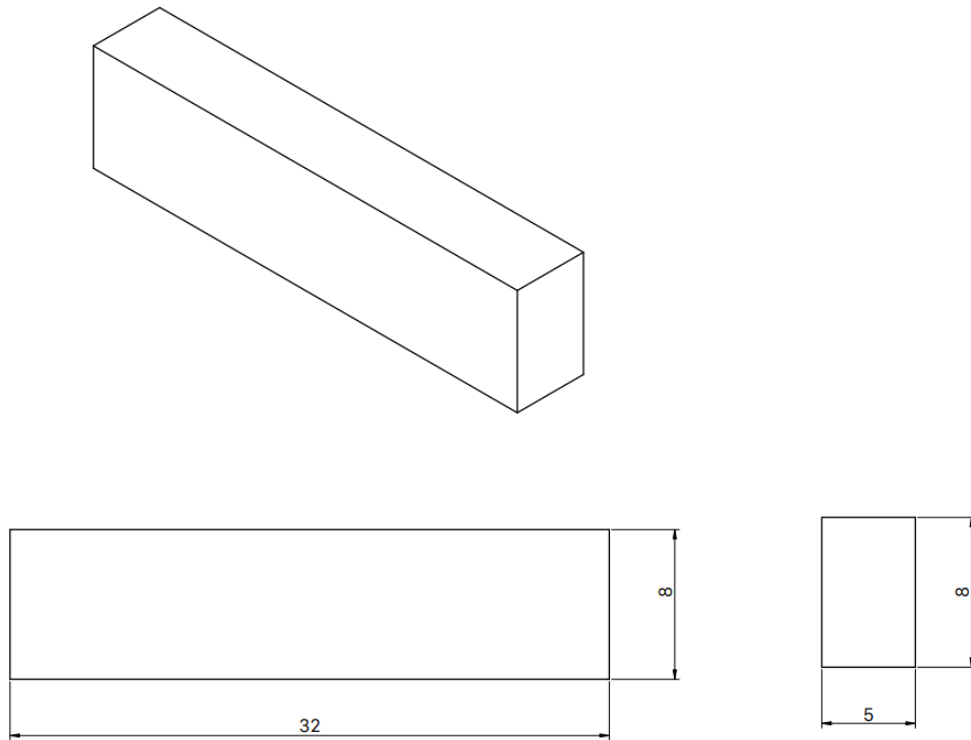
## Resultat



*Figur 10-11 Resultat av TO Terning*

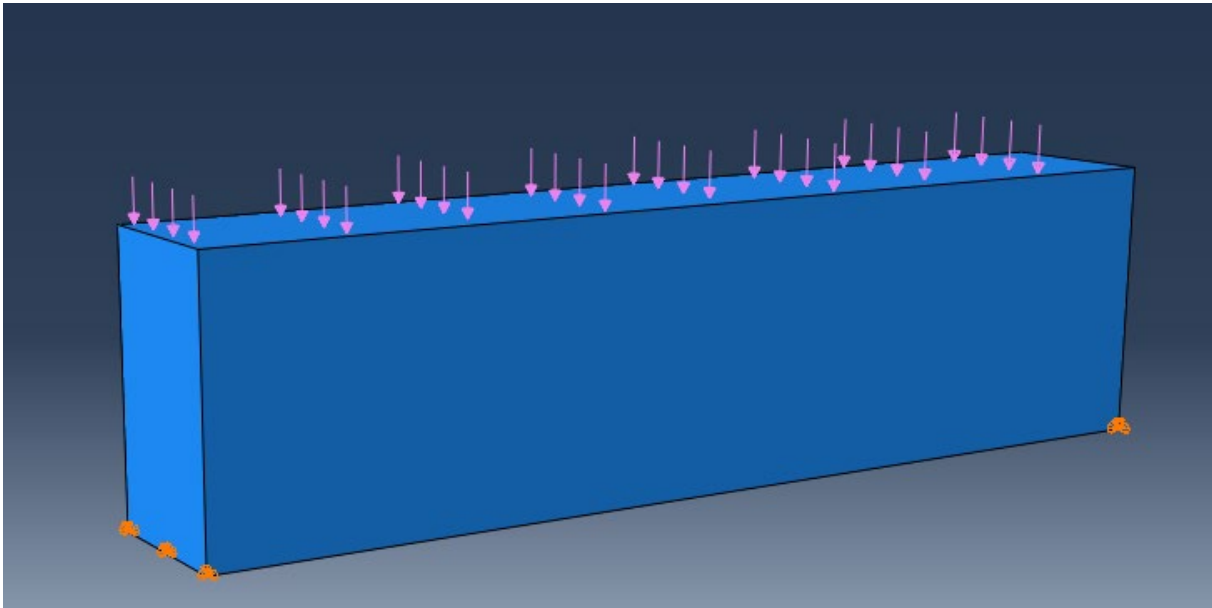
### 10.3.2 Bru

Eksempel 2 er tenkt en bru som spenner 32 meter og er 5 meter i bredde.



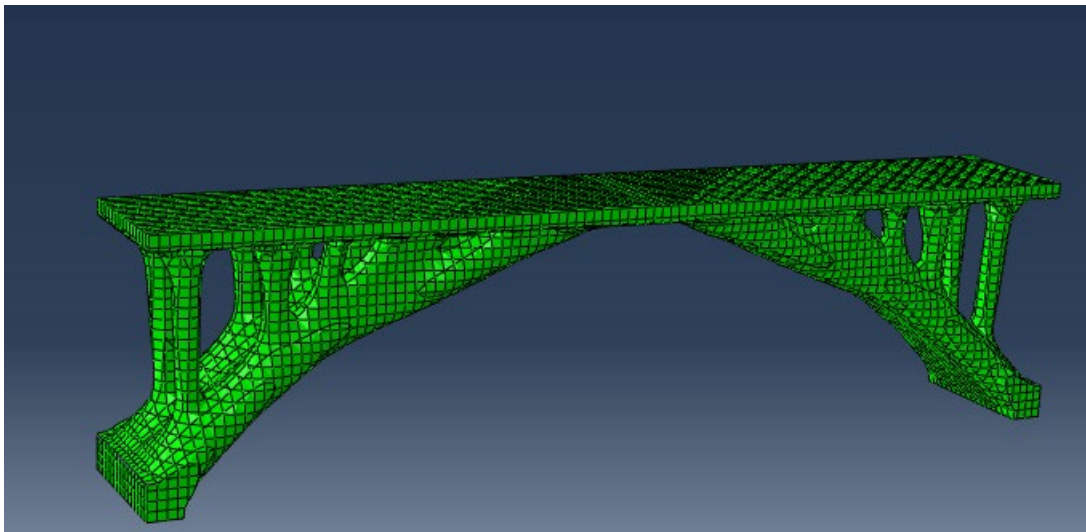
Figur 10-12 design av TO BRU

Parametere	Verdier	Enhet
E-modul	200000	N
Tverrkontraksjon forholdstall	0,3	
Tetthet	$7.89 \cdot 10^{-9}$	Tonne/mm <sup>3</sup>
Last	1	N/mm <sup>2</sup>
Randbetingelse	U1=0, U2=0, U3=0 (fastholdt i x, y og z retning)	
Volumbegrensning (prosent)	14	
Penaliseringsfaktor(SIMP)	3	



Figur 10-13 lastfordeling for TO BRU

## Resultat



Figur 10-14 Resultat av TO av bru

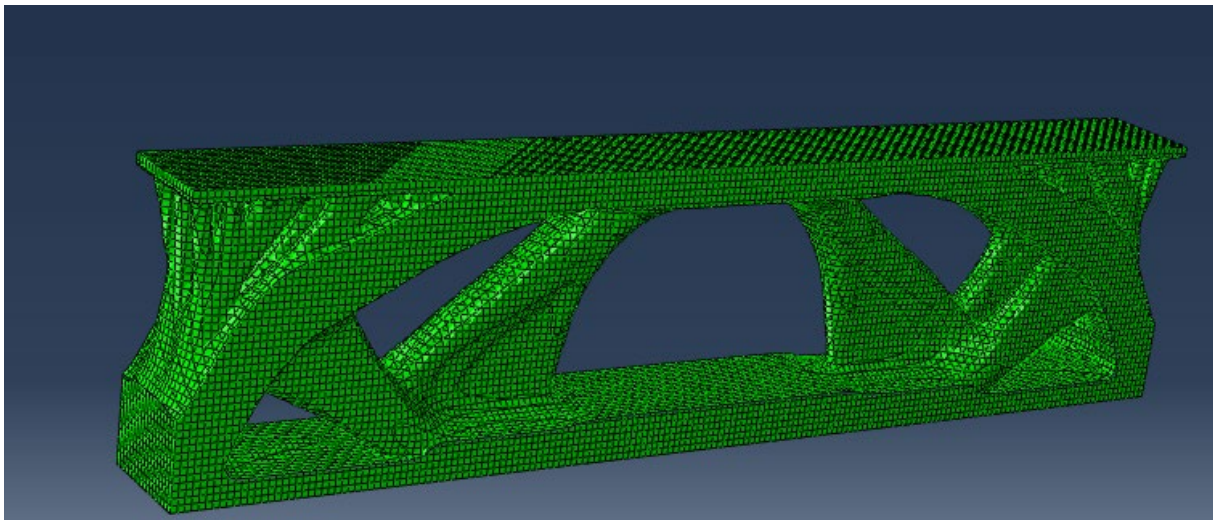
### 10.3.3 Bjelke

Til slutt har vi optimalisert en liten bjelke som vi skal utføre forsøk på. Denne bjelken skal produseres i to ulike materialer, derfor har vi optimalisert den to ganger med forskjellige materialer.

Parametere	Verdier	Enhet
E-modul (PLA)	3381	N/mm <sup>2</sup>
Tverrkontraksjon forholdstall (PLA)	0.36	
Tetthet (PLA)	1.24*10 <sup>-9</sup>	Tonne/mm <sup>3</sup>
E-modul Nylon)	2310	N/mm <sup>2</sup>
Tverrkontraksjon forholdstall (Nylon)	0.408	
Tetthet (Nylon)	1.07*10 <sup>-9</sup>	Tonne/mm <sup>3</sup>
Last	1	N/mm <sup>2</sup>
Randbetingelse	U1=0, U2=0, U3=0 og U2=0, U3=0 (fastholdt i x, y og z retning og y og z retning)	
Volumbegrensning (prosent)	14	
Penaliseringsfaktor(SIMP)	3	

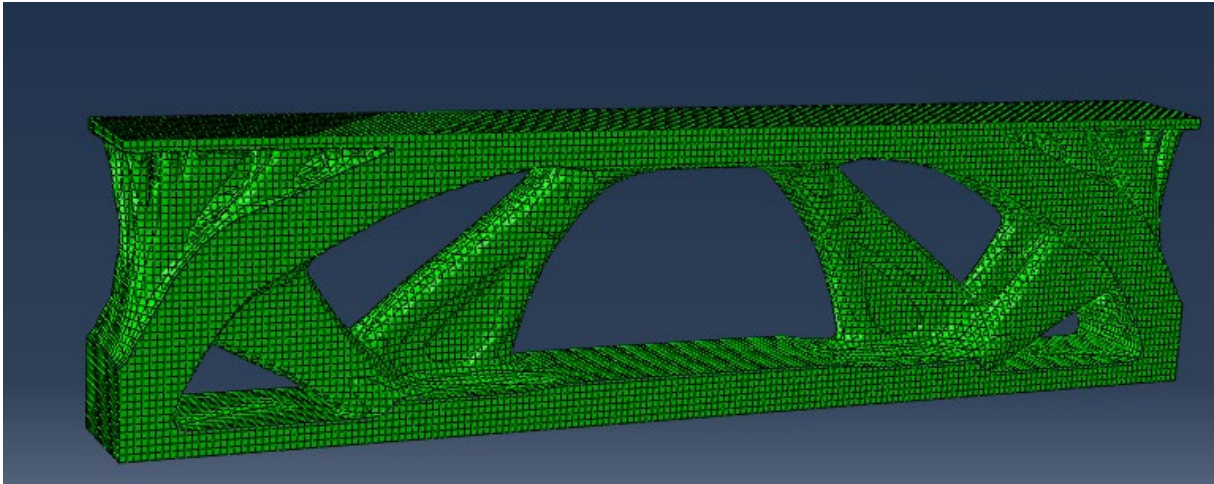
## Resultat

### Pla



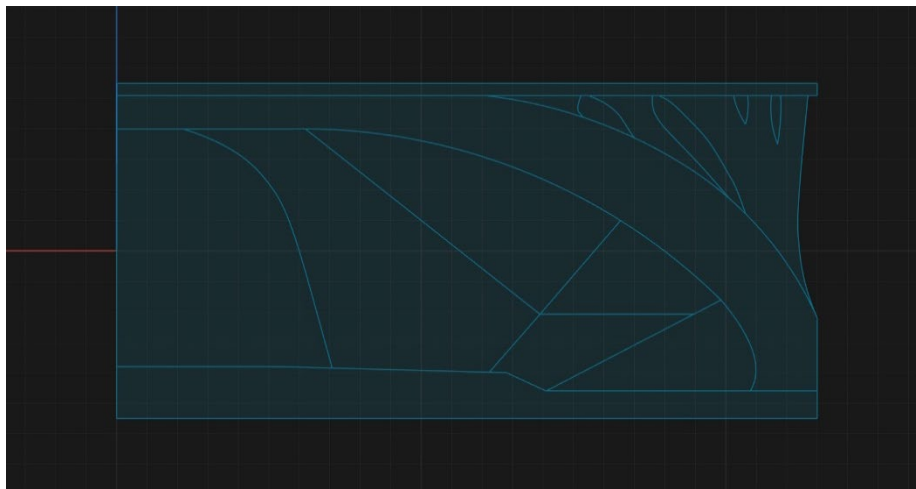
Figur 10-15

## Nylon

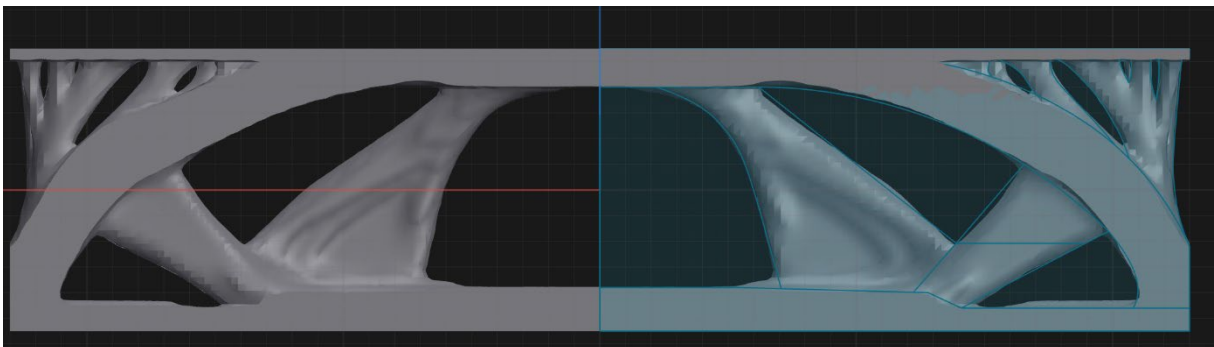


Figur 10-16

### 10.3.3.1.1 Manuell rekonstruksjon – Shapr3d



Figur 10-17 tening egen design basert på TO

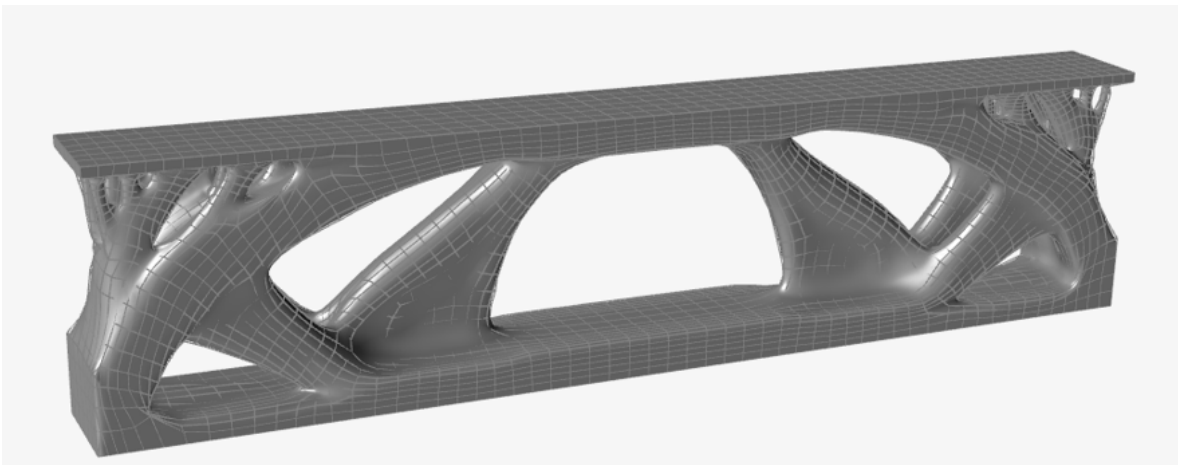


Figur 10-18 tening egen design basert på TO



*Figur 10-19 Resultat av tening*

### **10.3.3.1.2 Automatisert rekonstruksjon – Altair inspire**





# 11 Forsøk

## 11.1 Hensikt

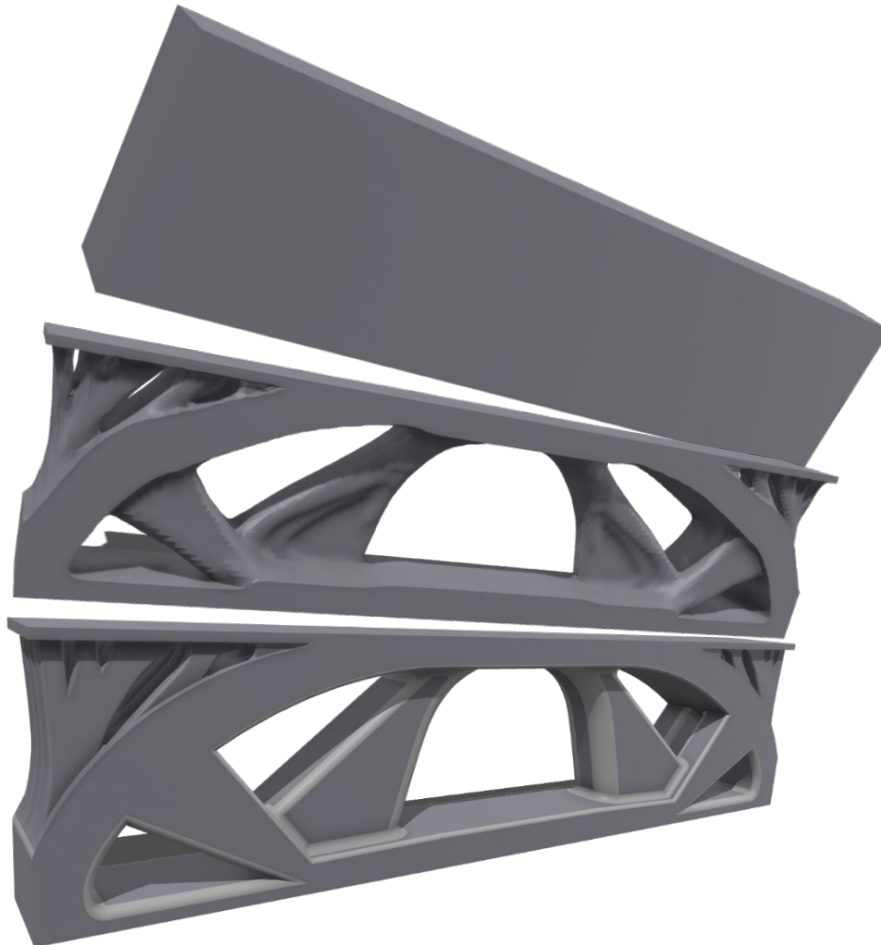
Dette eksperimentet er utformet for å oppnå en dypere forståelse av prosessen med topologioptimalisering. Målet er å lære å optimalisere et objekt gjennom topologioptimalisering og deretter produsere det

## 11.2 Metode

### 11.2.1 Bjelkedesign

Vi har utført forsøk på 3 ulike bjelker forskjellige bjelker:

- **Bjelke 1:** Massiv bjelke som er selve designdomenet (original geometri)
- **Bjelke 2:** Bjelken som har blitt topologioptimalisert i Abaqus (volumefraction 0,40)
- **Bjelke 3:** Bjelken vi har designet selv som er inspirert av den topologioptimaliserte bjelken i Abaqus (bjelke 2).



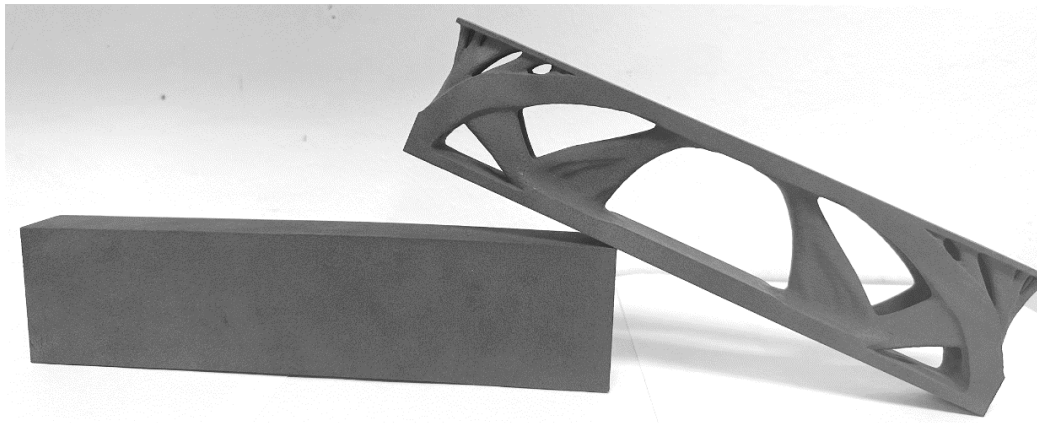
*Figur -1 Figuren av bjelkene B1, B2 og B3*

### 11.2.2 Produksjonsmetoder

Bjelkene vil bli produsert ved hjelp av to 3D-printteknologier:

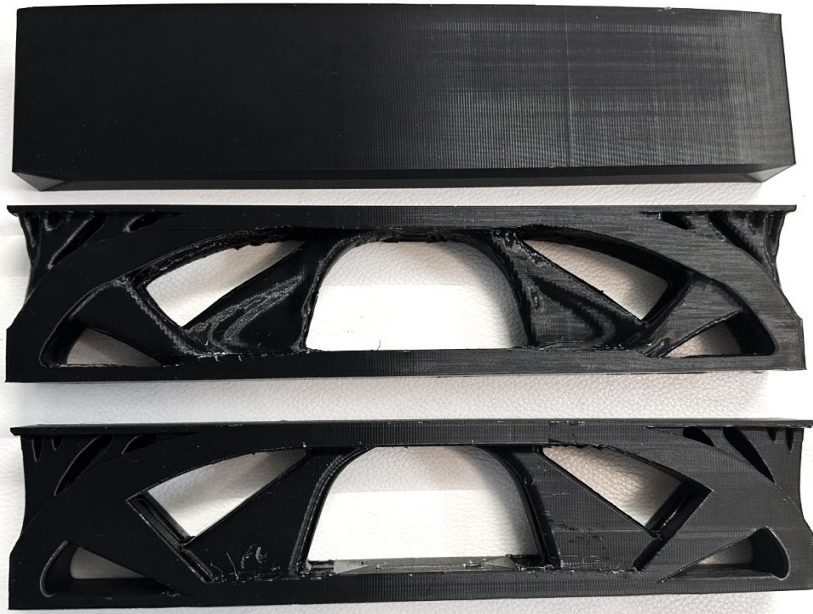
- **Fused Deposition Modeling (FDM):** Hver av de tre bjelkedesignene har blitt produsert ved hjelp av FDM, med tre eksemplarer av hver design, noe som gir oss totalt ni bjelker.
- **Selective Laser Sintering (SLS):** Bare Bjelke 1 og Bjelke 2 er blitt produsert med denne teknologien. Det har blitt produsert to eksemplarer av hver av disse, noe som resulterer i fire bjelker.

Dette vil totalt gi 13 bjelker for eksperimentell testing. Hensikten er å sammenligne resultatene oppnådd fra disse forskjellige designene og produksjonsmetodene.



*Figur -2 SLS 3D-printet bjelkene B1 og B2*





Figur -3 FDM 3D-printet bjelkene B1,B2 og B3

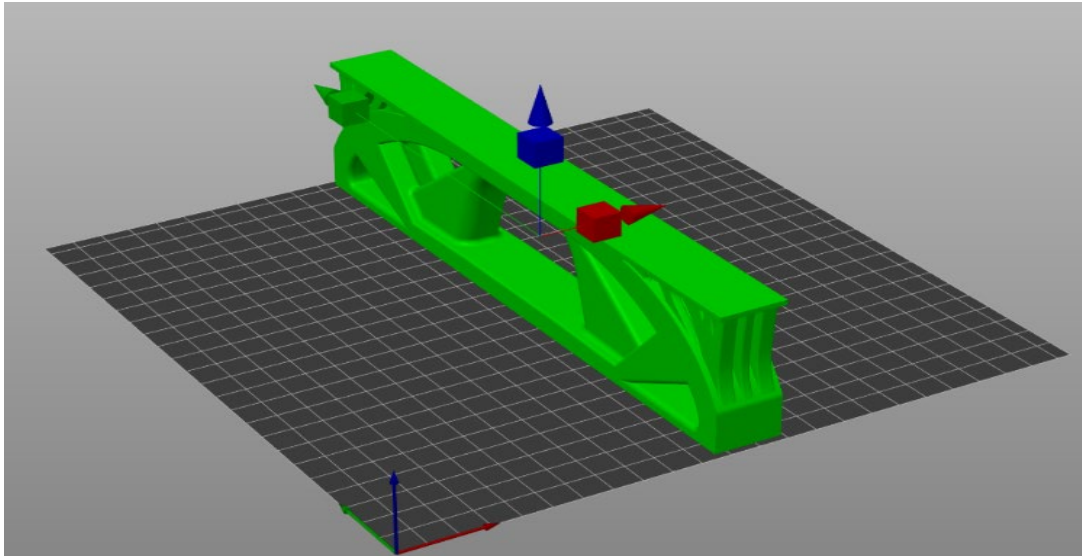
Tabell -1 Bjelker produsert for forsøk

NR	PROTOTYPE	VOLUM I ABQUSE %	METODE	3D- PRINTING
1	B1_FDM_1 (Referanses)	100%	ingen	FDM
2	B1_FDM_2	100%	ingen	FDM
3	B1_FDM_3	100%	ingen	FDM
4	B2_FDM_1	40%	SIMP	FDM
5	B2_FDM_2	40%	SIMP	FDM
6	B2_FDM_3	40%	SIMP	FDM
7	B3_FDM_1	40%	SIMP/Etter behandling	FDM
8	B3_FDM_2	40%	SIMP/Etter behandling	FDM
9	B3_FDM_3	40%	SIMP/Etter behandling	FDM
10	B1_SLS_1 (Referanses)	100%	ingen	SLS
11	B1_SLS_2	100%	ingen	SLS
12	B2_SLS_1	40%	SIMP	SLS
13	B2_SLS_2	40%	SIMP	SLS

## Metode

### FDM

Det første steget i 3D-printingsprosessen innebærer importering av modeller som STL-filer i PrusaSlicer (versjon 2.5). Dette programmet gjør det mulig å konvertere 3D-modellen til en form som 3D-printeren kan tolke og produsere. Det er flere innstillinger en kan justere i



Figur -4 viser STL-filer i PrusaSlicer

PrusaSlicer, som hver har en direkte innvirkning på printerkvaliteten, styrken på den ferdige modellen, og tiden det tar å printe.

### Orientering og hastighet

Orienteringen av modellen er en kritisk faktor som påvirker styrken på objektet. Modellen ble orientert i YZ-retningen, som vist i Figur 2, for å sikre at lasten virket normalt på lagene (layers). Det er også en fordel å printe langs y-aksen, ettersom det er byggeplaten som beveger seg frem og tilbake. Dette bidrar til å redusere vibrasjoner og gir en mer stabil utskrift. Når det gjelder utskriftshastigheten, ble standardinnstillingen for PrusaSlicer Elegoo Neptune benyttet, som i hovedsak er 40 mm/s for perimeters og 25 mm/s for eksterne perimeters.

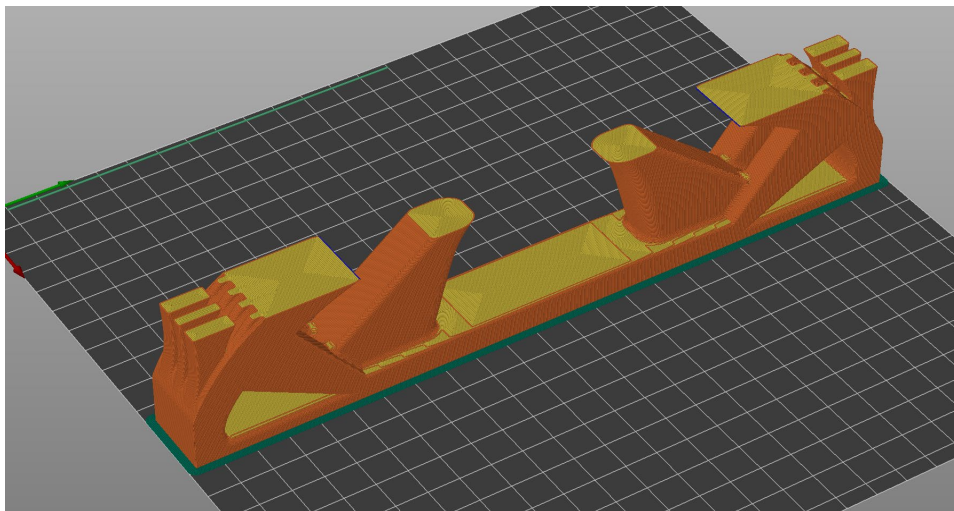
### Slicing og innstillinger

I vårt tilfelle var det viktig å sikre at alle modellene ble slicet med samme innstillinger, for å sikre en rettferdig sammenligning av resultatene. Lagtykkelsen (layer height) ble satt til 0,20

mm. For filamentvalget ble PLA fra 3D-net benyttet. Vi fikk tilsendt det tekniske databladet for dette produktet fra 3D-net, som inneholder essensielle opplysninger, inkludert anbefalte parametere og mekaniske egenskaper. Disse opplysningene ble brukt til å konfigurere innstillingene på PrusaSlicer

Basert på denne informasjonen ble dysens temperatur (nozzle temperature) satt til 210 grader Celsius og byggeplatetemperaturen (bed temperature) til 60 grader Celsius. Disse termiske parameterne er avgjørende for kvaliteten på 3D-printet. For å forbedre heftet til byggeplaten, ble en 3 mm brim benyttet.

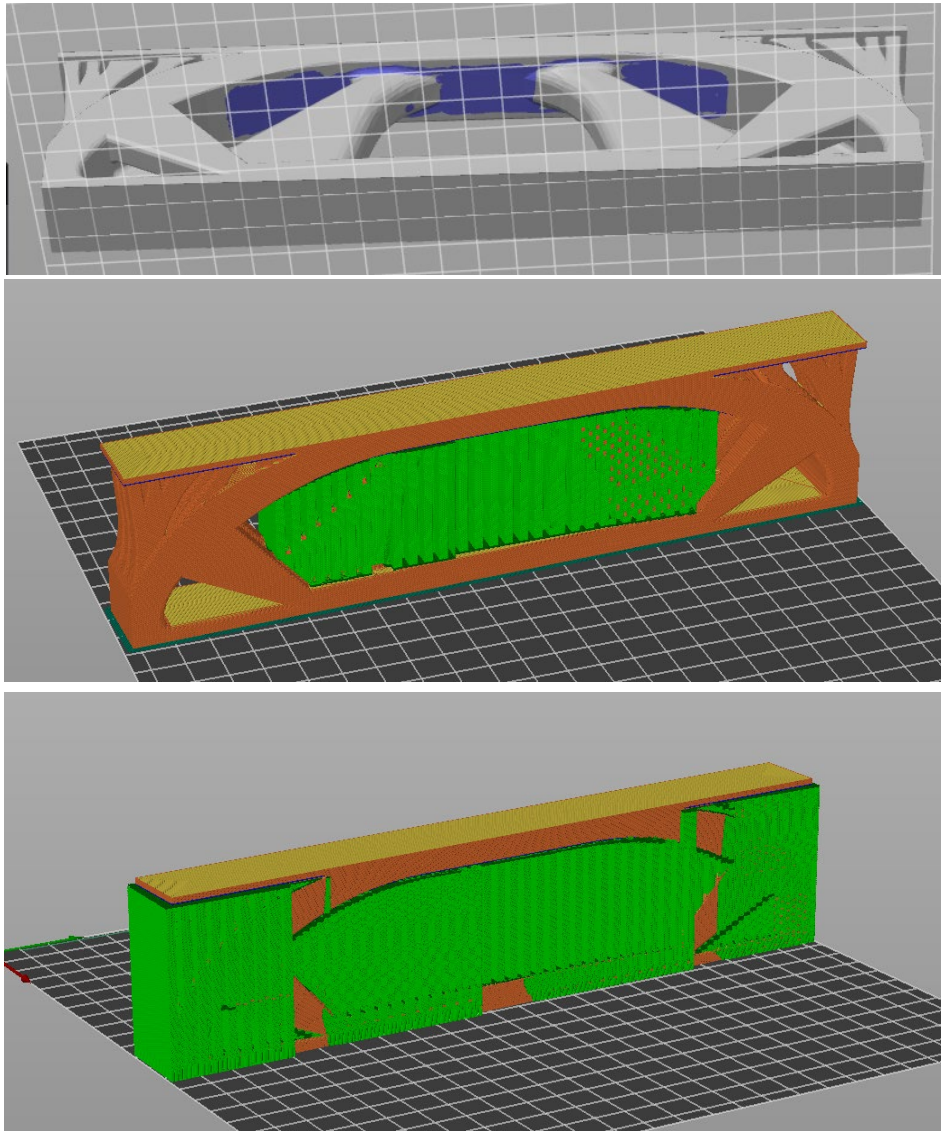
Målet var å gjøre den indre strukturen av modellen massiv. I stedet for å endre på utfyllingsmønsteret (fill pattern) og fyltettheten (fill density), ble antall perimeter økt til den indre strukturen ble massiv. Figur x illustrerer den indre massive strukturen.



Figur -5 PrusaSlicer figur

### **Bruk av støttestruktur (support)**

PrusaSlicer kan generere støttestrukturer automatisk der det er nødvendig, men dette kan resultere i overdreven bruk av materiale og krever mer etterarbeid for å fjerne støtten. I stedet ble det valgt å manuelt markere områder som krever støtte. Dette er illustrert på figur 6.



Figur -6 Støttestruktur

Figur 7 viser en tabell som oppsummerer de viktigste innstillingene som ble brukt i denne 3D-printprosessen. Disse innstillingene inkluderer lagtykkelse, dysens og byggeplatens temperaturer, orientering, utskriftshastighet, antall perimetre og områder merket for støtte.

Tabell -2 Valgt innstillinger i PrusaSlicer

PrusaSlicer innstillinger	Verdi
Layer height	0,2 mm
First layer height	0,2
Vertical shells	
Perimeter	100
Horizontal shells	
Solid layers: Top and bottom	100
Brim	3 mm
Speed for print moves	
Perimeter	40 mm/s
Small perimeter	25 mm/s
External perimeter	25 mm/s
Support material	40 mm/s
Temperature	
Nozzle: first layer and other layers	205
Bed: first layer and other layers	°C
	60
	°C

Ved bruk av følgende innstillinger i PrusaSlicer tok det totalt 191 timer, og 2274,60 gram PLA, å produsere 9 bjelker. Tabellen under viser sliced informasjon, altså informasjon generert av en PrusaSlicer.

Tabell -3 Produksjon tid og mengde

Bjelke:	Vekt (gram)	Tid (timer)	Antall	Total printetid (timer)	Total vekt (gram)
1	360,28	25,92	3	77,76	1080,84
2	183,16	17,93	3	53,79	549,48
3	214,76	19,82	3	59,46	644,28
Sum:				191,01	2274,6

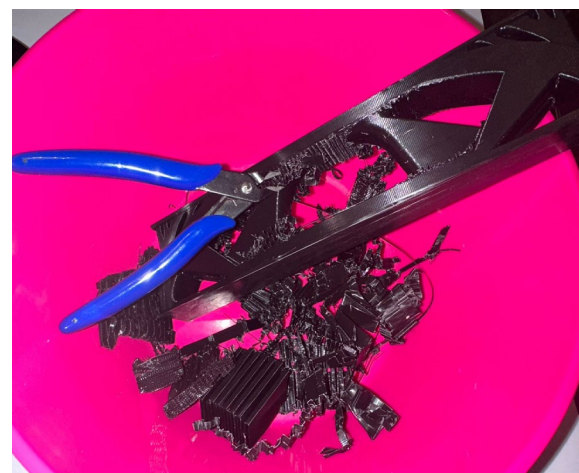
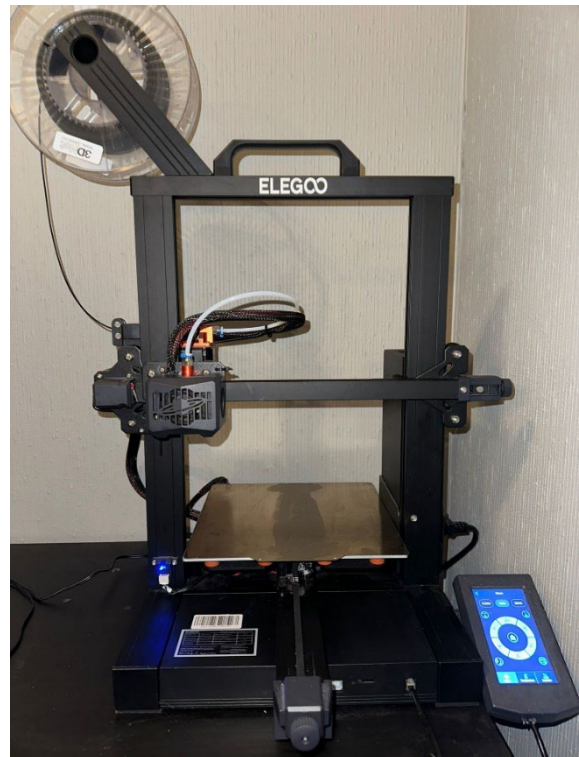
Etter at 3D-modellen var slicet, ble G-koden eksportert til et mikro-SD-kort.



### 11.2.3 3D-printer

#### FDM

3D-printeren som ble benyttet var Elegoo Neptune 3, som er en FDM-printer med et byggevolum på 220x220x280 mm, som. En illustrasjon av 3D-printeren finnes i Figur x. Før utskriften ble satt i gang, var det nødvendig med noen forberdesler. Byggeplaten som ble brukt, var baksiden av en PEI-plate som er helt blank. Det første som ble gjort, var rengjøring byggeplaten. God heft mellom byggeplaten og materialet er avgjørende for en vellykket utskrift. Byggeplaten ble vasket med varmt vann og Zalo. Deretter ble byggeplaten toppvarmet til 50 grader og UHU limstift påført for å sikre best mulig heft. Deretter ble byggeplaten justert. Denne printeren har funksjonalitet for automatisk justering av byggeplaten. Det neste trinnet i prosessen var å sette inn mikro-SD-kortet for å starte utskriften. Da utskriften var satt i gang, overvåket vi nøye det første laget, ettersom de fleste mislykkede utskrifter oppstår i begynnelsen. Etter at utskriften var fullført, fjernet vi støttestrukturene for bjelke 2 og 3. Figur 2 viser bjelke 2 slik den fremstår etter fullført utskrift, mens figur 3 illustrerer hvordan støttestrukturene blir fjernet. Det mest praktiske er å bruke en tang for denne oppgaven, men siden dette kan være tidkrevende, er det en fordel å minimere bruken av støttestrukturer for å spare både tid og materiale. Etter at støttestrukturene var fjernet, ble bjelkene veid.



Figur -7 FDM 3D-printing prosess

## SLS

Produksjonen av bjelkene med SLS ble utført hos 3D-net. Som nevnt tidligere, har vi bare fått produsert bjelke 1 og 2, og to av hver. Ideelt sett burde alle bjelkene vært produsert alle bjelkene og tre av hver. Printereren som ble brukt var Formlabs Fuse 1+, og materialet som ble brukt, var Formlabs nylon 12-pulver. Utskriftene måtte etterbehandles, og dette ble gjort ved bruk av Formlabs Sift, en etterbehandlingsstasjon som fjerner overflødig pulver. I tillegg ble delene glassblåst i etterkant for å fjerne mesteparten av pulveret. I motsetning til FDM-printing og slicing er det færre parametere man kan justere på i slicing-programmet for SLS. Det er verdt å merke seg at bjelkene også er massive innvendig. Vi mottok også et teknisk datablad som blant annet viser de mekaniske egenskapene. Figur x og x viser utstyret som ble brukt. Maskinen til venstre er formlabs fuse 1+ og etterbehandling stasjonen er maskinen til høyre. Til slutt har vi figur x som viser bjelkene importert i slicer programvaren.



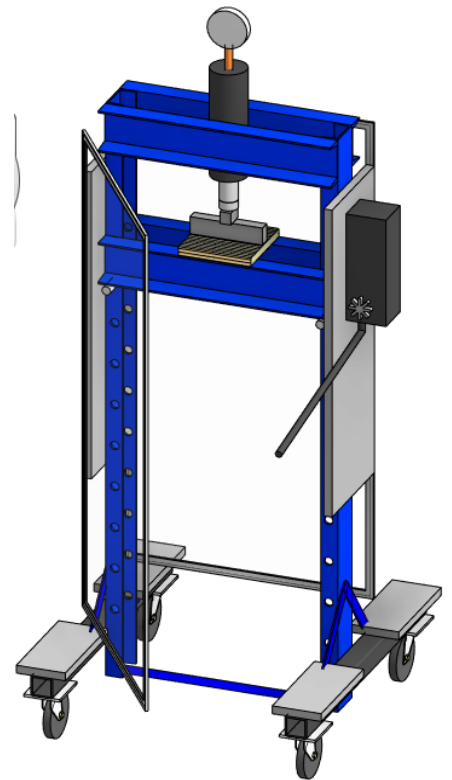
Figur -8 SLS printermaskin

## 11.2.4 Gjennomføringsmetode av Lab

### Oppsett av forsøk

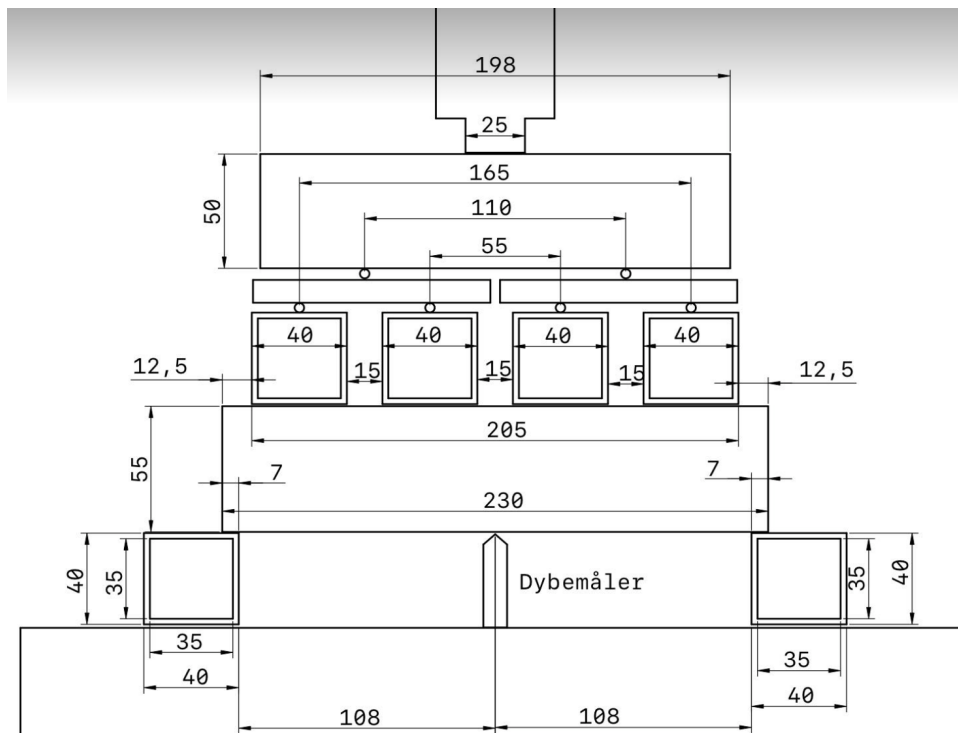
.Bjelkene ble plassert 7 mm inn fra begge sider, som resulterer i en spennvidde på 216 mm. Bjelken er optimalisert for en jevnt fordelt flatelast, som er det vi ønsker å teste. Dette har vært en utfordring, men vi har satt opp forsøket slik det er fremvist i figur 10,

Under utførelsen av forsøket benyttet vi en manuell hydraulisk trykkpresse for å gjennomføre prøvene. Vi opprettholdt samme oppsett og betingelser for å sikre at resultatene kunne sammenlignes pålitelig. For å måle forskyvningene på bestemte punkter brukte vi en dybdemåler. For å ivareta sikkerheten og ha dokumentasjon av forsøket, ble hele prosessen filmet. Dette sikret at vi hadde en grundig og pålitelig registrering av forsøket.



Figur -9 Hydraulisk verkstedpress

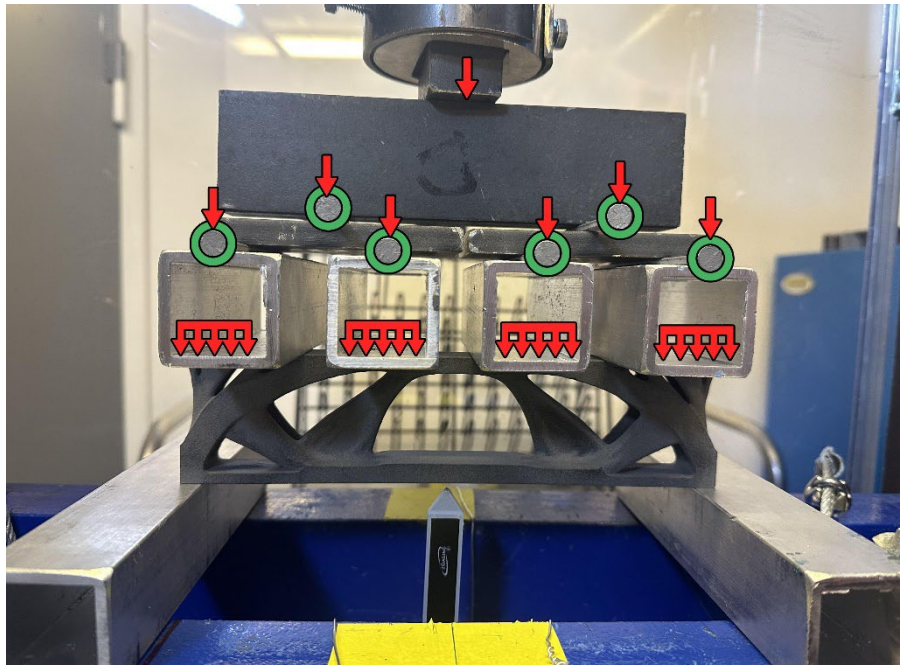
Aller først blir kraften påført en stiv bjelke. Denne bjelken fordeler belastningen jevnt til to plater. Overføringen mellom bjelken og platene skjer ved hjelp av leggende spiker, som



Figur -10 Oppsett av presse forsøk



fungerer som ledd. Deretter fordeles kraften fra platene til fire separate klosser, også dette ved hjelp av spiker. Oppsettet er utformet slik at spikerne fungerer som ledd. Dersom det oppstår ujevnheter under forsøket, kan systemet tilpasse seg for å opprettholde en jevn fordeling av belastningen.



Figur -11 bildet fra lab Kraft fordeling

Den samme metoden for kraftfordeling ble anvendt på alle prototyper for å sikre sammenlignbarhet av resultater. Før forsøket ble iverksatt, utførte vi tester for å validere effektiviteten av den valgte metoden for kraftfordeling.

To av de 100% optimaliserte prototyper (produsert med SLS-metoden og tre med FDM-metoden) ble veid for å bestemme deres eksakte vekt. Dette brukte vi som en referanse for å bestemme nøyaktigheten av optimaliseringsprosessen for hvert optimalisert element.

Forhold mellom bjelkene regner paser på massen ( $m$ ):

$$R(m) = \frac{m_{TO}}{m_R}$$

$R(m)$  = masse redksjon for optimalisert bjelket ,  
 $m_{TO}$  = Vekt av bjelket ,  $m_R$  = Vekt på refranse bjelket

Hver prototype ble deretter testet for bøyning og vekttoleranse ved hjelp av en manuell hydraulisk maskin. Disse testene ga innsikt i styrken og ytelsen til hver prototype. Dybdemåleren ble brukt til å måle bøyningen.

Alle resultater ble notert med tanke på vekt, forskyvning og bøyning for hvert element.

## 11.3 Resultater og observasjoner

### 11.3.1 Resultat fra Lab :

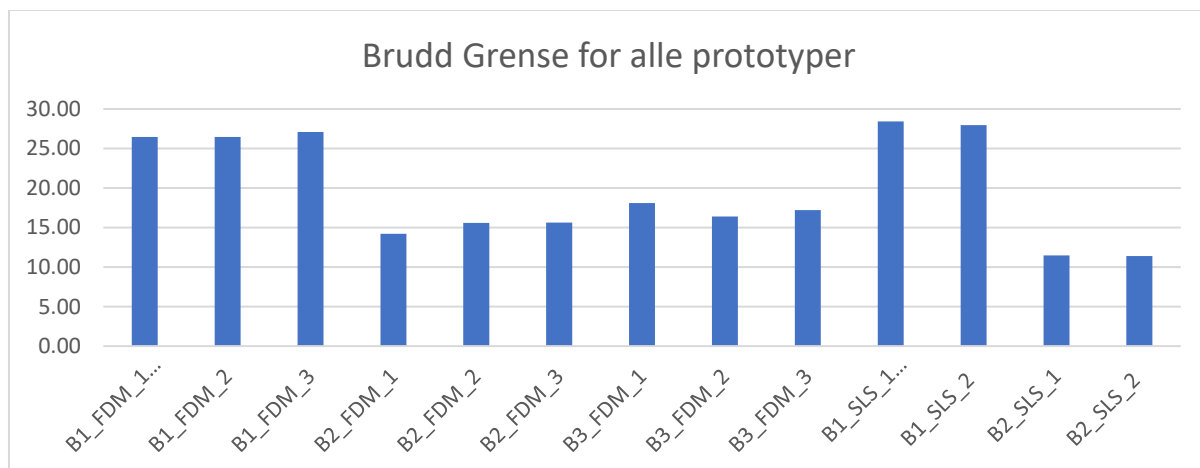
Resultat for forhold på vekt mellom Simulator i Abaqus og forsøk i lab, viser ekstra vekt. Tabell 11-4 viser forhold av masse redaksjon:

Tabell -4 Forhold på volum redaksjon (Abaqus/Lab)

Forsøk Toptimalisering konsept					Dato 05/05/12		
nr	Prototyp nr.	Printtype	Vekt	Dimensjonen	Volum redaksjon Abquas	Volum redaksjon Lab	Etter-behandling
1	B1_FDM_1 (Referanses)	FDM	309	12x50x230	100.0 %	100.0 %	Nei
2	B1_FDM_3	FDM	314.7	12x50x230	100.0 %	101.8 %	Nei
3	B1_FDM_2	FDM	308.1	12x50x230	100.0 %	99.7 %	Nei
4	B2_FDM_1	FDM	147.6	12x50x230	40.0 %	47.8 %	Nei
5	B2_FDM_2	FDM	144.7	12x50x230	40.0 %	46.8 %	Nei
6	B2_FDM_3	FDM	142.6	12x50x230	40.0 %	46.1 %	Nei
7	B3_FDM_1	FDM	174.9	12x50x230	40.0 %	56.6 %	Ja
8	B3_FDM_2	FDM	175.7	12x50x230	40.0 %	56.9 %	Ja
9	B3_FDM_3	FDM	173.3	12x50x230	40.0 %	56.1 %	Ja
10	B1_SLS_1 (Referanses)	SLS	290.8	12x50x230	100.0 %	100.0 %	Nei
11	B1_SLS_2	SLS	290.4	12x50x230	100.0 %	99.9 %	Nei
12	B2_SLS_1	SLS	127.5	12x50x230	40.0 %	43.8 %	Nei
13	B2_SLS_2	SLS	128.5	12x50x230	40.0 %	44.2 %	Nei

Det blitt observert at SLS 3D-Printing gir mer nøyaktighet. De to massive SLS prototyper har 0,1% forskjeller i vekt. Og de andre 40% optimaleste har 0,4% forskjeller i vekt. I forhold til FDM som har mellom 0.8 – 2% for alle forskjeller prototypene.

Etter utføring av prøven fikk vi brudd grense for alle prototyper og forskyvning for dem i fem belastning punkter fra 500-2500. og observert dybdemåle, ved å fyll alle resultater på Excel og plote de fikk vi figur:



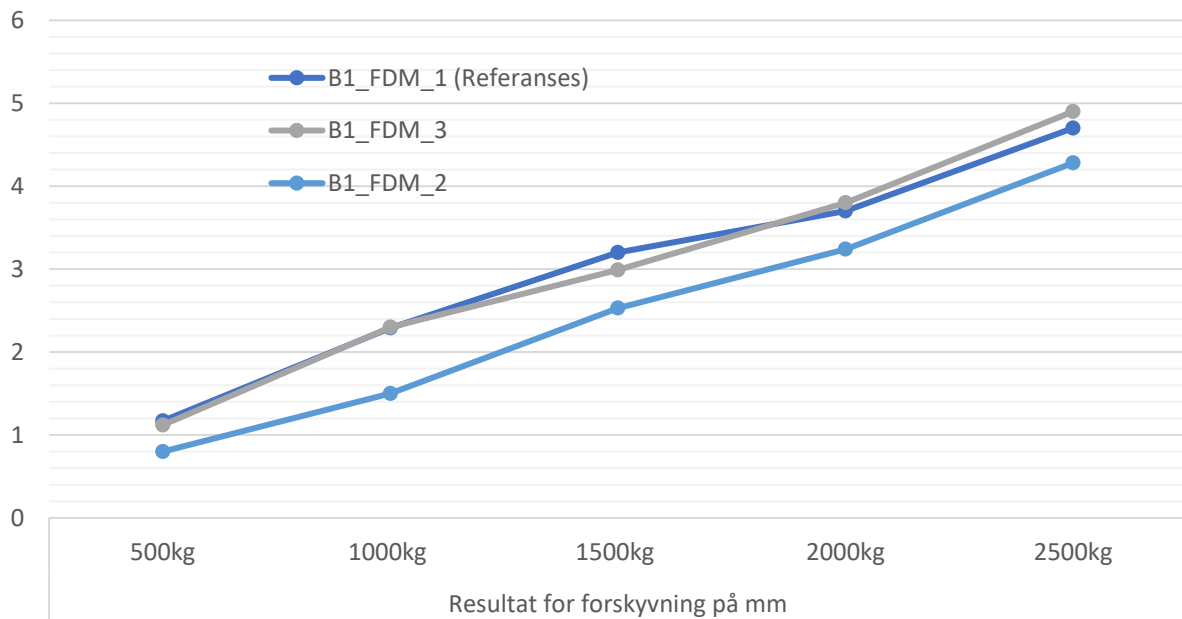
Figur -12 Brud grense for alle bjelkene

Ved å fylle alle resultater av stivhet forsøk på Excel og analyser det får vi denne tabell, som viser forskyvning i flere bestemte punkter:

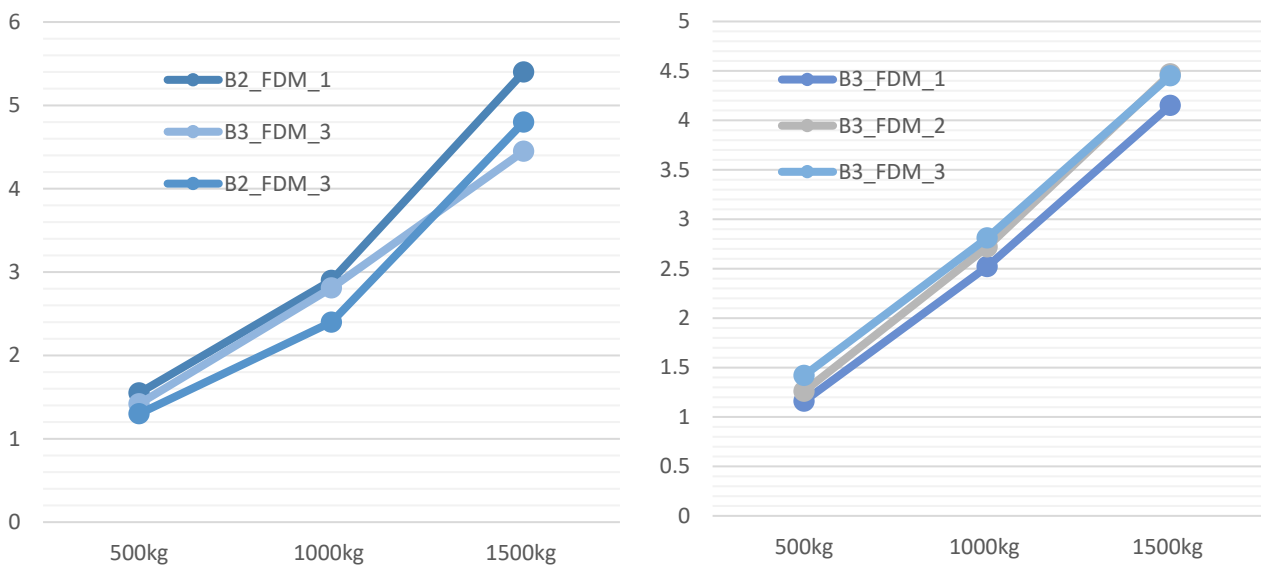
Tabell -5 Forskyvning fra lab forsøk

nr	Prototyp nr.	Resultat for forskyvning på mm						Kraft/vekt
		500kg	1000kg	1500kg	2000kg	2500kg	Brud i KN	N/g
1	B1_FDM_1 (Referanses)	1.17	2.29	3.2	3.7	4.7	26.46	85.63
2	B1_FDM_3	1.12	2.3	2.99	3.8	4.9	26.46	84.08
3	B1_FDM_2	0.8	1.5	2.53	3.24	4.28	27.08	87.89
4	B2_FDM_1	1.55	2.9	5.4			14.20	96.21
5	B2_FDM_2	1.26	2.36	3.9			15.58	107.68
6	B2_FDM_3	1.3	2.4	4.8			15.63	109.61
7	B3_FDM_1	1.16	2.52	4.15			18.09	103.44
8	B3_FDM_2	1.26	2.72	4.47			16.40	93.31
9	B3_FDM_3	1.42	2.81	4.45			17.21	99.30
10	B1_SLS_1 (Referanses)	1.46	2.68	3.88	4.96	6.44	28.42	97.73
11	B1_SLS_2	1.17	2.25	3.34	4.6	5.92	27.96	96.28
12	B2_SLS_1	1.95	3.9				11.47	89.93
13	B2_SLS_2	1.8	3.7				11.40	88.70

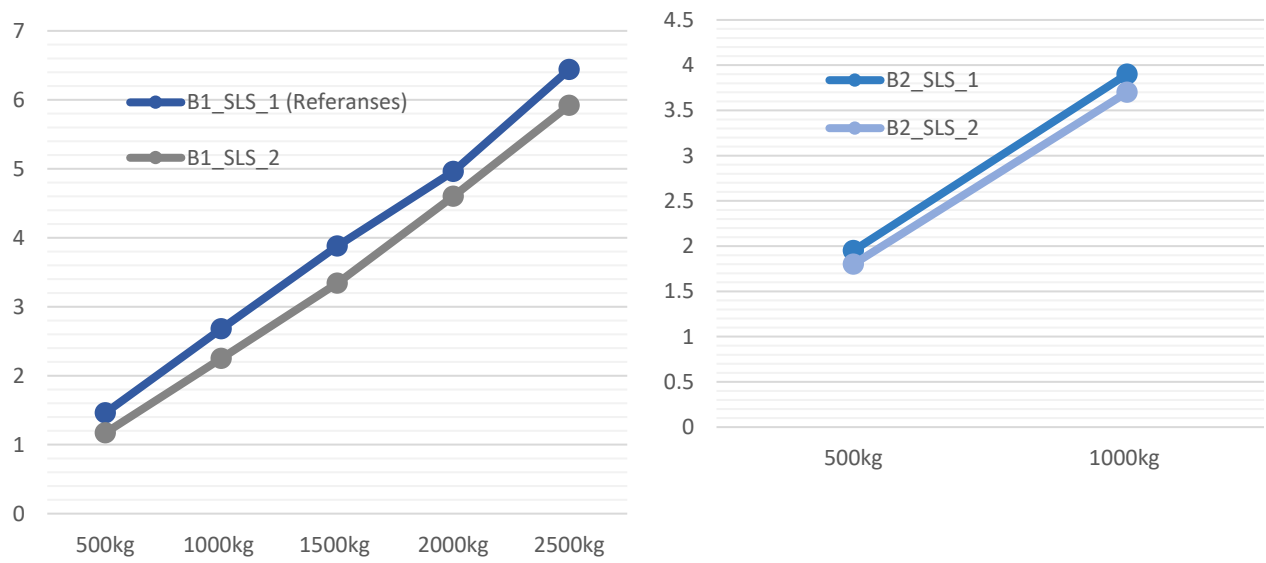
Vider plotter vi hver eneste prototype med like andre prototyper. Figur 32 og 33 viser prototype som er 3D-Printet ved FDM og med sitt brudd punkt



Figur -13 Stivhet forsøk resultatene for FDM 100%



Figur -14 Stivhet forsøk resultatene for topologioptimaliserte prototyper FDM (venstre er 40% RAW og Høyre er 40% videre behandlet)



*Figur -15 Stivhet forsøk resultatene for prototyper SLS (Venstre er 100% and høyre topologioptimalisering 40%)*



*Figur -17 FDM optimalisert bjelke*



*Figur -16 FDM massiv*

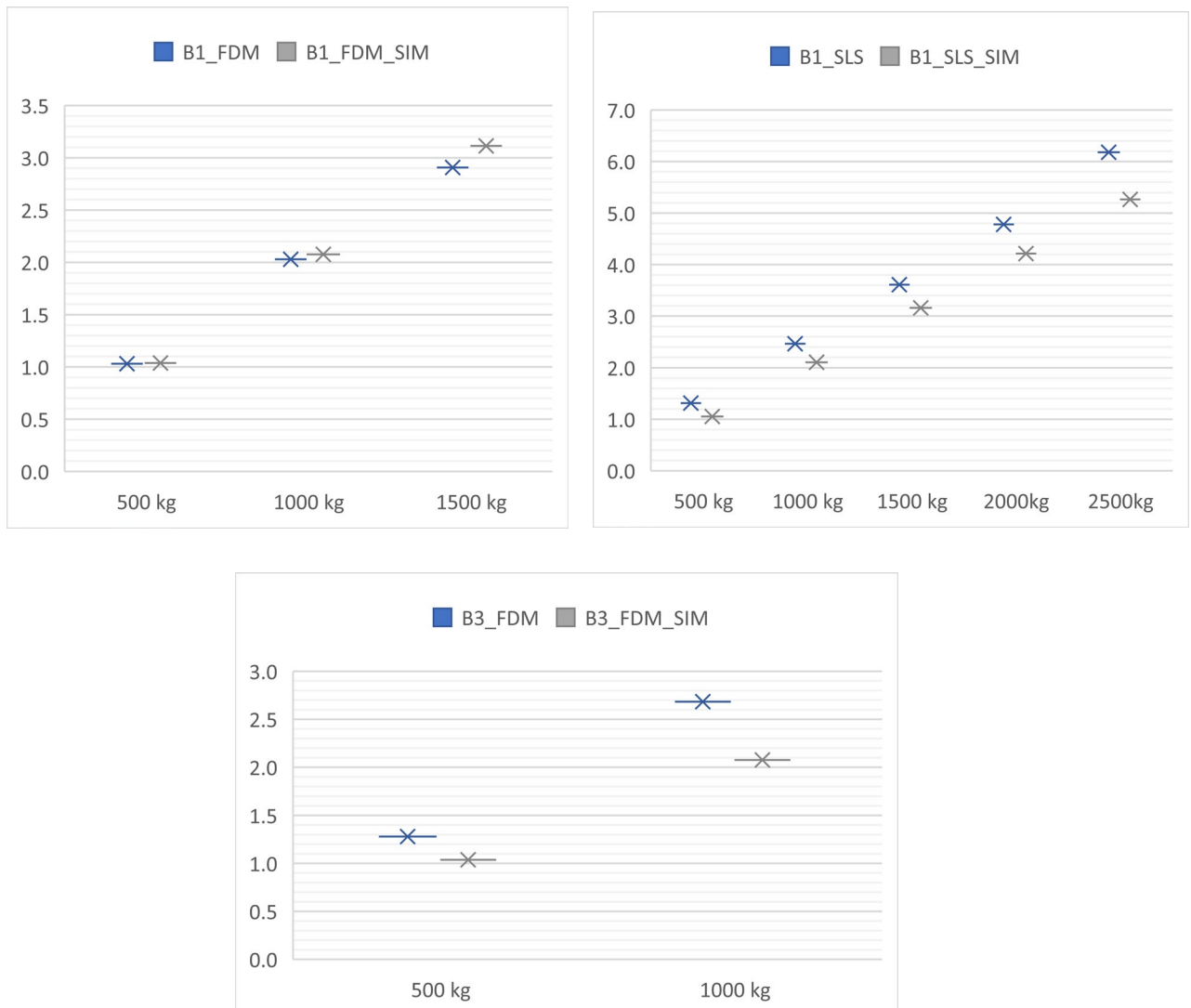


*Figur -18 SLS optimalisert og massiv bjelke*

### 11.3.2 Resultat fra Simulering i Abuqus :

Tabell 11-6 gjennomsnitt forskyvning av lab lab og Abaqus

nr	Prototype nr.	Resultat for forskyvning på mm					
		500 kg	1000 kg	1500 kg	2000kg	2500kg	3000kg
1	B1_FDM	1.0	2.0	2.9	3.6	4.6	7.4
2	B2_FDM	1.4	2.6	4.7			
3	B3_FDM	1.3	2.7	4.4			
4	B1_SLS	1.3	2.5	3.6	4.8	6.2	8.5
5	B2_SLS	1.9	3.8				
6	B1_FDM_SIM	1.038	2.076	3.114			
7	B3_FDM_SIM	1.038	2.076				
8	B1_SLS_SIM	1.053	2.106	3.160	4.214	5.267	



Figur -19 Forhold mellom lab og Abaqus resultat

## 12 Spørreundersøkelsen om bruk av topologioptimalisering i byggebransjen

### 12.1 Innledning

Denne rapporten tar for seg bruken av topologioptimalisering (TO) i den norske byggebransjen. Formålet med oppgaven er å utforske anvendelsesmulighetene for topologioptimalisering (TO) i byggebransjen. I denne undersøkelsen ønsker vi å kartlegge bruken av topologioptimalisering.

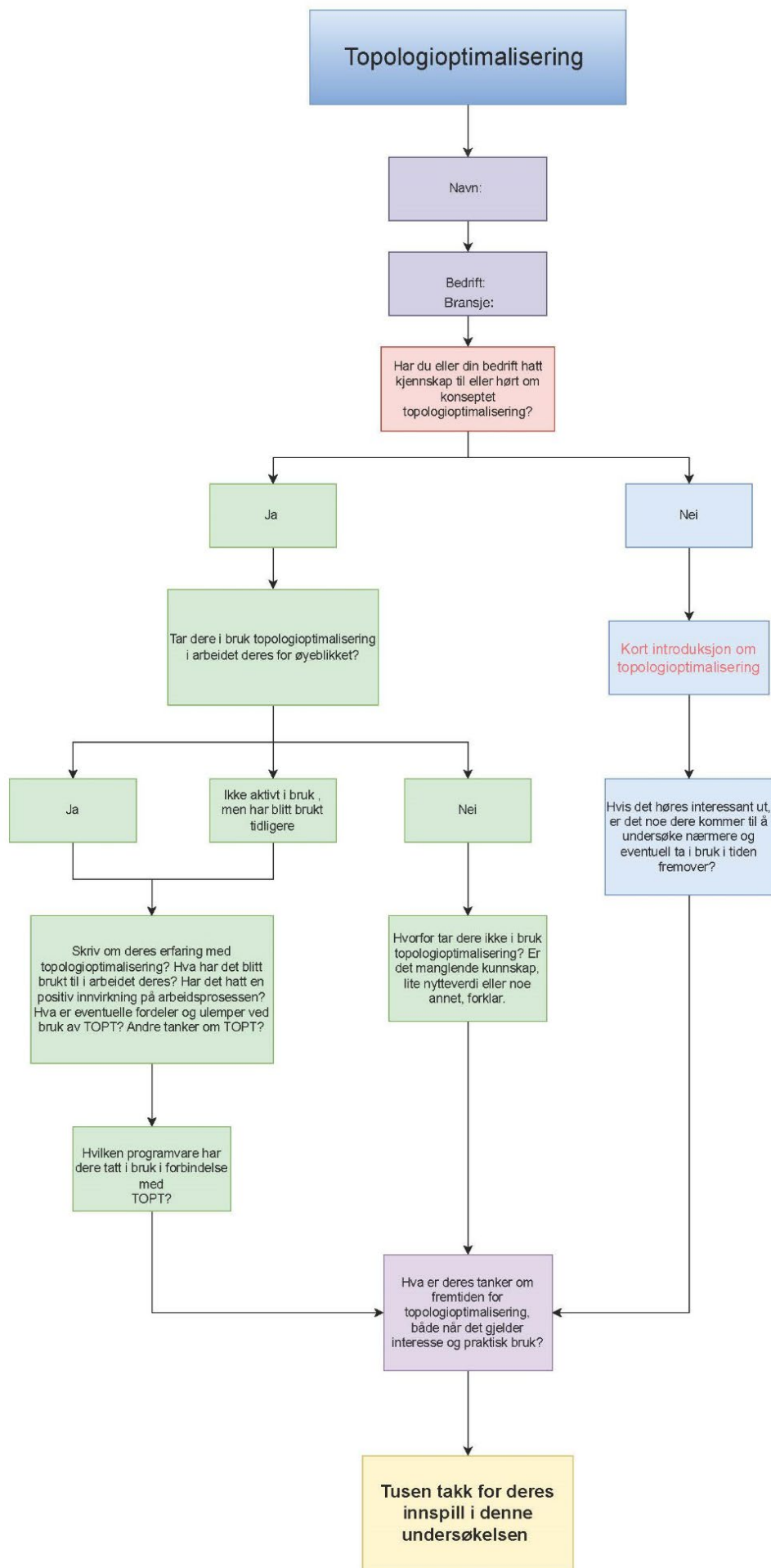
### 12.2 Metode

Metoden som ble brukt i undersøkelsen er kvantitativ og involverte direkte utsendelse av spørreskjemaer til 36 sivilingeniører som jobber i kjente aktører innen bygg- og industribransjen i Norge. Spørreskjemaet var strukturert på en måte som krever at deltakerne svarer på spørsmål knyttet til deres kjennskap om implementering av topologioptimalisering (TO) i sitt arbeid.

Formålet med spørreskjemaet var å sikre at de som var kjent med TO, kunne dele sin kunnskap og erfaring med metoden, samt hvordan de hadde implementert den i sitt arbeid. På den andre siden kunne de som ikke var kjent med TO, dele sine tanker og perspektiver på konseptet og de potensielle mulighetene det kunne bringe. For å strukturere spørreskjemaet og organisere spørsmålene ble det benyttet diagrammer, vist i figur x, som også viser tankeprosessen og utformingen av forsøket. En nettbasert plattform, «nettskjema.no» av UiO, ble brukt til å opprette og administrere selve spørreundersøkelsen. I tillegg ble et Python-skript benyttet til å sende personlige e-poster til deltakerne basert på informasjonen fra en Excel-fil (vedlagt), med e-postadresser og andre relevante detaljer.

Det er viktig å merke seg at metoden har noen begrensninger, for eksempel lav svarprosent og begrenset deltakelse, noe som kan påvirke generaliserbarheten og påliteligheten av resultatene.





Figur -1 logikken bak skjema som brukt i spørreundersøkelsen

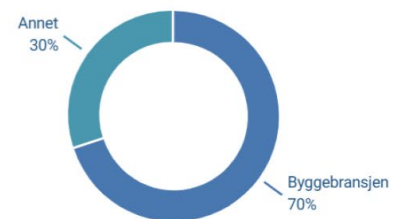
## 12.3 Resultater

Det var ti deltakere fra ulike bedrifter som svarte på spørreskjemaet. Blant disse var syv deltakere fra byggebransjen, mens tre deltakere tilhørte forskning og teknologiutvikling. Det er viktig å merke seg at antall deltakere er begrenset, og derfor kan det være utfordrende å generalisere funnene og trekke konklusjoner.

### Bransje :

Antall svar: 10

Svar	Antall	% av svar	
Annet	3	30%	30%
Byggebransjen	7	70%	70%

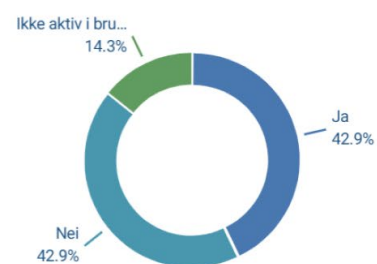


Blant deltakerne hadde syv kjennskap til topologioptimalisering (TO), som kan indikere at bevisstheten om TO er til stede i bransjen. Imidlertid svarte kun tre deltakere at de aktivt bruker TO i sitt arbeid, mens fire deltakere ikke bruker det per i dag. Årsakene til manglende bruk av TO kan variere og deltakerne nevnte faktorer som manglende kunnskap, begrenset nytteverdi og begrensninger knyttet til byggbarhet og spesifikke konstruksjonstyper. De som benytter seg av TO i sitt arbeid, rapporterte positive resultater og fordeler, spesielt innen designoptimalisering for additiv tilvirkning. Redusert materialbruk og forbedret styrke-til-vekt-forhold ble fremhevet som viktige fordeler ved bruk av TO i byggebransjen. Når angår programvare, ble det oppgitt at nTopology og Fusion360 er de viktigste verktøyene som benyttes i forbindelse med TO.

### Tar dere i bruk topologioptimalisering i arbeidet deres for øyeblikket?

Antall svar: 7

Svar	Antall	% av svar	
Nei	3	42.9%	42.9%
Ikke aktiv i bruk, men har blitt brukt	1	14.3%	14.3%
Ja	3	42.9%	42.9%



Selv om resultatene gir en begrenset innsikt i bruken og oppfatningen av TO i byggebransjen, er det klart at det både er fordeler og begrensninger knyttet til bruken av TO. Det blir nevnt de fordelene som inkluderer forbedret ytelse og reduksjon i materialkostnader, spesielt innenfor additiv tilvirkning. Begrensningene omhandler manglende kunnskap, begrenset nytteverdi i visse tilfeller og utfordringer knyttet til byggbarhet og konstruksjonstyper.

**Hvorfor tar dere ikke i bruk topologioptimalisering? Er det manglende kunnskap, liten nytteverdi eller noe annet, forklar.**

- Manglende kunnskap. Ikke modne løsninger. Konservativ kultur.
- Liten kunnskap og noe begrenset nytteverdi, da byggbarhet trumfer mye optimalisering av konstruksjonen. Type konstruksjoner spiller også inn. Mye av konstruksjonstypene vi jobber med er velkjent og utformes basert på erfaring for å finne en optimal form. Regelverk vil også være en begrensning for optimal form da funksjonskrav må tilfredsstilles.
- Resultatet af topologioptimering er meget komplekse stukturer, som byggebransjen ikke er klar til at fremstille endnu. Det vil således blive samlet økonomisk meget dyrere, selvom materialemængden kan reduceres. Desuden tager moderne topologioptimeringsmetoder endnu ikke højde for alle effekter i samme model, såsom stabilitet, utmattelse osv., hvilket gør at resultaterne ikke som udgangspunkt kan bruges direkte.

En av årsakene til at deltakere ikke deltok i spørreundersøkelsen, kan tenkes å være manglende kunnskap om topologioptimalisering. Dette kan ha redusert motivasjonen deres til å delta i undersøkelsen. Det ser ut til at noen av deltakerne ikke var kjent med konseptet eller hadde begrenset kunnskap om det. I tillegg mottok vi to svar på e-post som indikerte at TO ikke var relevant for deres interesseområde, og derfor valgte å avstå fra deltagelse.

<p>Det er ikke ofte du mottar e-post fra <a href="mailto:fredrik.hilding@rejlers.no">fredrik.hilding@rejlers.no</a>. <a href="#">Finn ut hvorfor dette er viktig.</a></p> <p>Hei Maad,</p> <p>Vi har kikket litt på henvendelsen din.</p> <p>Vi er dessverre ikke i stand til å svare. Dette ligger litt utenfor det arbeidsområdet vi er engasjert i.</p> <p>Lykke til med undersøkelsen</p> <p>Kind regards – Med vennlig hilsen</p>	<p>Vi er mest relatert til anleggsbransjen og ikke bygge bransjen så dette er ikke relevant for oss.</p> <p>Mvh/Best regards</p>
--	--

For å få et mer representativt bilde og en bedre forståelse av bruken og oppfatningen av TO i byggebransjen, kan det være nødvendig å utføre en bredere og mer omfattende undersøkelse med større deltakelse.

## 13 Diskusjon

### 13.1 Kartlegge bruken av TO i byggebransjen

Verdien av TO er påvist i en rekke byggeprosjekter, blant annet, The Gherkin, Qatar National Convention Centre og Akutagawa River Side Office Building. TO gir ingeniører kapasiteten til å utforske forskjellige designalternativer og oppdage de mest effektive løsningene for prosjekter. Dette kan bidra til å minimere materialbruk, samtidig som styrke og stivhet i byggkonstruksjoner økes. TO har spesielt bevist sin effektivitet innen områder som armeringskonfigurasjoner og 3D-printing av betongelementer. En fascinerende utvikling innenfor TO er implementeringen av 3D-printing. Denne teknologien har åpnet dører for nye muligheter og utfordringer når det gjelder å utøve TO i praksis. Det har blitt observert tilfeller der 3D-printing er brukt for å lage en form som deretter kan støpes, eller enda mer imponerende, direkte 3D-printing av betong eller stål for selve konstruksjonselementene. Dette illustrerer en voksende interesse og eksperimentering innen dette området.

TO gir en metode for å designe bygningsstrukturer som er effektive i materialbruk. Dette kan bidra til å kutte kostnader for byggeprosjekter, ved å redusere behovet for kostbare materialer. I tillegg kan TO potensielt redusere miljøpåvirkningen fra byggebransjen, som for tiden står for en betydelig andel av verdens CO<sub>2</sub>-utslipp. TO kan også forbedre estetikken til bygninger ved å tillate mer kreativt design.

Det er imidlertid noen utfordringer forbundet med bruk av TO. Først og fremst kan TO resultere i design som er mer utfordrende å produsere enn med tradisjonelle produksjonsteknikker. Dette kan bety en økning i behovet for mer avanserte, og potensielt dyrere, produksjonsmetoder som 3D-printing. Videre kan implementering av nye og innovative design møte tekniske og juridiske hindringer, særlig hvis de står i motsetning til å etablere standarder. Dessuten kan TO kreve sofistikert programvare og høyt kvalifiserte ingeniører, noe som kan øke kostnadene forbundet med implementeringen av denne teknikken. For at TO skal kunne utnytte sitt fulle potensial, må eksisterende utfordringer overvinnes. Dette kan kreve ytterligere forskning og standarder, samt forbedret kunnskap og opplæring for ingeniører. Selv om interessen for TO øker i byggebransjen, kan det være behov for større kunnskap og bevissthet om metoden i Norge.

Når det gjelder programverktøy, ble det nevnt flere alternativer som benyttes innenfor topologioptimalisering, inkludert Abqvas Fusion 360, Altair, ANSYS og nTopology. Det er imidlertid interessant å legge merke til at mange større prosjekter har utviklet sine egne koder og skripten for å tilpasse metoden til sine spesifikke behov. Dette viser at det er rom for

tilpassede løsninger og at det finnes en vilje til å utforske nye tilnærminger innenfor topologioptimalisering.

## 13.2 Topologioptimalisering i Norge: diskusjon for spørreundersøkelse

Spørreundersøkelsen har noen begrensninger som må tas i betraktning når man vurderer resultatene og trekker konklusjoner. En av hovedbegrensningene er den lave svarprosenten og begrenset deltakelse fra bedriftene som ble kontaktet. Med bare ni deltakere utgjør dette kun 30 prosent av det totale antallet bedrifter som ble kontaktet. Derfor kan resultatene være skjeve og ikke nødvendigvis representere bransjens synspunkter og erfaringer som helhet.

Til tross for disse begrensningene gir deltakerne likevel noen indikasjoner på bruken av topologioptimalisering (TO) i deres arbeid og deres oppfatninger om metoden. Det er positivt å merke seg at flere av deltakerne hadde kjennskap til TO, noe som tyder på at bevisstheten om metoden er til stede i bransjen. Dette kan indikere at TO anerkjennes som en relevant tilnærming i byggebransjen, selv om bruken av metoden kan være begrenset per i dag. På den andre siden ble det også nevnt at noen bedrifter ikke bruker TO i sitt arbeid. Dette kan skyldes manglende kunnskap om metoden og dens potensielle fordeler. Det kan være behov for mer informasjon og opplæring for å øke kunnskapsnivået om TO og inspirere bedriftene til å ta i bruk metoden. Det er viktig å skape bevissthet om TO og demonstrere hvordan det kan forbedre arbeidsprosessene og gi fordeler som redusert materialbruk og forbedret ytelse.

Videre ble det identifisert andre begrensninger knyttet til TO, inkludert utfordringer knyttet til byggebarhet, spesifikke konstruksjonstyper og konformitet med funksjonskrav og regelverk. Dette indikerer at implementeringen av TO i byggebransjen krever tilpasninger og løsninger for å ta hensyn til slike begrensninger. Det er viktig å utvikle metoder og verktøy som tar høyde for disse faktorene, for å sikre at TO kan brukes effektivt og trygt i ulike byggeprosjekter. For å få et mer fullstendig og representativt bilde av bruken og oppfatningen av TO i byggebransjen, vil det være nødvendig med en bredere og mer omfattende undersøkelse og med større deltakelse. En slik undersøkelse vil bidra til å samle flere perspektiver og erfaringer, og dermed gi mer pålitelige og generaliserbare resultater ved bruk av TO i bransjen.

Samlet sett viser denne spørreundersøkelsen at det er både interesse og begrensninger knyttet til bruken av topologioptimalisering i byggebransjen. Det er behov for mer kunnskap, bevisstgjøring og opplæring for å øke bruken av metoden, samtidig som det må tas hensyn til utfordringer knyttet til byggebarhet og konstruksjonstyper. Med riktig tilnærming og tilpasninger kan TO bli et verdifullt verktøy for å forbedre effektiviteten og bærekraften i byggebransjen.

## 14 Konklusjon

Topologioptimalisering (TO) representerer et skifte i hvordan vi forstår og implementerer design og konstruksjon i byggebransjen. Denne metoden, som fokuserer på å maksimere effektiviteten av materialbruk og finne de mest optimale metodene for materialforedling, har vist seg å være en verdifull ressurs i prosjekter over hele verden. Spesielt har bruken av TO i armeringskonfigurasjoner og 3D-printing av betongelementer demonstrert en høy grad av effektivitet og potensial for videre utvikling.

I Norge har vi sett at bruken av TO fortsatt er i en tidlig fase, men interessen og bevisstheten rundt metoden er tydelig. Det er fortsatt et behov for ytterligere utdanning, informasjon og forskning for å øke kunnskapsnivået og brukervennligheten av TO i bransjen. Dette vil være spesielt viktig for å overvinne de eksisterende utfordringene med TO, som inkluderer produksjonskompleksitet og konformitet med eksisterende standarder. Når det gjelder implementering av TO innen byggebransjen, kan det være mange forskjellige veier å gå. TO kan brukes i alle stadier av byggeprosessen, fra tidlig design og prototyping, til produksjon og konstruksjon. 3D-printing teknologien, for eksempel, gir spennende muligheter for å implementere TO i produksjon av bygningskomponenter. Videre kan TO også brukes i design og konstruksjon av infrastruktur, slik som broer, tunneler og veier.

Utføringen av TO krever en grundig prosess som inkluderer definerings av designproblem, opprettelse av en matematisk modell, bruk av passende TO-programvare og implementering av resultatene gjennom produksjon og testing. Denne prosessen kan være krevende, men gir også mulighet for innovasjon og forbedring av design og konstruksjonsmetoder.

I konklusjon, TO har et stort potensial til å forbedre byggebransjen, spesielt i forhold til effektivitet, bærekraft og kreativ design. Men for å realisere dette potensialet, må det være et fornyet fokus på forskning, utdanning og utvikling av ny teknologi. Vi står på terskelen til en ny tid innen byggebransjen, en tid som kan være preget av økt bruk av TO og andre innovative metoder. Det vil være spennende å se hvordan dette utvikler seg i årene som kommer.

## 15 Videre arbeid

Før fremtidige forsøk kan det være nyttig å investere i mer spesialisert utstyr som er designet for denne typen tester. For eksempel vil bruk av en dedikert bøyingsmåler og utstyr som er i stand til å fordele kraft jevnt, bidra til å gi mer nøyaktige resultater og minimere feilkildene knyttet til utstyret. En annen faktor som kan ha innvirkning på resultatene er kvaliteten og presisjonen til 3D-printeren som brukes til å produsere prototypene. Sørg for at alle prototypene er produsert med samme nøyaktighet for å eliminere eventuelle feilkilder som stammer fra produksjonsprosessen.

Videre kan det være fordelaktig å vurdere testing av større prototyper i fremtiden. Dette vil ikke bare gjøre det lettere å identifisere eventuelle avvik, men det vil også sikre at elementene er plassert korrekt for testing.

Når det gjelder spørreundersøkelser, kan det være fordelaktig å involvere flere deltakere i fremtiden. Dette vil ikke bare gi et bredere perspektiv, men vil også bidra til å minimere skjevhet og gjøre resultatene mer representative. Kanskje det også vil være fordelaktig å inkludere dybdeintervjuer som en del av prosessen, noe som vil gi mulighet til å utforske temaet topologioptimalisering i mer detalj og få en bedre forståelse av hvordan det er anvendt i byggebransjen i Norge.

Videre kan det være verdt å vurdere å forbedre den eksisterende opplæringen og informasjonen som er tilgjengelig om topologioptimalisering. Dette vil bidra til å øke bevisstheten og forståelsen av metoden blant byggebransjen i Norge, og kan potensielt flere bedrifter til å ta i bruk metoden i fremtiden.

Generelt sett vil disse forbedringene bidra til å forbedre kvaliteten på det videre arbeidet med topologioptimalisering, og vil sikre at det er basert på sterke, pålitelige og representative data.



## Referanser

1. Grønmo S. kvantitativ metode Universitetet i Bergen2023 [oppdatert 16. januar 2023,. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/kvantitativ\\_metode](https://snl.no/kvantitativ_metode).
2. Skei HH. litteraturvitenskap Oslo universitet: store norske leksikon; 2021 [oppdatert 29. oktober 2021. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/litteraturvitenskap>.
3. Rozvany GIN. A critical review of established methods of structural topology optimization21 September 2007. Tilgjengelig fra: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-007-0217-0#citeas>.
4. Costa P. THE HISTORY OF THE TOPOLOGY OPTIMISATION  
April 10, 2018. Tilgjengelig fra: <https://phelipecostapde.blogspot.com/2018/04/the-history-of-topology-optimisation.html>.
5. kumar Roy S, Mohanty A. Use of rotary optical encoder for firing detection in a spark ignition engine. Measurement. 2017;98:60-7.
6. Sigmund O, Maute K. Topology optimization approaches. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013;48(6):1031-55.
7. Ponginan R. What is Size, Shape, and Free-Shape Optimization? 2021 [oppdatert September 16, 2021. Tilgjengelig fra: <https://altairuniversity.com/52528-what-is-size-shape-and-free-shape-optimization/#:~:text=Size%20optimization%20is%20widely%20used,choice%2C%20and%20other%20part%20parameters>.
8. Bendsøe MP. Optimal shape design as a material distribution problem. Structural Optimization. 1989;1(4):193-202.
9. Huang X, Li W. A new multi-material topology optimization algorithm and selection of candidate materials. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2021;386:114114.
10. Falck-Ytter H. Materialteknologi. 1 : Grunnlag. Yrkesopplæring1984. Tilgjengelig fra: <https://www.nb.no/items/ebfda4a3be7fab5ce4c0ebd11ffb804?page=35>.
11. Yield Strength Vs Tensile Strength: Fabrication, Sheet Metal; [Tilgjengelig fra: <https://alloys.com/yield-strength-vs-tensile-strength/#:~:text=Yield%20strength%20is%20a%20measurement,then%20tensile%20strength%20is%20tested>.
12. Difference Between Yield Strength and Tensile Strength [oppdatert October 14, 2015. Tilgjengelig fra: <https://pediaa.com/difference-between-yield-strength-and-tensile-strength/>.
13. Helseth LE. Poissons forholdstall Universitetet i Bergen: store norske leksikon; [oppdatert 16. desember 2022. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/Poissons\\_tall](https://snl.no/Poissons_tall).
14. Difference Between Isotropic and Anisotropic Materials [oppdatert 20 Mars 2023. Tilgjengelig fra: <https://www.vedantu.com/chemistry/isotropic-anisotropic>.
15. Damiati L. The difference between anisotropic and isotropic surfaces. [Tilgjengelig fra: [https://www.researchgate.net/figure/The-difference-between-anisotropic-and-isotropic-surfaces-a-Anisotropic-surfaces-have\\_fig1\\_326780343](https://www.researchgate.net/figure/The-difference-between-anisotropic-and-isotropic-surfaces-a-Anisotropic-surfaces-have_fig1_326780343).
16. Bell K. an engineering approach to finite element analysis of linear structural mechanics problems. Trondheim Oslo: Akademika Publishing; 2013.
17. Topology Optimization: Create the best version of your parts! : Online 3D Printing Service; [Tilgjengelig fra: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/topology-optimization/>.
18. Christensen PW, Klarbring A. An introduction to structural optimization: Springer Science & Business Media; 2008.
19. Gu X, He S, Dong Y, Song T. An improved ordered SIMP approach for multiscale concurrent topology optimization with multiple microstructures. Composite Structures. 2022;287:115363.
20. Gao T, Zhang W. Topology optimization involving thermo-elastic stress loads. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010;42(5):725-38.

21. Yaguang Wang ZK. A level set method for shape and topology optimization of coated structures. Science Direct. 2018;574.
22. Tanskanen P. The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2002;191(47):5485-98.
23. Jj K, Tsavdaridis K, Toropov V. Applications of Topology Optimization in Structural Engineering2014.
24. Xie Y, Zuo Z, Huang X, Tang J, Zhao B, Felicetti P. Architecture and Urban Design through Evolutionary Structural Optimisation Algorithms. 2023.
25. Baandrup M, Sigmund O, Polk H, Aage N. Closing the gap towards super-long suspension bridges using computational morphogenesis. Nature Communications. 2020;11(1):2735.
26. Guest J, Moen C. Reinforced Concrete Design with Topology Optimization. Proceedings of the 19th Analysis and Computation Specialty Conference. 2010.
27. StatiCa I. Topology optimization for reinforced concrete. I: FRIDRICH O, red.: ONDREJ FRIDRICH; 2019.
28. Vantuyghem G, De Corte W, Shakour E, Amir O. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. Automation in Construction. 2020;112:103084.
29. Jipa A, Bernhard M, Meibodi M, Dillenburger B. 3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs2016.
30. BRØTAN V. Additiv produksjon kan gi mer bærekraftige produkter med mindre avfall. SINTEFblogg. 2021.
31. Jarle Sten Olsen HGH. 3D-printing med FDM-teknologi. Nasjonal digital læringsarena (NDLA). 2022.
32. How to design parts for FDM 3D printing. Hubs.
33. Carolo L. What Is a 3D Slicer? – Simply Explained. all3dpcom. 2022.
34. Chakravorty D. 3D Printing Supports – The Ultimate Guide. all3dpcom. 2023.
35. O'Connell J. 3D Printing Infill: The Basics for Perfect Results. all3dpcom. 2022.
36. Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing [Tilgjengelig fra: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>].
37. TopOpt. Interactive 3D TopOpt App. DTU University. 2020.
38. Ansys Discovery Reveals Critical Insights Early in the Design Process 2023 [Tilgjengelig fra: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>].
39. Ameba : Analysis & Simulation, Architecture, Civil Engineering. Food for Rhino. 2022.
40. All3DP. What Is an STL File? – The STL Format Simply Explained. All3DPcom. 2023.
41. PolyNURBS- Quickly create free-form solid geometry. Altair Inspire.
42. Fit -Use the Fit tool to automatically create a new PolyNURBS. Altair Inspire. 2023.
43. ABAQUS Analysis User's Manual. 2021.
44. Creating a geometric restriction in a topology or sizing optimization. 2022.

## **Vedlegger:**

- Vedlegg (1) Kontrakt / fremdriftsplan / timet liste .
- Vedlegg (2) Forsøk dokumentering skjema.
- Vedlegg (3) Excel filet (diagrammer og Tabeller).
- Vedlegg (4) 3D-net teknisk datablad.
- Vedlegg (5) Video dokumentering av forsøk.
- Vedlegg (6) Nylon 12 powder for SLS 3d-printing .
- Vedlegg (7) Rapport nettskjema for spørreundersøkelse.
- Vedlegg (8) Kontakt liste for spørreundersøkelse.
- Vedlegg (9) Automasjon Python skript for kontakt deltaker i spørreundersøkelse.