

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

TOPOLOGIAN OPTIMOINNIN KÄYTETTÄVYYS JATKUVIEN RAKENTEIDEN
SUUNNITTELUSSA

USABILITY OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN DESIGN OF CONTINUOUS
STRUCTURES

Lappeenrannassa 16.6.2021

Anna Valtonen

Tarkastaja TkT Kimmo Kerkkänen

Ohjaaja TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Anna Valtonen

Topologian optimoinnin käytettävyys jatkuvien rakenteiden suunnittelussa

Kandidaatintyö

2021

30 sivua, 11 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja: TkT Kimmo Kerkkänen

Ohjaaja: TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: 3d-tulostus, lisäävä valmistus, rakennesuunnittelu, teräsrakenteet, topologian optimointi, FE-analyysi

Kirjallisuustutkimuksena toteutetun kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää topologian optimoinnin käytettävyyttä mekaanisesti kuormitettujen jatkuvien rakenteiden kuten 3D-tulostettavien osien suunnittelussa.

Työn teoriaosassa käsitellään lyhyesti topologian optimoinnin teoriaa ja perehdytään topologian optimointia hyödyntävän suunnitteluprosessin vaiheisiin. Esimerkkinä topologian optimointiin käytettävästä ohjelmistosta käytetään SolidWorksin Topology Study -työkalua. FE-analyysia hyödyntävä iteratiivis-intuitiivinen suunnittelumenetelmä, joka on yleisin tapa uudenlaisten rakenteiden suunnitteluun, käydään läpi vaihtoehtoisena menetelmänä.

Tulokseksi saatiin tietoa optimointimenetelmistä ja mahdollisuuksista eri menetelmien yhdistämiseen. Löydettiin myös tietoa topologian optimoinnin sovellettavuudesta muihin valmistustekniikoihin kuten valaminen, leikkaus ja lastuava työstö. Saatiin myös esimerkkejä rakennetyypeistä, joihin topologian optimointia hyödynnetään.

Topologian optimoinnin selkeimmäksi eduksi osoittautui materiaalin säästö. Automaattisena iteratiivisena menetelmänä se on myös nopein tapa optimoida rakenteita, edellyttäen ettei tulos vaadi runsasta jälkikäsitelyä.

Selvisi, että kaupallisten ohjelmistojen kuten SolidWorksin taustalta löytyy tyypillisesti FE-menetelmää hyödyntävä SIMP-algoritmi. Näin ollen FE-menetelmän osaamista voidaan hyödyntää topologian optimoinnissa ja siirtyminen topologian optimoinnin ja iteratiivis-intuitiivisen suunnittelumenetelmän välillä on vaivatonta. Yhdeksi tavaksi hyödyntää topologian optimointia osoittautui referenssitopologian selvittäminen, jota käytetään perinteisellä tavalla suunniteltavan kappaleen pohjana.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Anna Valtonen

Usability of topology optimization in design of continuous structures

Bachelor's thesis

2021

30 pages, 11 figures, 3 tables and 1 appendice

Examiner: D.Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Supervisor: D.Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, structural design, steel structures, topology optimization, FEA

The aim of this bachelor's thesis was to examine usability of topology optimization in design of continuous structures subjected to mechanical loading, such as 3D-printed parts. The thesis was conducted as a literature study.

In the theory part, the theoretical background of topology optimization is handled briefly. Then the phases of a topology optimization based design process are studied. The optimization program used as an example is the Topology Study found in SolidWorks. The iterative-intuitive design process that utilizes FEA, that is the traditional way to design new structures, is presented as an optional approach.

As a result, information was obtained about different design methods for optimization and what possibilities there are to move from one method to another during the design process. It was found that the features of the topology optimization program be utilized for different manufacturing methods besides AM, e.g. casting, cutting and machining. Examples were found of the types of structures for which topology optimization is most suitable.

The most obvious advantage of topology optimization was shown to be weight and material reduction. As an automatic iterative method, it is also the fastest way to optimize structures, unless a lot of manual post-processing is needed.

Commercial programs like SolidWorks typically use a SIMP optimization algorithm that is based on the finite element method. This makes it possible to utilize skills in FEA in topology optimization and moving from topology optimization to iterative-intuitive design process is effortless. One way to use topology optimization was found to be finding of reference topologies for the common FEA based design process.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	6
1.1	Työn tavoitteet	7
1.2	Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset	7
1.3	Työssä käytetyt tutkimusmenetelmät.....	9
2	TOPOLOGIAN OPTIMOINTI SUUNNITTELUKYÖKÄLUNA	10
2.1	Topologian optimoinnin vaiheet	11
2.1.1	Suunnitteluavaruus	12
2.1.2	Optimointiongelma ja reunaehdot	12
2.1.3	Optimointialgoritmi.....	13
2.1.4	Tulosten muokkaaminen	16
2.2	SolidWorks Topology Study -työkalu	16
2.3	Perinteinen rakenteiden optimointi	19
3	TULOKSET	21
3.1	Suunnitteluprosessi topologian optimoinnissa ja perinteisessä optimoinnissa....	21
3.2	Topologian optimointi eri valmistusmenetelmille	22
3.3	Topologian optimoinnin sovelluskohteet.....	22
4	TULOSTEN ANALYSOINTI	23
4.1	Avaintulokset	23
4.1	Topologian optimointi eri arviointikriteerien valossa	23
4.2	Muita löydöksiä.....	24
4.3	Saavutettujen tulosten arviointi	25
4.2	Kirjallisuustutkimuksen luotettavuuden arviointi.....	26
4.3	Jatkotutkimusaiheet	27
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	29

LIITTEET

Liite I: Topologian optimointialgoritmien vertailutaulukko

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

E	kimmokerroin (N/mm ²)
ρ	tiheys (kg/m ³)
ESO	evolutionary structural optimization
BESO	bidirectional evolutionary structural optimization
FE	finite element
FEA	finite element analysis
SIMP	solid isotropic material with penalization

1 JOHDANTO

Topologian optimointi on materiaalin jakautumisen tai rakenneosien määrän ja niiden välisen sijoittelun optimoimista rakenteessa (Deaton & Grandhi 2013, s. 1; Ribeiro, Bernardo & Andrade 2021, s.1) Kuten rakenteiden optimoinnissa yleensä, topologian optimoinnin tavoite on rakenteen keventäminen tai materiaalin säästäminen (Hernández 1994, s.1; Westerlund 2017). Optimoitavat rakenteet voi jakaa kahden tyyppiin: rakenneosista koostuvat rakenteet ja jatkuvat rakenteet. Rakenneosista koostuva rakenne on esimerkiksi ristikkorakenne, jolle määritetään sauvojen määrä ja näiden liityntä toisiinsa. Jatkuvalle rakenteelle määritetään optimaalinen materiaalin jakautuminen tiettyjen rajojen sisällä, eli missä materiaalia on oltava ja mistä sitä saa poistaa (Ribeiro & al. 2021, s. 1; Rozvany, Zhou & Sigmund 1994, s. 340-341). Hyvin yksinkertaisia rakenteita ja kuormitustilanteita lukuunottamatta topologian optimointiin käytetään laskentaohjelmia (Westerlund 2017). Kuvassa 1 on esimerkki korvakkeen topologian optimoinnista.



Kuva 1. Perinteisillä suunnittelu- ja valmistusmenetelmillä toteutettu korvake (vasemmalla) ja topologiaoptimoituja 3D-tulostettuja korvakkeita. (Samant 2018)

Tässä kandidaatintyössä keskitytään jatkuvien rakenteiden topologian optimointiin. Jatkuvien rakenteiden topologian optimointi liittyy läheisesti metallien 3D-tulostukseen ja muuhun lisäävään valmistukseen. Kotimaisessa mediassa topologian optimointia onkin viime vuosina tuotu esille lähinnä 3D-tulostusta käsittelevissä artikkeleissa. Lisäävän valmistuksen etu muihin valmistustekniikoihin nähden on melkein rajaton mahdollisuus kappaleen muotoiluun (Harju 2017). Uutena teknologiana 3D-tulostukseen on liittynyt ylimitoitettujakin odotuksia siitä, miten se korvaa muut valmistustekniikat. Hyphen

tasoittumisen jälkeen teknologian kehittäminen kuitenkin jatkuu ja markkinat ovat taas kasvussa (Stewart 2018). Suomessa yritysten kiinnostus näkyy siinä, että aiheeseen liittyville koulutuksille on kysyntää. (mm. Harju 2017) 3D-tulostettuja, optimoituja osia käytetään maailmalla eniten lentokone- ja autoteollisuudessa. Vaikka 3D-tulostus antaa laajimmat mahdollisuudet optimointiin, kustannussäästöjä voi saavuttaa myös perinteisillä valmistusmenetelmillä, kuten valamisella ja lastuavalla työstöllä. (Liu & Ma 2016; Luotola 2017)

Materiaalin säästöä tavoitellaan myös ekologiselta kannalta. Materiaalitehokkuus määritellään ympäristöhallinnon verkkosivuilla siten, että “vähemmästä tuotetaan enemmän ympäristöä säästään”. Materiaalitehokkuudessa huomioidaan tuotteen koko elinkaari ja materiaalin kulumisen lisäksi energian säästäminen sekä -muut ympäristövaikutukset. (Ymparisto.fi 2014) Teknologiateollisuus ry. on pyrkinyt edistämään materiaalitehokkuutta vuoden 2010 ympäristölinjauksesta lähtien (Kilpailukykyä ja uutta liiketoimintaa materiaalitehokkuudesta 2013, s. 3). Topologian optimointi paitsi pienentää raaka-aineen kulutusta, vähentää kuljetusten tarvetta. 3D-tulostettujen varaosien tuottaminen on myös ympäristöystävällistä, ja materiaalitehokkuuden lisäksi se toimii osana laajempaa kiertotalousajattelua (Kiertotalouden keinovalikoima käyttöön 2016, s. 9).

1.1 Työn tavoitteet

Kandidaatintyön tavoite on selvittää topologian optimoinnin käytettävyyttä jatkuvien rakenteiden suunnittelussa. Jatkuvaksi rakenteeksi tässä tapauksessa ymmärretään myös kuvan 1 kaltainen levyistä hitsattu korvake. Jatkuvan rakenteen vastakohtana on monista samankaltaisista rakenneosista kuten sauvoista koottava rakenne. Optimoinnin teorian näkökulmasta vastaavat termit ovat jatkumon optimointi ja diskreetti optimointi (Ribeiro & al. 2021, s. 12).

1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymykset ovat:

- Miten topologian optimointia hyödyntävä suunnitteluprosessi eroaa muista tavoista optimoida mekaanisesti kuormitettua rakennetta lujuuden, jäykkyyden ja massan suhteen?

- Mitä etuja tai haittapuolia topologian optimointiin liittyy muihin menetelmiin nähden?
- Minkälaisiin kohteisiin topologian optimointi sopii?

Taulukossa 1 on esitetty arviointikriteerejä, joilla eri optimointimenetelmiä voi verrata. Kvantitatiivisilla, yksikäsitteisillä, toistettavilla kriteereillä tarkoitetaan sellaisia, joita voi mitata optimoimalla ja analysoimalla tiettyä rakennetta tietyillä menetelmillä. Arvot selviävät datasta ja kertovat optimoinnin onnistumisesta. Muut kriteerit ovat ulkoisia tekijöitä, joita ei samalla tavalla voida mitata yksikäsitteisesti ja toistettavasti, mutta erot niissä saattavat vaikuttaa menetelmän valintaan. Muut kriteerit jakautuvat kvantitatiivisiin ja kvalitatiivisiin.

Taulukko 1. Arviointikriteerejä eri optimointimenetelmille.

Kvantitatiivinen, yksikäsitteinen, toistettava	Muu kvantitatiivinen	Kvalitatiivinen
<ul style="list-style-type: none"> • massa (tilavuus) • lujuus 	<ul style="list-style-type: none"> • kustannukset • aika 	<ul style="list-style-type: none"> • menetelmän helppokäyttöisyys

Arviointikriteerien pohjalta muodostuu tarkentavia tutkimuskysymyksiä:

- Kuinka paljon topologian optimointi säästää materiaalia verrattuna muihin menetelmiin?
- Ovatko topologian optimoinnilla suunnitellut kappaleet luotettavia lujuuden kannalta?
- Kuinka topologian optimointi vertautuu perinteiseen suunnitteluun kustannusten, nopeuden tai tarvittavan osaamisen kannalta?

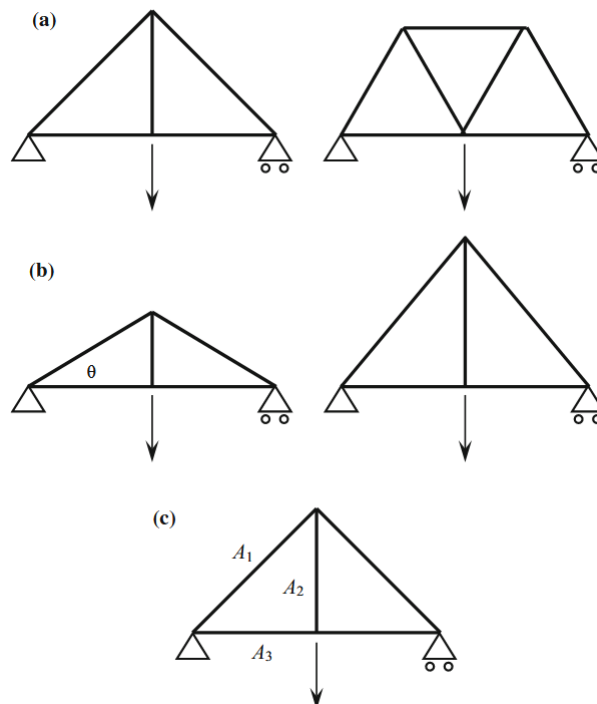
Työn näkökulma on konetekniikan ja teknisen rakennesuunnittelun. Topologian optimoinnin laskennallista puolta käsitellään työn teoriaosassa vain perusteiden verran. Työ keskittyy jatkuvien rakenteiden optimointiin, joten ristikkorakenteita ei käsitellä. Esimerkkiohjelmistona toimii SolidWorks, koska se oli saatavilla ja laajalti käytettynä kaupallisena suunnitteluohjelmistona sopii hyvin esimerkiksi.

1.3 Työssä käytetyt tutkimusmenetelmät

Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena. Kirjallisuuskatsauksen aineisto koostuu kirjoista ja tutkimusartikkeleista. Tieteellistä aineistoa haettiin tiedekirjastojen painetuista lähteistä, LUT-tiedekirjaston aineistotietokannasta, joka kattaa verkkoaineistoa monista eri lähteistä, ja Google Scholar -haun kautta. Lisäksi hyödynnettiin aiempien opinnäytetöiden lähdeluetteloita.

2 TOPOLOGIAN OPTIMOINTI SUUNNITTELUTYÖKALUNA

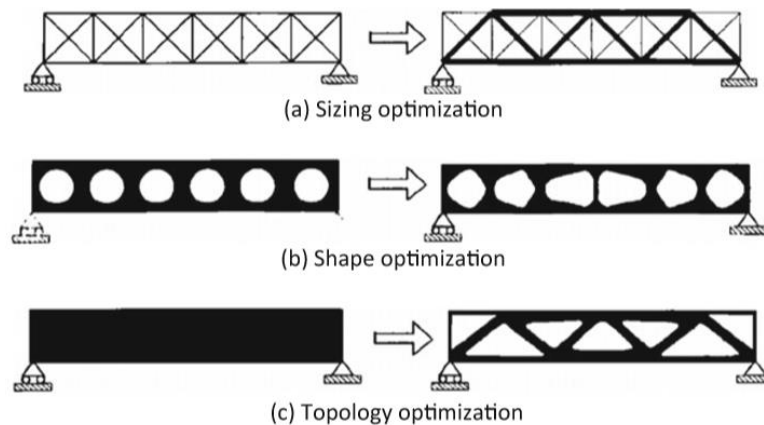
Rakenteen optimointiongelmat jaetaan vakiintuneimman käytännön mukaan kolmeen osaluueeseen: topologian optimointi, muodon optimointi ja mitoituksen optimointi (*topology, shape and size optimization*). Jakoa on alun perin käytetty rakenneosista koostuvien rakenteiden kuten ristikkojen suunnittelussa, ja vaikka niitä ei käsitellä tässä työssä, periaate on helpoin selittää niiden avulla. Rakenteen optimointiongelmien jaottelu ristikkorakenteelle on esitetty kuvassa 2. Topologiaa (a) optimoidessa optimoidaan ristikon liitoskohtien määrä ja sauvojen sijoittelu. Topologisesti erilaisia rakenteita ei voi saada samanlaisiksi mittoja muuttelemalla, vaan sauvojen (tai reikien) määrä pitäisi muuttua. Muodon (b) optimoinnissa määritetään rakenteen mittasuhteet ja mitoituksen (c) optimoinnissa sauvojen halkaisijat. (Ribeiro, Bernardo & Andrade 2021, s. 1 ja 11; Rothwell 2017, s.19-21)



Kuva 2. Optimointiongelmien jaottelu ristikkorakenteelle: topologian optimointi (a), muodon optimointi (b) ja mitoituksen optimointi (c). (Rothwell 2017, s. 20)

3D-tulostettavien kappaleiden suunnittelun yhteydessä Yang et al. määrittelevät topologian optimoinnin eri tavalla: tarkoitus on selvittää optimaalinen materiaalin jakautuminen tietyssä

suunnitteluavaruudessa (*design space*). Topologian optimointi jatkuvalle rakenteelle tarkoittaaakin *yleistä muodon optimointia*, joka ei rajoitu vain topologiaan (Rozvany et al. 1994, s. 341). Kuvassa 3 on esitetty optimointiongelmien jaottelu tällä tavalla. Optimointitavan nimi kuvaa ylimmän tason ongelmaa, joka ratkaistaan. Mitoituksen optimoinnissa (a) topologia ja muoto ovat ennalta määrättyjä, joten optimoidaan vain osien halkaisijat. Muodon optimoinnissa (b) topologia on annettu, mutta reikien muotoa ja sitä myötä rakenteen paksuutta eri kohdissa muutetaan. Topologian optimoinnissa (c) ratkeaa samalla sekä reikien määrä että niiden muoto. Esimerkissä ulkoiset mitat pysyvät samoina, mutta muodon ja topologian optimoinnissa niin ei välttämättä ole. (Yang, Hsu, Baughman, Godfrey, Medina, Menon & Wiener 2017, s. 122)



Kuva 3. Optimointiongelmien jaottelu kappaleelle: (a) mitoituksen optimointi (b) muodon optimointi (c) topologian optimointi. (Yang et al. 2017, s. 123)

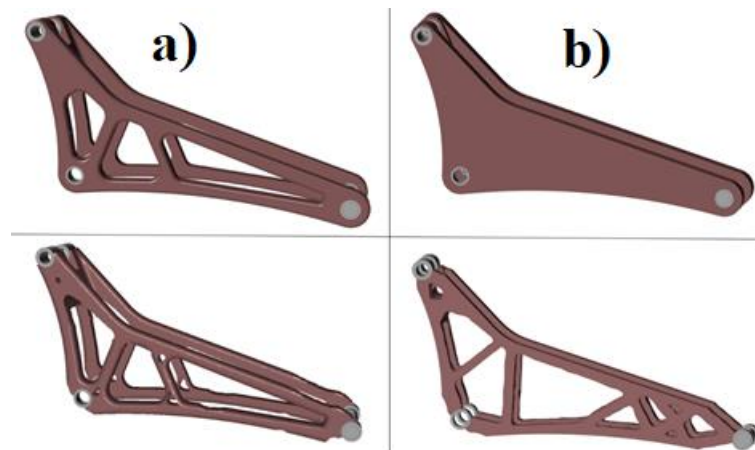
Topologian optimointi jatkuvalle kappaleelle, jossa materiaalin määrä on pieni verrattua koko tilavuuteen, tuottaa ristikkomaisen rakenteen, toteavat mm. Bendsøe ja Sigmund (2003, s. viii). Myös ristikkorakenteita voidaan optimoida algoritmeilla, mutta lähtötilanne on erilainen. Jatkuvan kappaleen optimoinnissa määritellään, onko tietyssä kohdassa materiaalia vai ei. Rakenne voidaan jakaa esimerkiksi FE-menetelmällä. Ristikoille lähtökohtana on mahdollisten liitospisteiden joukko ja tarkoitus on määritellä, onko pisteiden välillä liitosta. (Bendsøe & Sigmund 2003, s. viii)

2.1 Topologian optimoinnin vaiheet

Luvussa selvitetään topologian optimoinnin vaiheet jatkuvalle rakenteelle. Samalla käsitellään taustalla olevaa teoriaa.

2.1.1 Suunnitteluavaruus

Suunnitteluavaruus määritellään asettamalla rajat, joiden sisällä materiaalia voi olla: ulkomitat, mahdolliset reiät ym. Suunnitteluavaruuden valinnalla on vaikutus optimoinnin lopputulokseen. Yleensä suunnitteluavaruus perustuu suunnittelijan karkeaan arvioon (Chen & Lin 2000, s. 1-2). Vanhaa designia voi myös käyttää optimoinnin perustana, kunhan välttää yleiset virheet. Kuvassa 4 on esimerkkinä maastopolkupyörän takajousituksen osa, jota haluttiin keventää. Ensin optimoitiin poistamalla materiaalia nykyisestä mallista, jolloin suunnitteluavaruutena oli mallin ääriveriivat. Suunnitteluavaruutta muokkaamalla osasta saatiin selvästi jäykempi, vaikka materiaalia poistettiin saman verran. (Mudigonda, 2016).



Kuva 4. Suunnitteluavaruuden vaikutus topologian optimoinnin tulokseen. (a) Suunnitteluavaruus on nykyisen osan muoto. b) Muokattu suunnitteluavaruus. (Mudigonda, 2016)

2.1.2 Optimointiongelma ja reunaehdot

Seuraava askel on valita ratkaistava optimointiongelma ja reunaehdot. Yleinen ratkaisu teknisen suunnittelun optimointiongelmaan formuloidaan matemaattisesti seuraavasti:

$$\min f(\mathbf{X}), \text{ kun } g_i(\mathbf{X}) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

jossa

\mathbf{X} on muuttujavektori

$f(\mathbf{X})$ on funktio

$g_i(\mathbf{X})$ on reunaehtoien joukko. (Hernández 1994, s. 1)

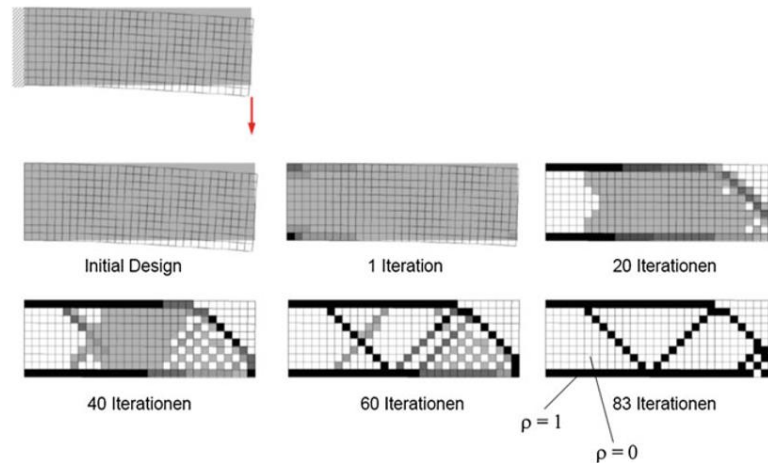
Optimointiongelmassa etsitään siis funktion minimiarvoa (joskus maksimia) tietyillä muuttujien reunaehdoilla. Yleensä rakenteiden massaa ja materiaalinkustannuksia halutaan minimoida. Lujuuden lisäksi siirtymä on usein käytetty kriteeri. Tavallisia esimerkkejä funktiosta ja reunaehdoista topologian optimoinnissa:

- Massan minimoiminen, reunaehtona lujuus varmuuskertoimella tai jäykkyys
- Jäykkyyden maksimoiminen tai venymäenergian minimoiminen, reunaehtona sallittu massa.

Funktioiden ja reunaehtojen määrittämiseen tarvitaan ainakin materiaalin tiedot, kiinnitysten sijainnit ja tyypit sekä rakenteeseen kohdistuvat ulkoiset kuormat. Kuten FEA-ohjelmistoa käytettäessä, topologian optimoinnissa lopputulos on täysin kiinni oikein määritellyistä lähtöarvoista. Rakenteiden mekaniikan lisäksi topologian optimointia voi soveltaa myös virtaustekniikkaan, lämmönjohtumiseen tai mihin vain fysikaaliseen ongelmaan missä rakenteen muodolla on väliä. (Deaton & Grandhi 2014, s. 27; Hernández 1994, s. 1; Liu & Ma 2016, s. 1; Yang et al. 2017, s. 124)

2.1.3 Optimointialgoritmi

Kuten FE-menetelmässä, optimointialgoritmien toiminta perustuu rakenteen jakamiseen pienempiin osiin. FE-menetelmä onkin yhtenä vaihtoehtona topologian optimoinnin taustalla. FE-menetelmä on lujuuslaskentaan kehitetty numeerinen menetelmä. Rakenne on jaettu elementteihin, joiden jännitykset ja siirtymät lasketaan elementin solmukohdissa ratkaisemalla suuri määrä yksinkertaisia yhtälöitä, ja väliarvot interpoloidaan näiden perusteella. Joissakin optimointimenetelmissä käytetään elementtien sijaan pikseleitä (2D-tapauksissa) tai yleisemmin vokseleita eli pikselin kolmiulotteisia vastineita. Lujuusteknisten ongelmien mallinnusta jälkimmäisellä menetelmällä ei nyt tarkemmin käsitellä. Algoritmi poistaa vokseleita tai elementtejä iteratiivisesti kuvan 5 tapaan, jossa minimoidaan 2D-palkin siirtymää. Iteraatioita jatketaan, kunnes joko saadaan lähtöehtojen mukainen tulos tai tulos ei enää olennaisesti parane. (Yang et al. 2017, s. 122)



Kuva 5. Palkin siirtymän minimointi eräällä topologian optimointialgoritmillä. Iteraatioita jatketaan, kunnes jokaisen pikselin tiheys ρ saa arvon 1 tai 0. (Yang et al. 2017, s. 123)

Tunnetuimmat topologian optimointialgoritmit ovat SIMP (solid isotropic material with penalization) ja BESO (bidirectional evolutionary structural optimization). Tyflopoulos et al. ovat luokitelleet erilaisia topologian optimoinnin algoritmeja. Pääluokat ovat elementteihin perustuva ja diskreetti. SIMP kuuluu ensimmäisiin ja BESO jälkimmäisiin. (Tyflopoulos, Flem, Steinert & Olsen 2018).

BESO toimii poistamalla kokonaisia vokseleita, jolloin vokselilla on kaksi mahdollista tilaa, 0 ”täysi” ja 1 ”tyhjä”. BESO on uusin versio ESO (evolutionary structural optimization) -tyypin algoritmeista. Aiemmat perustuivat joko materiaalin lisäämiseen tai poistoon. BESO sekä poistaa turhaa materiaalia että lisää sitä kohtiin, joissa on eniten jännitystä. (Tyflopoulos et al. 2018, s. 7; Yang et al. 2017, s. 123)

SIMP on algoritmeista kaupallisesti käytetyin (Tyflopoulos et al. 2018, s. 12). SIMP perustuu elementtimenetelmään. Suunnitteluavaruus verkotetaan kuten FE-analyysissä ja algoritmi poistaa turhia elementtejä. Elementeille määritellään suhteellinen tiheys välillä $[0,1]$. 1 merkitsee materiaalin tiheyttä ja 0 tyhjää (Tyflopoulos et al. 2018, s. 7; Yang et al. 2017, s. 123). Esimerkiksi venymäenergian minimointifunktio SIMP-menetelmälle näyttää seuraavalta:

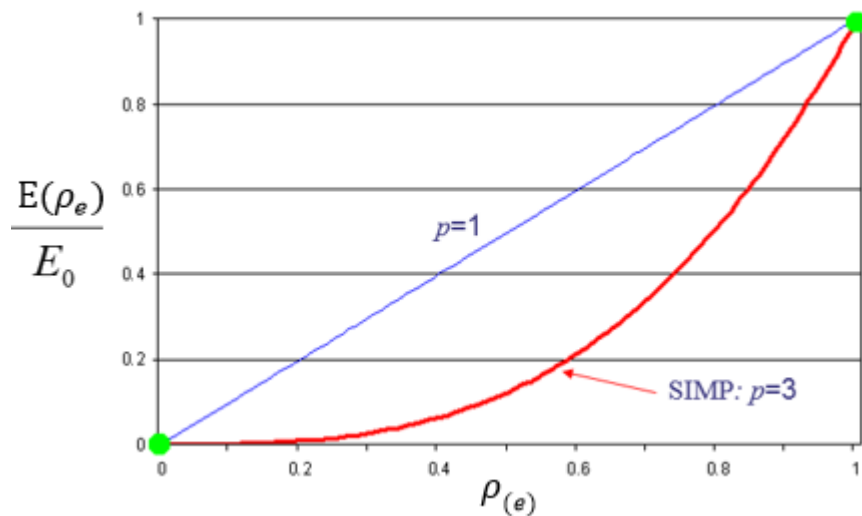
$$\min C = \mathbf{U}^T \mathbf{F} = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^n \mathbf{u}_e \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e = \sum_{e=1}^n (\rho_e)^p \mathbf{u}_e \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \quad (2)$$

siten, että

$$V = \sum_{e=1}^n \rho_e v_0 \leq V_{\max}$$

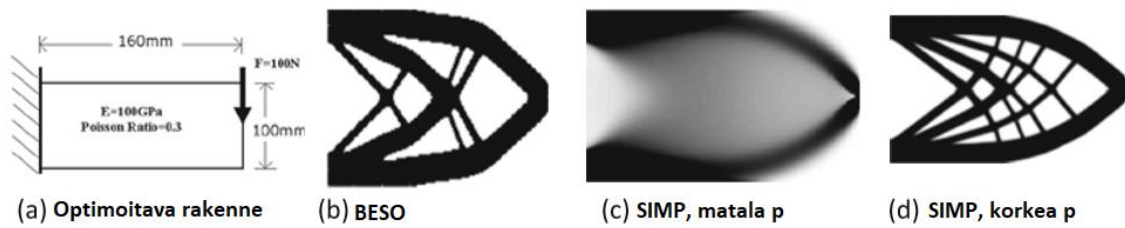
$$0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1$$

Yhtälössä (2) \mathbf{U} on globaali siirtymävektori, \mathbf{F} on globaali kuormavektori, \mathbf{K} on globaali jäykkyyssmatriisi. \mathbf{u}_e on elementin siirtymävektori ja \mathbf{k}_e elementin jäykkyyssmatriisi. ρ_e on elementin tiheys ja p on sakkokerroin (*penalization factor*), joka vähentää välitiheyden elementtien vaikutusta tulokseen. Yhtälön reunaehtoja ovat, ettei annettua maksimitilavuutta ylitetä, sekä elementtien minimitiheys ρ_{\min} , jonka alle menevät arvot jätetään huomiotta (Liu & Ma 2016, s. 1). Kuva 6 näyttää, kuinka sakkokerroin vaikuttaa vähemmän tiheiden elementtien jäykkyyteen.



Kuva 6. Sakkokertoimen p vaikutus elementin suhteelliseen jäykkyyteen (kimmokertoimeen) riippuen elementin suhteellisesta tiheydestä ρ_e . (Dassault Systèmes, 2020)

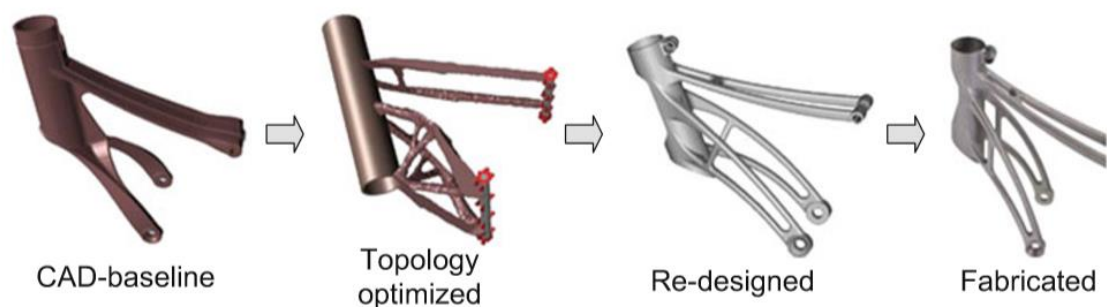
Kuvassa 7 on vielä havainnollistettu BESO- ja SIMP-menetelmien tuloksia. Jos sakkokerroin on matala, SIMP-menetelmän tulos sisältää enemmän välitiheyden elementtejä. Korkealla p :n arvolla optimoinnin tuloksella on selvä muoto mutta sumeat rajat.



Kuva 7. BESO- ja SIMP-optimointimenetelmien tulokset ja sakkokertoimen vaikutus SIMP:lla saataviin tuloksiin. (Yang et al. 2017, s. 5)

2.1.4 Tulosten muokkaaminen

Optimoinnin tuloksia täytyy yleensä muokata. Optimoinnin tuloksen rajat ovat rosoiset rakenteen jakamisen takia ja esimerkiksi SIMP-menetelmällä saadut rajat koostuvat ”väliähyden” elementeistä. 3D-tulostuksen kannalta ongelmallisia voivat olla liian pienet osat, joihin tulostuksen tarkkuus ei riitä. Äkilliset suuret muutokset rakenteen paksuudessa aiheuttavat lämpöjäännityksiä 3D-tulostaessa. Optimointiohjelmistoihin liittyy yleensä mahdollisuus asettaa valmistettavuuteen liittyviä rajoituksia, kuten minimiarvoja mitoille. Yangin et al. mukaan topologian optimointia käytetään tällä hetkellä eniten referenssinä optimaaliseen designiin, kuten kuvan 8 esimerkissä. (Yang et al. 2017, s. 125-126)

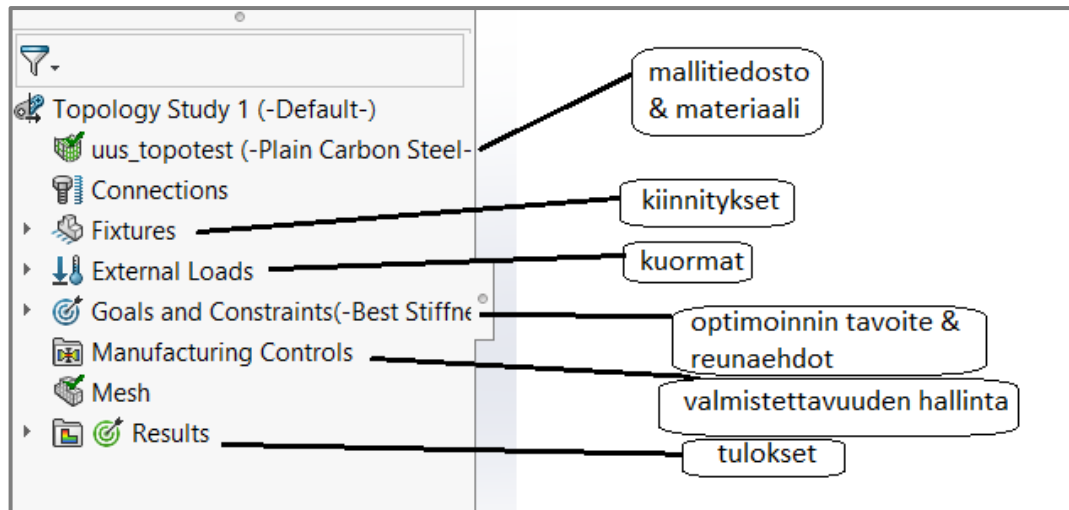


Kuva 8. Topologian optimoinnin käyttö referenssinä polkupyörän satulatelteen uudelleensuunnittelussa. (Yang et al. 2017, s. 126)

2.2 SolidWorks Topology Study -työkalu

Esimerkkinä topologian optimointiin käytettävästä ohjelmistosta on SolidWorks. SolidWorks on Dassault Systèmesin kehittämä, monipuolinen 3D-suunnitteluohjelmisto (Dassault Systèmes, 2019). Vuoden 2018 päivitykseen on lisätty topologiaoptimointityökalu.

Opastus SolidWorks-topologiaoptimointityökalun käyttöön löytyy SolidWorksin ohjesivuilta (Dassault Systèmes, 2020). Topologian optimointi löytyy SolidWorksista Simulation -välilehden alta valitsemalla Study – Topology Study. Kuvassa 9 esitellään työkalun valikko.



Kuva 9. SolidWorks Topology Study -työkalun valikko.

Optimoinnin tavoite voidaan valita seuraavista kolmesta:

- 1) jäykkyys/paino -suhteen maksimointi (= venymäenergian minimointi)
- 2) massan minimointi
- 3) maksimisiirtymän minimointi

Työkalu on siis toistaiseksi rajattu tyypillisiin rakenteiden mekaniikan ongelmiin.

Reunaehtoja voidaan asettaa seuraaville:

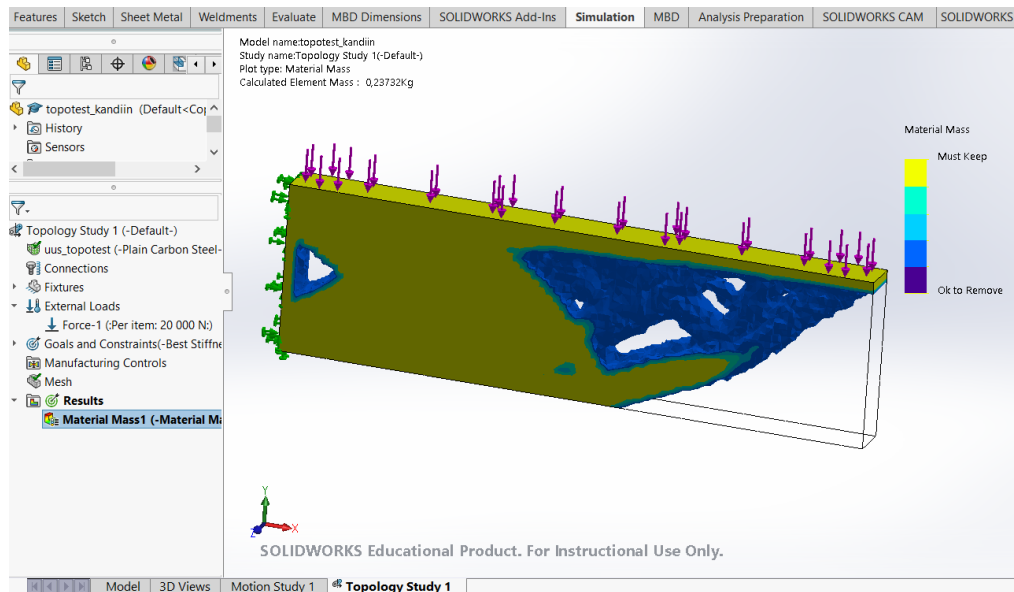
- massa
- siirtymä
- ominaistaajuudet
- varmuuskerroin

Työkaluun kuuluu myös Manufacturing Controls -osio, jossa voi asettaa valmistustapaan liittyviä reunaehtoja:

- säilytettävä alue
- valumuotin poistettavuus tai työkalujen suunta
- symmetria
- rakenteen paksuuden hallinta

Suunnittelutilavuutena toimii Solidworks-malli, jolle asetetaan materiaali, kiinnitykset ja kuormat samalla tavalla kuin SolidWorksin FE-analyysityökaluissa. Optimointityökalu luo automaattisesti mallille samanlaisen verkotuksen (*mesh*) kuin FE-analyysia tehdessä. SIMP-optimointimenetelmä on kuvailtu Topology Study -ohjesivustolla, joten taustalla oleva algoritmi perustuu siihen. Hyvän laskentatehon ja elementtimenetelmän hyödyntämisen takia se sopii SolidWorksin kaltaiseen ohjelmistoon.

Kuvassa 10 on esimerkki optimoinnin tuloksesta. Malli on kiinnitetty jäykästi toisesta päästä ja päälle asetettu tasainen jatkuva kuorma. Optimoinnin päämäärä on paras jäykkyys/massasuhde ja materiaalia poistettiin 50%. Keltainen alue kuvaa säilytettäviä elementtejä, sininen alue elementtejä joiden tiheys saa arvon 0:n ja 1:n välillä, jotka ”voi ehkä poistaa”. Tässä on tilaa jälkimuokkaajan harkintakyvylle. Optimoidusta mallista voidaan tallentaa automaattisesti siloteltu versio *.sldprt tai *.STL-tiedostona. Se voidaan myös tuoda Display-valikosta alkuperäisen mallin päälle käsin muokkausta varten. (Dassault Systèmes, 2020)



Kuva 10. Tulosten esittäminen SolidWorks Topology Study -työkalulla. Keltainen alue kuvaa säilytettävää osaa ja sininen alue ehkä säilytettävää osaa.

2.3 Perinteinen rakenteiden optimointi

Perinteinen tapa optimoida rakenteita, jota Christensen & Klarbing (2008) kutsuvat iteratiivis-intuiitiviseksi, tapahtuu seuraavalla tavalla:

- 1) luodaan ehdotus malliksi
- 2) selvitetään, täytyvätkö suunnittelukriteerit
- 3) jos jännitys tai siirtymä on liian suuri tai jos materiaalia on liikaa, mallia muokataan ja suoritetaan uudestaan vaihe 2

Vaihe 1 tarkoittaa yleensä lujousteknisen intuiition ja analyttisten laskelmien yhdistelmää. Vaihe 2 suoritetaan tavallisesti FE-analyysin avulla. FE-analyysi antaa mahdollisuuden tarkastella rakenteen jännityksiä yksityiskohtaisemmin kuin mitä analyttisillä menetelmillä pystytään. Vaiheen 3 muokkaus suoritetaan FE-analyysin tuloksen pohjalta niiltä osin kuin materiaalia täytyy poistaa tai lisätä. Vaiheita 2 ja 3 jatketaan niin kauan, kunnes ollaan tyytyväisiä lopputulokseen.

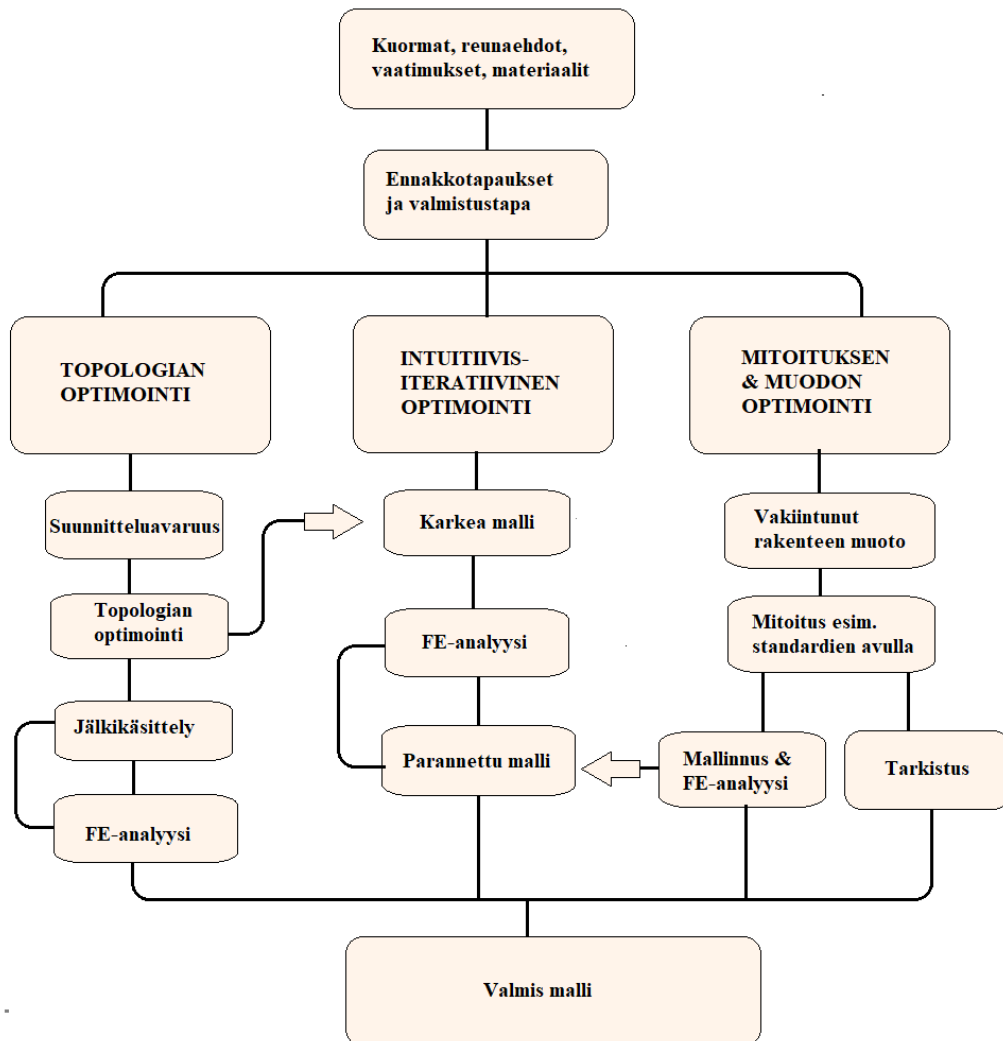
(Christensen & Klarbing 2008, s.8)

Yleisesti käytettyjen rakenteiden muodon ja mitoituksen optimointiin löytyy ohjeita standardeista. Standardit sisältävät erikoisempiakin muotoja, joihin on päädytty ajan kuluessa toteuttamalla iteratiivis-intuiivista menetelmää.

3 TULOKSET

3.1 Suunnitteluprosessi topologian optimoinnissa ja perinteisessä optimoinnissa

Kuvassa 11 on esitettyä vuokaaviona eri optimointimenetelmien kulku ja niiden väliset suhteet. Nuolet kuvaavat siirtymistä optimointimenetelmien välillä. Optimoinnin tietyissä vaiheissa saatetaan vaihtaa toiseen menetelmään. Kuormien ja vaatimusten lisäksi optimointimenetelmän valintaan vaikuttavaksi tekijäksi osoittautui mm. ennakkotapausten olemassaolo ja valmistustapa.



Kuva 11. Kaavio suunnittelussa käytettävistä optimointitavoista.

3.2 Topologian optimointi eri valmistusmenetelmille

Taulukossa 2 on listattu topologian optimoinnin kanssa yhteensopivia valmistusmenetelmiä. 3D-tulostettavalle kappaleelle ei tarvitse asettaa valmistussuuntaan liittyviä reunaehtoja optimointivaiheessa kuten muille menetelmille. Sen sijaan materiaalinpaksuudelle on jokin minimi, oli menetelmä mikä vain.

Taulukko 2. SolidWorks-topologiaoptimointityökalun käytettävyys valmistusmenetelmille.

Topologian optimointi ilman valmistussuuntaan liittyviä reunaehtoja	Topologian optimointi valmistussuuntaan liittyvillä reunaehdoilla
<ul style="list-style-type: none"> • 3D-tulostus 	<ul style="list-style-type: none"> • Valaminen • Muottitaonta • Lastuava työstö • Leikkaus
<p>Materiaalin paksuuteen liittyvät reunaehdot: Kaikille menetelmille; lämmöntuonnin huomioon ottaminen 3D-tulostuksessa ja kappaleen mahdollisen hitsaamisen kannalta.</p>	

3.3 Topologian optimoinnin sovelluskohteet

Tutkimuksen lähdeaineistosta löytyi seuraavia lujuuden ja siirtymän kannalta optimoitavien esimerkkirakenteiden piirteitä:

- erikoisen muotoiset osat, joihin ei ole ennakkotapauksia tai malleja standardissa
- vakiintuneetkin rakenteet, kun halutaan löytää optimaalinen muoto painokriittiseen sovellukseen
- kappaleet, joiden valmistusmenetelmäksi sopii 3D-tulostus
- moniniveliset tai monen kiinnityspisteen tasomaiset liitososat: voidaan toteuttaa kaksikulotteisena ristikkomaisena rakenteena muotti- tm. valmistusmenetelmällä
- joustavat mekanismit

4 TULOSTEN ANALYSOINTI

4.1 Avaintulokset

Seuraavissa alaluvuissa pohditaan tutkimuksen tuloksia. Ensin käydään läpi luvussa 1.2 esitettyihin kriteereihin liittyviä löydöksiä ja tämän jälkeen muita tutkimuksen tuloksia. Viimeisenä arvioidaan, kuinka hyvin päätutkimuskysymyksiin vastattiin.

4.1.1 Topologian optimointi eri arviointikriteerien valossa

Kirjallisuuskatsauksen tulosten pohjalta topologian optimointia voidaan arvioida niiden kriteerien pohjalta, jotka esitettiin johdantoluvun kappaleessa 1.2. Näitä ovat materiaalin säästö, lujuus, kustannukset, kulunut aika sekä menetelmän helppokäyttöisyys.

Materiaalin säästö riippuu kohteesta, valmistustekniikasta ja suunnitteluavaruuden rajaamisesta. Lukuarvoja saavutetulle materiaalin säästölle ei ehditty löytää. Tuoreita ja saatavilla olevia esimerkkejä nimenomaan SIMP-optimointimenetelmälle löytyi helpommin oppinäytetöistä ja verkkolähteistä kuin vahvoista tieteellisistä lähteistä.

Kaupallisten ohjelmistojen topologian optimointi perustuu elementtimenetelmään, joten lujuuden kannalta se on yhtä luotettava tai epäluotettava. Varmuuskerroin on mahdollista asettaa optimoinnin alkuehdoissa. Lopussa on syytä vielä suorittaa jälkikäsitellyn tuloksen tarkistus FE-analyysillä. Staattisten rakenteiden suunnittelussa tuskin tulee ongelmia, kunhan elementit on verkotettu oikein. Väsymiskestävyys on oma lukunsa, eikä esimerkiksi 3D-tulostettujen rakenteiden väsymiskäyttäytymistä vielä tunneta kovin perinpohjaisesti. Kaikkein kriittisimpiin rakenteisiin ei kannata soveltaa lisäävää valmistusta. Jos topologian optimointia sovelletaan perinteisiin menetelmiin, tulokset ovat paremmin sovellettavia dynaamisesti kuormitettuihin rakenteisiin.

Topologian optimoinnin käyttäminen ohjelmistossa edellyttää vähintään FE-menetelmän tunteista, jota perinteisessä suunnittelussa käytetään. Reunaehdot ja kuormat asetetaan samalla tavalla kuin elementtimenetelmällä analysoitaessa ja optimoinnin onnistuminen riippuu lähtöarvoista. Topologiaoptimoitu ja jälkikäsitelty rakenne on hyvä vielä kertaalleen analysoida FE-menetelmällä. Uutta topologian optimoinnissa on suunnitteluavaruuden

määrittäminen. Vähintäänkin samat mahdolliset virhetilanteet ovat olemassa kuin FE-analyysissä, mutta mahdollisista virhetilanteista tai käyttökelvottomista tuloksista, joita voisi liittyä optimointialgoritmin toimintaan, ei ehditty päästä selville.

Perinteinen tapa optimoida rakenteita on osin manuaalisesti toteutettava iteratiivinen menetelmä, topologian optimointi automaattinen iteratiivinen menetelmä. SolidWorks-optimointityökalun piirteisiin tutustussa selvisi, että topologian optimointi vaatii melko paljon laskentatehoa esimerkiksi pelkkään FE-analyysiin verrattuna. Vaikka topologian optimointi on laskennallisesti hidasta, sen avulla voidaan kuitenkin suorittaa iteraatioita nopeammin kuin mihin käsin muokkaamalla pystytään. Eniten aikaa vie tulosten manuaalinen jälkimuokkaus eli samojen työkalujen käyttö kuin perinteisessä menetelmässä. Jos optimoinnin tulos on kovin monimutkainen, kuluva aika on suurempi.

Topologian optimoinnin kustannukset liittyvät optimointiin yhdistettäviin tuotantokustannuksiin eivätkä ohjelman käyttöön. 3D-tulostuksen kustannukset ovat edelleen korkeat massatuotannossa, vaikka pienellä sarjakoolla se voi olla kannattavin valinta. Myös perinteisille menetelmille kustannukset on arvioitava tapauskohtaisesti.

4.1.2 Muita löydöksiä

Topologian optimointi voidaan tunnetusti viedä pisimmälle 3D-tulostuksen kanssa, koska kappaleen muodolle ei ole paljonkaan valmistukseen liittyviä rajoitteita. Kuitenkin topologian optimointia voidaan sopivin alkuehdoin tehdä myös valmistusmenetelmille, joissa käytetään muottia tai työkaluja, kuten valaminen, lastuava työstö, muottitaonta ja laserleikkaus. Optimointiohjelmasta löytyi ominaisuuksia, jotka ovat nimenomaan perinteisille valmistusmenetelmille tarkoitettuja.

Optimointityökalu ei ota kantaa valmistusmenetelmään, joten valmistusmenetelmän erityispiirteet suunnittelun kannalta täytyy tietää. Esimerkiksi muotoilun täydellistä vapautta rajoittava tukirakenteiden tarve 3D-tulostuksessa tai valmistustapakohtaiset vaatimukset materiaalinpaksuudelle.

Kirjallisuustutkimuksessa käsitelty topologian optimointiprosessi sopii hyvin rajallisesti standardimittaisista rakenneosia kuten levyjä tai putkia sisältäville rakenteille, mutta jos sitä

käytetään referenssinä perinteiseen suunnitteluun tai perinteisen suunnittelun rinnalla, tällainenkin soveltaminen on mahdollista. Referenssinä käyttäminen on hyödyllistä myös silloin, kun halutaan lisää muotoilun vapautta.

4.1.3 Saavutettujen tulosten arviointi

Päätutkimuskysymykset koskivat topologian optimoinnin käytettävyyttä jatkuvien rakenteiden suunnittelussa. Tässä luvussa arvioidaan, kuinka hyvin kysymyksiin löytyi vastauksia.

- Miten topologian optimointia hyödyntävä suunnitteluprosessi eroaa muista tavoista optimoida mekaanisesti kuormitettua rakennetta lujuuden, jäykkyyden ja massan suhteen?

Suunnittelutapojen yhtäläisyyksistä ja eroista löytyi riittävästi tietoa. Topologian optimointia verrattiin etenkin iteratiivis-intuitiiviseen menetelmään, joka on yleisin menetelmä ja lähimpänä topologian optimointia sovelluksiltaan. Lisäksi selitettiin muodon ja mitoituksen optimoinnin ero topologian optimointiin ja otettiin kolmanneksi esimerkiksi mitoitukseen keskittyvä suunnittelu, joka perustuu jo valmiiksi melko pitkälle perinteisillä menetelmillä optimoituihin muotoihin. Selvisi, että perinteinen iteratiivis-intuitiivinen suunnittelutapa ja topologian optimointi kaupallisilla ohjelmistoilla perustuvat molemmat elementtimenetelmään ja ovat luonteeltaan iteratiivisia prosesseja. Intuitiivis-iteratiivinen optimointi on samalla tavalla rajoittamatonta kuin topologian optimointi siten, että rakenteen topologiaa, muotoa ja kokoa optimoidaan samalla kertaa. Kävi myös selväksi näiden erot, kuten optimoinnin lähtökohtana olevan mallin erilainen hahmottelu.

- Mitä etuja tai haittapuolia topologian optimointiin liittyy muihin menetelmiin nähden?

Topologian optimoinnin kiistattomimpana etuna näyttäytyi materiaalin säästö ja massan vähentäminen, jotka kävivät ilmi jo työn alkuvaiheessa. Vähän huonommallakin suunnitteluavaruuden määrittelyllä materiaalia sai vähennettyä alkuperäisestä mallista.

Topologian optimoinnissa itse optimointiprosessi on nopea ja tehokas, mutta tulosten jälkikäsitteily voi viedä pitempäänkin kuin perinteisellä menetelmällä, jos käsinmuokkausta joudutaan tekemään paljon. Automaattisen jälkikäsitteilyn riittävyys jäi tutkimatta.

Muiden etujen ja haittojen osalta ei löytynyt niin yksiselitteisiä tuloksia. Yleistysten tekeminen esimerkiksi kustannuksista vaatisi laajempaa tutkimusta.

- Minkälaisiin kohteisiin topologian optimointi sopii?

Topologian optimoinnin kohteita koitettiin jäsentää mieluummin rakenneosan piirteiden kuin optimointia soveltavien teollisuudenalojen kautta. Esimerkkejä löytyi kohtalaisesti, mutta tätä osiota voisi tutkia systemaattisemmin. Topologian optimoinnin kohteista saatiin lisäksi tietoa valmistusmenetelmien osalta.

4.2 Kirjallisuustutkimuksen luotettavuuden arviointi

Kirjallisuustutkimukseen etsittiin vahvan lähteen määritelmän täyttäviä tieteellisiä lähteitä: kirjoja, artikkeleita ja konferenssipapereita.

Tieteellisiä artikkeleita topologian optimointiin liittyen on kirjoitettu runsaasti, mutta huomattava osa niistä keskittyy optimoinnin laskennalliseen puoleen ja vaihtoehtoihin optimointimenetelmiin, vaikka käytännön esimerkkejä on runsaasti mukana. Niitä ei siis ole mahdollista yleistää kaupallisissa ohjelmistoissa suosittua SIMP-menetelmää koskeviksi.

Suurin osa lähteistä näyttäisi myös koskevan diskreettiä topologian optimointia niin silmämääräisesti kuin hakujen perusteella. Esimerkiksi LUT-tiedekirjaston tietokannasta haulla ”topology optimization” löytyy 292 lähdetä, kun haku rajataan vahvoihin lähteisiin. Työn aihetta vastaavilla hauilla ”topology optimization additive manufacturing” ”topology optimization 3d printed” ja ”topology optimization continuum” vastaavia lähteitä löytyy vain 12-13 kappaletta. Sama näkyy vielä vahvemmin Google Scholarin tuloksissa. Relevanttien ja saatavilla olevien lähteiden löytäminen siis oli hieman haasteellista. Taulukossa 3 on esitetty työn vahvojen lähteiden määrä ja tyypit.

Taulukko 3. Työssä käytetyt vahvat lähteet.

LÄHTEEN TYYPPI	MÄÄRÄ
Kirja	5
Artikkeli	4
Seminaaripaperi	1
	Yhteensä: 10

Kirjallisuustutkimuksessa haastavaksi osuudeksi osoittautui muun muassa optimoinnin matemaattiseen luonteeseen keskittynyt käsitteistö, joka on joskus epäselvää ja jonka kääntäminen konkreettisten ilmiöiden puolelle voi olla haastavaa sellaisella tavalla, joka on selkeä asioiden soveltajalle.

Selkokieლისin tiivistys topologian optimoinnista löytyi Yangin et al. lisäävää valmistusta käsittelevästä teoksesta *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production* (2017). Kirjalähteiden joukossa on kolme yli 10 vuotta vanhaa lähdetä. Vanhojen lähteiden käyttöä puoltaa se, että niiden avulla on tutkittu teoriaa, joka muuttuu hitaammin kuin sovellukset. Mahdollisuuksien mukaan näille on pyritty etsimään vahvistusta uusista lähteistä. Esimerkiksi Bendsøen ja Sigmundin teos *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications* (2003) on laaja, nimenomaan SIMP-menetelmää käsittelevä perusteos topologian optimoinnista, jolle ei löytynyt päivitettyä vastinetta. Perinteisen suunnittelumenetelmän kuvaus löytyi vuoden 2008 kirjasta, mutta ”vanhana” menetelmänä se on yhä ajankohtainen.

4.3 Jatkotutkimusaiheet

Työssä perehdyttiin topologian optimoinnin taustalla oleviin algoritmeihin vain lyhyesti. Selvittämättä jäi, onko taustalla olevalla algoritmilla sellaisia rajoituksia tai virhetilanteita, joista rakennesuunnittelijan olisi hyvä olla tietoinen. Ylipäätään kuinka paljon suunnittelua toteuttavan olisi hyvä ymmärtää kaupallisten ohjelmien taustalla olevista algoritmeista kuten SIMP-menetelmästä.

Työssä käytettiin esimerkkinä SolidWorks-ohjelmiston työkalua topologian optimointiin. Työkalun ominaisuuksia olisi hyvä tutkia lisää käytännön esimerkeillä. SolidWorksissa olevia ominaisuuksia voisi myös verrata muihin saatavilla oleviin ohjelmistoihin.

Topologian optimoinnin etuja ja haittoja voisi arvioida valmistusmenetelmäkohtaisesti eri valmistusmenetelmille. Tämä vaatisi syvällisempää perehtymistä yksittäiseen valmistusmenetelmään ja topologian optimointiin käytettynä sen kanssa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kandidaatintyössä käsiteltiin topologian optimoinnin käytettävyyttä jatkuvien rakenteiden suunnittelussa. Työn motivaationa oli topologian optimoinnin tarjoamat mahdollisuudet rakenteiden keventämiseen ja tähän liittyvät materiaalin säästämisen, rakenteiden kevennettävyyden ja ympäristöystävällisyyden näkökohdat.

Selvisi, että topologian optimointi jatkuville rakenteille ja rakenneosista koostuville rakenteille kuten ristikoille on luonteeltaan erilaista. Rakenteiden optimointialgoritmeja on olemassa paljon erilaisilla toimintaperiaatteilla, mutta jatkuvan rakenteen topologian optimointi kaupallisilla ohjelmistoilla perustuu tyypillisesti FE-menetelmään ja SIMP-algoritmiin. SIMP-menetelmässä osa materiaalista määritellään poistettavaksi ja osa säilytettäväksi, ja näiden alueiden välissä on sumea alue. Optimoinnin tulos jälkikäsitellään automaattisesti tai manuaalisesti valmiiksi malliksi.

Suunnittelijan kannalta topologian optimoinnissa verrattuna perinteiseen FE-analyysin hyödyntämiseen on haasteena suunnitteluavaruuden määrittely. Eniten aikaa vievä osuus lienee optimoinnin tuloksen jälkimuokkaus, vaikka sitä ei kandidaatintyön osalta ehditty kokeilemaan. Topologian optimoinnin kannattavuus riippuu monista tekijöistä, joista valmistustapaan ja tuotantoon liittyvät tekijät ovat olennaisia. Vaikka topologian optimointi on vahvimmin sidoksissa 3D-tulostukseen, esimerkkiohjelmistosta löytyi hyödyllisiä ominaisuuksia valmistustapoja ajatellen, joissa käytetään muottia tai työkaluja: valaminen, takominen, lastuava työstö, leikkaus.

Perinteinen, tässä työssä intuitiivis-iteratiiviseksi kutsuttu menetelmä näyttäytyy edelleen jatkuvien rakenteiden optimoinnin tärkeimpänä menetelmänä. Topologian optimoinnin yksi yleinen käyttökohde on referenssin tarjoaminen, jonka pohjalta luodaan malli perinteisen optimointimenetelmän lähtökohdaksi. Topologian optimointia on siis mahdollista hyödyntää niin erikseen kuin perinteisen suunnittelun rinnalla. Topologian optimoinnista perinteiseen menetelmään vaihtamalla voidaan parantaa muotoilun vapautta ja valmistettavuutta.

Topologian optimoinnin vaatima osaaminen koostuu suurelta osin FE-menetelmän tuntemisesta. SIMP-algoritmin mahdollisista rajoitteista olisi kuitenkin hyvä tietää enemmän ja ylipäätään siitä, kuinka paljon suunnittelijan tulisi ymmärtää algoritmia. Optimoinnin tulos joka tapauksessa testataan FE-analyysillä, joten ymmärryksen etuna voisi olla virhetilanteiden välttäminen.

Edellä mainitun lisäksi jatkotutkimusaiheeksi sopisi topologian optimointiin käytettävien ohjelmistojen vertailu käytännön esimerkein. Mahdollista olisi myös tutkia topologian optimoinnin hyödynnettävyyttä valmistusmenetelmäkohtaisesti. Lähteet näin yksityiskohtaiseen aiheeseen lienevät tällä hetkellä harvassa, joten ohjelmistolla toteutettava mallintamista sisältävä tutkimus olisi luultavasti tähänkin paras lähestymistapa.

LÄHTEET

Bendsøe, M. P. & Sigmund, O. 2003. *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 370 s.

Chen, T. Y. & Lin, C. Y. 2000. Determination of optimum design spaces for topology optimization. *Finite Elements in Analysis and Design* Vol. 36. S. 1-16.

Dassault Systèmes 2019. About SOLIDWORKS. [Solidworks-ohjelmiston ohjesivuilla] [Viitattu 28.5.2019] Saatavissa:

http://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/sldworks/HIDD_ABOUTBOX.htm

Dassault Systèmes 2020. Topology Study. [Solidworks-ohjelmiston ohjesivuilla] [Viitattu 14.6.2020] Saatavissa:

http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c_generative_design_study.htm?id=63c5a2fa8df243b9bde79433a8850f4a#Pg0

Deaton, J. D. & Grandhi, R. V. 2014. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 49:1. S. 1-38.

Harju, K. 2017. 3D-metallitulostuksen edut luodaan suunnittelulla. [Konekuriiri-lehden verkkosivuilla]. Julkaistu 18.4.2017. [Viitattu 28.5.2019]. Saatavissa: <https://www.konekuriiri.fi/uutiset/3d-metallitulostuksen-edut-luodaan-suunnittelulla/>

Hernández, S. 1994. *Mathematical theory of optimum engineering design*. Teoksessa: Adeli, H. *Advances in Design Optimization*. London: Chapman & Hall. S. 1-40.

Kiertotalouden keinovalikoima käyttöön. 2016. Espoo: VTT. 12 s. (VTT Policy Brief 1/2016)

Kilpailukykyä ja uutta liiketoimintaa materiaalitehokkuudesta. 2013. Helsinki: Teknologiateollisuus ry. 28 s.

Liu, J. & Ma, Y. 2016. A Survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Software* Vol. 100. S. 161-175

Luotola, J. 2017. Tulostaminen teettää työtä insinööreille. [Insinööri-lehden verkkosivuilla]. Julkaistu 21.4.2017. [Viitattu 28.5.2019] Saatavissa: <https://insinoori-lehti.fi/artikkelit/tulostaminen-teettaa-tyota-insinooreille/>

Mudigonda, G. 2016. Thought Leader Thursday: Five Common Mistakes made Running Topology Optimization. Julkaistu 27.10.2016 [Viitattu 11.6.2020] Saatavissa: <https://blog.altair.com/thought-leader-thursday-five-common-mistakes-made-running-topology-optimization/>

Ribeiro, T. P., Bernardo, L. F. A. & Andrade, J. M. A. 2021. Topology Optimization in Structural Steel Design for Additive Manufacturing [Open access -julkaisu]. *Applied Sciences* Vol. 11(5), 2112. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/app11052112>

Rozvany, G. I. N., Zhou, M. & Sigmund, O. 1994. Optimization of Topology. Teoksessa: Adeli, H. *Advances in Design Optimization*. London: Chapman & Hall. S. 340-399.

Rothwell, A. 2017. Optimization Methods in Structural Design. [E-kirja]. Springer. 324 s. (Solid Mechanics and Its Applications, Vol. 151)

Stewart, D. 2018. 3D printing growth accelerates again. [Deloitte Insights -verkkosivuilla]. Julkaistu 11.12.2018. [Viitattu 28.5.2019] Saatavissa: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/3d-printing-market.html>

Tyflopoulos, E., Flem, D. T., Steinert, M. & Olsen, A. 2018. State of the art generative design and topology optimization and potential research needs. NordDesign 2018. Linköping, Sweden. 14.-17.8.2018.

Westerlund, V. 2017. Topologian optimoinnin hyödyntäminen. [RD Velho Oy:n verkkosivuilla]. [Viitattu 28.5.2019]. Saatavissa: <https://www.rdvelho.com/blogi/topologian-optimoinnin-hyodyntaminen/>

Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M. & Wiener, S. 2017. Additive Manufacturing of Metals. 168 s. [E-kirja]. Springer. (Springer Series in Advanced Manufacturing)

Ymparisto.fi. 2014. Materiaalitehokkuus. [Ympäristöhallinnon verkkosivuilla]. Viimeksi päivitetty 10.1.2014. [Viitattu 28.5.2019]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Resurssitehokkuus/Materiaalitehokkuus

Liite I. Topologian optimointialgoritmien vertailutaulukko. (Tyflopoulos et al., 2018)

Category		Approach	Procedure/Description	Strengths	Weaknesses	Recom. papers
Element-based	Density-based	Solid Isotropic Microstructures with Penalization (SIMP)	<ul style="list-style-type: none"> Eulerian (fixed mesh) method Discretization to solid isotropic elements Remove material Nested analysis and design approach (NAND) Minimize the compliance subject to a volume constraint problem via an iterative converge method 'Soft-kill' penalization method (white, void, grey, fractional material, black: material) 	<ul style="list-style-type: none"> Homogenization is not a prerequisite Computational efficiency Robustness Adaptive to (almost) any design condition Freely adjusted penalization Conceptual simplicity (no higher mathematics required) Available for all combinations of design constraints 	<ul style="list-style-type: none"> Intermediate densities Mesh-dependent Dependent on the degree of penalization Nonconvex 	<ul style="list-style-type: none"> Bendsoe, 1989; Kozvany, 2001; M. Zhou & Kozvany, 1991)
		Rational Approximation of Material Properties (RAMP)	<ul style="list-style-type: none"> Eulerian (fixed mesh) method Based on SIMP Nonzero sensitivity at zero density 	<ul style="list-style-type: none"> Convex 	<ul style="list-style-type: none"> Dependent on the degree of penalization Numerical difficulties in low density 	<ul style="list-style-type: none"> (Deaton & Grandhi, 2014; Luo et al., 2005; M. Stolpe & Svanberg, 2001)
		Optimal Microstructure with Penalization (OMP)	<ul style="list-style-type: none"> Eulerian (fixed mesh) method Based on SIMP Discretization to optimal nonhomogeneous elements 'Hard-kill' penalization method (white: void, black: material) 	<ul style="list-style-type: none"> More information about the isotropic-solid/empty/porous (ISEP) optimum 	<ul style="list-style-type: none"> Intermediate densities More computational effort than SIMP Nonrobust Advanced mathematics Nonconvex Requires homogenization Dependent on the degree of penalization Available only for compliance 	<ul style="list-style-type: none"> (Allaire, 1997; Kozvany, 2001)
	Dual Discrete Programming (DDP)	Non-Optimal Microstructures (NOM)	<ul style="list-style-type: none"> Eulerian (fixed mesh) method Based on SIMP Discretization to nonoptimal nonhomogeneous elements No penalization 	<ul style="list-style-type: none"> Available for all combinations of design constraints Less variables/element than OMP 	<ul style="list-style-type: none"> More variables/element than SIMP Fix and insufficient penalization Nonconvex Requires homogenization 	<ul style="list-style-type: none"> (Beckers & Fleury, 1997; Kozvany, 2001)
		Topological derivatives ('The Bubble-method')	<ul style="list-style-type: none"> Lagrangian (boundary following mesh) method Special case of homogenization Remove material Combine shape and topology optimization Introduce microscopic hole in order to predict the influence (derivative) and trigger the creation of new holes 	<ul style="list-style-type: none"> Penalization is not necessary Indirectly include filtering by mapping between nodal and element variables. 	<ul style="list-style-type: none"> Complex mathematics It is yet unclear whether the computed derivatives are useful 	<ul style="list-style-type: none"> (Allaire, 1997; Burger et al., 2004; Eschenauer et al., 1994)
	Level set		<ul style="list-style-type: none"> Eulerian (fixed mesh) and Hybrid methods Operate with boundaries instead of local density variables. Implicit moving boundary (IMB) models 	<ul style="list-style-type: none"> Flexibility in topological changes Can be mesh-independent Can find shape variations for robust design 	<ul style="list-style-type: none"> Restricted geometry from existing boundaries Inability to generate new holes at points surrounded by solid material (in 2D) 	<ul style="list-style-type: none"> (Jia et al., 2011; Osher & Sethian, 1988)

		<ul style="list-style-type: none"> Boundaries can form holes, split into multiple pieces, or merge with other boundaries to form a single surface Boundary of structure = zero level (contour) Modified density approach (uses shape derivatives for the development of the optimal topology) Most use ersatz material and fixed meshes 	<ul style="list-style-type: none"> Formulate objectives and constraints on the interface and describe boundary conditions at the interface 	<ul style="list-style-type: none"> Starting guess results Regularization, control of the spatial gradients of the level set function, and size control of geometric features Must combined with topological derivatives in 2d 	<p>(Bourdin & Chambolle, 2003; Wallin & Ristmanaa, 2014)</p>
	Phase field	<ul style="list-style-type: none"> Eulerian (fixed mesh) method Works directly on the density variables Smooth the design field by adding the total density variation to the objective Correspond to density approaches with explicit penalization and regularization 	<ul style="list-style-type: none"> Total density variation to the objective Carry out perimeter constrains and represent the surface dynamics of phase transition phenomena such as solid-liquid transitions 	<ul style="list-style-type: none"> Very slow boundary transition and convergence solution 	<p>(Bourdin & Chambolle, 2003; Wallin & Ristmanaa, 2014)</p>
	Evolutionary Structural Optimization (ESO)	<ul style="list-style-type: none"> Use of discrete variables Remove material 'Hard-kill' method (white: void, black: material) The structure turns into an optimum by repetitively removing inefficient material The elements with the lowest value of their criterion function are eliminated 	<ul style="list-style-type: none"> Small evolutionary ratio (ER) and fine mesh can produce a good solution 	<ul style="list-style-type: none"> Mesh and parameters dependent Heuristic Computationally rather inefficient Methodologically lacking rationality Tackle only simple 2D problems Breaks down with rapidly changing sensitivity 	<p>(Yi, Min, Xie & Huang, 2010; Yi M. Xie & Steven, 1993; M. Zhou & Rozvany, 2001)</p>
	Additive Evolutionary Structural Optimization (AESO)	<ul style="list-style-type: none"> Based-on ESO Use of discrete variables Add material (to reduce the local high stresses) Optimization starts from a core structure that is the minimum to carry the applied load 	<ul style="list-style-type: none"> Small evolutionary ratio (ER) and fine mesh can produce a good solution 	<ul style="list-style-type: none"> Mesh and parameters dependent Heuristic Computationally rather inefficient Methodologically lacking rationality Tackle only simple 2D problems Breaks down with rapidly changing sensitivity 	<p>(Querin, Steven, & Xie, 1998, 2000; Querin, Young, Steven, & Xie, 2000)</p>
	Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO)	<ul style="list-style-type: none"> Mathematically combination of ESO and AESO Use of discrete variables Add and remove material where needed 0: absence of element, 1: presence of element 	<ul style="list-style-type: none"> Mesh-independent Reduction of computational time comparing to ESO Adaptive shape Using a small evolutionary ratio ER and a fine mesh can produce a good solution 	<ul style="list-style-type: none"> Can be dependent on mesh 	<p>(Huang & Xie, 2007; Querin, Young, et al., 2000)</p>
	Extended Finite Element Method (XFEM)	<ul style="list-style-type: none"> Generalized shape optimization Introduction of a generalized and adaptive finite element scheme which work with meshes that can represent smooth and accurate boundaries Based on level set 	<ul style="list-style-type: none"> Overcome FEM discontinuities No remeshing is required Can study large 3D scale industrial problems 	<ul style="list-style-type: none"> Large errors in the stress estimation 	<p>(Van Meegret & Duijsinx, 2007)</p>
	Deformable Simplicial Complex (DSC)	<ul style="list-style-type: none"> Hybrid method Combine nonparametric shape optimization and introduction/removal of holes 	<ul style="list-style-type: none"> Robust topological additivity Topology control natural and simple Allows for nonmanifold configurations in the surface mesh 	<ul style="list-style-type: none"> Numerical diffusion Slower than the level set method Insufficient mesh quality 	<p>(Misztal & Betsztein, 2012)</p>
Combined					
	Discrete				