

Eemeli Jokinen

TOPOLOGIAN OPTIMOINNIN HYÖDYNTÄMINEN KONEENOSAN SUUNNITTELUSSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Ilari Laine
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Eemeli Jokinen: Topologian optimoinnin hyödyntäminen koneenosien suunnittelussa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma, Konetekniikka
Toukokuu 2022

Topologian optimointi on etenkin koneensuunnittelussa käytettävä menetelmä, jolla pyritään saavuttamaan kappaleelle optimaalinen materiaalityyppi valitun tavoitteen kannalta. Optimoinnilla voidaan tavoitella esimerkiksi rakenteen jäykkyyttä, hyvää lämmönjohtavuutta tai tehokasta nesteen virtausta rakenteen läpi. Topologian optimoimiseksi on runsaasti erilaisia menetelmiä, joista yleisimmin käytettyjä ovat tiheyspohjaiset menetelmät. Tiheyspohjaisista menetelmistä tunnetuin on Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP). Tiheyspohjaisissa menetelmissä optimoitava kappale jaetaan elementteihin, joille annetaan suhteelliset tiheyden arvot 0:n ja 1:n välillä. Optimoinnille asetetaan tavoite, esimerkiksi massan vähentäminen 40 prosentilla, sekä mahdollisia rajoitteita, kuten materiaalin vähimmäispaksuus.

SIMP-menetelmää käytettäessä elementtien arvoja iteroidaan hyödyntämällä potenssilakia (Power law). Potenssilain avulla elementtien suhteelliset tiheydet saadaan lähestymään kiinteää ja tyhjää eli nollaa ja ykköstä. Arvon 1 saavat elementit ovat tavoitteen saavuttamiseksi tarpeellisia ja jäävät osaksi rakennetta. Arvon 0 saavat elementit ovat taas tavoitteen saavuttamisen kannalta ylimääräisiä eivätkä sisällä materiaalia.

Työssä käydään ensin läpi tiheyspohjaisen topologian optimoinnin periaatteita sekä tutustutaan optimoinnin mahdollisuuksiin ja rajoitteisiin valmistavassa teollisuudessa. Varsinaisen tutkimuksen tavoitteena on toteuttaa topologian optimointi henkilöauton irrotettavalle vetokoukulle. Optimoinnin suorittamisessa käytetään Dassault systemsin Solidworks-ohjelmaa ja sen Topology study -ominaisuutta. Työssä vertaillaan kahta erilaisilla rajoitteilla optimoitua vetokoukkuja. Ensimmäinen versio optimoidaan siten, että se voitaisiin valmistaa valamalla. Toinen versio optimoidaan ilman valamiseen liittyviä rajoitteita.

Optimoinnin tavoitteena oli vetokoukun massan keventäminen ilman materiaalin myötölujuu-den ylittymistä. Koukkuja kuormitettiin kansainvälisen testausmenetelmän esittämällä tavalla. Kun käytettiin valamisen mahdollistavaa rajoitetta, saatiin koukkuja kevennettyä 20,3 prosenttia. Ilman valurajoitetta koukusta saatiin 23,1 prosenttia kevyempi. Ilman rajoitteita optimoidun version valmistaminen osoittautui kannattamattomaksi, koska sen koneistaminen olisi ollut vaikeaa. Materiaalia lisäävillä menetelmillä valmistaminen olisi ollut kannattamatonta ja aiheuttanut materiaalihukkaa. Valurajoitteella optimoidun kappaleen valmistaminen olisi ollut mahdollista, mutta saavutetun geometrian yksityiskohtaisuus olisi ollut ongelma valmistettaessa.

Työ osoittaa, että topologian optimointi on hyödyllinen työkalu koneensuunnittelussa. Sen avulla voidaan suunnitella helposti rakenteita, jotka toteuttavat suunnittelun tavoitteet optimaalisella tavalla. Tällaisten rakenteiden suunnittelu ilman optimointityökaluja olisi hidasta ja vaikeaa.

Avainsanat: Topologian optimointi, SIMP, koneensuunnittelu, Solidworks

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Eemeli Jokinen: Utilization of topology optimization in mechanical part design
Bachelor's thesis
Tampere University
Bachelor's Degree Programme in Mechanical Engineering
May 2022

Topology optimization is a method used in engineering to find optimal material distribution based on desired property of improvement. The goal of optimization may be for example stiffness or heat conductivity of the structure. Several ways of optimizing the topology of the structure have been developed. The most used methods are density-based methods. The best-known density-based method is Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP). When using density-based methods the designed part is distributed in elements. Those elements are given relative density values between 0 and 1. Optimization is given target – for example reducing the weight of the part by 40 %. Additional restrictions like minimum material thickness can also be included.

When using SIMP method the structure is optimized with power law during several iterations. Power law converges the relative densities of the elements towards solid and void elements. This is called 0-1 solution where elements with relative density 0 are void and those with 1 are solid.

In this thesis the mathematic principles behind topology optimization are being shortly discussed. The possibilities and difficulties when manufacturing these optimized structures are also discussed. The main goal of this thesis is topology optimization of detachable towbar. The towbar is optimized with Solidworks Topology study. In this thesis the towbar is optimized with two different constraints and differences between those are discussed. First version is optimized in a way that it could be casted. The second version is optimized without any production constraints.

The goal of optimization was to reduce the weight of the towbar as much as possible while material yield strength is not exceeded. With casting related de-mold constraint the towbar weight was reduced by 20,3 %. Weight of the version without constraints was reduced by 23,1 %. Producing the latter version of the towbar proved to be difficult for it could not be easily milled and using AM would be inefficient and result in material loss.

This thesis demonstrates how useful part of machine design topology optimization is. With topology optimization designing optimal structures that satisfy given measures and restrictions is effortless. Without topology optimization designing these kinds of structures would be a difficult and time-consuming task.

Keywords: Topology optimization, SIMP, engineering design, Solidworks

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TOPOLOGIAN OPTIMOINNIN PERIAATTEITA.....	3
2.1 Tiheyspohjaiset menetelmät.....	3
2.2 Solid Isotropic Material with Penalization	5
2.3 Optimoinnin tuloksien rajoittaminen.....	7
2.4 Optimoitujen osien valmistusmenetelmät ja -rajoitteet.....	11
2.4.1 Koneistus.....	11
2.4.2 Valaminen.....	12
2.4.3 Materiaalia lisäävä valmistus	13
3. VETOKOUKUN TOPOLOGIAN OPTIMOINTI	15
3.1 Optimoitava kappale	15
3.2 Työn suorittaminen	16
3.3 Solidworksin static study ja topology study.....	20
4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	22
4.1 Ensimmäinen koe	22
4.2 Toinen koe	24
4.3 Tuloksien vertailua	28
YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	Three dimensional, kolmiulotteinen
AM	Additive Manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
FE	Finite Element, äärellinen elementti
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization, tiheyspohjainen topologian optimoinnin menetelmä

1. JOHDANTO

Koneensuunnittelun yksi yleisimmistä tavoitteista on kestävä ja kevyt rakenne. Suunnittelutyössä tätä tavoitetta on vaikeaa saavuttaa pelkkien mittojen ja vaatimusten perusteella. Nykyaikaiset suunnitteluohjelmat mahdollistavat kappaleen ominaisuuksien analysoinnin matemaattisia malleja simuloimalla. Saatujen tuloksien perusteella on mahdollista muokata rakennetta paremmaksi. Tätä kutsutaan topologian optimoinniksi.

Topologia itsessään on matematiikan osa-alue, joka käsittelee topologisiksi avaruuksiksi kutsuttuja pistejoukkoja (Väisälä 2005 s. 9). Topologian optimoinnin tavoitteena taas on tuottaa suunniteltavalle kappaleelle rakenne, jossa materiaali on sijoitettu suunnittelutalvuuuteen optimaalisesti ja määrättyt rakenteelliset vaatimukset täyttyvät. Näitä vaatimuksia ovat tyypillisesti rakenteen kantamat kuormat, kappaleen koko ja esimerkiksi sen kiinnityspisteiden sijainnit (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 1).

Topologian optimoinnin avulla kappaleen lujuusominaisuudet saadaan pidettyä vaadituissa rajoissa massan vähentämisestä huolimatta. Staattisten tapauksien lisäksi topologian optimointia voidaan tehdä dynaamisille järjestelmille (Sander et al. 2013). Mekaanisten sovelluksien lisäksi topologian optimointia hyödynnetään myös muissa tapauksissa, kuten lämmönsiirtoon, akustiikkaan ja fluidien virtauksiin liittyvässä suunnittelussa (Sigmund & Maute 2013; Deaton & Grandhi 2013).

Topologian optimoimiseksi on kehitetty useita erilaisia menetelmiä. Tiheyspohjaiseen optimointiin perustuvia menetelmiä käytetään laajimmin, ja siihen pohjautuvia sovelluksia on kehitetty runsaasti (Deaton & Grandhi 2013). Tiheyspohjaisen optimoinnin vaihtoehtoja ovat muun muassa topologiset derivaatat (topological derivatives), tasa-arvojoukkoihin (level-set) pohjautuvat menetelmät sekä vaihekenttämenetelmät (phase field approach) (Sigmund & Maute 2013).

Tiheyspohjaisista menetelmistä tunnetuin on SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), jota myös tässä työssä käytettävän suunnitteluohjelman optimointityökalu hyödyntää (Dassault Systèmes 2019a). Tiheyspohjaisissa menetelmissä materiaalipisteille annetaan kullekin suhteellisen tiheyden arvo ρ , joka saa arvoja väliltä 0–1. Sakkomenetelmiä (penalty methods) käyttämällä nämä tiheyden arvot saadaan iteratiivisesti lähestymään nollaa ja ykköstä eli tyhjää ja kiinteää (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 5; Deaton & Grandhi 2013).

Topologian optimoinnin merkittävänä rajoittajana ovat valmistustekniset haasteet: tiettyjen piirteiden valmistaminen kappaleeseen voi olla liian kallista tai teknisesti mahdotonta. Näitä teknisiä rajoitteita pyritään huomioimaan jo optimoinnin aikana (Zhou et al. 2015). Suunnittelija voi rajoittaa optimointia antamalla ohjelmalle parametreja, joiden avulla rajoitteet otetaan huomioon optimoinnin aikana (Morris et al. 2020).

Materiaalia lisäävällä valmistuksella (Additive Manufacturing, AM) monet näistä rajoitteista voidaan ohittaa. AM-menetelmien ja topologian optimoinnin yhdistelmä tarjoaakin uusia vaihtoehtoja suunnitteluongelmien ratkaisuksi. On kuitenkin syytä huomata, ettei ohjelmiston tuottama ehdotus kappaleen optimoinnista ole useinkaan lopullinen ratkaisu, vaan suunnittelija hyödyntää optimointialgoritmin tuottamaa tulosta ja päättää itse lopullisen rakenteen (Lazarov et al. 2016).

Tässä työssä tutkitaan topologian optimoinnin mahdollisuuksia rakenteiden mekaanisiin ominaisuuksiin liittyen ja vertaillaan valmistusmenetelmien aiheuttamia rajoitteita optimointiin liittyen. Tutkimuksessa käytetään Dassault Systèmesin Solidworks-nimistä CAD-ohjelmistoa, jolla tutkittava kappale mallinnetaan. Suunnittelutyökalun lisäksi työssä hyödynnetään Solidworksin Static study -ominaisuutta ja varsinaisen topologian optimoinnin suorittamisessa Topology study -ominaisuutta.

Työssä optimoidaan henkilöauton vetokoukku ja tutkitaan, kuinka paljon sitä voidaan keventää ilman annettujen rajoitusten ylittymistä. Työssä tutkitaan myös valmistusmenetelmän vaikutusta optimoinnin mahdollisuuksiin ja tuloksiin. Työssä vertaillaan optimoinnin tuloksia valettavan ja muilla valmistusmenetelmillä valmistettavan kappaleen tapauksissa.

Työn sisältö on seuraava. Luvussa 2 esitellään topologian optimoinnin kehitystä ja vaihtoehtoja optimoinnin suorittamiseen. Luvussa keskitytään tiheyspohjaisiin menetelmiin ja edelleen SIMP-menetelmään. Lisäksi tarkastellaan eri valmistusmenetelmien vaikutuksia optimoinnin suorittamiseen. Luvussa 3 esitellään tutkittava kappale ja optimoinnissa käytettävät parametrit sekä vertailtaviksi valitut valmistusmenetelmät, joiden edellyttämällä tavalla optimointia rajoitetaan. Luvussa 4 esitellään tutkimuksissa saadut tulokset. Luvussa myös perehdytään saatuihin tuloksiin ja verrataan niitä toisiinsa sekä lähtötilanteeseen. Lisäksi tuloksia ja niiden merkitystä arvioidaan ja verrataan niitä muihin vastaaviin tutkimuksiin. Viimeisenä luvussa 5 tehdään yhteenveto työn sisällöstä.

2. TOPOLOGIAN OPTIMOINNIN PERIAATTEITA

Topologian optimoinnin voidaan sanoa saaneen todellisen alkusysäyksensä 1980-luvun lopussa, kun Martin Philip Bendsøe ja Noboru Kikuchi julkaisivat vuonna 1988 artikkelin numeerisesta topologian optimoinnista. Bendsøe laajensi tutkimusta heti seuraavana vuonna artikkelissaan ”Optimal shape design as a material distribution problem”, joka esitteli tiheyspohjaisen optimoinnin perusteita (Sigmund & Maute 2013). Sitten topologian optimoinnin kehitys on ollut nopeaa. Tietokoneiden laskentatehon valtava kasvu ja tietokoneavusteisen suunnittelun (Computer Aided Design, CAD) kehitys ovat autta- neet myös topologian optimoinnin kehityksen nykyiseen tilaansa.

Tapoja topologian optimoimiseksi on tutkittu paljon ja kehitys on ollut 2000-luvulla no- peaa. Vanhoja menetelmiä on jalostettu ja uusia vaihtoehtoja luotu. Eri lähestymistapoja topologian optimointiin ovat tiheyspohjaiset menetelmät, heuristiikkaan pohjautuvat Hard-kill-menetelmät, topologiset derivaatat (topological derivatives), tasa-arvojoukkoi- hin (level-set) pohjautuvat menetelmät, vaihekenttämenetelmät (phase field approach) ja solujen jakautumisesta vaikutteita saanut cellular division-based -menetelmä. (Deaton & Grandhi 2013) Tiheyspohjaiset menetelmät ovat näistä eniten käytettyjä ja pitkälle ke- hitettyjä, mutta niiden perusidea on verrattain yksinkertainen. Seuraavassa tarkastellaan tiheyspohjaisen topologian optimoinnin perusratkaisua.

2.1 Tiheyspohjaiset menetelmät

Tiheyspohjaiset optimointimenetelmät perustuvat kiinteään määrittelyjoukkoon äärellisiä elementtejä. Tavoitteena on minimoida kohdefunktion arvo määrittämällä elementit, joi- hin materiaalia sijoitetaan tai joista sitä toisaalta poistetaan. Rakenteiden optimoinnissa tämä minimiarvoonsa haluttava funktio on usein rakenteen joustavuus, toisin sanoen ha- lutaan maksimoida jäykkyyttä. Funktiota rajoitetaan yleensä ainakin käytettävän materi- aalin määrän osalta, mutta myös muita rajoitteita voidaan käyttää. (Deaton & Grandhi 2013; Lazarov et al. 2016) Diskreetissä tapauksessa jokaisessa elementissä on joko materiaalia, jolloin elementti saa arvon 1, tai tyhjää, jolloin elementin arvo on 0. Molem- mat arvot ovat mahdollisia kaikille elementeille suunnittelutilavuudessa Ω . Yleinen opti- mointiongelma voidaan kirjoittaa muotoon (Sigmund & Maute 2013)

$$\left. \begin{aligned} \min_{\rho} : F &= F(\mathbf{u}(\rho), \rho) = \int_{\Omega} f(\mathbf{u}(\rho), \rho) dV \\ s. t. : G_0(\rho) &= \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) dV - V_0 \leq 0 \\ : G_j(\mathbf{u}(\rho), \rho) &\leq 0, j = 1, \dots, M \\ : \rho(\mathbf{x}) &= 0 \text{ or } 1, \forall \mathbf{x} \in \Omega \end{aligned} \right\}. \quad (2.1)$$

Yhtälöryhmässä (2.1) F on minimoitava funktio eli optimoinnin tavoitefunktio ja G_0 on tilavuutta rajoittava funktio, joka pakottaa tilavuuden alkuperäistä pienemmäksi. Tilavuuden pienentyessä myös kappaleen massa pienenee. Kolmannessa yhtälössä G_j kuvaa mahdollisia muita rajoitteita, joita on M kappaletta. Alimmassa yhtälössä $\rho(\mathbf{x})$ on tiheysmuuttuja, joka saa arvon 0 tai 1. Vektori \mathbf{u} toteuttaa tilayhtälön, joka voi olla lineaarinen tai epälineaarinen. Mahdollisimman jäykkää rakennetta tavoittelevassa optimoinnissa \mathbf{u} on elementin myötymä ja $f(\mathbf{u}(\rho), \rho)$ on myötöenergian tiheys pisteessä.

Sigmund ja Maute (2013) toteavat, ettei tilavuuden vähentäminen ole kaikkien optimointitilanteiden tavoite, mutta tilavuusehdon avulla optimointi antaa kelvollisen lähtökohdan varsinaiselle optimoinnille ja viitettä sen tuloksista. Tämän vuoksi tilavuuden rajoittaminen on hyvä perusrajoite optimoinnille. Sigmund ja Maute (2013) huomauttavat myös, että todellisissa optimointitilanteissa rajoitteita on usein paljon, joten tässä esitetty ratkaisu on yksinkertaistettu esimerkki.

Kun yleisestä ratkaisusta siirrytään lähemmäs käytäntöä ja tiheyspohjaisen optimoinnin todellista toimintaa, voidaan ensimmäisenä jakaa suunnittelutilavuus Ω tiheysjakaumaa kuvaaviin elementteihin, joita on N kappaletta ja joiden tiheys voi olla 0 tai 1. Yleinen ratkaisu elementteihin jaetulle suunnittelutilavuudelle saadaan muotoon

$$\left. \begin{aligned} \min_{\rho} : F &= F(\mathbf{u}(\boldsymbol{\rho}), \boldsymbol{\rho}) = \sum_i \int_{\Omega_i} f(\mathbf{u}(\rho_i), \rho_i) dV \\ s. t. : G_0(\boldsymbol{\rho}) &= \sum_i v_i \rho_i - V_0 \leq 0 \\ : G_j(\mathbf{u}(\boldsymbol{\rho}), \boldsymbol{\rho}) &\leq 0, j = 1, \dots, M \\ : \rho_i &= 0 \text{ or } 1, i = 1, \dots, N \end{aligned} \right\}, \quad (2.2)$$

jossa v_i on elementin tilavuus ja ρ_i sen tiheys. Suunnittelumuuttujan vektori on $\boldsymbol{\rho}$, ja sen pituus on N . Sigmundin ja Mauten (2013) mukaan tämä diskreetti muoto on perusta suurimmalle osalle kehitetyistä topologian optimoinnin menetelmistä.

Ratkaisun diskreetti muoto tekee siitä hankalan ratkaista. Diskreettejä ongelmia on mahdollista ratkaista matemaattisesti tai heuristisesti, mutta ne eivät sovellu topologian optimoinnin kaltaisiin tapauksiin, joissa muuttujia on tuhansia. Siksi diskreetit ratkaisutavat eivät ole saavuttaneet suurta suosiota ja ne soveltuvat käytettäväksi vain rajatuissa tapauksissa. Myös epälineaaristen ehtojen täyttämisen vaikeus on näiden ratkaisujen haasteena. (Sigmund & Maute, 2013; Deaton & Grandhi 2013)

Diskreetin ratkaisun haasteiden vuoksi on kannattavaa korvata diskreetit muuttujat jatkuvilla ja etsiä keino näiden muuttujien saamiseksi lähelle diskreettiä ratkaisua (Deaton & Grandhi 2013). Kun käytetään interpolointifunktioita elementtien tiheyden tulkintaan ja gradienttiin perustuvia algoritmeja, saadaan haluttu tulos aikaan melko vähäisellä iteroinnilla. Tiheysparametrin ollessa jatkuva esitetään ratkaisu muodossa

$$\left. \begin{aligned}
\min_{\rho} : F &= F(\mathbf{u}(\boldsymbol{\rho}), \boldsymbol{\rho}) = \sum_i \int_{\Omega_i} f(\mathbf{u}(\rho_i), \rho_i) dV \\
s. t. : G_0(\boldsymbol{\rho}) &= \sum_i v_i \rho_i - V_0 \leq 0 \\
: G_j(\mathbf{u}(\boldsymbol{\rho}), \boldsymbol{\rho}) &\leq 0, j = 1, \dots, M \\
: 0 \leq \rho_i &\leq 1, i = 1, \dots, N
\end{aligned} \right\}, \quad (2.3)$$

jossa ρ_i voi saada arvoja väliltä 0–1. Tämä ratkaisun muoto on perusta suurelle osalle topologian optimoinnin sovelluksista. (Sigmund & Maute 2013)

Jos elementin tiheys saa arvon 0, aiheuttaa se ongelmia käytännön sovelluksissa. Se voi aiheuttaa singulariteettia elementtien matriisissa tai estää materiaalin lisäämisen kohtaan, jonka arvo on 0. Näiden vuoksi tiheydelle annetaan usein minimiarvo ρ_{min} . (Deaton & Grandhi 2013) Näissä tapauksissa arvon ρ_{min} saava elementti tulkitaan tyhjäksi ja ratkaisun (2.3) alin rivi saa muodon $0 \leq \rho_{min} \leq \rho_i \leq 1, i = 1, \dots, N$.

Yllä saatua ratkaisua hyödynnetään eri tavoin useissa eri ratkaisumalleissa. Aiemmin mainituista menetelmistä useat – tiheyspohjaiset menetelmät, topologiset derivaatat ja level set -menetelmät – pohjautuvat tähän yhtälöryhmään. Erot näiden tapojen väliltä löytyvät gradientin laskentatavasta ja rakenteen tilan päivittämisestä laskennan aikana (Sigmund & Maute 2013).

2.2 Solid Isotropic Material with Penalization

Tiheyspohjaisista menetelmistä tunnetuin on Martin Bendsøen vuonna 1989 sekä Ming Zhoun ja George Rozvanyn vuonna 1991 esittelemä SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) (Deaton & Grandhi 2013). Se on yksinkertainen tapa saavuttaa 1–0-ratkaisu tiheyspohjaisessa optimoinnissa. SIMP-menetelmää on vuosien varrella kehitetty ja sen rinnalle on kehitetty muita interpoloinnin vaihtoehtoja. Yksi näistä on RAMP (Rational Approximation of Material Properties), jonka merkittävin ero ja etu SIMP-menetelmään verrattuna on se, että RAMP-menetelmän herkkyyks ei ole 0 elementin tiheyden ollessa 0. Materiaalille ei siis tarvitse määrittää minimitiheyttä, joten menetelmällä pystytään ratkaisemaan tapauksia, joissa tiheydet ovat erittäin pieniä. (Sigmund & Maute 2013; Deaton & Grandhi 2013) SIMP-menetelmän yhteydessä Bendsøe ja Sigmund (2004 s. 10) esittävät sopivaksi ρ_{min} -arvoksi 10^{-3} . Muita vaihtoehtoisia versioita ovat esimerkiksi SINH, jossa sakotetaan (penalize) tilavuutta materiaaliparametrien sijasta, sekä PAMP (Porous Anisotropic Material with Penalization), joka soveltuu mikrorakenteiden ja moniskaalaisten materiaalien optimointiin (Deaton & Grandhi 2013; Wu et al. 2021).

Tiheyden ja materiaalin ominaisuuksien välinen interpolointi voidaan kirjoittaa muotoon

$$f(\mathbf{u}(\rho), \rho) = g(\rho)f_0(\mathbf{u}), \quad (2.4)$$

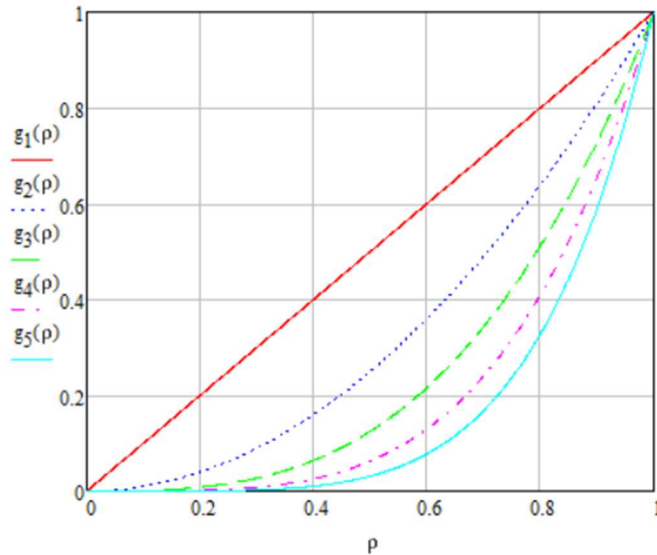
jossa $g(\rho)$ on tiheyden interpolointifunktio ja $f_0(\mathbf{u})$ kiinteän materiaalin kentän funktio, esimerkiksi jäykkyyttä maksimoidessa $f_0(\mathbf{u})$ kappaleen jännitysenergian tiheyttä. Tätä yhtälöä hyödynnetään useissa ratkaisuissa ja myös SIMP-menetelmässä. (Sigmund & Maute 2013)

SIMP käyttää power law -nimistä tapaa tuottamaan riippuvuus tiheysmuuttujan ja materiaaliominaisuuden välille. Power law tunnetaan myös nimellä fictitious material model (Deaton & Grandhi 2013). Suomeksi power law on potenssilaki. Käytännössä power law tarkoittaa tiheysparametrin korottamista potenssiin ja siten ratkaisun ohjaamista kohti 1–0-tilannetta. Yleisessä tapauksessa power law saa muodon

$$g(\rho_i) = \rho_i^p, \quad (2.5)$$

jossa p on määrätty potenssi, johon elementtikohtainen tiheys ρ_i korotetaan, ja sen arvo voidaan valita tapauskohtaisesti. Käytettävän arvon tulee olla suurempi kuin 1, jotta keskivaiheen tiheydet saadaan ohjattua kohti nollaa tai ykköstä (Zhou et al. 2001; Bendsøe & Sigmund 2004 s. 6). Tämä perustuu elementtien heikkoihin materiaaliominaisuuksiin niiden tilavuuteen verrattuna, jolloin niistä on kannattavaa päästä eroon optimoinnin minimiarvon saavuttamiseksi (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 6). Yleisenä sääntönä voidaan sanoa arvon $p = 3$ takaavan hyviä tuloksia (Sigmund & Maute 2013; Lazarov et al. 2016). Funktion käyttäytyminen eri p :n arvoilla on esitetty kuvassa (1). Kuvaajassa ρ on tiheysmuuttuja ja $g_p(\rho) = \rho^p$ yhtälön (2.5) mukaisesti. Kuvasta (1) voidaan nähdä, että riittävän suuri eksponentti on tarpeellinen laadukkaan tuloksen saavuttamiseksi.

Liian pienellä tai suurella p :n arvolla riskinä on optimoinnin ohjautuminen lokaaliin minimiin globaalin minimin sijasta (Sigmund & Maute 2013). Näihin tuloksiin jää tyypillisesti myös runsaasti nollan ja ykkösen välisten elementtien ”harmaata aluetta” (Bruggi 2016). Sen sijaan hyvin valitulla p :n arvolla tehty optimointi tuottaa tarkkoja tuloksia, joissa on vain vähän tyhjän ja kiinteän välistä aluetta (Bendsøe & Sigmund 2004 s.13). Harmaaksi alueeksi kutsutaan elementtejä, joiden tiheyden arvo on optimoinnin jälkeen jotain muuta kuin 0 tai 1. Harmaata aluetta ei voida ikinä täysin välttää, tämä johtuu alkuperäisen diskreetin ongelman muuttamisesta jatkuvaksi (Lazarov et al. 2016). Suuri harmaa alue aiheuttaa kuitenkin ongelmia, joita tarkastellaan luvussa 2.3.



Kuva 1. Power law -menetelmän parametrin p (penalization parameter) vaikutus tuloksiin SIMP-menetelmää käytettäessä. (mukaillen lähteestä Deaton & Grandhi 2013)

Tyypillisessä kappaleen jäykkyyttä tavoittelevassa optimoinnissa materiaalin Youngin moduuli eli kimmokerroin E_0 sisällytetään interpolointiin, jolloin saadaan selville elementtikohtainen jäykkyys. Yhtälö saa muodon

$$E(\rho_i) = g(\rho_i)E_0 = \rho_i^p E_0. \quad (2.6)$$

On tärkeää huomata, että power law vaatii toimiakseen ehdon tilavuuden rajoittamisesta. Rajoittaminen voi olla suoraa tai epäsuoraa. (Lazarov et al. 2016) Menetelmän toimimisen edellytyksenä ovat myös elementtien isotrooppisuus ja homogeenisyys (Wu et al. 2021)

2.3 Optimoinnin tuloksien rajoittaminen

Edellä esitettyyn optimointitapaan liittyy olennaisesti kaksi merkittävää ongelmaa: ”checkerboard pattern” ja ”mesh dependency” (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 28; Lazarov et al. 2016). Suoraan suomennettuina nämä tarkoittavat shakkilautakuvioita ja verkko-riippuvuutta, ja nimet ovatkin melko kuvaavia. Molemmat ilmiöt on tunnettu jo kauan ja niihin on kehitetty ratkaisuja jo kehityksen varhaisessa vaiheessa (Zhou et al. 2001).

Ensin mainittu checkerboard pattern tarkoittaa rakenteessa vuorottelevia tyhjiä ja kiinteitä elementtejä, jotka muodostavat rakenteeseen eräänlaista ruudukkoa. Tämä shakkiruudukko aiheutuu FE-mallissa olevista virheistä (Zhou et al. 2001). Käytännössä syynä on se, että tällaisen hienojakoisen yksinkertaisista elementeistä kootun ruudukon jäykkyys on lähes yhtä hyvä kuin umpinaisen materiaalin (Bendsøe & Sigmund 2004 s.

40). Tällainen rakenne ei kuitenkaan ole käytännössä mahdollinen. Ilmiö on yleisin yksinkertaisia elementtejä (kolmiot, nelikulmiot) käytettäessä, ja sitä voidaankin estää muun muassa käyttämällä korkeamman asteen elementtejä (Sigmund & Maute 2013). On kuitenkin huomioitava, että korkeamman asteen elementit vaativat optimointia tehdessä merkittävästi enemmän laskentatehoa (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 42).

Mesh dependency taas tarkoittaa optimoinnista saatujen tulosten riippuvuutta käytettyjen elementtien koosta. Käytettäessä eri kokoisia elementtejä voivat saadut tulokset olla täysin erilaisia (Lazarov et al. 2016). Tämä johtuu siitä, että pienempiä elementtejä käytettäessä rakenteeseen saadaan luotua enemmän ja pienempiä reikiä, jotka parantavat rakenteen hyötysuhdetta. (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 30). Tarpeeksi pieniä elementtejä käyttämällä rakenteen sisälle saadaan siis luotua aina vain pienempiä osia ja rakenteita niille (Zhou et al. 2001; Zegard & Paulino 2016). Syntyvä mikrorakenne on myös tyypillisesti anisotrooppinen eikä siis toteuta muun muassa SIMP-menetelmän ehtoa optimoitavan materiaalin isotrooppisuudesta (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 30). Mikrorakenteiden tai usealla skaalalla (makro- ja mikrorakenne) tehtävän optimoinnin tapauksessakin mikrotason rakenne halutaan pitää kappaleessa yhtenäisenä (Wu et al. 2021).

Jotta tulokset saadaan elementtien koosta ja tarkastelutasosta riippumattomaksi, täytyy optimointia rajoittaa tai tuloksia suodattaa (Sigmund & Maute 2013). Valtaosa optimoinnin menetelmistä hyödyntää jotakin suodatusmenetelmää (Clausen & Andreassen 2017). Erilaisia ratkaisuja on kehitetty runsaasti (Zhou et al. 2001; Lazarov et al. 2016). Niistä SIMP-menetelmän kanssa käytettäviä ovat perimeter control, sensitivity filter, density filter ja projection filter eli vapaasti suomennettuna piirin kontrollointi, herkkyiden suodatus, tiheyden suodatus ja projektiosuodatus (Zegard & Paulino 2016). Menetelmien toiminta perustuu elementtien arvojen muokkaamiseen ympäristönsä perusteella. (Deaton & Grandhi 2013)

SIMP-menetelmää käytettäessä perimeter control ja sensitivity filter tunnetaan myös termillä one-field SIMP. Näiden lisäksi one-field SIMP:iin luetaan kuuluvaksi myös gradientin kontrollointi (gradient control). (Sigmund & Maute 2013) Perimeter control eli vapaasti suomennettuna piirirajoitin perustuu kappaleen ulko- ja sisärajojen pituuden (kaksiulotteinen tapaus) tai pinta-alan (kolmiulotteinen tapaus) rajoittamiseen. Näin saadaan rajattua syntyvien pienten reikien määrää. (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 31) Menetelmän heikkous on se, ettei sillä pystytä suoraan rajaamaan tietyn kokoisia piirteitä pois mallista vaan toivottu tulos saavutetaan kokeilemalla (Zhou et al. 2001).

Density filter tunnetaan myös nimellä two-field SIMP. Tämä johtuu siitä, että se hyödyntää sekä muuttujan ρ kenttää (field) että tiheyden ρ kenttää. (Sigmund & Maute 2013)

Malli kuvaa todellisia tiheyksiä suunnitteluparametrien painotettuna keskiarvona määrytällä alueella, jonka säde on r_{min} (Zegard & Paulino 2016). Sigmundin ja Mauten (2013) mukaan sopivilla parametreilla tehtynä density filterin avulla saavutetaan lähes diskreettejä ratkaisuja.

Projection filteristä käytetään myös nimeä three-field SIMP. Density filterin kenttien lisäksi käytetään projektiokenttää $\hat{\rho}$, joka saadaan tyypillisesti tasoitetun Heaviside-funktion avulla. (Sigmund & Maute 2013; Zhou et al. 2015) Toisin kuin sensitivity filterin ja density filterin tapauksessa projection filteriä käytettäessä tyhjän ja kiinteän välisiä harmaita alueita ei juurikaan pääse syntymään (Deaton & Grandhi 2013; Lazarov et al. 2016; Clausen & Andreassen 2017). Zhou et al. (2015) mukaan kolmikenttäinen optimointijärjestelmä noudattaa seuraavia yhtälöitä:

$$\hat{\rho}_i = \frac{\sum_{j \in \mathbb{N}_i} \omega(\mathbf{x}_j) v_j \rho_j}{\sum_{j \in \mathbb{N}_i} \omega(\mathbf{x}_j) v_j}, \quad \omega(\mathbf{x}_j) = R - |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|, \quad (2.7)$$

$$\rho_i = \frac{\tanh(\beta \cdot \eta) + \tanh(\beta \cdot (\hat{\rho}_i - \eta))}{\tanh(\beta \cdot \eta) + \tanh(\beta \cdot (1.0 - \eta))}. \quad (2.8)$$

Yhtälössä (2.7) \mathbb{N}_i kuvaa elementin i suodatusympäristön elementtejä, R on suodattimen säde, v_j on elementin j tilavuus, \mathbf{x}_i ja \mathbf{x}_j ovat elementtien i ja j keskipisteiden koordinaatit ja ω painottaa niiden välistä etäisyyttä. Yhtälössä (2.8) β ohjaa arvioidun Heaviside-funktion jyrkkyyttä ja η on kynnyisarvo.

Yhtälöistä voidaan huomata Heaviside-projektion vaikutus tuloksiin. Tämän projektion sileyttä ohjataan kohti jyrkempiä muotoja iteroinnin aikana. Siten varmistetaan Heaviside-funktion differentioituvuus ja laadukas optimoinnin tulos. (Sigmund & Maute 2013) Alex Ferrerin (2019) mukaan projection filteriä käyttämällä päästään hyvin eroon harmaasta alueesta, mutta saatu tulos voi jäädä kauas optimaalisesta, koska interpoloinnin aikana materiaaliominaisuudet vaikuttavat tulokseen. Projection filter ei kuitenkaan poista harmaata aluetta, jos se johtuu huonosta sakotuksesta (penalization) (Sigmund & Maute 2013).

Projection filteriä käyttämällä on mahdollista rajata määrättyä pienemmät piirteet pois optimoitavasta rakenteesta. Tästä rajaamisesta käytetään termiä minimum length scale (Deaton & Grandhi 2013; Lazarov et al. 2016), ja se liittyy läheisesti mesh dependency-ongelmaan (Zhou et al. 2001). Käytännössä suunnittelija määrittää halkaisijan d_{min} , jota halkaisijaltaan pienempiä tyhjiä tai kiinteitä alueita sallita optimoituun malliin (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 36) Tällä menetelmällä saadaan huomioitua esimerkiksi valmistukseen liittyvät rajoitteet jo optimoinnin aikana (Guest 2008). Minimum length scale estää tyypillisesti myös shakkilautailmiön syntymistä (Bendsøe & Sigmund 2004 s. 39; Deaton &

Grandhi 2013). Tämä on helppo ymmärtää, koska vuorottelevat tyhjt ja kiinteät elementit ovat juuri sellaisia hyvin pieniä rakenneosia, joita minimum length scale rajoittaa.

Optimointiin voidaan määrittää myös maximum length scale, jolla rajataan liian suuret piirteet pois optimoinnista. James Guest (2008) sanoo myös maximum length scalen olevan tärkeä työkalu suunnittelijalle, koska se mahdollistaa pelkkää minimum length scale -suodattamista kattavamman optimoinnin kontrollin. Lazarovin et al. (2016) mukaan tällainen rajoittaminen voi olla tarpeen esimerkiksi kuljetuksen rajoitteiden tai valmistuksessa käytettävien materiaalien kokorajoitteiden – esimerkiksi teräslevyjen rajallisen koon – vuoksi. Käytännössä maximum length scale ohjaa kaikki rakenneosat halkaisijaltaan pienemmiksi kuin annettu maksimiarvo d_{max} (Guest 2008). Guestin (2008) esittelemä ratkaisu oli ensimmäinen tähän ongelmaan vastauksen tarjonnut algoritmi. Fyysisiin mittoihin sidottuina minimum ja maximum length scale eivät ole riippuvaisia optimoinnissa käytettävien elementtien määrästä tai koosta (Guest 2008).

Kuten jo aiemmin mainittiin, jatkuvalla elementtien tiheysjakaumalla tehtävän optimoinnin tulokset eivät ole ikinä täysin diskreettejä, eli kaikkien elementtien arvo ei ole optimoinnin jälkeen 0 tai 1. Tämä yleisen ratkaisun puute on ongelma, ja se osoittaa jatkuvilla arvoilla tehtävän optimoinnin heikkouden. Oikeilla arvoilla ja menetelmillä tehtynä tulokset saadaan kuitenkin lähelle 0–1-ratkaisua, jolloin harmaasta alueesta ei aiheudu merkittävää haittaa suunnittelutyössä.

Suuri harmaa alue sen sijaan jättää tuloksiin tulkinnanvaraa. Saavutettu tulos ei myöskään ole optimaalinen, koska rakenteelle ei ole saavutettu muotoa, jossa kappaleen rajat olisivat selkeät ja materiaalia olisi mahdollisimman harvoissa elementeissä. Harmaasta alueesta pitää luonnollisesti päästä eroon ennen kappaleen valmistamista, joten tarvitaan suunnittelijan tai ohjelmiston tulkintaa (Clausen & Andreassen 2017). Optimoinnin jälkeen tehty mallin muokkaaminen saattaa johtaa ei-optimaaliseen rakenteeseen tai jopa suunnittelu-ehdojen vastaiseen kappaleeseen (Lazarov et al. 2016). Edellä esitelty projection filter on eräs tehokas tapa saavuttaa 0–1-tulos.

Kaikki edellä mainitut rajoitteet ja suodattimet parantavat saatuja tuloksia, mutta samalla ne lisäävät laskettavia asioita optimoinnissa. Tiheyspohjainen optimointi vaatii ylipäätään paljon mallin iterointia, ja erityisesti optimoinnin tilan laskenta iteraatioiden välissä vaatii paljon laskentatehoa. (Lazarov et al. 2016) Laskennan vaatiman ajan ja riittävän tarkan tuloksen välille pitää siis etsiä tasapaino (Bruggi 2016). Tarvittavaan tuloksen tarkkuuteen vaikuttaa myös kappaleen valmistamiseen liittyvät edellytykset mallin tarkkuudelle. Tätä käsitellään seuraavassa aliluvussa.

2.4 Optimoitujen osien valmistusmenetelmät ja -rajoitteet

Minimum ja maximum length scale ovat merkittäviä optimoinnin suodattimia, kun halutaan huomioida valmistustekniset rajoitteet. Valmistuksessa käytettävät menetelmät ovat aina suunnittelua rajoittava tekijä, joten valmistuksen epätarkkuus määrää optimoinnissa käytettävän minimum length scalen (Lazarov et al. 2016). Valmistusmenetelmästä riippuen myös muiden rajoitteiden asettaminen on tarpeellista. Tässä luvussa keskitytään perinteisistä valmistusmenetelmistä koneistukseen ja valamiseen, jotka ovat koneenrakennuksessa varsin yleisesti käytettyjä valmistusmenetelmiä (Liu & Ma 2016). Näiden lisäksi esitellään materiaalia lisäävä valmistus, jota käytettäessä useista rajoitteista päästään eroon. Vaikka materiaalia lisäävä valmistuksen merkitys kasvaa jatkuvasti, edustaa se vielä pientä osaa tuotannosta, ja koneistuksen sekä valamisen kaltaisten perinteisten menetelmien merkitys on edelleen suuri (Liu & Ma 2016).

Suunnitteluohjelmistot ulottavat topologian optimoinnin suunnittelijan intuitiota laajemmalle, ja niiden avulla saavutetaan parempia suunnittelun tuloksia (Liu & Ma 2016; Wu et al. 2021). Monia optimoinnissa saatavia piirteitä ei kuitenkaan voida sellaisenaan toteuttaa, vaan optimointia joudutaan rajoittamaan, jotta kappaleiden valmistaminen on mahdollista (Lazarov et al. 2016). Valmistusrajoitteet kannattaa huomioida jo varhain suunnitteluvaiheessa, koska silloin se ei aiheuta merkittäviä kuluja ja samalla tehostetaan suunnittelutyötä (Langelaar 2019). Tähän onkin kiinnitetty viime vuosina entistä enemmän huomiota ja optimointia on kehitetty vastaamaan valmistuksen vaatimuksia (Wang & Kang 2017; Langelaar 2019). Tyypillisesti suunnittelija joutuu kuitenkin jälkikäsittelemään topologian optimoinnin tulosta ennen mallin lähettämistä tuotettavaksi (Lazarov et al. 2016).

2.4.1 Koneistus

Koneistamalla valmistettavien kappaleiden tapauksessa pitää huomioida aihoiden kiinnitys työstökoneeseen sekä käytettävien työkalujen fyysisten mittojen aiheuttamat rajoitteet. Työstettävän kappaleen on pysyttävä tiukasti paikoillaan ja työstökoneen terän päästävä kaikkiin pisteisiin kappaleen pinnalla (Langelaar 2019; Morris et al. 2020).

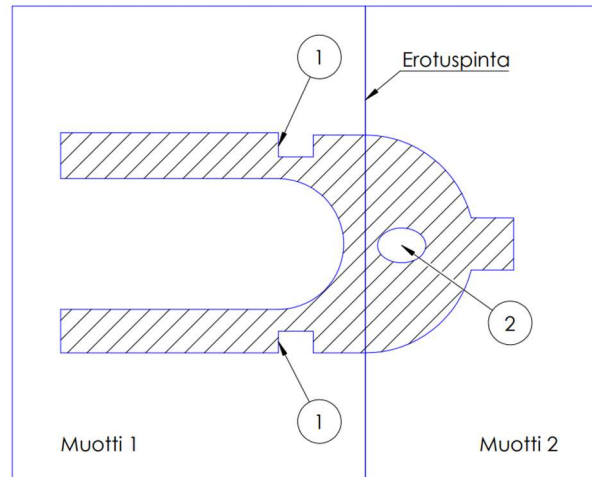
Käytössä on useita erilaisia työkaluja ja nykyaikaisilla moniakselisilla työstökoneilla kappaleita voidaan lähestyä useista kulmista, mutta lastuavan työkalun fyysiset mitat (hal-kaisija, pituus) rajoittavat mahdollisuuksia (Langelaar 2019). Lastuavan terän geometria pitää huomioida pinnan muotoja suunnitellessa, koska kaarevuussäteeltään työstävää terää pienempiä muotoja ei pystytä valmistamaan. Vaihtoehtoja rajoittaa myös se, että terän ja työstettävän kappaleen värähtelyä pitää välttää. (Morris et al. 2020) Kappaleen

muodolla on myös suuri vaikutus työstönopeuteen. Esimerkiksi jatkuva työkalujen vaihto sekä hankalat liikeradat hidastavat valmistusta lisäten kustannuksia (Liu & Ma 2016).

Yksi tapa suodattaa optimoinnin tuloksia työstökoneille sopiviksi on aiemmin mainittu minimum length scale. Sillä päästäänkin helposti eroon valmistuksen kannalta liian pienistä rakenteen osista. Sen lisäksi tarvitaan myös muita parametreja, joilla voidaan rajoittaa esimerkiksi kappaleeseen optimoidessa syntyviä uria tai taskuja, joiden koneistus on hankalaa tai jopa mahdotonta. (Liu & Ma 2016)

2.4.2 Valaminen

Valamalla valmistettävien kappaleiden tapauksessa huomioon tulee ottaa ennen kaikkea valumuotin poistamisen aiheuttamat rajoitteet. Muotti täytyy pystyä poistamaan valetun kappaleen ympäriltä valmistettavaa kappaletta tai muotteja vahingoittamatta (Lazarov et al. 2016; Wang & Kang 2017). Tavallinen valaminen ja ruiskuvalaminen voidaan tässä lukea samaksi asiaksi, koska niiden keskinäisillä eroilla ei ole juurikaan merkitystä topologian optimoinnin kannalta. Kappaleen jäähdyttäminen pitää huomioida, koska merkittävästi vaihtuva materiaalivahvuus aiheuttaa kappaleeseen jännityksiä sen jäähdyttämisen aikana heikentäen sen kestävyyttä. Erityisesti tämä pitää huomioida vahvistusriipojen suunnittelussa. (Liu & Ma 2016) Kappaleen sisällä ei voi olla onttoja alueita eikä sisennöksiä, koska ne estävät muotin irrottamisen. Valamisen estäviä muotoja on havainnollistettu kuvassa (2). Tällaiset rajoitteet vaikuttavat merkittävästi topologian optimointiin, koska muottien irrottamisen vaatimukset rajoittavat kappaleen geometriaa huomattavasti. (Wang & Kang 2017)



Kuva 2. Valamiseen liittyviä rajoitteita. Kuvan muotit on tarkoitus erottaa vasemmalle ja oikealle. Valettavassa kappaleessa ei voi olla sisennöksiä (1) eikä sisäisiä onttoja kohtia (2). (mukaillen lähteestä Wang & Kang 2017)

Valamisen tapauksessakin length scale -menetelmiä voidaan hyödyntää kappaleen mitoituksessa hyvän valettavuuden saavuttamiseksi. Liun ja Man (2016) mukaan on kuitenkin syytä huomioida riski paikalliseen minimiin päättämisestä ja tarkentaakin rajoitteita vaiheittain optimoinnin edetessä. Lisäksi muottien erotussuunta pitää pystyä huomioimaan optimoinnissa. Wang ja Kang (2017) kutsuvat tätä valurajoitteeksi (casting constraint). Valurajoitteen toteuttamiseksi on kehitetty useita menetelmiä (Liu & Ma 2016; Wang & Kang 2017).

2.4.3 Materiaalia lisäävä valmistus

Uudet valmistusmenetelmät – etenkin materiaalia lisäävä valmistus (AM) – ovat tuoneet topologian optimointiin runsaasti uusia mahdollisuuksia (Wu et al. 2021). Toisin kuin perinteiset valmistusmenetelmät, jotka perustuvat materiaalin poistamiseen aihioista, AM-valmistuksessa materiaalia lisätään kerroksittain aihioon. Näin vältytään monilta valmistuksen rajoiteilta (Lazarov et al. 2015). Materiaalin lisääminen johtaa parempaan raaka-aineen hyödyntämiseen, koska ylimääräistä materiaalia ei jouduta poistamaan aihioista (Meng et al. 2019).

Lisäävä valmistus ei juurikaan rajoita rakenteen monimutkaisuutta, jolloin topologian optimoinnin mahdollisuudet laajenevat merkittävästi (Liu & Ma 2016). AM-valmistuksen lähtökohtana on aina tietokoneella luotu 3D-malli kappaleesta (Gibson et al. 2010 s. 4). AM-menetelmiä käytettäessä makrorakenteen ei tarvitse olla joko tyhjää tai kiinteää, vaan myös erilaisia huokoisia tai rakenteeltaan jaksollisia kappaleita voidaan valmistaa (Meng et al. 2019). Tämä mahdollistaa entistä kevyempien mutta lujien rakenteiden valmistamisen (Liu & Ma 2016). Gibson et al. (2010 s. 9) mainitsevat lisäävän valmistuksen etuna myös riippumattomuuden muoteista ja kappaleen kiinnittämiseen tarvittavista jigeistä.

Tämä tekee pienten erien valmistamisesta kannattavampaa. AM-menetelmiä käytetäänkin laajasti prototyyppien valmistuksessa (Meng et al. 2019).

Vaikka materiaalia lisäävä valmistuksessa vältetään useat edellä mainittujen menetelmien ongelmat, on optimoinnin rajoitteena se, että rakenteen pitää valmistuksen aikana kantaa itsensä. Tämä ei ole kaikissa tapauksissa mahdollista ilman ulkoisia tukirakenteita (Lazarov et al. 2016; Liu & Ma 2016). Nämä rakenteet lisäävät materiaalikulutusta ja pidentävät valmistusaikaa. Kappaleen tulostamiseen käytettävällä laitteella on luonnollisesti omat rajoituksensa tarkkuuden osalta eikä niitä voi ylittää. Minimum length scale -tyyppinen rajoittaminen on siis tässäkin tapauksessa tarpeen. (Liu & Ma 2016) Tämän lisäksi 3D-tulostettu kappale vaatii usein jälkikäsittelyä (Lazarov et al. 2016; Meng et al. 2019).

AM-menetelmien ongelmana on myös valmistetun kappaleen mekaanisten ominaisuuksien riippuvuus tulostussuunnasta. Tulostussuunnalla on vaikutusta myös eri pinnoilla saavutettavaan pinnankarheuteen. (Gibson et al. 2010 s. 11; Nicolas et al. 2019) Tulostussuunnan lisäksi käytettävän materiaalin ominaisuudet eivät pysy vakiona: Mengin et al. (2019) mukaan AM-menetelmillä valmistettujen kappaleiden toistettavuus on huono, joten niiden lujuusominaisuuksia joudutaan toistuvasti tutkimaan veto- ja puristuskokeilla. Heikko toistettavuus on myös yksi merkittävimmistä AM-valmistuksen laajemman hyödyntämisen esteistä (Meng et al. 2019).

Vaikka lisäävään valmistukseen liittyy tiettyjä haasteita eikä sen kehitys ole vielä riittävän pitkällä perinteisten valmistusmenetelmien haastamiseksi massatuotannossa, liittyy siihen suuria tulevaisuuden odotuksia. Myös materiaalia lisäävän ja poistavan valmistuksen yhdistelmiä on kehitetty: näissä kappaleen perusmuoto luodaan 3D-tulostamalla, jonka jälkeen pinta viimeistellään koneistamalla (Liu & Ma 2016). Näin saavutetaan tarkempi lopputulos, mutta voidaan valmistaa haastavia rakenteita sekä säästää raaka-aineita (Gibson et al. 2010).

AM-valmistuksen ja topologian optimoinnin yhteiskäyttö on kasvattanut suosiotaan etenkin auto- ja ilmailuteollisuuden yrityksissä ja tämän yhdistelmän uskotaan muuttavan valmistavaa teollisuutta merkittävästi tulevaisuudessa. Yleisestikin voidaan sanoa AM-menetelmien kehityksen ja yleistymisen lisäävän myös topologian optimoinnin hyödyntämistä teollisuudessa. (Meng et al. 2019) Esimerkiksi tehokkaan raaka-ainekäytön ja rakenteiden keveyden tavoittelun voi nähdä edesauttavan topologian optimoinnin ja materiaalia lisäävän valmistuksen kysyntää.

3. VETOKOUKUN TOPOLOGIAN OPTIMOINTI

Seuraavassa esitellään ensin optimoitava kappale, joka on henkilöauton irrotettava vetokoukku. Tämän jälkeen tarkastellaan työn toteutusta. Työn suorittamiseen liittyen esitellään myös vetokoukkujen testauksessa käytettävä kansainvälinen sopimus, jota on hyödynnetty tässä tutkimuksessa soveltuvien osien. Lopuksi esitellään vielä mallintamiseen ja optimointiin käytettävä ohjelmisto ja tavat, joilla sitä tässä työssä hyödynnetään.

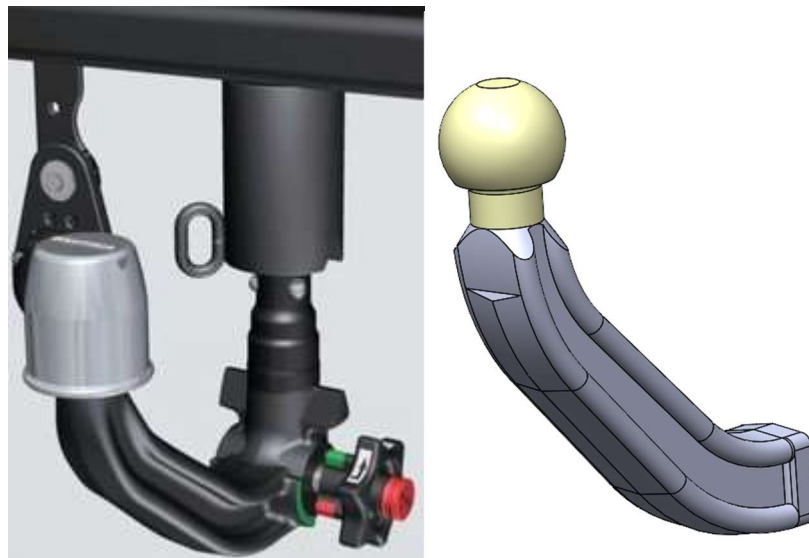
3.1 Optimoitava kappale

Työssä tutkitaan kevytperävaunun vetämiseen tarkoitettua vetokoukkuja, joka on mahdollista irrottaa auton perästä silloin kun sitä ei käytetä. Kevytperävaunulla tarkoitetaan tieliikennelain mukaisia O1- ja O2-luokkien perävaunuja, joita voidaan vetää henkilöautolla. Koukun massaa halutaan pienentää ennen kaikkea sen paikoilleen kiinnittämisen helpottamiseksi. Painavan koukun kiinnittäminen auton perään hankalassa asennossa on helpompaa, jos kiinnitettävä osa on kevyempi. Lisäksi irrotettava vetokoukku kulkee yleensä aina auton mukana, vaikka sitä käytetään vain harvoin – ylimääräisen massan mukana kuljettamisessa ei ole järkeä. Valmistajan näkökulmasta taas ylimääräistä raaka-ainekulutusta on syytä välttää. Optimoidun vetokoukun voidaan myös ajatella olevan tavallista vetokoukkuja miellyttävämmän ja kiehtovamman näköinen, ja kuluttajamarkkinoilla myytävän tuotteen tapauksessa myös sillä on merkitystä.

Tutkittava vetokoukku ei ole suora kopio mistään markkinoilla olevasta tuotteesta, mutta siihen on otettu vaikutteita Westfalia-Automotiven irrotettavista vetokoukuista (kuva 3). Saman tyyppisiä vetokoukkuja valmistavat myös monet muut yritykset. Koukun ja auton väliset kiinnitys- ja lukitusmekanismit on jätetty tämän optimoinnin ulkopuolelle tutkimuksen helpottamiseksi. Kiinnitysmekanismissa on runsaasti liikkuvia osia, jolloin sen todennukainen mallintaminen ja kuormitusten huomioiminen olisivat aiheuttaneet merkittäviä hankaluuksia. Kiinnitysosaa ei siis ole mallinnettu eikä sitä pyritä optimoimaan. Geometriansa puolesta koukku voisi olla myös kiinteästi autoon kiinnitettävä, mutta koukun keveydestä on enemmän hyötyä satunnaisesti käytettävän, irrotettavan koukun tapauksessa.

3.2 Työn suorittaminen

Vetokoukun kuormittamisen lähtökohtana käytetään Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission (UNECE) säännön n:o 55 mukaisia ajoneuvoyhdistelmien mekaanisten kytkinosien testauksen vaatimuksia. ”Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission sääntö n:o 55: ajoneuvoyhdistelmien mekaanisten kytkinosien hyväksyntää koskevat yhdenmukaiset vaatimukset” on työssä lyhennetty muotoon ”E-sääntö n:o 55”. E-sääntö n:o 55 (s. 19, 2010) määrää esimerkiksi vetokuulan mitat ja muodon, joten sitä ei voida optimoida. Vetokuula on merkitty kuvaan (3) keltaisella. Myös koukun kiinnityspinnasta (kuva 4) jätetään 5 mm syvyinen alue optimoinnin ulkopuolelle. Optimoinnissa pyritään siis vähentämään materiaalia vetokoukun ”varresta”.



Kuva 3. Kaupallinen vetokoukku ja CAD-malli tässä työssä optimoitavasta vetokoukusta. Vetokuula rajoitetaan optimoinnin ulkopuolelle. Vetokuula on merkitty oikeanpuoleiseen kuvaan keltaisella. Vasemman kuvan lähde: Westfalia-Automotive

E-säännön n:o 55 (s. 42, 2010) mukaan ”Ainoastaan vähäinen pysyvä muodonmuutos sallitaan määrättyissä staattisissa testeissä. Plastinen muodonmuutos ei saa olla yli 10 prosenttia suurimmasta muodonmuutoksesta.” Plastisen venymän osuus kokonaisvenymästä saa olla siis 10 %. Tässä työssä plastista muodonmuutosta eli toisaalta materiaalin myötölujuuden ylittäviä jännityksiä ei sallita. Näin saadaan parempi varmuus koukun mitoitukselle ja säästytään FE-analysissä plastisen venymän tutkimiselta.

Tässä työssä koukkuun kytkettävä kevytperävaunu on suuri, jarrullinen vaunu, jota saa kuitenkin vetää tavallisella henkilöautolla. Perävaunun massaksi sovitaan 1500 kg. Tarkastelun perusteella tämä massa on samaa kokoluokkaa suurimpien Suomessa myytävien yksiakselisten kevytperävaunujen kanssa. 1500 kg on myös melko tyypillinen ylä-

raja kuormalle, jota suuremmilla henkilöautoilla saa vetää. Näillä perusteilla 1500 kg lie-
nee järkevä vaunun massa tässä tutkimuksessa. Vetoauton kokonaismassaksi valitaan
2000 kg. Tämä on melko hyvä arvio sellaisen henkilöauton massasta, jolla 1500 kg pai-
noista jarrullista perävaunua saisi vetää. Sallittu vedettävä kuorma on vahvasti riippuvai-
nen vetoauton massasta. Tämän lisäksi esimerkiksi ajoneuvon vetotavalla ja käyttövoi-
malla on vaikutusta sallittuun kuormaan. Mallinnettu vetokoukku on lähellä edellä todet-
tujen kuormien tapauksissa käytettävää koukkuja.

Yllä sovitulla arvoilla saadaan määritettyä koukkuja kuormittavat voimat E-säännön n:o
55 (s. 5, 2010) mukaisesti. Testaamiskäyttöön tarkoitettu vaakasuuntaisen voiman D
arvo on yhtälön mukaan

$$D = \frac{T \cdot C}{T + R} \cdot g. \quad (3.1)$$

Yhtälössä T on vetoajoneuvon suurin sallittu massa tonneina, johon sisälletään vetokuu-
lan pystysuuntainen rasitus. Tunnus C kuvaa suurinta keskiakseliperävaunun renkaiden
kautta maahan välittyvää kuormaa. Toisin sanoen siitä on vähennetty vetokuulaan koh-
distuva pystysuuntainen kuorma. Arvo R on taas perävaunun suurin sallittu massa. Tun-
nus g on normaali putoamiskiikkyvyys, jonka arvo on E-säännön n:o 55 (s. 5, 2010) mu-
kaisesti $9,81 \frac{m}{s^2}$.

Vetokuulaan kohdistuva pystysuuntainen kuormitus lasketaan osaksi vetoajoneuvon
suurinta massaa. Tämän voiman arvo on E-säännön n:o 55 (s. 7, 2010) mukaisesti 10
prosenttia perävaunun suurimmasta massasta. Siitä käytetään tunnusta S . Tässä ta-
pauksessa 10 % massasta on 150 kg, joka aiheuttaa vetokuulaan $S = 150 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} =$
 $1,4715 \text{ kN}$ suuruisen voiman. Tätä käytetään tutkimuksessa pystysuuntaisen voiman ar-
vona. Yllä mainituilla arvoilla vaakasuuntaiseksi voimaksi saadaan $D = \frac{2,0 \text{ t} \cdot 1,35 \text{ t}}{2,0 \text{ t} + 1,5 \text{ t}} \cdot$
 $9,81 \frac{m}{s^2} = 7,567714 \dots \text{ kN} \approx 7,57 \text{ kN}$. Tätä voimaa käytetään myös vetokoukun kuormituk-
sessa. E-sääntö n:o 55:ssä (s. 42, 2010) todetaan myös, ettei "Ajoneuvon pitkittäisakse-
liin nähden poikittaisia vaakasuuntaisia voimakomponentteja ja momentteja ei oteta huo-
mioon, jos niillä on ainoastaan vähäinen merkitys". Näin oletetaan myös tässä tutkimuk-
sessa.

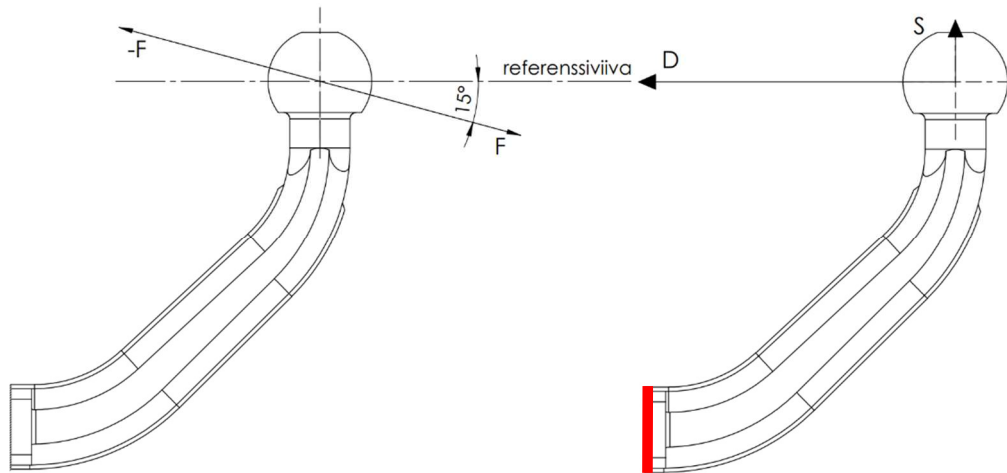
E-säännössä n:o 55 (s. 46, 2010) on määritetty dynaamisen testausvoiman kohdistuvan
vetokuulaan 15 asteen kulmassa kuvan (4) mukaisesti. Testausvoiman suuruudeksi on
määrätty $F = \pm 0,6 \cdot D = \pm 0,6 \cdot 7,567714 \dots \text{ kN} = \pm 4,540628 \dots \text{ kN} \approx 4,54 \text{ kN}$, joka dy-
naamisessa testissä kohdistuu vuorotellen taaksepäin alaviistoon ja eteenpäin yläviis-

toon. Kappaletta rasitettaisiin alle 35 Hz taajuisella sinimuotoisella voimalla, jonka amplitudi on F , vähintään 2 000 000 jakson ajan. Tässä työssä ei käsitellä fyysistä kappaletta, joten sen dynaaminen testaaminen ja mahdollisen väsymisen tutkiminen ei ole tarkoituksenmukaista. Työssä käytetään saatuja kuormien arvoja S ja D ilman kertoimia.

Topologian optimointi onnistuu helpommin, kun oletetaan kappaleeseen kohdistuvien rasitusten olevan staattisia. Dynaamisen kuormituksen sijasta edellä laskettuja voimia käytetään vetokoukun staattiseen kuormittamiseen. Kuvassa (4) on esitetty voimat ja niiden suunnat tapauksessa, joka on tyypillinen jarrutusilanteessa, mutta myös tilanne, jossa voimat kohdistuvat taakse ja alas, tutkitaan. Kuvan (4) vasen puoli on kuvaus E-säännön mukaisesta kokonaisvoiman kohdistamisesta dynaamisessa rasituskokeessa. Tässä kokeessa D- ja S-komponenteista saadun kokonaisvoiman kulmaksi referenssi-*viivasta* saataisiin noin 11 astetta, joka on melko lähellä virallisessa dynaamisessa testauksessa käytettävää 15 asteen kulmaa.

Sekä pysty- että vaakasuuntainen voima kohdistetaan tasaisesti koko vetokuulan pintaan. Todellisuudessa voima ei varmastikaan kohdistu pintaan tasaisesti, mutta todenmukaisen arvion tekeminen vaatisi runsaasti lisää tutkimista. Lisäksi voiman kohdistamispisteellä ei ole tässä tapauksessa suurta merkitystä, koska vetokuulan muotoa tai rakennetta ei optimoida, vaan se lähinnä välittää voimat koukun varteen.

Vetokoukun materiaaliksi valitaan yleisesti tunnettu ja useiden valmistajien käyttämä S355J2G3-rakenneteräs. Myös tutkittavan vetokoukun esikuvan valmistaja Westfalia-Automotive käyttää ominaisuuksiltaan vastaavaa materiaalia vetokoukuissaan. Materiaalin Youngin moduuli on 210 GPa, Poissonin vakio 0,28, myötölujuus 315 MPa ja murtolujuus 490 MPa. Työssä käytetään von Misesin vertailujännitystä, koska käytettävä ohjelmisto suosii sitä, ja se sopii hyvin rakenneteräksen kaltaisen sitkeän materiaalin lujuuden laskentaan. Materiaalin tiheys on 7800 kg/m^3 . Koukun massa on alkutilanteessa 2,53 kg ja tilavuus $324,358 \text{ cm}^3$. Kaikki edellä mainitut arvot ovat Solidworks-ohjelman käyttämiä, ja kaikki laskenta tehdään näillä arvoilla.



Kuva 4. Vasemmalla E-sääntö n:o 55 mukaisen testausvoiman kohdistuminen vetokuulaan. Oikealla työssä vetokuulaan kohdistettavat voimat eteen ja ylös sekä niiden suhteelliset suuruudet. Vasen kuva mukailen lähteestä E-sääntö n:o 55 (s. 46, 2010)

Ensimmäisenä vetokoukulle toteutetaan FE-analyysi, jossa selvitetään koukkuun syntyvät jännitykset ja sen varmuusluku annetulla kuormalla. Tuloksia verrataan optimoinnin jälkeen saataviin arvoihin. Tämän jälkeen toteutetaan rakenteen optimointi. Ensimmäistä koetta rajoitetaan määräämällä valmistamisessa käytettäville valumuoteille poistosuunta eli ns. de-mold-suunta. Tämä estää kuvassa (2) esitetyt valukappaleen valmistukseen liittyvät ongelmat. Toisessa kokeessa optimointi tehdään ilman valmistukseen liittyviä rajoitteita. Optimoinnin tulos halutaan molemmissa tapauksissa symmetriseksi koukkuja pituussuunnassa jakavan tason suhteen (kuva 5). Kuvassa (4) punaisella merkitty pinta on jäykästi kiinnitetty kaikissa mittauksissa.



Kuva 5. Vetokoukun symmetriataso.

Optimoinnin jälkeen tuloksia verrataan alkutilanteeseen ja toisiinsa. Tämän jälkeen kappaleen muotoa muokataan suunnitteluohjelmistolla optimoinnin tuloksien perusteella. Mallien muokkauksen jälkeen suunnittelutyökaluilla muokattujen mallien arvoja verrataan optimointityökalun antamiin tuloksiin ja toisiinsa.

3.3 Solidworksin static study ja topology study

Solidworks on ranskalaisen Dassault Systèmesin kehittämä ja markkinoima CAD-ohjelma (Computer Aided Design), jota hyödynnetään tässä työssä vetokoukun mallintamiseen sekä sen lujuuden analysointiin. Ohjelmistolla toteutetaan myös kappaleen topologian optimointi.

Static study -ominaisuutta käytetään kappaleen jännityksien selvittämiseksi. Static study on Solidworksiin sisäänrakennettu FE-analyysiin (Finite Element) käytettävä lisäosa. Vertaamalla saatuja tuloksia materiaalin ominaisuuksiin saadaan selvitettyä myös kappaleen varmuusluku määritetyssä kuormituksessa. Tämän elementtimenetelmää käyttävän analyysin tekeminen on välttämätöntä ennen topologian optimointia, koska saatua tulosta käytetään optimoinnin perustana. FE-analyysi on myös optimoinnin aikana tärkeä osa mallin kehittämistä, ja se tehdään osana jokaista iteraatiota.

Solidworksin Topology study -lisäosaa käytetään tässä työssä varsinaiseen topologian optimointiin. Ohjelmassa optimoinnin tavoitteeksi voidaan asettaa paras jäykkyyden ja massan suhde, mahdollisimman pieni massa tai mahdollisimman pieni elementtien siirtymä (Dassault Systèmes 2019b). Tässä työssä optimoinnilla tavoitellaan parasta jäykkyyden ja massan suhdetta (Best stiffness to weight ratio), koska se noudattaa parhaiten teoriaosuudessa esitettyjä periaatteita. Massaa pyritään vähentämään 40 prosenttia. Kappaleen keventämistä ei haluta kuitenkaan tehdä siinä vaikuttavia jännityksiä huomioidatta. Siksi optimoinnin tuloksia rajoitetaan asettamalla suurin kappaleessa sallittava jännityksen arvo materiaalin myötölujuuden suuruiseksi. Näin vältetään kappaleen plastinen muodonmuutos massan vähentämisen saavuttamiseksi. Toisaalta tämä tarkoittaa sitä, että optimoinnin tuloksena saatavien rakenteiden varmuus myötöön nähden on 1. Tämä kuitenkin sallitaan, koska virallisissa testeissä sallittaisiin myös vähäistä plastista muodonmuutosta. Lisäksi laskennassa käytettävät voimat ovat suuria käytännön tilanteisiin verrattuna. Tällä rajoitteiden yhdistelmällä saavutetaan kevein mahdollinen rakenne, joka on massa suhteutettuna mahdollisimman jäykkä eikä siihen synny plastista muodonmuutosta.

Solidworksin Topology study mahdollistaa optimoinnin rajoittamisen materiaalihyvyyden (thickness constraint), symmetrian (symmetry plane), muotin poistosuunnan (demold direction) ja haluttujen kappaleen osien optimoinnin ulkopuolelle jättämisen (preserved region) osalta. Tässä työssä hyödynnetään muottien poistamisen mahdollistavaa rajoitetta ja jätetään vetokuula sekä koukun kiinnityskohta optimoinnin ulkopuolelle. Näiden lisäksi optimoinnin tuloksien halutaan olevan symmetrisiä kuvan (5) osoittaman tason suhteen.

Sekä Static study että Topology study hyödyntävät elementtimenetelmää, joten kummassakin tapauksessa ohjelmisto jakoi tutkittavan kappaleen elementeiksi. Työn tuloksista haluttiin tarkkoja, joten elementtien kokoa säädettiin ohjelmiston ehdottamia asetuksia tarkemmiksi. Elementtien koko pyrittiin saamaan liukusäätimellä noin 2,5 mm kokoiseksi ja lopulta päädyttiin 2,4909 mm kokoisiin elementteihin. Tämän kokoisten elementtien toleranssiksi saatiin 0.124545 mm. Näitä elementtejä oli FE-mallissa 122 369 kappaletta.

4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

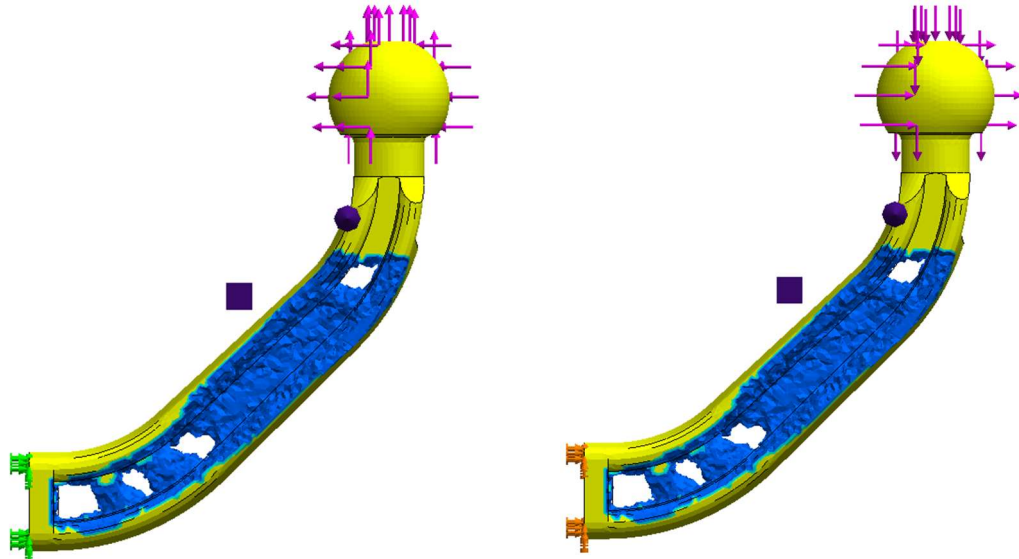
Kun vetokoukkua kuormitettiin lähtötilanteessa kuvan (4) mukaisilla voimilla eteen- ja ylöspäin, saatiin suurimmaksi jännityksen arvoksi 229,20 MPa. Tulos oli sama, jos voimien suunnat käännettiin alas ja taakse. Suurin jännitys syntyi yläpintaan vetokoukun kiinnityspisteen läheisyyteen, mutta tässäkin pisteessä jäätin melko kauas myötölujuuden arvosta 315 MPa. Suurin siirtymä voiman vaikutuksesta oli 1,277 mm. Siirtymän arvo oli suurin luonnollisesti vetokuulan yläpinnassa. Vetokoukun varmuudeksi myötöön nähden saatiin alkutilanteessa $\frac{315 \text{ MPa}}{229,20 \text{ MPa}} = 1,3743 \dots \approx 1,37$.

4.1 Ensimmäinen koe

Ensimmäisessä kokeessa vetokoukkua optimoitiin siten, että se voitaisiin valmistaa valamalla. Optimointiin sisällytettiin siis niin sanottu de-mold-suunta, jolla varmistettiin optimoidun geometrian olevan valamiseen sopiva. Muottien poistosuunta oli symmetriatason (kuva 5) normaalin suuntaisesti. E-säännön n:o 55 määrittämää vetokuulaa ei haluttu optimoida, joten siihen käytettiin ”preserved region” -rajoitetta. Myös koukun kiinnityspintaan rajattiin 5 mm syvyinen alue, josta materiaalia ei poistettu. Optimoinnille asetettiin myös rajoite suurimmasta sallitusta jännityksestä: sen arvoksi valittiin materiaalin myötölujuus, jottei rakennetta kevennetä siten, että siihen syntyy plastista muodonmuutosta. Optimoinnin tavoitteeksi asetettiin kappaleen keventäminen 40 prosentilla.

Vetokoukun massaksi saatiin optimoinnin jälkeen 1,610 kg. Kun massaa verrataan alkuperäiseen, huomataan, että kappale on keventynyt 0,92 kg. Kappaleen massa on siis noin 36,36 % pienempi kuin alussa. 40 prosentin keventäminen ei siis onnistunut, mutta koukkua on kevennetty niin paljon kuin on mahdollista ilman myötörajan ylittymistä. Optimoidun kappaleen suurin siirtymä on 2,02166 mm. Suurimman jännityksen arvo oli annetun rajoitteen mukaisesti noin 315 MPa.

Kun voimat suunnattiin optimoidessa taakse ja alas, saatiin massaksi 1,610 kg ja suurimmaksi siirtymäksi 2,02167 mm. Tutkittavat arvot olivat siis käytännössä samat voimien suunnasta riippumatta. Siirtymien ero johtuu laskentamallin epätäydellisyyksistä. Tuloksien yhtenevyyden voi todeta myös kuvasta (6), jossa on nähtävissä optimoinnin tulokset kummassakin tapauksessa. Saatua tulosta voidaan kuitenkin pitää varsin järkevänä, koska materiaalina käytetyn teräksen ominaisuudet ovat samankaltaiset sekä veto- että puristusjännityksen tapauksessa.



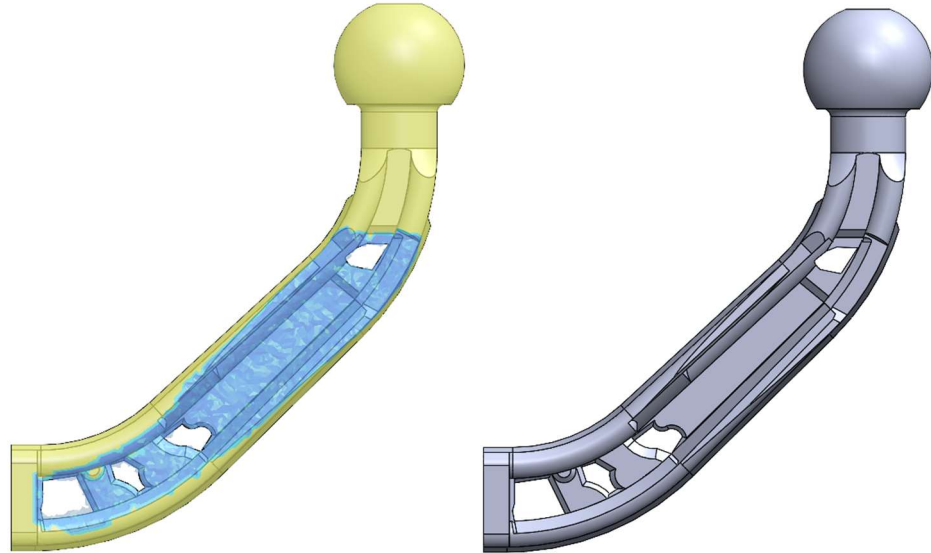
Kuva 6. Optimoinnin tulokset voimien suuntautuessa vastakkaisiin suuntiin. Nuolet osoittavat voimien suunnat. Kuvissa tummansiniset neliöt ovat symmetriarajoitteen merkkeinä. Pyöreä tummansininen merkki osoittaa valumuottien erotussuunnan – nyt ne ovat sivun ”sisään” ja sivusta ”ulos”.

Sivusuunnassa vaikuttavien voimien puuttuminen näkyy tuloksissa: materiaalia on poistettu poikittaissuunnassa paljon. On toki varsin ilmeistä, ettei vetokoukkuun kohdistu normaalissa käytössä merkittäviä sivuttaissuuntaisia voimia. Edellä todettiin E-säännön n:o 55 (2010) oletettavan samoin, joten materiaalin poistaminen on hyväksyttävää.

Vetokoukku muokattiin topologian optimoinnin mukaisesti ja geometria pyrittiin saamaan optimoinnin tulosten kaltaiseksi. Muokkaamisen jälkeen vetokoukun massaksi saatiin 2,017 kg. Massaa saatiin vähennettyä siis noin 0,51 kg eli noin 20,3 prosenttia. Tämä on huomattavasti vähemmän kuin optimoinnin tuloksena saatu 0,92 kg keveneminen. Koukun geometriaa muokattiin runsaasti ja pieniäkin yksityiskohtia pyrittiin ottamaan huomioon, kuten voidaan huomata kuvasta (7). Vetokoukun mallista tulikin melko yksityiskohtainen, ja esimerkiksi helposti tulkittavan työpiirustuksen tekeminen tästä kapaleesta olisi vaikeaa.

Tästä huolimatta lähes puolet optimointityökalun aikaansaamasta rakenteen kevenemisestä jäi toteuttamatta. Merkittävin syy tälle on se, ettei rakennetta haluttu tehdä vieläkin yksityiskohtaisemmaksi valmistamisen mahdollistamiseksi. Toinen huomioitava seikka on se, että optimoinnin tuloksien tarkka ja riittävä kopioiminen varsinaiseen malliin osoitautui haastavaksi. Alkuperäistä geometriaa haluttiin käyttää mallintamisen lähtökohdaksi, eikä optimoinnin tuloksien kopioiminen malliin ollut siksi kaikissa tapauksissa helppoa. Täysin uuden mallin tekeminen tai alkuperäisen riisuminen yksityiskohdista ja uudelleen mallintaminen olisi saattanut tuottaa parempia tuloksia. Nyt optimoinnin tulosta jouduttiin jäljittelemään erilaisilla materiaalin leikkauksilla ja viisteillä, eikä tuloksesta

saatu kovin siistin näköistä (kuva 7). Valumuotin poistamiseen liittyvästä rajoitteesta on kuitenkin huolehdittu ja vetokoukku olisi mahdollista valmistaa mallin pohjalta. Muodoltaan yksinkertaisemman lopputuloksen saavuttaminen olisi vaatinut optimoinnin tuloksien vapaampaa tulkintaa eikä sitä haluttu tässä tapauksessa tehdä.



Kuva 7. Vasemmalla näkymä, jonka avulla alkuperäistä mallia voitiin muokata optimoinnin tuloksien kaltaiseksi. Topologian optimoinnin tuloksen voi siis lisätä varsinaisen mallin ”päälle”. Oikealla lopullisen valurajoitteen mukaisen vetokoukun muoto.

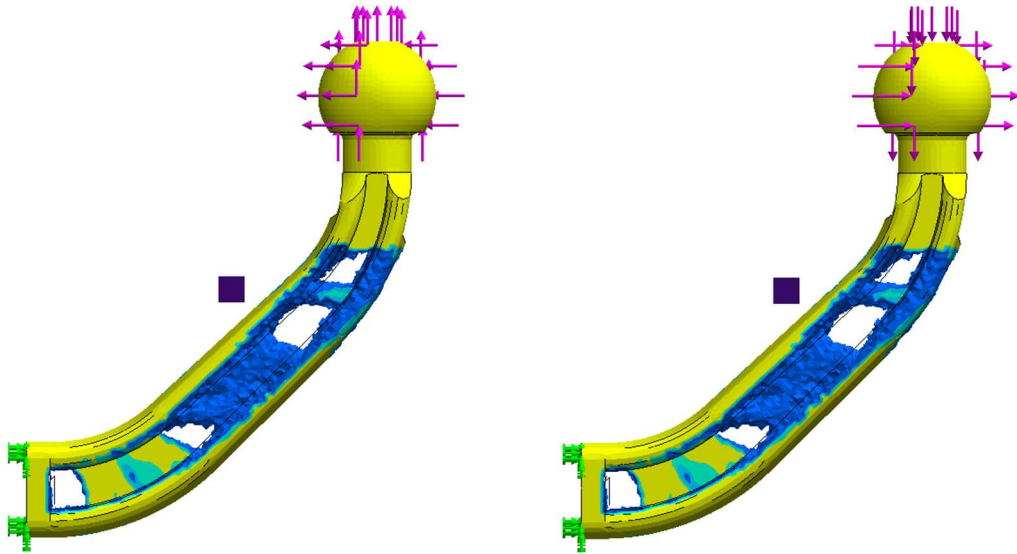
Optimoinnin tulosta vähäisempi materiaalin poistaminen vaikutti myös muihin tuloksiin: suurimmaksi jännityksen arvoksi saatiin 248,65 MPa ja suurimmaksi siirtymäksi 1,4603 mm. Materiaalin myötölujuudesta 315 MPa jäätii siis vielä varsin kauas ja vetokoukun varmuudeksi myötön suhteen saatiin $\frac{315 \text{ MPa}}{248,65 \text{ MPa}} = 1,22684 \dots \approx 1,23$. Suurin jännitys ei myöskään kasvanut kovin paljoa alkuperäisestä arvostaan 229,20 MPa. Samaten siirtymä kasvoi alun arvosta 1.277 mm vain vähän: noin 0,2 mm.

4.2 Toinen koe

Toisessa kokeessa de-mold-rajoite jätettiin pois optimoinnista, koska kappaletta ei ollut tarkoitus valmistaa valamalla. Muut valmistusmenetelmät eivät edellytä sitä. Toiset rajoitteet pidettiin ennallaan, koska kappaleesta haluttiin edelleen symmetrinen ja tuloksista mahdollisimman vertailukelpoisia. Materiaalin minimivahvuutta ei määritetty rajoitteeksi, koska pienimmän materiaalin paksuuden uskottiin olevan sekä koneistuksen että AM-menetelmien tapauksessa optimoinnin noin 2,5 mm elementtejä pienempi.

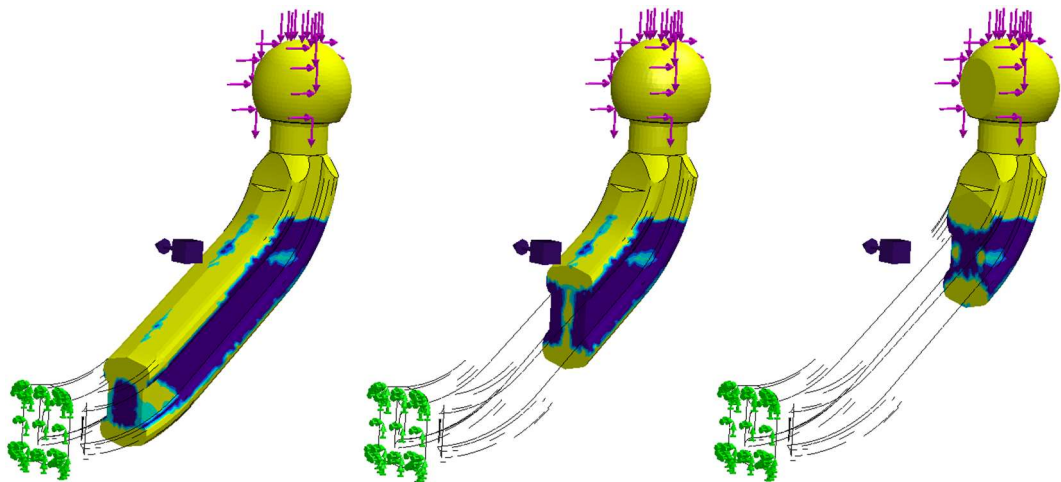
Voimien suuntautuessa eteen- ja ylöspäin saatiin vetokoukun massaksi optimoinnin jälkeen 1,571 kg ja suurimmaksi siirtymäksi 2,17369 mm. Vastaavasti voimien ollessa

taakse- ja alaspäin saatiin massaksi 1,571 kg ja suurimmaksi siirtymäksi 2,17369 mm. Saadut arvot ovat siis täysin samat. Myös kuvasta (8) voidaan todeta, että saadut tulokset ovat tässäkin tapauksessa identtiset.



Kuva 8. Vetokoukun topologian optimoinnin tulokset ilman de-mold-suuntaa. Neliö kuvassa merkitsee symmetrisyyttä kuvan (5) tason suhteen.

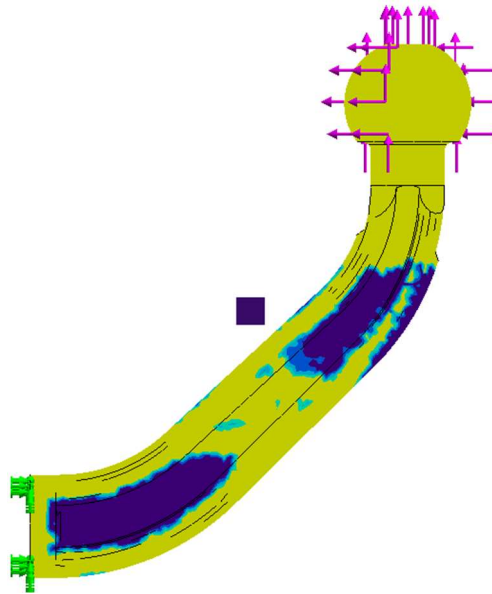
Huomionarvoisia olivat de-mold-rajoitteen puuttumisen vaikutukset: kappaleessa oli nyt materiaalia varren ulkosivuilla, mutta sitä oli jätetty keskeltä pois. Koukun valmistaminen ei olisi siis onnistunut valamalla edellisen kokeen kappaleen tavoin. Materiaalin sijoittamista on havainnollistettu kuvissa (9) ja (10). Tummansinisistä kohdista voitaisiin laskennan perusteella poistaa materiaalia.



Kuva 9. Poikkileikkauksia ilman de-mold rajoitetta optimoidusta vetokoukusta. Toisin kuin edellisessä kokeessa, on rakenteessa nyt tyhjiä kohtia koukun keskellä.

Topologian optimoinnilla saatujen tulosten perusteella kappaleen rakennetta parannettiin suunnittelutyökalulla. Optimoinnissa syntyneet selkeät ontot kohdat poistettiin ja rakennetta pyrittiin keventämään myötölujuuden ylittymättä. Vetokoukun massaksi saatiin

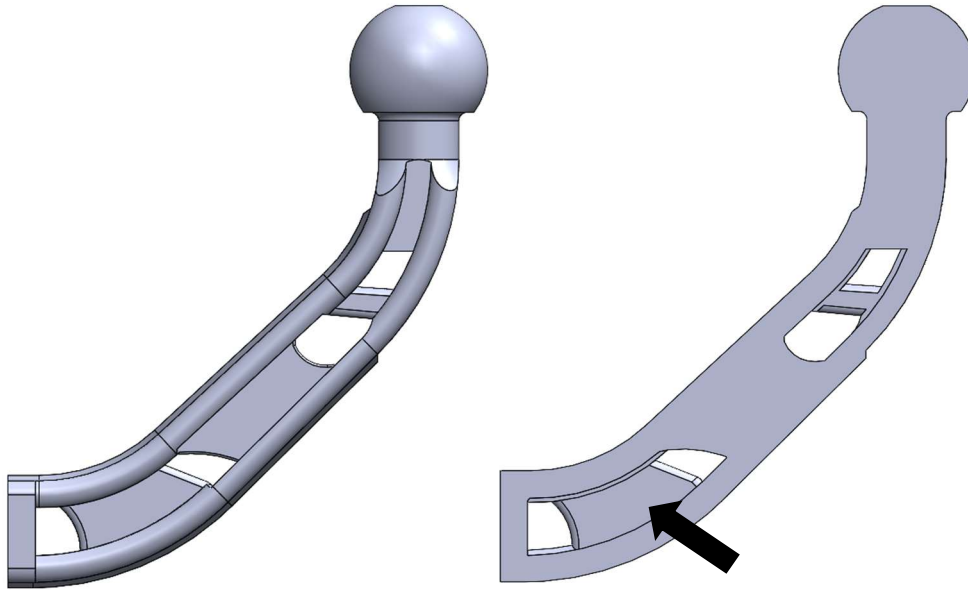
1,945 kg optimointityökalulla saadun 1,571 kg sijasta. Alkuperäisestä 2,53 kg massasta saatiin poistettua 0,585 kg eli 23,1 %. Merkittävä osa optimoinnilla saavutetusta kappaleen keventämisestä jäi siis nykyin toteutumatta rakennetta muokatessa.



Kuva 10. Keskeltä halkaistu kuva optimoidusta rakenteesta.

Tuloksien suuri ero selittyy osin sillä, että rakennetta ei pyritty saamaan optimoinnin yksityiskohtaiseksi kopioksi. Materiaalia poistettiin siten, ettei geometriasta tullut liian yksityiskohtaista. Tässä kokeessa haluttiin välttää kokeen 1 kaltainen monimutkainen rakenne. Optimoinnin tulosten perusteella tehdyt muutokset vetokoukussa ovat nähtävissä kuvassa (11). Rakenteen yksinkertaisuus helpottaisi kappaleen valmistusta. Tästä kappaleesta olisi myös verrattain helppoa luoda työpiirustus. Toisaalta ensimmäisen kokeen yhteydessä mainitut ongelmat optimoinnin tuloksien siirtämisessä mallin piirteiksi ilman merkittävää uudelleen suunnittelua pätivät myös tässä kokeessa.

Luonnollisesti myös kappaleen muut ominaisuudet olivat optimointityökalulla saaduista tuloksista poikkeavia: suurin koukussa vaikuttava jännitys oli 277,39 MPa ja suurin siirtymä 1,4943 mm. Materiaalin myötölujuuden arvosta 315 MPa jäätin siis vielä melko kauas. Voidaan siis todeta, ettei optimoinnin jälkeisessä suunnittelussa hyödynnetty optimoinnin koko potentiaalia.



Kuva 11. Ilman de-mold-rajoitetta optimoitu vetokoukku optimoinnin tulosten perusteella tehtyjen muutoksien jälkeen. Oikealla poikkileikkaus vetokoukun keskeltä. Rakenteessa on mustan nuolen osoittamassa kohdassa keskellä tyhjää. Myös ylimpänä olevien ripojen välissä on tyhjää

Kappaleen valmistaminen olisi hankalaa tai vähintäänkin kallista. On ilmeistä, ettei kappaleen valmistus valamalla olisi mahdollista. Tehokkain valmistustapa olisikin luultavasti koneistaa kappale jyrsimällä. Aihio kannattaisi tässäkin tapauksessa valaa materiaalihiukan vähentämiseksi. Kiinnittäminen työstökoneeseen onnistuisi kohdasta, josta koukku kiinnitettäisiin muuhun rakenteeseen ja pinnanmuodot saataisiin jyrsittyä tarkasti. Kuitenkin kappaleen keskellä olevien tyhjien alueiden koneistaminen olisi käytännössä mahdotonta, koska materiaalin poistaminen esimerkiksi kuvassa (11) nuolella merkitystä kohdasta olisi erittäin haastavaa. Tämän vuoksi kappaleen helppo valmistaminen koneistamalla vaatisi geometrian muokkaamista.

Edellä esiteltiin myös materiaalia lisäävän valmistuksen käyttö nykyaikaisessa tuotannossa ja mainittiin sen pystyvän tuottamaan muotoja, joita muilla valmistusmenetelmillä ei ole kannattavaa tehdä. Tällaisen muodon tekeminen ei olisikaan AM-menetelmillä vaikeaa ja tarkkuutta vaativat kohdat ja pinnan viimeistely voitaisiin tarvittaessa koneistaa viimeistelyvaiheessa. Tällaisen massatuotettavan kappaleen valmistaminen 3D-tulostamalla ei kuitenkaan olisi vielä tässä AM-kehityksen vaiheessa kannattavaa. Vetokoukun valmistaminen AM-menetelmillä olisi kannattamatonta myös sen vuoksi, että koukun muoto pakottaa rakenteen tukemiseen tulostusvaiheessa. Näiden tukirakenteiden poistaminen veisi aikaa ja olisi kuvan (11) osoittamasta kohdasta tässäkin tapauksessa vaikeaa. Lisäksi ainakin vetokuulan pinta pitäisi koneistaa tulostamisen jälkeen, jotta E-säännön n:o 55 edellytys lastuamalla työstettävästä pinnasta ja N9-toleranssista täyttyisivät.

4.3 Tuloksien vertailua

Kahdesta kokeesta saatiin saman suuntaisia tuloksia ja niiden keskinäiset erot ovat ymmärrettäviä: Tarkempien rajoitteiden vallitessa materiaalia voitiin poistaa vähemmän. Vähäisempi materiaalin poistaminen näkyi toisaalta pienempänä jännityksenä ja siirtymänä. Kokeissa saadut tulokset on koottu vertailun helpottamiseksi taulukkoon (1).

Taulukko 1. Kootut tulokset ja suureiden muutokset alkutilanteeseen verrattuna.

	Massa (kg)	Suurin jännitys (MPa)	Suurin siirtymä (mm)
Alkuperäinen kappale	2,53	229,20	1,277
1. kokeen optimoinnin tulos	1,61	315	2,0217
Muutos (%)	- 36,36	+ 37,43	+ 64,77
1. kokeen mallinnettu kappale	2,017	248,65	1,4603
Muutos (%)	- 20,28	+ 8,49	+ 19,01
2. kokeen optimoinnin tulos	1,571	315	2,1737
Muutos (%)	- 37,91	+ 37,43	+ 76,99
2. kokeen mallinnettu kappale	1,945	277,39	1,4943
Muutos (%)	- 23,12	+ 21,03	+ 21,78

Tuloksista voidaan nähdä, että ilman valurajoitetta materiaalia voitiin poistaa vain noin 40 grammaa enemmän kuin rajoitteen kanssa. De-mold-suunnan määritys vaikutti siis tuloksiin yllättävän vähän. Tämä voidaan nähdä myös kappaleen muokkaamisen seurauksena saatuja massoja vertaillessa: 2. kokeen kappale on noin 70 grammaa kevyempi. Näiden tuloksien erossa kiinnostavaa on se, että 1. kokeen kappaletta pyrittiin mallintamaan tarkemmin optimoinnin tulosta vastaavaksi, kun taas 2. kokeen yhteydessä rakennetta kevennettiin konservatiivisemmin. Tulokset eivät siis ole täysin johdonmukaisia, ja niiden perusteella voidaankin epäillä, että ilman de-mold-rajoitetta saatua optimointitulosta on ollut helpompi soveltaa koukun 3D-malliin.

Toinen huomionarvoinen seikka on se, että siirtymän arvo kasvaa merkittävästi mitä enemmän materiaalia poistetaan. Tulos on odotettu, mutta sen huomioiminen on tärkeää optimointia tehtäessä. Tästäkin hyvä esimerkki on ensimmäisen ja toisen optimoinnin tuloksien ero. Ilman valurajoitetta optimoitu kappale on 40 grammaa eli noin 2,4 % kevyempi kuin de-mold-rajoitteella optimoitu versio. Kuitenkin toisen kokeen kappaleen siirtymä on yli 7,5 % suurempi. Toisaalta huomataan myös, että 3D-mallin muokkaamisen seurauksen saatujen kappaleiden siirtymät ovat suhteessa hyvin pieniä, vaikka materiaalia on poistettu yli puolet optimoinnilla saatuihin tuloksiin verrattuna.

YHTEENVETO

Työssä tehtiin topologian optimointi henkilöauton irrotettavalle vetokoukulle ja esiteltiin topologian optimoinnin periaatteita. Optimoinnin tavoitteena oli 40 % massan vähentäminen siten, että kappaleen jäykkyys on paras mahdollinen ja ettei materiaalin myötölujuus ylitä. Vetokoukun optimointi tehtiin kahdella tavalla: koukun valamisen mahdollistamalla de-mold-rajoitteella ja ilman sitä. De-mold-suuntia käytettäessä koukusta saatiin poistettua vähemmän materiaalia ja materiaali keskittyi koukun keskitason läheisyyteen. Ilman valurajoitetta tehdyn optimoinnin tapauksessa rakennetta pystyttiin keventämään hieman enemmän. Materiaali sijoittui kappaleen ulkoreunoille jättäen keskelle tyhjää.

Valettavaksi suunnitellun version 3D-mallista tuli optimoinnin jälkeisen mallin kehittämisen seurauksena varsin yksityiskohtainen. Tämän mallin mukaisen valamootin valmistaminen vaatisikin tarkkojen valmistusmenetelmien käyttöä. Kappaleen valmistaminen valamalla olisi kuitenkin mahdollista. Toisen version valmistaminen ei onnistuisi valamalla, mutta sen geometria saatiin pidettyä melko yksinkertaisena. Tämän version valmistaminen olisi kuitenkin haastavaa siinä olevien materiaalista tyhjien alueiden sijaintien vuoksi. Materiaalia lisäävillä menetelmillä koukku saataisiin valmistettua, mutta tukirakenteiden poistaminen aiheuttaisi ongelmia. Lisäksi vetokoukun tapaisen massatuotteen valmistaminen 3D-tulostamalla on toistaiseksi kannattamatonta.

Topologian optimoinnin hyödyt ovat kuitenkin myös tämän työn perusteella ilmeiset: vetokoukun massaa voitiin pienentää yli 20 prosenttia melko vähäisellä muokkaamisella. 20 prosentin keventämisellä koukun mitatut ominaisuudet pysyivät lähellä alkuperäisiä arvojaan, joten keventäminen olisi mahdollista. Vähennetty massa, noin 0,5 kg, ei ole ajoneuvoyhdistelmästä puhuttaessa suuri kevennys, mutta prosentuaalinen muutos osoittaa topologian optimoinnin mahdollisuudet. Materiaalia lisäävän valmistuksen kehitys lisää mahdollisuuksia ja parantaa tuloksia, kuten tässäkin työssä havaittiin.

Tutkimuksen uskottavuutta lisää kansainvälisen testausmenetelmien mukaisten kuormien käyttö ja tätä ohjetta tiukemmat vaatimukset muodonmuutoksille. Toisaalta koukun käyttötilanteessa syntyviä värähtelyjä ja vaihtuvien voimien aiheuttamaa mahdollista materiaalin väsymistä tai muita todellisen kappaleen testaamisessa oleellisia asioita ei huomioitu tässä kokeessa. Toteutetuissa rakenteissa hyödynnettiin optimoinnin tuloksia kuitenkin varsin maltillisesti, joten rakenteen kestävyyttä ei lähtökohtaisesti ole syytä epäillä. Paremmiin käytäntöön sovellettavien tuloksien saaminen edellyttäisi kuitenkin prototyypin valmistamista ja sen testaamista.

LÄHTEET

Bendsøe, M. P. & Sigmund, O. (2004). Topology optimization: theory, methods, and applications. Second edition, corrected printing. Berlin: Springer.

Bruggi, M. (2016). Topology optimization with mixed finite elements on regular grids. Computer methods in applied mechanics and engineering. [Online] 305133–153. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.03.010>

Clausen, A. & Andreassen, E. (2017). On filter boundary conditions in topology optimization. Structural and multidisciplinary optimization. [Online] 56 (5), 1147–1155. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1709-1>

Dassault Systèmes. SIMP Method for Topology Optimization. [Online] Saatavilla http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm#vdl1527111485501 [Viitattu 8.3.2022]

Dassault Systèmes. Topology study. [Online] Saatavilla http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/HelpViewerDS.aspx?version=2019&prod=SolidWorks&lang=english&path=cworks%2fc_generative_design_study.htm&id=63c5a2fa8df243b9bde79433a+8850f4a [Viitattu 29.3.2022]

Deaton, J.D. & Grandhi, R.V. (2013). A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. Struct Multidisc Optim 49, pp. 1–38. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0956-z>

Ferrer, A. (2019). SIMP-ALL: A generalized SIMP method based on the topological derivative concept. International journal for numerical methods in engineering. [Online] 120 (3), 361–381. Saatavilla: <https://doi.org/10.1002/nme.6140>

Gibson, I., Rosen, D. W. & Stucker, B. (2010). Additive manufacturing technologies rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>

Guest, J. K. (2008). Imposing maximum length scale in topology optimization. Structural and multidisciplinary optimization. [Online] 37 (5), 463–473. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0250-7>

Langelaar, M. (2019). Topology optimization for multi-axis machining. Computer methods in applied mechanics and engineering. [Online] 351 226–252 Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.03.037>

Lazarov, B. S., Wang, F. & Sigmund, O. (2016). Length scale and manufacturability in density-based topology optimization. Archive of applied mechanics (1991). [Online] 86 (1–2), 189–218. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00419-015-1106-4>

Liu, J. & Ma, Y. (2016). A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. Advances in engineering software (1992). [Online] 100161–175. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.07.017>

Meng, L. et al. (2019). From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap. Archives of computational methods in engineering. [Online] 27 (3), 805–830. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09331-1>

Morris, N., Butscher, A. & Iorio, F. (2020). A subtractive manufacturing constraint for level set topology optimization. Structural and multidisciplinary optimization. [Online] 61 (4), 1573–1588. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02436-y>

Nicolas, B., Olivier, C., Mickael, R. & Simon, R. (2019). A design methodology for additive manufacturing applied to fused deposition modeling process. Mechanics & industry: an international journal on mechanical sciences and engineering applications. [Online] 20 (6), 608–. Saatavilla: <https://doi.org/10.1051/meca/2019040>

Sander, C., Petrich, D. & Albers, A. (2013). Extended Topology Optimization - two factors to decrease energy consumption of structural parts during dynamic movements. Open Access am KIT. [online] publikationen.bibliothek.kit.edu. Saatavilla: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000036949>

Sigmund, O. & Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. Struct Multidisc Optim 48, pp. 1031–1055. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>

Väisälä, J. (2005) Topologia. 2. 2. korj. p. Helsinki: Limes.

Wang, D. & Gao, W. (2019). Robust topology optimization under load position uncertainty. International journal for numerical methods in engineering. [Online] 120 (11), 1249–1272. Saatavilla: <https://doi.org/10.1002/nme.6180>

Wang, Y. & Kang, Z. (2017). Structural shape and topology optimization of cast parts using level set method. International journal for numerical methods in engineering. [Online] 111 (13), 1252–1273. Saatavilla: <https://doi.org/10.1002/nme.5503>

Wu, J., Sigmund, O. & Groen, J. P. (2021). Topology optimization of multi-scale structures: a review. Structural and multidisciplinary optimization. [Online] 63 (3), 1455–1480 Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02881-8>

Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission (UNECE) sääntö nro 55 – Ajo-neuvoyhdistelmien mekaanisten kytkinosien hyväksyntää koskevat yhdenmukaiset vaatimukset (2010) Virallinen lehti L 227, 1–61. Saatavilla: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:42010X0828\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:42010X0828(01))

Zegard, T. & Paulino, G. H. (2015). Bridging topology optimization and additive manufacturing. Structural and multidisciplinary optimization. [Online] 53 (1), 175–192. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1274-4>

Zhou, M., Shyy, Y. K. & Thomas, H. L. (2001). Checkerboard and minimum member size control in topology optimization. Structural and multidisciplinary optimization. [Online] 21 (2), 152–158. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s001580050179>

Zhou, M., Lazarov, B. S., Wang, F. & Sigmund, O. (2015). Minimum length scale in topology optimization by geometric constraints. Computer methods in applied mechanics and engineering. [Online] 293266–282. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2015.05.003>