

Valtteri Glad

# KANTAVAN RAKENTEEN OPTIMOINTI

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Huhtikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Valtteri Glad: Kantavan rakenteen optimointi  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Konetekniikka  
Huhtikuu 2021

---

Työssä tehtävänä on määrittää mahdollisimman kevyt rakenne, joka kykenee kannattelemaan 1 000 kg:n massan 2 m:n etäisyydellä kiinnityspisteestä. Rakenteen korkeuden ja leveyden tulee olla alle 30 cm.

Työn tarkoituksena on vertailla erinäisillä optimointitekniikoilla kehitettyjä rakenteita sekä pohdita, miten paljon aikaa eri tekniikat vaativat verrattuna siihen, miten hyviä tuloksia niillä saadaan. Työssä verrataan toisiinsa perinteisempää manuaalista optimointia sekä Solidworksin design study ja topologiaoptimointi toimintoja. Lisäksi Fusion 360 sovelluksella luodaan ilman valmistusmenetelmien rajaamista verrokkikappaleet, joihin muita optimointituloksia voidaan verrata.

Työssä manuaalisen optimoinnin ja Solidworksin design studyn avulla luodut optimaalisimmat profiilit eivät eronneet toisistaan huomattavasti, mikä on varsin oletettavaa, koska näillä keinoilla ei pyritty luomaan kevennettyjä profiileita, vaan etsittiin kevyintä kevennyksetöntä profiilia. Kun optimoinnissa käytettiin Solidworksin topologiaoptimointi ominaisuutta, kyettiin luomaan rakenne, joka on materiaalista ja profiilista riippuen noin 25–33 % kevyempi, kuin kevyin samasta materiaalista tehty kevennyksetön rakenne.

Rakenteiden vertailua varten luotiin Fusion 360:n generative design ominaisuudella verrokkikappaleet, joita ei välttämättä olisi mahdollista valmistaa perinteisin valmistusmenetelmin. Nämä verrokkikappaleet luotiin, jotta voitaisiin arvioida kuinka paljon raskaampia luodut rakenteet ovat kuin ne voisivat kevyimmillään olla. Kun verrokkikappaleita verrattiin kevennyksetöntömiin rakenteisiin havaittiin, että materiaalista riippuen design studylla luodut rakenteet olivat noin 74–100 % raskaampia kuin verrokkikappaleet. Kun topologiaoptimoituja rakenteita verrattiin verrokkikappaleisiin, havaittiin, että topologiaoptimoituidut kappaleet olivat noin 31–36 % raskaampia.

Optimoinnin suoritustavasta riippumatta optimointi vaatii aikaa. Tässä työssä käytetyistä optimointitekniikoista nopeimmat olivat manuaalinen optimointi ja Solidworksin design study. Näitä optimointimenetelmiä käyttämällä kevyin rakenne, johon kevennyksiä ei ole tehty, on mahdollista löytää noin kahdessa tunnissa. Kun design studylla on saatu selville optimaalisimmat profiilit, on suhteellisen helppo nähdä, miten parametrien muuttaminen vaikuttaa palkin optimaalisuuteen, mikä helpottaa topologiaoptimointia. Kun rakennetta kevennettiin topologiaoptimoinnin avulla, havaittiin, että topologiaoptimoinnilla voidaan tuottaa nopeasti rakenne, joka on lähellä optimaalisinta versiota rakenteesta, mutta mikäli halutaan luoda optimaalisin mahdollinen versio, kestää siinä huomattavan paljon kauemmin. Työssä havaittiin, että noin puolessa tunnissa kyettiin luomaan noin 24 % keventämätöntä rakennetta kevyempi topologiaoptimoitu rakenne. Kun samasta rakenteesta haluttiin luoda optimaalisin mahdollinen versio, kesti optimoinnissa noin 100 minuuttia, jolloin profiilia saatiin kevennettyä noin 27% alkuperäisestä.

Verrokkikappaleitten luomisessa meni aikaa noin 6 tuntia, mikä on huomattavasti enemmän kuin yhden kappaleen topologiaoptimointiin vaadittu aika, mutta toisaalta verrokkikappaleista tuli myös huomattavasti kevyempiä. Toisaalta Fusion 360:n generatiivista designia olisi voitu käyttää verrokkikappaleen luomisen sijaan jo ennen topologiaoptimointia, jolloin olisi tiedetty jo ennen optimoinnin aloittamista, millaista rakennetta topologia optimoinnilla etsitään. Tällä keinolla olisi voitu vähentää topologia optimointiin käytettävää aikaa.

Avainsanat: Optimointi, Topologiaoptimointi, Lujuusoppi, Rakenteen optimointi, Solidworks, Fusion 360, Generative design

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Valtteri Glad: optimization of a supporting structure  
Bachelor's thesis  
Tampere University  
Bachelor's degree program in mechanical engineering  
April 2021

---

In this work we are trying to come up with lightest possible structure which can carry a mass of 1000 kg that is 2 meters away from its attachment point. Height and width of this structure must be less than 30 cm.

In this work we will be creating structures by manual optimization and by using design study and topology optimization features of Solidworks. We will be comparing these structures to each other to see how much weight can be reduced by optimization. We will also be comparing how much time these different optimization techniques take compared to how much the structures weight can be reduced. We will also generate structure with generative design feature of Fusion 360 to be able to compare how much more weight could have been shaved off from other structures. This comparison structure might not be possible to produce with traditional manufacturing methods.

When comparing structures created by manual optimization and with design study feature of Solidworks we do not see much difference which is expected since these methods are used to find lightest possible profile without removing material. When topology optimization was used to remove the unnecessary material from predetermined profiles, we were able to make new structures which were 25–33 % lighter than original lightest possible structure.

When comparing structures where material has not been removed to the comparison structures generated with Fusion 360 it was noticed that the lightest possible structures from which material had not been removed from were 74–100 % heavier than comparison structures. The topology optimized structures were also about 31–36 % heavier than these comparison structures.

Some optimization techniques require more work than others which means that some take more time than others. Design study and manual optimization are the fastest optimization techniques used in this work. Both techniques are a bit faster than topology optimization. With these to methods the lightest structures from which material has not been removed can be found in about two hours. After using the design study feature of Solidworks it is easier to see how changing parameters of the structure affects the weight and load carrying capacity of the structure. Using information gained from design study it is easier to select the profiles which are to be optimized with topology optimization. While trying to find the most optimal structure with topology optimization it was noticed that it is quick to reduce some weight from a structure but finding the most optimal version take a whole lot more time. Using topology optimization feature of Solidworks we were able to make a structure that was approximately 24 % lighter than lightest structure from which material was not removed from in just half an hour. Creating the most optimal possible structure with topology optimization took about 100 minutes. The most optimal structure was approximately 27 % lighter than the lightest structure created with design study.

Generating the comparison structures took around six hours which is noticeably longer than running a single topology study. However, these comparison structures were also noticeably lighter than the topology optimized structures. The generative study could have also been used before topology study to find out more information about the most optimal structure to speed up the topology optimization process.

Keywords: Optimization, Topology optimization, Solid mechanics, Optimization of structure, Solidworks, Fusion 360, Generative design

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

# ALKUSANAT

Työn tekeminen on viivästynyt itsestäni ja vuoden 2020 tapahtumista johtuen, mutta nyt työ on viimeinkin valmis. Haluan kiittää Ilari Lainetta työn ohjaajana toimimisesta, työn tekemisen muistuttamisesta sekä varsinkin kärsivällisyydestä, jota työn odottelu on vaatinut. Lisäksi haluan kiittää Tampereen yliopiston professoria, Asko Ellmania, mielenkiintoni herättämisestä optimointia kohtaan sekä perhettäni ja ystäviäni heidän antamastaan tuesta.

Tampereella, 8.4.2021

Valtteri Glad

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Työn vaatimusten määrittely .....	1
1.2 Optimointimenetelmien määrittely .....	2
2. LUJUUSOPPI JA ALUSTAVA OPTIMOINTI .....	4
2.1 Lujuusoppi optimoinnin taustalla .....	4
2.2 Manuaalinen optimointi .....	5
3. TIETOKONEAVUSTEINEN OPTIMOINTI .....	11
3.1 Design study optimoinnin työkaluna .....	11
3.2 Topology study optimoinnin työkaluna .....	16
3.3 Fusion 360 generative design optimoinnin työkaluna .....	19
4. OPTIMOINNIN TULOSTEN VERTAILU .....	22
5. YHTEENVETO .....	26
LÄHTEET .....	27

# KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Optimoitavan rakenteen sallitut ulkomitat</i> .....	2
<b>Kuva 2.</b>	<i>Lattaprofiilin optimoinnissa käytetyn staattisen tutkimus rakenne</i> .....	12
<b>Kuva 3.</b>	<i>Putken staattinen tutkimus.</i> .....	14
<b>Kuva 4.</b>	<i>Topologiaoptimoitu palkki</i> .....	19
<b>Kuva 5.</b>	<i>Generatiiviselle designille määritellyt rajoitukset, kiinnityspisteet sekä alkuperäinen rakenne</i> .....	20
<b>Kuva 6.</b>	<i>Ensimmäisen generatiivisen designin tulos</i> .....	20
<b>Kuva 7.</b>	<i>Lopulliset generative designilla luodut rakenteet S500MC ja S355MC teräksille</i> .....	21

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

$A$	pinta-ala
$b$	profiilin leveys
$F$	voima
$g$	putoamiskiihtyvyys
$h$	profiilin korkeus
$I$	neliömomentti
$I_z$	neliömomentti z suunnassa
$L$	pituus
$m$	massa
$m_k$	kannateltava massa
$M_t$	taivutusmomentti
$s$	seinämävahvuus
$y$	etäisyys neutraaliaskelista
$\rho$	tiheys
$\sigma$	leikkausjännitys
$\sigma_s$	suurin sallittu leikkausjännitys
$\sigma_y$	taivutusmomentti etäisyydellä y neutraaliakselista

# 1. JOHDANTO

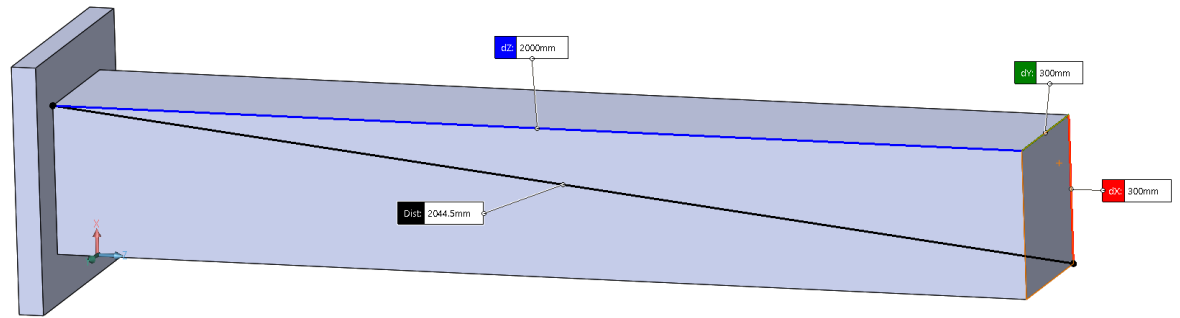
Rakenteen optimointi on nykyään monilla aloilla tärkeää, ellei jopa ehdotonta. Esimerkiksi lentävissä laitteissa, kuten lentokoneissa, parantaa lentokoneen lento-ominaisuuksia, vähentää kulutusta tai suurentaa lentokoneen lastinkantokykyä. Lentävien laitteiden lisäksi esimerkiksi autojen keventäminen vähentää polttoaineen kulutusta, minkä myötä myös päästöt vähenevät. Optimoinnin vaikutus kulkuneuvon kulutukseen on huomattava, sillä esimerkiksi auton keventäminen 10 %:lla vähentää polttoaineen kulutusta yleensä noin 6–8 % (Joost 2012).

Rakeneoptimoinnilla pyritään saavuttamaan paras mahdollinen rakenne, joka täyttää asetetut kriteerit ja noudattaa määriteltyjä rajoitteita. Optimoinnin perimmäinen tarkoitus on minimoida epäsuotuisat ominaisuudet ja maksimoida rakenteelle edulliset ominaisuudet. (Merrill et al. 2009) Suotuisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi taivutuslujuus ja elinkaaren pituus, kun taas epäsuotuisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi massa ja hitausmomentti.

## 1.1 Työn vaatimusten määrittely

Tässä työssä rakenteella kannatetaan 1 000 kg:n massaa 2 m:n etäisyydellä rakenteen kiinnityskohdasta. Lisäksi palkin korkeus ja leveys eivät saa ylittää 30 cm:ä. Kuvassa 1 on esitetty Solidworksilla piirretty malli, joka kuvaa palkin suurimpia sallittuja ulkomittoja.





**Kuva 1.** *Optimoitavan rakenteen sallitut ulkomitat*

Rakennetta suunniteltaessa on otettava huomioon valmistettavaan tuotteeseen liittyvät standardit ja varmistuttava, että määrätyt varmuuskertoimet toteutuvat. Tässä työssä ei kuitenkaan pyritä noudattamaan minkään tietyn alan standardeja, vaan valitaan materiaalin myötörajan varmuuskertoimeksi 1,25. Optimoitavalle kappaleelle annetaan kaksi materiaalivaihtoehtoa, jotka ovat S355MC ja S500MC. Kun varmuuskerroin on 1,25 ja materiaalien myötörajat 355 MPa ja 500 MPa (SFS-EN 10149-2 2013), saadaan materiaalien suurimmaksi sallituksi jännitykseksi 284 MPa ja 400 MPa.

## 1.2 Optimointimenetelmien määrittely

Manuaalisella optimoinnilla ja Solidworksin design studylla tutkitaan kevennyksettömiä lattaprofiileita ja suorakulmioputkia, joista tehdään Solidworksin topologiaoptimointi ominaisuudella myös kevennetyt versiot. Näiden lisäksi Fusion 360:n generative designin avulla luodaan verokkikappale ilman valmistusmenetelmien rajaamista. Koska manuaalisessa optimoinnissa kaavat ovat jo valmiiksi suhteellisen pitkiä, jätetään huomioimatta palkkien kulmien pyöritykset ja oletetaan, että rakenteissa on vain pyörityttömisiä 90°:n kulmia. Kun optimointi suoritetaan tietokoneella, otetaan kuitenkin huomioon kantavien rakenteiden reunojen pyöritykset.

Työn luvussa 2 perehdytään aluksi lujuusopin kaavoihin ja periaatteisiin, jotka ovat merkityksellisiä optimoinnin kannalta, minkä jälkeen kannake optimoidaan manuaalisesti.

Luvussa 3 luodaan Solidworksilla profiileja, joista design studylla määritellään kevyin vaatimukset täyttävä rakenne, minkä jälkeen Solidworksin topologiaoptimointiominaisuudella luodaan kevennettyjä versioita. Luvussa 3 Fusion 360:n generative design ominaisuuden avulla luodaan myös 2 verrokkikappaletta, joiden valmistukseen käytettäviä metodeja ei rajata. Työn luvussa 4 vertaillaan työssä luotavien rakenteiden painoja ja niiden kehittämisessä kuluvia aikoja.

## 2. LUJUUSOPPI JA ALUSTAVA OPTIMOINTI

Rakennetta optimoitaessa lujuusoppi on merkittävässä roolissa, sillä lujuusopin avulla voidaan määritellä, miten hyvin rakenne kykenee kannattelemaan massaa. Tästä syystä on tärkeä ymmärtää, miten rakenteen eri parametrien muuttaminen vaikuttaa rakenteen lujuuteen. Tässä luvussa käydään ensin läpi tarvittavat kaavat, minkä jälkeen niiden avulla määritellään kevyin mahdollinen vaatimukset täyttävä rakenne. Manuaalisessa optimoinnissa rakenteessa esiintyvät kulmat oletetaan teräviksi, koska pyöreäkulmaisten profiilien käyttäminen manuaalisessa optimoinnissa on ongelmallista.

### 2.1 Lujuusoppi optimoinnin taustalla

Kappaleen neliömomentti voidaan laskea kaavalla

$$I = \frac{(b \cdot h^3)}{12}, \quad (1)$$

missä  $b$  on profiilin leveys ja  $h$  sen korkeus, mikäli kappale on umpinainen (Mäkelä et al. 2005, s. 144). Mikäli taas profiili on sisältä tyhjä, voidaan sen neliömomentti laskea kaavassa (1) esitetyllä tavalla vähentämällä sisälle jäävän tyhjän tilan mukainen kappale seuraavasti:

$$I = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} - \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{b \cdot h^3 - (b - 2s)(h - 2s)^3}{12}, \quad (2)$$

missä  $b_1$  ja  $h_1$  ovat profiilin ulkoleveys ja -korkeus,  $b_2$  ja  $h_2$  ovat kappaleen sisällä olevan onton tilan leveys ja korkeus ja  $s$  on profiilin seinän paksuus. Voiman kappaleeseen aiheuttama normaalijännitys etäisyydellä  $y$  jännityksen keskiviivasta voidaan laskea kaavalla

$$\sigma_y = \frac{M_t \cdot y}{I_z}, \quad (3)$$

missä  $M_t$  on taivutusmomentti, jonka voima aiheuttaa tarkasteltavassa pisteessä,  $y$  on etäisyys rakenteen neutraaliakselista ja  $I_z$  on neliömomentti tarkasteltavassa suunnassa (Mäkelä et al. 2005, s. 139). Kaavassa (3) käytetty taivutusmomentti  $M_t$  voidaan laskea kaavalla

$$M_t = F * L, \quad (4)$$

missä  $F$  on taivuttava voima ja  $L$  on voiman etäisyys tarkasteltavassa pisteessä (Mäkelä et al. 2005, s. 147). Mikäli voimia on useampi kuin yksi, voidaan taivutusmomentti laskea lisäämällä voimista aiheutuvat taivutusmomentit toisiinsa. Tässä työssä tutkittavassa optimointitehtävässä on kaksi vääntöä aiheuttavaa voimaa, jotka ovat kappaleen päähän kiinnitettävän kappaleen painosta aiheutuva vääntö sekä kappaleen omasta massasta aiheutuva vääntö. Kappaleen oma massa voidaan laskea kaavalla

$$m = \rho AL, \quad (5)$$

missä  $\rho$  on rakenteen materiaalin tiheys ja  $A$  on palkin poikkipinta-ala.

## 2.2 Manuaalinen optimointi

Ominaisuuksia, joita tässä alaluvussa tutkitaan, ovat kannakkeen massa ja kuormankantokyky. Tutkittavia muuttujia ovat profiilista riippuen profiilin korkeus ja leveys sekä seinämän vahvuus. Optimoinnissa käytetään apuna tuoteominaisuuksien linearisointia tarkastelupisteessä.

Tarkastellaan aluksi lattaprofiilia. Jotta optimointi voidaan suorittaa, johdetaan tarvittavat kaavat ja luodaan matriisi, johon sijoitetaan osittaisderivoitut yhtälöt kappaleen massasta ja kuorman kantokyvystä. (Ellman 2020) Kappaleen massa voidaan laskea kaavalla (5), kun termi  $A$  korvataan kappaleen poikkipinnan leveydellä kerrottuna sen korkeudella. Tällöin kaavasta (5) saadaan

$$M = \rho * L * b * h, \quad (6)$$

minkä osittaisderivaatat ovat korkeuden suhteen

$$M = \rho * L * b \quad (7)$$

sekä leveyden suhteen

$$M = \rho * L * h. \quad (8)$$

Kaavat (1, 3, 4 ja 5) yhdistämällä saadaan laskettua suurin sallittu kannateltava kuorma  $m_k$  seuraavasti:

$$\sigma_s = \frac{M_t * y}{I_z} \rightarrow \frac{\sigma_s * I_z}{y} = M_t \rightarrow F * L + g * m * \frac{L}{2} = \frac{\sigma_s * I_z}{y} \rightarrow F = \frac{\sigma_s * I_z}{Ly} - \frac{g * m}{2} \rightarrow$$

$$m_k = \frac{\sigma_s * I_z}{L * y * g} - \frac{b * h * L * \rho}{1000^3 * 2} = \frac{\sigma_s * b * h^3}{12 * L * \frac{h}{2} * g} - \frac{b * h * L * \rho}{1000^3 * 2}. \quad (9)$$

Myös kaavasta (9) täytyy laskea osittaisderivaatat. Osittaisderivaatta kappaleen korkeuden suhteen on

$$\frac{\sigma_s * b * h}{3 * g * L} - \frac{b * L * \rho}{1000^3 * 2}, \quad (10)$$

kun taas osittaisderivaatta kappaleen leveyden suhteen on

$$\frac{\sigma_s * h^2}{6 * g * L} - \frac{h * L * \rho}{1000^3 * 2}. \quad (11)$$

Lasketut osittaisderivaatat sijoitetaan matriisiin

$$\begin{bmatrix} \Delta m \\ \Delta m_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta m}{\delta b} & \frac{\delta m}{\delta h} \\ \frac{\delta m_k}{\delta b} & \frac{\delta m_k}{\delta h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta b \\ \Delta h \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \rho * L * h & \rho * L * b \\ \frac{\sigma_s * h^3}{4 * g * L * y} - \frac{h * L * \rho}{1000^3 * 2} & \frac{\sigma_s * b * h^2}{12 * g * L * y} - \frac{b * L * \rho}{1000^3 * 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta b \\ \Delta h \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Jacobin matriisille lasketaan arvot suunnittelupisteessä. Tässä tehtävässä valitaan suunnittelupisteen mitoiksi  $b = 50 \text{ mm}$  ja  $h = 200 \text{ mm}$ . Kun nämä arvot sijoitetaan matriisiin, saadaan tulokseksi:

$$\begin{bmatrix} \rho * L * h & \rho * L * b \\ \frac{\sigma_s * h^2}{6 * g * L} - \frac{h * L * \rho}{1000^3 * 2} & \frac{\sigma_s * b * h}{3 * g * L} - \frac{b * L * \rho}{1000^3 * 2} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{7800 \text{ kg}}{\text{m}^3} * 2 \text{ m} * 0,2 \text{ m} & \frac{7800 \text{ kg}}{\text{m}^3} * 2 \text{ m} * 0,05 \text{ m} \\ \frac{284 * (200)^2}{12 * 9,81 * 2000} - \frac{200 * 2000 * 7800}{1000^3 * 2} & \frac{284 * 50 * 200}{4 * 9,81 * 2000} - \frac{50 * 2000 * 7800}{1000^3 * 2} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 3120 \text{ kg/m} & 780 \text{ kg/m} \\ 94,9 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} & 47,86 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Jotta matriisi olisi helpommin tulkittavissa, normalisoidaan arvot suunnittelupisteen arvoilla. Näin saatavaa matriisia kutsutaan dimensiottomaksi Jacobin matriisiksi eli herkkyysmatriisiksi. Suunnittelupisteessä massa on

$$m = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2 \text{ m} * 0,2 \text{ m} * 0,05 \text{ m} = 156 \text{ kg} \quad (14)$$

ja suurin mahdollinen massa, joka rakenteella voidaan kannatella

$$\begin{aligned}
 m_k &= \frac{\sigma_s \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot L \cdot \gamma \cdot g} - \frac{b \cdot h \cdot L \cdot \rho}{1000^3 \cdot 2} \\
 &= \frac{284 \text{ MPa} \cdot 50 \text{ mm} \cdot (200 \text{ mm})^3}{12 \cdot 2000 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{50 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm} \cdot 2000 \text{ mm} \cdot 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000^3 \cdot 2} = 4747 \text{ kg}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Herkkyysmatriisiksi saadaan näin ollen

$$\begin{aligned}
 &\begin{bmatrix} 3120 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \frac{0,05 \text{ m}}{156 \text{ kg}} & 780 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \frac{0,2 \text{ m}}{156 \text{ kg}} \\ 94,9 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} * \frac{50 \text{ mm}}{4747 \text{ kg}} & 72 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} \frac{200 \text{ mm}}{4747 \text{ kg}} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2,02 \end{bmatrix}, \quad (16)
 \end{aligned}$$

mistä havaitaan, että korkeutta ja leveyttä muutettaessa 1 % myös rakenteen massa muuttuu 1 %:n. Mikäli taas korkeutta muutetaan 1 % muuttuu rakenteen kuormankantokyky noin 2 %. Leveyttä muutettaessa taas 1 %:n muutos vaikuttaa kuormankantokykyyn noin 1 %:n. Näin ollen voidaan todeta, että lattaprofiilin leveydeksi kannattaa valita pienin mahdollinen leveys, jolla pystytään luomaan vaatimukset täyttävä rakenne. Lattaprofiilin kohdalla ohuin sallittu levyvahvuus on tässä työssä 6 mm. Optimaalisimmat latta-profiilit voidaan näillä tiedoilla laskea kaavasta (9) laskimella seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 m_k &= \frac{\sigma_s \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot L \cdot \gamma \cdot g} - \frac{b \cdot h \cdot L \cdot \rho}{1000^3 \cdot 2} \\
 &= \frac{284 \text{ MPa} \cdot 6 \text{ mm} \cdot x^3}{12 \cdot 2000 \text{ mm} \cdot 0,5 \cdot x \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{6 \text{ mm} \cdot x \cdot 2000 \text{ mm} \cdot 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000^3 \cdot 2} = 1000 \text{ kg} \rightarrow \\
 x &= 266,09 \dots \text{ mm} \approx 267 \text{ mm}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

Samalla tavalla voidaan laskea S500MC teräkselle kevyin mahdollinen rakenne, sijoittamalla 284 MPa:n tilalle 400 MPa. Tällöin saadaan rakenteen minimikorkeudeksi:

$$\begin{aligned}
 m_k &= \frac{\sigma_s \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot L \cdot \gamma \cdot g} - \frac{b \cdot h \cdot L \cdot \rho}{1000^3 \cdot 2} \\
 &= \frac{284 \text{ MPa} \cdot 6 \text{ mm} \cdot x^3}{12 \cdot 2000 \text{ mm} \cdot 0,5 \cdot x \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{6 \text{ mm} \cdot x \cdot 2000 \text{ mm} \cdot 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000^3 \cdot 2} = 1000 \text{ kg} \rightarrow \\
 x &= 223,77 \dots \text{ mm} \approx 224 \text{ mm}. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Seuraavaksi tutkitaan, miten suorakulmioputken ulkomittojen ja ainevahvuuden muuttaminen vaikuttavat rakenteen kuormankantokykyyn ja massaan. Johdetaan aluksi kaavat, joita optimoinnissa tarvitaan. Kaavasta (5) saadaan suorakulmioputkelle laskettua massa

$$m = \rho b h l - \rho(b - 2s)(h - 2s)l, \quad (19)$$

minkä derivaatat leveyden ja korkeuden suhteen ovat

$$m = 2\rho l s \quad (20)$$

ja materiaalin vahvuuden suhteen

$$m = -2L\rho(4s - h - b). \quad (21)$$

Kaavat (2, 3, 4 ja 5) yhdistämällä saadaan laskettua profiilin kuorman kanto kyky seuraavasti:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{M_t * y}{I_z} \rightarrow \frac{\sigma_s * I_z}{y} = M_t \rightarrow F * L + m * \frac{L}{2} = \frac{\sigma_s * I_z}{y} \rightarrow \\ m_k &= \frac{\sigma_s * I_z}{L * y} - \frac{m}{2} \rightarrow m_k = \frac{\frac{\sigma_s * I_z}{L * y}}{g} - \frac{\frac{\rho b h L - \rho(b - 2s)(h - 2s)L}{1000^3}}{2} \\ &= \frac{\sigma_s * (b * h^3 - (b - 2s)(h - 2s)^3)}{6 * L * h * g} - \frac{\rho b h L - \rho(b - 2s)(h - 2s)L}{1000^3 * 2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Jälleen kaavasta (21) tarvitaan osittaisderivaatat, jotka ovat korkeuden suhteen

$$\frac{\sigma_s * (3b * h^2 - 3(b - 2s)(h - 2s)^2)}{6 * L * h * g} - \frac{\sigma_s * (b * h^3 - (b - 2s)(h - 2s)^3)}{6 * L * h^2 * g} - \frac{\rho L s}{1000^3} \quad (23)$$

leveyden suhteen

$$\frac{\sigma_s * (h^3 - (h - 2s)^3)}{12 * L * y * g} - \frac{\rho L s}{1000^3} \quad (24)$$

ja materiaalin vahvuuden suhteen

$$\frac{\sigma_s * (2(h - 2s)^3 + 6(b - 2s)(h - 2s)^2)}{12 * L * y * g} - \frac{\rho L ((h - 2s) + (b - 2s))}{1000^3}. \quad (25)$$

Nämä osittaisderivaatat voidaan sijoittaa Jacobin matriisiin

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta m \\ \Delta m_k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\delta m}{\delta b} & \frac{\delta m_k}{\delta b} \\ \frac{\delta m}{\delta h} & \frac{\delta m_k}{\delta h} \\ \frac{\delta m}{\delta s} & \frac{\delta m_k}{\delta s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta b \\ \Delta h \\ \Delta s \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} 2\rho L s & \frac{\sigma_s * (h^3 - (h - 2s)^3)}{12 * L * y * g} - \frac{\rho L s}{1000^3} \\ 2\rho L s & \frac{\sigma_s * (3b * h^2 - 3(b - 2s)(h - 2s)^2)}{6 * L * h * g} - \frac{\sigma_s * (b * h^3 - (b - 2s)(h - 2s)^3)}{6 * L * h^2 * g} - \frac{\rho L s}{1000^3} \\ -2L\rho(4s - h - b) & \frac{\sigma_s * (2(h - 2s)^3 + 6(b - 2s)(h - 2s)^2)}{12 * L * y * g} - \frac{\rho L ((h - 2s) + (b - 2s))}{1000^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta b \\ \Delta h \\ \Delta s \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (26)$$

mikä on suorakulmioputken tapauksessa suurempi kuin lattaprofiililla. Tästä syystä käytetään normaalin Jacobin matriisin sijaan Jacobin matriisin transpoosia. Tällä kertaa suunnittelupisteen mitoiksi valitaan  $h = 200 \text{ mm}$ ,  $b = 100 \text{ mm}$  ja  $s = 3 \text{ mm}$ . Koska laskuissa käytettävät kaavat ovat liian pitkiä käytettäväksi matriisin sisällä, lasketaan matriisin arvot erikseen, minkä jälkeen tulokset sijoitetaan matriisiin. Kun kaavoihin (20, 21, 22, 23, 24 ja 25) sijoitetaan arvot, saadaan seuraavat tulokset:

$$\frac{\delta m}{\delta b} = \frac{\delta m}{\delta h} = 2\rho Ls = 2 * 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2 \text{ m} * 0.003 \text{ m} = 93,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}}, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta m}{\delta s} &= -2L\rho(4s - h - b) = -2 * 2 \text{ m} * 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (4 * 0.003 \text{ m} - 0.2 \text{ m} - 0.1 \text{ m}) \\ &= 8985,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}}, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta m_k}{\delta b} &= \frac{\sigma_s * (h^3 - (h-2s)^3)}{12 * L * \gamma * g} - \frac{\rho L s}{1000^3} \\ &= \frac{284 \text{ MPa} * ((200 \text{ mm})^3 - (200 \text{ mm} - 2 * 3 \text{ mm})^3)}{12 * 2000 \text{ mm} * 100 \text{ mm} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2000 \text{ mm} * 3 \text{ mm}}{1000^3} = 8,38 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}, \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta m_k}{\delta h} &= \frac{\sigma_s * (3b * h^2 - 3(b-2s)(h-2s)^2)}{6 * L * h * g} - \frac{\sigma_s * (b * h^3 - (b-2s)(h-2s)^3)}{6 * L * h^2 * g} - \frac{\rho L s}{1000^3} \\ &= \frac{284 * (3 * 100 * 200^2 - 3(100-6)(200-6)^2)}{6 * 2000 * 200 * 9,81} - \frac{284 * (100 * 200^3 - (100-6)(200-6)^3)}{6 * 2000 * 200^2 * 9,81} - \frac{7800 * 2000 * 6}{1000^3} \\ &= 9,78 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta m_k}{\delta s} &= \frac{\sigma_s * (2(h-2s)^3 + 6(b-2s)(h-2s)^2)}{12 * L * \gamma * g} - \frac{\rho L ((h-2s) + (b-2s))}{1000^3} \\ &= \frac{284 \text{ MPa} * (2(200 \text{ mm} - 6 \text{ mm})^3 + 6(100 \text{ mm} - 6 \text{ mm})(200 \text{ mm} - 6 \text{ mm})^2)}{12 * 2000 \text{ mm} * 100 \text{ mm} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \\ &\quad - \frac{7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2000 \text{ mm} * ((200 \text{ mm} - 6 \text{ mm}) + (100 \text{ mm} - 6 \text{ mm}))}{1000^3} = 427,7 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}. \end{aligned} \quad (31)$$

Kaavoista (27, 28, 29, 30 ja 31) saadut arvot voidaan sijoittaa Jacobin matriisiin seuraavasti:

$$\begin{bmatrix} \Delta m \\ \Delta m_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 93,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}} & 8,38 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} \\ 93,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}} & 9,78 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} \\ 8985,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}} & 427,7 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta b \\ \Delta h \\ \Delta s \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Seuraavaksi tarvitaan kannattimen massa sekä sen kuormankantokyky suunnittelupisteessä. Kannattimen massa suunnittelupisteessä voidaan laskea kaavalla (19)



$$m = 7800 \frac{kg}{m^3} * (0,1m * 0,2m - (0,1m - 0,006m)(0,2m - 0,006m)) * 2m$$

$$= 27,52 \text{ kg}, \quad (33)$$

ja suurin sallittu kannatettava massa kaavalla (22)

$$m_k = \frac{\sigma_s * \frac{b * h^3 - (b - 2s)(h - 2s)^3}{12}}{L * y * g} - \frac{22,84 \text{ kg}}{2}$$

$$= \frac{284 \text{ MPa} * (100 \text{ mm} * (200 \text{ mm})^3 - (100 \text{ mm} - 6 \text{ mm})(200 \text{ mm} - 6 \text{ mm})^3)}{12 * 2000 \text{ mm} * 100 \text{ mm} * 9,81 \frac{m}{s^2}} - \frac{27,52 \text{ kg}}{2} = 1371,1 \text{ kg}. \quad (34)$$

Näitä arvoja käyttämällä voidaan laskea Jacobin matriisista herkkymatriisi seuraavasti:

$$\begin{bmatrix} 93,6 \frac{kg}{m} * \frac{0,1m}{27,52 \text{ kg}} & 8,38 \frac{kg}{mm} * \frac{100mm}{1371,1 \text{ kg}} \\ 93,6 \frac{kg}{m} * \frac{0,2m}{27,52 \text{ kg}} & 9,78 \frac{kg}{mm} * \frac{200mm}{1371,1 \text{ kg}} \\ 7425,6 \frac{kg}{m} * \frac{0,003m}{27,52 \text{ kg}} & 427,7 \frac{kg}{mm} * \frac{3mm}{1371,1 \text{ kg}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,34 & 0,611 \\ 0,68 & 1,43 \\ 0,809 & 0,936 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Herkkymatriisista nähdään korkeuden kasvattamisen vaikuttavan jälleen eniten rakenteen kuormankantokykyyn suhteessa siihen, miten paljon se vaikuttaa massaan. Rakennetta suunniteltaessa kannattaa siis valita palkin materiaaliksi ohuin mahdollinen levy ja profiilin leveydeksi kapein mahdollinen. Työssä tarkasteltavat levyvahvuudet ovat 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm ja 10 mm ja rakenteen minimi leveydeksi vaaditaan 30 mm. Näitä tietoja käyttämällä saadaan laskettua S355MC teräksestä valmistettavalle rakenteelle minimi korkeus kaavaa (21) käyttämällä seuraavasti:

$$\frac{284 \text{ MPa} * (30 \text{ mm} * x \text{ mm}^3 - 24 \text{ mm} * (x \text{ mm} - 6 \text{ mm})^3)}{6 * 2000 * x * 9,81} - \frac{7800 \frac{kg}{m^3} * (30 \text{ mm} * x \text{ mm} - 24 \text{ mm} * (x \text{ mm} - 6 \text{ mm}) * 2000 \text{ mm})}{1000^3 * 2} \rightarrow$$

$$x = 231,647 \dots \text{ mm} \approx 232 \text{ mm}. \quad (36)$$

Kaavasta (35) voidaan korvata S355MC teräksen myötöraja 284 MPa S500MC teräksen myötörajalla 400 MPa, jolloin saadaan laskettua S500MC teräksestä valmistetun rakenteen minimi korkeus:

$$\frac{400 \text{ MPa} * (30 \text{ mm} * x \text{ mm}^3 - 24 \text{ mm} * (x \text{ mm} - 6 \text{ mm})^3)}{6 * 2000 * x * 9,81} - \frac{7800 \frac{kg}{m^3} * (30 \text{ mm} * x \text{ mm} - 24 \text{ mm} * (x \text{ mm} - 6 \text{ mm}) * 2000 \text{ mm})}{1000^3 * 2} \rightarrow$$

$$x = 190,416 \dots \text{ mm} \approx 191 \text{ mm}. \quad (37)$$

## 3. TIETOKONEAVUSTEINEN OPTIMOINTI

Tässä luvussa perehdytään rakenteen optimointiin Solidworksin optimointityökaluja hyödyntäen. Aluksi suoritetaan lattaprofiilien ja suorakulmioputkien optimointi design studia hyödyntäen. Tämän jälkeen luodaan Solidworksin topologiaoptimointiominaisuudella kevennyksellisiä rakenteita. Lisäksi Fusion 360:n generative designilla luodaan aiempien optimointien vertailukohdaksi verrokkikappaleet. Näiltä verrokkikappaleilta ei vaadita valmistettavuuden suhteen mitään, joten kyseiset kappaleet saattavat olla mahdollisia valmistaa.

### 3.1 Design study optimoinnin työkaluna

Aloitetaan optimaalisimman lattaprofiilin etsimisellä. Luodaan aluksi malli, jonka korkeutta ja leveyttä voidaan muuttaa vapaasti, ja joka on neljä metriä pitkä. Tämä malli katkaistaan keskeltä kahteen osaan split line komennolla. Tämän jälkeen mallille luodaan staattinen tutkimus ja design study, jonka säädeltävät parametrit ovat korkeus ja leveys. Lisäksi vaaditaan, ettei tutkimuksessa luotavassa profiilissa saa esiintyä jännityksiä, jotka ovat suurempia kuin ennalta määritellyt suurimmat sallitut jännitykset. Tutkimuksen tavoitteeksi valitaan kappaleen pienimmän mahdollisen massan löytäminen. (Dassault Systèmes, Design study) Rakenteen korkeuden annetaan muuttua 100 mm:n ja 300 mm:n välillä, kymmenen millimetrin askeleella. Profiilin leveys on tässä tapauksessa sen valmistamiseen käytettävän levyn ainevahvuus. Yleisiä ainevahvuuksia ovat muun muassa 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 15 mm ja 20 mm, joten leveydelle mahdollisiksi arvoiksi annetaan nämä arvot. Kuvassa 2 on esitettyä jännityksien tarkastelussa käytetyn staattisen tutkimuksen rakenne, jossa sininen väri kuvaa kiinnitys aluetta. Lisäksi kärjessä oleva nuoli kuvaa kannateltavaa massaa, ja keskellä palkkia oleva nuoli kuvaa palkkiin vaikuttavaa painovoimaa. Koska rakenne on todella pitkä korkeuteensa verrattuna, osa kiinnitys alueesta on rajattu pois, jotta rakenne saadaan esitettyä kuvassa 2 selkeämmin.



**Kuva 2. Lattaprofiilin optimoinnissa käytetyn staattisen tutkimus rakenne**

Optimoinnissa on hyvä välttää jännitys huippuja sopivan kiinnityksen lisäksi myös sopivalla verkon koolla. Mikäli verkko on liian suuri, ei suurimpia jännityksiä saada tarpeeksi tarkasti, mutta mikäli taas käytetään liian pientä verkkoa, saatetaan löytää kiinnityksestä johtuvia epärealistisia arvoja. Kun erinäisiä verkon kokoja käytiin läpi, havaittiin, että tässä tapauksessa sopiva verkon koko on 24 mm. Verkon koon sopivuudesta varmistuttiin vertailemalla staattisen tutkimuksen arvoja käsin laskettuihin arvoihin. Nämä arvot kirjattiin taulukkoon 1.

Taulukko 1. Verkon tarkkuuden varmistamisessa käytetyt arvot, sekä saadut jännitykset

Leveys (mm)	Korkeus (mm)	Suurin laskettu jännitys (MPa)	Suurin tietokoneelta saatu jännitys (MPa)
6	300	218	216
12	200	245	236
12	300	109	113
20	150	262	274
20	200	147	160
20	250	94	106
20	300	65	75

Ensimmäisessä optimoinnissa suurimmaksi sallituksi jännitykseksi valitaan 284 MPa. Kun tietokoneen annetaan suorittaa optimointi, saadaan taulukon 2 mukaiset arvot. Aikaa tässä optimoinnissa kului noin seitsemän minuuttia.

Taulukko 2. Design studyn tulokset, kun suurin sallittu jännitys on 284 MPa

Leveys (mm)	Korkeus (mm)	Massa (kg)
6	260	24,3
8	230	28,7
10	200	31,2
12	190	35,6
15	170	39,8
20	150	46,8

Sama optimointi suoritetaan uudestaan, mutta suurin sallittu jännitys vaihdetaan 284 MPa:sta 400 MPa:iin. Tämän optimoinnin tulokset on esitelty taulukossa 3. Optimoinnin uudelleen suorittamisessa kului aikaa saman verran kuin aiemmassa suorituksessa.

Taulukko 3. *Design studyn tulokset, kun suurin sallittu jännitys on 400 MPa*

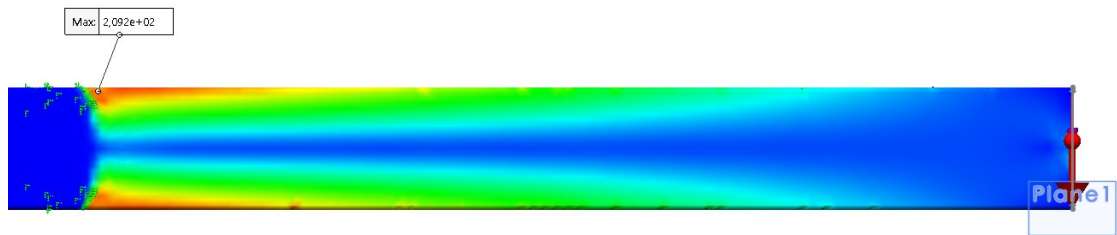
<b>Leveys (mm)</b>	<b>Korkeus (mm)</b>	<b>Massa (kg)</b>
6	220	20,6
8	190	23,7
10	170	26,5
12	160	30,0
15	140	32,8
20	130	40,6

Taulukoissa 2 ja 3 havaitaan, että kevyimmät rakenteet saavutetaan molemmissa tapauksissa pienimmällä mahdollisella leveydellä, mikä on ennalta arvattavissa luvun 2 tulosten pohjalta. Lisäksi kaavasta (1) nähdään, että rakenteen korkeuden suuntainen neliömomentti kasvaa voimakkaimmin, kun rakenteen korkeutta kasvatetaan. Rakenteen massaan leveyden ja korkeuden muuttaminen taas vaikuttavat saman verran.

Vaikka kevyin rakenne saadaankin ohuimmalla mahdollisella leveydellä, tulee suunnittelussa kuitenkin ottaa huomioon myös rakenteen lujuus ja jäykkyys muissa suunnissa. Kun massaa kannatetaan kahden metrin mittaisella levyllä, jonka leveys on kuusi millimetriä, ovat rakenteen jäykkyys ja lujuus sen leveyden suunnassa lähes olematon. Tästä syystä, vaikka kuusi millimetrisellä levyllä saavutetaankin optimaalinen massa, ei sellainen ole käytännöllinen.

Seuraavaksi tutkitaan suorakulmioputkesta valmistettuja rakenteita. Luodaan jälleen aluksi kappale, jonka mittoja voidaan muuttaa vapaasti ilman kyseisen mallin hajoamista, ja luodaan siihen samanlainen kiinnityspinta kuin aiemmassa kappaleessa. Tämän jälkeen luodaan staattinen tutkimus ja design study, jonka parametreiksi valitaan tällä kertaa palkin korkeus, leveys ja seinämän vahvuus. Palkin korkeus ja leveys voivat saada vapaasti mitä tahansa arvoja, mutta seinämän vahvuutta rajoittaa saatavilla olevat levyvahvuudet. Tämän profiilin yhteydessä tutkittavat levyvahvuudet ovat 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm ja 10 mm. Kuvassa 3 on esitettyinä profiilista tehdyn staattisen tutkimuk-

sen tulokset, josta nähdään, että suurimmat jännitykset jakautuvat suhteellisen järkevästi. Suorakulmioputkea optimoitaessa käytettiin 30 mm:n verkkoa, sillä 24 mm:n verkolla esiintyi epärealistisia jännityshuippuja enemmän. On myös tärkeää pitää mielessä, että staattinen tutkimus antaa tämän rakenteen yhteydessä hieman suuremman arvon, kuin todellinen suurin jännitys. Kun mallin jännityksiä tutkittiin, havaittiin, että mallissa esiintyy noin 5-10 prosenttia suurempia jännityshuippuja, kuin todelliset suurimmat jännitykset. Tämän takia optimoidut suorakulmioputkirakenteet ovat hieman raskaampia, kuin mitä ne kevyimmillään voisivat olla.



**Kuva 3.** Putken staattinen tutkimus.

Kun staattinen tutkimus on suoritettu, suoritetaan design study aluksi niin, että löydetään ne arvot, joita kannattaa tutkia tarkemmin. Tutkitaan siis aluksi vain ohuinta levy vahvuutta, ja annetaan korkeuden saada arvoja väliltä 100-300 mm ja leveyden arvoja 30 mm:n ja 280 mm:n väliltä. Korkeuden muutoksen askeleeksi valitaan 10 mm ja leveyden muutoksen askeleeksi 50 mm. Suurimmaksi sallituksi jännitykseksi valitaan 284 MPa. Alustavassa optimoinnissa kului aikaa noin 20 minuuttia, ja siitä saadut tulokset on kirjattu taulukkoon 4.

Taulukko 4. Alustavan tutkimuksen tulokset 3 mm:n seinämävahvuudella

Leveys (mm)	Korkeus (mm)	Massa (kg)
30	240	24,2
80	210	26,1
130	180	28,1
180	160	30,9
230	140	33,8
280	130	37,6

Taulukosta 4 voidaan havaita, että optimaalinen rakenteen leveys on 30-80 mm, ja että leveyden kasvattaminen vaikuttaa negatiivisesti rakenteen optimaalisuuteen myös suorakulmioputken tapauksessa. Näin ollen yli 130 mm leveitä profiileja ei tutkita. Seuraavaksi voidaan selvittää design studylla kaikkien levyvahvuuksien optimaaliset mitat tarkemmin. Tarkemman tutkimuksen suorittamisessa kesti noin 85 minuuttia ja siitä saadut tulokset on kirjattu taulukkoon 5.

Taulukko 5. *Design studyn tulokset suorakulmioputkelle, kun suurin sallittu jännitys on 284 MPa*

<b>Levy vahvuus (mm)</b>	<b>leveys (mm)</b>	<b>korkeus (mm)</b>	<b>massa (kg)</b>
3	30	240	24,2
4	30	210	27,9
5	40	180	31,1
6	50	160	34,7
8	60	130	39,2
10	70	110	46,0

Vaikka taulukon 5 tulokset näyttävät kasvavan melko järkevästi, voidaan tuloksia tarkemmin tutkimalla havaita, että palkissa esiintyy kiinnityksen takia epärealistisia jännityshuippuja, kuten aiemmin mainittiin. Mikäli kyseisiä jännityshuippuja ei otettaisi huomioon, havaitaan, että 3 mm levyvahvuudella ja 30 mm leveydellä jo 230 mm korkuinen profiili riittäisi työssä määritellyn massan kannattamiseen. Kaikki palkit eivät siis ole välttämättä todellisuudessa kaikkein optimaalisimmat, mutta ovat kuitenkin hyvin lähellä

Seuraavaksi sama tutkimus suoritetaan uudestaan, mutta suurimpana sallittuna jännityksenä käytetään 284MPa:n sijaan 400 MPa. Tämän tutkimuksen tulokset on kirjattu taulukkoon 6.

Taulukko 6. *Design studyn tulokset suorakulmioputkelle, kun suurin sallittu jännitys on 400 MPa*

<b>Levy vahvuus (mm)</b>	<b>leveys (mm)</b>	<b>korkeus (mm)</b>	<b>massa (kg)</b>
3	30	190	19,5
4	40	160	22,9
5	40	140	24,9
6	50	130	29,1
8	50	120	34,2
10	70	100	40,2

Taulukkoon 6 kirjatut arvot ovat hyvin samankaltaiset taulukon 5 arvojen kanssa, ja kasvavat samalla tavalla. Myös tässä design studyssa havaittiin, että jännityshuipuista johtuen osalla levyvahvuuksista saatiin tulokseksi kymmenen millimetriä korkeampi rakenne kuin mitä todellisuudessa olisi tarvittu.

### 3.2 Topology study optimoinnin työkaluna

Tässä alaluvussa luodaan kevennettyjä rakenteita hyödyntäen Solidworksin topologia optimointi työkalua. Sekä lattaprofiilista että suorakulmioputkesta luodaan useita optimoituja rakenteita, jotta löydetään optimaaliset rakenteet. Lattaprofiileja optimoitaessa käytettävän verkon koko 6 mm, kun taas suorakulmioputkia tutkittaessa verkon kokona käytetään 8 mm. Näitä verkon kokoja käytetään, koska ne ovat tiheimmät mahdolliset verkot, joita näiden profiilien yhteydessä pystytään käyttämään. Mikäli verkkojen kokoa tihennetään tästä, ei optimoinnissa käytettävä tietokone saa optimointia suoritettua. Tiheää verkkoa käytetään, koska sillä tulokset ovat tarkemmat (Dassault Systèmes, Topology Study).

Topologia optimointi aloitetaan luomalla lattaprofiilille topology study, jonka tavoitteeksi valitaan paras jäykkyyden ja massan suhde (Dassault Systèmes, Topology Study). Rakenteen kiinnityspinnaksi valitaan alue, jota käytettiin aiemmin design studyssa, ja vaaditaan, ettei kiinnitysalueelta saa poistaa materiaalia. Samalla rakenteen toiseen päähän lisätään kannateltavasta massasta aiheutuva voima ja valitaan painovoiman suunta. Rajoituksiksi valitaan suurin sallittu jännitys rakenteessa, joka on S355MC teräksen kohdalla 284 MPa sekä optimoidun kappaleen toivottu massa. Optimoidun kappaleen toivottuksi massaksi asetetaan 48,1 kg, koska kiinnitys alueelta ei poisteta materiaalia. Kun ensimmäinen optimointi on suoritettu, voidaan tavoiteltavaa massaa pienentää, kunnes rakenteen massa ei enää vähene tai optimoinnit alkavat epäonnistua. Näiden optimointien tulokset on kirjattu taulukkoon 7.

Taulukko 7. Topologiaoptimoinnin tulokset lattaprofiilille, kun suurin sallittu jännitys on 284MPa

leveys (mm)	korkeus (mm)	alkuperäinen massa (kg)	optimoitu massa (kg)	kesto (min)
6	300	28,1	18,5	35
6	300	28,1	17,8	100
8	300	37,4	16,5	110
10	300	46,8	16,3	115
10	225	35,1	23,2	90
12	300	56,2	17,8	120
15	300	70,2	19,6	140

Taulukkoon 7 kirjatusta tuloksista havaitaan, että aiemmasta poiketen kevyin rakenne ei löydy välttämättä topologiaoptimoinnin yhteydessä ohuimmalla levyvahvuudella. Korkeuden vaikutus sen sijaan optimointituloksen massaan on sama kuin aiemmin, eli korkeammilla profiileilla päästään parempaan lopputulokseen. Taulukon 7 tulosten pohjalta suoritetaan optimointi myös S500MC teräkselle. Optimaaliset tulokset S500MC teräkselle on kirjattu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Topologiaoptimoinnin tulokset lattaprofiilille, kun suurin sallittu jännitys on 400MPa

leveys (mm)	korkeus (mm)	alkuperäinen massa (kg)	optimoitu massa (kg)	kesto (min)
10	300	46,8	15,3	120
8	300	37,4	15	100

Seuraavaksi toteutetaan suorakulmioputken topologiaoptimointi. Topology studyn luomisessa voidaan käyttää aiemmin design studya varten luotua suorakulmioputken mallia. Topologiaoptimoinnissa voidaan käyttää samoja asetuksia kuin aikaisemmin suoritettussa lattaprofiilin optimoinnissa. Taulukkoon 9 on kirjattu topologiaoptimoinnin tulokset suorakulmioputkelle, kun suurin sallittu jännitys on 284 MPa.



Taulukko 9. *Topologiaoptimoinnin tulokset suorakulmioputkelle, kun suurin sallittu jännitys on 284MPa*

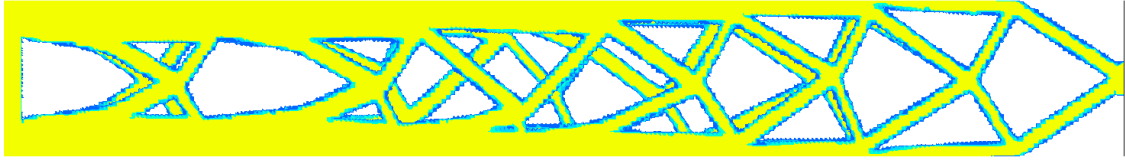
levyvahvuus (mm)	profiili (mm)	alkuperäinen massa (kg)	optimoitu massa (kg)	kesto (min)
3	300*30	29,8	18,0	120
3	300*40	30,7	16,6	140
3	300*50	31,7	16,5	150
3	250*50	27,0	17,5	140
3	300*60	32,6	16,9	150
3	300*70	33,6	16,8	150
3	300*100	36,4	17,4	150
4	300*40	40,4	18,7	120
4	300*50	41,7	18,4	140
4	300*60	42,9	18,2	150
4	300*70	44,2	18,9	150
5	300*50	51,4	22,4	150
5	225*50	39,7	21,4	150

Taulukon 9 pohjalta voidaan valita profiilit, joita halutaan tutkia S500MC teräksen kohdalla. S500MC teräksestä valmistettujen suorakulmioputkien optimointien tulokset on kirjattu taulukkoon 10.

Taulukko 10. *Topologiaoptimoinnin tulokset suorakulmioputkelle, kun suurin sallittu jännitys on 400Mpa*

profiili	seinämävahvuus	alkuperäinen massa	optimoitu massa	kesto
300*50	3	31,7	15,1	150
300*40	3	30,7	14,7	140
280*40	3	28,8	15,7	140
250*50	3	27,0	16,5	140

Kuvassa 4 on esitettyinä taulukossa 10 esiintyvistä topologiaoptimoiduista kappaleista kevyin.



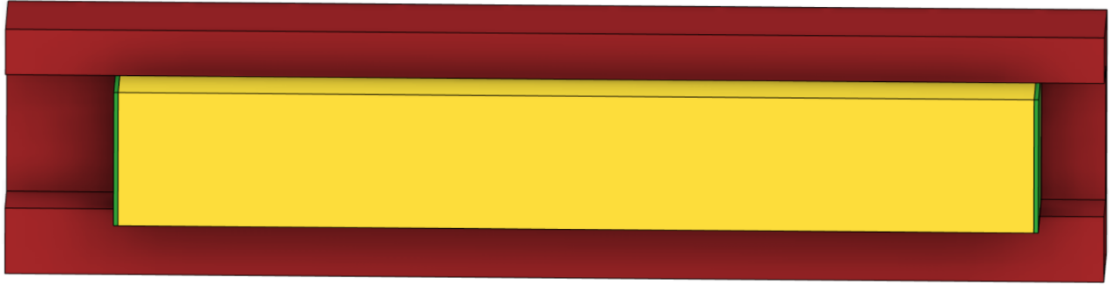
**Kuva 4.** Topologiaoptimoitu palkki.

Kuvassa 4 esitetty topologiaoptimoitu palkki ei ole symmetrinen korkeutensa, leveytensä tai pituutensa suhteen. Palkin rakenteen hahmottamisen helpottamista varten poistetun ja jäljelle jääneen materiaalin rajat on jätetty sinisiksi.

### **3.3 Fusion 360 generative design optimoinnin työkaluna**

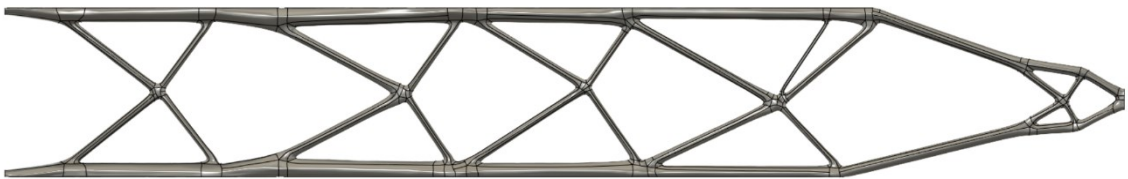
Fusion 360:n generative design ominaisuus mahdollistaa useiden profiilien luomisen eri valmistusmenetelmillä ja materiaaleilla yhdellä tutkimuksella (Autodesk Inc., Fusion 360 generative design). Etuna generatiivisessa designissa on myös se, että topologiaoptimoinnista poiketen Fusion 360:n generative design ei vain poista materiaalia ennalta määritellystä profiilista, vaan osaa myös lisätä sitä paikkoihin, joissa sitä tarvitaan. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka joltain alueelta poistettaisiin materiaalia jossain rakenteen versiossa, se voidaan myöhemmin lisätä takaisin. Tämän takia Fusion 360:n generative designilla voidaan luoda rakenteita, joiden luominen olisi vaikeaa tai mahdotonta Solidworksin topologiaoptimoinnilla.

Fusion 360:n generative design ominaisuutta varten mallinnetaan aluksi rajoittavat geometriat, aloitus malli ja kiinnitys pisteet. Tämän jälkeen voidaan luoda generative design tutkimus ja määritellä kiinnityspisteet, esiintyvät voimat, rakenteen materiaalit, käytettävät valmistusmenetelmät ja tutkimuksen tarkkuus sekä tavoitteet.



**Kuva 5.** *Generatiiviselle designille määritellyt rajoitukset, kiinnityspisteet sekä alkuperäinen rakenne*

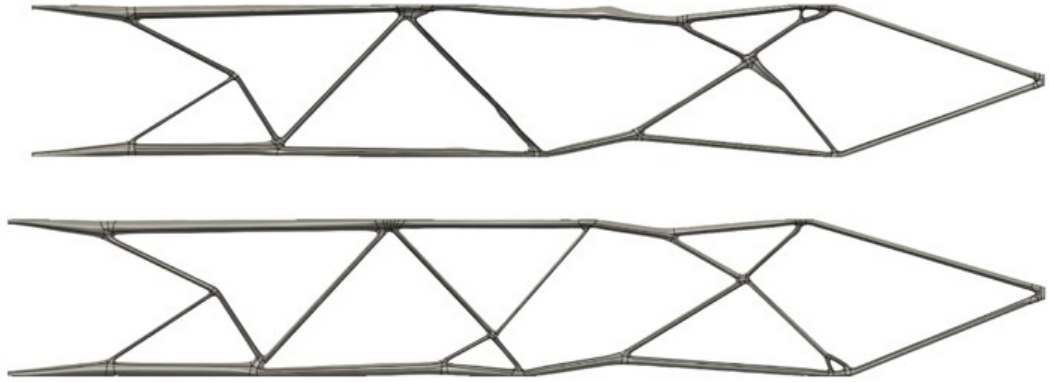
Kuvassa 5 on esitettyä punaisella alueet, joilla materiaalia ei saa esiintyä lopullisessa mallissa, keltaisella alkuperäinen rakenne ja vihreällä rakenteen kiinnityspiste sekä massan kiinnityspiste. Punaisella esitetty alue on kuvassa 5 halkaistu, jotta sen sisälle nähtäisiin, mutta todellisuudessa punainen alue ympäröi jokaiselta sivulta rakennetta. Generatiivisen tutkimuksen valmistusmenetelmäksi valitaan unrestricted, jolloin kappaleen valmistaminen ei välttämättä ole mahdollista. Tutkimuksen tarkkuudeksi valitaan suurin mahdollinen tarkkuus ja tavoitteeksi massan minimointi. Massaa minimoitaessa jännitykset saavat jälleen olla materiaalista riippuen maksimissaan 284 MPa tai 400 MPa. Tutkimuksen ensimmäisessä suorituksessa meni molemmilla materiaaleilla noin 4 tuntia. S500MC teräksestä tehdyn rakenteen massa oli ensimmäisen optimoinnin jälkeen 29,5 kg. Tämä rakenne on esitettyä kuvassa 6.



**Kuva 6.** *Ensimmäisen generatiivisen designin tulos*

Ensimmäisen optimoinnin rakenne on hieman erilainen S355MC teräksellä, mutta koska nämä eivät ole lopulliset tulokset ei S355MC teräksestä tehtyä rakennetta esitetä tässä välivaiheessa. Kun ensimmäinen optimointi on suoritettu, voidaan tutkimus suorittaa uudelleen. Ainoa ensimmäisen ja toisen optimoinnin ero on, että jälkimmäisessä optimoinnissa aloitus rakenteeksi valitaan ensimmäisen optimoinnin tulos. Kun jälkimmäinen optimointi suoritetaan, saadaan S500MC teräkselle rakenne, jonka massa on 11,2 kg ja

S355MC teräkselle rakenne, jonka massa on 12,2 kg. Lopulliset rakenteet ovat esitettynä kuvassa 7.



**Kuva 7.** Lopulliset generative designilla luodut rakenteet S500MC ja S355MC teräksille

Kuvassa 7 ylempänä on esitettynä S500MC teräkselle luotu rakenne ja S355MC teräkselle luotu rakenne alempana. Rakenteet ovat keskenään hyvin samanlaisia ja suurin osa rakenteiden massojen erosta syntyy siitä, että S500MC teräksestä tehdystä rakenteesta on poistettu turhia osia tai osista on vähennetty materiaalia. Lopullisessa optimoinnissa meni aikaa noin 2 tuntia, jolloin yhden rakenteen optimoinnissa meni kokonaisuudessaan aikaa noin 6 tuntia.

Vaikka optimointi generatiivisella designilla viekin jonkin verran aikaa, saatiin sillä myös todella hyviä tuloksia muihin optimointimethodeihin verrattuna. Näitä rakenteita ei välttämättä olisi kovin helppoa tai edes mahdollista valmistaa, mutta niiden avulla on helpompi ymmärtää, miten paljon turhaa massaa aiemmin luoduissa rakenteissa on esiintynyt. Vaihtoehtoisesti Fusion 360:n generative design ominaisuutta olisi voitu käyttää jo ennen topologiaoptimointia manuaalisen optimoinnin ja design studyn sijasta, koska näin olisi saatu huomattavasti enemmän tietoa optimaalisimmasta mahdollisesta rakenteesta.

## 4. OPTIMOINNIN TULOSTEN VERTAILU

Tässä luvussa perehdytään aiemmissa kappaleissa luotuihin optimoituihin kappaleisiin ja vertaillaan niitä toisiinsa. Aluksi kerätään yhteen taulukkoon kaikilla optimointitavoilla saadut parhaat tulokset ja muutama muu merkittävä tulos.

Taulukko 11. *Kaikilla optimointimenetelmillä löydetyt optimaalisimmat rakenteet*

optimointitapa	Profiili	materiaali	alkuperäinen massa (kg)	optimoitu massa (kg)	hävikki materiaali (kg)	kesto (min/ min)
manuaalinen	levy	S355MC	-	25,0	-	-
manuaalinen	levy	S500MC	-	21,0	-	-
manuaalinen	putki	S355MC	-	23,0	-	-
manuaalinen	putki	S500MC	-	20,1	-	-
design study	levy	S355MC	-	24,3	-	7
design study	levy	S500MC	-	20,6	-	7
design study	putki	S355MC	-	24,2	-	85
design study	putki	S500MC	-	19,5	-	85
top. opt.	levy	S355MC	28,1	18,5	9,6	35
top. opt.	levy	S355MC	28,1	17,8	10,3	100/135
top. opt.	levy	S355MC	46,8	16,3	30,5	115/570
top. opt.	levy	S500MC	37,4	15,0	22,4	100/220
top. opt.	putki	S355MC	29,8	18	11,8	120
top. opt.	putki	S355MC	31,7	16,5	15,2	150/820
top. opt.	putki	S500MC	30,7	14,7	16	140/430
gen. des.	-	S355MC	-	12,2	-	360
gen. des.	-	S500MC	-	11,2	-	360

Taulukosta 11 voidaan heti havaita, että manuaalisella optimoinnilla ja Solidworksin design studylla saadut tulokset eroavat toisistaan vain vähän, tarkemmin sanottuna alle 5 %. Kun huomioidaan että manuaalisessa optimoinnissa ei otettu huomioon profiilin kulmien pyöristyksiä, ei 5 % ero rakenteiden massoissa ole kovinkaan huomattava. Manuaalisesta optimoinnista ja design studysta voidaan siis todeta, että molempien kohdalla on onnistuttu kohtalaisesti. Suurin ero näiden kahden välillä on niihin kuluva aika. Suorakulmioputken kohdalla manuaalinen optimointi on hieman nopeampi tapa, mutta kun otetaan huomioon, että putkiprofiilin Solidworks mallia tarvitaan myös topologia optimointiin, ei ajallista säästöä juurikaan synny suuntaan eikä toiseen.

Vertailtaessa topologiaoptimoituja rakenteita design studylla ja manuaalisella optimoinnilla luotuihin rakenteisiin aletaan näkemään huomattavia eroja. Kun verrataan design studylla S355MC teräksestä luotua kevyintä mahdollista lattaprofiilia ja topologiaoptimoitua rakennetta, jonka luomisessa meni noin 35 minuuttia, havaitaan, että topologiaoptimoitu rakenne on noin 24 % kevyempi. Kun saman profiilin optimointia jatkettiin, optimaalisimman mahdollisen version löytämisessä kului aikaa noin 110 minuuttia ja rakenteen massa oli noin 27 % design studylla luodun rakenteen massaa pienempi. Optimaalisimman topologiaoptimoidun lattaprofiilin löytämiseksi tutkittiin 6 mm:n, 8 mm:n, 10 mm:n, 12 mm:n ja 15 mm:n levyisiä rakenteita, mistä 15 mm:n levyistä rakennetta ei enää olisi välttämättä tarvinnut tutkia koska jo 12 mm:n kohdalla havaittiin, että rakenteen massa alkaa kasvamaan rakenteen leveyttä kasvatettaessa. Lopullinen kevyin S355MC teräksestä valmistettu topologiaoptimoitu lattaprofiili oli noin 33 % kevyempi kuin design studylla löydetty kevyin profiili. Aikaa tämän topologiaoptimoinnin suorituksessa kului noin 115 minuuttia, mutta kun otetaan huomioon kaikki topologiaoptimoinnit, jotka vaadittiin optimaalisimman tuloksen löytämiseen, kului aikaa noin 570 minuuttia. Kun etsittiin optimaalisinta S500MC teräksestä luotua topologiaoptimoitua lattaprofiilia, kului 27 % kevyemmän rakenteen luomisessa aikaa noin 220 minuuttia.

Topologiaoptimoitaessa suorakulmioputkesta valmistettuja rakenteita yksittäisen optimoinnin kesto oli noin 25 % pidempi kuin lattaprofiilin kohdalla, mikä on ennalta arvattavissa, koska putkiprofiili on hieman monimutkaisempi. Kun S355MC teräksestä valmistettuja profiileita optimoitiin, saatiin 120 minuutissa tuotettua profiili, joka on lähes 26 % kevyempi kuin kevyin kevennyksetön S355MC teräksestä valmistettu suorakulmioputki. Kevyimmän S355MC teräksestä valmistetun topologiaoptimoidun putken luomisessa meni aikaa noin 150 minuuttia, jolloin rakenteesta saatiin tehtyä noin 32 % kevyempi. Kokonaisuudessaan aikaa tämän rakenteen tuottamiseen meni aikaa noin 820 minuuttia, kun otetaan huomioon ennen optimaalisinta rakennetta suoritettut topologia tutkimukset ja ne tutkimukset, jotka piti suorittaa, jotta voitiin varmistua, ettei kevyempää rakennetta löydy.

Etsittäessä S500MC teräksestä valmistettua optimaalisinta suorakulmioputkea aikaa kului jälleen vähemmän, koska S355MC teräksestä valmistetun rakenteen optimoinnista saatavien tulosten pohjalta voitiin olettaa, että optimaalisin rakenne löytyy ohuimmalla

levyvahvuudella. Optimoitaessa S500MC teräksestä valmistettuja suorakulmioputkikanteita optimaalisiin löydetty rakenne oli lähes 25 % kevyempi kuin kevyin keventämätön rakenne. Kokonaisaika, joka tämän rakenteen kehittämisessä kului, oli noin 430 minuuttia.

Vaikka topologiaoptimoituja rakenteita luotiin melko paljon, on hyvin todennäköistä, että ainakin suorakulmioputken kohdalla olisi ollut mahdollista tuottaa vielä hieman kevyempi rakenne. Tämä johtuu siitä, että suorakulmioputken kohdalla leveyttä muutettiin kerrallaan 10 mm, jolloin optimaalisiin leveys on saattanut olla kahden profiilin välissä. Tällä ei toisaalta ole kovinkaan suurta merkitystä, sillä sen massa ei todennäköisesti ole olennaisesti tässä työssä löydettyjä rakenteita kevyempi.

Fusion 360:n generative design ominaisuudella kehitettyjen rakenteiden luomisessa kului aikaa noin 6 tuntia yhtä rakennetta kohti. Tämä on yksittäiseen topologiaoptimointiin verrattuna huomattavan pitkä aika, mutta myös tulokset, joita generatiivisella designilla saatiin, olivat huomattavasti paremmat. Verrattaessa S355MC teräksestä valmistettua verrokkikappaletta design studylla kehitettyihin latta- ja suorakulmioprofiileihin havaitaan, että design studylla luodut rakenteet ovat lähes 100% raskaampia kuin optimaalisiin mahdollinen rakenne. Materiaalin ollessa S500MC teräs keventämättömät kappaleet olivat noin 74–84 % raskaampia kuin verrokkikappaleet. Myös topologia optimoidut rakenteet ovat huomattavasti raskaampia kuin työssä luodut verrokkikappaleet. kevyimmillään topologiaoptimoitu kappale oli noin 31 prosenttia raskaampi kuin verrokkikappale. Kaikki työssä löydettyt optimaalisimmat topologiaoptimoidut rakenteet olivat 31–36 % raskaampia, kuin niihin verrattavat verrokkikappaleet.

Topologiaoptimoitaessa rakennetta on otettava huomioon useita asioita. Tässä työssä pääpaino on massan vähentämisellä, eikä optimointiin kuluva ajasta tai valmistuskustannuksista juurikaan välitetä. Kuten työssä jo aiemmin mainittiin, kyettiin 35 minuutissa kappaletta keventämään noin 24 %, 145 minuutissa 27 % ja 570 minuutissa noin 33 %. Tässä tapauksessa 6 %:ssa siitä ajasta, mikä kului optimaalisimman rakenteen löytämiseen, löydettiin rakenne, jossa kevennys alkuperäisestä oli yli 70 % lopullisesta kevennyksestä. Näin ollen tapauksissa, missä painon merkitys ei ole todella suuri, saattaa olla kannattavampaa lopettaa optimointi ensimmäisen optimoinnin jälkeen, eikä edes yrittää et-

siä optimaalisinta mahdollista rakennetta. Taulukosta 11 voidaan lisäksi havaita, että esimerkiksi lattaprofiilin tapauksessa optimaalisimmasta profiilista lähes kaksi kolmasosaa alkuperäisen rakenteen materiaalista jouduttaisiin poistamaan. Vastaava luku olisi ollut 35 minuutin optimoinnin tapauksessa vain vähän reilu kolmannes.



## 5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli löytää mahdollisimman kevyt rakenne, joka täyttää ennalta määrätyt vaatimukset. Työssä käytettyjä optimointimetoodeja olivat manuaalinen optimointi, Solidworksin design study ja topologiaoptimointi toiminnot sekä Fusion 360:n generative design. Näillä tekniikoilla luotiin yli 50 rakennetta, joista merkittävimpiä vertailtiin toisiinsa. Näitä rakenteita vertailemalla työssä havainnollistetaan, miten paljon työtä eri menetelmien käyttäminen vaatii ja miten hyviä tuloksia niillä saadaan aikaan. Työstä voi myös saada kuvan siitä, miten näitä optimointimenetelmiä voi käyttää yhdessä optimaalisimman rakenteen löytämiseksi.

Rakenteita luotaessa pääpaino oli rakenteen massalla, mutta kun rakenteita vertailtiin, otettiin osittain huomioon myös rakenteiden kehittämiseen kulunut aika. Työssä rakenteiden optimointiin kuluvan ajan huomioinnilla pyrittiin esittämään, miten optimaalisimman mahdollisen rakenteen etsiminen ei aina välttämättä ole kannattavaa, vaan tilanteesta riippuen saattaa olla kannattavampaa suorittaa vain nopea topologiaoptimointi. Rakenteiden valmistuskustannuksia sen sijaan ei tässä työssä pohdittu, eikä generatiivisen designin kohdalla valmistettavuutta otettu huomioon.

Rakenteiden vertailun lisäksi työssä on esitelty optimoinnin vaiheita. Manuaalisen optimoinnin kohdalla työssä on esitelty valittuihin profiileihin liittyvää lujuuslaskentaa ja optimoinnissa tarpeellisia periaatteita, kun taas tietokoneavusteisen optimoinnin kohdalla on käsitelty optimoinnissa käytettävän mallin luomista, optimoinnin tarkkuuden kannalta merkittäviä asioita ja optimoinnin tulosten varmistamista.

## LÄHTEET

Joost, W. (2012). Reducing Vehicle Weight and Improving U.S. Energy Efficiency Using Integrated Computational Materials Engineering, JOM, vol.64, pp. 1032–1038. Saatavissa (viitattu 31.3.2020): <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-012-0424-z>

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. (2005). Tekniikan kaavasto: matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 18. uud. p. Tampere: Tammertekniikka

Merrill, C., Custer, R., Daugherty, J., Westrick, M., Zeng, Y. (2009) Delivering Core Engineering Concepts to Secondary Level Students, Journal of Technology education, vol.20, pp. 50–51. Saatavissa (viitattu 26.3.2021) [https://www.researchgate.net/publication/47435777\\_Delivering\\_Core\\_Engineering\\_Concepts\\_to\\_Secondary\\_Level\\_Students](https://www.researchgate.net/publication/47435777_Delivering_Core_Engineering_Concepts_to_Secondary_Level_Students)

SFS-EN 10149-2. 2013. Kuumavalssatut lujat kylmämuovattavat teräslevytuotteet. Osa 2: Termomekaanisesti valssattujen terästen tekniset toimitusehdot. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 18 s.

Dassault Systèmes, Design study, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 26.3.2021) [https://help.solidworks.com/2021/English/SolidWorks/cworks/c\\_Design\\_Study.htm?id=a3ced2c5f31d4e8eb14e863f6cccba#Pg0](https://help.solidworks.com/2021/English/SolidWorks/cworks/c_Design_Study.htm?id=a3ced2c5f31d4e8eb14e863f6cccba#Pg0)

Dassault Systèmes, Topology study, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 26.3.2021) [https://help.solidworks.com/2021/English/SolidWorks/cworks/c\\_generative\\_design\\_study.htm?id=bd2e8fde936e4e15a73b2474f78aca17#Pg0](https://help.solidworks.com/2021/English/SolidWorks/cworks/c_generative_design_study.htm?id=bd2e8fde936e4e15a73b2474f78aca17#Pg0)

Autodesk Inc., Fusion 360 generative design, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 26.3.2021) <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-2254BA0B-24DB-4B08-8A03-955FE34CB252>

Ellman, A. 2020. Parametrinen suunnittelu ja Monitavoiteoptimointi. Moniste. Koneen suunnittelun ja tuotekehityksen professorin luento 16.9.2020 Tampereen teknillisessä yliopistossa. Saatavilla (viitattu 26.3.2021) [https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/1057663/mod\\_resource/content/1/Luento%203.pdf](https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/1057663/mod_resource/content/1/Luento%203.pdf)