

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan osasto

Teräsrakenteiden laboratorio

Vesa Tynys

**TULEVAISUUDEN TYÖKONEPUOMIN GLOBAALI OPTIMOINTI  
-ESISELVITYS**

Työn tarkastajat:

Professori Timo Björk

DI Antti Sirén

DI Olli-Pekka Hämäläinen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
Konetekniikan koulutusohjelma  
Teräsrakenteiden laboratorio

Vesa Tynys

### **Tulevaisuuden työkonemuomin globaali optimointi -esiselvitys**

Diplomityö

2014

78 sivua, 21 kuvaa, 11 taulukkoa ja 9 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk  
DI Antti Sirén  
DI Olli-Pekka Hämäläinen

Avainsanat: monitavoiteoptimointi, optimointi, teleskooppipuomi, poikkileikkaus

Monitavoiteoptimointia käytetään laajasti auto- ja lentokoneteollisuudessa suunnittelun apuvälineenä, mutta muuten sen käyttö ei ole vielä yleistynyt laajemmin. Tässä työssä on tarkoitus tehdä laaja esiselvitys monitavoiteoptimoinnista ja sen hyödyntämisestä työkonemuomien suunnittelun apuvälineenä. Työ tehtiin yhteistyössä Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja projektiin osallistuvien FIMA ry:n jäsenten kanssa. Tulosten ja johtopäätösten perusteella tutkimusta tullaan mahdollisesti jatkamaan Tampereen teknillisen yliopiston tohtorikoulussa.

Työssä selvitettiin mitä monitavoiteoptimoinnilla tarkoitetaan ja esitellään sen etenemisvaiheet. Lisäksi työssä esitellään lyhyesti kuusi monitavoiteoptimointiohjelmistoa pääominaisuuksineen sekä selvitetään ohjelmistolisenssien hintoja.

Työssä optimointiin perehdyttiin teleskooppipuomin jatkoksen case -tutkimuksen avulla. Nivelpuomit ja nivel- ja teleskooppipuomien yhdistelmät rajattiin työn ulkopuolelle. Työssä muodostettiin teleskooppipuomin jatkoksen poikkileikkauksen optimointityökalu. Sen avulla voidaan laskea luotettavasti optimi mitat painon suhteen niin, että lommahdusrajoitteet, taipuvuusvastus sekä taipuma otetaan huomioon ja samalla voitiin arvioida optimointiprosessin etuja ja haittoja. Optimoinnin tuloksia voidaan käyttää edelleen monitavoiteoptimoinnin lähtöarvoina.

Optimointi tehtiin Matlabin avulla ja tulokset verifioitiin AGIFAP -elementtimenetelmäohjelmistolla. Optimoituja tuloksia tutkittiin edelleen Femap -elementtimenetelmäohjelmistolla, jolla haettiin vuorovaikutussuhteita monitavoiteoptimoinnin tueksi. FE -analyysien avulla muodostettiin kaksi apuohjelmaa optimoinnin tueksi.

Työssä havaittiin, että teleskooppipuomin jatkoksen optimointi vaatii FE -analyysiohjelmiston rinnalleen, jotta voidaan varmistua rakenteen kestävydestä ja optimoida väsymiskestävyyttä. Liukupalojen vaikutus teleskooppipuomin käytökseen sekä väsymiskestävyuden optimointi vaatii jatkotutkimusta.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Department of Mechanical Engineering  
Laboratory of Fatigue and Strength

Vesa Tynys

### **Global optimization of the boom of the future mobile machine -preliminary study**

Master thesis

2014

78 pages, 21 figures, 11 tables and 9 appendixes

Examiners: Professor Timo Björk  
M.Sc. Antti Sirén  
M.Sc. Olli-Pekka Hämäläinen

Keywords: multi-disciplinary optimization, optimization, telescopic boom, cross section

Multidisciplinary optimization is widely used in the car and airplane industry as an engineering tool but in the other fields of industry it hasn't yet made a breakthrough. The purpose of this work was to make a vast study about the multi-disciplinary optimization and its usability in designing of boom of the mobile machine. This study was carried out together with Lappeenranta University of Technology and project participates from FIMA association. Based on the results and conclusions of this thesis the study may be continued in wider form by the Doctoral School of Industry innovations (DSII) of Tampere University of Technology.

This thesis clarifies the meaning of the multidisciplinary optimization and introduces its solution phases. In addition the study introduces shortly six multidisciplinary optimization software and their main features and license prices.

The optimization of one section of a telescopic boom was studied through case study optimization. Knuckle and combinations of telescopic and knuckle booms have been excluded. The optimization of a boom section was carried out with an optimization tool which was programmed as a part of this study. With this optimization tool one can reliably calculate optimal dimensions in relation to mass in such way that buckling, bending and deformation are taken into account. The results from this optimization process can be utilized furthermore as input values in the multi-disciplinary optimization. The case study revealed also advantages and disadvantages of the optimization process.

The optimization tool was programmed on Matlab and its results were verified with AGIFAP FE -software. The results from the optimization tool were further studied with Femap -software, which was used for examining interaction relationships of various parameters for multi-disciplinary optimizations base knowledge.

One of the study results is that optimization of one section of telescopic boom requires FE -analysis in order to be sure about durability of structure and to optimize its fatigue strength. Influence of sliding pads on structural behavior of the boom and optimization of fatigue life requires further research.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty FIMA ry:lle yhteistyössä Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteiden laboratorion kanssa. Työn peruspilareina ovat toimineet professori Timo Björkin johtama teräsrakenteiden laboratorio yhdistettynä Olli-Pekka Hämäläisen optimointipuolen osaamiseen Antti Siréniä ja FIMA ry:tä unohtamatta, jotka kytkivät diplomityön yritysmaailmaan. Kiitos mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta, jossa pääsin yhdistämään jo opittuja asioita optimointiin konkreettisen ongelmanratkaisun kautta.

FIMA:n jäsenistä projektiin osallistuivat Avant Tecno Oy, Bronto Skylift Oy Ab, Comatec Oy, Deere & Company (John Deere), Mantsinen Group Ltd Oy, Rautaruukki Oyj, Sandvik Mining and Construction Finland Oy, VTT Technical research centre of Finland sekä Tampereen teknillinen yliopisto (TTY), joiden edustajia haluan kiittää panoksesta tähän työhön. Harvoin on mahdollista tehdä diplomityötä näin kattavan yritysryhmän kanssa, mistä oli tässä työssä huomattava etu.

Eryiskiitokset haluan välittää Antti Sirénille, joka hoiti työn ohjaamisen lisäksi huomattavan määrän työhön liittyviä käytännön järjestelyjä. Kiitokset myös Riku Neuvoselle Femapin ongelmanratkaisuavusta sekä joukolle tutkimusapulaisia ja opiskelijatovereita, joiden kanssa on vaihdettu vinkkejä aiheesta ja usein myös sen vierestä.

Lopuksi haluan vielä esittää suuret kiitokset kihlatulleni Wilhelmiina Ahoselle kaikesta tuesta ja itseluottamuksen kohottamisesta, jonka avulla olen saanut puserrettua työtä eteenpäin yli hankalien vaiheiden aina valmiiksi asti.

Lappeenrannassa 24.10.2014

Vesa Tynys

## SISÄLLYSLUETTELO

### ALKUSANAT

### SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLILUETTELO

1	Johdanto .....	11
1.1	Tavoitteet ja tutkimusmenetelmät .....	12
1.2	Rajaus .....	12
2	Yrityskysely .....	14
2.1	Kyselyn ensimmäinen ja toinen osa.....	14
2.2	Kyselyn kolmas osa.....	17
2.3	Yrityskyselyn yhteenveto .....	18
3	Kirjallisuusselvitys .....	19
3.1	Monitavoiteoptimoinnin teoriaa .....	19
3.2	Optimointiongelman mallin muodostaminen ja ratkaiseminen.....	20
3.3	Monitavoiteongelman ratkaisujoukon tutkiminen.....	20
3.4	Evoluutiolaskentaa hyödyntävä monitavoiteoptimointi .....	21
4	Monitavoiteoptimointiohjelmistoselvitys .....	23
4.1	Ohjelmistojen yhteensopivuus .....	24
4.2	Tutkittavat ohjelmistot.....	25
4.2.1	Matlab Optimization Toolbox ja Global Optimization Toolbox -laajennuksilla (The MathWorks) .....	25
4.2.2	Heeds MDO (Red Cedar Technology) .....	25
4.2.3	SimPro (Tampereen teknillinen Yliopisto) .....	26
4.2.4	OPTIMUS (Noesis Solutions) .....	27
4.2.5	Simulia Isight laajennuksella (Dassault Systèmes) .....	27
4.2.6	HyperWorks (Altair) .....	28
4.3	Ohjelmistoselvityksen yhteenveto.....	29

4.4	Puomioptimointi teemapäivä.....	30
4.4.1	Dassault Systèmes.....	30
4.4.2	Altair Hyperworks.....	31
4.4.3	Mathworks.....	32
4.4.4	EDR Medeso.....	32
4.5	Teemapäivän yhteenveto.....	33
5	Monitavoiteoptimoinnin lähtöarvojen hakeminen optimoimalla teleskooppipuomin yhtä jatkosta.....	35
5.1	Rakenteen valitseminen ja optimoinnin eteneminen.....	35
5.2	Optimoitava rakenne.....	36
5.2.1	Poikkileikkauksen valinta.....	36
5.2.2	Poikkileikkauksen lommahduksen analyttisen laskennan ongelma.....	36
5.2.3	Yksinkertaistettu poikkileikkaus.....	37
5.2.4	Profiilin optimoitavat ominaisuudet.....	38
5.3	Materiaali- ja valmistuskustannusten optimointi.....	38
5.3.1	Teräksen suhteellinen hinta.....	38
5.3.2	Rullamuovauksen kustannukset.....	39
5.3.3	Särmäyksen kustannukset.....	40
5.3.4	Hitsauskustannukset.....	40
5.3.5	Kustannusten optimointi.....	43
5.4	Poikkileikkauksen optimointityökalu.....	43
5.4.1	Rajoiteyhtälöiden muodostaminen.....	43
5.4.2	Optimoinnin laskentaparametrijoukon sekä lähtöarvojen määrittelemine.....	48
5.4.3	Optimointityökalun verifiointi.....	49
5.4.4	Optimointityökalun yhteenveto.....	52
5.5	Puomin tutkiminen FE -analyysien avulla.....	53
5.5.1	Kaksijatkoksisen teleskooppipuomin keskimmäisen jatkoksen yksinkertaistus.....	53
5.5.2	Liukupalojen koon varioiminen.....	56
5.5.3	Poikkileikkauksen viistekulman $\alpha$ varioiminen.....	59

5.5.4	Poikkileikkauksen levynpaksuuksien varioiminen .....	60
5.5.5	FE -laskennan tulosten hyödyntäminen optimoinnissa.....	62
5.5.6	FE -laskennan tulokset .....	65
6	Johtopäätökset.....	68
7	Jatkotutkimusehdotukset.....	72
8	Yhteenveto.....	74
	Lähteet.....	75

## Liitteet

Liite 1: Yrityskysely

Liite 2: Altair Hypermeshin tukemat CAD-tiedostot

Liite 3: HyperWorksin ohjelmien token -pohjainen hinnasto

Liite 4: Puomioptimointi teemapäivän ohjelmistojen edustajille annettu  
optimointitehtävä

Liite 5: Taipuman laskentakaavan muodostaminen

Liite 6: Reaktivoimien laskenta

Liite 7: Poikkileikkauksen optimointityökalun funktiot

Liite 8: Liukupalan koon muutoksen vaikutusta arvioiva apuohjelma

Liite 9: Poikkileikkauksen levynpaksuuksien varioinnin vaikutusta arvioiva apuohjelma

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$A$	Levykentän poikkipinta-ala	[mm <sup>2</sup> ]
$a$	U -profiilin leveys	[mm]
$A-D$	Liukupalaryhmien tunnukset	[-]
$c$	V -profiilin suoran osan pituus	[mm]
$\bar{c}$	Neutraaliakselin $Y$ -suuntainen etäisyys poikkileikkauksen alalaidasta	[mm]
$d$	V -profiilin viistojen osien pituus	[mm]
$e$	Samansuuntaisten levykenttien keskilinjojen etäisyys	[mm]
$E$	Teräksen kimmomoduuli	[MPa]
$e$	U -profiilin uumien pituus	[mm]
$F$	Teleskooppipuomia kuormittava voima	[N]
$h$	Poikkileikkauksen korkeus levykenttien keskilinjoilta mitattuna	[mm]
$h_1$	Suurempi etäisyys neutraaliakselilta poikkileikkauksen ylä- tai alalaitaan	[mm]
$h_2$	Pienempi etäisyys neutraaliakselilta poikkileikkauksen ylä- tai alalaitaan	[mm]
$h_{tot}$	Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus	[mm]
$I_{xx}$	Neliömomentti	[mm <sup>4</sup> ]
$J$	FE -mallin jousien sijainti	[-]
$k_m$	Levyjen epäkeskisyyden laskentajännityksen kerroin	[-]
$l$	Liukupalojen pituus	[mm]
$L$	Teleskooppipuomin jatkosten limittäin olevan osan pituus eli limityspituus	[mm]
$L_s$	Särmättävän kappaleen leveys	[cm]
$L_j$	Jatkoksen pituus	[mm]
$M$	Taivutusmomentti	[Nmm]
$m$	Wöhler -käyrän kulmakerroin	[-]
$M_{ekv}$	Ekvivalentti taivutusmomentti	[Nmm]
$M_t$	Särmäyskoneen käyttökustannukset	[€/s]
$n$	Parametri levykenttien epäkeskisyysskertoimen laskentaan	[-]
$N_s$	Särmäyksen taivutusten lukumäärä	[-]
$P$	Särmättävän kappaleen pituus	[cm]
$R^2$	Käyränsovituksen hyvyttä kuvaava parametri	[-]
$t$	Särmäykseen kuluva aika	[s]
$t_{01}$	U -profiilin levykenttien paksuus (nykyinen)	[mm]



$t_{02}$	V -profiilin levykenttien paksuus (nykyinen)	[mm]
$t_1$	U -profiilin levykenttien paksuus (uusi)	[mm]
$t_2$	V -profiilin levykenttien paksuus (uusi)	[mm]
$W_{vaad, vas}$	Vaadittava minimitaivutusvastus väsyttävällä kuormituksella	[mm <sup>3</sup> ]
$W_{vaad, stat}$	Vaadittava minimitaivutusvastus staattisella kuormituksella	[mm <sup>3</sup> ]
$W_{xx}$	Taivutusvastus X -akselin ympäri	[mm <sup>3</sup> ]
$y$	Levykentän pintakeskiön y-suuntainen etäisyys poikkileikkauksen alalaidasta	[mm]
$\alpha$	V -profiilin kulman suuruus	[°]
$\beta$	Snap-through kulman suuruus	[°]
$\gamma$	Varmuuskerroin staattiselle kuormalle	[-]
$\varepsilon$	Myötölujuuden huomioiva parametri standardissa 1993	[-]
$\sigma_{fy}; fy$	Teräksen myötölujuus	[MPa]
$\sigma_k$	Uusi keskijännitys liukupalaryhmän B alimman liukupalan editse	[MPa]
$\sigma_{k0}$	Keskijännitys liukupalaryhmän B alimman liukupalan editse	[MPa]
$\Delta\sigma_{ekv, vaad}$	Vaadittava ekvivalentti taivutusnormaalijännitys	[MPa]
$\psi$	Jännityssuhde	[-]
$v$	Jatkoksen taipuma	[mm]
$v_{sal}$	Jatkoksen sallittu taipuma	[mm]
AGIFAP	Advanced graphical interactive frame analysis package –elementtimenetelmäohjelma	
CAD	Computer -aided design	
CAE	Computer -aided engineering	
DM	decision maker; päätöksen tekijä monitavoiteoptimoinnissa	
DSII	Doctoral school of industry innovations	
EC3	Eurocode 3 –suunnitteluohje	
EMO	Evolutionary multiobjective optimization	
EO	Evolutionary optimization	
FAT	Väsymiskestävyysluokka	
FEM	Finite element method; elementtimenetelmä (työssä käytetty myös FE -analyysi, FE - laskenta)	
FIMA	Forum for intelligent machines ry	
HWU	HyperWorks units; token -pohjaisen lisenssijärjestelmän valuutta	
jm	Juoksumetri; hyötöpituus; yhtäjaksoinen pituus	
RBE	Rigid body element	

max	Maksimoidaan; maksimi
MCDM	Multiple criteria decision making problem; tilanne, jossa täytyy ottaa huomioon ristiriitaisia vaatimuksia
PL3	Poikkileikkausluokka 3
S960	Teräs, jonka myötölujuus on 960 MPa

## 1 JOHDANTO

Liikkuvien työkonemuomien suunnittelussa ja valmistamisessa on törmätty samaan ongelmaan kuin monilla muillakin tekniikan aloilla: markkinat vaativat teknisesti parempia ja erottuvia tuotteita kohtuulliseen hintaan. Samalla tarjolle tulee yhä edistyneempiä materiaaleja sekä valmistusmenetelmiä. Yritysten pitää pystyä tarttumaan näihin uusiin haasteisiin ja mahdollisuuksiin pysyäkseen kehityksen mukana.

Osa haasteesta kaatuu suunnitteluinsinöörin harteille, jonka pitää pystyä omaksumaank kehityksen parhaat palat ja muovata niistä edelleen toimivat kokonaisuus. Myös jo toimivia ja hyväksi havaittuja ratkaisuja pitää muokata, kun laitteiden vaatimukset tiukkenevat esimerkiksi päästö- tai turvallisuusrajoitusten muodossa. Ongelmana on tutkittavien vaihtoehtojen ja rajoitusten paljous rajallisen aikataulun puitteissa, jolloin paras mahdollinen ratkaisu voi jäädä saavuttamatta.

Kehitys on tuonut mukanaan myös erään ulospääsyn ongelmasta; tietokoneiden laskentatehon kasvaessa monitavoiteoptimoinnista on tullut käyttökelpoinen työkalu haettaessa parasta kompromissia valmistuskustannusten ja teknisen ominaisuuksien välillä. Ohjelmistot pystyvät läpikäymään ja analysoimaan vaatimukset täyttäviä vaihtoehtoja, jotka täyttävät kaikki vaatimukset huomattavasti nopeammin kuin suunnittelija, joka iteroi eri variaatioita läpi perinteisin menetelmin.

Tämä ei tarkoita sitä, että uudet ohjelmistot olisivat syrjäyttämässä perinteistä suunnittelutyötä. Työskentelytapoihin se tuo varmasti muutoksia, mutta perinteiselle insinööriheuristiikalle on jatkosakin tarvetta. Vaikka ohjelma osaakin laskea optimaalisimman muodon kuormitetulle kappaleelle, ei muoto välttämättä ole helppo tai kustannustehokas valmistaa. Myös ongelman formuloinnin tärkeys korostuu, jottei laskenta-aika tai ratkaisujoukko kasva kohtuuttoman suureksi.

Työn tarkoituksen oli tehdä monitavoiteoptimoinnista ja sen hyödyntämisestä työkonemuomien optimoinnissa laaja taustatyö laajempaa tutkimusta varten. Käytännössä työssä selvitettiin mitä monitavoiteoptimoinnilla tarkoitetaan, esiteltiin lyhyesti muutama monitavoiteoptimointiohjelmisto ja haettiin case -tutkimuksen optimoinnin avulla lähtöarvoja teleskooppimuomien monitavoiteoptimoinnille sekä havainnoitiin optimointiprosessin etuja ja ongelmakohtia.

Työ tehtiin Forum for intelligent machines ry:lle (FIMA) yhteistyötyössä Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT) kanssa. FIMA ry on yhteistyöfoorumi, joka kokoaa yhteen suomalaiset liikkuvien työkonemuomien valmistajat. FIMA ry:n tavoitteena on edistää suomalaisen teollisuuden kilpailukykyä, tutkimustoimintaa sekä tuotekehitystä teollisuuden tarpeiden mukaisesti. (FIMA:n kotisivut, 2013)

Diplomityö oli osa projektia, johon osallistui FIMA:n jäsenistä Avant Tecno Oy, Bronto Skylift Oy Ab, Comatec Oy, Deere & Company (John Deere), Mantsinen Group Ltd Oy, Rautaruukki Oyj, Sandvik Mining and Construction Finland Oy, VTT Technical research centre of Finland sekä Tampereen teknillinen yliopisto (TTY). Projektin osallistujien avulla tutkimus voitiin kohdistaa tarkasti konkreettisiin ongelmakohtiin ja näin saatiin myös määrättyä työn tarkempi rajaus.

### 1.1 Tavoitteet ja tutkimusmenetelmät

Työn voi jakaa neljään osaan, jotka ovat monitavoiteoptimoinnin teoria, ohjelmistoselvitys, teleskooppipuomin case -tutkimus sekä jatkotutkimuskohteiden hakeminen FIMA -palavereiden sekä muun tutkimuksessa tehtyjen havaintojen perusteella. Teoriaosuus tehtiin kirjallisuusselvityksen avulla ja sen tavoitteena oli luoda pohjaa työlle ja avata monitavoiteoptimointia käsitteenä. Ohjelmistoselvityksen ideana oli luoda lyhyt katsaus muutamaan optimointiohjelmistoon, niiden yhteensopivuuteen yritysten käyttämien ohjelmistojen kanssa ja samalla selvitettiin ohjelmistojen hintoja.

Teleskooppipuomin jatkoksen optimoinnilla haettiin lähtöarvoja ja -tietoja monitavoiteoptimoinnille. Lähtötiedot käsittävät ongelman alkuarvoja ja standardeja sekä sääntöjä, joita pitää noudattaa työkonemuomien suunnittelussa ja valmistamisessa. Lähtötietoihin kuuluvat myös ongelman rajaus, haluttujen ominaisuuksien painotukset ja muut vaatimukset. Optimointikoodi luotiin Matlab -ohjelmistolla, jonka jälkeen tulokset verifioitiin AGIFAP -elementtimenetelmäohjelmiston avulla. Optimoinnin tuloksia tutkittiin edelleen NxNastran/Femap -elementtimenetelmäohjelman sekä ratkaisijan avulla ja näin haettiin eri lähtötietojen ja parametrien välisiä vuorovaikutussuhteita monitavoiteoptimoinnin tueksi.

Teleskooppipuomin jatkoksen tutkimuksen yhteydessä pohdittiin myös optimoinnin mahdollisia ongelmakohtia sekä haettiin jatkotutkimukselle sopivia aiheita. Tämän työn tulosten perusteella on tarkoitus jatkaa monitavoiteoptimoinnin ja sen hyödyntämisen tutkimusta työkonemuomeissa laajemmilla resursseilla Tampereen teknillisen yliopiston tohtorikoulussa (Doctoral School of Industry Innovations DSII).

### 1.2 Rajaus

FIMA -projektityöryhmä ei halunnut monitavoiteoptimointiohjelmistojen tutkimuksesta kovin laajaa, koska tarkempi tutkimus olisi vienyt aikaa työn muilta osilta. Ohjelmistojen tutkimus rajattiin tärkeimpiin ominaisuuksiin, lisenssien hintaan sekä yhteensopivuuteen.

Monitavoiteoptimoinnin lähtöarvoja ja -tietoja haettiin vain teleskooppipuomin optimointiin; nivelpuomin sekä nivel- ja teleskooppipuomin yhdistelmien tutkiminen ei ollut diplomityön ajankäytön yhteydessä mahdollista. Lähtöarvojen haku rajattiin yhteen puomin poikkileikkaukseen, jolloin

poikkileikkausten välinen vertailu rajautui työn ulkopuolelle. Puomin jatkoksen kauluksia eikä muita varusteluja otettu huomioon, jotta lähtöarvojen haku pysyy mahdollisimman yleisellä tasolla. Puomin yksinkertaistus rajasi myös väsymiskestävyyden tarkastelua.

Optimoinnin lähtöarvoja sekä tärkeimpiä optimointikohteita työssä haettiin kaikille projektin osallistuville yrityksille tehdyllä kyselyllä, joka on esitetty seuraavassa kappaleessa. Kyselyn tulosten perusteella tutkimusta painotettiin edelleen tärkeimmiksi koettujen ominaisuuksien ja parametrien suuntaan.

## 2 YRITYSKYSELY

Työn alussa projektiin osallistuville FIMA:n jäsenille lähetettiin yritys-kysely, jonka avulla selvitettiin yritys-kohtaisia tarpeita sekä toiveita. Vaikka yritysten edustajia oli mahdollisuus tavata Di-työn yhteydessä järjestetyissä palavereissa, koettiin kirjallinen kysely tarpeelliseksi, jotta tapauskohtaiset tarpeet tulevat parhaiten esille. Dokumenteista on myös hyötyä monitavoiteoptimoijaa muodostettaessa. Yrityskysely on esitetty liitteessä 1.

Kyselyn avulla selvitettiin ominaisuudet, joiden optimoimiseen halutaan kiinnittää erityistä huomiota ja mitä jätetään vähemmälle huomiolle. Kyselyssä pyydettiin painottamaan työkonepuomin eri ominaisuuksia tärkeyden perusteella asteikolla 1-10 sekä tarkentamaan vastauksia tarvittaessa sanallisesti. Lisäksi osaan kysymyksistä vastattiin ainoastaan kirjallisesti. Kyselyn avulla kerättiin myös lähtödataa optimointia varten, joka sisältää muun muassa fyysisiä mittoja sekä käytettäviä standardeja. Samalla selvitettiin myös yritysten omaa ohjelmistovalikoimaa, jotta myöhemmin tutkittavat monitavoiteoptimointiohjelmistot ovat mahdollisimman yhteensopivia.

Kyselyyn vastasi yhteensä seitsemän projektiin osallistuvaa yritystä, joista viisi suunnittelee ja valmistaa työkonepuomeja. Kaksi yritystä jätti vastausten painotukset tekemättä ja vastasi ainoastaan kirjallisesti. Kyselyä ei räätälöity yritys-kohtaiseksi eli samat kysymykset esitettiin kaikille. Yritykset vastasivat itselleen tärkeiksi kokemiinsa kohtiin ja jättivät muut kohdat tyhjiksi. Painotuksien keskiarvoja laskettaessa jakajana käytettiin kysymykseen vastanneiden lukumäärää.

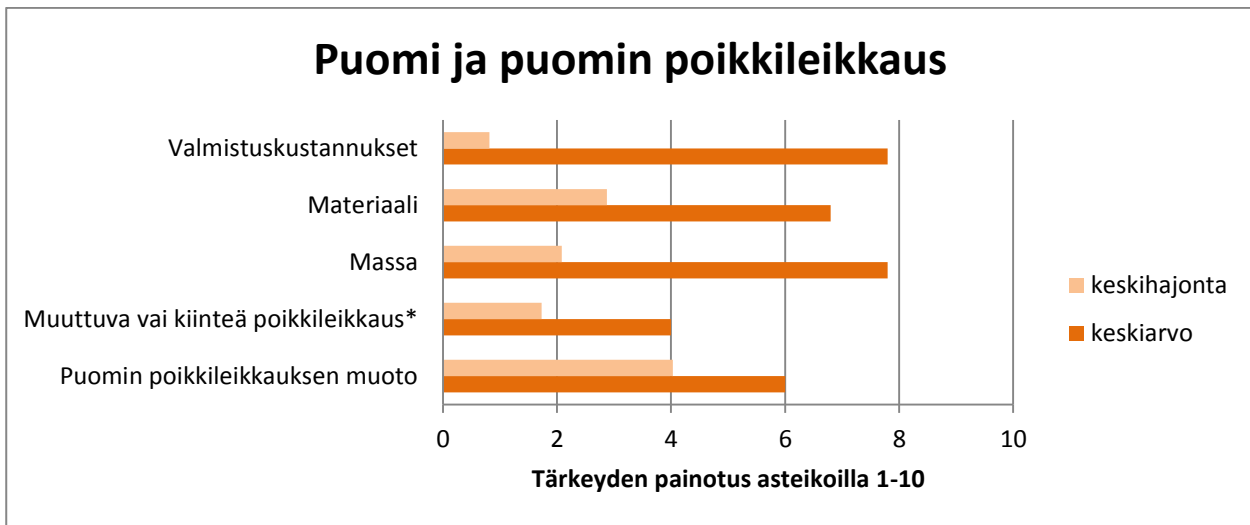
Kyselyn vastauksilla oli suuntaa antava rooli työn kannalta. Vastaukset ohjasivat esimerkiksi tarkastelemaan työlle tärkeitä standardeja. Lisäksi yksittäisiä vastauksia voidaan hyödyntää myöhemmin optimointiohjelmia räätälöitäessä yritys-kohtaisiksi. Optimointia varten tuloksista saatiin suuntaviivoja eri ominaisuuksien painotuksiin, kun haetaan parasta kompromissia.

### 2.1 Kyselyn ensimmäinen ja toinen osa

Kyselyn ensimmäinen osa selvitti yritysten käytössä olevia CAD, CAE -ohjelmia sekä mahdollisia optimointiohjelmia. Tämän osan tulokset on esitelty ohjelmistoselvityksen yhteydessä kappaleessa 4.1

Toinen osa käsitteli työkonepuomin suunnitteluvaiheita sekä optimoitavia ominaisuuksia painotettuna tärkeyden perusteella asteikolla 1-10. Kuvissa 1-3 on esitelty painotusten jakautumista. Kuvan 1 mukaan puomin valmistuskustannuksien ja massan optimointia pidettiin tärkeimpinä optimointi-

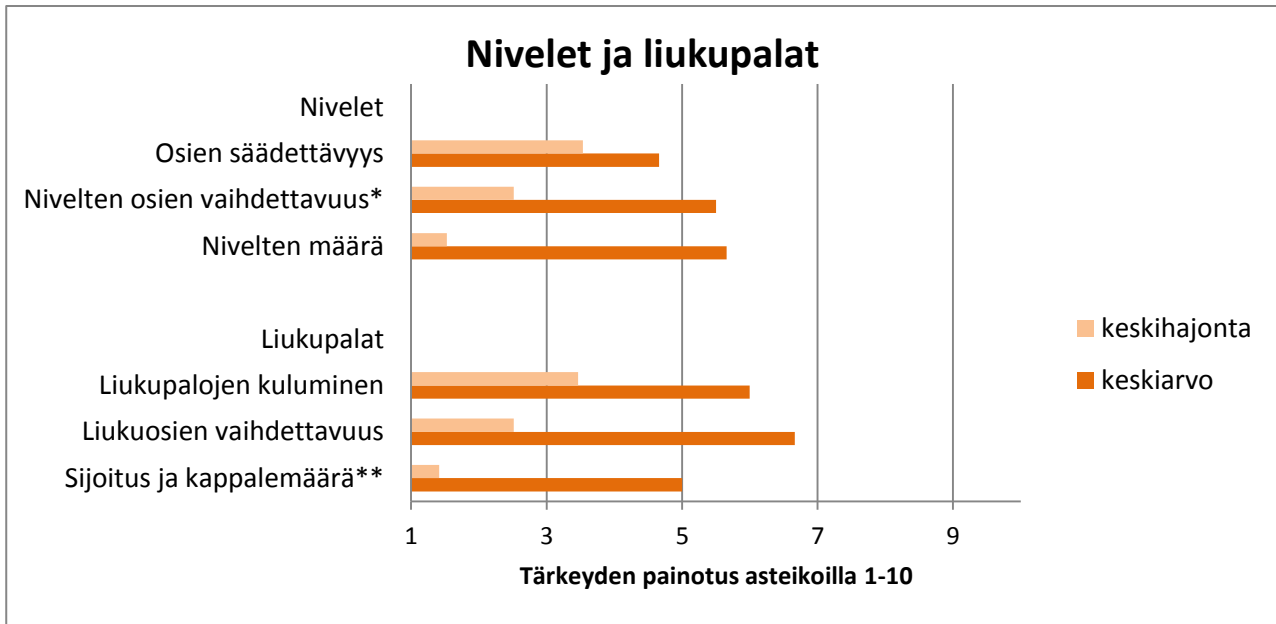
kohteina. Kirjallisten vastausten ja kuvan 1 perusteella puomeissa käytettyihin profiileihin ja poikkileikkauksiin oltiin tyytyväisiä.



**Kuva 1.** Puomin eri osa-alueiden painoarvo optimoinnin kannalta. Viiden vastaajan keskiarvot (\* 3 vastaajaa)

Kuvan 1 tuloksia voidaan tulkita myös niin, että vastanneet yritykset olivat melko tyytyväisiä tämänhetkisiin puomien poikkileikkauksien muotoihin. Toisaalta hajonta puomin poikkileikkauksen muodon painotuksissa on melko suurta, joten ehdottomia johtopäätöksiä ei voi tehdä. Jos tärkeäksi koettu massan vähentäminen toteutetaan vaihtamalla materiaali lujempaan, voidaan ohentaa seinämäpaksuuksia. Tällöin rakenteen suunnittelu, valmistus ja joskus myös käyttö muuttuu haastavammaksi. (Lämsä J. & Kiuru H., 2012, s. 11)

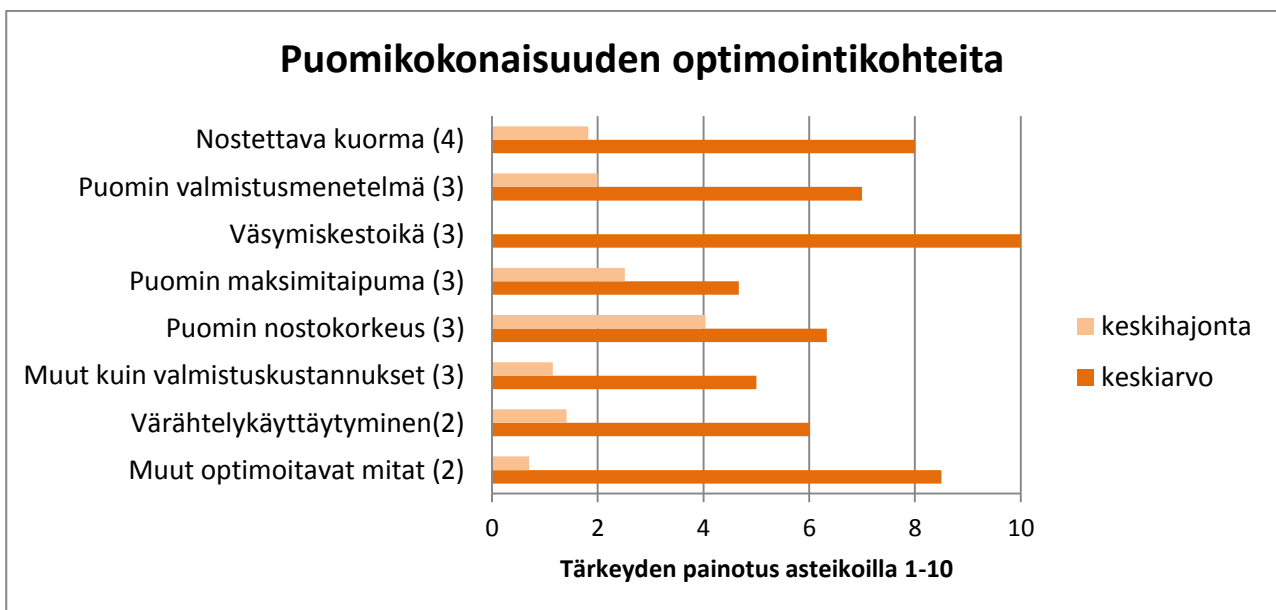
Tärkeimmiksi osakokonaisuuksiksi erilaisissa työkonepuomeissa koettiin teleskooppipuomien liukuosat sekä taitto- ja nivelpuomien nivelet, joiden yksityiskohtien painotukset on esitetty kuvassa 2. Vastausten perusteella niveliä ei juurikaan pidetty tärkeänä optimointikohteena ja niiden toimintaan oltiin tyytyväisiä.



**Kuva 2.** Nivelten sekä teleskooppipuomien liukuosien painoarvo optimoinnin kannalta. Kolmen vastaajan keskiarvot. (\* 2 vastaajaa, \*\* 4 vastaajaa)

Liukupalojen osalta tärkeimpänä ominaisuutena pidettiin vaihdettavuutta sekä kulumisen optimointia. Vastauksissa korostettiin teleskooppipuomin profiilin muodon vaikutusta palojen pintapaineeseen sekä likaantumisen vaikutusta toimintaan. Toisaalta kuvan perusteella mikään ominaisuus ei nouse erityisesti esille, joten nykyisiin nivel- ja liukupalaratkaisuihin oltiin ilmeisesti tyytyväisiä.

Kuvassa 3 on esitelty muita mahdollisia optimointikohteita ja -ominaisuuksia. Huomattavaa on, että vastaajamäärät vaihtelevat kahdesta neljään.



**Kuva 3.** Optimointikohteiden painoarvot keskiarvotettuna. Vastaajien lukumäärä on suluisissa.



Kolmas kuva selventää erityisesti puomikokonaisuuden eri ominaisuuksien suhteellisia painotuseroja. Kuvasta nousee selvästi kolme tärkeää optimointikohdetta pienillä hajonnoilla: väsymiskestävyys, muut optimoitavat mitat sekä nostettava kuorma.

Puomikokonaisuuden tärkeimmäksi osa-alueeksi nousi väsymiskestoikä keskiarvolla 10 ilman hajontaa. Myös sanallisissa vastauksissa korostui väsymiskeston tärkeys. Vaikka monen vastaajan tapauksessa väsymiskestoikä paljastui mitoittavaksi tekijäksi, vaihtelivat mitoittavat syklimäärät puolesta miljoonasta aina kymmeneen miljoonaan sykliin asti. Vastauksissa oli tarkennettu muiden optimoitavien mittojen koskevan yleistä laitteiden kompaktiutta sekä puomin aiheuttaman näköesteen huomioon ottamista, mikä voi olla optimointisuureena haastava. Nostettavaa kuormaa puolestaan pystytään optimoimaan lujuusopin avulla.

## 2.2 Kyselyn kolmas osa

Viimeisessä kolmannessa osiossa tiedusteltiin kirjallisesti työkonepuomin monitavoiteoptimoinnille lähtötietoja ja -arvoja. Tässä osiossa korostuivat käsiteltävien puomirakenteiden erot, mutta myös yhtäläisyyksiä oli selvästi havaittavissa. Koska jokaisen yrityksen edustaja on vastannut vain heitä koskeviin kohtiin, on vastauksista hankalaa tehdä yleistävää yhteenvetoa kohta kohdalta. Tästä huolimatta voitiin kuitenkin eritellä useimmille oleelliset lähtötiedot.

Yrityskyselyssä käsiteltävät puomit voidaan jakaa teleskooppipuomeihin, erilaisiin nivel- ja teleskooppipuomin yhdistelmiin sekä taitto ja -nostopuomin yhdistelmiin, joiden nostokuormat vaihtelevat tuhannesta kilosta viiteenkymmeneen tonniin. Puomeja kuormittavat nostokuorman lisäksi sähkö-, vesi- ja hydraulikkakaapelit erilaisia varusteluita unohtamatta. Käyttötarkoituksesta riippuen on otettava huomioon myös esimerkiksi tuulikuormitukset sekä mahdolliset iskumaiset kuormat.

Yksi yhteinen merkittävä tekijä on väsyttävä kuormitus, jonka tärkeyttä korostettiin yleisesti myös optimoitavissa ominaisuuksissa. Monelle väsyttävä kuormitus oli tärkein mitoittava kuormitus. Väsyttävää kuormaa on usein hankala arvioida ja monet projektin yrityksistä olivatkin keränneet mitausdataa väsymiskestoian arvioimisen tueksi. Lisähaastetta saattoivat tuoda myös saman työkonemallin käytön erot, jolloin kuormitus voi olla esimerkiksi toispuoleista verrattuna niin sanottuun normaaliin käyttöön. Myös kuljetuksen aikana puomiin kohdistuu väsyttävää kuormaa, mikä pitää ottaa huomioon kestoikää arvioidessa.

Vastausten perusteella painonsäätöä ei haeta jatkossakaan vaihtamalla terästä johonkin vaihtoehtoiseen materiaaliin, vaan kasvattamalla teräksen lujuutta sekä optimoimalla puomien geometriaa.

### 2.3 Yrityskyselyn yhteenveto

Kyselyn toteutus ei ehkä ollut paras mahdollinen ja kysymykset jäivät osittain ehkä liian yleiselle tasolle, mikä näkyi myös vastauksissa. Toisaalta kysely oli jo nykyisessä muodossaan melko työläs vastata, joten yksityiskohtaisempi kysely olisi vienyt liikaa aikaa. Yrityksillä on mallistoissaan useampia erilaisia työkoneita, joten vastaajan on pitänyt yleistää vastauksensa koskemaan koko mallistoa, vaikka esimerkiksi kyselyn olisi voinut rajata koskemaan myydyintä tai keskikokoista mallia.

Kyselyn vastauksista sai kuitenkin hyvän yleiskäsityksen, mihin ominaisuuksiin ja kohteisiin optimoinnin fokus halutaan kohdentaa. Samalla selvisi erilaisia yksittäisiä ongelma- ja kehityskohtia, joihin pitää paneutua. Tärkeää kyselyn antia olivat myös eri optimointikohteiden väliset painotukset, joita voidaan hyödyntää myöhemmin käytännössä optimointiohjelmaa muodostaessa.

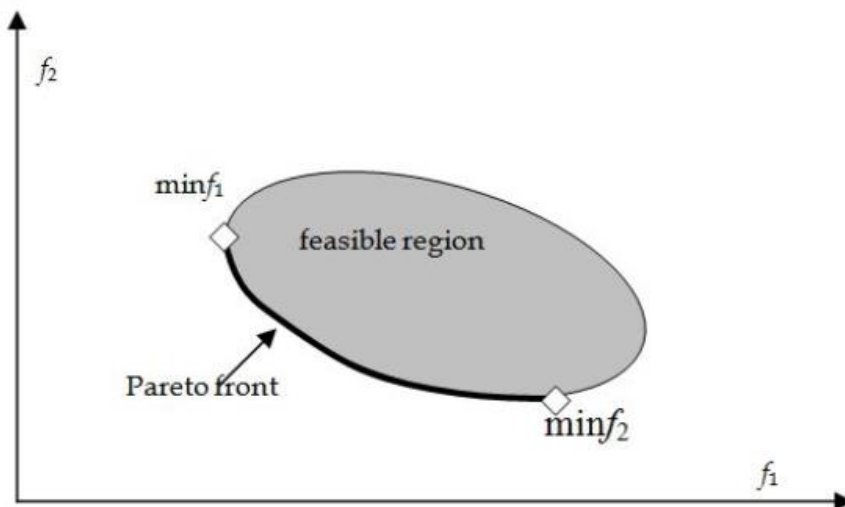
Tulokset korostavat myös projektiin osallistuvien yritysten valmistamien nostolaitteiden eroja. Tulosten perusteella on hyvin hankalaa tai ainakin työlästä muodostaa yhteistä monitavoiteoptimoijaa. Ohjelman pohja voi kuitenkin olla yhteinen, joka laajennetaan ja räätälöidään sopivassa vaiheessa yrityskohtaiseksi. Vaikka yrityskyselyn tuloksia käsiteltiinkin tässä kokonaisuutena, voidaan räätälöintivaiheessa hyödyntää edelleen yrityskohtaisia vastauksia.

### 3 KIRJALLISUUSSELVITYS

#### 3.1 Monitavoiteoptimoinnin teoriaa

Monessa käytännön suunnittelu- tai päätöksenteko-ongelmassa kohdataan tilanne, jossa täytyy ottaa huomioon yhtäaikaaisesti ristiriitaisia vaatimuksia (Multiple criteria decision making problem MCDM). MCDM -ongelman luonteesta määräytyen ratkaisu voi löytyä tietyistä ennalta määräytyistä vaihtoehdoista, jolloin puhutaan monitavoitearvioinnista (multi-attribute decision analysis), mutta jos ratkaisusta ei olla täysin varmoja eikä voida määrittellä tiettyjä ratkaisuvaihtoehtoja, voidaan ratkaisujoukkoa rajata rajoiteyhtälöillä, jolloin puhutaan monitavoiteoptimoinnista. (Branke et al., 2008, s. 1)

Monitavoiteoptimointiongelmalle on tyypillistä, ettei yhtä vastausta löydy, vaan on useampia matemaattisesti yhtä hyviä vastauksia. Tätä vastausjoukkoa kutsutaan Pareto -optimaaliseksi. (Branke et al., 2008, s. 2) Kuvassa 4 on esitetty harmaalla erään monitavoiteoptimointiongelman mahdolliset ratkaisut, joista haetaan parasta mahdollista kompromissia kahden muuttujan välillä. Optimaaliset vastaukset löytyvät Pareto -käyrältä (Pareto -front). (Noilublao C. & Bureerat S., 2009, s. 488-489)



**Kuva 4.** Pareto -optimaaliset ratkaisut on merkitty tummennetulla viivalla (Noilublao C. & Bureerat S., 2009, s 489)

Kuvan 4 kahden muuttujan välinen ongelma on erikoistapaus, jolloin Pareto -käyrällä liikkuminen parantaa toista muuttujaa kun toinen heikkenee. (Hakanen J., 2010) Esimerkiksi kuvan joukko voisi esittää vaihtoehtoisia puomin poikkileikkausmuotoja valmistuskustannusten ja massan funktiona. Kun  $f_1$  kasvaa, puomin massa kasvaa ja kun  $f_2$  kasvaa, valmistuskustannukset kasvavat. Eli funktioiden minimikohdissa on paras poikkileikkaus massan ja valmistuskustannusten suhteen. Jos li-

säksi halutaan optimoida esimerkiksi puomin taipumista tai muista ominaisuuksia, tulee ongelmasta monimutkaisempi, jolloin ratkaisujoukko on kolmiulotteinen taso. Kolmen muuttujan tapauksessa ei voida enää sanoa varmasti miten ratkaisutasolla liikkuminen vaikuttaa eri muuttujiin. Ongelmaa voidaan monimutkaistaa edelleen, jolloin ratkaisusta tulee ulottuvuuksien lisääntyessä hankalampi hahmottaa, mutta ratkaisun löytämisen periaate pysyy samana. (Noilublao C. & Sujin Bureerat S., 2009, s. 488-489), (Hakanen J., 2010)

### 3.2 Optimointiongelman mallin muodostaminen ja ratkaiseminen

Monitavoiteoptimointi sisältää kolme vaihetta: ongelman muodostamisen; optimoinnin sekä ratkaisun valinnan edellä mainitussa järjestyksessä. On tärkeää, ettei ratkaisun valintaan edetä ennen optimointia, vaikka ongelman lähtötietojen perusteella kuviteltaisiin, että tiedetään optimiratkaisu. Optimoinnin avulla on mahdollista parantaa ymmärrystä optimointiongelmaasta sekä ongelman sisäisistä vuorovaikutussuhteista niin, että pystytään muokkaamaan formuloitua ongelman kuvausta vastaamaan paremmin todellisuutta. Näin saavutetaan myös paremmin todellista ongelmaa vastaavia ratkaisujoukkoja. (Branke et al., 2008, s. VI-VII)

Branke kumppaneineen haluaa korostaa, että optimointiongelman mallin muodostaminen on yhtä tärkeää kuin itse optimointi. Malli sisältää ongelman muuttujat, tavoitteet sekä erilaiset rajoitteet. Kun ongelma on määritelty, etsitään sille optimiratkaisu. Ratkaisut ovat muodostetun optimointimallin ratkaisuja eivätkä todellisen ongelman. Tämän takia optimoinnin tuloksia pitää aina myös analysoida ja usein tämä johtaa optimointiongelman mallin muutoksiin tehden optimointitehtävästä iteratiivisen. (Branke et al., 2008, s. V-VI) Toisin sanoen iterointien avulla saadaan muodostettua hyvin lähelle todellisuutta vastaava ongelman kuvaus, jolloin myös ongelman ratkaisu on hyvin lähellä todellisen ongelman ratkaisua.

### 3.3 Monitavoiteongelman ratkaisujoukon tutkiminen

Koska monitavoiteoptimointiongelman vastaus on oikeammin ratkaisujoukko, tarvitaan päätöksen tekijää (decision maker DM). Ratkaisumenetelmät on jaoteltu neljään luokkaan DM:n ratkaisuprosessin roolin perusteella. Yleensä DM on henkilö, joka ymmärtää ongelman luonteen, mutta on myös menetelmiä, jossa ei käytetä DM:ää. (Branke et al., 2008, s. 2-3)

Jos DM ei osallistu optimoinnin ratkaisemiseen, menetelmiä kutsutaan no-preference -menetelmiksi. Tällöin pyritään löytämään mahdollisimman neutraali ratkaisu tekemällä oletuksia sen perusteella, minkälainen järkevä kompromissi olisi. (Branke et al., 2008, s. 3)

Priori -menetelmissä DM pyrkii tekemään ongelman kannalta suotuisia valintoja etukäteen, jonka jälkeen ratkaisuprosessi pyrkii etsimään Pareto -optimaaliset ratkaisut. Tämä on suoraviivainen lähestymistapa, jonka vaarana on, ettei DM välttämättä ymmärrä tehtävän ratkaisumahdollisuuksia tai rajoituksia, jolloin hän saattaa olla liian optimistinen tai pessimistinen valinnoissaan. (Branke et al., 2008, s. 3)

Vaihtoehtona on posteriori -menetelmä, jossa ongelman kannalta suotuisat valinnat tehdään kun Pareto -optimaaliset ratkaisut on löydetty. Tämä lähestymistavan avulla DM:lle selviää paremmin ratkaisuvaihtoehdot, mutta ratkaisujoukon käsittely on haastavampaa yli kahden muuttujan tapauksissa. Posteriori -menetelmä voi olla myös laskennallisesti raskas. (Branke et al., 2008, s. 3)

Neljäs luokka on interaktiiviset menetelmät, mikä on luokista laajin. Interaktiivisessa menetelmässä luodaan interaktiivinen ratkaisualgoritmi, mitä toistetaan yhä uudestaan. Jokaisen iteraatiokierroksen jälkeen päätöksentekijän pitää valita kierroksen tuottamista vastauksista mielestään suotuisin ratkaisu. DM oppii jokaisella iterointikierroksen tuloksista ja voi muuttaa niiden perusteella valintojaan. (Branke et al., 2008, s. 3)

Menetelmillä on vahvuutensa sekä heikkoutensa, joten niitä tarvitaan useampia. Ratkaisumenetelmä voi myös kuulua useampaan luokkaan yhtäaikaaisesti tai olla useamman luokan yhdistelmä määritelmän mukaisesti. Myös muunlaisia jaottelutapoja kuin edellä mainittu on esitelty. (Branke et al., 2008, s. 3-4)

### 3.4 Evoluutiolaskentaa hyödyntävä monitavoiteoptimointi

Tällä hetkellä ehkä tutkituin alue optimoinnin alalla on evoluutiolaskennan hyödyntävä monitavoiteoptimointi EMO (Evolutionary Multiobjective Optimization). EMO on populaatioperustainen monitavoiteoptimointimenetelmä, jossa optimoinnin iterointikierroksiin osallistuu useampi tulos, jotka kehittyvät aina uusiksi tulosjoukoiksi jokaisella iteraatiokierroksella. EMO:n suosioon on monia syitä, joista ehkä tärkeimpiin kuuluvat, ettei ongelman tarvitse olla derivoituva; evoluutiolaskentaa hyödyntävä optimointi EO (Evolutionary optimization) on yksinkertaista käyttää ja sitä voidaan käyttää joustavasti monenlaisissa applikaatioissa. (Branke et al., 2008, s. 59-60)

EMO:n käyttämät ratkaisualgoritmit voidaan jakaa kahteen sukupolveen elitismien estävän operaattorin käytön mukaisesti. Toisen sukupolven algoritmit sisältävät tämän toiminnon eli ne säilyttävät populaatioiden paremmat tulokset ja hylkäävät loput. Ensimmäisen sukupolven ratkaisualgoritmeissa ei ollut tätä ominaisuutta, eli laskentajoukko ei pienene laskennan edetessä mikä tarkoittaa pitkiä laskenta-aikoja. Se miten laskentajoukkoa karsitaan, vaihtelee algoritmikohtaisesti. Toisen sukupolven algoritmeja ovat esimerkiksi NSGA-II, SPEA sekä PAES ja ne kaikki ovat kehitetty

kaksituhattaluvun vaihteessa. (Branke et al., 2008, s. 65, 74-75) Tutkimuksen tavoitteena on jatkossa yhdistää EMO muihin monitavoiteoptimointimenetelmiin ja luoda niistä hybridi yhdistäen niiden parhaat ominaisuudet. (Branke et al., 2008, s. 59)

#### 4 MONITAVOITEOPTIMOINTIOHJELMISTOSELVITYS

Työn tämän osan tarkoituksena oli selvittää tutkittavien ohjelmistojen hankintakustannukset, varmistaa ohjelmistojen yhteensopivuus työryhmän jäsenten CAE/CAD -ohjelmistojen kanssa sekä selvittää tärkeimmät ominaisuudet. Ohjelmien yksityiskohtiin ei haluttu vielä tässä vaiheessa perehtyä tarkemmin.

Käytännössä sopivien ohjelmistojen haku tehtiin internet -hakujen avulla sekä Multiobjective optimization software -artikkelin pohjalta (Poles S. et al., 2008, s. 337-344). Koska tarjolla oli kymmeniä, ellei satoja erilaisia optimointiohjelmia, tutkimusjoukkoa rajattiin seuraavilla vaatimuksilla tutkimusongelman luonteen, helppokäyttöisyyden sekä yrityskyselyn perusteella:

- Kyky ratkaista epälineaarisia monitavoiteoptimointiongelmia
- Graafinen käyttöliittymä
- Kaupallinen ohjelmisto (näin pyrittiin varmistamaan käyttäjätuki)
- Yhteensopivuus jäsenyritysten CAD ja FEM -ohjelmistojen kanssa.

Tutkimus tehtiin perehtymällä ohjelmistovalmistajien kotisivujen ohjelmistokuvauksiin sekä haastatteluilla. Aiemmin mainitun rajauksen perusteella lähempään tarkasteluun valittiin neljä ohjelmistoa sekä kaksi ohjelmistoa tarkoitukseen sopivalla laajennuspaketilla varustettuna. Tarjolla oli varmasti myös muita rajauksen sisälle sopivia ohjelmistoja, mutta aikataulun ja tutkimuksen rajallisen laajuuden takia päädyttiin seuraavaan joukkoon (Ohjelmistovalmistaja suluissa):

- OPTIMUS (Noesis Solutions)
- Heeds MDO (Red Cedar Technology)
- Simulia Isight laajennuksella (Dassault Systèmes)
- Matlab Optimization Toolbox ja Global Optimization Toolbox laajennuksilla (The MathWorks)
- SimPro (Tampereen Teknillinen Yliopisto)
- HyperWorks (Altair).

Listan yrityksiin lähetettiin sähköpostitse tarjouskysely, jonka yhteydessä pyrittiin vahvistamaan yhteensopivuus sekä selvittämään muita mahdollisesti epäselviksi jääneitä asioita. SimPron kanssa joustettiin hieman rajauksen kanssa, koska oli mahdollisuus päästä tutustumaan ohjelmistoon ja sen ohjelmoihiin henkilökohtaisesti osana LUT:in ja TTY:n yhteistyötä. Lähdeviittaukset on selkeyden vuoksi mainittu kappaleen 4.2 ohjelmistokuvauksien yhteydessä.

#### 4.1 Ohjelmistojen yhteensopivuus

Yritysten käyttämien CAD- ja FEM -ohjelmien kirjo osoittautui melko laajaksi ja yhdensopivuuden varmistaminen yllättävän monimutkaiseksi, sillä monitavoiteoptimointiohjelmistojen valmistajien ilmoittamat yhteensopivuudet eivät olleet suoraan vertailukelpoisia. Osa ohjelmistovalmistajista lupasi yhteensopivuuden tiettyjen ohjelmien kanssa ainoastaan yhteen suuntaan. Esimerkiksi optimointiohjelmisto osaa hakea CAD -ohjelmasta tarvittavat tiedot, mutta tiedonsiirto ei onnistu enää päinvastaiseen suuntaan. Osa ohjelmista vaati erillisiä lisäosia käytössä olevien CAD- ja FEM -ohjelmien yhteensovittamiseksi. Oli myös mahdollista, että ohjelmiston valmistaja lupaa ohjelman sa olevan yhteensopiva paritettavasta ohjelmistosta riippumatta, mutta miten tämä käytännössä toteutetaan, ei selvinnyt. Taulukossa 1 on esitetty tarkempaan tutkimukseen valittujen ohjelmistojen yhteensopivuus yritysten käyttämien sovellusten kanssa.

*Taulukko 1. Monitavoiteoptimointi ohjelmistojen yhteensopivuus jäsenyritysten ohjelmien kanssa. huomaa, että taulukossa on CAD, FEM sekä laskentaohjelmistoja.*

	Matlab:	Heeds MDO*	SimPro*	Optimus*	Simulia iSight-I.	Altair**
Ansys	X	X	X	X	X	X
Catia	X	X	-	-	X	-
Excel	X	X	-	X	X	-
I-Deas	X	-	-	-	-	-
Inventor	X	-	-	-	-	-
Matlab	X	X	-	X	X	-
NX 6	X	X	-	-	-	-
Nx Nastran	X	X	-	X	X	X
Pro/ENGINEER	X	X	-	-	X	-
Solidworks	X	X	-	-	X	-
Solidworks Simulation	X	X	-	-	-	-
Spaceclaim	-	-	-	-	-	-
Vertex	-	-	-	-	-	-

\* ohjelmistovalmistaja lupaa yhteensopivuuden myös muiden ohjelmistojen kanssa

\*\* tuetut CAD-tiedostomuodot esitetty liitteessä 2

Monitavoiteoptimointiohjelmistoa, joka olisi ollut suoraan yhteensopiva kaikkien yrityskyselyssä tulleiden ohjelmien kanssa, ei löytynyt. Toisaalta tutkimusta tehdessä ei ollut vielä varmaa pitääkö ohjelman olla yhteensopiva sekä CAD- että FEM -ohjelmistojen kanssa vai vain toisen, joten todettiin tarkempaan tutkimukseen otettavien ohjelmien olevan alustavasti yhteensopivuudeltaan riittäviä.



## 4.2 Tutkittavat ohjelmistot

### 4.2.1 Matlab Optimization Toolbox ja Global Optimization Toolbox -laajennuksilla (The MathWorks)

Matlab on numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmisto, jota voi räätälöidä useilla eri aloille suunnatuilla lisäosilla eli toolboxeilla. Matlab on myös ohjelmointikieli sekä interaktiivinen ympäristö, jota voi käyttää numeerisen laskennan lisäksi visualisointiin sekä ohjelmointiin. Monitavoiteoptimointi varten Matlab tarvitsee lisäksi Optimization sekä Global optimization toolboxit. Ohjelmaa lisäosineen voi kokeilla ilmaiseksi 30 päivän ajan. (Mathworksin kotisivut; Matlab, 2014)

Mathworks tarjoaa Matlabiin erilaisia lisensointimahdollisuuksia: ohjelman käyttöoikeus voi olla rajattuna tietylle tietokoneelle tai käyttäjälle, ohjelma voi olla tietyn ryhmän käytettävissä tai vaihtoehtoisesti lisenssit voivat olla kellovia, jolloin hankittujen lisenssien lukumäärä rajaa käyttöä.

(Matlab pricing and licensing, 2014)

Matlab on jo käytössä useimmilla projektiin osallistuvilla yrityksillä, joten ohjelmiston toimintaperiaate on ennestään tuttu ja hankintakustannukset rajoittuvat lisäosiin. Matlabin yksittäisten lisenssi- en hinnat ovat esillä Mathworksin kotisivuilla ja Matlabin veroton hinta optimointilisäosineen on 4150 € per lisenssi. (Matlab 2000 €, Optimization toolbox 1150 €, Global optimization toolbox 1000 € (Matlab pricing and licensing, 2014) Asiakaspalvelu ei luvannut paljousalennuksia kahdestakymmenestä lisenssistä. Mathworks tarjoaa myös lisäosaa, jonka avulla voi nopeuttaa laskentaa hajauttamalla prosessin useammalle tietokoneelle. (Antti Löytynojan puhelin- ja sähköpostihaastattelut 30.4-4.5.2014)

Mathworksilla on toimisto Espoossa ja asiakaspalvelu vastasi nopeasti ja kattavasti sekä puhelimitse sekä sähköpostin välityksellä. Yhteensopivuuden varmistamiseksi tarjottiin omien lisäosien lisäksi myös kolmansien osapuolien ratkaisuja sekä annettiin esimerkki, kuinka heidän asiakasyrityksessään on ratkaistu CAD-FEM-Matlab -yhteensovitus. Samalla selvisi, etteivät Matlabin optimointilisäosat sisällä robustisuuden tarkastelutyökäluä, mutta tarkastelun voi kuitenkin suorittaa Matlabin avulla tutkimalla ratkaisua lähellä olevia pisteitä. (Antti Löytynojan puhelin- ja sähköpostihaastattelut 30.4-4.5.2014)

### 4.2.2 Heeds MDO (Red Cedar Technology)

Heeds MDO on optimointiohjelmisto, joka on erikoistunut erilaisten rakenteiden ja prosessien optimointiin. Heeds korostaa kotisivuillaan, ettei käyttäjällä tarvitse olla paljoakaan optimointikokemusta osataksaan käyttää ohjelmaa ja päästäkseen optimaaliseen tulokseen. Optimoinnin sekä monitavoiteoptimoinnin tuloksien robustisuuden tarkasteluun on myös tarjolla oma työkalunsa. Lisäksi monitavoiteoptimoinnin eri muuttujien vaikutusta lopputulokseen voidaan arvioida parametrikaikaisesti. Heeds MDO tarjoaa myös mahdollisuuden jakaa laskennallisesti raskaat optimointitehtävät

useammalle tietokoneelle laskennan nopeuttamiseksi. (Red cedar technologyn kotisivut; Heed MDO, 2014)

Red Cedar Technology tarjoaa Heedsiin kaksi eri lisenssivaihtoehtoa. Määräaikainen lisenssisopimus on vuoden mittainen (tai tarvittaessa lyhyempi), jonka aikana käyttäjän saatavilla on tekninen tuki sekä ohjelmistopäivitykset. Jatkuvalle lisenssillä saa ohjelmiston omakseen, mutta päivitykset sekä tekninen tuki jatkuvat vain ensimmäisen vuoden. (Red cedar technologyn kotisivut; Heed MDO, 2014), (Malin Hällstedtin sähköpostihaastattelut, 26.3-2.6.2014 )

Molemmista lisenssityypeistä tarjottiin määräalennusta pyydettyä tarjousta kahdestakymmenestä lisenssistä. Jatkuva lisenssi maksaa käyttäjällä 41 500 €, josta saa alennusta 20 %, ja johon voi halutessaan hankkia myöhemmin vuoden ylläpito/päivityspalvelun 8 300 € hintaan. Vuotuinen lisenssi maksaa 18 000 € käyttäjältä ja siihen saa 10 % määräalennuksen. Kahdenkymmenen jatkuvan lisenssin kokonaishinnaksi tulee 664 000 € ja vuotuisen lisenssin kokonaishinnaksi 324 000 €. (Malin Hällstedtin sähköpostihaastattelut 26.3-2.6.2014 )

Heeds MDO:n jälleenmyynnistä vastaa CAE Value AB Ruotsin Göteborgista käsin. Asiakaspalvelu toimi sujuvasti englanniksi sähköpostilla vaikkakin hieman viiveellä ja myös videopalaverimahdollisuus oli tarjolla. (Malin Hällstedtin sähköpostihaastattelut, 26.3-2.6.2014)

#### 4.2.3 SimPro (Tampereen teknillinen Yliopisto)

Simpro on ainakin toistaiseksi ei-kaupallinen optimointi ja monitavoiteoptimointiohjelmisto, jonka Petri Laakkonen ohjelmoi diplomityönään (Laskentatyökalun kehittäminen kantavien rakenteiden optimointiin). Diplomityössä on optimoinnilla ratkaistu monia klassisia optimointiongelmia sekä muutama käytännönläheinen rakenteen optimointiongelma menestyksekkäästi työkalun verifioimiseksi; myös työkalun matemaattista taustaa on esitelty. (Laakkonen P., 2014, s. 32-121)

Laakkonen myöntää työssään, että käyttäjän on ymmärrettävä optimoitavan tehtävän matemaattista luonnetta osatakseen asettaa ohjelmalle toimivat laskenta-asetukset ja helppokäyttöisyyteen tullaan jatkossa panostamaan lisää (Laakkonen P., 2014, s. 119-121). Myös Simpron monitavoiteoptimointia aiotaan jatkokehittää yhdessä Jyväskylän yliopiston kanssa. Jyväskylän yliopistossa on kehitetty pitkään interaktiivista Nimbus -monitavoiteoptimoijaa ja optimoijat yhdistämällä myös Nimbukseen saataisiin rajapinta FE -ohjelmien välille. (Laakkonen P., haastattelu 2.4.2014)

Simpro vaatii tällä hetkellä toimiakseen rinnalleen Matlabin, mikä ei välttämättä ole ongelma monien yritysten jo käyttäessä Matlabia. Simpro tukee Techila -järjestelmää, jonka avulla laskentaa

voidaan hajauttaa useammalle tietokoneelle ja nopeuttaa optimointia. Myös työkalu robustisuuden tarkasteluun on suunnitteilla. (Laakkonen P., haastattelu ja sähköpostihaastattelut 31.3.-31.7.2014)

Laakkonen hakee parhaillaan rahoitusta startup -yritykselle Tekes:ltä. Tulevana yritysideoana on tarjota yrityksille räätälöityjä optimointiratkaisuja yksinkertaisella lisensointimallilla. Simpron aikaisempi versio on jo käytössä Cargotec Oy:llä. (Laakkonen P., haastattelu ja sähköpostihaastattelut 31.3.-31.7.2014)

#### 4.2.4 OPTIMUS (Noesis Solutions)

Optimus on optimointiohjelmisto, joka tarjoaa kotisivujensa perusteella hyvin samanlaisia ominaisuuksia kuin Heeds MDO. Optimus on erikoistunut suunnittelun ja tuotantoprosessien optimointiin. Optimus pyrkii erityisesti auttamaan käyttäjää ymmärtämään, miten erilaiset muutokset ja muuttujat vaikuttavat tutkittavaan konstruktion tai prosessiin. Optimus tarjoaa myös työkalut tulosten robustisuuden tarkasteluun sekä havainnolliseen jälkikäsitelyyn. Myös laskennan hajauttaminen analyysin nopeuttamiseksi on mahdollista. (Noesis Solutionin kotisivut, 2014)

Noesis Solutions ei tarjoa kotisivuillaan suoraan kokeiluversiota Optimuksesta, mutta sellaisen saa ottamalla yhteyttä asiakaspalveluun. Noesis ei myöskään esittele sivuillaan lisensointivaihtoehtojaan ja tarjouta kysyttäessä ehdotettiin niin sanottua kaupallista peruspakettia, joka maksaa 30 000 €, mutta sen sisältöä ja lisenssimallia ei eritelty tarkemmin. Tutkimustarkoituksiin tarjottiin 50 % alennusta sekä mainittiin erikseen yliopistolisensseistä, mutta ei niiden hintoja. (Chameran M., sähköpostihaastattelu 19.3.-17.4.2014)

Optimuksen jälleenmyynti tapahtuu Ruotsin Vesteråsin kautta ja sitä hoitaa Ariadne Engineering AB. Asiakaspalvelu hoitui englanniksi ja vastaukset tulivat nopeasti. Teknisissä kysymyksissä vastaukset olivat epämääräisiä ja tietoa ohjattiin hakemaan Optimuksen kotisivuille. (Chameran M., sähköpostihaastattelu 19.3.-17.4.2014) Optimuksen myyntistrategia on melko aggressiivinen, jonka myös muut FIMA:n jäsenet olivat huomanneet.

#### 4.2.5 Simulia Isight laajennuksella (Dassault Systèmes)

Simulia Isight yhdistää simulointia ja optimointia. Isight pyrkii tarjoamaan kokonaisuuden, joka on hyvin yhteensopiva eri CAD -ohjelmien kanssa ja tarjoaa mahdollisuuden automatisoida laskentaprosessin. Ratkaisuprosessi voidaan myös haaroittaa eri osioihin, siihen voidaan lisätä takaisinkytkentöjä tai määrittää tiettyjä ehtoja, jotka prosessin pitää täyttää ennen kuin laskentaa jatketaan. (Dassault Systèmesin kotisivut, 2014)

Isight tarjoaa optimoinnin ja monitavoiteoptimoinnin lisäksi mahdollisuuden tutkia yksittäisten muuttujien vaikutusta prosessiin. Tuloksia voidaan havainnollistaa sekä jälkikäsitellä helposti. Isightin on saatavilla lisäksi kymmeniä erilaisia lisäosia, joilla voidaan laajentaa ominaisuuksia sekä parantaa yhteensopivuutta. (Dassault Systèmesin kotisivut, 2014)

Dassault Systèmes ei esittele lisenssivaihtoehtojaan ohjelmiston kotisivuilla ja myös kokeiluversio on pyydettävä erikseen (Dassault Systèmesin kotisivut, 2014). Sivustoa ei ollut helppolukuinen eikä ohjelmiston ominaisuuksia esitelty selkeästi.

Dassault Systèmesillä on useita yhteistyökumppaneita pohjoismaissa, jotka tarjoavat muun muassa konsultaatioapua yritysten projekteihin. Sähköiseen yhteydenottopyyntöön vastattiin soittamalla ja tiedustelemalla lisätietoja englanniksi. Vaikka soittaja lupasi ottaa uudestaan yhteyttä, Dassault ei enää kuitenkaan palanut asiaan.

#### 4.2.6 HyperWorks (Altair)

Hyperworks on ohjelmistoalusta, joka lisensointiperiaatteensa ansiosta tarjoaa käyttäjälleen optimointiohjelmistojen lisäksi laajan valikoiman mallinnus-, visualisointi- sekä analysointiohjelmistoja, jotka ovat kaikki käytettävissä token -lisensointisysteemin kautta. Kiinnostavimmat ohjelmat optimoinnin kannalta ovat nimeltään OptiStruct, HyperStudy sekä Motionsolve. (Altair Hyperworksin kotisivut, 2014)

OptiStruct on erikoistunut rakenteen muotoon ja sen optimointiin; Hyperstudylla voi suorittaa rakenteelle monitavoiteoptimointia ja selvittää konstruktion muuttujien yhteyksiä ja MotionSolve on tarkoitettu kokoonpanojen monikappaledynamiikan analysointiin sekä optimointiin. Näistä työn kannalta ehkä mielenkiintoisin on HyperStudy, joka tarjoaa laajan valikoiman optimointimenetelmiä, robustisuuden tarkastelumahdollisuuden sekä erilaisia jälkikäsitteilytyökaluja. Laskennan jakaminen useammalle koneelle on myös mahdollista. (Altair Hyperworksin kotisivut, 2014)

Lisensointijärjestelmä perustuu tokeneihin, joiden yksikkö on Hyperworksillä HWU (HyperWorks Unit). Tietyllä määrällä tokeneita voidaan käyttää eri Hyperworksin ohjelmia niiden arvon perusteella. Kun ohjelmaa ei käytetä, vapautuvat siihen käytetyt tokenit uudelleen käytettäväksi. (IBM, 2012, s. 3-4) HyperWorks veloittaa käyttäjä- ja konekohtaisesti vain tokeneissa arvokkaimman ohjelman arvon mukaisesti. Esimerkiksi jos käyttäjällä on ratkaisijan vaatimat 25 HWU:ta, hän voi samanaikaisesti käyttää tarvittavia edullisempia esi- ja jälkikäsitteilytyökaluja. Kun käyttäjä ei enää tarvitse aiemmin käyttämiään ohjelmia, hänellä on mahdollisuus käyttää muita ohjelmia, joiden arvo on korkeintaan 25 HWU:ta. (Lindholmin J., sähköpostihaastattelu 30.6-15.8.2014)

HyperWorksin lähin jälleenmyyjä on Ruotsissa, jossa sillä on kolme konttoria. Tarjouspyynnön vastauksessa arvioitiin, että 20 lisenssiä voisi vastata 21 HWU:ta per lisenssi eli yhteensä 420 HWU:ta, joista olisi mahdollista saada paljousalennusta, mutta tarjoussummaa ei annettu. Myöhemmin Puomioptimointi teemapäivillä 8.10.2014 yhden tokenin hinnaksi selvisi 510 €. Liitteessä 3 on esitetty HyperWorksin token hinnasto. Asiakaspalvelun edustaja vastasi nopeasti sähköposteihin englanniksi, vaikka olikin lomalla. (Joakim Lindholmin sähköpostihaastattelu 10.-17.7.2014)

#### 4.3 Ohjelmistonselvityksen yhteenveto

Jo suppeassa ohjelmistonselvityksessä selvisi, että optimointiohjelmien keskinäinen vertailu pelkästään valmistajien kotisivujen ja sähköpostikeskustelujen perusteella voi olla melko hankalaa. Asiakaspalvelun tekninen tietämys vaihteli eikä haluttua tietoa välttämättä löytynyt kotisivuilta tai sen löytäminen saattoi olla haastavaa. Lisenssien hintoja ei ole yleensä ilmoitettu tai ne muodostuvat niin monimutkaisesti, että ne lasketaan asiakkaille tapauskohtaisesti. Myös lisenssivaihtoehtoja on runsaasti. Ostajan pitää siis tietää tarkasti, mitä haluaa ja kysyä sitä suoraan, jos mahdollista.

Monet ohjelmistovalmistajat tarjoavat tuotteistaan demoversioita kokeiltavaksi, jolloin asiakas voi todeta konkreettisesti ohjelman ominaisuudet. Usean eri ohjelmiston vertailu on kuitenkin työlästä ja osa ominaisuuksista voi olla rajoitettuja tai poistettu demoversioista. Optimointiohjelmistojen ominaisuuksiin voi tutustua usein valmistajien kotisivuilta löytyvien esittelyvideoiden avulla, mutta niiden avulla on hankala päätellä esimerkiksi optimoidun rakenteen hyvyttä, koska on harvoin mahdollista sanoa, mikä on yksiselitteinen optimiratkaisu.

Ohjelmiston valintaan vaikuttaa optimointiominaisuuksien lisäksi yhteensopivuus omien ohjelmistojen kanssa, lisenssityyppi ja hinta. Teknisen tuen toimivuus on myös tärkeää ohjelmaa käyttöönottaessa, mutta sitä on hankala todentaa etukäteen. Ohjelmistonselvityksen yhteydessä pohdittiin myös ohjelmistojen yhteishankintaa FIMA:n kautta. Jos ohjelmiston hankinta onnistuisi yhteisesti kaikille FIMA:n kautta, mahdollisuus saada paljousalennusta suuremmalle lisenssimäärälle paraniisi. Yhteishankinnan etuna on myös laaja käyttäjäkunta FIMA:n sisällä, jolta olisi mahdollista kysyä neuvoja teknisen tuen lisäksi.

Tutkittavista ohjelmistoista Matlab ja Simulia vaativat lisäosan tai lisäosia toimiakseen monitavoite-optimoijina, eli käyttäjä maksaa mahdollisesti ominaisuuksista, joita ei tarvitse. Tilanne on eri, jos käyttäjällä on jo perusohjelma muussa käytössä, jolloin lisäosan hankkiminen voi olla yhteensopivuuden ja kustannusten kannalta järkevä ratkaisu. Altairin alla on kokonainen tuoteperhe, jonka saa käyttöönsä, vaikka tarve olisi vain optimoijalle, mikä voi näkyä myös tokenien hinnoissa. Tuoteperheen sisällä yhteensopivuus tuskin on ongelma, mutta useamman uuden ohjelman käyttöönotto voi olla työlästä. Optimus ja Heeds MDO keskittyvät pelkästään optimointiin, jolloin vertailu on

helpompaa ominaisuuksien, lisenssien ja kustannusten välillä. Teknisesti ja asiakaspalvelun puolesta Heeds MDO antoi näistä kahdesta vakuuttavimman kuvan. Simpro on vielä keskeneräinen, mutta valmistuttuaan ohjelmiston etuna suurempiin ohjelmistoihin verrattuna on sen tarjoama yrityskohtainen ohjelman räätälöintimahdollisuus ja kotimaisuus.

#### 4.4 Puomioptimointi teemapäivä

FIMA järjesti 8.10.2014 teemapäivän, johon se kutsui tässä työssä esiteltyjen monitavoiteoptimointiohjelmistojen edustajia esittelemään ohjelmiaan. Ohjelmistojen edustajille annettiin etukäteen ratkaistavaksi tehtävä, missä täytyi minimoida teleskooppipuomin kahden jatkoksen kokonaisuudessa sekä limitys. Teemapäivässä edustajat saivat esitellä ratkaisunsa ja demonstroida samalla ohjelmistojensa käytettävyyttä. Optimointitehtävä perustui osittain tässä työssä kappaleessa 5 esitellyn case -tutkimukseen ja esityksiltä toivottiin erityisesti, että ne havainnollistaisivat optimointitehtävän muodostamista ja ohjelmiston käytön helppoutta.

Ohjelmistojen edustajille annettu tehtävänanto on esitetty liitteessä 4 ja se on tehty yhdessä FI-MA:n Antti Sirénin kanssa (tehtävänanto Sirén, kuva Tynys). Tehtävänannon malli ei ole reunaehdoiltaan täysin määrätty koska haluttiin, että tarkasteltavat tapaukset eivät rajoitu puomin vaakasentoon. Tehtävänannon reunaehdot kuvaavat siis teleskooppipuomin alinta niveltä sekä kahta nostosylinteriä. Kaikki edustajat eivät ymmärtäneet ideaa tehtävänannosta, joten asia selvitettiin sitä kysyneille.

##### 4.4.1 Dassault Systèmes

Dassault Systèmesia edustivat Mikko Ollila (Technical Account manager) sekä Kari Saarinen (Senior manager) Rand Oy:stä ja he olivat rakentaneet optimointiprosessinsa hyödyntäen Simulia Isightia. Tähän ohjelmaan kerätään tarvittavat esi- ja jälkikäsitteilykomponentit, optimoija sekä mahdollisesti tarvittavilla ohjelmien väliset tiedonsiirtokomponentit. Isight muodostaa havainnollisen automatisoidun optimointiprosessiluupin, jonka avulla optimiratkaisu haettiin. Optimointiprosessin etenemistä pystyi myös seuraamaa reaaliajassa.

Randilla optimoinnin lähtökohtana oli kaksi suorakaiteen muotoista kotelopalkkia, joiden väliin oli asetettu vakiomittaiset kontaktielementit kuvaamaan liukupaloja. Tuloksena saatiin optimit poikkeileikkauksen levykenttien mitat, limityspituus, lopullisen rakenteen massa sekä optimimittoihin muokatut piirustukset valmiina CAD -mallina, jossa myös perusaineen väsyminen oli huomioitu. Poikkeileikkauksen muotoa ei optimoitu. Optimointiprosessin eniten konetehoa ja aikaa vaativa prosessi oli parametrien herkkyyshanalyysi; varsinainen optimointi oli vaiheena suhteellisen nopea.

Optimointiprosessiin tarvittavien yhteishinta määräytyy ongelman monimutkaisuudesta ja tutkitun tapauksen vaatimat ohjelmistot olisivat vaatineet 10 (Dassault Systèmesin) tokenia, joiden arvo on 2434 € kappale. Lisäksi käytetty käyttöliittymä maksaa 10 250 €.

#### 4.4.2 Altair Hyperworks

Altair Hyperworksia oli edustamassa Joakim Lindholm (Area sales manager), jonka esitys painottui käytettävyyden esittelyä enemmän Hyperworksin ohjelmistojen tarjoamien mahdollisuuksien esittelyyn. Lindholmin mukaan optimoinnin olisi voinut tehdä useammallakin eri Altairin ohjelmalla käyttötarkoituksesta riippuen, mutta nyt esittelyssä on käytetty pääsääntöisesti Inspire -ohjelmistoa.

Lindholm halusi lähteä esittelemään erityisesti topografiaoptimointia annetulla optimointitehtävällä. Yksinkertaistettuna topografiaoptimoinnissa määritellään ensin rakenteen alueet, jotka valmiissa kappaleessa on oltava (esimerkiksi kiinnitysreiät) sekä alueet, jotka halutaan optimoida. Lisäksi määritellään muut tarvittavat reunaehdot ja kuormat, jonka jälkeen optimoija laskee rakenteelle optimaalisen muodon. Lyhyen demovideon perusteella edellä kuvattu prosessi on melko yksinkertainen toteuttaa, mutta ohjelmiston yleistä käytettävyyttä ei juurikaan esitelty.

Annetun tehtävän tapauksessa liikkeelle lähdettiin kahdesta sisäkkäisestä pyöreästä putkesta, joiden väliin oli mallinnettu liukupalat pantana RBE3 elementtien avulla. Optimoitujen jatkosten poikkileikkaukset olivat symmetriset vaaka- ja pysty akselien suhteen, mutta sisemmät ja ulommat poikkileikkaukset olivat erilaiset. Topografisen optimimallin levynpaksuuksien arvot vaihtuivat kuormituksen mukaan ei-diskreetisti, joten suunnittelijan täytyi viimeistellä malli manuaalisesti, joka oli tehty tässä tapauksessa yhdistelemällä useampaa levynpaksuutta jännityskriittisiin kohtiin. Lindholm ei ollut ottanut huomioon limityspituuden minimointia optimointimallissaan, mikä selittää osittain erittäin kevyttä (noin 200 kg) rakennetta S960 teräksellä. Malliin oli tehty myös lommahdusanalyysi, mutta tulosten erittäin ohuiden seinämäpaksuuksien (perusprofiilit 2 mm) perusteella heräsi epäily, oliko materiaalin suuren myötölujuuden alentava vaikutus lommahduskestävyyteen otettu huomioon.

Altairin token -perusteinen veloitusjärjestelmä eroaa Dassault Systèmesin veloitusmallista ja on esitelty kappaleessa 4.2.6 tarkemmin. Käytännössä korkein ohjelmistokohtainen hinta määrää veloitussumman, joka oli Altairin ratkaisuprosessissa 50 tokenia, yhden tokenin maksaessa 510 €. Optimointiprosessin ohjelmistokustannukset olisivat siis 25 500 €. Altairin token -hinnasto on esitelty liitteessä 3.

#### 4.4.3 Mathworks

Risto Kause (National Sales Account Manager) ja Juan Sagarduy (Sales Application Engineer) edustivat Mathworksia ja he lähestyivät optimointiongelmia jättämällä graafisen mallintamisen prosessin ulkopuolelle. Mathworksin ohjelmistoihin voidaan liittää erilaisia CAD -ohjelmia, mutta koska Mathworksilla ei ole omaa graafista mallinnusohjelmaa, Löytynoja ja Sagarduy kiersivät ongelman mallintamalla yksinkertaisen puomin Simulink -ohjelman rakennekomponenttien avulla.

Mathworksin puomin lähtötilanne oli vastaava kuin Dassault Systèmesilla eli kaksi suorakaideprofiilia sisäkkäin. Liukupalat kuvattiin kontaktikomponenteilla, joille määriteltiin jousi- ja vaimennusvakiot. Vaikka malli oli yksinkertainen, näytti sen muodostamisen vaihteet erittäin monimutkaisilta ja aikaa vievältä. Simulink -komponenteissa luotua mallia ja sen muodonmuutoksia pystyi tarkastelemaan myös karkean visuaalisen mallin avulla, jonka muokkaaminen ei kuitenkaan ilmeisesti onnistu visualisoidun mallin kautta.

Optimointi suoritettiin optimization toolbox -lisäosan avulla ja tulokseksi saatiin skaalauskerroimia muodostetulla geometrialle (yksi poikkileikkausta kohden) sekä optimit limityspituudet. Tulokset esitettiin taulukkona, josta olisi voinut valita parhaan kompromissin jatkokehittäväksi. Simulinkin optimointiominaisuuksia käsiteltiin esityksessä hyvin suppeasti eikä mahdollisia tulosten jälkikäsitelytyökaluja esitelty ollenkaan. Sagarduyn demonstraation perusteella Mathworksin työkalut soveltuvat huonosti CAD -mallien luomiseen ja mielenkiintoisempaa olisikin ollut nähdä toisen valmistajan CAD -ohjelmisto yhdistettynä Mathworksin optimointiprosessiin.

Sagarduy jätti lopulta puomin optimoinnin vain osaksi suurempaa kokonaisuutta, jossa hän esitteli laajasti Mathworksin käyttämistä myös ohjausjärjestelmien optimointiin. Mathworksin ongelman ratkaisuun käyttämä ohjelmistokokonaisuus oli todennäköisesti teemapäivän laajin, mutta samalla myös edullisin - jääden kokonaissummaltaan alle kymmenen tuhannen euron.

#### 4.4.4 EDR Medeso

Päivän viimeisen esityksen pitivät Jani Ojala (Regional sales manager) sekä Juha Ojanen (Senior engineering analyst) edustaen Ansysa. Ojasella oli taustaa nostolaitteita valmistavasta Cargotec Oy:sta, joten puomit olivat hänelle tuttuja, mutta optimointitehtävän ratkaisuun käytettyä Design-Xploreria hän oli käyttänyt vasta muutaman viikon ajan. Ohjelma vaikutti helpolta ja intuitiiviselta käyttää ja optimointiprosessi muodostettiin hieman samaan tyyliin kuin Dassaultin Isightilla eli tarvittavat ohjelmat ketjutettiin ratkaisemaan optimointiprosessi. Ansys kokoaa optimointiprosessin komponentit Workbench -käyttöliittymän alle, jonka avulla voidaan tarkastella ja muuttaa datan kulkua ohjelmistolta toiselle hieman samaan tyyliin kuin Isightilla, mutta ei ehkä aivan yhtä havainnollisesti.



Kuten Simuliassa myös DesignXplorerissa parametrien herkkyyssanalyysi on laskentakapasiteettia eniten aikaa vievä vaihe. DesignXplorerissa optimi tulosjoukko määritellään herkkyyssanalyysin tulosten perusteella. Raja-arvoja, joilla tulosjoukko on saatu, voidaan edelleen tiukentaa ja poistaa laskennasta parametreja, joilla on pieni vaikutus optimoitaviin kohteisiin. Tämä voidaan tehdä helposti jälkikäsitteilykäyrien avulla ja laskea näin uudet optimitulokset nopeammin. Vaihtoehtoisesti voidaan valita tyydyttävä tulos, jonka parametrit päivitetään suoraan FE -malliin, jossa optimiparametrien mukainen malli lopuksi verifioidaan.

Myös Ansysella on tarjota useampia erilaisia optimointiohjelmiä määräytyen optimointitavasta ja parametrien määrästä. Optimointitehtävää lähdettiin optimoimaan ominaisuuksiltaan ehkä hieman vaatimattomammalla ohjelmistolla, jossa tutkittavien parametrien määrää ei suositeltu nostettavan yli 12 kappaleeseen laskenta-ajan huomattavan kasvun välttämiseksi. Optimoitavan mallin lähtökohtana oli nurkista pyöristetyt suorakaideprofiilit, joiden levynpaksuudet optimoitiin massan ja limityksen suhteen. Varsinaista optimiratkaisua ei esityksessä valittu, mutta laskettujen vaihtoehtojen joukosta olisi ollut helppoa valita paras.

EDR Medesolla haluttiin korostaa erityisesti optimoitavien parametrien määrittämisen helppoutta, mikä onnistuikin demon perusteella varsin vaivattomasti. Ansysen DesignXplorerin käytettävyys jäi kuitenkin hiukan Simulian taakse ainakin selkeyden osalta. Optimointiprosessissa käytettyjen ohjelmien hankintasummaksi kertyi edustajien arvion mukaan noin 25 000 €.

#### 4.5 Teemapäivän yhteenveto

Ohjelmistovalmistajien edustajien optimointidemonstraatiot vahvistivat kappaleessa 4.3 tehtyjä johtopäätöksiä: demoesityksien avulla ohjelmistoista ja niiden ominaisuuksista saa konkreettisen kuvan paljon yksinkertaisemmin kuin valmistajien kotisivuja tutkimalla, kun samalla on myös mahdollisuus kysyä suoraan epäselviksi jääneitä asioita. Teemapäivän aikana sai käsityksen, että tapa pyytää ohjelmistovalmistajia optimoimaan yritysten omia rakenteita ei ole ollenkaan epätyydyttävä. Näin voidaan siis suoraan tutkia ohjelmiston soveltuvuutta oman ongelman ratkaisuun eikä tarvitse tyytyä markkinointiosastojen valitsemien optimointiesimerkkien arvioimiseen.

Tehtävänannon hitsiin ja sen optimoimiseen ei paneuduttu yhdessäkään demonstraatioissa, vaikka valmistustapa oli eritelty tehtäväkuvauksessa. Ohjelmistojen edustajat myönsivät, että perusaineen väsymisen optimoiminen pystytään heidän työkaluillaan ottamaan paremmin tai ainakin helpommin huomioon kuin hitsin väsyminen. Myös hitsin väsymisen optimointi onnistuu, mutta se vaatii myös enemmän laskentatehoa ja vaivannäköä optimointiongelman määrittelyyn kuin mitä nyt esitellyissä ratkaisuissa nähtiin.

Laskennan tehokkuus ja laskenta-ajat olivat myös aiheita, joita ei esityksissä nostettu esille. Kysyttäessä tehtävään käytettyjä laskenta-aikoja, ne olivat muutamista tunneista noin kymmeneen tuntiin. Luvut eivät kuitenkaan ole vertailukelpoisia, koska mallien muodostamiseen annettiin melko vapaat kädet eikä laskentaan käytettyjen tietokoneiden laskentatehoja esitelty. Myös lähestymistavat optimointitehtävän ratkaisuun vaihtelivat suuresti.

Ohjelmistojen demonstraatioiden perusteella Simulia Isight sekä Ansysksen ohjelmistokokonaisuus sopivat hyvin olemassa olevien rakenteiden kehittämisen tueksi, kun taas Altairin Inspiren topologiaoptimointi oli ainakin demonstroidussa käytössä soveltuvampi konseptointiin ja varauksella myös tuotekehitykseen. Mathworksin Simulink vaatii muihin ohjelmistoihin verrattuna kokeneemman käyttäjän ja sen vahvuudet ovat todennäköisemmin enemmän ohjausjärjestelmien optimoinnissa, joita esityksessäkin nähtiin, kuin monimutkaisten rakenteiden optimoinnissa.

Teemapäivän perusteella on harhaanjohtavaa puhua yhdestä tietyistä optimointiohjelmasta, jolla rakenne optimoidaan, vaikka optimointiohjelma voidaankin prosessiin käytettävistä ohjelmista erottaa. Annetun tehtävän ratkaisun optimointiprosessiin käytettiin poikkeuksetta useampia ohjelmistoja sekä tarvittaessa erilaisia yhteensopivuuskomponentteja, joten optimointia käyttöönotettaessa pitää pohtia, minkälaisella ohjelmistokokoonpanolla työ onnistuu järkevimmin. Onnistuuko optimoinnin sulauttaminen omien ohjelmistojen yhteyteen järkevästi kun myös lisenssikustannukset otetaan huomioon, vai onko viisaampaa samalla vaihtaa jo käytössä olevia ohjelmistoja korvaaviin toisen valmistajan ohjelmistoihin?

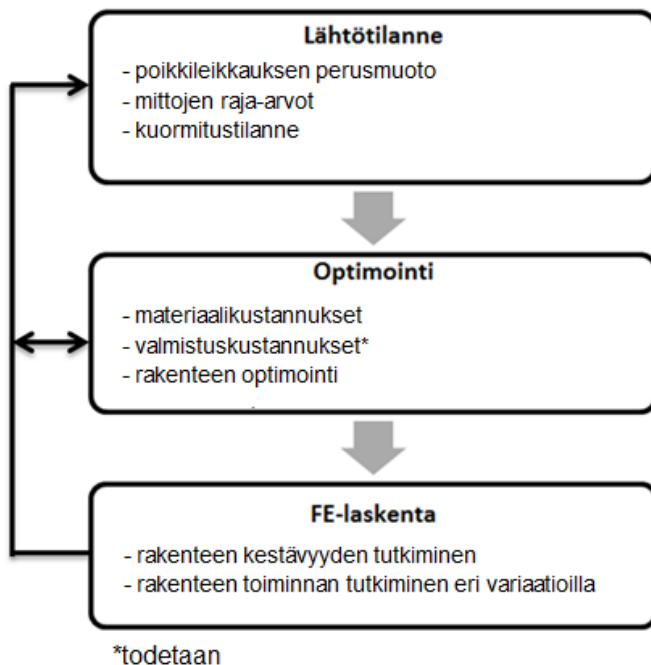
## 5 MONITAVOITEOPTIMOINNIN LÄHTÖARVOJEN HAKEMINEN OPTIMOIMALLA TELESKOOPPIPUOMIN YHTÄ JATKOSTA

DI -työn ohjausryhmän palaverissa päätettiin, että monitavoiteoptimoinnin edut ja mahdolliset ongelmat tulevat parhaiten esille konkreettisen tutkimuskohteen avulla. Koska työn tavoite ei kuitenkaan ole rakenteen monitavoiteoptimointi, vaan lähtöarvojen hakeminen monitavoiteoptimoinnin tueksi, päätettiin ongelmaa lähestyä yksitavoitteisen optimoinnin kautta. Tällä tavoin löydettyjä lähtöarvoja ja muita havaintoja voidaan hyödyntää myöhemmin monitavoiteoptimoinnissa.

### 5.1 Rakenteen valitseminen ja optimoinnin eteneminen

FIMA -työryhmän palaverissa päätettiin, että teleskooppipuomin jatkos on sopiva optimoinnin kohteeksi. Projektiin osallistuvilla työkone- ja nosturivalmistajilla on mallistossaan Mantsista lukuun ottamatta koneita, joiden konstruktion kuuluu jonkinlainen teleskooppipuomiratkaisu. Näin tuloksista on hyötyä mahdollisimman monelle sekä optimoinnin lähtökohta pystyttiin suoraan rajaamaan realistiseen kokoluokkaan sekä käyttämään muutenkin realistisia lähtöarvoja.

Teleskooppipuomin jatkoksen optimoinnin ja tutkimisen suunniteltu etenemisjärjestys on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.** Tutkimuksen eteneminen. Nuolet kuvaavat mahdollisia takaisinkytkentöjä, jos tulokset eivät ole toivottuja.

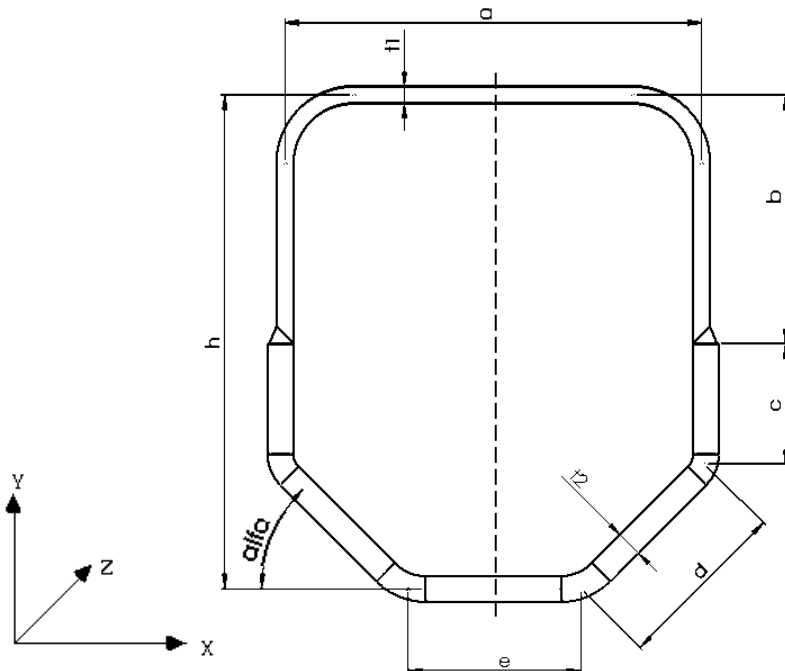
## 5.2 Optimoitava rakenne

### 5.2.1 Poikkileikkauksen valinta

Teleskooppipuomin poikkileikkausta suunniteltaessa tarkastelu keskittyi erilaisiin kotelorakenteisiin. Yksinkertaisimmillaan poikkileikkaus voi olla neliöprofiili vakiolla levynpaksuudella, mutta esimerkiksi Bronto Skylift käyttää puomeissaan useampaa levynpaksuutta, eri myötölujuuksisia teräksiä ja poikkileikkauksissa on useampia jäykistäviä kotelorakenteita. (Asumaniemi, M., haastattelu, 2.4.2014)

Olli-Pekka Hämäläinen oli jo optimoinut diplomityössään taivutuskuormitettuja kaksoissymmetrisiä profiileja vakiolevynpaksuudella (Hämäläinen O., 2011), joten kiinnostavammaksi tutkimuskohteeksi koettiin symmetriset profiilivaihtoehdot. Painonsäästöä haettaessa myös useamman kuin yhden levynpaksuuden käyttö on perusteltua, joten tutkittava poikkileikkaus koostuu kahdesta eri levynpaksuudesta.

Optimoitavaksi profiiliksi valittiin U- ja V -profiilin yhdistelmä kahdella levynpaksuudella niin, että alempi taivutuksella puristuksella oleva korotettu V -profiili on paksumpaa levynpaksuutta. Profiilin poikkileikkaus on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** Optimoitava profiili

### 5.2.2 Poikkileikkauksen lommahduksen analyttisen laskennan ongelma

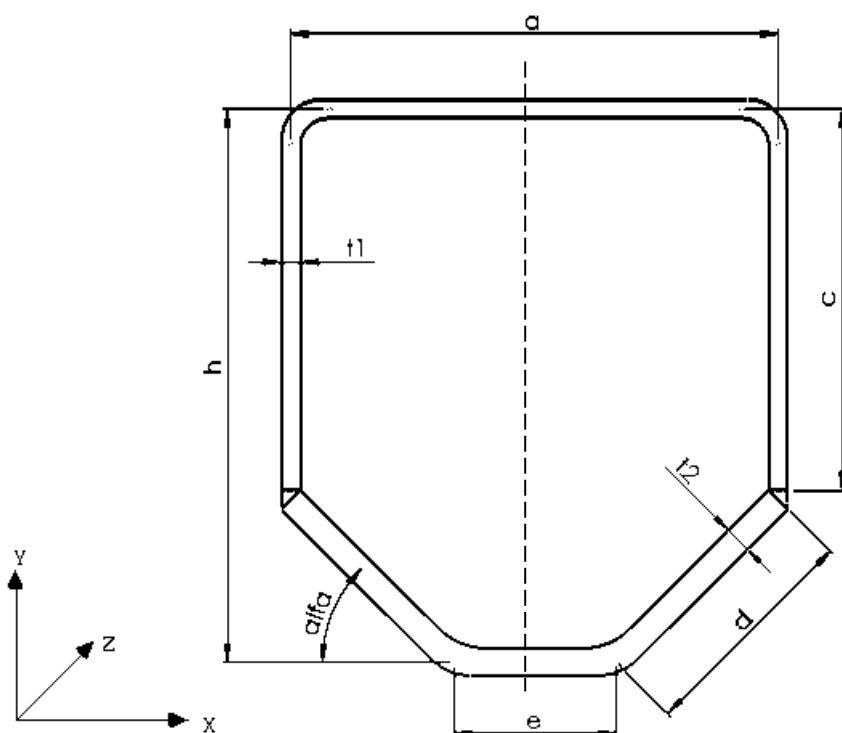
Poikkileikkausta piti kuitenkin myöhemmin yksinkertaistaa, koska kahdesta eri paksuudesta koostuvan levykentän lommahduksen analyttiseen tarkasteluun ei ollut kaavoja tarjolla. Kirjallisuudes-

sa on useita laskentamalleja kiilamaisille eli tasaisesti oheneville levykenttien lommahdustarkasteluun. Esimerkiksi G. G. Pope on laskenut lommahduskertoimia kiilamaisille levykentille artikkelissaan *The Buckling of Plates Tapered in Thickness* (Pope G. G., 1963). Eisenberger, M. ja Alexandrov A. tarjoavat aiheesta tuoreemman ja helppokäyttöisemmän laskentamallin artikkelissaan *Buckling loads of variable thickness thin isotropic plates* (Eisenberger, M. & Alexandrov A., 2003).

Lähempänä alkuperäistä poikkileikkausta on erilaisten porrastettujen levykenttien lommahdustarkastelut, joita löytyy myös kirjallisuudesta runsaasti. Vaikka sopivanlainen kaksiportaista levykenttää tutkiva artikkeli löytyikin, *Exact solutions for buckling and vibration of stepped rectangular Mindlin plates* (Xiang Y., Wei, G.W., 2004), ongelmana oli, ettei sopivaa reunaehto ja kuormitusyhdistelmää oltu käsitelty.

### 5.2.3 Yksinkertaistettu poikkileikkaus

Koska analyyttistä ratkaisumallia ei löytynyt, yksinkertaistettiin poikkileikkaus kuvan 7 mukaiseksi.



**Kuva 7.** Yksinkertaistettu optimoitava profiili

Alkuperäistä ja uutta yksinkertaistettua poikkileikkausta on hankalahko vertailla keskenään, koska alkuperäisen poikkileikkauksen optimointia ei pystytty suorittamaan. Uuden poikkileikkauksen hitsaaminen on ainakin hieman hankalampaa ja vaatii monimutkaisemman hitsaustuen käyttöä. Toisaalta uuden poikkileikkauksen V-profiilin särmääminen on yksinkertaisempaa ja kaksi kertaa

särmätyn profiilin lopputulos on myös todennäköisesti mittatarkempi kuin neljä kertaa särmätty muoto.

#### 5.2.4 Profiilin optimoitavat ominaisuudet

Yrityskyselyn sekä FIMA -työryhmän palaverin perusteella työssä päätettiin tutkia ja optimoida:

- 1) materiaali- ja valmistuskustannuksia
- 2) teräksen myötölujuutta
- 3) profiilin poikkipinta-alaa (tässä tapauksessa pinta-ala on suoraan verrannollinen massaan, koska puomin poikkipinta-ala pysyy vakiona)
- 4) puomin taipumaa
- 5) puomien limitystä\*
- 6) liukupalojen koon vaikutusta jännityksiin
- 7) poikkileikkauksen V -profiilin kulman vaikutusta jännityksiin
- 8) levynpaksuuden vaikutusta jännityksiin.

\*Tässä työssä limityksestä puhuttaessa viitataan nimenomaan limitysmitan minimiarvoon, ellei toisin mainita.

Optimointia yksinkertaistettiin rajaamalla kuormitusilanteeksi taivutusmomentti  $X$  -akselin (kuva 7) ympäri.

#### 5.3 Materiaali- ja valmistuskustannusten optimointi

Valmiin teräsrakenteen kustannuksista kertyy 38 % valmistusmateriaalista ja konepajavalmistuksesta 27 % eli yhteensä 65 %. Loput kustannuksista tulee suunnittelusta (13 %), asennuksesta (12 %) ja pintakäsittelystä (10 %). (Rautaruukki OYJ, 2010, s. 32.) Kustannusjakauman perusteella voidaan sanoa, että teräsrakenteiden materiaali- ja konepajavalmistuskustannuksien optimoinnilla voidaan pienentää helpoiten rakenteen kokonaiskustannuksia ja saavuttaa näin kilpailuetua. Toisaalta on hyvä huomata, että optimointi vaikuttaa myös muihin osakustannusryhmiin ja varsinkin optimointia käyttöönotettaessa suunnittelun kustannusosuus voi kasvaa uuden suunnittelutyökalun käyttöä opeteltaessa. Optimoinnin avulla suunnitteluprosessi voi nopeutua, mutta kustannusten kannalta tärkeämpää on kuitenkin suunnittelutulos, joka vaikuttaa jopa 70-80 prosenttiin valmistuskustannuksista (Piironen T., 2013, s. 4).

##### 5.3.1 Teräksen suhteellinen hinta

Työssä keskitytään suurimpien kustannuskokonaisuuksien tarkasteluun eli materiaali- ja konepajavalmistuskustannuksiin. Taulukossa 2 on esitetty lujien rakenneterästen suhteellisia hintoja. On

syitä huomata, että hinta määräytyy myös toimitusmuodosta ja määrästä (Nuutinen, sähköposti-haastattelu 9.6.2014).

*Taulukko 2. Kuumavalssatun peittaamattoman nauhateräksen indeksoitu hinta. (Nuutinen, sähköpostihaastattelu 9.6.2014)*

Nauhateräksen suhteellinen hinta	
teräslaatu	indeksoitu hinta
S355 rakenneteräs	1,00
Optim 700 MC Plus	1,20
Optim 900 CQ	1,80
Optim 960 CQ	1,83
Optim 1100 QC	2,00*

\*koemarkkinoinnissa, toimitettu toistaiseksi vain koetarkoituksiin

Lisäksi Hitsatut profiilit EN 1993 käsikirjasta (2010) löytyy suuntaa-antavaa levymateriaalien hintatietoa vuodelta 2007. Käsikirjassa esitellään teräslaatuja, jotka ovat myötölujuudeltaan matalampia (S235-S690), suhteellisia hintoja. (Rautaruukki OYJ, 2010, s. 46)

Lujien ja ultralujien terästen käyttö ei ole aivan ongelmaton. Ohuita rakenteita mitoittaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota rakenteiden stabiiliuteen. Lujuuden kasvaessa teräksen hitsattavuus heikkenee ja hitsaus vaatii erityistoimia; lämmöntuontiin sekä esilämmitykseen onkin syytä kiinnittää huomioita. Väsymiskestokaan ei välttämättä muutu staattisten lujuusominaisuuksien suhteessa ja hitsien muotoilua sekä sijoittelua pitää suunnitella tarkemmin kuin käytettäessä tavanomaisia teräksiä. (Koivisto et al., 2010, s. 290), (Lämsä J. & Kiuru H., 2012, s. 16)

Optimoitavan puomin materiaaliksi valittiin S700 lujuusluokan teräs, koska se on hyvä kompromissi hinnan ja lujuusominaisuuksien välillä. Lujien terästen käytöstä on paljon positiivisia kokemuksia, kun muistetaan ottaa huomioon niiden ominaisuudet suunnittelussa. Tutkittava profiilin muodot voidaan valmistaa joko särmäämällä tai rullamuovaamalla, jonka jälkeen V- ja U -profiilit kiinnitetään toisiinsa kiinni esimerkiksi MAG -hitsaamalla.

### 5.3.2 Rullamuovauksen kustannukset

Rullamuovauskustannuksiin vaikuttaa huomattavasti toimituserän koko sekä mahdolliset työkalukustannukset, ellei tehtaalla ole jo valmiiksi sopivia työkaluja. (Asumaniemi, M., haastattelu, 2.4.2014); (Salokangas J., 2004) Minimitoimituserät profiileille, jotka valmistetaan asiakkaan mittojen mukaan, ovat 500-1000 jm (juoksumetri) tai 8-10 tn. Hinta tehdastoimitukselle on 0,90-1,00

€/kg ja kuumasinkityille teräksille noin 1,30-1,50 €/kg. (Salokangas J., 2004) Nykyiset teräksen hinnat ovat todennäköisesti korkeammat, mutta hintojen suhde on suunnilleen sama.

Käytännössä hinnat ja saatavuus on aina varmistettava etukäteen. On myös hyvä ottaa huomioon rullamuovauksessa käytettävissä olevan aihion (teräsnauhan) mitat sekä rullamuovattavissa olevan profiilin maksimiulkomitat. (Salokangas J., 2004)

### 5.3.3 Särmäyksen kustannukset

Särmäyksen kustannuksiin vaikuttaa huomattavasti suuri käsityön tarve, minkä takia särmäämällä valmistetaan yleensä vain pieniä sarjoja tai erikoisprofiileja (Salokangas J., 2004). Boothroyd G. kumppaneineen tarjoaa särmäyskustannusten arvioimiseen laskumenetelmää, joka on esitetty kaavoissa 1 ja 2. (Boothroyd et al., 2002, s. 414-416) Särmäykseen kuluvaa aikaa voidaan arvioida kaavalla 1

$$t = 2(1 + N_s) + 0,05(2 + N_s)(P + L_s), \quad (1)$$

missä  $t$  on särmäysaika sekunneissa,  $N_s$  taivutusten lukumäärä ja  $P$  ja  $L_s$  ovat kappaleen leveys ja pituus senttimetreissä. On hyvä huomata, että kaava 1 perustuu Boothroydin ja kumppaneiden esittämään erään särmäyskoneen asennus- ja särmäysaikojen lineaariseen käyränsovitukseen. Tarkempia tuloksia varten on siis tehtävä oma käyränsovitus käytettävästä särmäyskoneesta. Kappalekohtaiset särmäyskustannukset määritellään kaavan 2 avulla

$$\frac{\text{kustannukset}}{\text{kpl}} = t \cdot M_t, \quad (2)$$

jossa  $Mt$  on koneen käyttökustannukset yksikössä €/s. Kaava voidaan myös yhdenmukaistaa hitsauskustannusten arviointikaavojen kanssa, jotka on esitelty seuraavassa kappaleessa, ottamalla huomioon niin sanotut työ- ja yleiskustannukset käyttökustannusten lisäksi.

### 5.3.4 Hitsauskustannukset

Hitsauskustannuksiin vaikuttaa erilaisten materiaalikustannusten lisäksi eniten erilaiset aikaa vievät työvaiheet aina railon valmistelusta viimeistelyyn ja tarkistamiseen. Ellei käyttökohde vaadi erityisen kallista metallia tai prosessi ole pitkälle automatisoitu, työntekijöiden palkat ovat yleensä suurin kustannuserä, mikä on otettu huomioon kaavoissa työhön kuluva ajassa. (Miller D. K., 2004) Kustannuksia voidaan arvioida kolmella eri lähestymistavalla, joista kaikkia voidaan hyödyntää puomin hitsauskustannusten arvioinnissa tapauskohtaisesti, sillä edellytyksellä, että hitsausprosessissa käytetään lisäainetta.



### 5.3.4.1 Kustannukset per kappale

Kappalekohtainen kustannusten laskentakaava on kolmesta laskutavasta tarkin. Laskutavassa ei tarvitse ottaa huomioon hitsin kokoa ja kappaleen erilaiset hitsit voidaan yhdistää suoraan, koska menetelmässä summataan tärkeimmät kustannustekijät per kappale. Hitsausmateriaalikustannus per kappale lasketaan seuraavilla kaavoilla (Miller D.K., 2004):

$$\frac{\text{lisäainelankakustannukset}}{\text{kpl}} = \text{langan syöttönopeus} \cdot \text{hitsausaika} \cdot \frac{\text{langan massa}}{\text{pituusyksikkö}} \cdot \frac{\text{langan hinta}}{\text{massa}}, \quad (3)$$

$$\frac{\text{suojakaasukustannukset}}{\text{kpl}} = \text{virtausnopeus} \cdot \text{hitsausaika} \cdot \frac{\text{kaasun hinta}}{\text{tilavuus}}. \quad (4)$$

Vastaavasti voidaan laskea myös jauhekaari- sekä puikkohitsauksen kappalekohtaiset kustannukset. Työkustannukset otetaan huomioon kaavalla 5.

$$\frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{kpl}} = \frac{\text{hitsaukseen kuluva aika}}{\text{kpl}} \cdot \frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{aikayksikkö}}. \quad (5)$$

Työ- ja yleiskustannukset koostuvat palkoista, työvälineistä, tiloista, valvonnasta ja muista vastaavista kuluista. Kaavoista 3-5 saadaan muodostettua kappalekohtaisen kustannuksen kaava 6:

$$\frac{\text{Kustannus}}{\text{kpl}} = \frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{kpl}} + \frac{\text{hitsausmateriaalikustannukset}}{\text{kpl}}. \quad (6)$$

### 5.3.4.2 Kustannukset per hitsin pituus

Tämä laskentatapa soveltuu hyvin pitkille yhden palon hitseille ja tuloksista pääsee vertailemaan erikokoisten saumojen kustannuksia. Useamman palon hitseille sopii paremmin kustannuksia painon perusteella arvioiva menetelmä. Kustannukset per hitsin pituus muodostetaan kaavoista 7-9. (Miller D.K., 2004)

$$\frac{\text{lisäainelankakustannukset}}{\text{hitsin pituus}} = \frac{\text{langan syöttönopeus} \cdot \frac{\text{langan massa}}{\text{pituusyksikkö}} \cdot \frac{\text{langan hinta}}{\text{massa}}}{\text{kuljetusnopeus}}, \quad (7)$$

$$\frac{\text{suojakaasukustannukset}}{\text{hitsin pituus}} = \frac{\text{virtausnopeus} \cdot \frac{\text{kaasun hinta}}{\text{tilavuus}}}{\text{kuljetusnopeus}}, \quad (8)$$

Vastaavasti voidaan laskea myös jauhekaari- sekä puikkohitsauksen kappalekohtaiset kustannukset. Työkustannukset otetaan huomioon kaavalla 9.

$$\frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{hitsin pituus}} = \frac{\frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{aikayksikkö}}}{\text{kuljetusnopeus} \cdot \text{paloaikasuhte}} \quad (9)$$

Kaavat 7-8 summaamalla saadaan kustannukset per hitsin pituus, joka on esitetty kaavassa 10:

$$\frac{\text{Kustannus}}{\text{hitsin pituus}} = \frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{hitsin pituus}} + \frac{\text{hitsausmateriaalikustannukset}}{\text{hitsin pituus}}. \quad (10)$$

### 5.3.4.3 Kustannukset per massa

Viimeinen laskentatapavaihtoehto on menetelmistä helppokäyttöisin ja sopii parhaiten monipalkko- sekä pinnoitushitsien kustannusten arvioimiseen. Menetelmä ei ole tarkka lyhyillä eikä yksipalkko-hitseillä. Kustannukset per massa voidaan laskea kaavoilla 11-14. (Miller D. K., 2004)

$$\frac{\text{lisäainekustannukset}}{\text{massa}} = \frac{\frac{\text{lisäaineen hinta}}{\text{massa}}}{\text{lisäaineen hyötysuhde}} \quad (11)$$

$$\frac{\text{suojakaasukustannukset}}{\text{massa}} = \frac{\text{virtausnopeus} \cdot \frac{\text{kaasun hinta}}{\text{tilavuus}}}{\text{lisäaineensulatusnopeus}} \quad (12)$$

Kaavaa numero 11 voidaan käyttää sekä lanka, että puikkohitsausprosesseissa. Lisäaineen hyötysuhde on lankaprosesseissa lähes 100 %, puikkohitsausprosesseissa vähemmän. Lisäaineensulatusnopeuden yksikkö on massa/aikayksikkö. Työkustannukset otetaan huomioon kaavalla 13.

$$\frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{massa}} = \frac{\frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{aikayksikkö}}}{\text{lisäaineensulatusnopeus} \cdot \text{paloaikasuhte}} \quad (13)$$

Kaavat 11-13 summaamalla voidaan laskea kustannukset per massayksikkö yhtälön 14 avulla:

$$\frac{\text{Kustannus}}{\text{hitsin pituus}} = \frac{\text{työ \& yleiskustannukset}}{\text{massa}} + \frac{\text{hitsausmateriaalikustannukset}}{\text{massa}}. \quad (14)$$

Esitetyt kolme hitsauskustannusten arviointikaavaa soveltuvat parhaiten erilaisten konstruktiovaihtoehtojen vertailuun. On myös hyvä huomata, että hitsausprosessin valinnalla voidaan vaikuttaa työhön kuluvaan aikaan ja kappaleen läpimenoaikaan.

Myös tarkempia ja monimutkaisempi hitsauskustannusten arviointikaavoja on tarjolla. Esimerkiksi Järmai K. esittelee yhden laskentatavan, jossa hitsauskokoontalon monimutkaisuus sekä hitsattavien levyjen paksuudet otetaan huomioon omilla kertoimillaan menetelmässä, jossa kustannuksia arvioidaan hitsin tilavuuden perusteella. (Järmai K. et al., 2013, s. 32-34)

### 5.3.5 Kustannusten optimointi

Kustannuksia voidaan minimoida tehokkaasti yksittäisen rakenteen monitavoiteoptimoinnissa, jos rakenteen muotoja pystytään varioimaan vapaasti. Jos esimerkiksi poikkileikkauksen perusmuoto on päätetty ennalta kuten tässä työssä, kustannusten optimointipotentiaali rajoittuu melkein pä materiaalikustannusten minimointiin, ellei voida vertailla useampia vaihtoehtoisia poikkileikkauksia keskenään.

Tässä työssä kustannuksia tyydyttiin optimoimaan materiaalikustannusten suhteen. Vaikka yrityskyselyssä painotettiin kahdeksi tärkeimmäksi optimointikohteeksi puomin kustannusten minimointia sekä massan minimointia samalla painotuskertoimella, ei FIMA:n projektityöryhmä halunnut painottaa kustannuspuolta enempää. Yksi syy oli projektin jäsenyritysten erilaiset kustannusrakenteet, minkä takia ei voitu yksiselitteisesti määrittää edullisinta valmistustapaa.

### 5.4 Poikkileikkauksen optimointityökalu

Kappaleessa 5.2 esitetyn profiilin (kuva 7) poikkileikkauksen levykenttien mittojen optimointia varten muodostettiin optimointityökalu, jonka avulla voidaan hakea poikkipinta-alan minimi reunaehtojen sallimissa rajoissa.

Reunaehtoina käytettiin taivutuskuormitetulta puomilta vaadittavaa taivutusvastusta sekä profiilille sallittua taipumaa kuormitussuunnassa. Puristuksella olevat levykentät mitoitettiin lommahdusrajoitteiden perusteella poikkileikkausluokka 3:n mukaisesti, niin että saavutettiin vaadittavat taivutusvastuksen sekä taipuman arvot. Seuraavissa kappaleissa laskentaa esitellään tarkemmin. Liitteessä 7 on esitetty optimointityökalun koodi kokonaisuudessaan.

Matlab -pohjainen optimointityökalu muodostettiin Olli-Pekka Hämäläisen diplomityössään tekemän koodin pohjalle. Hämäläisen koodista poiketen nyt käytettiin uudempaa Matlab R2012a -ohjelmistoa Optimization toolbox -lisäosalla, minkä etuna on tehokkaampi sqp -ratkaisualgoritmi. (Hämäläinen O. 2011, s. 37) Muodostetun optimoijan ratkaisuperiaate on epälineaarinen rajoitetulla ratkaisujoukolla eli sama kuin Hämäläisen optimoijassa, joten tässä ei perehdytä ratkaisufunktion matematiikkaan tarkemmin. Optimization Toolboxin ratkaisualgoritmeihin ja -funktioihin voi tutustua tarkemmin Mathworksin kotisivuilla (Optimization toolbox, 2014).

#### 5.4.1 Rajoiteyhtälöiden muodostaminen

Optimointityökaluun rajoitteet syötetään yhtälömuodossa, jolloin lausekkeen arvo määrätään tietyn ennalta määrätyn arvoksi tai rajoite voi olla ”yhtä suuri tai suurempi/pienempi kuin” -muotoinen epäyhtälölauseke. Rajoitteiden lisäksi lähtöarvojoukkoa joudutaan usein rajaamaan niin, että optimoitu geometria on yhteensopiva muun konstruktion kanssa.

#### 5.4.1.1 Taivutusvastus: staattinen kuorma

Poikkileikkauksen staattisen kestävyuden kannalta tutkittavista poikkipintasuureista taivutusvastus  $W_{vaad, stat}$  on tärkein. Vaadittava vähimmäisarvo taivutusvastukselle lasketaan kaavasta 15 (Valtanen E., 2010, s. 461)

$$W_{vaad, stat} = \frac{M \cdot \gamma}{\sigma_{fy}}, \quad (15)$$

missä  $M$  ennalta määrätty taivutusmomentti,  $\gamma$  on varmuuskerroin ja  $\sigma_{fy}$  on käytettävän teräksen myötölujuus.

Poikkileikkauksen taivutusvastus  $W_{xx}$  määritetään poikkipinnan dimensioista ja sitä varten pitää määrittää ensin neutraaliakselin sijainti. Jos koordinaatisto on määritelty kuvan 7 mukaisesti, neutraaliakselin etäisyys  $\bar{c}$  y-akselista määritellään kaavan 16 mukaisesti (Valtanen E., 2010, s. 461)

$$\bar{c} = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A}, \quad (16)$$

jossa  $A$  on yksittäisen levykentän pinta-ala ja  $y$  kohtisuora etäisyys  $X$ -akselilta.  $\bar{c}$ :n perusteella voidaan edelleen laskea suurempi kohtisuora etäisyys  $h_1$  profiilin ylä- tai alareunaan kaavalla 17

$$h_1 = \max \left\{ \bar{c}, h_{tot} - \bar{c} \right\}, \quad (17)$$

missä  $h_{tot}$  on kappaleen kokonaiskorkeus.  $h_1$ :n lisäksi pitää määrittää poikkileikkauksen neliömomentti  $I_{xx}$  neutraaliakselin ympäri.  $I_{xx}$ :n laskenta on esitetty vaiheittain liitteessä 7. Kun  $h_1$  ja  $I_{xx}$  on laskettu, voidaan määrittellä taivutusvastus kaavan 18 mukaisesti (Valtanen E., 2010, s. 461).

$$W_{xx} = \frac{I_{xx}}{h_1}, \quad (18)$$

Kun  $W_{vaad}$  ja  $W_{xx}$  on määritelty, muodostetaan taivutusvastuksen rajoiteyhtälö 19.

$$W_{vaad, stat} \leq W_{xx} \quad (19)$$

#### 5.4.1.2 Taivutusvastus: väsyttävä kuorma

Väsyttävä kuorma oli mitoittava monella FIMA -projektiin osallistuvalla yrityksellä, joten väsymiskestävyys olisi hyvä ottaa huomioon mahdollisimman aikaisin suunnittelussa. Eräs keino on mitata

olemassa olevien puomirakenteiden kuormituksia esimerkiksi venymäliuskojen avulla ja kerätä näin kuormitushistoriadataa. Kuormitushistoriasta voidaan laskea erilaisia käyttökelpoisia ekvivalentteja esimerkiksi rainflow -analyysin avulla, joiden avulla voidaan laskea arvio väsymiskestoikästä.

Väsyttävän kuorman vaatiman taivutusvastuksen määrittämiseksi pitää kuormitushistorian avulla selvittää ekvivalentti taivutusmomentti  $X$  -akselin ympäri  $M_{ekv}$ . Hitsin väsymistä tarkasteltaessa pitää lisäksi määritellä kuormitustapausta vastaava FAT -luokka, Wöhler -käyrän (SN-käyrä) kulmakerroin  $m$  (IIW suositusten sekä EC3:n mukaan yleensä  $m = 3$ ) sekä vaadittava kestoikä syk-leissä  $N$ , jos tarvittava  $\Delta\sigma_{ekv, vaad.}$  lasketaan nosturistandardin 13001-3-1:n suosittelemalla nimellisen jännityksen menetelmällä. (EN 13001-3-1, 2012, s. 37)

Ratkaistaan  $\Delta\sigma_{ekvival, vaad.}$  kaavasta 20

$$\Delta\sigma_{ekv, vaad.} = \left[ \frac{FAT^m \cdot 2 \cdot 10^6}{N} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (20)$$

jolloin voidaan määritellä vaadittava taivutusvastus kaavasta 21

$$W_{vaad, vas} = \frac{M_{ekv.}}{\Delta\sigma_{ekv, vaad.}} \quad (21)$$

Nyt taivutusvastuksen rajoiteyhtälö 19 saa muodon

$$\begin{aligned} W_{vaad, stat} &\leq W_{xx}, \\ W_{vaad, vas} &\leq W_{xx}. \end{aligned} \quad (22)$$

Nyt suunnittelijalla on mahdollisuus säätää vaadittavien taivutusvastusten keskinäistä suhdetta esimerkiksi vaihtamalla valmistusmateriaalia (kaava 15) ja pyrkiä näin esimerkiksi kevyempään ja edullisempaan ratkaisuun. Edellä esitetty tarkastelu ei kuitenkaan ole yksistään riittävä puomin väsymiskeston varmistamiseen, mikä johtuu muun muassa FAT -luokan valinnan tulkinnanvaraisuudesta.

#### 5.4.1.3 Taipuma

Profiilin taipuma voidaan määritellä joko siirtymänä profiilin eri kohdissa tai taipumakulmana. Optimoitukoodiin voidaan helposti määritellä rajoiteyhtälöt kummankin perusteella, mutta tässä yhteydessä päätettiin käyttää ainoastaan maksimisiirtymää.

Taipuma määräytyy profiilin kiinnitystavasta ja tuennasta. Tutkittavaan puomin jatkokseen soveltuu parhaiten kaava 23, joka kuvaa toisesta päästä taivutusmomentin kuormittamaa palkkia jossa on nivelpisteet liukupalojen kohdissa. Liitteessä 5 on esitetty taipumakaavan 23 muodostaminen vaiheittain.

$$v = \frac{F[(L_j - L)^3 + L(L_j - L)^2]}{3EI_{xx}} \quad (23)$$

Kaavassa 23  $F$  on puomin päässä vaikuttava vertikaalinen voima,  $L_j$  on profiilin pituus,  $L$  on limityspituus,  $E$  on teräksen kimmomoduuli ja  $I_{xx}$  on neliömomentti, jonka laskenta on esitetty liitteessä 7. Teräksen kimmomoduulin arvo vaihtelee hieman eri teräslaatuken kesken. Työssä on käytetty kuitenkin vakioarvoa 210 GPa teräslaadusta riippumatta.

Sallittu taipuma  $v_{sal}$  määrätään sovelluskohtaisesti, joten voidaan määritellä rajoiteyhtälö 24.

$$v \leq v_{sal} \quad (24)$$

#### 5.4.1.4 Lommahduskestävyys poikkileikkausluokka 3:n mukaan

Poikkileikkaus on mitoitettu EC3:n (Eurokoodi 3) poikkileikkausluokka 3:n (PL3) mukaisesti, kun sen äärimmäisessä puristetussa reunassa laskettu jännitys voi saavuttaa materiaalin myötörajan levykentän silti lommahtamatta. Paikallinen lommahdus estää kuitenkin plastisuusteorian mukaisen momenttikestävyyden kehittymisen. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, s. 42) PL3:n mukaista poikkileikkausta voidaan kutsua myös puolikompektiksi poikkileikkaukseksi (Niemi E., 2003 s. 21).




Pyrittäessä kevyisiin rakenteisiin käyttämällä lujia tai ultralujia teräksiä lommahdusmitoituksessa ongelmaksi voi tulla EC3:n asettama teräksen lujuusluokan rajaaminen korkeintaan S460:en. EC3:n laajennus 1993-1-12 laajentaa käytettävissä olevan lujuusluokan S700:n asti (SFS-EN 1993-1-12, 2007, 5-6 s.), mikä rajaa kuitenkin vaihtoehtoista pois lujimmat markkinoilla olevat teräkset.

Poikkileikkauksen puristuksella olevien levykenttien mitoitus voidaan tehdä teräksen myötölujuuden perusteella parametrin  $\varepsilon$  avulla (kaava 25)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}, \quad (25)$$

missä  $f_y$  on teräksen myötölujuus megapascalina (Niemi E., 2003, s 23). Mitoituksen edellytyksenä on, että levykentän leveys/paksuussuhde täyttää taulukon 3 ehdot.

*Taulukko 3. Poikkileikkausluokka 3:n mukaiset leveys/paksuussuhteiden c/t raja-arvot eri teräslaaduille. (Niemi E., 2003, s 25) parametri c kuvaa tarkasteltavan levykentän leveyttä.*

Jännitys-jakauma	Raja-arvo $c/t \approx$	$\psi$	Teräs									
			S235	S275	S355	S420	S460	S500	S550	S600	S650	S700
			$\epsilon$									
	$38,3 \cdot \epsilon$	1	1,000	0,924	0,814	0,748	0,715	0,686	0,654	0,626	0,601	0,579
 $\psi \geq 0$	$\frac{38,3 \cdot \epsilon}{0,61 + 0,39 \cdot \psi^{1,1}}$	0,75	43,0	39,8	35,0	32,2	30,8	29,5	28,1	26,9	25,9	24,9
		0,5	48,4	44,7	39,4	36,2	34,6	33,2	31,6	30,3	29,1	28,0
		0,25	54,8	50,6	44,6	41,0	39,2	37,6	35,8	34,3	32,9	31,7
		0	62,9	58,1	51,2	47,1	45,0	43,1	41,1	39,4	37,8	36,4
 $-1 > \psi \geq 0$	$\epsilon \cdot [19,5 \cdot (1 - \psi)^2 + 43,4]$	-0,25	73,2	67,7	59,6	54,8	52,3	50,2	47,8	45,8	44,0	42,4
		-0,5	87,0	80,4	70,8	65,0	62,2	59,6	56,8	54,4	52,3	50,4
		-0,75	103,3	95,5	84,0	77,2	73,8	70,8	67,5	64,6	62,1	59,8
		-1	121,5	112,3	98,9	90,9	86,9	83,3	79,4	76,1	73,1	70,4
Vapaa reuna*	$14 \cdot \epsilon$	1	14,0	12,9	11,4	10,5	10,0	9,6	9,2	8,8	8,4	8,1

kun  $\psi = 1,0$

Toisaalta Markku Kemppi kyseenalaisti EC3:n käyttämisen nosturisuunnittelun perustana ja suositeli käyttämään nosturistandardeja EN 13001-1 - 13001-3. (sähköpostihaastattelu 31.3) Nosturistandardeissa sovelletaan osittain EC3:sta, mutta rakenteissa käytettävän teräksen lujuusluokalle ei anneta ylärajaa, vain suosituksia. (EN 13001-2, 2012, s. 12)

S700:sta lujemmille teräslaaduille on tehty melko runsaasti lommahdustestejä, joiden perusteella kaavan 25 pätevyysaluetta voidaan laajentaa S960 asti. Myöskään tätä lujemmilla teräksillä ei ole aihetta epäillä kaavan pätevyyttä (Huusko L., 2006, s. 42), joten EC3:n mukaisiin rajoituksiin ei näytä olevan lujusteknistä perustetta. Taulukkoon 4 on ekstrapoloitu PL3:n mukaiset raja-arvot S1200 asti.

Taulukko 4. Poikkileikkausluokan 3 mukaisten c/t raja-arvot ekstrapoloituna teräslaatu S1200:n asti.

$\psi$	Teräs					
	S800	S900	S960	S1000	S1100	S1200
	$\varepsilon$					
	0,542	0,511	0,495	0,485	0,462	0,443
1	20,8	19,6	18,9	18,6	17,7	16,9
0,75	23,2	21,9	21,2	20,8	19,8	19,0
0,5	26,2	24,7	23,9	23,4	22,4	21,4
0,25	29,9	28,2	27,3	26,7	25,5	24,4
0	34,0	32,1	31,1	30,4	29,0	27,8
-0,25	40,0	37,7	36,5	35,8	34,1	32,7
-0,5	47,3	44,6	43,2	42,3	40,3	38,6
-0,75	55,9	52,7	51,0	50,0	47,7	45,6
-1	65,8	62,0	60,1	58,9	56,1	53,7
1	7,6	7,2	6,9	6,8	6,5	6,2

Kaavan 25 ja taulukon 3 kaavojen avulla muodostetaan epälineaariset yhtälörajoitteet 26-28 poikkileikkauksen puristuksella oleville levykentille.  $\psi$  on tarkasteltavan levykentän suurimman puristusjännityksen suhde pienimpään jännitykseen.

$$\frac{c}{t_1} \leq \varepsilon \cdot [19,5 \cdot (1 - \psi)^2 + 43,4] \quad (26)$$

$$\frac{d}{t_2} \leq \frac{38,3\varepsilon}{0,61+0,39\psi^{1,1}} \quad (27)$$

$$\frac{e}{t_2} \leq 38,3 \cdot \varepsilon \quad (28)$$

Poikkileikkauksen neutraaliakselin oletetaan sijoittuvan U -profiilin mitan c korkeudelle (kuva 7). Muodostettu optimointityökalu ei osaa laskea oikein tapausta, jossa neutraaliakseli sijaitsee muualla. U -profiilin paksuus on kaikissa levykentissä sama ja leveys määräytyy V -profiilin geometriasta.

#### 5.4.2 Optimoinnin laskentaparametrijoukon sekä lähtöarvojen määrittäminen

Rajoiteyhtälöiden lisäksi pitää rakennetta optimoitaessa rajata laskentaparametrijoukkoa, jotta tulos on järkevä myös käytännössä. Parametrijoukkoa rajaamalla voidaan esimerkiksi varmistaa, että optimoitu rakenne pysyy yhteensopivana muuhun kokoonpanoon nähden. Laskentaparametrijoukon laajuus vaikuttaa myös laskenta-aikaan.



Poikkileikkauksen laskentaparametrijoukko sekä laskennan lähtöarvot mukailevat John Deereltä saatuja arvoja. Taivutusmomentti on arvioitu seitsemän metrin puomille, jonka päässä on harveste-ripää (1250 kg), rotaattori (150 kg) sekä 350 kg:n puunrunko. Lisäksi on arvioitu sopiva sallittu taipuma. Laskentaparametrijoukko sekä laskennan lähtöarvot on esitetty taulukossa 5.

*Taulukko 5. Poikkileikkauksen laskentaparametrijoukko sekä laskennan lähtöarvot. (tunnukset a-a viittaavat kuvaan 7)*

tunnus	lähtö- ja raja-arvot	yksikkö
$a$	180-300	mm
$h$	180-300	mm
$d$	50-150	mm
$e$	50-150	mm
$t_1$	5-8	mm
$t_2$	6-8	mm
$\alpha$	45	[°]
$L$ (prof. pituus)	4000	mm
$\sigma_{fy}$	700	Mpa
$M$ (momentti)	120 000	kNm
$v$ (taipuma)	100	mm
$\gamma$ (varmuuskerroin)	1,1	-

#### 5.4.3 Optimointityökalun verifiointi

Taulukon 5 lähtöarvoja käytettiin myös optimointityökalun verifiointiin ja näin varmistettiin optimointityökalun toiminta sekä tulosten oikeellisuus myöhempää FE -analyysia varten. Lähtöarvoja vastaava poikkileikkaus on niin sanottu kapea poikkileikkaus, joka on esitetty taulukossa 6. Myöhemmin FE -laskennan yhteydessä havaittiin, että taulukossa 6 esitetyn mukainen kapean poikkileikkauksen jännitykset nousivat liian korkeiksi  $\alpha$  -kulmaa varioitaessa, joten laskettiin myös toinen, leveä poikkileikkaus, laskentaparametrijoukon alarajoja nostamalla. Molempien poikkileikkauksien tiedot on esitetty taulukossa 6. Kappaleessa 5.5 on kerrottu tarkemmin FE -laskennan vaiheista.

Taulukko 6. Optimoidut mitat kapealle ja leveälle poikkileikkaukselle.

tunnus [mm]	kapea poikkileikkaus	leveä poikkileikkaus
$a^*$	180,5	200,2
$h$	201	201
$c^{**}$	154,8	139,9
$d$	64	85
$e$	90	80
$t1$	5	5
$t2$	6	6
$\alpha$ (alfa)	45°	45°

\*määräytyy geometrian ja rajoitteiden perusteella

\*\*määräytyy geometrian perusteella

Verifointi tapahtui AGIFAP -ohjelmiston avulla, jolla on laskettu verrokkiarvot optimointityökalun poikkipintasuureille taulukon 6 mittojen perusteella. Tulosten vertailu on esitetty taulukoissa 7 ja 8.

Taulukko 7. Poikkileikkauksen optimointityökalun tuloksia kapealle profiilille

tunnus	selitys	MATLAB-optimointityök.	AGIFAP-analyysin tulokset	tulosten ero [%]
$h_1$ [mm]	neutraaliakselin sijainti	106,75	106,15	0,56
$A$ [mm <sup>2</sup> ]	poikkipinta-ala	3758,00	3758,00	0,00
$W_{xx}$ [mm <sup>3</sup> ]	taivutusvastus	215,12*10 <sup>3</sup>	216,69*10 <sup>3</sup>	0,72
$I_{xx}$ [mm <sup>4</sup> ]	neliömomentti	22,97*10 <sup>6</sup>	23,00*10 <sup>6</sup>	0,16
$\gamma$ [-]	varmuuskerroin, toteutunut	1,14	-	-
$v$ [mm]	taipuma, toteutunut	*55,0	-	-

\* 600 mm limituspituudella

Taulukko 8. Poikkileikkauksen optimointityökalun tuloksia leveälle profiilille

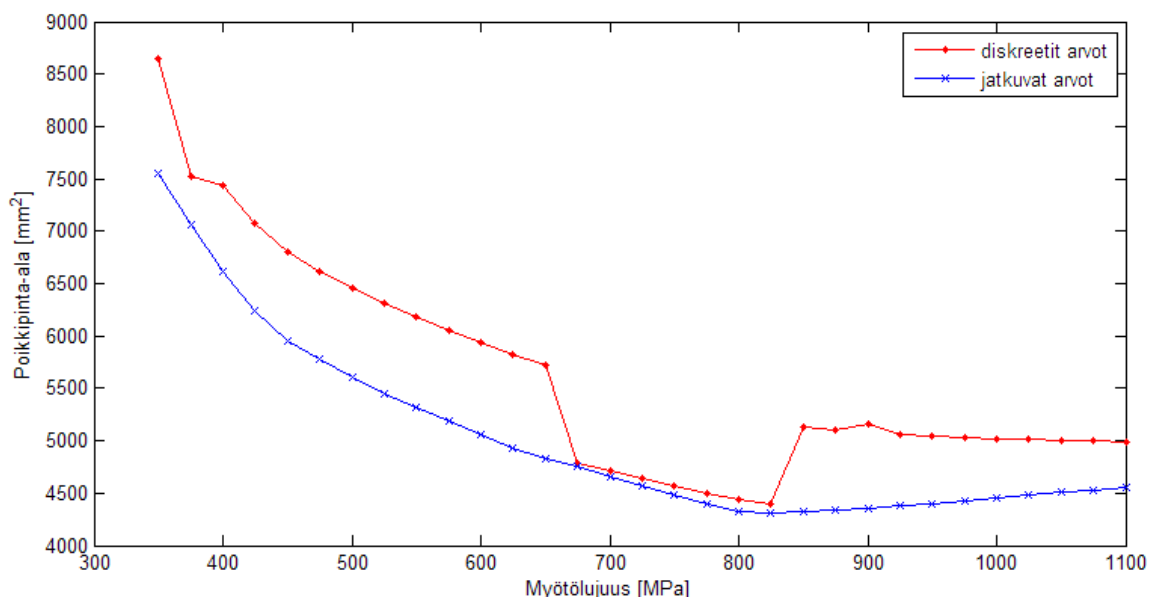
tunnus	selitys	MATLAB-optimointityök.	AGIFAP-analyysin tulokset	tulosten ero [%]
$h_1$ [mm]	neutraaliakselin sijainti	109,49	108,84	0,59
$A$ [mm <sup>2</sup> ]	poikkipinta-ala	3900,00	3899,95	0,00
$W_{xx}$ [mm <sup>3</sup> ]	taivutusvastus	214,06*10 <sup>3</sup>	216,12*10 <sup>3</sup>	0,96
$I_{xx}$ [mm <sup>4</sup> ]	neliömomentti	23,43*10 <sup>6</sup>	23,5242*10 <sup>6</sup>	2,19
$\gamma$ [-]	varmuuskerroin, toteutunut	1,14	-	-
$v$ [mm]	taipuma, toteutunut	*53,9	-	-

\* 600 mm limituspituudella

AGIFAP (Advanced Graphical Interactive Frame Analysis Package) on alun perin Lappeenrannan teknillisen yliopistossa kehitetty DOS -pohjainen elementtimalliohjelmisto (FE), jolla voi ratkaista tarkasti erilaisia poikkileikkaussuureita. AGIFAP muodostaa jokaiseen solmupisteeseen perinteisen kuuden vapausasteen sijaan seitsemän vapausastetta (3 siirtymä-, 3 kiertymä ja 1 vääntymävapautumisaste), jolloin voidaan myös ottaa avoprofiileissa esiintyvä estetty vääntö huomioon. (AGIFAP Version 6.1 User's guide, 1999, s.1) Työssä käytettyä AGIFAPia ei pidä sekoittaa samannimiseen ohjelmaan, jota One moment engineering (OME) tarjoaa kotisivuillaan. (OME:n kotisivut, 2013) OME:n ohjelma tosin perustuu työssä käytettyyn ohjelmaan.

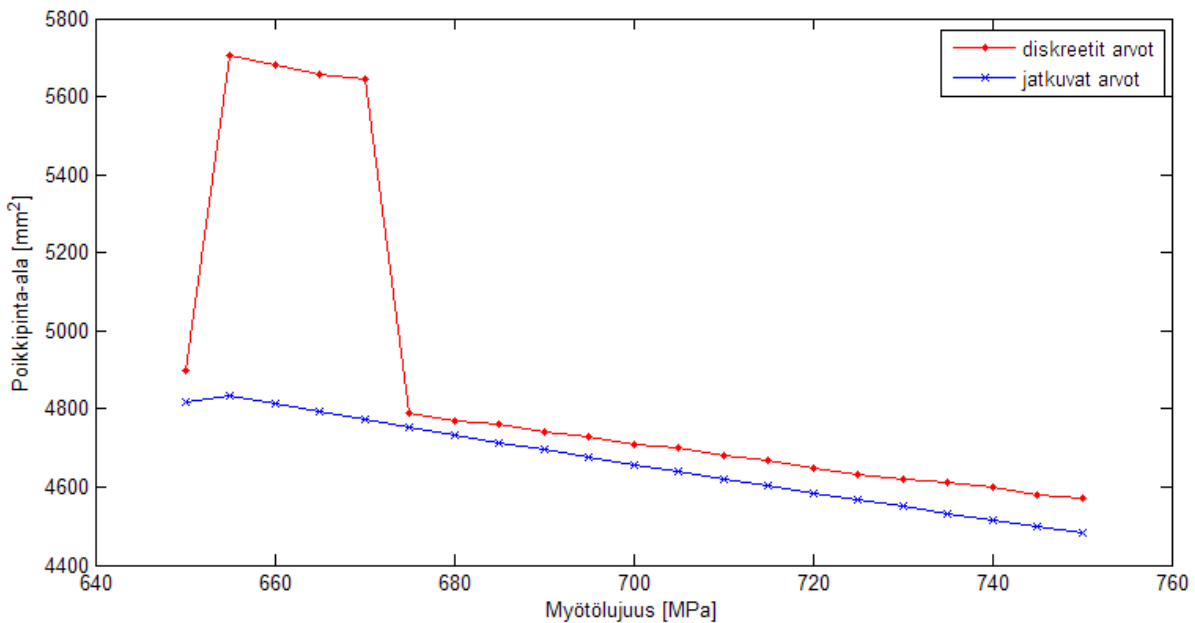
Poikkileikkaukset optimointityökalun ja AGIFAP -analyysin tulosten eroja tarkasteltaessa taulukoista 7 ja 8 huomataan, että tulokset vastaavat hyvin toisiaan. Optimointityökalu laskee tarvittavat poikkipinta-alueet noin 2 % virhemarginaalilla, mikä on riittävä tarkkuus profiilin optimointia varten. Osa tulosten arvojen eroista selittyy välipyöristyksillä AGIFAP -mallia luodessa. On myös hyvä huomata, ettei kumpaankaan malliin ole otettu huomioon nurkkapyöristyksiä, jotka vaikuttavat poikkipinta-alueisiin.

Työkalun tulosten konvergoimista voidaan arvioida kuvan 8 avulla, jossa on tutkittu poikkipinta-alueen muutosta myötölujuuden suhteen diskreeteillä sekä jatkuvilla levynpaksuuden arvoilla laskettuna. Kuvan 8 arvot laskettiin niin, että levykenttien mitoille on sallittu suuri vaihteluväli, kuormaksi on määritetty 250 kN, sallituksi taipumaksi 100 mm neljän metrin pituisella profiililla.



**Kuva 8.** Poikkileikkauksen pinta-ala myötölujuuden suhteen. Pinta-ala on laskettu myötölujuuden arvoilla 350-1100 MPa 25 MPa:n välein.

Kuvasta 8 voidaan todeta poikkileikkauksen tulosten konvergoivan sekä diskreeteillä, että jatkuvilla arvoilla. Laskenta-arvojen diskreettiys selittää ylemmän käyrän epäjatkuvuuksia, mutta sitä selittää myös laskentavälin harvuus. Tämän voi huomata kuvasta 9, missä on ratkaistu vastaavilla lähtöarvoilla poikkipinta-aloja tiheämmällä laskentavälillä.



**Kuva 9.** Poikkileikkauksen pinta-ala myötölujuuden suhteen. Pinta-ala on laskettu myötölujuuden arvoilla 650-750 MPa 5 MPa:n välein.

#### 5.4.4 Optimointityökalun yhteenveto

Optimointityökalu määrittelee lommahdusrajoitteen mukaiset optimit levykenttien mitat, riittävän taivutusvastuksen sekä maksimitaipuman pyrkien poikkipinta-alan minimiin. Vakiona pysyvän profiilin poikkileikkauksen poikkipinta-ala on suoraan verrannollinen profiilin massaun, joten voidaan sanoa, että optimointityökalu hakee keveintä vaatimukset täyttävää profiilia.

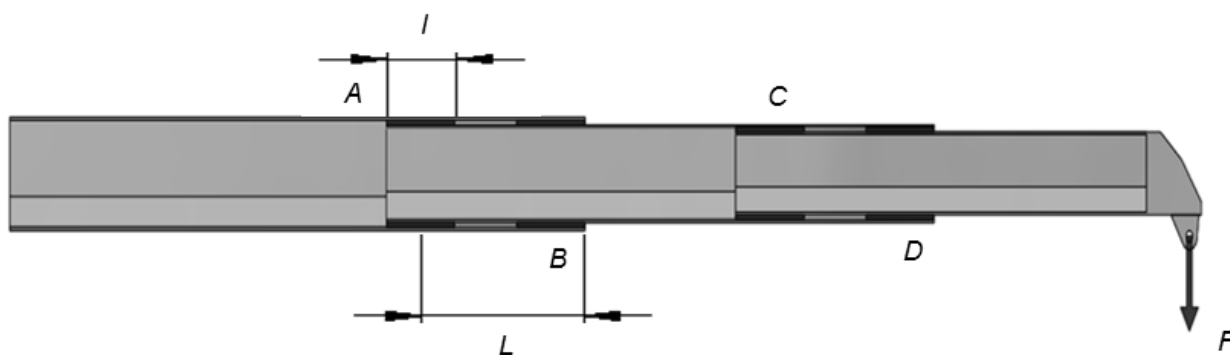
Optimointityökalu antaa tuloksesi poikkileikkauksen mittojen, taivutusvastuksen  $X$ -akselin ympäri (kuva 7) ja taipuman lisäksi poikkipinta-alan, neliömomentin  $X$ -akselin suhteen, neutraaliakselin sijainnin sekä toteutuneen varmuuskertoimen, joita voidaan käyttää edelleen monitavoiteoptimoinnin lähtöarvoina. Myös muiden poikkipintasuuressien laskenta ja tarkastelu tuloksista on mahdollista, jos työkaluun lisätään tarvittavat yhtälöt.

Työkalussa ei ole ominaisuutta robustisuuden tarkasteluun, joten tuloksia lähtöarvojoukon rajaukseen käytettäessä on hyvä varmistaa, ettei optimiratkaisua tule rajattua tarkastelun ulkopuolelle. Käytännössä robustisuuden tarkastelun voi kuitenkin tehdä optimointityökalulla tutkimalla muutamia pisteitä tulosten ympäriltä pakottamalla työkalun laskemaan haluttujen pisteiden arvot.

### 5.5 Puomin tutkiminen FE -analyysien avulla

Kun optimointityökalun tulokset oli verifioitu, jatkettiin optimoidun puomin tutkimista FE -laskennan keinoin. FE -analyysien avulla tutkittiin optimoitua poikkileikkausta yhden jatkoksen (kuva 10) avulla, kun teleskooppipuomia kuormittava taivutusmomentti muutettiin liukupalakohtaisiksi reaktiovoimiksi yksinkertaistetun puomin jatkoksessa. FE -laskennan avulla tutkittiin levynpaksuuden, liukupalojen koon sekä limityksen vaikutusta jännityksiin. Tulosten perusteella pyrittiin muodostamaan vuorovaikutussuhteita, joiden avulla voitiin parantaa edelleen muodostettua optimointityökalua.

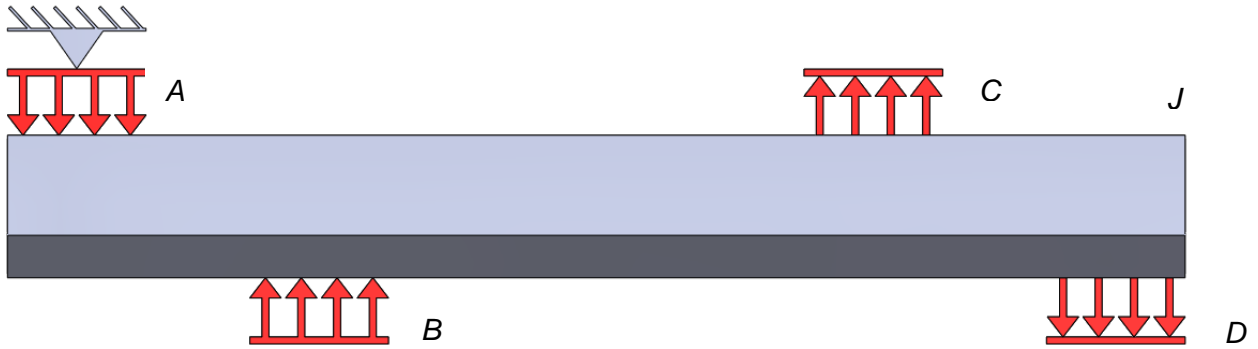
Käytännössä FE -laskenta toteutettiin kahdessa vaiheessa. Ensin todettiin jännitystasot tavanomaisella maksimilimityspituudella  $L$  (kuva 10), joka on tavanomaisesti noin 15 % jatkoksen pituudesta. Jos malli toimi odotetulla tavalla, mutta jännitystasot olivat liian korkeita, luotiin uusi poikkileikkaus optimointityökalulla muokkaamalla lähtöarvoja ja raja-arvoja ja toistettiin analyysi kunnes oltiin tyytyväisiä tuloksiin. Tämän jälkeen voitiin ruveta varioimaan haluttua parametria. FE -analyysin vaiheet on selostettu seikkaperäisemmin seuraavissa kappaleissa.



**Kuva 10.** Kaksijatkoksisen teleskooppipuomin pituussuuntainen poikkileikkaus. Kuvan mittasuhteita on muokattu selkeyden vuoksi. Liukupalojen pituus  $l$  on vakio ja limitys  $L$  liukupalaryhmien A ja B sekä C ja D välillä on sama.

#### 5.5.1 Kaksijatkoksisen teleskooppipuomin keskimmäisen jatkoksen yksinkertaistus

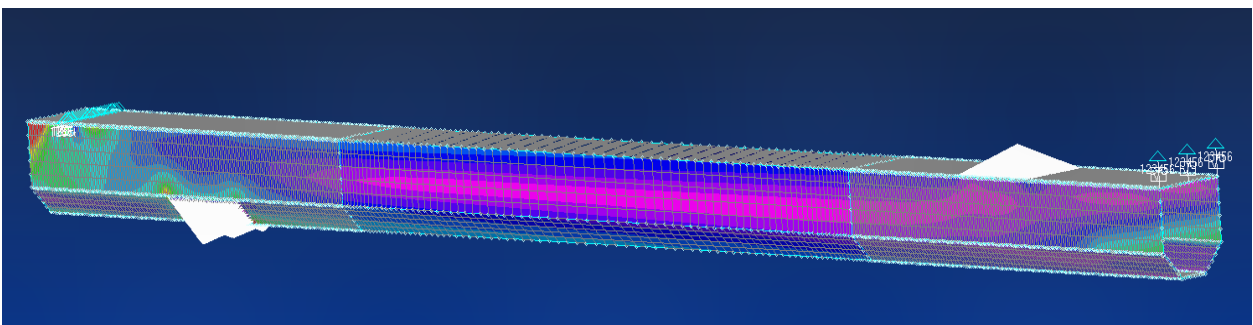
Tutkimus oli rajattu kahdesta jatkoksesta muodostuvan teleskooppipuomin ensimmäiseen jatkokseen, jolloin mallintamis- ja analysointi-aika pysyy kohtuullisena, kun liukupalakontaktit voitiin korvata reaktiovoimilla, jotka lasketaan statiikan voima- ja momenttiasapainoehdojen avulla. Kuvassa 11 on esitetty yksinkertaistetun puomin periaatekuva tukireaktioineen. Reaktiovoimien laskenta on esitetty liitteessä 6. Laskenta tehtiin sillä oletuksella, että limityksen muutos ei vaikuta kokonaispituuteen, vaan uloin jatkos tulee 3 m ulos keskimmäisestä jatkoksesta. Reaktiovoimat jaettiin liukupalojen pinta-alojen perusteella solmukuormiksi FE -laskennassa.



**Kuva 11.** Yksinkertaistetun jatkoksen kuormitusten ja tuennan periaatekuva. *A-D* esittävät liukupalaryhmäkohtaisia kuormituksia ja *J* jousien sijaintia.

Vaikka kuvan 11 puomi on voima- ja momenttitasapainossa, ei mallin reunaehdot ole täysin määritellyt. FE -analysoinnissa käytetty Femap 11.11 NxNastran ratkaisijalla ongelma kierrettiin lisäämällä jousia puomin ulompaan päädyn, joka on merkitty kuvassa *J*:llä. Jousien ylemmät päät liitettiin liikkumattomiin solmuihin ja alemmat poikkileikkauksen ylälaitaan. Muodostettujen jousien malli on yksinkertainen eikä jousivakio muutu suurillakaan siirtymillä. Jousivakio määriteltiin riittävän pieneksi, etteivät jouset vaikuttaisi analyysin tuloksiin merkittävästi.

Todellisessa puomijatkoksessa on lisäksi kuvasta 11 poiketen vahvistava kaulus puomin ulomassa päässä ja mahdollisesti myös puomin sisäpuolella alemmassa päädyssä. Kaulusten oletettiin vahvistavan jatkoksen päitä niin, ettei päätyjen jännityshuippuja eikä muodonmuutoksia ole otettu huomioon eikä siis myöskään niveltuennan aiheuttamaa jännityspiikkiä. Kuvassa 12 on esitetty kuvaa 11 vastaava FE -malli, jossa verkotusta on harvennettu vähemmän kiinnostavalta alueelta palkin keskeltä.



**Kuva 12.** Esimerkkikuva puomijatkoksen FE -mallista

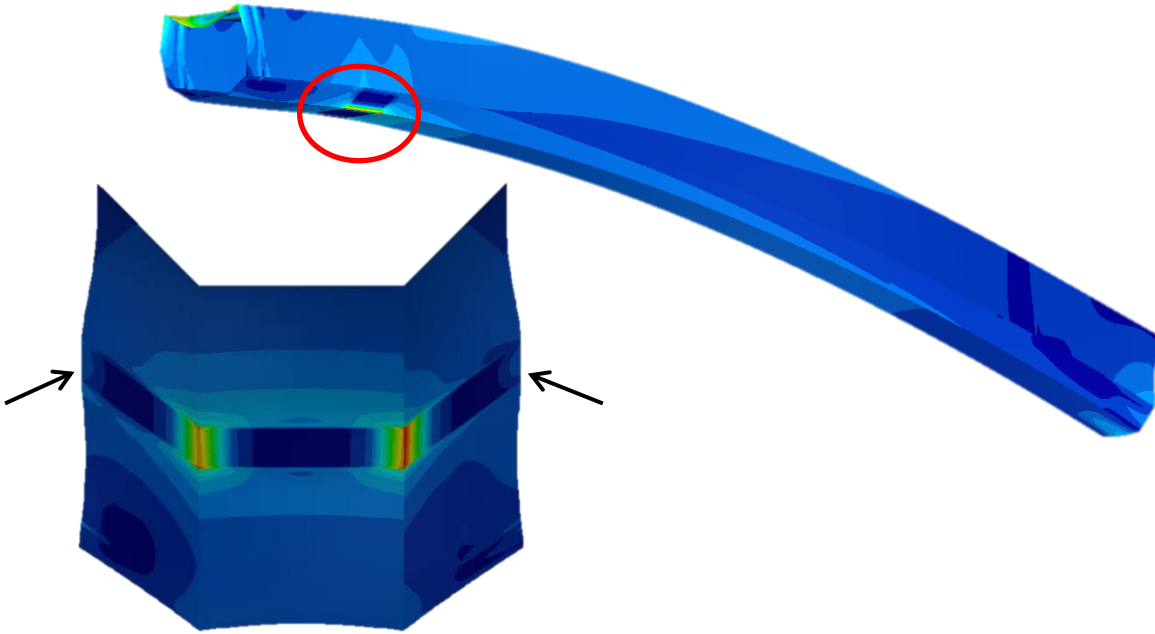
#### 5.5.1.1 Liukupalakontaktin mallintaminen

Liukupalakontaktin mallintaminen ei ole aivan yksinkertaista ja myös asian tutkiminen on hankalaa, koska liukupalat liikkuvat teleskooppipuomi mukana jatkosten välissä. John Deeren vanhempi ra-

kenteiden analysoija Kari Pärssisen mukaan kontaktien mallintamista hankaloittaa myös se, että liukupalojen särmät hioutuvat pois nopeasti käytössä, eikä suorakaidemuoto vastaa todellisuutta kuin käytön alkuvaiheessa. Liukupalakontaktin oikeanlainen mallinnus on tärkeää muun muassa tutkittaessa puomin liu'uttamiseen tarvittavia aksiaalivoimia. (Pärssinen K., haastattelu 2.4.2014)

Femapilla voidaan mallintaa kahden kappaleen välissä olevaa liukupalaa gap -elementtien avulla. Mallinnuksessa olisi pitänyt ottaa huomioon liukupalan materiaali, jatkosten kaulukset sekä levynpaksuudet. Yksittäisen analyysin luomisesta olisi tullut huomattavasti työläämpää ja monimutkaisempien mallien takia myös hitaampaa analysoida, joten tähän mallinnukseen ei tässä työssä ryhdytty. Malleja yksinkertaistettiin myös jättämällä nurkkien pyöristykset mallintamatta.

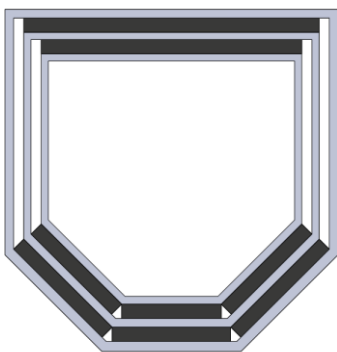
Yksinkertaistetussa mallissa liukupalakontaktit korvattiin liukupalojen alueelle tasan jakautuneella reaktiovoimilla kiinnostavien liukupalojen *B* ja *C* kohdissa. Jos reaktiovoima jaetaan tasaisesti solmukuormiksi liukupalan alueelle ongelmaksi muodostuvat epätodellisen suuret paikalliset muodonmuutokset, jotka todellisessa tilanteessa vastapuolen puomi estäisi. Nyt voimat tuotiin malliin jäykkien RBE2 -elementtien avulla liukupalan alueelle, jolloin ongelmaa ei muodostu. RBE2 -elementin ongelmana on, että se lisää kappaleen jäykkyyttä ja estää RBE2 elementtiin yhdistettyjen solmujen suhteellisen liikkeen. (Chmielewski T., Femap -koulutustilaisuus 20.5.2014) Menetelmä antoi kuitenkin järkevän suuruisia jännityksen arvoja, joten mallin puutteet hyväksyttiin, vaikka paikalliset muodonmuutokset mallintuvatkin väärin. Kuvassa 13 näkyy erään liukupalan aiheuttamat muodonmuutokset.



**Kuva 13.** Jatkoksen muodonmuutokset liukupalaryhmän *B* kohdalla skaalattuna viisinkertaiseksi. Alemmasta kuvasta on poistettu U -profiili. V -profiilin jäykistyminen on merkattu nuolilla, mikä näkyy laidan taipumattomuutena.

#### 5.5.2 Liukupalojen koon varioiminen

Liukupalan kokoa varioitiin kapealla poikkileikkauksella, jonka mitat on esitetty kappaleessa 4.4.3 taulukossa 6. Liukupalan paksuuden määrittelemisessä pitää ottaa huomioon muun muassa palan kiinnitettävyyden ja kuluminen. Liukupalan paksuus vaikuttaa myös ulompien poikkileikkausten koon. Liukupalan leveys maksimoitiin tässä tapauksessa pienemmän poikkileikkauksen geometrian perusteella. Kuva 14 selventää asiaa.

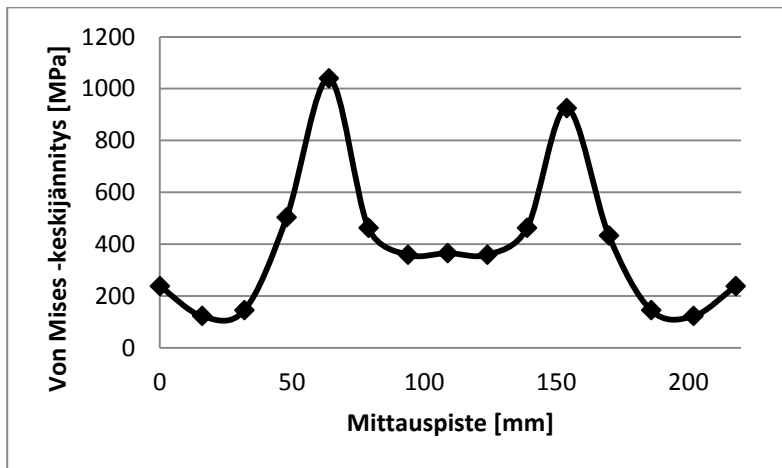


**Kuva 14.** Liukupalojen asettelu ja palojen leveyden määräytyminen geometrian perusteella.



Varioitavaksi suureksi jäi siis liukupalan pituus. Projektipalaverissa todettiin liukupalan pituuden olevan tavanomaisesti noin 150-300 mm. Analyysit tehtiin 150-300 mm liukupaloilla muuttamalla liukupalan pituutta 50 mm kerrallaan, käyttäen aluksi limituspituuksina 600 ja 700 millimetriä.

Analyyseissa kriittisimmäksi paikaksi paljastui liukupalaryhmän *B* sisempi pääty, jonka jännitysja-kauma on esitetty kuvassa 15.

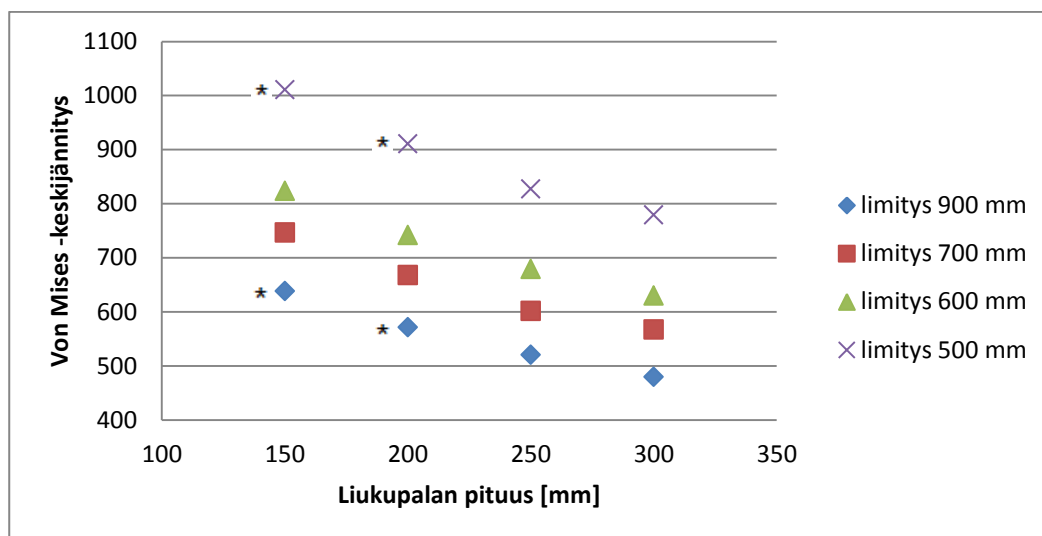


**Kuva 15.** Elementtikohtaiset jännitykset V -profiilin pinnan yli liukupalaryhmän *B* editse. Liukupalan pituus on 300 mm ja limitys 600 mm. Jännitys jakauman perusmuoto pysyi muuttumattomana kaikissa FE -analyyseissa.

Jännityspiikit sijaitsevat V -profiilissa sijaitsevan keskimmäisen liukupalan nurkissa ja vastaavan muotoinen jännitys jakauma oli havaittavissa myös liukupalojen ulommassa päädyssä matalammilla jännitystasoilla. Käytetty liukupalojen mallinnusmenetelmä selittää jännityspiikkien suuruutta, koska mallinnettu liukupala ei vastaa kimmoisempaa todellista liukupalaa. Jännityspiikkejä ei kuitenkaan pienennetty keinotekoisesti, koska on mahdollista, että piikkien väliset jännitystasot ovat puolestaan todellisia matalampia. Vertailun helpottamiseksi ja havainnollistamiseksi määriteltiin jokaisessa analyysissä jännityspiikkien välinen Von Mises -jännityskeskiarvo.

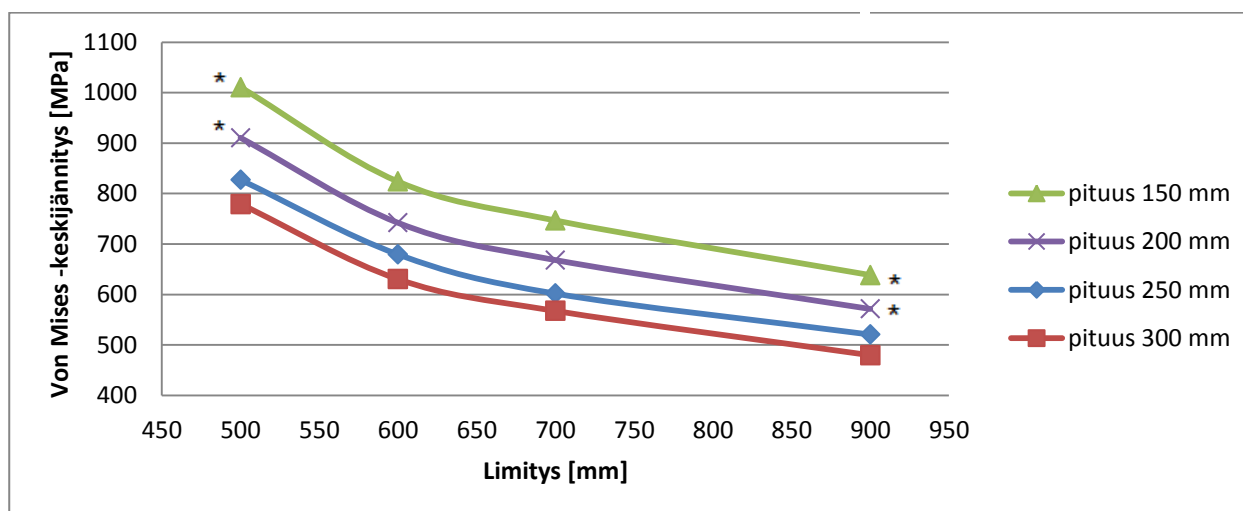
Limituspituuksilla 600 ja 700 mm huomattiin liukupalan pituuden vaikuttavan kääntäen verrannollisesti keskijännityksiin. Samalla huomattiin, että samanpituisten liukupalojen keskijännityksien suhde pysyy lähes vakiona kahdella eri limituspituudella. Havainto pyrittiin varmistamaan tutkimalla samaa poikkileikkausta 500 ja 900 mm limituspituuksilla ja vertailemalla tuloksia (tutkittavat liukupalan pituudet 250 ja 300 mm). Eri limituspituuksien välinen keskijännityssuhde pysyy vakiona, mutta sen arvo määräytyy verrattavista limituspituuksista. Toisin sanoen verrattaessa tuloksia 700 ja 900 mm sekä 500 ja 600 mm limituspituuksilla, molempien tapausten keskijännitysten suhde pysyy vakiona, mutta suhteen suuruus on eri. Tämän perusteella ekstrapoloitiin keskijännityksen

arvot 150 ja 200 mm liukupalapituuksille, jotka on esitetty analysoitujen tulosten kanssa kuvassa 16.



**Kuva 16.** Liukupalan pituuden vaikutus Von Mises -keskijännityksiin. Ekstrapoloidut pisteet on merkitty \* -merkillä.

Vastaavista tuloksista on piirretty kuvan 17 käyrät, jossa esitetään jännitykset limityksen suhteen eri liukupalojen pituuksilla.



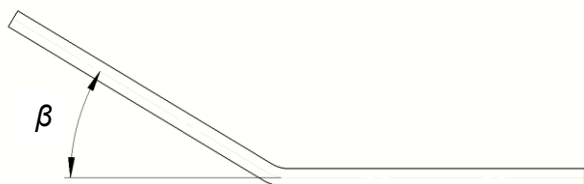
**Kuva 17.** Limityksen vaikutus Von Mises -keskijännityksiin. Ekstrapoloidut pisteet on merkitty \* -merkillä.

Kuvien 16 ja 17 perusteella limityksen pienentäminen nostaa keskijännitystä nopeammin kuin liukupalan pituuden pienentäminen. Ei voida kuitenkaan sanoa, että optimaalinen tulos saadaan mahdollisimman pitkällä liukupaloilla, koska ei tunneta liukupalan koon vaikutusta teleskoopin edes-

takaiseen liikkeeseen esimerkiksi kiilautumisilmiön kautta. Liukupalalle voitaneen määrittellä minimipinta-ala ja edelleen pituus paikallisten muodonmuutosten, keskijännityksen ja limityksen suhteen. Tämä ei kuitenkaan onnistu nykyisten FE -mallien avulla, koska käytetty liukupalakontaktin mallinnustapa jäykistää mallia liikaa.

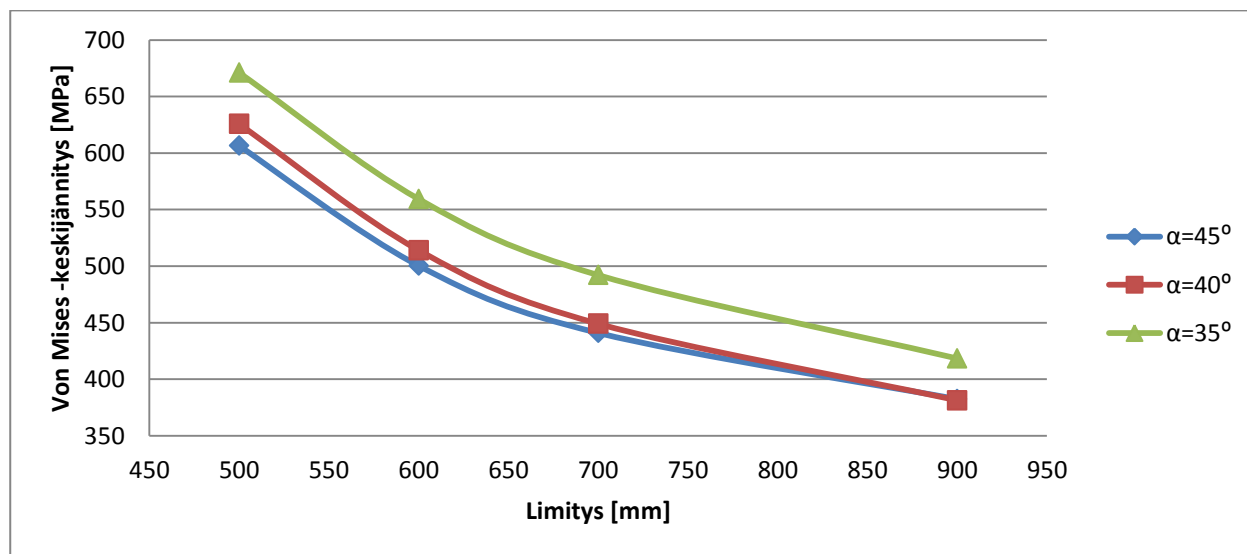
### 5.5.3 Poikkileikkauksen viistekulman $\alpha$ varioiminen

Poikkileikkauksen V -profiilin optimaalisen  $\alpha$  -kulman hakeminen (kuva 7) on haastavaa, sillä kulma vaikuttaa tutkittavien jännitystasojen lisäksi ainakin levykenttien lommahtamiseen sekä liukupalojen kiilautumiseen. Jos puristuksella olevien levykenttien välinen kulma  $\beta$  on alle  $30^\circ$  (kuva 18), vaarana on niin sanottu snap-through -lommahdus, jossa kaksi tai useampia levykenttiä lommahtaa yhtenä levykenttänä eli pokkaus ei jäykistä rakennetta tarpeeksi lommahdusta vastaan.



**Kuva 18.** Snap-through -lommahduskulman  $\beta$  havainnollistaminen

$\alpha$  -kulman muutoksen vaikutusta tutkittiin ensin loiventamalla kapean profiilin kulmaa  $40$  asteeseen ja malli analysoitiin  $600$  mm limityksellä. Keskijännitystasot nousivat kuitenkin liian korkeiksi myötölujuuteen nähden, joten päätettiin luoda uusi leveämpi poikkileikkaus (taulukko 6), jolloin liukupalojen pintapaine pienenee leveämpien liukupalojen ansiosta. Tutkittavat  $\alpha$  -kulmat ovat  $45$ ,  $40$  ja  $35$  astetta ja analyysien tulokset on esitetty limityksen funktiona kuvassa 19.



**Kuva 19.**  $\alpha$  -kulman vaikutus Von Mises -keskijännityksiin limityksen suhteen esitettynä.

Käyrien arvot lähenevät toisiaan limityspituuden kasvaessa, mikä näkyy hieman heikosti kuvasta 19, mutta on kuitenkin havaittavissa lukuarvoja tarkasteltaessa. On myös hyvä huomata leveään ja kapean profiilin keskijännitysten huomattava ero vertaamalla kuvia 17 ja 19. Esimerkiksi 600 mm limityksellä  $\alpha$  -kulman ollessa molemmissa sama  $45^\circ$ , ero on 179 MPa 250 mm liukupalan pituudella. Kapean ja leveän poikkileikkauksen poikkipinta-alojen ero on alle 4 %, mutta analysoitujen keskijännitysten ero on yli 26 %.

#### 5.5.4 Poikkileikkauksen levynpaksuuksien varioiminen

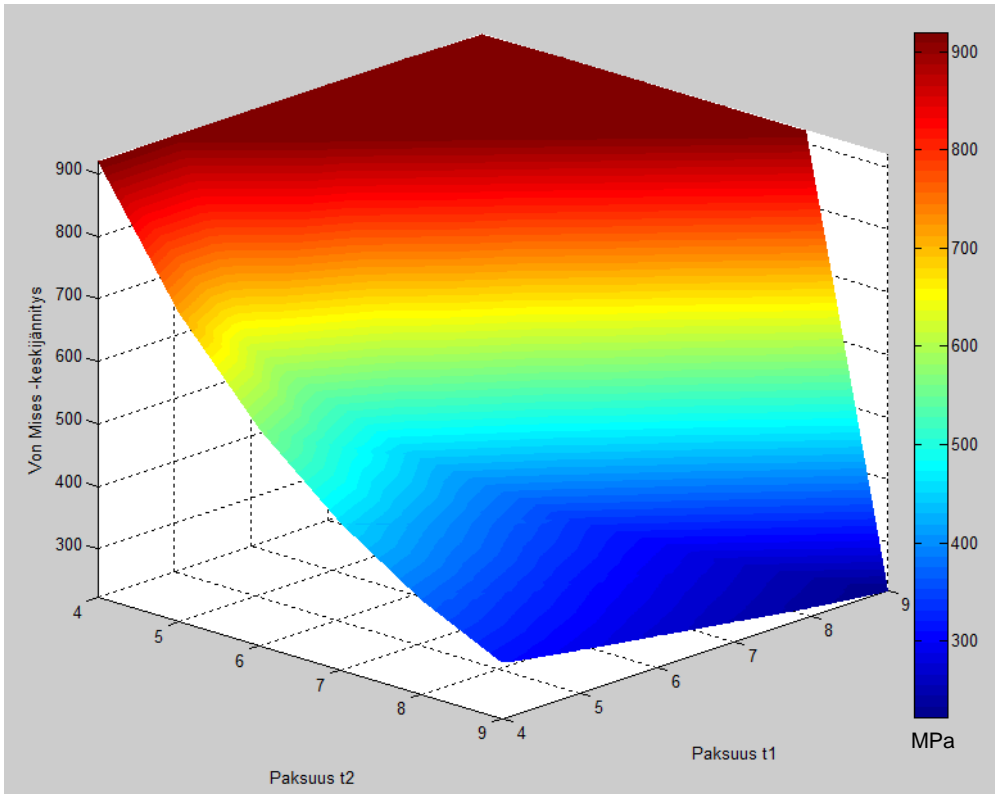
Optimoitavan poikkileikkauksen määrittelyssä päätettiin, että profiili muodostuu kahdesta eripaksuisesta levystä, jotka hitsataan kiinni toisiinsa. Ohuemmalla U -profiililla saavutetaan painonsäästöä, mutta toisaalta kahden eri paksuisen levyn yhdistäminen hitsaamalla vaatii hieman enemmän valmisteluja kuin tasapaksujen levyjen tapauksessa.

Poikkileikkauksen koon takia V- ja U -profiilien asetteleminen väsymisen kannalta optimaalisesti voi olla hankalaa. Tällöin väsymiskestoikää arvioidessa pitää ottaa huomioon levyjen epäkeskiisyys. Liukupalakuormista aiheutuvaa hitsejä vastaan kohtisuoraa jännitystä korottava termi  $k_m$  määräytyy levynpaksuuksista kaavan 12 mukaisesti.

$$k_m = \frac{6 \cdot e}{t_1} \cdot \frac{t_1^n}{t_1^n + t_2^n}, \quad (12)$$

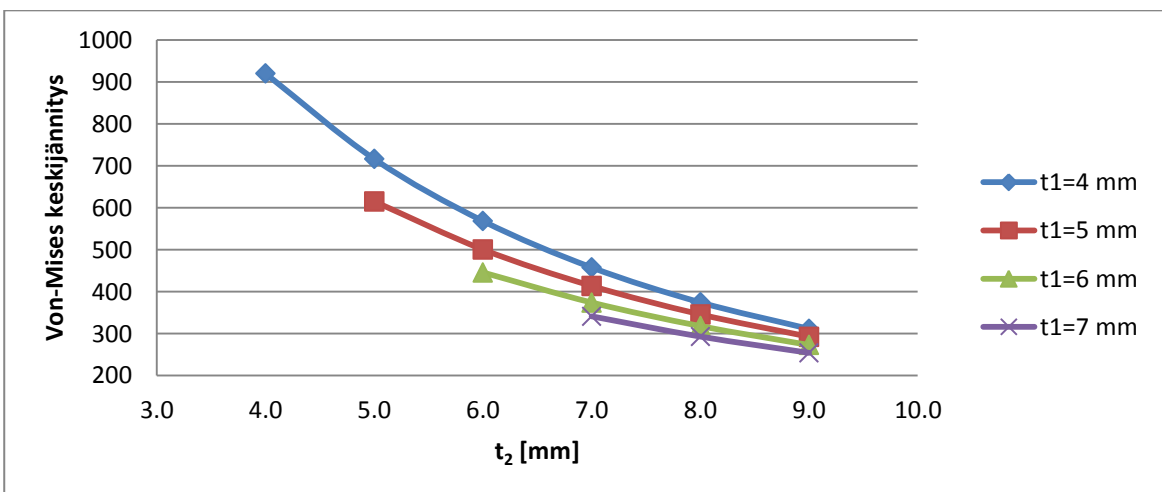
jossa  $t_1$  on pienempi levynpaksuus,  $t_2$  on suurempi levynpaksuus ja  $e$  on levyjen samansuuntaisten levyjen keskilinjojen etäisyys toisistaan. Koetulosten perusteella voidaan käyttää muuttujalle  $n$  arvoa 1,5. (Hobbacher A., 2008, s. 94, 130). Kaava pätee samansuuntaisilla levykentillä, joten liitoskohdan detaljista määräytyy, voidaanko sitä hyödyntää.

Levynpaksuuden vaikutusta tutkittiin V- ja U -profiilien levynpaksuuksilla 4-9 mm niin, että U -profiilin levynpaksuus  $t_1$  on vähintään yhtä suuri kuin levynpaksuus  $t_2$ . Limitys (600 mm) sekä liukupalan pituus (250 mm) pidettiin vakioina ja poikkileikkauksen levykenttien mitat ovat leveän poikkileikkauksen ( $\alpha = 45^\circ$ ) mukaisina. Kaikki tutkitut levynpaksuusyhdistelmät eivät ole välttämättä valmistusteknisesti tai edes lujuusopillisesti järkeviä, mutta suuremmasta datajoukosta on helpompi tulkita puomijatkoksen käytöstä. FE -analyysien tulokset on esitetty kuvissa 20. ja 21.



**Kuva 20.** Eri levyepäsuusyhdistelmien vaikutus keskijännityksiin.  $t_1$  on U -profiilin päsuus ja  $t_2$  on V -profiilin päsuus. Tapauksien, jossa  $t_1$  on suurempi kuin  $t_2$ , arvoksi on asetettu tulosten suurin arvo.

Kuvaan 21 on poimittu muutama poikkileikkaus kuvasta 20 luettavuuden parantamiseksi.



**Kuva 21.** Eri levyepäsuusyhdistelmien vaikutus keskijännityksiin.

Levyepäsuuden  $t_2$  kasvattaminen leveän poikkileikkauksen tapauksessa kuudesta seitsemään millimetriin laskee keskijännitystä noin 87 MPa. Vastaavasti jos  $t_2$ :n päsuutta vähennetään viiteen millimetriin, keskijännitys nousee noin 114 MPa. Vastaavat poikkipinta-alan muutokset ovat +6,4 %

ja -6,4 %. Todellinen poikkipinta-alan pieneneminen tapauksessa  $t_2 = 5$  mm on pienempi, sillä leveä poikkileikkaus myötäilee tasapaksuna, ellei levykentän mittoja kasvateta riittävän taivutusvastuksen aikaansaamiseksi.

#### 5.5.5 FE -laskennan tulosten hyödyntäminen optimoinnissa

FE -laskennan avulla muodostetut käyrät, joita on esitelty aiemmissa kappaleissa, auttavat ymmärtämään minkälaisia vaikutuksia eri parametrien muuttamisella on. Käyrien avulla osataan arvioida helpommin miten päästään parhaaseen kompromissiin, mutta tehokkaampaa on, jos optimointiohjelman tai sopiva apuohjelman avulla nähdään konkreettisesti muutoksen vaikutukset. Tätä varten tuloksia analysoitiin edelleen ja niistä haettiin vuorovaikutussuhteita apuohjelmien muodostamiseksi.

##### 5.5.5.1 Liukupalan koon muutoksen vaikutuksia arvioivan apuohjelman muodostaminen

Liukupalan pituuden havaittiin vaikuttavan kääntäen verrannollisesti Von Mises keskijännityksiin kriittisimmässä paikassa liukupalaryhmä  $B$ :n päädyssä (kuvat 11 ja 13), joten kuvan 16 tuloksille muodostettiin lineaarinen käyränsovitus Microsoft Officen Excelin (2010) taulukkolaskentaohjelmiston avulla. Havaittiin, etteivät käyrät ole yhdensuuntaisia, mutta niiden kulmakertoimien kasvoivat limityksen pienentyessä. Kulmakertoimista piirrettiin käyrä limityspituuksien suhteen ja havaittiin riippuvuus limityspituuteen. Käyränsovitusten avulla voidaan arvioida keskijännityksen muutosta liukupalojen ja limityksen mukaan.

Käyränsovitusten perusteella tehtiin yksinkertainen apuohjelma, jolla voidaan arvioida liukupalan pituuden tai pinta-alan muutoksen avulla keskijännityksen muutosta tietyllä limityksellä. Apuohjelmaan voidaan syöttää joko analysoidun jatkoksen tiedot tai vaihtoehtoisesti tutkia liukupalan koon ja limityksen vaikutuksia keskijännityksiin. Apuohjelman Matlab -koodi on esitelty liitteessä 8. Taulukkoon 9 on kerätty sekä Femapilla analysoituja että apuohjelmalla laskettuja keskijännityksen arvoja eri liukupalan pituuksilla ja limityksillä vertailtavaksi.

Taulukko 9. Apuohjelman tulosten (arvio) ja analysoitujen arvojen (FEM) vertailu.

Keskijännitys eri liukupalojen pituuksilla [Mpa]						
limitys [mm]	uutta liukupalan pituutta vastaava jännitystaso	lähtöpituus->uusi pituus [mm]				
		200->150	150->200	200->250	250->300	
900	FE [Mpa]	638,41	571,28	520,50	479,59	
	arvio [Mpa]	648,91	560,78	493,66	442,87	
	ero [%]	<b>-1,64</b>	<b>1,84</b>	<b>5,16</b>	<b>7,66</b>	
					<b>eron keskiarvo</b>	<b>3,25</b>
700	FE [Mpa]	746,68	668,17	601,69	567,37	
	arvio [Mpa]	733,53	681,31	602,80	536,33	
	ero [%]	1,76	-1,97	-0,18	5,47	
					<b>eron keskiarvo</b>	<b>1,27</b>
600	FE [Mpa]	823,81	742,05	679,41	630,31	
	arvio [Mpa]	801,29	764,58	682,81	620,17	
	ero [%]	<b>2,73</b>	<b>-3,04</b>	<b>-0,50</b>	<b>1,61</b>	
					<b>eron keskiarvo</b>	<b>0,20</b>
500	FE [Mpa]	1010,81	910,49	827,13	779,13	
	arvio [Mpa]	963,60	957,71	857,38	774,02	
	ero [%]	<b>4,67</b>	<b>-5,19</b>	<b>-3,66</b>	<b>0,66</b>	
					<b>eron keskiarvo</b>	<b>-0,88</b>

Apuohjelmalla määritellyt arvot laskettiin niin, että lähtötilanteeksi otettiin lähtöpituutta vastaavan analyysin tulos, jonka muutosta arvioitiin liukupalan pituuden muutoksen suhteen. Eroa voidaan selittää sillä, kuinka hyvin analysoidut arvot osuvat käyränsovituksilla muodostetuille suorille sekä FE -analyysien tuloksien virheillä. Käyränsovituksen luotettavuutta voi arvioida Excelissä  $R^2$  -arvolla: mitä lähempänä  $R^2$  on arvoa 1, sitä parempi sovitus on. (Excel-ohje, 2014) Kuvan 16 tuloksiin tehtyjen käyränsovitusten  $R^2$  arvot ovat väliltä 0,973-0,988 ja kulmakertoimia arvioivan käyränsovituksen  $R^2$  arvo on 0,992.

#### 5.5.5.2 Poikkileikkauksen levynpaksuuden varioinnin vaikutuksia arvioivan apuohjelman muodostaminen

Vastaavasti kuin liukupalan kokoa varioidessa aloitettiin levynpaksuuden varioinnin vuorovaikutussuhteiden haku tekemällä käyränsovitus kuvan 21 tulospisteille. Vaikka toisen asteen polynomi-funktiosovitus onnistui tarkasti, ongelmaksi muodostui sellaisten tilanteiden tutkiminen, joissa  $t_1$  ei pysy vakiona.

Kriittisimmän kohdan (liukupalaryhmän B sisempi pääty) keskijännitysten välisiä suhteita eri levynpaksuuksilla empiirisesti tutkittaessa löydettiin kolme eri riippuvuutta (kaavat 13-15). Löydettyjen vuorovaikutusten avulla voidaan laskea muodostetun apuohjelman avulla poikkileikkausvariaatiot,

joiden levynpaksuudet eroavat korkeintaan 2 mm verrokkitaipauksesta. Jos verrokkitaipauksen levynpaksuudet ovat lähtökohtaisesti jo melko toimivat käytännön sovelluksessa, ei suurempiin levynpaksuuksien muutoksiin ole normaalisti tarvetta. Apuohjelma on esitelty liitteessä 9.

Jos toista tai molempia levynpaksuuksia kasvatetaan 1 mm, voidaan uutta keskijännitystä arvioida FE -analyysidatan perusteella johdettujen kaavojen 13-15 avulla. Jos  $t_1$ :n paksuutta kasvatetaan 1 mm, käytetään kaavaa 13,

$$\sigma_k \approx \sigma_{k0} \cdot \frac{1+1,15\left(\frac{t_{01}}{t_1}\right)^2}{2}, \quad (13)$$

missä,  $\sigma_k$  on uusi keskijännitys,  $\sigma_{k0}$  on lähtötilanteen (analysoitu) keskijännitys,  $t_{01}$  on nykyinen U -profiilin levynpaksuus ja  $t_1$  on uusi levynpaksuus. Vastaavasti jos V -profiilin levynpaksuutta kasvatetaan 1 mm, uusi keskijännitys  $\sigma_k$  voidaan arvioida kaavasta 14,

$$\sigma_k \approx \sigma_{k0} \cdot \frac{1+0,9\left(\frac{t_{02}}{t_2}\right)^2}{2}, \quad (14)$$

missä  $t_{02}$  on nykyinen V -profiilin levynpaksuus ja  $t_2$  on uusi levynpaksuus. Jos molempia levynpaksuuksia kasvatetaan 1 mm, voidaan käyttää kaavaa 15,

$$\sigma_k \approx \sigma_{k0} \cdot \left(\frac{t_{02}}{t_2}\right)^2. \quad (15)$$

Kaavoja 13 ja 14 ei voi käyttää suoraan, jos halutaan pienentää levynpaksuutta. Taulukkoon 10 on laskettu eri levynpaksuusvariaatioita niin, että lähtöpaksuudet  $t_{01}$  ja  $t_{02}$  vaihtelevat ja uudet paksuudet  $t_1 = 5$  mm ja  $t_2 = 6$  mm pysyvät vakiona.



Taulukko 10. Apuohjelman tulosten (arvio) ja analysoitujen arvojen (FE) vertailu.

$t_{01}$ [mm]	$t_{02}$ [mm]	$\sigma_{ko}$ (FE) [Mpa]	$\sigma_k$ (arvio) [Mpa]	$\sigma_k$ (FE) [Mpa]	Ero [%]
4	5	716,07	497,26	500,43	-0,64
4	6	457,63	493,20	500,43	-1,47
4	7	457,63	*478,23	500,43	-4,64
5	5	614,97	499,66	500,43	-0,15
5	7	413,55	497,89	500,43	-0,51
6	6	445,68	495,58	500,43	-0,98
6	7	374,02	509,08	500,43	1,70
7	7	341,15	503,38	500,43	0,59
7	8	292,89	520,69	500,43	3,89

\* laskenta on tehty kahdessa vaiheessa, koska apuohjelma ei osaa käsitellä samanaikaisesti levynpaksuuksien erisuuntaisia muutoksia.

Taulukossa 10 esitetyn otannan virheen ja analysoitujen tulosten eron keskiarvo 0,25 % ja arvioitujen tulosten hajonta on 8,98 MPa virhemarginaalin ollessa noin 4 %. Laskenta tehtiin kahden desimaalin tarkkuudella. Tulosten erot ja hajonta ovat hyväksyttävän pieniä, joten apuohjelma laskee luotettavan keskijännitysarvion riippumatta levynpaksuuksien muutossuunnasta. Apuohjelma ei ota huomioon esimerkiksi taivutusvastuksen muutosta ja onkin hyvä tarkistaa, että uusi poikkileikkaus täyttää myös muut tarvittavat lujuuksitekniset vaatimukset.

Apuohjelma ei luonnollisestikaan osaa ennustaa kaikki variaatioita yhtä tarkasti, mutta analysoidun ja arvion välisen eron ei huomattu nousevan yli 10 % yhdessäkään tapauksessa. Jos arvioidaan yli 2 mm levynpaksuuden muutoksia laskemalla arvio useammassa osassa, virheen suuruuteen vaikuttaa myös laskentajärjestys ja käytettävät kaavat. Kaavan 15 voi esimerkiksi korvata laskemalla kaavojen 13 ja 14 avulla kahdessa osassa.

#### 5.5.6 FE -laskennan tulokset

FE -analyysissa tutkittiin Von Mises -keskijännityksen kehittymistä varioimalla kolmea kohdetta: liukupalojen kokoa, V -profiilin  $\alpha$  -kulmaa sekä poikkileikkauksen levynpaksuuksia. Keskijännitys laskettiin elementtikohtaisista jännityksistä, jotka mitattiin liukupalaryhmä B:n sisemmästä päädyistä alimman liukupalan editse. Mittauskohta oli jännitysten perusteella kriittisin paikka jokaisessa FE -analyysissa.

FE -analyysien tavoitteena oli tutkia teleskooppipuomin yhden jatkoksen käyttäytymistä eri tilanteissa niin, että optimointi on otettu huomioon. Kun tutkittava poikkileikkaus oli muodostettu kappalessa 5.4 esitetyllä optimointityökalulla ja kun lisäksi tiedettiin tavanomainen limityspituus (15 %

jatkoksen pituudesta), ei poikkileikkausta, jonka keskijännitys nousee tavanomaisella limityspituudella selvästi yli myötörajan, hyväksytyt jatkotutkimuksiin. Tällaisessa tilanteessa luotiin uusi poikkileikkaus muuttamalla optimointityökalun raja-arvoja yritys- ja erehdys -menetelmällä.

Vaikka näin toimimalla saavutettiin keskijännitykset, jotka jäivät alle myötörajan, käytetty liukupalojen kontaktimalli jäykistää mallia niin, etteivät paikalliset muodonmuutokset näy analyyseissa oikein. Paikallisille muodonmuutoksille ei myöskään määritelty raja-arvoa, joten on mahdotonta sanoa rajoittavatko liian suuret paikalliset muodonmuutokset liukupalojen liikettä, vai tuleeko jatkoksen myötöraja vastaan ensin. Tulosten verifioiminen oli muutenkin hankalaa, koska todellisissa puomeissa on jäykistävä kaulus ainakin uloimmassa päässä. Lisäksi puomin ulompaa päätä on voitu viistää painonsäästötarkoituksessa. Jos puomin kaulukset lisätään malliin, pitää myös ottaa huomioon edelliseen ja seuraavan puomin kaulukset, jolloin FE -malli pitää tehdä kolmesta osasta. Tällöin myös liukupalakontakti pitää mallintaa eri tavalla kuin nykyisissä malleissa. Poikkileikkausta yksinkertaistettiin lisäksi jättämällä levyjen taitoskohtien pyöristykset sekä pitkittäishitsit mallintamatta. Poikkileikkausta pyöristyksillä ja ilman vertailtiin keskenään ja huomattiin, että tuloksissa on korkeintaan noin 5 % ero eri mittausväleillä.

Jos hyväksytään mallien rajoitteet ja tarkastellaan tuloksia, niin huomataan kuvista 17 ja 19, että limityksen muutos vaikuttaa keskijännityksiin samaan tyyliin, kun varioidaan liukupalan kokoa sekä V -profiilin kulmaa. Myös poikkileikkaus on kuvien 17 ja 19 tilanteissa eri. Limityksen vaikutus keskijännityksiin seuraa samaa trendiä eri liukupalojen kooilla,  $\alpha$  -kulmilla ja poikkileikkauksilla - vain jännitystaso vaihtelee tilannekohtaisesti. Toisin sanoen limitys-keskijännitys -riippuvuus ei muutu  $\alpha$  -kulmaa tai liukupalan kokoa varioidessa. Levynpaksuus-keskijännitys -suhdetta limitykseen ei tutkittu.

Kuvan 16 tulosten perusteella liukupalan koko vaikuttaa melko tarkalleen kääntäen verrannollisesti keskijännitykseen; lisäksi kuvan 16 suorien kulmakertoimien havaittiin olevan riippuvaisia limityspituuksista. Variointivälinä 50 mm vaikuttaa hieman liian pitkältä, sillä muutokset ovat suurimmillaan noin 100 MPa kahden liukupalan pituuden välillä. V -profiilin levykenttien pituuksien suhteen mahdollista vaikutusta ei otettu huomioon laskennassa.

$\alpha$  -kulman variointi vaikutti keskijännityksiin verrattain vähän eikä välttämättä ole edes perusteltua optimoida kulmaa jännitysten perusteella. Jos poikkileikkauksen optimimuodon kulma ei ole keskijännityksen suhteen optimissa eli 45 asteessa, voi muoto olla silti täysin perusteltu esimerkiksi liukupalojen kiilautumisen kannalta. Keskijännitystä voidaan tarvittaessa pienentää esimerkiksi korottamalla levynpaksuutta. Levynpaksuuden muuttaminen yhden millimetrin verran laskee monessa tapauksessa keskijännitystä yli 100 MPa painonsäästön kustannuksella. Tuloksia tulkittaessa on

hyvä huomata melko vähäinen verrokkitulosten määrä, sillä johtopäätökset on tehty ainoastaan analysoitujen tulosten perusteella. Taulukkoon 11 on kerätty työssä havaitut eri parametrien väliset vuorovaikutussuhteet.

Taulukko11. Työssä havaitut parametrien väliset vuorovaikutussuhteet.

	Limityspituus	Liukupalan pituus	V-profiilin kulma	Levyn- paksuudet	Kiilautuminen	Jännitykset	Poikkipinta- alan muoto	Poikkipinta-ala
Limityspituus	+	- 1)	- 1)	(-) 1)	(+) 1)	+	(+) 1)	(+) 1)
Liukupalan pituus	- 1)	+	+1	EV	EV	+	?	?
V -profiilin kulma	- 1)	+1	+	EV	(+)	+	+	+ 1)
Levynpaksuudet	(-) 1)	EV	EV	+	(+) 2)	+	-	+
Kiilautuminen	(+) 1)	EV	(+)	(+) 2)	+	(+)	(+)	(+)
Jännitykset	+	+	+	+	(+)	+	+	+
Poikkipinta-ala muoto	(+) 1)	?	+	-	(+)	+	+	X
Poikkipinta-ala	(+) 1)	?	+ 1)	+	(+)	+	-	+

+ Havaittu vuorovaikutus

- Ei havaittua vuorovaikutusta

1) Vuorovaikutus jännitysten kautta

2) Vuorovaikutus muodonmuutosten kautta

() Veikkaus mahdollisesta vuorovaikutuksesta

EV Ei osata varmuudella sanoa

Muodostetut apuohjelmat pohjautuvat FE -analyysien tuloksiin ja niitä voitaisiin hyödyntää myös poikkileikkauksen optimointityökalussa yhdistämällä koodit toisiinsa. Yhdistämällä apuohjelmat optimointityökaluun voidaan parantaa optimointitulosta ja vähentää näin iterointikertoja. Ilman hyviä lähtöarvoja poikkileikkauksen optimointityökalu tarjoaa leveään ja kapeaan poikkileikkaukseen (taulukko 6) verrattuna ohuempia levynpaksuuksia, jolloin työläitä iterointikertoja olisi tullut todennäköisesti nykyistä enemmän. Levynpaksuuksien variointi -apuohjelman liittämällä optimointityökaluun voitaisiin siis tehostaa optimointia.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Yrityskyselyn tulosten perusteella ei ollut mielekästä kerätä monitavoiteoptimoinnin lähtötietoja yleisellä tasolla, koska optimointia hyödynnetään pienemmissä osakokonaisuuksissa tai yksittäisissä osissa. Lähtötiedot vaihtelevat paljon myös yritysten sisällä erilaisten työkoneiden kesken. Mittojen raja-arvot määräytyvät usein ympäröivän geometrian perusteella, mutta niihin vaikuttaa myös seikat, joille voi olla mahdotonta antaa numeerista arvoa. Puomirakenteissa tällainen on esimerkiksi puomin aiheuttama näköeste kuljettajalle, joten lähtötiedot kannattaa kerätä tapauskohtaisesti optimointikohteen mukaan.

Lähtöarvojen rajauksen avulla voidaan nopeuttaa laskentaa, mutta ehkä vielä tärkeämpää on määrittellä esimerkiksi lujuusopin perusteella määräytyviä raja-arvoja ja rajoitteita. Esimerkiksi taipumarajoite määrää suoraan vaadittavan minimiarvon taivutusneliömomentille ja PL3:n mukaan määräytyy lommahtavan levykentän leveys-paksuus -suhteen maksimiarvo. Lujuusopin avulla määrätyt raja-arvot ovat perusteltuja, kun suunnittelijan asettamat lähtö- ja raja-arvot määräytyvät osittain myös kokemuksen kautta, joita voi olla joskus hankalaa ja työlästä perustella pelkästään lujuusopin avulla. Suunnittelijan perustietojen tärkeyttä ei pidä kuitenkaan aliarvioida ja niiden avulla voidaan vähentää iterointikertojen määrää merkittävästi.

Lähtöarvojen tärkeys korostui poikkileikkauksen optimointityökalun tuloksissa, kun optimointi suoritettiin hyvin väljillä raja-arvoilla. Tulokseksi saatiin erittäin ohutseinämäinen poikkileikkaus suurella V -profiilin viistokulmalla. FE -analyseissa molemmat tapaukset todettiin toimimattomiksi. Tulos oli tästä huolimatta optimi rajoiteyhtälöiden määräämissä rajoissa. Tiukemmilla lähtöarvoilla voidaan kompensoida rajoiteyhtälöiden puutteita, mutta vaarana on, että optimiratkaisu jää näin rajauksen ulkopuolelle.

Työssä perehdyttiin muodostetun optimointityökalun lisäksi lyhyesti kuuteen kaupalliseen monitavoiteoptimointiohjelmistoon. Yrityskyselyn ja ohjelmistoselvityksen perusteella mahdollisen yhteisen monitavoiteoptimioijan hankkiminen voi olla haastavaa yhteensopivuusongelmien takia. Monitavoiteoptimointiohjelmistojen hankintahinnat voivat nousta kymmeniin tuhansiin euroihin lisenssin määrän perusteella. On myös muistettava, että optimointiohjelmisto tarvitsee FE -ohjelmiston rinnalleen. Optimointi voi myös vaatia tietokoneelta huomattavan paljon laskentatehoa optimointiongelman monimutkaisuudesta johtuen. Voidaan myös olettaa, että monitavoiteoptimoinnin käyttäminen osana suunnitteluprosessia saa aikaan tarpeen myös muuttaa työskentelytapoja. Suunnittelun kustannusten kasvua on arvioitava kriittisesti suhteessa saavutettaviin hyötyihin. Suunnittelu-työ on kertaluontoinen, kun taas hyöty kertaantuu tuotteen lukumäärän mukaan.

FIMA:n projektia ohjaavissa palavereissa palattiin usein optimointitehtävän formuloinnin tärkeyteen. Tuotteen jatkokehityksessä on yleensä melko helppoa määrittellä ominaisuudet, jotka vaativat parannusta sekä kohteet, joihin ollaan tyytyväisiä. Uuden rakenteen suunnittelussa on hankalampaa määrittellä kohteet, jotka voi jättää optimoinnin ulkopuolelle. Myös huono optimoinnin formulointi kostautuu jossain vaiheessa suunnitteluprosessia. Teleskooppipuomi on haastava optimointikohde, koska puomin täytyy toimia myös muilla kuin maksimilimityspituuksilla, puomiin kohdistuu staattisia sekä väsyttäviä kuormituksia ja lisäksi optimoinnissa pitää ottaa huomioon asioita, joiden toimivuutta on hankala arvioida numeerisesti.

Työssä muodostetun teleskooppipuomin jatkoksen optimointityökalun ratkaisuperiaate on epälineaarinen rajoitetulla ratkaisujoukolla. Lähtöarvojen lisäksi ratkaisujoukkoa rajaavat PL3:n säännöt, sallittu taipuma sekä staattisen tai väsyttävän kuormituksen perusteella määräytyvä minimitaivutusvastus. Optimoinnin tuloksena saadaan muun muassa poikkileikkauksen mitat, taivutusvastus sekä taipuma, joita voidaan käyttää edelleen monitavoiteoptimoinnin reunaehtoina ja vaatimuksina.

Työkalun tulokset ovat luotettavia ja konvergoivat. Työkaluun pystyy lisäämään ja poistamaan ominaisuuksia melko yksinkertaisesti ja sen käyttö on helppoa. Työkalun puutteena on vain yhden kuormitustyyppin ja -suunnan käsittelymahdollisuus. Työkalu on räätälöity yhdelle poikkileikkaukselle, mutta samalla perusidealla voidaan työkalun koodia muokkaamalla optimoida myös useampaa poikkileikkausta.

Useamman poikkileikkauksen rinnakkain optimoimisella saavutetaan useita etuja verrattuna yhden poikkileikkauksen optimointiin. Yhden poikkileikkauksen valmistuskustannukset voidaan optimoida vain tiettyyn rajaan asti, mutta ei päästä vertailemaan kustannuksia muihin vaihtoehtoihin, joilla voitaisiin päästä suurempiin säästöihin. Tässä työssä valmistuskustannusten arviointitavat vain todettiin, eikä niitä hyödynnetty optimoinnissa. Useamman poikkileikkauksen optimoiduilla tuloksilla voidaan helposti perustella tietyn ratkaisun hyvyys tai heikkous uusiin poikkileikkauksiin verrattuna myös muuten kuin kustannusten perusteella. Myös materiaalivalintaa voidaan perustella optimoinnin avulla. Työssä materiaalivalintaa ei ole perusteltu kuin suhteellisella hinnan avulla, mutta kirjallisuudesta löytyy monipuolisempia menetelmiä materiaalivalinnan avuksi, joita voidaan yhdistää nykyistä paremmin optimointiin.

Optimointityökalun tuloksia tutkittiin edelleen FE -analyysien avulla. Analyyseilla tutkittiin jatkoksen käyttäytymistä, kun varioitiin liukupalojen kokoa, limitystä, V -profiilin viistokulmaa sekä levynpaksuutta. Optimissa poikkileikkauksessa ei ole otettu huomioon liukupalojen aiheuttamaa paikallista kuormaa, mikä havaittiin myös epäkelvoista FE -analyysien tuloksista. Poikkileikkauksen mittoja

jouduttiin muokkaamaan uusien lähtöarvojen avulla, jotta saatiin hyväksyttäviä tuloksia. Samalla siis huomattiin optimointiohjelman vaativan FE -analysointiohjelman rinnalleen, jotta poikkileikkauksen toimivuus voidaan varmistaa.

Vaikka FE -analyysia tehtiin tutkimuskohdekohtaisesti verrattain vähän, voitaneen kuitenkin olettaa, että puomijatkoksesta löydetyt vuorovaikutussuhteet pätevät pääpiirteiltään, vaikka esitetyt lukuarvot eivät olisikaan absoluuttisesti oikein mallin yksinkertaistuksien vuoksi. Vuorovaikutussuhteita tutkimalla voidaan oppia puomin käyttäytymisestä niin, että voidaan tehdä valistuneempia suunnittelupäätöksiä puomin jatkokehityksessä ilman, että muutoksen vaikutusta tarvitsisi välttämättä tarkistaa FE -analyysien avulla. Liukupalan koon sekä poikkileikkauksen levynpaksuuksien variaation avulla löytyneistä vuorovaikutussuhteista muodostettiin molemmista omat apuohjelmat, joiden avulla voidaan helposti ja tarkasti arvioida liukupalan koon tai levynpaksuuden muutosta keskijännityksiin ilman työlästä FE -analyysia. V -profiilin  $\alpha$  -kulman variaationista ei tehty omaa apuohjelmaa, koska  $\alpha$  -kulma vaikuttaa jatkoksen lujuusominaisuuksien lisäksi liukupalojen kiilautumiseen, jota voi olla hankala arvioida numeerisesti.

Apuohjelmia ei kuitenkaan ole liitetty poikkileikkauksen optimointiohjelmaan, koska ne muodostettiin verrattain pienen datajoukon pohjalta. Levynpaksuuden variaation vaikutusta arvioiva apuohjelma ei osaa ottaa huomioon limityksen muutoksen tai liukupalan koon mahdollista vaikutusta laskentaan. Liukupalan koon variaation vaikutusta arvioiva apuohjelman ongelma on siinä, että se on muodostettu vain yhden poikkileikkauksen analyysien pohjalta, joten sitä ei voida käyttää luotettavasti suoraan muihin poikkileikkauksiin ilman lisätutkimusta.

Apuohjelmista voidaan kehittää tehokkaita suunnittelun apuvälineitä sekä niiden avulla voidaan vähentää optimoinnin iterointikertojen määrää. Apuohjelmien tulokset ovat tarkkoja tutkimusdatan sisällä, mutta niiden toimivuutta ei ole verifioitu muissa tapauksissa. Diplomityön yhteydessä ei ollut mahdollisuutta analysoida tarpeeksi dataa, jotta apuohjelmat olisi saatu valmiiksi. Apuohjelmat demonstroivat kuitenkin hyvin, miten FE -analyysin tulokset voidaan takaisinkytkä numeeriseen optimointiin parantamaan optimointituloksia. Apuohjelmien avulla voidaan myös tutkia puomin parametriherkkyyttä.

Muodostettua optimointityökalua voidaan käyttää suunnittelun apuvälineenä sellaisenaan tai sen tuloksia voidaan käyttää rajaamaan monitavoiteoptimoinnin lähtöarvojoukkoa. Myös muodostettuja apuohjelmia voidaan hyödyntää joko osana optimointityökalua tai suunnittelun apuvälineinä, kun apuohjelmien tulokset on ensin verifioitu. Työkalut ohjelmoitiin Matlab -ohjelmistolla, joten niitä voidaan hyödyntää melko suoraan monitavoiteoptimoinnissa, jos monitavoiteoptimoijana käytetään Matlabin Global optimization toolbox -lisäosaa. Tehokas rakenteen optimointi vaatii kuitenkin rin-

nalleen FE -ohjelmiston sopivalla takaisinkytkennällä, jotta vältetään työläältä yritys-ja-erehdys - menetelmän käytöltä.

## 7 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Väsymiskestävyyden optimointi sai kaikilta yrityskyselyyn vastanneilta korkeimman mahdollisen painoarvon, kun selvitettiin eri optimointikohteiden tärkeyttä ja painoarvoa. Väsymiskestävyyden optimoinnin haaste on, ettei välttämättä tiedetä mikä tai mitkä kohdat ovat väsymisen kannalta kriittisimmät ilman FE -analyysia. Jos väsymiskestävyyttä pitää toiminnallisten vaatimusten jälkeen tärkeimpänä suunnittelukriteerinä, pitää malli luoda kuitenkin jonkun muun suunnittelukriteerin mukaan, että voidaan aloittaa väsymisen optimointi. Tämän lisäksi mallia ei voida yksinkertaistaa, koska niin voidaan ohittaa väsymisen kannalta kriittinen yksityiskohta. Jos luotu malli on väsymisen kannalta huono, aikaa vieviä optimoinnin iterointikertoja voi kertyä useita.

Työssä väsymiskestävyyden tarkastelu jäi taivutusvastuksen määrittämiseen staattisen ja väsyttävän kuormituksen perusteella. Väsymiskestävyyden tutkiminen ja optimointi edellyttävät FE -ohjelmiston käyttöä optimoinnin yhteydessä. Esimerkiksi Hot Spot -menetelmällä väsymiskestoa arvioitaessa analyttisiä laskentamenetelmiä on huonosti tarjolla. IIW:n suosituksissa neuvotaan, miten väsymiskestoa pitää arvioida FE -analyysien avulla (Hobbacher A., 2008, s. 23-31), mutta optimointia varten pitäisi lisäksi kehittää järjestelmä, joka hakee tyydyttävän tuloksen useamman perättäisen iterointikierron avulla. Puomioptimointi teemapäivän perusteella monitavoiteoptimointiohjelmilla voidaan optimoida helposti perusaineen väsymistä, mutta hitsin väsymiskeston optimointi on vielä haasteellista eli aihe vaatisi jatkotutkimusta.

Teleskooppipuomin optimoimisen kannalta erityisesti liukupalojen käyttäytymistä kannattaisi tutkia tarkemmin. Liukupalojen ollessa oleellinen osa teleskooppimekanismia on hieman yllättävää, ettei aihetta ole tutkittu ainakaan FIMA:n sisällä. Liukupalan pintapaineen kesto määrittänee ainakin osittain palan minimipinta-alan, mutta mitkä parametrit rajoittavat maksimikokoa ja miten poikkileikkauksen geometria vaikuttaa liukupalaan? Myös liukupalan kulumisen ja nimenomaan kuluneen palan kontaktin mallintaminen FE -analyseissa vaatii lisätutkimusta. Teleskooppipuomin jatkoksen optimoinnin jatkokehityksessä pitää ottaa paremmin huomioon jatkos osana teleskooppipuomia, jolloin voidaan hakea optimipoikkileikkausten lisäksi jatkoskohtaiset limityksen ja liukupalojen mitat. On kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että koko puomin optimointimallista tulee haastava jo monimutkaisen kuormitustapauksen takia. Jos puomi optimoidaan jatkos kerrallaan, ei kokonaisuus ole välttämättä optimi.

Diplomityön rajauksen takia ei työssä käsitelty nivelpuomia eikä nivel- ja teleskooppipuomin yhdistelmiä. Näiden puomirakenteiden optimointi yleisellä tasolla voi olla teleskooppipuomia hankalampaa valmistajakohtaisten rakenneratkaisujen erilaisuuden takia. Jatkotutkimuksessa pitäisi siis sel-



vittää voiko nivelpuomeista sekä nivel- ja teleskooppipuomien yhdistelmistä tehdä yleisluontoista optimointimallia vastaavasti kuin tässä työssä, vai pitääkö optimointi räätälöidä puomikohtaisesti. Jos yleisluontoisen mallin luominen onnistuu, voidaan tutkimusta jatkaa edelleen monitavoiteoptimoinnin suuntaan ja tehdä puomikohtainen räätälöinti myöhemmin.

Puomin poikkileikkausta optimoidessa huomattiin, ettei kahden eri paksuisen yhdensuuntaisen levyn lommahdukselle ole analyyttistä ratkaisumenetelmää. Asiaa ryhdytään mahdollisesti tutki-  
maan LUT:ssa kandidaatti- tai diplomityönä. Luomalla tapauksesta analyyttisen ratkaisumenetel-  
män eri kuormitustilanteissa, sitä voitaisiin hyödyntää yleisesti myös muualla kuin puomien poikki-  
leikkauksien analyyttisessä optimoinnissa. Ratkaisumenetelmän puuttuminen voidaan kiertää FE -  
analyysillä, mutta optimiratkaisun hakeminen on näin työläämpää.

## 8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena on tehdä monitavoiteoptimoinnista ja sen hyödyntämisestä työkonepuomien optimoinnissa laaja pohjustustyö laajempaa tutkimusta varten yhteistyössä Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja projektiin osallistuvien FIMA ry:n jäsenten kanssa. Tutkimusta jatketaan mahdollisesti Tampereen teknillisen yliopiston tohtorikoulussa työssä tehtyjen johtopäätösten sekä jatkotutkimusehdotusten perusteella.

Käytännössä työssä selvitettiin, mitä monitavoiteoptimoinnilla tarkoitetaan, esiteltiin lyhyesti muutama monitavoiteoptimointiohjelmisto pääominaisuuksineen ja haettiin case -tutkimuksessa optimoinnin avulla lähtöarvoja teleskooppipuomin monitavoiteoptimoinnille sekä havainnoitiin optimointiprosessin etuja ja ongelmakohtia. Optimoinnin tuloksia tutkittiin edelleen elementtimenetelmän avulla ja haettiin parametrien välisiä riippuvuussuhteita monitavoiteoptimoinnin tueksi. Nivelpuomit ja nivel- ja teleskooppipuomien yhdistelmät rajattiin lähtöarvohaun ulkopuolelle.

Työn tuloksena saatiin poikkileikkauksen optimointityökalu, jonka avulla voidaan laskea luotettavasti poikkileikkaukselle optimit mitat painon suhteen niin, että jatkoksen lommahdusrajoitteet, taipuvuusvastus sekä taipuma otetaan huomioon. Optimin poikkileikkauksen käyttäytymistä tutkittiin FE -analyysien avulla ja tuloksista havaittiin liukupalojen koon, jatkosten limityksen, poikkileikkauksen levynpaksuuksien sekä poikkileikkauksen muodon välisiä vuorovaikutussuhteita, joiden avulla muodostettiin kaksi apuohjelmaa parametriherkkyyden tutkimiseen ja suunnittelun apuvälineiksi. Vaikka FE -analyysia tehtiin varioitavaa parametria kohden vain muutama yksinkertaistetuilla malleilla, voitaneen silti olettaa, että havaitut puomien parametriherkkyydet ovat todenmukaisia.

Työssä havaittiin myös, että rakenteen monitavoiteoptimointi vaatii rinnalleen FE -analyysiohjelmiston, jolla voidaan todeta tulosten luotettavuus. Myös väsymiskestävyyden arviointi ja optimointi edellyttää elementtimenetelmän käyttöä. Muita tärkeitä työssä tehtyjä johtopäätöksiä on monitavoiteoptimointitehtävän huolellisen formuloinnin tärkeys.

Jatkotutkimusta vaatii nyt työstä pois rajatut nivelpuomin sekä nivel- ja teleskooppipuomin yhdistelmät monitavoiteoptimoinnin varten. Väsymiskeston optimoiminen on myös yksi työn ongelmista, joihin ei löydetty ratkaisua. Teleskooppipuomin liukupalat sekä niiden vaikutus puomikokonaisuuteen herätti useita kysymyksiä, joita ei ole ainakaan FIMA:n sisällä tutkittu aiemmin. Liukupalattutkimuksen tuloksia voitaisiin hyödyntää suoraan puomien suunnittelussa sekä monitavoiteoptimoinnissa.

**LÄHTEET**

- 1) Agifap -Tarkkuutta ja tehokkuutta palkkimalleihin. [One moment engineeringin kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2.5.2013. [Viitattu 27.8.2014] Saatavissa: <http://www.omeinweb.com/agifap.php?lang=fi>
- 2) Agifap version 6.1 User's guide. 1999. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology. 82 s.
- 3) Asumaniemi, M. Engineering manager, Bronto Skylift Oy, haastattelu 2.4.2014, Haastattelijana Vesa Tynys
- 4) Boothroyd, G. Dewhurst P. & Winston K. 2002, Product design for manufacture and assembly. Boca Raton: CRC Press. 698 s.
- 5) Branke, J. Deb, K. Miettinen, K. & Słowiński, R. 2008. Multiobjective optimization -interactive and evolutionary approaches. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer. 470 s.
- 6) Chamera, M. Toimitusjohtaja, Ariadne engineering ab, sähköpostihaastattelut 19.3.-17.4.2014, Haastattelijana Vesa Tynys
- 7) Chmielewski, T. 20.5.2014. CEO. FEMComp Engineering Ab. Lappeenranta. Femap -koulutustilaisuus.
- 8) Eisenberger, M. & Alexandrov, A. 2003. Buckling loads of variable thickness thin isotropic plates. Technion: Faculty of civil engineering. Technion -Israel institute of technology. 889 s.
- 9) EN 13001-3-1. 2012. Crane -General design -Part 3-1 -Limit states and competence of steel structure. Brussels. European committee of standardization. 110 s.
- 10) Excel -ohje. [Microsoft officen kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 5.9.2014]. Saatavissa: <http://office.microsoft.com/en-001/excel-help/add-a-trendline-to-a-chart-HP005198462.aspx>
- 11) FIMA -Forum for Intelligent Machines ry. [Hermia Groupin kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2013. [Viitattu 18.6.2014]. Saatavissa: <http://www.hermiagroup.fi/fima/>

- 12) Hakanen, J. 2010. Monitavoiteoptimointija -teollisten prosessien hallinta -kurssin materiaali. [verkkodokumentti]. Viimeksi päivitetty 2010. [Viitattu 28.3.2014]. Saatavissa: [users.jyu.fi/~jhaka/ties592/TIES592-monitavoite-muotoilu.pdf](http://users.jyu.fi/~jhaka/ties592/TIES592-monitavoite-muotoilu.pdf)
- 13) Hållstedt, M. Ohjelmistoinsinööri, Cae Value Ab, sähköpostihaastattelut 26.3-2.6.2014, Haastattelijana Vesa Tynys
- 14) Hämäläinen, O. 2011. Lujasta teräksestä valmistetun palkin poikkileikkauksen optimointi -diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 63 s.
- 15) Heeds MDO. [Red cedar technologyn kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 7.5.2014]. Saatavissa: [http://www.redcedartech.com/products/heeds\\_mdo](http://www.redcedartech.com/products/heeds_mdo)
- 16) Hobbacher, A. 2008. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Paris: International institute of welding. 144 s.)
- 17) Huusko, L. 2006. Ultralujien terästen paikallinen lommahdus -lujuuden huomioivan parametrin pätevyysalueen laajentaminen. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 43 s.
- 18) Hyperworks. [Altair Hyperworksin kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 6.7.2014]. Saatavissa: <http://www.altairhyperworks.com/#>
- 19) IBM. 2012. Token licensing concepts and management. [verkkodokumentti]. Viimeksi päivitetty 24.10.2012. [Viitattu 2.7.2014] Saatavissa: <http://www-01.ibm.com/support/docview.wss?uid=swg27023414&aid=1>
- 20) Isight and the Simulia execution engine overview. [Dassault Systèmesin kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 15.5.2014]. Saatavissa: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/isight-simulia-execution-engine/overview/>
- 21) Jármai, K. & Farkas, J. 2013, Design, fabrication and economy of metal structures. Heidelberg: Springer, 671 s.
- 22) Koivisto, K. Laitinen, E. Niinimäki, M. Tiainen, T. Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 2010. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Edita. 304 s.

- 23) Laakkonen, P. 2014. Laskentatyökalun kehittäminen kantavien rakenteiden optimointiin - diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. 124 s.
- 24) Laakkonen, P. Tekniikan diplomi-insinööri, Tampereen teknillinen yliopisto, haastattelu ja sähköpostihaastattelut 31.3.-31.7.20014, Haastattelijana Vesa Tynys
- 25) Lindholm, J. Myyntipäällikkö, Altair engineering Ab, sähköpostihaastattelut 30.6-15.8.2014. Haastattelijana Vesa Tynys
- 26) Lämsä J. & Kiuru H. 2012. Ultralujat rakenne- ja kulutusteräkset -tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle. [verkkodokumentti]. Viimeksi päivitetty 6.3.2012. [Viitattu 29.9.2014] Saatavissa: <https://wiki oulu.fi/download/attachments/28082956/Ultralujat+rakenne-+ja+kulutuster%C3%A4kset+++t%C3%A4rkeimm%C3%A4t+ominaisuudet+suunnittelulle.pdf>
- 27) Löytynoja, A. 2014. Tekniikan diplomi-insinööri, ohjelmistoinsinööri, Mathworks, puhelin- ja sähköpostihaastattelut 30.4-4.5.2014. Haastattelijana Vesa Tynys
- 28) Matlab overview. [Mathworksin kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 5.5.2014]. Saatavissa: <http://www.mathworks.se/products/matlab/>
- 29) Matlab pricing and licensing. [Mathworksin kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 5.5.2014]. Saatavissa: [http://www.mathworks.se/pricing-licensing/index.html?prodcod=ML&\\_iid=main\\_pl\\_ML\\_tb](http://www.mathworks.se/pricing-licensing/index.html?prodcod=ML&_iid=main_pl_ML_tb)
- 30) Miller, D. K. 2004. Determining the Cost of Welding. [verkkodokumentti]. Päivitetty 1.3.2004. [Viitattu 31.7.2014]. Saatavissa: [http://weldingdesign.com/processes/news/wdf\\_10760](http://weldingdesign.com/processes/news/wdf_10760)
- 31) Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Teknologiateollisuus ry. 136 s.
- 32) Noilublao, C. & Sujin, B. S. 2009. Simultaneous Topology, Shape and Sizing Optimisation of Skeletal Structures Using Multiobjective Evolutionary Algorithms. [verkkodokumentti]. Viimeksi päivitetty 1.10.2009. [Viitattu 28.3.2014]. Saatavissa: <http://www.intechopen.com/books/evolutionary-computation/simultaneous-topology-shape-and-sizing-optimisation-of-skeletal-structures-using-multiobjective-evol>
- 33) Optimization toolbox. [Mathworksin kotisivuilta] Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 9.7.2014] Saatavissa: <http://www.mathworks.se/products/optimization/description3.html>

- 34) Optimus. [Noesis solutionin kotisivuilta]. Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 13.4.2014]. Saatavissa: <http://www.noesisolutions.com/Noesis/>
- 35) Piironen, T. 2013. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettavuuteen - Onnistuneen suunnittelun periaatteita -DFMA. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu. 63 s.
- 36) Poles, S. Vassileva M. & Sasaki D. 2008. Multiobjective optimization software. Berlin: Springer-Verlag. 20 s.
- 37) Pope, G. G. 1963. The Buckling of Plates Tapered in Thickness. London: Ministry of aviation 16 s.
- 38) Rautaruukki Oyj, 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja, Keuruu: Otavan kirjapaino Oy. kolmas uudistettu painos. 608 s.
- 39) Salokangas, J. 2004. Teräsrakentamisen kustannukset -luentomateriaali. AW-rakennus Oy, Tampere
- 40) SFS-EN 1993-1-1. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-12: EN 1993 Laajennus teräslajeihin S700 asti. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 11 s.
- 41) SFS-EN 1993-1-12. 2007. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1.1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto
- 42) Valtanen E. 2010. Tekniikan taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis -kirjat Oy. 18. painos. 1176 s.
- 43) Xiang, Y. & Wie, G.W. 2004. Exact solutions for buckling and vibration of stepped rectangular Mindlin plates. Penrith: School of Engineering and Industrial Design, University of Western Sydney 294 s.

## YRITYSKYSELY

**Käytettävissä olevat ohjelmistot ja käyttöjärjestelmät:**

1. Mitä mallinnusohjelmistoja käytätte?
2. Mitä mallien analysointiohjelmistoja käytätte?
3. Muut käytössä olevat CAE- ja CAD -ohjelmistot?
4. Mikä käyttöjärjestelmä(t) yrityksessänne on käytössä?
5. Käytättekö mahdollisesti jo jotain optimointiohjelmistoa? Mitä ja mihin?

**Suunnittelun ja laskentaprosessin eteneminen.**

Sen lisäksi, että painotetaan eri optimoitavien suureiden tärkeyttä, vaatii optimointityökalu loogisen etenemisjärjestyksen, jotta päädytäänärkeviin tuloksiin kohtuullisessa laskenta-ajassa.

6. Kuvailkaa tähän tyypillisen puomin suunnitteluprosessin ja erityisesti laskentaprosessin etenemisjärjestys lähtöparametreineen ja välitarkistuksineen. Halutessanne voitte lisätä tähän myös vuokaavion.

**Mitä halutaan optimoida ja millä painotuksilla. Vastaa asteikolla 1-10, missä 10 vastaa suurinta painoarvoa.**

Osa optimoitavista kohteista voi olla myös optimoinnin lähtötietona tai vaatimuksena.

Osalle optimoitavista suureista voi löytyä minimi- tai maksimivaatimus, joka on hyvä mainita. Konkreettiset numeeriset arvot helpottavat huomattavasti optimointityökalun muodostamista, nopeuttavat laskentaa sekä tarkentavat tuloksia.

7. Puomin poikkileikkausprofiili: Anna painoarvo 1-10 kullekin kohdalle
  - 7.1. Puomin poikkileikkauksen muoto? optimoidaanko tiettyjä profiileja vai optimoidaanko useampia eri vaihtoehtoja?
  - 7.2. Muuttuva vai kiinteä poikkileikkaus?
  - 7.3. Massa?
  - 7.4. Materiaalit? Painotus eri materiaaleihin?
  - 7.5. Valmistuskustannukset? Painotukset tarvittaessa jaettuna useammalle menetelmälle.
8. Muut kustannukset? Mitkä ja millä painotuksella?
9. Puomin nostokorkeus? Tavoiteväli?
10. Muut mitat, joita halutaan optimoida? Painotus?
11. Nostettava kuorma? Painotus?
12. Puomin maksimitaipuma? Ehdoton maksimi?
13. Teleskooppipuomin liukupalat/liukurullat; optimoidaanko ja millä painotuksella?
  - 13.1. Sijoitus ja kappalemäärä?
  - 13.2. Liukujen vaihdettavuus?
  - 13.3. Liukupalojen kuluminen (materiaali)?
  - 13.4. Liukujen säädettävyys?

14. Nivelpuomin nivelet; optimoidaanko ja millä painotuksella?
  - 14.1. Nivelten määrä?
  - 14.2. Osien vaihdettavuus?
  - 14.3. Osien säädettävyys? Onko mahdollista/tarpeellista?
15. Väsymiskestoikä? Maksimointi ja vähintään tietty syklimäärä?
16. Värähtelykäyttäytyminen? Optimoidaanko ja millä painotuksella?
17. Puomin valmistusmenetelmä? Optimoidaanko ja millä painotuksella?
18. Mitä muuta haluaisitte työkalun optimoivan?
19. Mitä ei haluta mukaan optimointiin tai mitä ei kannata optimoida? Miksi?

**Monitavoiteoptimointi, Optimoinnin lähtötiedot:** (osa optimoinnin lähtötiedoista voi olla myös optimoinnin kohteena ja päinvastoin)

20. Mitä standardeja valmiin tuotteen (optimoitavien osa-alueiden) on noudatettava? Mainitse muutama tärkein.
21. Mitä suosituksia (optimoitavien osa-alueiden) olisi hyvä noudattaa?
22. Puomin mitat ja massat:
  - 22.1. Puomin päämitat?
  - 22.2. Puomin tilantarve kuljetuksessa?
  - 22.3. Puomin vaatima tila käytön aikana?
  - 22.4. Muuta huomioitavaa tilantarpeen suhteen?
  - 22.5. Puomin massarajoite, onko maksimiarvoa?
23. Puomin tyyppi? (nivel, teleskooppi, em. yhdistelmä, muu)
24. Liukupalojen/rullien kulumisen vaikutus toimintaan? Esim. vaatii vaihdettaessa tarkan paikoituksen?
25. Nivelten kulumisen vaikutus toimintaan?
26. Puomiin kohdistuvat kuormitukset:
  - 26.1. Nostokuorma?
  - 26.2. Kannatteleeko puomi ns. lisäkuormaa esim. hydrauliletkuja? Kerro tarkemmin?
  - 26.3. Iskumaiset kuormat?
  - 26.4. Tuulikuormat? Standardin mukaan vai oma tiukempi vaatimus?
  - 26.5. Työsyklit ja liikeradat? (Tieto siitä, että työsyklidataa on käytettävissä, riittää tässä vaiheessa. Halutessanne voitte liittää sopiva dataa vastausviestiin)
  - 26.6. Muut kuormitukset?
27. Puomin sallittu staattinen taipuma?
28. Ominaistaajuusraja?
29. Kestoikävaatimus?
30. Huomioitavia turvallisuusnäkökohtia?
31. Puomin vaurioitumisen seuraukset?
32. Materiaali? (Jos ei optimoinnin kohteena)
33. Puomin valmistusmenetelmät?



**Liite 1.**

34. Jälki/lämpökäsittelyt?
35. Puomin valmistuskustannukset? Erittele hieman?
36. Käyttölämpötilat?
37. Mikä muu on oleellista tietoa puomia optimoidessa?

## ALTAIR HYPERMESHIN TUKEMAT CAD-TIEDOSTOT

Taulukko 1. Hypermeshin yhteensopivuus käyttöjärjestelmäkohtaisesti

CAD Format	Latest CAD Version Supported	Platforms <sup>1</sup>			
		Windows		Linux	Mac
		x86	x86_64	x86_64	x86_64
<b>ACIS</b>	r21	Y	Y	Y	Y
<b>CATIA</b>	V4 V5R21 V5-6R2012	Y	Y	Y	Y
<b>DXF</b>	AutoCAD 12	Y	Y	Y	Y
<b>IGES</b>	v6 JAMA-IS	Y	Y	Y	Y
<b>JT</b>	9.5	Y	Y	Y	Y
<b>Parasolid</b>	v25(native) V20(third party)	Y	Y	Y	Y
<b>PDGS</b>	v26	Y	Y	Y	Y
<b>Pro E</b>	Wildfire 5 Creo 2 M020	Y	Y	Y	Y
<b>SolidWorks</b>	2012	Y	Y	Y	N
<b>STEP</b>	AP203 AP214	Y	Y	Y	Y
<b>Tribon</b>	TXHSTL-R Tribon XML Export v1.3	Y	Y	Y	Y
<b>UG</b>	NX6 NX7 NX7.5 NX8 NX8.5	Y <sup>4</sup>	Y	Y <sup>2</sup>	Y <sup>3</sup>
<b>VDAFS</b>	v2	Y	Y	Y	Y

<sup>1</sup>Refer to the official HyperWorks platform support list for full details.<sup>2</sup>UG NX7 is not available on Linux64 with native reader.<sup>3</sup>UG NX is available on MAC using third-party reader only.<sup>4</sup>UG NX8 and UGNX8.5 not available on Windows x86 with native reader.

## HYPERWORKSIN OHJELMIEN TOKEN-POHJAINEN HINNASTO

Taulukko 1. Hyperworksin hinnasto

HyperWorks Units	Feature Name	Products/Functionality
2	EDDataManager	Enterprise Data Manager. The units always stack.
	PDataManager	Collaboration Tools Explore and Organize
4	ProcessManagerApp	Process Manager
6	HyperGraph	HyperGraph
	HyperGraph3D	HyperGraph 3D client
	HyperGraphTrans	HGTrans GUI, translating solver result files to Altair Binary File (.abf) format.
	HyperViewTrans	HVTrans, result translator for HyperView
	MediaView	MediaView client
	ScriptView	ScriptView under HyperMath or HyperMesh
	Templex	Templex
10	HyperMath	HyperMath
	Evolve	solidThinking Evolve provides a package that is HyperWorks Units enabled. It requires 10 HyperWorks units to run Evolve in HyperWorks system.
15	SimLabAutomation	SimLab Automation
21	AcuConsole	GUI pre-processor for AcuSolve
	AcuMeshSim	AcuConsole's CFD mesh generator
	AcuFieldView	CFD post-processor for AcuSolve results
	BatchMesher	Always stacks. For further details see "BatchMesher Unit Draw"
	HyperCrash	HyperCrash
	HyperMesh	It requires 21 units to run HyperMesh OSSmooth launched from HyperMesh (OSSmooth panel) draws 21 HWUs leveled plus 21 HWUs stacked, for a total of 42 HWUs. HyperForm checks for a HyperMesh license feature and hence requires 21 HWUs leveled. This also applies to other user profiles under Manufacturing and Engineering Solutions unless specified otherwise.
	HyperView	HyperView
	Inspire	solidThinking Inspire provides a package that is HyperWorks Units enabled. It requires 21 HyperWorks units to run Inspire in HyperWorks system.
	MotionView	MotionView
25	HyperStudy	HyperStudy
	SimLabPrePost	SimLab Pre and Post applications
50	ProcessStudio	Process Manager Studio, part of Process Manager application

### Liite 3.

HyperWorks Solvers		
1	OptiStructCheck	OptiStruct Check run
	RadiossCheck	RADIOSS Starter
25	Radioss	License feature and HWU's to run RADIOSS on a machine with 1-4 CPU-core/GPU Note: Radioss replaces RadiossA and RadiossB license features starting hwsolvers12.0.210.
	OptiStructFEA	License feature and HWU's to run OptiStruct FEA on a machine with 1-4 CPU-core/GPU
	AcuSolve	License feature and HWU's required to run AcuSolve on a machine with 1-4 CPU-core/GPU
	AcuView	License feature and HWU's required to run AcuView on a machine with 1-4 CPU-core/GPU
	AcuTrace	License feature and HWU's required to run AcuTrace on a machine with 1-4 CPU-core/GPU
	MotionSolve	MotionSolve
50	OptiStruct	License feature and HWU's required to run Optimization on a machine with 1-4 CPU-core/GPU
	HyperXtrudeFEA	HyperXtrude Solver

Taulukko 2. Prosessorien lukumäärän vaikutus HyperWorksin ohjelmistojen token -hintoihin.

Cores + GPU	Radioss / OptiStructFEA AcuSolve / AcuView AcuTrace / AcuFwh Multi-Physics	OptiStruct (Optimization Run)
1-4	25	50
5-8	30	55
9-16	35	60
17-32	45	70
33-64	55	80
65-128	65	90
129-256	75	100
257-512	85	110
513-1024	95	120
Each duplication	+10	+10

PUOMIOPTIMOINTI TEEMAPÄIVÄN OHJELMISTOJEN EDUSTAJILLE ANNETTU OPTIMOINTI-  
TEHTÄVÄ

Use Case: Boom optimization

The target is to design boom profiles which minimize the mass and overlapping ( $S$ ) of a two-section telescopic boom.

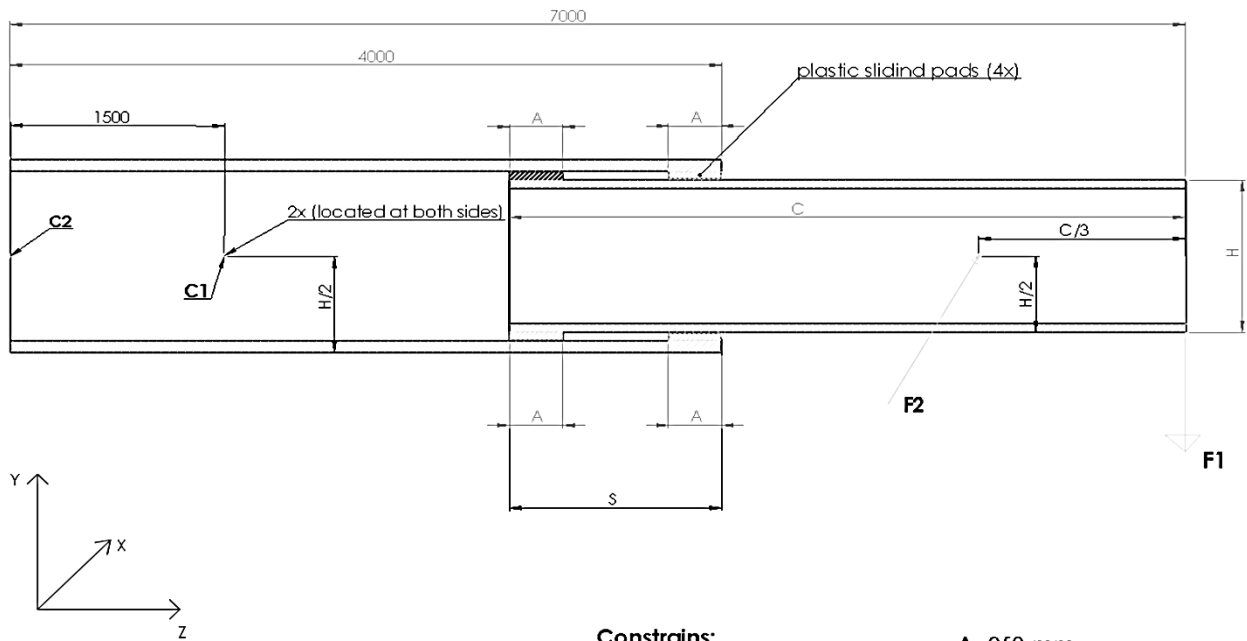
Specification and limitations of the boom (picture 1):

- Section 1  $L = 4000$  mm
- Section 2  $H = 200-300$  mm,  $B = 200 -300$  mm
- Material steel, yield class max S960
- Boom profile is made by welding two bended steel plates together
- Profile can have additional reinforcement plates or collars in critical locations
- Material thickness is discrete value with 1 mm steps
- Vertical force to lift 22 kN at the tip of the boom, dynamic load 1 million cycles (0% – 100% -0%)
- Horizontal force 5 kN on the second section -static (picture 1)
- Sliding pad material plastics, length  $A = 250$  mm -other dimension free choice according to the profile dimensions

Requirements:

- Max bending 100 mm with the max load & outreach
- Max local deformation 1,5 x plate thickness
- Static check with  $S = 1,5 \times S_{min}$  and  $2,0 \times S_{min}$
- General safety factor 1,10

Longitudinal cross-section



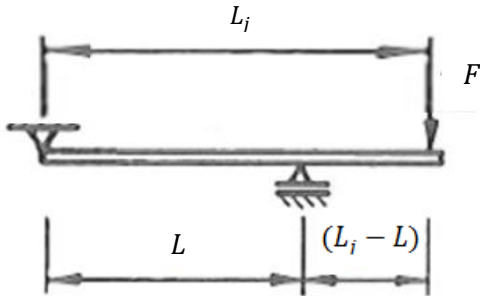
**Constrains:**  
**C1:** rotation around X-axis and movement in Y and Z-directions allowed  
**C2:** rotation around X-axis allowed

**A**=250 mm  
**H**=200-300 mm  
**B**=width=200-300 mm  
**F1**=22kN  
**F2**=5kN (X-direction)

Picture 1. Longitudinal cross-section of boom to be optimized.

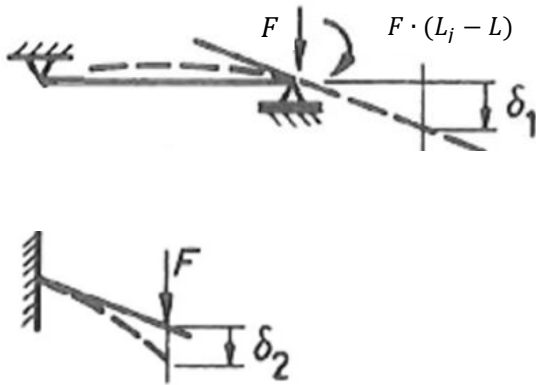
## TAIPUMAN LASKENTAKAAVAN MUODOSTAMINEN

Kuva 1 on puomin jatkoksen vapaakappalekuva, jossa niveltuet kuvaavat puomin liukupaloja.



**Kuva 1.** Puomin jatkoksen vapaakappalekuva. (muokattu) (Outinen et al., 2000, s. 211)

Jaetaan jatkos kahteen osaan kuvan 2 mukaisesti, jolloin voidaan lasketa taipumat  $\delta_1$  ja  $\delta_2$ .



**Kuva 2.** Puomin taipumat eroteltuina. (muokattu) (Outinen et al., 2000, s. 211)

$$\sigma_1 = \frac{F(L_j - L)L}{3EI_{xx}}(L_j - L)$$

$$\sigma_2 = \frac{F(L_j - L)^3}{3EI_{xx}}$$

$$v = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{F[(L_j - L)^3 + L(L_j - L)^2]}{3EI_{xx}}$$

Jos tunnetaan liukupalojen muodonmuutoksien suuruus, voidaan taipuman arvoa tarkentaa ottamalla jäykän kappaleen kiertymä huomioon.

Outinen, H. Koski, J. Salmi, T. 2000. Lujusopin perusteet. Tampere: Pressus Oy. 560 s.

## REAKTIOVOIMIEN LASKENTA

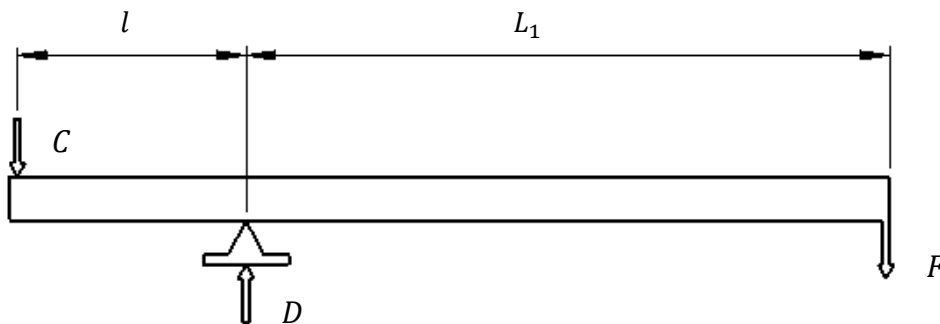
$$F = mg = 1750 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 17167,5 \text{ N}$$

$$L = 4 \text{ m}$$

$$L_1 = 3 \text{ m}$$

$$l = 0,5 \dots 0,9 \text{ m}$$

Asetetaan niveltuenta keskimmäisen puomin ulompaan päähän kuvan 1 mukaisesti ja ratkaistaan voimat  $C$  ja  $D$  uloimmaisesta jatkoksesta.



**Kuva 1.** Uloimman jatkoksen vapaakappalekuva

$$\sum M_1 = 0$$

$$F \cdot L_1 - C \cdot l$$

$$C = \frac{F \cdot L_1}{l}$$

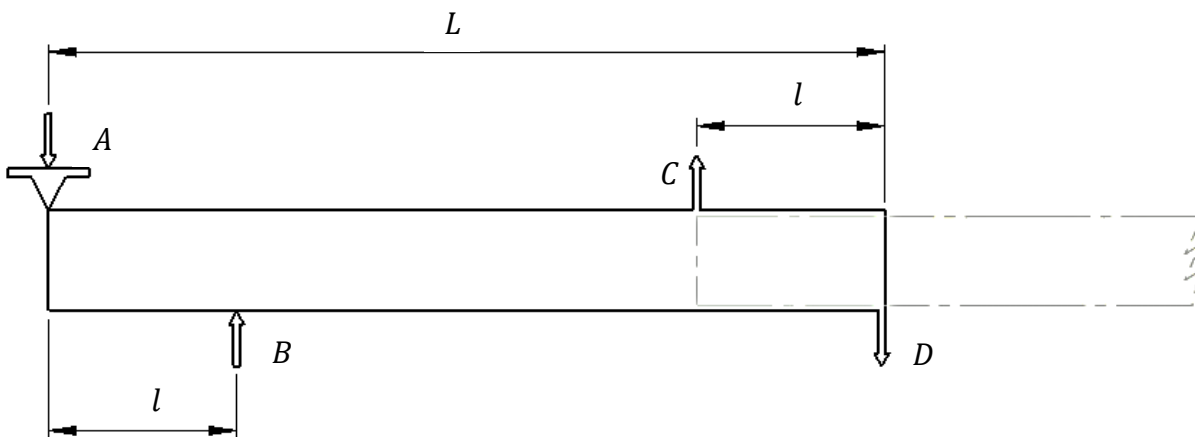
$$\sum F_1 = 0$$

$$D - C - F = 0$$

$$D = F + C$$

Kun voimat  $C$  ja  $D$  on ratkaistu, voidaan voiman ja vastavoiman periaatteen mukaisesti kääntää voimien  $C$  ja  $D$  vaikutussuunnat ja ratkaista voimat  $A$  ja  $B$  tarkastelemalla keskimmäistä jatkosta kuvan 2 mukaisesti. Niveltuenta on nyt keskimmäisen jatkoksen sisemässä päädyssä.





**Kuva 2.** Keskimmäisen jatkoksen vapaakappalekuva. Ulomman jatkoksen sijoittuminen näkyy harmaalla oikealla.

$$\sum M_2 = 0$$

$$D \cdot L - C(L - l) - B \cdot l = 0$$

$$B = \frac{D \cdot L - C(L - l)}{l}$$

$$\sum F_2 = 0$$

$$A - B - C + D = 0$$

$$A = B + C - D$$

## POIKKILEIKKAUKSEN OPTIMOINTITYÖKALUN FUNKTIOT

## 1. OPTIMOINTIFUNKTIO

```

function
[z]=CalcFun(fy,Mrd,gamma,Amin,Amx,L,Llim,F,def_lim,d_sigma_ekv,Mekv,vakio)

% ,missä fy on teräksen myötöraja [MPa],
% Mrd on jatkosta kuormittava taivutusmomentti [Nmm],
% gamma on varmuuskerroin [-],
% Amin ja Amx ovat poikkileikkauksen leveyden minimi- ja maksimiarvot [mm],
% L on jatkoksen pituus [mm],
% Llim on limityspituus [mm],
% F on jatkokset päässä Y -suuntaan vaikuttava voima [N],
% def_lim on jatkoksen sallittu taipuma [mm],
% d_sigma_ekv on väsyttävän kuormituksen perusteella laskettu
% ekvivalenttijännitys [MPa],
% Mekv on väsyttävän kuormituksen perusteella laskettu ekvivalentti
% taivutusmomentti [Nmm] ja
% kun vakio [-] saa arvon, työkalu laskee poikkileikkaussuureet lb:n arvoilla

clc
format long

% Pituuksien alarajat
% Muoto: [h d e t1 t2 alfa]
lb=[200 85 80 5 6 45];

%Pituuksien ylärajat
% Muoto: [h d e t1 t2 alfa]
ub=[500 250 250 20 20 60];

%Laskennan lähtöpisteet
%Muoto: [h; d; e; t1; t2; alfa]
v=[200;72;90;6;6;45]+rand(length(lb),1);

if nargin==12
    disp 'vakioarvot'
    lb=lb;
    ub=lb;
    v=lb;
    vakio;
end

%Vaadittu taivutusvastus
W=Mrd/(fy/gamma);

%Teräksen lujuuden mukaan määräytyvät PL3 suhteet
[nyy1,nyy2,nyy3]=suhteetPL3(fy);

%Pidetään huolta siitä että taipumarajoite ei aktivoidu jos sitä ei anneta
if nargin==5
    L=100;
    def_lim=10^6;
    d_sigma_ekv=1;
    Mekv=0;

```

```

%Vaadittu taivutusvastus

W=Mrd/(fy/gamma);
end

% Jos väsymiskestävyydelle ei ole alkuarvoja, jätetään se huomiotta
if nargin==9
    d_sigma_ekv=1;
    Mekv=0,
    W=Mrd/(fy/gamma);
end

% Ratkaistaan taivutusvastuksen mitoittava kuormitustilanne
if nargin>10

    Wstat=Mrd/(fy/gamma);
    Wvas=Mekv/d_sigma_ekv;

    if Wstat==Wvas

        %Vaadittu taivutusvastus
        W=Wstat;
        disp 'rakenne on staattisen ja väsyttävän kuormituksen suhteen tasaluja'

    elseif Wstat>Wvas
        disp 'staattinen kuormitus on määrävä'
        eroprosenttia=(1-Wvas/Wstat)*100
        %Vaadittu taivutusvastus
        W=Wstat;

    else Wvas>Wstat
        disp 'väsyttävä kuormitus on mitoittava'
        eroprosenttia=(1-Wstat/Wvas)*100
        %Vaadittu taivutusvastus
        W=Wvas;
    end
end

% Lineaariset rajoitteet
A=[0 0 1 0 -nyy2 0];
B=0;

% Laskennan asetukset
options = optimset('Display','off','Algorithm','sqp','MaxFunEvals',5000,...
    'DerivativeCheck','off','GradObj','on','TolFun',1e-4);

% Laskenta
[x,fval]=fmincon(@Objfun,v,A,B,[],[],lb,ub,@(v)mycon(v, W, fy, Amin, Amax, L,
Mrd, Llim, F, def_lim),options);

%Pyöristykset
if d_sigma_ekv==2
    XP=[];
    ii=1:length(x)
    XP=x(ii)
else
    XP=[];
    for ii=1:length(x)

```

```

        if x(ii)-floor(x(ii))<0.001

            XP(ii)=floor(x(ii));
        else
            XP(ii)=ceil(x(ii));
        end
    end
end

XP=XP';
alfa= XP(6);
WP=Wx(XP);

% Varmuus taivutusvastuksen suhteen
Wvarmuus=(WP-W)/W+1

% kokonaisvarmuus
Wgammatot=Wvarmuus+gamma-1;

% leveys
mittaA=XP(3)+2*cosd(alfa)*XP(2)

%Uuman korkeus
mittaC=XP(1)-XP(2)*sind(alfa)

disp 'Vastaus on muotoa mitat h, d, e, t1, t2, alfa, pinta-ala ja taivutusvastus
x-akselin suhteen'

z=[XP(1);XP(2);XP(3);XP(4);XP(5);XP(6);Area(XP);WP]
end

```

## 2. KOHDEFUNKTIO

```

function [z, gz]=Objfun(v)

% h=v(1)
% d=v(2)
% e=v(3)
% t1=v(4)
% t2=v(5)
% alfa=v(6)
% a=e+2*d*cosd(alfa);
% c=h-(0.5*t1+d*sind(alfa)+0.5*t2);

% poikkileikkauksen pinta-ala
z=v(5)*(v(3)+2*v(2))+v(4)*2*(v(1)-
v(2)*sind(v(6)))+v(4)*(v(3)+2*v(2)*cosd(v(6)));

% pinta-alan derivaatta
if nargin > 1
    gz=[2*v(4)
        2*v(5)-2*v(4)*sind(v(6))+2*v(4)*cosd(v(6))
        v(5)+v(4)
        2*v(1)-v(2)*sind(v(6))+v(3)+2*v(2)*cosd(v(6))
        -v(4)+v(3)+2*v(2)
        -2*v(4)*v(2)*cosd(v(6))-2*v(2)*v(4)*sind(v(6))];
end
end

```

## 3. RAJOITEYHTÄLÖT

```

function [cc,ceq] = mycon(v, W, fy, Amin, Amax, L, Mrd, Llim, F, def_lim)
h=v(1);
d=v(2);
e=v(3);
t1=v(4);
t2=v(5);
alfa=v(6)
a=e+2*d*cosd(alfa);
c=h-(d*sind(alfa));

[nyy1,nyy2,nyy3]=suhteetPL3(fy);

% pinta-ala
Atot=t2*(e+2*d)+t1*(2*c+a);

Ay1=e*t2*t2*0.5;
Ay2=2*d*t2*(0.5*d*sind(alfa)+0.5*t2);
Ay3=2*c*t1*(0.5*t2+d*sind(alfa)+0.5*c);
Ay4=a*t1*(0.5*t2+d*sind(alfa)+c+0.5*t1);

Aytot=Ay1+Ay2+Ay3+Ay4;

% neutraaliakseli h1 profiilin alapinnan suhteen (kuva 7)
h1=Aytot/Atot

% neutraaliakseli h2 profiilin yläpinnan suhteen (kuva 7)
h2=h+(t1+t2)/2-h1

% taivutusmomentti x-akselin suhteen
Ix1=(e*t2^3)/12+e*t2*(h1-0.5*t2)^2; % 1kpl
Ix2=t2*(d*sind(alfa))^3/6+(t2^3)*d*cosd(alfa)/6+2*d*t2*(h1-0.5*t2-
0.5*d*sind(alfa))^2; %2kpl
Ix3=c^3*t1/6+2*c*t1*(h2-0.5*t1-0.5*c)^2; % 2 kpl
Ix4=a*t1^3/12+a*t1*(h2-0.5*t1)^2; % 1kpl

Ix=Ix1+Ix2+Ix3+Ix4

% Taipuma
k_def=F*((L-Llim)^3+Llim*(L-Llim)^2);
def=k_def/(3*210000*Ix)

if h1<h2
Wx=Ix/h2;

else %h2<h1
Wx=Ix/h1;

end

% PL 3:n mukaisia jännityssuhteita
psii1=(h1-d*sind(alfa)-0.5*t2)/h1; % psii1>=0
psii2=- (h1-d*sind(alfa)-0.5*t2)/(h2-0.5*t1)% -1>=psii2>0

```

```

% Rajoitteiden määrittely
% Rajoitteet ovat muotoa "vastaus<=0"
cc = [W-Wx, def-def_lim, d/t2-sqrt(235/fy)*38.3/(0.61+0.39*psii1.^1.1) c/t1-
sqrt(235/(fy))*(19.5*(1-psii2)^2+43.4)/((h1-d*sind(alfa)-0.5*t2)/h1), -(h1-
d*sind(alfa)-0.5*t2)/(h2-0.5*t1) Amin-e-2*d*cosd(alfa) e+2*d*cosd(alfa)-Amax]

% Rajoitteet ovat muotoa "vastaus=0"
ceq=[Amin-e-2*d*cosd(alfa)];

% Varoitusilmoitukset, jos rajoitteet eivät toteudu
if cc(1)>0
    disp 'taivutusvastusvaatimus ei täyty'
elseif cc(2)>0
    disp 'taipumavaatimus ei täyty'
elseif cc(3)>0
    disp 'd/t2 -suhde ei ole PL3:n mukainen'
elseif cc(4)>0
    disp 'c/t1 -suhde ei ole PL3:n mukainen'
elseif cc(5)>0
    disp 'apusuure psii2 ei vastaa PL3:n ehtoja'
elseif cc(6)>0
    disp 'mitta a ei vastaa annettua minimirajoitetta'
elseif cc(7)>0
    disp 'mitta a ei vastaa annettua maksimirajoitetta'
elseif psii2<-1.1
    disp 'psii2:n rajoitetta on rikottu'
end
end

```

#### 4. POIKKILEIKKAUKSET TAIVUTUSVASTUS

```

% Taivutusvastuksen laskenta
function [z, Ix]=Wx(v)

h=v(1);
d=v(2);
e=v(3);
t1=v(4);
t2=v(5);
alfa=v(6);
a=e+2*d*cosd(alfa);
c=h-(d*sind(alfa));

% pinta-ala
Atot=t2*(e+2*d)+t1*(2*c+a);

Ay1=e*t2*t2*0.5;
Ay2=2*d*t2*(0.5*d*sind(alfa)+0.5*t2);
Ay3=2*c*t1*(0.5*t2+d*sind(alfa)+0.5*c);
Ay4=a*t1*(0.5*t2+d*sind(alfa)+c+0.5*t1);

Aytot=Ay1+Ay2+Ay3+Ay4;

% neutraaliakseli h1 profiilin alapinnan suhteen (kuva 7)
h1=Aytot/Atot;

```

## Liite 7.

```
% neutraaliakseli h2 profiilin yläpinnan suhteen (kuva 7)
h2=h+(t1+t2)/2-h1;

% neliömomentti X -akselin suhteen
Ix1=(e*t2^3)/12+e*t2*(h1-0.5*t2)^2; % 1kpl
Ix2=t2*(d*sind(alfa))^3/6+(t2^3)*d*cosd(alfa)/6+2*d*t2*(h1-0.5*t2-
0.5*d*sind(alfa))^2; %2kpl
Ix3=c^3*t1/6+2*c*t1*(h2-0.5*t1-0.5*c)^2; % 2 kpl
Ix4=a*t1^3/12+a*t1*(h2-0.5*t1)^2; % 1kpl

Ix=Ix1+Ix2+Ix3+Ix4

% taivutusvastus X -akselin suhteen
if h1<h2
    z=Ix/h2;

else % h2<h1
    z=Ix/h1;

end
end
```

## 5. POIKKILEIKKAUKSEN PINTA-ALA

```
function z=Area(v)

h=v(1);
d=v(2);
e=v(3);
t1=v(4);
t2=v(5);
alfa=v(6);
a=e+2*d*cosd(alfa);
c=h-(d*sind(alfa));

% pinta-ala
z=t2*(e+2*d)+t1*(2*c+a);
```

## 6. POIKKILEIKKAUKSEN OPTIMOINTIFUNKTION APUFUNKTIO

```
function [nyy1,nyy2,nyy3]=suhteetPL3(fy)

% apukerroin
eps=sqrt(235./fy);

% PL3:n mukaiset jännityssuhteet
nyy1=eps*(19.5*4+43.4);
nyy2=eps*38.3;
nyy3=eps*14;
```

## LIUKUPALAN KOON MUUTOKSEN VAIKUTUSTA ARVIOIVA APUOHJELMA

```

% Liukupalan pituuden/pinta-alan vaikutus suurempaan keskijännitykseen liukupa-
lan päädyssä V -profiilin alapinnan yli

function[]=lpmuutos(sigma0, L0, L, Lk, La, Lim, A0, A)

% , missä sigma0 on lähtötilanteen keskijännitys liukupalaryhmän B:n alimman
% liukupalan editse [MPa],
% L0 on liukupalojen nykyinen pituus [mm],
% L on liukupalojen uusi pituus [mm],
% Lk on kahden sivuilla olevan liukupalan leveys [mm],
% La on alimman liukupalan leveys [mm],
% Lim on puomien limitys [mm]
% A0 on liukupalojen nykyinen yhteispinta-ala [mm^2] tai [m^2] ja
% A on liukupalojen uusi yhteispinta-ala [mm^2] tai [m^2]

clc
% tehdään tarvittavat yksikkömuunnokset:
if nargin==8
    if A0>0.1 & A>0.1
        A0=A0/1000000;
        A=A/1000000;
    end
end
Lim=Lim/1000;

% Liukupalojen leveyksien suhde
leveyksiensuhde=Lk/La

pa0=(2*Lk*+La)*L0;
pa=(2*Lk*+La)*L;

if nargin==6
    % Riippuvuus limityksestä laskettaessa liukupalojen pituuden muutoksen avul-
    la
    Rpituus=1.2259*Lim+0.4492;

    deltaL=(L0-L)/L0;

    deltapa=(pa0-pa)/pa0

    sigma=Rpituus*(L0-L)+sigma0

    deltasigma=(1-(sigma/sigma0))*100

elseif nargin==8
    % Riippuvuus limityksestä liukupalojen liukupalojen pinta-alan muutoksen
    avulla

    Rala=7191.4*Lim+2635.1;
    deltaA=100*((A0-A)/A0)
    sigma=Rala*(A0-A)

end
end

```



## POIKKILEIKKAUKSEN LEVYNPAKSUUKSIEN VARIOINNIN VAIKUTUSTA ARVIOIVA APUOHJELMA

```

% Levynpaksuuden muutoksen vaikutus suurempaan keskijännitykseen liukupalan
% päädyssä V -profiilin alapinnan yli

function [] = tvar(T01, T02, T1, T2, sigma0)

% , missä T01 on U -profiilin lähtöpaksuus,
% T02 on V -profiilin lähtöpaksuus,
% T1 on U -profiilin uusi paksuus,
% T2 on V -profiilin uusi paksuus
% ja sigma0 on lähtötilanteen keskijännitys liukupalaryhmän B:n alimman
% liukupalan editse.

clc
% laskennan apusuureita
t1=T01-T1;
t2=T02-T2;
tkerroin=1;
tver1=(T01/T1)^2;
tver2=(T02/T2)^2;

% lasketaan tkerroin perustapauksille, joissa t1:n ja t2:n arvo muuttuu yhden
% millimetrin

if abs(t1)==1
    if abs(t2)==1
        disp '11' % laskentakaavan jäljitystunnus
        if T2>T02
            tkerroin=tver2;
            Akerroin=((T01/T1)+(T02/T2))/2;
        else
            tkerroin=tver2^-1;
        end
    end
end

if abs(t1)==1
    if abs(t2)==0
        disp '10' % laskentakaavan jäljitystunnus
        if T01<T1
            tkerroin=(1+1.15*(T01/T1)^2)/2;
        else
            tkerroin=(1+1.15*(T1/T01)^2)/2;
        end
    end
end

if abs(t1)==0
    if abs(t2)==1
        disp '01' % laskentakaavan jäljitystunnus
        if T02<T2
            tkerroin=(1+0.9*(T02/T2)^2)/2;
        else
            tkerroin=(1+0.9*(T2/T02)^2)/2;
        end
    end
end

```

## Liite 9.

```
end
end
% lasketaan tkerroin tapauksille, joissa t1:n ja t2:n arvo muuttuu
% korkeintaan kaksi millimetriä

if abs(t1)==0
    if abs(t2)==2
        disp '02' % laskentakaavan jäljitystunnus
        if T2>T02
            tkerroin1=(1+0.9*(T02/(T02+1))^2)/2;
            tkerroin2=(1+0.9*((T02+1)/T2)^2)/2;

            tkerroin=tkerroin1*tkerroin2;

        elseif T2<T02
            tkerroin1=(1+0.9*(T2/(T2+1))^2)/2;
            tkerroin2=(1+0.9*((T2+1)/T02)^2)/2;

            tkerroin=tkerroin1*tkerroin2;
        end
    end
end
end

if abs(t1)==2
    if abs(t2)==1
        disp '21' % laskentakaavan jäljitystunnus
        if T2>T02
            tkerroin1=(T02/(T02+1))^2;
        else
            tkerroin1=(T2/(T2+1))^2;
        end

        if T1>T01
            tkerroin2=(1+1.15*((T1-1)/T1)^2)/2;
        elseif T1<T01
            tkerroin2=(1+1.15*((T01-1)/T01)^2)/2;
        end
        tkerroin=tkerroin1*tkerroin2;

    elseif abs(t2)==2
        disp '22' % laskentakaavan jäljitystunnus
        if T2>T02
            tkerroin1=(T02/(T02+1))^2;
            tkerroin2=((T2-1)/T2)^2;

            tkerroin=tkerroin1*tkerroin2;
        else
            tkerroin1=(T2/(T2+1))^2 ;
            tkerroin2=((T02-1)/T02)^2;

            tkerroin=tkerroin1*tkerroin2;
        end
    end
end
end

if abs(t1)==1
```

## Liite 9.

```
if abs(t2)==2
    disp 'l2' % laskentakaavan jäljitystunnus
    if T2>T02
        tkerroin1=(T02/(T02+1))^2;
        tkerroin2=(1+0.9*((T02+1)/T2)^2)/2;

        tkerroin=tkerroin1*tkerroin2;
    else
        tkerroin1=(T2/(T2+1))^2;
        tkerroin2=(1+0.9*((T2+1)/T02)^2)/2;

        tkerroin=tkerroin1*tkerroin2;
    end
end

end

% Apuohjelman rajoitukset
if T01>T02
    disp 'tarkista lähtöarvot'
    tkerroin=0;
elseif T1>T2
    disp 'tarkista lähtöarvot'
    tkerroin=0;
elseif t1<0
    if t2>0
        disp 'Apuohjelma ei osaa ottaa huomioon suoraan tapausta, jossa levyn-
paksuuden muuttuvat eri suuntiin. Muutos pitää tehdä kahdessa osassa.'
        tkerroin=0;
    end
elseif t1>0
    if t2<0
        disp 'Apuohjelma ei osaa ottaa huomioon suoraan tapausta, jossa levyn-
paksuuden muuttuvat eri suuntiin. Muutos pitää tehdä kahdessa osassa.'
        tkerroin=0;
    end
elseif T01-T1==0
    if T02-T2==0
        disp 'tarkista lähtöarvot'
        tkerroin=0;
    end
end

if abs(t1)>2
    disp 'suorita laskenta useammassa osassa'
    tkerroin=0;
elseif abs(t2)>2
    disp 'suorita laskenta useammassa osassa'
    tkerroin=0;
end

% päätellään keskijännityksen muutossuunta
if T1>T01
    sigma=sigma0*tkerroin
elseif T2>T02
    sigma=sigma0*tkerroin
else
    sigma=sigma0*(tkerroin^-1)
end
```