

Timo Ketola

TERÄSRISTIKON ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU JA OPTIMOINTI

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Maaliskuu 2019

TIIVISTELMÄ

TIMO KETOLA: Teräsristikon algoritmiavusteinen suunnittelu ja optimointi

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 64 sivua, 14 liitesivua

Maaliskuu 2019

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: Assistant Professor Kristo Mela & Associate Professor Sami Pajunen

Avainsanat: Rakennesuunnittelu, optimointi, algoritmiavusteinen suunnittelu, automatisointi, teräsrakenteet

Tässä työssä on tutkittu algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntämistä teräsristikoiden mitoituksessa. Työssä esitetään mitoitusprosessi, jonka soveltuvuutta mitoituksen tehostamiseen testataan eri jännevälin Warren-ristikoilla. Mitoituksessa noudatettiin kaikkia eurokoodin mukaisia ehtoja. Kehitetyssä menetelmässä ristikolle suoritetaan sauvojen mitoitus murtorajatilassa sekä liitosten solmupistetarkastelut. Laskentamallissa kaikkien liitosten epäkeskisyydet huomioitiin muodostamalla diagonaalisauvojen ja paarteiden välille jäykät epäkeskisyyselementit.

Työssä esitellään teräsristikoiden mitoituksen laskentakaavat ja perinteiset suunnittelu-prosessit. Eurokoodin mukaisen laskennan lisäksi työssä on esitelty teräsristikon kustannusten arviointia varten kustannuspaikkapohjainen laskentamalli. Algoritmiavusteista suunnittelua sekä optimointia esitellään yleisellä tasolla. Työssä pureudutaan tarkemmin kehitetyn algoritmiavusteisen suunnitteluprosessin eri vaiheisiin ja niissä esiintyvien ongelmakohtien ratkaisuihin.

Mitoitusalgoritmi yhdistettiin lopuksi osaksi optimointiprosessia. Optimoinnin kohdefunktiona käytettiin ristikon massaa sekä arvioituja valmistuskustannuksia. Optimointiajot tehtiin kolmen eri jännevälin ristikolla vakiokuormituksella. Optimointi suoritettiin Grasshopper-ympäristössä käyttämällä optimoinnissa parveilualgoritmia. Optimoinnin suunnittelumuuttujina olivat sauvojen poikkileikkaukset, sekä ristikon geometriaominaisuudet. Rajoitusehdot koostuivat eurokoodin mukaisista sauvojen ja liitosten kestävyyksistä, geometrian reunaehdoista sekä käyttörajatilan mukaan lasketusta taipumasta.

Kehitetty mitoitusmenettely osoittautui tehokkaaksi mitoituksessa kaikilla testatuilla jänneväleillä. Mitoitukseen kuluva aika oli keskiarvoltaan kaikilla jänneväleillä alle kaksi sekuntia. Mitoitusalgoritmi liitettiin myös osaksi optimointia onnistuneesti. Optimoinnissa sekä kustannusten, että painon osalta päästiin lähtötilanteeseen nähden yli 10 % parempiin tuloksiin. Paino- ja kustannusoptimeiden välillä ei löydetty merkittäviä eroja, koska optimoitava ristikkotyyppejä oli vakio.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

TIMO KETOLA: Algorithm-aided design and optimization of steel truss

Tampere University

Master of Science Thesis, 64 pages, 14 Appendix pages

March 2019

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiners: Assistant Professor Kristo Mela & Associate Professor Sami Pajunen

Keywords: Structural design, optimization, algorithm-aided design, automatization, steel structures

The focus of this thesis is to investigate and develop an algorithm-aided workflow for steel truss design. A process description is given for designing steel trusses according to Eurocode 3. The design procedure consists of the designing of members as well as tubular joints. Joint eccentricities are considered by modelling rigid links between diagonals and chords. The method presented herein was tested with several different span lengths and two different loadings.

Basic information of designing steel trusses according to Eurocode were represented together with conventional design processes. Cost calculations of steel truss are done using a feature-based method. Algorithm-aided design and optimization is discussed in a general level. A deeper look is taken at problematic phases of the presented design process.

The design-algorithm was eventually included in an optimization process. Both mass and cost were used as objective functions for optimization. Optimization was done for three different span lengths with same loading conditions. Grasshopper software was utilized in initializing the optimization problem, which was solved using Particle swarm optimization. Members cross-sections and truss geometry are used as variables. Design constraints included strength of members and joints and geometrical limitations presented in Eurocode. Maximum displacement was also considered.

The presented method proved to be efficient with each of the studied trusses. The calculation time was approximately two second on average for each truss design point calculated. The optimization procedure was successfully applied to the implemented design algorithm. Both mass- and cost-optimums were more than 10 % lighter and cheaper respectively; however, significant differences between mass- and cost-optimums were not observed due to only considering a single truss type.

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

ALKUSANAT

Haluan kiittää Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiötä diplomityön mahdollistamisesta. Suuri kiitos kuuluu työn ohjaajalle Juha Soinille Sweco Rakennetekniikka Oy:stä työn aikana annetuista kommentteista ja vinkeistä. Lisäksi iso kiitos Jussi Jalkaselle ja Jyri Tuorille ideointiin osallistumisesta. Kiitos kuuluu myös työn tarkastajille, professori Kristo Melalle sekä professori Sami Pajuselle.

Tampereella, 18.03.2019

Timo Ketola

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen rajaukset ja tavoitteet.....	2
1.3	Tutkimuksen toteutus	3
2.	TERÄSRISTIKON SUUNNITTELU.....	4
2.1	Rakenneanalyysi	4
2.2	Sauvojen mitoitus.....	7
2.3	Liitosten mitoitus	13
2.3.1	Ristikon solmupisteet.....	13
2.3.2	Paarteiden jatkosliitokset	15
2.4	Käyttörajatila.....	18
2.5	Kustannusten arviointi	20
3.	ALGORITMIAVUSTEISEN SUUNNITTELUN SOVELTAMINEN.....	25
3.1	Algoritmiavusteinen suunnittelu	25
3.2	Perinteinen teräsristikon suunnitteluprosessi	27
3.3	Algoritmiavusteinen suunnitteluprosessi	29
3.3.1	Geometrian luonti	31
3.3.2	Sauvojen mitoitus.....	33
3.3.3	Liitosten mitoitus	34
3.3.4	Päätelmät.....	37
3.4	Optimointi	40
4.	MASSA- JA KUSTANNUSOPTIMOINTI.....	42
4.1	Optimointitehtävän formulointi	42
4.2	Lähtötiedot	46
4.3	Tulokset.....	48
4.3.1	24 metrin ristikko	48
4.3.2	36 metrin ristikko	49
4.3.3	48 metrin ristikko	51
4.4	Päätelmät	53
5.	YHTEENVETO	60
	LÄHTEET.....	62

LIITE A: POIKKILEIKKAUSKATALOGIT

LIITE B: KUSTANNUSLASKENNASSA KÄYTETYT ARVOT

LIITE C: VERTAILULASKELMAT

KUVALUETTELO

Kuva 1. Tutkimuksessa käsitelty K-ristikko.	1
Kuva 2. Kustannusten jakautuminen teräsrakenteisella kohteella (Evers & Maatje 2000).....	2
Kuva 3. Suorakaideputkipoikkileikkauksen mitat sekä käytetyt koordinaattiakselit.	4
Kuva 4. K-liitoksen epäkeskisyyden merkkisääntö.	5
Kuva 5. Liitosalueen mallinnus käyttäen kahta epäkeskisyyselementtiä.	6
Kuva 6. Sauvojen systeemipituudet, muokattu lähteestä (Wardenier et al. 2010).....	10
Kuva 7. Liitoskaavojen merkinnät Y-liitoksessa ja K-liitoksessa.	13
Kuva 8. Harjakohdan polviliitos. Liitoksessa voidaan käyttää vahvikelevyä.....	15
Kuva 9. a) Yläpaarteen ja b) alapaarteen jatkosliitos ruuviliitoksena.....	16
Kuva 10. Reunimmaisten ruuvien välinen keskiöetäisyys.....	18
Kuva 11. Levyjen palamurtumismuodot.	18
Kuva 12. Jatkosliitosten ruuvien välysten aiheuttama alapaarteen venymä.	19
Kuva 13. Perinteisen ja algoritmiaivusteisen ajankäytölliset eroavaisuudet. (Tanska & Österlund 2014, s. 24)	26
Kuva 14. Ristikon mitoituksessa toteutettavat vaiheet.....	30
Kuva 15. Ristikon rakenne- ja ulkokorkeus.	31
Kuva 16. Diagonaalien sijaintien iteroinnin vaiheet. Vaiheissa b) ja c) on esitetty diagonaalien edellisen vaiheen sijainti katkoviivalla.....	32
Kuva 17. Vapaavälin virheen suppeneminen iteroinnissa.....	33
Kuva 18. Ristikon solmupisteiden mitoitusmenettely.....	35
Kuva 19. Alapaarteen jatkosliitoksen mitoitus.	36
Kuva 20. Toteutetun ristikon mitoitusohjelman osa-alueet.	37
Kuva 21. Sauvojen ja liitosten käyttöaste jänneväleittäin kahdella eri kuormituksella.	38
Kuva 22. Laskenta-aika jänneväleittäin kahdella eri kuormituksella.	38
Kuva 23. Optimoinnin geometrian suunnittelumuuttujat.	42
Kuva 24. Optimointikaavio.	45
Kuva 25. Kohdefunktion arvo iteraatiokierroksien funktiona 24 metrin ristikoilla. Ylempänä massan ja alapuolella kustannusten minimointitehtävä.....	48
Kuva 26. Parhaiden löydettyjen 24 metrin ristikoiden geometriat. Vasemmalla massan ja oikealla kustannusten minimointitehtävän ratkaisut.	49
Kuva 27. Kohdefunktion arvo iteraatiokierroksien funktiona 36 metrin ristikoilla. Kuvaajat a) ovat 16 diagonaalien ja b) 20 diagonaalien ristikoista.	50
Kuva 28. Parhaiden löydettyjen 36 metrin ristikoiden geometriat. Vasemmalla massan ja oikealla kustannusten minimointitehtävän ratkaisut.	51
Kuva 29. Kohdefunktion arvo iteraatiokierroksien funktiona 48 metrin ristikoilla. Kuvaajat a) ovat 20 diagonaalien ja b) 24 diagonaalien ristikoista.	52
Kuva 30. Parhaiden löydettyjen 48 metrin ristikoiden geometriat. Vasemmalla massan ja oikealla kustannusten minimointitehtävän ratkaisut.	53

<i>Kuva 31. Massan jakautuminen yläpaarten, alapaarten ja diagonaalien välillä.....</i>	55
<i>Kuva 32. Kustannusten jakautuminen halvimmassa löydetyissä ristikoissa.</i>	55

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Hitsattujen rakenneputkiliitosten geometriaehdot Y- ja K-liitoksissa.</i>	6
<i>Taulukko 2. Ekvivalentin momentin kertoimet.</i>	12
<i>Taulukko 3. Teräsristikon solmupisteiden murtumismuodot ja laskentakaavat.</i>	14
<i>Taulukko 4. Alapaarteiden jatkosliitoksen mitoitus.</i>	17
<i>Taulukko 5. Rakenneosien taipumarajat.</i>	19
<i>Taulukko 6. Poikkileikkausten muuttaminen riippuen liitoksen murtumismuodosta.</i>	35
<i>Taulukko 7. Ohjelman edut ja rajoitukset.</i>	39
<i>Taulukko 8. Optimointiparametrien arvot.</i>	42
<i>Taulukko 9. Paarteiden geometriamuuttujien rajat.</i>	43
<i>Taulukko 10. Käytetyt kuormitukset optimoinnissa.</i>	46
<i>Taulukko 11. Käytetyt materiaaliominaisuudet optimoinneissa.</i>	47
<i>Taulukko 12. Optimoitavien ristikoiden lähtökohdat.</i>	47
<i>Taulukko 13. Yhteenveto optimointituloksista.</i>	54
<i>Taulukko 14. Optimointien keskiarvot sekä keskihajonnat.</i>	58

LYHENTEET JA MERKINNÄT

API	engl. Application programming interface, ohjelmointirajapinta
CIDECT	ransk. Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire
FEM	engl. Finite element method, elementtimenetelmä
NCCI	engl. Non-contradictory, Complementary Information, standardia ristiriidattomasti täydentävä lisäohje.
PSO	engl. Particle swarm optimization, parveilualgoritmi

Sauvojen ja liitosten mitoitus

A	Profiilin poikkipinta-ala
A_{net}	Poikkileikkauksen nettopinta-ala
A_{nt}	Levyn palamurtumisessa vetorasituksen alainen pinta-ala
A_{nv}	Levyn palamurtumisessa leikkausrasituksen alainen pinta-ala
$A_{tot.red}$	Muuttuja normaali- ja leikkausvoiman pienentämän taivutuskestävyyden laskennassa
A_v	Leikkauspinta-ala
$A_{w.red}$	Muuttuja normaali- ja leikkausvoiman pienentämän taivutuskestävyyden laskennassa
C_{my}	Ekvivalentin momentin kerroin
E	Kimmokerroin
F	Kuormitusvektori
K	Jäykkyysmatriisi
L_{cr}	Nurjahduspituus
L_i	Diagonaalisauvan pituus
L_{sys}	Systeempipituus
M_{Ed}	Taivutusmomentin mitoitusarvo
$M_{N.Rd}$	Normaalivoiman pienentämä taivutuskestävyys
$M_{N.V.Rd}$	Normaali- ja leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys
$M_{pl.Rd}$	Plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys
M_{Rk}	Taivutuskestävyyden ominaisarvo
$M_{V.Rd}$	Leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys
$N_{b.Rd}$	Nurjahduskestävyys
N_{cr}	Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma
$N_{c.Rd}$	Puristuskestävyys, kun nurjahdusta ei huomioida
N_{Ed}	Normaalivoiman mitoitusarvo
$N_{pl.Rd}$	Plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyys
N_{Rk}	Normaalivoimakestävyyden ominaisarvo
$N_{t.Rd}$	Vetokestävyys
$N_{V.Rd}$	Muuttuja normaali- ja leikkausvoiman pienentämän taivutuskestävyyden laskennassa
$N_{0.gap.Rd}$	Paarteen normaalivoimakestävyys vapaavälissä

V_{Ed}	Leikkausvoiman mitoitusarvo
$V_{eff.Rd}$	Teräslevyn kestävyys palamurtumisen suhteen
$V_{pl.Rd}$	Plastinen leikkausvoimakestävyys
V_{Rd}	Leikkausvoimakestävyys
W_{pl}	Plastinen taivutusvastus
a	Hitsin a-mitta
a_V	Muuttuja normaali- ja leikkausvoiman pienentämän taivutuskestävyyden laskennassa
a_w	Normaalivoiman pienentämän taivutuskestävyyden laskennassa käytettävä muuttuja
b_{eff}	Diagonaalin tehollinen leveys sen liittyessä paarteeseen
$b_{e,p}$	Diagonaalin tehollinen leveys, jota käytetään paarteen pinnan lävistymiskestävyyttä laskettaessa
b_i	Diagonaalin poikkileikkauksen leveys
c	Poikkileikkausluokituksessa käytettävä puristetun osan leveys
d	Ruuvien halkaisija
e	Epäkeskisyys
e_1	Voiman suunnassa reunimmaisen ruuvireiän keskiön etäisyys levyn reunasta
e_2	Ruuvien välinen keskiöetäisyys voiman suunnassa
f_b	Paarteen uuman nurjahduslujuus
f_u	Materiaalin murtolujuus
f_y	Materiaalin myötölujuus
$f_{yd,w}$	Hitsiaineen mitoituslujuus
g	K-liitoksen vapaaväli
h_i	Diagonaalin poikkileikkauksen korkeus
h_0	Paarteen poikkileikkauksen korkeus
I	Neliömomentti
k_n	Liitoksen kestävyuden pienennyskerroin
k_{yy}	Yhteisvaikutustekijä
k_1	Levyn reunapuristuskestävyyden laskennassa käytettävä muuttuja
l	Hitsin pituus
n	Käyttöaste
n_V	Normaalivoiman käyttöaste redusoidun poikkileikkauksen suhteen
p_1	Voimaa vasten kohtisuorassa suunnassa reunimmaisen ruuvireiän keskiön etäisyys levyn reunasta
p_2	Ruuvien välinen keskiöetäisyys voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa
t_i	Diagonaalin poikkileikkauksen paksuus
t_l	Teräslevyn paksuus
t_p	Teräslevyn paksuus
t_0	Paarteen poikkileikkauksen paksuus
u	Siirtymävektori
α	Epätarkkuustekijä
α_b	Levyn reunapuristuskestävyyden laskennassa käytettävä muuttuja
α_v	Ruuvien leikkauskestävyyden laskennassa käytettävä muuttuja

β	Diagonaalien poikkileikkausten leveyksien ja korkeuksien keskiarvon suhde paarteen leveyteen
β_{Lf}	Pitkän ruuviliitoksen kestävyuden pienennyskerroin
β_w	Korrelaatiokerroin
γ	Puolet paarteen leveyden suhteesta paarteen seinämän paksuuteen
γ_{M0}	Osavarmuusluku poikkileikkausten kestävyyttä laskettaessa
γ_{M1}	Osavarmuusluku sauvan kestävyyttä stabiilisuusiymiöiden suhteen laskettaessa
γ_{M2}	Osavarmuusluku nettopoikkileikkauksen vetokestävyyttä sekä liitosten kestävyksiä laskettaessa
γ_{M5}	Osavarmuusluku rakenneputkien välisten ristikkoliitosten kestävyksiä laskettaessa
η	Diagonaalisauvan korkeuden suhde paarteen leveyteen
θ_i	Diagonaalin liittymiskulma paarteeseen
$\bar{\lambda}$	Muunnettu hoikkuus
ρ	Taivutuskestävyyden pienennyskerroin leikkausvoiman vaikutuksesta
χ	Nurjahduksen pienennystekijä
χ_{LT}	Kiepahduksen pienennystekijä
Φ	Nurjahduksen pienennystekijän laskennassa käytettävä muuttuja

Kustannuslaskenta

A_h	Sahaoksen suuntaisten osien pinta-ala
A_p	Maalauspinta-ala
A_t	Sahattava poikkipinta-ala
C	Kokonaiskustannus
C_B	Suihkupuhdistuksen kustannus
C_{Ck}	Ajasta riippumattomien kulutustarvikkeiden kustannukset
C_k	Kustannuspaikan k kustannukset
C_M	Materiaalikustannus
C_S	Sahauskustannus
F_S	Sahatyypikerroin
F_{Sp}	Paksuuskerroin
H	Materiaalikerroin
L	Kappaleen pituus
L_{fw}	Hitsin pituus
Q	Sahaustehokkuus
S	Sahausnopeus
S_t	Sahan kestävyys
T_{Nk}	Tuottamaton aika
T_{Pk}	Tuottava aika
T_{Ta}	Silloitukseen kuluva aika
T_{We}	Hitsaukseen kuluva aika
W	Kappaleen massa

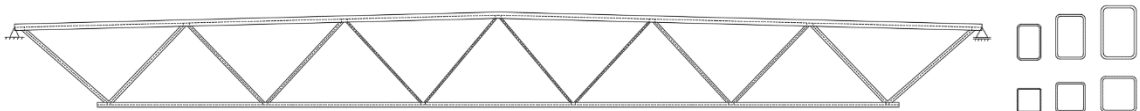
c_{CA}	Hitsauksen ajasta riippumattomat kustannukset
c_{Ck}	Ajasta riippuen kulutustarvikkeiden kustannukset
c_{Enk}	Energian yksikkökustannus
c_{Eqk}	Laitteiston hankintakustannus
c_{Lk}	Työvoiman yksikkökustannus
c_m	Materiaalin kilohinta
c_{Mk}	Laitteiston ylläpidon yksikkökustannus
c_{REk}	Työtilan hankinnan yksikkökustannus
c_s	Sahauksen kulutustarvikkeiden hinta
c_{Sek}	Työtilan ylläpidon yksikkökustannus
h	Putkiprofiilin pidempi sivu, josta vähennetään kaksi kertaa materiaa- lipaksuus
p_{SB}	Sahanterän hinta
u_k	Käyttöaste

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

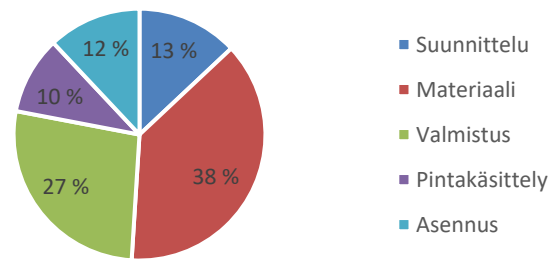
Teräsristikoiden suunnitteluun on kehitetty tietokoneavusteisia työkaluja jo 1990-luvulta lähtien (Heinisuo et al. 1991). Algoritmiavusteiset suunnittelumenetelmät ovat alkaneet yleistyä myös rakennesuunnittelussa, ja niiden avulla kokonaisia suunnitteluongelmia voidaan siirtää tietokoneiden ratkaistavaksi. Tietokoneen laskentatehoa hyödyntävien suunnittelumenetelmien käyttö onkin muuttunut kunnianhimoisten visioiden toteuttamisen työkalusta jokapäiväisessä työssä käytettäväksi potentiaaliseksi työkaluksi. Algoritmiavusteinen suunnittelu ei kuitenkaan pitäisi olla itseisarvo, vaan kokemusten myötä sille tulee löytää oikeat sovelluskohteet. (Labonnote et al. 2018)

Teräsristikoita käytetään yleisesti laajarunkoisten rakennusten kattokannattimina niiden keveyden ja mittatarkkuuden vuoksi. Tässä työssä keskitytään Warren-ristikoihin, jossa ristikon solmupisteet koostuvat K-liitoksista. K-ristikon etuna KT- ja N-ristikoihin verrattuna voidaan pitää vähäistä osien ja liitosten lukumäärää. Lisäksi tekniikka-asennukset ristikon läpi onnistuvat helposti harvan sauvotuksen vuoksi. Kuvassa 1 on esitetty tutkimuksessa käsitelty Warren-ristikko.



Kuva 1. Tutkimuksessa käsitelty K-ristikko.

Tietokoneavusteisen suunnittelun jatkona on kantavien rakenteiden suunnittelussa alettu hyödyntää optimointia. Esimerkiksi teräsristikoiden suunnittelua ja optimointia varten on kehitetty suunnittelu- ja optimointiohjelma (Mela et al. 2015), jonka avulla suoraviivaisia työtehtäviä voidaan automatisoida. Kantavien rakenteiden optimoinnissa haetaan nykyään keveimmän rakenteen sijasta halvinta rakennetta. Suunnittelija määrittää jopa 88 % teräsrakenteiden kustannuksista, minkä vuoksi on hyödyllistä kiinnittää huomioita suunnitteluratkaisuiden valmistus- ja asennushelpouteen. Kuvassa 2 on esitetty kustannusten jakauma teräsrakenteisella kohteella Evers & Maatje (2000) mukaan.



Kuva 2. Kustannusten jakautuminen teräsrakenteisella kohteella (Evers & Maatje 2000).

Tutkimuksen taustalla on kiinnostus algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntämisestä rakenteiden suunnittelussa. Mahdollisuus poistaa inhimilliset virheet, ja tehostaa geometrisesti työläiden rakenteiden mallintamista on vain yksi algoritmisen suunnittelun soveltuvuuskohteista. Algoritmien avulla työvaiheita saadaan automatisoitua, ja suunnittelijoiden aika voidaan vapauttaa muiden ongelmien ratkaisuun.

Olesen (2018) on tutkinut optimoinnin hyödyntämistä luonnossuunnitteluvaiheessa. Optimointi tehtiin erilaisille teräsrakenteille visuaalisen ohjelmoinnin keinoin. Työssä tutkittiin myös teräsristikoiden optimointia onnistuneesti. Kyseisen työn optimointiformulointia ei kuitenkaan voida pitää todelliseen kohteeseen soveltuvana, sillä rajoitusehtoina olivat pelkästään teräsrakenteiden jännitykset, jolloin normien mukaisten ehtojen täyttymisestä ei voida varmistua. Tässä työssä kehitettävän suunnitteluprosessin tarkoituksena on kattaa kaikki eurokoodin mukaiset mitoitus ehdot.

1.2 Tutkimuksen rajaukset ja tavoitteet

Tässä tutkimuksessa keskitytään kuvan 1 mukaisen yksiaukkoisen hitsatun teräsputkiristikon algoritmiavusteiseen suunnitteluun. Ristikon geometria käsittää vapaavälisin liitoksin kootun Warren-tyyppisen ristikon. Ristikon ja pilarin välinen liitos jätetään tutkimuksen ulkopuolelle, koska liitosalue toteutetaan rakenteesta riippuen eri tavoin. Poikkileikkauksina ristikossa käytetään neliön muotoisia rakenneputkia. Mitoitus tehdään eurokoodin mukaisesti huomioimalla Suomen kansallisen liitteen valinnat.

Tutkimuksen tavoitteena on määrittää algoritmiavusteiseen suunnitteluun soveltuva teräsristikon suunnittelumenetelmä. Suunnitteluprosessin tulee sisältää kaikki ristikon mitoituksen vaiheet niin, että eurokoodin mukaiset ehdot täyttyvät. Tietokoneavusteisella suunnittelulla pyritään automatisoimaan normin vaatiman laskentageometrian luontia liitosalueiden epäkeskisyyksien vaikutukset huomioiden. Lisäksi teräsristikon sauvojen mitoituksessa on oleellista alusta asti huomioida liitosten mitoitus. Työssä muodostettavassa mitoitusprosessissa pyritään huomioimaan molemmat osa-alueet mahdollisimman suoraviivaisesti.

Toisena tavoitteena on yhdistää optimointi osaksi suunnitteluprosessia. Jalkanen (2015) on esittänyt käytännönläheiseen suunnittelutyöhön liittyvät ehdot optimoinnin hyödyntämiselle, joita tutkimuksessa pyritään soveltamaan tarkoituksenmukaisesti. Suunnittelunormin mitoitus- ja rajoitusehtojen huomiointi on tärkein yksittäinen asia, kun optimointia halutaan soveltaa suunnittelutyökaluna. Optimoinnin hyödyt saattavat jäädä mittaattomiksi, jos optimoinnilla saatua suunnitteluratkaisua joudutaan jatkokesittelemään merkittävästi.

1.3 Tutkimuksen toteutus

Tutkimuksen esitiedoksi työssä esitellään eurokoodin ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset teräsristikon mitoitusehdot. Ennen suunnitteluprosessin automatisointia on perehdyttävä perinteisiin suunnittelumenetelmiin ja hyviin suunnittelukäytäntöihin sovellettavalla alalla. Algoritmiavusteinen suunnitteluun liittyen työssä esitellään yleisiä ideologioita sekä käytäntöjä.

Esitietojen pohjalta työssä esitetään automatisointiin soveltuva mitoitusmenettely teräsristikon suunnittelulle. Suunnitteluprosessin ongelma-alueisiin pureudutaan syvällisemmin, ja käytettyä logiikkaa avataan ongelmakohtien osalta. Kehitetyn suunnitteluprosessin toimintaa arvioidaan tehokkuuden ja sen tuottamien suunnitteluratkaisun perusteella. Tutkimuksessa keskitytään myös uuden suunnittelumenetelmän kehittämisprosessiin. Painoalueina pidetään osakokonaisuuksien välisiä vaativuussuhteita, jotta jatkotutkimuksissa ja -kehityksessä osataan paremmin hahmottaa tarvittavat resurssit.

Lopuksi tutkimuksessa kehitettyä mitoitusalgoritmia hyödynnetään osana optimointitehtävää. Optimointialgoritmin avulla pyritään hakemaan mahdollisimman hyvää geometriaratkaisua ristikoille. Ristikoiden optimoinnissa minimoidaan erikseen kokonaisuutta ja arvioituja valmistuskustannuksia. Löydettyjä optimiratkaisuja verrataan muissa tutkimuksissa saatuihin ratkaisuihin. Tulosten perusteella arvioidaan mitoitus- ja optimointialgoritmin yhdistämisen toimivuutta.

2. TERÄSRISTIKON SUUNNITTELU

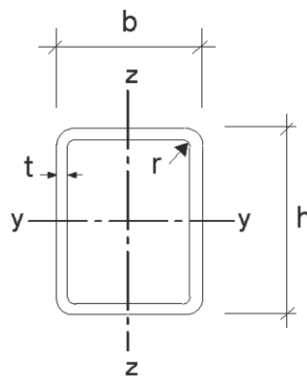
Tässä luvussa esitellään teräsrakenteiden ja liitosten mitoitus eurokoodi 3:n osien 1-1 (2005) ja 1-8 (2005) mukaisesti ottaen huomioon Suomen kansallisen liitteen (Ympäristöministeriö 2017) valinnat. Kaikkia lisä- ja korjausosia ei ole sisällytetty edellä esitettyihin standardeihin, mutta ne on huomioitu esitetyissä mitoitusohjeissa. Kaavat esitetään tutkimuksen kannalta oleellisilta osin yhden akselin suhteen taivutetuille rakenneosille sekä normaali- ja leikkausvoiman vaikutuksille.

2.1 Rakenneanalyysi

Tietokoneavusteisessa rakennesuunnittelussa rakenneosien rasitusten laskentaan käytetään usein elementtimenetelmää (eng. *Finite Element Method*, FEM), joka on osittaisdifferentiaaliyhtälön numeerinen ratkaisumenetelmä. Elementtimenetelmän tehokkuus perustuu monimutkaisen geometrian jakamiseen yksinkertaisempiin osiin, elementteihin. Elementit yhdessä muodostavat varsinaisen elementtiverkon, jota kutsutaan myös laskentamalliksi. Elementtimenetelmän perusyhtälö on muotoa

$$Ku = F \quad (2.1)$$

missä K on kerroinmatriisi, F on globaali kuormitusvektori ja u on kenttäfunktion solmuarvovektori. Lujuusopissa kerroinmatriisina on rakenteen jäykkyyssmatriisi ja solmuarvovektorina globaalisolmujen siirtymät. Perusyhtälön avulla voidaan ratkaista solmusiirtymät, joista jälleen voidaan ratkaista sauvoissa vaikuttavat rasitukset. Tässä työssä rakenneosien rasitusten laskenta tehdään kimmoteorian mukaisella lineaarisella rakenneanalyysillä. Kuvassa 3 on esitetty kaavoissa esiintyvät putkipoikkileikkauksen mitat.



Kuva 3. Suorakaideputkipoikkileikkauksen mitat sekä käytetyt koordinaattiakselit.

Eurokoodin mukaisesti mitoitettaessa ristikon paarteet mallinnetaan jatkuvina palkkielementteinä, jolloin kuormitusten ja epäkeskisyyksien aiheuttamat taivutusrasitukset tulee

huomioitua. Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa diagonaalit voidaan olettaa liittyvän nivelellisesti paarteisiin, mikäli seuraavat ehdot toteutuvat.

1. Geometria täyttää taulukon 1 vaatimukset (2.2)

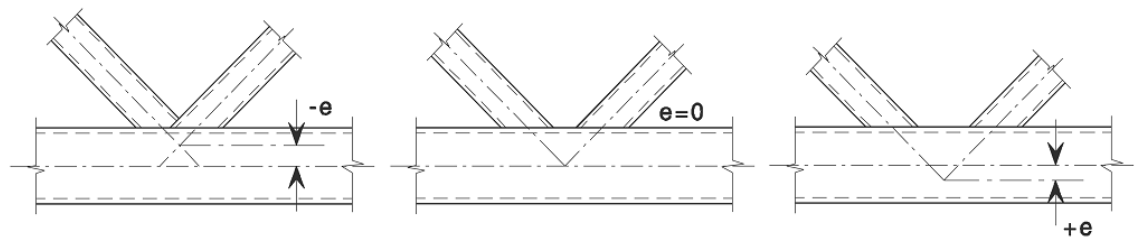
2. $L_i \geq 6h_i$ (2.3)

3. $-0.55h_0 \leq e \leq 0.25h_0$ (2.4)

missä h_0 on paarteen profiilin korkeus ja e on epäkeskisyyden suuruus. Diagonaalien i poikkileikkauksen korkeutta merkitään termillä h_i ja sen pituutta termillä L_i . Epäkeskisyyden e saadaan laskettua kaavalla

$$e = \left(\frac{h_1}{2 \sin \theta_1} + \frac{h_2}{2 \sin \theta_2} + g \right) \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2} \quad (2.5)$$

missä θ_i on diagonaalien ja paarteen välinen kulma ja g on K-liitoksen vapaavälin suuruus. Epäkeskisyyden arvo voi olla negatiivinen tai positiivinen riippuen tilanteesta. Kuvassa 4 on esitetty epäkeskisyyden merkkisääntö.



Kuva 4. K-liitoksen epäkeskisyyden merkkisääntö.

Ulkoisten kuormien lisäksi rasituksia sauvoihin aiheutuu liitosten kiertymisjäykkyydestä, sekä diagonaalien ja paarteen välisen liitoksen epäkeskisyydestä. Diagonaalien ja paarteiden välisten liitosten kiertymisjäykkyydestä aiheutuvat sekundääriset momentit voidaan jättää huomioimatta, jos ehdot (2.2) – (2.4) täyttyvät.

Epäkeskisyyden tulee yleisesti pyrkiä minimoimaan liitoksissa. Vapaavälisillä K-liitoksilla epäkeskisyyttä harvoin saadaan kokonaan poistettua johtuen vapaavälin minimiehdoista. Eurokoodin mukaiset vapaavälin g ehdot on esitetty alla.

$$g \geq 0.5(1 - \beta) \quad (2.6)$$

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (2.7)$$

missä t_1 ja t_2 ovat diagonaalien seinämäpaksuudet ja K-liitoksissa β lasketaan kaavalla

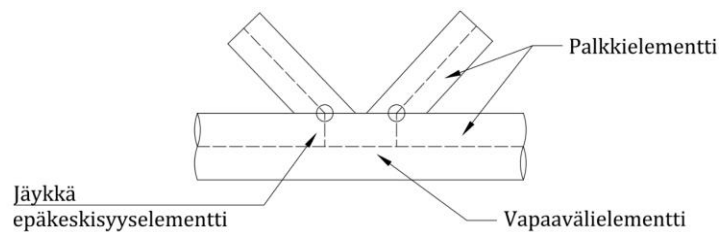
$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \quad (2.8)$$

Eurokoodin solmupistetarkastelukaavoille on asetettu geometriavaatimuksia liittyen liitokseen kuuluvien osien mittoihin. Taulukossa 1 on esitetty tässä työssä tarvittavien liitosten geometriaehdot.

Taulukko 1. Hitsattujen rakenneputkiliitosten geometriaehdot Y- ja K-liitoksissa.

Yhteiset	
$b_i/t_i \leq 35$	$t_i \geq 2.5 \text{ mm}$
$h_i/t_i \leq 35$	Puristetut osat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1 tai 2
$0.5 \leq h_i/b_i \leq 2.0$	
Y-liitos	
$b_1/b_0 \geq 0.25$	
K-liitos	
$b_1/b_0 \geq 0.35$	
$b_1/b_0 \geq 0.1 + 0.01b_0/t_0$	

Liitoksen epäkeskisyydestä aiheutuvat momentit tulee ottaa aina huomioon puristetun paarteen mitoituksessa. Epäkeskisyys tulee lisäksi huomioida vedetyn paarteen, diagonaalien sekä liitosten mitoituksessa, jos ehto (2.4) ei ole voimassa. Epäkeskisyys voidaan ottaa huomioon joko manuaalisesti lisäämällä taivutusmomenttien mitoitusarvoihin epäkeskisyyden vaikutus, tai muodostamalla rakennemallin liitoksiin epäkeskisyys-elementit. Kuvassa 5 on esitetty K-liitoksen laskentamalli, jossa epäkeskisyys vaikutus huomioidaan rasiusten laskennassa muodostamalla molemmille diagonaaleille erikseen epäkeskisyys-elementit.



Kuva 5. Liitosalueen mallinnus käyttäen kahta epäkeskisyys-elementtiä.

Kuvan 5 mukaisen liitoksen mallinnustavan geometrian luonti johtaa iteratiiviseen mallinnusprosessiin. Diagonaalien toisen pään solmun siirtäminen vaikuttaa sauvan kulmaan paarteiden suhteen, ja näin myös toisen päätepisteen oikeaan sijaintiin. Tämä johtuu K-liitokseen liittyvien diagonaalien keskilinjojen välisestä etäisyydestä ja sen riippuvuudesta liittyvien sauvojen kulmasta.

2.2 Sauvojen mitoitus

Puristetuille rakenneosille tulee tehdä poikkileikkausluokitus, jossa poikkileikkaukset jaetaan niiden puristettujen taso-osien hoikkuuksien mukaan eri luokkiin. Poikkileikkausluokissa 1 ja 2 poikkileikkaukselle voi muodostua plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys. Poikkileikkausluokassa 1 on lisäksi riittävä kiertymiskyky, jotta poikkileikkaukseen voi muodostua plastinen nivel. Poikkileikkausluokassa 3 profiilin reunalle voi muodostua myötölujuutta vastaava jännitys, mutta paikallinen lommahdus tapahtuu ennen plastisen taivutuskestävyyden saavuttamista. Poikkileikkausluokassa 4 profiilin taso-osien stabiilisuusilmiöt tulevat määrääväksi, ja profiilin kestävyysien laskennassa tulee käyttää pienennettyä, tehollista poikkileikkausta. Poikkileikkauksen poikkileikkausluokka määräytyy sen taso-osan mukaisesti, joka kuuluu suurimpaan luokkaan.

Tämän työn tutkimuksessa kaikki poikkileikkaukset on rajoitettu puhtaan puristuksen mukaan poikkileikkausluokkiin 1 ja 2, jolloin laskennassa voidaan käyttää täyttä plastisuusteorian mukaista kestävyyttä. Eurokoodin liitoslaskentataulukoiden käytön edellytyksenä on, että puristetut profiilit kuuluvat kyseisiin luokkiin. Profiilien valinnan yksinkertaistamiseksi vedetyt profiilit valitaan samasta katalogista kuin puristetut, jolloin kaikkien profiilien tulee täyttää vähintään poikkileikkausluokan 2 vaatimukset. Poikkileikkausluokitus on aina varmalla puolella, kun se tehdään puhtaan puristuksen mukaan. Profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 2 puristuksen mukaan, jos se täyttää ehdon

$$c/t \leq 38\epsilon, \quad (2.9)$$

missä $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$$c = h - 3t$$

t on profiilin paksuus

h on taivutuksen suuntainen profiilin korkeus

f_y on materiaalin myötölujuus

Eurokoodin mukainen leikkauskestävyyden mitoitusehto on

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1.0 \quad (2.10)$$

missä V_{Ed} on sauvassa vaikuttavan leikkausvoiman mitoitusarvo ja V_{Rd} on poikkileikkauksen leikkauskestävyys. Poikkileikkauksen leikkauskestävyys saadaan laskettua kaavalla

$$V_{pl.Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (2.11)$$

missä A_v on poikkileikkauksen leikkauspinta-ala, f_y on materiaalin nimellinen myötöraja ja γ_{M0} on osavarmuusluku, jonka arvo Suomessa on 1.0. Suorakaiteen muotoisen rakenneputken leikkauspinta-ala saadaan laskettua kaavalla (2.12).

$$A_v = A \frac{h}{b+h} \quad (2.12)$$

missä A on poikkipinta-ala. Puristuskestävyyden mitoitusehto on esitetty kaavassa (2.13), kun nurjahdusta ei huomioida.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c.Rd}} \leq 1.0 \quad (2.13)$$

missä N_{Ed} on normaalivoiman mitoitusarvo ja $N_{c.Rd}$ on puristuskestävyys, kun nurjahdusta ei huomioida. Poikkileikkausluokassa 1–3 puristuskestävyys määräytyy koko poikkileikkauksen kestävyden mukaisesti.

$$N_{c.Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.14)$$

Vetokestävyyden mitoitusehto on vastaavasti

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t.Rd}} \leq 1.0 \quad (2.15)$$

missä N_{Ed} on sauvassa vaikuttavan vetovoiman mitoitusarvo ja $N_{t.Rd}$ on poikkileikkauksen vetokestävyys. Vetokestävyyden arvo on

$$N_{t.Rd} = \min\left(N_{pl.Rd}, \frac{0.9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}}\right) \quad (2.16)$$

missä f_u on materiaalin murtolujuus, γ_{M2} on osavarmuusluku, jonka arvo Suomen kansallisen liitteen mukaan on 1.25 ja A_{net} on poikkileikkauksen nettopinta-ala. Jälkimmäinen termi voi tulla mitoittavaksi poikkileikkauksilla, joihin on tarvinnut porata reikiä esimerkiksi ruuviliitosta varten. Plastinen normaalivoimakestävyys lasketaan kaavalla

$$N_{pl.Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.17)$$

Puristettujen diagonaalien mitoitus tehdään taivutusnurjahduksen suhteen. Eurokoodin mukainen nurjahdusehto on

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (2.18)$$

missä N_{Ed} on sauvassa vaikuttava puristusvoiman mitoitusarvo ja $N_{b,Rd}$ on sauvan nurjahduskestävyys. Poikkileikkauksen nurjahduskestävyys poikkileikkausluokissa 1–3 lasketaan kaavalla (2.19).

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.19)$$

missä χ on nurjahduksen pienennystekijä

γ_{M1} on osavarmuusluku, jonka arvona Suomessa käytetään 1.0

Pienennystekijän arvo riippuu muunnetusta hoikkeudesta $\bar{\lambda}$. Jos muunnettu hoikkuus on alle 0.2, ei nurjahdus pienennä poikkileikkauksen kestävyyttä ja pienennystekijä saa arvon 1.

$$\chi = \begin{cases} 1.0, & \text{kun } \bar{\lambda} \leq 0.2 \\ \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0, & \text{kun } \bar{\lambda} > 0.2 \end{cases} \quad (2.20)$$

missä $\Phi = 0.5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2)$

α on nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L_{cr}^2}$$

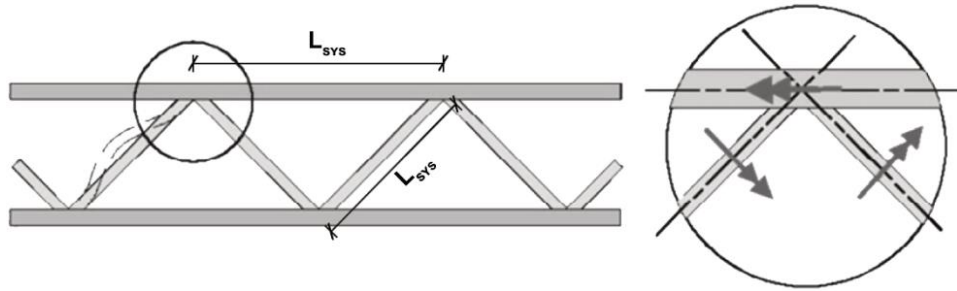
E on materiaalin kimmomoduuli

I on poikkileikkauksen neliömomentti

L_{cr} on sauvan nurjahduspituus

Käytetyn profiilikatalogin kaikki profiilit ovat kylmämuovattuja rakenneputkia, joille epätarkkuustekijä α saa arvon 0.49. Diagonaalien nurjahduspituutena molemmissa suunnissa voidaan Suomen kansallisen liitteen mukaan käyttää eurokoodin mukaista arvoa $L_{cr} = 0.75L_{sys}$. Diagonaalien kohdalla voidaan käyttää pienennettyä nurjahduspituutta johtuen sekä liitoksen, että rakenneosien jäykkyydestä. Systeemipituudella tarkoitetaan diagonaalien pituutta, jossa sen solmupisteet sijaitsevat paarteiden keskiviivoilla. Yläpaarteen nurjahduspituutena ristikon tasossa voidaan käyttää $L_{cr,y} = 0.9L_{sys}$. Kuvassa 6 on

esitetty diagonaalien ja paarteen tasossa tapahtuvan nurjahduksen nurjahduspituuksien laskennassa käytettävät pituudet L_{sys} .



Kuva 6. Sauvojen systeemipituudet, muokattu lähteestä (Wardenier et al. 2010).

Ristikon tasosta poispäin tapahtuvassa nurjahduksessa paarteen nurjahduspituutena käytetään arvoa $L_{cr,z} = 0.9L$, missä L on poikittaisten tukien välinen etäisyys. Boelin (2010) mukaan eurokoodin esittämä nurjahduspituudet diagonaaleille saattavat joissain tapauksissa johtaa kuitenkin epävarmalla puolella oleviin tuloksiin. Ristikon sauvoille voidaan aina käyttää nurjahduspituutta $L_{cr} = L_{sys}$.

Taivutuskestävyyden mitoitusehto poikkileikkausluokissa 1 ja 2 on

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1.0 \quad (2.21)$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo ja $M_{pl,Rd}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys. Taivutuskestävyys lasketaan kaavalla (2.22).

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.22)$$

missä W_{pl} on poikkileikkauksen plastinen taivutusvastus. Poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä voidaan joutua pienentämään leikkausvoiman tai normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuksen vuoksi. Normaalivoiman pienentämä taivutuskestävyys lasketaan kaavalla

$$M_{N,Rd} = \begin{cases} M_{pl,Rd}, & \text{kun } N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5(A - 2bt)f_y}{\gamma_{M0}}, \frac{1}{4}N_{pl,Rd}\right) \\ M_{pl,Rd} \frac{(1 - n)}{(1 - 0.5a_w)} \leq M_{pl,Rd}, & \text{muulloin} \end{cases} \quad (2.23)$$

Kaavassa (2.23) esiintyvä muuttuja n lasketaan vaikuttavan puristusvoiman ja puristuskestävyyden suhteena $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ ja kerroin a_w kaavalla

$$a_w = \min\left(\frac{A - 2bt}{A}, 0.5\right) \quad (2.24)$$

Taivutuskestävyyttä tulee pienentää myös leikkausvoiman vaikutuksesta, mikäli vaikuttava leikkausvoima ylittää 50 % kaavan (2.11) mukaisesta leikkauskestävyydestä. Leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys lasketaan kaavalla (2.25), kun leikkauslomahdus ei pienennä kestävyyttä.

$$M_{V.Rd} = \left(W_{pl} - \frac{\rho A_v^2}{8t} \right) \left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}} \right) \leq M_{pl.Rd} \quad (2.25)$$

missä pienennyskerroin $\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2$.

Jos taivutuskestävyyttä täytyy pienentää sekä normaalivoiman, että leikkausvoiman vuoksi, saadaan lopullinen taivutuskestävyys laskettu kaavalla (2.26).

$$M_{N.V.Rd} = \begin{cases} M_{V.Rd}, & \text{kun } N_{Ed} \leq \min \left(\frac{0.5A_{w.red}f_y}{\gamma_{M0}}, 0.25N_{V.Rd} \right) \\ M_{V.Rd} \frac{1 - n_V}{1 - 0.5a_V} \leq M_{pl.Rd}, & \text{muulloin} \end{cases} \quad (2.26)$$

missä $n_V = N_{Ed}/N_{V.Rd}$

$$a_V = A_{w.red}/A_{tot.red}$$

$$A_{w.red} = (1 - \rho)(A - 2bt)$$

$$A_{tot.red} = A - \rho(A - 2bt)$$

$$N_{V.Rd} = A_{tot.red}f_y/\gamma_{M0}$$

Taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutus stabiilisuuden menetyksen suhteen tarkistetaan kaavojen (2.27) ja (2.28) mukaisesti. Koska taivutus tapahtuu tutkittavissa rakenteissa vain toisen akselin suhteen ja poikkileikkausluokkaa 4 ei esiinny, suppenevat eurokoodissa olevat ehdot seuraavanlaisiksi.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0 \quad (2.27)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0 \quad (2.28)$$


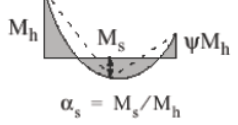
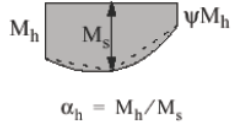
missä χ_y ja χ_z ovat poikkileikkauksen eri akselin suhteen lasketut taivutusnurjahduksen pienennystekijät. N_{Rk} ja M_{Rk} ovat poikkileikkauksen veto- ja taivutuskestävyyksien ominaisarvot. Kiepahduksen pienennystekijän χ_{LT} arvoksi tässä työssä oletetaan 1.0. Neliön muotoisilla rakenneputkilla ei käytännössä ole kiepahdusvaaraa, mutta suorakaiteen muo-

toisilla rakenneputkilla kiepahdus saattaa muodostua mitoittavaksi. Yhteisvaikutusehdoissa on lisäksi yhteisvaikutustekijä k_{yy} . Kaavan (2.27) pitkässä muodossa esiintyy vastaavasti yhteisvaikutustekijä k_{zy} , mutta suorakaiteen muotoisilla, yhteen suuntaan taivutetuilla rakenneputkilla sille voidaan valita arvoksi 0. Poikkileikkausluokissa 1 ja 2 yhteisvaikutustekijä k_{yy} voidaan laskea kaavalla

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda} - 0.2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) \leq C_{my} \left(1 + 0.8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) \quad (2.29)$$

Kaavoissa esiintyvä ekvivalentin momentin kertoimen C_{my} arvo riippuu tarkasteltavan sauvan momenttipinnasta taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Ekvivalentin momentin kertoimet.

Momenttipinta	Alue		C_{my} ja C_{mz} ja C_{mLT}	
			Tasan jakaantunut kuormitus	Pistemäinen kuormitus
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s / M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h / M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1+2\psi)^{1)}$
Sivusiirtyvien kehien sauvoille ekvivalentin momentin kertoimiksi valitaan arvot $C_{my} = 0,9$ tai $C_{Mz} = 0,9$				
Kertoimet C_{my} , C_{mz} ja C_{mLT} valitaan kyseeseen tulevien tukipisteiden välisen taivutusmomenttipinnan mukaan seuraavasti:				
Momenttikerroin	Akseli, jonka suhteen taivutus tapahtuu	Taso, jossa tukipisteet ovat siirtymättömiä		
C_{my}	y-y	z-z		
C_{mz}	z-z	y-y		
C_{mLT}	y-y	y-y		

Koska tässä työssä ei oteta kantaa, minkälaisessa rakenteessa ristikko sijaitsee, käytetään kertoimien laskennassa momenttipinnan mukaan määräytyviä arvoja. Toisin sanoen oletetaan, että ristikko ei ole sivusiirtyvän kehän osa.

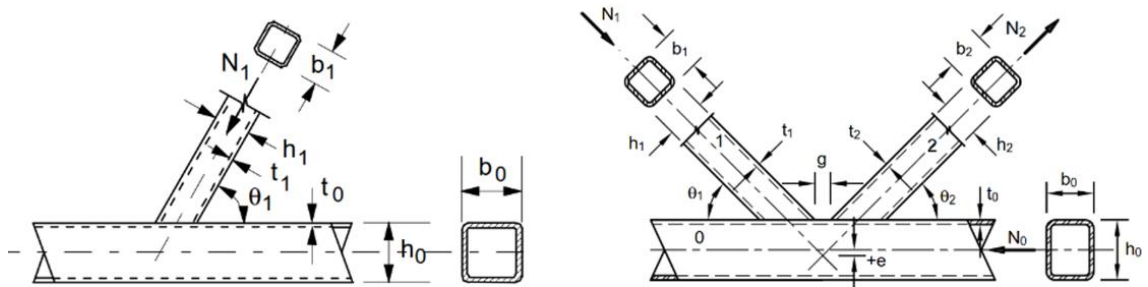
2.3 Liitosten mitoitus

2.3.1 Ristikon solmupisteet

Eurokoodi esittää ristikon hitsatuille putkiliitoksille 6 erilaista murtumismuotoa. Rakenneputkiliitosten mitoituskaavat perustuvat osittain testituloksiin, ja siksi eurokoodissa on esitetty geometriaehtoja liitokselle sekä siihen liittyville sauvoille. Tässä luvussa esitettyjen murtumismuotojen tarkastelu riittää kullekin liitokselle, mikäli esitetyt ehdot täyttyvät. Liitos tulee tarkastaa kaikkien murtumismuotojen suhteen, jos ehtoja rikotaan. Taulukon 1 ehtojen lisäksi diagonaalien liittymiskulmalle paarteen suhteen on annettu ehto

$$\theta_i \geq 30 \quad (2.30)$$

Tämän työn ristikoissa riittää Y- ja K-liitosten sekä harjan polviliitoksen mitoituskaavat. Esitetyt kaavat pätevät sellaisenaan lujuusluokkaan S355 asti. Pienentämällä laskennallisia kestävyyskertoimia 0.9 voidaan kyseisiä kaavoja soveltaa lujuusluokkaan S460 asti. Kuvassa 7 on esitetty liitoskaavoissa esiintyvät merkinnät.



Kuva 7. Liitoskaavojen merkinnät Y-liitoksessa ja K-liitoksessa.

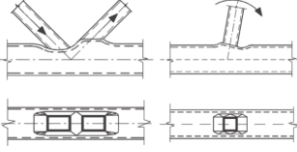
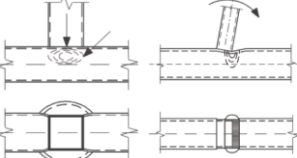
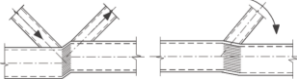
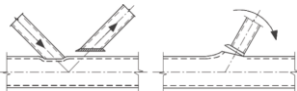
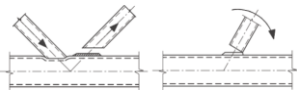
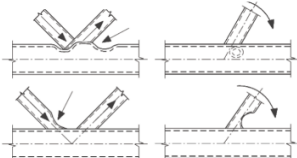
K-liitos tarkistetaan kahtena erillisenä Y-liitoksena, jos vapaavälin suuruus $g \geq t_1 + t_2$ ja $g \geq 1.5(1 - \beta)$. Taulukossa 3 on koottu eri murtumismuodot ja niitä vastaavat laskentakaavat Y- ja K-liitoksille. Tarkemmin liitoskaavojen muuttujia on esitetty eurokoodissa sekä teoriaa lähteessä (Packer et al. 2009).

Taulukossa esitettyjen kaavojen lisäksi K-liitokselle tulee tarkastaa vapaavälissä vaikuttavan normaali- ja leikkausvoiman yhteisvaikutus. Paarteen normaalivoimakkestävyys vapaavälissä saadaan kaavalla

$$N_{0,gap.Rd} = \frac{(A_0 - A_{v0})f_{y0} + A_{v0}f_{y0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} \quad (2.31)$$

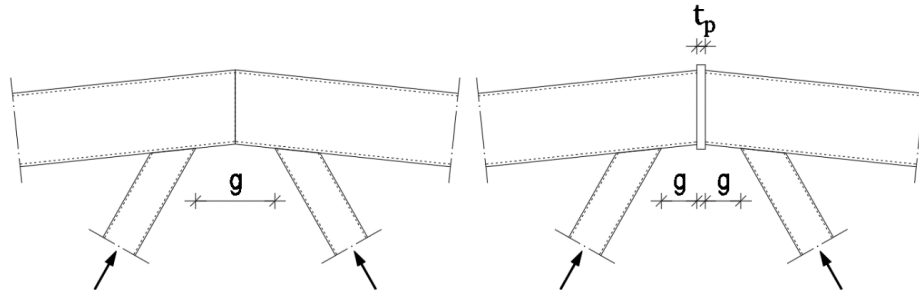
missä V_{Ed} on vapaavälissä vaikuttava leikkausvoima. Vapaavälin leikkausvoiman tarkka määrittäminen on mahdollista, jos K-liitosten mallinnukseen käytetään kuvan 5 mukaista mallinnustapaa.

Taulukko 3. Teräsristikon solmupisteiden murtumismuodot ja laskentakaavat.

Murtumismuoto	Y-liitos	K-liitos
	$\frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_i} \left(\frac{2\eta}{\sin \theta_i} + 4\sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5}$	$\frac{8,9 k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_i} \beta / \gamma_{M5}$
	$\frac{k_n f_b t_0}{\sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + 10t_0 \right) / \gamma_{M5}$	-
	-	$\frac{f_{y0} A_{v0}}{\sqrt{3} \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$
	$\frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + 2b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$	$\frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$
	$f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + 2b_{eff}) / \gamma_{M5}$	$f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$
	-	-

Vapaavälin leikkausvoiman arvioimiseksi on esitetty myös yksinkertaistettu tapa (Tiainen & Heinisuo 2015), jota voitaisiin soveltaa mitoitusohjelmassa. Yksinkertaistuksilla kuitenkin lopputulokset ovat usein ylimitoitettuja, joten on hyödyllistä pyrkiä muodostamaan automaattisessa suunnitteluohjelmassa kaikki osuudet mahdollisimman tarkasti ilman yksinkertaistuksia.

Harjalle liittyvissä diagonaaleissa vaikuttaa usein samanmerkkinen normaalivoima. Kuvassa 8 on havainnollistettu tilannetta. Polviliitoksen mitoitus riippuu kuvaan merkittyjen vapaavälien suuruudesta sekä siitä, käytetäänkö liitoksessa vahvikelevyä.



Kuva 8. Harjakohdan polviliitos. Liitoksessa voidaan käyttää vahvikelevyä.

Harjaliitoksessa on lähes aina edullista käyttää vahvikelevyä, sillä vahvistamattomalla polviliitoksella yläpaarteen normaalivoima on rajoitettu ehdolla

$$N_{Ed} \leq 0.2N_{pl.Rd} \quad (2.32)$$

Ehto käytännössä johtaisi yläpaarteen ylimitoitukseen, koska paarteiden normaalivoimat ovat suurimmillaan jännevälin keskikohdalla. Vahvikelevyllisellä liitostyyppillä käytetään K-liitoksen mukaisia laskentakaavoja, kun vapaavälin g suuruus on sille asetetuissa rajoissa. Suuremmilla vapaavälin arvoilla liitos mitoitetaan kahtena Y-liitoksena. Eurokoodin polviliitoksen vahvikelevylle on esitetty minimipaksuusvaatimus

$$t_p \geq \max(1.5t_0, 10\text{mm}) \quad (2.33)$$

missä t_p on välilevyn paksuus ja t_0 on paarteen paksuus. Liitoksen mitoitusena käytetään normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutusta kaavan (2.34) mukaisesti.

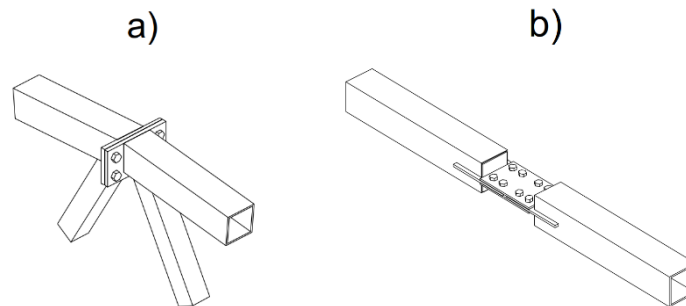
$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl.Rd}} \leq 1.0 \quad (2.34)$$

Diagonaalien ja paarteiden välinen hitsi voidaan mitoittaa eurokoodin hitsimitoituskaavoilla liitoksen rasiutusten mukaisesti, jos liitoksen kestävyys-, muodonmuutos- ja kiertymiskykyominaisuudet voidaan todentaa. Ristikon putkien välisissä liitoksissa jännitysja-kauma on epätasainen, ja osien myötääminen tasaa jännityshuippujen vaikutuksia. Tästä syystä hitsi kuitenkin usein mitoitetaan tasalujaksi heikoimman liitettävän osan mukaisesti. Hitsi on tasaluja, kun sen a-mitta on materiaalilla S355J2H $1.11t$ ja materiaalilla S420MH $1.48t$, missä t on ohuimman liitettävän osan paksuus. Suurilla putkien paksuuksilla kyseeseen voi tulla osittain- tai täysin läpihitsaus päittäishitsinä. Diagonaalien leveys on syytä rajata kapeammaksi kuin paarteiden leveys, jotta hitseistä ei tulisi vaikeita toteuttaa rakenneputkien nurkkapyörityksistä johtuen.

2.3.2 Paarteiden jatkosliitokset

Ristikko toteutetaan yleensä useammasta kokoonpanosta, jos sen jänneväli ylittää 25 metriä. Ristikot ovat hyvin tehokkaita kannattimia painoon nähden, eikä painon vuoksi ristikoita tarvitse jakaa useampaan osaan. Eri kokoonpanojen yhdistämiseksi on ristikkoon

suunniteltava jatkosliitokset. Jatkosliitokset suunnitellaan usein ruuviliitoksina, jotta ne ovat helposti toteutettavissa työmaaolosuhteissa. Kuvassa 9 on esitetty tyypilliset jatkosliitokset ylä- ja alapaarteelle.



Kuva 9. a) Yläpaarten ja b) alapaarten jatkosliitos ruuviliitoksena.

Yläpaarten laippaliitos käsitellään laskentamallissa jäykkänä liitoksena. Laippaliitoksille ei ole eurokoodissa esitetty laskentamenettelyä. Lähteen (Packer et al. 2009, s. 84) mukaan puristuksella olevilla laippaliitoksilla ruuvit eivät ole kriittisiä kuormankantokyvyn kannalta, vaan liitoslevyt siirtävät voiman kosketuspintojen kautta. Koska kyseinen jatkosliitos käsitellään laskentamallissa jäykkänä, liitokseen vaikuttaa normaalivoiman lisäksi myös taivutusta. Tällöin liitoksen osalta on tarkistettava, riittääkö paarten normaalivoima pitämään koko liitosalueen puristuksella. Eurokoodia ristiriidattomasti täydentävässä dokumentissa (NCCI SN044a 2006) puristetulle laippaliitokselle on esitetty kaksi edellytystä.

1. Täyden kosketuksen pinnat
2. Osien oikea sijoittelu, jotta epäkeskisyyden aiheuttamat momentit voidaan jättää huomioimatta.

Samassa dokumentissa on myös esitetty laskentamenetelmä vedetylle laippaliitokselle, mikä tässä työssä sivuutetaan. Ristikon suunnittelussa on kuitenkin huomioitava, että yläpaarten jatkosliitos saattaa joutua vetorasitukselle esimerkiksi asennustilanteessa tai kevyillä kattorakenteilla tuulen imun vuoksi.

Kuvan 9 b) mukainen limitetty liitos soveltuu hyvin jatkosliitokseksi, jos liitettävät osat pysyvät jokaisessa kuormitustapauksessa vedolla. Vetokuormituksen aiheuttamat rasitukset saadaan laippaliitokseen verrattuna suuremmin siirrettyä liitoslevyjen ja rakenneputken välillä. Voiman vaikuttaessa levyn suunnassa, siihen ei myöskään kohdistu lamelli-repeilyvaaraa. (SSAB Domex Tube Rakenneputket 2016, s. 223) Jatkosliitokset sijaitsevat usein ristikon jännevälillä keskellä, ja siksi paarteissa vaikuttavat normaalivoimat ovat suuria. Liitos voidaan mitoittaa suoraan alapaarten plastiselle vetokestäväydelle, jolloin liitoksen kestävyys on varmasti riittävä.

Alapaarrejatkoksen kohdalla tulee tutkia eurokoodin mukaiset murtumistavat ruuveille ja liitoslevyille, sekä mitoittaa levyn ja putken välinen hitsiliitos. Taulukossa 4 on esitetty alapaarrejatkoksen liitoskaavat.

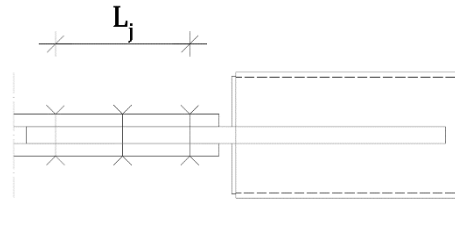
Taulukko 4. Alapaarteen jatkosliitoksen mitoitus.

Murtumistapa	Kestävyys
Ruuvien leikkauskestävyys	$F_{v.Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <p>Jos kierteet ovat leikkaustasossa</p> $\alpha_v = \begin{cases} 0.6, & \text{lujuuksluokilla 4.6, 5.6 ja 8.8} \\ 0.5, & \text{lujuuksluokilla 4.8, 5.8, 6.8 ja 10.9} \end{cases}$ <p>Jos kierteetön osa leikkaustasossa</p> $\alpha_v = 0.6$
Levyn reunapuristuskestävyys	$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{u,l} d t_l}{\gamma_{M2}}$ <p>missä $k_1 = \begin{cases} \min\left(2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right) & \text{reunarivi} \\ \min\left(1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right) & \text{muu rivi} \end{cases}$</p> $\alpha_b = \begin{cases} \min\left(\frac{e_1}{3d_0}, \frac{f_{ub}}{f_{u,l}}, 1.00\right) & \text{reunasarake} \\ \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - 0.25, \frac{f_{ub}}{f_{u,l}}, 1.00\right) & \text{muu sarake} \end{cases}$
Palamurtuminen	$V_{eff.Rd} = \frac{f_{u,l} A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f_{y,l} A_{nv}}{\gamma_{M0}}$
Levyn vetokestävyys	Kaavan 2.16 mukainen kestävyys
Hitsin kestävyys	$F_{w.Rd} = \Sigma a l f_{y,d,w} / \sqrt{3}$ <p>missä $f_{y,d,w} = f_u / (\beta_w \gamma_{M2})$</p>

Pitkillä liitoksilla ruuvien leikkauskestävyyden arvoa tulee pienentää kertoimella β_{Lf} . Pienennys tulee tehdä silloin, kun liitoksen voiman suunnassa kauimmaisten ruuvien keskiöiden välinen etäisyys on enemmän kuin 15 kertaa ruuvien halkaisija. Pienennystekijän arvo lasketaan kaavalla

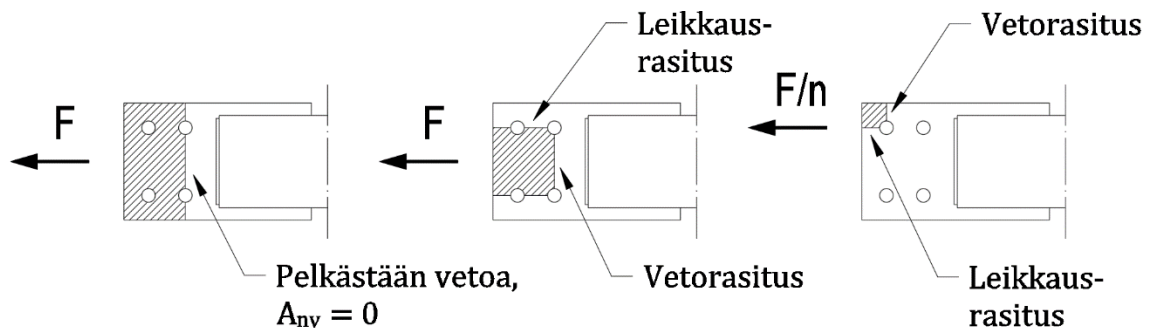
$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \quad (2.35)$$

missä L_j on äärimmäisten ruuvien välinen keskiöetäisyys ja d on ruuvien halkaisija. Pienennystekijän arvo tulee olla välillä $0.75 \leq \beta_{Lf} \leq 1.0$. Kuvassa 10 on esitetty etäisyys L_j .



Kuva 10. Reunimmaisten ruuvien välinen keskiöetäisyys.

Teräslevyjen murtumisen osalta tarkistukset tulee tehdä sekä liitoksen keskilevyille, että poskilevyille. Reunapuristuskestävyys tutkitaan ruuvikohtaisesti. Vetovoima voidaan olettaa jakautuvan tasan kaikille ruuveille, ja voimaa verrataan ruuviryhmän yksittäisten ruuvien mukaiseen pienimpään kestävyYTEEN. Erilaisia palamurtumismuotoja levyille voi olla kolme, ja ne kaikki tulee tarkastaa. Kuvassa 11 on näytetty mahdolliset palamurtumismuodot. Kuvien vedolle olevien osien pinta-alaa merkitään kaavoissa muuttujalla A_{nt} ja leikkauksella olevaa pinta-alaa muuttujalla A_{nv} .



Kuva 11. Levyjen palamurtumismuodot.

Kolmannessa palamurtumismuodossa palamurtuminen tapahtuu yksittäisen ruuvin osalta, jolloin mitoitusvoimana käytetään vain yhteen ruuviin kohdistuvaa voimaa. Rakennuksen suunnittelussa on tärkeää huomioida myös jatkoskohtien sivuttaissuuntainen tuenta. Tässä työssä tarkastelu kohdistuu tasoristikoihin, joten jatkosliitosten tuentojen mitoitus jätetään käsittelemättä.

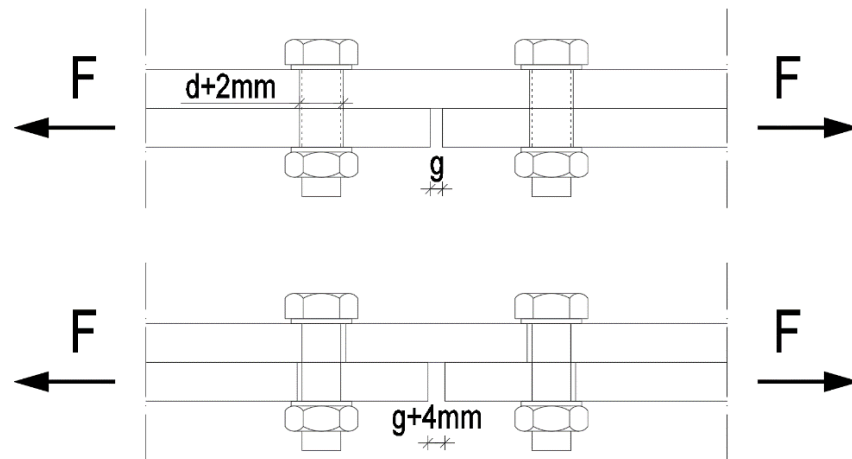
2.4 Käyttörajatila

Suomen kansallisessa liitteessä on esitetty taipumarajat eri rakenteille. Pääsääntöisesti taipumat eivät ole teräsristikoilla ongelma, ja sen vuoksi usein on mahdollista hyödyntää korkeamman lujuusluokan teräksiä. Taulukossa 5 on esitetty pääkannattajien taipumarajat.

Taulukko 5. Rakenneosien taipumarajat.

Rakenne	Taipuman tai siirtymän raja-arvo
Pääkannattajat	
– vesikatoissa ja katoksissa	L/300
– välipohjissa	L/400
Ulokkeet	L/150

Ristikon painosta aiheutuvat taipumat voidaan kumota esikorottamalla ristikköä. Lisätaipumia ristikolle aiheuttaa myös jatkosliitoksen välykset, jos ristikko koostuu useammasta kuin kahdesta kokoonpanosta. Jatkosliitosten ruuvireikien välykset aiheuttavat pieniä lisätaipumia, mutta usein ne ovat laskennan kannalta merkityksettömiä. Valmistuksessa ne on kuitenkin huomioitava. Kuvassa 12 on havainnollistettu jatkosliitoksen siirtymiä kuormituksen alaisuudessa. Lisätaipumat muodostuvat sitä suuremmiksi, mitä useampia jatkosliitoksia ristikköön joudutaan tekemään.

**Kuva 12. Jatkosliitosten ruuvien välysten aiheuttama alapaarteen venymä.**

Diagonaalien liitos paarteisiin voitiin rakennemallissa olettaa nivelelliseksi, jos ehdot (2.2) – (2.4) toteutuvat. Elementtimenetelmän mukaan lasketut taipumat ovat tällöin kuitenkin liian pieniä todellisiin taipumiin nähden. Laskentamallin mukaisille taipumille suositellaan käytettävän kerrointa 1.1. (Wardenier et al. 2010, s. 69)

2.5 Kustannusten arviointi

Kirjallisuudessa (Jármai & Farkas 1999; Pavlovčič et al. 2004; Haapio 2012) on esitetty useita teräsrakenteiden kustannuslaskentamalleja. Tässä esitetty teräsristikon kustannusten arviointi perustuu Haapion väitöstyöhön (2012). Haapio on esittänyt piirre pohjaisen kustannuslaskennan mallin, missä kokonaiskustannukset koostuvat eri työvaiheiden eli kustannuspaikkojen yhteenlasketusta summasta. Kustannuspaikan yleinen kustannusfunktio on

$$C_k = (T_{Nk} + T_{Pk}) \left(\frac{c_{Lk} + c_{Eqk} + c_{Mk} + c_{REk} + c_{Sek}}{u_k} \right) + T_{Pk}(c_{Ck} + c_{Enk}) + C_{Ck} \quad (2.36)$$

missä T_{Nk} on kustannuspaikan tuottamaton aika [min]

T_{Pk} on kustannuspaikan tuottava aika [min]

c_{Lk} on työvoiman yksikkökustannus [€/min]

c_{Eqk} on laitteiston hankintakustannus [€/min]

c_{Mk} on laitteiston ylläpidon yksikkökustannus [€/min]

c_{REk} on työtilan hankintakustannus [€/min]

c_{Sek} on työtilan ylläpidon yksikkökustannus [€/min]

c_{Ck} on ajasta riippuvien kulutustarvikkeiden kustannukset [€/min]

c_{Enk} on käytettävän energian yksikkökustannus [€/min]

C_{Ck} on ajasta riippumattomien kulutustarvikkeiden kustannukset [€]

u_k on käyttöaste [-]

Yleisen kustannusfunktion avulla voidaan arvioida eri kustannuspaikoille kustannukset. Mela on väitöstyössään (2013) soveltanut Haapion kustannuslaskentamallia teräsristikoiille. Teräsristikon kustannukset voidaan katsoa koostuvan materiaalin, suihkupuhalluksen, sahauksen, hitsauksen ja maalauksen kustannuksista. Ristikon kokonaiskustannus saadaan arvioitua kyseisten osakustannusten summana eli

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2.37)$$

missä C on kokonaiskustannus, n on kustannuspaikkojen lukumäärä ja C_i on yksittäisen kustannuspaikan arvioitu kustannus. Tietyille kustannuspaikoille osa yleisen kustannusfunktion termeistä voidaan jättää huomiotta.

Materiaali

Materiaalin kustannukset voidaan laskea kaavalla (2.38).

$$C_M = c_M W \quad (2.38)$$

missä c_M on materiaalin yksikkökustannus [€/kg] ja W on kappaleen massa [kg]. Materiaalille S355 voidaan käyttää arvoa $c_M = 0.8\text{€/kg}$.

Suihkupuhdistus

Suihkupuhdistuksen kustannukset voidaan arvioida kaavalla

$$C_B = 3.63 * 10^{-4} L \quad (2.39)$$

missä L on kappaleen pituus [mm]. Kaavan vakio-osuus sisältää suihkupuhalluksen kulutustarvikkeiden, työtilan, laitteiston, työvoiman sekä työhön tarvittavan energian kulut.

Sahaus

Rakenneputken sahauksesta ja päiden viistämisestä aiheutuvat kustannukset arvioidaan kaavalla (2.40).

$$C_S = c_S(T_{NS} + T_{PS}) + T_{PS}(c_{CS} + c_{ENS}) \quad (2.40)$$

missä T_{NS} on tuottamaton aika [min], T_{PS} on sahaus aika [min], c_{CS} on sahauksen kulutustarvikkeiden hinta [€/min], c_{ENS} on energian hinta [€/min] ja c_S on kulutustarvikkeiden, työtilan, laitteiston, työvoiman sekä työhön tarvittavan energian kulut.

Sahaukseen käytettävä tuottamaton aika riippuu sahattavan rakenneputken pituudesta sekä päiden viisteistä. Tuottamaton aika lasketaan kaavalla

$$T_{NS} = \begin{cases} 4.5 + \frac{1}{20000} L, \text{ jos } \theta_1 = 0 \text{ ja } \theta_2 = 0 \\ 5.5 + \frac{1}{20000} L, \text{ jos } \theta_1 > 0 \text{ tai } \theta_2 > 0 \\ 6.5 + \frac{1}{20000} L, \text{ jos } \theta_1 > 0 \text{ ja } \theta_2 > 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

missä L on rakenneputken pituus [mm] ja θ_i on kyseisen pään viisteen kulma.

Sahaukseen kuluva aika riippuu luonnollisesti sahattavasta poikkileikkauksesta, sekä sen materiaalista. Tuotantoaika lasketaan kaavalla

$$T_{PS} = \frac{h}{S * S_m} + \frac{A_h}{Q} \quad (2.42)$$

missä $h = H - 2t$

H on profiilin pidemmän sivun pituus

S_m on materiaalikerroin [-]

$$A_h \approx \frac{2Ht}{\cos(\theta_i)}$$

Q on sahaustehokkuus [mm²/min]

$$S = \begin{cases} 130, & \text{kun } 0 \leq t \leq 5 \\ 100, & \text{kun } 6 \leq t \leq 10 \\ 90, & \text{kun } 11 \leq t \leq 15 \end{cases}$$

Sahausten kulutustarvikkeiden hinta saadaan arvioitua kaavalla (2.43).

$$c_{CS} = \frac{A_t p_{SB}}{S_t T_{PS}} \quad (2.43)$$

missä $A_t = A / \cos(\theta_i)$

A on leikattavan poikkileikkauksen pinta-ala

p_{SB} on sahanterän hinta [€]

$$S_t = Q F_s F_{sp}$$

F_s on kerroin, mikä riippuu tuotteen tyypistä

$$F_{sp} = \begin{cases} 0.4, & \text{kun } 0 \leq t \leq 5 \\ 0.45, & \text{kun } 6 \leq t \leq 10 \\ 0.5, & \text{kun } 11 \leq t \leq 15 \end{cases}$$

Kaavoissa esiintyvä kulma θ on rakenneputken ja sahanterän välinen kulma. Rakenneputket sahataan niin, että pidempi sivu on vasten tukipintaa. Kulma saa arvon $\theta = 0$, kun rakenneputki sahataan kohtisuoraan poikki.

Hitsaus

Hitsausliitoksen valmistamisesta aiheutuvat kustannukset voidaan laskea kaavalla

$$C_A = T_{PA} \left(\frac{C_{LA} + C_{EqA} + C_{ReA} + C_{SeA}}{u_{PA}} + C_{EnA} \right) + C_{CA} \quad (2.44)$$

missä T_{PA} on tuotantoaika [min], c_{LA} on työvoimakustannukset [€/min], c_{EQA} on hitsausvälineistön hinta [€/min], c_{ReA} on työtilan investointikustannukset [€/min], c_{SeA} on työtilan ylläpitokustannukset [€/min], u_{PA} on käyttöaste, c_{EnA} on hitsauskaluston käyttämän energian (sähkön) hinta [€/min] ja c_{CA} on ajasta riippumattomat hitsaustarvikkeet [€].

Hitsaukseen kuluva aika voidaan jakaa silloitukseen ja itse hitsaustyöhön kuluvaan aikaan. Silloituksella tarkoitetaan apuhitsien tekoa ennen varsinaista hitsausta, ja siihen voidaan olettaa kuluvan $T_{Ta} = 1.59min$ aikaa. Kokonaisaika saadaan lisäämällä tähän hitsaustyön aika, eli

$$T_{PA} = T_{Ta} + T_{We} \quad (2.45)$$

missä T_{We} on hitsaustyöhön kuluva aika, joka on riippuvainen hitsiliitostyypistä. Ristikon rakenneputkiliitoksissa kyseeseen voi tulla piena- ja päittäishitsit. Hitsaukseen kuluva aika saadaan laskettua kaavalla

$$T_{We} = \begin{cases} \frac{L_{fw}}{1000} (0.4988a^2 - 0.0005a + 0.0021), & \text{pienahitseille} \\ \frac{L_{fw}}{1000} (0.249b^2 - 0.0096b + 0.0506), & \text{päittäishitseille} \end{cases} \quad (2.46)$$

missä a on hitsin a-mitta [mm]

b on hitsin syvyys [mm]

$$L_{fw} = \left(\frac{2H}{\sin(\theta)} + 2B \right) + (2\pi - 8)R$$

B on rakenneputken profiilin leveys

R on ulkopuolinen nurkkapyöristyksen säde

θ on diagonaalin ja paarteen välinen kulma

Ajasta riippumattomien tarvikkeiden kustannukset riippuvat myös hitsaustavasta kaavan (2.47) mukaisesti.

$$c_{CA} = \begin{cases} 7.85 * 10^{-6} L_{fw} a^2 * 6.35, & \text{pienahitseille} \\ 7.85 * 10^{-6} L_{fw} \frac{b^2}{2} * 6.35, & \text{päittäishitseille} \end{cases} \quad (2.47)$$

Maalaus

Maalauksen kustannukset voidaan arvioida kaavalla

$$C_p = T_{PP} \left(\frac{c_{LP} + c_{ReP} + c_{SeP}}{u_p} \right) + c_{CP} \quad (2.48)$$

missä $T_{PP} = 5.7 * 10^{-7} A_p$

A_p on maalauspinta-ala [mm²]

c_{LP} on työvoimakustannukset [€/min]

c_{ReP} on työtilan investointikustannukset [€/min]

c_{SeP} on työtilan ylläpitokustannukset [€/min]

u_p on käyttöaste

$c_{CP} = 3.87 * 10^{-6} A_u$

A_u on profiilien ulkopinta-ala, ristikon rakenneputkilla $A_u = A_p$

Kustannukset ovat aika- ja sijaintiriippuvaisia. Tästä syystä kustannusfunktioiden muuttujien arvot tulee aina muokata tilanteeseen soveltuviksi. Muuttujien arvot riippuvat muun muassa valmistavasta konepajasta sekä suunnittelukohdemaasta. Myös muita asioita voidaan sisällyttää kustannusarvioon, kuten kuljetuksesta ja asennuksesta aiheutuvat kustannukset (Pavlovčič et al. 2004).

3. ALGORITMIAVUSTEISEN SUUNNITTELUN SOVELTAMINEN

Tässä kappaleessa esitellään yleisesti algoritmiavusteista suunnittelua sekä paneudutaan tarkemmin teräsristikoiden algoritmiavusteisen suunnitteluprosessin kehittämiseen. Teräsristikoiden mitoitukseen esitetään menetelmä, ja sen toimivuutta testataan. Lopuksi pohditaan vielä optimointialgoritmien hyödyntämistä mitoitusalgoritmin rinnalla kantavien rakenteiden optimoimiseksi.

3.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu

Algoritmillla tarkoitetaan sarjaa ohjeita tai askelia, joilla pyritään saavuttamaan tietty päämäärä, eli toisin sanoen ratkaisemaan ennalta määritetty tehtävä (Tanska & Österlund 2014, s. 20). Algoritmin ohjeiden määrittelyllä on oleellinen osuus sen toiminnan kannalta. Jokaisen askeleen on oltava kuvattu niin, että se voidaan suorittaa yksiselitteisesti. Algoritmin sisältämien osien keskinäinen järjestys tulee olla yksikäsitteinen, mistä johtuen algoritmi on usein järkevää toteuttaa tietokoneohjelmana, vaikka periaatteessa algoritmin määrittelmä ei sitä vaadi. Algoritmille voidaan syöttää lähtötiedoksi tietoalkioita, joita se määrittelyllä logiikan mukaisesti käsittelee. Algoritmi voi vastaavasti suoriuduttuaan tehtävistä tuottaa dataa, jota voidaan jälleen jatkokäsitellä. Algoritmeja voidaan siitä johtuen ketjuttaa ja näin muodostaa pienemmistä algoritmeista suurempia kokonaisuuksia.

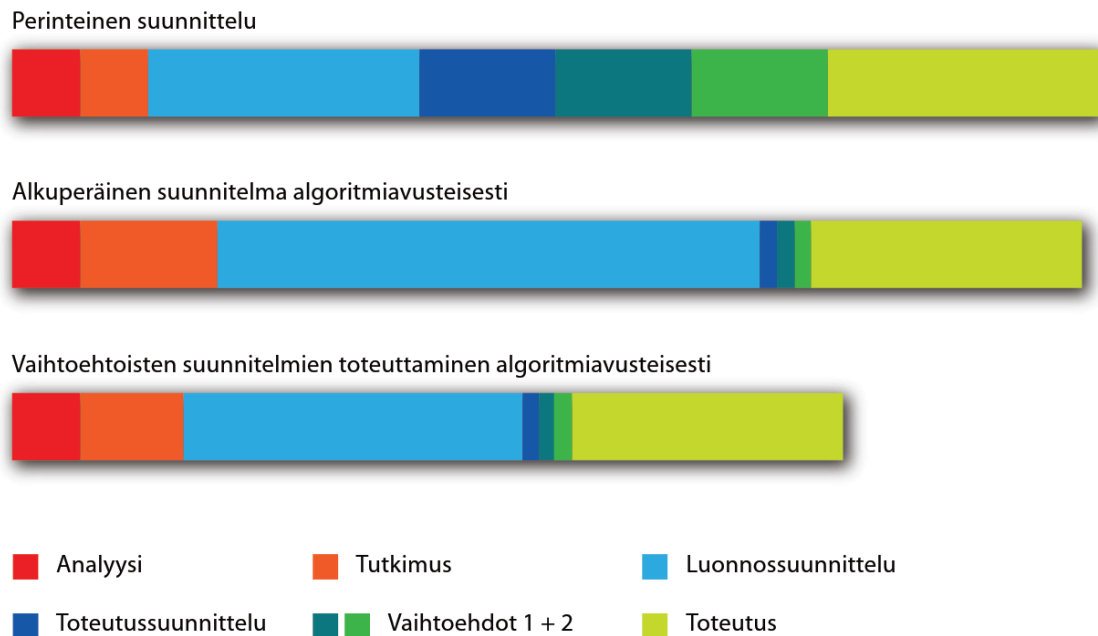
Algoritmiavusteisella suunnittelulla tarkoitetaan suunnittelumallia, jossa tietyt suunnitteluvaiheet ja niiden välinen tiedonsiirto on toteutettu algoritmien avulla. Kyseisellä menettelyllä voidaan automatisoida työtehtäviä, kun algoritmi ohjelmoidaan tietokoneen ymmärtämään muotoon. *Hajota ja hallitse* on yksi algoritmin suunnittelun periaate, missä ratkaistava ongelma jaetaan pienemmiksi osakokonaisuuksiksi. Ongelman jakamista tehdään niin kauan, että jokaiselle osaongelmalle osataan muodostaa ratkaisu. Lopuksi osaongelmille luodut ratkaisut kootaan yhdeksi kokonaisuudeksi, joka toimii alkuperäisen ongelman ratkaisuna. Jaettu ongelma johtaa algoritmia ohjelmoitaessa loogisesti modulaarisuuteen, jolloin ohjelman eri osakokonaisuudet voidaan eriyttää toisistaan. Tällöin algoritmien päivitys, muodostaminen ja korjaus voidaan kohdistaa pelkästään kyseessä oleviin kohtiin. Modulaarisuudella voidaan myös mahdollistaa algoritmien uudelleenjärjestäminen, esimerkiksi uusien käyttömahdollisuuksien luomisen yhteydessä. (Woodbury 2010, s. 61)

Algoritmeja voidaan toteuttaa esimerkiksi tekstimuotoisella ohjelmoinnilla, tai hyödyntämällä visuaalisia ohjelmointiympäristöjä. Visuaalisissa ohjelmointiympäristöissä algoritmien parametrinen luonne saadaan hyödynnettyä määrittelemällä lähtötiedot erilaisten

muutoksia hyväksyvien komponenttien avulla. Visuaalisissa ohjelmointiympäristöissä algoritmeja voidaan luoda ilman tekstimuotoista ohjelmointia, mikä madaltaa niiden käyttökynnystä.

Mahdollisuus muuttaa lähtötietoja tekee algoritmiavusteisista suunnitteluprosesseista tehokkaita niiden muuntojoustavuuden ja uudelleenkäytettävyyden vuoksi. Uudelleenkäytettävyyden varmistamiseksi on prosessin suunnitteluvaiheessa otettava huomioon kyseisen tehtävän tavoitteet ja kyseiselle toimenpiteelle tavanomaiset lähtötietomuuttujat. Suunnitteluprosessia automatisoidessa onkin tärkeää, että algoritmin logiikan kehittäjällä on syvä ymmärrys perinteisestä suunnitteluprosessista ja sen eri vaiheiden välisestä tiedonsiirrosta. Algoritmiavusteisessa suunnittelussa onkin alussa yksi vaihe enemmän perinteiseen suunnitteluun verrattuna. Tässä vaiheessa suunnittelija määrittelee eri osien ja osa-alueiden väliset kytkökset, eli algoritmin logiikan. (Woodbury 2010, s. 24)

Tanska & Österlund (2014) ovat avanneet algoritmisen ja perinteisen suunnittelun välisiä eroavaisuuksia. Algoritmisessa suunnitteluprosessissa yksittäinen ratkaisu ei ole merkittävä, vaan tehokkuus perustuu nimenomaan lähtötietojen muutoksilla saavutettaviin vaihtoehtoisin ratkaisuihin ja niiden analysointiin. Suunnittelumenetelmien osatehtävien suorittamiseen kuluvan ajan vertailua on esitetty kuvassa 13. Kuvasta ilmenee selkeästi algoritmisen suunnittelun etu suunnitteluratkaisujen vertailussa. Valmiiksi määritellyllä ja toteutetulla algoritmilla kyetään lyhyessä ajassa testaamaan ja tekemään johtopäätöksiä eri suunnitteluratkaisuiden välillä.



Kuva 13. Perinteisen ja algoritmiavusteisen ajankäytölliset eroavaisuudet. (Tanska & Österlund 2014, s. 24)

Rakennusalalla algoritmiavusteista suunnittelua voidaan hyödyntää lähes kaikissa tietokoneavusteisesti suoritettavissa työtehtävissä. Rakenteiden tietomallinnuksen työkaluna algoritmit osoittautuvat erittäin tehokkaiksi, kun työstettävä geometria on monimutkainen. Matemaattisesti määritettyjen käyrien ja pintojen mukailu käsin on työlästä, kun taas tietokoneen laskettavaksi ne ovat hyvin yksinkertaisia. Toistuvan geometrian luontiin monissa kaupallisissa mallinnus- ja piirto-ohjelmissa on jo työkaluja. Näissä työkaluissa siirrettävien tai kopioitavien osien tulee yleensä kuitenkin pysyä identtisinä. Algoritmillla geometriaa voidaan suoraan muokata jokaiseen kohtaan räätälöidyksi, jolloin esimerkiksi tarkan rakennekorkeuden määrittäminen kullekin osalle yksilöidysti on helposti tehtävissä. Geometrian luonnin lisäksi ennen tietomallinnusta rakenteilla voidaan suorittaa mitoitusta joko erilaisten valmiiden taulukoiden tai rakenneanalyysin perusteella.

Rakennelaskennan eri vaiheiden muodostaminen algoritmiksi on suoraviivaista, sillä standardin mukaisen rakenteiden mitoituksen kaikki vaiheet ovat yksiselitteisesti ja matemaattisesti määriteltävissä. Intuiitivien työvaiheiden muodostaminen yksiselitteisiksi säännöiksi on puolestaan usein hankalaa, koska suunnittelua ohjaa kokemusten myötä tullut tietotaito käsitellä ongelmia. Intuiitivisen ajattelumallin puuttumista voidaan kuitenkin kompensoida tietokoneen suurella laskentateholla, jolloin samassa ajassa kyetään tutkimaan useampia suunnitteluratkaisuja kuin perinteisillä suunnittelumenetelmillä.

Muodostamalla täysin automaattinen mitoitusprosessi algoritmien avulla, voidaan optimointi yhdistää osaksi suunnittelua. Populaatiopohjaiset optimointialgoritmit ovat helpoja hyödyntää, koska algoritmin lähtötiedot on jätetty muokattavaksi. Mitoitus- ja optimointialgoritmeja ei tule kuitenkaan sekoittaa keskenään. Optimointialgoritmit ovat algoritmeja, jotka pyrkivät kyseisen optimointimenetelmän mukaisesti joko maksimoimaan, tai minimoimaan kohdefunktion arvoa. Mitoitusalgoritmi puolestaan hakee annettuun lähtötiedoin ratkaisun sille asetettujen ohjeiden mukaisesti.

3.2 Perinteinen teräsristikon suunnitteluprosessi

Suunnitteluprosessin automatisoinnissa on tärkeää ymmärtää perinteiset suunnittelumenetelmät. CIDECTin kolmannessa oppaassa (Packer et al. 2009, s. 25) on esitetty suunnitteluprosessi teräsristikoiden suunnitteluun, jonka eri vaiheet ovat listattuna alla. Ristikon tilavaraus on usein ennalta määrätty, jolloin geometrian variointi kohdistuu erilaisten diagonaalisauvojen tutkimiseen. Ristikon korkeutta voidaan arvioida jännevälillä perusteella, jos lopullinen geometria on vapaasti rakennesuunnittelijan määriteltävissä.

1. Määritetään ristikon geometria
2. Määritetään kuormitukset
3. Lasketaan sauvojen rasitukset joko a) puhtaan ristikon mallin mukaisesti tai b) niin, että paarre on jatkuva ja diagonaalit liittyvät nivelellisesti paarteeseen.
4. Arvioidaan paarteiden profiilit normaalivoiman mukaan. Puristetun paarteen nurjahduspituuden kertoimena voidaan käyttää arvoa 0.9
5. Arvioidaan diagonaalien profiilit normaalivoiman mukaan. Puristettujen osien nurjahduspituuden kertoimena voidaan käyttää arvoa 0.75
6. Yhdenmukaistetaan diagonaalien poikkileikkaukset muutamaan eri profiiliin
7. Hahmotellaan liitokset. Ensisijaisesti pyritään vapaavälisiin liitoksiin. Tarkistetaan myös normien mukaiset vaatimukset liittyville profiileille ja kulmille
8. Mikäli ehdot eivät täyty, muutetaan liitos limitetyksi tai muutetaan profiileja.
9. Tarkistetaan paarteiden kestävydet ottaen huomioon normaalivoiman lisäksi momentit
10. Tarkistetaan ristikon taipuma
11. Suunnitellaan hitsiliitokset.

SSAB:n putkipalkkikäsikirjassa (2016, s. 424–426) on esitetty hieman edellisestä poikkeava ohjeistus ristikon suunnittelulle.

1. Määritetään kuormitukset
2. Määritetään ristikon geometria
3. Valitaan profiilit alustavasti laskemalla ristikon rasitukset V_{max} ja M_{max} palkkina. Paarteiden normaalivoimaksi arvioidaan M_{max}/h , missä h on ristikon korkeus. Diagonaalien normaalivoima on $\sqrt{2} V_{max}$.
4. Tarkistetaan tukea lähimpien liitosten kestävydet.
5. Lasketaan ristikon rasitukset niin, että paarre oletetaan jatkuvaksi ja uumasauvat liittyvät nivelellisesti paarteeseen.
6. Tarkistetaan sauvojen kestävydet kaikilla kuormitusyhdistelmillä. Tarvittaessa muokataan profiileja ja suoritetaan laskenta uudelleen.
7. Tarkistetaan normien mukaiset vaatimukset liitoksille
8. Tarkistetaan normien mukaiset kestävyden vaatimukset liitoksille, ja mitoitetään hitsiliitokset
9. Tarkistetaan ristikon taipuma
10. Suunnitellaan ristikon poikittaissuuntainen tuenta, liittyvien osien liitokset ristikkoon sekä asennusjatkokset.

SSAB:n käsikirjan ohjeistus on geometrian määrittämisen osalta loogisempi, sillä kuormitukset voivat osaltaan vaikuttaa ristikon geometrian valintaan. Ristikon rakennekorkeuden kasvattaminen pienentää paarteiden normaalivoimia, mutta samalla puristettujen diagonaalien kestävyys pienenee niiden nurjahduspituuksien kasvaessa. Tässä työssä kehitettävään algoritmiin ei sisällytetä kaikkia edellä esitetyissä malleissa suunniteltavia asioita, kuten ristikon poikittaissuuntaista tuentaa.

Ristikon suunnittelusta voidaan edellä listattujen menetelmien puitteissa havaita suunnittelua ohjaavia, yleisesti hyvän käytännön mukaisia ehtoja. Näillä ehdoilla suunnittelija pystyy varmistumaan suunnitteluratkaisun käyttökelpoisuudesta todellisissa kohteissa.

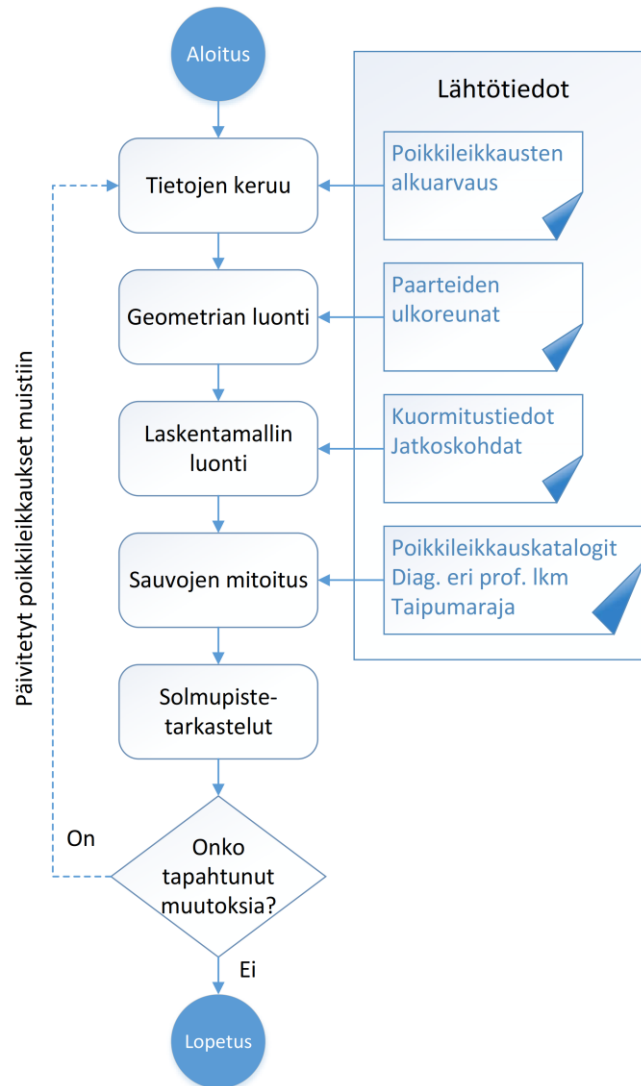
1. Liitosten mitoitus tulee huomioida sauvoja suunnitellessa
2. Vapaavälisiä liitoksia tulee suosia, jotta diagonaalisauvoja ei tarvitse leikata kahdessa suunnassa.
3. Liitokset lähtökohtaisesti suunnitellaan kestävämmän ilman vahvikelevyjä. Jos vahvikelevyllä voidaan säästää kustannuksissa, voidaan rasiitetuimpia liitoksia vahvistaa.
4. Diagonaalien eri profiilien lukumäärä on rajattu 1–3 eri poikkileikkaukseen
5. Ristikon ulkoreunojen sijainti (tilavaraus) on vakio

Teräsristikon massasta suuri osa, noin 50 %, koostuu puristetusta paarteesta. Myös alapaarteen osuus 30 % kokonaismassasta on merkittävä. Suunnittelussa onkin järkevää kiinnittää huomiota paarteiden mitoitukseen. Hyvän kokonaisratkaisun kannalta jokaiselle diagonaalille ei ole hyödyllistä löytää keveintä poikkileikkausta, mistä johtuen eri poikkileikkauksien lukumäärää voidaan rajoittaa tapauksesta riippuen.

Perinteisessä suunnittelussa suunnittelijalla on koko ajan tieto omien päätösten syistä ja niiden vaikutuksesta suunnitteluratkaisuun. Intuitiivista suunnittelua ohjaa hyvien suunnittelutapojen lisäksi kokemuksen myötä tullut tieto. Kokenut suunnittelija kykenee kokonaisuuden kannalta järkeviin ratkaisuihin, mutta lopputulokseen johtaneita valintoja voi olla hankalaa jäljitellä suoraviivaisiksi säännöiksi algoritmeihin. Algoritmeja luodessa pyritään kuitenkin jäljittelemään hyväksi todettuja käytäntöjä ja suunnitteluohjeita.

3.3 Algoritmiavusteinen suunnitteluprosessi

Teräsristikon suunnittelu koostuu selkeistä osakokonaisuuksista. Kuvassa 14 on esitetty ristikon mitoitusproseduuri, jonka toimivuutta tässä työssä tutkitaan. Prosessin määrittämisessä pyrittiin jäljittelemään perinteisiä suunnittelumenetelmiä, joita tarpeen mukaan muokattiin soveltumaan automatisoituun suunnittelumenetelmään.



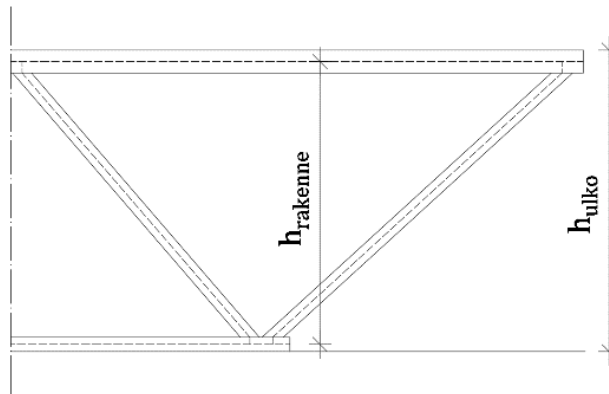
Kuva 14. Ristikön mitoituksessa toteutettavat vaiheet.

Algoritmi tarvitsee toimiakseen lähtötietoja, joiden valinnassa pyrittiin mahdollistamaan algoritmin monikäyttöisyys. Työssä lähtötiedoiksi valittiin paarteiden ulkoreunojen sijainnit, kuormitustiedot, mahdolliset ristikon jatkoskohdat sekä poikkileikkaukatalogit, joista paarteiden- ja diagonaalien poikkileikkaukset etsitään. Mitoitusta kannattaa hyödyntää alkuarvausten määrittämisessä, jotta aloitusgeometria olisi jo mahdollisimman lähellä todellista rakennetta.

Ohjelma on toteutettu pienemmissä kokonaisuuksissa edellä esitetyn kaavion mukaisesti. Suunnitteluvaiheiden parametrisessa kehityksessä huomio kiinnittyi toteutuksen suunnittelun tärkeyteen. Huolimattomasti tai keskeneräisellä idealla aloitettu osakokonaisuuden toteutus aiheutti ylimääräistä työtä, joka oltaisiin voitu välttää jakamalla ohjelma vielä pienempiin osiin ennen toteutuksen aloittamista. Ohjelman pilkkominen osiin on myös jatkokehityksen kannalta tehokasta, sillä lisäominaisuuksien luominen voidaan tehdä kohdennetusti ilman muutoksia kaikkiin olemassa oleviin osioihin.

3.3.1 Geometrian luonti

Rakennesuunnittelijan käytettävissä oleva tila on joissain tapauksissa määritelty rakenteen ulkoreunojen mukaisena tilavarauksena. Kuvan 15 mukainen ristikon rakennekorkeus $h_{rakenne}$ on paarteiden poikkileikkauksista riippuvainen, kun ulkokorkeus h_{ulko} pysyy vakiona. Rakennekorkeudella tarkoitetaan paarteiden keskiviivojen mukaista korkeutta, jonka mukaisesti laskentamalli tulee luoda. Koska rakennekorkeus muuttuu paarteiden profiilien muuttuessa, tulee jokaisen mitoituskierroksen lopuksi verrata saatuja profiileja alkuperäisiin poikkileikkauksiin, joilla geometria on luotu. Kuvassa 15 on havainnollistettu rakenne- ja ulkokorkeuden eroa.



Kuva 15. Ristikon rakenne- ja ulkokorkeus.

Ensimmäisen geometrian luontiin tarvitaan kaikkien sauvojen poikkileikkauksille alkuarvaus. Toteutetun algoritmin profiilien alkuarvauksessa hyödynnetään FEM-laskentaa ja normin mukaista mitoitusta, mutta alkuarvaukset on mahdollista laskea kuten perinteisissä suunnittelumalleissa. Alkuarvaus saadaan muodostamalla laskentamalli, jossa ulko- ja rakennekorkeus pysyvät samana, ja liitosten epäkeskisyys jätetään huomioimatta. Liitosten mitoitus alkuarvauksessa voidaan jättää huomioimatta, sillä mitoitus tulee joka tapauksessa tehdä uudelleen rakenteen dimensioiden ja voimasuureiden muuttuessa.

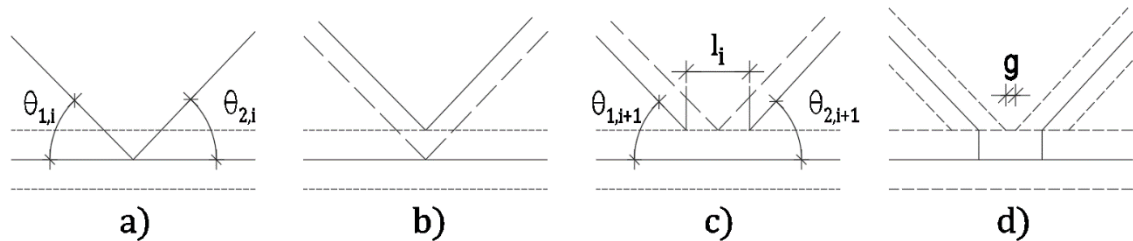
Paarteiden sijaintien jälkeen laskentamallin luontia varten tulee vielä muodostaa liitosalueiden vapaaväli- ja epäkeskisyys-elementit. Toteutetussa mitoitusalgoritmissa kaikki K-liitokset toteutetaan vapaavälisinä. Y-liitosten osalta riittää, että haetaan yläpaarteiden alapinnan tai alapaarteiden yläpinnan mukaiselta tasolta lähin piste, ja muodostaa paarteiden sisäpinnan ja laskentamallin mukaisen referenssiviivan välille jäykkä elementti. Kunkin K-liitoksen kohdalla täytyy laskea vapaavälien suuruus sekä referenssiviivojen sijainti poikkileikkausten mittojen ja ristikon geometrian avulla. Diagonaalien sijaintien tarkka laskenta vaatii iteraatiota, sillä diagonaalien toisen pään siirtäminen vaikuttaa diagonaalien kulmaan ja siten myös toisen pään tarkkaan sijaintiin. K-liitoksen diagonaalit vaikuttavat lisäksi toistensa sijainteihin, koska kaavassa (3.1) tarvitaan molempien diagonaalien liit-

tymiskulmaa paarteeseen. Kaavalla (3.1) saadaan laskettua yhden K-liitoksen diagonaalien laskentamallin mukaisten päätepisteiden välinen etäisyys eli vapaavälielementin pituus. Pituus l on esitetty kuvassa 16.

$$l = g + \frac{h_1}{2 \sin(\theta_1)} + \frac{h_2}{2 \sin(\theta_2)} \quad (3.1)$$

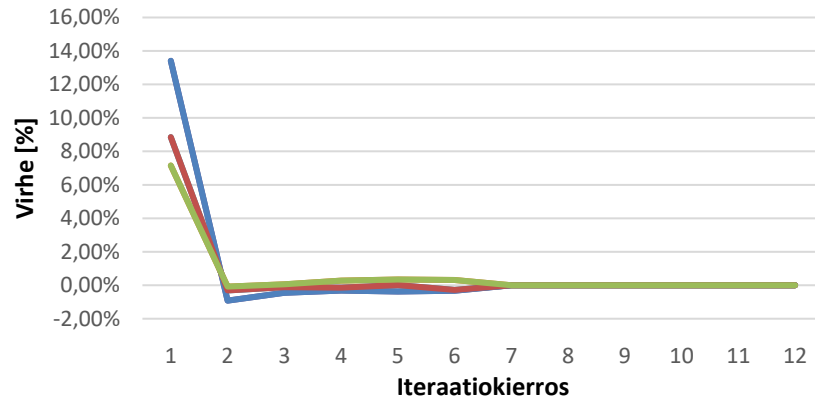
Vapaavälin g määrittämisessä ensin lasketaan keskeisen ($e = 0$) liitoksen mukainen vapaavälin suuruus, ja sen suuruutta verrataan ehtojen (2.6) ja (2.7) mukaiseen minimivapaaväliin. Keskeisen liitoksen vapaavälin ollessa liian pieni verrattuna minimivaatimukseen, muodostetaan kyseisen liitoksen geometria käyttäen minimivapaaväliä. Algoritmiin on eurokoodin mukaisten ehtojen lisäksi syötetty vapaavälille ehto $g \geq 20\text{mm}$, jotta liitos on varmasti helposti toteutettavissa.

Vapaavälin ollessa tiedossa, siirretään diagonaalit oikeisiin sijainteihin. Diagonaalien siirrossa vapaavälin ohella tulee huomioida kyseisen liitoksen diagonaalien dimensiot ja liittymiskulmat kaavan (3.1) mukaisesti. Diagonaalien siirrossa sauvan pään sijainti haetaan ensin kohtisuorasti paarteen pinnan mukaiselta viivalta, jonka jälkeen laskettu kokonaissiirto muodostetaan liikuttamalla päitä vastakkaisiin suuntiin $l/2$ suuruisen matkan. Kuvassa 16 on havainnollistettu esitellyn tavan eri vaiheet.



Kuva 16. Diagonaalien sijaintien iteroinnin vaiheet. Vaiheissa b) ja c) on esitetty diagonaalien edellisen vaiheen sijainti katkoviivalla.

Kohdassa a) lasketaan vapaavälin suuruus ja tarkistetaan minimivapaavälin vaatimukset. Vapaavälin ja geometriatietojen avulla lasketaan paarteen pinnalla tarvittava siirto kaavan (3.1) mukaisesti. Kohdassa b) siirretään päätepisteet paarteen pinnalle, jonka jälkeen c) siirretään päätepisteitä pois päin toisistaan, kumpaakin $l_i/2$ pituisen matkan. Lopuksi d) projisoidaan pisteet paarteen referenssiviivalle ja muodostetaan jäykät epäkeskisyyselementit. Kohtia a) – c) iteroidaan niin kauan, että ero edelliseen kierrokseen on merkityksättömän pieni. Kuvassa 17 on laskettu vapaavälin virhe edellisen kierroksen geometrialla laskettuun vapaavälin suuruuteen nähden kolmella eri ristikolla. Suhteellinen virhe on laskettu ristikon kaikkien liitosten virheiden keskiarvona. Harjaristikolla suoran alapartaan liitoksissa virhe suppeni nopeammin, kuin vinon yläpaarteen liitoksissa.



Kuva 17. Vapaavälin virheen suppeneminen iteroinnissa.

Kuvan 17 perusteella vaikuttaisi siltä, että 7 iteraatiokierrosta riittää tarkan geometrian luontiin. Ensimmäisellä kierroksella virhe voi olla vielä yli 10 % tarkan vapaavälin ja epäkeskisyyden suuruuteen nähden. Kolmen iteraatiokierroksen jälkeen virhe on keskiarvoltaan alle 1 %, joten rasiusten laskentaa varten myöhemmillä iteraatiokierroksilla ei enää ole vaikutusta. Rakennetta tietomallinnettaessa täysin tarkan geometrian saavuttamiseksi suositellaan kuitenkin yli 10 iteraatiokierroksen käyttöä, jolloin pyöristysvirheitä ei enää pääse tapahtumaan.

3.3.2 Sauvojen mitoitus

Teräsristikoida käytetään usein yläpohjan pääkannattimina. Tällöin kuormitukset kohdistuvat pääsääntöisesti ristikon yläpaarteelle. Kuormitusyhdistelmät tulee tehdä kohdemaan standardien mukaisesti, ja tässä työssä mitoitus sekä kuormitukset tehdään eurokoodin mukaan. Kuormitukset vaihtelevat oleellisesti kohteesta ja ristikosta riippuen, joten kuormitusten laskenta on eriytetty ohjelmasta omaksi kokonaisuudekseen. Koska kuormitusten laskenta on erotettu ohjelmasta, voidaan niitä muuttaa tarpeen mukaan aiheuttamatta muita muutoksia algoritmiin. Eurokoodi esittää harjaristikoidille epäsymmetrisiä kuormitustapauksia lumikuorman suhteen, joten ristikon laskentamallin tulee aina sisältää kaikki sauvat, vaikka se olisikin symmetrinen harjapisteen suhteen.

Sauvojen mitoitus tapahtuu luvussa 2 esitetyin perustein. Rakennesuunnitteluun on tarjolla useita kaupallisia FEM-ohjelmistoja, joihin on sisällytetty eri standardien mukaiset mitoitukset. Kehitetyssä ohjelmassa sekä FEM-laskenta, että sauvojen mitoitus toteutetaan hyödyntämällä Karamba3D-liitännäistä (*versio 1.3.1, build 181001*). FEM-laskennan palkkielementit perustuvat Timoshenkon palkkimalliin. Sauvojen mitoitukseen voitaisiin käyttää mitä tahansa mitoitusohjelmaa, jota pystyttäisiin ohjaamaan avoimen rajapinnan (*Application programming interface, API*) välityksellä. Vaihtoehtoisesti sauvojen mitoitus voidaan ohjelmoida itse, jolloin ohjelman tekijällä on hallinta koko mitoitusprosessiin. Sauvojen mitoituksen kannalta on oleellista, että rakennemalli kyetään luomaan

uudelleen jokaisella iteraatiokierroksella automaattisesti, koska paarteiden laskentamallin mukaiset sijainnit vaihtuvat poikkileikkauksen muuttuessa.

Karamba3D:n profiilien haku perustuu annetun poikkileikkauuskatalogin läpikäyntiin alusta loppua kohti. Näin käyttäjä voi itse määrittellä poikkileikkausten järjestyksen. Diagonaalien osalta järjestys on määritelty poikkileikkausten pinta-alan mukaan, jolloin valittu profiili on käytännössä kevein soveltuva poikkileikkaus. Paarteiden osalta poikkileikkausten järjestys pidetään leveyden mukaan kasvavassa järjestyksessä. Tällä järjestyksellä päädyttiin pinta-alan mukaan järjestettyyn katalogiin verrattuna nopeammin parempiin ratkaisuihin. Karamba3D:n poikkileikkausten haku koostuu kolmesta osuudesta.

1. Lasketaan sauvavoimat m :ssä kohdassa sauvaa. Jako m on vapaasti määritettävissä.
2. Jokaiselle elementille, ja elementtiryhmälle valitaan listalta ensimmäinen poikkileikkaus, jolla käyttöaste on alle sallitun.
3. Jos kohdassa 2 ei tapahtunut muutoksia, tai maksimikierrosmäärä on täytetty, algoritmi lopettaa toimintansa. Muulloin algoritmi jatkaa uudelleen kohdasta 1.

Koko ristikon mitoitusalgoritmin iteraatiokierrosten lukumäärän kasvaessa, rajoitetaan sauvojen käyttöastetta kaavan (3.2) mukaisesti.

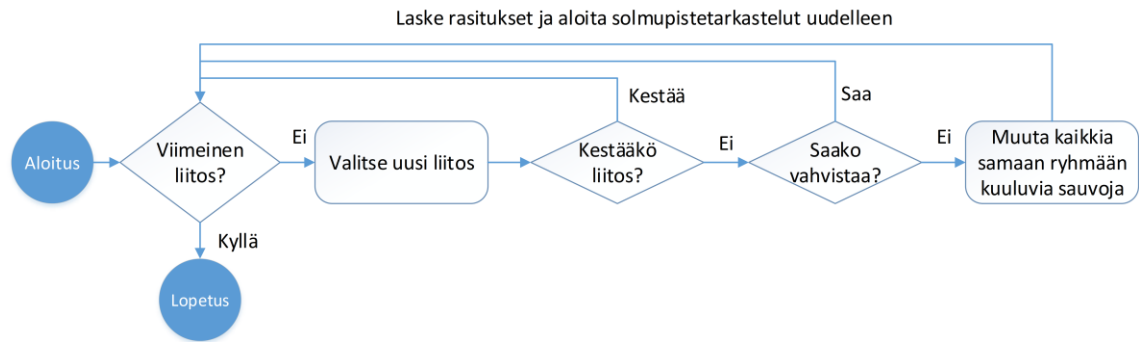
$$u_{max} = 0.95 - 0.01n, \quad \text{kun } n > 5 \quad (3.2)$$

missä n on valmiiden iteraatiokierrosten lukumäärä. Käyttöasteen rajoittaminen nopeuttaa ratkaisun löytämistä algoritmille hankalissa tapauksissa, mutta samalla saattaa heikentää lopullista suunnitteluratkaisua.

Ristikon tuentapisteet sijaitsevat alkuperäiseen geometriaan nähden yläpaarteen päätepisteiden kanssa samassa linjassa niin, että ristikon jänneväli pysyy vakiona. Diagonaalien eri poikkileikkausten lukumäärä annetaan algoritmille lähtötietona. Mahdollisia vaihtoehtoja on 1–3, ja poikkileikkauksen jaetaan niiden sijaintien mukaan ryhmiin diagonaalien lukumäärän perusteella.

3.3.3 Liitosten mitoitus

Liitosten mitoitus on oleellista suorittaa yhdessä sauvojen mitoituksen kanssa, jotta kalliiden vahvistusten tekemiseltä vältyttäisiin. Liitokset tulee tarkistaa kaikkien kuormitusyhdistelmien mukaisilla rasituksilla, mikä on perinteisillä menetelmillä työlästä ja virheeltä. Kuvassa 18 on havainnollistettu liitosten mitoitusta varten kehitetty malli.



Kuva 18. Ristikön solmupisteiden mitoitusmenettely.

Taulukossa 6 on esitetty ehdotus poikkileikkausten muuttamiseksi, kun liitos ei kestä rasiuksia. Poikkileikkausten valinnassa on oleellista huomioida murtumismuoto, jotta liitoksen kestävyys kyseisen murtumismuodon suhteen kasvaa. Poikkileikkausten valinta tapahtuu yritys ja erehdys –menetelmällä hyödyntämällä liitosten laskentakaavoista päätettyjä ehtoja. Taulukon ehdotukset perustuvat eurokoodin mukaisiin liitoskaavoihin, joista on päätelty murtumismuodoittain kestävyuden kannalta oleelliset muuttujat.

Taulukko 6. Poikkileikkausten muuttaminen riippuen liitoksen murtumismuodosta.

Murtumismuoto	Y-liitos	K-liitos
Paarteen pinnan murtuminen	Diagonaalit	Paarre, kun $\beta \geq 0.85$ Diagonaalit, muulloin
Paarteen sivun murtuminen	Paarre	-
Paarteen leikkausmurtuminen	-	Paarre
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen	Paarre	Paarre, kun $\beta \geq 0.85$ Diagonaalit, muulloin
Uumasauvan murtuminen	Diagonaalit	Diagonaalit
Uuma- tai parresauvan paikallinen lommahdus	-	-

Diagonaalien poikkileikkausten valinta on yksinkertaista normaalilämpötilassa, sillä sekä liitosten että sauvojen kestävyden ollessa parempi ohuilla ja leveillä poikkileikkauksilla. Palonkestovaatimusten saavuttamiseksi paksumpi poikkileikkaus on puolestaan tehokkaampi, koska laskennallinen putkiprofiilin palotilanteen lämpötila on riippuvainen sen seinämän paksuudesta. Paarteiden kohdalla liitosten kestävyys kuitenkin paranee sen poikkileikkauksen paksuuden kasvaessa. Toisaalta taivutuskestävyyden kannalta taloudellisempaa olisi valita korkeampi ja leveämpi poikkileikkaus. Tästä syystä keveimmän ratkaisun löytäminen ei ole yksiselitteistä, eikä sille ole kehitellyllä menetelmällä takeita.

Diagonaalit valitaan poikkileikkaukatalogista, joka on järjestetty pinta-alan mukaan pienimmästä suurimpaan. Paarteiden osalta katalogi on puolestaan järjestetty poikkileikkausten leveyden mukaan, ja toissijaisesti putken paksuuden mukaan. Paarteiden poikkileikkaus ei siis välttämättä ole painoltaan kevein. Taulukon 6 ehtoihin olisi hyödyllistä jatkossa lisätä uudelle poikkileikkaukselle leveys- ja paksuusehtoja, jolloin myös paarteet voitaisiin valita katalogista, joka on järjestetty poikkipinta-alojen mukaan. Joissain murtumismuodoissa on järkevämpää paksuntaa poikkileikkausta, kun taas toisissa poikkileikkauksen paksuntaminen lisäksi myös leventäminen parantaa kestävyyttä. Testien perusteella edellä esitetty tapa ei kuitenkaan toiminut yhtä hyvin poikkipinta-alan mukaan järjestetyillä poikkileikkauksilla, kuin leveyden ja paksuuden mukaan järjestetyillä.

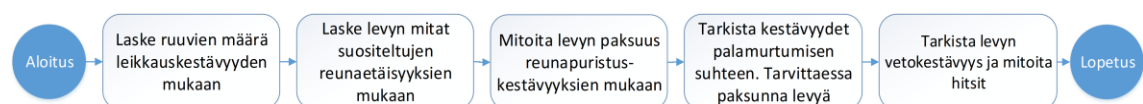
Yhden sauvan poikkileikkausta muutettaessa on huomioitava myös muut samaan ryhmään kuuluvat sauvat. Ryhmällä tarkoitetaan tässä yhteydessä niitä sauvoja, joilla tulee olla sama poikkileikkaus. Vedetylle paarteelle uuden poikkileikkauksen pinta-alan tulee olla suurempi kuin vanhan poikkileikkauksen. Puristetuille osille täytyy esittää poikkileikkauksen pinta-alan lisäksi toinen ehto sauvan mahdollisen nurjahduksen vuoksi. Nurjahduksen pienennyskerroin lasketaan kaavan (2.20) mukaisesti. Kun uuden poikkileikkauksen ehdoksi on asetettu vähintään yhtä suuri poikkipinta-ala kuin vanhalla poikkileikkauksella, kasvaa nurjahduskestävyys poikkileikkauksen neliömomentin kasvaessa. Ehdot ovat siis

$$A_{i+1} \geq A_i, \text{ Vedetyille sauvoille} \quad (3.3)$$

$$A_{i+1} \geq A_i \text{ ja } I_{i+1} \geq I_i, \text{ Puristetuille sauvoille} \quad (3.4)$$

Diagonaalien profiilia vaihdettaessa kuhunkin ryhmään kuuluu sekä vedettyjä, että puristettuja poikkileikkauksia, joten niiden kohdalla noudatetaan puristetuille osille esitettyä ehtoa. Liitosmitoituksessa liitosten kestävyuden ohella tulee huomioida eurokoodin mukaiset poikkileikkausten mittoihin liittyvät ehdot. Liitosehdot saattavat rajata soveltuvia poikkileikkauksia.

Jatkosliitosten mitoitus suoritetaan vasta muun ristikon mitoituksen jälkeen. Yläpaarteen liitokselle ei tässä työssä tehty erillistä mitoitusta. Kuvassa 19 on esitetty alapaarteen jatkoksen mitoitusmenettely.

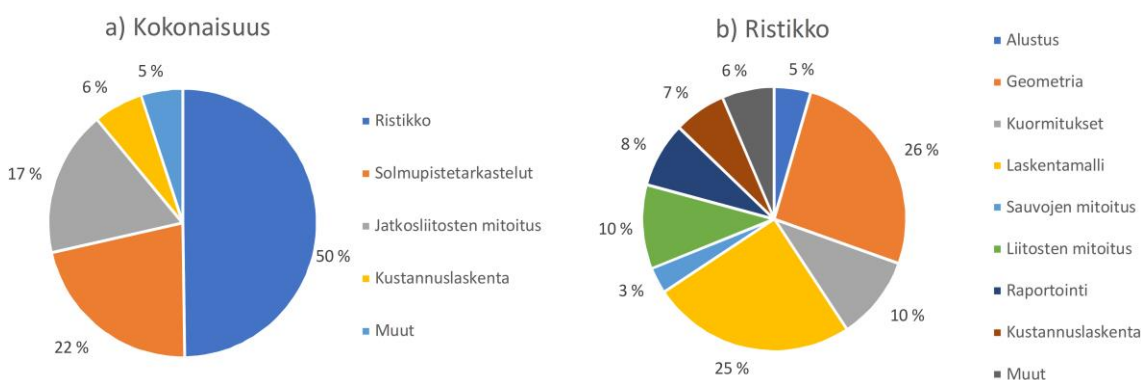


Kuva 19. Alapaarteen jatkosliitoksen mitoitus.

Alapaarteen jatkosliitos mitoitetaan parrepoikkileikkauksen plastiselle vetokestävyydelle. Plastisen vetokestävyuden hyödyntäminen mitoituksessa varmistaa sen, että liitos on varmasti kestävä kyseisellä poikkileikkauksella.

3.3.4 Päätelmät

Ristikon mitoitusohjelma ohjelmointiin C#-ohjelmointikielellä hyödyntäen valmista geometriakirjastoa. FEM-ohjelmana käytettiin Grasshopper-ympäristössä toimivaa Karamba3D liitännäistä, joka sisältää sauvojen mitoituksen eurokoodin mukaan käyttölämpötilassa. Kuvassa 20 on esitetty toteutetun ohjelman eri osa-alueiden laajuudet. Laajuudet on otettu koodin rivimääristä. Kaaviossa a) on esitetty ristikon kokonaismitoituksen osuus, ja eurokoodin sekä kustannuslaskennan yleiset mitoituskokonaisuudet, joita voidaan käyttää myös ohjelmasta irrallisina kokonaisuuksina. Kaaviossa b) on eriteltyä ristikon mitoitusohjelman osa-alueet.



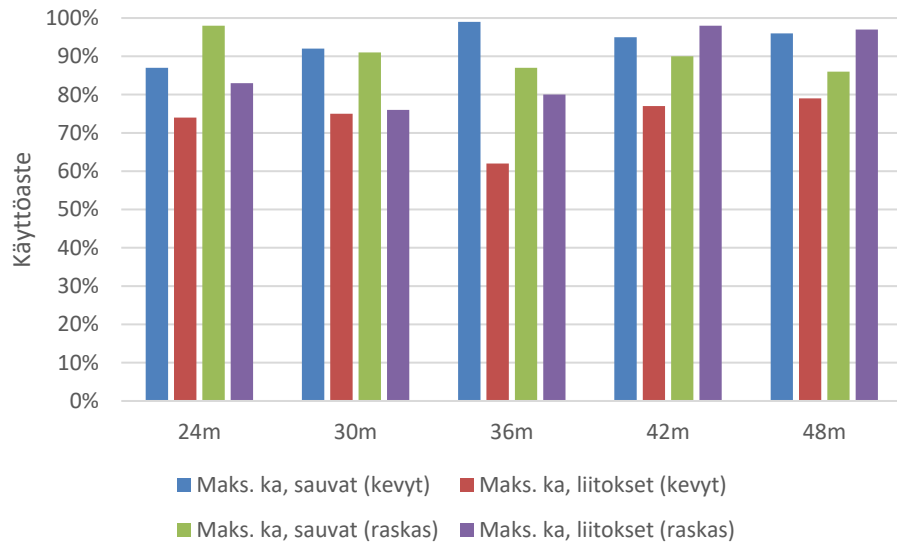
Kuva 20. Toteutetun ristikon mitoitusohjelman osa-alueet.

Ohjelman kehityksessä huomioitiin mahdollisimman suurelta osin jatkokehitysmahdollisuudet, ja uusien ristikkotyyppejen lisääminen algoritmeihin vaatisi vain osittaista laajenusta geometria- ja solmupistetarkastelukokonaisuuksiin. Kaavioista huomataan, että laskentamallin solmupisteiden vaikean geometrian vuoksi suuri osuus kehityksestä on kohdistunut geometriamoduuliin. Geometriaosuuden kanssa oli selkeästi eniten ongelmia, koska ohjelmalla tuli kyetä mitoittamaan sellaisia ristikoita, joilla paarteet ovat vapaa-
muotoisia.

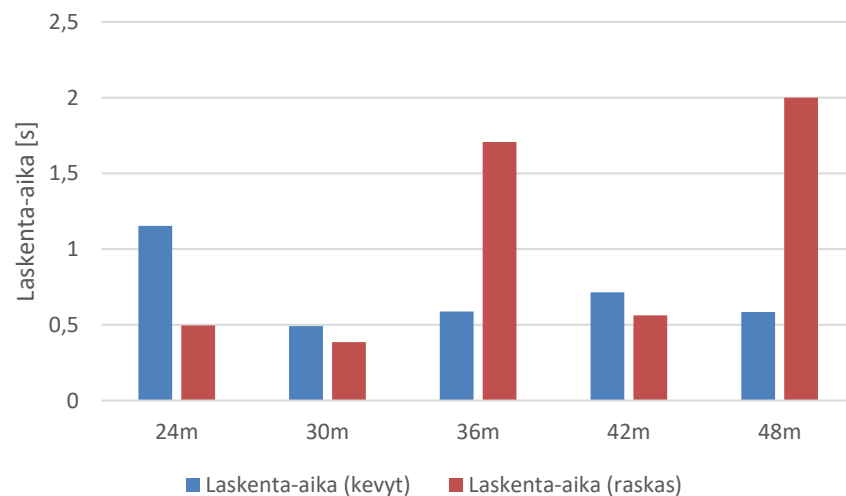
Toinen suuri kokonaisuus on ristikon laskentamallin rakentaminen. Kyseinen vaihe sisältää tukien ja kuormien määrittämisen, elementtien luonnin sekä poikkileikkausten ja materiaalien määrittämisen kyseisille elementeille ja vapautusten mallinnuksen diagonaaleille. Tarvittaessa alapaarteen jatkosliitoksen vapaus huomioidaan. Elementit jaetaan laskentamallia luodessa ryhmiin niin, että jokaisella ryhmän elementillä on sama poikkileikkaus. Näin esimerkiksi alapaarteen poikkileikkaus saadaan pidettyä yhtenäisenä koko matkalla, vaikka rasitukset vaihtelevat elementteittäin. Laskentamallin rakentamisen kanssa tuli paikoin ongelmia laskentamallin solmujen sijaintitoleransseista johtuen.

Kuvissa 21 ja 22 on esitetty löydetty maksimikäyttöasteet sekä mitoitukseen kulunut aika muutamalla lasketulla ristikolla. Esimerkkiristikoiden diagonaalit oli jaettu tasavälein. Ristikoiden kuormituksina käytettiin kahta erilaista kuormaa, joista toisella haettiin yleis-

sesti vaikuttavaa kuormitustasoa, ja toisella poikkeuksellisen raskaasti kuormitettuja tapauksia. Sauvojen materiaalina oli S355, paitsi pisimmän jännevälin raskaasti kuormitella ristikolla paarteiden materiaalina oli S420.



Kuva 21. Sauvojen ja liitosten käyttöaste jänneväleittäin kahdella eri kuormituksella.



Kuva 22. Laskenta-aika jänneväleittäin kahdella eri kuormituksella.

Jokaisella testatulla ristikolla löydettiin soveltuva ratkaisu ja löydetyn ristikon maksimikäyttöaste oli yli 85 %. Laskenta-aika pysyy kaikissa tutkituissa tapauksissa hyvin lyhyenä, alle kahdessa sekunnissa. Laskenta-aika otettiin kymmenen mitoituksen keskiarvosta. Kahdella raskaasti kuormitettulla ristikoilla laskenta-aika oli selkeästi pidempi kuin kevyemmin kuormitetuilla ristikoilla. Pisimmän jännevälin laskenta-aika perusmateriaalilla S355 oli merkittävästi suurempi kuin millään muulla testiristikolla, noin 10 sekuntia. Ratkaisuaikaa pidensi käypien poikkileikkausten pienempi lukumäärä. Kevyemmin kuormitetuilla ristikoilla liitosten käyttöasteet jäävät pienemmiksi kuin raskaammin kuormi-

tetuilla ristikoilla. Kuvaajassa esiintyvä sauvojen käyttöaste tarkoittaa koko ristikosta löytyvää maksimikäyttöastetta murtorajatilassa. Sauvojen osalta ohjelmalla saadaan haettua järkeviä ratkaisuja, vaikka aina ei päästä lähelle 100 % käyttöastetta. Ristikoiden kokonaisuuksien arviointi on hankalaa, sillä käyttökelpoisuus ja toteutettavuus riippuvat toteutettavasta kohteesta ja valmistavasta konepajasta.

Testiristikoiden perusteella voidaan todeta, että pelkästään valjastamalla päättelyllä muodostetut mitoituskäytännöt ohjelman logiikaksi, voidaan suunnittelu-aikaa lyhentää merkittävästi. Ehdotetulla mitoitusmenettelyllä kyettiin saamaan standardin ehdot täyttävät ratkaisut lyhyessä ajassa. Usein projektityöskentelyssä tasapainoillaan käytettävissä olevan ajan, ja suunnittelulaajuuden välillä, jolloin hyödyntämällä automatisointia voidaan suunnittelijan aikaa säästää ongelmakohtien ratkaisuun. Taulukossa 7 on koottuna subjektiivisia näkemyksiä ohjelman eduista ja rajoituksista.

Taulukko 7. Ohjelman edut ja rajoitukset.

Edut
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Nopeuttaa suunnittelutyötä <ul style="list-style-type: none"> • Liitosten ja sauvojen mitoituksen yhdistäminen • Jatkosliitosten automaattinen mitoitus ✓ Ristikko on suoraan mitoitettu eurokoodin mukaisesti <ul style="list-style-type: none"> • Vaivalloinen geometria automaattisesti • Vapaavälit suoraan normin mukaiset, eikä suunnittelijan tarvitse manuaalisesti säätää niitä ✓ Geometrian optimoinnin yhdistäminen mahdollista mitoitusalgoritmin sallimissa rajoissa ✓ Noudattaa täsmällisesti ohjelmaan syötettyä logiikkaa.
Rajoitukset
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Poislukien lähtötietojen valinta, ohjelman muuttaminen vaatii ohjelmointiosaimista ➤ Rajattu käyttötarkoitus: Vapaavälisin liitoksin koottu K-ristikko ➤ Kuormitustapaukset ennalta määrätty valmiissa ohjelmassa ➤ Suunnittelija ei suoraan näe kaikkien valintojen perusteita

Ohjelman puutteista moni liittyy sen rajalliseen kehitysaikaan. Näistä mikään ei kuitenkaan ole merkittävä este ohjelman käytölle. Oleellisena jatkokehitysalueena on palomitoituksen yhdistäminen mitoitukseen.

Ohjelman monipuolisuuden kannalta oli hyödyllistä toteuttaa ominaisuus, jossa ristikolle voidaan suorittaa pelkkä laskenta ilman muutoksia. Tällöin suunnittelija voi hyödyntää kehitettyä työkalua ristikoiden tarkastuslaskentaan, tai geometrian luontiin. Liitosten epäkeskisyyksien mallintaminen käsin on erittäin työlästä, ja tilanteesta riippuen jopa mahdotonta toteuttaa tarkasti. Perinteisellä menetelmällä liitosten laskenta tulisi tehdä erillään

sauvojen mitoitukselta, ja tiedonsiirto ohjelmasta toiseen käsin on hidasta. Ristikön kuormitukset saattavat myös joissain tilanteissa muuttua kesken suunnittelun, jolloin pelkän laskennan avulla voidaan tutkia kuormitusmuutosten vaikutus mitoituslaskentaan. Ohjelmasta on mahdollista viedä laskentamalli toisiin FEM-laskentaohjelmiin, jolloin käyttäjä voi halutessaan jatkaa suunnitteluprosessia perinteisin menetelmin.

3.4 Optimointi

Optimoinnilla tarkoitetaan parhaan mahdollisen ratkaisun systemaattista etsintää. Optimoinnissa pyritään hakemaan kohdefunktion palauttamalle arvolle minimi- tai maksimiarvoa muuttamalla suunnittelumuuttujien arvoja. Rakennesuunnittelussa kohdefunktiona voi olla esimerkiksi rakenteen massa, kustannus tai siirtymät. Kantavien rakenteiden optimoinnissa on järkevää minimoida rakenteen kustannuksia massan sijasta, sillä kustannus- ja paino-optimiit saattavat erota huomattavastikin toisistaan (Mela 2013). Koko hakuavaruuden parasta ratkaisua kutsutaan globaaliksi optimiksi. Hakuavaruudessa saattaa olla lisäksi lokaaleja optimeja. Lokaalilla optimilla tarkoitetaan sellaista sijaintia, jonka lähiympäristöstä ei löydetä parempaa ratkaisua. Käypien ratkaisujen joukon rajaa rajoitusehdot, jotka tässä työssä ovat eurokoodin mukaiset geometriaan sekä kestävyysliittävät ehdot.

Kantavien rakenteiden optimoinnissa voidaan jaotella kolme eri optimointityyppiä: mitoituksen, geometrian ja topologian optimointi. Mitoitusoptimoinnissa rakenteen geometria on ennalta määrätty, ja optimoinnilla pyritään hakemaan kyseiseen tapaukseen parhaiten soveltuvia poikkileikkauksia. Geometrian optimoinnissa puolestaan geometriaa voidaan muokata, esimerkiksi ristikon rakennekorkeutta $h_{rakenne}$ muuttamalla. Topologian optimoinnissa haetaan vastaavasti parasta geometrasta ratkaisua, tällä kertaa muuttamalla esimerkiksi sauvojen lukumäärää tai niiden tyyppiä.

Esitettyä mitoitusalgoritmia ei voi suoraan pitää mitoitusoptimointina, koska osa profiilien valinnasta tapahtuu yritys ja erehdys –menetelmällä. Optimointia voidaan kuitenkin soveltaa mitoitusalgoritmin kanssa. Mitoitusalgoritmi palauttaa jokaisella sille syötetyllä geometrialla kehitetyn logiikan mukaisen lopputuloksen, jonka laatu on riippuvainen logiikan laadusta. Optimointialgoritmillä pyritään hakemaan mahdollisimman hyvää geometriaa ristikolle diagonaalien sijaintia muuttamalla. Paarteiden sijainti voidaan tilanteen salliessa määrittää suunnittelumuuttujaksi optimointiin.

Tässä työssä optimointialgoritmina käytetään parveilualgoritmia (*Particle Swarm Optimization*, PSO), joka on populaatiopohjainen heuristinen optimointimenetelmä (Eberhart & Kennedy 1995). Heuristisilla menetelmillä tarkoitetaan ongelmanratkaisumetodeja, jotka perustuvat johonkin ideologiaan, mutta eivät välttämättä toteuta kaikkia loogisia vaatimuksia. Parveilualgoritmillä pyritään matkimaan luonnossa esiintyvien, ruokaa tai pesäpaikkaa etsivien, parvien toimintaa. Parveilualgoritmi soveltuu yhdistettäväksi algo-

ritmiavusteiseen suunnitteluun hyvin, koska optimointialgoritmillemme riittää tieto kohdefunktion arvosta eri suunnittelumuuttujien arvoilla. Tietoa kohdefunktion analyyttisestä laskennasta ei siis tarvita. (Jalkanen 2006)

Optimoinnin alussa parven jäsenille asetetaan satunnainen sijainti hakuavaruudessa. Parveilualgoritmin jokaisella laskentakierroksella parven jäsenille lasketaan uusi sijainti hyödyntäen sekä parven, että yksilön tietoja hakuavaruudesta. Sijainti alkioille i kierroksella $k + 1$ lasketaan kaavalla

$$\mathbf{x}_{k+1}^i = \mathbf{x}_k^i + \mathbf{v}_{k+1}^i \quad (3.5)$$

missä \mathbf{x}_{k+1}^i on jäsenen uusi sijainti, \mathbf{x}_k^i on jäsenen sijainti ennen siirtoa ja \mathbf{v}_{k+1}^i on nopeusvektori, joka lasketaan kaavalla (3.6).

$$\mathbf{v}_{k+1}^i = w\mathbf{v}_k^i + c_1r_1(\mathbf{p}_k^i - \mathbf{x}_k^i) + c_2r_2(\mathbf{p}_k^g - \mathbf{x}_k^i) \quad (3.6)$$

missä \mathbf{p}_k^i on jäsenen paras löydetty sijainti hakuavaruudessa kierrokseen k mennessä

\mathbf{p}_k^g on parven paras löydetty sijainti hakuavaruudessa kierrokseen k mennessä

w on inertia, tyypillisesti $0.8 \leq w \leq 1.4$

r_1 ja r_2 on satunnaislukuja, joille $0 \leq r_i \leq 1$

c_1 ja c_2 ovat skaalausparametreja, tyypillisesti $c_1 = c_2 = 2.0$

Inertian avulla voidaan säädellä, kuinka laajasti hakuavaruutta käydään läpi optimoinnissa. Inertian arvoa voidaan pienentää kesken optimoinnin, mikäli kohdefunktion arvo ei ole parantunut riittävästi asetettuun ehtoon nähden. Skaalausparametrien c_i avulla voidaan säädellä jäsenen luottamusta omaan, ja parven parhaaseen ratkaisuun. Koska nopeuden laskennassa hyödynnetään satunnaismuuttujia, on parveilualgoritmi stokastinen menetelmä. Stokastisuudella tarkoitetaan satunnaisuuteen perustuvaa.

Lopetusehdoksi parveilualgoritmissa voidaan määrittää kiinteä iteraatiokierrosten lukumäärä. Suuremmalla kierrosmäärällä pystytään tutkimaan laajemmin parhaan löydetyn ratkaisun lähimaastoa. Optimointi voidaan myös keskeyttää, jos kohdefunktion arvossa ei ole tapahtunut parannusta halutulla iteraatiokierrosmäärällä. Parveilualgoritmi on onnistuneesti sovellettu hankalissa kantavien rakenteiden optimointitehtävissä (Fourie & Groenwold 2002; Jalkanen 2007). Parveilualgoritmia on myös pyritty kehittämään soveltumaan paremmin tietynlaisiin optimointiongelmiin (Poli et al. 2007).

4. MASSA- JA KUSTANNUSOPTIMOINTI

Tässä tutkimuksessa ristikon poikkileikkauksina käytetään pelkästään neliön muotoisia rakenneputkia. Mitoitus tehdään eurokoodin mukaisesti. Optimointi suoritetaan visuaalisessa ohjelmointiympäristössä käyttäen Grasshopper-ohjelmaa. Optimointi tehdään parveilualgoritmillä, ja kaikissa optimointitehtävissä optimointiparametrit pysyvät samoina. Optimointiparametrit on esitetty alla.

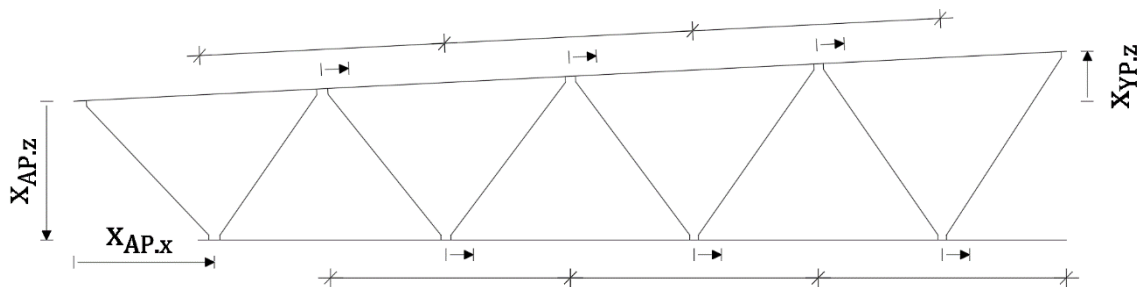
Taulukko 8. Optimointiparametrien arvot.

Muuttuja	Arvo
Inertia w	0.3
Skaalausparametrit c_1 ja c_2	2
Iteraatiokierrosten lkm	100
Populaatiokoko	40
Maksiminopeus	20 %

Optimoinnit suoritetaan tietokoneella, jossa on 32 GB keskusmuistia, sekä neliytiminen Intel® Xeon® CPU E3-1535M v5 @ 2.90GHz suoritin.

4.1 Optimointitehtävän formulointi

Ristikon suunnittelumuuttujina toimii geometriset suureet sekä sauvojen poikkileikkaukset. Käytetty poikkileikkaukatalogi on esitetty liitteessä A. Kuvassa 23 on esitetty vapaat geometriamuuttujat sekä diagonaalien liittymispisteiden siirtoalueet. Diagonaalien solmupisteiden sijainneille asetettiin rajat niin, että solmupisteitä voitiin siirtää molempiin suuntiin puolet paarteen solmupistevälistä. Näin voitiin varmistua, että diagonaalit eivät risteä missään tapauksessa.



Kuva 23. Optimoinnin geometrian suunnittelumuuttujat.

Tuelta katsottuna ensimmäisen diagonaalien liittospiste yläpaarteeseen on 150 mm epäkeskeinen jokaisella ristikolla. Ensimmäisen diagonaalien liittospisteen etäisyys alapaarteen

päästä on puolestaan 200 mm. Etäisyydet on muodostettu ensimmäisellä ristikkogeometrialla, jossa epäkeskisyyslementtejä ei ole vielä mukana. Lopullisissa ratkaisuisa epäkeskisyudet saattavat siis hieman erota edellä esitetyistä arvoista. Taulukossa 9 on esitetty paarteiden sijaintien reunaehtojen suuruudet tutkituilla ristikoilla.

Taulukko 9. Paarteiden geometriamuuttujien rajat.

Jänneväli [m]	$x_{YP,z}$ [mm]	$x_{AP,z}$ [mm]	$x_{YP,x}$ [mm]
24	300–1000	1500–2250	500–2500
36	450–1500	2250–3750	750–3750
48	600–2000	3000–5000	1000–5000

Ristikot on pakotettu symmetrisiksi harjalinjan suhteen. Mitoitusehtoina on luvussa 2 esitetyt sauvojen sekä liitosten kestävyudet. Eurokoodi esittää mitoitus ehdot muodossa

$$E_d \leq R_d \quad (4.1)$$

missä E_d on sauvassa tai liitoksessa vaikuttava voimasuure tai niiden yhdistelmä ja R_d on sitä vastaava eurokoodin mukainen sauvan tai liitoksen kestävyys. Ehdot voidaan kääntää optimoinnin standardiformulointia varten muotoon

$$g_i^j(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = E_{d,i}^j(\mathbf{x}, \mathbf{p}) - R_{d,i}^j(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad (4.2)$$

missä \mathbf{x} on kuvan 23 mukaiset geometriamuuttujat sisältävä vektori ja \mathbf{p} on sauvojen poikkileikkaukset sisältävä vektori, jotka valitaan diskreetistä joukosta. $E_{d,i}^j(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ on sauvan tai liitoksen i voimasuureet murtumistapaan j nähden ja $R_{d,i}^j(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ on sauvan tai liitoksen kestävyys murtumistapaan j nähden. Sauvojen ja liitosten kestävyyksien lisäksi rajoitusehtona on ristikon maksimitaipuma w .

$$g^w(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = w(\mathbf{x}, \mathbf{p}) - L/300 \leq 0 \quad (4.3)$$

Eurokoodin mukaiset mitoitus ehdot täyttyvät jokaisella ratkaisulla, jonka kehitetty algoritmisarja kykenee ratkaisemaan. Kaikki geometriaehdot eivät välttämättä kuitenkaan toteudu kaikilla arvoilla. Geometriaehdoilla tarkoitetaan liitoskaavojen pätevyysrajoituksia sekä diagonaalien ja paarteen välisten kulmien rajoitusta. Taulukossa 1 on koottuna geometriaehdot, joiden ohella tulee huomioida diagonaalien liittymiskulman ehto (2.30).

Kohdefunktiona optimoinnissa käytetään ristikon massaa sekä ristikon arvioituja kustannuksia. Kustannuslaskenta perustuu luvussa 2 esitettyyn tapaan. Rakenteen kokonaismassa lasketaan kaavalla

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = M(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n L_i A_i \rho \quad (4.4)$$

missä n on elementtien lukumäärä, L_i on sauvan i pituus, A_i on sauvan i profiilin poikkipinta-ala ja ρ on teräksen tiheys. Vastaavasti kustannusfunktio on

$$f(\mathbf{x}) = C(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4.5)$$

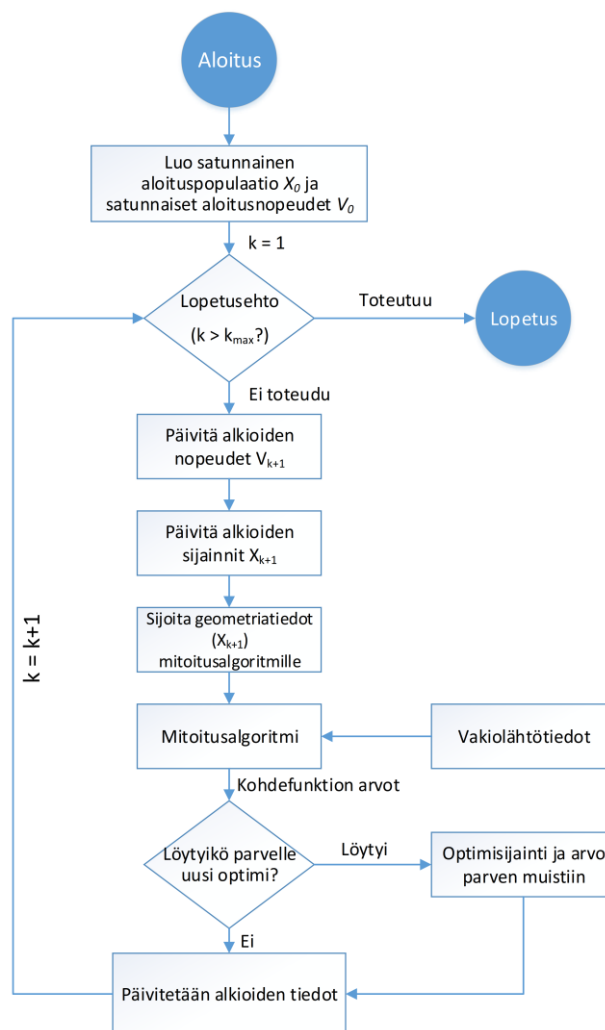
missä C_i on sauvan i kokonaiskustannukset, joka lasketaan yksittäisten kustannuspaikkojen summana. Optimointitehtävä voidaan jakaa kahteen osaan: parveilualgoritmillä suoritettava geometrian optimointiin sekä sen alitehtävänä olevaan mitoitus-tehtävään, jonka ratkaisuun hyödynnetään kehitettyä mitoitusalgoritmia. Optimointitehtävä on

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{x}} \Phi(\mathbf{x}) \\ & \text{sitte että} \\ & \mathbf{x}_{min} - \mathbf{x} \leq 0 \\ & \mathbf{x} - \mathbf{x}_{max} \leq 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

missä mitoitusalgoritmillä ratkaistava alitehtävänä on

$$\Phi(\mathbf{x}) = \left\{ \begin{array}{l} \inf_{\mathbf{p}} f(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \\ \text{sitte että} \\ g_i^N(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_S \\ g_i^B(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_S \\ g_i^M(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_S \\ g_i^V(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_S \\ g_i^{MN}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_S \\ g_i^{MV}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_S \\ g_i^{MNV}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_S \\ g_i^{NMS}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_S \\ g_{j,Y}^G(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, 5 \ \& \ Y = 1, 2 \\ g_{n,Y}^R(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad n = 1, 2, 3, 4 \ \& \ Y = 1, 2 \\ g_{j,K}^G(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, 7 \ \& \ K = 1, 2, \dots, n_K \\ g_{n,K}^R(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \quad n = 1, 2, 3, 4 \ \& \ K = 1, 2, \dots, n_K \\ g^w(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Alitehtävän sisällä geometriamuuttujat pysyvät vakiona, ja mitoitusalgoritmi muokkaa vain sauvojen poikkileikkauksia. Vektori \mathbf{x}_{min} on geometriamuuttujille asetetut alarajat ja \mathbf{x}_{max} on vastaavasti geometriamuuttujien ylärajat. Poikkileikkausvektorin \mathbf{p} valikoituu diskreetistä poikkileikkaustaulukosta esitetyn mitoitusalgoritmin sääntöjen mukaisesti. Alitehtävän kahdeksan ensimmäistä rajoitusehtoa koskevat sauvojen kestävyyskä. Yläindeksi N viittaa normaalivoimaan, B nurjahdukseen, M taivutukseen, V leikkaukseen, MN normaalivoiman ja taivutuksen yhteisvaikutukseen, MV leikkausvoiman ja taivutuksen yhteisvaikutukseen, MNV normaali- ja leikkausvoiman sekä taivutusmomentin yhteisvaikutukseen ja NMS normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusehtoon stabiiliuden suhteen. Muuttuja n_s on laskentamallin elementtien lukumäärä, pois lukien epäkeskisyyselementit. Liitosten osalta on eritelty geometriaehdot g^G ja kestävyysliittyvät ehdot g^R . Ristikossa on aina kaksi Y-liitosta ja n_K kappaletta K-liitoksia. Muuttujalla j kuvataan taulukon 1 mukaisia rajoitusehtoja Y- ja K-liitoksille, sekä lisäksi vapaa- välien ehtoja K-liitokselle. Muuttuja n kuvaa taulukon 3 mukaisia eri liitoksille ominaisia murtumistapoja. Kuvan 24 kaaviossa on esitetty optimoinnin kulku. Kaaviosta nähdään, missä vaiheessa mitoitusalgoritmia hyödynnetään osana optimointia.



Kuva 24. Optimointikaavio.

Jokaisella optimointikierröksellä partikkeleille lasketaan aluksi uusi nopeus, jonka avulla saadaan selvitettyä uusi sijainti hakuavaruudessa. Hakuavaruuden dimensiot kuvaavat eri geometriamuuttujia, jotka on esitetty kuvassa 23. Alkion sijainnin ja vakiolähtötietojen perusteella mitoitusalgoritmi laskee ristikolle ratkaisun, joka toteuttaa eurokoodin mukaiset mitoitus ehdot. Geometriaan liittyvien rajoitusehtojen rikkomista käsitellään kohdefunktiossa sakkotermin avulla. Sakkotermin arvo oli 24 metrin ristikolle 100 € tai 100 kg jokaista rikottua rajoitusehtoa kohden. Vastaavasti 36 metrin ristikon kohdefunktioon lisättiin 200 ja 48 metrin ristikon kohdefunktioon 300 yksikköä jokaista rikettä kohden.

Mitoitusalgoritmi saattaa tuottaa virheen kesken mitoituksen, jos se ei kykene löytämään ratkaisua. Tällöin kohdefunktiolle annetaan arvoksi jokin suuri luku niin, että kyseisellä jänneväliä löydetään varmasti parempia ratkaisuja. 24 metrin jänneväliä kyseinen virheen tuottama kohdefunktion arvo on 10000, 36 metrin jänneväliä 15000 ja 48 metrin jänneväliä arvo on 20000. Kierroksen lopuksi päivitetään sekä parven että alkioden tiedot sen perusteella, löytyikö kummankaan tietoihin verrattuna parempia ratkaisuja. Alkion tulee säilyttää tieto parven parhaan sijainnin lisäksi omasta parhaasta löydetystä sijainnistaan, sillä tietoja tarvitaan uusien nopeuksien laskennassa.

4.2 Lähtötiedot

Optimointi suoritetaan kolmen eri jännevälin ristikolle: 24 m, 36 m ja 48 m. Optimoinnissa diagonaalisauvojen lukumäärä on optimointiajon sisällä vakio, mutta 36 metrin ja 48 metrin ristikoille optimointi tehdään käyttämällä kahta eri vaihtoehtoa. Pisimmän jännevälin ristikolle suunnitellaan keskikohdalle työmaajatkos, jota laskentamallissa käsitellään nivelenä. Kullakin jänneväliä optimointitehtävän kohdefunktiona on sekä kustannusten, että painon minimointi. Ristikolle tulevat kuormitukset ovat samat kaikissa optimointitapauksissa. Kuormitustiedot on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Käytetyt kuormitukset optimoinnissa.

Kuormitus	Ominaisarvo
Rakenteen omapaino	Tiheyden 7850 kg/m^3 mukaan
Lumi	2.0 kN/m^2
Ripustuskuorma	0.3 kN/m^2
Yläpohjarakenteet	0.5 kN/m^2
Tuuli	-

Kuormitusleveys on 6 metriä kaikissa optimointitapauksissa. Yläpuolisten rakenteiden jatkuvuuskertoimenä on kaikissa tapauksissa 1. Seuraamusluokkana käytetään CC2, jolloin kuormien kerroin on myös 1. Tuulikuorma jätetään huomioimatta optimoinnissa yksinkertaistuksen vuoksi. Kuormitusyhdistelyt tehdään eurokoodin mukaisesti epäsymmetriset kuormitustapaukset huomioiden.

Yläpaarteen nurjahduspituutena käytetään molempiin suuntiin $0.9L_{SYS}$. Diagonaalien nurjahduspituudeksi molempiin suuntiin valittiin $0.8L_{SYS}$, koska epäkeskeisyysselementtien avulla muodostetussa laskentamallissa diagonaalien systeempituus on lyhempi kuin paarteiden keskiviivojen välille mallinnetulla sauvalla. Vapaavälien arvot pyöristetään 2 mm tarkkuuteen, ja minimivapaavälinä käytetään 20 millimetriä. Teräslajina kaikissa ristikoissa on S355, jonka materiaalitiedot on listattu alla.

Taulukko 11. Käytetyt materiaaliominaisuudet optimoinneissa.

Ominaisuus	Arvo
Myötölujuus f_y	355 MPa
Vetomurtolujuus f_u	470 MPa
Kimmokerroin E	210000 MPa
Liukumoduuli G	80769 MPa
Tiheys ρ	7850 kg/m ³

Taulukossa 12 on esitetty vertailuristikoiden tiedot. Vertailuristikossa diagonaalit ovat tasavälein ja ristikon yläpaarteen kaltevuus sekä rakennekorkeus on valittu kirjallisuudessa esiintyvien periaatteiden mukaisesti.

Taulukko 12. Optimoitavien ristikoiden lähtökohdat.

Jänneväli	Diagonaalien lkm.	Kaltevuus	Ristikon korkeus	Paino	Kustannusarvio
24 m	16	1:20	2.4 m	1770 kg	1852 €
36 m	16	1:20	3.6 m	4077 kg	3916 €
48 m	20	1:20	4.8 m	7160 kg	6781 €

Somodi *et al.* (2016) ovat optimoineet muun muassa 36 metrin jännevälin K-ristikkoja. Tutkimuksen ristikon kuormituksena on tasainen kuorma 23.5 kN/m yläpaarteelle, joka voidaan katsoa olevan samaa suuruusluokkaa kuin tässä tutkimuksessa käytetyt kuormitukset. Mitoitusalgoritmin yksi kuormitustapaus, jossa lumikuorma on määräävä, arvoksi saadaan

$$6 \text{ m} * (1.15 * (0.5 \text{ kN/m}^2 + 0.3 \text{ kN/m}^2) + 1.5 * 2.0 \text{ kN/m}^2) = 23.52 \text{ kN/m}$$

Viivakuorman lisäksi huomioidaan ristikon omapaino. Edellä mainitun tutkimuksen mukaisen vertailuristikon massa on 3740 kg, mikä on saatu vastaavasti tasavälein olevilla diagonaaleilla ilman optimointia.

Diagonaalien lukumäärä 24 metrin ristikolla on 16 kaikissa optimointiajoissa. 36 metrin ristikkoja optimoidaan kahdella eri diagonaalimäärällä, 16 ja 20. Vastaavasti 48 metrin ristikkoja optimoidaan 20 ja 24 diagonaalilla. Optimointeja suoritetaan 20 kappaletta kullakin eri ristikkotyypillä, joista 10 on painon ja 10 kustannusten minimointitehtäviä. Optimointeja suoritetaan siis yhteensä 100 kappaletta, 50 sekä massan että kustannusten minimointitehtävälle.

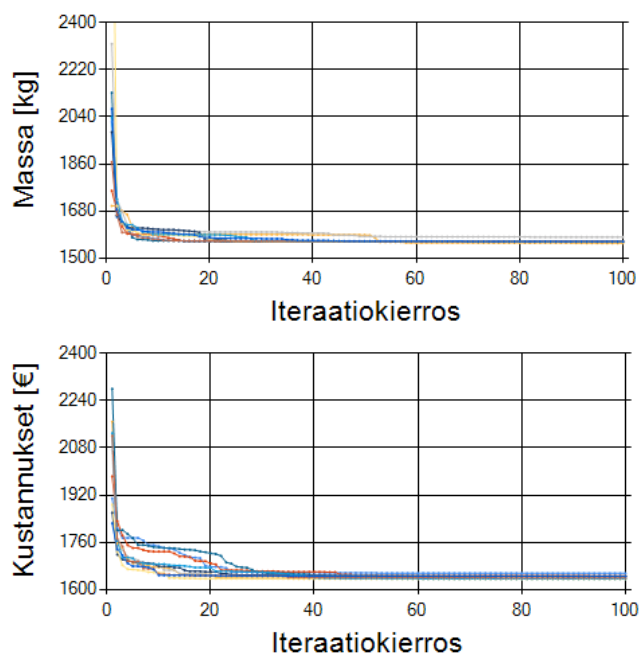
Liitteessä B on esitetty kustannuslaskennassa käytettyjen muuttujien arvot. Sahaussessa katkaistavien osien päiden sahauskulma vaikuttaa käytettävään laskentakaavaan. Koska parveilualgoritmillä hakuvaruuden tutkiminen perustuu osin satunnaisuuteen, käytetään sahausessa päiden kulmille toleranssia 2° . Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että diagonaalin liittymiskulma ollessa välillä $88^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$, lasketaan sen kustannukset kuten liitos olisi suorassa kulmassa.

4.3 Tulokset

Seuraavaksi esitetään optimointiajojen tulokset erikseen jokaiselle tarkastetulle jännevälille. Diagonaaleille on optimoinnissa asetettu maksimissaan kolmea eri poikkileikkausta. Ennalta määrätyt diagonaaliryhmät käyvät ilmi esitetyistä optimitulosten kuvista. Optimointeja suoritettiin 10 kappaletta jokaiselle optimointitapaukselle. Optimointeja tehdessä ohjelman toimivuuden kanssa oli aika ajoin ongelmia, ja ohjelma saattoi kaatua kesken optimoinnin. Löydetty tulos hyväksyttiin, jos yli 95 iteraatiokierrosta oli ehditty laskea ennen ohjelman kaatumista.

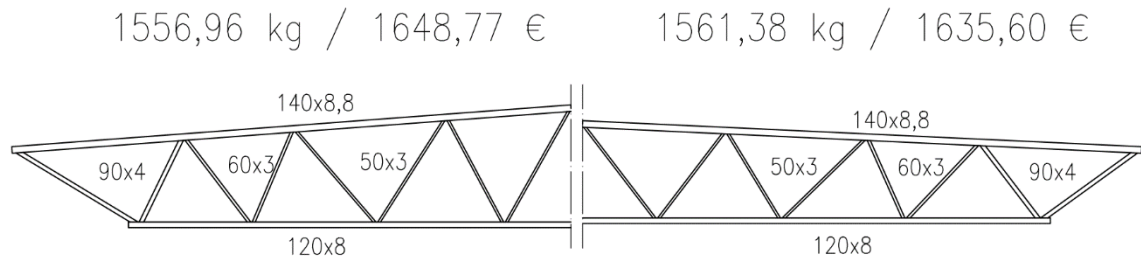
4.3.1 24 metrin ristikko

24 metrin jännevälän ristikon optimoinnissa käytettiin yhtä diagonaalilukumäärää. Kuvassa 25 on esitetty kohdefunktion arvon kehitys iteraatiokierrosten funktiona. Ylempi kuvaaja esittää massan minimointia, jossa kohdefunktion eli pysty akselin arvot ovat kilogrammoina. Alempi kuvaaja puolestaan on kustannusten minimoinnista, jolloin kohdefunktiona on arvioidut valmistuskustannukset.



Kuva 25. Kohdefunktion arvo iteraatiokierrosten funktiona 24 metrin ristikoilla. Ylempänä massan ja alapuolella kustannusten minimointitehtävä.

Kuvaajista huomataan, että optimointialgoritmi ei kykene useimmissa massaoptimoinneissa löytämään 40 kierroksen jälkeen merkittävästi parempia ratkaisuja. Kustannusten optimoinnissa hajontaa oli enemmän, mutta kunkin optimoinnin parasta ratkaisua lähellä oleva ratkaisu löydettiin keskimäärin 45 kierroksen jälkeen. Kuvassa 26 on esitetty parhaat löydetyt ratkaisut. Kuvan vasemmalla puolella on esitetty massan minimointitehtävän ja oikealla kustannusten minimoinnilla löydetty ristikko. Ristikot ovat harjalinjan suhteen symmetrisiä, joten kuvissa on esitetty vain puolet ristikoista.



Kuva 26. Parhaiden löydettyjen 24 metrin ristikoiden geometriat. Vasemmalla massan ja oikealla kustannusten minimointitehtävän ratkaisut.

Sauvojen poikkileikkaukset ovat identtiset molemmissa ratkaisuissa. Minimipainoratkaisun paino on 12 % pienempi kuin vertailuristikon paino, ja sen painosta 52.8 % koostui yläpaarteesta, 32.2 % alapaarteesta ja loput 15 % diagonaalisauvojen osuudesta. Osuudet ovat hyvin lähellä perinteisesti oletettuja painojakaumia ristikkokannattajille.

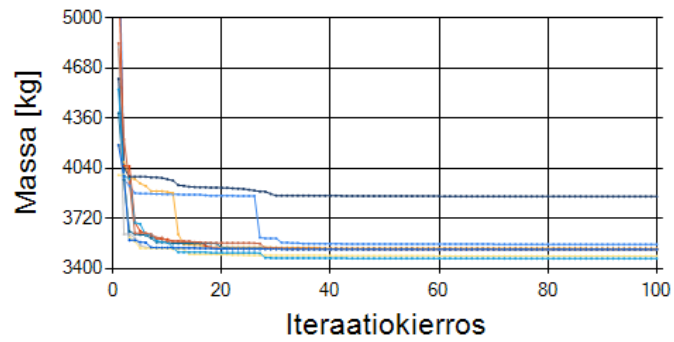
Edullisimmassa ristikossa paino sekä kustannukset ovat hyvin lähellä painominimin ratkaisun arvoja. Tulos on looginen, koska optimoinnissa tutkittiin yhdentyypisiä ristikoita, jolloin eri kustannuspaikkojen osuus valmistuskustannuksiin on aina lähes sama. Tällöin suuri osa kustannusten minimoinnista muodostuu ristikon keventämisestä.

Keveimmällä ristikolla alapaarten päädyn sijainti ristikon suunnassa tuli rajoittavaksi tekijäksi geometriaominaisuuksista. Halvimmalla ristikolla yksikään geometriamuuttuja ei muodostunut rajoittavaksi. Yläpaarten tuelta katsottuna lähimmän liitoksen käyttöaste oli maksimissaan 89 % ja alapaarten 91 %. Murtorajatilassa yläpaarten maksimikäyttöaste on 90 % ja alapaarteelle vastaavasti 83 %. Diagonaalien osalta käyttöasteet vaihtelevat välillä 27–94 %.

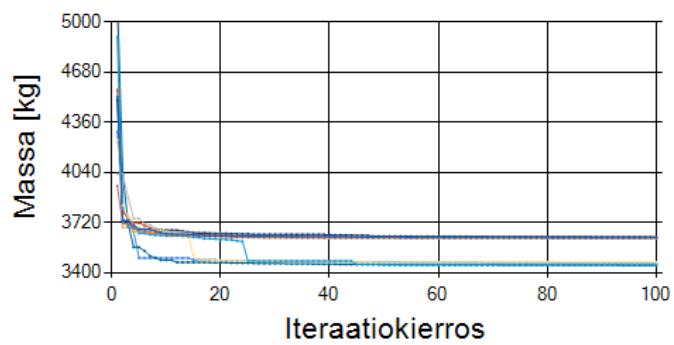
4.3.2 36 metrin ristikko

Toisena optimoitavana ristikkona oli 36 metrin jännevälin ristikko. Optimointi tehtiin käyttäen 16 ja 20 diagonaalisauvaa. Kuvassa 27 on esitetty kohdefunktion kehitys iteraatiokierrosten funktiona. Kuvaajissa sekä ristikoiden kuvissa merkitään 16 diagonaalisauvan ristikoita merkinnällä a) ja vastaavasti 20 diagonaalin ristikoita merkinnällä b).

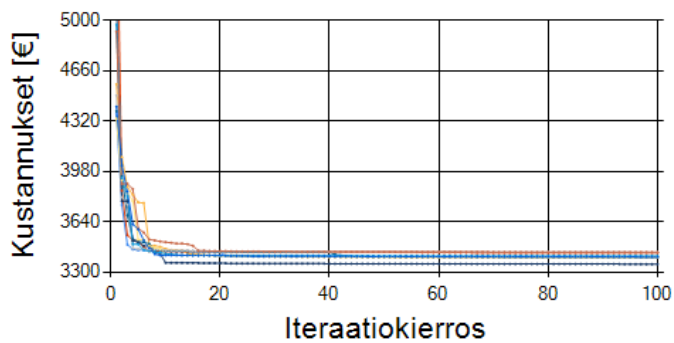
a) Massa



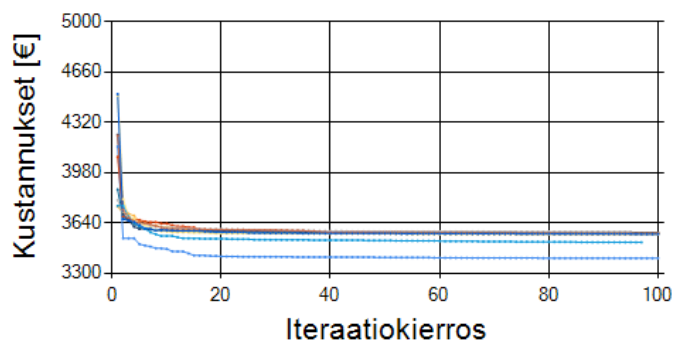
b) Massa



a) Kustannus

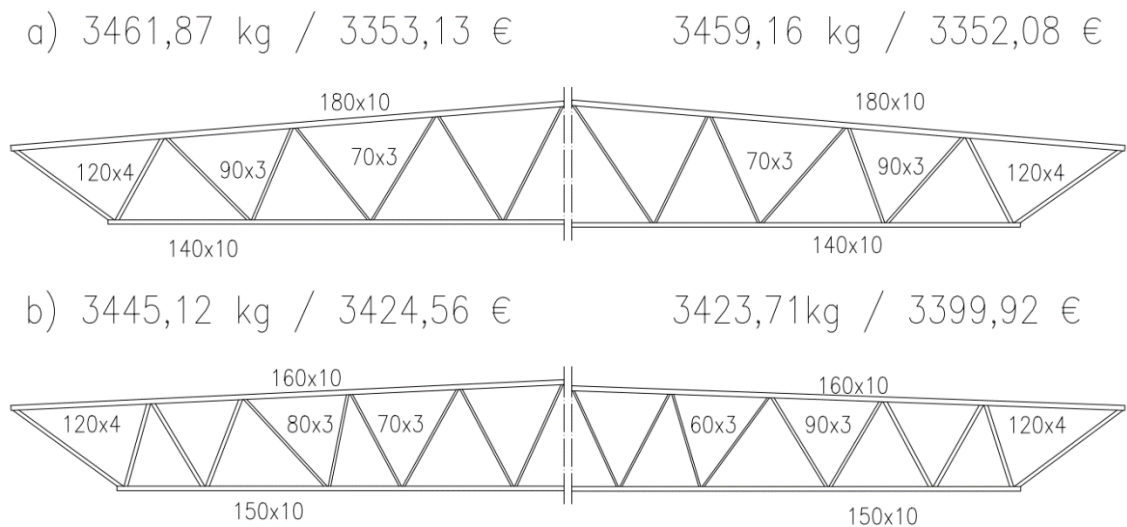


b) Kustannus



Kuva 27. Kohdefunktion arvo iteraatiokierroksien funktiona 36 metrin ristikoilla.
 Kuvaajat a) ovat 16 diagonaalien ja b) 20 diagonaalien ristikoista.

Optimointiajojen välinen hajonta 36 metrin ristikoilla oli suurempaa kuin 24 metrin ristikoilla. Parasta löydettyä ratkaisua lähellä oleva tulos löydettiin pääsääntöisesti yhtä nopeasti, alle 45 iteraatiokierroksen laskennan jälkeen. Kuvan 27 b) kustannusten kehittyminen kuvaajasta huomataan hyvin parveilualgoritmin stokastinen käyttäytyminen, koska paras löydetty ratkaisu on huomattavasti parempi kuin minkään muun optimointiajon tulos. Kuvan 27 a) ja b) massaoptimoinneista puolestaan nähdään, kuinka optimointialgoritmi saattaa välillä juuttua lokaaliin optimiin. Kuvassa 28 on esitetty parhaiden optimointitulosten geometriat sekä profiilit. Kuvan vasen puoli kuvaa massaminimoinnilla, ja oikea puolestaan kustannustenminimoinnilla löydettyä ratkaisua.



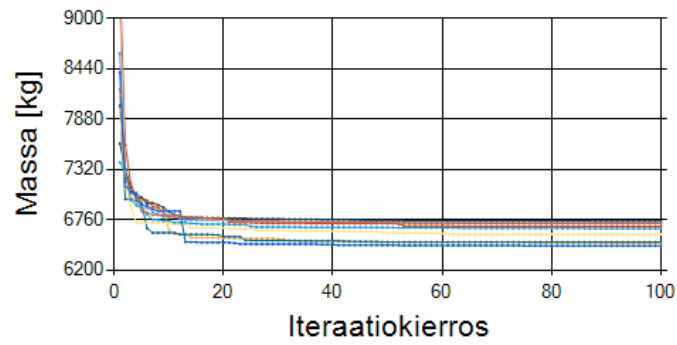
Kuva 28. Parhaiden löydettyjen 36 metrin ristikoiden geometriat. Vasemmalla massan ja oikealla kustannusten minimointitehtävän ratkaisut.

Ristikotyypillä a) löydetty ratkaisut vastaavat hyvin pitkälti toisiaan kaikilta geometriaparametreiltaan. Tästä johtuen ristikoiden massat sekä kustannusarviot ovat lähellä toisiaan, eikä niiden välillä voida nähdä merkittävää eroa. Yksikään geometriamuuttuja ei tullut rajoittavaksi millään esitetyllä 36 metrin ristikolla. Kuvan 28 alemmista ristikoista huomataan, että löydetyllä kustannusminimillä on pienempi paino kuin massaminimoidulla ristikolla. 36 metrin ristikoilla kustannus- ja paino-optimoinnin tulokset jäävät lähelle toisiaan, eikä eri kohdefunktioilla päästy merkittävästi parempaan ratkaisuun. Vastaava tulos saatiin 24 metrin ristikoilla. Tyypin b) ristikoiden keveydestä huolimatta niiden kustannukset ovat suuremmat tyyppiin a) verrattuna, koska useammalla diagonaalisauvalla rakenneosien työstämiskustannukset kasvavat.

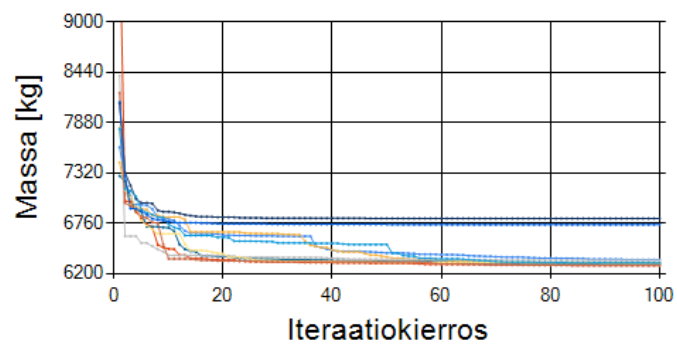
4.3.3 48 metrin ristikko

Kolmas optimointitapaus oli 48 metrin jännevälön ristikko, jolle tehtiin vastaavasti optimointi kahdella eri diagonaalisauvalukumäärällä. Kuvassa 29 on esitetty 48 metrin ristikon massan ja kustannusten kehittyminen iteraatiokierrosten funktiona. Diagonaaleja oli tapauksessa a) 20 ja tapauksessa b) 24 kappaletta.

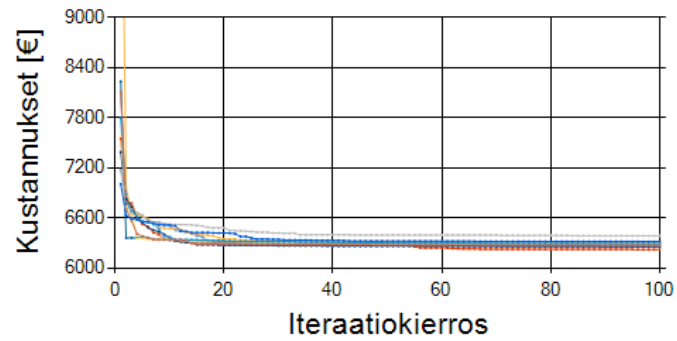
a) Massa



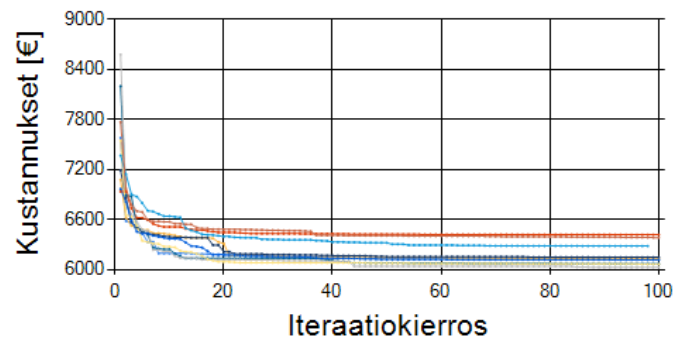
b) Massa



a) Kustannus



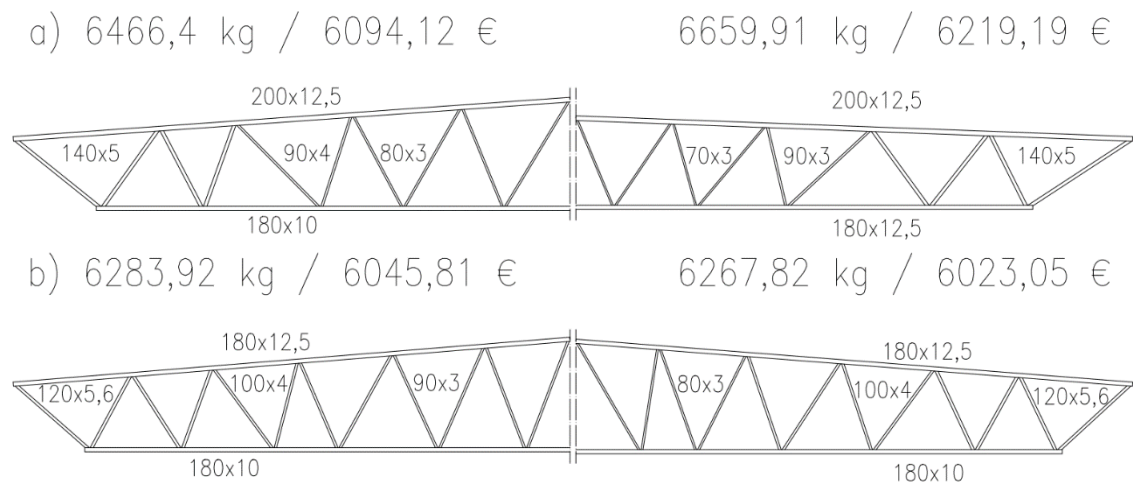
b) Kustannus



Kuva 29. Kohdefunktion arvo iteraatiokierroksien funktiona 48 metrin ristikoilla.
 Kuvaajat a) ovat 20 diagonaalien ja b) 24 diagonaalien ristikoista.

Toisin kuin aiemmissa ristikoissa, 48 metrin ristikon keskelle suunniteltiin jatkosliitos. Jatkosliitoksen kohdalla alapaarteelle laskentamalliin asetettiin nivel. Jatkosliitosten vaikutuksia kustannuksiin ei huomioitu, sillä niiden voidaan katsoa olevan merkityksettömiä eri vaihtoehtojen välillä.

Optimointiajoissa on enemmän hajontaa lyhyemmän jännevälin ristikoihin verrattuna. Ristikkotyypin b) massaoptimoinnissa nähdään selkeästi optimointiajojen lopputulosten jakautuminen kahteen eri ratkaisuun. Useilla ajoilla ratkaisu jäi siis lokaaliin optimiin, jonka läheisyydestä käytetyllä optimointialgoritmillä ei kyetty löytämään parempia ratkaisuja. 48 metrin jännevälin ristikoilla tulos ei suurimmassa osassa ajoista enää merkittävästi parantunut 60 kierroksen jälkeen. Kuvassa 30 on esitetty parhaat löydetty ristikot.



Kuva 30. Parhaiden löydettyjen 48 metrin ristikoiden geometriat. Vasemmalla massan ja oikealla kustannusten minimointitehtävän ratkaisut.

Ristikkotyypin a) optimoinneista huomataan jälleen, että massan minimoinnilla kyettiin löytämään halvempi rakenne kuin kustannuksia minimoidessa. Tyypin b) optimoinneissa kustannusminimoitu ristikko on puolestaan myös kevyempi kuin massaminimoitu. Useammalla diagonaalisauvalla löydetään keveämpiä ratkaisuja kuin harvemmillä diagonaalisauvoituksella, koska yläpaarteen nurjahduspituus lyhenee. Oletetusti suuri osa ristikon painosta koostui nimenomaan yläpaarteesta, joten suunnittelussa on järkevää kiinnittää huomiota puristettujen paarteiden nurjahdustuentaan. 24 diagonaalilla kevein ristikko on 3.1 % kevyempi kuin 20 diagonaalilla löydetty kevein ristikko. Kustannukset ovat kuitenkin huomattavasti lähempänä toisiaan, koska sauvojen lukumäärän kasvaessa myös niiden tarvitsemat työstämiskustannukset kasvavat. Ero kustannuksissa halvimmilla a) ja b) tyypin ristikoilla oli vain 1.2 %.

4.4 Päätelmät

Tutkimuksen optimointiajoissa laskettiin yhteensä lähes 400 000 ristikkoa. Optimointi tehtiin kolmella eri jännevälillä Grasshopper-ympäristössä käyttäen parveilualgoritmia.

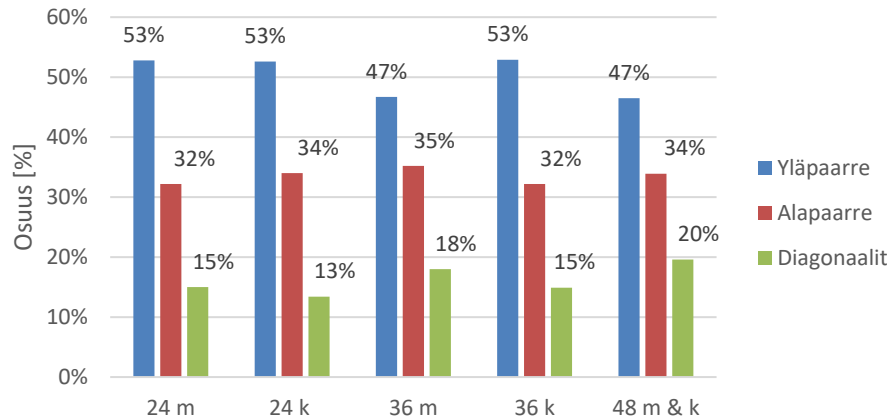
Taulukossa 13 on koottuna parhaiden löydettyjen ristikoiden tiedot sekä muutokset mitoituslaskennalla laskettuihin verrokkiristikoihin nähden. Vertailuristikoiden diagonaalit oli jaettu tasavälein, rakennekorkeus oli $L/10$ ja kattokaltevuus 1:20. Sauvojen profiilien perässä suluissa on ilmoitettu murtorajatilan maksimikäyttöaste. Taulukossa on lisäksi esitetty tuelta katsottuna ensimmäisten liitosten maksimikäyttöasteet yläpaarteella (liitos 1) ja alapaarteella (liitos 2).

Taulukko 13. Yhteenveto optimointituloksista.

L [m]	24		36		48
	Kevein	Halvin	Kevein	Halvin	Kevein & halvin
Diag. Lkm	16	16	20	16	24
h_{ulko} [mm]	2631 (L/9)	2204 (L/11)	3420 (L/11)	4124 (L/9)	4931 (L/10)
Kaltevuus	1:18	1:29	1:31	1:11	1:13
Yp [kg]	822,2 (52,8 %)	821 (52,6 %)	1599,9 (46,7 %)	1830,9 (52,9 %)	2911,5 (46,5 %)
Ap [kg]	501,7 (32,2 %)	530,4 (34 %)	1205,8 (35,2 %)	1113,3 (32,2 %)	2125,1 (33,9 %)
Diag. [kg]	233 (15 %)	210 (13,4 %)	617,9 (18 %)	515 (14,9 %)	1231,2 (19,6 %)
Yp [Ka-%]	140x8,8 (90 %)	140x8,8 (96 %)	160x10 (97 %)	180x10 (93 %)	180x12,5 (96 %)
Ap [Ka-%]	120x8 (83 %)	120x8 (81 %)	150x10 (78 %)	140x10 (83 %)	180x10 (84 %)
D1 [Ka-%]	90x4 (94 %)	90x4 (89 %)	120x4 (100 %)	120x4 (96 %)	120x5,6 (98 %)
D2 [Ka-%]	60x3 (98 %)	60x3 (98 %)	90x3 (99 %)	90x3 (97 %)	100x4 (90 %)
D3 [Ka-%]	50x3 (93 %)	50x3 (99 %)	60x3 (99 %)	70x3 (98 %)	80x3 (96 %)
Liitos 1 [Ka-%]	89 %	90 %	73 %	97 %	91 %
Liitos 2 [Ka-%]	91 %	86 %	98 %	94 %	85 %
Massa [kg]	1556,96 (-12 %)	1561,38 (-11,8 %)	3423,71 (-16 %)	3459,16 (-15,2 %)	6267,82 (-12,5 %)
Hinta [€]	1648,77 (-11 %)	1635,6 (-11,7 %)	3399,92 (-13,2 %)	3352,08 (-14,4 %)	6023,05 (-11,2 %)

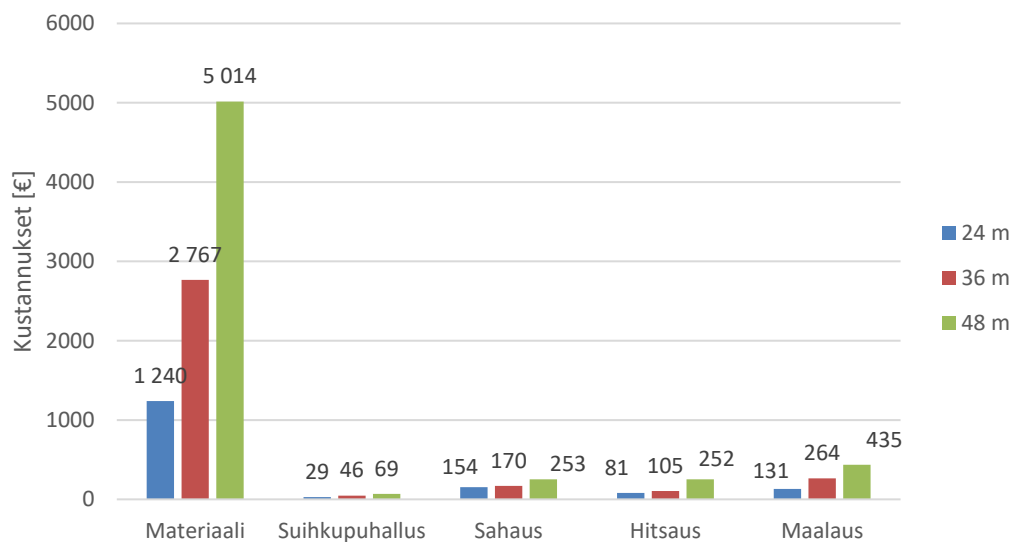
Massaa saatiin optimoinnilla pienennettyä 12–15 % lähtötilanteeseen verrattuna. Kustannuksia puolestaan saatiin pienennettyä 11–14 % vertailuristikoon nähden. Eniten ratkaisua saatiin parannettua 36 metrin jännevälillä ristikoilla. Optimoinnissa saavutetut hyödyt johtuivat diagonaalisauvojen sekä paarteiden sijaintien hienosäädöstä, ja sen myötä saavutetuista poikkileikkausten pienemisestä. Sauvottelu ei ollut optimoituilla ristikoilla tasavälein jakautunut, vaan puristetut diagonaalit pyrkivät lyhenemään, jotta niiden nurjahduskestävyys kasvaisi. Alapaarteella solmujen jaottelulla ei ole suurta merkitystä, mutta yläpaarteen nurjahduspituus määräytyy solmupisteiden mukaan. Lähellä tukea paarteen normaalivoima on pieni, jolloin nurjahduspituus voi olla pidempi. Paarteiden poikkileikkaukset ovat melko paksuja, koska poikkileikkaukatalogi ei ollut paarteiden osalta järjestetty pinta-alan mukaan. Parempaan kokonaisratkaisuun päästäisiin, jos liitosten mitoituksessa esitettyyn tapaan muokata poikkileikkauksia sisällytettäisiin myös poikkileikkauksen leveydelle ja paksuudelle ehtoja. Tällöin paarteiden poikkileikkaukatalogi voitaisiin järjestää pinta-alan mukaan, ja rakenteille todennäköisesti löytyisi kevyempiä ratkaisuja.

Monissa kustannusoptimeissa ristikoissa voidaan löytää samoja piirteitä kuin massaminimoiduissa ristikoissa. Massojen jakautuminen yläpaarteeseen, alapaarteeseen ja diagonaalien kesken on esitetty kuvassa 31. Jakaumat on esitetty edellä olevan taulukon mukaisille ristikoille.



Kuva 31. Massan jakautuminen yläpaarteeseen, alapaarteeseen ja diagonaalien välillä.

Massan jakautuminen kaikilla ristikoilla on lähellä oletettua jakoa, jossa ristikon massasta noin 50 % koostuu yläpaarteesta, 30 % alapaarteesta ja loput 20 % diagonaalien massasta. 36 metrin jännevälillä keveimmällä ja halvimmalla ristikolla paarteiden osuus on selvästi erilainen diagonaalisauvojen lukumäärän erosta johtuen. Kuvassa 32 on esitetty eri kustannuspaikkojen osuudet halvimmilla löydettyillä ristikoilla kullekin jännevälille.



Kuva 32. Kustannusten jakautuminen halvimmilla löydettyissä ristikoissa.

Kustannuspaikkojen suhteelliset osuudet ovat lähes samat, koska optimoinneissa oli käytävissä vain yhden tyyppinen ristikkomalli. Koska materiaalikustannusten osuus kokonaiskustannuksista on suuri, 76–83 %, massan keventyessä myös kustannukset pienenevät suhteessa eniten. Tästä syystä kustannus- ja massaminimoidut rakenteet johtivat usein lähes samaan ratkaisuun. Pieniä eroja keveimmän ja halvimmän ristikon väliltä voidaan

kuitenkin löytää, vaikka massat ja kustannukset ovatkin hyvin lähellä toisiaan. Ristikoiden rakennekorkeus on kustannusoptimoituissa rakenteissa pienempi, koska rakennesien pituus vaikuttaa suoraan suihkupuhallus-, sahaus- ja maalaus-kustannuksiin, sekä välillisesti materiaalikustannuksiin. Rakennekorkeuden pienentyessä paarteiden normaallivoimat kuitenkin kasvavat. Rakennekorkeuden liiallinen pienentäminen johtaisikin paarteiden poikkileikkausten kasvattamiseen, joka johtaisi materiaalikustannusten kasvuun.

Materiaalikustannusten jälkeen seuraavaksi suurin osuus kustannuksista koostui lyhimällä ristikolla sahauskustannuksista, ja muilla ristikoilla maalaus-kustannuksista. Sahauskustannuksien osuus oli lähes kaksinkertainen 24 metrin ristikolla verrattuna pidemmän jännevälän ristikoihin. Melan (2013) löytämän minimikustannusristikon kustannuksista 70 % koostui materiaalista, 2 % suihkupuhalluksesta, 12 % sahauksesta, 6 % hitsauksesta ja 10 % maalauksesta. Tässä työssä halvimpien ristikoiden materiaalikustannusten osuus kustannuksista oli hieman suurempi. Tämä selittyy ristikkotyypien eroilla, sillä Melan väitöstyön optimiristikot olivat sauvottelultaan merkittävästi erilaisia kuin tässä työssä tutkittu perinteinen Warren-ristikko.

36 metrin jännevälän ristikon keveimmällä ja halvimalla ristikolla oli eri määrä diagonaalisauvoja. Kaikissa tapauksissa massaa minimoimalla ei siis päästä halvimpaan ratkaisuun, vaikka ristikkotyypikin on vakio. Erot kyseisten ristikoiden kustannuksien välillä on kuitenkin vain yhden prosentin luokkaa, joka käytännössä osoittautuu epäolennaiseksi. Tulos kuitenkin osoittaa sen, että parhaan mahdollisen ratkaisun etsimiseksi optimointia on syytä tehdä useammalle sauvotukselle, vaikka ristikkotyyppi olisikin jo lyöty lukkoon. Heuristisilla menetelmillä globaalin optimin löytymiselle ei ole takeita, joten usein järkävien sauvottelujen tutkiminen riittää.

36 metrin ristikkoa voidaan verrata raportissa (Somodi et al. 2016) esitettyyn optimiratkaisuun. Kuormat ovat lähellä toisiaan, ja materiaali on tutkimuksen vertailuristikossa S355. Raportissa esitetty halvin ristikko on hinnaltaan 3304 €, joka on laskettu samalla kustannusmallilla. Keveimmän ristikon massa on 3344 kg. Tässä tutkimuksessa myös paarteiden sijainnit olivat geometriamuuttujina, toisin kuin edellä mainitun raportin optimoinneissa. Tässä tutkimuksessa halvin löydetty ristikko oli hinnaltaan 3352 €, eli 48 € kalliimpi kuin toisen tutkimuksen ristikko. Kevein ristikko oli puolestaan 3424 kg, joka on 80 kg vertailuristikkoa enemmän. Painoero johtuu lähinnä alapaarten poikkileikkausten erosta. Vertailuraportin ristikon liitosten epäkeskisyydet on mallinnettu yhdellä epäkeskisyyselementillä. Alapaarre saattaa toisinaan osoittautua kehitetyllä ohjelmalla ylimitoitetuksi eurokoodin ehtoihin nähden, koska rakennemalliin muodostettiin nyt aina epäkeskisyyselementit liitosten kohdalle. Epäkeskisyyden ollessa hyväksytyissä rajoissa, epäkeskisyydestä aiheutuvia momenteja ei tarvitsisi alapaarten mitoituksessa ottaa huomioon.

Taulukosta 13 nähdään, että yläpaarteen maksimikäyttöaste on jokaisella ristikolla yli 90 %. Alapaarteen osalta käyttöasteet jäävät kuitenkin alle 85 %, ja mitoittava kohta on lähes kaikissa ristikoissa ensimmäisen liitoksen vapaavälielementissä. Leikkausvoiman yhteisvaikutus normaalivoima- ja taivutusmomentin kanssa tulisi tarkistaa laskentamallista muokatuille rasiuksille, mikäli laskentamalli muodostettaisiin vain yhdellä epäkeskisyysselementillä.

Taulukossa esitetyt diagonaalisauvojen käyttöasteet kuvaavat kyseiselle poikkileikkaukselle löydettyä maksimikäyttöastetta, joka pääsääntöisesti kohdistuu kyseisen ryhmän reunimmaiseen puristettuun uumasauvaan. Uumasauvojen maksimikäyttöaste saadaan haettua lähelle 100 prosenttia, koska liitosten kestävyys saadaan usein paremmin kasvatettua parretta kasvattamalla tai paksuntamalla. Osalla diagonaaleista käyttöaste jää kuitenkin varsin alhaiseksi, koska toteutetulla mitoitusalgoritmillä on ennalta määritelty, mitkä diagonaalit saavat saman poikkileikkauksen. Tulosta voitaisiin parantaa muokkamalla diagonaalien poikkileikkauksjakoa. Nyt ratkaistuissa ristikoissa samaan ryhmään kuului sekä puristettuja, että vedettyjä diagonaaleja, vaikka puristettujen osien kestävyys on pienempi nurjahdusehdosta johtuen. Osoptimoimalla jokaisen diagonaalin poikkileikkaus päästäisiin kevyempiin ja halvempiin lopputuloksiin, mutta koska diagonaalien osuus kokonaispainosta on vain noin 15–20 %, ei sillä saavutettaisi merkittävää hyötyvaikutusta lopulliseen painoon tai kustannuksiin.

Liitteessä C on esitetty RFEM-ohjelmalla tehdyt vertailulaskelmat 24 metrin halvimmalle löydetylle ristikolle. Vertailulaskuissa ilmeni eroavaisuuksia eritoten alapaarteen ensimmäisen vapaavälielementin käyttöasteen osalta. Mitoitusalgoritmissa käytetty Karamba3D-ohjelman mukainen käyttöaste vapaavälielementille oli 9.7 % suurempi kuin RFEMillä ja käsin laskemalla saatu käyttöaste. Liitteen C lopussa on vertailtu käyttöasteita astetta kahdella ohuemmalla alapaarteen poikkileikkauksella. Vertailun perusteella vaikuttaisi siltä, että Karamba3D-ohjelman mukainen normaalivoiman, leikkausvoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusmitoitus ylimitoittaa alapaarteen poikkileikkausta. Alapaarteen pienennyksellä 24 metrin ristikon massa tippuisi 1561 kilogrammasta 1509 kilogrammaan. Myös yläpaarteen yhdellä elementillä käyttöasteiden välinen ero on todella suuri, jopa 17 %. Yläpaarteen osalta tämä ei kuitenkaan johda ylimitoitukseen, koska kyseinen elementti ei käyttöasteiden erosta huolimatta osoittaudu mitoittavaksi koko yläpaarretta tarkasteltaessa.

Kirjallisuudesta ei löytynyt tietoa siitä, tulisiko K-liitosten vapaavälielementeille tehdä kaikki eurokoodin mukaiset sauvojen ja poikkileikkausten tarkastelut. Kyseinen K-liitosten mallinnustapa on muutenkin kirjallisuudessa harvinainen. Liitoskaavoissa huomioidaan paarteen leikkausmurto, jonka laskennassa tarvitaan vapaavälissä vaikuttavaa leikkausvoimaa. Vapaavälin normaalivoimakestävyyttä ei saada laskettua, jos vapaavälin leikkausvoima on suurempi kuin poikkileikkauksen plastinen leikkauskestävyys, joten leikkausmitoitus on ainakin tehtävä vapaavälissä. Epäkeskisyysselementeistä aiheutuvan

leikkauksen suhteen laskettu käyttöaste on vapaaväleissa usein suuri, joten leikkausvoiman pienentämä taiputuskestävyys muodostuu pieneksi. Leikkauksen, normaalivoiman ja taiputuksen yhteisvaikutus vapaavälissä pitäisi tarkistaa erikseen, jos liitos mallinnetaan vain yhdellä epäkeskisyys-elementillä. Tällöinkin paarteessa vaikuttavan leikkausvoiman suuruus joudutaan arvioimaan diagonaalivoimien perusteella.

Ristikkoliitoksia voidaan vahvistaa paikallisilla vahvikelevyillä. Vahvistettujen liitosten valmistaminen on kuitenkin työläämpää, joten niiden kustannusvaikutusta tulisi tarkastella erikseen. Tukea lähellä olevien liitosten vahvistusta kannattaisi kuitenkin miettiä, mikäli sillä saavutettaisiin kustannussäästöjä paarteen poikkileikkauksen pienentyessä. Mitoitusalgoritmissa ei huomioitu ristikon liitosta pilariin, joten yläpaarteen ensimmäisen liitoksen osalta vahvistus saattaisi olla tarpeellista esitetyillä ratkaisuilla.

Taulukossa 14 on esitetty optimointiajojen keskiarvot, mediaanit sekä keskihajonnat. Optimointi suoritettiin 10 kertaa kutakin taulukossa esiintyvää optimointitapausta kohden. Taulukossa pienempää diagonaalilukumäärää on merkattu kirjaimella a) ja suurempaa kirjaimella b). Keskiarvon ja mediaanin jälkeen suluissa on esitetty ero halvimpaan tai keveimpään löydettyyn ratkaisuun nähden.

Taulukko 14. Optimointien keskiarvot sekä keskihajonnat.

Optimointi	Keskiarvo		Mediaani		Keskihajonta
24 massa	1564 kg	(+7)	1563 kg	(+6)	6,1
24 kustannus	1643 €	(+8)	1645 €	(+9)	6
36 a) massa	3548 kg	(+125)	3521 kg	(+97)	112,1
36 a) kustannus	3405 €	(+53)	3400 €	(+48)	23,6
36 b) massa	3555 kg	(+131)	3618 kg	(+194)	86,9
36 b) kustannus	3545 €	(+193)	3566 €	(+214)	54,8
48 a) massa	6632 kg	(+364)	6673 kg	(+405)	107,3
48 a) kustannus	6287 €	(+264)	6285 €	(+262)	44,2
48 b) massa	6408 kg	(+140)	6314 kg	(+46)	196,1
48 b) kustannus	6173 €	(+150)	6123 €	(+100)	137,2

Keskiarvo on laskettu kunkin optimointitapauksen lopputuloksien perusteella. Keskihajonta kuvaa puolestaan keskimääräistä poikkeamaa odotusarvosta, joka tässä tapauksessa on sama kuin keskiarvo. Lyhyimmällä tutkitulla jännevälillä optimointituloksien hajonta oli hyvin pientä, ja käytännössä kaikilla optimointiajoilla päädyttiin lähelle samaa tulosta. Optimoinnin voidaan siis katsoa toimivan hyvin 24 metrin ristikoilla. Pidemmän jännevälillä ristikoilla hajontaa puolestaan tuli enemmän. Jännevälillä pidentyessä keskihajonta vaikuttaisi kasvavan. Hajonnan pienentäminen voisi olla mahdollista käyttämällä suurempaa populaatiokokoa, jolloin aloituspisteet kattaisivat paremmin hakuavaruutta. Samalla kuitenkin optimointiaika pitenisi. Menettelyn soveltuvuutta eritoten pitkien jännevälillä tai raskaasti kuormitettujen ristikkojen optimointiin tulisi tutkia erikseen useammalla ristikolla ja optimointiajolla.

Pidemmillä jänneväleillä optimointien tulosten keskiarvo jäi kauemmas parhaasta löydetyistä ratkaisusta kuin lyhemmillä jänneväleillä. Mitoitusalgoritmin soveltuvuutta osana optimointia on vaikea arvioida yleisesti, koska tarkastelussa oli vain yhdentyypinen rakenne. Teräsristikoiden osalta voidaan kuitenkin todeta, että optimointi on mahdollista yhdistää mitoitusalgoritmin kanssa ja menetelmä vaikuttaisi soveltuvan paremman ratkaisun etsintään. Löydetyt ratkaisut täyttivät eurokoodin mukaiset ehdot, ja verrokkiristikoihin nähden tulokset olivat parempia.

Optimoiteja tehdessä käytetty optimointitapa ei toiminut parhaalla mahdollisella tavalla, vaan ohjelma saattoi kaatua kesken optimoinnin. Kaatumisia pystyttiin vähentämään hidastamalla optimointia, mutta samalla optimointiajat pitenivät. Kaatumisten syytä ei saatu selville. Optimointi kesti 24 metrin ristikoilla 75–90 minuuttia, 36 metrin ristikoilla 80–120 minuuttia ja 48 metrin ristikoilla 130–180 minuuttia. Optimoinnin alustaminen oli kuitenkin todella helppoa visuaalisessa ohjelmointiympäristössä. Optimoinnin stabiilisuutta parantamalla voitaisiin samassa ajassa tehdä enemmän optimointeja, ja menetelmän lopullinen tehokkuus optimointikeinona voitaisiin testata paremmin.

5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli muodostaa teräsristikoiden suunnittelua varten suunnittelumenetelmä, jota voidaan soveltaa algoritmiavusteisessa suunnittelussa. Mitoitusmenetelmän lähestymistapaa pidettiin käytännönläheisenä, ja algoritmin tärkeimpänä vaatimuksena oli kaikkien standardin mukaisten ehtojen täyttyminen. Kehitettyä menetelmää testattiin sekä yksittäisten ristikoiden mitoituksessa, että optimoinnin työkaluna. Algoritmin testaus kohdistui yksiaukkoiisiin, vapaasti tuettuihin Warren-ristikoihin. Profiileina käytettiin neliön muotoisia kylmämuovattuja rakenneputkia.

Mitoitusalgoritmi toteutettiin C#-ohjelmointikielellä. Ristikon geometria muodostettiin paarteiden ulkolinjojen perusteella. Laskennassa kaikkien liitosten epäkeskisyydet huomioitiin jo laskentamallissa. K-liitokset mallinnettiin kahdella epäkeskisyyselementillä, jolloin niiden välillä olevasta vapaavälielementistä saatiin suoraan tieto vapaavälissä vaikuttavasta leikkausvoimasta. Liitosten mitoituksessa käytettiin yritys ja erehdys –menetelmää. Työssä esitettiin ehdotus, kuinka liitoksen eri murtumistavoilla poikkileikkauksia kannattaisi muokata kestävyuden kasvattamiseksi. Ehdotetulla logiikalla algoritmin avulla kyettiin mitoittamaan ristikoita tehokkaasti, mutta liitoksen kestävyuden parantamiseksi olisi logiikkaan oleellista jatkossa lisätä ehtoja uuden poikkileikkauksen leveydelle ja paksuudelle.

Algoritmin toimivuutta testattiin viidellä eri jänneväliillä ja kahdella eri kuormitustapauksella. Mitoitusalgoritmi sisälsi sauvojen mitoituksen ohella ristikon solmupisteiden mitoituksen. Ehdotetulla menetelmällä kyettiin onnistuneesti mitoittamaan ristikot eurokoodin mukaisesti keskimäärin alle kahdessa sekunnissa. Algoritmiavusteisella suunnittelulla onnistuttiin tehostamaan teräsristikon suunnittelua huomattavasti. Havaittuja etuja perinteisiin suunnittelumenetelmiin nähden olivat tehokkuus ja virheettömyys. Asetetut tavoitteet ja rajaukset huomioiden ohjelmasta ei löytynyt merkittäviä puutteita.

Optimointi tehtiin kolmelle eri jännevälille minimoimalla sekä massaa että kustannuksia. Lisäksi kahden pidemmän jännevälin ristikoilla tutkittiin kahta eri diagonaalisauvojen lukumäärää. Optimointi suoritettiin Grasshopperissa käyttämällä parveilualgoritmia. Optimoinnin tavoitteena oli testata, voidaanko mitoitusalgoritmia hyödyntää osana optimointia, sekä päästäänkö menettelyllä merkittävästi parempiin ratkaisuihin. Optimoinnissa geometriamuuttujat olivat jatkuvia ja sauvojen poikkileikkaukset valittiin diskreetistä joukosta. Rajoitusehdot käsittivät eurokoodin mukaiset kestävyysvaatimukset, sauvojen poikkileikkauksiin ja liitoskaavoihin liittyvät ehdot.

Optimoinnissa päästiin painon osalta 12–16 % kevyempiin ratkaisuihin kuin tasavälein sijoitetuilla diagonaaleilla. Kustannusten minimoinnissa päästiin puolestaan 11–14 %

halvempiin ratkaisuihin. Massa- ja kustannusoptimeiden välillä löydettiin pieniä geometriaan liittyviä eroja. Kustannusoptimoidut ristikot olivat hieman matalampia kuin keveimmät ristikot. Ristikoiden massan ja kustannusten osalta merkittävää eroa ei kuitenkaan parhaiden löydettyjen ratkaisujen välillä esiintynyt. Tutkimuksen perusteella voidaan kuitenkin todeta mitoitusalgoritmin soveltuvan optimointiin. Optimoinnin kannalta parempiin ratkaisuihin päästäisiin, mikäli sauvojen poikkileikkausten valinnassa hyödynnetään mitoitusoptimointia yritys ja erehdys –menetelmän sijasta.

K-liitosten vapaavälielementeissä vaikuttaa diagonaaleista normaalivoimista johtuen suuri leikkausvoima, jolloin paarten leikkaus- ja normaalivoiman pienentämä taivutuskestävyys pienenee merkittävästi. Toteutetun algoritmin mitoituksessa kaikissa liitoksissa otettiin epäkeskisyydet huomioon, vaikka eurokoodin mukaiset ehdot eivät olisi sitä edellyttänyt. Kirjallisuudesta ei löydetty esimerkkitapauksia sille, mitkä eurokoodin mukaiset sauvojen kestävyudet tulisi tarkistaa vapaavälielementille. Tutkimuksen tapauksissa kaikki eurokoodin ehdot huomioitiin. Käytetyssä Karamba3D-ohjelmasta löytyi laskentavirhe tai yksinkertaistuksia, mikä johti suurempiin käyttöasteisiin alapaarten ensimmäisellä vapaavälielementillä vertailulaskelmiin nähden. Asiasta on ilmoitettu ohjelman kehittäjälle ja asia on otettu käsittelyyn. Löydetty laskentavirhe kuitenkin vaikutti optimoinnissa löydettyihin tuloksiin, ja alapaarre osoittautui tarkastetulla ristikolla ylimitoitetuksi.

Tässä työssä tutkitut ristikot olivat kaikki Warren-tyyppisiä. Jatkotutkimuksissa mitoitusmenetelmää voitaisiin laajentaa muun tyyppisten ristikoiden mitoitukseen. Suuri osa kehitetystä menetelmästä on suoraan sovellettavissa muihin ristikoihin. Merkittävä kehitysmahdollisuus olisi myös palomitoitukseen implementoinnissa. Palomitoitus nähdään usein erillisenä suunnitteluvaiheena, vaikka se tulisi ottaa huomioon teräsrakenteiden suunnittelussa alusta alkaen. Kriittisten lämpötilojen laskenta käsin on hyvin työlästä niille osille, joille stabiilisuusilmiöt tulee huomioida. Palotilanteessa teräksen kimmomoduuli ja lujuus pienenevät eri suhteessa, joten kriittisten lämpötilojen laskenta stabiilisuuden suhteen johtaa iteratiiviseen laskentaprosessiin. Näistä syistä palomitoituksen yhdistäminen valmiiseen algoritmiin helpottaisi merkittävästi suunnittelijan työtä.

LÄHTEET

- Boel, H. (2010). Buckling Length Factors of Hollow Section Members in Lattice Girders, Eindhoven University of Technology, 186 p.
- Eberhart, R. & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory, MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE, pp. 39-43.
- EN 1993-1-1 (2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 99 p.
- EN 1993-1-8 (2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-8: Design of joints, Suomen standardoimisliitto, 148 p.
- Evers, H. & Maatje, I. (2000). Cost based engineering and production of steel connections, Connections in steel structure IV, pp. 14-22.
- Fourie, P.C. & Groenwold, A.A. (2002). The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 23(4), pp. 259-267.
- Haapio, J. (2012). Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach, Tampere University of Technology, 99 p. Available: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2795-1>.
- Heinisuo, M., Möttönen, A., Paloniemi, T. & Nevalainen, P. (1991). Automatic design of steel frames in a CAD-system, Proceedings of the 4th Finnish Mechanics days, Lappeenranta, Suomi, pp. 197-204.
- Jalkanen, J. (2007). Tubular truss optimization using heuristic algorithms, Tampere University of Technology, 106 p. Available: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-200903101039>.
- Jalkanen, J. (2006). Parveilualgoritmi kantavien rakenteiden optimoinnissa, Rakenteiden mekaniikka, Vuosikerta 39, Nro 2, s. 23-35.
- Jalkanen, J. (2015). Practical tubular truss optimization, 13th Nordic Steel Construction Conference, 23-25.9.2015, Tampere, Finland, pp. 91-92.
- Jármai, K. & Farkas, J. (1999). Cost calculation and optimisation of welded steel structures, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 50(2), pp. 115-135.
- Labonnote, N., Luczkowski, M., Mork, J., Dyvik, S., Rønnquist, A. & Manum, B. (2018). Computational Design for AEC - "Mush-have" or "Nice-to-Have"? 17th international conference on computing in civil and building engineering - Conference proceedings, 5.6.2018 - 7.6.2018, pp. 205-212.

- Mela, K. (2013). *Mixed Variable Formulations for Truss Topology Optimization*, Tampere University of Technology, 132 p. Available: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3116-3>.
- Mela, K., Alinikula, M., Tiainen, T., Heinisuo, M. & Sorsa, I. (2015). Suunnittelutyökalu putkiristikoiden mitoittamiseen ja optimointiin, *Proceedings of the XII Finnish Mechanics Days. Suomen XII Mekaniikkapäivien esitelmät*, s. 136-141.
- NCCI SN044a-EN-EU (2006). *Design for splices in structural hollow sections*, 12 p.
- Olesen, J. (2018). *Intelligent optimization of steel structures in the early design phase through Visual Programming*, Technical University of Denmark, 88 p. Available (referenced 27.2.2019): https://www.dropbox.com/sh/rwcvzbpldywfr7g/AADA-A3AA5Ip-KVh_Ne6IK7iwa?dl=0.
- Packer, J.A., Wardenier, J., Zhao, X.-., van der Vegte, G. J. & Kurobane, Y. (2009). *Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading*, 2nd ed, CIDECT, 149 p.
- Pavlovčič, L., Krajnc, A. & Beg, D. (2004). Cost function analysis in the structural optimization of steel frames, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 28(4), pp. 286-295.
- Poli, R., Kennedy, J. & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization: An overview, *Swarm Intelligence*, Vol. 1(1), pp. 33-57.
- Somodi, B., Pablovic, M., Mela, K., Heinisuo, M., Björk, T., Veljkovic, M., Turán, P., Erkkilä, J., Ongelin, P., Schillo, N., Horváth, L., Pétursson, E., Kövesdi, B., Schaffrath, S., Manoleas, P., Minkkinen, J., Feldmann, M., Clarin, M., Seyr, A., Valkonen, I., Tuominen, N. & Viridi, K. (2016). *Rules on high strength steel (RUOSTE)*, 150 p. Available (referenced 15.2.2019): <https://publications.europa.eu/portal2012-portal/html/downloadHandler.jsp?identifier=515285b0-c820-11e6-a6db-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=>.
- SSAB Domex Tube Rakenneputket (2016). *EN 1993 - käsikirja*, SSAB Europe Oy, Hämeenlinna, 688 s.
- Tanska, T. & Österlund, T. (2014). *Algoritmit puurakenteissa - menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto*, University of Oulu, 174 s.
- Tiainen, T. & Heinisuo, M. (2015). Teräsristikoiden paarteiden liitoksen vapaan välin leikkausvoiman arviointi, *Proceedings of the XII Finnish Mechanics Days. Suomen XII Mekaniikkapäivien esitelmät, Rakenteiden Mekaniikan Seura ry*, s. 30-35.
- Wardenier, J., Packer, J.A., Zhao, X.-. & van der Vegte, G. J. (2010). *Hollow Sections in Structural Applications*, 2nd ed. CIDECT, 232 p.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*, Routledge, London; New York, NY, 300 p.

Ympäristöministeriö (2017). Rakenteiden lujuus ja vakaus. Teräsrakenteet. 96 s. Saatavilla (viitattu 15.10.2018): <http://www.ymp.fi/download/noname/%7BD829E0A3-9D8E-4730-8E6C-EF076B4642F2%7D/126585>

LIITE A: POIKKILEIKKAUSKATALOGIT

Taulukko 1. Optimoinnissa käytetyt poikkileikkaukset.

Nimi	h [mm]	t [mm]	M [kg/m]	A [mm ²]	I _y [mm ⁴]	W _{ely} [mm ³]	W _{ply} [mm ³]	PI
SHS 25x25x3	25	3	1,89	241	18400	1470	1910	1
SHS 30x30x3	30	3	2,36	301	35000	2340	2960	1
SHS 40x40x3	40	3	3,3	421	93200	4660	5720	1
SHS 40x40x4	40	4	4,2	535	110700	5540	7010	1
SHS 50x50x3	50	3	4,25	541	194700	7790	9390	1
SHS 50x50x4	50	4	5,45	695	237400	9490	11730	1
SHS 50x50x5	50	5	6,56	836	270400	10820	13700	1
SHS 60x60x3	60	3	5,19	661	351300	11710	13950	1
SHS 60x60x4	60	4	6,71	855	435500	14520	17640	1
SHS 60x60x5	60	5	8,13	1036	504900	16830	20880	1
SHS 70x70x3	70	3	6,13	781	575300	16440	19420	1
SHS 70x70x4	70	4	7,97	1015	721200	20610	24760	1
SHS 70x70x5	70	5	9,7	1236	846300	24180	29560	1
SHS 80x80x3	80	3	7,07	901	878400	21960	25780	1
SHS 80x80x4	80	4	9,22	1175	1110000	27760	33070	1
SHS 80x80x5	80	5	11,3	1436	1314000	32860	39740	1
SHS 80x80x6	80	6	13,2	1683	1492000	37290	45790	1
SHS 90x90x3	90	3	8,01	1021	1273000	28290	33040	2
SHS 90x90x4	90	4	10,5	1335	1619000	35980	42580	1
SHS 90x90x5	90	5	12,8	1636	1929000	42870	51410	1
SHS 90x90x6	90	6	15,1	1923	2205000	49000	59540	1
SHS 100x100x4	100	4	11,7	1495	2264000	45270	53300	1
SHS 100x100x5	100	5	14,4	1836	2711000	54220	64590	1
SHS 100x100x6	100	6	17	2163	3115000	62290	75100	1
SHS 100x100x7,1	100	7,1	19,4	2465	3401000	68030	83590	1
SHS 100x100x8	100	8	21,4	2724	3659000	73190	91050	1
SHS 100x100x10	100	10	25,6	3257	4111000	82220	105300	1
SHS 110x110x4	110	4	13	1655	3059000	55620	65210	1
SHS 110x110x5	110	5	16	2036	3679000	66900	79270	1
SHS 110x110x6	110	6	18,9	2403	4246000	77190	92460	1
SHS 120x120x4	120	4	14,2	1815	4023000	67050	78330	2
SHS 120x120x5	120	5	17,5	2236	4855000	80910	95450	1
SHS 120x120x5,6	120	5,6	19,5	2482	5323000	88710	105300	1
SHS 120x120x6	120	6	20,7	2643	5622000	93690	111600	1
SHS 120x120x7,1	120	7,1	23,8	3033	6235000	103900	125700	1
SHS 120x120x8	120	8	26,4	3364	6769000	112800	137800	1
SHS 120x120x8,8	120	8,8	28,6	3648	7199000	120000	147900	1
SHS 120x120x10	120	10	31,8	4057	7768000	129500	161800	1
SHS 140x140x5	140	5	20,7	2636	7906000	112900	132300	2
SHS 140x140x5,6	140	5,6	23	2930	8696000	124200	146300	1

Nimi	h [mm]	t [mm]	M [kg/m]	A [mm ²]	I _y [mm ⁴]	W _{ely} [mm ³]	W _{ply} [mm ³]	PI
SHS 140x140x6	140	6	24,5	3123	9204000	131500	155300	1
SHS 140x140x7,1	140	7,1	28,3	3601	10320000	147400	176300	1
SHS 140x140x8	140	8	31,4	4004	11270000	161000	194200	1
SHS 140x140x8,8	140	8,8	34,2	4352	12050000	172100	209200	1
SHS 140x140x10	140	10	38,1	4857	13120000	187400	230400	1
SHS 150x150x5	150	5	22,3	2836	9821000	130900	153000	2
SHS 150x150x6	150	6	26,4	3363	11460000	152800	179900	1
SHS 150x150x7,1	150	7,1	30,5	3885	12900000	172000	204800	1
SHS 150x150x8	150	8	33,9	4324	14120000	188200	226000	1
SHS 150x150x8,8	150	8,8	36,9	4704	15130000	201700	243900	1
SHS 150x150x10	150	10	41,3	5257	16530000	220300	269200	1
SHS 150x150x12,5	150	12,5	48,7	6204	18170000	242300	305600	1
SHS 160x160x6	160	6	28,3	3603	14050000	175700	206200	1
SHS 160x160x7,1	160	7,1	32,7	4169	15870000	198400	235500	1
SHS 160x160x8	160	8	36,5	4644	17410000	217700	260100	1
SHS 160x160x8,8	160	8,8	39,7	5056	18700000	233700	281100	1
SHS 160x160x10	160	10	44,4	5657	20480000	256000	311000	1
SHS 160x160x12,5	160	12,5	52,6	6704	22750000	284400	355700	1
SHS 180x180x6	180	6	32,1	4083	20370000	226300	264400	2
SHS 180x180x7,1	180	7,1	37,2	4737	23130000	257000	303100	1
SHS 180x180x8	180	8	41,5	5284	25460000	282900	335700	1
SHS 180x180x8,8	180	8,8	45,2	5760	27420000	304600	363600	1
SHS 180x180x10	180	10	50,7	6457	30170000	335200	403500	1
SHS 180x180x12,5	180	12,5	60,5	7704	34060000	378500	467100	1
SHS 200x200x7,1	200	7,1	41,6	5305	32320000	323200	379300	2
SHS 200x200x8	200	8	46,5	5924	35660000	356600	420900	1
SHS 200x200x8,8	200	8,8	50,7	6464	38500000	385000	456600	1
SHS 200x200x10	200	10	57	7257	42510000	425100	508100	1
SHS 200x200x12,5	200	12,5	68,3	8704	48590000	485900	593500	1
SHS 220x220x7,1	220	7,1	46,1	5873	43670000	397000	464000	2
SHS 220x220x8	220	8	51,5	6564	48280000	438900	515600	1
SHS 220x220x8,8	220	8,8	56,3	7168	52210000	474700	560200	1
SHS 220x220x10	220	10	63,2	8057	57820000	525700	624700	1
SHS 220x220x12,5	220	12,5	76,2	9704	66740000	606700	734900	1
SHS 250x250x8	250	8	59,1	7524	72290000	578300	675800	2
SHS 250x250x8,8	250	8,8	64,6	8224	78350000	626800	735300	2
SHS 250x250x10	250	10	72,7	9257	87070000	696500	822000	1
SHS 250x250x12,5	250	12,5	88	11200	101610000	812900	975200	1
SHS 260x260x8,8	260	8,8	67,3	8576	88690000	682200	799000	2
SHS 260x260x10	260	10	75,8	9657	98650000	758800	893800	1
SHS 260x260x12,5	260	12,5	91,9	11700	115480000	888300	1063000	1
SHS 300x300x10	300	10	88,4	11260	155190000	1035000	1211000	2
SHS 300x300x12,5	300	12,5	108	13700	183480000	1223000	1451000	1

LIITE B: KUSTANNUSLASKENNASSA KÄYTETYT ARVOT

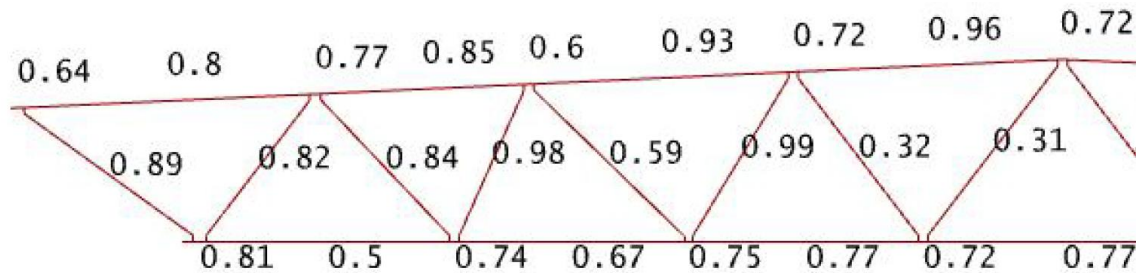
Taulukon arvot perustuvat Melan väitöstyössä (2013) esitettyihin arvoihin. Arvot kuvaavat Suomessa vuonna 2012 vallinnutta hintatasoa.

Taulukko 1. Kustannuslaskennassa käytettävät arvot.

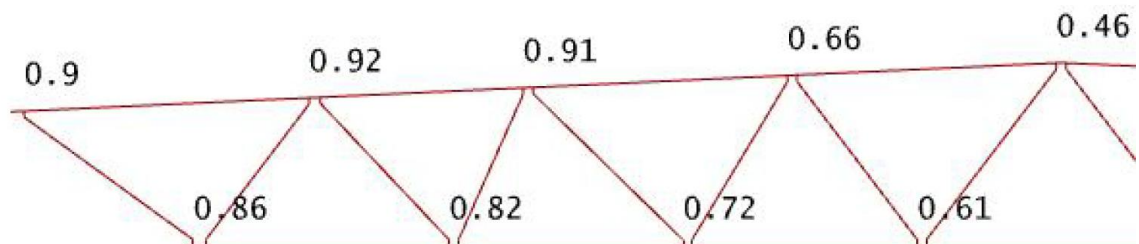
Selite	Merkintä	Käytetty arvo
<i>Materiaali</i>		
Materiaalin hinta	c_M	0.8 €/kg
<i>Sahaus</i>		
Yleiset kustannukset	c_S	1.2 €/min
Energian hinta	c_{EnS}	0.02 €/min
Sahausnopeus	S	$\left\{ \begin{array}{l} 120 \text{ mm/min}, 0 \leq t \leq 5 \\ 100 \text{ mm/min}, 6 \leq t \leq 10 \\ 90 \text{ mm/min}, 11 \leq t \leq 15 \end{array} \right.$
Materiaalikerroin	S_m	0.8
Sahaustehokkuus	Q	6900 mm ² /min
Kestävyyssparametri	F_{sp}	$\left\{ \begin{array}{l} 0.4, 0 \leq t \leq 5 \\ 0.45, 6 \leq t \leq 10 \\ 0.5, 11 \leq t \leq 15 \end{array} \right.$
Kalustoparametri	F_s	1350 min
<i>Hitsaus</i>		
Työvoimakustannukset	c_{LA}	0.46 €/min
Kalustokustannukset	c_{EqA}	0.01 €/min
Työtilan investointikustannukset	c_{ReA}	0.03 €/min
Työtilan ylläpitokustannukset	c_{SeA}	0.04 €/min
Energian hinta	c_{EnA}	0.01 €/min
Silloitus aika	T_{Ta}	1.59 min
Käyttöaste	u_{PA}	1.0
<i>Maalaus</i>		
Työvoimakustannukset	c_{LP}	0.46 €/min
Työtilan investointikustannukset	c_{ReP}	0.03 €/min
Työtilan ylläpitokustannukset	c_{SeP}	0.04 €/min
Käyttöaste	u_P	1.0

LIITE C: VERTAILULASKELMAT

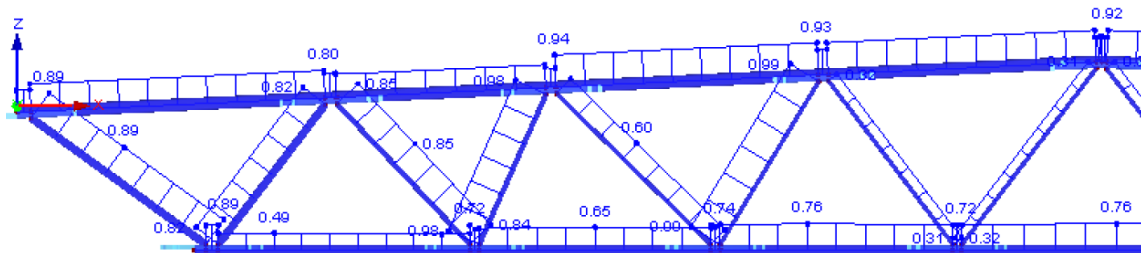
Tässä liitteessä on esitetty 24 metrin kustannusoptimoitun ristikon tulokset mitoitusohjelmasta. Ristikosta on tehty vertailulaskelmat RFEM-ohjelmalla. Aluksi on esitetty laskentatulokset optimoinnissa löydetylle ratkaisulle. Alapaarteen tuelta katsottuna ensimmäiselle vapaavälielementille tehdään lisäksi vertailulaskelmat, ja tuloksia tutkitaan myös ohuemmillä poikkileikkauksilla.



Kuva 1. Ristikon sauvojen käyttöasteet mitoitusohjelmasta (Karamba3D).



Kuva 2. Liitosten käyttöasteet mitoitusohjelmasta.



Kuva 3. Ristikon sauvojen käyttöasteet RFEM.

Taulukossa 1 on koottuna elementeittäin RFEMin ja Karamba3D:n mukaiset käyttöasteet. Elementit 33–48 ovat K-liitosten vapaavälielementit, 50–59 ovat yläpaarteen ja 61–69 ovat alapaarteen elementit. Diagonaalit ovat 70–85. Taulukon jälkeen on esitetty alapaarteen tuelta katsottuna ensimmäisen vapaavälielementin (RFEM ID 41) laskut käsin. RFEM antoi kyseiselle elementille 9,7 % pienemmän käyttöasteen kuin Karamba3D.

Taulukko 1. Käyttöasteet sauvoittain, sekä ero RFEM:in ja Karamba3D:n välillä.

RFEM ID	Poikkileikkaus	RFEM	Karamba	Ero
33	SHS 140x140x8.8 Ruukki	74,5	77,3	2,8
34	SHS 140x140x8.8 Ruukki	59,3	59,7	0,4
35	SHS 140x140x8.8 Ruukki	72,2	72,0	-0,2
36	SHS 140x140x8.8 Ruukki	72,2	72,1	-0,1
37	SHS 140x140x8.8 Ruukki	72,2	72,1	-0,1
38	SHS 140x140x8.8 Ruukki	72,2	72,0	-0,2
39	SHS 140x140x8.8 Ruukki	59,3	59,7	0,4
40	SHS 140x140x8.8 Ruukki	74,5	77,3	2,8
41	SHS 120x120x8 Ruukki	71,3	81,0	9,7
42	SHS 120x120x8 Ruukki	71,9	74,3	2,4
43	SHS 120x120x8 Ruukki	73,9	74,8	0,9
44	SHS 120x120x8 Ruukki	71,6	71,6	0,0
45	SHS 120x120x8 Ruukki	71,6	71,6	0,0
46	SHS 120x120x8 Ruukki	73,9	74,8	0,9
47	SHS 120x120x8 Ruukki	71,9	74,3	2,4
48	SHS 120x120x8 Ruukki	71,3	81,0	9,7
50	SHS 140x140x8.8 Ruukki	64,4	64,4	0,0
51	SHS 140x140x8.8 Ruukki	80,2	80,0	-0,2
52	SHS 140x140x8.8 Ruukki	67,7	84,7	17,0
53	SHS 140x140x8.8 Ruukki	93,5	93,4	-0,1
54	SHS 140x140x8.8 Ruukki	92,2	95,6	3,4
55	SHS 140x140x8.8 Ruukki	92,2	95,6	3,4
56	SHS 140x140x8.8 Ruukki	93,5	93,4	-0,1
57	SHS 140x140x8.8 Ruukki	67,7	84,7	17,0
58	SHS 140x140x8.8 Ruukki	80,2	80,0	-0,2
59	SHS 140x140x8.8 Ruukki	64,4	64,4	0,0
61	SHS 120x120x8 Ruukki	0,0	0,1	0,1
62	SHS 120x120x8 Ruukki	49,0	50,4	1,4
63	SHS 120x120x8 Ruukki	65,3	66,6	1,3
64	SHS 120x120x8 Ruukki	75,6	76,8	1,2
65	SHS 120x120x8 Ruukki	75,7	77,0	1,3
66	SHS 120x120x8 Ruukki	75,6	76,8	1,2
67	SHS 120x120x8 Ruukki	65,3	66,6	1,3
68	SHS 120x120x8 Ruukki	49,0	50,4	1,4
69	SHS 120x120x8 Ruukki	0,0	0,1	0,1
70	SHS 90x90x4 Ruukki	89,1	88,8	-0,3
71	SHS 90x90x4 Ruukki	81,5	81,6	0,1
72	SHS 60x60x3 Ruukki	84,8	84,5	-0,3
73	SHS 60x60x3 Ruukki	97,8	97,8	0,0
74	SHS 50x50x3 Ruukki	59,6	59,1	-0,5
75	SHS 50x50x3 Ruukki	98,6	98,7	0,1
76	SHS 50x50x3 Ruukki	31,8	31,8	0,0
77	SHS 50x50x3 Ruukki	30,8	30,8	0,0
78	SHS 50x50x3 Ruukki	30,8	30,8	0,0
79	SHS 50x50x3 Ruukki	31,8	31,8	0,0
80	SHS 50x50x3 Ruukki	98,6	98,7	0,1
81	SHS 50x50x3 Ruukki	59,6	59,1	-0,5
82	SHS 60x60x3 Ruukki	97,8	97,8	0,0
83	SHS 60x60x3 Ruukki	84,8	84,5	-0,3
84	SHS 90x90x4 Ruukki	81,5	81,6	0,1
85	SHS 90x90x4 Ruukki	89,1	88,8	-0,3

Alapaarteen ensimmäisen vapaavälielementin mitoitus

Profiili := "120x120x8"

$h = 120 \text{ mm}$	$I_y = 6769000 \text{ mm}^4$	$I_z = 6769000 \text{ mm}^4$	
$b = 120 \text{ mm}$	$W_{pl.y} = 137800 \text{ mm}^3$	$W_{pl.z} = 137800 \text{ mm}^3$	
$t = 8 \text{ mm}$	$W_{el.y} = 112800 \text{ mm}^3$	$W_{el.z} = 112800 \text{ mm}^3$	
$A = 3364 \text{ mm}^2$	$A_v := A \cdot \frac{h}{b+h} = 1682 \text{ mm}^2$		

Osavarmuusluvut

$$\gamma_{M0} := 1.00 \quad \gamma_{M1} := 1.00 \quad \gamma_{M2} := 1.25 \quad \gamma_{M5} := 1.00$$

Materiaaliominaisuudet

$$f_y := 355 \text{ MPa} \quad E := 210000 \text{ MPa} \quad \nu := 0.3 \quad G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80769.231 \text{ MPa}$$

Voimasuureet

$$V_{Ed} := 246 \text{ kN} \quad N_{Ed} := 341 \text{ kN} \quad M_{Ed} := 20.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

EN 1993-1-1 mukainen mitoitus

$$\text{Taivutuskestävyys } M_{pl.Rd} := \frac{W_{pl.y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 48.919 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad n_M := \frac{M_{Ed}}{M_{pl.Rd}} = 0.419$$

$$\text{Vetokestävyys } N_{pl.Rd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1194.22 \text{ kN} \quad n_N := \frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} = 0.286$$

$$\text{Leikkauskestävyys } V_{pl.Rd} := A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 344.742 \text{ kN} \quad n_V := \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} = 0.714$$

Liitoskaavojen mukainen normaalivoimakestävyys vapaavälissä (EN 1993-1-8)

$$N_{0.gap.Rd} := \frac{(A - A_v) \cdot f_y + A_v \cdot f_y \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} = 1015.431 \text{ kN} \quad n_{gap} := \frac{N_{Ed}}{N_{0.gap.Rd}} = 0.336$$

Normaalivoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$a_w := \min\left(\frac{A - 2 \cdot b \cdot t}{A}, 0.5\right) = 0.429$$

$$M_{N.Rd} := \begin{cases} \text{if } N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5 \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \frac{1}{4} \cdot N_{pl.Rd}\right) \\ \quad \parallel M_{pl.Rd} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \min\left(M_{pl.Rd}, M_{pl.Rd} \cdot \frac{1 - n_N}{1 - 0.5 \cdot a_w}\right) \end{cases} = 44.502 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$n_{NM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.Rd}} = 0.461$$

Leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$\rho := \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1\right)^2 = 0.182$$

$$M_{V.Rd} := \min\left(M_{pl.Rd}, \left(W_{pl.y} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{8 \cdot t}\right) \cdot \left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}}\right)\right) = 46.056 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad n_{VM} := \frac{M_{Ed}}{M_{V.Rd}} = 0.445$$

Normaalivoiman ja leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$A_{w.red} := (1 - \rho) \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) = 1180.525 \text{ mm}^2 \quad A_{tot.red} := A - \rho \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) = 3100.525 \text{ mm}^2$$

$$a_V := \frac{A_{w.red}}{A_{tot.red}} = 0.381 \quad N_{V.Rd} := \frac{A_{tot.red} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1100.686 \text{ kN} \quad n_{V2} := \frac{N_{Ed}}{N_{V.Rd}} = 0.31$$

$$M_{N.V.Rd} := \begin{cases} \text{if } N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5 \cdot A_{w.red} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \frac{1}{4} \cdot N_{V.Rd}\right) \\ \quad \parallel M_{V.Rd} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \min\left(M_{V.Rd} \cdot \frac{1 - n_{V2}}{1 - 0.5 \cdot a_V}, M_{pl.Rd}\right) \end{cases} = 39.262 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$n_{NVM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.V.Rd}} = 0.522$$

Käyttöasteet

$$n_M = 0.419 \quad n_N = 0.286 \quad n_V = 0.714 \quad n_{gap} = 0.336$$

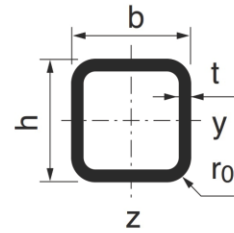
$$n_{NM} = 0.461 \quad n_{VM} = 0.445 \quad n_{NVM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.V.Rd}} = 0.522$$

$$n_{max} := \max(n_M, n_N, n_V, n_{NM}, n_{VM}, n_{NVM}) = 0.714 \quad (n_{karamba} := 0.81)$$

Vertailu ohuemalla poikkileikkauksella

Profiili := "120x120x7,1"

$$\begin{array}{lll}
 h = 120 \text{ mm} & I_y = 6235000 \text{ mm}^4 & I_z = 6235000 \text{ mm}^4 \\
 b = 120 \text{ mm} & W_{pl,y} = 125700 \text{ mm}^3 & W_{pl,z} = 125700 \text{ mm}^3 \\
 t = 7.1 \text{ mm} & W_{el,y} = 103900 \text{ mm}^3 & W_{el,z} = 103900 \text{ mm}^3 \\
 A = 3033 \text{ mm}^2 & A_v := A \cdot \frac{h}{b+h} = 1516.5 \text{ mm}^2 &
 \end{array}$$



Osavarmuusluvut

$$\gamma_{M0} := 1.00 \quad \gamma_{M1} := 1.00 \quad \gamma_{M2} := 1.25 \quad \gamma_{M5} := 1.00$$

Materiaaliominaisuudet

$$f_y := 355 \text{ MPa} \quad E := 210000 \text{ MPa} \quad \nu := 0.3 \quad G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80769.231 \text{ MPa}$$

Voimasuureet

$$V_{Ed} := 246 \text{ kN} \quad N_{Ed} := 341 \text{ kN} \quad M_{Ed} := 20.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

EN 1993-1-1 mukainen mitoitus

$$\text{Taivutuskestävyys } M_{pl,Rd} := \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 44.624 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad n_M := \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.459$$

$$\text{Vetokestävyys } N_{pl,Rd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1076.715 \text{ kN} \quad n_N := \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.317$$

$$\text{Leikkauskestävyys } V_{pl,Rd} := A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 310.821 \text{ kN} \quad n_V := \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0.791$$

Liitoskaavojen mukainen normaalivoimakkestävyys vapaavälissä (EN 1993-1-8)

$$N_{0,gap,Rd} := \frac{(A - A_v) \cdot f_y + A_v \cdot f_y \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} = 867.418 \text{ kN} \quad n_{gap} := \frac{N_{Ed}}{N_{0,gap,Rd}} = 0.393$$

Normaalivoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$a_w := \min\left(\frac{A - 2 \cdot b \cdot t}{A}, 0.5\right) = 0.438$$

$$M_{N.Rd} := \begin{cases} \text{if } N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5 \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \frac{1}{4} \cdot N_{pl.Rd}\right) \\ \quad \parallel M_{pl.Rd} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \min\left(M_{pl.Rd}, M_{pl.Rd} \cdot \frac{1 - n_N}{1 - 0.5 \cdot a_w}\right) \end{cases} = 39.046 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$n_{NM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.Rd}} = 0.525$$

Leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$\rho := \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1\right)^2 = 0.34$$

$$M_{V.Rd} := \min\left(M_{pl.Rd}, \left(W_{pl.y} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{8 \cdot t}\right) \cdot \left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}}\right)\right) = 39.74 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$n_{VM} := \frac{M_{Ed}}{M_{V.Rd}} = 0.516$$

Normaalivoiman ja leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$A_{w.red} := (1 - \rho) \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) = 877.434 \text{ mm}^2 \quad A_{tot.red} := A - \rho \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) = 2581.434 \text{ mm}^2$$

$$a_V := \frac{A_{w.red}}{A_{tot.red}} = 0.34 \quad N_{V.Rd} := \frac{A_{tot.red} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 916.409 \text{ kN} \quad n_{V2} := \frac{N_{Ed}}{N_{V.Rd}} = 0.372$$

$$M_{N.V.Rd} := \begin{cases} \text{if } N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5 \cdot A_{w.red} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \frac{1}{4} N_{V.Rd}\right) \\ \quad \parallel M_{V.Rd} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \min\left(M_{V.Rd} \cdot \frac{1 - n_{V2}}{1 - 0.5 \cdot a_V}, M_{pl.Rd}\right) \end{cases} = 30.061 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$n_{NVM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.V.Rd}} = 0.682$$

Käyttöasteet

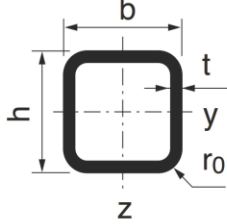
$$n_M = 0.459 \quad n_N = 0.317 \quad n_V = 0.791 \quad n_{gap} = 0.393$$

$$n_{NM} = 0.525 \quad n_{VM} = 0.516 \quad n_{NVM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.V.Rd}} = 0.682$$

$$n_{max} := \max(n_M, n_N, n_V, n_{NM}, n_{VM}, n_{NVM}) = 0.791 \quad (n_{karamba} := 1.10 \text{ **Ylimiöittäa**})$$

Vertailu ohuemalla poikkileikkauksella

Profiili := "120x120x6"

$h = 120 \text{ mm}$	$I_y = 5622000 \text{ mm}^4$	$I_z = 5622000 \text{ mm}^4$	
$b = 120 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 111600 \text{ mm}^3$	$W_{pl,z} = 111600 \text{ mm}^3$	
$t = 6 \text{ mm}$	$W_{el,y} = 93690 \text{ mm}^3$	$W_{el,z} = 93690 \text{ mm}^3$	
$A = 2643 \text{ mm}^2$	$A_v := A \cdot \frac{h}{b+h} = 1321.5 \text{ mm}^2$		

Osavarmuusluvut

$$\gamma_{M0} := 1.00 \quad \gamma_{M1} := 1.00 \quad \gamma_{M2} := 1.25 \quad \gamma_{M5} := 1.00$$

Materiaaliominaisuudet

$$f_y := 355 \text{ MPa} \quad E := 210000 \text{ MPa} \quad \nu := 0.3 \quad G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80769.231 \text{ MPa}$$

Voimasuureet

$$V_{Ed} := 246 \text{ kN} \quad N_{Ed} := 341 \text{ kN} \quad M_{Ed} := 20.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

EN 1993-1-1 mukainen mitoitus

$$\text{Taivutuskestävyys } M_{pl.Rd} := \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 39.618 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad n_M := \frac{M_{Ed}}{M_{pl.Rd}} = 0.517$$

$$\text{Vetokestävyys } N_{pl.Rd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 938.265 \text{ kN} \quad n_N := \frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} = 0.363$$

$$\text{Leikkauskestävyys } V_{pl.Rd} := A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 270.854 \text{ kN} \quad n_V := \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} = 0.908$$

Liitoskaavojen mukainen normaalivoimakkestävyys vapaavälissä (EN 1993-1-8)

$$N_{0.gap.Rd} := \frac{(A - A_v) \cdot f_y + A_v \cdot f_y \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} = 665.442 \text{ kN} \quad n_{gap} := \frac{N_{Ed}}{N_{0.gap.Rd}} = 0.512$$

Normaalivoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$a_w := \min\left(\frac{A - 2 \cdot b \cdot t}{A}, 0.5\right) = 0.455$$

$$M_{N.Rd} := \begin{cases} N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5 \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \frac{1}{4} \cdot N_{pl.Rd}\right) & = 32.65 \text{ kN} \cdot \text{m} \\ M_{pl.Rd} \\ \text{else} \\ \min\left(M_{pl.Rd}, M_{pl.Rd} \cdot \frac{1 - n_N}{1 - 0.5 \cdot a_w}\right) \end{cases}$$

$$n_{NM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.Rd}} = 0.628$$

Leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$\rho := \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1\right)^2 = 0.667$$

$$M_{V.Rd} := \min\left(M_{pl.Rd}, \left(W_{pl.y} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{8 \cdot t}\right) \cdot \left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}}\right)\right) = 31.008 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad n_{VM} := \frac{M_{Ed}}{M_{V.Rd}} = 0.661$$

Normaalivoiman ja leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys

$$A_{w.red} := (1 - \rho) \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) = 401.036 \text{ mm}^2 \quad A_{tot.red} := A - \rho \cdot (A - 2 \cdot b \cdot t) = 1841.036 \text{ mm}^2$$

$$a_V := \frac{A_{w.red}}{A_{tot.red}} = 0.218 \quad N_{V.Rd} := \frac{A_{tot.red} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 653.568 \text{ kN} \quad n_{V2} := \frac{N_{Ed}}{N_{V.Rd}} = 0.522$$

$$M_{N.V.Rd} := \begin{cases} N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5 \cdot A_{w.red} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \frac{1}{4} \cdot N_{V.Rd}\right) & = 16.642 \text{ kN} \cdot \text{m} \\ M_{V.Rd} \\ \text{else} \\ \min\left(M_{V.Rd} \cdot \frac{1 - n_{V2}}{1 - 0.5 \cdot a_V}, M_{pl.Rd}\right) \end{cases} \quad n_{NVM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.V.Rd}} = 1.232$$

Käyttöasteet

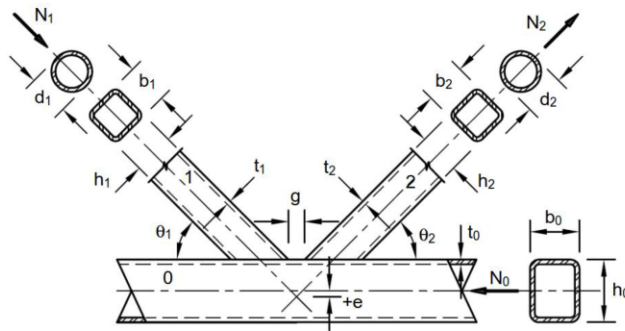
$$n_M = 0.517 \quad n_N = 0.363 \quad n_V = 0.908 \quad n_{gap} = 0.512$$

$$n_{NM} = 0.628 \quad n_{VM} = 0.661 \quad n_{NVM} := \frac{M_{Ed}}{M_{N.V.Rd}} = 1.232$$

$$n_{max} := \max(n_M, n_N, n_V, n_{NM}, n_{VM}, n_{NVM}) = 1.232 \quad (n_{karamba} := 2.41)$$

Seuraavaksi on esitetty alapaarteen ensimmäisen liitoksen laskentatulokset.

K-liitos



Paarre

Profiili

SHS120x120x8

Materiaali

S355

Voimat

N0 [kN]

528

M0 [kN]

3

V0 [kN]

246

N1 [kN]

307

N2 [kN]

421

g [mm] 20

Diagonaali 1

Profiili SHS90x90x4

Materiaali S355

θ [°] 53

Diagonaali 2

Profiili SHS90x90x4

Materiaali S355

θ [°] 36

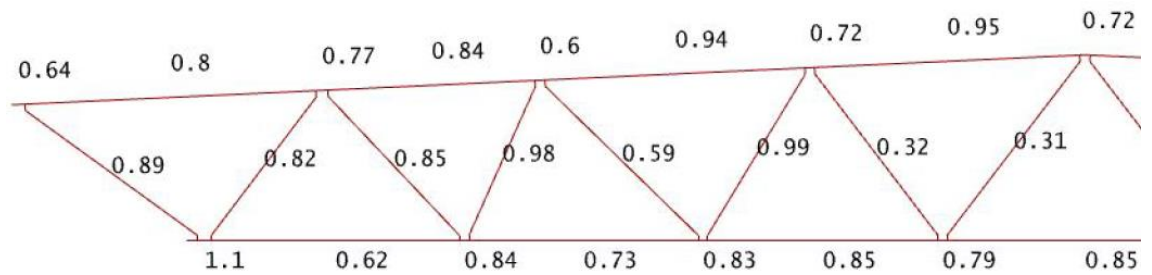
Tulokset

Murtumismuoto	Kestävyys	Käyttöaste
Diagonaali 1		
Paarteen pinnan murtuminen	520,05 kN	59 %
Paarteen leikkausmurto	573,39 kN	53,5 %
Lävistysleikkautuminen $\beta \leq (1-1/\gamma)$	770,7 kN	39,8 %
Uumasauvan murto	488,48 kN	62,8 %
Diagonaali 2		
Paarteen pinnan murtuminen	706,6 kN	59,6 %
Paarteen leikkausmurto	779,07 kN	54 %
Lävistysleikkautuminen $\beta \leq (1-1/\gamma)$	1272,7 kN	33,1 %
Uumasauvan murto	488,48 kN	86,2 %
Paarteen leikkautuminen N0.gap.rd	1070,05 kN	49 %

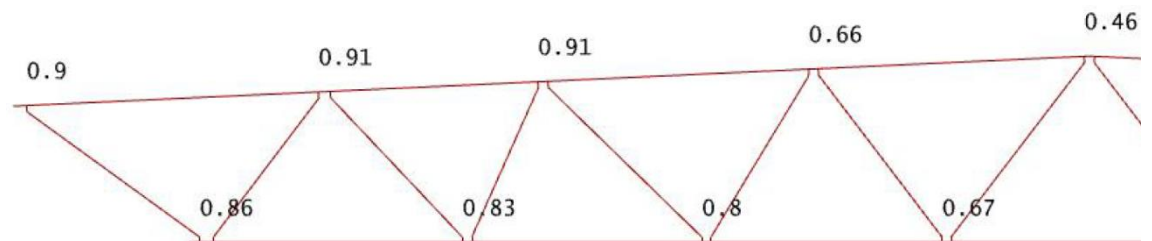
Ehdot

$\theta_1 \geq 30^\circ$	OK	$h_2/t_2 \leq 35$	OK
$\theta_2 \geq 30^\circ$	OK	$0.5 \leq h_2/b_2 \leq 2.0$	OK
$t_0 \geq 2.5$	OK	Diagonaali 1 pll 1/2	OK
$t_1 \geq 2.5$	OK	$b_0/t_0 \leq 35$	OK
$t_2 \geq 2.5$	OK	$h_0/t_0 \leq 35$	OK
$b_1/b_0 \geq 0.35$	OK	$0.5 \leq h_0/b_0 \leq 2.0$	OK
$b_1/b_0 \geq 0.1+0.01b_0/t_0$	OK	Paarre pll 1/2	OK
$b_1/t_1 \leq 35$	OK	$g \geq t_1+t_2$	OK
$h_1/t_1 \leq 35$	OK	$g/b_0 \geq 0.5(1-\beta)$	OK
$0.5 \leq h_1/b_1 \leq 2.0$	OK	$g/b_0 \leq 1.5(1-\beta)$	OK
$b_2/b_0 \geq 0.35$	OK	$-0.55 \leq e/h_0 \leq 0.25$	OK
$b_2/b_0 \geq 0.1+0.01b_0/t_0$	OK	$L_1 \geq 6h_1$	Ei tarkistettu
$b_2/t_2 \leq 35$	OK	$L_2 \geq 6h_2$	Ei tarkistettu

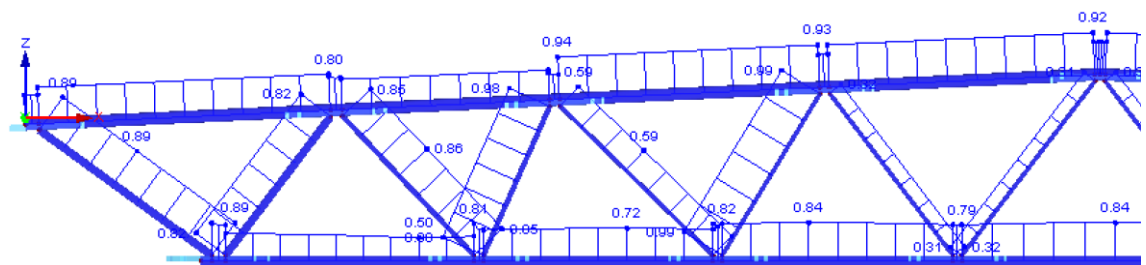
Alla kuvissa on esitetty käyttöasteet alapaarteen poikkileikkauksella SHS 120x7,1.



Kuva 4. Ristikon sauvojen käyttöasteet mitoitusohjelmasta (Karamba3D).



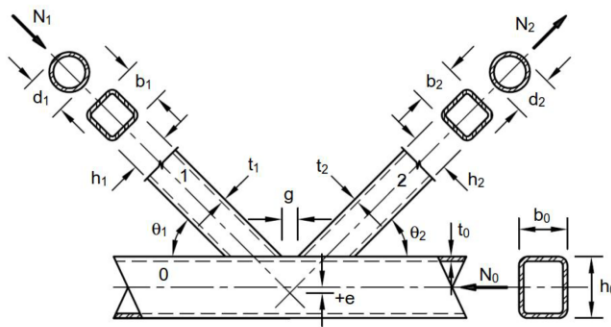
Kuva 5. Liitosten käyttöasteet mitoitusohjelmasta.



Kuva 6. Ristikon sauvojen käyttöasteet RFEM.

RFEMillä alapaarteen ensimmäisen vapaavälielementin käyttöaste on 82 %, joka on lähellä käsin laskettua 79 % käyttöastetta. Liitoksen käyttöaste ei muutu poikkileikkausta muutettaessa, ja suurin käyttöaste tulee vieläkin uumasauvan murron suhteen.

K-liitos



Paarre

Profiili SHS120x120x7,1

Materiaali S355

Voimat

N0 [kN] 528

M0 [kN] 3

V0 [kN] 246

N1 [kN] 307

N2 [kN] 421

g [mm] 20

Diagonaali 1

Profiili SHS90x90x4

Materiaali S355

θ [°] 53

Diagonaali 2

Profiili SHS90x90x4

Materiaali S355

θ [°] 36

Tulokset

Murtumismuoto	Kestävyys	Käyttöaste
Diagonaali 1		
Paarteen pinnan murtuminen	434,8 kN	70,6 %
Paarteen leikkausmurto	501,56 kN	61,2 %
Lävistysleikkautuminen ($\beta \leq (1-1/\gamma)$)	671,7 kN	45,7 %
Uumasauvan murto	488,48 kN	62,8 %
Diagonaali 2		
Paarteen pinnan murtuminen	590,78 kN	71,3 %
Paarteen leikkausmurto	681,49 kN	61,8 %
Lävistysleikkautuminen ($\beta \leq (1-1/\gamma)$)	1112,81 kN	37,8 %
Uumasauvan murto	488,48 kN	86,2 %
Paarteen leikkautuminen N0.gap.rd	930,47 kN	57 %

Ehdot

$\theta_1 \geq 30^\circ$	OK	$h_2/t_2 \leq 35$	OK
$\theta_2 \geq 30^\circ$	OK	$0.5 \leq h_2/b_2 \leq 2.0$	OK
$t_0 \geq 2.5$	OK	Diagonaali 1 pll1/2	OK
$t_1 \geq 2.5$	OK	$b_0/t_0 \leq 35$	OK
$t_2 \geq 2.5$	OK	$h_0/t_0 \leq 35$	OK
$b_1/b_0 \geq 0.35$	OK	$0.5 \leq h_0/b_0 \leq 2.0$	OK
$b_1/b_0 \geq 0.1+0.01b_0/t_0$	OK	Paarre pll 1/2	OK
$b_1/t_1 \leq 35$	OK	$g \geq t_1+t_2$	OK
$h_1/t_1 \leq 35$	OK	$g/b_0 \geq 0.5(1-\beta)$	OK
$0.5 \leq h_1/b_1 \leq 2.0$	OK	$g/b_0 \leq 1.5(1-\beta)$	OK
$b_2/b_0 \geq 0.35$	OK	$-0.55 \leq e/h_0 \leq 0.25$	OK
$b_2/b_0 \geq 0.1+0.01b_0/t_0$	OK	$L_1 \geq 6h_1$	Ei tarkastettu
$b_2/t_2 \leq 35$	OK	$L_2 \geq 6h_2$	Ei tarkastettu