



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JUHO VASTAPUU
TERÄSHALLIN KATTOJÄYKISTYKSEN MASSA- JA
KUSTANNUSOPTIMOINTI
Diplomityö

Tarkastaja: TkT Kristo Mela

Tarkastaja ja aihe hyväksytty Talouden ja rakentamisen tiedekunta-neuvoston kokouksessa 24. syyskuuta 2018

TIIVISTELMÄ

JUHO VASTAPUU: Teräshallin kattojäykistyksen massa- ja kustannusoptimointi
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 83 sivua, 31 liitesivua
Syyskuu 2018
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Rakennesuunnittelu
Tarkastaja: TkT Kristo Mela

Avainsanat: Grasshopper, Galapagos, algoritmiavusteinen suunnittelu, jäykistäminen, optimointi

Tässä diplomityössä selvitettiin rasiuksien jakautumista sauvarakentein jäykistetyn teräshallin kattojäykistyksessä ja suoritettiin jäykisterakenteiden massa- ja kustannusoptimointia. Optimointi suoritettiin algoritmiavusteisia työkaluja hyödyntäen käyttäen Grasshopper, Karamba3D ja Galapagos -sovelluksia. Työllä on tarkoitus tuottaa tietoa näiden komponenttien toiminnasta ja soveltuvuudesta teräsrakenteiden optimointiin. Optimoinnilla on tarkoitus selvittää erilaisten jäykistetopologioiden kustannustehokkuutta.

Työn teoriaosuudessa syvennytään optimoinnin matemaattiseen teoriaan, avataan optimoinnin yleisimpiä käsitteitä ja työssä käytettävän geneettisen optimointialgoritmin toimintaperiaatetta sekä sakkofunktiota. Lisäksi teoriaosuudessa selvitetään erilaisten jäykistysrakenteiden toimintaperiaatetta sekä Eurokoodi 3:n mukaista jäykistysjärjestelmän epätarkkuuksista aiheutuvaa rasiusta ja jäykistevoiman kertymää jäykistävälle ristikolle. Työssä esitellään myös teräsrakenteen materiaali-, valmistus- ja asennuskustannusten muodostumista kustannuspaikkaperusteisesti. Tutkimusta varten toteutetun teräshallin parametrisen rakennemallin sovelluksen toimintaperiaate ja sen käyttö optimointiin esitellään yleisellä tasolla. Lisäksi optimoinnissa käytettävän Galapagos-komponentin toiminta selostetaan yksityiskohtaisesti.

Optimoinnin lisäksi työssä suoritettiin selvitys, jossa vertailtiin kahden erilaisen jäykistystopologian rasiusten jakautumista. Selvityksessä osoitettiin, että jäykisterakenteille kohdistuu rasiuksia ulkoisesta vaakakuormasta, jäykistysjärjestelmän epätarkkuudesta ja rakenteiden muodonmuutoserosta seuraamuksena syntyvästä pakkovoimasta. Lisäksi osoitettiin, että katto-orsille pääkannatinristikon yläpaarteelta kohdistuva ekvivalentti stabiiloiva voima on verrannollinen paarteen taipuman arvoon orren kohdalla.

Tutkimuksessa suoritettiin optimointi teräshallin kattojäykistykselle. Optimoinnin suunnittelumuuttujina käytettiin kattorakenteiden poikkileikkauksia sekä jäykisterakenteiden topologia- tai geometriaparametreja. Optimoinnin tuloksissa esitellään tuloksena saatu optimirakenne, eri rakenteiden käyttöasteet, rakenteen siirtymät sekä massojen ja kustannusten jakautuminen rakenneosittain. Lisäksi optimoinneista esitetään konvergenssikäyrät, joiden perusteella optimoinnin laatua arvioidaan.

ABSTRACT

JUHO VASTAPUU: Skeletal steel hall mass and cost optimization of roof braces
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 83 pages, 31 Appendix pages
September 2018
Master's Degree Programme in Civil Engineering
Major: Structural Design
Examiner: D.Sc. Kristo Mela

Keywords: Grasshopper, Galapagos, algorithm-aided design, bracing, optimization

Roof bracing optimization and distribution of brace forces was studied in this master of science thesis. Both mass- and cost optimizations were considered. Optimization was performed by algorithm-aided tools using Grasshopper, Karamba3D and Galapagos software. Aim of the thesis is to produce knowledge about components and their suitability for steel structures optimization. By optimization the aim is to research the cost-efficiency of different bracing topologies.

The theory part of thesis focuses on mathematical theory of optimization and genetic algorithm which is used in this thesis for optimization and the operation of penalty function which is also applied in optimization. Furthermore the theory of different bracing system functionality, imperfection of bracing system in Eurocode 3 and cumulation of bracing forces in roof-purlins is clarified in theory section of the thesis. Also theory and calculation applied in optimization about steel assembly material-, manufacturing- and erection costs are presented. For the research a parametrised structural model was made and the principals of model and it's aptitude for optimization is presented. Grasshopper Galapagos is used for optimization and its detailed operating principle is presented.

In addition to optimization, the smaller explanation of bracing forces distribution is presented. Explanation was made by comparing two different bracing topologies. It was indicated that forces caused by external horizontal loads, bracing system imperfection and restraint forces caused by differential deflections have influence in brace structures. Also it was indicated that equivalent stabilizing force directed from roof-truss upper chord has relation to chord imperfection in the point where purlin is connected to chord.

Optimization of steel hall roof structures was performed in this research. Design variables in optimization were roof structures cross-sections and geometry and topology parameters of brace structures. The results of optimizations are presented as utilization of elements, structure deformations and distribution of masses and costs by structural elements. Also convergence-curves of optimization are presented and quality of optimization is evaluated.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:n Tampereen rakennetekniikan yksikölle. Kiitän työnantajaani mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta ja hyvien puitteiden järjestämisestä työn tekemiseen liittyen.

Kiitän työni ohjaajia Markku Järvenpäättä sekä Markku Raiskilaa kuin myös muita työyhteisön jäseniä, jotka ovat olleet mukana ohjaamassa ja neuvomassa työn tekemisessä. Kiitän myös työni tarkastajaa Kristo Melaa, jonka opetuksesta sain myös innostuksen kipinän teräsrakenteiden optimointiin. Kiitos myös Jukka Mäenpäälle johdatuksesta parametriseen suunnittelun maailmaan.

Kiitos opiskelutovereilleni, perheelleni sekä avopuolisolleni Hennalle tuesta ja kannustuksesta työn tekemiseen liittyen.

Tampereella, 31.10.2018

Juho Vastapuu

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Työn tavoitteet, tutkimusmenetelmät ja rajaukset.....	2
2.	OPTIMOINTI	4
2.1	Optimointitehtävän matemaattinen määrittely.....	4
2.2	Teräsrakenteen optimointi.....	7
2.3	Geneettinen optimointialgoritmi	9
2.4	Sakkofunktio	11
3.	TERÄSHALLIN JÄYKISTÄMINEN JA JÄYKISTEIDEN KUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN.....	15
3.1	Jäykistäminen yleisesti.....	15
3.2	Hallirakennuksen katon pituussuuntainen jäykistys	18
3.3	Jäykistysjärjestelmän epätarkkuus	22
3.4	Teräsrakenteen kustannusten muodostuminen.....	26
4.	KATTOJÄYKISTYKSEN OPTIMOINTISOVELLUS GRASSHOPPERILLA... 33	
4.1	Sovelluksen toimintaperiaate	33
4.2	Hallirakennuksen geometrian parametrisointi	34
4.3	Rakennemalli Karamba 3D-työkalulla ja kustannusten laskenta.....	40
4.4	Rakenneanalyysi ja mitoitus Karamba3D-työkalulla	43
4.5	Galapagos-optimointikomponentti	46
5.	KATTOJÄYKISTEIDEN MASSAN JA KUSTANNUSTEN OPTIMOINTI	51
5.1	Tutkittava rakenne.....	51
5.2	Esiselvitys: Rasiusten jakautuminen kattojäykisteissä	52
5.3	Optimointitehtävät ja suunnittelumuuttujat	59
5.4	Rajoitusehdot ja kuntoisuusfunktion muodostaminen	62
5.5	Optimointialgoritmi	64
6.	OPTIMOINNIN TULOKSET	65
6.1	Tulokset.....	65
6.1.1	OPT-1.....	65
6.1.2	OPT-2.....	68
6.1.3	OPT-3.....	71
6.2	Tulosten arviointi ja johtopäätökset	74
6.3	Jatkotutkimusaiheet.....	77
7.	YHTEENVETO	78
	LÄHDELUETTELO	81
	LIITE A: ELEMENTTIEN LOKAALIT KOORDINAATISTOT	84

LIITE B: KUSTANNUSTEN MUODOSTAMISEEN KÄYTETTÄVÄT KAAVAT JA VAKIOT.....	85
LIITE C: ESIMERKKILASKELMA: SIDEPALKIN KUSTANNUKSET	89
LIITE D: KÄYTETYT TERÄSPROFIILIT	101
LIITE E: ESISELVITYKSEN LASKENNAN TULOKSET	105
LIITE F: TULOKSET: OPT-1	106
LIITE G: TULOKSET: OPT-2	108
LIITE H: TULOKSET: OPT-3	110
LIITE I: OPTIMOINNIN KONVERGENSSIKÄYRÄT	112
LIITE J: TULOKSET: PÄÄKANNATINRISTIKON RASITUKSET	114

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Sauvarakentein jäykistetyin teräshallin katon jäykistysjärjestelmä koostuu jäykisteristi-koista sekä katto-orsista. Näiden rakenteiden tehtävä on jäykistää hallirakennuksen katto ulkoisten vaakakuormien, kuten tuulen ja rakenteiden epätarkkuuksista aiheutuvien kuormien tuomille rasituksille. Lisäksi rakenteiden tehtävä on toimia puristettuja rakenteina stabiloivina siteinä. Käytännön suunnittelutyössä käytetään usein puristettua rakennetta poikittaissuunnassa tukevan siteen mitoittamiseen ns. 2 %-sääntöä (Ziemian 2010, s. 531). Timoshenko ja Winter (Timoshenko & Gere 1963; Winter 1958) esittivät kuitenkin jo 1900-luvun puolivälissä, että toimiakseen puristetun rakenneosan nurjahdustukena, vaaditaan poikittaissuuntaiselta siteeltä myös riittävä jäykkyys. Winter osoitti lisäksi, että siteelle kohdistuu rasitusta ainoastaan puristetun rakenteen epätarkkuudesta, kuten vinoudesta ja kaarevuudesta. Teräsrakenteiden suunnittelustandardi (EN 1993-1-1 2005) esittääkin jäykistävien siteiden rasitusten laskentaan ekvivalentin stabiloivan voiman laskentakaavan, joka perustuu puristetun rakenneosan kaarevuuteen sekä jäykistysjärjestelmän taipumaan. Teräsrakenteisen hallin katon jäykistysjärjestelmä onkin yksi rakennuksen kriittisimpiä rakenneosia. Suomessa on tapahtunut runsaasti rakennusvaurioita, jotka osaltaan johtuvat jäykiste- ja orsirakenteiden puutteellisesta suunnittelusta, valmistuksesta tai toteutuksesta (Leino et al. 2017, s. 77).

Teräsrakenteinen hallirakennus on tavallisesti muodoltaan yksinkertainen, rakenneosat sisältävät toistoa sekä runko on symmetrinen. Tämänkaltaisen rungon rakenneanalyysi on yksinkertaista toteuttaa parametrisesti algoritmiavusteisen suunnittelun työkaluja hyödyntäen. Algoritmiavusteinen suunnittelu ja parametrinen mallinnus ovat tämän työn kirjoitushetkellä alan nouseva trendi. Algoritmiavusteinen suunnittelu mahdollistaa rakenneanalyysin tekemisen rakennuksen parametrisesti mallinnetulle rungolle. Parametrien muutoksien aiheuttamat seuraukset rakenneanalyysiin ja rasitusten jakautumiseen rakenneosille on nähtävissä välittömästi ja näin suunnittelija pystyy analysoimaan rungon toimintaa kattavammin ja löytämään optimaalisia ratkaisuja. Rakenteiden optimoinnista on tullut tietotekniikan kehittymisen myötä yhä kokonaisvaltaisempi tutkimuksen ala. Teräsrakenteisia runkoja suunniteltaessa rakenteiden optimointi ja hyvän käyttöasteen tavoittelu ovat yksi suunnittelun keskipiste teräsrakenteiden korkeahkon hinnan vuoksi verrattuna kilpaileviin rakennusmateriaaleihin. Optimoinnin tavoitteena on tavallisesti joko rakenteiden massan tai materiaali-, tuotanto- ja asennuskustannusten minimointi. Algoritmiavusteinen suunnittelu tarjoaa optimointia varten yksinkertaiset ja käytännön suunnittelutyön kannalta tehokkaat työkalut optimointia varten.

Tutkimuksen lähtökohtana on Ramboll Finland Oy:n asettama tavoite kehittää algorit-

miavusteista suunnittelua ja sen hyödyntämistä rakennesuunnittelussa sekä työntekijän oma motivaatio teräsrakenteiden suunnitteluun sekä rakenteiden optimointiin. Rambollille on aikaisemmin toteutettu diplomitöitä algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntämisessä betonielementtirakenteiden suunnittelussa (Erkkilä 2017), sekä teräsrungon suunnittelussa yleisesti (Mäenpää 2018). Tämä työ toimii osaltaan jatkona yritykselle toteutetavasta tutkimuksesta algoritmiavusteisessa suunnittelussa ja hyödyntää lähtöolettamuksissa aiemmin tehtyjä töitä.

1.2 Työn tavoitteet, tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Tutkimuksen tavoitteena on toteuttaa teräshallin parametriseen suunnitteluun ja rakennemallin laadintaan työkalu, tutkia sillä rasiusten jakautumista rakennuksen kattojäykisteissä ja toteuttaa optimointi katon pituussuuntaiselle jäykistykselle. Lisäksi tavoitteena on tuottaa tietoa käytettävien komponenttien soveltuvuudesta rakenteiden optimointiin ja parametriseen suunnitteluun.

Tässä työssä katon pituussuuntainen jäykistysjärjestelmä rajataan katon tason jäykisteristikoon, päätypalkkiin, pääkannatinristikkojen yläpaarteita tukeviin katto-orisiin sekä reunapalkkeihin. Myös pääkannatinristikon yläpaarteet tulkitaan työssä osaksi katon jäykistysjärjestelmäkokonaisuutta. Tarkasteltavat rakenteet ovat teräsrakenteisia putkipalkkeja. Myös katto-orrella tarkoitetaan työssä teräsputkipalkkia. Ohutlevyrakenteet ja jäykistävät kattopeltiprofiilit rajataan työn ulkopuolelle.

Työssä toteutettavan optimoinnin avulla pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Onko kannattavampaa kasvattaa pääkannatinristikon yläpaarteen kokoa vai lisätä jäykistävien orsien määrää?
2. Onko kannattavampaa pyrkiä mahdollisimman pieniin poikkileikkauksiin kokonaisuuden minimoimiseksi vai mahdollisimman pieneen sauvamäärään kokonais kustannusten minimoimiseksi?
3. Kannattaako kattorakenteiden geometriassa pyrkiä sitomaan katto-orret, jäykisteristikko ja päädyn pilarit samoihin solmupisteisiin rakenneosien kaksiaksiaalisen taipumuksen välttämiseksi?
4. Onko jäykisterakenteiden sijoittelu tasajaolla kannattavin ratkaisu vai voidaanko käyttämällä jännevälin keskellä tiheämpää orsijakoa saada aikaan edullisempi kokonaisuus?

Tutkimus toteutetaan luomalla hallirakennuksesta parametrinen rakennemalli Grasshopper-sovelluksella (versio 0.9). Grasshopper on David Ruttenin luoma visuaalinen ohjelmointiympäristö, joka toimii Rhinoceros 3D-mallinnusohjelman sisällä. Rakennemallin luontiin ja rakenneanalyysiin käytetään Clemens Preisingerin (Preisinger 2016) luomaa Karamba3D-työkalua (versio 1.3.0, myöhemmin Karamba). Karamba on parametriseen suunnitteluun tarkoitettu FEM-laskentatyökalu, joka toimii Grasshopper-ympäristön sisällä.

Mäenpää toteutti diplomityössään (2018) rakennelaskentavertailun Karamban ja RFEM-laskentasovelluksen tulosten välillä ja totesi sen luotettavuuden ja hyödyllisyyden algoritmivusteisen suunnittelun työkaluna. Optimoinnissa käytetään Grasshopper-ympäristöön sisältyvää Galapagos-optimointikomponenttia.

Rakenteiden optimointi toteutetaan sekä kokonaismassan- että kokonaiskustannusten optimointina. Kustannusten optimointia varten työssä hyödynnetään Haapion (2012) väitöskirjaa teräsrakenteiden kustannuspaikkaperusteisesta kustannusten muodostumisesta. Väitöskirjassa parametrisoitu ja formuloitu kustannusten muodostuminen tarjoaa hyvän lähtökohdan teräsrakenteiden kustannusten optimoinnille. Teräsrakenteen kustannuksen laskennassa huomioidaan materiaali-, konepajavalmistus- ja asennuskulut. Kustannukset määritellään idealisoidussa tilanteessa toteutuvien kulujen perusteella ja niissä ei huomioida esimerkiksi valmistus- tai asennustapakohtaisia yksityiskohtia sekä katetta.

Rakenteiden mitoitus toteutetaan Teräsrakenteiden suunnittelustandardin (EN 1993-1-1 2005) sekä sen kansallisen liitteen (Ympäristöministeriö 2017) mukaan. Mitoitus tehdään ainoastaan kantavien ja jäykistävien rakenneosien poikkileikkausten kestävyys- ja stabiilisuustarkasteluna. Stabiilisuustarkastelu rajataan rakenneosien paikalliseen stabiiliuteen ja optimoinnissa runkokokonaisuudelle ei tehdä lineaarista stabiilisuustarkastelua. Palotilanteen sekä onnettomuustilanteen kysymyksiin ei työssä oteta kantaa ja esimerkiksi katon jäykisteristikon sijoittelu jatkuvan sortuman kannalta rajataan työn ulkopuolelle. Rakennedetaljiikan, kuten liitosten mitoitus sekä teräsristikon solmupisteiden tarkastelu rajataan myös työn ulkopuolelle. Työssä käytettävät rakenneputket ovat neliön mallisia SHS-rakenneputkia ja käytettävä profiilikirjasto on valittu tukkutoimittajan (Oy Kontino Ab 2018) profiilikatalogin perusteella.

Työssä optimoitavia rakenteita ovat pääkannatinristikko, katto-orret, päätypalkki sekä jäykisteristikko. Optimoinnin suunnittelumuuttujia ovat näiden rakenteiden poikkileikkausparametrit sekä rakenteiden topologia- ja solmupisteiden geometriaparametrit. Optimointi tehdään ennalta määritellylle hallirakennukselle, jonka ulkodimensiot sekä kehäjako on vakio. Pääkannatinristikkorakenteeksi työssä on valittu isostaattinen K-ristikko. Jäykisteristikon geometrioista optimointi suoritetaan K- ja N-ristikkogeometrioille. Ennen optimointia työssä on suoritettu esiselvitys, jossa on vertailtu kattorakenteiden rasiuksia kahdessa eri jäykistetopologiassa. Näiden perusteella on myös määritelty jäykisteristikolle kohdistuva todellinen ekvivalentti stabiloiva voima ja tätä on vertailtu Eurokoodi 3:n määrittämään arvoon.

2. OPTIMOINTI

2.1 Optimointitehtävän matemaattinen määrittely

Matemaattisella optimoinnilla tarkoitetaan prosessia, jossa systemaattisesti etsitään asetetulle funktiolle paras mahdollinen arvo siten, että sille asetetut rajoitusehdot toteutuvat. Asettamalla optimoitava kohde sekä halutut rajoitusehdot matemaattiseen muotoon, voidaan optimoimalla löytää matemaattisin keinoin paras käypä ratkaisu. Käyvällä ratkaisulla tarkoitetaan ratkaisua, joka kuuluu annettujen rajoitusehtojen joukkoon. (Rao 1999, s. 1)

Matemaattisesti optimoinnissa on tavoitteena etsiä funktiolle käyvästä joukosta minimi- tai maksimi-arvo. Optimointitekniikoita ja algoritmeja on kehitetty lukuisia ja kukin niistä soveltuu käytettäväksi eri tavalla eri optimointitehtäviin. Optimointi ja erilaisten optimointimenetelmien tutkiminen on yksi matemaattisen operaatiotutkimuksen osa-alueista. Optimoinnista voidaan joissain yhteyksissä käyttää myös nimitystä matemaattinen ohjelmointi (*mathematical programming*), jolla viitataan matemaattisten algoritmien kehittämistä ja ohjelmoimista optimointitarkoituksiin. (Rao 1999, s. 1)

Optimointitehtävä kirjoitetaan matemaattisesti seuraavanlaisessa muodossa.

$$\text{Etsi } \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \text{ joka } \min_{x \in S} f(\mathbf{x}), \text{ siten että} \quad (2.1)$$

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

$$S = \{\mathbf{x} | g_i(\mathbf{x}) \leq 0; h_j(\mathbf{x}) = 0; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p\} \quad (2.2)$$

missä \mathbf{x} on vektori, joka sisältää n kappaletta suunnittelumuuttujia, f on kohdefunktio, g_i ja h_j ovat rajoitusfunktioita ja S on tehtävän rajoitusehdot toteuttavien suunnittelumuuttujien arvojen joukko. Rajoitusehto muodostuu rajoitusfunktioista ja epäyhtälö- tai yhtälömuotoisesta rajoitteesta kuten kaava (2.1) esittää. Suunnittelumuuttujien lukumäärä (n) sekä rajoitusehtojen lukumäärä (m ja/tai p) eivät ole riippuvaisia toisistaan. Tällaista optimointitehtävää kutsutaan rajoitetuksi optimointiongelmaksi. Optimointiongelman ei kuitenkaan tarvitse olla rajoitettu, vaan se voidaan ilmoittaa myös rajoittamattomana. Kaavassa (2.1) on esitetty optimointitehtävän standardimuotoinen asettelu (*standard design optimization model*). (Rao 1999, s. 6)

Vektori \mathbf{x} sisältää optimointitehtävän kaikki suunnittelumuuttujat (*design variables*). Muuttamalla jonkin suunnittelumuuttujan x_i arvoa, muuttuu myös kohdefunktion arvo $f(\mathbf{x})$. Suunnittelumuuttujista voidaan käyttää myös nimitystä optimointimuuttujat tai vapaat muuttujat, eli niiden arvoja voidaan muuttella vapaasti kun haetaan kohdefunktiolle arvoa. Jokaiselle suunnittelumuuttujalle täytyy pystyä asettamaan jokin numeerinen arvo optimointia varten. (Arora 2004, s. 42–43)

Optimointitehtävän tavoitteena on joko minimoida tai maksimoida kohdefunktion arvo. Mikäli optimointitehtävässä on useampi kuin yksi kohdefunktio, käytetään tehtävästä nimitystä monitavoiteoptimointi (*multiobjective design optimization*). Tällöin kohdefunktio ilmaistaan matemaattisesti kohdefunktioiden joukkona

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \left[f_1(\mathbf{x}) \quad f_2(\mathbf{x}) \quad \cdots \quad f_p(\mathbf{x}) \right], \quad (2.3)$$

jossa jokainen kohdefunktio koostuu kuitenkin samasta suunnittelumuuttujavektorista \mathbf{x} .

Optimoitavalle kohteelle asetettavat rajoitusehdot esitetään rajoitefunktioina $g_i(\mathbf{x})$ ja $h_j(\mathbf{x})$. Optimointialgoritmi ratkaisee optimointitehtävän siten, että suunnittelumuuttujat toteuttavat optimointitehtävän rajoitusehdot. Rajoitusehdot toteuttavien suunnittelumuuttujien arvojen joukkoa kutsutaan käyväksi joukoksi (*feasible region*). Käypä joukko S määritellään täten rajoitusehtojen rajoittamaksi joukoksi (kaava 2.2). (Arora 2004, s. 45)

Mitä tahansa käyvässä joukossa S olevaa kohdefunktion arvoa kutsutaan käyväksi ratkaisuksi (*feasible design*) huolimatta siitä onko kyseessä optimiratkaisu. Kahden suunnittelumuuttujan optimointitehtävän tapauksessa käypää joukkoa voidaan havainnollistaa piirtämällä rajoitefunktioiden tasa-arvokäyrät ($g_i(\mathbf{x}) = 0$ ja $h_j(\mathbf{x}) = 0$) suunnitteluavaruuteen. Käypä joukko S muodostuu näiden käyrien rajoittamana alueena. Käyvän joukon negaatiota kutsutaan epäkäyväksi alueeksi (*infeasible region*). Sekä kohdefunktion $f(\mathbf{x})$, että rajoitusehtojen $g_i(\mathbf{x})$ ja $h_j(\mathbf{x})$ on oltava joko implisiittisesti tai eksplisiittisesti johonkin tehtävän suunnittelumuuttujaan riippuvia. Mikäli riippuvuutta ei ole, ei optimointitehtävää voi muodostaa eikä varsinaista optimointiongelmää voi edes osoittaa. (Arora 2004, s. 43)

Kuten optimointitehtävän määrittelevä kaava (2.1) osoittaa, optimointiongelmalle voidaan asettaa rajoitusehtoja sekä yhtälö- että epäyhtälömuodossa. Epäyhtälörajoitteita kutsutaan käypään joukkoon nähden toispuoleisiksi rajoitusehdoiksi (*unilateral constraints* tai *one-sided constraints*). Epäyhtälörajoitteiden rajoittama käypä joukko on täten paljon laajempi kun verrataan yhtälörajoitteista käypää joukkoa. Esimerkiksi kahden suunnittelumuuttujan tapauksessa yhtälörajoite tarkoittaisi, että käypä ratkaisu löytyisi rajoitefunktion käyrältä. (Arora 2004, s. 16–18)

Yhtälömuotoisten rajoitusehtojen määrän tulee olla maksimissaan suunnittelumuuttujien määrä, toisin sanottuna optimointitehtävän kaavan (2.1) tulee toteuttaa ehto

$$p \leq n. \quad (2.4)$$

Tapaus, jossa yhtälömuotoisia rajoitusehtoja on annettuja suunnittelumuuttujia enemmän, on kyseessä ylimäärätty yhtälöryhmä (*overdetermined system*). Tällaisessa tapauksessa rajoitusehtojen joukossa on ylimääräisiä eli redundanteja ehtoja, jotka toteuttavat suoraan jonkun muun rajoitusehdon, eikä niiden ilmoittaminen täten ole tarpeellista. Triviaalita-pauksessa jossa suunnittelumuuttujien määrä ja yhtälömuotoisten rajoitusehtojen määrä on yhtäsuuri, löytyy tehtävälle ratkaisu analyttisin keinoin eikä optimointi ole tarpeellista. Kaksiulotteisessa tapauksessa tämä tarkoittaisi kahden käyrän leikkauspistettä. (Arora 2004, s. 43)

Standardimuotoisessa optimointitehtävässä epäyhtälörajoitteet ilmoitetaan aina kaavan (2.1) osoittamassa muodossa, eli siten että rajoitusehto on pienempi tai yhtäsuuri kuin nol-la (≤ 0). Tästä huolimatta voidaan optimointitehtävässä käsitellä myös \geq -tyyppisiä rajoitusehtoja. Standardimuotoista tehtävää aseteltaessa nämä voidaan muuttaa \leq -muotoon yksinkertaisesti kertomalla ehto luvulla -1. Epäyhtälömuotoisten rajoitusehtojen määrää ei ole rajoitettu, toisin kuin yhtälömuotoiset rajoitteet kaavassa (2.4). (Arora 2004, s. 43)

Optimointitehtävällä voi olla kohdefunktiosta sekä rajoitusehdoista riippuen yksi tai useampi optimiratkaisu. Kaikista tehtävän optimiratkaisusta käytetään nimitystä lokaali optimi, joka tarkoittaa että ratkaisu antaa kohdefunktion minimi- tai maksimiarvon ympäristös-sään. Kaikista lokaaleista optimeista arvoltaan pienintä (tai suurinta) kutsutaan globaaliksi optimiksi ja se on siis kohdefunktion minimiarvo (tai maksimiarvo) tehtävän käyvässä joukossa. Globaali optimiratkaisu on siis aina myös lokaali optimi, mutta lokaali optimi-ratkaisu ei välttämättä ole globaali. (Arora 2004, s. 84–85) Lokaalien optimien olemassa olon ja määrän määrittää kohdefunktion konveksisuus. Kohdefunktion ollessa konvek-si on tehtävällä ainoastaan yksi optimiratkaisu, joka on samalla globaali ja lokaali optimi. Epäkonveksilla funktiolla voi puolestaan olla useita lokaaleita optimeita, joista yksi on tehtävän globaali optimi. (Arora 2004, s. 149–150)

Suunnittelumuuttujien saadessa vain diskreettejä arvoja, käytetään optimointitehtävästä nimitystä diskreetti tehtävä. Optimointitehtävän suunnittelumuuttuja-avaruuden ollessa diskreetti, on myös optimointitehtävän ratkaisuavaruus diskreetti. Tällaisista optimoin-titehtävistä käytetään myös nimitystä kombinatorinen optimointitehtävä (Haataja 2004, s. 35). Tehtävän vastakohta on jatkuva tehtävä, jossa siis sallitaan kaikille suunnittelu-muuttujille reaalityöarvo (*real-valued programming problem*). (Rao 1999, s. 28) Insi-nöritieteissä suunnittelumuuttujat valitaan yleensä ennalta määritellystä joukosta käytös-sä olevien resurssien mukaan, eli käsiteltävät optimointitehtävät ovat usein diskreettejä.

Optimointitehtävä ratkaistaan käyttämällä tehtävään sopivaa ratkaisualgoritmia. Optimoin-nin ratkaisualgoritmeja on kehitetty lukuisia eikä ole olemassa yhtä algoritmia, joka so-veltuu yleisesti kaikkien optimointitehtävien ratkaisuun. Käytettävän optimointialgorit-min valinta tehdään määritellyn optimointitehtävän perusteella. Optimointitehtävän rat-kaisumenetelmät voidaan jaotella matemaattisiin, stokastisiin, statistisiin sekä moderneihin optimointitekniikoihin (Rao 1999, s. 3). Matemaattisilla optimointimenetelmillä teh-tävän ratkaisu pyritään löytämään analyttisesti esimerkiksi differentiaalilaskennan avulla

tai numeerisesti esimerkiksi iteraatiolla. Matemaattiset menetelmät ovat tehokkaita pienten ja tarkasti määriteltyjen ja rajattujen optimointitehtävien ratkaisuun ja niillä saatu ratkaisu on usein tarkka. Stokastisilla optimointimenetelmillä ratkaistaan satunnaislukutehtäviä sekä keskitytään ratkaisuihin todennäköisyysjakaumiin analyytisyyden sijasta. Esimerkiksi Markov-prosessi on yksi tunettu stokastinen menetelmä. Statistinen tai tilastollinen optimointi tarkoittaa tehtävää, jossa tietyn mallin käyttäytymistä pyritään ennustamaan ja optimoimaan käyttäen tilastomatemattisia keinoja. Yksi statistinen malli on regressioanalyysi. (Rao 1999, s. 3–4)

Optimointitehtävälle ei kuitenkaan aina ole mahdollista eikä mielekästäkään löytää tarkkaa ratkaisua asetetun tehtävän monimuotoisuudesta ja käytettävissä olevista ratkaisuresursseista johtuen. Esimerkiksi diskreetteja ja jatkuvia muuttujia sisältävän ei-konveksin epälineaarisen ja epäjatkuvan tehtävän ratkaisu edellä esitetyillä optimointimenetelmillä vaikeaa tai jopa mahdotonta. Tämän vuoksi on kehitetty optimointitekniikoita, joissa ratkaisumenetelmä perustuu matemaattisen analytiikan sijasta iteraatiiviseen algoritmiin ja ratkaisun heuristiseen etsimiseen. Näistä optimointimenetelmistä käytetään nimitystä modernit optimointitekniikat (Rao 1999, s. 3) tai metaheuristiset menetelmät (Blum & Roli 2003). Toisin kuin matemaattiset optimointimenetelmät, jotka tarvitsevat usein kohde- ja rajoitefunktion lisäksi myös näiden derivaatat, moderneille optimointialgoritmeille riittää ainoastaan, että kohdefunktio voidaan laskea numeerisesti eli evaluoida. Varsinaista kohdefunktion lauseketta ei tarvitse välttämättä edes tuntea. (Blum & Roli 2003) Useat modernit optimointitekniikat perustuvat luonnosta tuttuihin ilmiöihin ja jäljentävät esimerkiksi evoluution, molekyylien, eliöiden parvikäyttäytymisen tai neurobiologian prosesseja. Yleisimpiä moderneja optimointitekniikoita ovat esimerkiksi tässä diplomityössä käytettävät geneettinen algoritmi (*genetic algorithm*, GA). Muita keinoja ovat esimerkiksi jäähdytysmenetelmä (*simulated annealing*, SA), parveilualgoritmi (*particle swarm*), muurahaisyhdyskuntaoptimointi (*ant colony*) tai neuroverkot. (Rao 1999, s. 693)

2.2 Teräsrakenteen optimointi

Teräsrakenteiden optimoinnissa on tavoitteena löytää mahdollisimman taloudellinen, mutta vaatimukset täyttävä rakenne. Tavallisimpia teräsrakenteiden optimointitehtäviä ovat esimerkiksi rakenteiden massan tai tuotantokustannusten optimointi. Mela on tutkinut väitöskirjassaan (2013) teräsrakenteisen putkiristikon optimointia ja määrittänyt käsitteet topologian, geometrian ja rakenteiden poikkileikkausten optimoinnille. Rakenteen topologialla tarkoitetaan rakenteessa olevien sauvojen ja solmupisteiden lukumäärää ja sitä, miten sauvat kytkeytyvät toisiinsa. Ristikkorakenteen tapauksessa erilaisia ristikkotopologioita ovat esimerkiksi N-, K- ja KT-ristikot. Jokaista topologiaa vastaa joukko geometrioita, jotka määrittävät sauvojen ja solmupisteiden sijainnin. Rakenteen mitoitusoptimoinnilla tarkoitetaan ainoastaan tietyssä sauvageometriassa olevien sauvojen poikkileikkausten optimointia muuttamatta rakenteen topologiaa tai geometriaa.

Teräsrakenteiden optimointia varten rakenteen geometria ja rakennelaskenta on asetetta-

va matemaattiseksi malliksi ja parametrisoitava. Matemaattinen formulointi mahdollistaa rakenteen optimoinnin. Optimoinnissa suunnittelumuuttujia ovat parametrit, jotka määrittävät rakenteen topologian, geometrian sekä yksittäisten rakenneosien poikkileikkaukset. Optimoinnin kohdefunktio muodostuu rakenteen massan optimoinnissa rakenteen kokonaismassasta (2.5) sekä kustannusten optimoinnissa rakenteen kokonaiskustannuksista (2.6).

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n L_i A_i \rho \quad (2.5)$$

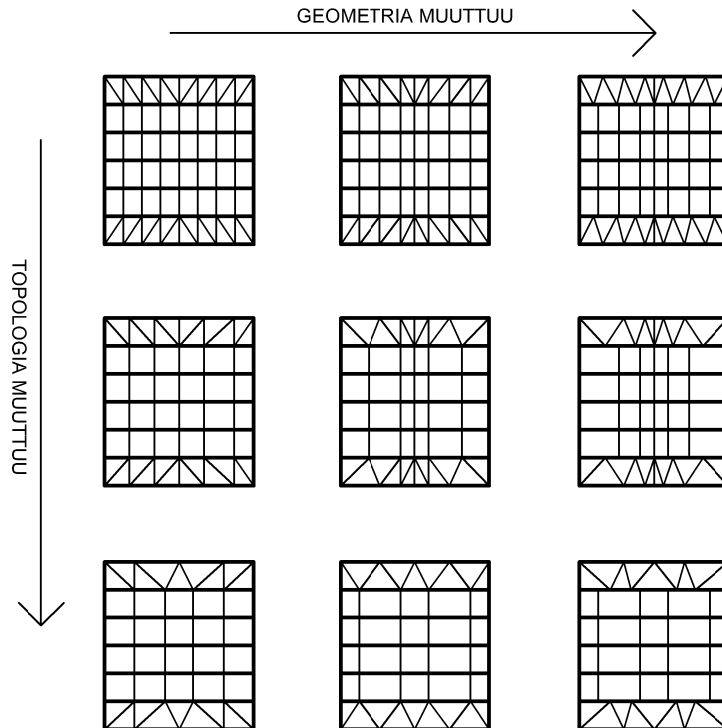
$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2.6)$$

Massan lauseke (2.5) voidaan sauvarakenteilla yleensä yksikäsitteisesti ilmoittaa sauvojen pituuksien L_i , poikkipinta-alojen A_i ja tiheyksien ρ tulojen summana. Yksittäisen teräskokoonpanon kustannus C_i puolestaan muodostuu materiaalikustannuksia aiheuttavan rakenteen massan lisäksi myös valmistus- ja asennuskustannuksista sekä liittimien kustannuksista. Haapio on tutkinut väitöskirjassaan (2012) teräsrakenteiden kustannuksia ja formuloinut kaavat kustannusten muodostumiselle kustannuspaikkaperusteisesti. Kustannusten parametrisointi mahdollistaa kustannusten optimoinnin.

Asettamalla optimoinnille rajoitusehdot varmistetaan rakenteelle asetettujen vaatimusten täytyminen. Vaatimuksia asettavat tavanomaisesti rakenteen lujuus, stabiilisuus, siirtymä- ja taipumarajat sekä rakennettavuus. Vaatimukset esitetään teräsrakenteiden osalta Teräsrakenteiden suunnittelustandardissa (EN 1993-1-1 2005), johon myös tämän diplomityön laskenta perustuu. Standardiin viittaamisessa käytetään työssä jatkossa merkintää Eurokoodi 3. Optimointia varten parametrisoidulle rakenteelle suoritetaan algoritmiaivusteisesti rakennelaskenta, jonka perusteella määritetään rakenteille käyttöaste sekä muodonmuutokset. Asettamalla näille rakennemallista saataville tiedoille rajoitusehdot ja asettamalla optimoinnin suunnittelumuuttujiksi rakenteen parametrit, voidaan rakenne optimoida.

Tässä diplomityössä optimoidaan teräsrakenteisen hallin katon jäykistysjärjestelmää. Suoritettava optimointi on yhtäaikaaisesti topologia-, geometria ja mitoitusoptimointia. Näin ollen optimoinnin suunnittelumuuttujia ovat rakenteiden määrän osoittavat parametrit (topologia), rakenteiden ja solmupisteiden sijaintia osoittavat parametrit (geometria) ja poikkileikkausta osoittavat parametrit (mitoitus). Kuvassa (2.1) on havainnollistettu topologian ja geometrian käsite hallin katon jäykistykseen tapauksessa.

Kuvassa vasemmanpuoleisimmassa sarakkeessa olevat jäykistegeometriat on toteutettu niin, että jäykisteet on sijoitettu tasajaolla ja että jäykisteristikon ja orsien solmupisteet ovat samat. Keskimmaisessä sarakkeessa solmupisteet pysyvät edelleen yhdessä, mutta jäykisteiden jako ei ole enää tasainen. Viimeisessä sarakkeessa sijoittelu solmupisteiden ja jaon osalta on vapaa.



Kuva 2.1. Havainne-esimerkki topologian ja geometrian käsitteistä. Ylimmällä rivillä olevissa jäykistegeometrioissa on yhteensä 58, keskimmaisellä rivillä 42 ja alimmalla rivillä 32 jäykistävää sauva.

2.3 Geneettinen optimointialgoritmi

Tässä diplomityössä optimoidaan teräsrakenteisen hallin kattojäykistysrakenteita käyttämällä kappaleessa 2.1 esitetyistä metaheuristisista optimointimenetelmistä geneettistä algoritmia. Yhteistä metaheuristisille menetelmille on, että niillä ei etsitä analyttisesti tarkkaa globaalia optimiratkaisua vaan pyritään käytettävissä olevien resurssien, kuten esimerkiksi laskentatehon puitteissa löytämään riittävän lähellä optimia oleva ratkaisu. Metaheuristinen optimointialgoritmi pyrkii löytämään ratkaisun käyttämällä tiettyä heuristiikkaa, kuten esimerkiksi jäljentämällä luonnon ilmiöitä. Koska menetelmät ovat approksimaalisia, riittää niille, että asetettu optimoitava funktio on ainoastaan evaluoitavissa. Tällöin välttämättä edes optimoitavan funktion lauseketta ei tarvitse tuntea. Näin ollen metaheuristiset optimointialgoritmit pystyvät ratkaisemaan likiarvoisesti hyvinkin monimuotoisia, epäjatkuvia ja diskreettejä optimointitehtäviä, joihin tavallisilla analyttisillä menetelmillä ei pysty. (Blum & Roli 2003)

Yksi tunnetuimmista luonnon heuristiikkaa jäljentelevistä optimointialgoritmeista on John Hollandin 1960-luvulla kehittämä geneettinen algoritmi. Geneettinen algoritmi on yksi evoluutioalgoritmeista ja se on nimenomaan optimointitehtävien ratkaisuun kehitetty menetelmä. Evoluutioalgoritmeilla tarkoitetaan luonnon evoluutioteoriaa jäljittelevää menetelmää. Niissä asetetulle ongelmalle pyritään löytämään paras ratkaisu määrittämällä ensin ongelman suunnittelumuuttujista alkupopulaatio, laskemalla jokaisen muuttujan kun-

toisuus, valitsemalla tämän jälkeen populaation parhaat yksilöt ja luoda niistä jälkeläisiä tiettyjä säännönmukaisuuksia noudattaen. Tätä prosessia jatketaan kunnes voidaan todeta, että asetetulle ongelmalle on löydetty riittävän hyvä ratkaisu. (Blum & Roli 2003) Geneettisen algoritmin periaate on esitetty algoritmissa 1.

```

luo alkupopulaatio  $P_0$ 
for  $k = 0, 1, 2, \dots, m$ 
    risteytä populaation  $P_k$  yksiloita keskenään
    generoi mutaatioita populaatiossa  $P_k$ 
    if lopetusehto
        aseta  $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}$  ja lopeta iterointi
    else
        valitse populaation  $P_k$  parhaat yksilot populaatioksi  $P_{k+1}$ 
    end
end

```

Algoritmi 1. Geneettinen algoritmi. (Haataja 2004, s. 164)

Geneettinen algoritmi alkaa alkupopulaation luomisella. Populaatiolla tarkoitetaan suunnittelumuuttujavektoreiden \mathbf{x} muodostamaa joukkoa. Geneettisessä algoritmissa yksittäisestä suunnittelumuuttujasta käytetään myös termiä geeni (*gene*) ja yhdestä suunnittelumuuttujavektorista termiä kromosomi (*chromosome*). Tavallisesti alkupopulaatio käsittää $2n..4n$ suuruisen määrän suunnittelumuuttujavektoreita, missä n on suunnittelumuuttujien määrä. Riittävän suurella alkupopulaatiolla pyritään siihen, että algoritmi ei myöhemmin päädy tarkastelemaan vain yhtä lokaalia optimipistettä vaan että suunnitteluavaruus tulisi tutkittua kattavasti. (Rao 1999, s. 694–702)

Algoritmi pyrkii minimoimaan (maksimoimaan) sille asetetun kohdefunktion jota kutsutaan kuntoisuusfunktioiksi tai hyvyysfunktioiksi (*fitness function*). Koska geneettinen algoritmi on tarkoitettu rajoittamattoman optimointitehtävän ratkaisuun, on kuntoisuusfunktion sisällytettävä kohdefunktion lisäksi myös tehtävän rajoitusehdot. Rajoitusehtojen sisällyttämiseksi kuntoisuusfunktion on kehitetty useita menetelmiä. Tässä diplomityössä käytetään sakkomenetelmää, jonka teoria esitetään kappaleessa 2.4.

Alkupopulaation luomisen jälkeen kuntoisuusfunktion arvo evaluoidaan kullakin alkupopulaation suunnittelumuuttujavektorilla. Tämän jälkeen alkaa algoritmin varsinainen toiminta eli jälkeläisten luominen. Jälkeläisillä tarkoitetaan tietyin ehdoin edellisen iteraation geeneistä luotavia uusia geenejä, joista muodostetaan kromosomeja. Geneettisessä algoritmissa jälkeläisten luonti tapahtuu kolmessa vaiheessa:

1. Parinvalinta (*reproduction*)
2. Risteytys (*crossover*)
3. Mutaatio (*mutation*)

Parinvalintaoperaatiossa algoritmi valitsee tiettyä säännönmukaisuutta noudattaen ne kromosomit, joilla on korkea kuntoisuus. Operaatiossa valitut kromosomit jatkavat algoritmin risteytys- ja mutaatiokierroksille. Muut kromosomit hylätään. Valinta voi perustua esimerkiksi todennäköisyysvalintaan kuntoisuuden perusteella, jossa kromosomia vastaava kuntoisuus määrittää todennäköisyyden sille, että kromosomi tulee valituksi. Tällöin korkeamman kuntoisuuden omaavat suunnittelumuuttujat tulevat todennäköisemmin säilymään pidempään algoritmin edetessä. Näin systeemin kuntoisuus iterointikierrosten edetessä paranee. Muita vaihtoehtoja valita kromosomit parinvalintaoperaatiossa ovat esimerkiksi asettamalla valittaville kromosomien kuntoisuuden alaraja-arvo suhteellisesti tai yksinkertaisesti asettamalla kaikki kromosomit tasa-arvoisiksi. (Rao 1999, s. 694–702)

Risteytysoperaatio tapahtuu parinvalinnan jälkeen. Risteytyksessä seuraavalle iterointikierrokselle valituista kromosomeista luodaan uusia kromosomeja vaihtamalla kromosomien sisältämiä geenejä keskenään. Risteytys voi perustua esimerkiksi satunnaiseen valintaan, jossa satunnaisesti valitusta kahdesta kromosomista risteytetään satunnainen määrä geenejä. Risteytyksellä aikaansaadut kromosomit voivat olla kuntoisuudeltaan edeltäviä kromosomeja parempia tai huonompia. Lisäksi parinvalintaprosessi varmistaa sen, että kuntoisuudeltaan huonommat kromosomit eivät pääse mukaan seuraaville iterointikierroksille. (Rao 1999, s. 694–702)

Ennen iteraatiokierroksen loppua suorittaa algoritmi vielä kromosomien mutaatio-operaation. Operaatioissa mutatoitavan geenin arvoa manipuloidaan tiettyä säännönmukaisuutta noudattaen. Yksi tapa on manipuloida geenin numeerisen arvon muodostamaa binäärijonoa suorittamalla bittien välillä esimerkiksi pistemäisesti poistoja, kahdennuksia tai kääntöjä. Mutaatiotapa riippuu optimointialgoritmistä ja algoritmilta ennalta valitun mutaatiotodennäköisyyden mukaan. Mitä suurempi mutaatiotodennäköisyys on, sitä useampi kromosomin bitti mutatoidaan. Esimerkiksi pistemäisessä kääntömutaatioissa vaihdetaan valitulla todennäköisyydellä geenin binäärijonossa 1-bitin arvot 0-biteiksi ja päinvastoin. Mutaatioprosessin tarkoitus on kasvattaa luotavien populaatioiden diversiteettiä ja mahdollistaa näin sellaisten kromosomien syntymisen, joita kaksi edellistä operaatiota eivät pystyisi synnyttämään. (Rao 1999, s. 694–702) Optimoinnin kannalta tämä tarkoittaa sitä, että tulos ei jää lokaaliin optimiin, sillä luotavaan populaatioon syntyy yksilöitä, jotka eivät ole suoraan johdettu edellisen iteraatiokierroksen yksilöistä.

Algoritmin suorittaminen lopetetaan lopetusehdon täytyessä. Lopetusehdoiksi voidaan asettaa esimerkiksi suppenemisraja, jolloin algoritmin suoritus päättyy kun iteraation jokaista kromosomia vastaavat kuntoisuusfunktion arvot ovat riittävän lähellä toisiaan. Muita lopetusehtoja voivat olla esimerkiksi suoritettavien iterointikertojen tai optimointialgoritmin suoritusajan yläraja-arvo. (Rao 1999, s. 694–702)

2.4 Sakkofunktio

Optimoitavan tehtävän tilaa kuvataan kuntoisuusfunktioilla. Koska metaheuristiset optimointialgoritmit on tarkoitettu pääsääntöisesti rajoittamattomien tehtävien optimointiin,

on rajoitusehtoja sisältävän optimointitehtävän tapauksessa rajoitusehdot sisällytettävä kuntoisuusfunktioon. Optimoinnin tutkimuksessa tästä käytetään nimitystä rajoitusehtojen hallinta (*constraint handling*).

Yksi tavallisimpia ja yksinkertaisimpia tapoja sisällyttää rajoitusehdot kuntoisuusfunktioon on sakkomenetelmä (*penalty method*). Sakkomenetelmässä optimoinnin kohdefunktion arvoon lisätään sakkofunktiolla määritettävä sakkotermi tilanteessa, jossa tehtävän suunnittelumuuttujat eivät ole optimoinnin rajoitusehtojen määrittämällä käyväällä alueella. Sakkotermin arvon on oltava riittävän suuri, jotta välttyään tilanteelta, jossa optimointialgoritmi päättyy ratkaisuun jossa on mukana sakkotermi. Näin voi käydä esimerkiksi minimointitehtävän tilanteessa, jossa suunnittelumuuttujien määrittämä epäkävällä alueella oleva kohdefunktion arvo on pieni ja tähän lisättävän sakkotermin arvona käytetään liian pientä arvoa.

Jotta sakkomenetelmiä voitaisiin käyttää tehokkaasti, on suositeltavaa, että rajoitusehdot ovat suhteellisesti samaa suuruusluokkaa jolloin jokaisen rajoitusehtojen rikkominen aiheuttaa samansuuruisen sakon. Tämän vuoksi rajoitusehtoa muokataan kaavan (2.7) mukaisesti.

$$g = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_a} \geq 0 \quad (2.7)$$

missä σ tarkoittaa tekijää, jolle on asetettu rajoitusehtona yläraja-arvo σ_a . (Haftka & Zafer 1992, s. 160)

Sakkomenetelmistä esitetään tässä sisäisen (*interior penalty*) ja ulkoisen sakon menetelmät (*exterior penalty*). Ulkoisen sakon menetelmässä kohdefunktioon lisätään sakkotermi tilanteessa, jossa rajoitusehto (kaava 2.7) ei täyty. Näin ollen kuntoisuusfunktion arvo saa kaavan (2.8) muodon.

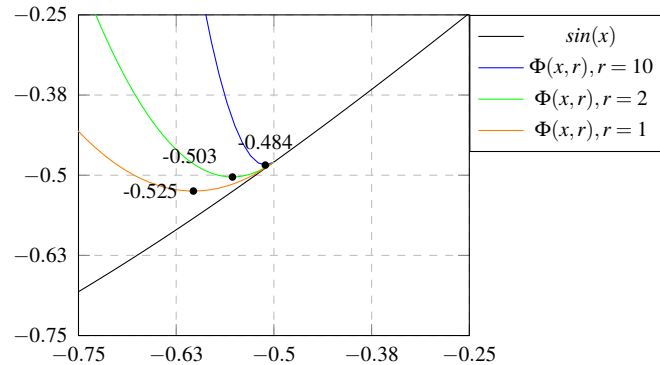
$$\Phi(\mathbf{x}, r) = f(\mathbf{x}) + r \sum_{j=1}^p [h_j(\mathbf{x})]^2 + r \sum_{i=1}^m \langle -g_i(\mathbf{x}) \rangle^2, \quad (2.8)$$

missä $f(\mathbf{x})$ on kohdefunktio, $h_j(\mathbf{x})$ on yhtälörajoitusehto ja $g_i(\mathbf{x})$ epäyhtälörajoitusehto. Kärkisulkeismerkinä määritellään kaavan (2.9) mukaan. Määritelmän perusteella epäyhtälörajoitusehto saa aikaan sakkotermin ainoastaan tapauksessa, jossa se ei täyty.

$$\langle a \rangle = \max(0, a) \quad (2.9)$$

Termi r on epänegatiivinen sakkokerroin, joka määrittää sakon suuruusluokan. Mitä suurempi sen arvo on, sitä jyrkemmin kuntoisuusfunktio Φ saa sakkotermin rajoitusehdon

ylittyessä. Tämän vuoksi sakkotermin r kasvatetaan optimointialgoritmin laskennan edessä. Aloittamalla laskenta pienellä sakkotermin arvolla, löytää optimointialgoritmi helpommin sellaisetkin optimiratkaisut, jotka ovat lähellä käyvän joukon reunaa. (Haftka & Zafer 1992, s. 187–188)



Kuva 2.2. Esimerkki ulkoisen sakkofunktion vaikutuksesta kuntoisuusfunktioon kohdefunktiolla $f(x) = \sin(x)$ ja rajoitusehdolla $x \geq -0,5$ eri sakkokertoimen r arvoilla. Tehtävän käypä ratkaisu on -0.479 .

Ulkoisen sakan käyttö saattaa kuitenkin johtaa tilanteeseen, jossa optimitulos on epäkäyvällä alueella kuten kuva 2.2 havainnollistaa. Kuvaajassa esitetään jokaisen kuntoisuusfunktion optimiratkaisut ja nämä kaikki ovat epäkäyvällä alueella. Kuvaaja havainnollistaa, että kuitenkin kasvattamalla sakkotermin r arvoa lähestyy epäkäypä optimi tehtävän käypää optimiratkaisua.

Mikäli optimointitehtävä sisältää ainoastaan epäyhtälörajoitteita, voidaan vaihtoehtoisesti määrittää sisäinen sakkofunktio, jossa sakkotermin suuruus kasvaa kun rajoitusehdon reunaa lähestytään.

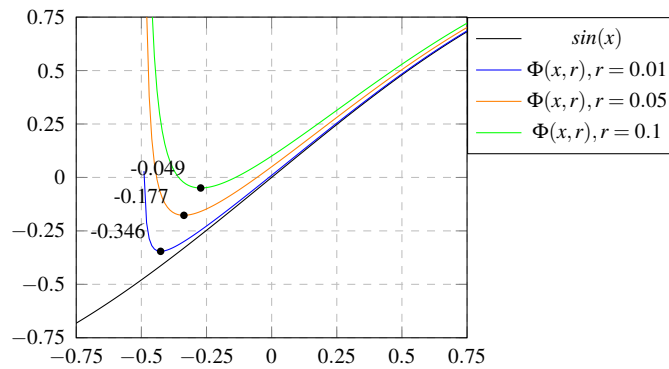
Sisäinen sakko määritellään esimerkiksi kaavalla (2.10).

$$\Phi(\mathbf{x}, r) = f(\mathbf{x}) + r \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(\mathbf{x})} \quad (2.10)$$

Toinen tapa on käyttää käänteisfunktion sijasta logaritmista funktiota sakkotermin lisäämiseksi (kaava 2.11).

$$\Phi(\mathbf{x}, r) = f(\mathbf{x}) - r \sum_{i=1}^m \log[g_i(\mathbf{x})] \quad (2.11)$$

Sisäisen sakan käyttäytymistä kohdefunktion arvon lähestyessä rajoitusehtoa on havainnollistettu kuvassa 2.3. Toisin kuin ulkoisen sakan menetelmä, sisäinen sakko tuottaa ratkaisun joka on aina käyvässä joukossa. Tämä havainnollistuu kuvassa 2.3, jossa kuntoisuusfunktion käyrä on kaikissa kohdissa käyvällä alueella.



Kuva 2.3. Esimerkki sisäisen sakkofunktion vaikutuksesta kuntoisuusfunktion kohdefunktiolla $f(x) = \sin(x)$ ja rajoitusehdolla $x \geq -0,5$ eri sakkokertoimen r arvoilla. Sisäisen sakan funktiona on tässä käytetty kaavan (2.10) määritelmää.

Sakkotermin r käyttö on päinvastaista ulkoisen sakan menetelmään verrattuna, eli optimointi aloitetaan suurella sakkotermillä ja sen arvoa pienennetään laskennan edetessä. Sisäistä sakkoa käytettäessä tehtävän tarkastelu on kuitenkin rajattava käyvälle alueelle, sillä epäkäyvällä alueella edellä esitetyt sakkofunktiot saavat negatiivisia (2.10) tai kompleksisia (2.11) arvoja. (Haftka & Zafer 1992, s. 190–191) Tämän vuoksi tässä diplomityössä toteutettavassa optimoinnissa on päädytty käyttämään ulkoisen sakan menetelmää.

3. TERÄSHALLIN JÄYKISTÄMINEN JA JÄYKISTEIDEN KUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN

3.1 Jäykistäminen yleisesti

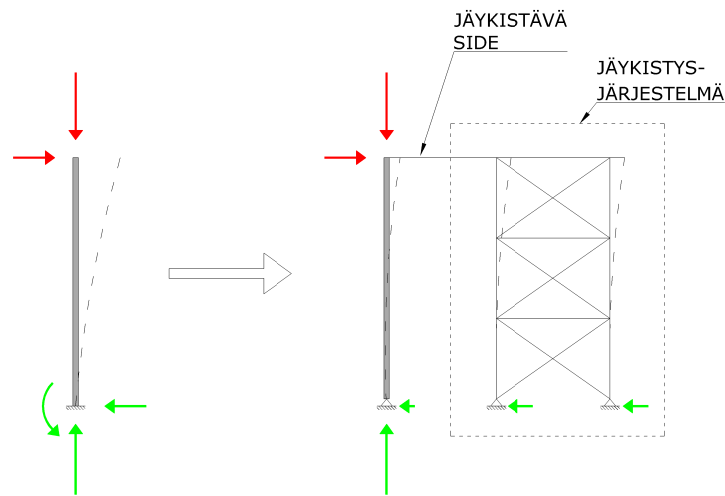
Kantavien rakenneosien stabiliteetti varmistetaan jäykistämällä rakennus. Rakennus on jäykistettävä sekä vaak- että pystysuunnassa ja jäykisteille kohdistuvat kuormat on vietävä perustuksille.

Jäykistäminen ja jäykistejärjestelmän toimintatarkoitus jaetaan ulkoisia kuormia ja sisäisiä kuormia vastaanottaviin jäykisterakenteisiin. Tavallisesti jäykisterakenteista puhuttaessa ulkoisilla kuormilla tarkoitetaan ulkoisia vaakavoima, joita ovat esimerkiksi tuuli-kuorma ja pystykuormista rakenteille niiden epätarkkuuksista sekä asennustoleransseista aiheutuvat lisävaakavoimat. Vaakakuormat aiheuttavat rakennukseen sivusiirtymiä tai kiertymää, jolloin pystykuormat muuttuvat rakenneosiin nähden epäkeskeiseksi ja puristetut rakenneosat ovat vaarassa menettää kantavuutensa esimerkiksi stabiliteetin menetyksen seurauksena. Jäykisterakenteiden on tarkoitus estää tätä vaakakuormista aiheutuva muodonmuutosta ja näin ollen säilyttää rakennuksen muoto jäykkänä kokonaisuutena, jolloin kuormat ohjautuvat rakenneosia pitkin suunnitellusti perustuksille. Tavallisia ulkoisia vaakakuormia vastaan toimivia jäykisterakenteita teräshallissa ovat katon jäykisteristikko ja pilarien väliset vinositeet. (Ballio & Mazzolani 1983)

Sisäisiä voimia vastaan toimivilla jäykisteillä tarkoitetaan rakenteita, jotka tukevat kantavan rungon puristettuja tai taivutettuja rakenneosia stabiliteetin menetystä vastaan. Hoi-killä puristetuilla ja myös taivutetuilla rakenneosilla mitoittavaksi tekijäksi muodostuu usein sisäiset stabiliteetti-ilmiot, kuten nurjahdus ja kiepahdus. Sisäisen jäykistejärjestelmän tarkoitus on muodostaa tukipisteitä näihin rakenneosiin ja näin estää nämä stabiliteetinmenetysilmiöt rajoittamalla vapaata nurjahdus- tai kiepahduspituutta. Yksi esimerkki sisäisestä jäykistysjärjestelmästä teräshallissa on pääkannatinristikon yläpaarten nurjahdustuennat, joista tavallisesti käytetään yleisnimitystä katon jäykistesiteet tai kattoorret. (Ballio & Mazzolani 1983) Stabiliteettijäykistäminen voidaan edelleen jakaa yksittäistä rakenneosaa tukeväksi järjestelmäksi sekä koko rakennuksen rungon vaakasuuntaista stabiliteettia tukeväksi järjestelmäksi, jota esimerkiksi teräshallin kattojäykistys on. (Aristizabal-Ochoa 2011)

Jäykistäminen perustuu rakenteiden mekaniikan otaksumaan, jonka mukaan rakenteisiin ja rakenteiden muodostamiin kokonaisuuksiin kohdistuva kuorma ohjautuu rakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa. Koska rakennuksissa vaikuttavat pystykuormat ovat tavallisesti hyvin paljon vaakakuormia suurempia, toteutetaan rakenteet ensisijaisesti pystykuormia kantavina runkorakenteina ja näille mitoitetaan erillinen yleensä huomattavasti

kevyempi jäykistejärjestelmä vaakakuormia varten. Yksinkertainen jäykistysjärjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.1, jossa esitetään mastopilarin jäykistämistä erillisellä jäykisteristikkorakenteella.



Kuva 3.1. Esimerkki pilarin jäykistämisestä jäykisteristikolla.

Kuvassa on esitetty punaisella pilarirakenteeseen vaikuttava ulkoinen pysty- ja vaakakuorma ja vihreällä rakennetta tukevat tukireaktiot. Katkoviivalla on esitetty rakenteiden siirtymät. Jäykistämättömässä tilanteessa (vasen) puristetun pilarirakenteen jäykistäminen on toteutettu mastopilarirakenteella. Jäykistetyssä (oikea) tilanteessa puolestaan mastopilarin tuenta on muutettu nivelellisesti tuetuksi ja rakennetta tukee vaakasuunnassa jäykisteristikko. Pilarin suhteessa varsinainen jäykistävä rakenne on pilarin ja jäykistejärjestelmän välinen sauva, jota kutsutaan jäykistesiteeksi. Jäykistesiteen tehtävä on siirtää jäykistyskuorma jäykistävälle rakenteelle.

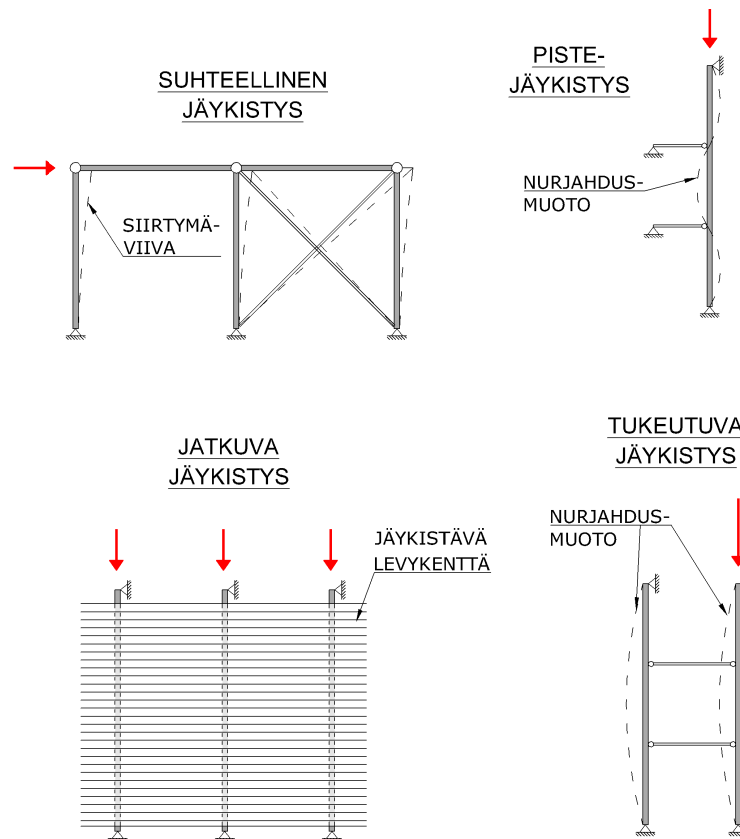
Jäykistämättömässä tilanteessa pilarin juureen kohdistuu kuormiin nähden vastakkaisuuntaiset ja yhtä suuret tukireaktiot sekä vaakakuormasta aiheutuva taivutusmomentti. Jäykistetyssä tilanteessa pilaria tukee ristikkomallinen jäykistejärjestelmä, joka on vaakakuorman suunnassa huomattavasti pilaria jäykempi rakenne ja näin ollen suurin osa vaakakuormasta siirtyy tälle rakenteelle. Jäykistämättömänä pilari jouduttaisiin mitoittamaan myös vaakakuormista aiheutuville rasituksille, kun taas jäykistettynä ulkoisella rakenteella sen tarvitsee kantaa pääasiallisesti vain pystysuuntainen rasitus. Vaakakuormat vastaanotetaan jäykisterakenteella. Myös siirtymät ovat jäykistetyssä tilanteessa huomattavasti jäykistämättömästä tilannetta pienemmät, sillä jäykistysjärjestelmä tuo rakennekokonaisuudelle huomattavasti lisää jäykkyyttä vaakakuorman suunnassa. Jäykisteellä saadaan siis aikaiseksi pienemmät siirtymät ja kantava runkorakenne voidaan mitoittaa sen varsinaista käyttötarkoitusta eli pystykuormien kantamista varten.

Jäykistysjärjestelmät voidaan luokitella niiden toiminnallisuuden perusteella neljään eri tyyppiin (Yura & Helwig 1995).

1. Suhteellinen jäyksitys (*relative bracing*)

2. Pistemäinen jäykistys (*discrete bracing*)
3. Jatkuva jäykistys (*continuous bracing*)
4. Tukeutuva jäykistys (*lean-on bracing*)

Eri jäykistystyyppit on havainnollistettu kuvassa (3.2).



Kuva 3.2. Havainnollistus erilaisista jäykistysjärjestelmätyypeistä Yura & Helwigin (1995) mukaisesti.

Suhteellisessa jäykistysjärjestelmässä jäykistettävä rakenne toimii osana jäykistysjärjestelmää. Suhteellinen jäykistys muodostaa tavallisesti useista jäykistesauvoista muodostuvan yhden jäykistekokonaisuuden. Kuvan 3.1 rakenne on esimerkki suhteellisesta jäykistyksestä. Rakennekokonaisuuteen kuormista aiheutuvat muodonmuutokset riippuvat paitsi jäykisterakenteiden topologiasta ja jäykkyydestä, myös jäykistettävien rakenteiden jäykkyysominaisuuksista. Rakennekokonaisuuden tiettyyn pisteeseen kohdistuvan kuorman aiheuttamalla siirtymällä on selkeä relaatio muihin rakennekokonaisuuden pisteiden siirtymiin. Esimerkkikuvassa 3.2 pystysauvojen yläpään vaakasuuntainen siirtymä on yhtä suuri jokaisella sauvalla.

Pistemäisellä jäykistysjärjestelmällä tarkoitetaan tilannetta, jossa puristettua sauvaa tai taivutettua palkkia tuetaan sen tukipisteiden välillä rakenteen stabiliteetin parantamiseksi. Pistemäisellä jäykistysjärjestelmällä ei siis hallita koko rakennekokonaisuuden siirtymiä,

vaan ainoastaan yksittäisen rakenneosan stabiliteettia, kuten kuva 3.2 osoittaa. Usein pistemäinen jäykistejärjestelmä onkin vain yksi rakennuksen kokonaisjäykistykseen osa ja se liittyy seuraavaan jäykistejärjestelmään rakennuksen kokonaisstabiliteetin takaamiseksi.

Suhteellisessa ja pistemäisessä jäykistyksessä jäykistejärjestelmä koostuu sauvarakenteista ja tuettavilla rakenteilla on aina vapaata pituutta jäykistesiteiden kiinnityspisteiden välillä. Jatkuvalle jäykistyksellä puolestaan tarkoitetaan jäykistystapaa, jossa tuettava sauva sidotaan johonkin jatkuvaan rakenteeseen siten, että tukematonta pituutta stabiliteetin menetykselle ei ole tai se on sauvan kokonaispituuteen nähden todella pieni. Käytännön rakenteissa tämä tarkoittaa levyrakenteilla jäykistämistä.

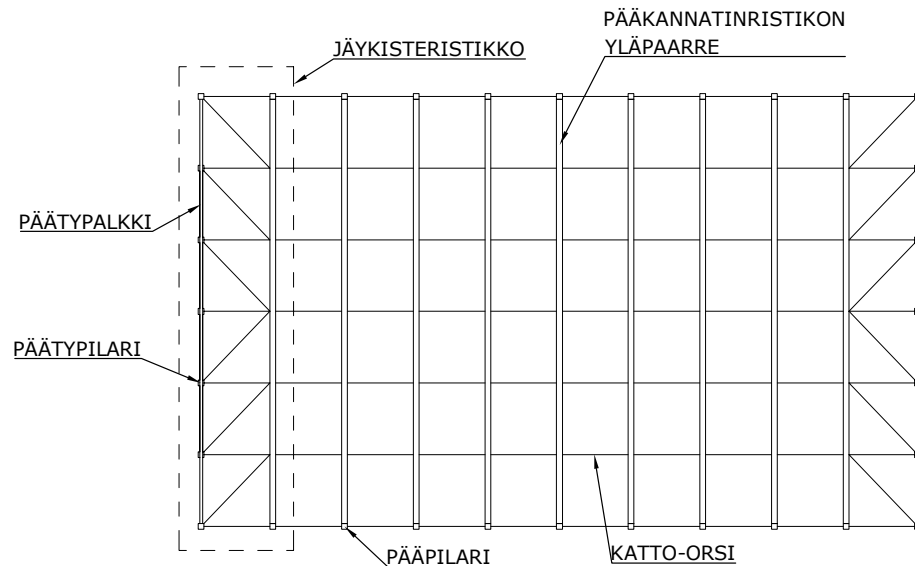
Rakene voidaan myös kiinnittää vastaavanlaiseen vierekkäiseen rakenteeseen, jolloin jäykistejärjestelmä on tähän rakenteeseen tukeutuva. Jotta rakenteiden tukipisteiden välinen globaali nurjahdus voisi tapahtua kuten kuvassa 3.2 on esitetty, tulee puristavan voiman ylittää koko rakennekokonaisuuden eli sekä puristetun sauvan että rakennetta tukevan sauvan yhteenlasketun kriittisen kuorman arvon (Yura 1971). Tukevan rakenteen ollessa riittävän jäykkä muuttuu puristetun sauvan nurjahdusmuoto jäykistesiteiden liittymispisteiden väliseksi lokaaliksi nurjahdukseksi ja jäykistysjärjestelmä muistuttaa enemmän pistemäistä jäykistysrakennetta.

Edellä kuvatut jäykistysjärjestelmätyypit koskevat pääasiallisesti vain yhtä rakennetta tai samantyyppisten rakenneosien kokonaisuutta. Rakennuksen kokonaisjäykistys muodostuu erilaisista jäykistysjärjestelmistä ja niiden yhteistoiminnasta. Kuten aiemmin todettua, jäykistäminen on tehtävä sekä ulkoisista kuormista aiheutuville rasituksille, että yksittäisten rakenneosien stabiliteetin tuomasta tuentatarpeesta aiheutuville rasituksille. Ulkoisista kuormista jäykistävälle rakenteille kohdistuvat rasitukset voidaan määrittää laatimalla rakenteesta sauvamalli ja ratkaisemalla sauvavoimat rakenneanalyysin avulla. Stabiliteettituennassa jäykisteet on mitoitettava myös niin, että puristettujen rakenneosien vapaa nurjahduspituus ei kasva kriittistä kuormaa vastaavaa nurjahduspituutta suuremmaksi.

3.2 Hallirakennuksen katon pituussuuntainen jäykistys

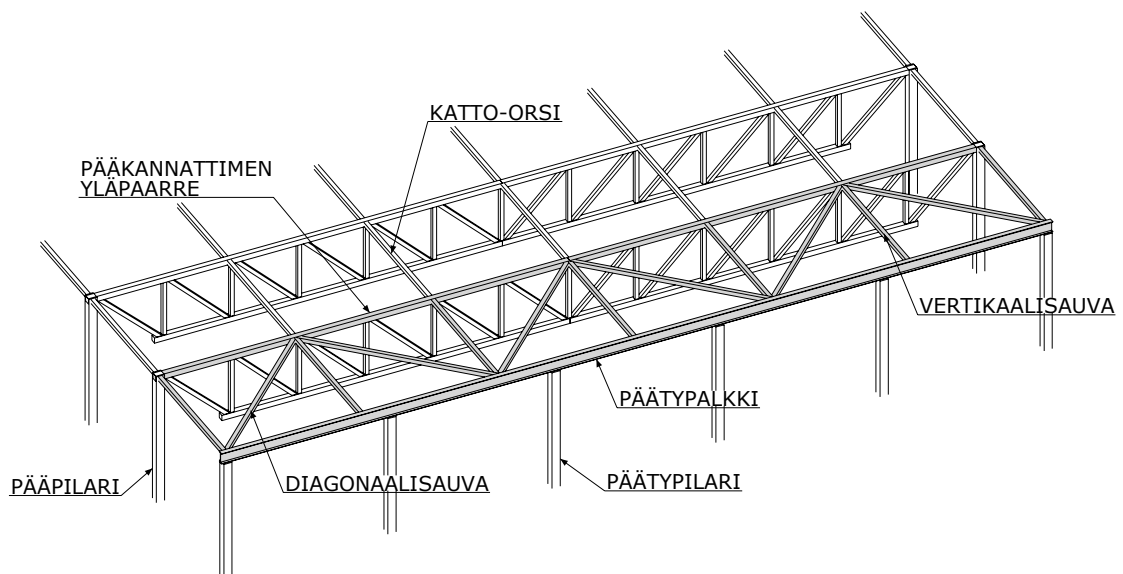
Teräshallin katon pituussuuntainen jäykistysjärjestelmä muodostuu katon tasossa olevista jäykisteristikoista sekä pääkannatinristikoiden yläpaarteita tukevista katto-orsista. Myös näihin rakenteisiin liittyvät osat, kuten pääkannattimen yläpaarre, katon päätypalkki sekä pääty- ja pääpilarit, kuuluvat osaltaan jäykistysjärjestelmään. Katon jäykistysjärjestelmän topologia ja jäykistysjärjestelmän osat on esitetty kuvassa 3.3.

Katon tasossa olevan jäykisteristikon tehtävänä on vastaanottaa hallin päätyisivulle katon osuudelle kohdistuva tuulikuorma sekä katto-orsilta pääkannattimien tuennasta aiheutuva stabiloiva kuorma. Jäykisteristikosta käytetään myös nimitystä tuuliristikko etenkin silloin, kun se on sijoitettu hallin päätyyn kuten kuvassa 3.3. Jäykisteristikon rakenneosat on esitetty periaatteellisesti kuvassa 3.4. Ristikon paarteet muodostuvat hallin päätypalkista ja ensimmäisen kehän pääkannatinristikon yläpaarteesta. Nämä rakenneosat toimi-



Kuva 3.3. Teräsrakenteisen hallin kattojäykistystyksen periaate.

vat myös pystykuormaa kannattelevina rakenneosina jäykisteristikoon nähden poikittaisessa suunnassa. Päätypalkki on tavallisesti tuettu hallin päätypilareilla, joista käytetään myös nimitystä tuulipilarit. Jäykisteristikko muodostetaan näihin paarrerakenteisiin nivellisesti liittyvillä uumasauvoilla eli diagonaaleilla sekä mahdollisilla vertikaalisauvoilla.



Kuva 3.4. Periaatekuva päädyn jäykisteristikon rakenteesta ja sen osista.

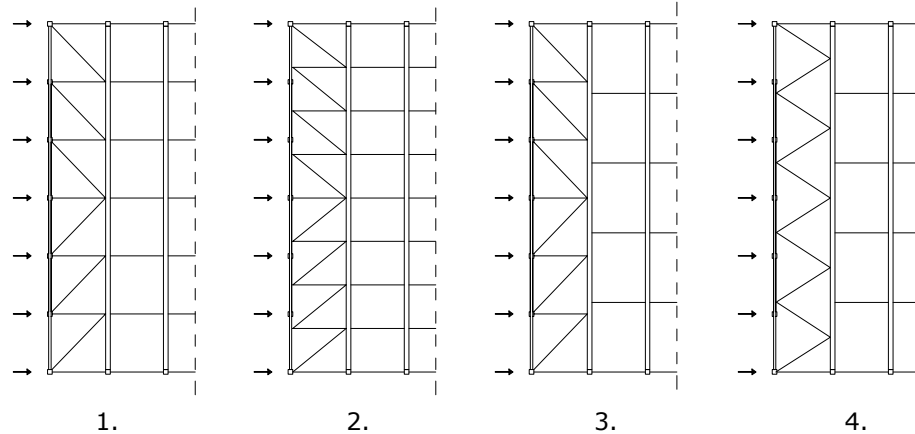
Periaatekuvassa 3.3 esitetystä kattojäykistystopologiasta jäykisteristikon diagonaalit liittyvät päätypalkilla päätypilareiden yläpään ja ensimmäisen kehän pääkannatinristikon yläpaarteella katto-orsien kohdalle. Tällainen jäykisteiden geometria ei aiheuta jäykisteiden aksiaalisesta rasituksesta johtuvia katon tason suuntaisia taivutusmomenteja päätypalkille tai kattoristikon yläpaarteelle. Jäykistysgeometrian ei kuitenkaan välttämättä tarvitse johtaa tällaiseen tilanteeseen, vaan rakenneosille voidaan sallia myös kaksiakiaali-

nen taivutus, joka otetaan huomioon rakenteiden mitoituksessa. Jäykisteristikkoa esittävässä periaatekuvassa 3.4 onkin esitettyinä tapaus, jossa ristikon diagonaalit ja vertikaalit eivät päätyypalkin kohdalla liity päätypilareiden kohdalle, vaan kytkeytyvät päätyypalkin kentän alueelle. Pääkannatinristikon puolella katto-orret ja jäykisteristikon uumasauvat puolestaan kytkeytyvät samaan pisteeseen. Kuvan tapauksessa siis päätyypalkki on mitoitettava myös jäykisteristikon aiheuttamalle kaksiakσιαaliselle taivutukselle, mutta pääkannatinristikon yläpaarretta ei.

Kattojäykisteiden geometriasta voidaan siis eritellä neljä erilaista tapausta rakenteiden mitoituksen kannalta:

1. Päätyypalkille ja pääkannatinristikon yläpaarteelle ei synny poikittaista taivutusta.
2. Päätyypalkille aiheutuu jäykisteristikon uumasauvojen sijoittelusta poikittaista taivutusta.
3. Pääkannatinristikon yläpaarteelle aiheutuu jäykisteristikon uumasauvojen sijoittelusta poikittaista taivutusta.
4. Sekä päätyypalkille että pääkannatinristikon yläpaarteelle aiheutuu jäykisteristikolta poikittaista taivutusta.

Nämä tapaukset on eritelty kuvassa 3.5.

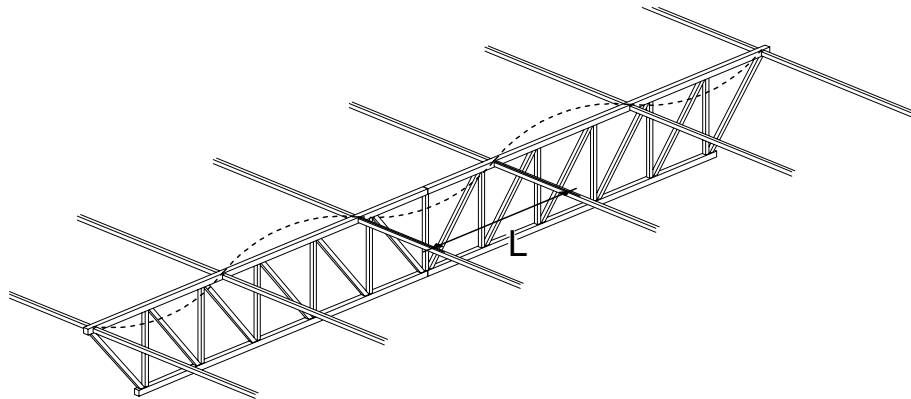


Kuva 3.5. Erilaisia jäykisteristikon geometrioita katon rakenneosille poikittaista taivutusta aiheuttavien tapausten perusteella.

Ristikkorakennetta suunniteltaessa voidaan diagonaalien geometria sijoittaa sekä päätypilareihin että katto-orssiin (1), pelkästään katto-orssiin (2), pelkästään päätypilareihin (3) tai suunnitella topologia täysin vapaasti (4). Ilmeistä on, että päätyypalkin sekä pääkannatinristikon yläpaarteen mitoituksen kannalta edullisinta on tilanne, jossa poikittaista taivutusta ei synny. Päätyypalkki on pystykuorman vuoksi taivutettu rakenne ja pääkannatinristikon yläpaarre puolestaan puristettu ja taivutettu rakenne, joten vaakasuuntainen taivutus johtaa näiden rakenteiden mitoituksessa kaksiakσιαalisen taivutuksen sekä yhdistetyn normaalivoiman mitoitustapaan. Kuitenkin taas jäykisteristikon massan tai sauva-

määrän kannalta edullista voi olla mitoittaa rakenne niin, että kaksiakσιαalista taivutusta jäykisteristikon paarreosille sallitaan, jolloin kyseessä on optimointitehtävä.

Pääkannatinristikon yläpaarteeseen liittyy kuvan 3.3 mukaisesti toisella puolella jäykisteristikko ja toisella puolella katto-orret. Katto-orsien tehtävä on jäykistää hallin pääkannatinristikoiden puristetut yläpaarteet pääkannatinristikon tasosta poispäin tapahtuvaa nurjahdusta vastaan. Tätä on havainnollistettu kuvassa 3.6. Katto-orret muodostavat yhdessä ristikoiden yläpaarteiden kanssa jäykistysjärjestelmän. Tämä jäykistysjärjestelmä tukeutuu kokonaisuudessaan hallin jäykisteristikkoon, joka on selkeästi katto-orsien jäykistysjärjestelmää jäykempi rakenne hallin pituussuunnassa. Jäykisteristikko mitoitetaan ulkoisen vaakakuorman lisäksi myös katto-orsijärjestelmältä sille kohdistuvalle stabiloivalle voimalle. Tällaisen jäykisteiden sarjan ja siltä kohdistuvan stabiloivan voiman määrittystä käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.3. (Kaitila 2010)

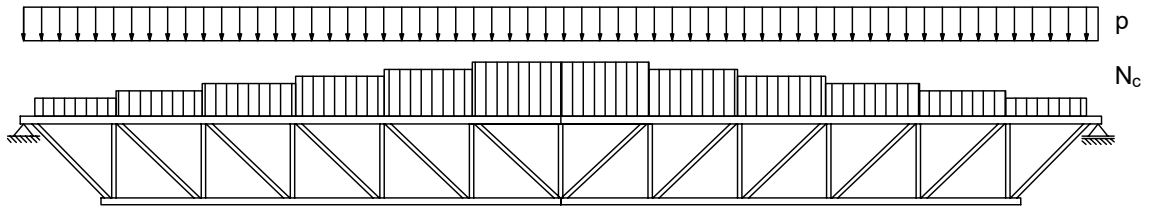


Kuva 3.6. Putkiristikon puristetun yläpaarteen nurjahdusmuoto ja nurjahdustuennat.

Ristikon tuenta ja katto-orsien väliset etäisyydet suunnitellaan siten, että yläpaarteiden nurjahduskestävyys ei alita paarteissa vaikuttavaa aksiaalista puristusvoimaa. Puristusvoiman ylittäessä yläpaarteiden nurjahduskestävyyden, on yläpaarteeseen muodostuvan nurjahtavan sauvan nurjahdusmuoto katon tason suunnassa kuvan 3.6 mukainen. Eurokoodi 3:n liitteen BB mukaan nurjahduspituudeksi voidaan tässä tapauksessa putkiristikon paarteelle asettaa 0,9 kertaa katto-orsien välinen etäisyys.

Pääkannatinristikon toiminta perustuu sen paarteiden ja uumasauvojen yhteistoimintaan. Ristikko kannattelee pystykuormaa palkin tavoin. Ristikon paarteet toimivat taivutuksessa kuten palkin laipat vastaanottaen taivutusmomentista aiheutuvan veto- ja puristusrasituksen. Uumasauvat välittävät leikkausrasituksia palkin uuman tavoin. Koska ristikko ei kuitenkaan ole jatkuva rakenne, paarteille kohdistuvan normaalivoiman jakauma on jatkuvan jakauman sijasta portaittainen. Tätä porrastusta on havainnollistettu kuvassa 3.7, jossa on esitettyinä ristikon yläpaarteiden puristusvoiman porrastuksen periaate. Normaalivoima puristetulla yläpaarteella muttuu aina vedetyn uumasauvan kohdalla.

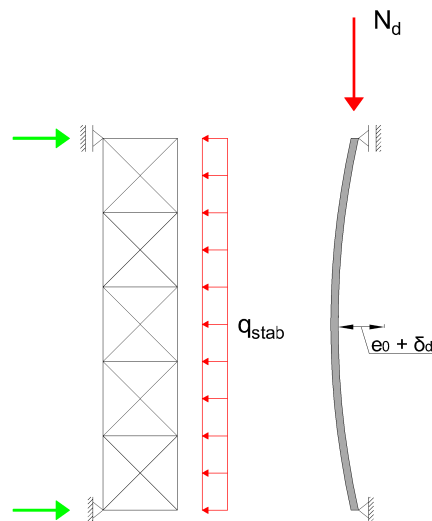
Edellä esitetystä hallirakennuksen katon pituussuuntaisesta jäykistyksestä voidaan eritellä erilaiset jäykistysjärjestelmätyypit, jotka käytiin läpi kappaleessa 3.1. Katto-orsien pää-



Kuva 3.7. Periaatekuva pystykuorman aiheuttamasta normaalivoiman portaittaisesta jakautumisesta ristikon yläpaarteelle.

kannatinristikon yläpaarteelle antama stabiilettijäykistys on pistemäinen jäykistys. Niillä ei siis hallita koko rakennuksen siirtymiä eivätkä ne varsinaisesti liity koko rakennuksen stabiilettiin, vaan ainoastaan yksittäisen rakenneosan nurjahduskestävyyden varmistamiseen. Katto-orret tukeutuvat sarjassa tuuliristikoon, jolloin tätä kokonaisuutta voidaan pitää tukeutuvana jäykistysenä. Tuuliristikko itsessään on suhteellinen jäykistysrakenne, sillä sen eri pisteiden siirtymät ovat yhteydessä toisiinsa.

3.3 Jäykistysjärjestelmän epätarkkuus



Kuva 3.8. Eurokoodi 3:n mukainen puristetulta sauvalta jäykisteristikolle viivakuormana kohdistuva ekvivalentti stabiiloiva voima q_{stab} .

Eurokoodi 3 esittää laskentakaavan puristetun sauvan epätarkkuudesta aiheutuvasta jäykisteelle kohdistuvasta kuormasta. Standardin kaava on määritelty puristuksesta alkukaarevuuden omaavaan sauvaan aiheutuvan taivutusmomentin kautta. Taivutusmomentti muunnetaan tätä vastaavaksi tasaiseksi kuormaksi, jota kutsutaan standardissa ekvivalentiksi stabiiloivaksi kuormaksi q_{stab} . Tämä tasainen kuorma kohdistuu jäykistäviltä siteiltä niitä tukevalle jäykistysjärjestelmälle. Kaava on

$$q_{stab} = \Sigma N \frac{8(e_0 + \delta_q)}{L^2}, \quad (3.1)$$

missä ΣN on tuettavien puristettujen sauvojen yhteenlaskettu puristusvoima, e_0 on puristetun sauvan alkukäyryys, δ_q on kuormista aiheutuva jäykistysjärjestelmän taipuma ja L on puristettujen sauvojen pituus. Koska kaava sisältää sekä rasiitus- että muodonmuutossuureita, edellyttää kaavan käyttö iteratiivista laskentaa. FEM-laskentaohjelmia käyttämällä tämä iteraatio voidaan toteuttaa suorittamalla toisen kertaluvun rakenneanalyysi, jolloin kuormista aiheutuvat siirtymät otetaan huomioon rasiituksissa. Toisen kertaluvun analyysillä siirtymän δ_q arvoksi voidaan siis asettaa nolla. Ekvivalentin stabiloivan voiman siirtymistä puristetulta sauvalta jäykisterakenteelle on havainnollistettu kuvassa 3.8. Kuvassa on esitetty punaisella käyryyden e_0 ja δ_q omaavalle sauvalle kohdistuva puristusvoima, joka siirtyy jäykistävälle tasolle tasaiseksi kuormaksi standardin q_{stab} . Vihreällä on kuvattu jäykisteristikon tukireaktiot.

Suunnittelustandardin kaava ekvivalentille stabiloivalle voimalle (3.1) määrittää kuormituksen tilanteessa, jossa puristetussa sauvassa vaikuttaa sen koko pituudelta vakiosuuruisen voima. Mikäli sauvassa vaikuttava voima ei ole sen koko pituudelta sama, kaava (3.1) on varmalla puolella Eurokoodi 3:n kohdan 5.3.3(5) mukaan. Teräshallin kattojäykistykseen tapauksessa puristettu rakenne on pääkannatinristikon yläpaarre. Koska ristikkorakenteen yläpaarteissa vaikuttaa kuitenkin aiemmin todetusti portaitaisesti vaihtuva normaalivoima (kuva 3.7), on mielekäästä tutkia sen tuennalle kohdistuvaa voimaa tarkemmin kuin mitä suunnittelustandardin kaava (3.1) olettaa. Biegus & Czepizak (2018) esittivät stabiloivan voiman laskennan tilanteessa, joka ottaa huomioon ei-vakiosuuruisen voiman ristikon yläpaarteella. Siinä jäykistysjärjestelmälle kohdistuva stabiloiva voima määritetään puristetun sauvan taivutusmomentin kautta. Taivutusmomentti M (Nm) tarkasteltavan pisteen x_0 (m) kohdassa saadaan funktiolla

$$M(x_0) = - \int_{x_0}^L n(x)[y(x_0) - y(x)]dx - \frac{\int_0^L n(x)y(x)dx}{L} \quad (3.2)$$

missä $y(x)$ on paarteiden epäkeskisyyden funktio, $n(x)$ paarteissa vaikuttavan normaalivoiman jakauman funktio (N/m) ja L sauvan pituus. Kun oletetaan, että rakenne on parabolisesti kaareva, voidaan epäkeskisyyden funktio $y(x)$ määrittää kaavalla

$$y(x) = 4(e_0 + \delta_q) \frac{x}{L^2}(L - x), \quad (3.3)$$

missä e_0 on käyryyden huippuarvo eli alkukäyryys, δ_q on kuormista aiheutuva taipuma ja L on sauvan jännevälän pituus.

Sauvassa vaikuttava normaalivoima on kuvan 3.7 mukaisesti portaitainen. Laskennan yksinkertaistamiseksi käsitellään kuitenkin tätäkin voimaa parabolisesti jakautuneena. Näin voidaan aksiaalisen voimajakauman funktio $n(x)$ ilmoittaa muodossa

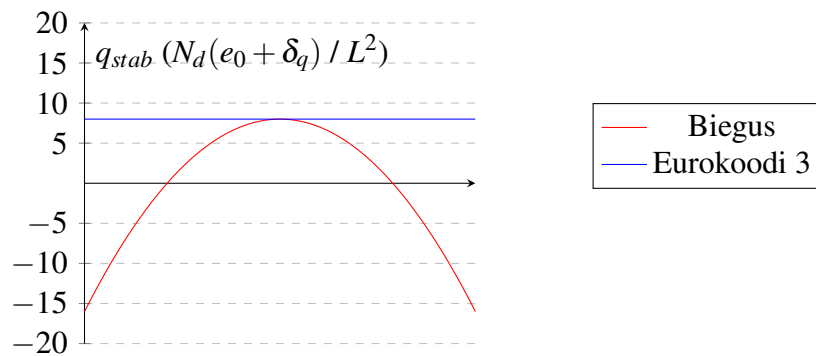
$$n(x) = 4n_d \frac{x}{L^2}(L - x), \quad (3.4)$$

missä n_d on sauvan aksiaalisen voimajakauman huippuarvo (N/m).

Taivutusmomentin $M(x)$ aiheuttava sauvassa vaikuttava tasainen kuorma q_{stab} voidaan määrittää kimmoviivan differentiaaliyhtälön avulla. Ratkaisemalla sauvassa vaikuttavan taivutusmomentin toisen kertaluvun derivaatta saadaan kuormitusjakaumalle funktio

$$q_{stab}(x) = \frac{d^2M(x)}{dx^2} = 16n_d \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} \left(6\frac{x}{L} - 6\frac{x^2}{L^2} - 1 \right). \quad (3.5)$$

Kuvassa 3.9 on esitettyä stabiloiva voimajakauma tilanteessa, jossa puristettua sauvaa kuormitetaan vakiosuuruisella voimalla (kaava 3.1) sekä tilanteessa, jossa voima on parabolisesti jakautunut (kaava 3.5). Kuvaajassa sauvan alkukäyryydelle e_0 on käytetty arvoa $L/500$ ja kuormista aiheutuvalla taipumalla δ_q arvoa 0.



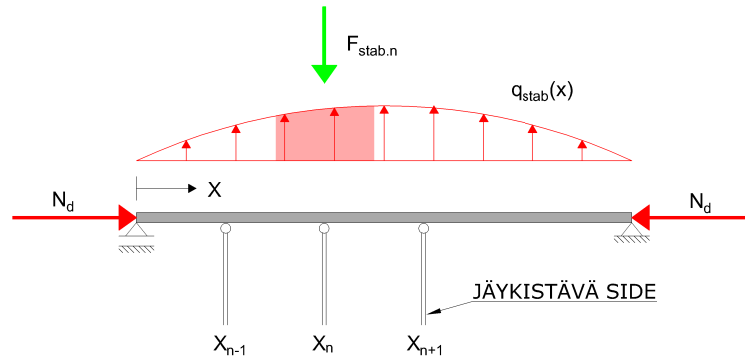
Kuva 3.9. Puristetun sauvan stabiloivan voiman kehittyminen jännevälin pituudella (Biegus & Czepizak 2018) sekä Eurokoodi 3:n mukaisesti.

Kuvaajasta huomataan, että puristusvoiman jakautuessa puristetulle sauvalle parabolisesti kuvan 3.7 mukaisesti vaihtuu stabiloivan voiman suunta hieman ennen jännevälin neljännespistettä. Stabiloiva voima saa huippuarvonsa jännevälin keskellä sekä jännevälin päissä. Jännevälin keskellä stabiloivan voiman suuruus saavuttaa Eurokoodi 3:n mukaisen ekvivalentin stabiloivan kuorman arvon (kaava 3.1), kun taas tukien alueella kaavan (3.5) mukainen stabiloiva voima on kaksi kertaa Eurokoodi 3:n mukaisen kuorman verran. Standardin toteamuksen mukaan kaava (3.1) on varmalla puolella siitäkin huolimatta, että puristetussa sauvassa ei vaikuta vakiosuuruisen voima. Tämä toteamus ei siis (Biegus & Czepizak 2018) mukaan pidä paikkaansa ja suunnittelustandardi on tältä osin epävarmalla puolella.

Kuva 3.9 sekä kaavat (3.1) ja (3.5) esittävät siis puristetun sauvan stabiliteettituennalle kehittyvän voimajakauman sauvan pituudella. Tätä voimajakaumaa havainnollistettiin kuvassa 3.8. Kun puristettua sauvaa tuetaan pistemäisesti jäykistesiteillä sauvan eri pisteistä (esim. kuva 3.6), saadaan yhdelle jäykisteelle kohdistuva voima määritettyä integroimalla voimajakauman funktiota matkalla, jolta tarkasteltava side kerää kuormaa. Integrointikaava on

$$F_{stab,n} = \int_{\frac{x_n - x_{n-1}}{2}}^{\frac{x_{n+1} - x_n}{2}} q_{stab}(x) dx \quad (3.6)$$

missä $F_{stab,n}$ on tarkasteltavalle siteelle n kohdistuva voima ja x_n on siteen sijainti puristetulla sauvalla. Notaatiot $n + 1$ ja $n - 1$ tarkoittavat siteeseen nähden edellisen ja seuraavan siteen sijaintia puristetulla sauvalla. Jäykistevoiman integrointia on havainnollistettu kuvassa 3.10.



Kuva 3.10. Periaatekuva jäykistevoiman integroinnista voimajakaumasta.

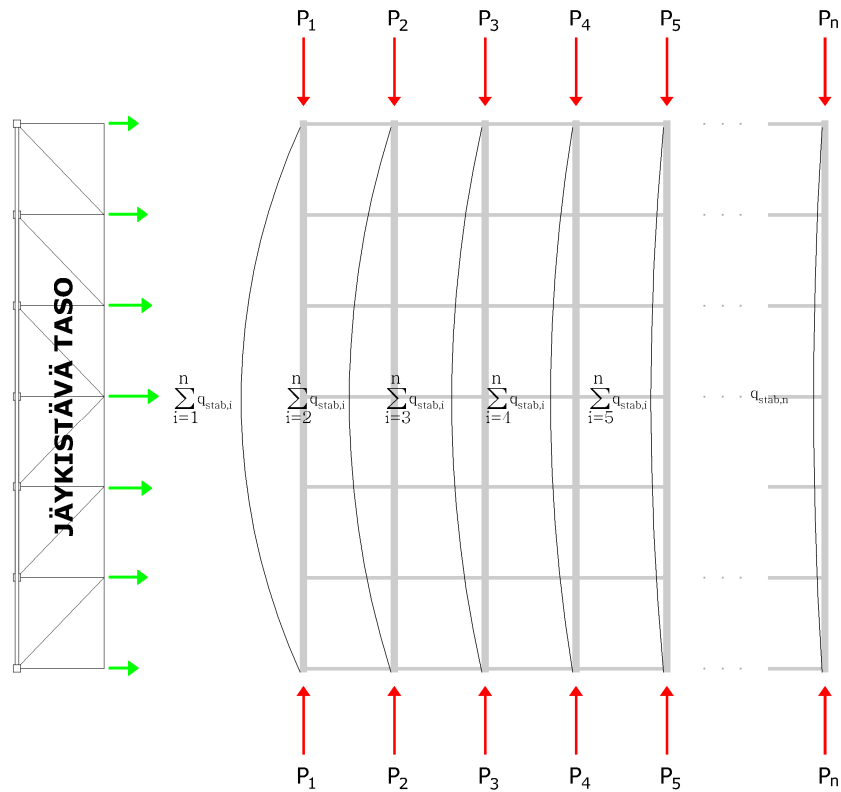
Kuten Eurokoodi 3 esittää (kaava 3.1), kumuloituu puristetuilta sauvoilta jäykisteraketeelle kohdistuva stabiloiva voima. Hallirakennuksen kattojäykistyksessä puristettuina rakenteina toimivat pääkanantinristikoiden yläpaarteet. Näiden stabiliteettituennasta aiheutuva voima q_{stab} välitetään hallin päädyn jäykisteristikolle katto-orsilla.

Jäykistevoiman kumuloitumista havainnollistetaan kuvassa 3.11. Kuvassa on esitettyä kuvan 3.3 tilannetta vastaavassa tapauksessa halirakennuksen kattorakenteet harmaalla värillä, rakenteita puristavat voimat punaisella sekä jäykistävältä tasolta eli katon jäykisteristikolta jäykistejärjestelmälle kohdistuva tukireaktio vihreällä värillä. Ehyellä viivalla esitetyt kaaret kuvaavat kyseisellä kehällä vaikuttavaa stabiloivaa voimaa kokonaisuudessaan ja niiden yhteyteen merkityt summalausekkeet kuvaavat stabiloivan kuorman kertymistä.

Voiman kumuloitumista tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että voimaan vaikuttaa suureksi osaksi puristetun sauvan alkukäyryys e_0 , joka on kuitenkin sekä suunnaltaan että suuruudeltaan satunnainen. Eurokoodi 3 esittää jäykistysjärjestelmää tarkasteltaessa yksittäisen sauvan epätarkkuudeksi arvon $L/500$. Kuitenkin, mikäli jäykistejärjestelmällä tuetaan useampia sauvoja, voidaan standardin mukaan tätä epätarkkuuden arvoa pienentää kertomalla se kertoimella

$$\alpha_m = \sqrt{0.5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}, \quad (3.7)$$

missä m on tuettavien sauvojen määrä.



Kuva 3.11. Puristettujen sauvojen stabiileittuennan aiheuttamien rasiusten kumuloituminen jäykistävälle tasolle.

3.4 Teräsrakenteen kustannusten muodostuminen

Tässä diplomityössä teräskokoonpanojen kustannusten laskenta perustuu Haapion (2012) väitöskirjaan. Väitöskirjassa kokoonpanon kustannukset on parametrisoitu kustannuspaikoittain. Yhdestä teräsrakenteesta, joka muodostuu putki- tai avoprofiilista sekä tähän konepajalla liitettävistä liitososista käytetään nimitystä kokoonpano. Kokoonpanon kokonaiskustannus muodostuu kumulatiivisesti sen valmistuksessa ja asennuksessa esiintyvien kustannuspaikkojen kustannuksista. Tässä diplomityössä huomioitavat kustannuspaikat ovat

1. Materiaalikustannukset C_{SM}
2. Puhdistus- ja esikäsitteilykustannukset C_B
3. Leikkauskustannukset (levyrakenteille) C_{Cu}
4. Katkaisukustannukset (profileille) C_S
5. Hahlon leikkauskustannukset C_{Co}
6. Porauskustannukset C_D
7. Hitsauskustannukset C_W
8. Pintakäsittelykustannukset C_P

9. Asennuskustannukset C_E .

Haapio jakoi työssään aikaperusteiset kustannukset työvoima-, laite-, ylläpito-, huolto- ja kiinteistökustannuksiin. Lisäksi prosessissa kuluvat materiaalit ja prosessiin käytetty energia lisätään kustannuspaikan kustannuksiin. Haapion esittämä yleinen muoto kustannuspaikan kustannuksille on esitetty kaavassa (3.8).

$$C_k = (T_{Nk} + T_{Pk}) \frac{c_{Lk} + c_{Eqk} + c_{Mk} + c_{REk} + c_{Sek}}{u_k} + T_{Pk}(c_{Ck} + c_{Enk}) + C_{Ck}, \quad (3.8)$$

missä C_k tarkoittaa kustannuspaikassa k muodostuvaa kustannusta (€). T_{Nk} tarkoittaa kustannuspaikassa tuottamatonta aikaa (h) ja T_{Pk} tuottavaa aikaa (h). Tuottamattomaksi ajaksi määritellään kaikki prosessia varten tehtävät valmistavat työt ja tuottavaksi ajaksi prosessin varsinainen työvaihe. Hintatekijöitä (€/h) ovat työvoimakustannukset c_{Lk} , laiteinvestoinnit c_{Eqk} , laitteiden ylläpito- ja huoltokustannukset c_{Mk} , kiinteistö- ja tilakustannukset c_{REk} ja tuotantotilojen ylläpitokustannukset c_{Sek} . Lisäksi pelkästään prosessissa tuottavan ajan perusteella muodostuu kustannuksia prosessista kuluva materiaalista c_{Ck} ja prosessiin käytetystä energiasta c_{Enk} . Myös ajasta riippumattomat eli kiinteät kulut C_{Ck} on esitetty. Prosessin hyötysuhdetta kuvataan muuttujalla u_k . (Haapio 2012)

Tässä diplomityössä teräskokoonpanon kokonaiskustannusten laskenta perustuu Haapion väitöskirjaan, mutta laskentaa on yksinkertaistettu käyttämällä eri hintatekijöiden c sijasta samaa aikaperusteista konepajavalmistuskustannusta c_{fb} (€/h). Aikaperusteiseksi valmistuskustannukseksi tässä diplomityössä on valittu 75,0 €/h. Näin kustannuspaikan kokonaishinnan muodostumiselle saadaan tässä diplomityössä käytettävä kaava (3.9).

$$C_k = (T_{Nk} + T_{Pk})c_{fb} + C_{Ck}. \quad (3.9)$$

Työaikojen T_{Pk} ja T_{Nk} laskenta perustuu Haapion väitöskirjaan. Näiden ja ajasta riippumattomien kustannusten sekä materiaali- ja ainekustannusten laskentaan käytettävät vaihtokertoimet on esitetty liitteessä B. Tässä työssä ajasta riippumattomat kustannukset C_{Ck} muodostuvat ainoastaan ainekustannuksista ja näistä huomioidaan hitsaus- ja pintakäsittelytyössä syntyvät ainekustannukset. Hyötysuhdetta u_k ei huomioida tässä työssä ($u = 1,0$). Pintakäsittelykustannuksiin Haapio on määrittänyt myös käsitellyn kokoonpanon kuivumisesta aiheutuvat kustannukset, mutta ne on jätetty tässä työssä huomioimatta. Myöskään kuljetuskustannuksia ei huomioida.

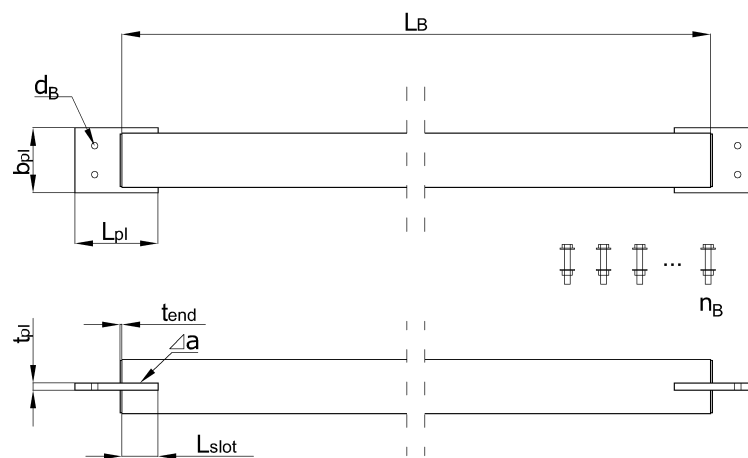
Työssä lasketaan syntyvien kustannuksien osalta

- katto-orsien,
- jäykisteristikon sauvojen,
- reunapalkkien,

- pääkannatinristikon ja
- päätypalkin

kustannukset.

Katto-orret, jäykisteristikon sauvat ja reunapalkit muodostuvat samanlaisesta jäykistekokoonpanosta. Jäykistekokoonpano koostuu varsinaisen putkipalkin lisäksi liitoslevyistä, päädyn tulppalevyistä sekä liittimistä. Liittimien kustannukset työssä lasketaan nimenomaisesti jäykisterakenteen kustannuksiksi eli esimerkiksi kattoristikon kustannuksia lasettaessa liittimiä ei huomioida. Jäykistekokoonpanossa liitoslevy upotetaan teräsprofiiliin tehtävään hahloon. Kuvassa 3.12 on esitetty työssä käytettävän jäykistekokoonpanon rakenne. Kokoonpanon vakiodimensiot on esitetty taulukossa 3.1.



Kuva 3.12. Työssä tutkittavan jäykistekokoonpanon rakenne ja rakenteen osien dimensioparametrit.

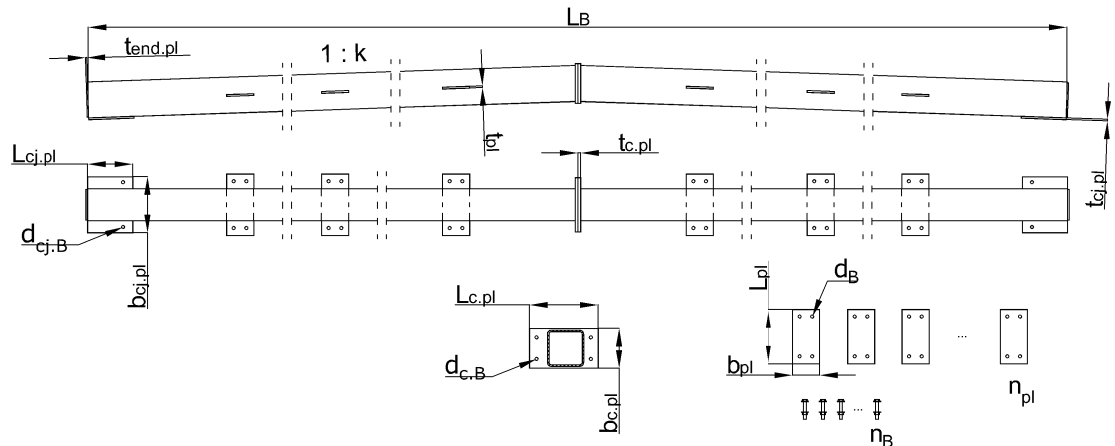
Taulukko 3.1. Jäykistekokoonpanoon liittyvien osien vakioimitat ja -määrät.

Parametrin tunnus	Parametrin selite	Arvo	Yksikkö
L_{pl}	Liitoslevyn pituus	200	mm
L_{slot}	Hahlon syvyys	100	mm
t_{pl}	Liitoslevyn ainevahvuus	10	mm
t_{end}	Päätylevyn ainevahvuus	5	mm
n_B	Pulttien määrä	4	kpl
d_B	Reiän halkaisija	18	mm
a	Hitsin a-mitta	5	mm

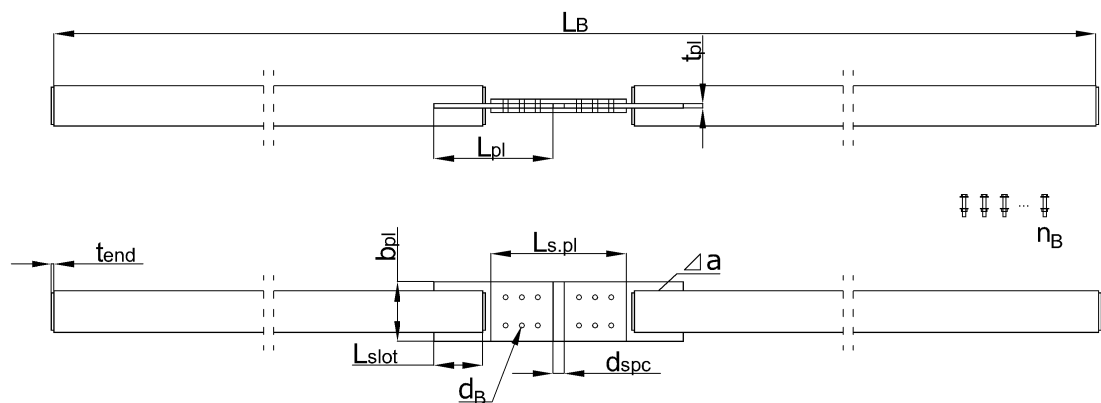
Liitoslevyn leveys on parametrisoitu siten, että se on jäykisteprofiilin leveys lisättynä 20 mm. Liitoksessa käytetään pulttikokoa M16. Päädyn tulppalevyn hitsin a-mitta on 5 mm.

Pääkannatinristikko koostuu ylä- ja alapaarteesta sekä diagonaalisauvoista. Liitososina ristikossa on molempien päiden liitoslevyt pilareihin, ala- ja yläpaarten jatkosliitokset sekä katto-orsien liitoslevyt. Lisäksi profiilien päissä on tulppalevyt. Kuvissa 3.13, 3.14

ja 3.15 on esitetty työssä käytettävien yläpaarteiden, alapaarteiden ja diagonaalien kokoonpanojen rakenne. Yläpaarteella jäykisteorsien liitoslevyt upotetaan paarteiden läpi kuvan osoittamalla tavalla. Alapaarteiden jatkoslevy upotetaan profiliin tehtävään hahloon samalla tavalla kuin jäykistekokoonpanossa. Taulukoissa 3.2 ja 3.3 on esitetty ylä- ja alapaarte-kokoonpanoille käytettävien liitososien vakiodimensiot.



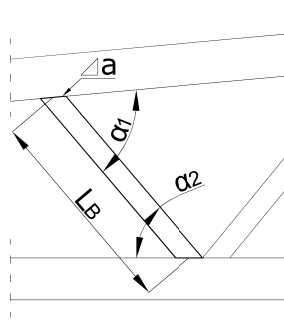
Kuva 3.13. Työssä tutkittavan ristikkokokoonpanon yläpaarteiden rakenne ja rakenteen osien dimensioparametrit.



Kuva 3.14. Työssä tutkittavan ristikkokokoonpanon alapaarteiden rakenne ja rakenteen osien dimensioparametrit.

Jatkosliitoslevyjen dimensioiden parametrisoitu siten että levyn leveys $b_{c,pl}$ on yläpaarte-profilin leveys lisättynä 20 mm ja levyn pituus L_{pl} on yläpaarte-profilin leveys lisättynä 100 mm. Yläpaarteella jäykisteiden liitoslevyjen leveys, pulttien koko ja lukumäärä vastaa jäykistekokoonpanon liitosta. Liitoslevyn pituus L_{pl} on yläpaarte-profilin leveys lisättynä 100 mm. Päädyn tulppalevyn hitsien a-mitta on 5 mm.

Alapaarteiden jatkoslevyjen leveys on parametrisoitu olemaan alapaarteiden profilin leveys lisättynä 50 mm. Päädyn tulppalevyjen hitsien a-mitta on 5 mm. Jatkosliitoksen pultteina käytetään pulttikokoa M24.



Kuva 3.15. Työssä tutkittavan ristikkokokoonpanon diagonaalien rakenne ja rakenteen osien dimensioparametrit.

Taulukko 3.2. Yläpaarteen liittyvien osien vakioimitat ja -määrät.

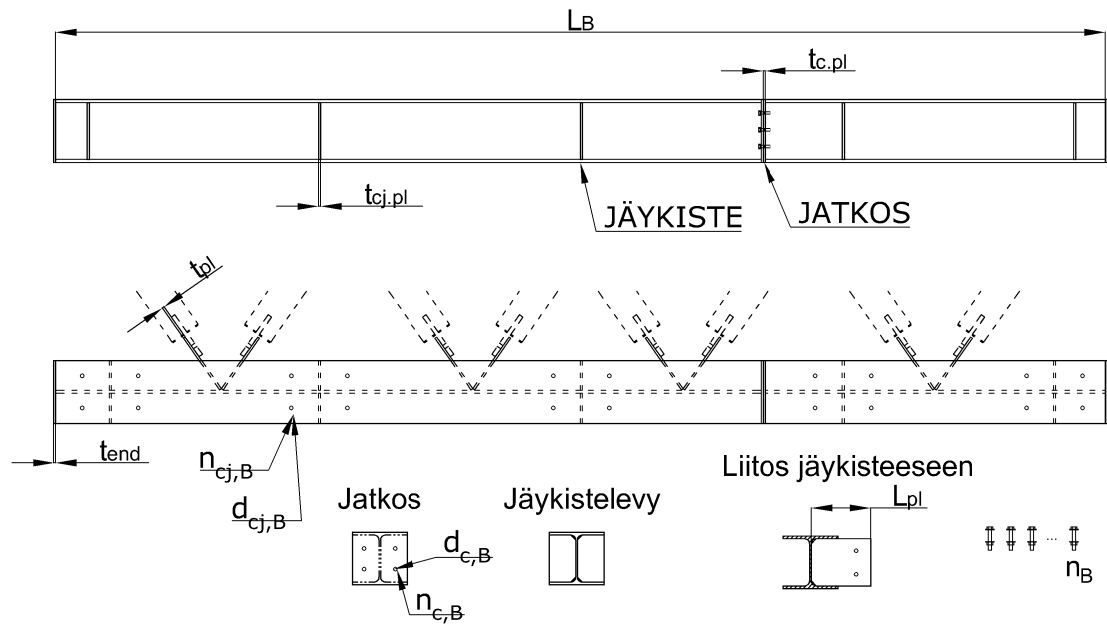
Parametrin selite	Parametrin tunnus	Arvo	Yksikkö
Pilarin liitoslevyn pituus	$L_{c,j,pl}$	350	mm
Pilarin liitoslevyn leveys	$b_{c,j,pl}$	350	mm
Pilarin liitoslevyn ainevahvuus	$t_{c,j,pl}$	10	mm
Jatkoslevyn ainevahvuus	$t_{c,pl}$	10	mm
Liitoslevyn ainevahvuus	t_{pl}	10	mm
Reiän halkaisija	$d_{c,j,B}$	18	mm
Reiän halkaisija	$d_{c,B}$	18	mm
Pulttien määrä	$n_{c,j,B}$	2	mm
Pulttien määrä	$n_{c,B}$	4	mm
Päätylevyn ainevahvuus	t_{end}	5	mm
Hitsien a-mitta	a	5	mm

Taulukko 3.3. Alapaarteen liittyvien osien vakioimitat ja -määrät.

Parametrin selite	Parametrin tunnus	Arvo	Yksikkö
Jatkoslevyjen pituus	$L_{s,pl}$	500	mm
Liitoslevyn pituus	L_{pl}	400	mm
Levyjen ainevahvuus	t_{pl}	20	mm
Hahlon syvyys	L_{slot}	250	mm
Liitoslevyjen välys	d_{spc}	50	mm
Pulttien määrä	n_B	12	kpl
Reiän halkaisija	d_B	26	mm
Hitsien a-mitta	a	10	mm

Päätypalkkina työssä käytetään valssattua leveälappaprofilia (HEA). Kokoonpano muodostuu pääprofiilista, jäykisteristikon liitoslevyistä, päätypilarien kohdalle asetettavista jäykistelevyistä, jatkoslevyistä liittimiseen, päätylevyistä sekä liittimistä, joilla kokoonpano liitetään päädyn pilareihin. Kuvassa 3.16 on esitetty päätypalkkikokoonpanon rakenne sekä taulukossa 3.4 on esitetty työssä käytettävien liitososien vakiodimensiot. Liitos- sekä jäykistelevyjen korkeus on parametrisoitu siten, että se vastaa päätypalkin profiilin uuman korkeutta. Jatkoslevyn korkeus ja leveys vastaa profiilin dimensioita. Liitoslevyn pituus on parametrisoitu siten, että se ulottuu 100 mm palkin reunan ulkopuolelle. Jäykisteristi-

kon liitoslevyissä pulttien määrä ja koko määräytyy jäykisteprofilin perusteella.



Kuva 3.16. Työssä tutkittavan päätypalkkikokoonpanon rakenne ja rakenteen osien dimensioparametrit.

Taulukko 3.4. Päätypalkkiin liittyvien osien vakiomitat ja -määrät.

Parametrin selite	Parametrin tunnus	Arvo	Yksikkö
Jatkoslevyn ainevahvuus	$t_{c,pl}$	20	mm
Jäykistelevyn ainevahvuus	$t_{cj,pl}$	10	mm
Päätylevyn ainevahvuus	$t_{end,pl}$	10	mm
Pulttien määrä	$n_{cj,B}$	4	kpl
Pulttien määrä	$n_{c,B}$	6	kpl
Reiän halkaisija	$d_{cj,B}$	18	mm
Reiän halkaisija	$d_{c,B}$	18	mm
Hitsien a-mitta	a	10	mm

Työssä käytetään teräsosien pintakäsittelyyn epoksimaalausjärjestelmää, jonka kuivakalvon paksuus on $100 \mu m$. Maalin kuivapartikkelien suhteellisenä osuutena käytetään arvoa 45 %.

Asennuskustannuksista huomioidaan ainoastaan jäykisterakenteiden asennuskustannukset, sillä pääkannatinristikon ja päätypalkin asennuskustannukset ovat valitun rakenteen topologiassa optimoinnista riippumatta aina saman suuruiset. Asennuskustannuksista tässä työssä huomioidaan rakenteen vastaanotto, välivarastointi työmaalla, nosto ja asennus. Kokonaisasennuskustannus teräskokoonpanolle määritetään kaavan (3.10) mukaan.

$$C_E = \sum \frac{T_{E,i}}{n_{E,i}} (\sum c_{E,i,j}) \quad (3.10)$$

Kaavassa $T_{E,i}$ tarkoittaa työvaiheen i työmenekkiä (t_{th}), $n_{E,i}$ työvaiheeseen osallistuvien työntekijöiden lukumäärää (tt) ja $c_{E,i,j}$ työvaiheeseen i osallistuvan kustannustekijän j aikaperusteista kustannusta (€/h). Kustannusten muodostamiseen käytettävät työmenekit ja työkustannukset on esitetty liitteessä B. Työmenekit jäykisterakenteille on määritelty Rakennustieto Oy:n Talo-Ratu -ohjekorttisarjan Teräsrunkotyön ohjeistuksessa (Ratu 0409 2013). Tässä työssä käytetään jäykisteen painosta riippumatta ohjeistuksen työmenekkejä yli 100 kg painoiselle teräsrakenteelle. Työkustannukset on määritelty Rakennustiedon RT-kustannuslaskentapalvelun (Rakennustieto Oy 2018) hinnaston perusteella.

Liitteessä C on esitetty esimerkkilaskelma sideputkipalkin kustannusten laskennasta. Esimerkkilaskelmassa käytetty profiili on SHS 100 x 5 ja liitoslevyt sekä kokoonpanon muut ominaisuudet ovat tässä kappaleessa esitettyjen mukaisia. Laskennassa on saatu kokoonpanon materiaalikustannuksiksi 82,2 €, valmistuskustannuksiksi 96,2 € ja asennuskustannuksiksi 74,4 €. Näin ollen kyseisen sideputkipalkin kokonaiskustannus on 252,8 €.

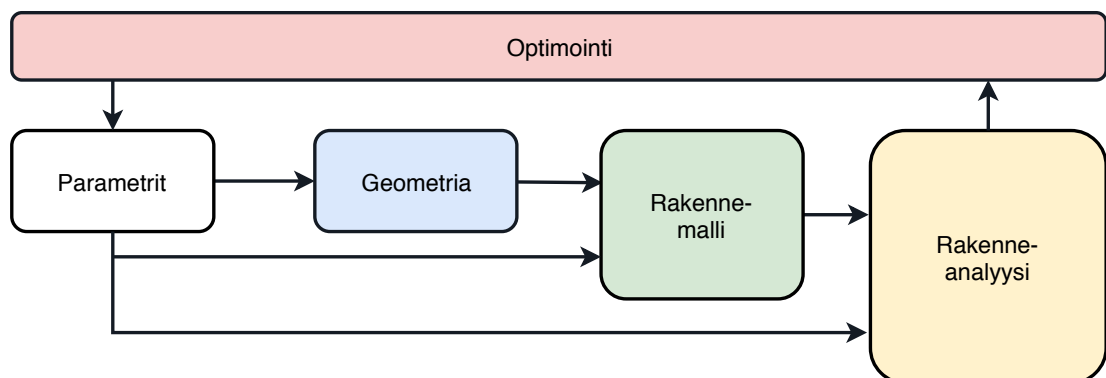
4. KATTOJÄYKISTYKSEN OPTIMOINTISOVELLUS GRASSHOPPERILLA

4.1 Sovelluksen toimintaperiaate

Tässä diplomityössä tehtävän tutkimuksen toimintaympäristöksi on toteutettu Grasshopper-ympäristössä Karamba3D-työkalua hyödyntäen teräsrakenteisen hallin parametrinen rakenteen mallinnus ja analysointisovellus. Sovelluksen optimointitoiminto käyttää rakennemallia optimointiin, ja työssä tehty tutkimus on näin toteutettu kokonaan työkalua käyttäen. Sovelluksen rakenne pohjautuu Makriksen (2013) opinnäytetyössään toteuttamaan avaruusristikon parametriseen mallinnus- ja optimointityökaluun. Sovelluksen rakenne on lohkotettu viiteen osioon:

1. Parametrien syöttäminen
2. Rakenteen geometrian luonti
3. Rakennemallin luonti
4. Rakenneanalyysi ja tulosten esittäminen
5. Optimointikomponentti

Sovelluksen eri lohkoja ja niiden välistä toimintaa on havainnollistettu kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Grasshopper-sovelluksen lohkotus ja toimintaperiaate.

Parametrien syöttäminen toteutetaan Grasshopperin Slider -komponenteilla, jotka toimivat numeerisina muuttujina ohjelman muille osille. Käyttäjä käyttää komponentteja sovelluksen toimintojen toteuttamiseen ja säätämiseen. Komponentteihin on asetettu ylä- ja alaraja-arvot sekä tarkkuustoleranssi, jolla parametri annetaan. Lisäksi sovelluksessa on

muutamia totuusarvoparametreja sekä valikkoparametreja, jotka liittyvät erilaisten geometriavaihtoehtojen valintaan. Erilaiset parametrit käydään läpi kappaleessa 4.2.

Rakenteen geometrian luonnilla tarkoitetaan Rhinoceros 3D -näkymän tulostettavien graafisten komponenttien luomista. Geometriakomponenttien myöhempi käyttö rakennemallin osana asettaa reunaehdoja geometriakomponenttien luomiselle. Hallin geometria muodostuu viiva- ja pistekomponenteista, jotka muodostetaan käyttäjän syöttämien parametrien mukaisesti. Parametrisoidun geometrian luonti käydään läpi kappaleessa 4.2.

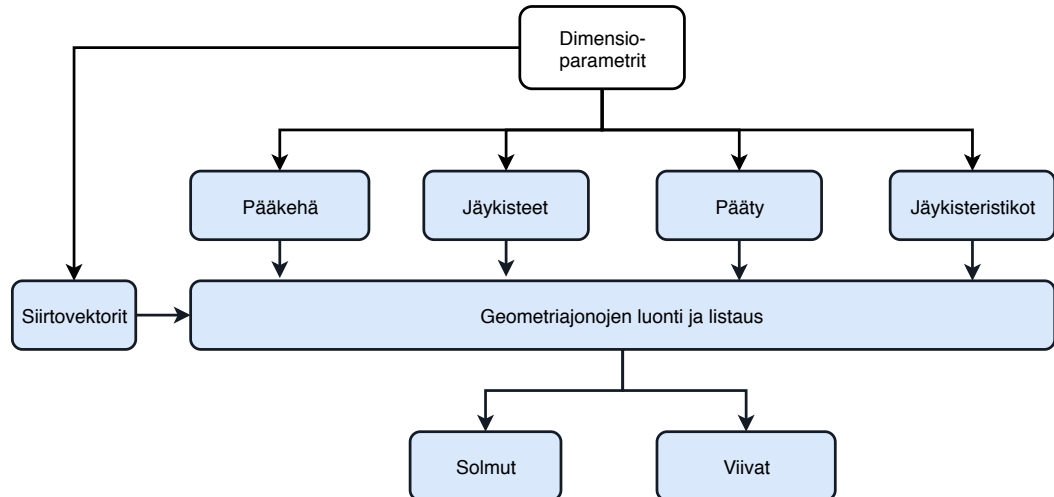
Kun hallirakennuksen geometria on luotu, muodostetaan siitä rakennemalli Karamba3D-työkalulla. Komponentti muodostaa rakennemallin sille syötettyjen geometriaparametrien sekä käyttäjän syöttämien kuorma-, poikkileikkaus- ja materiaaliparametrien perusteella. Rakennemallin luonti ei tarkoita rakenneanalyysin tekemistä, vaan se on eritelty omaksi kokonaisuudekseen. Makris (2013) eritteli rakennemallin luomisen ja rakenneanalyysin erikseen termeillä *simulation* ja *analysis*. Rakennemallin luonti käydään läpi kappaleessa 4.3.

Rakennemallista suoritetaan rakenneanalyysi sekä rakenteiden mitoitus Karamban analyysikomponenteilla. Rakenneanalyysillä tarkoitetaan rakenteiden siirtymien ja rasitusten määrittämistä FEM-analyysillä. Mitoituksella tarkoitetaan rakenteille asetettujen poikkileikkausten perusteella tehtävää kestävyyslaskentaa ja sen perusteella tehtävää käyttöasteen laskentaa. Karamba tekee rakenteiden mitoituksen Eurokoodi 3:n mukaisesti. Rakenneanalyysin tekeminen ja rakenteiden mitoitus sekä mitoituskaavat käydään läpi kappaleessa 4.4.

Diplomityön tutkimuksellinen osa eli kattojäykisteiden optimointi toteutetaan Grasshopperin Galapagos-optimointikomponentilla. Galapagos on Grasshopperin ympäristöön kuuluva optimointikomponentti, jolla voidaan suorittaa optimointia perustuen joko evoluutioalgoritmiin tai *simulated annealing* -menetelmään. Optimointikomponentille syötetään parametreiksi eli suunnittelumuuttujiksi tietty joukko dimensio- ja poikkileikkausparametreista ja optimointi suoritetaan näiden suhteen. Optimoinnin kuntoisuusfunktio määrittellään rakenteen hyväksyttävyyden mukaisista reunaehdoista. Optimointikomponenttia ja sen toimintaa käsitellään kappaleessa 4.5.

4.2 Hallirakennuksen geometrian parametrusointi

Hallin geometria muodostetaan numeerisilla parametreilla. Hallin geometrialla tarkoitetaan rakennemallille syötettävien viivojen ja solmupisteiden sijaintitiedon luomista. Rakennemallissa viivageometrioille lisätään materiaali- ja poikkileikkaustiedot sekä solmupistegeometrioille kuorma- ja tuentatiedot. Tätä diplomityötä varten luodussa sovelluksessa geometria ja geometrioiden luonti on jaettu pääkehän, katto-orsien, päädyn sekä jäykisteristikon geometrioiden luontiin. Geometria muodostetaan kuvan 4.2 periaatteen mukaisesti.



Kuva 4.2. Parametrisen rakennemallin geometrian luonnin periaate.

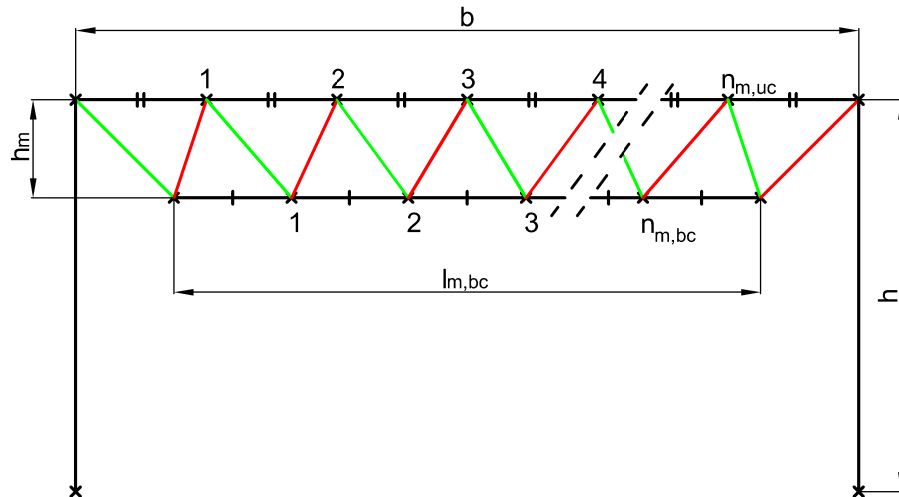
Jokaisesta rungon osan geometriasta luodaan aluksi yksi kappale, joka alkaa mallin origopisteestä ja sijaitsee origopisteen kautta kulkevassa XZ-, YZ tai XY-tasossa. Tämän jälkeen ne siirretään ja kopioidaan haluttuihin paikkoihin muodostaen näin rakennuksen rungon kokonaismallin. Näitä origopisteeseen luotavia geometrioita kutsutaan alkeisgeometrioiksi. Nämä alkeisgeometriat ovat pääkehä, jäykisteet, pääty ja jäykisteristikot kuvan 4.2 mukaisesti.

Pääkehän geometria muodostuu pääkannatinristikosta sekä pääpilareista. Pääkannatinristikko muodostuu edelleen ylä- ja alapaarteesta sekä niitä yhdistävistä diagonaaleista. Pääkehä muodostetaan taulukon 4.1 mukaisilla parametreilla.

Taulukko 4.1. Pääkehän parametrit.

Parametrin selite	Tunnus
Hallin leveys	b
Hallin korkeus	h
Alapaarteen pituus	$l_{m,bc}$
Pääkannatinristikon korkeus	h_m
Diagonaalien lukumäärä	d_m
Alkukaarevuus	$\Delta_{0,m}$

Ristikon diagonaalien geometria muodostetaan parametrisoimalla niiden lukumäärää siten että solmupisteiden etäisyys on vakio diagonaalien lukumäärästä riippuen. Näin saadaan aikaiseksi kuvan 3.7 mukainen portaittainen puristusvoima. Katto-orsille kohdistuva jäykistysvoima saadaan aikaiseksi mallintamalla kattoristikon paarteet kaareviksi siten, että jännevälän keskellä paarteen epäkeskisyyden alkukaarevuuden $\Delta_{0,m}$ suuruinen. Tämä toteutetaan muodostamalla paarteiden käyrät Grasshopperin Arc -komponentilla. Komponentti muodostaa sille annetun kolmen pisteen kautta kulkevan ympyrän kaaren. Alkukaarevuuden arvona käytetään tässä diplomityössä Eurokoodi 3:n mukaista arvoa $b/500$ (Eurokoodi 3 kaava 5.12). Pääkehän parametrisointia on havainnollistettu kuvassa 4.3.



Kuva 4.3. Pääkehän geometrian parametrisointi.

Diagonaalit muodostetaan lisäämällä pääkannatinristikon yläpaarteelle solmuja parametrim $n_{m,uc}$ mukainen määrä ja alapaarteelle parametrim $n_{m,bc}$ mukainen määrä. Solmujen määrällä ja diagonaalien lukumäärällä on kaavan 4.1 mukainen yhteys. Diagonaalien lukumäärän määrittävä parametri on parillinen kokonaisluku.

$$\begin{aligned} n_{m,uc} &= \frac{d_m}{2} - 1 \\ n_{m,bc} &= n_{m,uc} - 1 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Alapaarteen pituus voidaan määrittää käyttämällä parametria $l_{m,bc}$. Tässä diplomityössä tehtävässä tutkimuksessa pääkannatinristikon jokaisen diagonaalien diagonaalikulma on sama. Määrittämällä alapaarteen pituus parametrisesti diagonaalien määrän ja jännevälän suhteessa, saadaan jokaisen diagonaalien ja paarteiden välinen kulma saman suuruiseksi. Alapaarteen pituus määritetään tässä diplomityössä kaavalla (4.2).

$$l_{m,bc} = b \left(1 - \frac{2}{d_m} \right) \quad (4.2)$$

Solmupisteet muodostetaan Grasshopperin Divide Curve -komponentilla. Komponentille syötetään käyrägeometria sekä kokonaislukuarvo. Komponentti sijoittaa annetulle käyrälle vakiojaolla solmupisteitä kokonaislukuarvon mukaisen määrän ja pilkkoo käyrän solmupisteiden välisiin osiin. Ylä- ja alapaarteen solmupisteistä muodostetaan tämän jälkeen listamuuttujat. Solmujen välille muodostetaan viivageometria Line -komponentilla. Komponentti muodostaa viivageometrian listamuuttujassa samalla indeksillä olevien solmupisteiden välille. Jotta diagonaalit muodostuisivat oikein, on oikealta vasemmalle ja vasemmalta oikealle kulkevat viivat muodostettava erikseen. Kuvassa 4.3 tätä on havainnollistettu punaisilla ja vihreillä viivoilla. Kuvassa vihreällä esitetyt viivat muodostetaan

siten, että yläpaarten solmupisteet sisältävästä listamuuttujasta on poistettu viimeinen alkio ja vastaavasti punaisella esitetyt viivat siten, että listamuuttujasta on poistettu ensimmäinen alkio.

Katto-orret sijoitetaan pääkannatinristikon yläpaarteiden väliin kohtisuoraan paarten suuntaan nähden. Katto-orret sijoitetaan jokaisen pääkehän väliin, lukuun ottamatta jäykistäviä kehävälejä eli niitä kehävälejä, jolla katon jäykisteristikko sijaitsee. Jokaisen yksittäisen katto-orren sijainti yläpaarten pituudella annetaan omana suhdelukuparametrina $p_{pur,n}$, jonka arvo on $0,0...1,0$. Suhdelukuparametrin avulla pääkannattimen yläpaarteelle luodaan solmupisteet Evaluate length -komponentilla. Komponentti luo solmupisteiden suhdelukuparametrilla sille osoitettuun sijaintiin annetun käyrän pituudella.

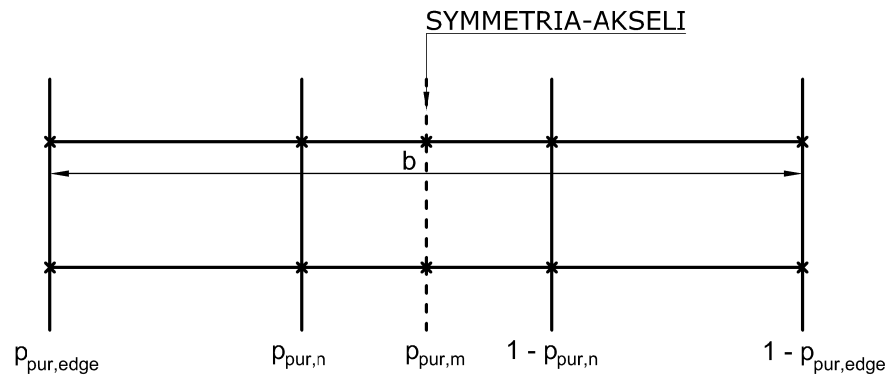
Jotta hallin katosta saadaan pääkannattimen jännevälän keskipisteen kautta kulkevan ja hallin pituussuuntaisen akselin suhteen symmetrinen, ohjataan yhdellä parametrilla kahdelta toisilleen tämän akselin suhteen peilikuvana toimivaa katto-ortta. Lisäksi totuusarvoparametrilla $p_{pur,m}$ sijoitetaan yksittäinen katto-orso jännevälän keskelle. Katto-orren pituus on pääkehien välinen etäisyys, joka ei ole käyttäjän antama dimensioparametri, vaan se lasketaan parametreina annettujen hallin kokonaispituuden l ja pääkehien lukumäärän d_m perusteella. Katto-orsien muodostamiseen tarvittavat parametrit on lueteltu taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2. Katto-orsien muodostamiseen tarvittavat parametrit.

Parametrin selite	Tunnus
Hallin pituus	l
Pääkehien lukumäärä	d_m
Keskimmäinen katto-orso	$p_{pur,m}$
Orsilinjan 1 sijainti	$p_{pur,A}$
Orsilinjan 2 sijainti	$p_{pur,B}$
Orsilinjan 3 sijainti	$p_{pur,C}$
⋮	⋮
Orsilinjan n sijainti	$p_{pur,n}$

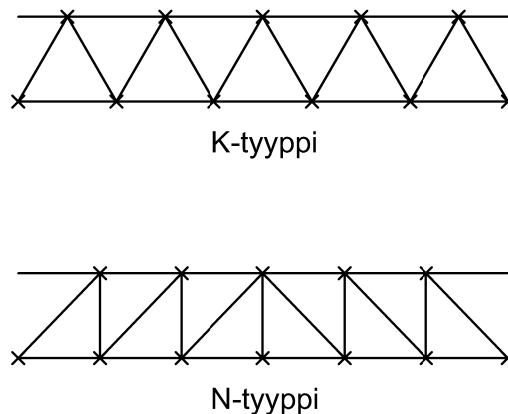
Katto-orsien lisäksi pääkehien väliin pääpilareiden yläpäiden väliin sijoitetaan reunapalkki. Reunapalkit ovat geometrialtaan samanlaisia kuin katto-orret, niiden triviaalinen sijaintiparametri on $p_{pur,edge} = 0$ ja käyttäjä ei täten voi vaikuttaa reunapalkkien geometriaan. Katto-orsien ja reunapalkkien parametrinen sijoittelu on havainnollistettu kuvassa 4.4.

Hallin pääty muodostuu päätypalkista sekä päätypilareista. Päätypilareilla ei tässä diplomityössä ole jäykistävää vaikutusta, joten ne mallinnetaan ainoastaan solmupisteinä päätypalkille. Rakennemallissa näihin pisteisiin lisätään tuenta ja päädyn vaakakuorma. Tuen tyyppi määritellään rakennemallin luonnin yhteydessä ja tuennat esitellään kappaleessa 4.3. Päätypilareiden lukumäärää säädetään parametrilla d_{end} ja solmupisteet muodostetaan päätypalkille vakiojaolla käyttäen Divide Curve -komponenttia.



Kuva 4.4. Katto-orsien ja reunapalkkien geometrian parametrusointi.

Jäykisteristikko muodostuu diagonaalisauvoista. Sauvat muodostetaan lisäämällä solmupisteet jäykistävän kehävälän pääkannattimien yläpaarteille ja luomalla viivageometriat näiden solmujen välille. Tässä diplomityössä tutkittavat jäykisteristikon geometriat ovat N- ja K-tyyppin ristikot. Näitä on havainnollistettu kuvassa 4.5.



Kuva 4.5. Jäykisteristikon erilaiset geometriavaihtoehdot.

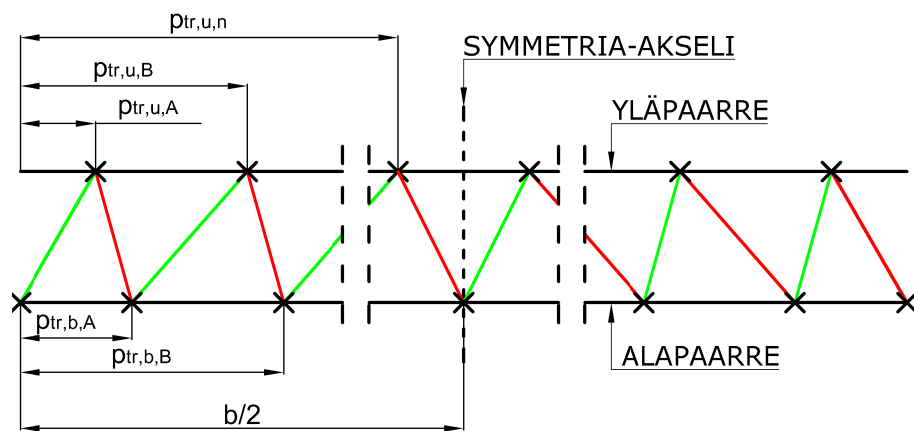
Jäykisteristikon jokainen solmupiste syötetään omana parametrinaan. Parametrit ovat suhdelukuparametreja samaan tapaan, kuin katto-orsien parametrit ja solmupisteet luodaan Evaluate length -komponentin avulla. Jäykisteristikko on myös katto-orsien sijoittelun tapaan symmetrinen hallin pituussuuntaisen keskiakselin suhteen. Solmupisteiden parametrit on jaettu jäykisteristikon hallin päädyn puoleisiin ja hallin keskiosan puoleisiin parametreihin. Yksinkertaistuksen vuoksi käytetään tässä jatkossa termejä jäykisteristikon yläpaarre hallin keskiosan puoleiselle paarteelle ja alapaarre päätypalkin puoleiselle paarteelle.

Solmupisteiden sijoittelu riippuu valitusta geometriatyypistä. K-tyyppin ristikossa sekä ylä- että alapaarten solmupisteitä säädelään omina parametreinaan. N-tyyppin ristikossa ylä- ja alapaarten vastaavia solmupisteitä voidaan säädellä kumpaakin yhdellä parametrilla, sillä solmupisteet sijaitsevat paarten pituusakselin suhteen samassa pisteessä. Solmupisteet luodaan taulukon 4.3 parametreilla.

Taulukko 4.3. Jäykisteristikon parametrit.

Parametrin selite	Tunnus
Geometrian tyyppi	G_{tr}
Ristikon koko	d_{tr}
Solmupisteen A sijainti yläpaarteella	$p_{tr,u,A}$
Solmupisteen B sijainti yläpaarteella	$p_{tr,u,B}$
Solmupisteen C sijainti yläpaarteella	$p_{tr,u,C}$
⋮	⋮
Solmupisteen n sijainti yläpaarteella	$p_{tr,u,n}$
Solmupisteen A sijainti alapaarteella	$p_{tr,b,A}$
Solmupisteen B sijainti alapaarteella	$p_{tr,b,B}$
Solmupisteen C sijainti alapaarteella	$p_{tr,b,C}$
⋮	⋮
Solmupisteen n sijainti alapaarteella	$p_{tr,b,n}$

Kuvassa 4.6 on havainnollistettu jäykisteristikon parametrisointia. Pääkannatinristikon tapaan myös jäykisteristikon diagonaalisauvat jaetaan oikealta vasemmalle ja vasemmalta oikealle liittyviin viivoihin. Näitä on esitetty kuvassa 4.6 punaisilla ja vihreillä viivoilla. Diagonaaliiviivojen muodostamistapa on täten sama kuin pääkannatinristikon diagonaaleilla, mikä on esitetty pääkannatinristikon parametrisoinnin yhteydessä.

**Kuva 4.6.** Jäykisteristikon solmupisteiden ja sauvojen parametrisointi.

Taulukon 4.3 parametrien lisäksi sovellukseen on toteutettu mahdollisuus muuttaa jäykistävän kehävälän etäisyyttä (jäykisteristikon korkeus), jäykisteristikon sijaintia eli mahdollisuus valita mille kehävälille jäykisteristikot sijoitetaan sekä jäykisteristikoiden keskinäinen peilaaminen. Näitä ei kuitenkaan käytetä tässä diplomityössä optimoinnin parametreina.

Pääkannatinristikon yläpaarteen viivageometrialle muodostetaan edellisten kohtien mukaisesti solmupisteet pääkannattimen diagonaaleille, katto-orsille sekä jäykisteristikon diagonaaleille. Jotta geometrioista voitaisiin muodostaa rakennemalli, on jokaisen raken-

nemalliin kuuluvan viivageometrian alettava solmupisteestä ja päätyttävä solmupisteeseen. Rakennemallille ei voida siis syöttää viivageometrioita, jotka jatkuvat solmupisteiden yli. Tämän vuoksi jatkuvien rakenteiden, kuten pääkannatinristikon yläpaarten ja päätypalkin geometriat luodaan uudelleen muodostamalla viivageometria niillä olevien solmupisteiden välille. Ensin kaikki solmupisteet tuodaan yhteen listamuuttujaan, jonka jälkeen solmupisteet järjestetään nousevaan järjestykseen niiden x-koordinaatin perusteella. Tämän jälkeen listamuuttuja kopioidaan ja toisesta listamuuttujasta poistetaan ensimmäinen alkio ja toisesta viimeinen alkio. Listamuuttujien sisältämien solmupisteiden välille muodostetaan tämän jälkeen viivageometriat Line -komponentilla. Näin solmupisteiden välille saadaan muodostettua yhtenäinen viivojen jono. Samaa periaatetta käytettiin myös pääkannatinristikon ja jäykisteristikon diagonaalien muodostamisessa.

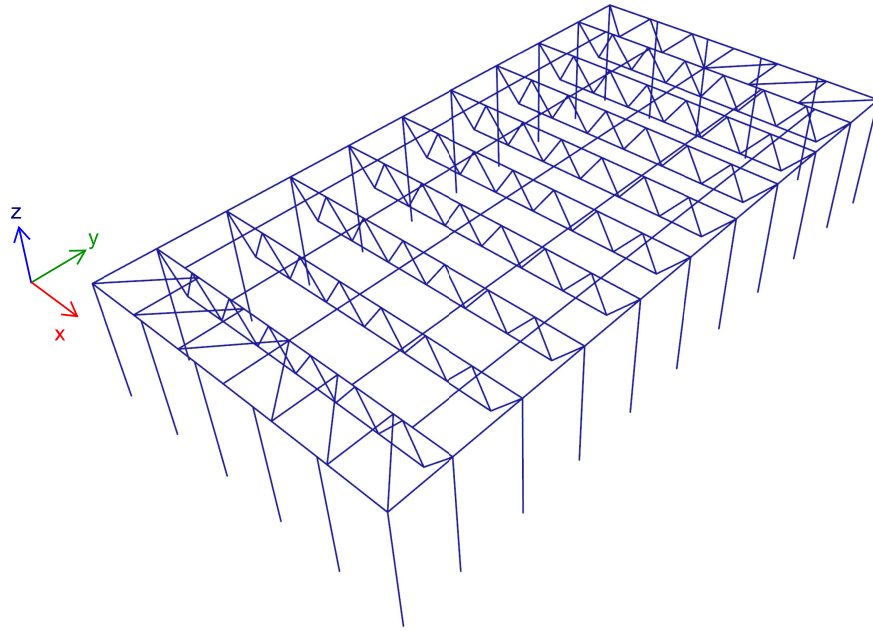
Kun alkeisgeometriat on luotu mallin origopisteeseen, ne siirretään ja kopioidaan haluttuihin paikkoihin käyttäen Grasshopperin Move ja Linear Array -komponentteja. Komponenteille syötetään siirrettävä käyrägeometria sekä siirtovektori, eli suunta ja etäisyys johon geometria siirretään. Linear Array -komponentille annetaan lisäksi kokonaislukuarvo, jonka mukaan se muodostaa annetusta geometriasta säännöllisen jonon, jossa geometrioiden välinen etäisyys on siirtovektorin suuruinen. Tätä komponenttia käytetään säännöllisesti toistuvien rakenteiden geometrioiden luomiseen. Hallin kokonaisgeometria on havainnollistettu kuvassa 4.7.

Viivageometrioiden lisäksi rakennemallia varten luodaan solmupistegeometriat. Solmupisteitä käytetään rakennemallissa tuentojen sekä pistekuormien syöttämiseen. Geometrian luontivaiheessa luotavat solmupisteet ovat pääpilarien alapään solmupisteet, päätypilarien liittymissolmupisteet päätypalkille sekä pääkannatinristikon diagonaalien liittymissolmupisteet yläpaarteelle. Solmupisteitä ei luoda uudelleen, vaan ne poimitaan viivageometrioiden luonnin yhteydessä, ja näistä luodaan geometriajonot samaan tapaan kuin viivageometrioista.

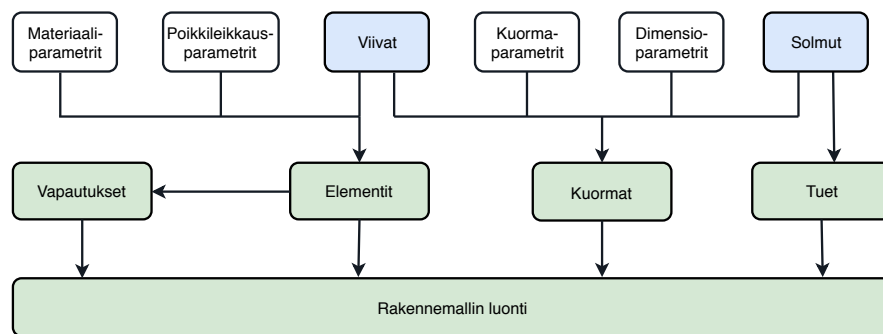
4.3 Rakennemalli Karamba 3D-työkalulla ja kustannusten laskenta

Rakennemallin toteutus jaetaan tässä diplomityössä mallin muodostamiseen ja mallin analysointiin. Rakennemallin muodostusvaiheessa rakennemallille syötetään geometriatiedot, joiden luominen esitettiin edellisessä kappaleessa 4.2. Rakennemalli kootaan Karamban Assemble model -komponentilla, joka muodostaa rakennemallin sille annettavista elementeistä, tuennoista, kuormista ja vapautusasteista. Rakennemalli muodostetaan kuvan 4.8 periaatteen mukaisesti.

Viivageometrioista muodostetaan elementtejä Karamban Line to Beam -komponentilla. Komponentille syötetään haluttu viivageometria tai geometrioiden sarja listamuuttujana, poikkileikkaustieto sekä elementin tunnus (id). Karambassa poikkileikkaustieto sisältää kaikki poikkileikkauksen analysointiin tarvittavat mitta- ja poikkileikkausarvot ja ne



Kuva 4.7. Hallin geometria kokonaisuudessaan Rhinoceros-näkymässä.



Kuva 4.8. Rakennemallin luonnin periaate.

syötetään ohjelmalle Excel-taulukkomuodossa. Poikkileikkauksista muodostetaan poikkileikkausperheitä, jotka muodostuvat keskenään samankaltaisista teräsprofileista. Näitä ovat esimerkiksi IPE, HEA, RHS ja SHS -profiliperheet. Poikkileikkausperheen valinta tehdään Karamban Cross section range selector -komponentilla, jolla valitaan poikkileikkausperhe ja komponentti antaa lähtötietonaan kyseisen poikkileikkausperheen kaikki poikkileikkaukset listamuuttujana. Tämän jälkeen Cross section selector -työkalulla valitaan listasta haluttu poikkileikkaus ja se syötetään elementille. Eri elementtien nimet ja tunnukset on esitetty taulukossa 4.4

Myös materiaalitieto sisältyy poikkileikkauksen tietoihin. Koska tässä diplomityössä käytetään samaa teräslautua koko rakennuksessa, syötetään materiaalitieto jo poikkileikkausperheen määrittelyvaiheessa. Tällöin jokainen poikkileikkausperheen poikkileikkaus käyttää perheelle määritettyä materiaalia, eikä sitä tarvitse määrittää jokaiselle poikkileikkaukselle erikseen. Materiaalitieto määritetään Karamban Material select -komponentilla,

Taulukko 4.4. Rakennemallin elementtien selitteet ja tunnukset.

Elementin selite	Tunnus
Pääpilari	mn_column
Pääkannattimen yläpaarre	mn_truss_upper_chord
Pääkannattimen alapaarre	mn_truss_lower_chord
Pääkannattimen diagonaali	mn_truss_diagonal
Katto-orisi	roof_brace
Reunapalkki	edge_beam
Jäykisteristikon diagonaali	brace_truss_diagonal
Jäykisteristikon vertikaali	brace_truss_vertical
Päätypalkki	end_beam

jonka lähtötieto syötetään Cross section range -komponentille.

Tuennat muodostetaan Karamban Support-komponentilla. Komponentille syötetään pistegeometria sekä tuen vapausasteet. Tässä diplomityössä hallin pääpilarit toimivat mastoina molempiin suuntiin, joten pääpilarin alapään tuenta mallinnetaan kaikkiin suuntiin jäykkänä ja kiinteänä tukena. Päätypilarit toimivat ainoastaan pystykuormaa kantavina tukina, joten niiden kohdalle mallinnetaan päätypalkille nivelellinen tuki, joka on kiinteä z-suunnassa. Katon pituussuuntainen tuenta toteutetaan lisäämällä jäykisteristikon kehälle reunapalkin kohdalle y-suuntaan kiinteä nivelellinen tuki. Tällä korvataan pitkän sivun vinojäykiste, jota ei tässä diplomityössä mallinneta.

Rakennemalli liittyy kaikki toisiinsa liittyvät elementit jäykästi, ellei niille määritä erikseen vapautusta (Preisinger 2016). Elementeille määritetään vapautukset Karamban Beam joints -komponentilla. Komponentille syötetään elementin tunnus ja valitaan elementin alku- ja loppupään vapautusasteet. Vapautusasteet määritellään elementin lokaalissa koordinaatistossa, jotka on esitetty liitteessä A. Tämän diplomityön rakennemallissa kaikki eri elementit liittyvät toisiinsa nivelellisesti, lukuun ottamatta jatkuvia rakenteita eli pääkannattimen ala- ja yläpaarretta sekä päätypalkkia. Elementtien vapautukset on esitetty taulukossa 4.5.

Taulukko 4.5. Rakennemalliin elementeille annetut vapautukset. Vapautukset ilmoitettu elementtien lokaalissa koordinaatistossa.

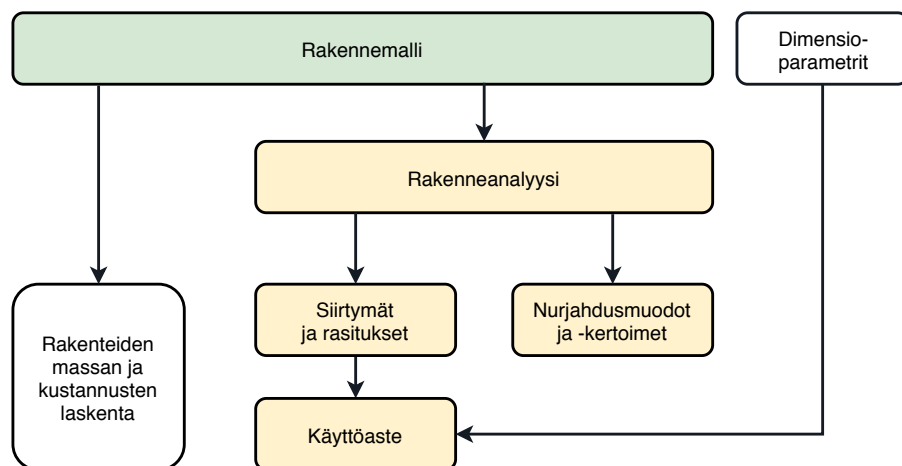
Elementin selite	Alkupää		Loppupää	
	Siirtymä	Kiertymä	Siirtymä	Kiertymä
Pääpilari				x y
Pääkannattimen yläpaarre				
Pääkannattimen alapaarre				
Pääkannattimen diagonaali		y		y
Katto-orisi		y z		y z
Reunapalkki		y z		y z
Jäykisteristikon diagonaali		y z		y z
Jäykisteristikon vertikaali		y z		y z
Päätypalkki				

Kuormat syötetään rakennemalliin Karamban Loads-komponentilla. Komponentilla voidaan määrittää joko piste- tai viivakuormia. Lisäksi komponentilla määritetään elementtien omasta painosta aiheutuva kuorma (*gravity load*). Putoamiskiihtyvyyden arvona käytetään $10,0 \text{ m/s}^2$, jota Karamba käyttää oletusarvona. Kuormaa varten komponentille syötetään kuormatyyppistä riippuen joko piste- tai viivageometria sekä kuormavektori. Kuormavektori sisältää kuorman suuruuden ja suunnan vektorimuotoisena muuttujana. Pystykuormat syötetään pääkannatinristikon yläpaarteelle ja päätypalkille viivakuormana. Koska tässä diplomityössä tarkastellaan kattojäkistykseen toimintaa ainoastaan hallin pituus-suunnassa, on vaakakuormana ainoastaan hallin pituus-suuntainen tuulikuorma, joka syötetään päätypalkille pistekuormana päätypilarien solmupisteiden kohdalle. Kuormat annetaan numeerisina parametreina pinta-alakuormina (kN/m^2) ja muunnetaan hallin dimensioiden perusteella viiva- ja pistekuormiksi. Erillistä kuormitusyhdistelyä ei tehdä, vaan kuormat tarkastellaan Karambassa aina kuormitustapauskohtaisesti ja myös tässä diplomityössä rakenteiden optimointi tehdään kuormitustapauksittain.

Rakennemallin luontikomponentilta (*Assemble model*) saadaan lähtötietoina suoraan rakenteiden massat. Rakenteiden kustannusten määrittämiseen ohjelmaan on ohjelmoitu Python-skriptit, jotka määrittävät rakenteiden kustannustiedot. Skriptille syötetään rakennemallilta laskettavan rakenteen poikkileikkaustieto sekä pituus. Muut kustannukset lasketaan skriptille syötettävien vakiodimensioiden mukaan, jotka on esitetty kappaleen 3.4 taulukoissa. Laskenta tapahtuu liitteen C esimerkkilaskennan periaatteen mukaisesti.

4.4 Rakenneanalyysi ja mitoitus Karamba3D-työkalulla

Mallin analysointivaiheessa suoritetaan rakennelaskenta tekemällä FEM-rakenneanalyysi ja määrittämällä rakenteille Eurokoodi 3 mukaiset käyttöasteet. Lisäksi rakenneanalyysin tuloksena saaduista siirtymä- ja rasitustiedoista luodaan käyttäjälle tulosteet. Näitä käytetään myös optimoinnissa hyödyksi. Rakenneanalyysi- ja mitoitusprosessia havainnollistetaan kuvassa 4.9.



Kuva 4.9. Rakenneanalyysin ja rakenteiden Eurokoodi 3 mukaisen mitoituksen periaate.

Kun rakennemalli on luotu, suoritetaan FEM-analyysi valitun kertaluvun mukaan. Karambassa on käytössä ensimmäisen kertaluvun laskentaan AnalyzeThI ja vastaavasti toisen kertaluvun laskentaan AnalyzeThII -komponentit. Toisen kertaluvun laskentakomponentti suorittaa rakenneanalyysin perustuen siirtomatriisimenetelmään (*finite-element transfer-matrix method, FE-TMM*), jossa toisen kertaluvun siirtymätila ratkaistaan käyttäen ennalta määritettyjä funktioita (Rubin 1996) sijoittamalla ne siirtomatriisiin. Numeerinen laskenta suoritetaan käyttämällä potenssisarjakehitelmää. (Preisinger 2018) Rakennelaskentakomponentille syötetään Assemble Model -komponentilla koottu rakennemalli. Lisäksi toisen kertaluvun laskentaa varten komponentille syötetään laskennan sarjakehitelmää varten tarvittavien iterointikertojen yläraja-arvo sekä suppenemistoleranssi (*convergence tolerance*). Komponentti suorittaa iterointeja kunnes määritetty suppenemistoleranssi saavutetaan tai iterointien suurin sallittu määrä saavutetaan.

Rakennelaskentakomponentti antaa lähtötietona rakennemallin, joka sisältää FEM-laskennan mukaiset siirtymät sekä elementtien rasitukset. Tuloksia tarkastellaan ja esitetään käyttäjälle Karamban Beam Forces sekä Beam Displacement -komponenteilla. Komponentit antavat sille elementtitunnuksella osoitettujen elementtien rasitukset sekä siirtymät listamuuttujana. Beam Forces -komponentilla saatavat rasitustiedot ovat normaalivoima, leikkausvoima, taivutusmomentti sekä vääntömomentti. Beam Displacement -komponentti ilmoittaa rakenteiden siirtymä- ja kiertymätiedot.

Rakenteille lasketaan Eurokoodi 3:n mukaiset murtorajatilan käyttöasteet Karamban Utilization-työkalulla. Komponentti määrittää käyttöasteen perustuen elementin ominaisuuksiin eli geometriaan ja poikkileikkauksiin sekä rasituksiin. Käyttöaste määritetään rakenteen poikkileikkausluokan mukaan. Tässä diplomityössä käytetään laskentaan kuitenkin poikkileikkausluokasta riippumatta kimmoteorian mukaista laskentaa. Tämä laskentatapa valitaan komponentin Elast-parametrilla.

Kaavoissa (4.4), (4.3) ja (4.5) N_{Ed} tarkoittaa rakenteessa vaikuttavaa puristusvoimaa ja V_{Ed} leikkausvoimaa, A rakenteen poikkipinta-alaa, A_v rakenteen leikkauspoikkipinta-alaa, f_y teräksen lujuutta, γ_{M0} materiaalin osavarmuuslukua poikkileikkauksen kestävyystarkastelussa ja γ_{M1} vastaavaa osavarmuuslukua stabiilisuustarkastelussa. Molemmille osavarmuusluvulle käytetään arvoa 1,0.

Jäykisterakenteet, pääkannatinristikon alapaarre ja diagonaalit mitoitetaan aksiaalisesti rasitettuina sauvoina. Käyttöaste vedetyille sauvalle kaavan (4.3) mukaan (Eurokoodi 3 kaava 6.5).

$$n_t = \frac{N_{Ed}\gamma_{M0}}{Af_y} \quad (4.3)$$

Puristetun sauvan käyttöaste määritellään nurjahdusmitoituksena kaavan (4.4) mukaan (Eurokoodi 3 kaavat 6.47 ja 6.49).

$$n_c = \frac{N_{Ed}\gamma_{M1}}{\chi A f_y}, \quad (4.4)$$

Nurjahduksen pienennyskertoimen χ määritetään Eurokoodi 3:n kohdan 6.3.1.2 mukaan ja sen tarkempi esittäminen tässä työssä sivutetaan. Nurjahduskäyränä käytetään S355 lujuusluokan kylmämuovatuille rakenneputkelle ohjeistettua nurjahduskäyrää c.

Nurjahduspituutena Karamba käyttää oletuksena sellaisten elementille kuuluvien solmupisteiden välistä etäisyyttä, joihin kytkeytyy vähintään kolme elementtiä (Preisinger 2016). Tämä pätee pääkannattimen yläpaarretta lukuunottamatta muille rakennuksen rakenteille. Nurjahduspituuden muokkaus tapahtuu Karamban Modify Element -komponentilla, jolla syötetään pääkannattimen yläpaarteille oikeat nurjahduspituudet. Yläpaarten nurjahduspituus y-y -akselin ympäri tarkoittaa yläpaarten nurjahdusta ristikon tasossa ja se on diagonaalien välinen vapaa etäisyys, joka on koko yläpaarteella sama. Nurjahduspituus z-z -akselin ympäri tarkoittaa nurjahdusta ristikon tasosta pois päin ja se määritetään kullekin yläpaarten elementille vastaamaan sen sijainnin mukaista katto-orsien välistä etäisyyttä. Nurjahduspituudet kerrotaan lopuksi kertoimella 0,9, joka on standardin mukainen nurjahduspituuden kerroin (Eurokoodi 3 liite BB). Muille hallirakennuksen rakenteille käytetään Karamban määrittelemää automaattista nurjahduspituutta.

Rakenteen leikkauskestävyyden käyttöaste määritellään kaavan (4.5) mukaan (Eurokoodi 3 kaava 6.18).

$$n_v = \frac{V_{Ed}\gamma_{M0}\sqrt{3}}{A_v f_y} \quad (4.5)$$

Pääkannatinristikon yläpaarre ja päätypalkki mitoitetaan puristettuina ja taivutettuina rakenteina. Käyttöaste määritellään kaavan (4.6) mukaan (Eurokoodi 3 kaava 6.61).

$$n_{nm} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \\ \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rd}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

$$N_{Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{i,Rd} = \frac{W_{i,el} f_y}{\gamma_{M1}}$$

Kaavassa (4.6) $W_{i,el}$ tarkoittaa rakenteen tutkittavan akselin kimmoteorian mukaista taivutusvastusta. Yhteisvaikutustekijöiden k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} ja k_{zz} määrittäminen tapahtuu Eurokoodi 3:n liitteen B mukaisilla kaavoilla. Ekvivalentin momentin kertoimet C_{my} , C_{mz} ja C_{mLT} Karamba rajoittaa yksinkertaistuksen vuoksi välille 0,9...1,0. Näiden kertoimien kaavojen laskennan esittäminen tässä diplomityössä sivutetaan.

Kaavassa 4.6 termi χ_{LT} on kiepahduksen pienennyskerroin, joka otetaan huomioon taivutettujen rakenteiden laskennassa. Laskenta tapahtuu Eurokoodi 3:n kohdan 6.3.2.2 mukaan ja sen tarkempi esittäminen tässä työssä sivutetaan. Kiepahduspituuden määrittäminen tapahtuu Karamban automaattisella nurjahduspituuden laskennalla, joka esitettiin edellä. Laskennan yksinkertaistuksen vuoksi Karamba käyttää kiepahduskertoimen laskennalle käytettävän termin C_1 arvona 1,0 (Mäenpää 2018). Kiepahduskäyränä Karamba käyttää standardin mukaisesti päätypalkille valssatun profiilin käyrää a tai b profiilin dimensiosuhteista riippuen sekä putkiprofileille käyrää d.

Yhdistetyn taivutus- ja leikkausrasituksen tapauksessa tilanteessa, jossa leikkausrasitus on enemmän kuin puolet kaavan (4.5) mukaisesta leikkauskestävyydestä, pienennetään taivutusmomenttikestävyyttä kertomalla rakenteen lujuus kertoimella $(1 - \rho)$ kaavan (4.7) mukaan (Eurokoodi 3 kaava 6.29).

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}\gamma_{M0}\sqrt{3}}{A_v f_y} - 1 \right)^2 \quad (4.7)$$

Karamba käyttää kuitenkin yksinkertaistuksena rasitusten suunnasta riippumatta aina sen suunnan kerrointa ρ , joka on pienempi (Mäenpää 2018).

4.5 Galapagos-optimointikomponentti

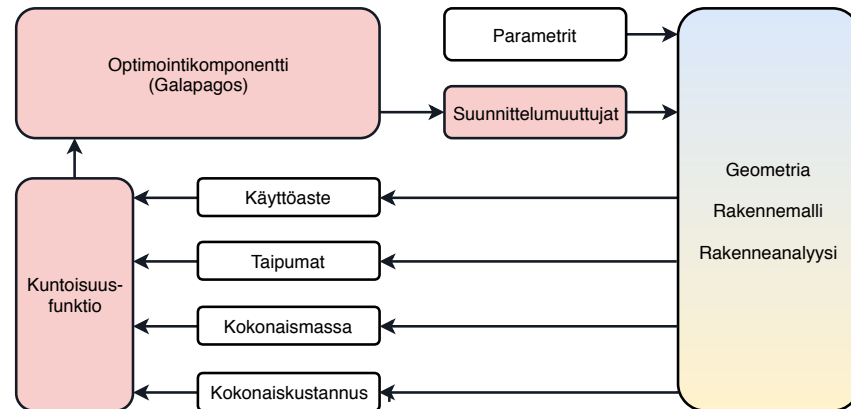
Optimointiin käytetään Grasshopper-ympäristöön kuuluvaa Galapagos-komponenttia. Galapagos on Grasshopperin kehittäjän David Ruttenin kehittämä musta laatikko (*black-box*) -tyyppinen ratkaisutyökalu. Black box -menetelmällä tarkoitetaan sellaisen funktion ratkaisua, jolle ei ole määritetty analyttistä muotoa, mutta joka on kuitenkin evaluoitavissa. Tällaisen funktion optimointitehtävä määritellään kaavalla (4.8).

$$\min_{\mathbf{x} \in D} f(\mathbf{x}), f: \mathbb{R}^d \Rightarrow \mathbb{R} \quad (4.8)$$

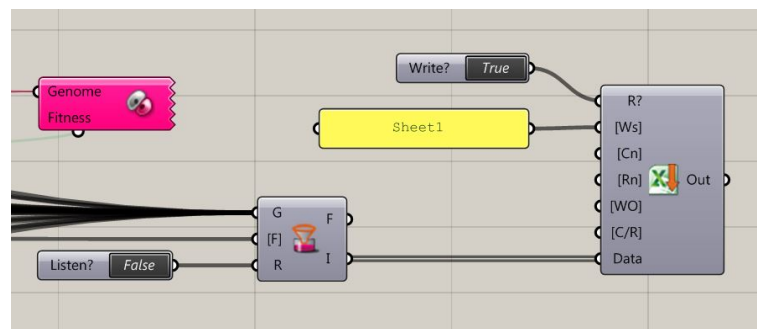
Joukko D johon tehtävän suunnittelumuuttujat \mathbf{x} kuuluvat on funktion f määrittelyjoukon \mathbb{R}^d osajoukko. (Vu et al. 2017)

Optimointikomponentin toiminta osana työkalun kokonaistoimintaa on havainnollistettu kuvassa 4.10.

Galapagos-komponentissa on valittavana tehtävän ratkaisemiseen joko geneettinen algoritmi tai jäädytysalgoritmi (*simulated annealing*). Geneettisen algoritmin, jota diplomityössä käytetään optimointiin, toimintaperiaate esitettiin kappaleessa 2.3. Galapagos-komponentille (kuva 4.11) syötetään optimoinnin kuntoisuusfunktio (*fitness*) sekä suunnittelumuuttujat (*genome*).



Kuva 4.10. Havainnekuva optimointikomponentin toimintaperiaatteesta.



Kuva 4.11. Galapagos-optimointikomponentti sekä tulosten tallentamiseen käytettävä Galapagos Listener ja TT-Toolboxin ExcelXL-komponentti.

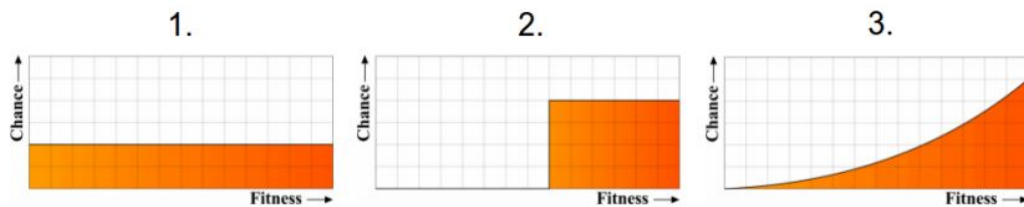
Galapagosin geneettisen algoritmin toiminta on lohkotettu viiteen vaiheeseen:

1. Ratkaisun kuntoisuuden laskeminen (*fitness*)
2. Valinta (*selection*)
3. Parinvalinta (*coupling*)
4. Jälkeläisten tuottaminen (*coalescence*)
5. Mutaatio (*mutation*)

Optimointiprosessin suoritus alkaa alkupopulaation luomisella ja alkupopulaatiossa olevien suunnittelumuuttujavektoreiden kuntoisuuden laskemisella. Suunnittelumuuttujavektoreista käytetään tässä jatkosta nimitystä yksilö ja yksittäisestä suunnittelumuuttujasta nimitystä geeni. Alkupopulaatioon kuuluu käyttäjän asettama alkuarvaus, joka on laskennan käynnistyshetkellä käyttäjän asettama arvo geneille. Loput alkupopulaation yksilöt algoritmi määrittää satunnaisesti. Ohjelmassa on myös mahdollista valita alkupopulaation luominen siten, että jokaisen alkupopulaation yksilön muodostamien geenien arvo eroaa suhteellisesti enintään 10 % käyttäjän asettamasta alkuarvauksesta. Tämä tapahtuu valitsemalla asetus Start from slider setting. Alkupopulaation suuruus määritellään ohjelman

Initial boost -asetuksella. Alkupuolauation määrittelyn jälkeen ohjelma laskee jokaiselle yksilölle kuntoisuuden. (Rutten 2011)

Seuraava populaatio luodaan tuottamalla edellisestä populaatiosta uusia yksilöitä eli jälkeläisiä. Yhdestä populaation luomiskierroksesta käytetään nimitystä iteraatio. Jälkeläisten tuottaminen aloitetaan valintaprosessilla, jossa valitaan nykyisestä populaatiosta yksilöt parinvalintaa varten. Valintaprosessi tapahtuu joko isotrooppisesti, eksklusiivisesti tai yksilön kuntoisuuden perusteella (*biased*). Kunkin yksilön kohdalla prosessi, jonka mukaan valinta tehdään valitaan näistä kolmesta prosessista satunnaisesti. Jokaisessa prosessissa yksilölle asetetaan todennäköisyys, jonka mukaan valinta tapahtuu. Isotrooppisessa prosessissa jokaiselle yksilölle annetaan sama todennäköisyys kuntoisuudesta riippumatta. Eksklusiivisessa prosessissa valitaan satunnainen määrä yksilöitä kuntoisuuden perusteella, ja näille kaikille annetaan yhtä suuri satunnaisesti valittava todennäköisyys tulla valituksi. Kuntoisuuden perusteella tehtävässä valinnassa puolestaan yksilön todennäköisyys tulla valituksi kasvaa yksilön kuntoisuuden kasvaessa. Erilaisia valintaprosesseja on havainnollistettu kuvassa 4.12.



Kuva 4.12. Galapagoksen valintaoperaatiot: isotrooppinen (1), eksklusiivinen (2) sekä kuntoisuuden perusteella tapahtuva valinta (3) (Rutten 2011).

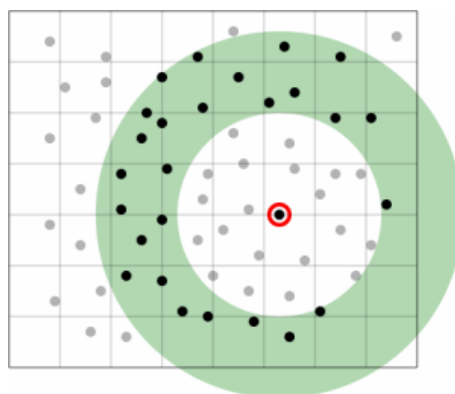
Populaatiosta valitut yksilöt etenevät algoritmin parinvalintaprosessiin. Parinvalintaprosessissa jokaiselle siihen edenneelle yksilölle valitaan pari, jonka kanssa yksilö muodostaa jälkeläisiä (*offspring*). Parinvalinta tapahtuu yksilöiden väliseen geneettiseen etäisyyteen perustuen. Geneettisellä etäisyydellä tarkoitetaan kahden yksilön euklidista etäisyyttä suunnittelumuuttujien avaruudessa. Euklidinen etäisyys määritetään kaavalla (4.9).

$$d(p, d) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} \quad (4.9)$$

missä p ja q ovat geenien koordinaattipisteitä n -ulotteisessa avaruudessa (Lalla 2017). Geneettisen etäisyyden perusteella algoritmi järjestää parinvalintaa varten kunkin yksilöparin laskevaan järjestykseen. Tästä luettelosta jokainen yksilö valitsee parin perustuen käyttäjän syöttämään *in-breeding* -asetukseen. Asetus määrittää ylä- ja alarajan geneettiselle etäisyydelle kaavan (4.10) perusteella.

$$(1 - B)(1 - n) \leq G \leq 1 + B(n - 1), \quad (4.10)$$

missä B on käyttäjän valitsema *in-breeding* -asetus (%) ja n on algoritmissa käytettävä satunnaisluku, joka on 20 % (Rutten 2018). Kaava (4.10) antaa aina geneettisen etäisyyden ylä- ja alarajan erotukseksi suhteellisen luvun 0.2, mutta kerrointa B kasvattamalla alaraja pienenee lineaarisesti. *In-breeding* -asetusta kasvattamalla käyttäjä voi siis vaikuttaa siihen, kuinka samankaltaisia pariutettavat geenit ovat. Suuri kerroin johtaa iterointeihin, joissa yksilöt ovat hyvin samankaltaisia toisiinsa nähden ja optimoinnin tulos saattaa alkaa suppenemaan nopeasti kohti globaalia optimia kun taas pieni kerroin johtaa optimoinnin edetessä populaatioihin, joiden diversiteetti on suurempi. Parinvalintaprosessia ja geneettistä etäisyyttä on havainnollistettu kuvassa 4.13.



Kuva 4.13. Geneettinen etäisyys ja parinvalinta Galapagoksessa. Vihreä alue kuvaa aluetta, jolta punaisella valittu yksilö valitsee parin jälkeläisten synnyttämistä varten. Alueen sisällä olevan valkoisen ympyrän halkaisija määritetään käyttäjän asettamalla *in-breeding* -asetuksella. (Rutten 2011)

Parinvalintaprosessin jälkeen pariutetut yksilöt luovat jälkeläisiä. Galapagoksessa jälkeläisten luonti tapahtuu joko risteyttämällä, interpoloimalla tai painottamalla geenien kuntoisuutta. Risteyttämisessä molemmista yksilöistä valitaan satunnainen määrä genejä ja yhdistämällä nämä luodaan jälkeläinen. Interpolaatiossa jälkeläisen yksittäisen geenin arvo perustuu isäntäyksilöiden vastaavien geenien keskiarvoon. Risteyttämis- ja interpolaatiooperaatiot eivät siis huomioi yksilöiden kuntoisuutta. Kolmas operaatio onkin toteuttaa interpolaatio siten, että luotavien geenien arvo tapahtuu isäntäyksilöiden kuntoisuuksien painotettuna keskiarvona. (Rutten 2011)

Kun jälkeläiset on muodostettu, kasvatetaan uuden populaation diversiteettia toteuttamalla satunnaiselle määrälle uusia yksilöitä satunnaisen suuruisia pistemutaatioita. Pistemutaatiolla tarkoitetaan, että yksittäisen geenin arvoa muutetaan. Mutaatioprosessin jälkeen uusi populaatio on valmis ja iterointikierron on tullut päätökseen. Ennen tätä toteutetaan kuitenkin vielä operaatio, jossa uuden populaation huonoimmat yksilöt korvataan edellisen iteraatiokierron parhailla yksilöillä. Korvattavien yksilöiden määrä asetetaan käyttäjän määrittämällä *maintain* -asetuksella (%). (Rutten 2011)

Kun seuraava populaatio on luotu, palaa algoritmi vaiheeseen 2 ja uusi iterointikierron alkaa. Iterointikierron suoritetaan niin kauan kunnes ohjelman lopetusehto täyttyy. Lopetusehtoja ovat esimerkiksi laskennan kokonaisajan täytyminen, tavoitekuntoisuuden saa-

vuttaminen tai riittävän monen perättäisen iterointikierron suorittaminen, joilla parhaan yksilön kuntoisuus ei ole parantunut. (Rutten 2011)

Optimoinnissa Galapagokselle syötetään suunnittelumuuttujat komponentin Genome-tietoon ja kuntoisuusfunktion arvo Fitness-tietoon. Komponentti suorittaa optimoinnin käyttämällä suunnittelumuuttujien Slider-komponentteja. Toteutettu työkalu evaluoi suunnittelumuuttujien perusteella kuntoisuusfunktiolle arvon, joka on optimoinnista riippuen esimerkiksi rakenteen massa tai kustannus. Kuntoisuusfunktio sisältää myös rajoitusehdot. Kuntoisuusfunktion muodostaminen optimointitehtävää varten esitetään kappaleessa 5.4.

Galapagoksen iterointia ja kohdefunktion arvon kehittymistä seurataan Galapagos Listener -komponentilla. Komponentille syötetään tulotietona suunnittelumuuttujat ja kuntoisuusfunktio samaan tapaan kuin varsinaiselle Galapagos-komponentille. Suunnittelumuuttujalistaan voi lisätä myös muita optimoinnin aikana muuttuvia suureita. Mikäli esimerkiksi optimoidaan massaa, voi rakenteiden kustannustiedon lisätä tulotiedoksi suunnittelumuuttujien joukkoon. Komponentti kerää muuttujien arvon jokaisella populaatiolla ja tallettaa ne listamuuttujaksi. Listamuuttuja viedään laskennan päätyttyä Excel-muotoon raportointia varten käyttämällä TT-Toolboxin ExcelXL-komponenttia.

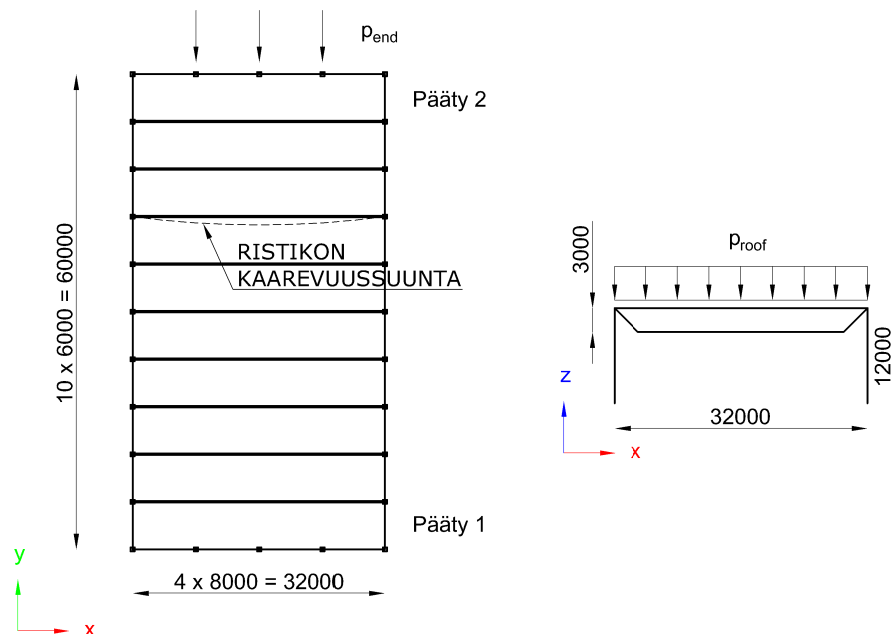
5. KATTOJÄYKISTEIDEN MASSAN JA KUSTANNUSTEN OPTIMOINTI

5.1 Tutkittava rakenne

Tässä diplomityössä tutkittavan hallirakennuksen mitat on esitetty taulukossa 5.1 sekä kuvassa 5.1.

Taulukko 5.1. Tutkittavan hallirakennuksen dimensiot.

Dimensio	Tunnus	Arvo	Yksikkö
Hallin korkeus	h	12,0	m
Hallin leveys	b	32,0	m
Hallin pituus	l	60,0	m
Pääkannattimen korkeus	h_m	3,0	m
Pääkehien lukumäärä	d_m	9	kpl
Päätypilarien lukumäärä	d_{end}	5	kpl



Kuva 5.1. Tutkittavan hallirakennuksen dimensiot ja kuormen suunnat. Kuvassa esitetty myös globaali koordinaatisto, päätyjen nimeäminen ja ristikon kaarevuussuunta.

Tutkittavassa rakenteessa on yhteensä 9 pääkehää, joiden välinen etäisyys on 6,0 m. Pääkannatinristikon jännevälän suhde korkeuteen on 10,67.

Kuvassa 5.1 on esitetty myös halliin kohdistuvat ulkoiset kuormat. Tuulikuormasta huomioidaan ainoastaan hallin päätyyn vaikuttava painekuorma ja se mallinnetaan pistekuor-

mana päätypilareiden yläpään. Pistekuorman arvo P_{end} on parametrisoitu sovellukseen ja se lasketaan kaavalla (5.1).

$$P_{end} = \frac{p_w h b}{2(d_{end} - 2)} \left(1 - \frac{1}{d_{end}} \right) \quad (5.1)$$

Kaavassa p_w on tuulikuorman pinta-alakuorman arvo (kN/m^2), h on hallin korkeus, b on hallin leveys ja d_{end} päätypilareiden lukumäärä. Vastaavasti pääkannatinristikon viivakuorman arvo P_{roof} määritetään kaavalla (5.2).

$$P_{roof} = \frac{l p_{roof}}{d_m + 1} \quad (5.2)$$

Kaavassa p_{roof} on katon pinta-alakuorman arvo (kN/m^2), l on hallin pituus ja d_m on pääkehien lukumäärä. Päätypalkille viivakuorman arvo on puolet pääkannatinristikon viivakuorman arvosta.

Optimoinnissa käytetään pääkannatinristikon ja jäykisteiderakenteiden poikkileikkauksina neliöputkiprofileja (SHS) sekä päätypalkilla kuumavalssattua leveälappaprofilia (HEA). Käytetyt profiilit ja niiden poikkileikkauksominaisuudet on esitetty liitteessä D. Pääpilarien poikkileikkaukseksi valitaan HEA340. Päätypilareilla toimivat ainoastaan pystysuuntaisina tukina päätypalkille, joten niille ei valita poikkileikkausta.

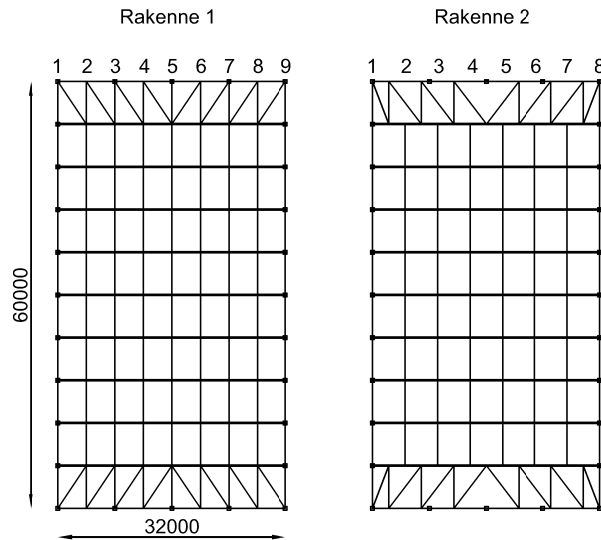
Käytettävän teräksen lujuusluokka on S355 ja sen materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. Käytettävän S355-teräsmateriaalin ominaisuudet.

Ominaisuus	Tunnus	Arvo	Yksikkö
Kimmokerroin	E	210000	N/mm^2
Liukumuoduli	G	80769,2	N/mm^2
Ominaispaino	γ	78,5	kN/m^3
Myötölujuus	f_y	355	N/mm^2

5.2 Esiselvitys: Rasitusten jakautuminen kattojäykisteissä

Ennen varsinaista kattojäykisteiden optimointia suoritetaan kappaleessa 5.1 esitetylle rakenteelle esiselvitys, jonka tarkoituksena on tutkia, miten jäykistevoimat jakautuvat kattojäykisteissä ja miten jäykistetopologia vaikuttaa rasitusten jakautumiseen. Tutkittavat jäykistetopologiat on esitetty kuvassa 5.2. Ensimmäisessä vaihtoehdossa katto-orret liittyvät jäykisteristikon orsiin ja toisessa vaihtoehdossa katto-orret liittyvät jäykisteristikon solmupisteiden puoliväliin. Tavoitteena on havainnollistaa poikittaisen taivutuksen syntymistä kattoristikon yläpaarteelle ja sen vaikutusta orsivoimiin. Tutkittavissa rakenteissa



Kuva 5.2. Esiselvityksessä tutkittavien jäykisterakenteiden topologiat.

on ensimmäisessä tapauksessa orsilinjoja 9 kappaletta ja toisessa tapauksessa 8 kappaletta. Vastaavien tapauksien katto-orsien välinen etäisyys on 4,0 m ja 4,57 m.

Kummastakin jäykistetopologiasta on suoritettu rakennelaskenta tapauksella, jossa kattoristikon yläpaarre on ideaalisuora sekä laskenta, jossa yläpaarteelle annetaan Eurokoodi 3:n mukainen alkukaarevuus. Kattoristikon diagonaalien solmupisteiden välinen etäisyys yläpaarteella on 4 m eli kattoristikko sisältää kokonaisuudessaan 16 diagonaalisauvaa. Laskennan tiedot on esitetty taulukossa 5.4 ja laskennassa on käytetty taulukon 5.5 mukaisia rakenteiden poikkileikkauksia. Käytetyt kuormat on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3. Esiselvityksessä tutkitun hallirakennuksen kuormat (kN/m^2).
Kuormitustapauksissa ei ole mukana rakenteiden omaa painoa.

Kuorma	Tunnus	Minimi	Maksimi
Katon tasokuorma	p_{roof}	1,0	4,0
Päädyn vaakakuorma	p_{end}	0,0	1,0

Laskennassa ei oteta huomioon rakenteiden omasta painosta aiheutuvaa kuormaa. Laskenta on suoritettu toisen kertaluvun rakenneanalyysillä, jolloin Eurokoodi 3:n mukaan ekvivalentti stabiloiva kuorma muodostuu pelkästään ristikon alkukaarevuudesta eikä ulkoisista kuormista aiheutuvaa taipumaa tarvitse huomioida. Esiselvityksessä mallinnetaan kattoristikon yläpaarre kaarevana, jolloin mallissa tulisi olla suoraan nähtävissä ekvivalentin stabiloivan kuorman vaikutus orsivoimiin eikä sitä tarvitse lisätä rakennemalliin erikseen.

Esiselvityksen aluksi määritellään käsin laskemalla ekvivalentin stabiloivan voiman suuruus käyttämällä aikaisemmin esitettyä kaavaa (3.1). Kun oletetaan ulkoisista kuormista aiheutuvaksi katon tason taipumaksi $\delta_q = 10$ mm saadaan ekvivalentiksi stabiloivaksi viivakuormaksi päädyn jäykisteristikolle $2,08$ kN/m^2 maksimipystykuormalla ($4,0$ kN/m^2).

Taulukko 5.4. *Esiselvityksessä tehdyt rakennelaskennan asetukset.*

	Rakenne	Pystykuorma (kN/m^2)	Vaakakuorma (kN/m^2)	Ristikon kaarevuus
1	1	1,0	1,0	0
2	1	1,0	1,0	L/500
3	1	1,0	0	0
4	1	1,0	0	L/500
5	1	4,0	1,0	0
6	1	4,0	1,0	L/500
7	1	4,0	0	0
8	1	4,0	0	L/500
9	2	1,0	1,0	0
10	2	1,0	1,0	L/500
11	2	1,0	0	0
12	2	1,0	0	L/500
13	2	4,0	1,0	0
14	2	4,0	1,0	L/500
15	2	4,0	0	0
16	2	4,0	0	L/500

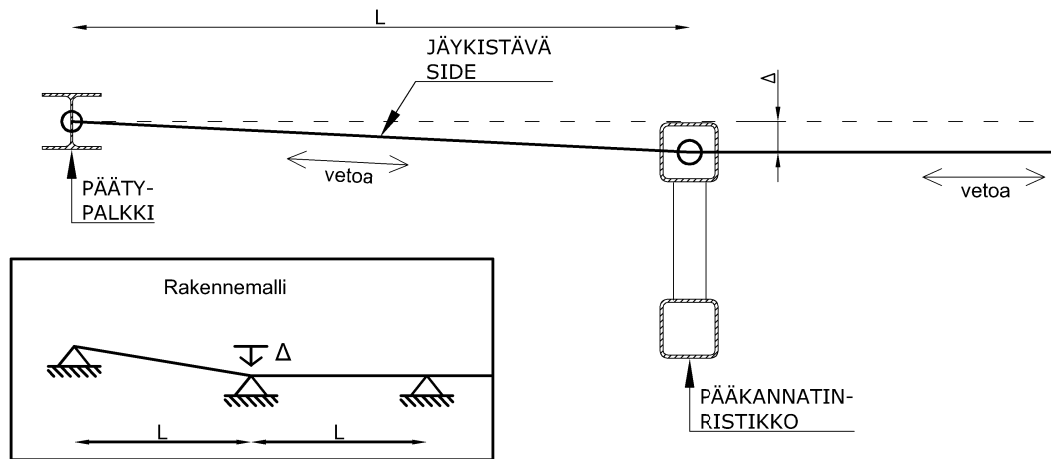
Taulukko 5.5. *Esiselvityksessä käytettävät rakenteiden poikkileikkaukset.*

Rakenne	Poikkileikkaus
Pääkannatinristikon yläpaarre	200 x 8
Pääkannatinristikon alapaarre	150 x 6
Pääkannatinristikon diagonaalit	120 x 6
Katto-orret	100 x 5
Jäykisteristikon diagonaalit	140 x 8
Reunapalkki	140 x 6
Päätypalkki	HEA300

Rakenteessa 1 kohdistuu tällä viivakuormalla yhdelle katto-orrelle 8,3 kN ja rakenteessa 2 vastaavasti 9,5 kN.

Ekvivalentin stabiloivan voiman lisäksi katto-orrelle kohdistuu rasisus rakenteen ulkoisesta vaakakuormasta, joka tutkittavan hallirakenteen tapauksessa on tuulikuorma, joka kohdistuu hallin päätypalkille pistekuormana. Kuorma taivuttaa hallin katon tasoa pituussuunnassa ja saa aikaan rasisuksia katon rakenteissa. Päädyn jäykisteristikko toimii pääkannatinristikon tapaan kuorman suunnassa jäykkänä rakenteena ja vastaanottaa suurimman osan tuulikuorman rasisuksesta. Osa rasisuksista siirtyy kuitenkin katto-orsille ja niiden kautta vastakkaisen päädyn jäykisteristikolle. Tämä kuorma on katto-orsien mitoituksessa lisättävä ekvivalenttiin stabiloivaan voimaan. (Kouhi 2015, s. 223–225)

Edellä kuvatut rasisukset ovat kuormitustapauksesta ja kattoristikon kaarevuussuunnasta orren sijaintiin nähden joko veto- tai puristusrasisuksia. Näiden lisäksi katto-orrelle kohdistuu rakennemallissa päätypalkin ja pääkannatinristikoiden pystysuuntaisen taipumae-ron johdosta aksiaalista rasisusta, joka on ainoastaan vetoa. Koska kyseessä on estetystä



Kuva 5.3. Hallin päätypalkin ja kattoristikon taipumaerosta aiheutuva pakkovoima. Δ tarkoittaa kuormasta aiheutuvaa taipumaeroa.

muodonmuutoksesta aiheutuva rasitus, käytetään tästä nimitystä pakkovoima. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 5.3.

Pakkovoiman suuruus määritellään päästään nivelellisesti tuetussa sauvassa aksiaalisen jäykkyyden ja venymän yhteyden avulla. Venymän suuruus on siirtyneen rakenteen solmupisteiden välisen etäisyyden ja rakenteen systeemipituuden erotus. Aksiaalisen jäykkyyden, sauvan aksiaalisen voiman ja venymän yhteys on kaavan (5.3) mukainen.

$$\Delta L = \frac{NL}{EA}, \quad (5.3)$$

missä ΔL tarkoittaa sauvan venymää, E sauvan materiaalin kimmokerrointa, A sauvan poikkipinta-alaa, N sauvassa vaikuttavaa aksiaalista voimaa ja L sauvan systeemipituutta.

Esiselvityksessä tehdyn rakennelaskennan tuloksista on raportoitu katto-orsien normaali-voimat hallin kummassakin päädyssä, pääkannatinristikon rasitukset ja taipuma sekä päätypalkin vaakasiirtymä jokaisen laskennan osalta. Tulokset on esitetty liitteessä E.

Rakenteelle 1 tehdyissä laskennoissa 3 ja 7 vaikuttaa jäykisterakenteissa ainoastaan taipumaeron aiheuttaman pakkovoiman suuruinen voima. Vastaavat laskennat rakenteelle 2 ovat 11 ja 15. Vertaamalla näitä orsivoimia saatuihin tuloksiin laskennoista, joissa rakenteessa vaikuttaa vaakakuorma sekä tilanteisiin joissa kattoristikon yläpaarre on kaareva, voidaan voimien erotusten perusteella määrittellä vaakakuorman sekä ekvivalentin stabi-loivan kuorman vaikutus orsivoimiin.

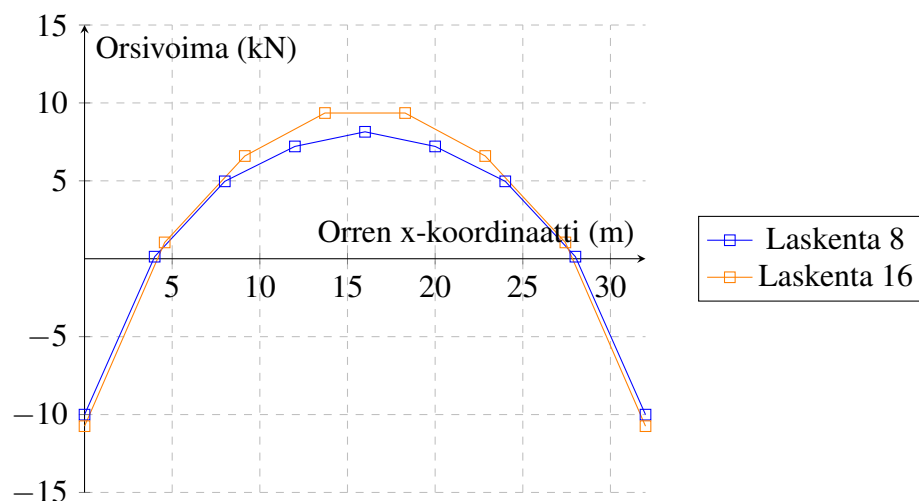
Vertaillaan maksimipystykuormalla tehtyjä laskentoja, joissa ei vaikuta vaakakuormaa ja määritetään ekvivalentti stabi-loiva vaakavoima orsissa. Taulukkoon 5.6 on koottu orsivoimien erotus laskennoista, joissa ristikko on ideaalisuora sekä joissa ristikko on kaareva. Erotus on laskettu hallin kummassakin päädyssä. Taulukon sarakkeet vastaavat kyseisen rakenteen vastaavaa reunapalkki- ja orsilinjaa.

Taulukko 5.6. Orsilinjojen lasketut ekvivalentit stabiloivat voimat (kN) hallin kummassakin päädyssä. Negatiivinen kuorma tarkoittaa puristusta.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Laskenta 8									
Pääty 1	10.06	0.12	-4.99	-7.22	-8.16	-7.22	-4.99	0.12	10.06
Pääty 2	-10.06	-0.15	4.95	7.19	8.13	7.19	4.95	-0.15	-10.06
Laskenta 16									
Pääty 1	10.75	-1.04	-6.59	-9.37	-9.37	-6.59	-1.04	10.75	
Pääty 2	-10.75	1.06	6.60	9.34	9.34	6.60	1.06	-10.75	

Taulukon perusteella maksimipystykuormalla keskilinjän orsien rasiusten itseisarvojen keskiarvo on 8,15 kN rakenteessa 8 sekä vastaavasti 9,35 kN rakenteessa 16. Suhteellisina arvoina nämä vastaavat n. 20 % orren kokonaisvoimasta, joka vastaavissa tapauksissa on 41,57 kN ja 41,86 kN. Orsivoima vastaa myös varsin hyvin suuruusluokkatarkastelussa käsin laskemalla saatuja orsivoimia 8,3 kN ja 9,5 kN. Orsivoima on saman suuruinen mutta eri merkinen hallin eri päädyissä. Tämä johtuu siitä, että kaikki kattoristikot ovat samaan suuntaan kaarevia. Pääty, jonka suuntaan kattoristikot ovat kaarevia ottaa vastaan ekvivalentin stabiloivan voiman orsien puristuksena ja vastakkainen pääty orsien vetona.

Taulukosta on myös havaittavissa orsivoimien jakautuminen. Eurokoodi 3:n ekvivalentin stabiloivan voiman laskentakaava perustuu tasaisesti jakautuneeseen kuormaan. Taulukon jakauman perusteella orsivoimien jakauma vaikuttaisi kuitenkin enemmän vastaavan riskin yläpaarteen todellisen voimajakauman kautta integroitua taivutusmomenttikuvaajan jakaumaa ja sitä kautta laskettua orsivoimaa. Tämän laskenta esitettiin kappaleessa 3.3. Taulukon orsivoimissa on selkeästi havaittavissa, että orsivoima kasvaa siirryttäessä lähemmäs jännevälän keskipistettä, vaikka orsien välinen etäisyys on sama.



Kuva 5.4. Orsivoimien jakauma hallin jännevälän matkalla laskentatapauksessa 8 ja 16. Jakauma vastaa kuvassa 3.9 esitettyä (Biegus & Czepizak 2018) jakaumaa.

Ulkoisen vaakakuorman vaikutus orsiin todetaan vastaavanlaisella menettelyllä kuin stabiiloivan kuorman osuus. Vertailemalla laskentatuloksia, joissa rakenteessa ei vaikuta vaakakuormaa tuloksiin, joissa vaakakuorma vaikuttaa voidaan katto-orsille kohdistuva vaakakuorman osuus määrittää näiden kahden orsivoiman erotuksena. Taulukkoon 5.7 on koottu katto-orsissa vaikuttavat tuulikuormasta aiheutuvat rasitukset. Taulukon sarakkeet vastaavat kyseisen rakenteen vastaavaa reunapalkki- ja orsilinjaa.

Taulukko 5.7. Orsilinjojen lasketut hallin päädyn tuulikuormasta aiheutuvat orsivoimat (kN).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rakenne 1									
Laskenta 1	0.01	3.22	8.29	10.24	12.46	10.24	8.29	3.22	0.01
Laskenta 5	0.03	3.22	8.26	10.22	12.42	10.22	8.26	3.22	0.03
Rakenne 2									
Laskenta 9	0.09	3.87	7.89	9.42	9.42	7.89	3.87	0.09	
Laskenta 13	0.11	3.87	7.81	9.29	9.29	7.81	3.87	0.11	

Taulukon tuloksista huomataan, että rakenteessa 2 vaikuttavat orsivoimat ovat hieman pienempiä rakenteeseen 1 verrattuna. Rakenteessa 2 on tämän lisäksi yksi orsilinja vähemmän kuin rakenteessa 1. Laskemalla kummassakin tapauksessa tuulikuorman aiheuttamat orsivoimat yhteen, saadaan rakenteessa 1 orsivoimien resultantiksi 55,96 kN ja rakenteessa 2 vastaavasti 42,36 kN. Ero on selitettävissä jäykistysrakenteen geometrialla. Rakenteessa 1 orsilinjat kiinnittyvät jäykisteristikon solmupisteisiin, kun taas rakenteessa 2 orsilinjat kiinnittyvät solmupisteiden puoliväliin. Tämä aiheuttaa katon tason suuntaista taivutusta kattoristikon yläpaarteelle, jolloin pienempi osuus tuulikuormasta siirtyy katto-orsille. Rakenteessa 1 jäykisteristikon rasitukset siirtyvät suoraan orsille eikä poikittaista taivutusta kattoristikon yläpaarteelle pääse syntymään. Tuulikuorman resultantti hallin päätyyn on 144 kN. Laskennan perusteella orsille tuulikuormasta siirtyvä osuus on 29...39 %.

Taulukkoon 5.8 on koottu kaikista esiselvityksessä tehdyistä rakennelaskennoista pääkannatinristikon yläpaarteen maksimirasitukset, Eurokoodi 3:n mukainen käyttöaste. Käyttöaste on laskettu Karamba3D-työkalulla, joka käyttää yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen käyttöasteen laskentaan kaavaa (4.6). Molemmissa rakenteissa nurjahduspituus kattoristikon tason suunnassa on diagonaalien välinen etäisyys kerrottuna standardin liitteen BB mukaisella nurjahduspituuden kertoimella 0,9 eli 3,6 m. Katon tason suunnassa yläpaarteen nurjahduspituus rakenteessa 1 on 3,6 m ja vastaavasti rakenteessa 2 4,11 m. Taulukossa esitetään myös kattoristikon taipuma sekä päätypalkin vaakataipuma.

Taulukon perusteella jäykistetopologialla on selkeä vaikutus pääkannatinristikon yläpaarteen raistukseen ja käyttöasteeseen. Rakenteessa 1, jossa jäykistetopologian vuoksi ristikolle ei kohdistu katon tason suuntaista taivutusta (M_z), on poikittaisten taivutuksen suuruus merkityksetön. Rakenteessa 2 kohdistuu yläpaarteelle poikittaista taivutusta pelkän minimipystykuorman vaikuttaessa 5,03 ja 5,27 kNm. Vaakakuorman vaikuttaessa poikit-

Taulukko 5.8. Esiselvityksessä tehtyjen rakennelaskentojen pääkannatinristikon yläpaarten rasitukset sekä Eurokoodi 3:n mukaiset käyttöasteet sekä rakenteiden taipumat. Jäykistetopologian vaikutus ristikon poikittaisen taivutuksen suuruuteen on selkeä.

	Pääkannatinristikon yläpaarre			Käyttöaste Eurokoodi 3	Pysty- taipuma (mm)	Vaaka- taipuma (mm)
	N_{max} (kN)	$M_{y,max}$ (kNm)	$M_{z,max}$ (kNm)			
Rakenne 1						
1	-249.74	9.47	0.5	0.22	24.22	4.64
2	-249.74	9.55	0.67	0.22	24.33	4.5
3	-249.74	9.45	0.27	0.21	23.82	0.64
4	-249.74	9.56	0.6	0.21	24.04	0.76
5	-998.93	38.5	1.21	0.85	95.28	6.34
6	-998.93	38.85	2.91	0.85	96.03	4.51
7	-998.93	38.46	1.05	0.85	95.28	2.55
8	-998.93	38.88	3.05	0.85	96.07	4.27
Rakenne2						
9	-249.74	9.19	10.65	0.34	25	27.63
10	-249.74	9.19	10.97	0.35	25.11	27.57
11	-249.74	9.19	5.03	0.23	23.82	1.24
12	-249.74	9.18	5.27	0.24	24.04	1.43
13	-998.93	37.42	26.03	1.11	95.28	32.18
14	-998.93	37.4	31.26	1.14	96.05	30.43
15	-998.93	37.42	20.55	0.98	95.28	5.05
16	-998.93	37.4	25.98	1.02	96.08	7.11

taisen taivutuksen suuruus kasvaa arvoihin 10,65 kNm ja 10,97 kNm. Kuitenkin kattoristikon kaarevuuden vaikutus minimipystykuorman tapauksessa on vain 0,24...0,32 kNm. Maksimipystykuorman tapauksessa erot tulevat selkeämmin esille. Ilman vaakakuormaa poikittaisen taivutuksen suuruus on ilman kaarevaa ristikkooa 20,55 kNm ja kaarevan ristikon kanssa 25,98 kNm. Vaakakuorman kanssa poikittainen taivutus nousee ilman kaarevaa ristikkooa arvoon 26,03 kNm ja vastaavasti kaarevalla ristikolla arvoon 31,26 kNm. Ristikon kaarevuuden vaikutus maksimipystykuormalla on siis 5,23...5,43 kNm. Tämä vastaa noin 17...21 % poikittaisen taivutusmomentin kokonaisarvosta. Taulukon tulosten perusteella voidaan siis todeta, että yksinomaan jäykistetopologian valinnalla voidaan vaikuttaa kattoristikon yläpaarten käyttöasteeseen ja näin ollen optimoinnille on perusteet.

Laskennoissa 7 ja 15 orsissa vaikuttaa pelkästään pakkovoiman aiheuttama aksiaalinen vetävä voima. Tämän voiman arvot on esitetty taulukossa 5.9.

Taulukon perusteella pakkovoiman suuruus orsissa on pienimmilläänkin noin nelinkertainen verrattuna taulukoiden 5.6 ja 5.7 mukaisiin ekvivalentin stabiloivan voiman ja ulkoisen vaakakuorman aiheuttamiin orsivoimiin. Kaavan (5.3) perusteella taulukon pakkovoimat aiheuttavat venymät ovat orsissa 0,32...0,67 mm.

Orsiin kohdistuva pakkovoima on otettava huomioon, mikäli todellisessa rakenteessa jäy-

Taulukko 5.9. Orsilinjoissa vaikuttavat pakkovoimat (kN).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rakenne 1									
Laskenta 7	-0.04	31.93	41.14	43.14	33.44	43.14	41.14	31.93	-0.04
Rakenne 2									
Laskenta 15	0.69	20.38	32.76	32.49	32.49	32.76	20.38	0.69	

kistesauvat liittyisivät kantaviin rakenteisiin täysin kiinteästi kuvan 5.3 mukaisesti ja että sauvojen asennusjärjestys olisi sellainen, että venymän aiheuttava painumaero on rakennemallin mukainen. Kuitenkin todellisessa tilanteessa esimerkiksi jäykisteristikon sauvat asennetaan tavallisesti vasta kattoristikon ja päätypalkin jälkeen, jolloin rakenteissa on jo tapahtunut muodonmuutoksia. Lisäksi laskennan perusteella orsien venymän suuruus on alle 1 mm, mikä on pienempi kuin tavallisesti käytettävä pulttien reikätoleranssi. Pulttiliitoksen ei myöskään voida olettaa olevan täysin luistamaton. Voidaan siis otaksua, että rakennemallin pakkovoimat eivät ole todellisia rakenteen kannalta mitoituksessa huomioitavia voimia. Lisäksi pakkovoima on aina vetoa, toisin kuin ekvivalentti stabiloiva voima sekä ulkoisen vaakakuorman aiheuttama orsivoima. Tämän vuoksi on rakenteiden luotettavuuden kannalta suositeltavampaa mitoitaa sauvat puristettuina rakenteina ja jättää pakkovoima mahdollisesti kokonaan huomioimatta.

5.3 Optimointitehtävät ja suunnittelumuuttujat

Työssä suoritetaan massa- ja kustannusoptimointia kappaleessa 5.1 esitetyle rakenteelle. Optimoitavia rakenteita ovat

- pääkannatinristikon alapaarre, yläpaarre ja diagonaalit,
- katto-orret,
- reunapalkit,
- jäykisteristikon sauvat ja
- päätypalkki.

Jäykisteristikon geometrioista tarkastellaan sekä K- että N-tyypin ristikkogeometriaa. Nämä geometriavaihtoehdot esiteltiin kuvassa 4.5.

Erilaisia tehtävänasetteluja on tässä työssä kolme kappaletta.

1. **OPT-1:** Topologian optimointi. Rakenne on parametrisoitu siten, että suunnittelumuuttujiksi asetetaan jäykisteristikon sauvojen ja katto-orsien määrä. Orret ja jäykisteristikon sauvat sijoitellaan vakiojaolla.
2. **OPT-2:** Geometrian optimointi. Rakenne on parametrisoitu siten, että jäykisteristikon sauvojen ja katto-orsien määrä on vakio, mutta niiden solmupisteiden sijainnit asetetaan suunnittelumuuttujiksi.

3. **OPT-3:** Geometrian optimointi. Rakenne on parametrisoitu siten, että jäykisteristikon sauvojen ja katto-orsien määrä on sama kuin OPT-2 -tehtävässä. Solmupisteiden sijainnit asetetaan suunnittelumuuttujiksi, mutta katto-orsien ja jäykisteristikon sauvojen solmupisteet ovat kytketty toisiinsa.

OPT-1 optimointitehtävien tavoitteena on vertailla kahden eri jäykisteristikkovaihtoehdon eroja ja luoda vertailukohdat kahdelle jälkimmäiselle optimoinnille. Tuloksia ei kuitenkaan voi suoraan vertailla, sillä OPT-2 ja OPT-3 tehtävissä esivalitulle topologialle suoritetaan geometrian optimointi. OPT-2 ja OPT-3 optimointien tarkoitus onkin tutkia pääty-palkin ja pääkannatinristikon yläpaarten kaksiakσιαalisen taivutuksen vaikutusta optimitulokseen.

Jokaisesta tehtävänasettelusta muodostetaan massan ja kustannuksen optimointitehtävä. Jokaisesta optimointitehtävästä suoritetaan laskenta 10 kertaa, eli työssä tehtävien laskentojen kokonaismäärä on 120 kappaletta.

Tässä työssä optimointitehtävään viittaamiseen käytetään massan optimoinnissa kirjainta M ja kustannusten optimoinnissa kirjainta C. Esimerkiksi C-OPT-1-K tarkoittaa OPT-1 tehtävän kustannusoptimointia K-ristikkogeometrialla. Lisäksi kyseisen optimoinnin tiettyyn laskentaan voidaan viitata esimerkiksi C-OPT-1-K-8, joka tarkoittaa kyseisen optimointitehtävän kahdeksatta laskentaa.

Optimoinnissa mitoitetaan katon jäykisterakenteet vaakakuormalle ja ekvivalentille stabiloivalle voimalle. Esiselvityksessä todetun rakennemalliin syntyvän pakkovoiman vaikutus poistetaan määrittämällä kuormitustapaukset siten, että pakkovoima ei mitoita rakenteita. Tämän vuoksi optimointi suoritetaan kuormitustapauksella, joissa rakenteessa ei vaikuta lainkaan pystykuormaa sekä kuormitustapauksella, jossa rakenteessa vaikuttaa pystykuorma ja vaakakuorma. Kuormitustapaukset on esitetty taulukossa 5.10.

Taulukko 5.10. Optimoinnissa tutkittavat kuormitustapaukset. Kaikissa kuormitustapauksissa on mukana rakenteiden omasta painosta aiheutuvat rasitukset.

Kuormitustapaus	Selite	Katon tasokuorma $p_{proof}(kN/m^2)$	Päädyn vaakakuorma $p_{end}(kN/m^2)$
1	Maksimi vaakuorma	0	1,0
2	Maksimi pystykuorma	4,0	1,0

Esiselvityksen perusteella kuormitustapaus 1 mitoittaa katon jäykisterakenteet ja kuormitustapaus 2 mitoittaa pääkannatinristikon yläpaarten tapaukselle, jossa siihen kohdistuu kaksiakσιαalista taivutusta. Ekvivalentti stabiloiva voima vaikuttaa todellisuudessa ainoastaan kuormitustapauksessa 2. Koska kuitenkin sen vaikutus kumoutuu pystykuormasta aiheutuvan pakkovoiman vuoksi, muodostetaan se lisäämällä kuormitustapauksessa 1 jokaisen kattoristikon yläpaarteelle katon tason suunnassa vakiosuuruinen viivakuorma. Viivakuorman suuruus lasketaan kertomalla esiselvityksessä käsin laskettun viivakuorman suuruus jäykisteristikoiden lukumäärällä ja jakamalla tämä luku pääkannatinristi-

koiden lukumäärällä. Näin ollen ekvivalentin stabiloivan vaakakuorman suuruus ristikon yläpaarteella on 0,44 kN/m.

Optimoinnissa käytettävät suunnittelumuuttujat muodostuvat rakenteiden geometriaparametreista sekä poikkileikkaukset määrittävistä parametreista. Poikkileikkaukset määrittävät parametrit sekä näiden ala- ja ylärajat ja alkuarvaukset ovat jokaisessa optimointitehtävässä samat ja ne on esitetty taulukossa 5.11. Parametreille säädetään ylä- ja alarajat Grasshopperissa määrittämällä kyseisen parametrin Number Slider -säätimelle ylä- ja alarajat. Poikkileikkausparametrit ovat numeerisia kokonaislukuparametreja. Yhtä kokonaislukua vastaa profiilikatalogissa yksi poikkileikkaustieto.

Taulukko 5.11. Optimointitehtävissä käytettävät poikkileikkausparametrit, niiden raja-arvot ja alkuarvaukset. Käytettävä poikkileikkauskirjasto on esitetty liitteessä D

Suunnittelumuuttuja	Alaraja	Yläraja	Alkuarvaus
Yläpaarten poikkileikkaus	100 x 10	300 x 12,5	250 x 8
Alapaarten poikkileikkaus	100 x 5	300 x 12,5	150 x 10
Diagonaalien poikkileikkaukset	80 x 3	300 x 12,5	150 x 5
Päätypalkin poikkileikkaus	HEA100	HEA1000	HEA260
Jäykisteristikon diagonaalit	100 x 5	200 x 10	140 x 8
Reunapalkin poikkileikkaus	100 x 5	200 x 10	150 x 6

Katto-orren poikkileikkauksena käytetään kaikissa optimoinneissa vakiopoikkileikkausta 100 x 5.

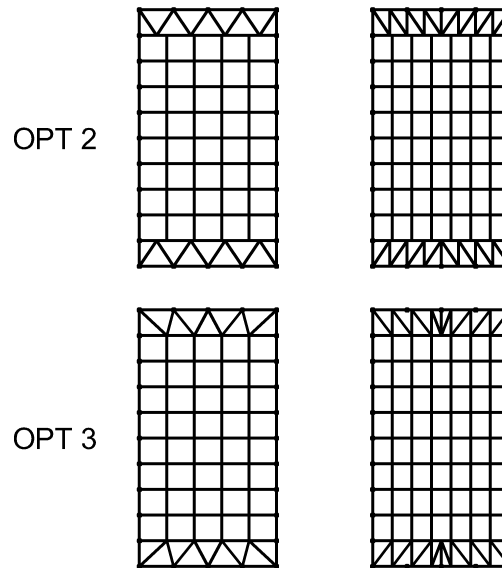
OPT-1 -optimoinnissa tehtävässä topologian optimoinnissa topologiaparametreja ovat jäykisteristikon koko ja katto-orsien lukumäärä pääkehää kohden. Lisäksi optimoidaan pääkannatinristikon diagonaalien lukumäärä. Jäykisteristikon koolla tarkoitetaan tässä jäykisteristikon diagonaalien lukumäärää. K-ristikon tapauksessa tämä tarkoittaa ristikossa olevien sauvojen kokonaislukumäärää ja N-ristikossa vastaavasti diagonaalisauvojen lukumäärää. Parametrien ala- ja yläraja-arvot sekä alkuarvaukset on esitetty taulukossa 5.12. Topologiaparametrit ovat numeerisia kokonaislukuparametreja. Jäykisteristikon koon ja pääkannatinristikon diagonaalien lukumäärää osoittavat parametrit ovat lisäksi parillisia kokonaislukuja.

Taulukko 5.12. OPT-1 -optimoinnissa käytettävät topologiaparametrien raja-arvot ja alkuarvaukset.

Suunnittelumuuttuja	Alaraja	Yläraja	Alkuarvaus
Pääkannatinristikon diagonaalien lukumäärä	8	24	16
Katto-orsien lukumäärä	0	12	6
N-jäykisteristikon koko	4	14	6
K-jäykisteristikon koko	4	20	10

OPT-2 ja OPT-3 -tehtävissä optimointi suoritetaan geometrian optimointina esivalitulle topologialle. Nämä esivalitut topologiat on esitetty kuvassa 5.5. K-ristikkoon valitun ristikkotopologian koko on 8 diagonaalia ja N-ristikkoon myös vastaavasti 8 diagonaalia.

Katto-orsien määräksi on K-ristikon optimoinnissa valittu 4 katto-orsilinjaa ja N-ristikon tapauksessa 6 katto-orsilinjaa.



Kuva 5.5. Esivalitut topologiat sekä geometrian alkuarvaukset OPT-2 ja OPT-3 -tehtävissä K- ja N -jäykisteristikkogeometrialla.

OPT-2 ja OPT-3 -tehtävissä solmupisteiden sijaintiparametrit ovat numeerisia liukulukumuuttujia, joiden arvo on välillä 0,0...1,0.

5.4 Rajoitusehdot ja kuntoisuusfunktion muodostaminen

Optimoinnin rajoitusehdoista ovat rakenteiden kestävyyskäyttöaste sekä rakenteille määritetyt suurimmat sallitut taipumat. Rakenteiden käyttöaste määritetään käyttämällä Karamban Utilizer-komponenttia, ja sen ylärajaksi määritellään 1,0. Laskennassa käytetään ensimmäisen kertaluvun rakenneanalyysia, joka suoritetaan Karamban AnalyzeThI-komponentilla. Käyttöasteesta ilmoitetaan optimointialgoritmilta ainoastaan koko rakenteen suurin käyttöaste n_{max} . Karamban Utilizer-komponentti laskee käyttöasteen kaikissa kuormitustapauksissa ja ilmoittaa näistä suurimman. Käyttöasteen laskenta on esitetty kappalessa 4.4.

Taipumarajoiksi määritellään Eurokoodi 3:n kansallisen liitteen (Ympäristöministeriö 2017) mukaisesti pystysuuntaiselle taipumalle arvo $L/300$, missä L on rakennuksen jänneväli ja vaakasuuntaiselle taipumalle arvo $H/150$, missä H on rakennuksen korkeus. Tutkittavan rakenteen tapauksessa vastaavat taipumarajat ovat täten 107 mm ja 80 mm. Pystysuuntainen taipuma v_z (mm) määritellään pääkannatinristikon alapaarten keskipisteen siirtymästä globaalin z-akselin suunnassa. Vaakasuuntainen taipuma v_y (mm) määritellään päätypalkin jokaisen solmupisteen siirtymien suurimmasta arvosta globaalin y-akselin suunnassa. Rajoitusehdot muokataan samaan suuruusluokkaan kaavan (2.7) mukaisesti.

Rajoitusehdot ovat siis käyttöaste (5.4), pystysuuntainen taipuma (5.5) ja vaakasuuntainen taipuma (5.6).

$$g_1 = 1 - \frac{n_{max}}{1.0} \geq 0 \quad (5.4)$$

$$g_2 = 1 - \frac{v_z}{107} \geq 0 \quad (5.5)$$

$$g_3 = 1 - \frac{v_y}{80} \geq 0 \quad (5.6)$$

Kappaleessa 5.3 esitettiin tässä diplomityössä toteutetut optimointitehtävät. Kullekin optimointitehtävälle suoritetaan optimointi käyttäen kohdefunktiona rakenteiden massaa (5.7) sekä rakenteiden kokonaiskustannuksia (5.8).

$$f(\mathbf{x}) = M(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n L_i A_i \rho \quad (5.7)$$

$$f(\mathbf{x}) = C(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n C_i \quad (5.8)$$

Kaavassa (5.7) L_i tarkoittaa elementin i pituutta ja A_i vastaavan elementin poikkipinta-alaa. Teräsrakenteen tiheys ρ on esitetty taulukossa 5.2. Ohjelmassa massatietona käytetään kuitenkin Karamban Disassemble Model -komponenttia, jonka avulla voidaan eritellä kunkin elementin massa. Kaavassa (5.8) C_i tarkoittaa elementin i kustannusta. Kustannukset lasketaan kappaleessa 3.4 esitetyn teorian mukaisesti käyttäen liitteen B kaavoja ja vakioita. Kustannuksissa huomioidaan asennuskustannusten osalta ainoastaan jäykisterakenteiden eli katto-orsien, reunapalkkien sekä jäykisteristikon sauvojen asennuskustannukset.

Kohdefunktion ja rajoitusehtojen perusteella muodostetaan optimoinnin kuntoisuusfunktio. Kuntoisuusfunktio muodostuu kohdefunktiosta ja rajoitusehtojen perusteella määriteltävästä sakkotermistä. Sakkotermien muodostuminen esiteltiin kappaleessa 2.4. Laskennassa käytetään sakkofunktion muodostamiseksi ulkoisen sakon menetelmää. Koska rajoitusehdot muodostuvat ainoastaan epäyhtälörajoitteista, saa kuntoisuusfunktio kaavan 5.9.

$$\Phi(\mathbf{x}, r) = f(\mathbf{x}) + r(< -g_1 >^2 + < -g_2 >^2 + < -g_3 >^2) \quad (5.9)$$

Sakkotermiä r kasvatetaan lineaarisesti iteraatiokierrosten funktiona. Ensimmäisellä iteraatiokierroksella sakkotermien arvoksi valitaan 250000, mikä on noin viisinkertainen alkuarvauksen kohdefunktion arvoon nähden. Sakkotermien arvoon lisätään luku 250000 aina siirryttäessä uudelle iteraatiokierrokselle. Näin ollen sakkotermien arvo on kaavan (5.10) mukainen.

$$r_{i+1} = r_i + 250000 \quad (5.10)$$

missä i tarkoittaa iteraatiokierroksen lukumäärää.

5.5 Optimointialgoritmi

Optimointi suoritetaan Grasshopperin Galapagos-komponentin geneettisellä optimointialgoritmeilla.

Geneettisissä algoritmeissa valitaan ensimmäisen iteraatiokierroksen populaation kooksi 150 ja muille iteraatiokierroksille 50. Tämä toteutetaan Galapagosin Initial Boost -asetuksella asettamalla peruspopulaation kooksi 50 ja Initial Boost -kertoimeksi 3. Optimoinnin lopetusehtoja ovat laskenta-ajan täytyminen ja iteraatiokierrosten lukumäärä, joilla kuntoisuusfunktion arvo ei ole pienentynyt. Laskenta-ajaksi valitaan 40 min ja tuloksen seisahtumisen perättäisten laskentakierrosten ylärajaksi 30. Galapagosin Maintain arvoksi valitaan 10 %, joka tarkoittaa valitulla populaatiokoolla, että 5 parasta suunnittelumuuttujavektoria korvataan seuraavan populaation 5 huonoimman tilalle. Parinvainnassa käytettäväksi Inbreeding -kertoimeksi valitaan 75 %. Galapagosin optimointiasetukset on koottu taulukkoon 5.13.

Taulukko 5.13. Galapagos -optimointikomponentin asetukset.

Asetus	Arvo
Runtime limit	40 min
Max. stagnant	30
Population	50
Initial boost	3
Maintain	10 %
Inbreeding factor	75 %

Jokaisesta optimointitehtävästä suoritetaan 10 laskentaa. Laskennan suorittaneen tietokoneen prosessori on Intel Xeon CPU E5-2680 2,4 GHz, keskusmuistin määrä 128 GB ja käyttöjärjestelmä Windows 10.

6. OPTIMOINNIN TULOKSET

6.1 Tulokset

Seuraavissa alaluvuissa esitetään diplomityössä tehtyjen optimointien tulokset. Tuloksista esitetään optimitulosten osalta taulukoidusti rakenteiden käyttöasteet, poikkileikkaukset, eri rakenneosien massat ja kustannukset, ja näiden suhteellinen osuus kokonaismassasta- ja kustannuksista. Taulukoissa esitetään alkuarvauksen tilanne sekä kyseisen optimoinnin massa- ja kustannusoptimin tulos. Tuloksella tarkoitetaan kyseisen rakenteen kattojäykisteiden, pääkannatinristikon sekä päätypalkin kokonaismassaa tai -kustannusta. Lisäksi kattojäykisteiden topologia esitetään kuvallisesti. Näiden lisäksi työn liitteissä F, G ja H esitetään optimoinnin jokaisen laskentakerran tuloksen massan ja kustannuksen arvo sekä tulosta vastaavat topologia- tai geometriaparametrit. Liitteissä esitetään myös jokaisella laskentakerralla suoritettujen evaluointien lukumäärä.

Työssä suoritettiin kolme optimointitehtävää. Jokainen optimointitehtävä sisältää optimoinnin rakenteelle, jossa jäykistysristikolla on N- ja K-topologia. Lisäksi jokaiselle geometrialle tehtiin massa- ja kustannusoptimointi. Jokainen optimointilaskenta suoritettiin kymmenen kertaa ja optimitulokseksi valittiin näistä tuloksista paras. Yhteensä yksi optimointitehtävä sisältää siis 40 laskentaa ja laskentojen kokonaismäärä tässä työssä oli 120.

6.1.1 OPT-1

OPT-1 -optimoinnissa hallin rakenne parametrisoitiin siten, että katto-orret ja jäykisteristikon solmupisteet sijoiteltiin hallin leveys suunnassa tasajaolla. Suunnittelumuuttujiksi optimoinnissa asetettiin topologiamuuttujat eli katto-orsien ja jäykisteristikon diagonaalisauvojen lukumäärät sekä lisäksi pääkannatinristikon diagonaalien lukumäärä. Optimointi suoritettiin sekä kokonaismassan että kokonaiskustannusten suhteen sekä K että N jäykisteristikon geometrioilla.

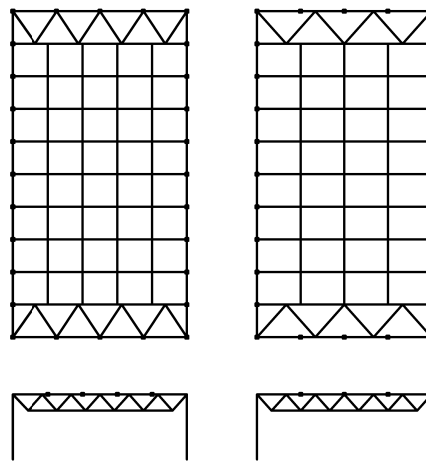
Optimoinnin OPT-1 tulokset on esitetty liitteessä F. Suunnittelumuuttujien lukumäärä molemmissa ristikkotopologioissa oli 9 kappaletta ja ne on esitetty taulukoissa 5.11 ja 5.12. Keskimäärin evaluointeja K-ristikolla suoritettiin 2622 ja N-ristikolla 2704.

Jäykisteristikon K-geometrialla optimitulokset on massaltaan 42497 kg ja se on saatu laskentakerralla M-OPT-1-K-6. Jäykisterakenteiden topologia sisältää massaoptimissa tuloksessa neljä orsilinjaa sekä jäykisteristikko kahdeksan diagonaalisauvaa. Pääkannatinristikon diagonaalien lukumäärä on 12. Vastaavasti optimitulokset kustannuksiltaan on 67080 €,

jossa orsilinjojen lukumäärä on kolme ja jäykisteristikon diagonaalisauvojen lukumäärä kuusi. Tulos on saatu laskennalla C-OPT-1-K-9.

Massan optimoinnissa tehdyssä kymmenessä laskentakerrassa tulokset vaihtelevat välillä 42497...44829 kg. Suurimman ja pienimmän tuloksen välinen suhteellinen erotus on siis 5,5 %. Vastaavasti kustannusoptimoinnissa tulokset vaihtelevat välillä 67080...69172 €, jossa vastaavasti suhteellinen ero on 3,1 %.

Tuloksia havainnollistetaan kuvassa 6.1. Rakenteiden poikkileikkaukset ja käyttöasteet on esitetty taulukossa 6.1. Massojen ja kustannusten jakauma ja suhteelliset osuudet on esitetty taulukossa 6.2. Taulukoissa esitetään myös vastaavat alkuarvauksen arvot.



Kuva 6.1. M-OPT-1-K-1 (vas.) ja C-OPT-1-K-5 (oik.) tuloksia vastaavat jäykistetopologiat. Vasemmanpuoleisen rakenteen massa on 42497 kg ja oikeanpuoleisen rakenteen kustannus 67080 €.

Taulukko 6.1. OPT-1-K laskennan massa- ja kustannusoptimien tulokset ja rakenteiden käyttöasteet sekä siirtymät.

	Alkuarvaus		Massaoptimi		Kustannusoptimi	
	Profili	Käyttöaste	Profili	Käyttöaste	Profili	Käyttöaste
Yläpaarre	250 x 8	0.681	250 x 8	0.846	250 x 8	0.993
Diagonaali	150 x 5	0.701	140 x 5	0.953	140 x 5	0.897
Alapaarre	150 x 10	0.644	100 x 10	0.992	100 x 10	0.978
Jäykisteristikko	140 x 8	0.481	120 x 5	0.913	120 x 6	0.982
Reunapalkki	150 x 6	0.031	100 x 5	0.018	100 x 6	0.080
Katto-orisi	100 x 5	0.174	100 x 5	0.215	100 x 5	0.334
Päätypalkki	HEA260	0.961	HEA240	0.815	HEA300	0.882
Pystytaipuma	75.3 mm	0.704	95.8 mm	0.898	94.9 mm	0.890
Vaakataipuma	12.9 mm	0.162	7.65 mm	0.096	26.0 mm	0.325

Jäykisteristikon N-ristikon geometrialla optimitulos on sama sekä massa- että kustannusoptimoinneissa. Tulokset on saatu laskennoilla M-OPT-1-N-1 ja C-OPT-1-N-5. Optimirakenne on massaltaan 40804 kg ja kustannuksiltaan 64664 €. Jäykisterakenteessa

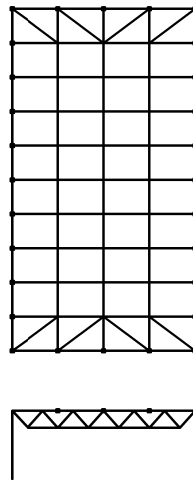
Taulukko 6.2. OPT-1-K laskennan optimitulosten rakenneosien massojen ja kustannusten suhteelliset osuudet.

	Alkuarvaus				Optimi			
	Massa (kg)		Kustannus (€)		Massa (kg)		Kustannus (€)	
Reunapalkit	3168	0.058	6544	0.074	1730	0.041	5270	0.079
Päätypalkit	4361	0.079	4725	0.054	3858	0.091	5885	0.088
Jäykisteristikot	4275	0.078	7514	0.085	2025	0.048	3933	0.059
Katto-orret	4151	0.076	11999	0.136	2767	0.065	6000	0.089
Pääristikot	38969	0.710	57289	0.650	32117	0.756	45993	0.686
Yhteensä	54923	1.000	88071	1.000	42497	1.000	67081	1.000

on kolme orsilinjaa ja jäykisteristikossa neljä diagonaalisauvaa. Tulosta havainnollistetaan kuvassa 6.2.

Massan optimoinnissa tulokset vaihtelevat välillä 40804...42682 kg eli suhteellinen erotulosten välillä on korkeintaan 4,6 %. Vastaavasti kustannusten laskennassa tulokset vaihtelevat välillä 64664...72657 €. Suhteellinen ero on suurimmillaan 12,4 %.

Rakenteiden poikkileikkaukset ja käyttöasteet esitetään taulukossa 6.3 ja vastaavasti massojen ja kustannusten jakaumat ja suhteelliset osuudet rakenneosittain taulukossa 6.4. Lisäksi molemmissa taulukoissa esitetään myös vastaavat alkuarvauksen arvot.



Kuva 6.2. OPT-1-N laskennan tulos. Sama rakenne on optimi sekä massaltaan (40804 kg) että kustannuksiltaan (64664 €).

Taulukko 6.3. OPT-1-N laskennan massa- ja optimin tuloksen rakenteiden käyttöasteet ja siirtymät.

	Alkuarvaus		Optimi	
	Profiili	Käyttöaste	Profiili	Käyttöaste
Yläpaarre	250 x 8	0.643	250 x 8	0.985
Diagonaali	150 x 5	0.701	140 x 5	0.931
Alapaarre	150 x 10	0.644	100 x 10	0.986
Jäykisteristikko	140 x 8	0.270	120 x 4	0.439
Reunapalkki	150 x 6	0.031	100 x 5.0	0.023
Katto-orssi	100 x 5	0.153	100 x 5.0	0.317
Päätypalkki	HEA260	0.948	HEA 220	0.997
Pystytaipuma	75.3 mm	0.704	95.7 mm	0.879
Vaakataipuma	11.8 mm	0.148	6.9 mm	0.086

Taulukko 6.4. OPT-1-N laskennan rakenneosien massojen ja kustannusten suhteelliset osuudet.

	Alkuarvaus				Optimi			
	Massa fkg)		Kustannus (€)		Massa (kg)		Kustannus (€)	
Reunapalkit	3168	0.057	6544	0.073	1730	0.042	5000	0.077
Päätypalkit	4361	0.078	4779	0.054	3230	0.079	3657	0.057
Jäykisteristikot	4914	0.088	8459	0.095	1653	0.041	4014	0.062
Katto-orret	4151	0.075	11999	0.135	2075	0.051	6000	0.093
Pääkannatinristikot	38969	0.701	57289	0.643	32117	0.787	45994	0.711
	55562	1.000	89070	1.000	40805	1.000	64664	1.000

6.1.2 OPT-2

OPT-2 optimoinnissa suoritettiin geometrian optimointi siten, että suunnittelumuuttujiksi asetettiin esivalitun jäykistystopologian katto-orssien ja jäykisteristikon sauvojen solmupisteiden sijaintiparametrit. Lisäksi suunnittelumuuttujana oli pääkannatinristikon diagonaalien lukumäärä eli tältä osin kyseessä oli myös topologian optimointi. K-ristikon tapauksessa valittiin jäykistystopologia, joka sisälsi neljä orsilinjaa ja kahdeksan jäykisteristikon diagonaalisauvaa. Vastaavasti N-ristikon tapauksessa orsilinjoja oli kuusi ja jäykisteristikon diagonaalisauvoja kahdeksan.

Optimoinnin tulokset on esitetty liitteessä G. Suunnittelumuuttujien lukumäärä molemmissa ristikkogeometrioissa on 12 kappaletta. K-ristikolla evaluointeja suoritettiin keskimäärin 2693 ja N-ristikolla 2640 kappaletta.

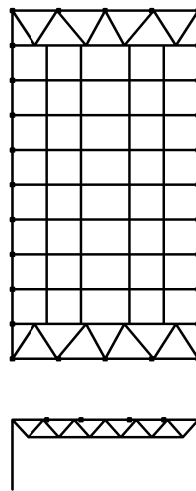
K-jäykistegeometriassa sekä massan että kustannusten optimitulos on saatu kustannusoptimoinnin laskennalla C-OPT-2-K-2. Rakenne on massaltaan 43327 kg ja kustannuksiltaan 68873 €.

Massaoptimoinnissa tulokset vaihtelevat välillä 43820...45830 kg. Suhteellisesti tämä tarkoittaa tulosten olevan 4,6 % sisällä. Vastaavat arvot kustannusten optimoinnissa ovat

68873...72264 € ja 4,9 %.

Jäykistysgeometria on esitetty kuvassa 6.3. Järjestyksessä keskilinjalta hallin sivuun päin siirryttäessä orsilinjojen väliset etäisyydet ovat 8960 mm, 5440 mm ja 6080 mm. Vastavasti jäykisteristikon solmupisteet sijaitsevat pääkannatinristikon yläpaarteella 2080 mm ja 640 mm etäisyydellä lähimmästä orsilinjasta. Päätypalkilla jäykisteristikon solmupiste sijaitsee 180 mm päätypilarista.

Taulukossa 6.5 esitetään optimituloksen rakenteiden poikkileikkaukset ja käyttöasteet. Taulukossa 6.6 esitetään rakenteiden massojen ja kustannusten jakauma rakenneosittain sekä näiden suhteelliset osuudet kokonaismassasta ja -kustannuksista. Taulukoissa esitetään myös vastaavat alkuarvauksen arvot.



Kuva 6.3. C-OPT-2-K laskennan optimituloks, joka on sekä kustannuksiltaan että massaltaan kyseisen laskentasarjan optimi. Rakenteen massa on 43327 kg ja kustannus 68873 €.

Taulukko 6.5. OPT-2-K laskennan rakenteiden käyttöasteet sekä siirtymät.

	Alkuarvaus		Optimi	
	Profili	Käyttöaste	Profili	Käyttöaste
Yläpaarre	250 x 8	0.789	250 x 8	0.953
Diagonaali	150 x 5	0.701	140 x 5	0.952
Alapaarre	150 x 10	0.644	120 x 8	0.976
Jäykisteristikko	140 x 8	0.481	150 x 5	0.480
Reunapalkki	150 x 6	0.031	90 x 6	0.090
Katto-orso	100 x 5	0.189	100 x 5	0.233
Päätypalkki	HEA260	0.680	HEA 240	0.965
Pystytaipuma	75.1 mm	0.702	90.0 mm	0.827
Vaakataipuma	8.1 mm	0.101	7.6 mm	0.095

N-geometriassa sekä massan että kustannusten optimituloks on saatu kustannusoptimoinnin laskennalla C-OPT-2-N-4. Optimituloksen massa on 43831 kg ja kustannus 74888

Taulukko 6.6. OPT-2-K laskennan optimituloksen rakenneosien massojen ja kustannusten suhteelliset osuudet.

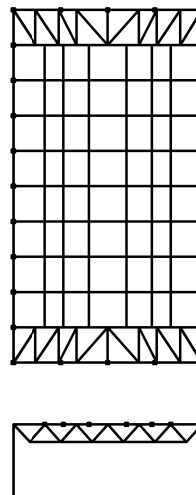
	Alkuarvaus				Optimi			
	Massa (kg)		Kustannus (€)		Massa (kg)		Kustannus (€)	
Reunapalkit	3168	0.060	6544	0.079	1811	0.042	5016	0.073
Päätypalkit	4361	0.082	4698	0.057	3858	0.089	4216	0.061
Jäykisteristikot	3626	0.069	6200	0.075	2572	0.059	5301	0.077
Katto-orret	2767	0.052	7999	0.097	2767	0.064	7999	0.116
Pääkannatinristikot	38969	0.737	56932	0.691	32318	0.746	46341	0.673
Yhteensä	52891	1.000	82374	1.000	43328	1.000	68874	1.000

€.

Massaoptimoinnin tulokset vaihtelevat välillä 44053...47829 kg ja kustannusoptimoinnin 74888...79303 €. Vastaavasti massaoptimoinnilla tulosten välinen suurin suhteellinen erotus on 8,6 % ja kustannusoptimoinnilla 5,9 %.

Jäykistysgeometria on esitetty kuvassa 6.4. Orsilinjojen väliset etäisyydet ovat järjestyksessä hallin keskilinjalta hallin reunaa kohti 6400 mm, 4320 mm, 3200 mm ja 5280 mm. Vastaavasti jäykisteristikon solmupisteet sijaitsevat pisteissä 3680 mm, 7680 mm ja 10720 mm. Päätypilaria lähin jäykistesauva sijaitsee 180 mm pääty Pilarin yläpäästä.

Taulukossa 6.7 esitetään optimituloksen rakenteiden poikkileikkaukset ja käyttöasteet. Taulukossa 6.8 esitetään optimituloksen massojen ja kustannusten jakauma rakenneosittain ja näiden suhteelliset osuudet kokonaismassasta ja -kustannuksista. Molemmissa taulukoissa esitetään myös vastaavat alkuarvaukset arvot.



Kuva 6.4. C-OPT-2-N laskennan optimitulos. Rakenne on sekä massaltaan (43831 kg) että kustannuksiltaan (74888 €) kyseisen laskentasarjan optimi.

Taulukko 6.7. OPT-2-N laskennan rakenteiden käyttöasteet sekä siirtymät.

	Alkuarvaus		Optimi	
	Profili	Käyttöaste	Profili	Käyttöaste
Yläpaarre	250 x 8	0.626	250 x 8	0.797
Diagonaali	150 x 5	0.701	140 x 5	0.931
Alapaarre	150 x 10	0.644	120 x 8	0.965
Jäykisteristikko	140 x 8	0.301	120 x 4	0.575
Reunapalkki	150 x 6	0.031	90 x 6	0.081
Katto-orso	100 x 5	0.158	100 x 5	0.198
Päätypalkki	HEA260	0.443	HEA 200	0.984
Pystytaipuma	74.8 mm	0.699	94.2 mm	0.884
Vaakataipuma	4.7 mm	0.059	6.4 mm	0.080

Taulukko 6.8. OPT-2-N laskennan optimituloksen rakenneosien massojen ja kustannusten suhteelliset osuudet.

	Alkuarvaus				Optimi			
	Massa (kg)		Kustannus (€)		Massa (kg)		Kustannus (€)	
Reunapalkit	3168	0.058	6544	0.076	1811	0.041	5016	0.067
Päätypalkit	4361	0.080	4833	0.056	2703	0.062	3238	0.043
Jäykisteristikot	6267	0.115	11137	0.130	2848	0.065	7937	0.106
Katto-orret	4151	0.076	11999	0.140	4151	0.095	11999	0.160
Pääkannatinristikot	36565	0.671	51257	0.598	32318	0.737	46698	0.624
Yhteensä	54512	1.000	85770	1.000	43831	1.000	74889	1.000

6.1.3 OPT-3

Optimoinnissa OPT-3 hallin rakenne parametrisoitiin siten, että jäykisteristikon diagonalisauvat liittyvät ristikon yläpaarteella katto-orsien kanssa samoihin solmupisteisiin. Jäykistystopologiana käytettiin samaa esivalittua topologiaa kuin OPT-2 optimoinnissa. Suunnittelumuuttujia olivat siis katto-orsien sijaintiparametrit sekä K-ristikon optimoinnissa jäykisteristikon diagonaalien solmupisteet päätypalkilla. Lisäksi pääkannatinristikon diagonaalien lukumäärä oli suunnittelumuuttuja.

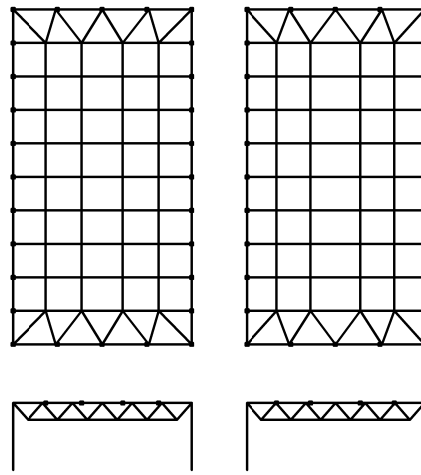
Kaikkien laskentojen tulokset on esitetty liitteessä H. Suunnittelumuuttujien lukumäärä molemmissa ristikkogeometrioissa on 10 kappaletta. Evaluointien lukumäärän keskiarvo K-ristikolla oli 2737 ja N-ristikolla 2586 kappaletta.

K-jäykisteristikogeometriassa optimituloksena on massaltaan 42902 kg ja kustannuksiltaan 68543 € ja se on saatu laskennalla M-OPT-3-K-3. Vastaavasti kustannuksiltaan paras rakenne on saatu laskennalla C-OPT-3-K-7 ja se on kustannuksiltaan 68433 € ja massaltaan 42962 kg.

Massaoptimoinnissa tulosten vaihteluväli on 42902...44671 kg ja kustannusten optimoinnissa 68433...71848 €. Suhteellisesti massaoptimoinnin tulokset ovat toisistaan enintään 4,1 % ja kustannusoptimoinnin vastaavasti 5,0 % päässä.

Sekä massa- että kustannusoptimoinnin jäykistysgeometria on esitetty kuvassa 6.5. Vasemmanpuoleisessa tapauksessa katto-orsien välinen etäisyys hallin keskilinjalta reunan suuntaan järjestyksessä on 7360 mm, 6400 mm ja 5920 mm. Oikeanpuoleisessa tapauksessa vastaavat arvot ovat 8960 mm, 6080 mm ja 5440 mm. Päätypalkilla diagonaalit liittyvät kummassakin tapauksessa 180 mm etäisyydelle päätypilarista.

Taulukossa 6.9 esitetään massa- ja kustannusoptimoinnin tulosten rakenteiden poikkileikkaukset ja suurimmat käyttöasteet. Taulukossa 6.10 esitetään rakenneosittain rakenteiden massat ja kustannukset ja näiden suhteelliset osuudet kokonaismassasta ja -kustannuksista. Molemmissa taulukoissa esitetään lisäksi alkuarvauksen vastaavat arvot.



Kuva 6.5. *M-OPT-3-K-3 (vas.) ja C-OPT-3-K-7 (oik.) laskennan tulokset. Vasemmanpuoleinen rakenne on massaltaan 42902 kg ja oikeanpuoleinen kustannuksiltaan 68433 €.*

Taulukko 6.9. *OPT-3-K laskennan massa- ja kustannusoptimien tulokset ja rakenteiden käyttöasteet sekä siirtymät.*

	Alkuarvaus		Massaoptimi		Kustannusoptimi	
	Profili	Käyttöaste	Profili	Käyttöaste	Profili	Käyttöaste
Yläpaarre	250 x 8	0.694	250 x 8	0.857	250 x 8	0.998
Diagonaali	150 x 5	0.685	140 x 5	0.935	140 x 5	0.940
Alapaarre	150 x 10	0.629	100 x 10	0.984	100 x 10	0.986
Jäykisteristikko	140 x 8	0.293	120 x 4	0.672	100 x 8	0.862
Reunapalkki	150 x 6	0.031	120 x 6	0.047	100 x 5	0.018
Katto-orsi	100 x 5	0.203	100 x 5	0.238	100 x 5	0.236
Päätypalkki	HEA260	0.684	HEA 240	0.948	HEA 240	0.988
Pystytaipuma	75.1 mm	0.702	95.8 mm	0.898	95.8	0.898
Vaakataipuma	5.8 mm	0.072	6.5 mm	0.082	7.1	0.088

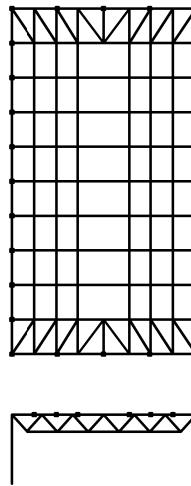
N-geometriassa sekä massan että kustannusten suhteen optimitulos on saatu kustannusoptimoinnissa laskennalla C-OPT-3-N-2. Optimituloksen massa on 43912 kg ja kustannus 74737 €.

Taulukko 6.10. OPT-3-K laskennan massa- ja kustannusoptimien massojen ja kustannusten jakautuminen eri rakennesosille ja niiden suhteelliset osuudet.

	Alkuarvaus				Optimi			
	Massa (kg)		Kustannus (€)		Massa (kg)		Kustannus (€)	
Reunapalkit	3168	0.060	6544	0.079	2490	0.058	5000	0.073
Päätypalkit	4361	0.082	4698	0.057	3858	0.090	4216	0.062
Jäykisteristikot	3705	0.070	6272	0.076	1670	0.039	5047	0.074
Katto-orret	2767	0.052	7999	0.097	2767	0.064	7999	0.117
Pääkannatinristikot	38969	0.736	56932	0.691	32117	0.749	46172	0.675
Yhteensä	52969	1.000	82446	1.000	42902	1.000	68434	1.000

Massaoptimoinnissa kaikkien laskentakertojen tulokset vaihtelevat välillä 44156...46019 kg ja kustannusoptimoinnissa vastaavasti välillä 74737...80105 €. Suhteellisesti tämä tarkoittaa, että massaoptimoinnissa tulosten välinen erotus on suurimmillaan 4,2 % ja kustannusoptimoinnissa 7,2 %.

Tuloksia havainnollistetaan kuvassa 6.6. Rakenteiden poikkileikkaukset on esitetty taulukossa 6.11. Massojen ja kustannusten jakauma ja suhteelliset osuudet on esitetty taulukossa 6.12. Molemmissa taulukoissa esitetään myös vastaavat alkuarvauksen arvot.



Kuva 6.6. C-OPT-3-N laskennan tulos, joka on sekä massaltaan (43912 kg) että kustannuksiltaan (74737 €) kyseisen laskentasarjan optimi.

Taulukko 6.11. OPT-3-N laskennan rakenteiden käyttöasteet sekä siirtymät.

	Alkuarvaus		Optimi	
	Profili	Käyttöaste	Profili	Käyttöaste
Yläpaarre	250 x 8	0.605	250 x 8	1.001
Diagonaali	150 x 5	0.685	140 x 5	0.965
Alapaarre	150 x 10	0.629	120 x 8	0.931
Jäykisteristikko	140 x 8	0.301	90 x 6	0.954
Reunapalkki	150 x 6	0.031	100 x 5	0.027
Katto-orso	100 x 5	0.172	100 x 5	0.242
Päätypalkki	HEA260	0.716	HEA 200	0.961
Pystytaipuma	75.3 mm	0.704	94.2 mm	0.883
Vaakataipuma	4.9 mm	0.061	6.1 mm	0.077

Taulukko 6.12. OPT-3-N laskennan massa- ja kustannusoptimien massojen ja kustannusten jakautuminen eri rakenneosille ja niiden suhteelliset osuudet.

	Alkuarvaus				Optimi			
	Massa (kg)	Kustannus (€)	Massa (kg)	Kustannus (€)	Massa (kg)	Kustannus (€)	Massa (kg)	Kustannus (€)
Reunapalkit	3168	0.056	6544	0.071	1730	0.039	5000	0.067
Päätypalkit	4361	0.077	4833	0.053	2703	0.062	3238	0.043
Jäykisteristikot	6289	0.110	11158	0.122	3011	0.069	7802	0.104
Katto-orret	4151	0.073	11999	0.131	4151	0.095	11999	0.161
Pääkannatinristikot	38969	0.684	57289	0.624	32318	0.736	46698	0.625
Yhteensä	56937	1.000	91823	1.000	43912	1.000	74737	1.000

6.2 Tulosten arviointi ja johtopäätökset

Jokaisessa laskennassa lopetusehtona käytetty 40 min laskenta-ajan yläraja lopetti laskennan. Toinen lopetusehto oli laskennan tuloksen kehityksen seisahtuminen 30 perättäiseksi iteraatiokierrokseksi. Tämä ehto ei kuitenkaan yhdelläkään laskentakerralla toteutunut. Työssä tehdyssä 120 optimointilaskennassa suoritettiin keskimäärin 2664 evaluaatiota yhtä laskentaa kohden. Laskennassa käytetty aloituspopulaation koko on 150 ja populaation koko 50. Yhteen laskentaan sisältyy siis keskimäärin 51 geneettisen algoritmin iteraatiokierrosta. Optimituloksen kehittymistä ilmaistaan konvergenssikäyrällä. Optimitulokseen johtaneiden laskentakierrosten konvergenssikäyrät on esitetty liitteessä I. Kuvaajiin on merkitty myös katkoviivalla alue, joka kuuluu kyseisen laskentakerran optimituloksen 2,5 %-fraktiiliin. Tällä havainnollistetaan sitä, miten hyvin laskennan tulos suppenee. Taulukkoon 6.13 on koottu jokaiselta laskentakierrokselta 2,5 %-fraktiiliin kuuluvien evaluaatiokierrosten lukumäärä sekä lukumäärän suhteellinen osuus koko laskentakierroksen evaluaatioista.

Suoritetuissa massaoptimoinneissa keskimäärin 637 evaluaatiota ja kustannusoptimoinneissa keskimäärin 950 evaluaatiota kuuluu optimituloksen 2,5 %-fraktiiliin. Keskihaajonta massaoptimoinnilla on 420 evaluaatiokierrosta ja vastaavasti kustannusoptimoinnilla 390. Suhdeluvun keskiarvo painotettuna kierrosten evaluontien lukumäärällä on mas-

Taulukko 6.13. Optimointikierrosten optimituloksen 2,5 %-fraktiiliin kuuluvien evaluaatiokierrosten lukumäärät ja näiden suhteelliset osuudet optimointikerran evaluaatioiden lukumäärästä. Korostettujen laskentojen suhteellinen osuus fraktiilista on alle 20 %.

	Massaoptimointi		Kustannusoptimointi	
	Evaluaatiot	%-osuus	Evaluaatiot	%-osuus
OPT-1-K	362	13.6	1511	55.6
OPT-1-N	249	10.9	1045	36.4
OPT-2-K	1102	39.3	909	34.4
OPT-2-N	507	22.4	617	21.2
OPT-3-K	1232	44.1	529	19.6
OPT-3-N	372	14.5	1088	40.8

saoptimoinnilla 24,8 % ja kustannusoptimoinnilla 34,5 %. Optimointikierrokset, joissa optimituloksen suppeneminen on selkeästi vajavaista ovat massaoptimoinnin laskennat OPT-1-K, OPT-1-N ja OPT-3-N sekä kustannusoptimoinnin laskenta OPT-3-K. Nämä tulokset ovat taulukossa korostettuna ja niissä suhteellinen osuus on alle 20 %. Voidaan siis todeta, että optimituloksen parantuminen laskenta-aikaa kasvattamalla ainakin näillä optimoinikerroilla olisi ollut odotettavissa. Huomioitavaa on myös, että Galapagos-optimointikomponentissa on mahdollista asettaa lopetusehto ainoastaan täysin ei-kehitystä tapahtuvien iteraatiokierrosten lukumäärälle, mutta fraktiilia ei ole mahdollista asettaa.

Optimoinnin rajoitusehdoista käyttöaste osoittautui rajoittavaksi tekijäksi kaikissa laskennoissa. Muita rajoitusehdoja olivat pysty- ja vaakasuuntainen taipuma. Pystysuuntaisen taipuman käyttöaste jäi optimituloksissa arvoihin 0,83...0,90 ja vaakasuuntaisen vastaavasti 0,08...0,33. Mitoitettavia rakenteita ovat pääkannatinristikon ylä- ja alapaarre sekä päätypalkki. Yläpaarteen käyttöaste asettui kaikissa laskennoissa välille 0,797...1,001. Vastaava vaihteluväli diagonaaleille on 0,897...0,965, alapaarteelle 0,931...0,992 ja päätypalkille 0,815...0,997. Voidaan siis todeta, että käytetty ulkoinen sakkofunktiomenetelmä sekä valittu sakkotermin kehitys (kaava 5.10) osoittautuivat toimiviksi. Ainoastaan yksi tulos jäi epäkäyväälle alueelle yläpaarteen käyttöasteen ollessa 1,001.

Suunnittelumuuttujien määrittelyalue esiteltiin taulukossa 5.11. Optimituloksissa määrittelyalueen alarajan on useammassa laskennassa saanut reunapalkin poikkileikkaus. Muilla suunnittelumuuttujilla optimitulos jäi jokaisella laskennalla määrittelyalueen ääriarvojen välille. Valitsemalla reunapalkki suunnittelumuuttujan sijasta vakioprofiiliseksi olisi optimoinnista saatu vähennettyä yksi suunnittelumuuttuja ja näin ollen mahdollisesti olisi päästy parempiin tuloksiin.

Pääkannatinristikon topologia (12 diagonaalisauvaa), yläpaarteen poikkileikkaus (250 x 8) sekä diagonaalien poikkileikkaus (140 x 5) oli kaikissa optimoinnin tuloksissa sama. Ristikön topologia ja rasitukset on esitetty liitteessä J. Alapaarteen poikkileikkaus vaihteli 100 x 10 ja 120 x 8 välillä.

Pääkannatinristikko muodostaa tutkituissa tapauksissa 73,6...78,7 % rakenteen massas-

ta ja 62,4...71,1 % rakenteen kustannuksista. Valitsemalla isompi poikkileikkaus ristikon yläpaarteeseen päädyttäisiin siis todennäköisesti kokonaisuuden kannalta epätaloudellisempaan rakenteeseen. Yläpaarten poikkileikkausta on mahdollista pienentää lisäämällä diagonaalien lukumäärää, jolloin taivutusmomentti yläpaarteella pienenesi, mutta ristikon massa tai kustannukset muodostuvat näissä tilanteissa suuremmiksi, jolloin katon rakenne ei kokonaisuudessaan ole enää optimi. Voidaan siis todeta, että tutkitun rakenteen tapauksessa jäykisterakenteita optimoimalla ei voida vaikuttaa pääkannatinristikkoon.

Taulukkoon 6.14 on koottu optimointien tulokset.

Taulukko 6.14. Koonti optimointien tuloksista.

	K-ristikko		N-ristikko	
	Massa (kg)	Kustannus (€)	Massa (kg)	Kustannus (€)
OPT-1	42497	67080	40804	64664
OPT-2	43327	68873	43831	74888
OPT-3	42902	68433	43912	74737

Jäykistesauvojen määrä OPT-1 K-ristikon kustannusoptimissa tapauksessa on 56 ja vastaavasti N-ristikon tapauksessa 58. Vaikka N-ristikolla asennettavien sauvojen määrä on suurempi, on kokonaiskustannus 2416 € pienempi. Tämä on selitettävissä sillä, että N-ristikon topologiassa ei rakenteilla ole lainkaan kaksiakσιαalista taivutusta (6.2). K-ristikon tapauksessa päätypalkin profiili on HEA300 ja jäykisteristikon diagonaalit 120 x 6, kun vastaavasti N-ristikolla päätypalkki on HEA220 ja jäykisteristikon diagonaalit 120 x 4. N-ristikon rakenne on myös kokonaisuudessaan 2143 kg kevyempi kuin kustannusoptimi K-ristikon rakenne. K-ristikolla massaoptimi rakenne on 42497 kg, joka kustannuksiltaan on 983 € suurempi kuin kustannusoptimi rakenne. Ero selittyy asennuskustannuksilla ja suuremmalla liitosten määrällä. Massaoptimissa rakenteessa asennettavia jäykistesauvoja on 12 kappaletta enemmän kuin kustannusoptimissa. Liitteen C perusteella yhden siteen asennuskustannus on 74,4 €, jolloin pelkästään asennuskustannuksista tuleva kustannusero on kokonaisuudessaan 823 €. OPT-1 K ja N-rakenteita verrattaessa edullisempi kokonaisuus saavutetaan siis suuremmalla sauvamäärällä ja jäykistegeometrialla, jossa pystykuormia kantaville rakenteille ei synny kaksiakσιαalista taivutusta.

Kun verrataan OPT-2 ja OPT-3 laskennan K- ja N-ristikon tuloksia, voidaan todeta asennettavien jäykisterakenteiden määrän vaikutus kustannuksiin. K-ristikon jäykistetopologiassa sauvojen kokonaismääräksi valittiin 68 ja N-ristikon jäykistystopologiassa vastaavasti 98. Kuitenkin optimoimalla massaa saatiin rakenteiden kokonaismassat hyvin lähelle toisiaan, optimitulosten välisen eron massoissa ollen vain 1,1...2,3 %. Kuitenkin kustannuksissa ero jäi 8,7...10,8 %. Näissä tapauksissa on siis selkeää, että isompi sauvamäärä johtaa korkeampiin kustannuksiin, vaikka rakenteiden kokonaismassa on lähes sama.

OPT-2 ja OPT-3 laskennan K-topologiat ovat samanlaisia verrattuna OPT-1 laskennan K-topologiaan, joten geometriaa optimoimalla vähintäänkin sama tulos olisi teoriassa saavutettavissa. OPT-2-K tulos on kuitenkin 830 kg OPT-1-K tulosta suurempi ja vastaavasti

OPT-3-K on 405 kg suurempi. Kustannusten osalta OPT-2-K on 1793 € ja OPT-3-K 1353 € suurempi kuin OPT-1-K. Aiemmin todettiin, että laskenta-aikaa kasvattamalla etenkin laskennoilla C-OPT-3-K ja M-OPT-3-N voisi olla mahdollista löytää parempi tulos. Kuitenkin rakenteiden korkean käyttöasteen perusteella voidaan todeta, että kyseisellä topologialla paremman tuloksen saavuttaminen on epätodennäköistä ja että kaikilla optimointitehtävillä tehdyt K-ristikkotopologiat ovat lähellä kyseisen topologian optimia. Voidaan siis todeta, että geometriaa optimoimalla ei saavutettu parempaa kokonaisuutta, vaan optimiratkaisu löytyy pelkästään topologiaa optimoimalla. Huomioitavaa on silti, että OPT-3 tilanteessa K-ristikolla optimitulos on tilanne, jossa päätypalkilla ei ole poikittaista taivutusta tai sitä on hyvin vähän, kuten kuva 6.5 osoittaa.

6.3 Jatkotutkimusaiheet

Tutkimuksessa käytetyt Grasshopper, Karamba3D ja Galapagos -työkalut ovat suhteellisen uusia, niistä saatavilla oleva tutkimustieto on varsin vähäistä, ohjelmistojen dokumentaatio on suppeaa ja jaettu tieto rajoittuu suurimmaksi osaksi käyttäjien jakamiin kokemuksiin. Tässä diplomityössä luotiin tutkimusta varten työkalu käyttäen näitä sovelluksia. Työtä tehdessä nousi kuitenkin jatkuvasti esiin tarve luotettavalle ja vertailukelpoiselle tiedolle komponenttien toiminnasta. Esimerkiksi Galapagos-optimointikomponentin luvussa 4.5 esitetty toimintaperiaate perustuu täysin sen kehittäjän internetissä jakamiin tietoihin (Rutten 2011) sekä hänen kanssa käytyyn sähköpostikeskusteluun (Rutten 2018). Galapagos-komponentissa on geneettisen optimointialgoritmin lisäksi myös simulated annealing -algoritmiin perustuva optimointimahdollisuus.

Galapagoksen lisäksi Grasshopper-ympäristöön on kehitetty myös muita optimointikomponentteja, joita ovat esimerkiksi vastepintametelmään perustuva Opossum (Wortmann 2018), monitavoiteoptimointiin soveltuva Octopus (Vierlinger 2015) tai useamman optimointialgoritmin tarjoava Goat (Rechenraum 2018). Algoritmiavusteinen suunnittelu yleistyy rakennesuunnittelun alalla jatkuvasti ja sen myötä insinööriystävällisten optimointisovellusten käyttö yleistyy. Tutkimus jossa vertailtaisiin Grasshopper-ympäristölle toteutettuja optimointityökaluja, ja esitettäisiin ongelmia joihin sovellukselle kehitetyt eri optimointikomponentit parhaiten soveltuisivat, loisi hyvän pohjan alalla jo käynnistyneelle kehitystyölle.

7. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä toteutettiin sauvarakentein jäykistetyin teräshallin rakennelaskentaa ja optimointia varten parametrinen rakennemalli. Rakennemalli toteutettiin Grasshopper-sovelluksella ja rakenneanalyysi sen Karamba3D-lisäosalla. Toteutetun rakennemallin perusteella tutkittiin jäykistysvoimien jakautumista hallin kattojäykistyksessä ja suoritettiin kattojäykisteiden topologian ja geometrian optimointi.

Rasitusten jakautumista ja kaksiakselisen taivutuksen vaikutusta pääkannatinristikon yläpaarteissa sekä parretta tukevien katto-orisien normaalivoimajakaumaa tutkittiin työssä tehdyssä esiselvityksessä. Selvityksen tarkoituksena oli luoda käsitys jäykistysrakenteiden rasitusten suuruusluokasta ja luoda perusteet rakenteiden optimoinnille. Optimoinnin kohdefunktiona oli erikseen sekä rakenteiden massa että kustannukset.

Selvityksessä vertailtiin kahta jäykistystopologiaa. Toisessa rakenteessa katto-orret ja päädyn jäykisteristikon sauvat sijoitettiin niin, että poikittaista taivutusta rakenteille ei pääse syntymään. Toisessa rakenteessa poikittaisen taivutuksen suuruus pyrittiin maksimoimaan sauvojen sijoittelulla. Selvityksessä eriteltiin katto-orsiin pääkannatinristikon nurjahdustuennasta, tuulikuormasta sekä rakenteiden taipumaerosta aiheutuvasta pakkovoimasta aiheutuvien voimien suuruus. Selvityksen perusteella maksimipystykuorman vaikuttaessa pakkovoiman suuruus katto-orssissa on nurjahdustuennasta sekä ulkoisesta vaakakuormasta aiheutuvaan rasitukseen verrattuna noin nelinkertainen ristikon jännevälillä. Pakkovoiman suuruutta todellisessa rakennuksessa voidaan kuitenkin pitää kyseenalaisena, sillä esimerkiksi rakentamisjärjestys ja pulttiliitosten luisto pienentävät sen vaikutusta. Lisäksi puristetussa rakenteessa on otettava huomioon myös rakenteen nurjahduskestävyys, joten rakenteen mitoittamista pelkästään pakkovoiman aiheuttamalle veto-rasitukselle ei voida pitää luotettavana.

Selvityksessä tutkittiin myös kattoristikon yläparretta tukeviin orsiin jäykistysjärjestelmän epätarkkuudesta aiheutuvaa ekvivalenttia stabiloivaa voimaa ja sen jakautumista eri orsilinjoille. Selvityksessä määritettiin ensin käsin laskemalla ekvivalentin stabiloivan voiman suuruus käyttämällä Eurokoodi 3:n laskentakaavaa (3.1). Tämän jälkeen tulosta verrattiin rakenneanalyysistä saatuihin orsivoimiin. Rakennemallissa ristikon yläparreiden geometria mallinnettiin kaarevana ja näin otettiin huomioon alkukaarevuus. Rakenneanalyysi suoritettiin toisen kertaluvun mukaan, jolloin Eurokoodi 3:n mukaan käsinlaskentakaavassa ei tarvitse huomioida kuormista aiheutuvaa taipumaa. Laskennan perusteella ekvivalentin stabiloivan voiman suuruus verrattuna käsinlaskettuihin arvoihin poikkesi vain 1,6...1,8 %. Selvityksen perusteella ekvivalentin stabiloivan voiman jakautuminen eri orsilinjoille muistuttaa paraabelikäyrää. Työn teoriaosuudessa selvitettiin, että integroimalla kaarevan sauvan parabolisesti jakautuneen normaalivoiman jakaumaa sauvan

pituuden yli, on sauvan pitkittäisakselista kohtisuorasti kaarevuuden suuntaan kohdistuvan voiman jakauma paraabelin muotoinen. Selvityksessä tutkittu orsivoimajakauma tukee siis tätä teoriaa.

Työn tutkimusosuudessa suoritettiin katon jäykisterakenteille sekä pääkannatinristikolle optimointi. Optimoinnin tarkoituksena oli tutkia, miten jäykistysjärjestelmän geometria vaikuttaa rakenteen kustannustehokkuuteen ja millaisiin optimiratkaisuihin erilaisilla topologioilla on mahdollista päästä. Optimointi jaettiin kolmeen erilaiseen tehtävään, joissa hallin rakenne oli parametrisoitu eri tavoin. Ensimmäisessä optimointitehtävässä optimointiin jäykistävien sauvojen määrää ja rakenteiden poikkileikkauksia. Toisessa tehtävässä optimointiin esivalitussa jäykistystopologiassa jäykistysrakenteen geometriaa. Kolmas tehtävä oli aseteltu samalla tavalla kuin toinen tehtävä, mutta rakenne oli parametrisoitu niin, että orsilinjat liittyivät viimeisellä ristikkokehällä jäykisteristikon sauvoihin, jolloin pääkannatinristikon yläpaarteelle ei synny poikittaista taivutusta.

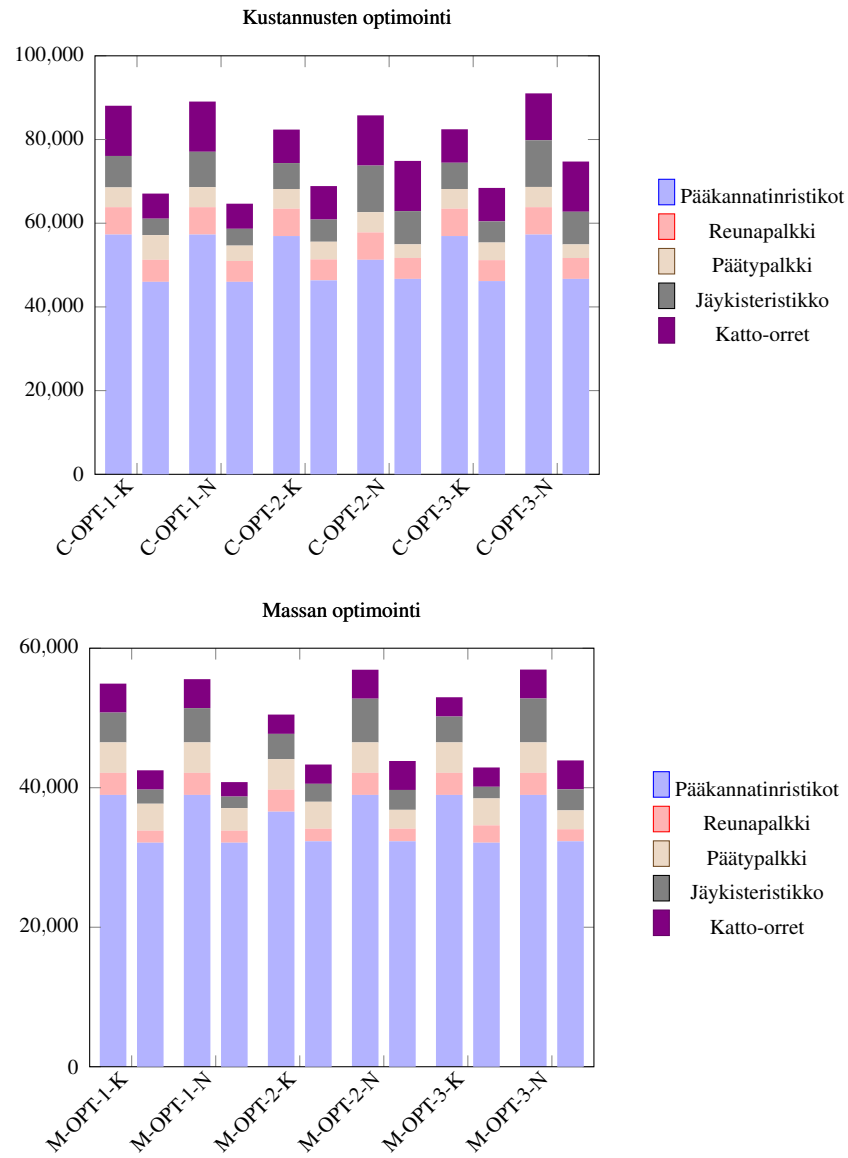
Optimointi suoritettiin Grasshopperin Galapagos-komponentin geneettisellä optimointialgoritmillä. Tulosten luotettavuus pyrittiin varmistamaan toistamalla jokainen tehtävänäsettelun laskenta 10 kertaa sekä toteamalla tulosten riittävä tarkkuus tuloksen konvergenssikäyrän sekä optimitulosten käyttöasteiden perusteella. Tulosten perusteella osoittautui, että laskentaan valittu 40 min laskenta-aika oli joidenkin tulosten suppenemisen kannalta liian lyhyt. Toisaalta kuitenkin käyttöasteen perusteella tehtiin oletus, että kyseinen tulos on riittävän lähellä optimia.

Optimoinnin tulokset on esitetty kuvassa 7.1. Kuvaajissa esitetään sekä alkuarvaus vasemmanpuoleisessa pylväsryhmässä että optimitulos oikeanpuoleisessa pylväsryhmässä.

Optimoinnin perusteella pyrittiin vastaamaan tutkimuskysymyksiin, jotka esitettiin työn johdannossa. Jokaisen optimoinnin tuloksessa pääkannatinristikon yläpaarteeksi valikoitui sama teräsputki profiili, vaikka optimituloksissa jäykistävien orsilinjojen määrä vaihtelee välillä 3...6. Jäykistysjärjestelmän optimoinnilla ei siis kyseisessä rakenteessa saavutettu ristikon kannalta merkittävää etua. Myöskään oletusta, että katto-orsien tiheämpi sijoittelu ristikon jännevälin keskelle yläpaarteen portaittaisen puristusvoiman vuoksi tuottaisi paremman ratkaisun, ei pystytty optimoimalla osoittamaan oikeaksi.

Kaikkien optimitulosten kokonaismassa vaihteli välillä 40804...43912 kg, jäykistävien sauvarakenteiden määrä välillä 56...98 ja kokonaiskustannus välillä 64664...74888 €. Tämän perusteella on selkeää, että jäykistysjärjestelmän optimoinnissa saavutettava etu saadaan nimenomaan kustannuksissa massan sijaan, jolloin kannattavampaa on pienempien poikkileikkausten sijaan pyrkiä minimoimaan sauvamäärä.

Tulosten perusteella jäykistysjärjestelmän geometrialla ei ole suurta vaikutusta optimirakenteen kannalta. Saaduissa optimituloksissa on mukana sekä sellaisia rakenteita, joissa kaksiaksiaalista taivusta esiintyy että rakenteita, joissa sen vaikutus on saatu minimoitua että rakenteen parametrisoinnilla sekä geometriaa vapaasti optimoimalla. Kokonaismas-



Kuva 7.1. Massa- ja kustannusoptimointien alkuarvaukset ja optimitulokset sekä massojen ja kustannusten jakautuminen.

san ja kokonaiskustannusten vaihtelu näiden välillä on kuitenkin merkityksetöntä verrattuna jäykistetopologian optimointiin.

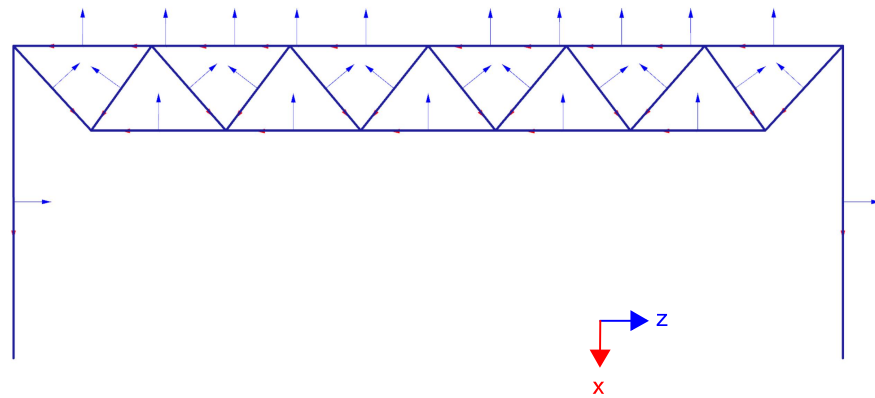
LÄHDELUETTELO

- Aristizabal-Ochoa, D. J. (2011). Minimum bracing stiffness for multi-column systems: theory. *Dyna* Vol. 78.No. 168, s. 7–18. ISSN: 0012-7353.
- Arora, J. S. (2004). *Introduction to optimum design*. 2. painos. 728 s. ISBN: 0-12-064155-0.
- Ballio, G. & F. M. Mazzolani (1983). *Theory and design of steel structures*. ISBN: 0-412-23660-5.
- Biegus, A. & D. Czepizak (2018). Generalized model of imperfection forces for design of transverse roof racings and purlins. *Archives of civil and mechanical engineering (ACME)* Vol. 18, s. 267–279. ISSN: 1644-9665.
- Blum, C. & A. Roli (2003). *Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison*. *ACM Computing Surveys* Vol. 35.No. 3, s. 268–308.
- EN 1993-1-1 (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. CEN.
- Erkkilä, S. (2017). *Algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntäminen betonielementtirakenteiden suunnittelussa*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 113 s.
- Haapio, J. (2012). *Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach*. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. 140 s.
- Haataja, J. (2004). *Optimointitehtävien ratkaiseminen*. 3. painos. 245 s. ISBN: 952-9821-95-6.
- Haftka, R. T. & G. Zafer (1992). *Elements of structural optimization*. 3. painos. 481 s. ISBN: 0-7923-1504-9.
- Kaitila, O. (2010). *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus : Eurocode 3 -oppikirja*. Teräsrakenneyhdistys. 183 s. ISBN: 7978-952-9683-50-5.
- Kouhi, J. (2015). *Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu, 1-1 Yleiset ja rakennuksia koskevat säännöt : sovellutusohjeita, taustatietoja, kommentteja, tulkintoja, selvennyksiä, kansallinen liito ja sen taustoja, oppi- ja opetusaineistoa, esimerkkejä*. 1. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry. ISBN: 978-952-9683-44-4.
- Lalla, A. (2017). *kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 98 s.

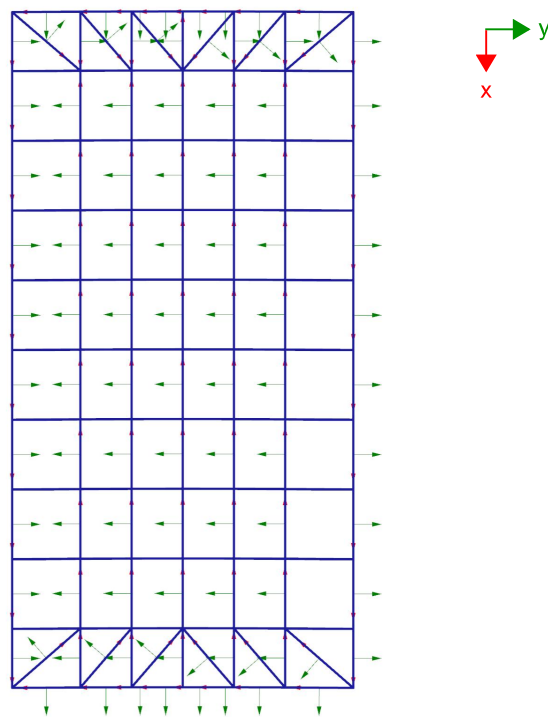
- Leino, T., G. Åström & T. Lahtela (2017). Rakenteiden vaurionsietokyvyn varmistaminen onnettomuustilanteessa (RIL 201-4-2017). Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 166 s. ISBN: 978-951-758-617-7.
- Makris, M. P. (2013). Structural Design Tool for Performative Building Elements: A Semi-Automated Grasshopper Plugin for Design Decision Support of Complex Trusses. Master of Science Thesis. University of South California. 227 s.
- Mela, K. (2013). Mixed Variable Formulations for Truss Topology Optimization. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. 150 s.
- Mäenpää, J. (2018). Algorithm-aided structural engineering of steel framed warehouse. Master of Science Thesis. Tampereen teknillinen yliopisto. 138 s.
- Oy Kontino Ab (2018). Putkipalkit neliöt S355J2H tuotekatalogi. URL: <http://tuoteluettelo.kontino.fi/?p=4806> (viitattu 16. 10. 2018).
- Preisinger, C. (2016). Karamba user manual. Versio 1.2.2. 142 s. URL: <https://www.karamba3d.com/news/new-manual/> (viitattu 26. 08. 2018).
- Preisinger, C. (2018). Sähköpostikeskustelu 10.9.2018. URL: info@karamba.com.
- Rakennustieto Oy (2018). RT-kustannuslaskenta, hinnasto. URL: <https://kustannuslaskenta.rakennustieto.fi/> (viitattu 17. 10. 2018).
- Rao, S. S. (1999). Engineering optimization : theory and practice. 4. painos. 830 s. ISBN: 978-0-470-18352-6.
- Ratu 0409 (2013). Teräsrunkotyö. Rakennustieto Oy.
- Rechenraum (2018). goat - Free optimization solver component for Rhino's Grasshopper. URL: <https://www.rechenraum.com/en/goat.html> (viitattu 30. 10. 2018).
- Rubin, H. (1996). Uniform formulae of first- and second-order theory for skeletal structures. Engineering structures Vol. 19.No. 11, s. 903–909. ISSN: 0141-0296/97.
- Rutten, D. (2011). Evolutionary Principles applied to Problem Solving. David Ruttenin blogi "I Eat Bugs For Breakfast". URL: <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/epatps01/> (viitattu 17. 10. 2018).
- Rutten, D. (2018). Sähköpostikeskustelu 17.10.2018. URL: david@mceel.com.
- Timoshenko, S. P. & J. M. Gere (1963). Theory of elastic stability. 17. painos. 541 s. ISBN: 0-07-Y85821-7.
- Vierlinger, R. (2015). Octopus. URL: <https://www.food4rhino.com/app/octopus> (viitattu 30. 10. 2018).

- Winter, G. (1958). Lateral bracing of columns and beams. American society of civil engineers Vol. 125, s. 809–825.
- Wortmann, T. (2018). Opossum - optimization solver with surrogate models. URL: <https://www.food4rhino.com/app/opossum-optimization-solver-surrogate-models> (viitattu 30. 10. 2018).
- Vu, K. K. et al. (2017). Surrogate-based methods for black-box optimization. International Transactions in Operational Research Vol. 24.No. 3, s. 393–424.
- Ympäristöministeriö (2017). Rakenteiden lujuus ja vakaus. Teräsrakenteet. Helsinki. 96 s. URL: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus (viitattu 16. 10. 2018).
- Yura, J. A. (1971). The effective length of columns in unbraced frames. AISC Engineering Journal Vol. 8.No. 2, s. 37–42.
- Yura, J. A. & T. A. Helwig, toim. (1995). Bracing for stability - State-of-the-art. ASCE Structures Congress XIII. Boston, Ma., s. 88–103.
- Ziemian, R. D. (2010). Stability design criteria for metal structures. 6. painos. ISBN: 978-0-470-08525-7.

LIITE A: ELEMENTTIEN LOKAALIT KOORDINAATISTOT



Kuva A.1. Pääkehän elementtien lokaalit koordinaattiakselit.



Kuva A.2. Katon elementtien lokaalit koordinaattiakselit.

LIITE B: KUSTANNUSTEN MUODOSTAMISEEN KÄYTETTÄVÄT KAAVAT JA VAKIOT

Kustannuskaavat ja -vakiot koskevat yhden kokoonpanon valmistusta koskevia kustannuksia.

Taulukko B.1. *Materiaalikustannusten yksikköhinnat.*

Selite	Tunnus	Kustannus	Yksikkö
Teräs tukkuhinta	c_{SM}	0,80	€/kg
Pultti M16	c_B	1,00	€/kpl
Mutteri M16	c_N	0,30	€/kpl
Aluslevy M16	c_W	0,50	€/kpl
Pultti M24	c_B	3,30	€/kpl
Mutteri M24	c_N	1,00	€/kpl
Aluslevy M24	c_W	0,80	€/kpl
Maali (EP)	c_p	10,00	€/L

Taulukko B.2. *Työkustannusten yksikköhinnat.*

Selite	Tunnus	Kustannus	Yksikkö
Konepajatyö	c_{fb}	75,0	€/h
Rakennusmies (RM)	c_{RM}	40,0	€/h
Rakennusapumies (RAM)	c_{RAM}	28,0	€/h
Henkilönostin	c_{lift}	20,0	€/h
Nosturi	c_{crane}	100,0	€/h

Taulukko B.3. *Työmenekit (Ratu 0409 2013) mukaan.*

Selite	Tunnus	Kustannus	Yksikkö
Vastaanotto ja välivarastointi	T_{Es}	0,05	tth/kpl
Nosto	T_{Ec}	0,35	tth/kpl
Mittaus ja asennus	T_{Ee}	0,6	tth/kpl

Esikäsittely

Esikäsittelyprosessin valmisteleviin töihin kuluva aika on

$$T_{NB} = 3min \quad (B.1)$$

Esikäsittelyprosessiin kuluva työaika on

$$T_{PB} = \frac{L_B}{v_B} \quad (\text{B.2})$$

missä L_B on käsiteltävän kappaleen pituus ja v_B on laitteen tehokkuus. Käytetään arvoa $v_B = 3000 \text{ mm/min}$.

Katkaisu

Katkaisuprosessin valmisteleviin töihin kuluva aika on

$$T_{NS} = 4.5 \text{ min} + \frac{L_B}{v_B} \quad (\text{B.3})$$

missä L_B on käsiteltävän kappaleen pituus ja v_B on sahakuljettimen nopeus. Käytetään arvoa $v_B = 20000 \text{ mm/min}$.

Katkaisuprosessiin kuluva työaika on

$$T_{PS} = \frac{2h}{SS_m} + \frac{A_h}{Q} \quad (\text{B.4})$$

missä h on katkaistavan kappaleen korkeus, S_m on materiaalista riippuva kerroin, jolle käytetään arvoa $S_m = 0,9$, A_h on katkaistavan profiilin vaakasuuntaisten osuuden pinta-ala, Q on sahaustehokkuus vaakasuunnassa, jolle käytetään arvoa $Q = 8800 \text{ mm}^2/\text{m}$ ja S on sahaustehokkuus pystysuunnassa (mm/min), jonka suuruus on

$$S = 0.0328t^2 - 3.1794t + 115.6, \quad (\text{B.5})$$

missä t on katkaistavan profiilin ainevahvuus (mm).

Poraus

Levyjen porausprosessin valmisteleviin töihin kuluva aika on

$$T_{ND} = 3 \text{ min} \quad (\text{B.6})$$

Poraus aika muodostuu terän syöttönopeudesta (mm/min) ja porattavien reikien määrästä. Terän syöttönopeus kierrosta kohti f_n (mm/kierros) määritetään kaavalla

$$f_n = -0.0002d^2 + 0.0141d + 0.1354m \quad (\text{B.7})$$

missä d on porattavan reiän koko (mm). Terän leikkausnopeutena käytetään arvoa $V_c = 40 \text{ m/min}$. Terän syöttönopeus (mm/min) lasketaan poraustyöstön kaavoilla.

Levyjen leikkaus

Levyjen leikkausprosessin valmisteleviin töihin kuluva aika on

$$T_{NCu} = 3 \text{ min} \quad (\text{B.8})$$

Leikkausprosessiin kuluva työaika (min) on

$$T_{PCu} = \frac{L_{Cu}}{8.9212t^2 - 486.87t + 8155.8}, \quad (\text{B.9})$$

missä t on leikattavan levyn paksuus (mm) ja L_{Cu} leikkeen pituus.

Hahlon leikkaus

Profiliin tehtävän hahlon leikkausprosessin valmistelutöihin kuluva aika (min) on

$$T_{NC0} = 10 + \frac{L_B}{v_B} + 0.001L_{C0} \quad (\text{B.10})$$

missä L_B on työstettävän kappaleen pituus (mm), v_B on leikkauskuljettimen nopeus ja L_{C0} on leikkeen kokonaispituus (mm). Käytetään kuljettimen nopeudelle arvoa $v_B = 20000 \text{ mm/min}$.

Leikkausprosessiin kuluva työaika (min) on

$$T_{PC0} = \frac{L_{C0}}{-4.1939t + 658.67} \quad (\text{B.11})$$

missä t on profiilin ainevahvuus (mm).

Hitsaus

Hitsausprosessin valmistelutöihin kuluva aika (min) on

$$T_{b,NW} = 1.59n_{pl} \quad (\text{B.12})$$

missä n_{pl} on hitsattavien levyjen lukumäärä.

Pienahitsille hitsausaika on

$$T_{PW} = L_W(0.4988a^2 - 0.0005a + 0.021), \quad (\text{B.13})$$

missä L_W on hitsaussauman pituus ja a on pienahitsin a-mitta.

Hitsauksen ainekustannus (€/m) on

$$c_{CPA} = 0.0000498a^2 \quad (\text{B.14})$$

Pintakäsittely

Pintakäsittelyprosessiin kuluva työaika (min) on

$$T_{PP} = \frac{0.01 + DFT}{v_{si}f_{pg}}A_sL_B, \quad (\text{B.15})$$

missä DFT on maalipinnan kuivapaksuus (mm), v_{si} on kuivapartikkeleiden osuus jolle käytetään arvoa 45%, f_{pg} on maaliruiskun tehokkuus jolle käytetään arvoa 900000 mm^3/min , A_s on profiilin vaipan pinta-ala pituusyksikköä kohti (mm^2/m) ja L_B on profiilin pituus (m).

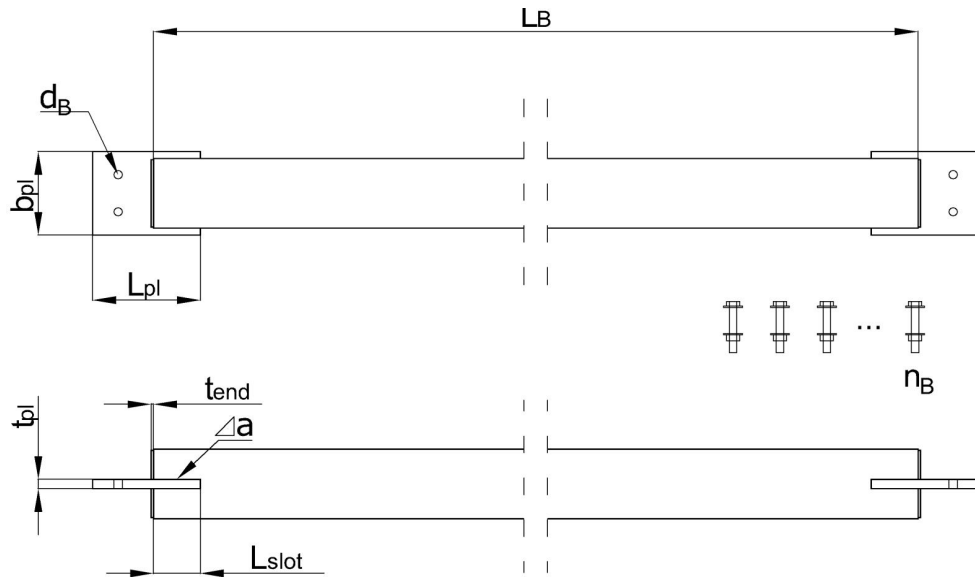
Kuluvan maalin määrä on

$$v_{CP} = \frac{0.01 + 1.3DFT}{v_{si}}A_sL_B \quad (\text{B.16})$$

LIITE C: ESIMERKKILASKELMA: SIDEPALKIN KUSTANNUKSET

Perustuu Jaakko Haapion väitöskirjaan:

Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach



Lähtötiedot

Putkipalkki

Profiili	profiili := <input type="text" value="100 x 100 x 5"/>
Palkin pituus	$L_B := 6\text{m}$
Materiaali	Teräs S355

Kiinnikkeet

Pulttien määrä	$n_B := 4$	kokonaismäärä siteessä
Pulttien koko	pultti := <input type="text" value="M16"/>	
Kierre	pulttikierre := <input type="text" value="Osakierteinen"/>	
Pultin pituus	pultti_pituus := <input type="text" value="80"/>	
Aluslevyjä per. pultti	$n_{\text{aluslevy}} :=$ <input type="text" value="2"/>	

Pintakäsittely

EP 100/1

Kuivapaksuus	DFT := 100 μ m
Kuivapartikkelien osuus	$v_{s1} := 45\%$

Levyt

Levyn paksuus	$t_{p1} := 10\text{mm}$
Levyn leveys	$b_{p1} := h + 20\text{mm} = 120\text{-mm}$
Levyn pituus	$L_{p1} := 200\text{mm}$
Upotusmitta putkipalkkiin	$L_{\text{slot}} := 100\text{mm}$
Päätylevyn paksuus	$t_{\text{end}} := 5\text{mm}$
Hitsin a-mitta	$a := 5\text{mm}$

Yksikköhinnat

Materiaali

Profiilin hinta	$c_{SMB} := 0.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$	
Levyn hinta	$c_{SMPL} := 0.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$	
Kiinnikkeet	$c_{Bi} = 1 \text{ €}$	pultti
	$c_{Ni} = 0.3 \text{ €}$	mutteri
	$c_{Wi} = 0.5 \text{ €}$	aluslevy
Maali	$c_p := 10 \frac{\text{€}}{\text{L}}$	

Konepajatyö

Aikakustannus	$c_{fb} := 75 \frac{\text{€}}{\text{hr}}$
---------------	---

Asennustyö

Asentajat	$c_{RM} := 40 \frac{\text{€}}{\text{hr}}$
	$c_{RAM} := 28 \frac{\text{€}}{\text{hr}}$
Henkilönostin	$c_{lift} := 20 \frac{\text{€}}{\text{hr}}$
Nosturi	$c_{crane} := 100 \frac{\text{€}}{\text{hr}}$

Materiaalit

Profiilin massa pituusyksikköä kohti	$m_m = 14.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
Profiilin poikkipinta-ala	$A = 1840 \cdot \text{mm}^2$
Putkipalkin massa	$W_{\text{SMB}} := L_B \cdot m_m = 86.4 \text{ kg}$
Levyjen massa	$W_{\text{SMPL}} := 2 \left[t_{\text{pl}} \cdot b_{\text{pl}} \cdot L_{\text{pl}} + 2 \cdot \left[t_{\text{end}} \cdot \left(h^2 - h \cdot t_{\text{pl}} \right) \right] \right] \cdot \rho_s = 5.2 \text{ kg}$
Kokonaismassa	$W := W_{\text{SMPL}} + W_{\text{SMB}} = 91.6 \text{ kg}$
Putkipalkin kustannus	$C_{\text{SMB}} := W_{\text{SMB}} \cdot c_{\text{SMB}} = 69.1 \text{ €}$
Levyjen kustannus	$C_{\text{SMPL}} := W_{\text{SMPL}} \cdot c_{\text{SMPL}} = 4.1 \text{ €}$
Liitinten kustannus	$C_{\text{SMC}} := n_B \cdot (c_{\text{Bi}} + c_{\text{Ni}} + n_{\text{aluslevy}} \cdot c_{\text{Wi}}) = 8.9 \text{ €}$
Kokonaiskustannus materiaalit	$C_{\text{SM}} := C_{\text{SMB}} + C_{\text{SMPL}} + C_{\text{SMC}} = 82.2 \text{ €}$

$$C_{\text{SM}} = 82.2 \text{ €}$$

Esikäsittely

Valmistelutyöt	$T_{NB} := 3 \text{ min}$
Puhdistimen tehokkuus	$v_B := 3000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$
Puhdistusaika	$T_{PB} := \frac{L_B}{v_B} = 2 \cdot \text{min}$
Kokonaisaika esikäsittely	$T_B := T_{NB} + T_{PB} = 5 \cdot \text{min}$
Kokonaiskustannus esikäsittely	$C_B := (T_{NB} + T_{PB}) \cdot c_{fb} = 6.3 \text{ €}$

$$T_B = 5 \cdot \text{min}$$

$$C_B = 6.3 \text{ €}$$

Katkaisu

Valmistelutyöt

$$T_{NS} := 4.5 \text{ min} + \frac{L_B}{20000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 4.8 \cdot \text{min}$$

Sahaustehokkuus pystysuunnassa

$$S := \left[0.0328 \cdot (t \cdot \text{mm}^{-1})^2 - 3.1794 \cdot (t \cdot \text{mm}^{-1}) + 115.6 \right] \cdot \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 100.5 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Materiaalikerroin

$$S_m := 0.9$$

Sahaustehokkuus vaakasuunnassa

$$Q := 8800 \frac{\text{mm}^2}{\text{min}}$$

Vaakasuuntaan sahattavan alueen poikkipinta-ala

$$A_h := \frac{A}{2} = 920 \cdot \text{mm}^2$$

Sahausaika

$$T_{PS} := 2 \left(\frac{2 \cdot h}{S \cdot S_m} + \frac{A}{2Q} \right) = 4.6 \cdot \text{min}$$

Kokonaisaika katkaisu

$$T_S := T_{NS} + T_{PS} = 9.4 \cdot \text{min}$$

Kokonaiskustannus katkaisu

$$C_S := (T_{PS} + T_{NS}) \cdot c_{fb} = 11.8 \text{ €}$$

$$T_S = 9.4 \cdot \text{min}$$

$$C_S = 11.8 \text{ €}$$

Poraus

Valmistelutyöt	$T_{ND} := 3 \text{ min}$
Terän pyörimisnopeus	$V_c := 40 \frac{\text{m}}{\text{min}}$
Reiän koko	$d = 18 \cdot \text{mm}$
Terän syöttönopeus per. kierros	$f_n := \left[-0.0002 \cdot (d \cdot \text{mm}^{-1})^2 + 0.0141 \cdot (d \cdot \text{mm}^{-1}) + 0.1354 \right] \cdot \frac{\text{mm}}{1} = 0.3 \cdot \frac{\text{mm}}{1}$
Pyörimisnopeus	$r := \frac{V_c}{\pi \cdot d} = 707.4 \cdot \frac{1}{\text{min}}$
Syöttönopeus	$V_f := r \cdot f_n = 229.5 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{min}}$
Yhden reiän porausaika	$t_{d,1} := \frac{t_{pl}}{V_f} = 2.6 \text{ s}$
Kokonais porausaika	$T_{PD} := t_{d,1} \cdot n_B + 0.1 \text{ min} \cdot (n_B - 1) = 0.5 \cdot \text{min}$
Kokonaisaika poraus	$T_D := T_{PD} + T_{ND} = 3.5 \cdot \text{min}$
Kokonaiskustannus poraus	$C_D := T_D \cdot c_{fb} = 4.3 \text{ €}$

$$T_D = 3.5 \cdot \text{min}$$

$$C_D = 4.3 \text{ €}$$

Levyjen leikkaus

Leikkattava pituus $L_{Cu} := 2(2 \cdot b_{pl} + 2 \cdot L_{pl}) + 4 \left(2 \cdot h + \frac{h - t_{pl}}{2} \right) = 2260 \cdot \text{mm}$

Valmistelutyöt $T_{NCu} := 3 \text{ min}$

Leikkaamisaika $T_{PCu} := \frac{L_{Cu}}{\left[8.9212 \cdot (t_{pl} \cdot \text{mm}^{-1})^2 - 486.87 \cdot (t_{pl} \cdot \text{mm}^{-1}) + 8155.8 \right] \cdot \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 0.5 \cdot \text{min}$

Kokonaisaika leikkaus $T_{Cu} := T_{NCu} + T_{PCu} = 3.5 \cdot \text{min}$

Kokonaiskustannus leikkaus $C_{Cu} := T_{Cu} \cdot c_{fb} = 4.4 \square$

$$T_{Cu} = 3.5 \cdot \text{min}$$

$$C_{Cu} = 4.4 \square$$

Hahlojen leikkaus

Leikkattava pituus $L_{Co} := 4(2 \cdot L_{slot} + t_{pl}) = 840 \cdot \text{mm}$

Valmistelutyöt $T_{NCo} := 4 \text{ min} + 4 \cdot 1.5 \text{ min} + \frac{L_B}{20000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} + L_{Co} \cdot 0.001 \frac{\text{min}}{\text{mm}} = 11.1 \cdot \text{min}$

Leikkaamisaika $T_{PCo} := \frac{L_{Co}}{-4.1939 \cdot t \cdot \text{mm}^{-1} + 658.67} \cdot \frac{\text{min}}{\text{mm}} = 1.3 \cdot \text{min}$

Kokonaisaika leikkaus $T_{Co} := T_{NCo} + T_{PCo}$

Kokonaiskustannus leikkaus $C_{Co} := T_{Co} \cdot c_{fb} = 15.6 \square$

$$T_{Co} = 12.5 \cdot \text{min}$$

$$C_{Co} = 15.6 \square$$

Hitsaus

Valmistelutyöt	$T_{NW} := 1.59 \text{ min} \cdot 6 = 9.5 \cdot \text{min}$	1.59 min/levy
Hitsien kokonaispituus	$L_{W.pl} := 2 \cdot (4 \cdot L_{slot} + 2 \cdot t_{pl}) = 840 \cdot \text{mm}$	liitoslevy
	$L_{W.end} := 4 \cdot (2 \cdot h + h - t_{pl}) = 1160 \cdot \text{mm}$	päätylevy
Hitsaamisaika	$T_{W.pl} := \left[0.4988 \cdot (a \cdot \text{mm}^{-1})^2 - 0.0005 \cdot a \cdot \text{mm}^{-1} + 0.0021 \right] \frac{\text{min}}{\text{m}} = 12.5 \cdot \frac{\text{min}}{\text{m}}$	liitoslevy
	$T_{W.end} := \left(0.4988 \cdot 5^2 - 0.0005 \cdot 5 + 0.0021 \right) \frac{\text{min}}{\text{m}} = 12.5 \cdot \frac{\text{min}}{\text{m}}$	päätylevy
Hitsaamisaika	$T_{PW} := L_{W.pl} \cdot T_{W.pl} + L_{W.end} \cdot T_{W.end} = 24.9 \cdot \text{min}$	
Ainekustannus	$c_{CPA.pl} := (a \cdot \text{mm}^{-1})^2 \cdot 7.85 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1.91 \frac{\square}{\text{mm}} + 4.44 \frac{\square}{\text{mm}} \right) = 1.2 \frac{\square}{\text{m}}$	liitoslevy
	$c_{CPA.end} := 5^2 \cdot 7.85 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1.91 \frac{\square}{\text{mm}} + 4.44 \frac{\square}{\text{mm}} \right) = 1.2 \frac{\square}{\text{m}}$	päätylevy
Ainekustannus	$c_{CW} := L_{W.pl} \cdot c_{CPA.pl} + L_{W.end} \cdot c_{CPA.end} = 2.5 \square$	
Kokonaisaika hitsaaminen	$T_W := T_{NW} + T_{PW} = 34.5 \cdot \text{min}$	
Kokonaiskustannus hitsaaminen	$C_W := T_W \cdot c_{fb} + c_{CW} = 45.6 \square$	

$$T_W = 34.5 \cdot \text{min}$$

$$C_W = 45.6 \square$$

Pintakäsittely

Maaliruiskun tehokkuus	$f_{pg} := 900000 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$
Maalattava pinta-ala	$A_P := A_S \cdot L_B + 2 \cdot (L_{pl} - L_{slot}) \cdot b_{pl} = 23220 \cdot \text{cm}^2$
Maalaus aika	$T_{PP} := \frac{1}{v_{si}} \cdot \frac{(0.01\text{mm} + 1.3 \cdot \text{DFT})}{f_{pg}} \cdot A_S \cdot L_B = 0.8 \cdot \text{min}$
Kokonaisaika maalaustyö	$T_P := T_{PP} = 47.7 \text{ s}$
Tarvittava maalin määrä	$v_{CP} := \frac{1}{v_{si}} \cdot (0.01\text{mm} + 1.3 \cdot \text{DFT}) \cdot A_P = 0.7224 \text{ L}$
Ainekustannus	$C_{CP} := c_p \cdot v_{CP} = 7.2 \text{ €}$
Kokonaiskustannus	$C_P := T_P \cdot c_{fb} + C_{CP} = 8.2 \text{ €}$

$$T_P = 0.8 \cdot \text{min}$$

$$C_P = 8.2 \text{ €}$$

Asennus

Työryhmän koko:

- aloittavat työt 1 RM + 1 RAM	$n_{VV} := 2$
- nostot ja siirrot 2 RM + 1 RAM	$n_N := 3$
- asennus ja kiinnitys 2 RM + 1 RAM	$n_{Er} := 3$
- suojaus, siivous ja merkintä 1 RM + 1 RAM	$n_{fin} := 2$

Työmenekit

Vastaanotto ja välivarastointi	$t_{VV} := 0.05\text{hr}$
Nostot ja siirrot	$t_N := 0.35\text{hr}$
Asennus ja kiinnitys	$t_{Er} := 0.6\text{hr}$
Suojaus, siivous ja merkintä	$t_{fin} := 0.01\text{hr}$

Asennuskustannukset

Vastaanotto ja välivarastointi	$T_{VV} := \frac{t_{VV}}{n_{VV}} = 1.5 \cdot \text{min}$	$C_{Er.VV} := T_{VV} \cdot (c_{RM} + c_{RAM} + c_{crane}) = 4.2 \square$
Nosto	$T_N := \frac{t_N}{n_N} = 7 \cdot \text{min}$	$C_{Er.N} := T_N \cdot (c_{RM} + c_{RM} + c_{RAM} + c_{crane}) = 24.3 \square$
Asennus	$T_{Er} := \frac{t_{Er}}{n_{Er}} = 12 \cdot \text{min}$	$C_{Er.Er} := T_{Er} \cdot (c_{RM} + c_{RM} + c_{RAM} + c_{lift} + c_{crane}) = 45.6 \square$
Lopetustyöt	$T_{fin} := \frac{t_{fin}}{n_{fin}} = 0.3 \cdot \text{min}$	$C_{Er.fin} := T_{fin} \cdot (c_{RM} + c_{RAM}) = 0.3 \square$
Kokonaisaika	$T_E := T_{VV} + T_N + T_{Er} + T_{fin} = 20.8 \cdot \text{min}$	
Kokonaiskustannus	$C_E := C_{Er.VV} + C_{Er.N} + C_{Er.Er} + C_{Er.fin} = 74.4 \square$	

$$T_E = 20.8 \cdot \text{min}$$

$$C_E = 74.4 \square$$

Yhteenveto

Materiaali-
kustannukset

$$C_{SM} = 82.2 \text{ €}$$

Valmistus-
kustannukset

$$C_F := C_B + C_S + C_D + C_{Cu} + C_{Co} + C_W + C_P = 96.2 \text{ €}$$

Asennuskustannukset

$$C_E = 74.4 \text{ €}$$

Kokonaiskustannus

$$C := C_{SM} + C_F + C_E$$

$$C = 252.8 \text{ €}$$

Kokonaiskustannus
massayksikköä kohti

$$c := \frac{C}{W} = 2.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

LIITE D: KÄYTETYT TERÄSPROFIILIT

Taulukko D.1. Optimoinnissa käytetyt SHS-neliöputkiprofiilit.

Profiilin nimi	h (mm)	t (mm)	A (cm ²)	A _v (cm ²)	I (cm ⁴)	W _{el} (cm ³)	W _{pl} (cm ³)	i (cm)
SHS 25 x 25 x 3	25	3	2.41	1.205	1.84	1.47	1.91	0.87
SHS 30 x 30 x 3	30	3	3.01	1.505	3.5	2.34	2.96	1.08
SHS 40 x 40 x 2	40	2	2.94	1.47	6.94	3.47	4.13	1.54
SHS 40 x 40 x 3	40	3	4.21	2.105	9.32	4.66	5.72	1.49
SHS 40 x 40 x 4	40	4	5.35	2.675	11.07	5.54	7.01	1.44
SHS 50 x 50 x 2	50	2	3.74	1.87	14.15	5.66	6.66	1.95
SHS 50 x 50 x 3	50	3	5.41	2.705	19.47	7.79	9.39	1.9
SHS 50 x 50 x 4	50	4	6.95	3.475	23.74	9.49	11.73	1.85
SHS 50 x 50 x 5	50	5	8.36	4.18	27.04	10.82	13.7	1.8
SHS 60 x 60 x 3	60	3	6.61	3.305	35.13	11.71	13.95	2.31
SHS 60 x 60 x 4	60	4	8.55	4.275	43.55	14.52	17.64	2.26
SHS 60 x 60 x 5	60	5	10.36	5.18	50.49	16.83	20.88	2.21
SHS 70 x 70 x 3	70	3	7.81	3.905	57.53	16.44	19.42	2.71
SHS 70 x 70 x 4	70	4	10.15	5.075	72.12	20.61	24.76	2.67
SHS 70 x 70 x 5	70	5	12.36	6.18	84.63	24.18	29.56	2.62
SHS 80 x 80 x 3	80	3	9.01	4.505	87.84	21.96	25.78	3.12
SHS 80 x 80 x 4	80	4	11.75	5.875	111	27.76	33.07	3.07
SHS 80 x 80 x 5	80	5	14.36	7.18	131.4	32.86	39.74	3.03
SHS 80 x 80 x 6	80	6	16.83	8.415	149.2	37.29	45.79	2.98
SHS 90 x 90 x 3	90	3	10.21	5.105	127.3	28.29	33.04	3.53
SHS 90 x 90 x 4	90	4	13.35	6.675	161.9	35.98	42.58	3.48
SHS 90 x 90 x 5	90	5	16.36	8.18	192.9	42.87	51.41	3.43
SHS 90 x 90 x 6	90	6	19.23	9.615	220.5	49	59.54	3.39
SHS 100 x 100 x 3	100	3	11.41	5.705	177	35.41	41.21	3.94
SHS 100 x 100 x 4	100	4	14.95	7.475	226.4	45.27	53.3	3.89
SHS 100 x 100 x 5	100	5	18.36	9.18	271.1	54.22	64.59	3.84
SHS 100 x 100 x 6	100	6	21.63	10.815	311.5	62.29	75.1	3.79
SHS 100 x 100 x 8	100	8	27.24	13.62	365.9	73.19	91.05	3.67
SHS 100 x 100 x 10	100	10	32.57	16.285	411.1	82.22	105.3	3.55

Profilin nimi	h (mm)	t (mm)	A (cm^2)	A_v (cm^2)	I (cm^4)	W_{el} (cm^3)	W_{pl} (cm^3)	i (cm)
SHS 120 x 120 x 3	120	3	13.81	6.905	312.3	52.06	60.24	4.76
SHS 120 x 120 x 4	120	4	18.15	9.075	402.3	67.05	78.33	4.71
SHS 120 x 120 x 5	120	5	22.36	11.18	485.5	80.91	95.45	4.66
SHS 120 x 120 x 6	120	6	26.43	13.215	562.2	93.69	111.6	4.61
SHS 120 x 120 x 8	120	8	33.64	16.82	676.9	112.8	137.8	4.49
SHS 120 x 120 x 10	120	10	40.57	20.285	776.8	129.5	161.8	4.38
SHS 140 x 140 x 5	140	5	26.36	13.18	790.6	112.9	132.3	5.48
SHS 140 x 140 x 6	140	6	31.23	15.615	920.4	131.5	155.3	5.43
SHS 140 x 140 x 8	140	8	40.04	20.02	1127	161	194.2	5.3
SHS 140 x 140 x 10	140	10	48.57	24.285	1312	187.4	230.4	5.2
SHS 150 x 150 x 4	150	4	22.95	11.475	807.8	107.7	124.9	5.93
SHS 150 x 150 x 5	150	5	28.36	14.18	982.1	130.9	153	5.89
SHS 150 x 150 x 6	150	6	33.63	16.815	1146	152.8	179.9	5.84
SHS 150 x 150 x 8	150	8	43.24	21.62	1412	188.2	226	5.71
SHS 150 x 150 x 10	150	10	52.57	26.285	1653	220.3	269.2	5.61
SHS 160 x 160 x 5	160	5	30.36	15.18	1202	150.3	175.2	6.29
SHS 160 x 160 x 6	160	6	36.03	18.015	1405	175.7	206.2	6.25
SHS 160 x 160 x 8	160	8	46.44	23.22	1741	217.7	260.1	6.12
SHS 160 x 160 x 10	160	10	56.57	28.285	2048	256	311	6.02
SHS 180 x 180 x 5	180	5	34.36	17.18	1737	193	224	7.11
SHS 180 x 180 x 6	180	6	40.83	20.415	2037	226.3	264.4	7.06
SHS 180 x 180 x 8	180	8	52.84	26.42	2546	282.9	335.7	6.94
SHS 180 x 180 x 10	180	10	64.57	32.285	3017	335.2	403.5	6.84
SHS 200 x 200 x 5	200	5	38.36	19.18	2410	241	278.9	7.93
SHS 200 x 200 x 6	200	6	45.63	22.815	2833	283.3	329.7	7.88
SHS 200 x 200 x 8	200	8	59.24	29.62	3566	356.6	420.9	7.76
SHS 200 x 200 x 10	200	10	72.57	36.285	4251	425.1	508.1	7.65
SHS 200 x 200 x 12.5	200	12.5	87.04	43.52	4859	485.9	593.5	7.47
SHS 250 x 250 x 6	250	6	57.63	28.815	5672	453.8	524.5	9.92
SHS 250 x 250 x 8	250	8	75.24	37.62	7229	578.3	675.8	9.8
SHS 250 x 250 x 10	250	10	92.57	46.285	8707	696.5	822	9.7
SHS 250 x 250 x 12.5	250	12.5	112	56	10161	812.9	975.2	9.52
SHS 300 x 300 x 6	300	6	69.63	34.815	9964	664.2	764.2	11.96
SHS 300 x 300 x 8	300	8	91.24	45.62	12801	853.4	990.7	11.84
SHS 300 x 300 x 10	300	10	112.6	56.3	15519	1035	1211	11.74
SHS 300 x 300 x 12.5	300	12.5	137	68.5	18348	1223	1451	11.57

Taulukko D.2. Optimoinnissa käytetyt HEA-avoprofiilit.

Profiilin nimi	h (mm)	b (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)	r (mm)	A (mm ²)	A_y (mm ²)	A_z (mm ²)	I_y (mm ⁴)	I_z (mm ⁴)	$W_{el,y}$ (mm ³)	$W_{pl,y}$ (mm ³)	$W_{el,z}$ (mm ³)	$W_{pl,z}$ (mm ³)
HEA100	96	100	5	8	12	21.2	16.85	7.52	349	134	72.8	83	26.8	41.14
HEA120	114	120	5	8	12	25.3	20.05	8.42	606	231	106	119.4	38.5	58.85
HEA140	133	140	5.5	8.5	12	31.4	24.76	10.11	1030	389	155	173.4	55.6	84.85
HEA160	152	160	6	9	15	38.8	30.06	13.24	1670	616	220	246	76.9	117.63
HEA180	171	180	6	9.5	15	45.3	35.46	14.52	2510	925	294	324	103	156.49
HEA200	190	200	6.5	10	18	53.8	41.59	18.05	3690	1340	389	430	134	203.82
HEA220	210	220	7	11	18	64.3	50.15	20.63	5410	1950	515	568	178	270.59
HEA240	230	240	7.5	12	21	76.8	59.74	25.14	7760	2770	675	744	231	351.69
HEA260	250	260	7.5	12.5	24	86.8	67.36	28.74	10450	3670	836	920	282	430.17
HEA280	270	280	8	13	24	97.3	75.36	31.78	13670	4760	1010	1112	340	518.13
HEA300	290	300	8.5	14	27	113	87.02	37.75	18260	6310	1260	1384	421	641.17
HEA320	310	300	9	15.5	27	124	96.24	40.76	22930	6990	1480	1628	466	709.74
HEA340	330	300	9.5	16.5	27	133	102.47	44.48	27690	7440	1680	1850	496	755.95
HEA360	350	300	10	17.5	27	143	108.7	49.2	33090	7890	1890	2080	526	802.28
HEA400	390	300	11	19	27	159	118.18	57.35	45070	8560	2310	2560	571	872.86
HEA450	440	300	11.5	21	27	178	130.43	65.75	63720	9470	2900	3220	631	965.53
HEA500	490	300	12	23	27	198	142.68	75.18	86970	10370	3550	3940	691	1058.51
HEA550	540	300	12.5	24	27	212	148.94	83.96	111900	10820	4150	4620	721	1106.9
HEA600	590	300	13	25	27	226	155.2	92.75	141200	11270	4790	5360	751	1155.66
HEA650	640	300	13.5	26	27	242	161.47	103.55	175200	11720	5470	6140	782	1204.79
HEA700	690	300	14.5	27	27	260	168.02	116.5	215300	12180	6240	7040	812	1256.74
HEA800	790	300	15	28	30	286	174.75	139	303400	12640	7680	8700	843	1312.26
HEA900	890	300	16	30	30	321	187.36	163.8	422100	13550	9480	10820	903	1414.48
HEA1000	990	300	16.5	31	30	347	193.67	184.71	553800	14000	11190	12820	934	1469.71

Taulukko D.3. Taulukon D.1 lyhenteiden selitteet.

Selite	Tunnus
Profiilin korkeus (leveys)	h
Profiilin ainevahvuus	t
Poikkipinta-ala	A
Leikkauspoikkipinta-ala	A_y
Neliömomentti	I
Kimmoinen taivutusvastus	W_{el}
Plastinen taivutusvastus	W_{pl}

Taulukko D.4. Taulukon D.2 lyhenteiden selitteet.

Selite	Tunnus
Profiilin korkeus	h
Profiilin leveys	b
Laipan paksuus	t_f
Uuman paksuus	t_w
Poikkipinta-ala	A
Leikkauspoikkipinta-ala y-suunnassa	A_y
Leikkauspoikkipinta-ala z-suunnassa	A_z
Neliömomentti y-akselin ympäri	I_y
Neliömomentti z-akselin ympäri	I_z
Kimmoinen taivutusvastus y-akselin ympäri	$W_{el,y}$
Plastinen taivutusvastus y-akselin ympäri	$W_{pl,y}$
Kimmoinen taivutusvastus z-akselin ympäri	$W_{el,z}$
Plastinen taivutusvastus z-akselin ympäri	$W_{pl,z}$

LIITE E: ESISELVITYKSEN LASKENNAN TULOKSET

Taulukko E.1. Esiselvityksen rakennelaskennasta saadut orsivoimat (kN). Taulukon sarakkeet vastaavat kuvan 5.2 orsilinjoja.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Pääty 2	-0.12	11.75	18.13	21.42	20.52	21.42	18.13	11.75	-0.12
	Pääty 1	0.07	10.73	19.15	20.77	21.12	20.77	19.15	10.73	0.07
2	Pääty 2	0.13	11.35	17.63	21.01	20.11	21.01	17.63	11.35	0.13
	Pääty 1	-0.18	11.18	19.70	21.22	21.58	21.22	19.70	11.18	-0.18
3	Pääty 2	-0.03	8.02	10.34	10.85	8.36	10.85	10.34	8.02	-0.03
	Pääty 1	-0.03	8.02	10.34	10.85	8.36	10.85	10.34	8.02	-0.03
4	Pääty 2	0.22	7.59	9.82	10.42	7.92	10.42	9.82	7.59	0.22
	Pääty 1	-0.29	8.44	10.86	11.28	8.79	11.28	10.86	8.44	-0.29
5	Pääty 2	-0.52	35.39	49.11	54.13	46.16	54.13	49.11	35.39	-0.52
	Pääty 1	0.47	34.91	49.71	52.61	45.58	52.61	49.71	34.91	0.47
6	Pääty 2	9.53	35.53	44.15	46.93	38.03	46.93	44.15	35.53	9.53
	Pääty 1	-9.58	34.79	54.69	59.83	53.74	59.83	54.69	34.79	-9.58
7	Pääty 2	-0.04	31.93	41.14	43.14	33.44	43.14	41.14	31.93	-0.04
	Pääty 1	-0.05	31.93	41.15	43.15	33.45	43.15	41.15	31.93	-0.05
8	Pääty 2	10.01	32.05	36.16	35.92	25.28	35.92	36.16	32.05	10.01
	Pääty 1	-10.11	31.78	46.10	50.34	41.58	50.34	46.10	31.78	-10.11
9	Pääty 2	0.18	8.91	16.32	17.60	17.60	16.32	8.91	0.18	
	Pääty 1	0.32	9.11	16.05	17.69	17.69	16.05	9.11	0.32	
10	Pääty 2	0.55	8.69	15.47	17.27	17.27	15.47	8.69	0.55	
	Pääty 1	-0.05	9.39	17.01	18.19	18.19	17.01	9.39	-0.05	
11	Pääty 2	0.16	5.13	8.30	8.23	8.23	8.30	5.13	0.16	
	Pääty 1	0.16	5.13	8.30	8.23	8.23	8.30	5.13	0.16	
12	Pääty 2	0.39	4.68	7.66	7.73	7.73	7.66	4.68	0.39	
	Pääty 1	-0.07	5.59	8.94	8.73	8.73	8.94	5.59	-0.07	
13	Pääty 2	0.37	24.21	40.75	42.45	42.45	40.75	24.21	0.37	
	Pääty 1	1.21	24.30	40.41	41.12	41.12	40.41	24.30	1.21	
14	Pääty 2	11.11	23.19	34.22	33.19	33.19	34.22	23.19	11.11	
	Pääty 1	-9.52	25.38	47.04	50.54	50.54	47.04	25.38	-9.52	
15	Pääty 2	0.69	20.38	32.76	32.49	32.49	32.76	20.38	0.69	
	Pääty 1	0.68	20.38	32.77	32.50	32.50	32.77	20.38	0.68	
16	Pääty 2	-10.05	21.42	39.35	41.86	41.86	39.35	21.42	-10.05	
	Pääty 1	11.43	19.32	26.17	23.16	23.16	26.17	19.32	11.43	

LIITE F: TULOKSET: OPT-1

Taulukko F.1. M-OPT-1-K

	Massa (kg)	Kustannus (€)	Diagonaalien lukumäärä	Orsilinjojen lukumäärä	Jäykisteristikon koko	Evaluoinnit
1	44829	73405	14	5	8	2520
2	43791	72777	14	5	8	2510
3	43008	68935	12	4	8	2575
4	43417	69131	12	4	8	2636
5	44399	75963	18	5	10	2252
6	42497	68063	12	4	8	2660
7	43692	71176	12	5	8	2540
8	43146	69562	12	4	8	2453
9	42834	68632	12	4	8	2656
10	43486	69340	12	4	8	2575

Taulukko F.2. C-OPT-1-K

	Kustannus (€)	Massa (kg)	Diagonaalien lukumäärä	Orsilinjojen lukumäärä	Jäykisteristikon koko	Evaluoinnit
1	67819	43186	12	3	10	2718
2	68828	43242	12	4	8	2677
3	69172	43702	12	4	8	2693
4	68397	42947	12	4	8	2638
5	68870	43324	12	4	8	2617
6	68700	43122	12	4	8	2605
7	67830	44503	12	3	6	2943
8	67977	42947	12	3	10	2589
9	67080	43905	12	3	6	2716
10	67924	46156	12	3	6	2864

Taulukko F.3. M-OPT-1-N

	Massa (kg)	Kustannus (€)	Diagonaalien lukumäärä	Orsilinjojen lukumäärä	Jäykisteristikon koko	Evaluoinnit
1	40804	64664	12	3	4	2273
2	41310	72053	18	5	4	2506
3	42380	77317	16	6	8	2320
4	42682	71339	14	5	4	2647
5	42319	74700	16	6	4	2698
6	42225	68939	12	3	8	2771
7	41378	65392	12	3	4	2759
8	42521	66569	12	3	4	2831
9	41657	76195	16	6	8	2495
10	40912	71311	18	5	4	2673

Taulukko F.4. C-OPT-1-N

	Kustannus (€)	Massa (kg)	Diagonaalien lukumäärä	Orsilinjojen lukumäärä	Jäykisteristikon koko	Evaluoinnit
1	65908	42268	12	3	4	2745
2	68479	41414	12	3	8	2909
3	68238	44500	12	3	4	2948
4	65409	41739	12	3	4	2696
5	64664	40804	12	3	4	2869
6	65164	41402	12	3	4	2901
7	69063	45390	12	3	4	2726
8	72657	42474	16	6	4	2822
9	65734	41772	12	3	4	2840
10	72598	42465	16	6	4	2644

LIITE G: TULOKSET: OPT-2

Taulukko G.1. M-OPT-2-K

	Massa	Kustannus	Diagon.			Jäykisteristikon solmup.			Eval.
	(kg)	(€)	lkm.	Orsilinjat		Paarre	Paarre	Pääty	
1	44212	69661	12	6560	11840	4000	11040	7040	2666
2	43820	71823	14	6240	12800	3680	9920	8160	2805
3	45830	73910	14	6080	12800	3680	12160	7840	2682
4	44529	73636	16	5600	12480	3680	10880	7520	2571
5	44343	69922	12	5600	11840	3360	11200	7680	2644
6	45612	74661	16	5440	12480	4000	8640	6720	2679
7	44881	72110	14	5920	11360	3520	10720	7040	2524
8	44905	72142	14	7360	12800	5440	9920	6880	2741
9	45115	71452	12	5120	11840	3520	11360	7680	2643
10	44170	70020	12	5280	12160	3200	11360	7680	2671

Taulukko G.2. C-OPT-2-K

	Kustannus	Massa	Diagon.			Jäykisteristikon solmup.			Eval.
	(€)	(kg)	lkm.	Orsilinjat		Paarre	Paarre	Pääty	
1	71163	45422	14	4640	12320	3520	11360	7680	2817
2	68873	43327	12	5920	11840	3840	12480	7680	2639
3	69283	43794	12	4320	11680	4640	7360	7360	2646
4	68994	43785	12	7840	11680	9120	6560	9120	2673
5	69984	44071	14	7520	12800	3040	8640	6080	2596
6	70236	44659	12	6240	12000	4160	7360	7520	2539
7	69464	43803	12	5280	12320	3840	11360	7680	2965
8	71598	45317	12	5920	11680	3680	11680	7840	2821
9	71915	46224	14	6400	12800	2880	10400	7520	2855
10	72264	46504	14	6560	12800	4960	9280	6880	2686

Taulukko G.3. M-OPT-2-N

	Massa (kg)	Kustannus (€)	Diag. lkm.	Orsilinjat			Jäykisteristikon solmup.			Eval.
1	44702	75410	12	4000	8480	13440	3680	7840	11680	2437
2	44053	75138	12	4160	8640	13120	3520	7840	11360	2261
3	47162	78113	12	3680	8000	11680	3200	7200	10880	2430
4	47562	79174	12	4000	8480	12800	3360	7200	11040	2635
5	47829	79642	12	4000	8000	12640	3520	7360	11360	2427
6	46864	78338	12	3680	8640	13280	3680	7520	11680	2562
7	46963	78940	12	4000	8320	12800	3360	7200	10880	2599
8	46698	82502	16	4640	8800	13280	3040	7840	10880	2669
9	46272	77692	12	4960	8000	12640	3520	7360	11360	2639
10	45784	77370	12	4320	8640	12640	3200	7520	11520	2654

Taulukko G.4. C-OPT-2-N

	Kustannus (€)	Massa (kg)	Diag. lkm.	Orsilinjat			Jäykisteristikon solmup.			Eval.
1	77621	47891	12	5120	7040	12800	3680	7840	11840	2603
2	76003	45134	12	3840	8160	12640	3520	7680	10560	2707
3	76033	45248	12	4000	8320	12800	3520	7840	11680	2725
4	74888	43831	12	5280	8480	12800	3680	7680	10720	2914
5	77080	47361	12	3840	7520	13280	3520	7520	11360	2662
6	77117	45756	12	4000	3040	12800	3680	7520	11360	2821
7	77259	46398	12	4160	7520	11840	3520	7360	11520	2806
8	76717	45943	12	4640	4800	12000	3680	8000	11200	2635
9	78619	47292	12	4000	8320	13280	3360	7360	11520	2736
10	79303	48289	12	4320	8640	12800	3680	7840	11040	2881

LIITE H: TULOKSET: OPT-3

Taulukko H.1. M-OPT-3-K

	Massa (kg)	Kustannus (€)	Diagonaalien lukumäärä	Orsilinjat		Solmupiste päätypalkilla	Eval.
1	43687	69219	12	6400	12320	6240	2720
2	43347	68874	12	5600	12160	7040	2811
3	42902	68543	12	5920	12320	7680	2793
4	43265	68849	12	4960	11520	7840	2703
5	43707	69198	12	4800	11840	7680	2801
6	43707	69198	12	4800	11840	7680	2877
7	43406	68974	12	5280	11520	7680	2893
8	43357	69133	12	5120	12160	7360	2499
9	43712	69202	12	5120	11520	7840	2872
10	44671	71901	14	5600	12480	7840	2562

Taulukko H.2. C-OPT-3-K

	Kustannus (€)	Massa (kg)	Diagonaalien lukumäärä	Orsilinjat		Solmupiste päätypalkilla	Eval.
1	71848	46132	14	5760	12320	7680	2445
2	68875	43411	12	5440	11520	7680	2738
3	69206	43738	12	5920	11680	7680	2880
4	69528	44244	12	4960	11680	7840	2612
5	69697	44164	12	3360	11520	6400	2911
6	69411	43627	12	4160	12000	8160	2668
7	68433	42962	12	5440	11520	7680	2698
8	70702	45125	14	4160	11360	6880	2819
9	69212	43722	12	5440	11520	7680	2740
10	69212	43722	12	5440	11520	7680	2702

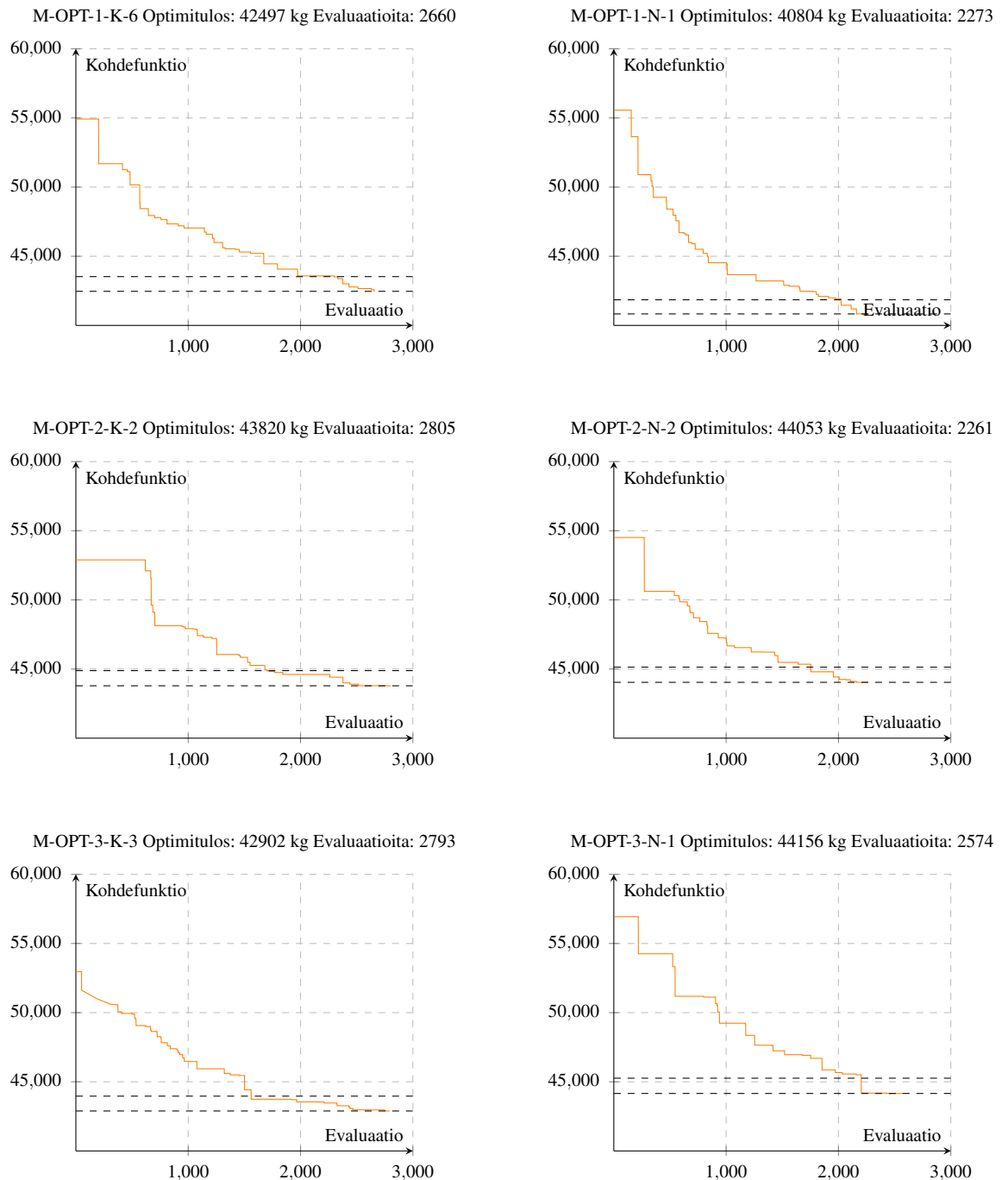
Taulukko H.3. M-OPT-3-N

	Massa (kg)	Kustannus (€)	Diagonaalien lukumäärä	Orsilinjojen sijainnit			Eval.
1	44156	78789	16	3040	8000	13280	2574
2	44225	79370	18	8160	4960	13120	2721
3	46019	77781	12	2880	8960	12640	2760
4	44159	78791	16	5280	8000	13120	2603
5	45436	78505	14	3520	8000	12800	2523
6	45475	78101	14	4000	8000	12800	2590
7	45671	76889	12	3680	8320	11840	2496
8	44800	77749	14	4000	8160	12800	2548
9	44725	77737	14	4640	8160	12800	2576
10	44682	76144	12	7680	3520	12320	2611

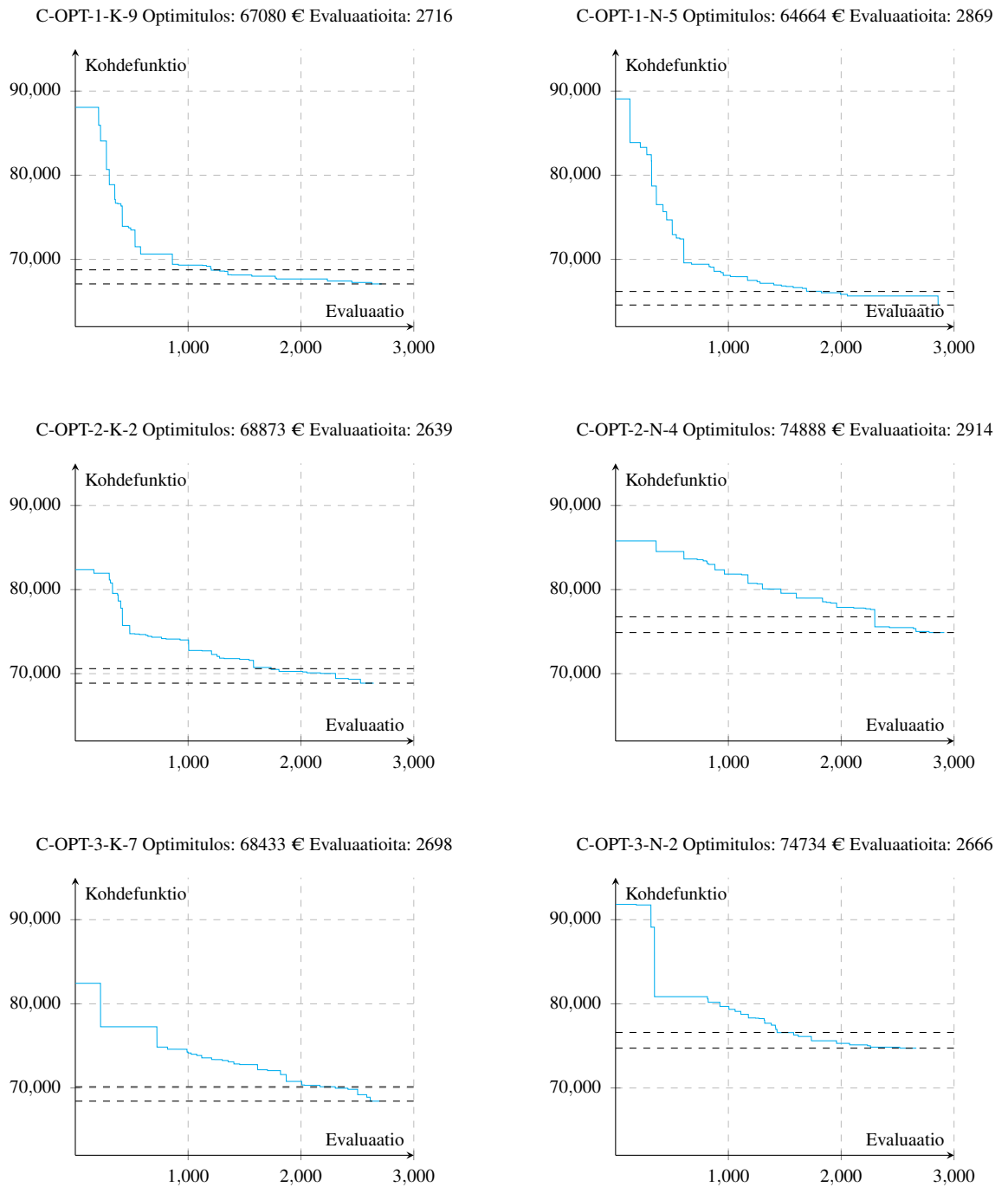
Taulukko H.4. C-OPT-3-N

	Kustannus (€)	Massa (kg)	Diagonaalien lukumäärä	Orsilinjojen sijainnit			Eval.
1	77855	45119	16	4640	8640	13120	2500
2	74737	43912	12	4000	7840	11520	2666
3	77634	44629	16	5120	8160	13280	2478
4	76613	45234	12	4960	7840	11520	2662
5	76929	45648	12	3200	7200	12800	2488
6	77165	45980	12	2880	8000	12640	2544
7	78331	45789	14	3520	8000	12800	2575
8	80105	47183	16	4800	8480	13280	2438
9	75846	44528	12	2560	7840	11840	2809
10	76101	44916	12	5600	8160	12800	2554

LIITE I: OPTIMOINNIN KONVERGENSSIKÄYRÄT

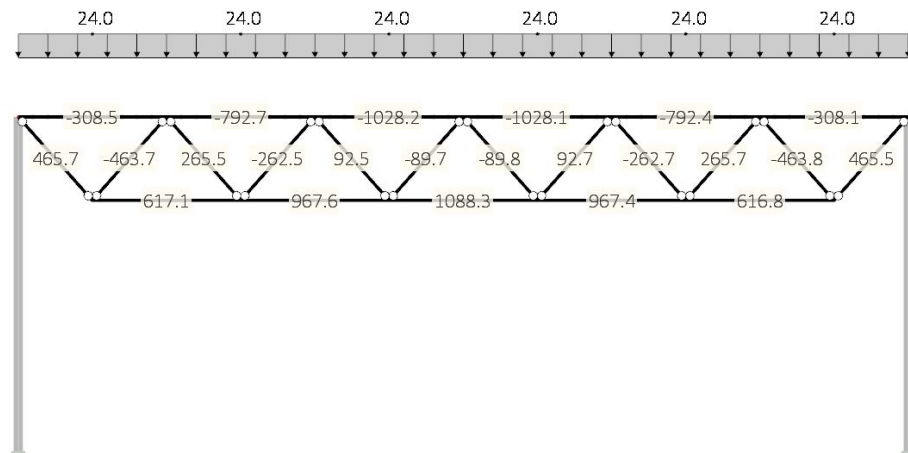


Kuva I.1. Massaoptimoinnin kuntoisuusfunktion kehitys. Mustalla katkoviivalla merkitty alue kuvaa aluetta, joka on optimituloksesta 2,5 % sisällä.

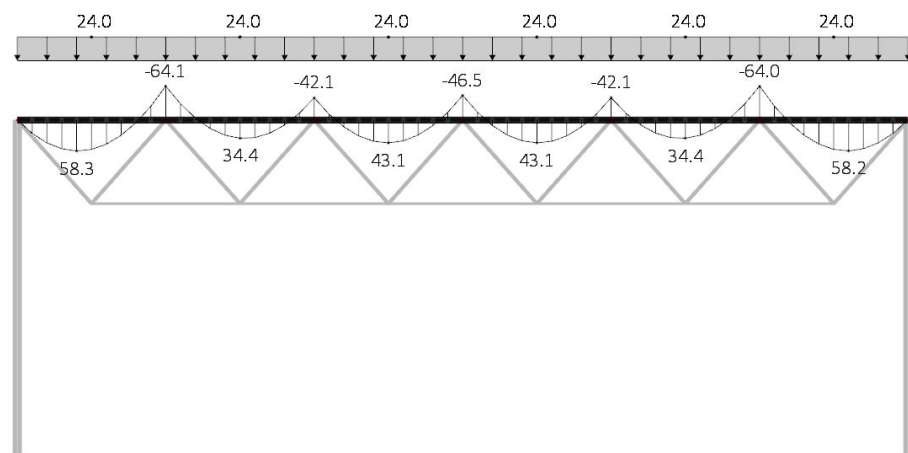


Kuva I.2. Kustannusoptimoinnin kuntoisuusfunktion kehitys. Mustalla katkoviivalla merkitty alue kuvaa aluetta, joka on optimituloksesta 2,5 % sisällä.

LIITE J: TULOKSET: PÄÄKANNATINRISTIKON RA-SITUKSET



Kuva J.1. Pääkannatinristikon normaalivoimat.



Kuva J.2. Pääkannatinristikon yläpaarten taivutusmomentti.