

Victoria Keskinen

# **RAKENNEPUTKIRISTIKOSTA JA I-POIKKILEIKKAUKSISISTA PILAREISTA KOOSTUVAN TERÄSKEHÄN OPTIMOINTI**

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastajat: Assistant Professor Kristo Mela  
Associate Professor Sami Pajunen  
Huhtikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Victoria Keskinen: Rakenneputkiristikosta ja I-poikkileikkauksisista pilareista koostuvan teräskehän optimointi  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Huhtikuu 2020

---

Tutkimuksen aihe on teräksisen kaksoissymmetrisestä hitsatusta I-poikkileikkauksisesta pilarista ja rakenneputkiristikosta koostuvan kehän optimointi. Työn avulla SSAB:n on tarkoitus lisätä kaksoissymmetrinen hitsattu I-poikkileikkauksinen pilari FrameCalc-laskentaohjelmaansa. Myös alustavaa tutkimusta viistetyn pilarin optimoinnista ja lisäämisestä ohjelman pilarivaihtoehdoksi on tehty. Tavoitteena on ollut selvittää, miten pilarin ja kehän optimointitehtävät on asettava ja kuinka ne kannattaisi ratkaista, jotta saavutettaisiin mahdollisimman kevyt rakenne, joka täyttää eurokoodien vaatimukset lujuudelle ja stabiilisuudelle. Optimointi ja elementtimallin luominen on tehty Python-ohjelman avulla.

Työssä on tutustuttu erilaisiin algoritmeihin ja niiden toimintaan sekä käsitelty optimoinnin peruskäsitteitä. Suunnittelumuuttujina on käytetty pääasiassa I- ja neljöputkiprofiilin poikkileikkauksimittoja. Ratkaisumenetelmänä on käytetty pilarilla branch-and-bound -algoritmia, jossa muuttujat ovat diskreettejä. Tässä menetelmässä on alitehtävä, joka ratkaistaan trust region -algoritmilla. Kehän ratkaisumenetelmänä on käytetty kaksivaiheista menettelyä, jossa ensimmäisessä vaiheessa käytetään binäärimuuttujia sekä seka- ja kokonaislukuista peräkkäisten lineaaristen approksimaatioiden menetelmää. Toisessa vaiheessa käytetään indeksimuuttujia ja moniympäristöhakua, jonka alitehtävä ratkaistaan geneettisellä algoritmilla.

Yksittäistä pilaria on tutkittu 144 erilaisella laskentatapauksella kolmella eri teräslajilla. Diskreeteillä muuttujilla optimoitua hitsattua I-profiilista poikkileikkauksiluokassa 2 tai 3 olevaa pilaria on vertailtu vastaavaan käypään SHS- ja HEA-profiiliseen pilariin. Tutkimuksen laskentatulosten perusteella voidaan sanoa, että painon kannalta on järkevää käyttää hitsattuja I-profiileita pilareina. Hitsattujen I-profiilisten pilareiden painoero HEA- ja SHS-profiileihin verrattuna korostuu pisimmillä tutkituilla pilareilla. Mitä pidempi pilari on, sitä enemmän optimoinnilla saavutetaan hyötyä painon suhteen. Laskentatapausten perusteella voidaan todeta, että pilarin ratkaisemiseen käytetty menetelmä näyttää sopivan hyvin kaksoissymmetrisen hitsatun I-profiilisen pilarin ratkaisemiseen.

Kehällä on tutkittu neljää erilaista laskentatapausta kahdella eri teräksellä. Kehän optimointituloksista ei voida tehdä yhtä suoraa päätelmää kuin yksittäisen pilarin optimoinnista. Kehällä ei myöskään ole tutkittu niin paljon eri tapauksia, että voitaisiin tehdä kattavia johtopäätöksiä. Laskentatapausten perusteella on todettu, että käytetyt algoritmit eivät tässä työssä olleet kehän optimointitehtävän ratkaisemiseen sopivimpia.

Avainsanat: rakennesuunnittelu, optimointi, teräsrakenteet, massan minimointi, portaalikehä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Victoria Keskinen: Optimization of the steel portal frame with a tubular truss and I-profile columns  
Master's thesis  
Tampere University  
Master's Degree Program in Civil Engineering  
April 2020

---

The subject of the study is the optimization of the steel portal frame with a tubular truss and I-profile columns. Through this work, SSAB is expected to add a dual symmetric welded I-profile column to their FrameCalc-program. Preliminary research on optimizing the tapering column and adding it as a column alternative to the program has also been done. The aim has been to find out how the column and frame optimization tasks should be set up and how they should be solved in order to achieve the lightest possible structure that meets the requirements of the Eurocodes for strength and stability. The optimization and creation of the element template are done with Python.

The thesis introduces different algorithms and their operation as well as the basic concepts of optimization. The design variables are mainly the cross-sectional dimensions of the I- and tubular profiles. The column solution method is the branch-and-bound algorithm, where the variables are discrete. There is one subproblem in this method, which is solved by the trust region algorithm. The frame solution method is a two-step procedure, in which the first step uses binary variables and a method of mixed and integer sequential linear approximations. The second stage uses index variables and variable neighbourhood search, which subproblem is solved by a genetic algorithm.

The single column has been studied in 144 different cases in three different grades of steel. Discrete-variable optimized welded I-profile columns in cross-sectional class 2 or 3 have been compared with the corresponding current SHS and HEA profile columns. The weight difference of the welded I-profile columns compared with the HEA and SHS profiles is accentuated by the longest studied columns. The longer the column the more optimization the weight gain is achieved. Based on the computational cases, it can be stated that the method used for solving the column seems to be well suited for solving the dual symmetric welded I-profile column.

Four different cases with two different steels have been studied in the frame. Frame optimization results cannot be as directly deduced as column optimization. In addition, the frame has not investigated so many different cases that it is possible to make comprehensive conclusions. Based on the computational cases, it has been found that the algorithms used in this work were not the most suitable for solving the frame optimization problem.

Keywords: structural design, optimization, steel structures, mass minimization, portal frame

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

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty työsuhteessa Tampereen yliopistoon. Kiitos työn ohjaajalle ja tarkastajalle professori Kristo Melalle työn aikana saaduista kommentteista ja ohjeista. Kiitos Python-ohjelman ja algoritmien sekä optimointitehtävien rakentamisen kanssa auttamisesta toiselle diplomityöntekijälle Jaakko Huuskolle. Haluan kiittää myös työn toista tarkastajaa professori Sami Pajusta.

Kiitos opiskelukavereilleni ja perheelleni tuesta ja kannustuksesta työn tekemiseen liittyen. Suurin kiitos kuuluu miehelleni Niklakselle avusta, tuesta ja kannustuksesta työn eri vaiheisiin liittyen sekä työn valmiiksi saattamisessa.

Tampereella, 20. huhtikuuta 2020

Victoria Keskinen

# SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto . . . . .	1
1.1	Tausta . . . . .	1
1.2	Tutkimuksen tavoite ja rajaukset . . . . .	2
1.3	Tutkimuksen toteutus . . . . .	2
2	Portaalikehän suunnittelu ja mitoitus . . . . .	4
2.1	Rakenneanalyysi . . . . .	4
2.2	Poikkileikkausluokitus . . . . .	8
2.3	Pilarin ja ristikon sauvojen mitoitus . . . . .	9
2.3.1	Poikkileikkauskestävyys ehdot . . . . .	10
2.3.2	Stabiilisuusehdot . . . . .	12
2.4	Ristikon liitosten mitoitus . . . . .	14
2.5	Viistetty pilari . . . . .	16
3	Optimointiteoria . . . . .	20
3.1	Optimoinnin perusteet . . . . .	20
3.2	Rakenteiden optimoinnin erityispiirteet . . . . .	24
4	Portaalikehän optimointitehtävän asettaminen . . . . .	26
4.1	Suunnittelumuuttujat . . . . .	27
4.1.1	Pilarin muuttujat . . . . .	27
4.1.2	Ristikon muuttujat . . . . .	28
4.2	Kohdefunktio . . . . .	29
4.3	Rajoitusehdot . . . . .	30
4.3.1	Poikkileikkausehdot . . . . .	31
4.3.2	Stabiilisuusehdot . . . . .	32
4.3.3	Hitsattujen liitosten ehdot . . . . .	33
4.4	Optimointitehtävän formulointi . . . . .	36
5	Optimointimenetelmät . . . . .	38
5.1	Kaksoissymmetrisen hitsatun I-pilarin ja teräsputkiristikkekehän optimointimenetelmät . . . . .	39
5.2	Kaksivaihetekniikka . . . . .	40
5.3	Käytettävät optimointialgoritmit . . . . .	42
5.4	Laskennan toteutus . . . . .	46
6	Laskentatapauksia . . . . .	49
6.1	Yksittäisen pilarin optimointi . . . . .	49
6.1.1	Kiepahduksen ja heikomman suunnan nurjahduksen vaikutus . . . . .	52
6.1.2	Jatkuvien ja diskreettien muuttujien vaikutus . . . . .	53
6.1.3	Diskreettien muuttujien optimipilarien vertailu HEA-pilareihin . . . . .	56

6.1.4	Diskreettien muuttujien optimipilarien vertailu SHS-pilareihin . . . . .	57
6.1.5	Teräksen lujuuden vaikutus hitsattuihin optimipilareihin . . . . .	59
6.2	Kehän optimointi . . . . .	62
7	Yhteenveto . . . . .	67
	Lähteet . . . . .	69
Liite A	Jatkuvien ja diskreettien muuttujien pilarien optimointitulokset . . . . .	71

# KUVALUETTELO

1.1	Kehän rakenne sekä neliöputki- ja I-profiilit. . . . .	1
2.1	Kehän rakenne ja kuormitukset. . . . .	4
2.2	Alkuepäätarkkuuksien korvaaminen ekvivalenteilla vaakavoimilla. . . . .	5
2.3	K- ja Y-liitos. . . . .	6
2.4	K-liitoksen epäkeskisyys. . . . .	7
2.5	Epäkeskisyysselementit. . . . .	7
2.6	Poikkileikkausmittojen merkinnät sekä z- ja y-akselien suunnat. . . . .	9
2.7	Viistetty pilari ja sen poikkileikkaukset. . . . .	17
3.1	Konvekksi ja epäkonvekksi käypä joukko ja funktio. . . . .	22
3.2	Globaali ja lokaali optimi. . . . .	23
3.3	Rakenteiden optimoinnin tehtävätyypit. . . . .	24
4.1	Ohjelman toimintalogiikka yksinkertaistetusti. . . . .	26
4.2	Pilarin ja ristikon muuttujat. . . . .	27
5.1	Kaaviokuva kaksivaiheisesta menetelmästä. . . . .	41
5.2	Funktion $f(\mathbf{x})$ minimointi. . . . .	42
5.3	Geneettisen algoritmin populaation kehittyminen ja liikkuminen kohti optimia. . . . .	45
5.4	Geneettisen algoritmin vaiheet. . . . .	46
5.5	Kaaviokuva ohjelman toimintalogiikasta. . . . .	47
6.1	Pilarin kuormat. . . . .	50
6.2	Kiepahduksen ja heikomman suunnan nurjahduksen määräävyys eri nurjahduspituuksilla. . . . .	52
6.3	Jatkuvien ja diskreettien muuttujien optimitulosten vertailua. . . . .	54
6.4	Hitsattujen ja valssattujen pilarien optimitulosten vertailua. . . . .	56
6.5	Hitsattujen ja rakenneputkipilarien optimitulosten vertailua. . . . .	58
6.6	Eri teräslajeilla optimoitujen pilarien tulosten vertailua. . . . .	60
6.7	Kehän rakenne ja kuormat. . . . .	62
6.8	Kehän sauvojen numerointi. . . . .	63

## TAULUKKOLUETTELO

2.1	K- ja Y-liitosten geometriaehdot hitsatuissa neliörakenneputkiliitoksissa. . . . .	7
2.2	Yhteisvaikutustekijöiden kaavat. . . . .	13
2.3	K- ja Y-liitosten murtumismuodot ja kestävyudet. . . . .	15
3.1	Esimerkki indeksimuuttujista. . . . .	23
4.1	Pilarin muuttujien ylä- ja alarajat. . . . .	28
4.2	Ristikon muuttujien ylä- ja alarajat. . . . .	29
5.1	Rakenteiden optimointien vaiheet sekä käytettävät algoritmit ja muuttujat. . . . .	39
6.1	Diskreeteillä muuttujilla optimoitujen hitsattujen pilarien optimitulosten sekä HEA- ja SHS-pilarien tulosten vertailua. . . . .	51
6.2	Jatkuvilla ja diskreeteillä muuttujilla optimoitujen hitsattujen pilarien optimitulosten vertailua. . . . .	55
6.3	Optimoitujen hitsattujen I-profiilisten pilarien vertailu HEA-profiilisiin pilareihin. . . . .	57
6.4	Optimoitujen hitsattujen I-profiilisten pilarien vertailu SHS-profiilisiin pilareihin. . . . .	59
6.5	Optimoitujen hitsattujen I-profiilisten pilarien vertailua eri teräslajeilla. . . . .	61
6.6	Kehän tuloksia ilman liitosten geometriaehtoien rajoitusehtoja. . . . .	64
6.7	Kehän tuloksia, joissa on mukana liitosten geometriaehtoien rajoitusehtoja. . . . .	65
6.8	Kehän tuloksia, joissa on mukana liitosten geometriaehtoien rajoitusehtoja. . . . .	66



## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$A$	poikkileikkauksen pinta-ala
$A_0$	paarteen poikkileikkauksen pinta-ala
$A_v$	poikkileikkauksen leikkauspinta-ala
$A_{SHS}$	rakenneputken poikkileikkauksen pinta-ala
$C$	kerroin
$C_1, C_2$	kertoimet
$E$	kimmomoduuli
$E_d$	voimien mitoitusarvo
$G$	liukumoduuli
$H_0, H_1, H_2$	kehän mitat
$I_t$	vääntöjäyhyys
$I_w$	käyristymisjäyhyys
$I_y, I_z$	neliömomentit
$I_{T,eq}$	ekvivalentti vääntöjäyhyys
$I_{min}, I_{max}$	pienin ja suurin neliömomentti
$I_{y,eq}, I_{z,eq}$	ekvivalentit neliömomentit
$L$	ristikon jänneväli tai pilarin pituus
$L_{cr}$	nurjahduspituus
$M_{Ed}$	mitoitettava taivutusmomentti
$M_{N,Rd}$	redusoitu taivutuskestävyys
$M_{V,Rd}$	redusoitu taivutuskestävyys
$M_{c,Rd}$	taivutuskestävyys
$M_{cr}$	kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti
$N_{Ed}$	mitoitettava normaalivoima
$N_{Rd}$	normaalivoimakestävyys
$N_{b,Rd}$	nurjahduskestävyys
$N_{c,Rd}$	puristusrasituksen mitoitusarvo
$N_{cr}$	kriittinen nurjahduskuorma
$N_{i,Ed}$	mitoitettava normaalivoima uumasauvalle $i$

$N_{i,Rd}$	normaalivoimakestävyys uumasauvalle $i$
$N_{t,Rd}$	vetorasituksen mitoitusarvo
$R_d$	kestävyyden suunnitteluarvo
$V_{Ed}$	mitoitettava leikkausvoima
$W_y$	taivutusvastus
$\Phi$	parametri nurjahduskestävyyyslaskennassa
$\alpha$	epätarkkuustekijä
$\beta, \beta_1$	parametrit
$\chi$	kiepahduksen pienennystekijät
$\chi, \chi_y, \chi_z$	nurjahduksen pienennystekijät
$\epsilon$	parametri poikkileikkausluokitukseen
$\eta$	parametri
$\gamma$	parametri
$\gamma_h$	parametri
$\gamma_{M0}, \gamma_{M1}, \gamma_{M5}$	osavarmuuskertoimet
<b>F</b>	globaali kuormitusvektori
<b>K</b>	kerroinmatriisi
<b>u</b>	kenttäfunktion solmuarvovektori
<b>x</b>	muuttujavektori
$\bar{\lambda}$	dimensioton hoikkuusluku
$\rho$	teräksen tiheys
$\theta_1, \theta_2$	liitosten kulmat
$a$	hitsin mitta
$b$	I-poikkileikkauksen leveys
$b_{eff}$	uumasauvan tehollinen leveys
$b_{e,p}$	lävistysleikkautumisen tehollinen leveys
$c$	apusuure poikkileikkausluokan tarkistamiseen
$e$	liitoksen epäkeskisyyys
$f$	kohdefunktio
$f_y$	teräksen lujuus
$g$	liitoksen vapaaväli
$g_i, g_j$	Rajoitusehdot
$h$	I-poikkileikkauksen korkeus
$h_0$	paarteen poikkileikkauksen korkeus

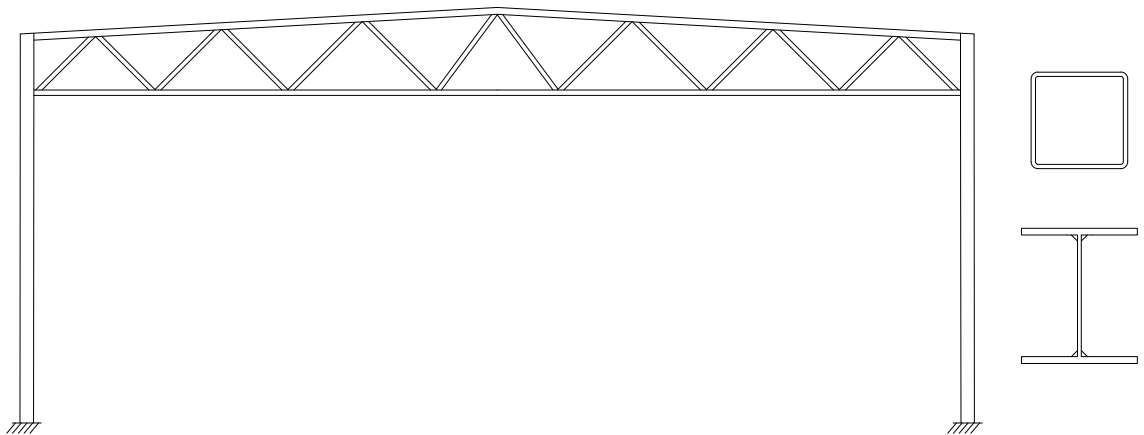
$h_b$	uumasauvan poikkileikkauksen korkeus
$h_i$	uumasauvan poikkileikkauksen korkeus
$h_{SHS}$	rakenneputken poikkileikkauksen korkeus
$h_{bc}$	alapaarteen poikkileikkauksen korkeus
$h_{eq}$	ekvivalentti poikkileikkauksen korkeus
$h_{min}, h_{max}$	viistetyin pilarin pienemmän ja suuremman pään poikkileikkauksen korkeus
$h_{tc}$	yläpaarteen poikkileikkauksen korkeus
$k$	kerroin
$k_n$	parametri
$k_w$	kerroin
$k_{yy}, k_{zy}$	yhteisvaikutustekijät
$n$	parametri
$n_B$	uumasauvojen lukumäärä
$n_E$	koko kehän sauvojen lukumäärä
$n_J$	ristikon kaikkien liitosten lukumäärä
$n_{E,B,K}$	ristikon K-liitosten sauvojen lukumäärä
$n_{E,B,Y}$	ristikon Y-liitosten sauvojen lukumäärä
$n_{E,c}$	pilarien lukumäärä
$n_{E,t}$	ristikon sauvojen lukumäärä
$n_{J,K}$	ristikon K-liitosten lukumäärä
$n_{var}$	muuttujien lukumäärä
$p_1$	yläpaarteen kuorma
$p_1$	alapaarteen kuorma
$q_1, q_2$	tuulikuormat
$r$	parametri
$t$	I-poikkileikkauksen seinämäpaksuus
$t_0$	paarteen seinämäpaksuus
$t_b$	uumasauvan seinämäpaksuus
$t_i$	uumasauvan seinämäpaksuus
$t_{bc}$	alapaarteen seinämäpaksuus
$t_{tc}$	yläpaarteen seinämäpaksuus
$z_g$	kuormituspisteen ja vääntökeskiön välinen etäisyys

B&B	kokonais- ja sekalukutehtävien ratkaisualgoritmi (engl. branch and bound)
FEM	elementtimenetelmä (engl. finite element method)
GA	geneettinen algoritmi (engl. genetic algorithm)
GMNIA	geometrian ja materiaalin osalta epälineaarinen analyysi, jossa on huomioitu epätäydellisyydet (engl. Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included)
ILP	kokonaislukuinen lineaaristen approksimaatioiden optimointimenetelmä (engl. integer linear programming)
LP	lineaaristen approksimaatioiden optimointimenetelmä (engl. linear programming)
MISLP	seka- ja kokonaislukuinen lineaaristen approksimaatioiden optimointimenetelmä (engl. mixed integer sequential linear programming)
$\mathbb{R}$	reaaliluvut
SHS	neliöputkiprofiili (engl. square hollow section)
SLP	peräkkäisten lineaaristen approksimaatioiden optimointimenetelmä (engl. sequential linear programming)
VNS	moniympäristöhaku-algoritmi (engl. variable neighbourhood search)
$\mathbb{Z}$	kokonaisluvut

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Teräksisiä kehärakenteita käytetään usein kantavina rakenteina monissa erilaisissa hal- leissa ja teollisuusrakennuksissa. Teräs on kevyt ja luja materiaali, jota voidaan valmistaa halutuilla ominaisuuksilla [1]. Standarditeräsprofiileita on laaja valikoima ja käytettävän teräksen mittojen ja lujuuksien rajoissa voidaan tehdä useita erilaisia hitsattuja profiileita. Tässä työssä optimoidaan kehärakennetta, jossa käytetään ristikossa neliöputkiprofiile- ja ja pilareina I-profiileja. Kuvassa 1.1 on havainnollistettu kehärakennetta ja käytettäviä profiileita.



**Kuva 1.1.** Kehän rakenne sekä neliöputki- ja I-profiilit.

I-profiili on avoin profiili, eli sillä ei ole umpinaista osaa, joka hankaloittaisi esimerkiksi maalausta tai muuta viimeistelytyötä. Avoin profiili mahdollistaa ruuviliitokset, joissa liitoksen molempia puolia pääsee helposti käsittelemään. Pilarina I-profiilin hyvä ominaisuus on muun muassa massan sijainti tarvittavissa paikoissa, eli mahdollisimman kaukana pintakeskiöstä. Leveälaippaisena I-profiili soveltuu hyvin pilariksi [2, s. 11]. Yksiaukkoisissa hallirakenteissa kuormitus on useimmiten huomattavasti suurempi vain toisessa suunnassa, jolloin I-profiilin suurta taivutusvastusta päästään käyttämään hyödyksi.

Neliöputkiprofiili (*engl. Square Hollow Section, SHS*) on umpinainen profiili, mikä antaa rakenneputkiristikolle suuren vääntöjäykkyyden ja rakenneputkille hyvän kiepahduskestävyyden. Rakenneputkien suuri nurjahduskestävyys ristikkorakenteessa mahdollistaa pitkän jännevälän ja harvan uumasauvojen jaon. Rakenneputkiristikoiden yksinkertaiset liito-

syksityiskohdat ovat valmistuksen kannalta edullisia. Rakenneputkien pintakäsittelyä helpottavat putkien pyöreät nurkat ja avarat liitokset. [3, s. 14] Rakenneputkien valikoima on kattava, mikä mahdollistaa sopivien profiilien valinnan ristikon jokaiselle rakenneosalle.

Perinteisesti rakennesuunnittelijat ovat valinneet oman kokemuksensa ja oletuksensa perusteella muutaman eri rakennevaihtoehdon, joita vertaillaan ja joista lopulta sopivin valitaan. Optimointi tarjoaa vaihtoehtoisen tavan suunnitteluprosessiin. Kun suunnitteluprosessi automatisoituu, voidaan tutkia enemmän erilaisia vaihtoehtoja lyhyessä ajassa kuin perinteisellä tavalla. Optimoinnilla haetaan systemaattisesti algoritmien avulla minimi- tai maksimiarvoja kohdefunktiolle. Rakennesuunnittelussa kohdefunktio voi antaa tuloksena esimerkiksi rakenteen minimipainon tai -kustannukset. Optimoinnilla monimutkainen suunnittelutehtävä selkiytyy, kun se saadaan koottua yhdeksi kokonaisuudeksi. Myös eri osapuolilta tulevat vaatimukset saadaan otettua huomioon. Erilaisia optimointimenetelmiä ja algoritmeja on tutkittu aiemmin rakenteiden optimointiongelmien ratkaisemiseksi [4, 5, 6, 7, 8].

Optimointitehtävän asettelu vaatii paljon aikaa ja huolellista suunnittelua. Ajankäyttö optimointitehtävän luomiseksi on kuitenkin järkevää erityisesti, jos suunniteltava rakenne on suuri ja monimutkainen tai samankaltaisia rakenteita tullaan tekemään jatkossakin, jolloin voidaan käyttää samaa optimointimenetelmää.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite ja rajaukset

Tutkimuksen aiheena on teräsputkiristikkekehän optimointi. Ristikko koostuu rakenneputkista ja pilari on hitsattu I-profiili. Aiemmin on tehty diplomityö rakenteesta, jossa sekä ristikko että pilari ovat rakenneputkista. Aiempaa työtä käytettiin SSAB:n FrameCalc-laskentaohjelman kehittämiseen. Tämän tutkimuksen avulla ohjelmaan lisätään pilari-vaihtoehdoksi hitsatut I-profiiliset pilarit. Lisäksi tehdään alustavaa tutkimusta viistetyn pilarin lisäämisestä pilarivaihtoehdoksi.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka ristikkokehän optimointitehtävä tulisi asettaa ja ratkaista, kun kehä koostuu kahdesta hitsatusta I-profiilisesta pilarista ja rakenneputkiristikosta. I-profiili voi olla joko suora tai viistetty. Lisäksi tavoitteena on saada aikaan ratkaisu, jonka avulla SSAB:n laskentaohjelmaan voidaan lisätä I-pilareita kehärakenteseen. Tutkimuksessa haetaan optimiratkaisua minimimassalle.

Tutkimus rajautuu hitsattujen I-pilarien sekä putkiristikkekehän tutkimiseen ja optimointiin. Tutkimus perustuu Standardiin EN 1993.

## 1.3 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus suoritetaan perehtymällä aiheesta tehtyyn kirjallisuuteen, tutkimuksiin ja erilaisiin algoritmeihin. Lisäksi apuna käytetään jo aloitettua Tampereen yliopiston Metalli- ja

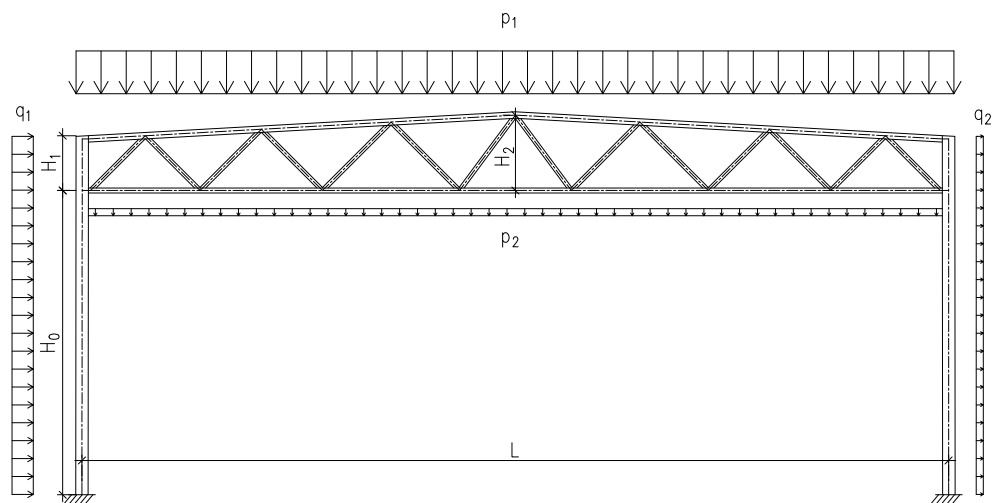
kevytrakenteiden tutkimusryhmässä teräsrakenteiden optimointiin kehitettyä Pythonkie-  
listä ohjelmaa. Tutkimuskysymyksiä ovat:

- Saavutetaanko kaksoissymmetrisen hitsatun I-profiilisen pilarin optimoinnilla mer-  
kittävää hyötyä painon kannalta verrattuna vakioprofiileihin?
- Saavutetaanko kaksoissymmetristen hitsattujen I-profiilisten pilarien käyttämisellä  
hyötyä painon kannalta rakenneputkiristikkekehän optimoinnissa?

Ensimmäisen luvun teoreettisen taustan ja tutkimuksen tavoitteiden kuvailun jälkeen tut-  
kimuksen toisessa luvussa tutustutaan portaalikehän suunnittelun teoriaan rakennea-  
lyysin avulla. Kolmannessa luvussa tehdään katsaus optimointiteoriaan ja käsitellään ra-  
kenteiden optimoinnin erityispiirteitä. Neljännessä luvussa käsitellään portaalikehän op-  
timointia ja muotoillaan työn varsinainen optimointitehtävä. Viidennessä luvussa tutustu-  
taan erilaisiin algoritmeihin ja käsitellään työssä käytettäviä optimointimenetelmiä. Kuu-  
des luku esittelee tutkimustehtävän laskennallista ratkaisua ja käsittelee työn tuloksia.  
Lopulta seitsemäs luku tiivistää tulokset ja olennaisimmat havainnot.

## 2 PORTAALIKEHÄN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Työssä tarkastellaan portaalikehää, jossa kaksi hitsattua I-profiilista pilaria ovat pystysuuntaisina rakenteina, ja SHS-profiileista tehty ristikko on vaakarakenteena. Hitsattujen I-profiilien levyosat ja SHS-profiilit ovat SSAB:n valikoimasta. Tässä luvussa esitellään portaalikehän mitoitus Eurokoodi 3:n osien 1-1 [9] ja 1-8 [10] sekä Suomen kansallisen liitteen [11] valintoihin perustuen. Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa tarkastetaan rakennesosien ja liitosten kestävyys, stabiileetti, liitosten geometriset rajoitukset ja rakenteen palonkestävyys. Stabiileetin tarkastus tehdään käytännön suunnittelukohteessa koko rakennukselle. Tässä työssä stabiileetti tarkastetaan yksittäisille rakennesosille ja palo-suunnittelun mukaisia tarkasteluja ei tehdä. Toisen kertaluokan vaikutuksia ei huomioida, joten tehdään vain ensimmäisen kertaluokan analyysi.



**Kuva 2.1.** Kehän rakenne ja kuormitukset.

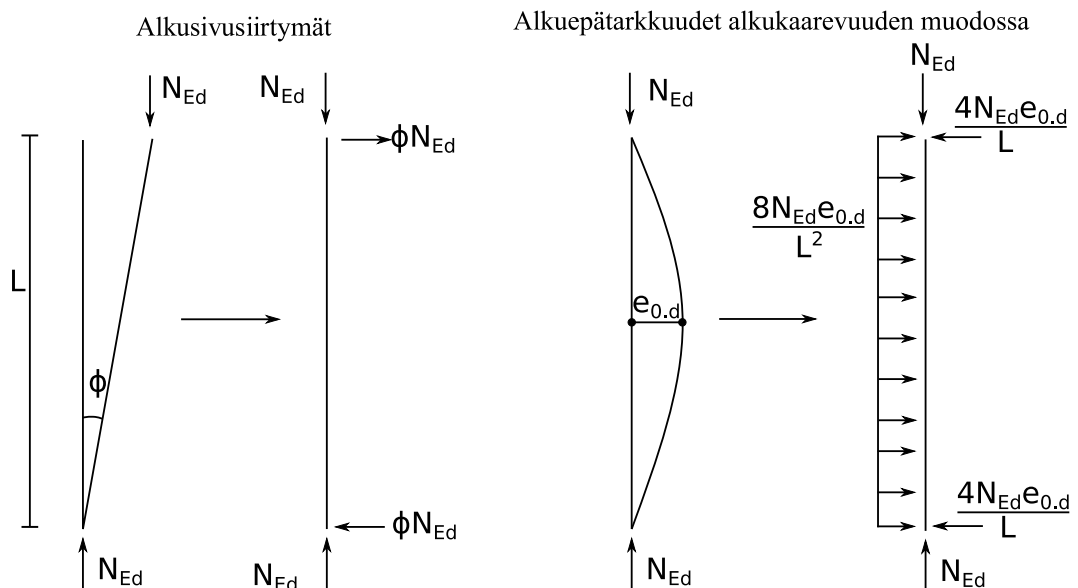
Kuvassa 2.1 on esitetty kehälle tulevat kuormitukset. Kuormitukset ovat Eurokoodin 1991-1-1 [12] mukaisia. Kehän kuormia ovat lumi- ja tuulikuorma sekä pysyvät kuormat, joita ovat kattorakenteen paino, ristikon alapaarteen ripustuskuorma ja kehän rakenteiden omat painot.

### 2.1 Rakenneanalyysi

Eurokoodin 3 mukaisesti rakenneanalyysin perusoletuksena on, että analyysi perustuu rakennemalleihin, jotka ovat tarkoituksenmukaisia tarkasteltavassa rajatilassa. Rakenne-



mallissa ja laskelmissa rakenteellinen käyttäytyminen tarkasteltavassa rajatilassa on kuvailtava riittävän tarkasti ja poikkileikkausten, sauvojen, liitosten ja tukien odotettavissa oleva käyttäytyminen on kuvailtava. Epätarkkuuksien vaikutukset sivusiirtyvien kehärakenteiden sauvojen nurjahduksessa otetaan kehän rakenneanalyysissä huomioon käyttämällä alkusivusiirtymän muodossa olevaa ekvivalenttia sivusiirtymää. Yksittäisillä sauvoilla epätarkkuuksien vaikutukset otetaan huomioon alkukaarevuuden muodossa olevista epätarkkuuksista. Alkuepätarkkuudet voidaan korvata pilariin vaikuttavalla ekvivalentilla vaakavoimalla. Ensimmäisen kertaluvun teoriaa käytettäessä sisäiset voimat ja momentit voidaan yleensä määrittää ensimmäisen kertaluvun teorian mukaisesti käyttämällä rakenteen alkuperäistä geometriaa. [9, kohdat 5.1-5.4] SSAB:n FrameCalc-ohjelmassa tehdään lineaarinen, ensimmäisen kertaluvun mukainen, rakenneanalyysi. Tässä työssä yksittäisen pilarin optimoinnissa alkuepätarkkuudet huomioidaan korvaamalla ekvivalenteilla vaakavoimilla kuvan 2.2 esittämän periaatteen mukaisesti.



**Kuva 2.2.** Alkuepätarkkuuksien korvaaminen ekvivalenteilla vaakavoimilla.

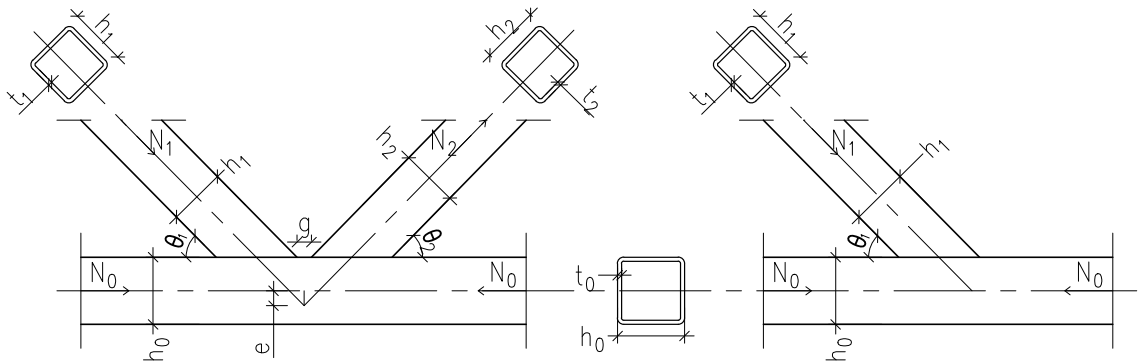
Tässä työssä tutkittava rakenne on hyperstaattinen, joten rakenneosien rasitusten laskennassa käytetään elementtimenetelmää (*engl. Finite Element Method, FEM*). Elementtimenetelmässä rakenneosat jaetaan elementteihin, jotka muodostavat elementtiverkon. Elementtimenetelmä on osittaisdifferentiaaliyhtälön numeerinen menetelmä, jonka tehokkuus perustuu jo mainittuihin elementtijakoihin. Elementtien rajoilla on solmukohtia, joiden arvoja interpoloimalla lasketaan kenttäfunktion arvoja. Menetelmällä geometrialtaan monimutkainenkin rakenne saadaan ratkaistua yksinkertaisissa osissa, eli elementeissä. Elementtiverkon perusyhtälö voidaan esittää muodossa

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}, \quad (2.1)$$

missä  $\mathbf{K}$  on kerroinmatriisi, joka muodostetaan elementtien kerroinmatriiseista  $\mathbf{k}$  sijoitussummauksella,  $\mathbf{u}$  on kenttäfunktion solmuarvovektori ja  $\mathbf{F}$  on kuormitusvektori. Lujuuspissa elementtimenetelmä soveltuu parhaiten siirtymämenetelmään, jossa kerroinmatriisi

on rakenteen jäykkymatriisi ja solmuarvoina ovat solmujen siirtymät. Perusyhtälöllä ratkaistaan solmusiirtymät, joista ratkaistaan sauvojen rasitukset. Rakenneosien rasitukset lasketaan tässä työssä kimmoteorian mukaisella lineaarisella rakenneanalyysillä.

Työssä käytettävä ristikko on tyypiltään K-ristikko, joka on esitetty kuvassa 2.1. Ristikon yläpaarre ottaa vastaan puristusta ja taivutusta ja alapaarre ottaa vastaan vetoa ja taivutusta. Uumasauvat ottavat vastaan aksiaalisia voimia, eli vetoa ja puristusta. Ristikon sauvoille aiheutuu ulkoisten kuormien lisäksi rasituksia liitosten kiertymisjäykkyydestä sekä uumasauvojen ja paarteiden välisen liitoksen epäkeskisyydestä. Pilarit ja ristikon paarteet mallinnetaan ja analysoidaan jatkuvina palkkielementteinä. Tällöin saadaan huomioitua kuormitusten ja epäkeskisyyksien aiheuttamat taivutusrasitukset. Tässä työssä käytettävällä K-ristikolla uumasauvojen liitokset ovat K- tai Y-liitoksia. Kuvassa 2.3 on K- ja Y-liitos. K-liitoksessa paarteeseen on liittynyt kaksi uumasauvaa ja Y-liitoksessa yksi.



**Kuva 2.3.** K- ja Y-liitos sekä niiden merkinnät.

Liitosten kiertymisjäykkyydestä aiheutuvat sekundääriset momentit voidaan jättää huomioimatta ja uumasauvojen liitokset paarteisiin voidaan olettaa nivelellisiksi Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa, jos geometria täyttää taulukon 2.1 vaatimukset ja seuraavat ehdot toteutuvat:

$$L_i \geq 6h_i \quad (2.2)$$

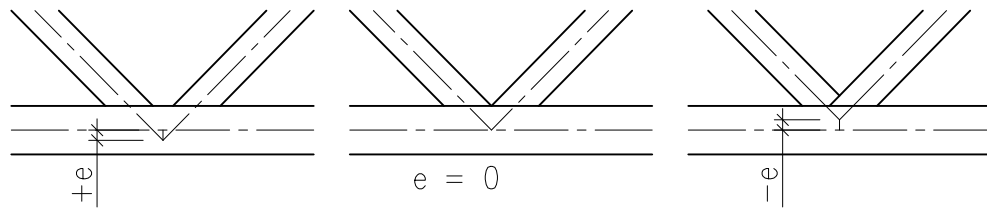
$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0, \quad (2.3)$$

missä  $h_i$  on diagonaalin  $i$  poikkileikkauksen korkeus ja  $L_i$  on sen pituus. Paarteen profiilin korkeus on  $h_0$  ja epäkeskisyyden suuruus on  $e$ . Epäkeskisyyden  $e$  lasketaan kaavalla

$$e = \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \left( \frac{h_1}{2 \sin \theta_1} + \frac{h_2}{2 \sin \theta_2} + g \right) - \frac{h_0}{2}, \quad (2.4)$$

missä  $\theta_i$  on uumasauvan ja paarteen välinen kulma ja  $g$  on K-liitoksen vapaaväli. Epäkeskisyyden voi olla positiivista tai negatiivista tilanteesta riippuen. Kuvassa 2.4 on havainnollistettu epäkeskisyyttä.

Epäkeskisyyden pyritään yleensä minimoimaan liitoksissa, mutta vapaavälisillä K-liitoksilla sen saaminen nolaksi on hankalaa vapaavälin minimiehtojen takia. Eurokoodi määrää



**Kuva 2.4.** K-liitoksen epäkeskisyyden vaihtoehdot.

vapaavälille minimi- ja maksimiarvon

$$\max(t_1 + t_2, 0.5h_0(1 - \beta)) \leq g \leq 1.5h_0(1 - \beta) \quad (2.5)$$

missä  $t_1$  ja  $t_2$  ovat uumasauvojen seinämävahvuudet. K-liitoksissa  $\beta$  lasketaan neliöprofiileille kaavalla

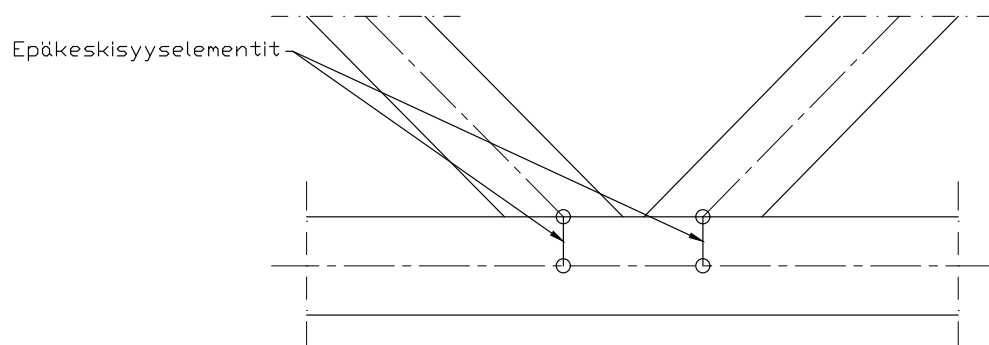
$$\beta = \frac{h_1 + h_2}{2h_0}. \quad (2.6)$$

Eurokoodi asettaa vaatimuksia liittyen liitokseen kuuluvien rakenneosien mittoihin. EN 1993-1-8 taulukossa 7.8 [10] on esitetty uuma- ja parresauvojen välisten hitsausliitosten pätevyysrajat. Tässä työssä tarvittavat geometriaehdot on esitetty taulukossa 2.1.

**Taulukko 2.1.** K- ja Y-liitosten geometriaehdot hitsatuissa neliörakenneputkiliitoksissa.

Molemmat	K-liitos	Y-liitos
$h_i/t_i \leq 35$	$h_1/h_0 \geq 0.35$	$h_1/h_0 \geq 0.25$
$t_i \geq 2.5 \text{ mm}$	$h_1/h_0 \geq 0.1 + 0.01h_0/t_0$	
Puristetut osat: PLL 1 tai 2		

Liitoksen epäkeskisyydestä aiheutuvat momentit on otettava puristetun paarteen mitoituksessa aina huomioon. Jos ehto (2.3) ei ole voimassa epäkeskisyyttä huomioidaan myös vedetyn paarteen, uumasauvojen ja liitosten mitoituksessa. Epäkeskisyyttä voidaan ottaa huomioon kahdella tavalla: lisäämällä manuaalisesti mitoitusarvoihin epäkeskisyyden vaikutus tai lisäämällä rakennemalliin liitoksille epäkeskisyyselementit. Kuvassa 2.5 on havainnollistettu epäkeskisyyselementtejä, joita tässä työssä käytetään. Ristikon paarteen liitos pilariin on kehän tasossa nivel ja kehästä poispäin jäykkä. Pilarin liitos perustuksiin on jäykkä kehän tasossa.



**Kuva 2.5.** Epäkeskisyyselementit ristikon rakennemallissa.

## 2.2 Poikkileikkausluokitus

Eurokoodin mukaan poikkileikkausluokituksen tarkoituksena on tunnistaa, missä laajuudessa poikkileikkausten paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkausten kestävyyttä ja kiertymiskykyä. Poikkileikkausluokka riippuu puristettujen osien leveys-paksuussuhteista. Poikkileikkaukset jaetaan neljään poikkileikkausluokkaan (PLL1-PLL4):

- PLL1: Tarkastelu voidaan tehdä plastisuusteorian mukaan, sillä riittävän kiertymiskykyinen nivel voi syntyä ilman poikkileikkauksen kestävyuden pienentämistä.
- PLL2: Sauva voidaan olettaa plastisoituvaksi, jolloin poikkileikkauksen kestävyys voidaan laskea plastisuusteorian mukaisesti. Paikallinen lommahdus rajoittaa syntyvän nivelen kiertymiskykyä, joten voimasuureiden jakautuminen on laskettava kimmoteorian mukaisesti.
- PLL3: Taivutuksessa rasitetuimmassa kohdassa voidaan saavuttaa myötöraja, mutta paikallinen lommahdus estää plastisuusteorian mukaisen momenttikestävyuden syntymisen, joten tarkasteluissa käytetään kimmoteoriaa.
- PLL4: Paikallinen lommahdus tapahtuu ennen myötörajaa saavuttamista ja aiheuttaa kestävyyksien pienenemistä, jolloin tarkasteluissa käytetään tehollista poikkileikkausta.

Tässä työssä ristikko koostuu SHS-profiileista, joten kaikki osat ovat Eurokoodin mukaisen hitsattujen liitosten liitoslaskentataulukoiden vaatimusten mukaisesti vähintään poikkileikkausluokassa 2. Hitsattu pilari on joko luokassa 2 tai 3, jolloin sen poikkileikkauskestävyyksien laskenta vaihtelee plastisuusteorian (PLL2) ja kimmoteorian (PLL3) välillä. EN 1993-1-1 taulukossa 5.2 [9] esitetään puristettujen taso-osien suurimpien leveys-paksuussuhteiden raja-arvot eri poikkileikkausluokissa. Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat (tässä I-pilarin uuma sekä neliöputkiprofiilin uumat ja laipat) kuuluvat poikkileikkausluokkaan 2, jos ne täyttävät ehdon

$$\frac{c}{t} \leq 38\varepsilon \quad (2.7)$$

ja poikkileikkausluokkaan 3, jos ne täyttävät ehdon

$$\frac{c}{t} \leq 42\varepsilon. \quad (2.8)$$

Ulokkeelliset laipat, eli tässä työssä I-pilarin laipat, kuuluvat poikkileikkausluokkaan 2, jos ne täyttävät ehdon

$$\frac{c}{t} \leq 10\varepsilon \quad (2.9)$$

ja poikkileikkausluokkaan 3, jos ne täyttävät ehdon

$$\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon. \quad (2.10)$$

Kaavoissa (2.7) – (2.10)

$$c = \begin{cases} h_{SHS} - 3t_{SHS} & \text{neliöputkiprofiileille,} \\ h - 2t_f - 2a\sqrt{2} & \text{hitsatun I-profiilin uumalle,} \\ \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - a\sqrt{2} & \text{hitsatun I-profiilin laipalle,} \end{cases}$$

$t_{SHS}$  on neliöprofiilin paksuus,

$h_{SHS}$  on neliöprofiilin korkeus,

$h$  on I-profiilin korkeus,

$b$  on I-profiilin leveys,

$t_w$  on I-profiilin uuman paksuus,

$t_f$  on I-profiilin laipan paksuus,

$a$  on hitsin a-mitta,

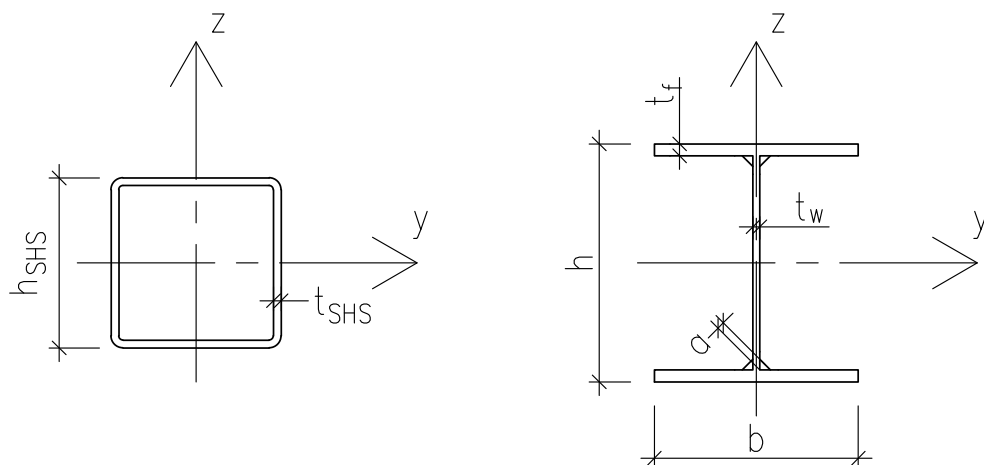
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \text{ ja}$$

$f_y$  on teräksen myötölujuus.

Poikkileikkausluokka määräytyy hoikimman, eli suurimman poikkileikkausluokan omaavan, taso-osan mukaisesti. Kun poikkileikkausluokitus tehdään puhtaan puristuksen mukaisesti, ollaan aina varmallalla puolella.

### 2.3 Pilarin ja ristikon sauvojen mitoitus

Portaalikehän jokaisen rakenneosan kestävyys ja stabiilius tarkistetaan Eurokoodin mukaisesti. Poikkileikkauskestävyys tarkistetaan normaalivoimien (puristus tai veto), taivu-



**Kuva 2.6.** Poikkileikkausmittojen merkinnät sekä z- ja y-akselien suunnat.

tuksen ja leikkauksen sekä näiden yhteisvaikutusten osalta. Stabiilisuus tarkistetaan heikomman ja vahvemman suunnan nurjahduksen ja kiepahduksen sekä näiden yhteisvaikutuksen osalta.

Tässä kappaleessa käsitellään standardikokoisia SHS-profiileita ja kaksoissymmetristä hitsattua I-profiilia. Poikkileikkauksen akselien suunnat on esitetty kuvassa 2.6. Vastavia kaavoja sovelletaan myöhemmin viistetyn hitsatun I-profiilisen pilarin rakennetta käsiteltäessä.

### 2.3.1 Poikkileikkauskestävyys ehdot

Eurokoodin mukainen leikkauskestävyys ehto on

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd}, \quad (2.11)$$

missä  $V_{Ed}$  on sauvassa vaikuttava leikkausvoiman mitoitusarvo ja  $V_{c,Rd}$  on poikkileikkauksen leikkauskestävyys. Poikkileikkauksen leikkauskestävyys lasketaan kaavalla

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}}, \quad (2.12)$$

missä  $A_v$  on poikkileikkauksen leikkauspinta-ala ja osavarmuuskerroin  $\gamma_{M0} = 1.0$ . Leikkauspinta-ala lasketaan neliöputkiprofiilille kaavalla

$$A_v = \frac{A_{SHS} h_{SHS}}{b_{SHS} + h_{SHS}} = \frac{A_{SHS}}{2}, \quad (2.13)$$

missä  $A_{SHS}$  on neliöputkiprofiilin pinta-ala ja  $b_{SHS} = h_{SHS}$ . Hitsatun I-profiilin leikkauspinta-ala lasketaan kaavalla

$$A_v = \eta h_w t_w, \quad (2.14)$$

missä  $h_w$  on uuman korkeus ja kertoimelle  $\eta$  voidaan valita konservatiivinen arvo 1.

Eurokoodin mukainen vetokestävyys ehto on

$$N_{t,Ed} \leq N_{Rd}, \quad (2.15)$$

missä  $N_{t,Ed}$  on sauvan vetorasituksen mitoitusarvo ja  $N_{Rd}$  on sauvan normaalivoimakestävyys. Vastaavasti puristuskestävyys ehto ilman taivutuksen vaikutusta on

$$N_{c,Ed} \leq N_{Rd}, \quad (2.16)$$

missä  $N_{c,Ed}$  on sauvan puristusrasituksen mitoitusarvo. Poikkileikkausluokissa 1–3 normaalivoimakestävyys lasketaan käyttämällä poikkileikkauksen kokonaisalaa  $A$  ja teräksen myötölujuutta  $f_y$ :

$$N_{Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (2.17)$$

Mitoitusehto taivutukselle kehän suunnassa on

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}, \quad (2.18)$$

missä  $M_{Ed}$  on sauvassa vaikuttava taivutusmomentin mitoitusarvo ja  $M_{c,Rd}$  on poikkileikkauksen taivutuskestävyys. Taivutuskestävyyden mitoitusarvo saadaan laskettua kaavalla

$$M_{c,Rd} = \frac{W_y f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (2.19)$$

missä  $W_y$  on plastinen tai kimmoinen taivutusvastus riippuen, mikä poikkileikkausluokka on kyseessä. Taivutuskestävyyttä saattaa olla tarve redusoida normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuksen tai leikkausvoiman takia. Taivutusmomenttikestävyys lasketaan neliöputkiprofiilille normaalivoiman vaikutukset huomioiden kaavalla

$$M_{N,Rd} = \begin{cases} M_{c,Rd}, & \text{kun } N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5(A-2bt)f_y}{\gamma_{M0}}, 0.25N_{Rd}\right) \\ \min\left(M_{c,Rd} \frac{1-n}{1-0.5a_w}, M_{c,Rd}\right), & \text{muulloin.} \end{cases} \quad (2.20)$$

Kaavassa (2.20) poikkileikkaussuureet viittaavat neliöputkiprofiiliin ja olevat tekijät ovat

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$$

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

Taivutusmomenttikestävyys lasketaan hitsatulle I-profiilille normaalivoiman vaikutukset huomioiden kaavalla

$$M_{N,Rd} = \begin{cases} M_{c,Rd}, & \text{kun } N_{Ed} \leq \min\left(\frac{0.5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}, 0.25N_{Rd}\right) \\ \min\left(M_{c,Rd} \frac{1-n}{1-0.5a}, M_{c,Rd}\right), & \text{muulloin.} \end{cases} \quad (2.21)$$

Kaavassa (2.21)  $t_f$  on laipan paksuus, kaikki poikkileikkaussuureet viittaavat hitsattuun I-profiiliin ja olevat tekijät ovat

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$$

$$a = \min\left(\frac{A-2bt_f}{A}, 0.5\right).$$

Taivutuskestävyyttä pienennetään leikkausvoiman vaikutuksesta, jos leikkausvoima  $V_{Ed} \geq 0.5V_{c,Rd}$ . Taivutuskestävyyden pienentäminen tehdään käyttämällä leikkauspinta-alalle pienennettyä myötörajaa. Tällöin taivutuskestävyys lasketaan kaavalla

$$M_{V,Rd} = \frac{W_y(1-\rho)f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (2.22)$$

missä pienennyskerroin

$$\rho = \left( \frac{2V_{Ed}}{V_{c,Rd}} - 1 \right)^2. \quad (2.23)$$

### 2.3.2 Stabiilisuusehdot

Eurokoodin mukainen nurjahdusehto on

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}, \quad (2.24)$$

missä  $N_{Ed}$  on sauvan puristusrasituksen mitoitusarvo ja  $N_{b,Rd}$  on sauvan nurjahduskestävyys. Sauvan nurjahduskestävyys lasketaan poikkileikkausluokissa 1-3 kaavalla

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (2.25)$$

missä  $\chi$  on nurjahduksen pienennystekijä ja osavarmuuskerroin  $\gamma_{M1} = 1$ . Nurjahduksen pienennystekijä saadaan kaavasta

$$\chi = \begin{cases} 1.0, & \text{kun } \bar{\lambda} \leq 0.2 \\ \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, & \text{kun } \bar{\lambda} > 0.2. \end{cases} \quad (2.26)$$

Kaavassa (2.26) olevat tekijät ovat

$$\Phi = 0.5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2) \quad (2.27)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad (2.28)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}, \quad (2.29)$$

missä  $\alpha$  on nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä,  $E$  on materiaalin kimmomoduuli, joka on teräksellä 210 MPa.  $I$  on poikkileikkauksen neliömomentti ja  $L_{cr}$  on sauvan nurjahduspituus. Nurjahduspituudet valitaan Eurokoodin EN 1993-1-1 [9] ja sen Suomen kansallisen liitteen [11] mukaisesti. Paarteille käytetään Eurokoodin mukaisesti sekä tason suunnassa että tasosta poispäin tapahtuvassa nurjahduksessa arvoa  $L_{cr} = 0.9L$ , jossa  $L$  on kahden solmupisteen välinen etäisyys. Uumasauvojen nurjahduspituutena kummassakin suunnassa käytetään Eurokoodin Suomen kansallisen liitteen mukaista arvoa  $L_{cr} = 0.75L$ . Pilarille käytetään tuennasta riippuen arvoa  $L_{cr,y} = 0.7L$  tai  $L_{cr,y} = 2.0L$  kehän tasossa ja  $L_{cr,z} = 1.0L$  kehän tasosta poispäin.



Yhdistetyn taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen yhteisvaikutus tarkistetaan kaavoilla

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \quad (2.30)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}}, \quad (2.31)$$

missä  $N_{Rk}$  on sauvan ominaispuristuslujuus,  $M_{Rk}$  on sauvan ominaistaivutuskestävyys,  $\chi_y$  ja  $\chi_x$  ovat sauvan y- ja z-suunnan taivutusnurjahduksen pienennystekijät.  $\chi_{LT}$  on kiepahduksen pienennystekijä. Neliöputkiprofiilit eivät ole käytännössä alttiita kiepahdukselle [3, s. 90], joten niille  $\chi_{LT} = 1$ . Hitsatulla I-profiililla kiepahdus tarkistetaan kaavoilla (2.32)–(2.37). Yhteisvaikutustekijät  $k_{yy}$  ja  $k_{zy}$  lasketaan taulukon 2.2 mukaisesti.

**Taulukko 2.2.** Yhteisvaikutustekijöiden kaavat [9, taulukko B.1].

Yhteisvaikutustekijät	Poikkileikkaustyyppi	Suunnitteluoletukset	
		Kimmoteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 3 ja 4	Plastisuusteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 1 ja 2
$k_{yy}$	I-profiilit	$C_{my} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	Suorakaideputket	$\leq C_{my} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$\leq C_{my} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
$k_{yz}$	I-profiilit	$k_{zz}$	$0,6 k_{zz}$
	Suorakaideputket		

Taulukossa 2.2 sivusiirtyvien kehien sauvoille ekvivalentin momentin kertoimeksi valitaan  $C_{my} = 0,9$ , jota käytetään myös tässä työssä.

Eurokoodin mukainen kiepahdusehto on

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd}, \quad (2.32)$$

missä  $M_{Ed}$  on sauvan taivutusrasituksen mitoitusarvo ja  $M_{b,Rd}$  on sauvan kiepahduskestävyys. Sauvan kiepahduskestävyys lasketaan poikkileikkausluokissa 1-3 kaavalla

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_y f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (2.33)$$

missä  $\chi$  on kiepahduksen pienennystekijä. Kiepahduksen pienennystekijä saadaan kaavasta

$$\chi_{LT} = \min \left( \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta_{LT} \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1,0, \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \right) \quad (2.34)$$

Kaavassa (2.34) olevat tekijät ovat

$$\Phi_{LT} = 0,5(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta_{LT} \bar{\lambda}_{LT}^2) \quad (2.35)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}, \quad (2.36)$$

missä  $\alpha_{LT}$  on nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä. Suomen kansallisen liitteen [11] mukaan hitsatuille vakiopoikkileikkauksisille kaksoissymmetrisille I-profiileille  $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.2$  ja  $\beta_{LT} = 1.0$ . Kimmoteorian mukainen kiepahdusmomentti  $M_{cr}$  kaksoissymmetriselle hitsatulle I-profiilille voidaan laskea kaavalla

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{kL} \left( \sqrt{\frac{k^2 I_w}{k_w I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right), \quad (2.37)$$

missä kertoimet  $C_1$  ja  $C_2$  määräytyvät momenttipinnan perusteella [2, s. 143–145],  $I_z$  on heikomman suunnan neliömomentti,  $L$  on kiepahdustukien välinen etäisyys,  $k$  on tuenasta riippuvainen kerroin, joka vaihtelee arvosta 0.5 (täysin jäykkä tuenta) arvoon 1 (nivelellinen tuenta),  $k_w$  riippuu sauvan pään kiinnityksestä käyristymisen suhteen (arvolla 1 ollaan varmallalla puolella),  $I_w$  on käyristymisjäyhyys,  $G$  on teräksen liukumoduuli,  $I_t$  on vääntöjäyhyys ja  $z_g$  on kuormituspuolelta ja vääntökeskiön välinen etäisyys.

## 2.4 Ristikon liitosten mitoitus

Teräksen lujuus vaikuttaa liitosten kestävyysluokkaan. Ristikkoliitosten kestävyysluokkaa redusoidaan kertoimella [3, s. 166][13, kohta 7.1.1(4)]

- 1.0, kun teräksen lujuusluokka on S235–S355
- 0.9, kun teräksen lujuusluokka on S420–S460
- 0.8, kun teräksen lujuusluokka on enintään S700.

Tässä työssä kaikki ristikon uumasauvojen liitokset paarteisiin ovat hitsattuja. Liitokset suunnitellaan kestäväksi niihin kohdistuvat normaalivoimat.

Liitoksen kestävyydelle on voimassa ehto

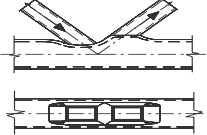
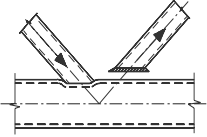
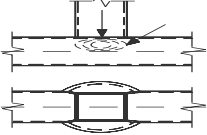
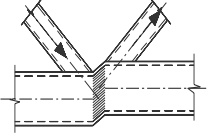
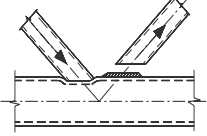
$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}, \quad (2.38)$$

missä  $N_{i,Ed}$  on sauvassa vaikuttava mitoittava normaalivoima ja  $N_{i,Rd}$  on liitoksen kestävyys. Kullekin liitokselle riittää tässä luvussa esitettyjen Eurokoodin mukaisten murtumismuotojen tarkastelujen tekeminen, jos esitetyt geometriaehdot täyttyvät. Taulukon 2.1 geometriaehtojen lisäksi liitosten hitsattavuus lisää liitokselle uumasauvan ja paarteen välisen ehdon

$$\theta_i \geq 30^\circ. \quad (2.39)$$

Kappaleen 2.1 kuvassa 2.3 on esitetty liitoskaavojen merkinnät. Kaavojen alaindekseissä 0 viittaa paarteeseen ja 1, 2 sekä  $i$  viittaavat uumasauvoihin. K-liitos tarkistetaan kahte-

**Taulukko 2.3.** K- ja Y-liitosten murtumismuodot ja niiden kestävyysien  $N_{Rd,i}$  laskenta-kaavat.

Murtumismuoto	K-liitos	Y-liitos
Paarteen pinnan murtuminen 	Tarkistetaan aina  $\frac{8.9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma} \beta}{\sin \theta_i} \gamma_{M5}$	Tarkistetaan, kun $\beta_1 \leq 0.85^*$  $\frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta_1) \sin \theta_1} \left( \frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta_1} \right) \gamma_{M5}$
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen 	Tarkistetaan, kun $\beta \leq (1 - 1/\gamma)$  $\frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left( \frac{2h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) \gamma_{M5}$	Tarkistetaan, kun $0.85 \leq \beta_1 \leq (1 - 1/\gamma)$  $\frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 2b_{e,p} \right) \gamma_{M5}$
Paarteen sivun murtuminen 	–	Tarkistetaan, kun $\beta_1 = 1.0^*$  $\frac{f_b t_0}{\sin \theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right) \gamma_{M5}$
Paarteen leikkausmurtuminen 	Tarkistetaan aina  $\frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \gamma_{M5}$	–
Uumasauvan murtuminen 	Tarkistetaan aina  $\frac{f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff})}{\gamma_{M5}}$	Tarkistetaan, kun $\beta_1 \geq 0.85$  $\frac{f_{y1} t_1 (2h_1 - 4t_1 + b_{eff})}{\gamma_{M5}}$
* Kun $0.85 \leq \beta_1 \leq 1$ , tarkistetaan paarteen pinnan murtokestävyys $\beta_1$ :n arvolla 0.85 ja paarteen sivun murtokestävyys $\beta_1$ :n arvolla 1.0, minkä jälkeen kestävyys interpoloidaan lineaarisesti väliltä $\beta = [0.85, 1]$ käyttäen liitokselle laskettua $\beta_1$ :n arvoa.		

na erillisenä Y-liitoksena, jos  $g \geq 1.5(1 - \beta)$  ja  $g \geq t_1 + t_2$ . Taulukon 2.3 kaavojen lisäksi K-liitoksen vapaavälissä vaikuttava normaali- ja leikkausvoiman yhteisvaikutus tarkistetaan. Paarteen normaalivoimakkestävyys liitoksen uumasauvojen vapaavälissä lasketaan kaavalla

$$N_{Rd,0} = \frac{(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - \left( \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \right)^2}}{\gamma_{M5}}, \quad (2.40)$$

missä  $A_0$  on paarteen pinta-ala,  $A_{v0}$  on paarteen leikkauspinta-ala,  $V_{Ed}$  on vapaavälissä vaikuttava leikkausvoima ja osavarmuuskerroin  $\gamma_{M5} = 1.0$ .

Taulukon 2.3 kaavoissa esiintyvistä suureista

$$\beta_1 = \frac{b_1}{b_0} \quad (2.41)$$

$$\gamma = \frac{0.5b_0}{t_0} \quad (2.42)$$

$$b_{e,p} = \min \left( \frac{10t_0b_i}{b_0}, b_i \right). \quad (2.43)$$

Uumasauvan murtokestävyyden ja paarteen pinnan lävistysleikkautumisen laskukaavoissa tehollinen leveys saadaan kaavalla

$$b_{eff} = \min \left( \frac{10t_0^2f_{y0}b_i}{b_0f_{yi}t_i}, b_i \right). \quad (2.44)$$

$A_v$  on paarteen leikkauspinta-ala, joka saadaan kaavalla

$$A_v = (2h_0 + \alpha b_0)t_0, \quad (2.45)$$

missä

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}}. \quad (2.46)$$

Paarteen pinnan murtumisen kaavoissa esiintyvä kerroin

$$k_n = \begin{cases} 1.0 & \text{vedetylle paarteelle} \\ \min \left( 1.3 - \frac{0.4n}{\beta} \right), 1.0 & \text{puristetulle paarteelle,} \end{cases} \quad (2.47)$$

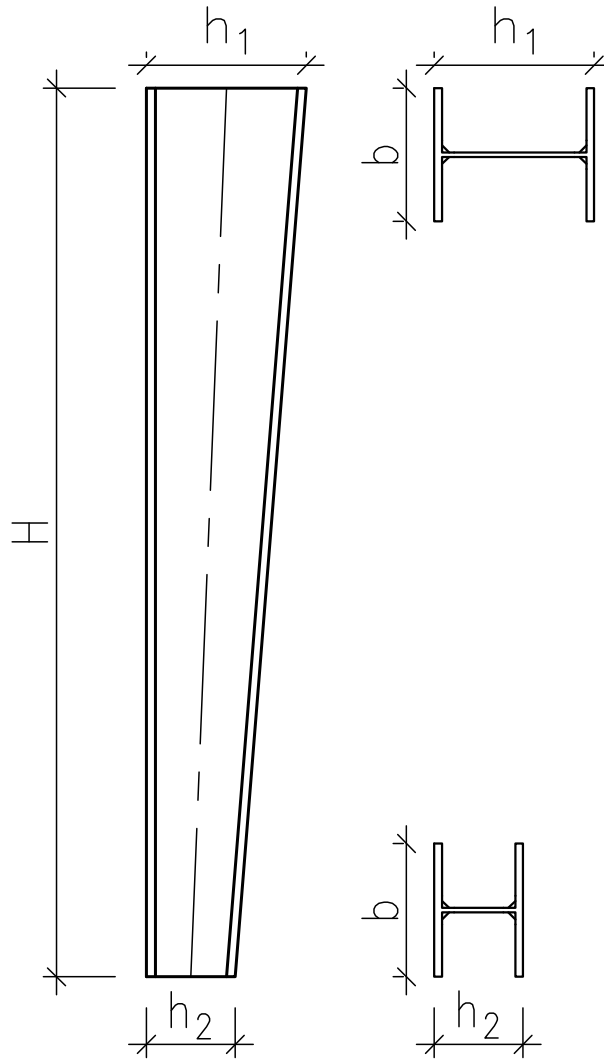
missä  $n$  lasketaan puristetulle paarteelle kaavalla

$$n = \frac{N_{0,Ed}}{\gamma_{M5}A_0f_{y0}} + \frac{M_{0,Ed}}{\gamma_{M5}W_{el,0}f_{y0}}, \quad (2.48)$$

missä  $N_{0,Ed}$  on liitoksessa itseisarvoltaan suurin paarteen normaalivoiman arvo.  $M_{0,Ed}$  on taivutusmomentti liitoksessa,  $W_{el,0}$  on poikkileikkauksen kimmoinen taivutusvastus.

## 2.5 Viistetty pilari

Viistetyn pilarin käytön tarkoituksena on keventää pilaria asettamalla massaa sinne, mihin kohdistuvat suurimmat voimat. Tässä viistetty pilari on kaksoissymmetrinen hitsattu I-profiili, jonka uuman korkeus muuttuu. Laippojen paksuudet ja leveydet sekä uuman paksuus pysyvät samoina koko pilarin matkalla. Viistetty pilari ja sen poikkileikkaukset



**Kuva 2.7.** Viistetty pilari ja sen ylä- ja alapään poikkileikkaukset.

on esitetty kuvassa 2.7. Viistetyn pilarin poikkileikkausmitoitus voidaan tehdä Eurokoodin mukaisesti samalla periaatteella kuin kappaleessa 2.3 tasaisella pilarilla. Viistetyn pilarin uuman korkeus muuttuu lineaarisesti pilarin pituudella, eikä tiedetä, mikä on pilarin mitoittavin kohta, joten poikkileikkauskestävyys tarkistetaan useassa kohdassa viistettyä pilaria. Poikkileikkaus vaikuttaa myös stabiilisuuteen, jolloin stabiilisuuskestävyys ehdot on myös tarkastettava useasta kohdasta viistettyä pilaria.

Eurokoodi ei suoraan esitä viistetylle pilarille ohjetta stabiiliuden tarkastamiseen. Viistetyn pilarin stabiiliuden tarkastaminen on monimutkaisempaa kuin suoran pilarin, sillä analyttisiä kimmoteorian mukaisia kaavoja kriittisten kuormien laskentaan ei ole ja kriittisen poikkileikkauksen valinta nurjahduskestävyyden laskentaan ei ole suoraviivaista. Yksinkertaiselle viistetylle pilarille, joka on nivelellisesti tuettu, on Eurokoodin 1993-1-1 lukujen 6.3.3 ja 6.3.4 perusteella tehty esimerkkilaskelmat viistetyn pilarin stabiiliteettikestävyyden tarkistukselle kriittisessä poikkileikkauksessa. [14, s. 302-317] Stabiiliteettikestävyyden laskentaan käytettävien poikkileikkaussuureiden on oltava kriittisen poikkileikkauksen kohdalta laskettua, elleivät seuraavaksi esitettävät kaavat esitä muuta.

Vahvemman akselin suuntainen kriittinen nurjahduskuorma kriittisessä poikkileikkauksessa kuvan 2.7 mukaiselle viistetylle pilarille saadaan laskettua seuraavasti [14, s. 291-293]:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{y,eq}}{L_{cr}^2}, \quad (2.49)$$

missä

$$I_{y,eq} = CI_{y,max} \quad (2.50)$$

$$C = 0.08 + 0.92r \quad (2.51)$$

$$r = \sqrt{\frac{I_{y,min}}{I_{y,max}}}, \quad (2.52)$$

missä  $I_{y,eq}$  on vahvemman suunnan ekvivalentti neliömomentti,  $I_{y,max}$  on viistetyn pilarin isomman pään neliömomentti ja  $I_{y,min}$  on viistetyn pilarin pienemmän pään neliömomentti. Heikomman akselin suuntainen kriittinen nurjahduskuorma kuvan 2.7 mukaiselle viistetylle pilarille saadaan laskettua seuraavasti [14, s. 291-293]:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{z,min}}{L_{cr}^2}, \quad (2.53)$$

missä  $I_{z,min}$  on viistetyn pilarin pienemmän pään neliömomentti.

Kiepahduskestävyyden laskemiseen tarvittava kriittinen momentti kriittisessä poikkileikkauksessa kuvan 2.7 mukaiselle viistetylle pilarille saadaan laskettua seuraavasti [14, s. 307-308]:

$$M_{cr} = 1.13 \left[ \frac{\pi}{L} \sqrt{GI_{T,eq}EI_{z,min} \left( 1 + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2 EI_{T,eq}} \right)} \right], \quad (2.54)$$

missä  $L$  on kiepahdustukien välinen etäisyys ja

$$I_{T,eq} = \frac{I_{T,max} + I_{T,min}}{2} \quad (2.55)$$

$$I_w = \frac{1}{4} I_{z,min} h_f^2, \quad (2.56)$$

missä  $I_{T,max}$  on viistetyn pilarin isomman pään ja  $I_{T,min}$  on viistetyn pilarin pienemmän pään vääntöjäyhyys. Laippojen pintakeskiöiden välinen etäisyys

$$h_f = h_{eq} - 2t_f, \quad (2.57)$$

missä

$$h_{eq} = h_{max} \sqrt{0.283 + 0.434\gamma_h + 0.283\gamma_h^2} \quad (2.58)$$

$$\gamma_h = \frac{h_{min}}{h_{max}}, \quad (2.59)$$

missä  $h_{min}$  ja  $h_{max}$  ovat viistetyn pilarin pienemmän ja suuremman pään poikkileikkauksien korkeudet.

Edellä esitellyt kaavat eivät ole suoraan Eurokoodin mukaisia. Näitä kaavoja käyttäen tehtyjä esimerkkilaskelmia on vertailtu tarkkan 3D GMNIA -mallin (*engl. Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included*) laskelmiin ja saadut tulokset ovat 3D GMNIA -mallin tuloksia konservatiivisempia [14, s. 302-317].

## 3 OPTIMOINTITEORIA

Optimointi on parhaan mahdollisen ratkaisun systemaattista etsintää, joka suoritetaan tehtävän ratkaisuun sopivilla algoritmeilla. Optimoinnin lähtökohtana on, että jos rakenne voidaan analysoida, kuten tämän työn kappaleessa 2 tehdään, se voidaan myös optimoida.

Optimoinnissa kohdefunktiolle haetaan minimi- tai maksimiarvoa muuttamalla suunnittelumuuttujien arvoja. Rakenteiden optimoinnissa suunnittelijan on ymmärrettävä sekä algoritmien toiminta että suunniteltavien ja optimoitavien rakenteiden käyttäytyminen. [15, s. 1-2] Tässä kappaleessa käsitellään optimoinnin peruskäsitteitä ja kuvaillaan optimointiprosessia. Lisäksi käydään läpi rakenteiden optimoinnin erityispiirteitä ja tehtävätyyppejä.

### 3.1 Optimoinnin perusteet

Tehtävän asettelu, eli optimointitehtävän määrittely tai formulointi, on optimoinnissa tärkeässä roolissa. Tehtävän asetteluun kuuluvat suunnittelumuuttujien, rajoitusehtojen ja kohdefunktion määrittäminen. Tehtävän asettelussa tarvitaan myös materiaaleihin ja valmistukseen liittyviä tietoja. Optimointitehtävän lähtötilanteena voi olla aiempi ratkaisu, jota parannetaan, tai kokonaan uusi ratkaisutapa. Optimoitava kohde ja halutut rajoitusehdot asetetaan matemaattiseen muotoon, jolloin optimoimalla voidaan matemaattisin keinoin etsiä käypää ratkaisua. Käypä ratkaisu on annettujen rajoitusehtojen joukkoon kuuluva ratkaisu. Tehtävän formulointi matemaattiseen muotoon voidaan suorittaa Aroran [16, s. 16-17] mukaan viisivaiheisella prosessilla:

1. Määritellään ongelmalle selkeät tavoitteet ja vaatimukset.
2. Kerätään tarvittavia lähtötietoja, kuten materiaaliominaisuuksia sekä valmistukseen liittyviä vaatimuksia ja rajoitteita. Usein ongelman ratkaisemiseksi tehdään tehtävästä kokeiluversiona, joten tässä vaiheessa valitaan sopivat analysointimenetelmät ja -työkalut. Suunnittelutiedot voivat riippua suunnittelumuuttujista, jotka tunnistetaan seuraavassa vaiheessa, joten suunnittelutietoja tarkennetaan usein myöhemmissä vaiheissa. Tarkistetaan, että ongelma on ratkaistavissa olemassa olevilla tiedoilla.
3. Tunnistetaan ja määritellään suunnittelumuuttujat. Tarkistetaan, että suunnittelumuuttujia on ainakin vähimmäismäärä ongelman muotoilua varten.



4. Tunnistetaan optimointikriteeri ja valitaan ongelmalle kohdefunktio, jonka optimoitu arvo on tehtävän paras mahdollinen ratkaisu.
5. Tunnistetaan rajoitusehdot ja muotoillaan ne yhtälömuotoisiksi.

Kohdefunktion voidaan sanoa mittaavan optimointitehtävän ratkaisun hyvyttä. Suunnittelumuuttujat ovat parametreja, joita muuttamalla rakennetta voidaan parantaa. Rajoitusehdot varmistavat, että optimoinnilla saatava ratkaisu täyttää rakenteelle asetetut vaatimukset. Tässä työssä rajoitusehdot ovat eurokoodien mukaiset geometriaan ja kestävyysliittyvät ehdot. Optimointitehtävän yleinen matemaattinen esitysmuoto voidaan kirjoittaa seuraavasti [16, s. 42]:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}), \text{ siten, että} \quad (3.1)$$

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

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

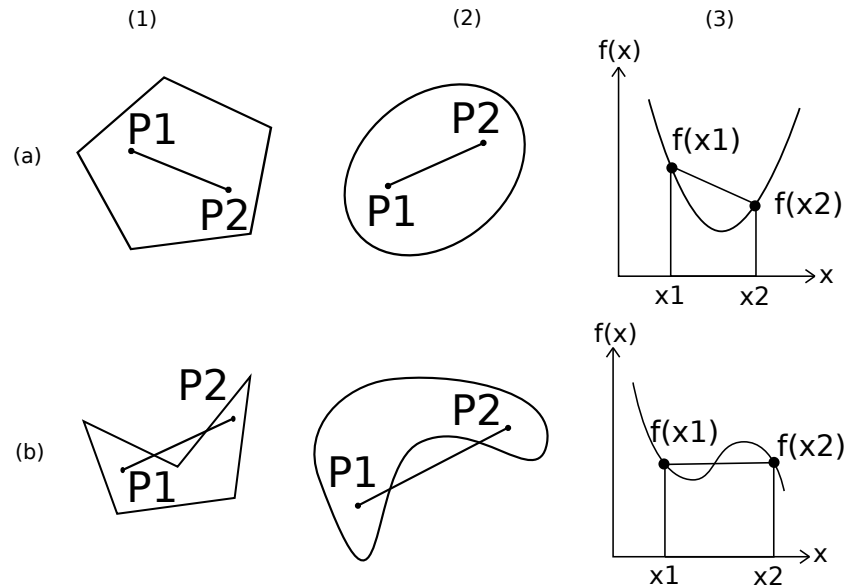
missä

$$\mathbf{x} = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n\} \quad (3.2)$$

missä  $f$  on kohdefunktio ja  $g_i$  sekä  $h_j$  ovat rajoitusfunktioita ja  $\mathbf{x}$  on  $n$  kappaletta suunnittelumuuttujia sisältävä vektori. Standardimuotoisessa optimointitehtävässä epäyhtälörajoitusehdot ilmoitetaan aina  $\leq$ -muodossa. Jos kuitenkin epäyhtälö on  $\geq$ -muotoisena, se saadaan muutettua  $\leq$ -muotoon kertomalla ehto luvulla  $-1$ .

Epäyhtälörajoitusehtoja voi olla kuinka paljon tahansa. Yhtälömuotoisia rajoitusehtoja pitäisi olla vähemmän tai yhtä monta kuin suunnittelumuuttujia. Jos yhtälömuotoisia rajoitusehtoja on enemmän kuin suunnittelumuuttujia, jotkin rajoitusehdot toteuttavat suoraan toisen rajoitusehdon ja ovat näin ollen optimointitehtävän ratkaisun kannalta ylimääräisiä. Erikoistapauksessa, jossa yhtälömuotoisia rajoitusehtoja on yhtä paljon kuin suunnittelumuuttujia, tehtävä saadaan ratkaistua analyttisin keinoin eikä välttämättä tarvita optimointia. [16, s. 43] Kuten rakenteiden optimointitehtävissä yleensä, myös tässä työssä rajoitusehtoja tulee olemaan enemmän kuin suunnittelumuuttujia, joten teoriassa osa ehdoista on ylimääräisiä. Tällöin optimointitehtävän ratkaisussa vain osa rajoitusehdoista on aktiivisina tai lähellä rajaa.

Optimointialgoritmilla ratkaistun optimointitehtävän suunnittelumuuttujat toteuttavat määritellyt rajoitusehdot. Pisteet, joissa kaikki rajoitusehdot toteutuvat, muodostavat käyvän joukon. [16, s. 45] Käypä joukko voi olla konvekksi (kuva 3.1), jolloin kaikkien joukon alkoioiden välille piirretyllä janalla olevat alkiot kuuluvat joukkoon. Jos kaikki janan välillä olevat alkiot eivät kuulu joukkoon, käypä joukko on epäkonvekksi. Funktio on konvekksi, jos kahden funktion pistettä yhdistävä suora ei leikkaa funktiota missään muussa sen pisteessä, ja epäkonvekksi, jos suora leikkaa funktion ainakin yhdessä pisteessä. [16, s. 149-153] Kuvassa 3.1 on havainnollistettu konveksisuutta (rivillä a) ja epäkonveksisuutta (rivillä b) käypien joukkojen (sarakeet 1 ja 2) sekä funktioiden (sarake 3) osalta. Konveksisuus voidaan määrittellä myös matemaattisesti. Joukko  $X$  on konvekksi, jos kaikille  $x_1, x_2 \in X$



**Kuva 3.1.** Konvekksi (rivi a) ja epäkonvekksi (rivi b) käypä joukko (1 ja 2) ja funktio (3).

ja kaikille  $t \in [0, 1]$  on voimassa [16, s. 149-150]

$$tx_1 + (1 - t)x_2 \in X. \quad (3.3)$$

Funktio  $F : X \rightarrow \mathbb{R}$  on konvekksi, jos [17, s. 353]

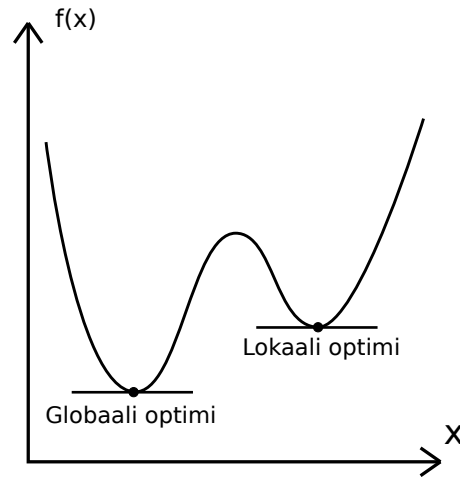
$$f(tx_1 + (1 - t)x_2) \leq tf(x_1) + (1 - t)f(x_2), \quad (3.4)$$

kun  $x_1, x_2 \in X$  ja  $t \in [0, 1]$ .

Optimi ratkaisu voi olla globaali tai lokaali optimi. Jos tehtävä on konvekksi, sen jokainen lokaali optimi on globaali optimi. Globaali optimi on hakuavaruuden kaikista ratkaisuista paras, kun taas lokaali optimi on lähiympäristönsä paras ratkaisu. Tätä on havainnollistettu kuvassa 3.2, jossa funktiolle etsitään minimiratkaisua ja lokaali optimi on selvästi suurempi kuin globaali. [16, s. 84-85] Klassisilla optimointimenetelmillä voidaan taata ainoastaan lokaalin optimin löytyminen.

Funktiot voivat olla lineaarisia tai epälineaarisia. Epälineaarisilla funktioilla voi olla useita lokaaleja optimeja, jotka voivat olla huomattavasti huonompia kuin globaali optimi. Tehtävä on lineaarinen optimointiongelma, jos kaikki funktiot ovat lineaarisia (*engl. linear programming problem, LP*). Muussa tapauksessa tehtävä on epälineaarinen (*engl. nonlinear programming problem, NLP*). Lineaarinen tehtävä on aina konvekksi. Epälineaarinen tehtävä on konvekksi, jos tehtävän käypä joukko on konvekksi ja kohdefunktio on käyvässä joukossa konvekksi. Muussa tapauksessa epälineaarinen tehtävä on epäkonvekksi.

Suunnittelumuuttujat voivat olla esimerkiksi jatkuvia, diskreettejä tai kokonaislukuarvoisia [15, s. 6-7]. Jatkuvat muuttujat saavat arvokseen mitä tahansa ylä- ja alarajan väliltä. Jos suunnittelumuuttujat ovat diskreettejä, optimointitehtäväkin on diskreetti. Diskreettien muuttujien joukkoon sisältyy arvoja esimerkiksi tietyin välein ylä- ja alarajan väliltä



**Kuva 3.2.** Globaali optimi on selvästi pienempi kuin lokaali optimi.

tai määrätystä listasta. Kokonaislukumuuttujat saavat vain kokonaislukuarvoja, kun taas jatkuvien ja diskreettien muuttujien arvojoukkona ovat reaaliluvut. Kokonaislukutehtävän ääritapaus on binäärimuuttujat, jolloin muuttujat saavat arvokseen joko 0:n tai 1:n. Kokonaislukumuuttujalla voidaan myös viitata luetteloitujen ominaisuuksien järjestyslukuun, esimerkiksi tässä työssä SHS-profiilivalikoimaan, jolloin muuttujaa sanotaan indeksimuuttujaksi. Taulukossa 3.1 on esimerkki indeksimuuttujista. Binääri- ja indeksimuuttujia käytetään, sillä niiden avulla voidaan käyttää suoraan teräsprofiili tai -levyvalikoiman mukaisia arvoja muuttujina. Kokonaislukumuuttujia käytettäessä tehtävää kutsutaan kokonaislukutehtäväksi. Tehtävää kutsutaan sekalukutehtäväksi, kun käytössä on sekä jatkuvia että diskreettejä muuttujia.

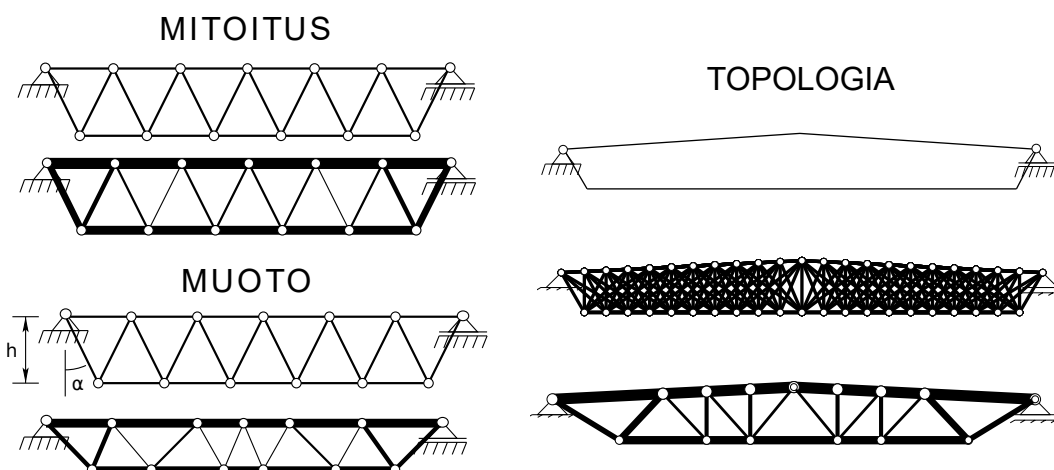
**Taulukko 3.1.** Esimerkki indeksimuuttujista.

Indeksi	Profiilin ominaisuudet
0	$h_0, t_{w0}, b_0, t_{f0}$
1	$h_1, t_{w1}, b_1, t_{f1}$
2	$h_2, t_{w2}, b_2, t_{f2}$
3	$h_3, t_{w3}, b_3, t_{f3}$

Diskreetit tehtävät ja sekalukuongelmat ovat usein huomattavasti hankalampia ratkaista kuin jatkuvat muuttujan tehtävät. [4, s. 2-3] Optimointitehtävän ratkaisemiseen käytetään tehtävään sopivaa algoritmia. Ei ole olemassa algoritmia, joka soveltuisi yleisesti käytettäväksi kaikkien optimointitehtävien ratkaisuun, vaan optimointialgoritmin valinta määräytyy määritetyn optimointitehtävän matemaattisten ominaisuuksien perusteella. Erilaisia menetelmiä on paljon erityyppisille tehtäville ja tässä työssä käsiteltyjä menetelmiä esitellään luvussa 5.

## 3.2 Rakenteiden optimoinnin erityispiirteet

Rakenteiden optimoinnissa optimointiongelmia voidaan lähestyä kolmella eri tavalla, joita ovat mitoituksen, geometrian ja topologian optimointi. Mitoitusoptimoinnissa geometria määrätään aluksi ja optimoinnissa muutetaan poikkileikkausta, esimerkiksi levynpaksuuksia ja poikkileikkausmittoja. Geometrian eli muodon optimoinnissa muutetaan rakenteen geometriaa esimerkiksi solmukoordinaatteja siirtämällä tai rakennekorkeutta muuttamalla. Topologian optimoinnissa haetaan parasta geometristä ratkaisua muuttamalla esimerkiksi sauvojen ja reikien lukumäärää sekä sauvojen välisiä liitoksia, joiden kautta solmupisteet muuttuvat. Näitä on havainnollistettu kuvassa 3.3, jossa mitoitusoptimoinnilla sauvojen poikkileikkauksia on muuteltu, muodon optimoinnissa on vaihdeltu solmupisteiden paikkoja ja ristikon korkeutta ja topologian optimoinnissa muutettu muun muassa sauvojen määrää ja sauvojen välisiä liitoksia. Rakenteiden optimoinnissa tehdään yleensä erillinen rakenneanalyysi, jossa lasketaan rakenneosien kestävyudet ja muodonmuutokset. Analyysi voidaan tehdä käyttämällä esimerkiksi elementtimenetelmää (*engl. Finite Element Method, FEM*).



**Kuva 3.3.** Rakenteiden optimoinnin tehtävätyypit: mitoitus, muoto ja topologia [18, s. 3].

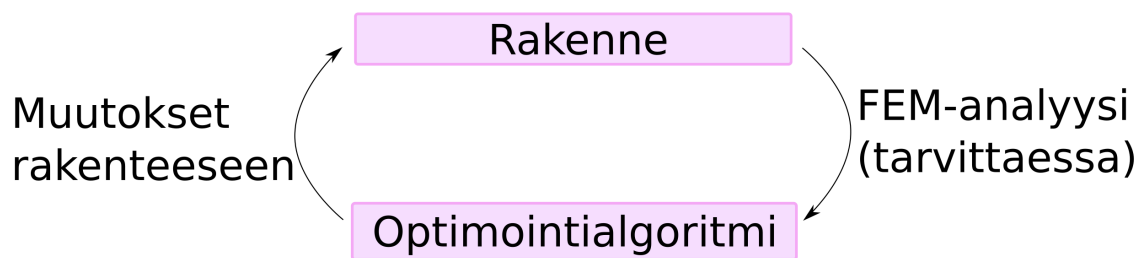
Rakennesuunnittelussa peruselementteinä ovat usein sauvamaiset rakenneosat, esimerkiksi palkit ja pilarit. Useimmiten teräsrakenteisissa sauvaelementeissä käytetään standardiprofiileja. Hitsatuissa profiileissa voidaan käyttää saatavilla olevista valikoimista valittuja teräslevyjä tai mahdollisuuksien mukaan erikoispaksuisia levyjä, jotka voidaan mitata tarkkuuksien rajoissa valmistaa halutun paksuisiksi. Erikoispaksuisia levyjä käytettäessä kannattaa tarkastella, onko se taloudellisesti järkevää. Valittavissa olevat arvot tuovat optimointitehtävään diskreettejä muuttujia, joka tekee tehtävästä diskreetin. Suunnitteluohjeisto määrää kriteerit, joilla rakenneosien kestävyttä tarkastellaan erilaisilla kuormituksilla, jolloin suunnitteluohje määrää kaavassa (3.1) esitetyn optimointitehtävän rajoitusehdot. Suunnitteluohjeen ehdot voivat olla yksinkertaisia tai melko monimutkaisia, jolloin mukana voi olla ehtoja, jotka tuovat mukaan esimerkiksi epäjatkuvia tai derivoitumattomia funktioita. Rakenteiden optimointitehtävät ovat useimmiten diskreettejä, epälieneaarisia ja epäkonvekseja, kuten tämänkin työn optimointitehtävä on.

Jos tarkastellaan yksittäistä rakenneosaa ja valitaan arvo suoraan vakioprofiileista, optimointi ei ole välttämättä järkevää. Profiileja on rajallinen määrä, jolloin voidaan käydä vaihtoehdot läpi ja valita taloudellisin. Kun vaihtelua on enemmän, tehtävä muuttuu työläämmäksi laskea. Tällöin optimoinnilla saavutetaan etua, kun voidaan tutkia enemmän erilaisia vaihtoehtoja lyhyessä ajassa. Tässä työssä tutkitaan muun muassa hitsattua I-pilaria, jolla uuman ja laippojen paksuudet sekä uuman korkeus ja laippojen leveydet voivat vaihdella. Tällaisen profiilin parhaan mahdollisen ratkaisun selvittäminen muuten kuin optimoimalla olisi hidasta ja työlästä. Yhtenä työn tavoitteena on selvittää hitsatun I-profiilin optimoinnista saatavia hyötyjä. Tätä tutkitaan optimoimalla hitsattua I-pilaria ja vertailemalla tuloksia vakioprofiileihin. Muuttujina voivat olla esimerkiksi rakenneosan taipuvuusvastus, poikkileikkauksen pinta-ala tai jo edellä mainitut poikkileikkausmitat.

Teräsrakenteille on tyypillistä, että taloudellisimmaksi rakenteeksi oletetaan kevyin rakenne, joka täyttää rajoitusehdot. Tavoitefunktiona käytetään tästä syystä usein massafunktiota. Teräsrakenteilla on myös monia työvaiheita, jotka vaikuttavat materiaalikustannusten lisäksi rakenneosan kokonaiskustannukseen. Esimerkiksi hitsatussa pilarissa työvaiheita ovat muun muassa leikkaaminen, hitsaus, maalaus ja hiekkapuhallus/sinkous. Tästä syystä myös kustannusfunktion käyttö tavoitefunktiona on järkevää. Tässä työssä käytetään massan tavoitefunktiota.

## 4 PORTAALIKEHÄN OPTIMOINTITEHTÄVÄN ASETTAMINEN

Tässä työssä käsitellään mitoitusoptimointia, kun sekä geometria että topologia on päätetty ennen varsinaisen optimoinnin aloittamista. Optimoinnilla etsitään annetulle rakenteelle ja kuormitukselle optimiprofiileja, joilla saavutetaan mahdollisimman pieni rakenteen kokonaisuudessa. Optimoinnissa aktiiviset rajoitusehdot ovat kiinnostavimpia. Aktiiviset rajoitusehdot ovat ehtoja, jotka ovat lähimpänä 100 %:n käyttöastetta. Epäyhtälömuotoisia rajoitusehtoja on enemmän kuin tehtävän ratkaisemiseen tarvitaan, jolloin osa ehdoista on todellisuudessa turhia ratkaisun löytymisen kannalta. Tässä otetaan kuitenkin kaikki rajoitusehdot mukaan, sillä ylimääräiset ehdot voivat nopeuttaa optimointia ja auttaa tehtävän ratkaisemisessa rajaamalla käypää joukkoa pienemmäksi. Lisäksi kaikki Eurokoodin mukaiset ehdot on aina huomioitava rakenteiden mitoituksessa.



**Kuva 4.1.** Ohjelman toimintalogiikka yksinkertaistetusti.

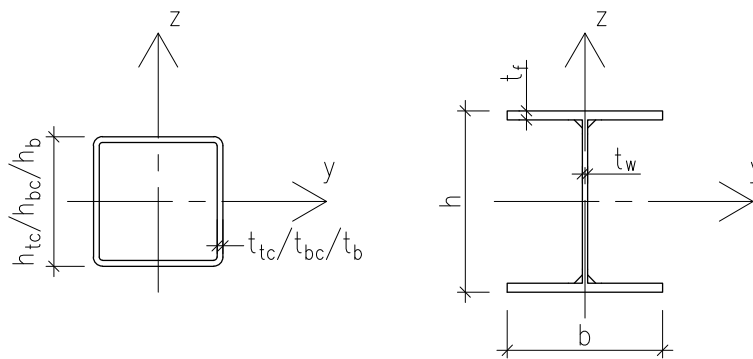
Optimointitehtävän formulointi vaatii kohdefunktion, suunnittelumuuttujat ja rajoitusehdot. Tässä työssä kohdefunktiona on minimimassan funktio, poikkileikkausmitat ovat suunnittelumuuttujia ja rajoitusehdot perustuvat Eurokoodiin 3. Tehtävänasettelu tehdään kapaleessa 3 esitetyn teorian mukaisesti. Tehtävänasettelun matemaattisessa esitysmuodossa käytetään kaavaa (3.1). Kuvassa 4.1 on esitetty yksinkertaistetusti tämän työn ohjelman toimintalogiikkaa. Rakenteelle tehdään FEM-analyysi aluksi ja aina tarvittaessa, mistä saadaan rasitukset ja siirtymät. Rakenneanalyysi tarvitaan, kun rakennetta muokataan, eli esimerkiksi profiilien muuttamisen jälkeen. Optimointialgoritmi hakee ratkaisua, jonka perusteella tehdään muuttujien kautta muutoksia rakenteeseen ja taas tarvittaessa FEM-analyysi.

## 4.1 Suunnittelumuuttujat

Optimoitava rakenne koostuu pilareista ja ristikosta. Ristikon sauvoille on valittava profiilit SSAB:n valikoimasta, jolloin ristikon muuttujat ovat väistämättä diskreettejä. Hitsatun pilarin dimensiot ovat myös muuttujina, jotka periaatteessa ovat jatkuvia, mutta käytännössä ne rajataan diskreetteihin arvoihin tarkkuuksiin ja toleransseihin liittyvistä valmistusteknisistä syistä. Pilarina käytettävän I-profiilin ja ristikossa käytettävän neliöprofiilin muuttujat on esitelty kuvassa 4.2. Muuttujat voidaan esittää yhtenä vektorina

$$\mathbf{x} = \{ \mathbf{x}_p \ \mathbf{x}_r \}, \quad (4.1)$$

jossa  $\mathbf{x}_p$  on pilarin muuttujat sisältävä vektori ja  $\mathbf{x}_r$  on ristikon muuttujat sisältävä vektori.



**Kuva 4.2.** Ristikon neliöputkiprofiilien ja pilarin I-profiilin muuttujat.

Muuttujat voidaan määrittellä eri tavoin, kuten jatkuvina tai indeksimuuttujina. Määrittelyn taustalla on tehtävän ratkaisemisen menetelmä tai prosessi ja erilaisille tehtäville sopivat erilaiset muuttujat. Tässä työssä kaksoissymmetristä hitsattua I-pilaria optimoidaan ensin jatkuvilla muuttujilla, jolloin voidaan vertailla tuloksia diskreeteillä muuttujilla saatiin tuloksiin. Optimointi voidaan suorittaa myös diskreeteillä muuttujilla joko suoraan tai kaksivaihetekniikan toisessa vaiheessa.

### 4.1.1 Pilarin muuttujat

Pilarin muuttujiksi on valittu poikkileikkausmitat. Kaksoissymmetrisellä hitsatulla I-pilarilla on 4 muuttujaa, joita on havainnollistettu kuvassa 4.2. Pilarin muuttujat voidaan esittää vektorina

$$\mathbf{x}_p = \{ h \ t_w \ b \ t_f \}, \quad (4.2)$$

missä  $h$  on poikkileikkauksen korkeus,  $t_w$  on uuman paksuus,  $b$  on laipan leveys ja  $t_f$  on laipan paksuus. Muuttujien ylä- ja alarajat on esitelty taulukossa 4.1.

Kun muuttujat ovat jatkuvia, ne voivat saada mitä tahansa arvoja ylä- ja alarajan väliltä. Muulloin laippojen sekä uuman paksuudet määräytyvät SSAB:n valikoimasta ja leveydet sekä korkeudet annetaan 10 mm:n välein ylä- ja alarajan väliltä. Mahdolliset paksuudet

**Taulukko 4.1.** Pilarin muuttujien ylä- ja alarajat.

Rajat	Pilari		
	Korkeus $h$ [mm]	Uuman paksuus $t_w$ [mm]	Laipat $b * t_f$ [mm]
Yläraja	500	20	500 * 20
Alaraja	100	4	100 * 4

ovat

$$t_i = [4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20] \text{ mm.}$$

Indeksimuuttujat saavat arvokseen edellä esitettyjen paksuuksien indeksejä sekä valittavissa olevien leveyksien ja korkeuksien indeksejä.

Kun käytetään binäärimuuttujia, jokainen muuttuja saa arvokseen 0 tai 1. Binäärimuuttujien avulla voidaan käsitellä suoraan levyvalikoiman arvoja. Binäärimuuttujat voidaan esittää muodossa

$$x_i = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij} y_{ij}, \quad (4.3)$$

missä  $x_i$  on I-profiilin poikkileikkausmitta

$$x_i \in \{h_j, b_j, t_{wj}, t_{fj}\} \quad (4.4)$$

ja  $\hat{x}_{ij}$ :n  $i$  viittaa poikkileikkauksen mittaan ja  $j$  viittaa mitan valittavissa olevaan arvoon.

$$\hat{x}_{ij} \in \mathbb{X}_i, \quad (4.5)$$

missä  $\mathbb{X}_i$  sisältää poikkileikkausmitalle  $x_i$  valittavissa olevat arvot.  $y_{ij}$  on binäärimuuttuja, joka saa arvokseen 1 tai 0 seuraavasti

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{kun sauvalle } i \text{ valitaan vaihtoehto } j \\ 0, & \text{muulloin.} \end{cases} \quad (4.6)$$

Koska pilarille  $i$  voidaan valita vain yksi arvo jokaiselle poikkileikkausmitalle, tarvitaan binäärimuuttujia käytettäessä rajoitusehto

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1. \quad (4.7)$$

## 4.1.2 Ristikon muuttujat

Ristikon muuttujiksi on valittu ristikon osien poikkileikkausmitat. Neliörakenneputkiristikolla on 6 muuttujaa, kun muuttujat ovat jatkuvia tai diskreettejä. Muuttujat on esitetty



kuvassa 4.2. Ristikon muuttujat voidaan esittää vektorina

$$\mathbf{x}_r = \{h_{tc} \ t_{tc} \ h_{bc} \ t_{bc} \ h_b \ t_b\}, \quad (4.8)$$

missä  $h_{tc}$  on yläpaartein leveys ja  $t_{tc}$  paksuus,  $h_{bc}$  on alapaartein leveys ja  $t_{bc}$  paksuus sekä  $h_b$  on uumasauvan leveys ja  $t_b$  paksuus. Muuttujien ylä- ja alarajat on esitelty taulukossa 4.2. Jatkuvat ristikon muuttujat voivat saada mitä tahansa arvoja ylä- ja alarajan väliltä. Diskreetit ristikon muuttujat voivat saada SSAB:n SHS-valikoiman profiilien mukaisia leveyksiä ja paksuuksia.

**Taulukko 4.2.** Ristikon muuttujien ylä- ja alarajat.

Rajat	Ristikko		
	Yläpaarre $h_{tc} * t_{tc}$ [mm]	Alapaarre $h_{bc} * t_{bc}$ [mm]	Uumasauvat $h_b * t_b$ [mm]
Yläraja	300 * 12.5	200 * 10	150 * 8
Alaraja	100 * 4	80 * 4	50 * 3

Ristikon muuttujia on yhteensä 3, kun käytössä ovat indeksimuuttujat. Indeksimuuttujien avulla voidaan käsitellä suoraan profiilivalikoiman arvoja, jolloin ristikon muuttujat ovat SSAB:n SHS-valikoiman profiileita. Indeksimuuttujat voidaan esittää vektorina

$$\mathbf{x}_r = \{p_{tc} \ p_{bc} \ p_b\}, \quad (4.9)$$

missä  $p_{tc}$  on yläpaartein,  $p_{bc}$  on alapaartein ja  $p_b$  on uumasauvojen neliöputkiprofiili SHS-valikoimasta valittuna.

Kun käytetään binäärimuuttujia jokainen muuttuja saa arvokseen 0 tai 1. Binäärimuuttujien avulla voidaan käsitellä suoraan profiilivalikoiman arvoja. Binäärimuuttujat voidaan esittää vektorina

$$\mathbf{x}_i = \sum_{j=1}^n \hat{\mathbf{x}}_j y_{ij}, \quad (4.10)$$

missä  $\hat{\mathbf{x}}_j$  sisältää neliöputkiprofiilin poikkileikkaukseen liittyviä suureita

$$\hat{\mathbf{x}}_j \in \{\hat{A}_j \ \hat{I}_j \ \hat{W}_j \ \hat{h}_j \ \hat{b}_j \ \hat{t}_j \ \dots\} \quad (4.11)$$

ja  $y_{ij}$  on binäärimuuttuja, jolle pätevät kaavojen (4.6) ja (4.7) ehdot.

## 4.2 Kohdefunktio

Tutkimuksessa haetaan ratkaisu minimimassalle. Rakenteen minimimassan kohdefunktio on yksinkertaisempi kuin minimikustannusten kohdefunktio. Kevein rakenne on usein hyvin lähellä pienimpiä kustannuksia, joten minimimassan kohdefunktiota käytetään yleisemmin. Kustannusten minimoimisessa otetaan materiaalikustannusten lisäksi huomioon muun muassa hitsauksen, maalauksen ja sahauksen aiheuttamat kustannukset.

Jos optimointitehtävässä on useita kohdefunktioita, tehtävää kutsutaan monitavoiteoptimoinniksi. Kohdefunktio ilmaistaan tällöin matemaattisesti kohdefunktioiden joukkona, jossa jokaisella kohdefunktiolla on sama suunnittelumuuttujavektori  $\mathbf{x}$ . Tässä työssä keskitytään minimimassan kohdefunktioon.

Massan minimoimisen kohdefunktion tuloksena on koko rakenteen minimimassa. Tämän kohdefunktion formulointi on yksiselitteistä. Minimimassan kohdefunktio on

$$W(x) = \rho \sum_{i=1}^{n_E} l_i A_i(\mathbf{x}), \quad (4.12)$$

missä teräksen tiheys  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ,  $n_E$  on kehän rakenneosien lukumäärä,  $l_i$  on rakenneosan  $i$  pituus ja  $A_i$  on rakenneosan  $i$  poikkileikkauksen pinta-ala. Viistetyllä I-pilarilla minimimassan kohdefunktio ei ole suoraan sama kuin kaksoissymmetrisellä I-pilarilla. Viistetyllä pilarilla on huomioitava pilarin pituuden mukaisesti muuttuva uuman pinta-ala. Lisäksi viistetty laippa on pidempi kuin suora laippa.

### 4.3 Rajoitusehdot

Rajoitusehdoilla varmistetaan käytettävien suunnitteluohjeiden mukaisten ehtojen toteutuminen ja portaalikehän käytettävyys. Kaikki olennaiset suunnittelukriteerit on esitetty kappaleessa 2. Rajoitusehtojen formulointiin on useita erilaisia tapoja. Eurokoodissa suunnittelukriteerit esitetään muodossa

$$E_d \leq R_d, \quad (4.13)$$

missä  $E_d$  on mitoitusarvo ja  $R_d$  on kestävyuden suunnitteluarvo. Mitoitusarvot lasketaan sauvan molemmissa päissä ja itseisarvoltaan suurempi valitaan rajoittavaksi. Optimoinnissa epäyhtälömuotoiset rajoitusehdot esitetään muodossa  $g_j(x) \leq 0$ .

Rajoitusehto on aktiivinen, jos tarkastelupisteessä  $x^*$  toteutuu  $g_j(x^*) = 0$ . Määräävä rajoitusehto tarkoittaa tässä työssä rajoitusehtoa, joka on kaikista rajoitusehdoista lähimpänä aktiivista eli lähimpänä sallittua rajaa 0. Matemaattisesti esitettynä määräävä rajoitusehto on  $\arg \max_j (g_j(x^*))$ , jossa  $\arg \max$  tarkoittaa sitä indeksin  $j$  arvoa, jolla  $g_j(x^*)$  on suurin. On myös huolehdittava, että tarkastelupiste on käypä. Määräävän rajoitusehdon käsitettä tarvitaan, sillä on mahdollista, että yksikään rajoitusehto ei ole aktiivinen. Erityisesti diskreetissä optimoinnissa voidaan päätyä tilanteeseen, jossa ei ole aktiivisia rajoitusehtoja.

Poikkileikkausehtoja ovat normaalivoimakestävyuden, leikkausvoimakestävyuden ja taivutusmomenttikestävyuden ehdot. Stabiilisuusehtoja ovat nurjahduskestävyysehto heikompaan ja vahvempaan suuntaan, yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyysehto heikompaan ja vahvempaan suuntaan sekä kiepahduskestävyysehto. Lisäksi poikkileikkausluokka asettaa rajoitusehtoja, eivätkä poikkileikkausmitat voi mennä negatiiviseksi.

### 4.3.1 Poikkileikkausedot

Normaalivoiman rajoitusehto voidaan johtaa kaavojen (2.15) ja (2.16) avulla. Normaalivoiman rajoitusehtojen implementoinnissa on huomioitava, että molemmat ehdot ovat mukana, sillä etukäteen ei välttämättä tiedetä, ovatko sauvat vedettyjä vai puristettuja.

$$g_i^N(\mathbf{x}) = \begin{cases} N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - N_{Rd,i}(\mathbf{x}) \leq 0, & \text{kun sauvassa on vetoa} \\ -N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - N_{Rd,i}(\mathbf{x}) \leq 0, & \text{kun sauvassa on puristusta.} \end{cases} \quad (4.14)$$

Normaalivoimakestävyys  $N_{Rd,i}(x)$  kullekin sauvalle  $i$  lasketaan kaavalla (2.17). Yleisen merkkiohjesäännön mukaan veto on positiivista ja puristus negatiivista. Ylempi osa kaavasta (4.14) on aktiivisena, kun sauvaan kohdistuu vetoa ja alempi osa on aktiivisena, kun sauvaan kohdistuu puristusta.

Taivutusmomentin ehto on esitetty kaavassa (2.18). Normaalivoiman vaikutus otetaan huomioon taivutusmomentin rajoitusehtoa johdettaessa. Taivutusmomentin rajoitusehto on

$$g_i^M(\mathbf{x}) = |M_{Ed,i}(\mathbf{x})| - M_{N,Rd,i}(\mathbf{x}) \leq 0. \quad (4.15)$$

Leikkausvoiman rajoitusehto johdetaan kaavan (2.11) perusteella

$$g_i^V(\mathbf{x}) = |V_{Ed,i}(\mathbf{x})| - V_{Rd,i}(\mathbf{x}) \leq 0. \quad (4.16)$$

Lineaariset ehdot poikkileikkausluokkien rajoista kirjoitetaan kappaleen 2.2 kaavoista johtaen. Poikkileikkausluokkien rajoitusedot ovat aktiivisena hitsatululle I-pilarille sekä jatkuvilla että diskreeteillä muuttujilla optimoitaessa. Kun neliöputkiprofiilit ovat standardikoisia, eli standardivalikoimasta valittuja profiileja, ne pysyvät aina poikkileikkausluokkien rajoissa. Poikkileikkausluokan rajoitusehtoa tarvitaan neliöputkiprofiilille, kun neliöputkea optimoidaan jatkuvilla tai diskreeteillä arvoilla. Rajoitusedot tehdään puristetuille taso-osille, jolloin ollaan mitoituksen kannalta varmallalla puolella. Kahdelta reunalta tuetuille puristetuille taso-osille (tässä I-profiilin uumalle) rajoitusehto kirjoitetaan

$$g_i^{CL,w}(\mathbf{x}) = \begin{cases} h_i - 2t_{f,i} - 38\epsilon t_i - 2\sqrt{2}a \leq 0 & \text{poikkileikkausluokassa 2} \\ h_i - 2t_{f,i} - 42\epsilon t_i - 2\sqrt{2}a \leq 0 & \text{poikkileikkausluokassa 3.} \end{cases} \quad (4.17)$$

Ulokkeellisille laipoille puristettujen taso-osien (tässä I-profiilin laipoille) rajoitusehto kirjoitetaan

$$g_i^{CL,f}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{1}{2}h_i - \frac{1}{2}t_{w,i} - 10\epsilon t_i - \sqrt{2}a \leq 0 & \text{poikkileikkausluokassa 2} \\ \frac{1}{2}h_i - \frac{1}{2}t_{w,i} - 14\epsilon t_i - \sqrt{2}a \leq 0 & \text{poikkileikkausluokassa 3.} \end{cases} \quad (4.18)$$

Neliöputkiprofiililla sekä laipat että uumat ovat kahdelta reunalta tuettuja puristettuja taso-

osia, jolloin rajoitusehto kirjoitetaan

$$g_i^{CL,SHS}(\mathbf{x}) = h_i - 3t_{f,i} - 38\epsilon t_i \leq 0 \text{ poikkileikkausluokassa 2.} \quad (4.19)$$

Hitsatun I-profiilin poikkileikkauksen korkeudelle on asetettu minimikorkeusehto

$$-h + 2t_f + 50 \text{ mm} \geq 0, \quad (4.20)$$

sillä poikkileikkauksen korkeus ei voi mennä negatiiviseksi ja se ei voi olla pienempi kuin laippojen paksuus. Shear lag -ilmiön tarkempi huomiointi hitsatulla I-pilarilla vältetään muodostamalla rajoitusehto

$$g_i^{SL}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}b_i - \frac{1}{2}t_{w,i} - \frac{L}{50} - \sqrt{2}a \leq 0, \quad (4.21)$$

missä  $L$  on momentin nollakohtien välisen etäisyyden arvo.

### 4.3.2 Stabiilisuusehdot

Nurjahdus tarkastetaan kaikille puristuksen alaisille rakenneosille heikommassa ja vahvemmassa suunnassa. Normaalivoiman negatiivinen arvo on puristusta, joten nurjahduksen rajoitusehto on aktiivisena ainoastaan niillä sauvoilla, joilla on negatiivista normaali-voimaa. Nurjahduksen rajoitusehto esitetään kaavasta (2.24) johtaen

$$g_i^B(\mathbf{x}) = \begin{cases} -N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - N_{b,Rd,y,i}(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ kehän tasossa} \\ -N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - N_{b,Rd,z,i}(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ kehän tasosta poispäin.} \end{cases} \quad (4.22)$$

Rajoitusehto yhdistetylle puristukselle ja taivutukselle saadaan vastaavasti

$$g_i^C(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\frac{N_{Ed,i}(\mathbf{x})}{N_{b,Rd,y,i}(\mathbf{x})} + k_{yy}(\mathbf{x}) \frac{|M_{Ed,i}(\mathbf{x})|}{M_{Rd,i}(\mathbf{x})} - 1 \leq 0 \text{ kehän tasossa} \\ -\frac{N_{Ed,i}(\mathbf{x})}{N_{b,Rd,z,i}(\mathbf{x})} + k_{zy}(\mathbf{x}) \frac{|M_{Ed,i}(\mathbf{x})|}{M_{Rd,i}(\mathbf{x})} - 1 \leq 0 \text{ kehän tasosta poispäin.} \end{cases} \quad (4.23)$$

Kiepahduksen rajoitusehto saadaan kaavasta (2.32) johtaen

$$g_i^{LT}(\mathbf{x}) = M_{Ed,i}(\mathbf{x}) - M_{b,Rd,i}(\mathbf{x}) \leq 0. \quad (4.24)$$

Kiepahduksen rajoitusehto on aktiivisena I-pilareilla. Ristikossa on neliöputkiprofiileja, joilla ei ole kiepahdusvaaraa.

### 4.3.3 Hitsattujen liitosten ehdot

Taulukosta 2.1 saadaan hitsattujen liitosten geometrialle rajoitusehtoja K- ja Y-liitoksille erikseen ja yhteisesti. Kuten aiemminkin, alaindeksi 0 viittaa paarteeseen ja alaindeksi  $i$  viittaa uumasauvoihin ( $i \in [1, 2]$ ). Lineaarinen ehto sekä K- että Y-liitokselle johdetaan muotoon

$$g_i^{G1}(\mathbf{x}) = h_i - 35t_i \leq 0, \quad (4.25)$$

missä  $i$  on kattoristikon sauva. K-liitoksilla uumasauvan ja paarteen poikkileikkauksien korkeuksien suhteesta saadaan rajoitusehdoksi

$$g_i^{G2}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0.35h_{tc} - h_{bi} \leq 0 \\ 0.35h_{bc} - h_{bi} \leq 0, \end{cases} \quad (4.26)$$

missä  $h_{bi}$  on uumasauvan  $i$  sivun leveys. Y-liitoksella vastaava ehto on

$$g_i^{G3}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0.25h_{tc} - h_{bi} \leq 0 \\ 0.25h_{bc} - h_{bi} \leq 0. \end{cases} \quad (4.27)$$

Lisäksi K-liitoksessa vapaavälille johdetaan kaavasta (2.5) rajoitusehto

$$g_j^{Gap}(\mathbf{x}) = \begin{cases} t_1 + t_2 - g \leq 0 \\ 0.5h_0(1 - \beta) - g \leq 0 \\ g - 1.5h_0(1 - \beta) \leq 0. \end{cases} \quad (4.28)$$

Liitoksien kestävyyksien rajoitusehdot perustuvat liitosten murtumismuotoihin taulukosta 2.3. Kestävyys tarkistetaan jokaisessa K-liitoksessa molemmille uumasauvoille ja Y-liitoksessa yhdelle uumasauvalle. Paarteen leikkausmurtumiselle K-liitoksessa on rajoitusehto

$$g_j^{CSF}(\mathbf{x}) = \begin{cases} N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - \frac{f_{y0}A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \leq 0 & \text{vedetyssä K-liitoksessa,} \\ -N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - \frac{f_{y0}A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \leq 0 & \text{puristetussa K-liitoksessa.} \end{cases} \quad (4.29)$$

Paarteen normaalivoimakestävyydelle K-liitoksen uumasauvojen vapaavälissä on kaavasta (2.40) johdettu rajoitusehto

$$g_j^N(\mathbf{x}) = \begin{cases} N_{Ed,0}(\mathbf{x}) - N_{Rd,0}(\mathbf{x}) \leq 0 & \text{vedetyssä K-liitoksessa,} \\ -N_{Ed,0}(\mathbf{x}) - N_{Rd,0}(\mathbf{x}) \leq 0 & \text{puristetussa K-liitoksessa.} \end{cases} \quad (4.30)$$

Paarteen pinnan puristumurrolle on rajoitusehto

$$g_j^{CF}(\mathbf{x}) = \begin{cases} N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - \frac{8.9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma} \beta}{\sin \theta_i \gamma_{M5}} \leq 0 \\ \text{vedetyssä K-liitoksessa,} \\ -N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - \frac{8.9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma} \beta}{\sin \theta_i \gamma_{M5}} \leq 0 \\ \text{puristetussa K-liitoksessa,} \\ N_{Ed,1}(\mathbf{x}) - \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta_1) \sin \theta_1} \left( \frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta_1} \right) \leq 0 \\ \text{vedetyssä Y-liitoksessa,} \\ -N_{Ed,1}(\mathbf{x}) - \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta_1) \sin \theta_1} \left( \frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta_1} \right) \leq 0 \\ \text{puristetussa Y-liitoksessa.} \end{cases} \quad (4.31)$$

Uumasauvan murtumiselle on rajoitusehto

$$g_j^{BF}(\mathbf{x}) = \begin{cases} N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - \frac{f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff})}{\gamma_{M5}} \leq 0 \\ \text{K-liitoksen vedetyssä uumasauvassa,} \\ -N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - \frac{f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff})}{\gamma_{M5}} \leq 0 \\ \text{K-liitoksen puristetussa uumasauvassa,} \\ N_{Ed,1}(\mathbf{x}) - \frac{f_{y1} t_1 (2h_1 - 4t_1 + b_{eff})}{\gamma_{M5}} \leq 0 \\ \text{Y-liitoksen vedetyssä uumasauvassa,} \\ -N_{Ed,1}(\mathbf{x}) - \frac{f_{y1} t_1 (2h_1 - 4t_1 + b_{eff})}{\gamma_{M5}} \leq 0 \\ \text{Y-liitoksen puristetussa uumasauvassa.} \end{cases} \quad (4.32)$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautumiselle on rajoitusehto

$$g_j^{PS}(\mathbf{x}) = \left\{ \begin{array}{l} N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - \frac{f_{y0}t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left( \frac{2h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) \leq 0 \\ \text{vedetyssä K-liitoksessa,} \\ -N_{Ed,i}(\mathbf{x}) - \frac{f_{y0}t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left( \frac{2h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) \leq 0 \\ \text{puristetussa K-liitoksessa,} \\ N_{Ed,1}(\mathbf{x}) - \frac{f_{y0}t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 2b_{e,p} \right) \leq 0 \\ \text{vedetyssä Y-liitoksessa,} \\ -N_{Ed,1}(\mathbf{x}) - \frac{f_{y0}t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 2b_{e,p} \right) \leq 0 \\ \text{puristetussa Y-liitoksessa.} \end{array} \right. \quad (4.33)$$

Paarteen sivun murtumiselle Y-liitoksessa on rajoitusehto

$$g_j^{CS}(\mathbf{x}) = \left\{ \begin{array}{l} N_{Ed,1}(\mathbf{x}) - \frac{f_b t_0}{\sin \theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right) \leq 0 \\ \text{vedetyssä Y-liitoksessa,} \\ -N_{Ed,1}(\mathbf{x}) - \frac{f_b t_0}{\sin \theta_1} \left( \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right) \leq 0 \\ \text{puristetussa Y-liitoksessa.} \end{array} \right. \quad (4.34)$$

Liitoskestävyyksien rajoitusehdot voidaan koota yhdeksi rajoitusehdoksi

$$g_j^J(\mathbf{x}) = \{g_j^{CF}(\mathbf{x}) g_j^{CSF}(\mathbf{x}) g_j^N(\mathbf{x}) g_j^{BF}(\mathbf{x}) g_j^{PS}(\mathbf{x}) g_j^{CS}(\mathbf{x})\}. \quad (4.35)$$

## 4.4 Optimointitehtävän formulointi

Optimointitehtävä asetetaan yksittäiselle pilarille kaavan (3.1) mukaisesti

$$\begin{aligned}
 & \min f(\mathbf{x}_p) \\
 & \text{siten että} \\
 & g_i^N(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1 \\
 & g_i^M(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1 \\
 & g_i^V(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1 \\
 & g_i^{CL,w}(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1 \\
 & g_i^{CL,f}(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1 \\
 & g_i^{SL}(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1 \\
 & g_i^B(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1 \\
 & g_i^C(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1 \\
 & g_i^{LT}(\mathbf{x}_p) \leq 0 \quad i = 1
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

missä  $f(\mathbf{x}_p)$  on massan kohdefunktio. Kohdefunktiossa vektori  $\mathbf{x}_p$  sisältää kaikki suunnittelumuuttujat  $n_{var}$ . Yksittäisen pilarin suunnittelumuuttujien lukumäärä  $n_{var}$  on 4.

Optimointitehtävä asetetaan yksittäiselle kehälle kaavan (3.1) mukaisesti

$$\begin{aligned}
 & \min f(\mathbf{x}) \\
 & \text{siten että} \\
 & g_i^N(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_E \\
 & g_i^M(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_E \\
 & g_i^V(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_E \\
 & g_i^{CL,w}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_{E,c} \\
 & g_i^{CL,f}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_{E,c} \\
 & g_i^{CL,SHS}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_{E,t} \\
 & g_i^{SL}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_{E,c} \\
 & g_i^B(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_E \\
 & g_i^C(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_E \\
 & g_i^{LT}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_{E,c} \\
 & g_j^{G1}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_{E,t} \\
 & g_j^{G2}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_{E,B,K} \\
 & g_j^{G3}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_{E,B,Y} \\
 & g_j^{Gap}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_{J,K} \\
 & g_j^J(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_J,
 \end{aligned} \tag{4.37}$$



missä  $f(\mathbf{x})$  on massan kohdefunktio. Kohdefunktiossa vektori  $\mathbf{x}$  sisältää pilarin ( $\mathbf{x}_p$ ) ja ristikon ( $\mathbf{x}_r$ ) suunnittelumuuttujavektorit, joista saadaan suunnittelumuuttujien määrä  $n_{var}$ . Tässä työssä kehän suunnittelumuuttujien lukumäärä  $n_{var}$  on jatkuvilla ja diskreeteillä muuttujilla 10 ja indeksimuuttujilla 7.  $n_E$  on koko kehän sauvojen kokonaismäärä,  $n_{E,c}$  on pilareiden lukumäärä,  $n_{E,t}$  on ristikon sauvojen lukumäärä (uumasauvat ja paarteet),  $n_{E,B,K}$  on K-liitoksisten ja  $n_{E,B,Y}$  Y-liitoksisten uumasauvojen lukumäärä,  $n_{J,K}$  on K-liitosten lukumäärä ja  $n_J$  on kaikkien ristikon liitosten lukumäärä.

## 5 OPTIMOINTIMENETELMÄT

Tässä työssä ristikon profiilit sekä pilarin uuman ja laippojen paksuus valitaan olemassa olevasta valikoimasta. Pilarin poikkileikkauksen leveys ja korkeus vaihtelevat tietyin askelepituuksin. Näin ollen optimointitehtävään tulee diskreettejä muuttujia. Lisäksi, kun rajoitusehdot muodostetaan eurokoodien pohjalta, optimointiongelman huomataan olevan diskreetti, epälineaarinen ja epäkonvekksi. Edellä mainitut seikat rajoittavat käytettävissä olevien ratkaisumenetelmien joukkoa.

Jatkuvien muuttujien ja funktioiden käsittely voidaan suorittaa hyödyntäen klassisia matemaattisia menetelmiä, kuten derivointia, mikä ei onnistu epäjatkuvien funktioiden käsittelyssä. Menetelmät, jotka käyttävät kohdefunktion ja rajoitusehtojen funktioiden derivointia, saattavat tämän työn tapaisissa optimointiongelmissa kuitenkin johtaa lokaaliin minimiratkaisuun.

Globaalin optimoinnin menetelmät voidaan karkeasti jakaa deterministisiin ja metaheuristisiin eli stokastisiin menetelmiin. Deterministiset menetelmät perustuvat matematiikkaan, kuten gradienttimenetelmiin, kun taas metaheuristiset menetelmät perustuvat satunnaisuuteen. Determinististä menetelmää voidaan käyttää metaheuristisen menetelmän osana.

Diskreetin, epälineaarisen ja epäkonveksin tehtävän ratkaisemiseen kehitetyt menetelmät ovat useimmiten metaheuristisia, joissa käytetään esimerkiksi geneettisiä algoritmeja tai parveilualgoritmeja. Metaheuristisessa menetelmässä riittää, että kohdefunktio voidaan laskea numeerisesti eli evaluoida, eikä varsinaista lauseketta tai funktioiden derivaattoja tarvitse aina edes tuntea [19].

Metaheuristisilla menetelmillä pyritään parantamaan ratkaisua yleensä heuristisella etsimisellä, eli luonnonilmiötä jäljittelevää heuristista sääntöä soveltamalla. Heuristiikka sisältää satunnaisen komponentin tutkitun alueen laajentamiseksi, jotta tutkittava alue tulee käytyä läpi mahdollisimman kattavasti. Metaheuristinen menetelmä valitaan optimointitehtävän matemaattisten ominaisuuksien perusteella; yhteen tehtävään sopiva metaheuristinen menetelmä ei välttämättä ole soveltuva toiseen. Metaheuristisillakaan menetelmillä ei kuitenkaan voida taata globaalin optimin löytämistä [20].

## 5.1 Kaksoissymmetrisen hitsatun I-pilarin ja teräspuistikkekehän optimointimenetelmät

Tässä työssä optimoidaan ensin pelkkää kaksoissymmetristä hitsattua I-pilaria. Optimointitehtävässä on tällöin mukana vain pilarin muuttujat ja rajoitusehdot. I-pilarin optimointi tehdään ensin jatkuvilla muuttujilla, jolloin tehtävän ratkaisemiseksi voidaan käyttää esimerkiksi gradienttipohjaista menetelmää. Tässä työssä hitsatun I-pilarin optimointia jatkuvilla muuttujilla on tehty *trust region*-algoritmeilla. Jatkuvien muuttujien ratkaisut eivät kuitenkaan ole vielä käytännössä toteuttamiskelpoisia, sillä tehtävän ratkaisuna saatavat poikkileikkausmitat ovat liian tarkkoja konepajoille. Jatkuvan muuttujan tehtävän ratkaisu toimii alarajana diskreetin muuttujan tehtävän ratkaisulle. Diskreetin muuttujan tehtävän ratkaisemisella ei päästä parempaan tulokseen kuin jatkuvan muuttujan tehtävän ratkaisu, ellei jatkuvan muuttujan tehtävässä ole jouduttu lokaaliin optimiin. Taulukossa 5.1 on esitetty pilarin ja kehän optimoinnin vaiheet sekä käytettävät algoritmit ja muuttujat. Käytettäviä algoritmeja käsitellään myöhemmin tarkemmin kappaleessa 5.3.

Pilarin optimointi tehdään myös suoraan diskreeteillä muuttujilla, jolloin käytetään SSAB:n valikoiman levyjen paksuuksia ja poikkileikkauksen leveys ja korkeus valitaan tietyltä väliltä tasaisin askelpituuksin. Pilaria on optimoitu diskreeteillä muuttujilla *branch-and-bound*-algoritmillalla (B&B), jossa alarajan ratkaisemisessa käytetään *trust region*-algoritmia. B&B-algoritmillalla on saatu diskreettejä, valikoiman mukaisia, ratkaisuja pilarin poikkileikkausmitoille. Jatkuvilla muuttujilla saatuja ratkaisuja vertaillaan diskreeteillä muuttujilla saatuihin ratkaisuihin.

Portaalikehän optimointia on tehty kaksivaihetekniikalla, sillä koko kehän optimointitehtävä on huomattavasti suurempi ja monimutkaisempi tehtävä kuin pelkän pilarin optimointitehtävä. Kaksivaihetekniikan ensimmäisessä vaiheessa ratkaistaan MISLP-algoritmillalla (*engl. Mixed Integer Sequential Linear Programming*) linearisoitu diskreetti tehtävä. MISLP-algoritmillalla on haettu suuresta ratkaisuavaruudesta lähellä optimia oleva käypä tai epäkäypä diskreetti ratkaisu, joka on lähtökohtana toiseen vaiheeseen. Kaksivaihetekniikan toisessa vaiheessa käytetään VNS-algoritmia (*engl. Variable Neighbourhood Search*), joka käyttää metaheuristisiin menetelmiin kuuluvaa geneettistä algoritmia (GA).

**Taulukko 5.1.** Kaksoissymmetrisen hitsatun pilarin ja portaalikehän optimoinnin vaiheet sekä käytettävät algoritmit ja muuttujat. Suluissa on esitetty mahdollisissa osatehtävissä käytettävä algoritmi.

Optimoitava rakenne	Vaihe	Algoritmi	Muuttujat
Pilari	1.	B&B ( <i>trust region</i> )	pilarin diskreetit muuttujat $x_p$
Kehä	1.	MISLP	indeksimuuttujat $x$
	2.	VNS (GA)	binäärimuuttujat $x$
	3.	MISLP	jatkuvat muuttujat $g$

Diskreetit muuttajat ovat ensimmäisessä vaiheessa binäärimuuttujia MISLP-algoritmia varten, joten ensimmäisestä vaiheesta saatava ratkaisu on diskreetti. Ensimmäisen vaiheen MISLP-algoritmillä saatu ratkaisu ei välttämättä ole vielä alkuperäisen tehtävän käypä ratkaisu. Toista vaihetta varten ensimmäisen vaiheen diskreetin tehtävän ratkaisu formuloidaan indeksimuuttujiksi. Binääri- ja indeksimuuttujia käytetään, sillä niillä voidaan käsitellä suoraan levy- ja profiilivalikoimien arvoja. Toinen vaihe suoritetaan VNS-algoritmillä, joka käyttää geneettistä algoritmia paikallisessa haussa. Toisessa vaiheessa pyritään löytämään optimiratkaisu tehtävälle. Hakuavaruus on toisessa vaiheessa suppeampi kuin ensimmäisessä vaiheessa. VNS laajentaa hakuympäristöä tarvittaessa, kuten myöhemmin kappaleessa 5.3 VNS-algoritmista todetaan.

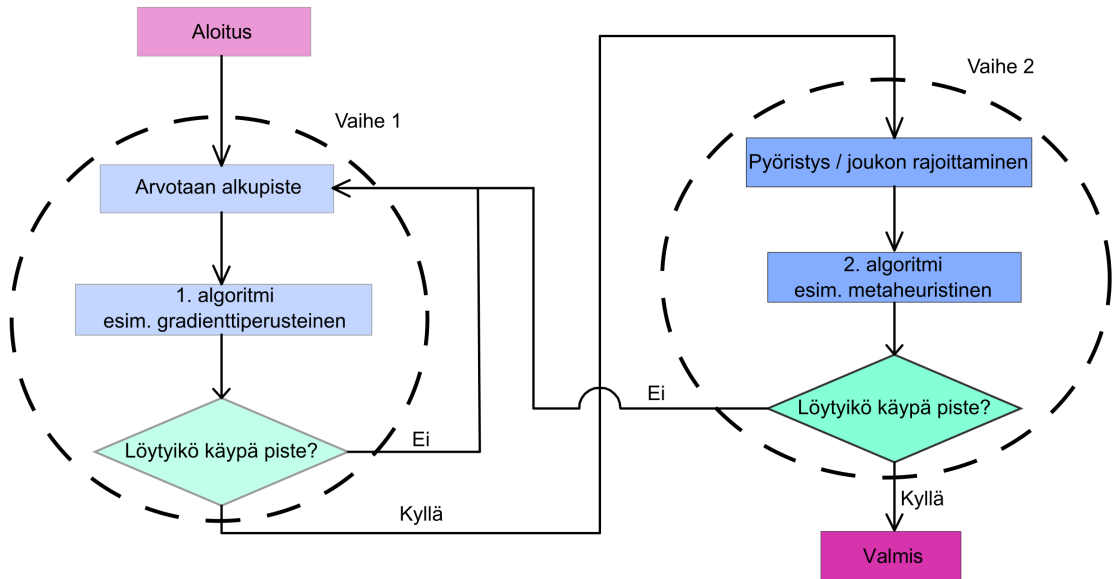
Tässä työssä liitosten geometriaehdot ovat aiheuttaneet hankaluuksia, kun on yritetty saada eurokoodin geometriaehtojen mukainen optimitulos. Liitosten geometriaehtojen optimointia on tehty ratkaisemalla sama toisen vaiheen tehtävä uudelleen, mutta rajoitusehtoina ovat ainoastaan liitosten geometriaehdot. Algoritmina käytetään MISLP:tä. Liitosten vapaavälit  $g$  ovat tehtävässä jatkuvina muuttujina, eikä muita muuttujia ole. Tällöin tehtävä on jatkuvan muuttujan tehtävä, jolloin MISLP-algoritmi palautuu SLP-algoritmiksi (*engl. Sequential Linear Programming*). Jos liitosten geometriaehdot optimoidaan näin, ehdot eivät ole olleet mukana ensimmäisen ja toisen vaiheen tehtävissä.

## 5.2 Kaksivaihetekniikka

Tämän työn optimointitehtävää voitaisiin lähteä optimoimaan suoraan täydellä suunnitteluavaruudella diskreeteillä muuttujilla, joille annettaisiin ylä- ja alarajat. Tällaisessa optimointimenetelmässä voitaisiin käyttää edellä mainittuja metaheuristisia menetelmiä, mutta optimointi saattaisi kestää kauan, eikä tulos olisi välttämättä optimi. Suoraan täyden suunnitteluavaruuden käyttämisen sijaan voidaan käyttää kaksivaiheista menettelyä, jossa ensin relaksoidaan tehtävä jatkuvaksi ja ratkaistaan jatkuva ongelma. Kuvassa 5.1 on kaaviokuva kaksivaiheisesta menettelyprosessista. Kaksivaihetekniikassa tehtävän formulointi voi muuttua vaiheesta toiseen siirryttäessä, millä voi olla vaikutusta muuttujan tyyppiin määrittelyssä ja käsittelyssä.

Jatkuvan muuttujan tehtävän ratkaisemiseen löytyy kirjallisuudesta useita menetelmiä. Kaksivaihetekniikassa ratkaistaan ensin jatkuva tehtävä, jonka jälkeen tarkastellaan jatkuvan tehtävän ratkaisun tuloksena saatavaa alkuperäisestä suunnitteluavaruudesta kavennettua diskreettiä ympäristöä. Jokaiselle alkuperäisen tehtävän suunnittelumuuttujalle valitaan jatkuvan tehtävän ratkaisun läheltä eli naapurustosta  $n$  arvoa, joilla etsitään parasta kohdefunktion arvoa antavaa yhdistelmää. [20]

Toiseen vaiheeseen valittavat arvot ovat SSAB:n profiili- ja levyvalikoiman sekä tehtävän formuloinnissa päätettyjen levyjen leveyksien ja korkeuksien mukaisia arvoja. Toisessa vaiheessa alkuperäistä suunnitteluavaruutta on näin ollen kavennettu, sillä kaikki ylä- ja alarajojen väliset arvot eivät ole enää valittavissa. Koska kyseessä on epälineaarinen



**Kuva 5.1.** Kaaviokuva kaksivaiheisesta menetelmästä.

diskreetti tehtävä, ratkaisumenetelmä rajautuu toisessa vaiheessa käytännössä metaheuristisen menetelmän käyttöön. Käyttämällä optimoinnissa edellä kuvailtua kaksivaiheista tekniikkaa kohdefunktion arvot ovat samaa luokkaa kuin suoran metaheuristisen algoritmin soveltamisessa, mutta laskenta-aika on merkittävästi vähäisempi. [20]

On huomioitava, että tämän työn optimointiongelma on epäkonvekksi. Lokaaliin optimiin päätymistä pyritään ehkäisemään ratkaisemalla tehtävä useilla alkupisteillä. Käytettävän optimointialgoritmin on oltava sellainen, joka sallii alkupisteen epäkäyppyyden, jotta voidaan käyttää arvottua aloituspistettä. Sakkofunktioita, jotka sakottavat käyvän joukon  $S$  ulkopuolelle mentäessä, voidaan käyttää apuna tehtävän ratkaisemisessa. Sakkofunktiota käytettäessä voidaan ratkaista kaavasta (3.1) johtaen tehtävä

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} f(\mathbf{x}) + \mu P(\mathbf{x}), \text{ missä} \quad (5.1)$$

$\mu > 0$  on vakio,

$P : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  on jatkuva ja ei-negatiivinen,

$P(\mathbf{x}) = 0 \iff \mathbf{x} \in S$ .

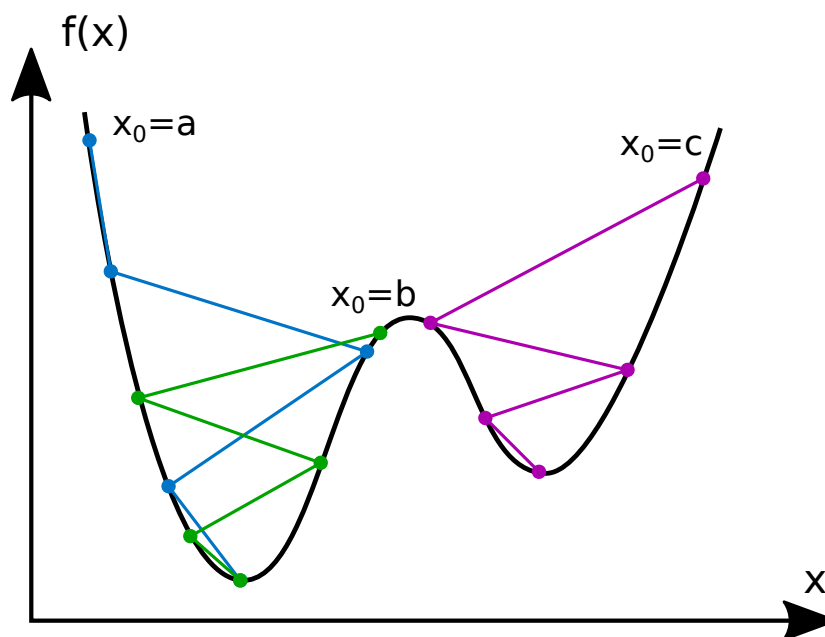
Tehtävässä (5.1)  $\mu P(\mathbf{x})$  on sakkofunktio ja  $S$  on tehtävän käypä joukko. Kun sakkokerroin  $\mu \rightarrow \infty$ , ongelman optimiratkaisu lähestyy ongelman (3.1) optimiratkaisua. Sakkofunktiosta voi olla apua sellaisessa tilanteessa, jossa suunnittelumuuttujat eivät ole rajoitusehtojen määrittämällä käyvällä alueella. Tällaisessa tilanteessa sakkofunktion arvo lisätään kohdefunktion arvoon. Sakkofunktion arvon on oltava riittävän suuri, jotta vältetään tilanne, jossa sakkofunktio on mukana optimointialgoritmin ratkaisussa. Esimerkiksi minimointitehtävässä sakkofunktion arvon on oltava riittävän suuri, jotta kohdefunktion ja sakkofunktion yhteenlaskettu arvo ei ole pienempi kuin rajoitusehtojen mukainen optimitulos.

### 5.3 Käytettävät optimointialgoritmit

Jatkuvien muuttujien tehtävien ratkaisuun sopiva menetelmä on *trust region*-, eli luottamusaluealgoritmi, joka on iteratiivinen optimointialgoritmi. Sen toiminta perustuu siihen, että jonkin luottamusalueen sisällä kohdefunktiolle tehdään kvadraattinen approksimaatio, ja tätä funktiota kutsutaan mallifunktioksi. Luottamusalue on sellainen alue, jonka sisällä mallifunktion toimintaan luotetaan. Mallifunktion minimointia luottamusalueella kutsutaan algoritmin osaongelmaksi, jonka ratkaisu on laskennallisesti ja suorituskyvyllisesti luottamusaluealgoritmin toiminnan vaativin osa.

Luottamusaluealgoritmeissa rajataan tietyn kokoinen alue senhetkisen iteraatiopisteen ympärille ja minimoidaan mallifunktio tämän alueen sisällä. Luottamusalueelta saadun minimiarvon perusteella arvioidaan mallin osuvuutta kohdefunktion ja valitaan seuraavan iteraation aloituspiste sekä luottamusalueen koko. Luottamusmenetelmissä valitaan ensin askelkoko ja sitten askelsuunta. Saatu ratkaisu hyväksytään uudeksi iteraatioaskeleeksi, jos se tuottaa riittävästi vähenemää funktiossa. [21, luku 1] Iterointia yleisesti on havainnollistettu kuvassa 5.2, jossa eri aloituspisteillä päädytään eri optimiratkaisuihin.

Jatkuvien muuttujien tehtävän ratkaisussa voidaan käyttää matemaattisena optimointialgoritmina peräkkäisten lineaaristen approksimaatioiden menetelmää (*engl. Sequential Linear Programming, SLP*). SLP on iteratiivinen menetelmä, jolla epälineaarille optimointitehtäville etsitään lokaaleja minimiarvoja. Menetelmässä ratkaistaan useita peräkkäisiä lineaarisia optimointitehtäviä (*engl. Linear Programming, LP*). Jos linearisoinnilla päädytään epäkäypään ratkaisuun tai aloituspiste on epäkäypä, voidaan kappaleessa



**Kuva 5.2.** Funktion  $f(x)$  minimointi. Funktiota iteroitu kolmella eri aloituspisteellä:  $a$ ,  $b$  ja  $c$ . Aloituspisteitä on useita, jotta ehkäistään lokaaliin optimiin päätymistä, kuten aloituspisteellä  $c$  on tapahtunut.

5.2 esitellyn sakkofunktion avulla saada algoritmi kuitenkin ratkaisemaan tehtävä. SLP-algoritmin vaiheet ovat:

1. Asetetaan kierroslaskuri nolnaan, valitaan lineaaristen rajoitusehtojen suhteen käypä aloituspiste ja valitaan askeleensäätöparametrit sekä ylä- ja alaraja askelpituuksille.
2. Ratkaistaan lineaarinen optimointitehtävä, jonka ratkaisuna saadaan hakusuunta, joka sisältää tässä algoritmissa myös askelpituuden.
3. Tarkistetaan toteutuvatko valittujen parametrien ja rajojen mukaiset lopetusehdot, joita ovat suunnittelumuuttujien arvojen suhteellinen muutos, kohdefunktion peräkkäisten arvojen muutos ja hakusuunnan meneminen nollassi. Jos kaikki lopetusehdot toteutuvat, optimointi lopetetaan, sillä ollaan optimipisteessä. Muutoin jatketaan seuraavaan vaiheeseen.
4. Korjataan pistettä hakusuunnan mukaisesti ja lisätään kierroslaskuriin kierros. Siirytään kohtaan 2.

Seka- ja kokonaislukuinen peräkkäisten lineaaristen approksimaatioiden (*engl. Mixed Integer Sequential Linear Programming, MISLP*) menetelmässä ratkaistaan jono sekalukutehtäviä. Tehtävissä voi olla sekä reaali- että kokonaislukumuuttujia ja osa muuttujista voi olla binäärimuuttujia. Menetelmän periaate on sama kuin aiemmin esitetyllä SLP-algoritilla, mutta tässä osalla tai kaikilla muuttujilla on kokonaislukurajoituksia. Tehtäville voi antaa myös diskreettejä muuttujia. Pelkästään jatkuvista muuttujista koostuvat tehtävät palautuvat SLP-menetelmällä ratkaistaviksi. Kokonaislukutehtävän äärimuoto on binääritehtävä, jossa binäärimuuttuja voi saada vain arvon 0 tai 1, jolloin valitaan kahdesta päätösvaihtoehdosta toinen. [22] Binäärimuuttuja on esitelty tarkemmin luvussa 4.1.

Yleisesti käytetty kokonaislukuoptimoinnin (*engl. Integer Linear Programming, ILP*) ratkaisumenetelmä on *branch-and-bound* -algoritmi (B&B). Menetelmän perusajatuksena on ratkaistavan ongelman jakaminen osaongelmiin, joista suljetaan pois löydettyä ratkaisua huonompia joukkoja sisältäviä vaihtoehtoja. B&B on tunnetuin luettelointimenetelmä ja käytetyin kokonais- ja sekalukutehtävien ratkaisualgoritmi. Luettelointimenetelmissä generoidaan kokonais- tai sekalukutehtävän kaikki mahdolliset ratkaisuvaihtoedot. Menetelmässä algoritmit koostuvat kirjanpitorutiinista ja eliminointialgoitmista, jolla pyritään osoittamaan, että tietyillä kokonaislukuarvoilla ei voida tuottaa enää nykyistä parempaa ratkaisua. B&B-menetelmässä työläin vaihe on jokaisessa haarautumisessa ratkaistava LP-tehtävä. Menetelmä on suhteellisen tehokas, jos kohdefunktion arvolle voidaan laskea hyviä ylä- ja alarajoja. Mahdollisimman hyvä alkuarvaus auttaa hyvän ratkaisun saavuttamisessa. [23, s. 95-96]

B&B on maksimointitehtävä, jonka alaraja on aluksi  $-\infty$ . Alaraja ratkaistaan esimerkiksi SLP- tai *trust region* -algoritmeilla. B&B-algoritmin vaiheet ovat [24, s. 370-379]:

1. Muodostetaan ILP-tehtävästä LP-tehtävä poistamalla kokonaislukurajoitukset.
2. Ratkaistaan tutkittava LP-tehtävä.

- Jos ratkaisu on kokonaislukuvektori, on kaksi vaihtoehtoa:
    - (a) Alaraja korvataan kohdefunktion arvolla, jos ratkaisu on parempi kuin voimassa oleva alaraja.
    - (b) Alaraja säilytetään, jos ratkaisu on huonompi kuin voimassa oleva alaraja.
  - Jos alitehtäviä on tutkimatta, niistä valitaan tutkittavaksi yksi ja siirrytään kohtaan 2. Kun kaikki alitehtävät on tutkittu, voimassa olevaa alarajaa vastaava piste on ILP-tehtävän optimiratkaisu ja algoritmi päättyy.
  - Jos ratkaisu ei toteuta kokonaislukurajoituksia, on kaksi vaihtoehtoa:
    - (a) Siirrytään kohtaan 3, jos ratkaisu on parempi kuin voimassa oleva alaraja.
    - (b) Valitaan uusi tutkimaton alitehtävä ja siirrytään kohtaan 2, jos ratkaisu on huonompi kuin voimassa oleva alaraja. Voimassa olevaa alarajaa vastaava piste on ILP-tehtävän optimiratkaisu ja algoritmi päättyy, jos kaikki alitehtävät on tutkittu.
3. Valitaan yksi muuttuja  $x_i$ , jonka arvo ei ole kokonaisluku tutkittavan LP-tehtävän optimiratkaisussa. LP-tehtävästä muodostetaan kaksi alitehtävää lisäämällä muuttujaa koskevat rajoitukset

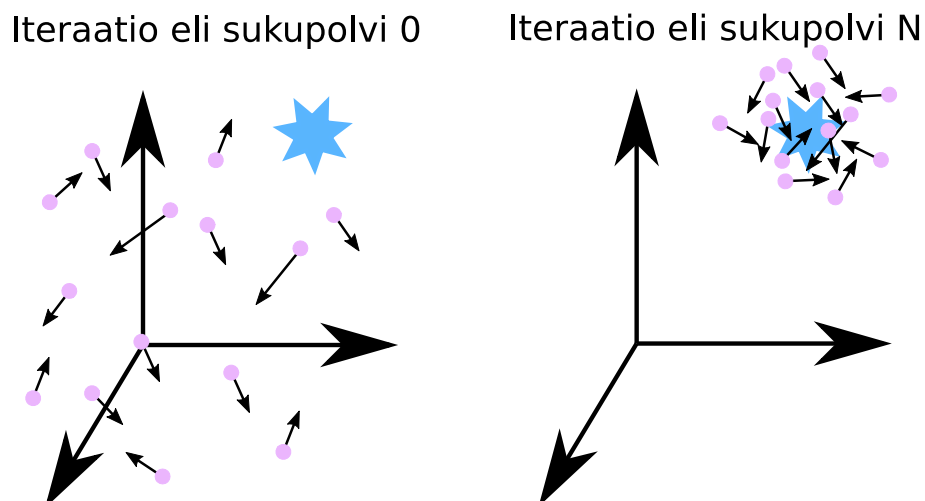
$$x_i \leq a \text{ ja } x_i \geq a + 1,$$

missä  $a \in \mathbb{Z}$  ja muuttujan  $x_i$  arvolle LP-tehtävän optimissa  $x_i^*$  pätee ehto  $a < x_i^* < a + 1$ . Toinen alitehtävistä valitaan tutkittavaksi ja siirrytään kohtaan 2.

Monympäristöhaku (*engl. Variable Neighbourhood Search, VNS*) on yksinkertainen metaheuristinen algoritmi, jossa hakuprosessin aikana systemaattisesti vaihdetaan hakuympäristön kokoa ja tyyppiä, jotta ei päädyttäisi lokaaliin optimiin [25]. Algoritmin hakuavuuden ratkaisuille määritetään yhden ympäristön sijaan  $k$  ympäristöä  $(N_1, N_2, \dots, N_k)$ . Jokaisella moniympäristöhaun iteraatiolla haku etenee valitsemalla ensin sattumanvarainen ratkaisu  $s'$  ympäristöstä  $N_1$ . Tämän jälkeen ympäristöstä etsitään sattumanvaraisesti ratkaisusta  $s'$  alkaen paikallisella haulla paikallista minimiratkaisua  $s''$ . Jos löydetty ratkaisu on pienempi kuin nykyinen, valitaan  $s''$  nykyiseksi arvoksi ja aloitetaan uusi iteraatiokierros. Jos löydetty ratkaisu on suurempi tai yhtä suuri kuin nykyinen ratkaisu edetään ympäristöön  $N_2$  ja toistetaan edelliset vaiheet. Hakua jatketaan käymällä ympäristöjä järjestelmällisesti läpi, kunnes löytyy parempi ratkaisu tai kaikki ympäristöt on käyty läpi. Jos haku loppuu siihen, että kaikki ympäristöt on käyty läpi, algoritmin toiminta päättyy ja nykyinen ratkaisu on algoritmin ratkaisu. [26]

Monympäristöhaun ympäristöt on hyvä määritellä siten, että ne muodostavat kasvavan sarjan ympäristön koon suhteen. Tällä pyritään pitämään hakualue mahdollisimman pienenä, kun algoritmi laajentaa hakualueutta vain tarvittaessa, jos pienemmältä alueelta ei onnistuta löytämään parempaa ratkaisua kuin nykyinen. VNS-algoritmillä haetaan globaalia optimiratkaisua. VNS voi käyttää paikallisessa haussa esimerkiksi geneettistä algoritmia, kuten tässä työssä tehdään.





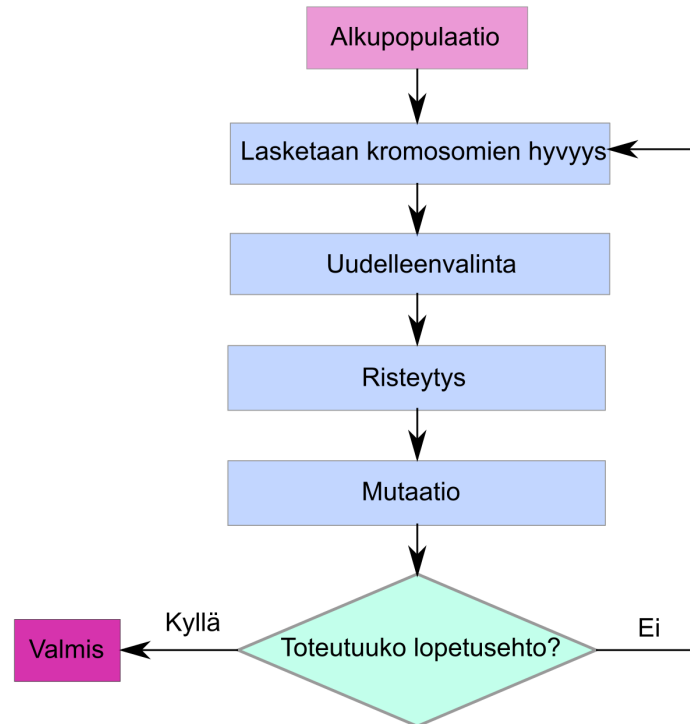
**Kuva 5.3.** Geneettisen algoritmin populaation kehittyminen ja liikkuminen kohti optimia.

Geneettiset algoritmit (*engl. Genetic Algorithm, GA*) ovat heuristisia optimointimenetelmiä, jotka imitoivat luonnon evoluutiomekanismeja. GA ei vaadi kohdefunktion jatkuvuutta. Tavoitteena on löytää globaali optimi, mutta tämä ei välttämättä ole mahdollista, jolloin voidaan päästä ainoastaan hyvään ratkaisuun. Geneettistä algoritmia ei kannata käyttää ainakaan ainoana menetelmänä tehtävään, joka ratkeaa tehokkaasti perinteisillä algoritmeilla. Yhden alkuarvauksen ja lopputuloksen sijaan geneettisessä algoritmossa ratkaisujen populaatio kehittyy ja liikkuu kohti optimia. Tätä on havainnollistettu kuvassa 5.3. Algoritmin tehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi sopivan alkupopulaatiokoon valinta ja ongelman formulointi. [23, s. 162-168] Suuri populaatiokoko tarkoittaa laajaa hakualuetta, mutta samalla laskenta-aika voi kasvaa suureksi.

Geneettisen algoritmin perusideana on *rakennuspalikkahypoteesi*: Hyviä ratkaisuja yhdistämällä on mahdollista löytää vielä parempia ratkaisuja. Ratkaisuavaruuden alkiot muutetaan geneettiseksi koodiksi esimerkiksi bittijonoksi, missä jokaista mahdollista ratkaisua vastaa tietty merkkijono. Merkkijonoja kutsutaan kromosomeiksi, kromosomien alkiota geeneiksi ja geenien mahdollisia arvoja alleeleiksi. Geneettisissä algoritmeissa populaation koko säilyy vakiona koko iteraation, eli sukupolven, ajan. Uusia sukupolvia muodostetaan niin pitkään, kunnes ratkaisu suppenee. [23, s. 162-168] Tyypillisesti geneettisen algoritmin vaiheet ovat:

1. Ratkaisuavaruuden kromosomeista muodostetaan sattumanvaraisesti alkupopulaatio.
2. Kromosomit arvioidaan hyvyysfunktion avulla.
3. Geneettisiä operaattoreita esimerkiksi *uudelleenvalintaa*, *risteytystä* ja *mutaatioita* soveltamalla muodostetaan uusi populaatio.
4. Vaiheita 2 ja 3 toistetaan, kunnes lopetusehto toteutuu.

Geneettisen algoritmin vaiheita on havainnollistettu myös kuvassa 5.4. Geneettisen algoritmin prosessi imitoi luonnonvalintaa, jossa huonot ominaisuudet katoavat ja hyvät siirtyvät seuraaville sukupolville. Elitistisellä valinnalla paras alkio säilyy seuraavalle su-



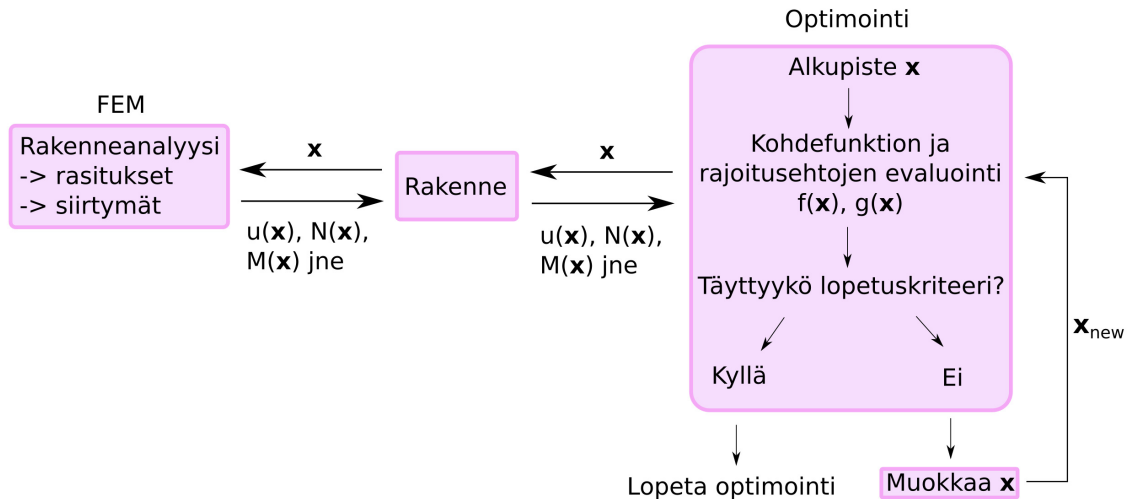
**Kuva 5.4.** Geneettisen algoritmin vaiheet.

kupolvelle. Uudelleenvalinnassa valitaan todennäköisemmin suuremman hyvyysfunktion arvon omaava kromosomi. Hyvyysfunktio kertoo kromosomin soveltuvuuden annettuun tehtävään ja se määritellään ongelmakohtaisesti. Risteytyksessä kahdesta kromosomista luodaan kaksi uutta kromosomia vaihtamalla osa geneeistä keskenään. Mutaatio luo algoritmille satunnaisuutta, sillä se valitsee kromosomista satunnaisesti geenin, jonka alleelin se vaihtaa toiseksi. [8]

Uudelleenvalinnassa ja risteytyksessä geenit periytyvät jollakin tavalla edellisestä populaatiosta, mikä voi johtaa helpommin lokaaliin optimiin, sillä alkupopulaatiossa ei välttämättä ole ollut kaikkia globaalin optimin genejä. Mutaatio ehkäisee lokaaliin optimiin päättymistä, sillä alleelin vaihto tässä operaatiossa on satunnaista. Mutaatiodennäköisyydeksi voidaan asettaa nolasta eroava luku, jolloin varmistetaan, että mutaatioita tapahtuu. Algoritmin lopetusehtona voi olla esimerkiksi iteraatiokierrosten päättyminen tai hyvyysfunktion kynnsarvo. Kynnsarvon ylittyessä iterointi lopetetaan. Voidaan tutkia myös iteraatiokierrosten määrää, joiden aikana paras ratkaisu ei ole merkittävästi parantunut ja tietyn määrän jälkeen iterointi lopetetaan.

## 5.4 Laskennan toteutus

Optimointi ja kehän elementtimallin rakentaminen tehdään Python 3.7 (64-bit) -versiolla. Ohjelmassa luodaan rakenne, jolle tehdään tarvittaessa rakenneanalyysi. Optimointialgoritmi etsii optimiratkaisua, jonka perusteella rakenteeseen tehdään tarvittavia muutoksia.



**Kuva 5.5.** Kaaviokuva ohjelman toimintalogiikasta.

Kuvassa 5.5 on esitetty ohjelman toimintaidea. Algoritmien toiminta pääpiirteittäin on esitetty aiemmin kappaleessa 5.3. Tässä työssä käytetyistä algoritmeista MISLP, VNS, GA ja B&B ovat Tampereen yliopiston Metall- ja kevytrakenteiden tutkimusryhmässä ohjelmoituja. MISLP:ssä käytetään Googlen OR-Tools-versiota 7.5.7466. GA:ssa käytetään NumPy-versiota 1.18.1 ja DEAP-versiota 1.3.1. B&B:ssä käytetään Gurobin Gurobipy-versiota 8.1.1. *Trust region* on avoimen lähdekoodin kirjasto SciPy:stä, josta on käytetty versiota 1.4.1.

Pilarin optimointitehtävän ratkaisemisessa on käytetty kappaleessa 5.3 esiteltyä B&B-algoritmia, jonka osatehtävissä käytetään samassa kappaleessa esiteltyä *trust region*-algoritmia. Kehän optimointitehtävän ratkaisemisessa käytettyjä algoritmeja ovat MISLP ja VNS, jonka osatehtävissä käytetään GA:ta. MISLP käyttää binäärimuuttujia, jotka esiintyvät vain lineaarisissa rajoitusehdoissa, jolloin epälineaarisuus tulee jatkuvien muuttujien kautta. Kuten kappaleessa 5.3 kerrottiin, MISLP ratkaisee useita peräkkäisiä linearisoituja tehtäviä. Linearisoitu kaavan (3.1) mukainen yhtälö voidaan esittää seuraavasti:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}^k) + \nabla f^T(\mathbf{x}^k)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^k) \quad (5.2)$$

siten, että  $g_i(\mathbf{x}^k) + \nabla g_i^T(\mathbf{x}^k)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^k) \leq 0$

$$h_j(\mathbf{x}^k) + \nabla h_j^T(\mathbf{x}^k)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^k) = 0$$

missä  $\underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x} \leq \bar{\mathbf{x}}$ ,

missä kierroksella  $k$  linearisointi tehdään pisteessä  $\mathbf{x}^k$  ja  $\mathbf{x}$ :n ylä- ja alarajat ovat tehtävän muuttujien ylä- ja alarajat. MISLP-algoritmin yhtenä lopetusehtona on, että jos tehtävän linearisointi on epäkäypä, optimointi lopetetaan ja paluuarvona on nollavektori. Jos linearisointi on aloituspisteessä epäkäypä, MISLP ei tee käytännössä mitään ja siirrytään suoraan toiseen vaiheeseen.

VNS:n alitehtävä on sama kuin alkuperäinen tehtävä, mutta muuttujien arvoja on rajattu ympäristön mukaan. VNS käyttää indeksimuuttujia, jolloin hakuympäristö on aluksi aloituspiste  $\pm 1$  indeksi. SSAB:n poikkileikkausluokkien 1 ja 2 SHS-profiilit on järjestetty listaan kasvavasti pinta-alan mukaan. Profiilit valitaan poikkileikkausluokista 1 ja 2, jotta suunnittelussa voidaan käyttää kappaleen 2.4 mukaista liitosmitoitusta.

Profiililistasta VNS ottaa ensimmäiseksi hakuympäristöksi aloituspisteen indeksiä yhden indeksin pienemmän ja suuremman profiilin. Paikallisessa haussa VNS käyttää geneettistä algoritmia. GA käyttää alkuperäistä tehtävän formulointia ja muuttujina käytetään indeksimuuttujia. Tässä tutkimuksessa populaatiokoko  $n_{pop} = 50$  ja mutaatiotodennäköisyys  $mut_{rate} = 0.15$ . Jos hakuympäristöstä löydetään parempi ratkaisu kuin aloituspiste, ratkaisusta tulee ikään kuin uusi aloituspiste, jolle taas tarvittaessa laajennetaan hakuympäristöä. Jos hakuympäristöstä ei löydy parempaa ratkaisua, hakuavaruutta kasvatetaan yhdellä indeksillä. Tässä työssä VNS-algoritmi loppuu ja sillä hetkellä oleva ratkaisu jää loppuratkaisuksi, jos kymmenennen hakuympäristön laajentamisen jälkeenkään ei ole löytynyt parempaa ratkaisua kuin aloituspiste.

## 6 LASKENTATAPAUKSIA

Portaalikehän ja pilarin optimointi suoritetaan käyttämällä tietokonetta, jossa on AMD Ryzen 5 1600 6-ytiminen prosessori 3.2 GHz kellotaajuudella ja 16 GB välimuistia. Kuormien yhdistely on tehty Eurokoodia [27] mukaillen. Yksittäisen hitsatun I-pilarin optimoinnissa lumi ja tuuli on molemmat otettu täytenä, eli yhdistelykertoimia ei ole käytetty. Näin ollen kuormitukset ovat varmalla puolella. Kehän kuormituksessa lumi on otettu huomioon täytenä ja tuulikuorman laskennassa on käytetty yhdistelykerrointa.

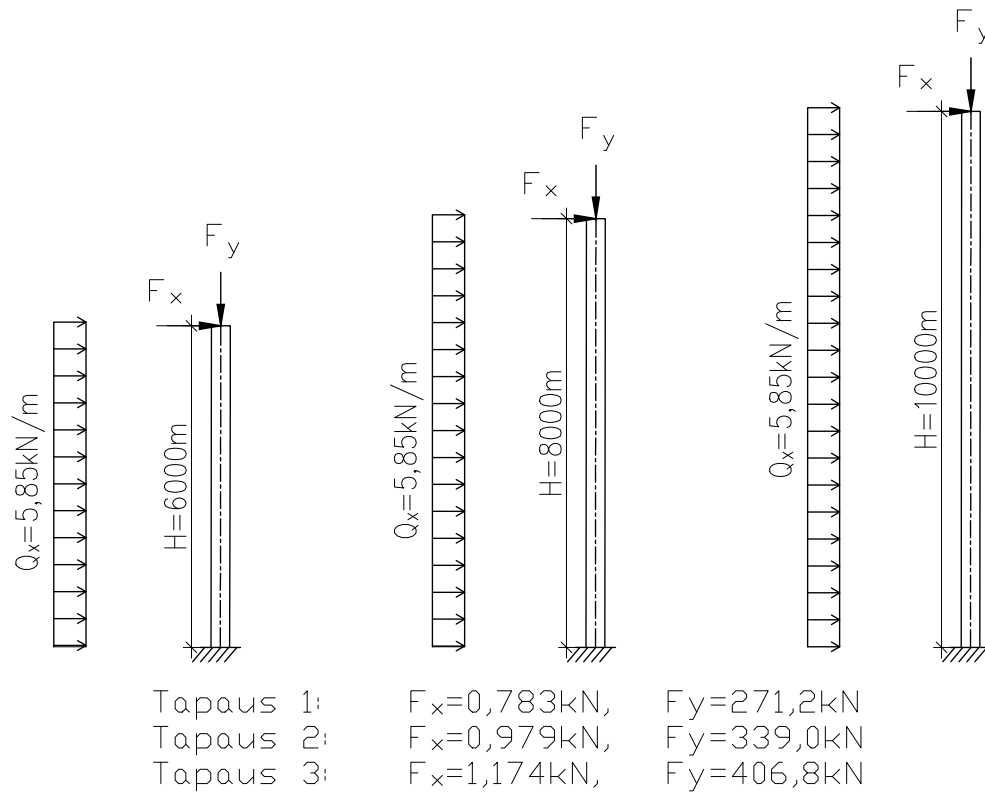
Pilarilla on tutkittu yhteensä 144 erilaista laskentatapausta. Kaikki laskentatapaukset on tutkittu kolmella eri teräslajilla ja sekä jatkuvilla että diskreeteillä muuttujilla. Pilarien tapauksille on laskettu optimoituja pilareita vastaavilla kuormituksilla käypiä HEA- ja SHS-profiileja, joihin hitsattua I-pilaria vertaillaan. Kehällä on tutkittu 4 erilaista laskentatapausta, joista jokainen on tutkittu kahdella eri teräslajilla. Kehää on tutkittu sekä liitosehtojen kanssa että ilman liitosehtoja.

### 6.1 Yksittäisen pilarin optimointi

Yksittäistä pilaria on optimoitu kolmena eri pituisena (6 m, 8 m ja 10 m) ja kolmella eri teräslajilla (S355, S500 ja S700). Optimoinnissa on käytetty *trust region*- ja B&B-algoritmeja. Pilarien kuormitukset ja pituudet alapäästään jäykällä tuentatapauksella on esitetty kuvassa 6.1. Pilarilla on samat kuormat myös toisella tutkitulla tuentavaihtoehdolla, jossa pilarin yläpää on nivelellisesti tuettu. Jokainen kuvan 6.1 kuormitustapaus tutkitaan molemmilla tuentavaihtoehdoilla kaikilla kolmella pilarin pituudella.

Pilaria on tutkittu 144 erilaisella laskentatapauksella kolmella eri teräslajilla. Tapaukset on tutkittu sekä jatkuvilla että diskreeteillä muuttujilla. Muuttuvia suureita ovat

- nurjahduspituus 2L tai 0.7L (vahvempi suunta kehän tasossa) ja 1L (heikompi suunta, eli kehän tasosta poispäin), kun L on pilarin pituus
- poikkileikkausluokka 2 tai 3
- pilarin pituus 6 m, 8 m tai 10 m
- ristikon jänneväli 24 m, 30 m tai 36 m (muutettu pilarille pystykuormaksi)
- pilarin kiepahdus tuettu tai tukematon
- pilarin heikomman suunnan nurjahdus tuettu tai tukematon.



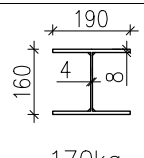
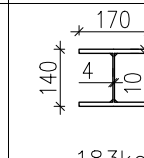
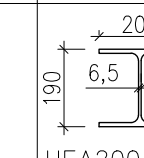
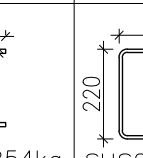
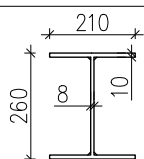
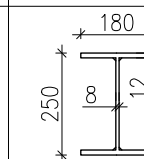
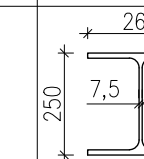
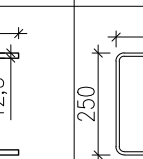
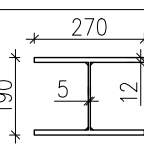
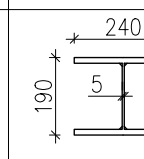
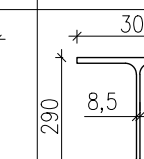
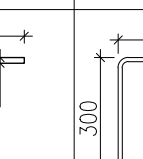
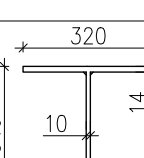
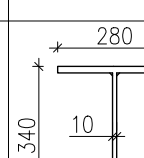
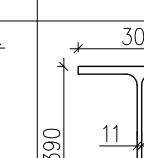
**Kuva 6.1.** Eri pituisten pilarien kuormat ja alapäässä jäykkä tuki. Toisena pilarin tuentavaihtoehtona on alapäästä jäykästi ja yläpäästä nivelellisesti tuettu pilari, jolla on samat kuormat. Jokainen kuormitustapaus tutkitaan molemmilla tuentavaihtoehdoilla kaikilla kolmella pilarin pituudella.

Pilariin kohdistuva pystykuorma  $F_y$  sisältää tyypillisen Etelä-Suomen lumikuorman muuttuvana kuormana. Pilarille laskettuja pysyviä kuormia aiheuttavat vesikaton ja ristikon arvioitu oma paino sekä pilarin oma paino. Tasaiset kuormat on muutettu pilarille piste-kuormaksi siten, että puolet vesikaton, ristikon ja lumen painosta tulee kehän yhdelle pilarille. Lisäksi kuormien laskennassa on huomioitu pilarien jakoväli, jolta kuormat tulevat yhdelle pilarille. Pilarien jakoväli on kaikissa tapauksissa 6 m. Pilarin yläpään kohdistuva vaakakuorma  $F_x$  on alkuepätkäkuuksien (kuva 2.2) mukaisesti laskettu. Tasaisena vaakakuormana  $Q_x$  vaikuttaa tuulikuorma. Kaikissa kuormituksissa on varmuuskertoimet mukana.

Laskentatapauksista puolet, eli 72 tapusta, on optimoinnissa pakotettu poikkileikkausluokan ehdoilla luokkaan 3 ja puolet luokkaan 2. Molempien luokkien tapauksista puolet, eli 36 tapusta, on optimoitu mastopilarina, jolloin nurjahduspituutena on vahvemmassa suunnassa käytetty 2L. Toiset 36 tapusta on optimoitu yläpäästään nivelellisenä ja alapäästään jäykkänä pilarina, jolloin nurjahduspituutena on vahvemmassa suunnassa käytetty 0.7L. Heikommassa suunnassa nurjahduspituus on kaikissa tapauksissa 1L. Tuloksista huomataan, että poikkileikkausluokassa 3 optimoitu pilari on usein kevyempi kuin vastaava poikkileikkausluokassa 2 optimoitu pilari.

Taulukossa 6.1 on esitelty neljän eri kuormitustapauksen optimiprofiilit. Hitsatut profiilit on optimoitu diskreeteillä muuttujilla. Kahdessa ylimmässä tapauksessa pilarin pituus on

**Taulukko 6.1.** Diskreeteillä muuttujilla optimoitujen hitsattujen I-profiilien optimiratkaisuja sekä vastaavien käypien HEA- ja SHS-profiilien tulosten vertailua, kun pilarin kuormituksena on kuvan 6.5 tapauksien 1 ja 3 mukaiset kuormat. Teräksenä on S355 ja sekä kiepahdus että heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia.

	Hitsattu PLL3	Hitsattu PLL2	HEA	SHS
Pilarin pituus 6 m Tapaus 1 Nurjahduspituus 0,7L	 170kg	 183kg	 HEA200, 254kg	 SHS220x7,1 277kg
Pilarin pituus 6 m Tapaus 1 Nurjahduspituus 2L	 288kg	 289kg	 HEA260, 409kg	 SHS250x8 354kg
Pilarin pituus 10 m Tapaus 3 Nurjahduspituus 0,7L	 574kg	 591kg	 HEA300, 883kg	 SHS300x10 884kg
Pilarin pituus 10 m Tapaus 3 Nurjahduspituus 2L	 948kg	 945kg	 HEA400, 1248kg	Ei käypää ratkaisua

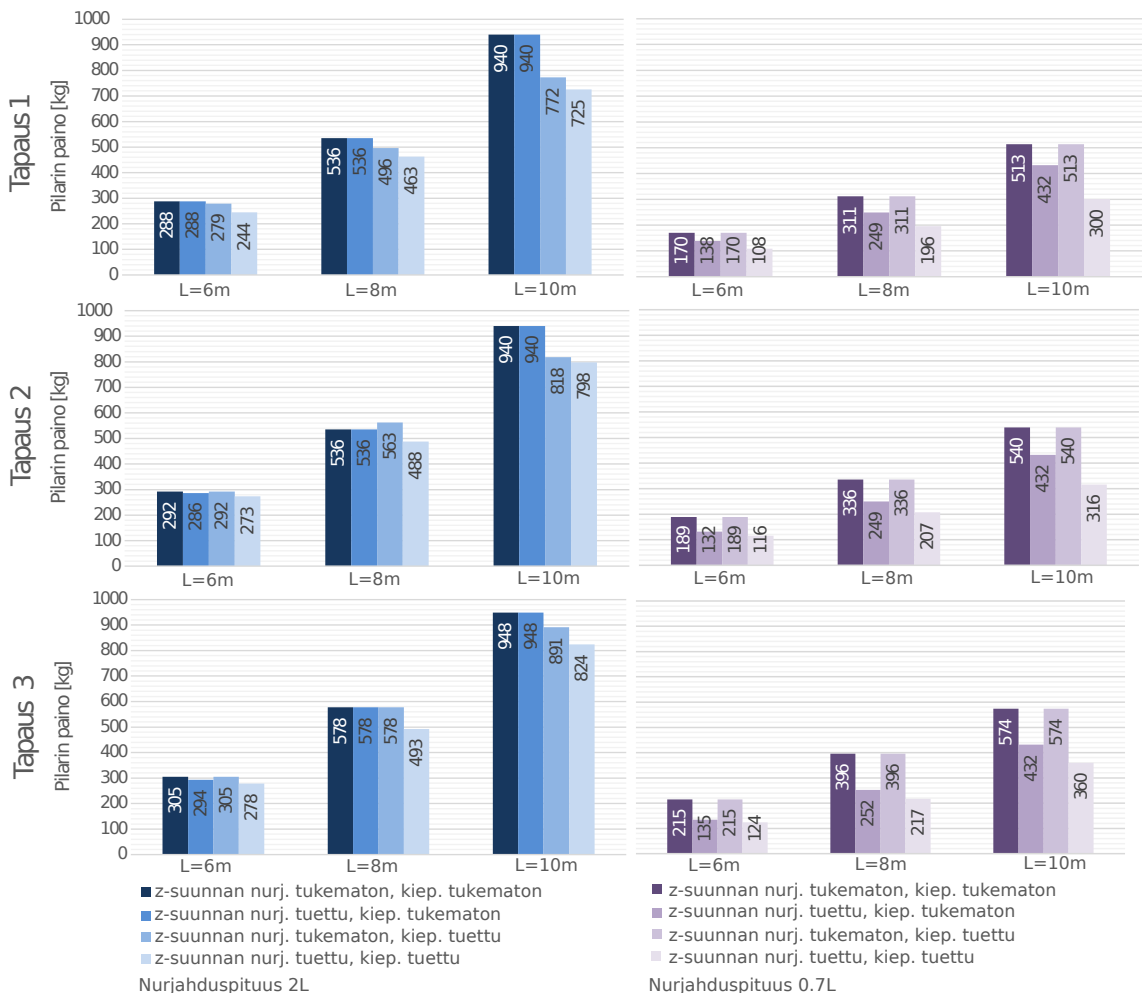
6 m ja kuormitustapauksena on kuvan 6.1 mukainen tapaus 1. Kahdessa alemmassa tapauksessa pilarin pituus on 10 m ja kuormitustapauksena on kuvan 6.1 mukainen tapaus 3. Optimoiduista tapauksista on esitetty optimiprofiili sekä poikkileikkausluokassa 2 että poikkileikkausluokassa 3. Lisäksi taulukossa on optimoituja tapauksia vastaavat käyvät HEA- ja SHS-profiilit, jos sellaiset ovat löytyneet. Poikkileikkaussuureille tai -mitoille ei ole löytynyt säännönmukaisuuksia tässä tutkimuksessa.

Diskreeteillä muuttujilla optimoitaessa määrääväksi rajoitusehdoksi tulee usein kiepahdus, heikomman suunnan nurjahdus tai yhdistetty puristus ja taivutus vahvemmassa suunnassa. Jos kiepahdus ja heikomman suunnan nurjahdus on tuettu, määrääväksi ehdoksi tulee vahvemman suunnan puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus. Jatkuvilla muuttujilla optimoitaessa saadaan lähes aina useampi kuin yksi rajoitusehto aktiiviseksi. Aktiiviset rajoitusehdot ovat jatkuvilla muuttujilla samat kuin määräävät rajoitusehdot diskreeteillä muuttujilla optimoitaessa sekä lisäksi poikkileikkausluokkaehdot. Poikkileikkausluokkaehdot eivät tule määrääviksi diskreeteillä muuttujilla optimoitaessa, sillä poikkileikkausmittoja ei voida valita portaattomasti, jolloin ei päästä yhtä lähelle poikkileik-

kausluokan ehdon rajaa. Teräksen lujuudesta riippumatta diskreeteillä muuttujilla laipan poikkileikkausluokan rajasta on käytössä noin 80 %, kun jatkuvilla muuttujilla päästään useimmiten yli 90 %. Uumalla ei päästä kummassakaan tapauksessa yhtä lähelle poikkileikkausluokan rajaa kuin laipalla.

### 6.1.1 Kiepahduksen ja heikomman suunnan nurjahduksen vaikutus

Kiepahduksen ja heikomman suunnan nurjahduksen määräävyyttä on tutkittu erilaisilla tapauksilla, joissa on vaihdeltu kiepahduksen ja heikomman suunnan nurjahduksen tuentaa. Kuvassa 6.2 on yhteensä kuusi pylvässarjaa, joista sinisävyisillä on vahvemman suunnan nurjahduspituus 2L ja violetin sävyisillä vahvemman suunnan nurjahduspituus 0.7L. Kaikissa tapauksissa pilarilla on kuvan 6.1 tapauksien mukaiset kuormat, teräksenä



**Kuva 6.2.** Kiepahduksen ja heikomman suunnan nurjahduksen määräävyys eri nurjahduspituuksilla, kun pilarin kuormituksena on kuvan 6.1 tapauksien mukaiset kuormat, teräksenä S355 ja poikkileikkausluokkana on 3. Pilarien pituudet ovat kuvassa millimetreinä. Vasemmalla on esitetty pidemmän nurjahduspituuden 2L ja oikealla on esitetty lyhyemmän nurjahduspituuden 0.7L pilarien pituudet ja painot eri tapauksissa.



on S355, poikkileikkausluokka on 3 ja muuttujat ovat optimoinnissa diskreettejä. Molempien nurjahduspituuksien tapauksissa on tapaukset, eli kuvassa neljän pylvään rykelmät, kolmelle eri pilarin pituudelle. Tummimmat, eli pylväsrykelmien vasemmanpuoleisimmat, pylväät ovat tapauksia, joissa sekä kiepahdus että heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia. Seuraavissa pylväissä kiepahdus on tukematon, mutta heikomman suunnan nurjahdus on tuettu. Kolmansina pylväinä vasemmalta ovat pylväät, joilla heikomman suunnan nurjahdus on tukematon, mutta kiepahdus on tuettu. Viimeiset pylväät ovat tapauksia, joissa sekä kiepahdus että heikomman suunnan nurjahdus ovat tuettuja.

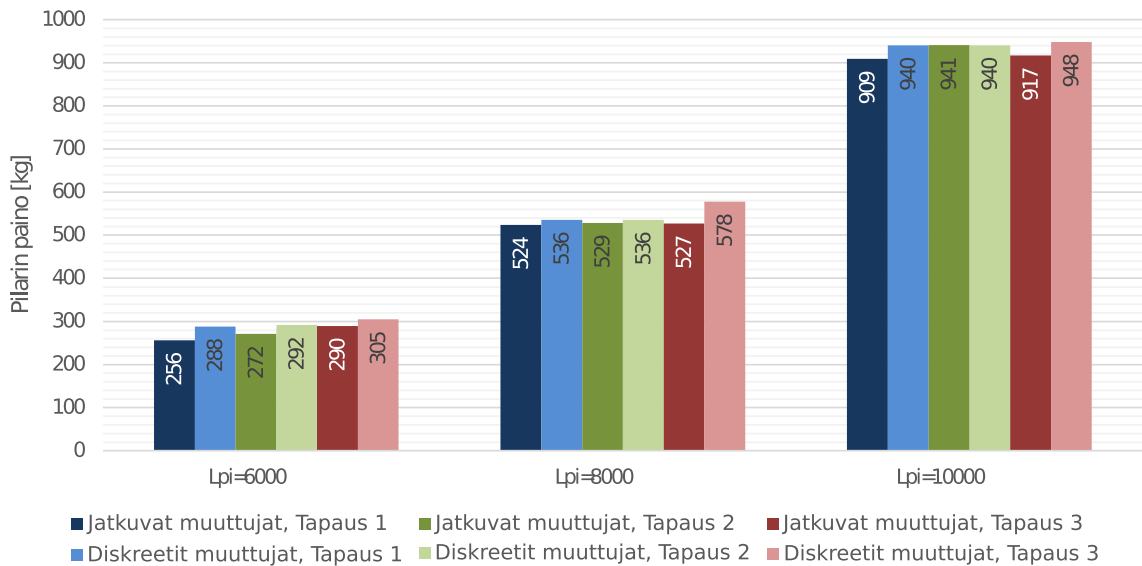
Kuvasta 6.2 voidaan huomata, että vahvemman suunnan nurjahduspituudella 2L pilarin kiepahdus tulee usein määrääväksi rajoitusehdoksi. Vahvemman suunnan nurjahduspituudella 2L kiepahduksen rooli näkyy siten, että pilarin painoa saadaan pienemmäksi, kun kiepahdus ei ole mukana rajoitusehdoissa. Mitä pidempi pilari on, sitä enemmän korostuu kiepahduksen määräävyys rajoitusehtona verrattuna heikomman suunnan nurjahduksen rajoittavuuteen. Vahvemman suunnan nurjahduspituudella 0.7L heikomman suunnan nurjahdus tulee usein määrääväksi rajoitusehdoksi. Vahvemman suunnan nurjahduspituudella 0.7L heikomman suunnan nurjahduksen rooli näkyy siten, että pilarin painoa saadaan pienemmäksi, kun heikomman suunnan nurjahdus ei ole mukana rajoitusehdoissa. Nurjahdus- ja kiepahdustuennalla voidaan näin ollen saada aikaan kevyempi pilari kuin ilman tuentoja. Pidemmällä nurjahduspituuksilla kiepahdustuenta ja lyhyemmällä heikomman suunnan nurjahduksen tuenta kannattaa tehdä ensin.

Kun tarkastellaan kuvan 6.2 tapauksia 3, huomataan lyhyemmän nurjahduspituuden pilarien tapauksissa heikomman suunnan nurjahduksen olevan edelleen määräävä. Suurimmilla kuormilla pidemmän nurjahduspituuden pisimmällä 10 m pilarilla kiepahdus on edelleen määräävä. Kiepahdus tai heikomman suunnan nurjahdus ei ole kumpikaan määräävä tapauksen 3 pidemmän nurjahduspituuden 8 m pilarilla. Tällöin rajoittavana tekijänä voi olla esimerkiksi puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus. Kuvan 6.2 tuloksissa huomataan poikkeava tilanne tapauksen 2 pidemmän nurjahduspituuden 8 m pilarilla, kun kiepahdustuetusta pilarista on tullut painavampi kuin kiepahdustukemattomasta. Tähän voi olla syynä se, että tapauksessa on päädytty lokaaliin optimiin.

### 6.1.2 Jatkuvien ja diskreettien muuttujien vaikutus

Jatkuvilla muuttujilla optimoitaessa käyttöasteet ovat parempia kuin diskreeteillä muuttujilla optimoitaessa. Jatkuvilla muuttujilla voidaan saada useampia rajoitusehtoja aktiiviseksi, eli optimoitua 100 %:n käyttöasteeseen, mutta diskreeteillä muuttujilla saadaan usein korkeintaan yksi määräävä rajoitusehto, joka on lähellä 100 %:n käyttöastetta.

Diskreeteillä muuttujilla optimoitaessa ei luonnollisesti päästä yhtä keveään pilariin kuin jatkuvilla muuttujilla optimoitaessa. Syynä tähän on, etteivät algoritmit saa valita muuttujiksi mitä tahansa arvoa, vaan on otettava levyvalikoiman arvoja, jolloin paksuus tai leveys pyöristyy usein ylöspäin. Kuvassa 6.3 on esitelty jatkuvilla ja diskreeteillä muuttujilla



**Kuva 6.3.** Jatkuvien ja diskreettien muuttujien optimitulosten vertailua eri pituisilla pila-reilla, kun pilarin kuormituksena on kuvan 6.1 tapauksen 1 mukaiset kuormat sinisillä, tapauksen 2 mukaiset kuormat vihreillä ja tapauksen 3 mukaiset kuormat punaisilla pylväillä. Teräksenä on S355, nurjahduspituutena 2L ja poikkileikkausluokkana 3. Pilarien pituudet ovat kuvassa millimetreinä. Samasta väristä tummempi pylväs kuvaa jatkuvan ja vaaleampi diskreetin muuttujan optimoinnin tulosta. Kiepahdus ja heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia.

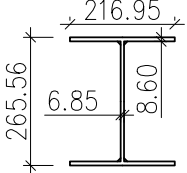
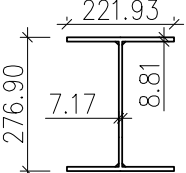
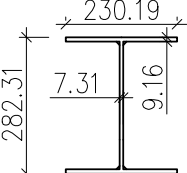
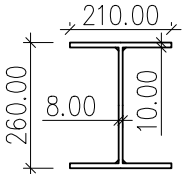
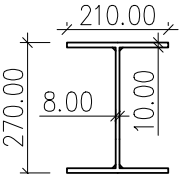
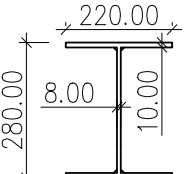
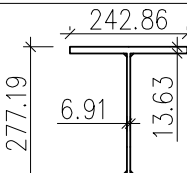
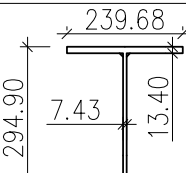
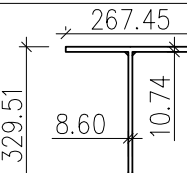
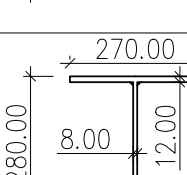
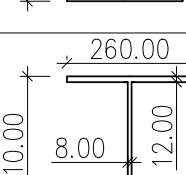
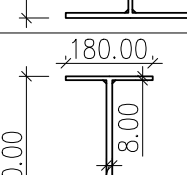
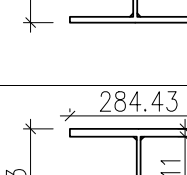
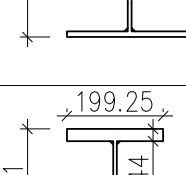
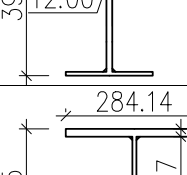
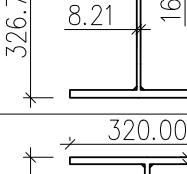
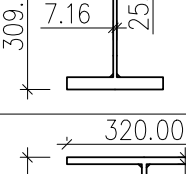
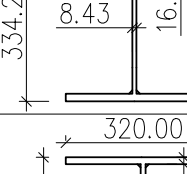
laskettujen optimipilareiden massoja. Poikkileikkausluokat tuovat omat rajoitteensa poikkileikkauksen leveys–paksuus-suhteisiin, jolloin jatkuvilla ja diskreeteillä muuttujilla optimoidun pilarin poikkileikkausmitat voivat erota huomattavasti toisistaan. Tässä työssä määrättiin poikkileikkaus pysymään joko poikkileikkausluokassa 2 tai 3.

Stabiiliteettiehtojen lisäksi jatkuvilla muuttujilla optimoitaessa laipan poikkileikkausluokan rajoitusehto on ollut usein yksi aktiivisista ehdoista riippumatta siitä, mikä teräslaatu on kyseessä. Diskreeteillä muuttujilla optimoitaessa pilarin stabiiliteettiehdot ovat olleet määrääviä. Diskreeteillä muuttujilla optimoitaessa poikkileikkausluokan rajoitusehto ei ole tullut määrääväksi, sillä poikkileikkausmittoja ei voida valita portaattomasti, vaan niiden on oltava valikoiman mukaisia. Tällöin on voitu päätyä suurempaan poikkileikkausmittaan, joka ei ole täsmälleen poikkileikkausluokkaehdon mukainen. Jatkuvilla muuttujilla optimoitaessa tätä ilmiötä ei esiinny, sillä poikkileikkausmitat voidaan valita portaattomasti.

Kuvasta 6.3 huomataan, että diskreeteillä muuttujilla optimoitu pilari on lähes aina painavampi kuin jatkuvilla muuttujilla optimoitu pilari, kuten jo edellä todettiin. Pisimmällä pilarilla tapauksella 2 diskreeteillä muuttujilla optimoitu pilari on kuitenkin kevyempi kuin jatkuvilla muuttujilla optimoitu pilari. Tämä voi selittyä sillä, että jatkuvilla muuttujilla optimoitu pilari on voinut päätyä lokaaliin eikä globaaliin optimiin, jolloin ei olla päästy kevyimpään mahdolliseen ratkaisuun.

Taulukossa 6.2 on esitetty jatkuvilla ja diskreeteillä muuttujilla optimoitujen pilareiden optimitulosten poikkileikkausmittoja ja massoja, kun poikkileikkausluokka on kolme, teräs on S355 ja sekä kiepahdus että heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia. Pilarien

**Taulukko 6.2.** Jatkuvilla ja diskreeteillä muuttujilla optimoitujen hitsattujen pilarien optimitulosten vertailua, kun pilarien kuormituksena on kuvan 6.1 tapauksien mukaiset kuormat ja poikkileikkausluokka on 3. Teräksenä on S355 ja sekä kiepahdus että heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia.

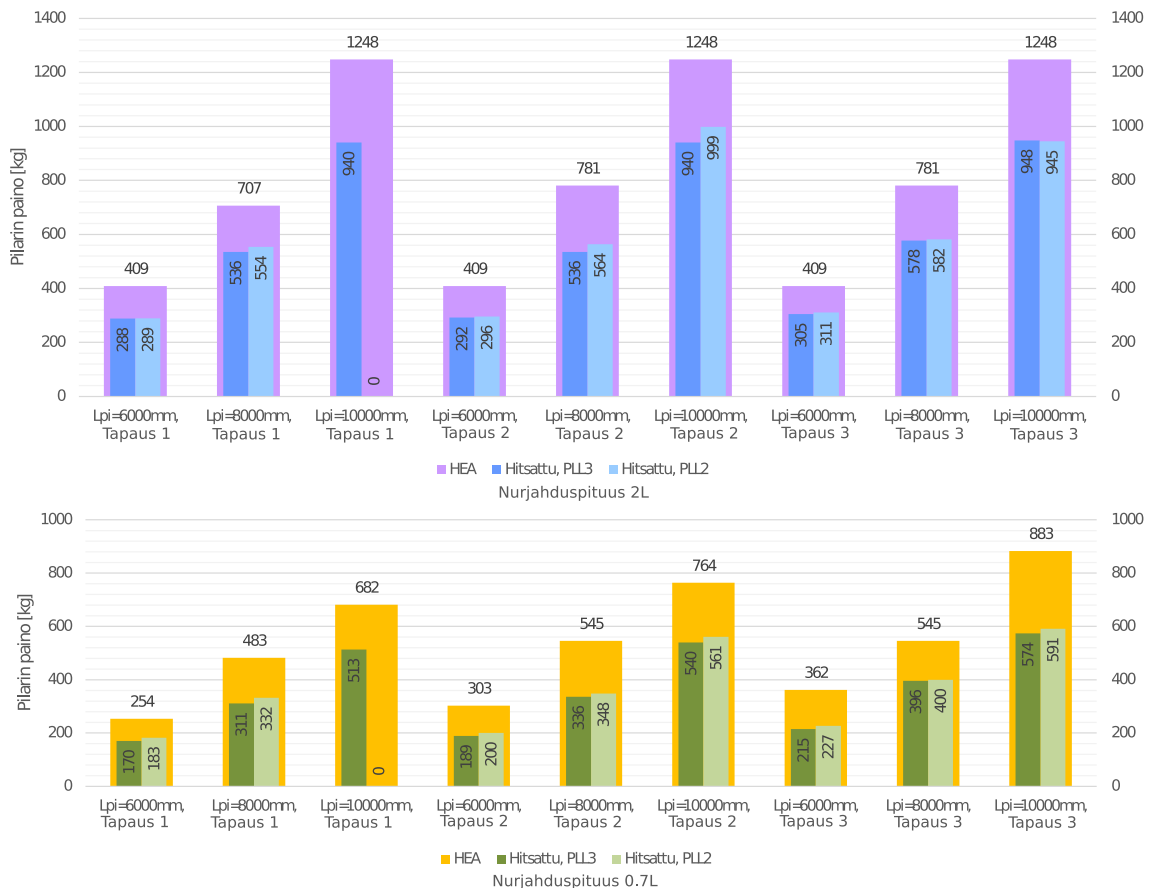
	PLL3	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3
Pilarin pituus 6 m	Jatkuvat muuttujat	 256kg	 272kg	 290kg
	Diskreetit muuttujat	 288kg	 292kg	 305kg
Pilarin pituus 8 m	Jatkuvat muuttujat	 524kg	 529kg	 527kg
	Diskreetit muuttujat	 536kg	 536kg	 578kg
Pilarin pituus 10 m	Jatkuvat muuttujat	 909kg	 941kg	 917kg
	Diskreetit muuttujat	 940kg	 940kg	 948kg

kuormituksena on kuvan 6.1 tapauksien mukaiset kuormat. Poikkileikkauksista huomataan, että vastaavien tapauksien poikkileikkaukset voivat erota huomattavasti toisistaan.

### 6.1.3 Diskreettien muuttujien optimipilarien vertailu HEA-pilareihin

Valssattuja HEA-profiileita ei ole optimoitu, vaan jokaiselle optimoidulle hitsatulle I-pilarille on haettu vastaavan pituinen ja vastaavalla kuormituksella kevyin käypä HEA-profiili valikoimasta siten, että käyttöasteet pysyvät alle 100 %:n. HEA-profiilien kestävyys on tarkastettu käsinlaskennalla eurokoodien mukaisesti. Kuvassa 6.4 on esitelty eripituisten pilarien optimiprofiileita erisuuruuksilla kuormituksilla eri poikkileikkausluokissa ja jokaiselle tapaukselle vastaava käypä HEA-profiili.

Kuvasta 6.4 nähdään, että käyvät HEA-profiilit ovat selkeästi painavampia kuin samoille tapauksille optimoidut hitsatut I-profiilit. Joissakin tapauksissa hitsatun I-pilarin poikkileikkausluokan 2 pilari on poikkileikkausluokan 3 pilaria kevyempi, mutta useimmiten poikkileikkausluokan 3 pilari on kevein. Lisäksi tapauksessa 1, jossa on 10 m pilari poikkileik-



**Kuva 6.4.** Hitsattujen ja valssattujen pilarien optimitulosten vertailua, kun pilarin kuormituksena on kuvan 6.1 tapauksien 1, 2 ja 3 mukaiset kuormat. Teräksenä on S355 ja sekä kiepahdus että heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia. Ylemmässä kuvaajassa nurjahduspituutena on 2L ja alemmassa kuvaajassa 0.7L. Samasta väristä tummempi pylväs on poikkileikkausluokassa 3 ja vaaleampi poikkileikkausluokassa 2 olevan pilarin optimitulos. Kahden kapeamman pylvään takana oleva leveämpi erivärinen pylväs kuvaa tapaukselle käyvän HEA-profiilin painoa.

**Taulukko 6.3.** Optimoitujen hitsattujen kaksoissymmetristen I-profiilisten pilarien vertailu vastaavien tapausten kevyimpiin käypiin HEA-profiilisiin pilareihin. Jokaisella rivillä on tutkittu yhdeksää tapausta, joilla vaihtelevat pilarin pituus ja kuormitustapa.

I-profiilisen pilarin tietoja			HEA-profiili painavampi kuin hitsattu I-profiili		
Teräs	PLL	Nurjahduspituus	min	max	keskiarvo
S355	3	2L	32%	46%	36%
		0.7L	33%	69%	51%
	2	2L	25%	42%	34%
		0.7L	36%	59%	47%
S700	3	2L	39%	52%	44%
		0.7L	35%	63%	52%
	2	2L	31%	56%	42%
		0.7L	28%	59%	41%

kausluokassa 2 ei ole löytynyt käypää tulosta. Tähän voi olla syynä algoritmille määriteltujen maksimi-iteraatiokierrosten saavuttaminen, eikä käypää tulosta ole tällä iteraatiomäärällä löytynyt. Algoritmi on myös saattanut jäädä ikään kuin jumiin joidenkin arvojen välille.

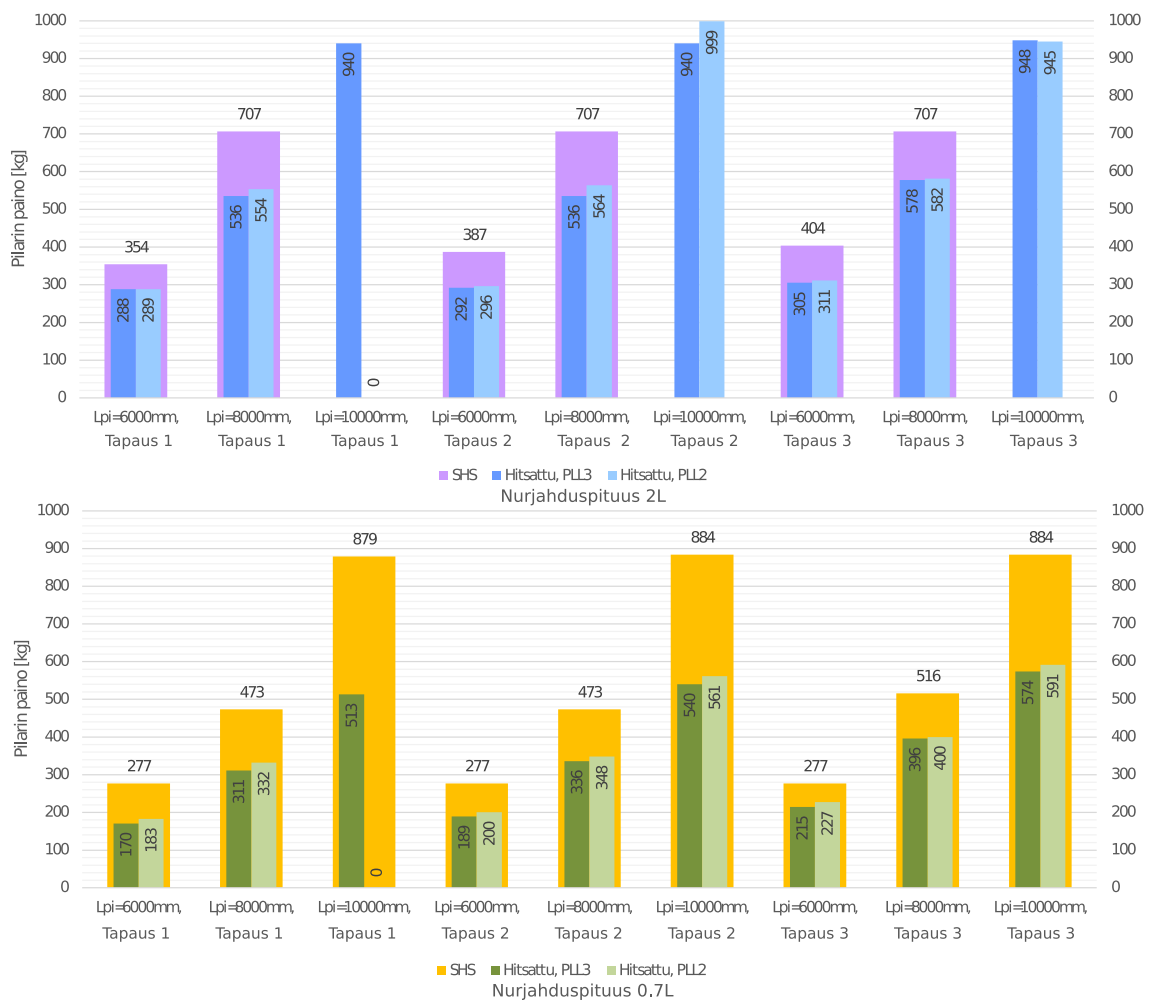
Taulukossa 6.3 on esitetty, paljonko painavampi HEA-profiilinen pilari on verrattuna optimoituu hitsattuun kaksoissymmetriseen I-profiiliseen pilariin, kun kuormitukset ovat samat. Taulukkoon on koottu eri kuormitustapauksista ja pituisista pilareista (kuormitukset ja pituudet kuvasta 6.1) suurin, pienin ja keskimääräinen painoero prosentteina. Pilareita on vertailtu poikkileikkausluokassa 3 ja 2 sekä teräksillä S355 ja S700. Lisäksi on erikseen vertailut mastopilarina, jolloin vahvemman suunnan nurjahduspituus on 2L, ja alapäästään jäykkänä ja yläpäästään nivelellisenä pilarina, jolloin vahvemman suunnan nurjahduspituus on 0.7L. Taulukosta 6.3 huomataan, että lukuun ottamatta yhtä muista tuloksista poikkeavaa tapausta, nurjahduspituudella 0.7L saavutettava keskimääräinen painohyöty on 8-15% enemmän kuin nurjahduspituudella 2L. Poikkeavassa tapauksessa teräksenä on S700 ja poikkileikkausluokka on 2. Poikkeavassa tapauksessa pidemmän nurjahduspituuden pilarilla saavutetaan keskimäärin 1% enemmän painohyötyä kuin lyhyellä nurjahduspituudella.

#### 6.1.4 Diskreettien muuttujien optimipilarien vertailu SHS-pilareihin

SHS-rakenneputkille on haettu vastaavalla tavalla kuin HEA-profiileille SSAB:n valikoidun mukaisista SHS-profiileista eri optimointitapauksille vastaavat kevyimmät käyvät SHS-profiilit. SHS-profiili on valittu siten, että käyttöaste pysyy alle 100 %, ja profiilien

kestävyys on tarkastettu käsinlaskennalla Eurokoodin mukaisesti. Kuvassa 6.5 on esitelty eripituisten pilarien optimiprofiileita erisuuruksilla kuormituksilla eri poikkileikkausluokissa ja jokaiselle tapaukselle vastaava käypä SHS-profiili.

Kuvasta 6.5 nähdään, että käyvät SHS-profiilit ovat selkeästi painavampia kuin samoille tapauksille optimoidut hitsatut I-profiilit. Hitsatut I-profiilit ovat samoja kuin ylempänä HEA-profiileihin verrattaessa ja yllä mainituista syistä 10 m pilari poikkileikkausluokassa 2 puuttuu tästäkin kuvasta. SSAB:n valikoimasta ei vakiokokoina löydy tarpeeksi isoja profiileita, jotta pisimmille 10 m mastopilareille olisi löytynyt käypä SHS-profiili. Tästä voidaan päätellä, että rasiutusten kasvaessa suuriksi SSAB:n SHS-profiilivalikoiman raja tulee vastaan ja on käytettävä I-profiilista pilaria.



**Kuva 6.5.** Hitsattujen ja rakenneputkipilarien optimitulosten vertailua, kun pilarin kuormituksena on kuvan 6.5 tapauksien 1, 2 ja 3 mukaiset kuormat. Teräksenä on S355 ja sekä kiepahdus että heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia. Ylemmässä kuvaajassa nurjahduspituutena on 2L ja alemmassa kuvaajassa 0.7L. Samasta väristä tummempi pylväs on poikkileikkausluokassa 3 ja vaaleampi poikkileikkausluokassa 2 olevan pilarin optimitulokset. Kahden kapeamman pylvään takana oleva leveämpi erivärinen pylväs kuvaa tapaukselle käyvän SHS-profiilin painoa.

**Taulukko 6.4.** Optimoitujen hitsattujen kaksoissymmetristen I-profiilisten pilarien vertailu vastaavien tapausten kevyimpiin käypiin SHS-profiilisiin pilareihin. Tapauksia, joissa nurjahduspituus on 2L ja pilarin pituus on 10 m, ei ole mukana taulukossa, sillä niihin ei löytynyt käypää SHS-profiilia SSAB:n valikoimasta.

I-profiilisen pilarin tietoja			SHS-profiili painavampi kuin hitsattu I-profiili		
Teräs	PLL	Nurjahduspituus	min	max	keskiarvo
S355	3	2L	22%	33%	29%
		0.7L	29%	71%	50%
	2	2L	22%	31%	26%
		0.7L	22%	58%	41%
S700	3	2L	31%	41%	37%
		0.7L	25%	74%	51%
	2	2L	30%	38%	34%
		0.7L	21%	69%	40%

Jos vertaillaan keskenään optimoitua hitsattua I-profiilia sekä vastaaville kuormituksille kevyimpiä käypiä HEA- ja SHS-profiileja, kuvista 6.4 ja 6.5 huomataan, että hitsattu optimoitu I-profiili on aina kevyin pilari. Kuvista huomataan myös, että pisimmällä 10 m pilarilla vahvemman suunnan nurjahduspituudella 0.7L HEA-profiili on jokaisessa tapauksessa kevyempi kuin SHS-profiili. SHS-profiilit ovat lähes kaikissa tapauksissa HEA-profiileja kevyempiä, kun pilarin pituus on 6 m tai 8 m.

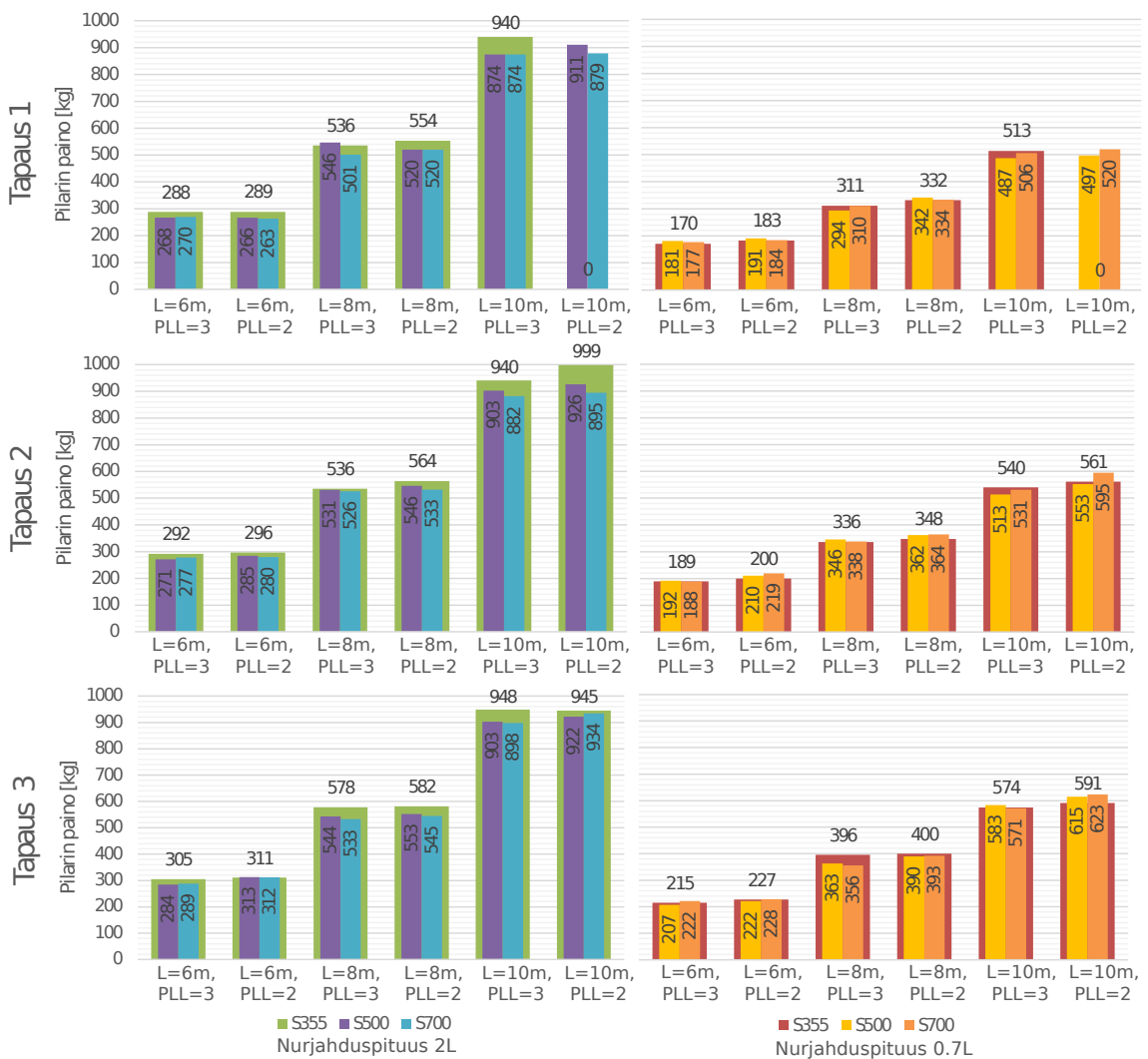
Taulukossa 6.4 on esitetty, paljonko painavampi SHS-profiilinen pilari on verrattuna optimoituun hitsattuun kaksoissymmetriseen I-profiiliseen pilariin, kun kuormitukset ovat samat. Taulukkoon on koottu eri kuormitustapauksista ja pituisista pilareista (kuormitukset ja pituudet kuvasta 6.1) suurin, pienin ja keskimääräinen painoero prosentteina. Pilareita on vertailtu poikkileikkausluokassa 3 ja 2 sekä teräksillä S355 ja S700. Lisäksi on erikseen vertailut mastopilarina, jolloin vahvemman suunnan nurjahduspituus on 2L, ja alapäästään jäykkänä ja yläpäästään nivelellisenä pilarina, jolloin vahvemman suunnan nurjahduspituus on 0.7L. Taulukosta 6.4 huomataan, että nurjahduspituudella 0.7L saavutettava painohyöty on keskimäärin 6-24% enemmän kuin nurjahduspituudella 2L.

### 6.1.5 Teräksen lujuuden vaikutus hitsattuihin optimipilareihin

Hitsattuja I-pilareita on optimoitu kolmella eri SSAB:n teräslajilla, jotka ovat S355, S500 ja S700. Eurokoodin mukaisessa poikkileikkausluokkien mitoituksessa S500 ja S700 teräksillä on tiukemmat poikkileikkausluokkien rajat kuin S355 teräksellä. Tällöin tiukemman rajan takia korkealujuusteräksisellä pilarilla on voitu päätyä suurempiin poikkileikkausmitoihin kuin S355-pilarilla, mikä voi johtaa tilanteeseen, jossa korkealujuusteräksinen pilari on painavampi kuin S355-pilari. Poikkileikkausluokkaehdon rajoittaessa pilarin poikkileikkauksen hoikkuutta korkealujuusteräksen käyttämisen hyödyt eivät tule esille.

Taulukoista 6.3 ja 6.4 huomataan, että HEA- ja SHS-profiilisiin pilareihin verrattuna hitsatulla korkealujuusteräksisellä S700-pilarilla saavutettava painohyöty pidemmän nurjahduspituuden 2L pilareilla on keskimäärin 8% suurempi kuin S355-pilarilla saavutettava painohyöty. Lukuun ottamatta yhtä poikkeavaa tapausta lyhyemmällä nurjahduspituudella 0.7L S355- ja S700-pilareista on keskimäärin yhtä paljon painohyötyä, kun näitä verrataan HEA- ja SHS-profiilisiin pilareihin. Poikkeavassa tapauksessa S355-pilarilla saavutetaan 6% enemmän painohyötyä kuin S700-pilarilla, kun teräksenä on S355, poikkileikkausluokkana on 2 ja kyseessä on HEA-profiilin vertailu hitsattuun I-profiiliin.

Kuvasta 6.6 huomataan, että yksittäisen pilarin optimoinnissa korkealujuusterästä käytämällä saavutetaan kevyempiä pilareita kuin S355 teräksellä. On myös mahdollista, että korkealujuusteräksiset pilarit ovat painavampia kuin S355-teräksinen pilari, kuten lyhyemmällä nurjahduspituudella on useassa tapauksessa. Kuvassa 6.6 nurjahduspituudella 0.7L korkealujuusteräksiset pilarit ovat lähes jokaisessa tapauksessa painavam-



**Kuva 6.6.** Eri teräslajeilla optimoitujen pilarien tulosten vertailua, kun pilarin kuormitussena on kuvan 6.5 tapauksien mukaiset kuormat. Sekä kiepahdus että heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia. Vasemmanpuoleisissa kuvaajissa nurjahduspituutena on 2L ja oikeanpuoleisissa kuvaajissa 0.7L.



**Taulukko 6.5.** Optimoitujen hitsattujen kaksoissymmetristen I-profiillisten pilarien vertailua eri teräslajeilla. Pilarien painoja on vertailtu keskenään ja tässä on esitetty korkealujuusteräksisen pilarin painon suhde S355-teräksiseen pilariin.

Pilarin tietoja			Korkealujuusteräksisen pilarin paino S355-teräksisestä pilarista		
Teräs	Kuormitustapaus (kuvasta 6.1)	Nurjahduspituus	min	max	keskiarvo
S500	1	2L	92%	102%	95%
		0.7L	94%	106%	101%
	2	2L	93%	99%	96%
		0.7L	95%	105%	101%
	3	2L	93%	101%	96%
		0.7L	92%	102%	98%
S700	1	2L	91%	94%	93%
		0.7L	99%	104%	101%
	2	2L	90%	98%	94%
		0.7L	98%	110%	103%
	3	2L	92%	100%	96%
		0.7L	90%	105%	100%

pia kuin S355-pilarit. Tähän voivat olla syynä aiemmin mainitut tiukemmat ehdot poikkileikkausluokkien määrittelyssä tai lokaaliin optimiin päätyminen. Määrittävät rajoitusehdot ovat samoja teräksen lujuudesta riippumatta. Kuvan 6.6 perusteella voidaan sanoa, että eurokoodin mukaisella mitoituksella korkealujuusteräksen käytöstä ei näyttäisi olevan hyötyä lyhyillä nurjahduspituuksilla.

Mastopilarilla korkealujuusteräksiset pilarit ovat kuvassa 6.6 lähes kaikissa tapauksissa kevyempiä kuin S355-pilarit. Tähän syynä voi olla mastopilarien kiepahduksen määrällisyys, jolloin korkealujuusterästen suuremmasta lujuudesta on hyötyä ja saavutetaan kevyempi pilari kuin S355-teräksellä. Kuvasta huomataan, että hyötyä on sitä enemmän mitä pidempi mastopilari on. Mastopilarin ensimmäisessä tapauksessa 8 m PLL3:n ja kolmannessa tapauksessa 6 m PLL2:n S500-pilari on painavampi kuin S355-pilari, mikä voi johtua lokaaliin optimiin pääntymisestä tai tiukemmista poikkileikkausluokkaehdoista. Tapauksessa 1 ei ole saatu tulosta pisimmälle S355-pilarille poikkileikkausluokassa 2. Tässä ongelma voi johtua käytetystä algoritmista, joka ei ole päässyt käypään tulokseen esimerkiksi iteraatiokierrosten rajan tullen vastaan.

Taulukossa 6.5 on esitetty optimoitujen hitsattujen kaksoissymmetristen I-profiillisten pilarien vertailua, kun pilareilla on samat mitat ja kuormat, mutta teräksen lujuus muuttuu. Taulukossa on esitetty prosentteina korkealujuusteräksisten S500- ja S700-pilarien painojen suhteita S355-teräksisiin pilareihin eri kuormitustapauksilla ja nurjahduspituuksilla. Tuloksista huomataan, että korkealujuusteräksen käytöllä ei saavuteta kovinkaan paljon etua painon kannalta ja joissain tapauksista siitä on jopa haittaa, kun korkealujuusteräksi-

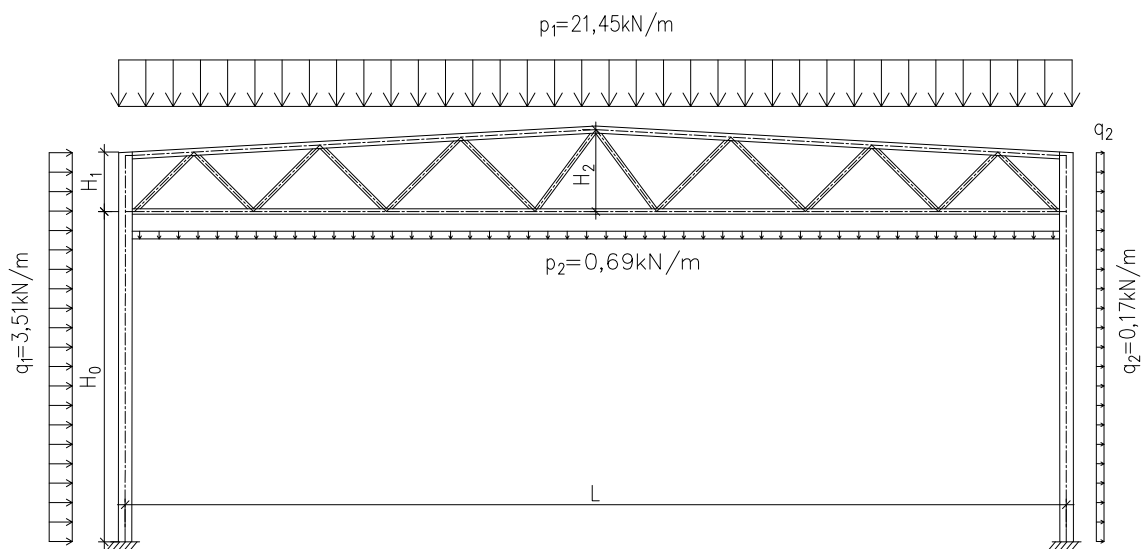
sestä pilarista tulee painavampi. Tulosta selittävät jo mainitut käytettävien poikkileikkausluokkien tiukemmat rajoitusehdot korkealujuusteräksillä kuin S355-teräksellä. Poikkileikkausluokkaa 4 ei ole käsitelty tässä tutkimuksessa. Poikkileikkausluokassa 4 olevaa pilaria kannattaisi tutkia jatkossa, jotta saadaan selvitettyä, saavutettaisiinko sillä kevyempiä pilareita kuin tässä työssä tutkituissa poikkileikkausluokissa 2 ja 3.

## 6.2 Kehän optimointi

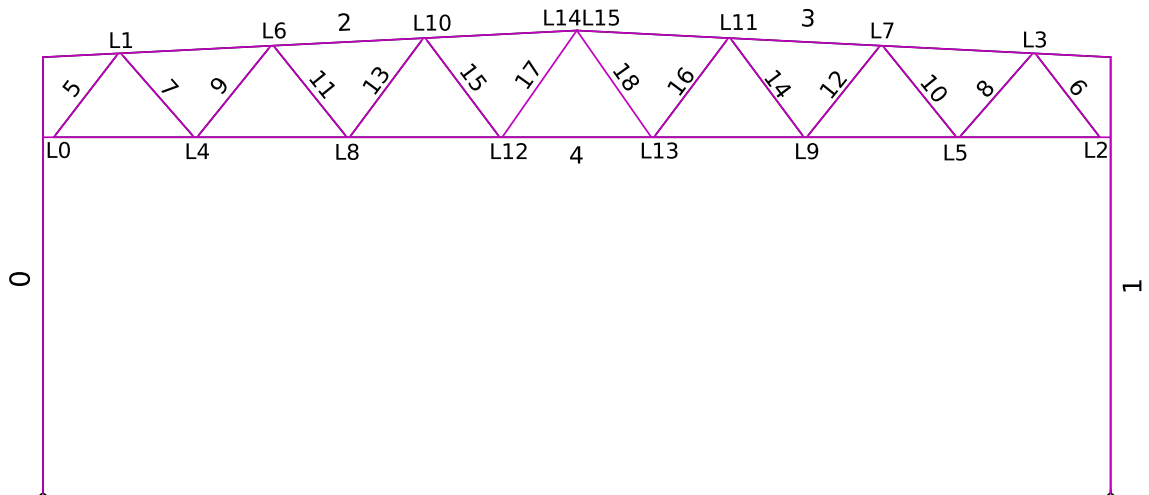
Portaalikehälle on tutkittu kahdeksan erilaista laskentatapausta. Optimoinnissa on käytetty MISLP- ja VNS-algoritmeja, joista VNS käyttää paikallisessa haussa geneettistä algoritmia. Kehän muoto ja kuormat ovat kuvan 6.7 mukaiset. Kuvassa 6.8 on esitetty kehän sauvojen numerointi. Laskentatapaukset ovat seuraavanlaisia:

- Ristikon teräslaji on jokaisessa tapauksessa S420.
- Ristikon leveys  $L$  on 24 m (ristikon korkeus reunalla  $H_1 = 1,8$  m ja harjalla  $H_2 = 2,4$  m) tai 30 m (ristikon korkeus reunalla  $H_1 = 2,1$  m ja harjalla  $H_2 = 2,9$  m).
- Pilarin vapaa pituus  $H_0$  on 6 m tai 8 m. Pilarin kokonaispituus saadaan laskemalla yhteen vapaa pituus ja ristikon korkeus reunalla.
- Pilarin teräslaji on S355 tai S700.

Optimointituloksia, joissa ei ole mukana liitosten geometriaehtojen rajoitusehtoja, on esitelty taulukossa 6.6. Tulokset eivät ole eurokoodien vaatimusten mukaisia, sillä liitosten geometriaehtoja ei ole huomioitu. Kun tarkastellaan taulukon 6.6 käypiä tuloksia huomataan, että S700 teräksellä ei välttämättä saavuteta kevyempää rakennetta. Tämä voi johtua pilarissa käytettävän korkealujuusteräksen tiukemmista ehdoista poikkileikkausluokan suhteen, jolloin voidaan päätyä suurempiin poikkileikkausmittoihin ja pilarin massa on suurempi. Yhden tuloksen on ilmoitettu olevan likimain käypä, sillä sen määräävä



**Kuva 6.7.** Kehän rakenne ja laskentatapauksien kuormat.



**Kuva 6.8.** Kehän sauvojen numerointi.

rajoitusehto on ylittänyt käyttöasteen alle 3 %, joten tässä työssä tulos on hyväksytty käyväksi.

Kaikki optimointitulokset eivät ole käypiä, mikä voi johtua käytetyistä algoritmeista. Algoritmien lopetusehdot voivat vaikuttaa saataviin tuloksiin. Ensimmäisen vaiheen MISLP-algoritmin yhtenä lopetusehtona on, että jos tehtävän linearisointi on epäkäypä, optimointi lopetetaan ja paluuarvona on nollavektori. Jos linearisointi on aloitusasteessa epäkäypä, MISLP ei tee käytännössä mitään ja siirtyään suoraan toiseen vaiheeseen. Tällöin ensimmäinen vaihe ei välttämättä toteuta ensimmäisen vaiheen roolia, ja tehtävä ratkaistaan käytännössä vain toisen vaiheen VNS-algoritilla, eli kaksivaiheinen ratkaisuteknikka ei toteudu.

Sekä MISLP- että VNS-algoritmi lopettaa, jos kaksi peräkkäistä tulosta ovat riittävän lähellä toisiaan. Tässä työssä kahden peräkkäisen tuloksen suhteellinen ero saa olla enintään 0.01 %, jotta algoritmi lopettaa. Iteraatiokierroksille on asetettu maksimimäärä, jolloin sekin on joissain tilanteissa voinut tulla vastaan. Tällöin algoritmi on kuitenkin jäänyt ikään kuin jumiin esimerkiksi kahden ratkaisun välille, jolloin iteraatiokierrosten saavuttaessa maksimiarvonsa ongelmatilanteesta päästään pois. Iteraatiokierrokset on pidetty tässä työssä niin suurina, että ne eivät rajoita optimointia. Iteraatiokierrosten maksimimäärä on MISLP-algoritilla 50 ja VNS-algoritilla 10. Myös kokonaisajalle on asetettu maksimiarvo  $10^8$  s, mutta se on työssä riittävän pitkä, jolloin se ei rajoita optimointia.

Taulukossa 6.6 esitetyistä tuloksista kehillä, joilla on 24 m ristikon jänneväli, määrääväksi rajoitusehdoksi on tullut kaikilla neljällä laskentatapauksella pilarin, eli sauvan 1, puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus heikommassa suunnassa. Taulukon 6.6 30 m ristikon jännevälisillä kehillä määrääväksi rajoitusehdoksi on tullut lyhyemmillä pilareilla toisen yläpaarten, eli sauvan 2, puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus vahvemmassa suunnassa ja pidemmillä pilareilla uumasauvan 6 vahvemman suunnan nurjahdus.

**Taulukko 6.6.** Kaksoissymmetrisen hitsatun I-poikkileikkauksisen pilarin ja rakenneputkiristikon muodostaman kehän tuloksia, kun liitosten geometriaehtojen rajoitusehdot eivät ole mukana. Ristikko on terästä S420.

Ristikon jänneväli [m]		24		30		
Pilarin pituus [m]		7.8	9.8	8.1	10.1	
Pilari: teräs S355	Massa [kg]	2297	2641	4415	3928	
	Käyppyyys	kyllä	kyllä	~ kyllä	kyllä	
	Määräävä ehto	pur. taiv. yht. (z)		pur. taiv. yht. (y)	nurjahdus (y)	
	Määräävä sauva	1	1	2	6	
	Ehdon käyttöaste	99.8%	99.6%	102%	97.3%	
	Pilarin poikkileikkausmitat [mm]	$h$	190	210	320	230
		$t_w$	5	5	14	12
		$b$	220	220	310	250
		$t_f$	10	14	20	14
	Ristikon profiilit $h_i \times t_i$ [mm]	tc	160x6.0	150x6.0	160x8.0	180x7.1
bc		120x7.1	100x8.0	100x8.0	120x7.1	
web		100x4.0	100x4.0	120x4.0	120x4.0	
Pilari: teräs S700	Massa [kg]	2282	2824	3305	3796	
	Käyppyyys	kyllä	kyllä	ei	ei	
	Määräävä ehto	pur. taiv. yht. (z)		pur. taiv. yht. (y)	nurjahdus (y)	
	Määräävä sauva	1	1	2	6	
	Ehdon käyttöaste	99.6%	99.7%	140%	145%	
	Poikkileikkausmitat [mm]	$h$	170	210	260	220
		$t_w$	8	16	14	12
		$b$	180	190	210	220
		$t_f$	12	15	16	20
	Ristikon profiilit $h_i \times t_i$ [mm]	tc	150x6.0	150x6.0	160x6.0	160x6.0
bc		120x7.1	100x7.1	100x8.0	120x7.1	
web		100x4.0	100x4.0	110x4.0	100x4.0	

Taulukoissa 6.7 ja 6.8 on esitetty kehän tuloksia, joissa liitosten geometriaehtojen rajoitusehtoja on mukana. Kolmannessa vaiheessa on ratkaistu tehtävä siten, että vain liitosten geometriaehtojen rajoitusehdot ovat mukana ja muuttujina ovat pelkästään liitosten vapaavälit  $g$ . Liitosten geometriaehdoista vapaavälien ja epäkeskisyyksien ehtoja ei kuitenkaan ole mukana, jolloin tulokset eivät ole eurokoodien mukaisia geometrian osalta. Vapaavälien ja epäkeskisyyksien ehtoja ei ole mukana, sillä ne tuottivat ongelmia, eikä tällä menetelmällä ja käytetyillä algoritmeilla saatu niistä tuloksia.

**Taulukko 6.7.** Kaksoissymmetrisen hitsatun I-poikkileikkauksisen pilarin ja rakenneputkiristikon muodostaman kehän tuloksia, kun liitosten geometriaehtojen rajoitusehdot ilman vapaavälien ja epäkeskisyyksien ehtoja ovat mukana. Ristikko on terästä S420 ja pilari on terästä S355.

Ristikon (S420) jänneväli [m]		24		30		
Pilarin (S355) pituus [m]		7.8	9.8	8.1	10.1	
Vaihe 2	Massa [kg]	2297	2961	3231	3637	
	Käyppyyks	kyllä	kyllä	ei	ei	
	Määräävä ehto	pur. taiv. yht. (z)		nurjahdus (y)	pur. taiv. yht. (z)	
	Määräävä sauva	1	1	6	1	
	Ehdon käyttöaste	99.8%	92.0%	149%	126%	
	Pilarin poikkileikkausmitat [mm]	$h$	190	220	230	230
		$t_w$	5	6	6	10
		$b$	220	240	230	230
$t_f$		10	12	10	12	
Ristikon profiilit $h_i \times t_i$ [mm]	tc	160x6.0	150x7.1	160x8.0	180x7.1	
	bc	120x7.1	120x7.1	140x7.1	120x7.1	
	web	100x4.0	100x6.0	90x5.0	120x4.0	
Vaihe 3	Massa [kg]	2289	2830	3922	4016	
	Käyppyyks	kyllä	kyllä	ei	ei	
	Määräävä ehto	liitoksen uumasauvan maksimileveyden geometriaehto				
	Määräävä sauva	L4	L4	L4	L4	
Ehdon käyttöaste	98.0%	98.0%	129%	115%		

Liitosten geometriaehtoja optimoidaan MISLP-algoritmilla, jota käytetään myös ensimmäisessä vaiheessa, jolloin sen lopetusehdot ovat samat kuin ensimmäisessäkin vaiheessa. Jos linearisointi on aloituspisteessä, eli toisen vaiheen ratkaisussa, epäkäypä algoritmi lopettaa optimoimisen. Myös, jos kaksi peräkkäistä tulosta ovat tarpeeksi lähellä toisiaan, eli kahden peräkkäisen tuloksen suhteellinen ero on enintään 0.01 %, optimointi lopetetaan.

Kun vertaillaan kehän taulukon 6.6 tuloksia ja taulukoiden 6.7 ja 6.8 tuloksia toisen vaiheen jälkeen, eli ennen kuin liitosten geometriaehtoja on ollenkaan mukana, huomataan, että kehän massa ja poikkileikkausmitat vaihtelevat. Lähtöarvo vaikuttaa siihen, millaiseen tulokseen päästään. Geneettinen algoritmi aiheuttaa satunnaisuutta, minkä takia aina ei päästä samaan tulokseen, vaikka lähtöarvo olisi sama. Käytetyillä algoritmeilla ei päästä jokaisessa tapauksessa käypään arvoon. Optimointi on voinut päätyä lokaaliin optimiin, joka ei ole ollut käyväällä alueella, mutta on täyttänyt lopetuskriteerin.

Taulukoiden 6.7 ja 6.8 toisen vaiheen tuloksissa määrääviksi rajoitusehdoiksi tulevat pilarin tai paarteen puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus heikommassa tai vahvemmassa suunnassa tai uumasauvan vahvemman suunnan nurjahdus. Taulukoiden 6.7 ja 6.8

**Taulukko 6.8.** Kaksoissymmetrisen hitsatun I-poikkileikkauksisen pilarin ja rakenneputki-ristikon muodostaman kehän tuloksia, kun liitosten geometriaehtojen rajoitusehdot ilman vapaavälien ja epäkeskisyyksien ehtoja ovat mukana. Ristikko on terästä S420 ja pilari on terästä S700.

Ristikon (S420) jänneväli [m]		24		30		
Pilarin (S700) pituus [m]		7.8	9.8	8.1	10.1	
Vaihe 2	Massa [kg]	2231	2594	3039	3568	
	Käyppyy	ei	ei	ei	ei	
	Määräävä ehto	nurjahdus (y)				
	Määräävä sauva	6	6	6	6	
	Ehdon käyttöaste	111%	145%	182%	183%	
	Pilarin poikkileikkausmitat [mm]	$h$	170	190	210	220
		$t_w$	6	15	14	14
		$b$	190	200	230	240
		$t_f$	12	14	12	15
	Ristikon profiilit $h_i \times t_i$ [mm]	tc	150x6.0	140x6.0	160x6.0	160x6.0
bc		120x7.1	110x6.0	120x7.1	120x7.1	
web		90x4.0	80x4.0	90x4.0	90x4.0	
Vaihe 3	Massa [kg]	2326	2971	3244	3562	
	Käyppyy	kyllä	ei	ei	kyllä	
	Määräävä ehto	liitoksen uumasauvan maksimileveyden geometriaehto				
	Määräävä sauva	L4	L4	L4	L4	
Ehdon käyttöaste	98.0%	123%	123%	86.7%		

kolmannen vaiheen tuloksista puolet ovat käypiä ja puolet epäkäypiä. Kriittiseksi ehdoksi muodostuu uumasauvan leveyden geometriaehto. Optimointeja täytyisi tehdä useampia, jotta voitaisiin tehdä kattavia johtopäätöksiä kehän massasta ja optimiprofiileista. Myös erilaisia algoritmiyhdistelmiä olisi hyvä kokeilla.

## 7 YHTEENVETO

Tutkimuksen aiheena on teräksisen kaksoissymmetrisestä hitsatusta I-pilarista ja rakenneputkiristikosta koostuvan kehän optimointi. Tutkimuksen avulla SSAB:n on tarkoitus lisätä kaksoissymmetrinen hitsattu I-profiilinen pilari FrameCalc-laskentaohjelmaansa. Lisäksi on tehty alustavaa tutkimusta viistetyn pilarin optimoinnista ja lisäämisestä ohjelman pilarivaihtoehdoksi. Tavoitteena on ollut selvittää, miten pilarin ja kehän optimointitehtävät tulisi asettaa ja ratkaista, jotta saavutettaisiin mahdollisimman kevyt rakenne, joka täyttää eurokoodien vaatimukset lujuudelle ja stabiilisuudelle. Optimointi ja rakennemallin luominen on tehty käyttäen Python-ohjelmaa. Tässä työssä laskennan suorittaminen kokonaisuudessaan on ollut työläs vaihe, joka on myös vienyt paljon aikaa.

Työssä on tutustuttu erilaisiin algoritmeihin ja niiden toimintaan sekä käsitelty optimoinnin peruskäsitteitä. Suunnittelumuuttujina on käytetty pääasiassa I- ja neliöputkiprofiilin poikkileikkausmittoja. Pilarin ratkaisumenetelmänä on käytetty *branch-and-bound* -algoritmia, jossa muuttujat ovat diskreettejä ja alitehtävä ratkaistaan *trust region* -algoritmilla. Kehän ratkaisumenetelmä on kaksivaiheinen menettely, jossa ensimmäisessä vaiheessa käytetään binäärimuuttujia sekä seka- ja kokonaislukuista peräkkäisten lineaaristen approksimaatioiden menetelmää. Toisessa vaiheessa käytetään indeksimuuttujia ja moniympäristöhakua, jonka alitehtävä ratkaistaan geneettisellä algoritmilla. Keskeisimmät tulokset ovat, että hitsatulla I-pilarilla saadaan selvästi valssattua pilaria pienempi paino ja että käytetyt algoritmit eivät olleet sellaisenaan kehän optimointitehtävälle soveltuvia. Algoritmien osalta tutkimus jatkuu.

Yksittäistä pilaria on tutkittu 144 erilaisella laskentatapauksella kolmella eri teräslajilla ja sekä jatkuvilla että diskreeteillä muuttujilla. Diskreeteillä muuttujilla optimoitua hitsattua I-profiilista poikkileikkausluokassa 2 tai 3 olevaa pilaria on vertailtu vastaavaan kevyimpään käypään SHS- ja HEA-profiiliseen pilariin. Vertailtavissa tapauksissa kiepahdus ja heikomman suunnan nurjahdus ovat tukemattomia, vahvemman suunnan nurjahduspituutena on 2L tai 0.7L, pilarin pituus on 6 m, 8 m tai 10 m, kuormitustapaukset ovat kuvan 6.5 tapauksien 1-3 mukaiset ja teräslajeina ovat S355 ja S700.

Kun vertaillaan keskenään optimoitua hitsattua I-profiilia sekä vastaaville kuormituksille kevyimpiä käypiä HEA- ja SHS-profiileja, huomataan, että hitsattu optimoitu I-profiili on aina kevyin pilari. SHS-profiilit ovat lähes kaikissa tapauksissa HEA-profiileja kevyempiä, kun pilarin pituus on 6 m tai 8 m. Pisimmällä tutkitulla 10 m ja pilarilla vahvemman suunnan

nan nurjahduspituudella 0.7L HEA-profiilit ovat kevyempiä kuin SHS-profiilit. Kun pilarin pituus on 10 m ja vahvemman suunnan nurjahduspituutena on 2L, SSAB:n valikoimasta ei löydy käypää SHS-profiilia.

Tutkimuskysymyksenä on ollut, saavutetaanko kaksoissymmetrisellä hitsatulla I-profiilisella pilarilla hyötyä painon kannalta. Tutkimuksen laskentatulosten perusteella voidaan sanoa, että painon kannalta on järkevää käyttää hitsattuja I-profiileita pilareina. Hitsattujen I-pilareiden painoero HEA- ja SHS-profiileihin verrattuna korostuu pisimmillä tutkituilla pilareilla, eli 10 m:n pilareilla. Tästä voidaan päätellä, että mitä pidempi pilari on, sitä enemmän optimoinnilla saavutetaan hyötyä painon suhteen. Lyhyemmillä pilareilla painoero ei ole yhtä suuri kuin pisimmillä pilareilla. Laskentatapausten perusteella pilarille käytetty menetelmä näyttäisi sopivan hyvin pilarin optimointitehtävän ratkaisemiseen.

Tässä tutkimuksessa on tutkittu poikkileikkausluokkien 2 ja 3 profiileita, mutta voitaisiin myös tutkia, saavutettaisiinko poikkileikkausluokan 4 profiilia käyttämällä vielä kevyempiä pilareita. Massaoptimoinnin lisäksi kannattaisi tehdä vielä hitsattujen pilarien kustannusoptimointi, jotta saataisiin tietää kokonaiskustannukset. Tällöin voitaisiin vertailla hitsatun pilarin kokonaiskustannuksia valmiiden pilarien hintoihin ja saataisiin selville, onko hitsattu pilari varmasti taloudellinen rakenne.

Kehällä on tutkittu neljää erilaista laskentatapausta kahdella eri teräksellä. Teräslajit ovat S355 ja S700. Ristikon jänneväli on 24 m tai 36 m ja rakenteen vapaa korkeus on 6 m tai 8 m. Kehän optimointituloksista ei voida tehdä yhtä suoraa päätelmiä kuin yksittäisen pilarin optimoinnista. Kehällä ei myöskään ole tutkittu niin paljon eri tapauksia, että voitaisiin tehdä kattavia johtopäätöksiä. Käytetyt algoritmit eivät ole tässä työssä olleet tarkoituksensa sopivimpia, eikä niillä saada aina käypiä tuloksia. Kehää pitäisi tutkia vielä lisää liitosten geometriaehtojen kannalta, jotta niistä saataisiin eurokoodien vaatimusten mukaisia. Kehän optimoinnissa olisi myös mielekästä tutkia, miten eri algoritmien käyttö eri vaiheissa vaikuttaa tulokseen ja laskenta-aikaan.



## LÄHTEET

- [1] Väisänen, P. *Teräs perustietoa arkkitehtipiskelijalle*. Espoo: TKK, arkkitehtiosasto, rakennusoppi, 2007. 47 s. ISBN: 978-951-22-8650-8.
- [2] Ongelin, P. ja Valkonen, I. *Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja*. Rautaruukki Oyj, 2010. 610 s. ISBN: 978-952-5010-02-2. URL: [http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010\\_PDF-versio.pdf](http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010_PDF-versio.pdf).
- [3] Ongelin, P. ja Valkonen, I. *SSAB Domex Tube Rakenneputket EN 1993 -käsikirja*. SSAB Europe Oy, 2016. 690 s. ISBN: 978-952-93-7447-2.
- [4] Jalkanen, J. Tubular truss optimization using heuristic algorithms. Tohtorinväitöskirja. Tampere: Tampere University of Technology, 2007. 124 s.
- [5] Balling, R. Optimal steel frame design by simulated annealing. *Journal of Structural Engineering* 117.6 (1991), s. 1780–1795.
- [6] Hager, K. ja Balling, R. New Approach for Discrete Structural Optimization. *Journal of Structural Engineering* 114.5 (1988), s. 1120–1134.
- [7] Thanedar, P. B. ja Vanderplaats, G. N. Survey of Discrete Variable Optimization for Structural Design. *Journal of Structural Engineering* 121.2 (1995), s. 301–306.
- [8] Greiner, D., Winter, G. ja Emperador, J. M. Optimising frame structures by different strategies of genetic algorithms. *Finite Elements in Analysis and Design* 37.5 (2001), s. 381–402.
- [9] EN 1993-1-1. *Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005, 101 s.
- [10] EN 1993-1-8. *Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005, 150 s.
- [11] Suomen rakentamismääräyskokoelma. *Rakenteiden lujuus ja vakaus. Teräsrakenteet*. Helsinki: Ympäristöministeriö, 2019, 95 s.
- [12] EN 1991-1-1. *Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2002, 73 s.
- [13] EN 1993-1-12. *Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-12: Laajennus teräslajeihin S700 asti*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2007, 13 s.
- [14] Silva, L. S. d., Simões, R. ja Gervásio, H. *Design of steel structures: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1 - General rules and rules for buildings*. Yhteistyössä E. C. for Constructional Steelwork. 1. ed., revised 2. impr. ECCS Eurocode design manuals. Brussels: ECCS, 2013. 438 s. ISBN: 978-92-9147-115-7.

- [15] Belegundu, A. D. ja Chandrupatla, T. R. *Optimization concepts and applications in engineering*. New York: Cambridge University Press, 2011. 459 s. ISBN: 978-1-139-03780-8.
- [16] Arora, J. S. *Introduction to Optimum Design*. 2. painos. Elsevier Science & Technology, 2004. 751 s. ISBN: 978-0-08-047025-2.
- [17] Pitkäranta, J. *CALCULUS FENNICUS TTK:n 1. lukuvuoden laaja matematiikka*. Avoimet oppimateriaalit ry, 2015. 1040 s. ISBN: 978-952-7010-13-6. URL: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/123037/mod\\_resource/content/2/calculusfennicus.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/123037/mod_resource/content/2/calculusfennicus.pdf).
- [18] Mela, K. *Mixed Variable Formulations for Truss Topology Optimization*. Tohtorinväitöskirja. Tampere: Tampere University of Technology, 2013. 150 s.
- [19] Blum, C. ja Roli, A. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys* 35.3 (2003), s. 268–308. URL: [https://www.iiia.csic.es/~christian.blum/downloads/blum\\_rol\\_i\\_2003.pdf](https://www.iiia.csic.es/~christian.blum/downloads/blum_rol_i_2003.pdf).
- [20] Tiainen, T. ja Mela, K. Kaksivaiheinen menettely epälineaarisen diskreetin teräsrakenteiden optimointitehtävän ratkaisemiseksi. *Rakenteiden Mekaniikka* 50.3 (2017), s. 118–121.
- [21] Conn, A. R., Gould, N. I. M. ja Toint, P. L. *Trust-region methods*. MPS-SIAM series on optimization. Philadelphia, PA: Society for Industrial ja Applied Mathematics, 2000. 959 s. ISBN: 978-0-89871-460-9.
- [22] Chinneck, J. W. Chapter 13: Binary and Mixed-Integer Programming. *Practical Optimization* (2016), 11 s.
- [23] Haataja, J. *Optimointitehtävien ratkaiseminen*. Espoo: CSC-Tieteellinen laskenta, 2004. ISBN: 978-952-9821-95-2.
- [24] Taha, H. A. *Operations research: an introduction*. 8th ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall, 2007. 813 s. ISBN: 978-0-13-188923-1.
- [25] Bouhmala, N., Hjelmervik, K. ja Øvergaard, K. I. A Generalized Variable Neighborhood Search For Combinatorial Optimization Problems. *Electronic Notes in Discrete Mathematics* 47 (2014), s. 45–52.
- [26] Hansen, P., Mladenovic, N. ja Pérez, J. A. M. Variable neighbourhood search: methods and applications. *A Quarterly Journal of Operations Research* 175 (2009), s. 367–407.
- [27] EN 1990. *Eurocode: Rakenteiden suunnitteluperusteet*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006, 186 s.

## A JATKUVIEN JA DISKREETTIEN MUUTTUJIEN PILARIEN OPTIMOINTITULOKSET

Jatkuvien ja diskreettien muuttujien pilarien optimointitulokset. Taulukkoon on koottu lähtötietoja sekä tuloksia. Tuloksien osalta on esitetty tuloksen käyppyy, kohdefunktion arvo (yksikkönä kg) sekä tuloksena saadut poikkileikkausmitat (yksikkönä mm). Lähtötietoina ovat ristikon pysty- ja vaakakuormat (yksikkönä N) pilarille yläpään pistekuormana. Pilarien pituuden yksikkönä on mm ja nurjahduspituus on kerroin, jolla pilarin pituus kerrotaan. Pystykuormat on laskettu ristikon jänneväliltä (yksikkönä mm), joka on lähtötietona taulukossa. Kiepahdus ja heikomman suunnan nurjahdus ovat laskennassa joko tuettuja *False* tai tukemattomia *True*. Tulokset on esitetty erikseen teräksille S355, S500 ja S700.

## S355, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

Käypyy	Iteraatioiden määrä	Kohdefunktion arvo	Ristikön jänneväli	Pilarin pituus	Pystykuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Vaakakuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Nurjahduspituus	Heikkomman suunnan nurjahdus (tuettu=False, tukematon=True)	Kiepahdus (tuettu=False, tukematon=True)	laipan poikkileikkausluokka	uuman poikkileikkausluokka	poikkileikkauksen korkeus	uuman paksuus	laipan leveys	laipan paksuus
True	18	255.97	24000	6000	-271200	783	2	True	True	3	3	265.56	6.85	216.95	8.60
True	22	255.97	24000	6000	-271200	783	2	False	True	3	3	265.56	6.85	216.96	8.60
True	17	252.59	24000	6000	-271200	783	2	True	False	3	3	271.51	7.04	212.51	8.40
True	201	237.51	24000	6000	-271200	783	2	False	False	3	3	335.79	8.98	145.70	7.42
True	23	271.71	30000	6000	-339000	979	2	True	True	3	3	276.90	7.17	221.93	8.81
True	18	263.56	30000	6000	-339000	979	2	False	True	3	3	292.74	7.67	210.23	8.27
True	25	271.71	30000	6000	-339000	979	2	True	False	3	3	276.90	7.17	221.93	8.81
True	201	252.93	30000	6000	-339000	979	2	False	False	3	3	347.01	9.35	168.65	6.67
True	18	289.59	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	3	3	282.31	7.31	230.19	9.16
True	21	273.21	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	3	3	317.20	8.40	204.60	7.99
True	20	289.59	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	3	3	282.31	7.31	230.19	9.16
True	201	267.42	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	3	3	359.26	9.64	151.32	7.81
True	201	524.20	24000	8000	-271200	783	2	True	True	3	3	277.19	6.91	242.86	13.63
True	201	523.98	24000	8000	-271200	783	2	False	True	3	3	270.65	6.70	243.97	13.76
True	201	455.77	24000	8000	-271200	783	2	True	False	3	3	318.27	8.23	209.71	11.51
True	201	438.30	24000	8000	-271200	783	2	False	False	3	3	391.76	10.60	192.52	7.77
True	201	528.68	30000	8000	-339000	979	2	True	True	3	3	294.90	7.43	239.68	13.40
True	201	530.41	30000	8000	-339000	979	2	False	True	3	3	298.57	7.56	239.13	13.36
True	201	491.13	30000	8000	-339000	979	2	True	False	3	3	322.22	8.31	220.04	12.14
True	201	463.20	30000	8000	-339000	979	2	False	False	3	3	405.92	10.95	177.11	8.82
True	29	527.19	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	3	3	329.51	8.60	267.45	10.74
True	201	536.90	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	3	3	317.16	8.11	235.80	13.12
True	201	552.55	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	3	3	312.56	7.95	242.83	13.44
True	201	486.68	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	3	3	416.75	11.30	196.26	8.22
True	201	909.09	24000	10000	-271200	783	2	True	True	3	3	326.73	8.21	284.43	16.11
True	201	933.23	24000	10000	-271200	783	2	False	True	3	3	286.51	6.66	228.01	22.54
True	161	744.86	24000	10000	-271200	783	2	True	False	3	3	369.29	9.75	275.92	11.06
True	201	709.62	24000	10000	-271200	783	2	False	False	3	3	443.77	12.05	219.52	8.90
True	201	941.01	30000	10000	-339000	979	2	True	True	3	3	309.51	7.16	199.25	25.44
True	201	941.07	30000	10000	-339000	979	2	False	True	3	3	309.44	7.15	198.59	25.53
True	155	792.37	30000	10000	-339000	979	2	True	False	3	3	373.67	9.84	287.33	11.56
True	201	746.34	30000	10000	-339000	979	2	False	False	3	3	457.74	12.45	220.80	9.14
True	201	917.05	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	3	3	334.25	8.43	284.14	16.07
True	201	950.94	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	3	3	330.68	7.68	184.24	27.12
True	25	836.64	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	3	3	378.58	9.96	297.19	11.99
True	201	780.73	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	3	3	471.59	12.80	208.95	9.96
True	23	265.78	24000	6000	-271200	783	2	True	True	2	2	252.55	7.03	191.61	10.47
True	17	265.78	24000	6000	-271200	783	2	False	True	2	2	252.55	7.03	191.61	10.47
True	18	255.93	24000	6000	-271200	783	2	True	False	2	2	265.91	7.51	181.97	9.85
True	75	233.64	24000	6000	-271200	783	2	False	False	2	2	341.17	10.02	100.00	8.56
True	20	277.17	30000	6000	-339000	979	2	True	True	2	2	270.47	7.62	191.23	10.41

## S355, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

True	23	273.07	30000	6000	-339000	979	2	False	True	2	2	276.34	7.82	187.03	10.14
True	20	277.17	30000	6000	-339000	979	2	True	False	2	2	270.47	7.62	191.23	10.41
True	201	249.92	30000	6000	-339000	979	2	False	False	2	2	356.36	10.54	105.31	8.18
True	20	296.94	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	2	2	275.13	7.74	199.27	10.90
True	19	281.83	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	2	2	297.87	8.54	183.06	9.86
True	19	296.94	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	2	2	275.13	7.74	199.27	10.90
True	201	264.88	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	2	2	365.91	10.77	100.53	9.37
True	20	531.97	24000	8000	-271200	783	2	True	True	2	2	269.42	7.37	244.25	13.69
True	19	531.97	24000	8000	-271200	783	2	False	True	2	2	269.42	7.37	244.25	13.69
True	21	466.68	24000	8000	-271200	783	2	True	False	2	2	315.73	9.01	209.36	11.44
True	201	428.61	24000	8000	-271200	783	2	False	False	2	2	400.35	11.71	100.00	12.10
True	23	538.23	30000	8000	-339000	979	2	True	True	2	2	293.44	8.17	239.46	13.34
True	20	538.23	30000	8000	-339000	979	2	False	True	2	2	293.44	8.17	239.46	13.34
True	22	502.40	30000	8000	-339000	979	2	True	False	2	2	319.77	9.10	219.77	12.08
True	86	454.89	30000	8000	-339000	979	2	False	False	2	2	413.28	12.08	100.00	12.80
False	201	559.28	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	2	2	310.89	8.73	240.34	13.36
True	18	547.44	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	2	2	315.12	8.89	235.46	13.05
True	21	535.57	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	2	2	324.14	9.21	228.76	12.62
True	185	479.44	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	2	2	424.98	12.42	100.00	13.46
False	201	860.57	24000	10000	-271200	783	2	True	True	2	2	172.67	4.01	300.24	17.34
False	201	919.97	24000	10000	-271200	783	2	False	True	2	2	282.50	7.60	293.84	16.72
True	32	747.43	24000	10000	-271200	783	2	True	False	2	2	362.22	10.43	233.81	12.86
True	109	690.33	24000	10000	-271200	783	2	False	False	2	2	454.89	13.22	100.00	16.02
True	26	923.45	30000	10000	-339000	979	2	True	True	2	2	310.23	8.52	288.09	16.31
True	21	923.46	30000	10000	-339000	979	2	False	True	2	2	310.23	8.52	288.08	16.31
True	26	801.18	30000	10000	-339000	979	2	True	False	2	2	365.70	10.49	245.30	13.56
True	201	731.26	30000	10000	-339000	979	2	False	False	2	2	466.57	13.75	119.81	13.67
True	21	931.67	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	2	2	332.29	9.25	283.89	16.01
True	26	931.66	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	2	2	332.29	9.25	283.89	16.01
True	25	851.10	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	2	2	369.74	10.59	255.18	14.16
True	193	765.43	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	2	2	480.96	13.96	100.00	17.66
True	24	165.81	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	166.06	4.00	191.58	7.61
True	31	119.39	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	163.08	4.00	157.67	6.12
True	27	165.81	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	166.05	4.00	191.58	7.61
True	201	103.95	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	216.18	5.66	118.82	4.35
True	32	182.31	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	166.99	4.00	202.20	8.08
True	35	120.64	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	172.83	4.29	155.50	6.02
True	34	182.31	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	166.99	4.00	202.20	8.08
True	198	113.20	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	226.15	5.94	123.13	4.52
True	21	197.65	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	167.81	4.00	211.58	8.49
True	31	125.48	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	197.99	5.04	150.03	5.74
True	25	197.65	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	167.81	4.00	211.58	8.49
True	201	122.22	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	239.89	6.30	109.63	5.24
True	25	292.57	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	168.92	4.00	224.19	9.04
True	41	241.99	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	168.35	4.04	201.35	8.04
True	26	292.57	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	168.92	4.00	224.19	9.04
True	201	182.97	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	249.52	6.55	117.09	5.79
True	25	320.50	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	169.94	4.00	235.66	9.55
True	40	241.99	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	168.35	4.04	201.35	8.04
True	31	320.50	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	169.93	4.00	235.66	9.55
True	201	196.21	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	257.71	6.82	138.65	5.18
True	201	346.27	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	171.91	4.03	245.54	9.98

## S355, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

True	35	242.52	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	180.10	4.39	198.61	7.90
True	92	346.27	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	171.91	4.03	245.54	9.98
True	81	209.10	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	266.65	7.08	142.52	5.32
True	201	461.73	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	191.71	4.60	250.42	10.17
True	40	421.44	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	192.63	4.66	237.51	9.60
True	38	461.73	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	191.73	4.60	250.42	10.17
True	49	288.52	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	278.43	7.40	150.25	5.65
True	201	503.78	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	193.83	4.63	262.55	10.70
True	81	421.44	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	192.63	4.66	237.51	9.60
True	90	503.78	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	193.83	4.63	262.55	10.70
True	67	306.40	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	287.93	7.67	153.83	5.79
True	201	542.44	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	195.82	4.66	273.19	11.17
True	27	421.44	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	192.64	4.66	237.51	9.60
True	92	542.44	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	195.82	4.66	273.19	11.17
True	53	323.65	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	296.74	7.92	157.24	5.93
True	201	175.98	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	151.70	4.00	170.80	9.38
True	22	122.39	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	152.60	4.00	138.45	7.39
True	201	175.98	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	151.71	4.00	170.80	9.38
True	30	99.24	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	203.39	5.80	100.00	4.92
True	201	194.52	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	154.91	4.00	180.22	9.96
True	29	123.23	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	158.35	4.19	137.51	7.32
False	201	191.23	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	100.00	4.00	183.78	10.18
True	17	107.54	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	217.85	6.27	100.00	4.89
True	201	211.65	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	157.80	4.00	188.49	10.47
True	24	126.69	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	176.33	4.79	134.61	7.11
False	201	218.73	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	106.28	4.00	196.48	10.96
True	26	115.84	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	231.30	6.71	100.00	4.86
True	28	309.99	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	159.94	4.00	198.17	11.06
True	23	246.14	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	157.08	4.00	174.86	9.63
True	24	309.99	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	159.94	4.00	198.17	11.06
True	21	175.00	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	254.21	7.45	100.00	4.82
True	22	341.85	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	161.24	4.00	208.78	11.72
True	25	246.32	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	160.57	4.12	174.24	9.59
True	18	341.85	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	161.25	4.00	208.78	11.72
True	39	187.64	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	263.88	7.75	100.00	5.11
True	27	371.13	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	162.38	4.00	218.07	12.29
True	23	248.06	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	174.88	4.59	171.84	9.41
True	22	371.13	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	162.38	4.00	218.07	12.29
True	122	199.87	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	272.60	8.01	100.00	5.43
True	201	486.66	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	172.56	4.31	222.18	12.52
True	33	427.19	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	175.75	4.48	206.28	11.53
False	201	445.99	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	100.06	4.00	218.48	12.31
True	92	277.87	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	286.78	8.42	100.00	6.14
True	201	535.15	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	174.99	4.35	233.51	13.21
False	201	400.04	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	160.36	4.00	201.58	11.27
False	201	457.03	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	142.32	4.00	217.92	12.28
True	142	295.23	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	296.03	8.70	100.00	6.50
False	201	588.39	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	138.31	4.00	248.84	14.18
True	21	427.25	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	178.69	4.58	205.75	11.49
False	201	479.86	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	134.60	4.00	224.15	12.66
True	49	311.85	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	304.58	8.95	100.00	6.84

## S500, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

Käypyyys	Iteraatioiden määrä	Kohdefunktion arvo	Ristikön jänneväli	Pilarin pituus	Pystykuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Vaakakuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Nurjahduspituus	Heikoman suunnan nurjahdus (tuettu=False, tukematon=True)	Kiepahdus (tuettu=False, tukematon=True)	laipan poikkileikkausluokka	uuman poikkileikkausluokka	poikkileikkauksen korkeus	uuman paksuus	laipan leveys	laipan paksuus
True	24	248.47	24000	6000	-271200	783	2	True	True	3	3	228.45	6.78	203.09	9.49
True	18	248.47	24000	6000	-271200	783	2	False	True	3	3	228.45	6.78	203.09	9.49
True	32	239.44	24000	6000	-271200	783	2	True	False	3	3	239.45	7.20	193.98	8.99
True	201	211.13	24000	6000	-271200	783	2	False	False	3	3	298.03	9.34	122.59	7.50
True	26	258.90	30000	6000	-339000	979	2	True	True	3	3	245.86	7.39	202.52	9.43
True	17	255.16	30000	6000	-339000	979	2	False	True	3	3	250.74	7.58	198.52	9.21
True	20	258.90	30000	6000	-339000	979	2	True	False	3	3	245.86	7.39	202.52	9.43
True	201	226.64	30000	6000	-339000	979	2	False	False	3	3	310.23	9.75	125.88	7.70
True	20	276.90	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	3	3	251.88	7.58	210.00	9.81
True	16	263.17	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	3	3	270.96	8.30	194.53	8.97
True	18	276.91	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	3	3	251.88	7.58	210.00	9.81
True	201	248.98	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	3	3	329.90	10.45	133.27	7.49
True	19	499.44	24000	8000	-271200	783	2	True	True	3	3	244.11	7.13	258.49	12.36
True	24	499.43	24000	8000	-271200	783	2	False	True	3	3	244.10	7.13	258.49	12.36
True	19	438.44	24000	8000	-271200	783	2	True	False	3	3	282.83	8.60	224.74	10.52
True	201	404.72	24000	8000	-271200	783	2	False	False	3	3	354.95	11.21	148.46	8.98
True	19	505.50	30000	8000	-339000	979	2	True	True	3	3	266.76	7.94	253.73	12.07
True	20	505.50	30000	8000	-339000	979	2	False	True	3	3	266.76	7.94	253.73	12.07
True	16	471.66	30000	8000	-339000	979	2	True	False	3	3	289.40	8.79	234.28	11.01
True	201	414.33	30000	8000	-339000	979	2	False	False	3	3	362.08	11.46	147.09	9.03
True	15	514.23	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	3	3	287.36	8.67	249.68	11.82
True	19	514.21	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	3	3	287.35	8.67	249.69	11.82
True	18	502.32	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	3	3	295.69	8.98	242.61	11.43
True	200	434.97	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	3	3	392.66	12.32	100.00	11.91
True	201	870.72	24000	10000	-271200	783	2	True	True	3	3	260.17	7.32	265.47	17.80
True	201	871.06	24000	10000	-271200	783	2	False	True	3	3	258.89	7.26	265.79	17.82
True	18	703.62	24000	10000	-271200	783	2	True	False	3	3	322.78	9.89	252.40	11.90
True	201	654.14	24000	10000	-271200	783	2	False	False	3	3	406.13	12.94	170.82	9.75
True	102	869.61	30000	10000	-339000	979	2	True	True	3	3	282.00	8.28	305.12	14.73
True	201	877.47	30000	10000	-339000	979	2	False	True	3	3	280.00	8.02	262.66	17.54
True	21	754.09	30000	10000	-339000	979	2	True	False	3	3	329.36	10.08	262.86	12.43
True	201	692.79	30000	10000	-339000	979	2	False	False	3	3	415.39	13.20	171.78	10.53
True	192	877.76	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	3	3	302.97	9.03	300.92	14.47
True	201	888.35	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	3	3	299.57	8.72	260.18	17.31
True	21	800.66	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	3	3	335.81	10.28	271.95	12.90
True	201	701.49	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	3	3	421.65	13.43	170.21	10.44
True	24	257.19	24000	6000	-271200	783	2	True	True	2	2	222.02	7.10	177.49	11.40
True	20	257.19	24000	6000	-271200	783	2	False	True	2	2	222.02	7.10	177.49	11.40
True	20	246.49	24000	6000	-271200	783	2	True	False	2	2	232.78	7.57	169.08	10.75
True	95	218.02	24000	6000	-271200	783	2	False	False	2	2	305.07	10.56	100.00	7.86
True	18	268.33	30000	6000	-339000	979	2	True	True	2	2	238.38	7.74	177.48	11.35

## S500, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

True	20	264.72	30000	6000	-339000	979	2	False	True	2	2	242.15	7.90	174.56	11.12
True	18	268.33	30000	6000	-339000	979	2	True	False	2	2	238.38	7.74	177.48	11.35
True	68	234.14	30000	6000	-339000	979	2	False	False	2	2	316.66	10.97	100.00	8.42
True	23	288.45	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	2	2	243.72	7.90	184.78	11.87
True	19	273.03	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	2	2	260.36	8.62	171.93	10.88
True	19	288.45	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	2	2	243.72	7.90	184.78	11.87
True	46	249.07	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	2	2	327.02	11.32	100.00	8.94
True	20	512.13	24000	8000	-271200	783	2	True	True	2	2	240.45	7.56	223.19	14.70
True	20	512.13	24000	8000	-271200	783	2	False	True	2	2	240.45	7.56	223.19	14.70
True	19	448.97	24000	8000	-271200	783	2	True	False	2	2	275.36	9.07	194.88	12.52
True	115	400.00	24000	8000	-271200	783	2	False	False	2	2	357.83	12.34	100.00	11.15
True	20	521.23	30000	8000	-339000	979	2	True	True	2	2	261.33	8.38	220.23	14.42
True	18	521.23	30000	8000	-339000	979	2	False	True	2	2	261.33	8.38	220.23	14.42
True	19	486.50	30000	8000	-339000	979	2	True	False	2	2	281.01	9.23	204.39	13.20
True	79	427.22	30000	8000	-339000	979	2	False	False	2	2	370.52	12.77	100.00	11.88
False	201	542.16	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	2	2	277.76	9.01	221.21	14.44
True	15	532.00	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	2	2	280.16	9.12	217.70	14.18
True	18	521.04	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	2	2	286.52	9.40	212.61	13.79
True	120	452.39	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	2	2	381.87	13.15	100.00	12.56
True	24	880.18	24000	10000	-271200	783	2	True	True	2	2	257.12	7.96	265.80	17.77
True	17	880.18	24000	10000	-271200	783	2	False	True	2	2	257.12	7.96	265.80	17.77
True	19	717.21	24000	10000	-271200	783	2	True	False	2	2	314.61	10.45	217.88	14.10
True	73	642.88	24000	10000	-271200	783	2	False	False	2	2	406.07	13.91	100.00	14.76
True	17	889.62	30000	10000	-339000	979	2	True	True	2	2	278.82	8.82	262.64	17.48
True	19	889.62	30000	10000	-339000	979	2	False	True	2	2	278.82	8.82	262.64	17.48
True	23	774.52	30000	10000	-339000	979	2	True	False	2	2	320.21	10.61	228.40	14.85
True	70	683.95	30000	10000	-339000	979	2	False	False	2	2	419.75	14.37	100.00	15.66
True	21	902.23	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	2	2	298.32	9.59	260.05	17.24
True	21	902.23	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	2	2	298.32	9.59	260.05	17.24
True	17	827.24	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	2	2	325.79	10.77	237.47	15.50
True	96	721.88	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	2	2	431.99	14.77	100.00	16.51
True	201	162.89	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	144.11	4.00	177.54	8.30
True	38	116.72	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	142.70	4.00	146.56	6.69
True	43	162.89	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	144.10	4.00	177.54	8.30
True	24	88.57	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	189.11	5.79	100.00	4.17
True	77	179.29	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	146.64	4.00	187.01	8.80
True	24	116.72	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	142.70	4.00	146.56	6.69
True	41	179.29	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	146.64	4.00	187.01	8.80
True	69	95.94	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	198.30	6.09	100.00	4.42
True	23	194.37	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	147.79	4.00	195.42	9.24
True	22	117.40	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	147.06	4.16	145.79	6.64
True	23	194.37	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	147.79	4.00	195.42	9.24
True	73	103.04	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	206.13	6.34	100.00	4.70
True	21	288.45	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	149.00	4.00	207.07	9.84
True	19	234.81	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	146.72	4.00	185.15	8.70
True	23	288.45	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	149.00	4.00	207.07	9.84
True	121	159.03	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	220.76	6.79	100.00	5.54
True	23	316.80	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	150.11	4.00	217.72	10.40
True	23	234.81	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	146.72	4.00	185.15	8.70
True	23	316.80	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	150.11	4.00	217.72	10.40
True	201	170.19	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	229.55	7.08	100.69	5.80
True	26	342.79	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	151.08	4.00	227.03	10.88



## S500, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

True	25	235.10	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	149.94	4.11	184.56	8.66
True	23	342.79	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	151.08	4.00	227.03	10.88
True	187	174.65	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	232.92	7.19	100.42	5.94
True	201	455.79	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	166.73	4.53	231.90	11.11
True	33	408.00	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	158.49	4.28	219.72	10.49
True	36	455.79	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	166.73	4.53	231.90	11.11
True	201	253.83	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	247.93	7.72	122.33	5.76
True	201	499.18	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	168.87	4.56	243.34	11.70
True	38	408.00	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	158.49	4.28	219.72	10.49
True	37	499.18	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	168.88	4.56	243.34	11.70
True	201	269.60	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	258.25	8.02	112.00	6.55
True	201	538.84	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	170.83	4.59	253.33	12.22
True	91	408.00	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	158.49	4.28	219.72	10.49
True	31	538.84	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	170.83	4.59	253.33	12.22
True	201	284.56	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	265.84	8.28	115.69	6.63
True	201	176.50	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	127.32	4.00	160.23	10.36
False	201	118.56	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	118.29	4.00	129.66	8.13
False	201	171.35	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	100.00	4.00	160.23	10.36
True	35	91.74	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	160.72	5.17	100.00	5.88
True	201	195.37	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	129.92	4.00	168.95	11.00
True	201	118.32	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	131.81	4.00	127.94	8.01
False	201	189.74	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	100.00	4.00	168.95	11.00
True	30	97.73	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	172.44	5.63	100.00	5.85
True	201	212.68	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	132.18	4.00	176.55	11.55
True	34	120.37	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	144.53	4.40	126.41	7.87
False	201	206.62	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	100.00	4.00	176.55	11.55
True	25	103.71	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	183.28	6.05	100.00	5.82
True	23	311.18	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	142.63	4.00	184.59	12.14
True	22	236.37	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	138.97	4.00	159.54	10.31
True	21	311.18	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	142.63	4.00	184.59	12.14
True	24	158.46	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	207.82	6.99	100.00	5.75
True	21	343.86	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	144.07	4.00	194.48	12.86
True	21	236.37	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	138.97	4.00	159.54	10.31
True	32	343.86	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	144.07	4.00	194.48	12.86
True	20	169.56	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	220.00	7.46	100.00	5.72
True	23	373.74	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	145.32	4.00	203.07	13.49
True	16	238.28	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	149.86	4.43	158.16	10.18
True	21	373.74	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	145.32	4.00	203.07	13.49
True	20	180.25	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	231.03	7.89	100.00	5.69
True	201	488.97	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	151.80	4.23	207.14	13.77
True	33	408.98	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	145.63	4.09	189.16	12.47
False	201	492.31	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	100.05	4.00	211.82	14.13
True	24	249.96	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	249.97	8.62	100.00	5.63
True	201	539.29	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	154.29	4.26	217.83	14.54
True	26	408.99	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	146.73	4.13	189.00	12.45
False	201	535.12	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	100.06	4.00	220.93	14.79
True	32	266.60	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	260.15	9.00	100.00	5.80
True	201	585.20	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	156.51	4.30	227.12	15.22
True	26	410.00	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	157.63	4.56	187.49	12.31
False	201	557.55	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	100.06	4.00	225.54	15.13
True	38	282.26	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	268.00	9.27	100.00	6.12

## S700, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

Käypyyys	Iteraatioiden määrä	Kohdefunktion arvo	Ristikön jänneväli	Pilarin pituus	Pystykuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Vaakakuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Nurjahduspituus	Heikomman suunnan nurjahdus (tuettu=False, tukematon=True)	Kiepahdus (tuettu=False, tukematon=True)	laipan poikkileikkausluokka	uuman poikkileikkausluokka	poikkileikkauksen korkeus	uuman paksuus	laipan leveys	laipan paksuus
True	21	244.26	24000	6000	-271200	783	2	True	True	3	3	205.43	7.01	188.53	10.32
True	21	244.26	24000	6000	-271200	783	2	False	True	3	3	205.43	7.01	188.53	10.32
True	20	232.68	24000	6000	-271200	783	2	True	False	3	3	216.53	7.52	178.64	9.68
True	201	201.99	24000	6000	-271200	783	2	False	False	3	3	274.69	10.08	109.75	7.62
True	35	253.05	30000	6000	-339000	979	2	True	True	3	3	223.63	7.77	186.68	10.16
True	20	251.54	30000	6000	-339000	979	2	False	True	3	3	225.16	7.84	185.34	10.07
True	20	253.05	30000	6000	-339000	979	2	True	False	3	3	223.63	7.77	186.68	10.16
True	201	224.73	30000	6000	-339000	979	2	False	False	3	3	290.44	10.71	116.15	7.88
True	23	271.78	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	3	3	230.10	8.01	193.72	10.58
True	20	259.61	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	3	3	243.13	8.60	182.40	9.84
True	17	271.78	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	3	3	230.10	8.01	193.72	10.58
True	201	233.18	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	3	3	296.34	10.93	116.53	8.11
True	24	487.96	24000	8000	-271200	783	2	True	True	3	3	221.91	7.44	237.40	13.30
True	29	487.96	24000	8000	-271200	783	2	False	True	3	3	221.91	7.44	237.40	13.30
True	20	424.87	24000	8000	-271200	783	2	True	False	3	3	254.49	8.94	206.97	11.33
True	201	369.36	24000	8000	-271200	783	2	False	False	3	3	327.37	12.18	124.28	8.45
True	17	496.85	30000	8000	-339000	979	2	True	True	3	3	242.27	8.30	234.25	13.06
True	23	496.84	30000	8000	-339000	979	2	False	True	3	3	242.27	8.30	234.26	13.06
True	20	460.09	30000	8000	-339000	979	2	True	False	3	3	262.11	9.21	216.00	11.87
True	201	411.40	30000	8000	-339000	979	2	False	False	3	3	338.16	12.54	135.50	9.39
True	18	507.31	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	3	3	260.76	9.08	231.49	12.84
True	22	507.31	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	3	3	260.76	9.08	231.49	12.84
True	22	492.45	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	3	3	269.13	9.46	223.89	12.35
True	201	436.84	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	3	3	349.98	13.03	140.26	9.42
True	29	840.45	24000	10000	-271200	783	2	True	True	3	3	236.87	7.83	282.95	16.09
True	27	840.45	24000	10000	-271200	783	2	False	True	3	3	236.87	7.83	282.95	16.09
True	15	679.69	24000	10000	-271200	783	2	True	False	3	3	289.13	10.25	232.38	12.82
True	201	594.50	24000	10000	-271200	783	2	False	False	3	3	361.68	13.43	144.91	10.32
True	25	849.90	30000	10000	-339000	979	2	True	True	3	3	257.89	8.72	279.68	15.83
True	23	849.90	30000	10000	-339000	979	2	False	True	3	3	257.89	8.72	279.68	15.83
True	21	733.66	30000	10000	-339000	979	2	True	False	3	3	297.13	10.53	242.30	13.41
True	201	633.39	30000	10000	-339000	979	2	False	False	3	3	396.05	14.76	112.44	11.38
True	23	862.28	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	3	3	276.94	9.52	276.92	15.61
True	16	862.29	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	3	3	276.94	9.52	276.92	15.61
True	27	783.23	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	3	3	304.56	10.79	250.94	13.93
True	201	676.37	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	3	3	388.28	14.48	151.28	10.95
True	22	251.41	24000	6000	-271200	783	2	True	True	2	2	202.40	7.44	163.69	12.26
True	20	251.41	24000	6000	-271200	783	2	False	True	2	2	202.40	7.44	163.69	12.26
True	20	242.81	24000	6000	-271200	783	2	True	False	2	2	209.41	7.80	157.89	11.73
True	48	209.57	24000	6000	-271200	783	2	False	False	2	2	276.96	11.25	100.00	7.51
True	16	265.68	30000	6000	-339000	979	2	True	True	2	2	215.81	8.03	165.72	12.39

## S700, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

True	21	259.91	30000	6000	-339000	979	2	False	True	2	2	220.67	8.29	161.74	12.02
True	19	265.67	30000	6000	-339000	979	2	True	False	2	2	215.81	8.03	165.72	12.39
True	112	226.43	30000	6000	-339000	979	2	False	False	2	2	288.30	11.72	100.00	8.10
True	17	286.63	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	2	2	221.69	8.25	172.53	12.96
True	18	268.78	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	2	2	237.20	9.06	159.88	11.79
True	16	286.64	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	2	2	221.69	8.25	172.53	12.96
True	39	241.94	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	2	2	298.35	12.12	100.00	8.65
True	20	497.50	24000	8000	-271200	783	2	True	True	2	2	220.80	7.96	204.15	15.71
True	20	497.50	24000	8000	-271200	783	2	False	True	2	2	220.80	7.96	204.15	15.71
True	18	441.22	24000	8000	-271200	783	2	True	False	2	2	246.46	9.31	182.11	13.69
True	128	383.24	24000	8000	-271200	783	2	False	False	2	2	324.31	13.12	100.00	10.63
True	21	509.34	30000	8000	-339000	979	2	True	True	2	2	240.03	8.85	202.28	15.47
True	20	509.34	30000	8000	-339000	979	2	False	True	2	2	240.03	8.85	202.28	15.47
True	16	480.96	30000	8000	-339000	979	2	True	False	2	2	253.29	9.55	191.00	14.44
True	119	412.19	30000	8000	-339000	979	2	False	False	2	2	336.94	13.62	100.00	11.42
True	23	522.08	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	2	2	257.36	9.66	200.61	15.26
True	19	522.08	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	2	2	257.36	9.66	200.62	15.26
True	17	517.35	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	2	2	259.62	9.78	198.71	15.08
True	59	438.78	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	2	2	348.14	14.07	100.00	12.16
True	22	850.25	24000	10000	-271200	783	2	True	True	2	2	237.06	8.41	241.89	18.93
True	24	850.25	24000	10000	-271200	783	2	False	True	2	2	237.06	8.41	241.89	18.93
True	18	702.85	24000	10000	-271200	783	2	True	False	2	2	280.33	10.69	203.68	15.43
True	177	613.70	24000	10000	-271200	783	2	False	False	2	2	367.40	14.77	100.00	14.03
True	24	864.93	30000	10000	-339000	979	2	True	True	2	2	257.24	9.34	239.94	18.68
True	16	864.93	30000	10000	-339000	979	2	False	True	2	2	257.24	9.34	239.94	18.68
True	17	763.99	30000	10000	-339000	979	2	True	False	2	2	287.44	10.94	213.53	16.26
True	201	657.80	30000	10000	-339000	979	2	False	False	2	2	381.16	15.30	100.00	15.03
True	18	881.50	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	2	2	275.36	10.19	238.30	18.46
True	18	881.50	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	2	2	275.36	10.19	238.30	18.46
True	17	819.96	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	2	2	294.12	11.17	222.03	16.98
True	120	698.29	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	2	2	393.38	15.77	100.00	15.97
True	201	163.43	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	126.07	4.00	166.33	9.13
True	43	114.02	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	122.33	4.00	136.44	7.29
True	90	163.43	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	126.07	4.00	166.33	9.13
True	33	81.83	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	151.69	5.24	100.01	4.97
True	201	180.29	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	128.41	4.00	175.19	9.68
True	48	114.02	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	122.33	4.00	136.44	7.29
True	43	180.29	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	128.40	4.00	175.19	9.68
True	37	87.64	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	162.84	5.70	100.00	4.94
True	172	195.72	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	130.47	4.00	182.90	10.16
True	29	114.31	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	127.50	4.06	135.77	7.25
True	44	195.72	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	130.47	4.00	182.90	10.16
True	28	93.30	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	172.89	6.12	100.00	4.92
True	22	290.05	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	133.07	4.00	193.27	10.79
True	24	228.17	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	130.22	4.00	170.12	9.37
True	25	290.05	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	133.07	4.00	193.27	10.79
True	28	145.42	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	197.85	7.15	100.00	4.85
True	25	319.55	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	134.31	4.00	203.34	11.42
True	23	228.17	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	130.22	4.00	170.12	9.37
True	25	319.55	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	134.31	4.00	203.34	11.42
True	47	155.97	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	206.80	7.50	100.00	5.04
True	19	346.48	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	135.40	4.00	212.09	11.95

## S700, Jatkuvat muuttujat, trust region -algoritmi

True	29	229.09	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	135.48	4.22	169.41	9.31
True	25	346.47	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	135.39	4.00	212.09	11.96
True	48	165.83	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	214.08	7.78	100.00	5.28
True	201	458.16	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	147.44	4.47	216.59	12.20
True	25	394.91	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	134.17	4.00	202.13	11.34
True	32	458.16	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	147.44	4.47	216.59	12.20
True	201	233.17	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	225.05	8.17	100.96	6.10
True	201	503.68	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	149.71	4.51	227.49	12.87
True	34	394.91	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	134.17	4.00	202.13	11.34
True	35	503.68	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	149.71	4.51	227.49	12.87
True	115	248.76	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	233.35	8.47	100.00	6.51
True	201	545.15	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	151.73	4.55	236.98	13.45
True	27	395.73	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	143.71	4.40	200.71	11.23
True	102	545.15	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	151.72	4.55	236.98	13.45
True	201	257.49	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	237.77	8.64	100.29	6.69
True	201	179.41	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	112.46	4.00	150.76	11.44
True	27	114.30	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	106.73	4.00	118.95	8.70
False	201	177.06	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	100.00	4.00	150.76	11.44
True	32	91.13	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	129.60	4.61	100.00	7.01
True	201	198.96	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	114.87	4.00	158.93	12.15
True	24	114.50	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	117.50	4.00	117.90	8.61
False	201	196.15	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	100.00	4.00	158.93	12.15
True	33	95.91	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	140.13	5.09	100.00	6.97
True	201	216.81	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	117.00	4.00	166.02	12.76
True	24	116.41	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	127.27	4.37	117.04	8.50
False	201	213.60	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	100.00	4.00	166.02	12.76
True	42	100.66	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	149.70	5.53	100.00	6.93
True	23	317.38	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	129.00	4.00	173.38	13.40
True	199	229.10	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	132.90	4.00	100.00	16.23
True	19	317.38	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	129.00	4.00	173.38	13.40
True	39	151.09	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	172.03	6.55	100.00	6.84
True	18	351.55	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	130.61	4.00	182.70	14.20
True	151	229.10	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	132.90	4.00	100.00	16.23
True	22	351.55	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	130.61	4.00	182.70	14.20
True	31	160.74	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	183.35	7.07	100.00	6.80
True	20	382.70	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	132.01	4.00	190.79	14.90
True	45	231.05	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	140.78	4.29	100.00	16.06
True	19	382.70	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	132.01	4.00	190.79	14.90
True	26	169.98	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	193.45	7.53	100.00	6.76
True	201	498.61	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	135.73	4.14	194.50	15.21
True	36	393.19	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	128.87	4.00	172.58	13.33
False	201	514.06	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	107.14	4.00	199.51	15.65
True	21	234.01	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	210.77	8.32	100.00	6.69
False	201	542.11	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	111.55	4.00	204.66	16.10
True	201	394.08	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	138.37	4.14	138.58	16.54
False	201	630.41	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	104.25	4.00	221.22	17.52
True	19	249.77	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	222.46	8.86	100.00	6.64
True	201	599.71	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	140.61	4.21	213.48	16.84
True	23	396.65	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	145.14	4.76	170.97	13.12
False	201	587.51	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	114.33	4.00	212.97	16.81
True	18	264.59	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	232.84	9.33	100.00	6.60

## S355, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

Käypyyys	Kohdefunktion arvo	Ristikön jänneväli	Pilarin pituus	Pystykuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Vaakakuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Nurjahduspituus	Heikomman suunnan nurjahdus (tuettu=False, tukematon=True)	Kiepahdus (tuettu=False, tukematon=True)	laipan poikkileikkausluokka	uuman poikkileikkausluokka	poikkileikkauksen korkeus	uuman paksuus	laipan leveys	laipan paksuus
True	288.25	24000	6000	-271200	783	2	True	True	3	3	260.00	8.00	210.00	10.00
True	288.25	24000	6000	-271200	783	2	False	True	3	3	260.00	8.00	210.00	10.00
True	278.83	24000	6000	-271200	783	2	True	False	3	3	260.00	8.00	200.00	10.00
True	243.98	24000	6000	-271200	783	2	False	False	3	3	350.00	10.00	150.00	6.00
True	292.02	30000	6000	-339000	979	2	True	True	3	3	270.00	8.00	210.00	10.00
True	286.37	30000	6000	-339000	979	2	False	True	3	3	280.00	8.00	200.00	10.00
True	292.02	30000	6000	-339000	979	2	True	False	3	3	270.00	8.00	210.00	10.00
True	273.18	30000	6000	-339000	979	2	False	False	3	3	340.00	10.00	160.00	8.00
True	305.21	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	3	3	280.00	8.00	220.00	10.00
True	293.90	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	3	3	320.00	10.00	200.00	8.00
True	305.21	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	3	3	280.00	8.00	220.00	10.00
True	277.89	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	3	3	350.00	10.00	160.00	8.00
True	535.56	24000	8000	-271200	783	2	True	True	3	3	280.00	8.00	270.00	12.00
True	535.56	24000	8000	-271200	783	2	False	True	3	3	280.00	8.00	270.00	12.00
True	496.12	24000	8000	-271200	783	2	True	False	3	3	330.00	10.00	240.00	10.00
True	462.71	24000	8000	-271200	783	2	False	False	3	3	390.00	12.00	180.00	8.00
True	535.56	30000	8000	-339000	979	2	True	True	3	3	310.00	8.00	260.00	12.00
True	535.56	30000	8000	-339000	979	2	False	True	3	3	310.00	8.00	260.00	12.00
True	562.69	30000	8000	-339000	979	2	True	False	3	3	320.00	10.00	250.00	12.00
True	487.83	30000	8000	-339000	979	2	False	False	3	3	410.00	12.00	190.00	8.00
True	577.76	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	3	3	320.00	10.00	260.00	12.00
True	577.76	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	3	3	320.00	10.00	260.00	12.00
True	577.76	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	3	3	320.00	10.00	260.00	12.00
True	492.85	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	3	3	430.00	12.00	180.00	8.00
True	940.43	24000	10000	-271200	783	2	True	True	3	3	330.00	10.00	320.00	14.00
True	940.43	24000	10000	-271200	783	2	False	True	3	3	330.00	10.00	320.00	14.00
True	772.44	24000	10000	-271200	783	2	True	False	3	3	360.00	10.00	270.00	12.00
True	725.34	24000	10000	-271200	783	2	False	False	3	3	440.00	12.00	210.00	10.00
True	940.43	30000	10000	-339000	979	2	True	True	3	3	330.00	10.00	320.00	14.00
True	940.43	30000	10000	-339000	979	2	False	True	3	3	330.00	10.00	320.00	14.00
True	817.97	30000	10000	-339000	979	2	True	False	3	3	370.00	10.00	290.00	12.00
True	797.56	30000	10000	-339000	979	2	False	False	3	3	460.00	14.00	200.00	10.00
True	948.28	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	3	3	340.00	10.00	320.00	14.00
True	948.28	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	3	3	340.00	10.00	320.00	14.00
True	891.13	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	3	3	390.00	12.00	290.00	12.00
True	824.25	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	3	3	470.00	14.00	210.00	10.00
True	288.63	24000	6000	-271200	783	2	True	True	2	2	250.00	8.00	180.00	12.00
True	288.63	24000	6000	-271200	783	2	False	True	2	2	250.00	8.00	180.00	12.00
True	263.76	24000	6000	-271200	783	2	True	False	2	2	270.00	8.00	180.00	10.00
True	238.33	24000	6000	-271200	783	2	False	False	2	2	330.00	10.00	120.00	8.00
True	296.16	30000	6000	-339000	979	2	True	True	2	2	270.00	8.00	180.00	12.00

## S355, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

True	296.16	30000	6000	-339000	979	2	False	True	2	2	270.00	8.00	180.00	12.00
True	296.16	30000	6000	-339000	979	2	True	False	2	2	270.00	8.00	180.00	12.00
True	254.34	30000	6000	-339000	979	2	False	False	2	2	340.00	10.00	110.00	10.00
True	311.24	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	2	2	280.00	8.00	190.00	12.00
True	301.44	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	2	2	300.00	10.00	180.00	10.00
True	311.24	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	2	2	280.00	8.00	190.00	12.00
True	275.44	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	2	2	370.00	12.00	100.00	8.00
True	553.90	24000	8000	-271200	783	2	True	True	2	2	270.00	8.00	230.00	15.00
True	543.60	24000	8000	-271200	783	2	False	True	2	2	270.00	8.00	240.00	14.00
True	496.12	24000	8000	-271200	783	2	True	False	2	2	310.00	10.00	210.00	12.00
True	434.07	24000	8000	-271200	783	2	False	False	2	2	400.00	12.00	100.00	12.00
True	563.94	30000	8000	-339000	979	2	True	True	2	2	290.00	8.00	230.00	15.00
True	563.94	30000	8000	-339000	979	2	False	True	2	2	290.00	8.00	230.00	15.00
True	546.36	30000	8000	-339000	979	2	True	False	2	2	310.00	10.00	210.00	14.00
True	463.72	30000	8000	-339000	979	2	False	False	2	2	410.00	12.00	100.00	14.00
True	581.53	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	2	2	310.00	10.00	230.00	14.00
True	581.53	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	2	2	310.00	10.00	230.00	14.00
True	570.22	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	2	2	320.00	10.00	220.00	14.00
True	493.61	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	2	2	410.00	12.00	110.00	15.00
False		24000	10000	-271200	783	2	True	True	2	2				
False		24000	10000	-271200	783	2	False	True	2	2				
True	780.29	24000	10000	-271200	783	2	True	False	2	2	350.00	10.00	240.00	14.00
True	708.07	24000	10000	-271200	783	2	False	False	2	2	460.00	14.00	100.00	15.00
True	998.52	30000	10000	-339000	979	2	True	True	2	2	300.00	10.00	280.00	18.00
True	998.52	30000	10000	-339000	979	2	False	True	2	2	300.00	10.00	280.00	18.00
True	849.68	30000	10000	-339000	979	2	True	False	2	2	370.00	12.00	240.00	14.00
True	742.61	30000	10000	-339000	979	2	False	False	2	2	470.00	14.00	110.00	15.00
True	945.14	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	2	2	340.00	10.00	280.00	16.00
True	945.14	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	2	2	340.00	10.00	280.00	16.00
True	899.61	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	2	2	360.00	12.00	250.00	15.00
True	770.56	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	2	2	480.00	14.00	100.00	18.00
True	170.31	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	160.00	4.00	190.00	8.00
True	138.29	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	150.00	4.00	150.00	8.00
True	170.31	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	160.00	4.00	190.00	8.00
True	108.33	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	210.00	6.00	110.00	5.00
True	189.34	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	180.00	5.00	200.00	8.00
True	132.26	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	180.00	6.00	150.00	6.00
True	189.34	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	180.00	5.00	200.00	8.00
True	115.87	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	220.00	6.00	120.00	5.00
True	214.78	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	160.00	4.00	200.00	10.00
True	135.08	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	190.00	6.00	150.00	6.00
True	214.78	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	160.00	4.00	200.00	10.00
True	123.78	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	230.00	6.00	110.00	6.00
True	311.49	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	160.00	4.00	220.00	10.00
True	249.32	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	170.00	5.00	200.00	8.00
True	311.49	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	160.00	4.00	220.00	10.00
True	195.94	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	250.00	8.00	120.00	5.00
True	335.98	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	170.00	5.00	230.00	10.00
True	249.32	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	170.00	5.00	200.00	8.00
True	335.98	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	170.00	5.00	230.00	10.00
True	207.24	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	260.00	8.00	130.00	5.00
True	395.89	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	160.00	4.00	240.00	12.00

## S355, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

True	252.46	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	180.00	5.00	200.00	8.00
True	395.89	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	160.00	4.00	240.00	12.00
True	217.29	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	280.00	8.00	130.00	5.00
True	513.39	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	180.00	5.00	240.00	12.00
True	431.75	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	200.00	5.00	230.00	10.00
True	513.39	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	180.00	5.00	240.00	12.00
True	300.18	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	280.00	8.00	140.00	6.00
True	540.08	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	200.00	5.00	250.00	12.00
True	431.75	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	200.00	5.00	230.00	10.00
True	540.08	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	200.00	5.00	250.00	12.00
True	315.88	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	290.00	8.00	150.00	6.00
True	573.84	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	190.00	5.00	270.00	12.00
True	431.75	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	200.00	5.00	230.00	10.00
True	573.84	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	190.00	5.00	270.00	12.00
True	359.53	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	290.00	10.00	150.00	6.00
True	182.75	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	140.00	4.00	170.00	10.00
True	128.87	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	140.00	4.00	140.00	8.00
True	182.75	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	140.00	4.00	170.00	10.00
True	100.79	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	200.00	6.00	100.00	5.00
True	200.18	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	150.00	5.00	180.00	10.00
True	130.75	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	150.00	4.00	140.00	8.00
True	200.18	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	150.00	5.00	180.00	10.00
True	112.47	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	210.00	6.00	100.00	6.00
True	227.21	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	150.00	4.00	180.00	12.00
True	134.24	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	170.00	5.00	130.00	8.00
True	227.21	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	150.00	4.00	180.00	12.00
True	126.23	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	220.00	8.00	100.00	5.00
True	332.21	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	170.00	5.00	190.00	12.00
True	257.48	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	160.00	5.00	170.00	10.00
True	332.21	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	170.00	5.00	190.00	12.00
True	183.38	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	250.00	8.00	100.00	5.00
True	348.16	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	150.00	4.00	210.00	12.00
True	257.48	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	160.00	5.00	170.00	10.00
True	348.16	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	150.00	4.00	210.00	12.00
True	193.42	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	270.00	8.00	100.00	5.00
True	399.91	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	150.00	4.00	210.00	14.00
True	260.62	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	170.00	5.00	170.00	10.00
True	399.91	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	150.00	4.00	210.00	14.00
True	204.98	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	270.00	8.00	100.00	6.00
False		24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	2	2				
False		24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	2	2				
True	521.24	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	180.00	5.00	210.00	14.00
True	298.30	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	290.00	10.00	100.00	5.00
True	561.28	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	170.00	5.00	230.00	14.00
False		30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	2	2				
True	561.28	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	170.00	5.00	230.00	14.00
True	312.43	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	290.00	10.00	100.00	6.00
True	591.11	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	190.00	5.00	240.00	14.00
True	438.03	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	180.00	5.00	200.00	12.00
True	591.11	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	190.00	5.00	240.00	14.00
True	328.13	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	310.00	10.00	100.00	6.00

S500, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

Käypyyys	Kohdefunktion arvo	Ristikön jänneväli	Pilarin pituus	Pystykuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Vaakakuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Nurjahduspituus	Heikomman suunnan nurjahdus (tuettu=False, tukematon=True)	Kiepahdus (tuettu=False, tukematon=True)	laipan poikkileikkausluokka	uuman poikkileikkausluokka	poikkileikkauksen korkeus	uuman paksuus	laipan leveys	laipan paksuus
True	267.53	24000	6000	-271200	783	2	True	True	3	3	230.00	8.00	200.00	10.00
True	267.53	24000	6000	-271200	783	2	False	True	3	3	230.00	8.00	200.00	10.00
True	258.11	24000	6000	-271200	783	2	True	False	3	3	230.00	8.00	190.00	10.00
True	231.73	24000	6000	-271200	783	2	False	False	3	3	300.00	10.00	130.00	8.00
True	271.30	30000	6000	-339000	979	2	True	True	3	3	240.00	8.00	200.00	10.00
True	265.64	30000	6000	-339000	979	2	False	True	3	3	250.00	8.00	190.00	10.00
True	271.30	30000	6000	-339000	979	2	True	False	3	3	240.00	8.00	200.00	10.00
True	235.50	30000	6000	-339000	979	2	False	False	3	3	320.00	10.00	100.00	10.00
True	284.48	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	3	3	250.00	8.00	210.00	10.00
True	278.83	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	3	3	260.00	8.00	200.00	10.00
True	284.48	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	3	3	250.00	8.00	210.00	10.00
True	254.34	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	3	3	320.00	10.00	120.00	10.00
True	546.11	24000	8000	-271200	783	2	True	True	3	3	240.00	8.00	250.00	14.00
True	546.11	24000	8000	-271200	783	2	False	True	3	3	240.00	8.00	250.00	14.00
True	483.56	24000	8000	-271200	783	2	True	False	3	3	290.00	10.00	210.00	12.00
True	419.00	24000	8000	-271200	783	2	False	False	3	3	360.00	12.00	110.00	12.00
True	531.29	30000	8000	-339000	979	2	True	True	3	3	270.00	10.00	250.00	12.00
True	531.29	30000	8000	-339000	979	2	False	True	3	3	270.00	10.00	250.00	12.00
True	507.42	30000	8000	-339000	979	2	True	False	3	3	280.00	10.00	230.00	12.00
True	441.11	30000	8000	-339000	979	2	False	False	3	3	380.00	12.00	100.00	14.00
True	543.85	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	3	3	290.00	10.00	250.00	12.00
True	543.85	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	3	3	290.00	10.00	250.00	12.00
True	528.78	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	3	3	290.00	10.00	240.00	12.00
True	464.72	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	3	3	370.00	12.00	160.00	10.00
True	874.49	24000	10000	-271200	783	2	True	True	3	3	260.00	8.00	310.00	15.00
True	874.49	24000	10000	-271200	783	2	False	True	3	3	260.00	8.00	310.00	15.00
True	748.89	24000	10000	-271200	783	2	True	False	3	3	310.00	10.00	240.00	14.00
True	672.59	24000	10000	-271200	783	2	False	False	3	3	420.00	14.00	110.00	14.00
True	902.75	30000	10000	-339000	979	2	True	True	3	3	280.00	10.00	300.00	15.00
True	902.75	30000	10000	-339000	979	2	False	True	3	3	280.00	10.00	300.00	15.00
True	786.57	30000	10000	-339000	979	2	True	False	3	3	330.00	10.00	250.00	14.00
True	713.72	30000	10000	-339000	979	2	False	False	3	3	430.00	14.00	110.00	16.00
True	902.75	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	3	3	310.00	10.00	290.00	15.00
True	902.75	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	3	3	310.00	10.00	290.00	15.00
True	830.53	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	3	3	330.00	10.00	270.00	14.00
False		36000	10000	-406800	1174	2	False	False	3	3				
True	266.02	24000	6000	-271200	783	2	True	True	2	2	220.00	8.00	170.00	12.00
True	266.02	24000	6000	-271200	783	2	False	True	2	2	220.00	8.00	170.00	12.00
True	262.25	24000	6000	-271200	783	2	True	False	2	2	240.00	8.00	160.00	12.00
True	230.60	24000	6000	-271200	783	2	False	False	2	2	320.00	12.00	100.00	6.00
True	284.86	30000	6000	-339000	979	2	True	True	2	2	240.00	8.00	180.00	12.00



## S500, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

True	273.56	30000	6000	-339000	979	2	False	True	2	2	240.00	8.00	170.00	12.00
True	284.86	30000	6000	-339000	979	2	True	False	2	2	240.00	8.00	180.00	12.00
True	247.18	30000	6000	-339000	979	2	False	False	2	2	320.00	12.00	100.00	8.00
True	313.50	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	2	2	230.00	8.00	180.00	14.00
True	292.02	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	2	2	260.00	10.00	160.00	12.00
True	313.50	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	2	2	230.00	8.00	180.00	14.00
True	258.48	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	2	2	340.00	12.00	100.00	8.00
True	519.98	24000	8000	-271200	783	2	True	True	2	2	240.00	8.00	220.00	15.00
True	519.98	24000	8000	-271200	783	2	False	True	2	2	240.00	8.00	220.00	15.00
True	486.07	24000	8000	-271200	783	2	True	False	2	2	270.00	10.00	190.00	14.00
True	411.47	24000	8000	-271200	783	2	False	False	2	2	350.00	12.00	110.00	12.00
True	546.36	30000	8000	-339000	979	2	True	True	2	2	270.00	10.00	210.00	15.00
True	546.36	30000	8000	-339000	979	2	False	True	2	2	270.00	10.00	210.00	15.00
True	509.94	30000	8000	-339000	979	2	True	False	2	2	280.00	10.00	200.00	14.00
True	442.11	30000	8000	-339000	979	2	False	False	2	2	380.00	14.00	100.00	10.00
True	552.64	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	2	2	280.00	10.00	210.00	15.00
True	552.64	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	2	2	280.00	10.00	210.00	15.00
True	540.08	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	2	2	300.00	10.00	210.00	14.00
True	472.51	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	2	2	390.00	14.00	100.00	12.00
True	910.60	24000	10000	-271200	783	2	True	True	2	2	260.00	10.00	260.00	18.00
True	910.60	24000	10000	-271200	783	2	False	True	2	2	260.00	10.00	260.00	18.00
True	763.02	24000	10000	-271200	783	2	True	False	2	2	300.00	10.00	220.00	16.00
True	650.61	24000	10000	-271200	783	2	False	False	2	2	400.00	14.00	110.00	14.00
True	926.30	30000	10000	-339000	979	2	True	True	2	2	280.00	10.00	260.00	18.00
True	926.30	30000	10000	-339000	979	2	False	True	2	2	280.00	10.00	260.00	18.00
True	814.83	30000	10000	-339000	979	2	True	False	2	2	320.00	12.00	230.00	15.00
True	703.36	30000	10000	-339000	979	2	False	False	2	2	430.00	16.00	120.00	10.00
True	921.59	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	2	2	310.00	10.00	250.00	18.00
True	921.59	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	2	2	310.00	10.00	250.00	18.00
True	874.18	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	2	2	320.00	12.00	240.00	16.00
True	737.12	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	2	2	430.00	15.00	120.00	14.00
True	180.86	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	130.00	4.00	170.00	10.00
True	126.98	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	130.00	4.00	140.00	8.00
True	180.86	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	130.00	4.00	170.00	10.00
True	95.14	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	180.00	6.00	100.00	5.00
True	192.17	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	140.00	4.00	180.00	10.00
True	126.98	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	130.00	4.00	140.00	8.00
True	192.17	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	140.00	4.00	180.00	10.00
True	97.97	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	190.00	6.00	100.00	5.00
True	207.24	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	140.00	5.00	190.00	10.00
True	128.87	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	140.00	4.00	140.00	8.00
True	207.24	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	140.00	5.00	190.00	10.00
True	118.69	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	200.00	8.00	100.00	5.00
True	293.90	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	140.00	4.00	210.00	10.00
True	256.22	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	140.00	4.00	180.00	10.00
True	293.90	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	140.00	4.00	210.00	10.00
True	173.33	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	230.00	8.00	100.00	5.00
True	345.65	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	140.00	4.00	210.00	12.00
True	256.22	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	140.00	4.00	180.00	10.00
True	345.65	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	140.00	4.00	210.00	12.00
True	178.35	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	240.00	8.00	100.00	5.00
True	363.24	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	150.00	4.00	220.00	12.00

## S500, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

True	254.34	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	150.00	5.00	170.00	10.00
True	363.24	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	150.00	4.00	220.00	12.00
True	183.38	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	250.00	8.00	100.00	5.00
True	486.70	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	160.00	5.00	230.00	12.00
True	435.20	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	150.00	4.00	210.00	12.00
True	486.70	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	160.00	5.00	230.00	12.00
True	262.50	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	250.00	8.00	120.00	6.00
True	513.39	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	180.00	5.00	240.00	12.00
True	435.20	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	150.00	4.00	210.00	12.00
True	513.39	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	180.00	5.00	240.00	12.00
True	298.30	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	270.00	10.00	120.00	5.00
True	583.26	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	170.00	5.00	240.00	14.00
True	445.10	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	150.00	5.00	210.00	12.00
True	583.26	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	170.00	5.00	240.00	14.00
True	291.39	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	260.00	8.00	110.00	8.00
True	191.41	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	140.00	4.00	150.00	12.00
False		24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	2	2				
True	191.41	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	140.00	4.00	150.00	12.00
True	98.34	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	160.00	6.00	100.00	6.00
True	210.25	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	120.00	4.00	170.00	12.00
False		30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	2	2				
True	409.02	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	370.00	14.00	160.00	12.00
True	101.17	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	170.00	6.00	100.00	6.00
True	221.56	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	120.00	4.00	180.00	12.00
True	138.95	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	130.00	5.00	120.00	10.00
True	221.56	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	120.00	4.00	180.00	12.00
True	119.82	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	180.00	8.00	100.00	6.00
True	342.13	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	130.00	4.00	180.00	14.00
True	252.71	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	130.00	4.00	150.00	12.00
True	342.13	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	130.00	4.00	180.00	14.00
True	169.81	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	200.00	8.00	100.00	6.00
True	362.23	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	140.00	4.00	190.00	14.00
True	255.22	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	140.00	4.00	150.00	12.00
True	362.23	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	140.00	4.00	190.00	14.00
True	179.86	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	220.00	8.00	100.00	6.00
True	389.99	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	150.00	5.00	200.00	14.00
True	265.64	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	150.00	5.00	150.00	12.00
True	389.99	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	150.00	5.00	200.00	14.00
True	184.88	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	230.00	8.00	100.00	6.00
True	496.75	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	140.00	4.00	210.00	14.00
False		24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	2	2				
True	496.75	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	140.00	4.00	210.00	14.00
True	273.18	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	240.00	10.00	100.00	6.00
True	552.64	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	140.00	4.00	220.00	15.00
True	443.53	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	150.00	5.00	180.00	14.00
True	552.64	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	140.00	4.00	220.00	15.00
True	288.88	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	260.00	10.00	100.00	6.00
True	614.81	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	150.00	4.00	230.00	16.00
True	447.45	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	160.00	5.00	180.00	14.00
True	614.81	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	150.00	4.00	230.00	16.00
True	296.73	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	270.00	10.00	100.00	6.00

5700, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

Käyvyys	Kohdefunktion arvo	Ristikön jänneväli	Pilarin pituus	Pystykuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Vaakuormat pilarille (pistekuorma pilarin päähän)	Nurjahduspituus	Heikkomman suunnan nurjahdus (tuettu=False, tukematon=True)	Kiepähähdus (tuettu=False, tukematon=True)	laipan poikkileikkausluokka	uuman poikkileikkausluokka	poikkileikkauksen korkeus	uuman paksuus	laipan leveys	laipan paksuus
True	269.79	24000	6000	-271200	783	2	True	True	3	3	200.00	8.00	180.00	12.00
True	269.79	24000	6000	-271200	783	2	False	True	3	3	200.00	8.00	180.00	12.00
True	244.92	24000	6000	-271200	783	2	True	False	3	3	220.00	8.00	180.00	10.00
True	211.95	24000	6000	-271200	783	2	False	False	3	3	270.00	10.00	100.00	10.00
True	277.32	30000	6000	-339000	979	2	True	True	3	3	220.00	8.00	180.00	12.00
True	268.47	30000	6000	-339000	979	2	False	True	3	3	230.00	10.00	180.00	10.00
True	277.32	30000	6000	-339000	979	2	True	False	3	3	220.00	8.00	180.00	12.00
True	233.62	30000	6000	-339000	979	2	False	False	3	3	280.00	10.00	100.00	12.00
True	288.63	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	3	3	220.00	8.00	190.00	12.00
True	273.18	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	3	3	240.00	10.00	180.00	10.00
True	288.63	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	3	3	220.00	8.00	190.00	12.00
True	249.06	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	3	3	310.00	12.00	110.00	8.00
True	500.89	24000	8000	-271200	783	2	True	True	3	3	220.00	8.00	230.00	14.00
True	500.89	24000	8000	-271200	783	2	False	True	3	3	220.00	8.00	230.00	14.00
True	449.65	24000	8000	-271200	783	2	True	False	3	3	260.00	10.00	200.00	12.00
True	395.89	24000	8000	-271200	783	2	False	False	3	3	320.00	12.00	100.00	14.00
True	526.26	30000	8000	-339000	979	2	True	True	3	3	250.00	10.00	220.00	14.00
True	526.26	30000	8000	-339000	979	2	False	True	3	3	250.00	10.00	220.00	14.00
True	508.68	30000	8000	-339000	979	2	True	False	3	3	250.00	10.00	210.00	14.00
True	434.32	30000	8000	-339000	979	2	False	False	3	3	350.00	14.00	140.00	8.00
True	532.54	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	3	3	260.00	10.00	220.00	14.00
True	532.54	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	3	3	260.00	10.00	220.00	14.00
True	527.52	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	3	3	280.00	10.00	210.00	14.00
True	452.41	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	3	3	350.00	14.00	110.00	12.00
True	874.49	24000	10000	-271200	783	2	True	True	3	3	250.00	10.00	280.00	16.00
True	874.49	24000	10000	-271200	783	2	False	True	3	3	250.00	10.00	280.00	16.00
True	703.36	24000	10000	-271200	783	2	True	False	3	3	280.00	10.00	230.00	14.00
True	632.71	24000	10000	-271200	783	2	False	False	3	3	370.00	14.00	110.00	15.00
True	882.34	30000	10000	-339000	979	2	True	True	3	3	260.00	10.00	280.00	16.00
True	882.34	30000	10000	-339000	979	2	False	True	3	3	260.00	10.00	280.00	16.00
True	783.74	30000	10000	-339000	979	2	True	False	3	3	300.00	12.00	240.00	14.00
True	667.25	30000	10000	-339000	979	2	False	False	3	3	380.00	14.00	120.00	15.00
True	898.04	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	3	3	280.00	10.00	280.00	16.00
True	898.04	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	3	3	280.00	10.00	280.00	16.00
True	815.14	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	3	3	310.00	12.00	250.00	14.00
True	699.91	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	3	3	390.00	14.00	110.00	18.00
True	262.63	24000	6000	-271200	783	2	True	True	2	2	200.00	8.00	150.00	14.00
True	262.63	24000	6000	-271200	783	2	False	True	2	2	200.00	8.00	150.00	14.00
True	250.95	24000	6000	-271200	783	2	True	False	2	2	210.00	8.00	160.00	12.00
True	218.92	24000	6000	-271200	783	2	False	False	2	2	270.00	12.00	100.00	8.00
True	279.59	30000	6000	-339000	979	2	True	True	2	2	210.00	8.00	160.00	14.00

S700, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

True	273.18	30000	6000	-339000	979	2	False	True	2	2	220.00	10.00	160.00	12.00
True	279.59	30000	6000	-339000	979	2	True	False	2	2	210.00	8.00	160.00	14.00
True	230.22	30000	6000	-339000	979	2	False	False	2	2	290.00	12.00	100.00	8.00
True	311.80	36000	6000	-406800	1174	2	True	True	2	2	220.00	8.00	170.00	15.00
True	282.60	36000	6000	-406800	1174	2	False	True	2	2	240.00	10.00	160.00	12.00
True	311.80	36000	6000	-406800	1174	2	True	False	2	2	220.00	8.00	170.00	15.00
True	246.80	36000	6000	-406800	1174	2	False	False	2	2	290.00	12.00	100.00	10.00
True	519.98	24000	8000	-271200	783	2	True	True	2	2	220.00	10.00	200.00	16.00
True	519.98	24000	8000	-271200	783	2	False	True	2	2	220.00	10.00	200.00	16.00
True	455.93	24000	8000	-271200	783	2	True	False	2	2	250.00	10.00	180.00	14.00
True	396.64	24000	8000	-271200	783	2	False	False	2	2	330.00	14.00	120.00	8.00
True	532.54	30000	8000	-339000	979	2	True	True	2	2	240.00	10.00	200.00	16.00
True	532.54	30000	8000	-339000	979	2	False	True	2	2	240.00	10.00	200.00	16.00
True	496.12	30000	8000	-339000	979	2	True	False	2	2	250.00	10.00	190.00	15.00
True	419.50	30000	8000	-339000	979	2	False	False	2	2	340.00	14.00	110.00	10.00
True	545.10	36000	8000	-406800	1174	2	True	True	2	2	260.00	10.00	200.00	16.00
True	545.10	36000	8000	-406800	1174	2	False	True	2	2	260.00	10.00	200.00	16.00
True	545.10	36000	8000	-406800	1174	2	True	False	2	2	260.00	10.00	200.00	16.00
True	443.62	36000	8000	-406800	1174	2	False	False	2	2	340.00	14.00	110.00	12.00
True	879.20	24000	10000	-271200	783	2	True	True	2	2	240.00	10.00	230.00	20.00
True	879.20	24000	10000	-271200	783	2	False	True	2	2	240.00	10.00	230.00	20.00
True	736.02	24000	10000	-271200	783	2	True	False	2	2	280.00	12.00	200.00	16.00
True	622.51	24000	10000	-271200	783	2	False	False	2	2	370.00	15.00	100.00	14.00
True	894.90	30000	10000	-339000	979	2	True	True	2	2	260.00	10.00	230.00	20.00
True	894.90	30000	10000	-339000	979	2	False	True	2	2	260.00	10.00	230.00	20.00
True	823.31	30000	10000	-339000	979	2	True	False	2	2	280.00	12.00	210.00	18.00
True	666.47	30000	10000	-339000	979	2	False	False	2	2	370.00	15.00	120.00	14.00
True	934.15	36000	10000	-406800	1174	2	True	True	2	2	270.00	10.00	240.00	20.00
True	934.15	36000	10000	-406800	1174	2	False	True	2	2	270.00	10.00	240.00	20.00
True	860.99	36000	10000	-406800	1174	2	True	False	2	2	290.00	12.00	220.00	18.00
True	718.43	36000	10000	-406800	1174	2	False	False	2	2	390.00	16.00	120.00	14.00
True	176.63	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	130.00	5.00	160.00	10.00
True	115.68	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	110.00	4.00	130.00	8.00
True	176.63	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	130.00	5.00	160.00	10.00
True	86.66	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	150.00	6.00	100.00	5.00
True	188.40	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	120.00	4.00	180.00	10.00
True	117.56	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	120.00	4.00	130.00	8.00
True	188.40	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	120.00	4.00	180.00	10.00
True	92.32	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	170.00	6.00	100.00	5.00
True	221.56	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	120.00	4.00	180.00	12.00
True	124.82	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	130.00	5.00	130.00	8.00
True	221.56	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	120.00	4.00	180.00	12.00
True	98.34	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	160.00	6.00	100.00	6.00
True	310.48	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	120.00	4.00	190.00	12.00
True	235.50	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	130.00	5.00	160.00	10.00
True	310.48	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	120.00	4.00	190.00	12.00
True	158.26	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	200.00	8.00	100.00	5.00
True	337.86	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	140.00	5.00	200.00	12.00
True	235.50	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	130.00	5.00	160.00	10.00
True	337.86	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	140.00	5.00	200.00	12.00
True	163.28	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	210.00	8.00	100.00	5.00
True	356.08	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	150.00	5.00	210.00	12.00

## S700, Diskreetit muuttujat, branch and bound -algoritmi

True	238.64	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	140.00	5.00	160.00	10.00
True	356.08	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	150.00	5.00	210.00	12.00
True	174.84	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	210.00	8.00	100.00	6.00
True	505.54	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	3	3	140.00	5.00	210.00	14.00
True	403.49	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	3	3	140.00	5.00	190.00	12.00
True	505.54	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	3	3	140.00	5.00	210.00	14.00
True	234.24	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	3	3	220.00	8.00	110.00	6.00
True	531.45	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	3	3	150.00	5.00	220.00	14.00
True	403.49	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	3	3	140.00	5.00	190.00	12.00
True	531.45	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	3	3	150.00	5.00	220.00	14.00
True	253.71	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	3	3	220.00	8.00	100.00	8.00
True	571.48	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	3	3	140.00	5.00	240.00	14.00
True	407.42	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	3	3	150.00	5.00	190.00	12.00
True	571.48	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	3	3	140.00	5.00	240.00	14.00
True	281.03	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	3	3	250.00	10.00	100.00	6.00
True	183.88	24000	6000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	100.00	4.00	150.00	12.00
True	120.58	24000	6000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	110.00	4.00	110.00	10.00
True	183.88	24000	6000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	100.00	4.00	150.00	12.00
True	102.21	24000	6000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	130.00	5.00	100.00	8.00
True	219.49	30000	6000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	120.00	5.00	150.00	14.00
True	122.46	30000	6000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	120.00	4.00	110.00	10.00
True	219.49	30000	6000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	120.00	5.00	150.00	14.00
True	104.56	30000	6000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	140.00	5.00	100.00	8.00
True	228.34	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	120.00	4.00	160.00	14.00
True	129.53	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	130.00	5.00	110.00	10.00
True	228.34	36000	6000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	120.00	4.00	160.00	14.00
True	110.40	36000	6000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	140.00	6.00	100.00	8.00
True	334.10	24000	8000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	140.00	5.00	170.00	14.00
True	235.12	24000	8000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	120.00	4.00	140.00	12.00
True	334.10	24000	8000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	140.00	5.00	170.00	14.00
True	164.79	24000	8000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	160.00	6.00	110.00	8.00
True	364.24	30000	8000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	130.00	4.00	180.00	15.00
True	244.29	30000	8000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	130.00	5.00	140.00	12.00
True	364.24	30000	8000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	130.00	4.00	180.00	15.00
True	177.85	30000	8000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	170.00	8.00	100.00	8.00
True	392.50	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	140.00	5.00	190.00	15.00
True	243.41	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	150.00	6.00	130.00	12.00
True	392.50	36000	8000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	140.00	5.00	190.00	15.00
True	187.90	36000	8000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	190.00	8.00	100.00	8.00
True	519.67	24000	10000	-271200	783	0.7	True	True	2	2	140.00	5.00	190.00	16.00
True	405.69	24000	10000	-271200	783	0.7	False	True	2	2	130.00	4.00	170.00	14.00
True	519.67	24000	10000	-271200	783	0.7	True	False	2	2	140.00	5.00	190.00	16.00
True	241.15	24000	10000	-271200	783	0.7	False	False	2	2	200.00	8.00	100.00	8.00
True	594.72	30000	10000	-339000	979	0.7	True	True	2	2	130.00	4.00	200.00	18.00
True	399.57	30000	10000	-339000	979	0.7	False	True	2	2	150.00	5.00	160.00	14.00
True	594.72	30000	10000	-339000	979	0.7	True	False	2	2	130.00	4.00	200.00	18.00
True	277.89	30000	10000	-339000	979	0.7	False	False	2	2	210.00	10.00	100.00	8.00
True	622.98	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	True	2	2	130.00	4.00	210.00	18.00
True	399.57	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	True	2	2	150.00	5.00	160.00	14.00
True	622.98	36000	10000	-406800	1174	0.7	True	False	2	2	130.00	4.00	210.00	18.00
True	285.74	36000	10000	-406800	1174	0.7	False	False	2	2	220.00	10.00	100.00	8.00