

Karol Pekola

PITKÄN JÄNNEVÄLIN TERÄSRISTIKON ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU JA OPTIMOINTI

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: Apulaisprofessori Kristo Mela,
Professori Sami Pajunen
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Karol Pekola: Pitkän jännevälin teräsristikon algoritmiavusteinen suunnittelu ja optimointi
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2021

Rakennuksissa halutaan yhä pidempiä jännevälejä, jolloin yhtenä suunnitteluratkaisuna on teräsristikoiden käyttö. Pitkän jännevälin teräsristikoilla tulee ristikon suunnittelussa kysymykseen korkealujuuksisten terästen käyttö. Korkealujuuksisten terästen käytöllä voidaan saavuttaa ristikoilla pidempiä jännevälejä. Korkealujuuksisilla teräksillä voidaan myös saavuttaa kustannussäästöjä, jos korkealujuuksisten terästen avulla saadaan pienennettyä sauvojen poikkileikkauksia tarpeeksi. Algoritmiavusteisen suunnittelun käytön hyötyjä on tutkittu rakennesuunnittelulle. Algoritmiavusteinen suunnittelu voi tuoda etuja rakennesuunnitteluun suunnittelun automatisoinnin puolesta ja tehokkuuden parantamisen puolesta. Algoritmiavusteisessa suunnittelussa luodaan suunnittelukohteelle parametrinen malli, jota suunnittelija pystyy muokkaamaan mallin lähtöparametrien avulla.

Työn tavoitteena oli luoda algoritmiavusteinen parametrinen malli pitkän jännevälin teräsristikoille. Työssä kehitetyllä ristikon parametrisella mallilla oli tarkoitus tutkia erilaisten ristikoiden käyttäytymistä eri jänneväleillä. Ristikkotyyppinä työssä tutkittiin K-ristikoita, KT-ristikoita ja N-ristikoita. Ristikoita tutkittiin jänneväleillä 60 - 120 m. Työssä tehdyllä ristikon parametrisella mallilla pystytään luomaan ristikon geometria, josta algoritmiavusteisesti luodaan rakennemalli ja määritetään ristikko mallille annettujen kuormitusyhdistelmien mukaan. Ristikon parametrisessa mallissa on mukana optimointityökalu, jonka avulla teräsristikko voidaan optimoida ristikon kustannusten tai massan suhteen. Optimoinnissa käytetään heuristisiin optimointimenetelmiin kuuluvaa evoluutioalgoritmia. Optimointityökalun avulla pyritään ristikon geometriaa muuttamalla minimoimaan ristikon kustannuksia tai massaa. Parametrisessa mallissa ristikon topologian valinta jätetään lähtökohtaisesti suunnittelijan valinnaksi.

Työssä tutkittavista ristikoista tutkittiin optimointityökalun tarkkuus, korkealujuuksisten terästen vaikutus kustannuksiin ja massaan sekä jännevälin pidentämisen vaikutus eri ristikkotyyppien kustannuksiin ja massaan. Optimointityökalun tarkkuus oli tulosten perusteella suhteellisen hyvä keskihajontaa katsoen. Suorittamalla optimoinnin monta kertaa samalle ristikolle saadaan optimoinnin tulosta varmemmaksi, mutta monen optimointiajon suorittamiseen kuluu aikaa. Korkealujuuksisten terästen vaikutuksen tutkimisesta huomattiin, että käytettäessä korkealujuuksisia teräksiä alapaarteella, saadaan selvästi pienennettyä alapaarten sauvan poikkileikkauksia. Pienimmät kustannukset saatiin ristikoille, joilla käytettiin sekä alapaarteella että yläpaarteella korkealujuuksisia teräksiä. Tutkittaessa jännevälien vaikutusta teräsristikoille työssä käytettävillä poikkileikkauksilla uumasauvojen määrä rupesi kasvamaan pisimmillä ristikoilla. KT-ristikolla ja N-ristikolla oli pienemmät kustannukset verrattuna K-ristikkoon jännevälin kasvaessa. Ristikoilla käytettiin kylmämuovattuja suorakaidepoikkileikkauksen muotoisia rakenneputkia.

Avainsanat: Algoritmiavusteinen suunnittelu, optimointi, teräsristikot, korkealujuuksiset teräkset, rakennesuunnittelu, pitkä jänneväli

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Karol Pekola: Algorithms-aided design and optimization of long span steel truss
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
April 2021

Longer and longer spans are desired in buildings, in which case one of the design solutions is the use of steel trusses. With long span steel trusses, the use of high-strength steel comes into play in the design of the truss. With the use of high-strength steels longer spans can be achieved with steel trusses. High-strength steels can also achieve lower costs if the use of high-strength steels allows smaller cross sections in truss bars. The benefits of algorithms-aided design have been studied for structural design. Algorithms-aided design can bring advantages to structural design in terms of automation and better efficiency. In algorithms-aided design a parametric model is created for the design project that the designer can then modify by changing model's input parameters.

The aim of this thesis was to create an algorithms-assisted parametric model for long span steel trusses. The parametric model of the steel truss developed in the work was intended to study the behavior of different trusses at different spans. Truss types that were studied in the thesis were K-trusses, KT-trusses, and N-trusses. The trusses were studied at spans of 60 to 120 m. The parametric model of the steel truss developed in the thesis can be used to create a truss geometry, from which an algorithmically assisted structural model is created and the truss is designed according to the load combinations given to the model. The parametric model of the truss includes an optimization tool to optimize the cost or the mass of the steel truss. The optimization tool uses an evolutionary algorithm that is part of the heuristic optimization methods. The optimization tool aims to minimize the cost or mass of the steel truss by changing the geometry of the truss. In the parametric model developed in the thesis, the choice of the truss topology is left to the designer.

The accuracy of the optimization tool, the effect of high-strength steels on cost and mass, and the effect of different spans on the cost and mass of different types of trusses were studied in the thesis. The accuracy of the optimization tool was relatively good based on the results in terms of standard deviation. Performing the optimization many times on the same truss makes the result of the optimization more reliable, but it takes more time to perform many optimization runs. Examining the effect of high-strength steels, it was found that the use of high-strength steels in the bottom chord results in a clearly reduced cross-sectional size of the bottom chord. The lowest cost was obtained for trusses when high-strength steel was used on both the bottom chord and the top chord. When studying the effect of different spans on steel trusses, the number of web bars began to increase with the longest trusses with the cross section sizes available in the work. KT-trusses and N-trusses had lower costs compared to K-trusses as the span increased. Cold-formed rectangular cross-sectional structural tubes were used on the trusses.

Keywords: Algorithms-aided design, optimization, long span, steel trusses, high-strength steel, structural design

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

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Sweco Rakennetekniikka Oy:n toimeksiannosta. Työn aihe on mielenkiintoinen ja on kiinnostavaa nähdä kuinka automaatiota pystytään hyödyntämään yhä enemmissä määrin suunnittelualalla. Haluan kiittää Swecon ohjaajia, Timo Ketolaa ja Juha Kukkosta, sekä työn tarkastajaa ja ohjaajaa Kristo Melaa aiheen ideoinnista, hyvästä ohjauksesta sekä hyvistä neuvoista ja vinkeistä.

Turussa, 30.4.2021

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PITKÄN JÄNNEVÄLIN TERÄSRISTIKOT	3
2.1 Yleistä	3
2.2 Teräksen materiaaliominaisuudet ja poikkileikkausluokat	6
2.3 Murtorajatilan kestävyudet	12
2.3.1 Aksiaalisen kuorman kestävyys	13
2.3.2 Taivutuskestävyys	15
2.3.3 Leikkauskestävyys	16
2.3.4 Nurjahduskestävyys	18
2.3.5 Kiepahduskestävyys	23
2.3.6 Taivutus ja leikkaus	27
2.3.7 Taivutus ja aksiaalinen voima	28
2.3.8 Taivutus, leikkaus ja aksiaalinen voima	31
2.3.9 Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus puristetussa sauvassa	32
3. ALGORITMIAVUSTEINEN TERÄSRISTIKON SUUNNITTELU JA OPTIMOINTI	34
3.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu	34
3.2 Optimointi	36
4. PITKÄN JÄNNEVÄLIN RISTIKON TUTKITTAVA MALLI	40
4.1 Parametrinen malli	40
4.2 Ristikön kustannukset	48
4.3 Mallin optimointi	52
5. TUTKIMUSTULOKSET	56
6. YHTEENVETO	74
LÄHTEET	76
LIITE A: OPTIMOINNISSA KÄYTETTÄVÄT POIKKILEIKKAUSLUETTELOT	
LIITE B: OPTIMOIDUT K-RISTIKOT	
LIITE C: OPTIMOIDUT KT-RISTIKOT	
LIITE D: OPTIMOIDUT N-RISTIKOT	

LYHENTEET JA MERKINNÄT

API	ohjelmointirajapinta
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
FEM	finite element analysis
NCCI	Non-Contradictory Complementary Information
SCI	the Steel Construction Institute
A	brutto poikkileikkauksen pinta-ala
A_0	poikkileikkauksen alkuperäinen pinta-ala
A_{eff}	tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala
A_f	laipan pinta-ala
$A_{f.net}$	vedetyn laipan netto-pinta-ala
A_{net}	poikkileikkauksen nettopinta-ala
A_v	leikkauspinta-ala
A_w	profiilin uuman pinta-ala
C_1, C_2	kuormituksesta riippuvia kertoimia
E	kimmokerroin
G	liukukerroin
I	neliömomentti,
I_t	vääntöneliömomentti
I_z	neliömomentti heikomman akselin suhteen
I_ω	käyritysmisjäyhyys
L	jänneväli
L_{cr}	sauvan nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$	nurjahduskestävyyden mitoitusarvo
$N_{c.Rd}$	poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo
N_{cr}	kimmoteorian mukainen bruttopoikkileikkauksen mukaan laskettu kriittinen voima
N_{Ed}	aksaalisesti vedetyn sauvan vetovoiman mitoitusarvo
$N_{pl.Rd}$	bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisen kestäväyden mitoitusarvo
$N_{t.Rd}$	poikkileikkauksen vetokestäväyden mitoitusarvo
$N_{u.Rd}$	nettopoikkileikkauksen kestäväyden mitoitusarvosta kiinnittimien reikien kohdalla
$M_{b.Rd}$	kiepahduskestävyyden mitoitusarvo
M_{cr}	kimmoteorian mukainen kriittinen momentti
$M_{c.Rd}$	poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo
$M_{el.Rd}$	kimmoteorian mukaisen taivutuskestävyyden mitoitusarvo
M_{Ed}	taivutusmomentin mitoitusarvo
$M_{N.Rd}$	normaalivoiman vaikutuksen huomioon ottava taivutuskestävyyden mitoitusarvo
$M_{pl.Rd}$	plastisuusteorian mukaisen taivutuskestävyyden mitoitusarvo
$M_{V.Rd}$	leikkausvoiman vaikutuksen huomioon ottava taivutuskestävyys
$V_{c.Rd}$	leikkauskestävyyden mitoitusarvo
V_{Ed}	leikkausvoiman murtorajatilan mitoitusarvo
$V_{pl.Rd}$	plastinen leikkauskestävyys
W_{el}	kimmoteorian mukainen poikkileikkauksen taivutusvastus
$W_{eff.min}$	tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus+
$W_{net.y.min}$	nettopoikkileikkauksella kyseeseen tulevan akselin suuntaan laskettu pienin taivutusvastus

$W_{net.z.min}$	nettopoikkileikkauksella kyseeseen tulevan akselin suuntaan las- kettu pienin taivutusvastus
W_{pl}	plastisuusteorian mukainen poikkileikkauksen taivutusvastus
W_y	kyseeseen tuleva taivutusvastus
b	poikkileikkauksen leveys
b_f	laipan leveys
c	taso-osan pituus
f_y	materiaalin nimellinen myötölujuus
f_u	materiaalin nimellinen murtolujuus
h	poikkileikkauksen korkeus
h_w	uuman korkeus leikkausvoiman suunnassa
i	brutto-poikkileikkauksen hitaussäde
k_z, k_ω	sauvan tuentatyyppin mukaan kriittisen pituuden kertoimia
k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}	yhteisvaikutustekijät
r	nurkan pyöristyssäde
t	materiaalipaksuus
t_f	tarkasteltavan laipan paksuus
t_w	tarkasteltavan uuman paksuus
z_g	kuorman vaikutuskohdan etäisyys vääntökeskiön painopisteestä poikkileikkauksen korkeussuunnassa
α	epätarkkuustekijä
α_{LT}	kiepahduskäyrän epätarkkuustekijä
β	kiepahduskestävyyden termi
γ_M	osavarmuusluku
γ_{M0}	osavarmuusluku poikkileikkauksen kestävyuden kanssa
γ_{M1}	osavarmuusluku stabiiliuden suhteen tarkasteltuna
γ_{M2}	osavarmuusluku poikkileikkauksen kestävyyttä tarkasteltaessa ve- tokestävyuden suhteen
ε	myötölujuuden huomioon ottava termi
ε_u	kokonaistasavenymä
η	myötölujittumisen huomioon ottava kerroin
$\bar{\lambda}$	muunnettu hoikkuus
$\bar{\lambda}_{LT}$	muunnettu hoikkuus kiepahduskestävyydellä
$\bar{\lambda}_{LT.0}$	kiepahduskestävyyden termi
Φ	nurjahduskestävyyden termi
Φ_{LT}	kiepahduskestävyyden termi
ρ	myötörajan pienennystermin
$\sigma_{x.Ed}$	poikkileikkauksen suurin aksiaalinen paikallinen jännitys
χ	puristuskestävyyden lommahdustekijä, nurjahduskestävyyden pie- nennystekijä
χ_1, χ_1	lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kuorelle
χ_{LT}	kiepahduskestävyyden pienennystekijä
χ_x	lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kuorelle

Työssä käytetyt lyhenteet ja merkinnät

1. JOHDANTO

Korkeiden teräslujuuksien käyttö teräsrakenteissa on yleistymässä luoden mahdollisuuksia entistä isommille rakennuksille ja pidemmille jänneväleille rakennusten kantavissa rakenteissa. Pitkän jännevälin teräsristikoilla saadaan luotua isoja, avaria tiloja, jolloin niitä on käytetty esimerkiksi isoissa stadioneissa ja lentokenttäterminaaleissa. Pitkän jännevälin teräsristikot ovat erittäin vaativia rakenteita sekä suunnittelun että rakentamisen kannalta, jolloin suunnittelijoilta ja rakentajilta vaaditaan paljon osaamista.

Teräsristikoiden selkeän muodon ja rakenteen tarkkuuden takia teräsristikoiden suunnittelussa voidaan käyttää optimointia haettaessaan parasta mahdollista suunnitteluratkaisua, joka täyttää ristikolle asetetut vaatimukset mahdollisimman kustannustehokkaasti. Optimoinnin avulla teräsristikolle voidaan asettaa ristikon geometrian lähtöparametreille rajat annettujen lähtövaatimusten mukaan, jonka jälkeen ristikolle voidaan optimoinnin avulla hakea kustannuksiltaan halvin geometrian muoto.

Erityisesti korkealujuuksisten terästen yleistyminen edesauttaa pidempien jännevälien saavuttamisessa edullisemmin. Terästen materiaalistandardeihin on tullut viime vuosina lisäyksiä korkeammista teräslujuuksista sekä teräsrakenteiden suunnittelun eurokoodiin 3 valmistellaan lisäystä korkeista teräslujuuksista lujuudesta S700 ylöspäin S960 asti. Liitosten suunnittelu vaikuttaa oleellisesti jo rakennemalliin riippuen liitosvalinnoista. Ristikon hitsiliitoksilla tulee huomioida liitoksen epäkeskisyys rakennemallissa, joka vaikuttaisi liitosvoimiin. Pidemmällä jänneväleillä teräsristikoilla kuitenkin tulee toteutuskelpoisemmaksi pulttiliitokset.

Työn tarkoituksena on muodostaa teräsristikon parametrinen malli, joka algoritmiaivusteisesti luo geometrian perusteella rakennemallin ja mitoittaa sekä optimoi ristikon. Teräsristikolle voidaan vaihtaa ristikkotyyppejä ja ristikon geometria voidaan päättää käyttäjän toimesta. Käyttäjä voi myös muuttaa ristikon sauvojen mahdollisia poikkileikkaustietoja, sauvojen teräslujuuksia sekä ristikon kuormitustietoja. Ristikon parametrisessa mallissa pyritään luomaan teräsristikolle mahdollisimman kattavasti työkalut ristikon muokkaamiselle, jotta mallin käyttäjä voi hakea haluamansa ominaisuudet ristikolle.

Liitoksilla on vaikutusta ristikon sauvojen valintaan, mutta työn laajuuden takia liitosten tarkastelu joudutaan jättämään pois. Ristikon palomitoitus rajataan myös pois työssä.

Isoissa kohteissa rakenteiden palomitoitusta voidaan tarkastella toiminnallisen palomitoituksen kannalta. Tällöin toiminnallisella palomitoituksella voidaan näyttää teräsristikoiden palonkestävyyden kannalta, että isoissa rakennuksissa teräsristikoiden ollessa korkealla ristikkorakenteille ei vaadita täyttä palomitoitusta. Joka tapauksessa palomitoitus on oleellinen osa teräsrakenteiden suunnittelua.

Työn tavoitteena on muodostaa teräsristikoille toimiva parametrinen malli, jonka avulla pystytään muokkaamaan teräsristikot mallin käyttäjän haluamille lähtötiedoille. Teräsristikoita tutkitaan eri jänneväleillä käyttäen kylmämuovattuja suorakaidepoikkileikkauksia rakenneputkille. Teräsristikoiden tutkimisesta jätetään pois muiden poikkileikkausmuotojen tarkastelu. Teräsristikoiden tarkastelussa ristikoiden kuormitusväli pidetään samana kaikilla ristikoilla. Parametrinen malli tehdään käytettävissä olevilla suunnitteluohjelmilla.

2. PITKÄN JÄNNEVÄLIN TERÄSRISTIKOT

Teräsristikoita käytetään monissa rakennuksissa ja niiden jännevälit ovat kasvaneet korkeampien teräslujuuksien ja pidempien jänneväливаatimusten takia. Teräsristikoiden ensimmäiset käyttökohteet ovat olleet sillat. Erityisesti suuria rautatiesilloja on tehty teräksestä jo melkein 150 vuotta ensimmäisen teräsristikkosillan ollessa Eads Bridge Yhdysvalloissa, joka valmistui vuonna 1874. Nykyään pisimpiä teräsristikoita käytetään suurissa stadioneissa ja monikäyttöhalleissa. Tällaisia ovat esimerkiksi kupolimainen Singapore Sports Hub, missä teräsristikoista muodostuvan kaaren jänneväli on yli 310 m, ollen täten jänneväliään maailman pisin vapaasti pystyssä pysyvä kaarirakenne. Pitkät jännevälit tuovat rakennuksiin avaraa tilaa, jolloin niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi isoissa stadioneissa tai lentokenttäterminaaleissa. Stadioneissa pitkillä jänneväleillä saadaan luotua katettu areena, jota pystytään käyttämään monella tapaa säästä huolimatta.

2.1 Yleistä

Teräsristikoiden poikkileikkauksina käytetään paarteissa putkiprofiileja tai I-profiileja sekä diagonaalisauvoissa yleensä putkiprofiileja. Putkiprofiileita löytyy suorakaide-, neliö- ja ympyräprofiileina sekä harvinaisempina muun muassa ellipsin muotoiset profiilit. Teräsristikoissa voidaan käyttää myös avoprofiileja, kuten I- tai H-profiileja parresauvoissa.

Rakenneteräksissä käytetyt teräslujuudet ovat kasvaneet vuosikymmenien myötä ja nykyään korkeitakin teräslujuuksia on käytettävissä. 20 vuotta sitten S275 oli yleisin teräslujuus ja S355 oli poikkeus, mutta nykyään S355 on yleisin teräslujuus. Pitkän jännevälin teräsrakenteissa korkealujuuksiset teräkset tuovat etua muun muassa materiaalin painon pienenemiseen, kevyempään tukirakenteeseen sekä perustuksiin tai pienempiin päästöihin. (HILONG 2017.) Korkeampi teräslujuus S420 on myös yleistynyt enemmän nykyään kylmämuovatuissa rakenneputkissa. Korkealujuuksiset teräkset voivat tulla edullisemmaksi erityisesti teräsrakenteissa, joissa rakenneosien kestävyys tulevat mitoittavaksi eikä rakenteen taipuma tai muu käyttörajatilan ehto (SCI 2020. s. 49).

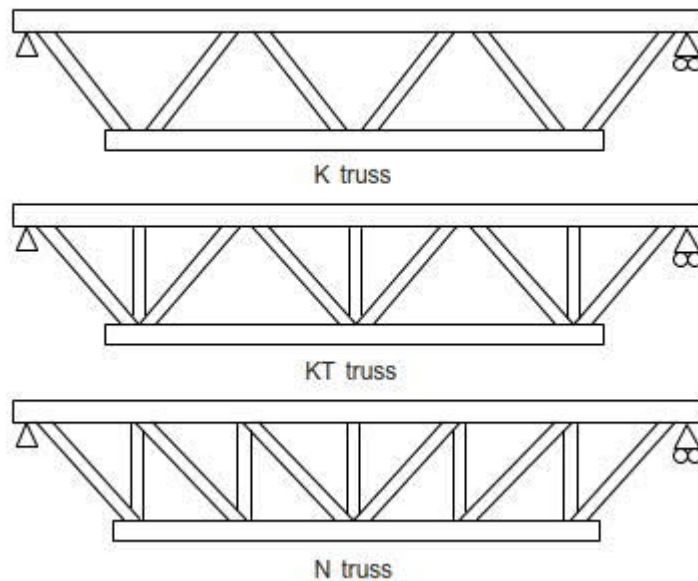
Teräksiset rakenneputket voidaan valmistaa seostamattomasta teräksestä tai hienorae-teräksestä. Rakenneputket valmistetaan kuumavalssatusta teräsnauhasta kylmämuovaamalla tai kuumamuovaamalla. Kylmämuovatut rakenneputket voidaan valmistaa myös lisälämpökäsittelyllä siten, että saadaan samat ominaisuudet rakenneputkille kuin

kuumamuovaamalla valmistetut rakenneputket. Kylmämuovattujen rakenneputkien tulee täyttää standardin EN 10219 vaatimukset. Kuumamuovattujen tai lisälämpökäsittelyllä valmistettujen kylmämuovattujen rakenneputkien tulee täyttää standardin EN 10210 vaatimukset. (EN 10210-1 2006, EN 10219-1 2006) Vuonna 2020 korkealujuuksisista teräksistä on lisätty standardeihin EN 10210 ja EN 10219 osat EN 10210-3 ja EN 10219-3, jotka kattavat teräslajit lujuudesta S460 lähtien S960 asti (EN 10210-3 2020, EN 10219-1 2020). Kuumavalssattujen avoprofiilien teräslaadun tulee täyttää standardin EN 10025 materiaalivaatimukset. Standardiin EN 10025 on myös tullut lisäyksiä vuonna 2019 koskien korkealujuuksisia teräksiä. Standardin EN 1993-1-1 seuraava muutos tulee otta-
maan huomioon teräslujuudet välillä S235 ja S700 sekä standardin EN 1993-1-12 uusi versio on kehitteillä teräslujuuksiin S960 asti (SCI 2020. s.50).

Euroopassa rakenneputkien poikkileikkausvalikoimassa suurilta teräsvalmistajilta ArcelorMittalilta löytyy kuumavalssattuja rakenneputkia teräslujuuksissa S235-S420 ja kylmävalssattuja rakenneputkia teräslujuuksissa S235-S700, kun taas SSAB:lta löytyy kylmävalssattuja rakenneputkia lujuuksilla S235-S960 (ArcelorMittal 2019, SSAB 2017).

Tavallisilla jänneväleillä teräsristikoissa liitokset tehdään yleensä hitsiliitoksina. Pidemmillä jänneväleillä kuitenkin pulttiliitokset tulevat kannattavimmiksi ristikon osien koon kasvamisen myötä, jolloin ristikon asennus työmaalla on helpompaa pulttiliitoksin hitsiliitokseen verrattuna. Pitkillä jänneväleillä kuitenkin myös liitosvoimat kasvavat, jolloin pulttiliitosten suunnittelusta tulee vaativaa.

Ristikot jaotellaan tavallisesti uumasauvojen muodon mukaan ristikkotyyppeihin, joista yleisimmät ovat kuvassa 1 esitetyt K-ristikot, KT-ristikot sekä N-ristikot. K-ristikossa sauvojen lukumäärä on pieni muihin ristikkotyyppeihin verrattuna, mutta yläpaarten nurjahduspituus voi olla pitkä suurentaen yläpaarten poikkileikkausta. KT-ristikossa saadaan lyhennettyä yläpaarten nurjahduspituutta ristikon tasossa pystysauvoilla, mutta sauvojen määrä kasvaa sekä alapaarten liitoksesta tulee monimutkaisempi. N-ristikko tulee taas edulliseksi korkeilla ja lyhyillä ristikoilla, jolloin puristettujen uumasauvojen pituus saadaan lyhyemmiksi. N-ristikossa kuitenkin on suurempi määrä sauvoja sekä liitokset ovat monimutkaisempia kuin K-ristikossa. (SSAB 2016.)



Kuva 1. Erilaisia ristikkotyyppejä. (SSAB 2016.)

Ristikon rakennemallissa tavallisesti paarteet ajatellaan jatkuvina ja diagonaalit ovat nivelellisesti liitetty parresauvoihin. Sivuttaistuennat ja muut pistekuormat pyritään sijoittamaan liitoskohtiin, jolloin saadaan pienennettyä paarteiden taivutusmomentteja. Yläpaarteen taivutusmomentteja voidaan pienentää entisestään, jos katto-orretkin sijoitetaan yläpaarteen solmukohtiin. Putkipalkit toimivat hyvin teräsristikossa, sillä putkipalkkileikkauksilla kestävät tehokkaasti puristusta ja vetoa. (SSAB 2016.) Kuvan 1 mukaisesti ristikot tuetaan niveltuelle sekä pystytuelle. Ristikot voivat olla kuvan 1 mukaisesti suorita tai ne voivat olla harjaristikkoita tai kaariristikkoita. Harjaristikossa paarteet voivat olla suorita tai kaaren muotoisia. Kaari kestää tehokkaammin kuormia suoraan paarteeseen verrattuna, mutta on monimutkaisempi rakenne. Ristikon optimikorkeus on eri lähteiden mukaan $h = L/9 \dots L/12$ tai $L/10 \dots L/16$ (SSAB 2015.). Ristikon kuormien kasvattaminen nostaa ristikon optimikorkeutta. Ristikon alapartaen sijoittaminen tuen alapuolelle parantaa ristikon sivusuuntaista jäykkyyttä, kun suurempi osa ristikon massaa on tukipisteiden alapuolella, jolloin ristikko on stabiilimpi rakenne.

Standardin EN 10219 mukaiset kylmämuovattut rakenneputket mitoitetaan standardin EN 1993-1-3 (2006.) kohdan 1.1 (3) mukaisesti standardien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-8 mukaan. Kuumamuovattujen rakenneputkien ja kuumavalssattujen rakenneterästen suunnittelu tapahtuu standardin EN 1993-1-1 (2005.) mukaan.

Suomessa ristikkoon kohdistuu kuormia ristikon omasta painosta, rakenteiden kuormista, ripustuskuormista, lumikuormasta sekä tuulikuormasta. Pistekuormat pyritään kohdistamaan ristikon liitoskohtiin. Ristikon sauvakuormat voidaan laskea siihen sovel-

tuvalla rakenneanalyysiohjelmalla. Sauvakuormien avulla lasketaan sauvan poikkileikkauksen kestävyys. Täydellisessä ristikossa, missä kaikki liitokset ovat niveliä sekä kaikki kuormat kohdistuvat ristikon liitoksiin, sauvoihin kohdistuu vain vetoa tai puristusta, mutta todellisuudessa paarteisiin kohdistuu monesti tasaista kuormaa sekä liitokset eivät ole aina niveliä. Tämän takia paarteissa tulee myös tarkastaa taivutuskestävyys ja sitä kautta lommahduskestävyys. Ristikon tavallisissa kuormitustilanteissa yläpaarre on puristuksessa ja alapaarre on vedossa, jolloin yläpaarteeseen tulee isompi poikkileikkaus nurjahduskestävyyden kautta. Uumasauvoissa puristus ja veto vaihtelevat sekä uumasauvojen kuormat kasvavat mentäessä lähemmäksi tukia. Rakenneputkien liitoksia koskevien ehtojen mukaan liitoksissa rakenneputkien poikkileikkausluokkia rajoitetaan standardin EN 1993-1-8 ehdon 7.1.2(2) mukaan poikkileikkausluokkiin 1 ja 2. Ristikon sauvojen välisen kulman pienin sallittu arvo on 30° standardin EN 1993-1-8 ehdon 7.1.2(3) mukaan. Tällöin paarteiden ja uumasauvojen välinen kulma tai viereisten uumasauvojen välinen kulma ei saa olla pienempi kuin 30° .

Ristikko mitoitetaan käyttörajatilassa tavallisesti taipumalle. Taipumia rajoitetaan standardin EN 1993-1-1 kansallisessa liitteen taulukossa 3 (Ympäristöministeriö 2019.). Kansallisen liitteen taipumaraja vesikatoissa ja katoksissa oleville rakenteille on $L/300$. Väli- ja ulokkeille taipumaraja on $L/400$ ja ulokkeille $L/150$. Pitkillä teräsristikoilla, joissa on käytetty pulttiliitoksia, tulee ottaa taipuman mitoituksessa huomioon liitoksissa tapahtuvat liikkeet.

2.2 Teräksen materiaaliominaisuudet ja poikkileikkausluokat

Poikkileikkaukset jaetaan neljään poikkileikkausluokkaan, jotka määräytyvät siitä miten paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkauksen kestävyttä ja kiertymiskykyä. Poikkileikkausluokassa 1 koko poikkileikkaus on tehollinen. Poikkileikkaukseen voi muodostua plastinen nivel, jolla on plastiseen taivutuskestävyyteen perustuva taivutuskestävyys sekä plastisuusteorian edellyttämä riittävä kiertymiskyky. Poikkileikkausluokassa 2 koko poikkileikkaus on tehollinen ja poikkileikkaukseen voi muodostua plastisen taivutuskestävyyden omaava plastinen nivel, mutta kiertymiskyky rajoittaa paikallinen lommahdus. Poikkileikkausluokassa 3 koko poikkileikkaus on tehollinen. Taivutusjännityksen alaisena poikkileikkaus voi saavuttaa myötölujuuden poikkileikkauksen äärimmäisessä puristetussa reunassa, mutta poikkileikkaus lommahtaa ennen kuin saavutetaan poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys. Tasaisesti puristetussa poikkileikkauksessa koko poikkileikkaus voi saavuttaa myötölujuuden. Poikkileikkausluokassa 4 vain osa poikkileikkauksesta on tehollista, jolloin poikkileikkauksessa esiintyy paikalli-

nen lommahdus ennen kuin jokin poikkileikkauksen osa saavuttaa myötölujuuden. Tällöin poikkileikkauksen kestävyys lasketaan poikkileikkauksen tehollisten osien pinta-alojen perusteella. Poikkileikkausluokassa 4 taivutuskestävyydessä ja puristuskestävyydessä käytetään eri poikkileikkauksia. (SSAB 2016, SFS-EN 1993-1-1 2005.)

Teräsrakenteiden eurokoodin 3 taulukossa 5.2 on määritetty poikkileikkausluokkien rajat taso-osan pituuden suhteesta taso-osan paksuuteen. Kuvassa 2 on esitetty taulukon 5.2 osa 1, missä on esitetty kahdelta reunalta tuettujen puristettujen taso-osien poikkileikkausluokkien rajat. Putkiprofiilien poikkileikkausluokkien ja I-profiilien uumien poikkileikkausluokkien rajat menevät taulukon 5.2 osan 1 mukaan. Standardissa EN 1993-1-1 ei ole annettu tarkkaa ohjetta suorakaiteen muotoisen poikkileikkauksen taso-osan pituudelle, mutta standardissa EN 1993-1-5 (2006.) kohdassa 4.4 (2) on annettu suorakaiteen muotoisen putken laipalle annettu ohje

$$c = b - 3t, \quad (1)$$

missä b on putkiprofiilin laipan kokonaismitta ja t on tarkasteltavan laipan paksuus. Kuvassa 3 on eurokoodin 3 taulukon 5.2 osa 2, missä esitetään puristettujen taso-osien ulokkeellisten laippojen poikkileikkausluokkien rajat. I-profiilien laippojen poikkileikkausluokat tarkastellaan taulukon 5.2 osan 2 mukaan. Kuvassa 4 on esitetty eurokoodin 3 taulukon 5.2 osa 3, missä esitetään pyöreiden putkien poikkileikkausluokkien rajat puristuksessa ja/tai taivutuksessa. Poikkileikkaukset, jotka eivät täytä poikkileikkausluokan 3 vaatimuksia, kuuluvat poikkileikkausluokkaan 4. I-profiilien ja suorakaiteen muotoisten putkiprofiilien poikkileikkausluokan 4 tehollisten osien pituudet lasketaan standardin EN 1993-1-5 (2006.) luvun 4 mukaan. Poikkileikkausluokan 4 pyöreillä putkilla lasketaan standardin EN 1993-1-6 (2007.) luvun 8 ja liitteen D mukaan puristuskestävyydelle lommahduksen pienennystekijä χ kuorelle.

Kestävydet ja voimasuureet voidaan laskea rakenneosille kimmoteorian mukaan kaikilla poikkileikkausluokilla, jos otetaan lommahduksen vaikutus huomioon poikkileikkauksen kestävydessä. Poikkileikkausluokan 1 rakenneosilla voimasuureet voidaan laskea plastisuusteorian mukaan ja poikkileikkausluokan 1 ja 2 rakenneosilla kestävydet voidaan laskea plastisuusteorian mukaan. Poikkileikkausluokkia 1-3 laskettaessa voidaan käyttää varmalla puolella olevia tasaisen puristuksen rajoja poikkileikkauksille, joihin kohdistuu puristusta ja taivutusta. (SSAB 2016.) Teräksen lujuus otetaan huomioon poikkileikkausluokkien laskennassa huomioon termillä ϵ , minkä laskentakaava on esitetty kuvien 1-3 taulukossa 5.2. Teräksen lujuuden kasvaessa poikkileikkauksien täytyy olla vähemmän hoikkia saavuttaakseen poikkileikkausluokkien rajat.

Standardissa En 1993-1-1 on esitetty suunnitteluun säännöt teräslujuuksille S460 asti. Standardissa EN 1993-1-12 on esitetty lisäsääntöjä muihin eurokoodin 3 standardeihin teräslajeista, joiden lujuus on suurempi kuin S460, mutta enintään S700. Normaalilujuuksisille ja korkealujuuksisille teräksille annetaan eri raja-arvot murtolujuuden ja myötölujuuden suhteelle f_u/f_y , murtovenymälle ja kokonaistasavenymälle ϵ_u . Taulukossa 1 on esitetty standardien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-12 raja-arvot rakenneteräksien sitkeysvaatimuksille. Murtovenymällä tarkoitetaan mittapituutta $5,65\sqrt{A_0}$ vastaavaa murtovenymää, missä A_0 on poikkileikkauksen alkuperäinen pinta-ala.

Euroopan komission tutkimuksessa RUOSTE (2016.) on tarkasteltu korkealujuuksisten putkiterästen sitkeysvaatimuksia ja poikkileikkausluokkien rajoja ja havaittiin, että poikkileikkausluokkien rajat eivät ole riittävän tiukkoja taulukon 1 sitkeysvaatimuksilla korkealujuuksisilla teräksillä. Tutkimuksissa näytettiin yhteyttä murtolujuuden ja myötölujuuden suhteen sekä poikkileikkausluokkien rajojen suhteen. Poikkileikkausluokan 1 saavuttamiseksi vaadittiin tutkimuksessa riittävää plastisuusteorian edellyttämää kiertymiskykyä ja poikkileikkausluokan 2 rajana pidettiin poikkileikkauksen murtotaivutuskestävyyden ylittävän plastisuusteorian mukaisen taivutuskestävyyden. Tutkimuksen mukaan riittävän poikkileikkausluokan 1 kiertymiskyvyn saavuttamiseksi murtolujuuden ja myötölujuuden suhteen raja-arvolla 1,05 vaadittaisiin teräslujuuksilla S500-S700 rajaa 30ϵ . Nykyisen 33ϵ rajan saavuttamiseksi tarvitaan tutkimuksen mukaan murtolujuuden ja myötölujuuden suhteeksi 1.3. Riittävän poikkileikkausluokan 2 murtotaivutuskestävyyden ja plastisuusteorian mukaisen taivutuskestävyyden suhteen saamiseksi vaadittaisiin teräslujuuksilta S500-S700 rajaa 35ϵ . Tarvittava murtolujuuden ja myötölujuuden suhde poikkileikkausluokan 2 rajaan 38ϵ olisi 1.10. (RUOSTE 2016. s.29-32.)

Taulukko 5.2 (Osa 1): Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat						
				Taivutus ko. akselin suhteen		
				Taivutus ko. akselin suhteen		
Poikkileik-kausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\epsilon$ ²⁾	$kun \psi > -1: c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $kun \psi \leq -1^*): c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) Arvoa $\psi \leq -1$ käytetään, kun joko puristusjännitys $\sigma < f_y$ tai vedetyn puolen venymä $\epsilon_y > f_y/E$

¹⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 121,43\epsilon$

²⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 38,25\epsilon$

³⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1995-1-5 mukaan raja-arvo riippuu lommahduskertoimesta k_σ ja jännityssuhteesta ψ .

Kuva 2: Teräsrakenteiden eurokoodi 3 taulukko 5.2 (Osa 1). (SFS-EN 1993-1-1 2005.)

Taulukko 5.2 (Osa 2): Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet

Ulokkeelliset laipat						
		Valssatut profiilit		Hitsatut profiilit		
Poikkileik- kausluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat				
		Vapaa reuna on puristettu		Vapaa reuna on vedetty		
Taso-osan jännitys- jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Taso-osan jännitys- jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ ⁴⁾	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ ⁵⁾ k_σ ks. EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

⁴⁾ Suomentajan huomautus:

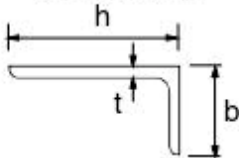
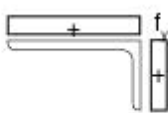
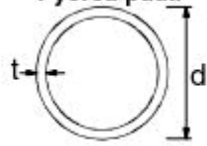
Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 13,96\epsilon$

⁵⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 21,29\epsilon\sqrt{k_\sigma}$

Kuva 3: Teräsrakenteiden eurokoodin 3 taulukon 5.2 osa 2. (SFS-EN 1993-1-1 2005.)

Taulukko 5.2 (Osa 3): Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet

Kulmateräkset						
						
Ks. myös "Ulokkeelliset laipat" (ks. taulukon osa 2)						
Ei sovelleta kulmateräksiin, jotka kiinnitetään jatkuvasti muihin rakenneseisiin						
Poikkileikkausluokka	Puristettu poikkileikkaus					
Poikkileikkauksen jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
3	$h/t \leq 15\epsilon$: $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$					
Pyöreä putki						
						
Poikkileikkausluokka	Taivutettu ja/tai puristettu poikkileikkaus					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
Huom. Kun $d/t > 90\epsilon^2$, ks. EN 1993-1-6.						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Kuva 4: Teräsrakenteiden eurokoodin 3 taulukon 5.2 osa 3. (SFS-EN 1993-1-1 2005.)**Taulukko 1:** Eurokoodin 3 teräksen sitkeysvaatimusten raja-arvot lujuuksien mukaan. (SFS-EN 1993-1-1 2005, SFS-EN 1992-1-12 2007.)

	S235-S460 (EN 1993-1-1)	S500-S700 (EN 1993-1-12)
Murtolujuuden ja myötölujuuden suhde f_u/f_y	$\geq 1,10$	$\geq 1,05$
Murtovenymä	$\geq 15\%$	$\geq 10\%$
Kokonaistasavenymä ϵ_u	$\geq 15f_y/E$	$\geq 15f_y/E$

Euroopan komission tutkimuksissa SEMI-COMP (2009.) ja SEMI-COMP+ (2013.) selvitetiin normaalilujuuksisten rakenneterästen poikkileikkausluokkien rajoja ja tutkimuksissa tehtiin päätelmiä, että poikkileikkausluokkien rajoja tulisi tiukentaa, jotta saavutettaisiin standardin EN 1990 liitteen D mukaiset riittävät varmuudet sekä saataisiin standardin EN 1993-1-1 taulukon 5.2 rajat yhtenäisiksi standardin EN 1993-1-5 kanssa. Tutkimuksissa ehdotetut uudet rajat kahdelta reunalta tuettujen taso-osien puristuksessa on poikkileikkausluokan 1 rajalle 28ϵ , poikkileikkausluokan 2 rajalle 34ϵ ja poikkileikkausluokan 3 rajalle 38ϵ . Euroopan komission tutkimuksessa HILONG (2017.) esitettiin edellä mainittujen rajojen olevan myös käyttökelpoisia korkealujuuksisilla teräksillä.

Standardin EN 1993-1-12 kohdassa 5.4.1(3) kielletään teräslujuuksilta S500-S700 plastisuusteorian mukainen kokonaisanalyysi eli eurokoodissa poikkileikkauksessa ei katsota syntyvän plastista niveltä korkealujuuksisilla teräksillä. Lisäksi kohdan 5.4.1 (4)B mukaan korkealujuuksisilta jatkuvatuksilta palkeilta kielletään plastisuusteorian mukaisen momenttien uudelleen jakaantumisen huomioon ottaminen. Plastisuusteorian mukaisen kokonaistarkastelun käyttö ei kuitenkaan ole yleistä (SCI 2020. s.51.).

Isobritannialaisen tutkimusinstituutin SCI korkealujuuksisten terästen oppaassa (2020.) kerrotaan, että seuraavassa standardin EN 1993-1-1 versiossa oletetaan terästen sitkeysvaatimusten olevan jaoteltu plastisuusteorian mukaisen kokonaistarkastelun sekä kimmoteorian mukaisen kokonaistarkastelun mukaan. Sitkeysvaatimuksista oletetaan poistettavan kokonaistasavenymä ϵ_u . Plastisuusteorian mukaiselle kokonaistarkastelulle annetaan oletettavasti murtolujuuden ja myötölujuuden suhteelle minimiraja 1,10 sekä murtovenymälle minimiraja 15%. Kimmoteorian mukaiselle kokonaistarkastelulle annetaan oletettavasti murtolujuuden ja myötölujuuden suhteelle minimiraja 1,05 sekä murtovenymälle minimiraja 12%. Sitkeysvaatimukset jaotellaan teräslujuuksien mukaan siten, että kaikkien teräslujuuksien ajatellaan täyttävän kimmoteorian mukaisen kokonaistarkastelun vaatimat minimisitkeysvaatimukset ja teräslujuuksien lujuuteen S460 asti ajatellaan täyttävän plastisuusteorian mukaisen kokonaistarkastelun vaatimat minimisitkeysvaatimukset. (SCI 2020. s.50.)

2.3 Murtorajatilan kestävydet

Seuraavaksi esitetään sauvan murtorajatilan kestävyksien mitoitukset teräsrakenteiden eurokoodin 3 mukaan, jossa otetaan huomioon myös korkealujuuksisten terästen erikoissäännöt. Korkealujuuksisten terästen säännöissä esitetään myös mahdolliset uusiin tutkimuksiin perustuvat mitoitusäännöt, jotka eroavat eurokoodien säännöistä. Teräsristikoiden optimoinnin ja algoritmisen suunnittelun puitteissa jätetään poikkileikkausluo-

kan 4 tarkemmat mitoitusäännöt läpikäymättä. Poikkileikkausluokan 4 hoikat poikkileikkaukset eivät ole yhtä tehokkaita painon suhteen muihin poikkileikkausluokkiin verrattuna johtuen poikkileikkausluokan 4 poikkileikkauksen kestävyysien laskennasta tehollisen poikkileikkauksen suhteen. Teräsrakenteiden valmistajilla on tavallisesti saatavilla taulukkotietoina kaikille poikkileikkauksille rakenteen mitoituksessa käytettävät tarkat poikkileikkaussuureet, joten niitä ei tarkemmin eritellä tässä työssä.

Eurokoodien mitoituksessa poikkileikkauksien mitoituskestävyydet saadaan kertomalla kyseeseen tulevan kestävyys ominaisarvo osavarmuusluvulla γ_M . Eurokoodin 3 eri osissa esitetään osavarmuusluvut käytettäviksi eri kestävyysien kanssa. Poikkileikkausten kestävyysien kanssa poikkileikkausluokasta riippumatta käytetään osavarmuuslukua γ_{M0} . Stabiiliuden suhteen sauvojen kestävyysä tarkasteltaessa käytetään osavarmuuslukua γ_{M1} , kun laskelmat tehdään sauvan tarkastuksena. Poikkileikkausten kestävyyttä tarkasteltaessa vetomurtumisen suhteen käytetään osavarmuuslukua γ_{M2} . Rakennusten suunnittelussa käytettävät osavarmuusluvut voidaan määrittää kansallisessa liitteessä ja Suomessa käytetään murtorajatilan kestävyysien osavarmuuslukujen γ_{M0} , γ_{M1} ja γ_{M2} suhteen eurokoodissa 3 suositeltuja arvoja 1,0, 1,0 ja 1,25 tässä järjestyksessä. (SFS-EN 1993-1-1 2005.)

2.3.1 Aksiaalisen kuorman kestävyys

Vetovoiman ja puristusvoiman mitoitus on esitetty standardin EN 1993-1-1 luvuissa 6.2.3 ja 6.2.4 tässä järjestyksessä. Poikkileikkausta mitoittaessa vedolle, poikkileikkaus toimii tehollisena kaikissa poikkileikkausluokissa. Vedetyn poikkileikkauksen tulee täyttää ehto

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1, \quad (2)$$

missä N_{Ed} on aksiaalisesti vedetyn sauvan vetovoiman mitoitusarvo murtorajatilassa ja $N_{t,Rd}$ on poikkileikkauksen vetokestävyys mitoitusarvo. Poikkileikkauksen vetokestävyys mitoitusarvoksi $N_{t,Rd}$ valitaan pienempi arvoista

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}, \quad (3)$$

tai

$$N_{u,Rd} = \frac{A_{net}f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (4)$$

missä $N_{pl,Rd}$ on bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisen kestävyuden mitoitusarvosta, $N_{u,Rd}$ on nettopoikkileikkauksen kestävyuden mitoitusarvosta kiinnittimien reikiä kohdalla, f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus ja f_u on materiaalin nimellinen murtolujuus. Brutto-poikkileikkauksen pinta-alan A ominaisuudet lasketaan käyttäen poikkileikkauksen nimellismittoja. Brutto-poikkileikkauksesta ei tarvitse vähentää kiinnittimien reikiä, mutta isommat aukot otetaan huomioon. Poikkileikkauksen nettopinta-ala A_{net} lasketaan bruttopoikkileikkauksesta vähentäen tarkoituksenmukaisesti kaikki reiät ja muut aukot. Yksittäisen kiinnikkeen reiän tapauksessa sekä reikiä ei ollessa limitettyjä nettopinta-ala lasketaan poikkileikkauksen tasossa. Reikiä ollessa limitettyjä määrääväksi nettopinta-ala tulee pienempi joko suoralla murtoviivalla tai limitetyllä murtoviivalla laskettu pinta-ala. (SFS-EN 1993-1-1 2005.)

Mitoittaessa poikkileikkauksen puristuskestävyyttä tulee mitoitusarvon N_{Ed} täyttää ehto

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1, \quad (5)$$

missä $N_{c,Rd}$ on poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo. Poikkileikkauksen puristuskestävyydessä otetaan huomioon vain poikkileikkauksen lokaalit stabiiliusilmiöt eli taso-osien mahdollisen lommahduksen vaikutus kestävyteen. Koko sauvan globaalin stabiiliuden menetys otetaan huomioon nurjahduskestävyydessä. Poikkileikkauksen puristuskestävyys jaetaan poikkileikkauksien mukaan ehtoihin, jolloin poikkileikkausluokille 1-3 lasketaan tasaiselle puristukselle puristuskestävyyden mitoitusarvo $N_{c,Rd}$ kaavalla

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (6)$$

Poikkileikkausluokan 4 I-palkeilla ja suorakulmion muotoisilla rakenneputkilla puristuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (7)$$

missä A_{eff} on tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala keskeisessä puristuksessa. (SFS-EN 1993-1-1 2005.) Tehollinen poikkileikkaus A_{eff} lasketaan standardin EN 1993-1-5 mukaan normaalijännitysten aiheuttaminen lommahdusvaikutusten mukaisesti. Ympyrän muotoisilla rakenneputkilla puristuskestävyyden mitoitusarvossa otetaan huomioon kuoren lommahdus pienennystekijällä standardin EN 1993-1-6 mukaan. Ympyrän muotoiselle poikkileikkausluokan 4 rakenneputkelle käytetään SSAB:n käsikirjassa (2016.) kaavaa

$$N_{c.Rd} = \frac{\chi_x A f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (8)$$

missä χ_x on lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kuorelle ja osavarmuusluku γ_{M1} on lommahduksen suhteen standardin EN 1993-1-6 kohdan 8.5.1(2) mukaan. Osavarmuusluvulle γ_{M1} käytetään Suomessa standardin EN 1993-1-6 mukaista suositusarvoa 1,1 (Ympäristöministeriö 2019.).

2.3.2 Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden mitoitus on esitetty standardin EN 1993-1- (2005.) luvussa 6.2.5. Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden suhteen taivutusmomentin M_{Ed} tulee täyttää ehto

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c.Rd}} \leq 1,0, \quad (9)$$

missä $M_{c.Rd}$ on poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo. Poikkileikkauksen taivutuskestävyys voidaan laskea plastisoituneen tilanteen mukaan, kun poikkileikkauksen kaikki puristetut osat kuuluvat vähintään poikkileikkausluokkaan 2. Poikkileikkauksen taivutuskestävyys voidaan laskea koko poikkileikkauksen yli lineaarisen kimmoteorian mukaan, kun poikkileikkauksen kaikki puristetut osat kuuluvat vähintään poikkileikkausluokkaan 3. Poikkileikkausluokassa 1 ja 2 taivutuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$M_{c.Rd} = M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (10)$$

missä $M_{pl.Rd}$ on plastisuusteorian mukaisen taivutuskestävyyden mitoitusarvo ja W_{pl} on plastisuusteorian mukainen poikkileikkauksen taivutusvastus. Poikkileikkausluokassa 3 taivutuskestävyys lasketaan kaavalla

$$M_{c.Rd} = M_{el.Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (11)$$

missä $M_{el.Rd}$ on kimmoteorian mukaisen taivutuskestävyyden mitoitusarvo ja W_{el} on kimmoteorian mukainen poikkileikkauksen taivutusvastus. Poikkileikkausluokassa 4 taivutuskestävyys lasketaan kaavalla

$$M_{c.Rd} = \frac{W_{eff.min} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (12)$$

missä $W_{eff.min}$ on tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus. Poikkileikkausluokan 4 ympyrän muotoisten rakenneputkien taivutuskestävyys lasketaan SSAB:n käsikirjan (2016.) mukaan kaavalla

$$M_{c.Rd} = \frac{\chi_x W_{el} f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (13)$$

missä χ_x on lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kuorelle, osavarmuusluku γ_{M1} on lommahduksen suhteen standardin EN 1993-1-6 kohdan 8.5.1(2) mukaan ja W_{el} on kimmoteorian mukainen taivutusvastus.

Taivutuskestävyydessä $M_{c.Rd}$ tulee ottaa huomioon kiinnittimien reikien vaikutus. Vedetyssä laipassa olevia reikiä ei tarvitse ottaa huomioon, jos poikkileikkauksessa toteutuu ehto

$$\frac{A_{f.net} 0,9 f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (14)$$

missä $A_{f.net}$ on vedetyn laipan netto-pinta-ala ja A_f on vedetyn laipan pinta-ala. Ehto takaa hallitun plastisoitumisen periaatteen mukaisen toiminnan reikien alueella. Ehto (14) pätee myös vedetyn uuman alueelle edellyttäen, että otetaan huomioon yhdessä vedetyn laipan ja uuman alue. Puristetulla alueella ei tarvitse ottaa huomioon kiinnittimien reikiä edellyttäen, että kiinnitin on reiässä lukuun ottamatta ylisuuria ja pidennettyjä reikiä. (EN 1993-1-1 2005.)

2.3.3 Leikkauskestävyys

Leikkauskestävyyden mitoitus on esitetty standardin EN 1993-1-1 luvussa 6.2.6. Poikkileikkauksen leikkauskestävyyden tulee täyttää leikkausvoiman murtorajatilan mitoitusarvoa V_{Ed} vastaan ehto

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c.Rd}} \leq 1,0, \quad (15)$$

missä $V_{c.Rd}$ on leikkauskestävyyden mitoitusarvo. Leikkauskestävyyden mitoitusarvolle $V_{c.Rd}$ voidaan käyttää kaikissa poikkileikkausluokissa plastista leikkauskestävyyttä $V_{pl.Rd}$ kaavan

$$V_{c.Rd} = V_{pl.Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

mukaan, missä A_v on leikkauspinta-ala. Pyöreille rakenneputkille plastista leikkauskestävyyttä käytetään SSAB:n rakenneputkien käsikirjan (2016.) mukaan poikkileikkausluokille 1-3 ja leikkauslommahdukskestävyys tulee laskea poikkileikkausluokalla 4. Leikkauspinta-ala A_v määritetään erilaisille poikkileikkaustyypeille ja kuormitustavoille taulukon 2 mukaan. Kaavan (15) mukainen plastinen leikkauskestävyys pätee tapauksessa,

jossa ei ole vääntöä. Standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.2.6 (7) leikkauskestävyyden laskemisessa ei tarvitse ottaa huomioon kiinnittimien reikiä lukuun ottamatta leikkauskestävyyden laskemisessa liitosalueilla standardin EN 1993-1-8 mukaan. Leikkausvoiman kanssa samaan aikaan oleva vääntö tulee ottaa huomioon leikkauskestävyyden standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.2.7(9) mukaan.

Poikkileikkauksen uuman leikkauslommahduskestävyys tulee tarkistaa standardin EN 1993-1-5 luvun 5 mukaan, jos uuman hoikkuus ylittää ehdon

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta}, \quad (17)$$

missä h_w on uuman korkeus leikkausvoiman suunnassa, t_w on tarkasteltavan uuman paksuus, ε on kuvissa 2-4 esitetty materiaalin myötölujuudesta riippuva kerroin. Myötölujuuttumisen huomioon ottavalle kertoimelle η annetaan standardin EN 1993-1-1 korjauksessa AC:2006 kohdassa 6.2.6 (6) varman päälle oleva arvo 1,0. Kansallisessa liitteessä esitetään kertoimelle η noudatettavaksi standardin EN 1993-1-5 suositeltavia arvoja eli 1,2 kun teräksen lämpötila on enintään 400 °C sekä 1,0 kun lämpötila on yli 400 °C. SSAB:n rakenneputkien käsikirjassa (2016.) suorakulmion muotoisille rakenneputkille annetaan leikkauslommahduskestävyyden hoikkuuden ehdoksi

$$\frac{h}{t} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} + 3, \quad (18)$$

missä h on rakenneputken korkeus leikkausvoiman suunnassa ja t on tarkasteltavan kohdan paksuus. Hoikat ehtojen (17) ja (18) mukaiset poikkileikkaukset, joille tulee mittaamaan leikkauslommahduskestävyys, kuuluvat tavallisesti poikkileikkausluokkaan 4, joten leikkauslommahduskestävyyden kaavoja ei tässä tarkemmin eritellä.

Taulukko 2: Yleisimpien ristikkoprofiilien leikkauspinta-alat standardin EN 1993-1-1 mukaan. (EN 1993-1-1. 2005. s.54-55.)

Poikkileikkaustyyppi	Leikkauspinta-ala A_v
Valssaamalla valmistetut I- ja H-profiilit, joissa kuormitus on uuman suuntainen.	$\min(A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f, \eta h_w t_w)$
Hitsatut I-, H- ja koteloprofiilit, joissa kuormitus on uuman suuntainen.	$\eta \sum (h_w t_w)$
Hitsatut I-, H- ja koteloprofiilit, joissa kuormitus on laipan suuntainen.	$A - \eta \sum (h_w t_w)$
Valssaamalla valmistetut suorakaiteen muotoiset rakenneputket, kun aineenpaksuus on vakio: a) kuormitus vaikuttaa korkeuden suunnassa. b) kuormitus vaikuttaa leveyden suunnassa.	a) $\frac{Ah}{(b+h)}$ b) $\frac{Ab}{(b+h)}$
Pyöreät rakenneputket, joiden aineenpaksuus on vakio.	$\frac{2A}{\pi}$

(A on poikkileikkauksen pinta-ala, b on kokonaisleveys, h on kokonaiskorkeus, h_w on uuman korkeus, r on nurkan pyöristyssäde, t_f on laipan paksuus, t_w on uuman paksuus, η on Myötölujittumisen huomioon ottava termi, kts. alla.)

2.3.4 Nurjahduskestävyys

Nurjahduskestävyys mitoitetaan standardin EN 1993-1-1 luvun 6.3 mukaan. Puristetut sauvat mitoitetaan nurjahduskestävyydelle ehdon

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (19)$$

mukaan, missä N_{Ed} on puristusvoiman mitoitusarvo ja $N_{b,Rd}$ on nurjahduskestävyyden mitoitusarvo. Poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3 nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{b,Rd}$ lasketaan kaavalla

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (20)$$

missä χ on kyseeseen tuleva nurjahduskestävyyden pienennystekijä ja γ_{M1} on osavarmuusluku stabiiliuden suhteen. Poikkileikkausluokalle 4 nurjahduskestävyys lasketaan kaavalla

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (21)$$

missä A_{eff} on poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala.

Nurjahduskestävyyden pienennystekijä χ valitaan sauvalle kyseeseen tulevaa nurjahduskäyrää käyttäen kuvan 5 ja taulukon 3 mukaan. Nurjahduskestävyyden pienennystekijä lasketaan kaavan

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ mutta } \chi \leq 1,0 \quad (22)$$

mukaan, missä termi Φ lasketaan kaavan

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (23)$$

mukaan, missä α on epätarkkuustekijä ja $\bar{\lambda}$ on muunnettu hoikkuus. Muunnetun hoikkuuden $\bar{\lambda}$ ollessa alle 0,2, nurjahduskestävyyden pienennystekijä χ on 1,0. Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}$ lasketaan poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3 kaavan

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad (24)$$

mukaan, missä N_{cr} on kimmoteorian mukainen bruttopoikkileikkauksen mukaan laskettu kriittinen voima kyseeseen tulevassa nurjahdusmuodossa. Poikkileikkausluokalle 4 muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}$ lasketaan kaavalla

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}. \quad (25)$$

Kimmoteorian mukaiselle nurjahduksen kriittiselle kuormalle N_{cr} kaikissa poikkileikkausluokissa on SSAB:n rakenneputkien -käsikirjassa (2016.) annettu kaava

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 EA}{(L_{cr}/i)^2}, \quad (26)$$

missä E on kimmokerroin, I on bruttopoikkileikkauksen neliömomentti kyseeseen tulevalla akselilla, L_{cr} on sauvan nurjahduspituus taivutusnurjahduksen suuntaan, A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala ja i on bruttopoikkileikkauksen hitaussäde kyseeseen tulevalla akselilla. Standardin EN 1993-1-1 liitteessä BB esitetään, että ristikon sauvojen nurjahduspituudeksi L_{cr} voidaan valita sauvojen systeempituus L , ellei nurjahduspituus

delle voida perustella pienempää arvoa analyysiin perustuen. Systemipituudella tarkoitetaan ristikon tasossa liitosten välistä etäisyyttä. Ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa systeemipituus määritellään poikittaistukien väliseksi etäisyydeksi.

Kuvan 5 nurjahduskäyrien valinnasta nähdään kuumamuovattujen etu nurjahduskestävyydessä kylmämuovattuihin taulukon 4 nurjahduskäyrien epätarkkuustekijöiden suhteen. Taulukossa 3 on laskettu epätarkkuustekijöiden vaikutus nurjahduskestävyyden pienennystekijään χ nurjahduskäyrien a ja c epätarkkuustekijöillä laskettujen pienennystekijöiden χ_1 ja χ_2 suhteen avulla. Taulukossa 3 laskettujen suhteiden avulla nähdään, että kuumamuovatuilla nurjahduskestävyys on pääsääntöisesti noin 10-20% parempi kuin kylmämuovatuilla. Korkealujuuksisilla teräksillä ero nurjahduskestävyyksissä kylmämuovattujen ja kuumamuovattujen välillä on vielä suurempi, noin 10-30%.

Taulukko 3: Nurjahduskäyrän a, a₀ ja c vaikutus nurjahduskestävyyden pienennystekijään.

λ	α_1 (a)	Φ_1	χ_1	α_2 (c)	Φ_2	χ_2	χ_1/χ_2
0.4	0.21	0.601	0.953	0.49	0.629	0.897	1.062
0.6	0.21	0.722	0.890	0.49	0.778	0.785	1.133
0.8	0.21	0.883	0.796	0.49	0.967	0.662	1.202
1	0.21	1.084	0.666	0.49	1.196	0.540	1.233
1.2	0.21	1.325	0.530	0.49	1.465	0.434	1.222
1.4	0.21	1.606	0.418	0.49	1.774	0.349	1.197
1.6	0.21	1.927	0.333	0.49	2.123	0.284	1.172
1.8	0.21	2.288	0.270	0.49	2.512	0.235	1.152
2	0.21	2.689	0.223	0.49	2.941	0.196	1.136
λ	α_1 (a ₀)	Φ_1	χ_1	α_2 (c)	Φ_2	χ_2	χ_1/χ_2
0.4	0.13	0.593	0.970	0.49	0.629	0.897	1.081
0.6	0.13	0.706	0.928	0.49	0.778	0.785	1.181
0.8	0.13	0.859	0.853	0.49	0.967	0.662	1.289
1	0.13	1.052	0.725	0.49	1.196	0.540	1.343
1.2	0.13	1.285	0.573	0.49	1.465	0.434	1.321
1.4	0.13	1.558	0.446	0.49	1.774	0.349	1.277
1.6	0.13	1.871	0.352	0.49	2.123	0.284	1.238
1.8	0.13	2.224	0.283	0.49	2.512	0.235	1.208
2	0.13	2.617	0.232	0.49	2.941	0.196	1.184

Muunnetun hoikkuuden $\bar{\lambda}$ kaavassa (24) eurokoodi olettaa, että muunnettu hoikkuus kasvaa teräksen myötölujuuden kasvaessa täten huonontaen sauvan nurjahduskestävyyttä. Tämä perustuu olettamukseen, että materiaalilujuuden kasvattaminen suurentaa rakenneosassa valmistuksen aikana syntyviä jäännösjännityksiä täten kasvattaen nurjahduskestävyyteen vaikuttavia epätarkkuuksia. Tutkimuksen RUOSTE (2016.) mukaan kylmämuovatuilla rakenneputkilla myötölujuuden kasvaessa nurjahduskestävyyden pienennystekijä on edullisempi kuin normaalilujuuksisilla rakenneputkilla. Tutkimuksen mukaan korkealujuuksisilla kylmämuovatuilla teräsputkilla jäännösjännitysten suhde myötölujuuteen on pienempi kuin normaalilujuuksisilla teräsputkilla, jolloin jäännösjännitysten vaikutus poikkileikkauksen nurjahduskestävyyteen on pienempi korkealujuuksisilla teräksillä. (RUOSTE. 2016. s. 73-75.)

Standardin EN 1993-1-12 taulukon 6.2 lisäsäännöllä teräksille, joiden lujuus on suurempi kuin S460, voidaan käyttää kuvan 5 lujuuden S460 nurjahduskäyriä. Tutkimuksen RUOSTE (2016.) mukaan teräslujuuksilla S420-S960 kylmämuovatuille teräsputkille voidaan käyttää kokeellisten tutkimusten mukaan nurjahduskäyrää b täyttäen standardin EN1990 liitteen D varmuuden. Numeerisiin malleihin perustuen teräslujuuksille S500-S700 voidaan käyttää analyysin mukaan nurjahduskäyrää b, mutta teräslujuudelle S960 nurjahduskäyrää a. Nykyisten standardien mukaan kylmämuovatuilla teräsputkilla teräslujuuden nostaminen ei tuo etua nurjahduskestävyyteen nurjahduskäyrän valinnan puolesta. Tutkimuksessa RUOSTE myös esitettiin numeerisiin mallien analysointiin perustuen normaalilujuuksisille S235-S355 kylmämuovatuille teräsputkille nurjahduskäyrä c, mikä vastaa nykyistä kuvan 5 nurjahduskäyrää. (RUOSTE. 2016. s. 73-75.)

Tutkimuksen RUOSTE (2016.) mukaan teräslujuuksilla S420-S960 kylmämuovatuille teräsputkille voidaan käyttää kokeellisten tutkimusten mukaan nurjahduskäyrää b täyttäen standardin EN1990 liitteen D varmuuden. Numeerisiin malleihin perustuen teräslujuuksille S500-S700 voidaan käyttää analyysin mukaan nurjahduskäyrää b, mutta teräslujuudelle S960 nurjahduskäyrää a. (RUOSTE. 2016. s. 73-75.)

Poikkileikkaus		Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä		
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Vassatut profiilit		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a b	a ₀ a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c
Hitsatut I-profiilit		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c	
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d	
Rakennepuutket		Kuumamuovattu	Kaikki	a	a ₀	
		Kylmämuovattu	Kaikki	c	c	
Hitsatut kotelo-profiilit		Yleensä (poikkeus, ks. alla)	Kaikki	b	b	
		Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Kaikki	c	c	
U-, T- ja umpiprofiilit			Kaikki	c	c	
L-teräkset			Kaikki	b	b	

Kuva 5: Standardin EN 1993-1-1 taulukko 6.2 "Nurjahduskäyrän valinta poikkileikkauksen mukaan". (EN 1993-1-1. 2005.)

Taulukko 4: Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät. (EN 1993-1-1. 2005.)

Nurjahduskäyrä	a ₀	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

2.3.5 Kiepahduskestävyys

Taivutetut sauvat voivat menettää stabiiliutensa vahvemman akselin suhteen puristetulla laipalla nurjahtamalla sivusuuntaan, jolloin sauva samalla kiertyy pituusakselinsa ympäri. Tätä ilmiötä kutsutaan kiepahdukseksi. Kiepahdukseen vaikuttaa poikkileikkauksen hoikkuus, jonka takia neliön tai pyöreän mallisilla rakenneputkilla ei käytännössä ole kiepahdusvaaraa. Ristikoissa tavallisesti yläpaarteessa tulee tarkasteluun kiepahduskestävyys, mutta yläpaarteen kiepahduserkkyyttä voidaan pienentää lisäämällä sivuttaistuksia sekä kohdistamalla kuormat yläpaarteen solmukohtiin.

Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo $M_{b.Rd}$ lasketaan sivusuunnassa tukemattomalla vahvemman akselin suhteen taivutetulla sauvalla kaavalla

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (27)$$

missä χ_{LT} on kiepahduskestävyyden pienennystekijä ja W_y on kyseeseen tuleva taivutusvastus. Poikkileikkausluokissa 1 tai 2 taivutusvastukselle käytetään plastista taivutusvastusta $W_y = W_{pl.y}$. Poikkileikkausluokissa 3 taivutusvastukselle käytetään kimboteorian mukaista taivutusvastusta $W_y = W_{el.y}$. Poikkileikkausluokissa 4 taivutusvastukselle käytetään tehollista taivutusvastusta $W_y = W_{eff.y}$. Osavarmuuslukuna γ_{M1} käytetään sauvan stabiiliuden suhteen laskettavan kestävyuden osavarmuuslukua $\gamma_{M1} = 1,0$. Standardissa EN 1993-1-1 annetaan kiepahduskestävyyden pienennystekijän χ_{LT} laskemiseksi kaksi menettelyä, yleisen tapauksen tarkastelu standardin kohdan 6.3.2.2 mukaan sekä valssattujen ja vastaavien hitsattujen sauvojen tarkastelu standardin kohdan 6.3.2.3 mukaan. Kohdan 6.3.2.3 mukainen tarkastelu koskee kaksoissymmetrisiä vakio-poikkileikkauksisia I- ja H-profiileja sekä kuumavalssattuja ja kylmämuovattuja rakenneputkia standardin EN 1993-1-1 kansallisen liitteen kohdan 6.3.2.3(1) mukaan. Kansallisen liitteen kohdan 6.3.2.3(2) mukaan kaikissa muissa tapauksissa käytetään standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.3.2.2 mukaisia sääntöjä. Ristikon sauvojen poikkileikkaukset kuuluvat tavallisesti kohdan 6.3.2.3 mukaisen menettelyyn. (SFS-EN 1993-1-1. 2005, Ympäristöministeriö. 2019. s.16-17.)

Valssatuille ja vastaaville hitsatuille sauvuille kohdan 6.3.2.3 mukaan lasketaan kiepahduskestävyyden pienennystekijä χ_{LT} kaavan

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mutta } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (28)$$

mukaan, missä $\bar{\lambda}_{LT}$ on sauvan muunnettu hoikkuus ja Φ_{LT} lasketaan kaavan

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta\bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (29)$$

mukaan. Kaavan (28) termi α_{LT} on kiepahduskäyrän epätarkkuustekijä ja se katsotaan taulukoiden 5 ja 6 mukaan. Taulukon 5 mukaiset kiepahduskäyrien epätarkkuustekijät ovat standardin EN 1993-1-1 taulukon 6.3 mukaiset. Taulukon 6 poikkileikkauksen mukaan valittavat kiepahduskäyrät esitetään teräsrakenteiden eurokoodin kansallisessa liitteessä taulukossa 1, missä esitetään kiepahduskäyrien valinta rakenneputkia varten. Kaavojen (27) ja (28) termeille β ja $\bar{\lambda}_{LT,0}$ annetaan kansallisessa liitteessä käytettäväksi arvot valssatuille kaksoissymmetrisille vakiopoikkileikkauksisille I- ja H-profiileille sekä kuumavalssatuille ja kylmämuokatuille rakenneputkille $\beta = 0,75$ ja $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$. Hitsatuille vakiopoikkileikkauksisille kaksoissymmetrisille I-profiileille annetaan arvot $\beta = 1,0$ ja $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,2$. Kansallisen liitteen mukaan muissa kuin taulukon 6 tapauksissa käytetään standardin EN 1993-1-1 menetelmää 6.3.2.2. (Ympäristöministeriö. 2019. s.16-17.)

Taulukko 5: Kiepahduskäyrien suositeltavat epätarkkuustekijät standardin EN 1993-1-1 taulukon 6.5 mukaan. (EN 1993-1-1. 2005.)

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Taulukko 6: Kiepahduskäyrien valinta poikkileikkauksen mukaan standardin EN 1993-1-1 kansallisen liitteen taulukon 1 mukaan standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.3.2.3 mukaisen tarkastelun kanssa käytettäessä. (Ympäristöministeriö. 2019. s.17.)

Poikkileikkaus (poikkileikkaus on vakio sauvan pituudella)	Rajat	Kiepahduskäyrä
Valssatut kaksoissymmetriset I- ja H-profiilit sekä kuumavalssatut rakenneputket.	$h/b \leq 2$ $2 < h/b < 3,1$	b c
Hitsatut kaksoissymmetriset I-profiilit ja kylmämuovatut rakenneputket.	$h/b \leq 2$ $2 < h/b < 3,1$	c d

Sauvan muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_{LT}$ kiepahduksen suhteen lasketaan kaavalla

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}, \quad (30)$$

missä W_y on poikkileikkausluokasta riippuva taivutusvastus ja M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa. Kriittiselle momentille M_{cr} ei esitetä eurokoodissa 3 laskentatapaa. ECCS:n teknisen komitean 8 dokumentissa ”Rules for Member Stability in EN 1993-1-1” (2006.) esitetään kaksoissymmetriselle suoralle vakiopoikkileikkauksiselle sauvalle kriittisen momentin kaava

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right], \quad (31)$$

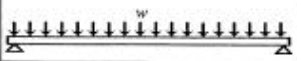

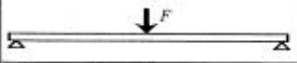



missä kertoimet C_1 ja C_2 ovat kuormituksesta riippuvia kertoimia, I_z on neliömomentti heikomman akselin suhteen, I_t on vääntöneliömomentti, I_ω on käyritysmisjäyhyys, E on kimmokerroin, G on liukukerroin, L on sauvan sivusiirtymän estävien tukipisteiden välimatka, k_z ja k_ω ovat sauvan tuentatyyppin mukaan kriittisen pituuden kertoimia ja z_g on kuorman vaikutuskohdan etäisyys vääntökeskiön painopisteestä poikkileikkauksen korkeussuunnassa. Kaavan (31) mukainen kriittinen momentti määritetään kaikilla poikkileikkausluokilla bruttopoikkileikkauksella. Kaavan (31) mukaista kimmoteorian mukaista kriittistä momenttia voidaan pitää varmalla puolella olevana. Kriittisen pituuden kertoimet k_z ja k_ω määräytyvät sauvan tuentatyyppin mukaan. Kaavassa (31) oletetaan, että sauvan päätytuilla sivusiirtymä ja sauvan kiertymä pituusakselin ympäri on estetty. Kerroin k_z esittää päätytukien kiertymäkykyä ja kerroin k_ω esittää päätytukien käyritysmisjäyhyys. Kertoimet k_z ja k_ω voivat vaihdella välillä 0,5...1,0, mutta ilman erityisempiä käyritysmisjäyhyys estämisen tapoja k_ω voidaan olettaa arvoksi 1,0, jolloin sauva pääsee vapaasti käyritysmisjäyhyys molemmista päistä. Kertoimelle k_z voidaan tavallisesti olettaa varmalla puolella oleva arvo 1,0, jolloin sauva pääsee vapaasti kiertymään molemmissa päissä. Kertoimet C_1 ja C_2 määräytyvät sauvan kuormitustavan mukaan ja ECCS:n eurokoodin 3 ohjeessa (2006.) on esitetty varmalla puolella olevia arvoja kertoimille C_1 , C_2 ja C_3 , mitkä on esitetty taulukossa 7. Kaksoissymmetrisellä poikkileikkauksella vääntökeskiö sijaitsee painopisteessä, jolloin kuormituspisteen ja vääntökeskiön välinen etäisyys z_g kuormituksen ollessa ylälaipalla $z_g = +h/2$ ja kuormituksen ollessa alalaipalla $z_g = -h/2$. Käyritysmisjäyhyys I_ω voidaan jättää standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.2.7 mukaan huomioimatta rakenneputkilla. I- ja H-profiileilla käyritysmisjäyhyys I_ω on standardipoikkileikkauksilla tavallisesti esitetty teräsvalmistajien poikkileikkaustaulukoissa. (ECCS. 2006. s. 229-238.)

Rakenneputkille voidaan standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.2.7 mukaan jättää estetyin väännön vaikutus huomioon ottamatta, jolloin kaava (30) sieventyy SSAB:n rakenneputkien käsikirjan (2016.) mukaan muotoon

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(L)^2} \left[\sqrt{\frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right], \quad (32)$$

missä $k = k_z$.

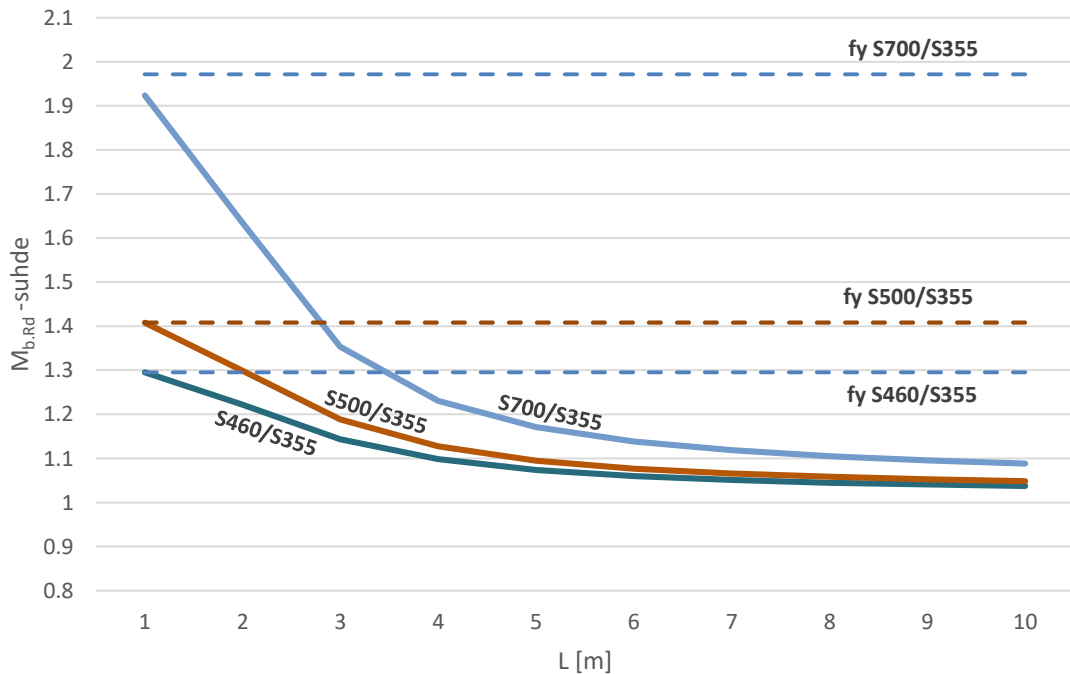
Taulukko 7: Eurokoodin 3 ECCS:n ohjeessa esitetyt arvot tekijöille C_1 , C_2 ja C_3 eri kuormitus- ja tuentatavoilla. (ECCS. 2006.)

Loading and support conditions	Bending moment diagram	Values of k_z	Value of factors		
			C_1	C_2	C_3
		1,0	1,12	0,45	0,525
		0,5	0,97	0,36	0,478
		1,0	1,35	0,59	0,411
		0,5	1,05	0,48	0,338
		1,0	1,04	0,42	0,562
		0,5	0,95	0,31	0,539

Kiepahduskestävyys voidaan jättää huomioon ottamatta ja pelkästään poikkileikkauksen taivutuskestävyys tarkistetaan, jos muunnetulle hoikkuudelle pätee ehto $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$ tai mitoitustaivutusmomentille ja murtomomentille pätee ehto $M_{Ed}/M_{cr} \leq 0,16$ standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.3.2.2(4) mukaan.

Kiepahduskestävyyden laskennassa teräslujuuden kasvattamisella ei ole vaikutusta kiepahduskäyrien valintaan toisin kuten nurjahduskestävyyden laskennassa, joten korkealjuuksisten terästen valinnalla ei saa yhtä helposti etua kiepahduskestävyyden kasvattamiseen. Myötölujuuden f_y suurentaminen suurentaa lineaarisesti kiepahduskestävyyden mitoitusarvoa $M_{b,Rd}$ kaavan (26) mukaan, mutta myötölujuuden kasvaminen suurentaa myös sauvan muunnettua hoikkuutta $\bar{\lambda}_{LT}$ suhteessa $\sqrt{f_y}$ täten pienentäen kiepahduskestävyyden pienennystekijää χ_{LT} . Teräslujuuden kasvattaminen voi nostaa myös profiilin poikkileikkausluokan luokasta 1 tai 2 luokkaan 3, jolloin kimmoteorian mukaisella taivutusvastuksella laskeminen pienentää kiepahduskestävyyttä. Kuvassa 6 on esitetty IPE 500 -profiililla korkeampien teräslujuuksien suhdetta S355 teräslujuuteen kiepahduskestävyyden $M_{b,Rd}$ osalta eri sauvan pituuksilla L . Kuvassa on katkoviivalla merkitty teräslujuuksien myötölujuuksien suhteet. Kuvasta nähdään kuinka sauvan pituuden kasvassa kiepahdus tulee nopeasti vallitsevaksi ja myötölujuuden kasvattamisella ei saada

enää hyötyä kiepahduskestävyyteen. Kuvan 6 perusteella korkealujuuksisten terästen suuresta myötölujuudesta saadaan enemmän hyötyä minimoimalla kiepahduksen vaikutusta esimerkiksi lisäämällä kiepahdustukia. (SCI. 2020. s. 57-58.)



Kuva 6: Teräslujuuden vaikutus kiepahduskestävyyteen $M_{b,Rd}$ IPE 500 -profiililla.

2.3.6 Taivutus ja leikkaus

Standardin EN 1993-1-1 luvun 6.2.8 mukaan leikkausvoiman vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen tulee ottaa huomioon paitsi, jos leikkausvoima on puolet pienempi leikkauskestävyyden plastisuusteorian mukaisesta arvosta. Tällöin leikkausvoiman vaikutus taivutuskestävyyteen voidaan jättää ottamatta huomioon lukuun ottamatta mahdollista leikkauslommahduksen vaikutusta.

Leikkausvoiman vaikutus taivutuskestävyyteen otetaan huomioon kohdan 6.2.8(3) mukaan laskemalla taivutusmomenttikestävyys käyttäen leikkauspinta-alalle pienennettyä myötörajaa $(1 - \rho)f_y$, missä ρ on kaavan

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (33)$$

mukainen, missä V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa ja $V_{pl,Rd}$ on kaavan (16) mukainen plastisuusteorian mukainen leikkausvoimakestävyys. I-profiilin tapauksessa taivutuskestävyys laskettaisiin uudelleen käyttäen uumalle pienennettyä

myötörajaa. Tämä voi johtaa työläisiin laskentoihin, mutta kohdassa 6.2.8(5) esitetään kaikille poikkileikkausluokille kaksoissymmetriselle vahvemman akselin suhteen taivutetulle I-profiilille leikkausvoiman vaikutuksen huomioon ottavan taivutuskestävyyden kaavan

$$M_{y.V.Rd} = \frac{\left[W_{pl.y} - \frac{\rho A_w^2}{4t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ mutta } M_{y.V.Rd} \leq M_{y.c.Rd}, \quad (34)$$

missä $W_{pl.y}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus, ρ on kaavan (32) mukainen pienennyskerroin, A_w on profiilin uuman pinta-ala, t_w on uuman paksuus, γ_{M0} on kestävyuden osavarmuusluku 1,0 ja $M_{y.c.Rd}$ on poikkileikkausluokan mukaan laskettu taivutuskestävyys luvun 2.3.2 mukaan. (SFS-EN 1993-1-1. 2006.) SSAB:n rakenneputkien käsikirjassa (2016.) esitetään kaavaa (34) vastaava kaava nelion ja suorakaiteen muotoisille rakenneputkille

$$M_{y.V.Rd} = \frac{\left[W_{pl.y} - \frac{\rho A_v^2}{8t} \right] f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ mutta } M_{y.V.Rd} \leq M_{y.c.Rd}, \quad (35)$$

missä A_v on rakenneputkelle taulukon 2 mukainen leikkauspinta-ala ja t on putken materiaalipaksuus. Pyöreille poikkileikkausluokan 1, 2 ja 3 rakenneputkille SSAB:n käsikirjassa (2016.) esitetään leikkausvoiman vaikutuksen huomioon ottavan taivutuskestävyyden kaava

$$M_{V.Rd} = (1 - \rho)M_{c.Rd}, \quad (36)$$

missä ρ on kaavan (32) mukainen pienennystekijä myötörajalle ja $M_{c.Rd}$ on poikkileikkauksen poikkileikkausluokan mukaan laskettu taivutuskestävyys. Kaavassa (36) leikkausvoiman pienentämä myötöraja oletetaan koko poikkileikkaukselle taivutuskestävyyttä laskiessa.

2.3.7 Taivutus ja aksiaalinen voima

Aksiaalisen voiman ja taivutusmomenttien yhteisvaikutus, kun nurjahdusta ja kiepahdusta ei oteta huomioon, lasketaan standardin EN 1993-1-1 luvun 6.2.9 mukaan. Poikkileikkausluokilla 1 ja 2 aksiaalisen voiman ja taivutuksen yhteisvaikutuksessa voidaan käyttää ehtoa

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N.Rd}} \leq 1,0, \quad (37)$$

missä M_{Ed} taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa ja $M_{N.Rd}$ on normaalivoiman vaikutuksen huomioon ottava taivutuskestävyyden mitoitusarvo. Kaksoissymmetrisille I- tai H-profiileille ei tarvitse ottaa normaalivoiman pienentävää vaikutusta huomioon taivutuskestävyydessä y-akselin suuntaan ehtojen

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl.Rd} \text{ ja } N_{Ed} \leq 0,5 \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (38)$$

täyttyessä. Kaksoissymmetrisille I- tai H-profiileille normaalivoimaa ei tarvitse ottaa huomioon taivutuskestävyyden z-akselin suuntaan, jos ehto

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (39)$$

täyttyy. Normaalivoiman vaikutuksen huomioon ottava taivutuskestävyys $M_{N.Rd}$ lasketaan kaksoissymmetrisillä valssatuilla tai hitsatuilla I- tai H-profiileille y-akselin suuntaan kaavalla

$$M_{N.y.Rd} = \frac{1-n}{1-0,5a} M_{pl.y.Rd}, \text{ mutta } M_{N.y.Rd} \leq M_{pl.y.Rd}, \quad (40)$$

missä $n = N_{Ed}/N_{pl.Rd}$, $a = (A - 2A_f)/A \leq 0,5$ ja $A_f = b_f t_f$ sekä z-akselin suuntaan kaavalla

$$M_{N.z.Rd} = \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] M_{pl.z.Rd}, \text{ mutta } M_{N.z.Rd} \leq M_{pl.z.Rd}, \quad (41)$$

kun $n > a$, muuten $M_{N.z.Rd} = M_{pl.z.Rd}$.

Neliön ja suorakaiteen muotoisille rakenneputkille normaalivoiman huomioon ottaminen taivutuskestävyydessä määräytyy y-akselin suunnassa ehtojen

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl.Rd} \text{ ja } N_{Ed} \leq \frac{0,5(A - 2bt)f_y}{\gamma_{M0}} \quad (42)$$

sekä z-akselin suunnassa ehtojen

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl.Rd} \text{ ja } N_{Ed} \leq \frac{0,5(A - 2ht)f_y}{\gamma_{M0}} \quad (43)$$

Neliön ja suorakaiteen muotoisille rakenneputkille normaalivoiman vaikutuksen huomioon ottavan taivutuskestävyyden kaava $M_{N.Rd}$ on y-akselin suunnassa

$$M_{N.y.Rd} = \frac{1-n}{1-0,5a_w} M_{pl.y.Rd}, \text{ mutta } M_{N.y.Rd} \leq M_{pl.y.Rd}, \quad (44)$$

missä $n = N_{Ed}/N_{pl.Rd}$ ja $a_w = (A - 2bt)/A \leq 0,5$. Z-akselilla vastaava kaava on

$$M_{N.y.Rd} = \frac{1 - n}{1 - 0,5a_f} M_{pl.y.Rd}, \text{ mutta } M_{N.y.Rd} \leq M_{pl.y.Rd}, \quad (45)$$

missä $n = N_{Ed}/N_{pl.Rd}$ ja $a_f = (A - 2ht)/A \leq 0,5$.

Pyöreillä rakenneputkilla normaalivoiman vaikutuksen huomioon ottavan taivutuskestävyys $M_{N.Rd}$ lasketaan kaavasta

$$M_{N.Rd} = M_{N.y.Rd} = M_{N.z.Rd} = (1 - n^{1.7})M_{pl.Rd}, \text{ mutta } M_{N.Rd} \leq M_{pl.Rd}, \quad (46)$$

missä $n = N_{Ed}/N_{pl.Rd}$.

Kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen osoitetaan täyttävän ehto

$$\left(\frac{M_{y.Ed}}{M_{N.y.Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z.Ed}}{M_{N.z.Rd}} \right)^\beta \leq 1, \quad (47)$$

missä kertoimet α ja β riippuvat poikkileikkauksen tyypistä, mutta kertoimille voidaan valita varmalla puolella olevan arvon $\alpha = \beta = 1$. I- ja H-profiileille kertoimille saadaan arvot $\alpha = 2$ ja $\beta = 5n$, mutta $\beta \geq 1$. Suorakaiteen ja neliön mallisilla rakenneputkilla $\alpha = \beta = 1,66/[1 - 1,13(N_{Ed}/N_{pl.Rd})^2]$, mutta α ja $\beta \leq 6$. Pyöreillä rakenneputkilla $\alpha = \beta = 2$.

Poikkileikkausluokalla 3, kun leikkausvoimaa ei ole, poikkileikkauksen suurimman aksiaalisen paikallisen jännityksen tulee täyttää ehto

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (48)$$

missä $\sigma_{x.Ed}$ on normaalivoiman ja momenttien yhteisvaikutuksesta aiheutuva suurin normaalijännitys nettopoikkileikkauksella laskettuna. Teräsrakenneyhdistyksen Eurocode 3 -oppikirjassa (2014.) esitetään suurimmalle normaalijännitykselle $\sigma_{x.Ed}$ kaava

$$\sigma_{x.Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_{net}} + \frac{M_{y.Ed}}{W_{net.y.min}} + \frac{M_{z.Ed}}{W_{net.z.min}}, \quad (49)$$

missä A_{net} on kiinnikkeiden reiät sekä muut heikennysreiät huomioon otettuna laskettu nettopinta-ala ja $W_{net.y.min}$ sekä $W_{net.z.min}$ ovat nettopoikkileikkauksella kyseeseen tulevan akselin suuntaan lasketut pienimmät taivutusvastukset poikkileikkauksessa.

2.3.8 Taivutus, leikkaus ja aksiaalinen voima

Taivutuksen, leikkauksen ja aksiaalisen voiman yhteisvaikutuksesta esitetään standardin EN 1993-1-1 luvussa 6.2.10. Normaalivoiman, taivutusmomenttien ja leikkausvoiman vaikuttaessa samanaikaisesti, kun leikkausvoima $V_{Ed} < 0,5V_{pl.Rd}$, otetaan leikkausvoiman vaikutus huomioon laskemalla luvussa 2.3.7 esitettyjen taivutuskestävyyksien $M_{N.Rd}$ arvot ottaen huomioon luvussa 2.3.6 esitetty leikkauspinta-alalla vaikuttava pienennetty myötöraja. Tämä voidaan ottaa huomioon esimerkiksi I- ja H-profiileilla käyttämällä kaavassa (40) taivutuskestävyyden $M_{pl.y.Rd}$ sijasta kaavassa (34) esitettyä leikkausvoiman vaikutuksesta pienennettyä taivutuskestävyyttä $M_{y.V.Rd}$ kaavan (40) täten tullen muotoon

$$M_{N.y.Rd} = \frac{1-n}{1-0,5a} M_{y.V.Rd}, \text{ mutta } M_{N.y.Rd} \leq M_{pl.y.Rd}. \quad (50)$$

Poikkileikkausluokille 3 ja 4 tulisi laskea luvun 2.3.6 mukaisen leikkauspinta-alalle pienennetyn myötörajan $(1-\rho)f_y$ kanssa kestävydet ja poikkileikkaussuureet. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.1.10(3) mukaan arvolla $(1-\rho)$ pienennettyä poikkileikkauksen vastaavan osan paksuutta. SSAB:n rakenneputkien käsikirjassa (2016.) esitetään kuitenkin, että laskenta voi muodostua hankalaksi erityisesti saman aikaisesti y- ja z-akseleilla vaikuttavien leikkausvoimien kanssa, mutta käsikirjassa esitetään, että leikkausvoiman vaikutus voidaan ottaa yksinkertaistetusti varmallalla puolella huomioon, jos koko poikkileikkaukselle käytetään luvun 2.3.6 mukaista pienennettyä myötörajaa $(1-\rho)f_y$. SSAB:n käsikirjassa (2016.) esitetään yhteisvaikutuksille poikkileikkausluokalla 3 kaava

$$\frac{N_{Ed}}{Af_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y}f_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed}}{W_{el.z}f_y/\gamma_{M0}} \leq (1-\rho), \quad (51)$$

joka pätee kaikilla poikkileikkausmuodoilla.

Teräsrakenneyhdistyksen Eurocode 3 -oppikirjassa (2014.) esitetään, että kaikilla poikkileikkausluokilla voidaan käyttää myös varmallalla puolella olevaa lineaarista yhteisvaikutuksen epäyhtälöä

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.Rd}} \leq 1, \quad (52)$$

missä rasituskomponenttien mitoitusarvoja N_{Ed} , $M_{y.Ed}$ ja $M_{z.Ed}$ vastaavat bruttopoikkileikkauksien tai tehollisten leikkauksien kestävyksien mitoitusarvot N_{Rd} , $M_{y.Rd}$ ja $M_{z.Rd}$ lasketaan aikaisempien lukujen mukaan. Leikkausvoima otetaan huomioon luvun 2.3.6 mukaisesti taivutuskestävyyksillä.

2.3.9 Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus puristetussa sauvassa

Ellei rakenteelle suoriteta toisen kertaluvun analyysiä taivutusmomentin ja normaalivoiman rasittaman sauvan kestävyys tarkastetaan standardin EN 1993-1-1 luvun 6.3.3 mukaan, kun sauva voi nurjahtaa tai kiepahtaa. Luvun 6.3.3 mukainen menettely koskee vain vakiopoikkileikkauksisia kaksoissymmetrisiä poikkileikkauksia, jotka eivät ole alttiit poikkileikkauksen muodonvääristymiselle. Luvun 6.3.3 kohdan (3) mukaan rakennejärjestelmän sauvoille kestävyuden tarkastus voidaan tehdä perustuen yksittäisten sauvojen tarkasteluun, jotka ajatellaan irrotetuksi rakenteesta. Sivusiirtyvien rakenteiden toisen kertaluvun vaikutukset (P- Δ -vaikutukset) otetaan huomioon joko sauvanpäämomentteissa tai käyttämällä tarkoituksenmukaisia nurjahduspituuksia. SSAB:n rakenneputkien käsikirjassa (2016.) kohdassa 2.10.1 kerrotaan, että yhteisvaikutuskaavoihin sisältyy toisen kertaluvun vaikutukset kestävyteen tarkasteltavan sauvan itsensä osalta. Ruukin "Hitsatut profiilit EN 1993" -käsikirjassa (2010.) kohdassa 2.11.1 esitetään sovelletut kaavat heikomman akselin suhteen symmetriselle poikkileikkaukselle kyseisen kohdan mukaisten ehtojen mukaan. Eurokoodin 3 kansallisen liitteen mukaan

Yhdistetyn taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen rasittamille sauvoille tarkistetaan ehdot

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (53)$$

ja

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0, \quad (54)$$

missä N_{Ed} , $M_{y.Ed}$ ja $M_{z.Ed}$ ovat normaalivoiman ja taivutusmomenttien mitoitusarvoja murtorajatilassa, $\Delta M_{y.Ed}$ ja $\Delta M_{z.Ed}$ ovat poikkileikkausluokassa 4 painopisteakselin siirtymisestä aiheutuvat momentit, N_{Rk} , $M_{y.Rk}$ ja $M_{z.Rk}$ on poikkileikkauksen poikkileikkausluokan määritetyt puristuskestävyyden ja taivutusmomenttikestävyyksien ominaisarvot, χ_y ja χ_z ovat luvun 2.3.4 mukaiset nurjahduskestävyyksien pienennystekijät kyseiseen suuntaan, χ_{LT} on luvun 2.3.5 mukainen kiepahduskestävyyden pienennystekijä ja k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} ja k_{zz} ovat standardin EN 1993-1-1 liitteiden A tai B mukaan määritetyt yhteisvaikutustekijät. Eurokoodin 3 kansallisen liitteen kohdan 6.3.3(5) mukaan sekä liitteen A menetelmää 1 että liitteen B menetelmää 2 voidaan käyttää yhteisvaikutustekijöiden määrittämisessä. Liitteen A menetelmä 1 on tarkempi kuin liitteen B menetelmä 2, mutta

menetelmä 1 on laskennallisesti työläämpi. Liitteen B menetelmässä 2 on annettu yhteisvaikutustekijöiden määrittämisessä taulukkotiedoissa tiedot poikkileikkaustyyppin osalta I-profiileille ja suorakaideputkille, mutta eurokoodin 3 kansallisessa liitteessä (2019.) kohdassa 6.3.3 kerrotaan, että liitteen B mukaista menetelmää 2 sovelletaan myös pyöreille rakenneputkille. Pyöreillä ja neliön muotoisilla rakenneputkilla ei ole käytännössä kiepahdusvaaraa, joten niille voi kiepahduskestävyyden pienennystekijän χ_{LT} olevan arvoa $\chi_{LT} = 1,0$. (SFS-EN 1993-1-1. 2005, SSAB. 2016. s.135-139.)

3. ALGORITMIAVUSTEINEN TERÄSRISTIKON SUUNNITTELU JA OPTIMOINTI

Algoritmiavusteisella suunnittelulla on tarkoitus luoda algoritmeihin perustuva erilaisten parametrien mukaan toimiva malli, jonka avulla saadaan lähtötietoja muuttamalla etsittyä haluttu lopputulos suunniteltavalle mallille. Algoritmillä tarkoitetaan sarjaa ohjeita tai käskyjä, joilla päästään tarkoituksen mukaisista lähtötiedoista haluttuun lopputulokseen. Algoritmiavusteisella suunnittelulla luodaan parametrinen malli, joka mallin algoritmien avulla luo halutun lopputuloksen lähtöparametreja muuttamalla ja vertailemalla. Parametrisella mallilla tarkoitetaan mallia, jonka kaikki tieto perustuu mallin parametreihin eli mallille syötettäviin tietoihin.

Luomalla algoritmeihin perustuvan parametrinen mallin tulee tietokoneavusteisella suunnittelulla mukaan luonnollisesti myös parametrinen mallin optimointi haluttuun lopputulokseen. Parametrinen mallin optimoinnissa diskreettien lähtöparametrien suuren määrän tai ja epälineaaristen yhtälöiden takia päädytään monesti heurististen optimointimenetelmien käyttöön. Heuristisilla optimointimenetelmillä ei välttämättä päästä optimointitehtävän globaaliin optimiin, mutta niillä saadaan riittävän hyvä ratkaisu riittävässä ajassa. Heuristisissa menetelmissä käytetään monesti stokastisia menetelmiä, jolloin satunnaisuuteen perustuen lähtömuuttujia vaihtelemalla menetelmä suuntaa kohti optimia.

3.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu

Algoritmiavusteista ja parametrista suunnittelua on tutkittu ja kehitetty arkkitehtisuunnittelussa ja rakennesuunnittelussa paljon 2000-luvulla. Tietokoneavusteinen suunnittelu on tuonut tarvittavat työkalut suunnittelijoiden käyttöön, jotta algoritmiavusteisen suunnittelun tehokkuus on saatu mahdollistettua suunnittelussa. Moniin suunnitteluohjelmistoihin kehitetyt ohjelmointirajapinnat (*application programming interface*, API) ovat tuoneet ohjelmien käyttäjille mahdollisuuden luoda omia algoritmeja ohjelmien käyttämisen tehostamiseen. Suunnitteluohjelmien välillä on kehitetty myös integraatiotapoja, jolloin suunnittelumalleja pystytään viemään tai tuomaan ohjelmasta toiseen suhteellisen vaivattomasti. Lisääntynyt ohjelmointiosaaminen suunnittelijoilla on myös tuonut uusia työkaluja tai käyttötapoja perinteiseen tietokoneavusteiseen suunnitteluun.

Arkkitehtisuunnittelussa algoritmiavusteilla suunnittelulla on haettu etua tavallisesti geometrian luomisessa, jolloin suunnittelija voi parametrisella mallilla tutkia monimutkaisia

muotoja suhteellisen helpolla vaivalla. Geometrian hakemisessa suunnittelija luo algoritmeista mallin, joka valituilla lähtöparametreilla muodostaa halutun geometrian muodon. Tällöin lähtöparametreja muuttamalla suunnittelija saa tehokkaasti tarkennettua ja vertailtua eri muotoja algoritmisen mallin avulla. Arkkitehtisuunnittelussa algoritmiavusteista suunnittelua on käytetty ja tutkittu jo pidempään kuin rakennesuunnittelussa, sillä geometrian hakemisessa algoritmiavusteinen suunnittelu tulee eduksi.

Rakennesuunnittelussa algoritmiavusteisella suunnittelulla luodulla parametrisella mallilla pyritään tavallisesti hakemaan kustannustehokkain rakenne, joka täyttää vaaditut kriteerit. Monimutkaisissa rakenteissa voi olla vaikea tai hidas löytää käsin iteroimalla kustannustehokkainta suunnitteluratkaisua, jolloin parametristä mallia on kehitetty tehostamaan parhaimman suunnitteluratkaisun löytämistä. Tällöin suunnittelija voi parametristä mallia hyödyntäen joko optimoida riittävän hyvän suunnitteluratkaisun tai parametristä mallia iteroiden etsiä suunnitteluratkaisua. Suunnittelijan tulisi aina miettiä parametrisen mallin käyttö hankekohtaisesti, sillä parametrisen mallin teko voi olla aikaa vievää, jolloin menetelmän käytöstä ei välttämättä olekaan ajallista hyötyä suunnittelussa. Teräsristikon tapauksessa suunnittelijan tekemien tai valmiiksi saatujen algoritmien avulla rakennesuunnittelija voi lähtötietoja muuttamalla hakea mahdollisimman kustannustehokas suunnitteluratkaisu ristikolle.

Parametrisen mallin etuna on suunnittelun kohdekohtainen tarkkuuden parantaminen. Tosin suunnittelija voi päättää itse kuinka tarkkaa parametrissa mallia suunnittelussa käyttää. Parametristä mallia voidaan yksinkertaistaa joidenkin osien suhteen, jos niiden huomioon ottaminen vaatisi paljon aikaa tai jos joitain lähtötietoja ei ole saatavilla. Parametrisen mallin tekemisessä suunnittelija voi tehdä kehittää itse algoritmit tai suunnittelija voi käyttää valmiita algoritmeja. Suunnittelija voi myös muokata vanhoista parametrisistä malleista omaan suunnittelukohteeseensa sopivan mallin.

Nykyään eri suunnitteluohjelmien välillä pystyy viemään malleja melko sulavasti ja toimivasti ohjelmien välillä, jolloin samaa mallia ei tarvitse montaa kertaa mallintaa uudelleen eri ohjelmissa. Rakennemallin voi viedä melko jouhevasti mallintamisohjelmasta FEM-ohjelmaan, jolloin FEM-ohjelmassa ei tarvitse koko rakennemallia tehdä uudelleen. Yleisimmillä mallintamisohjelmilla ja FEM-ohjelmilla mallien sisäänvienti ja ulosvienti on tehty yhteensopiviksi ainakin mallin geometrian siirtämisen, joten monia yleisimpiä eri valmistajienkin ohjelmia pystytään käyttämään yhdessä rajoitetusti.

Algoritmiavusteisessa suunnittelussa algoritmit voidaan tehdä ohjelmointikielillä tai visuaalisilla ohjelmointityökaluilla. Suunnitteluohjelmien erilaiset komponenttityökalut ovat

myös algoritmeja, mutta niiden muokattavuus on tavallisesti rajoitettuja. Algoritmiavusteisessa suunnittelussa on tavallisesti tärkeää, että parametrinen mallin käyttäjä tuntee algoritmien toiminnan, jotta tunnetaan mahdolliset mallin rajoitukset ja mallin toiminta tarkkaan. Suunnitteluohjelmissa ei myöskään ole tavallisesti mahdollisuutta kytkeä komponenttikomentoja sarjaan, jolloin ei ole mahdollisuutta suorittaa monia komponentteja tai työkaluja automaattisesti. Ohjelmien valmistajat voivat julkaista ohjelmille ohjelmointirajapinnan, joka suunnitteluohjelmien tapauksessa tuo lisätyökaluja ja lisämuokattavuutta käyttäjälle. Ohjelmointirajapinnalla esitetään mahdolliset komennot ja toiminnot ohjelmalle, jolloin ohjelmalle voidaan ohjelmoida käytettävissä olevien toimintojen mukaan erilaisia käyttötarkoituksia. Ohjelmistojen valmistajat päättävät API:n julkaisusta, että julkaistaanko API rajoitetusti, vapaasti tai API:a ei julkaista ollenkaan. Valmistaja julkaisee ohjelmistorajapinnalle dokumentaatio, missä esitetään ohjelmointirajapinnassa käytettävät toiminnot, jonka avulla ohjelman käyttäjä osaa käyttää API:a ohjelman yhteydessä.

3.2 Optimointi

Optimoinnilla pyritään löytämään halutulle kohdefunktiolle minimi- tai maksimiarvo käyttäen tiettyjä rajoitefunktioita kohdefunktion muuttujille. Yksinkertaisimmillaan optimointitehtävä voi olla muotoa

$$\text{minimize } f(\mathbf{x}) \text{ subject to } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (55)$$

missä $f(\mathbf{x})$ on kohdefunktio, mikä sisältää muuttujat vektorilla \mathbf{x} ja $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ on vektori, joka sisältää rajoitefunktioita $g_1(\mathbf{x}), \dots, g_i(\mathbf{x})$. Optimointitehtäviä voidaan ratkaista numeerisilla menetelmillä tai optimointitehtävän ratkaisun hakemiseen voidaan käyttää heuristisia menetelmiä. Numeerisilla menetelmillä voidaan ratkaista optimointitehtävä matemaattisesti, mutta numeeriset menetelmät voivat olla tavallisesti aikaa vieviä tehdä sekä epälineaarisilla rajoitefunktioilla ja diskreeteillä muuttujilla numeeriset menetelmät voivat olla myös hankalia ja työläitä. Numeeriset menetelmät sopivat hyvin lineaaristen yhtälöiden ratkaisuun jatkuvilla muuttujilla, mutta rajoitettujen epälineaaristen yhtälöiden optimointiin on myös kehitetty optimointimenetelmiä, kuten esimerkiksi *sequential quadratic programming* -algoritmi (SQP-algoritmi). (Spilles et al. 2009.)

Heuristiset tai metaheuristiset menetelmät sopivat tavallisesti paremmin epälineaaristen funktioiden tai diskreettien muuttujien optimointitehtävän ratkaisemiseksi. Heuristisilla optimointimenetelmillä tarkoitetaan menetelmiä, joilla saadaan ratkaistua optimointitehtävä riittävällä tarkkuudella tai riittävän nopeasti. Heuristisia menetelmiä voidaan käyttää numeeristen menetelmien sijaan, jos optimointitehtävään sisältyy monia epälineaarisia

tai hankalia rajoitefunktioita tai muuttujat ovat diskreettejä. Monet heuristiset optimointimenetelmät ovat stokastisia menetelmiä, jolloin optimointimenetelmä käyttää tai luo satunnaisia muuttujia. Heuristisilla optimointimenetelmillä ei välttämättä päästä lähelle globaalia optimia optimointitehtävälle järkevässä ajassa, mutta menetelmien tarkoituksena on saada riittävän hyvä ratkaisu suhteellisen lyhyessä ajassa. Heurististen optimointimenetelmien etuna on myös optimointialgoritmien monikäyttöisyys sekä muunnettavuus. Heuristisiin menetelmiin kuuluvat optimointialgoritmit kuten simuloitu jäähdytys (*simulated annealing*, SA), tabuhaku (*tabu search*, TS), geneettiset algoritmit (GA) ja parveilualgoritmi (*particle swarm optimization*, PSO). (Jalkanen 2007.)

Simuloitu jäähdytys ja tabuhaku kuuluvat paikallisen haun algoritmien (*local search algorithms*) luokkaan, missä algoritmit parantavat kohdefunktion arvoa paikallisen tiedon perusteella. Paikallisen haun optimointialgoritmit lähtevät alkuarvauksesta ja siirtyvät jokaisella iterointikierröksellä parempaa ratkaisua kohti alkuarvauksen ympäristöstä. Yksinkertaisimmillaan paikallisen haun optimointialgoritmit siirtyvät kohti paikallista optimia ja pysähtyvät ensimmäisessä paikallisessa optimissa, jolloin optimointitulokset voi jäädä heikoksi. Edistyneisimmissä algoritmeissa on toimintoja, joilla pystytään välttämään heikkoja optimointituloksia tarjoavia paikallisia optimeita ja edistämään optimointitulosta lähemmäksi globaali optimia. Sekä simuloitulla jäähdytyksellä, että tabuhaulla on menetelmät, millä optimointialgoritmit pystyvät poistumaan paikallisesta optimista ja antamaan parhaimman optimointituloksen vasta tietyn iterointikierrösmäärän tai iterointiajan jälkeen. (Jalkanen 2007.)

Simuloidun jäähdytyksen idea perustuu metallin lämpökäsittelyyn, missä kuumennetun teräksen lämpötilan annetaan laskea hitaasti, jolloin saadaan suotuisampia ominaisuuksia teräkselle teräsmolekyylien pyrkiessä tasapainotilaan. Jäähdyttämällä teräksen liian nopeasti ei välttämättä saavuteta tasapainotilaa täysin teräksessä. Optimoinnissa algoritmille annetaan jokin alkulämpötila ja lämpötila pienenee nolnaan iteraatiokierrösten kuluessa. Lämpötilaan perustuen algoritmi muodostaa todennäköisyyden valita huonompi ratkaisu nykyisen ratkaisun sijasta algoritmin hakiessa ympäristöstään ratkaisuja. Mitä pienempi lämpötila on, niin sitä pienempi mahdollisuus valita huonompi ratkaisu. Tällöin lämpötilan ollessa korkea, algoritmi valitsee melkein kaikki ratkaisut ympäristöstään, jolloin algoritmi valitsee myös huonompia ratkaisuja näin välttäen paikallisia optimeita alussa. Lämpötilan pienetessä nolnaan algoritmi ei enää valitse huonompia ratkaisuja vaan pyrkii optimiin valiten parempia ratkaisuja. (Jalkanen 2007.)

Tabuhaussa algoritmin päästessä paikalliseen optimiin, algoritmi tallentaa parhaimman ratkaisun ylös tabulistaan, jonka ratkaisuja algoritmi ei voi enää käyttää. Tabuhaku etsii sitten seuraavaksi parhaimman ratkaisun paikallisen optimin ympäristöstä ja ottaa taas

ratkaisun ylös tabulistaan. Siten tabuhaku pystyy pääsemään pois paikallisesta optimista ja etsimään mahdollisesti seuraavan paikallisen optimin. Jos parempia paikallisia optimeita ei löydy, niin algoritmi antaa tulokseksi listasta tallennetuista ratkaisuista parhaimman ratkaisun. (Jalkanen 2007.)

Geneettiset algoritmit ja parveilualgoritmit ovat populaatioihin perustuvia optimointimenetelmiä, jotka eroavat paikallisen haun menetelmistä siten, että populaatiomenetelmät yhden optimointiratkaisun sijaan lasketaan optimointiratkaisujen ryhmiä. Ryhmien optimointiratkaisut ovat toisistaan riippumattomia, jolloin ryhmien optimointitehtäviä pystytään suorittamaan rinnakkain. Populaatioihin perustuvilla menetelmillä ei ole välttämättä antaa käypää alkuarvausta optimointitehtävällä, sillä ensimmäisen ryhmän ratkaisut valitaan tavallisesti satunnaisesti. Ensimmäisen ryhmän jälkeen optimointialgoritmi pyrkii valitsemaan seuraavat ryhmät siten, että ratkaisuryhmä lähenee optimointitehtävän globaalia optimia. Populaatioihin perustuvilla menetelmillä ryhmien valinta vaihtelee menetelmien välillä. Geneettisen algoritmin idea perustuu luonnonvalintaan, jossa populaatioryhmien ratkaisujäsenistä valitaan vain parhaimmat, joiden perusteella muodostetaan seuraava populaatioryhmä. Parveilualgoritmiin ryhmien valinnan idea perustuu luonnossa esiintyvien parvien, esimerkiksi kala- tai lintuparvien, käyttäytymiseen. Parvessa yksittäisten jäsenten kokemuksien ja koko parven kollektiivisen kokemuksen avulla parvi yrittää mukautua ympäristöönsä. Näin yksittäisen parven jäsenelle sekä koko parvelle on hyödyllistä jakaa tietoa ajaen koko parven etua. (Jalkanen 2007.)

Jalkasen väitöskirjassa (2007.) on vertailtu edellä mainittujen heurististen optimointialgoritmien käyttöä erilaisten teräsrakenteiden optimoinnissa. Väitöskirjan tutkimuksen mukaan heuristiset algoritmit sopivat erilaisten teräsrakenteiden optimointiin, vaikka optimointitehtävät sisältäisivätkin hankalia rajoitefunktioita terässuunnittelun vaatimuksista ja diskreeteistä muuttujista johtuen. Tosin heuristiset algoritmit vaativat paljon laskentatehoa ja heurististen menetelmien optimointitulokset sisältävät aina vähän epävarmuutta. Heuristiset menetelmät eivät myöskään aina tuota käypää ratkaisua, vaan algoritmeja voidaan joutua säätämään ja optimointia voidaan joutua yrittämään monta kertaa. Jalkasen tutkimuksessa yksikään heuristisista optimointialgoritmeista ei ollut paras kaikissa teräsrakenteiden optimointitehtävissä, mutta parveilualgoritmi ja tabuhaku toimivat tehokkaammin simuloituun jäädytykseen ja geneettiseen algoritmiin verrattuna.

Rakenteita optimoidessa haetaan pohjimmiltaan kustannuksille minimiä, jolloin optimoinnin kohdefunktion muodostaa rakenteen kustannuksien laskentakaava. Monesti optimointitehtävää voidaan yksinkertaistaa ajatellen, että massaltaan kevyin rakenne on kustannustehokkain, jolloin kohdefunktiona toimii rakenteen massan laskentakaava. Täl-

löin ei oteta muita rakenteen valmistukseen liittyviä kustannuksia huomioon, vaan kustannusten ajatellaan kasvavan samassa suhteessa rakenteen massan kanssa. Rajoitefunktioina toimii rakenteiden optimoinnissa tavallisesti standardien mukaiset murtorajati-
lojen tai käyttörajati-
lojen ehdot eri mitoitusilanteissa, jotka rajoittavat rakenteen minimi-
kokoa tai minimihintaa. Rakennetta voidaan optimoida kustannusten lisäksi myös muilla rakenteen toimivuuden kannalta tärkeillä ominaisuuksilla, kuten esimerkiksi taipumien rajoittamisella. (Jalkanen 2007.)

4. PITKÄN JÄNNEVÄLIN RISTIKON TUTKITTAVA MALLI

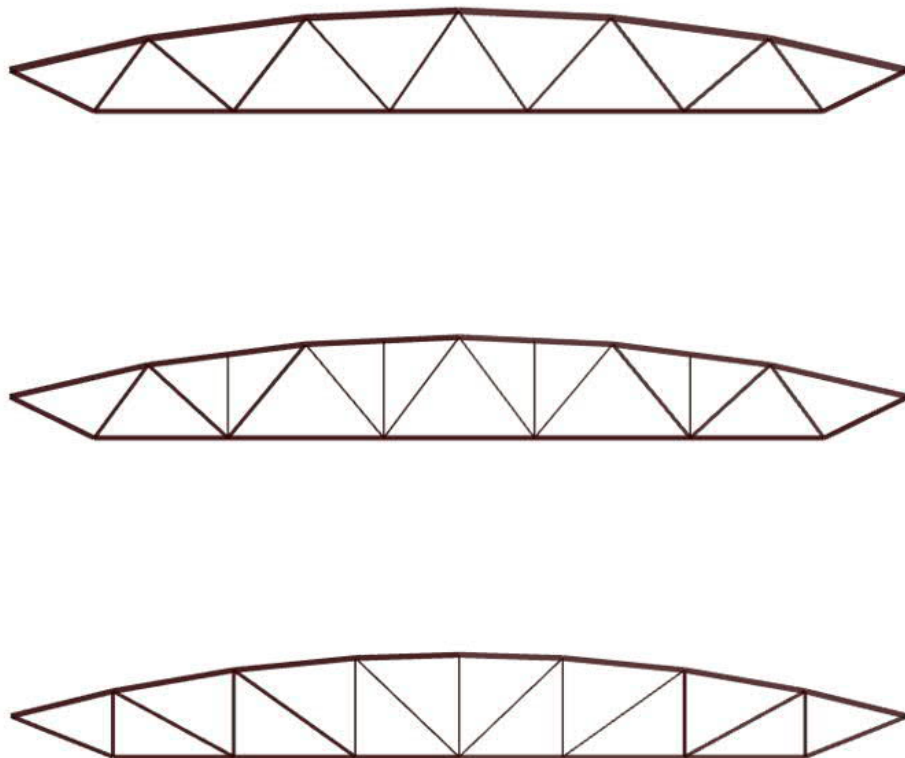
Teräsristikolle luodaan parametrinen malli, jolla pystyy luomaan eri ristikkotyypin teräsristikon geometrian ja rakennemallin, josta lasketaan ristikon kuormitukset sekä mitoiteetaan ristikon sauvat. Parametrissa mallia voidaan optimoida ristikon kustannusten tai massan suhteen. Korkeampia teräslujuuksia tarkasteltaessa ristikon optimointi on järkevämpi tehdä kustannusten suhteen, koska tavallisesti haetaan halvempia kustannuksia, mutta massan suhteen optimoitaessa tulokset suosivat korkeita teräslujuuksia. Parametrin mallin luoma teräsristikon rakennemalli voidaan viedä rakenneanalyysiohjelmaan, jossa tulokset voi tarkistaa, sekä rakenneanalyysiohjelmasta voidaan viedä sauvojen ja ristikon tulokset Exceliin. Ristikon kustannuksissa parametrissa mallissa muodostetaan osien kustannukset arvioitujen kustannusten lähtötietojen perusteella. Kustannuksista suuri osa muodostuu liitoksista ja liitoksien sekä sauvojen asennuskustannuksista, mutta työn puitteissa ei ole arvioitu liitosten mitoittamista, jolloin täten liitosten kustannusten tarkempi arviointi ei ole mahdollista. Tästä syystä kustannuksista arvioidaan vain ristikon sauvojen osien kustannukset.

4.1 Parametrinen malli

Teräsristikon parametrinen malli luodaan Rhinoceros 3D (Rhino) -ohjelmalla. Algoritmit tehdään Rhinon Grasshopper-liitännäisellä, mikä on visuaaliseen ohjelmointiin perustuva työkalu. Ristikon geometria luodaan Grasshopperin työkaluilla Rhinoon ja geometriasta luodaan rakennemalli Grasshopperin Karamba3D-liitännäisellä. Karamba3D:llä myös suoritetaan rakennemallin rakenneanalyysi ja ristikon sauvojen mitoituskuormituksia vastaan. Rakennemallin optimointi tapahtuu Grasshopperin Galapagos-liitännäisellä. Karamba3D:llä luotu rakennemalli tuodaan Autodesk Robot Structural Analysis rakenneanalyysiohjelmaan Robot-ohjelman ohjelmointirajapinnan avulla. Robot-ohjelmassa suoritetaan ristikon kuormitusten laskenta ja mitoiteetaan sauvat. Laskennan ja mitoituksen tulokset tuodaan Exceliin luetteloksi. Teräsristikon geometria voidaan myös viedä mallintamisohjelmaan.

Kuvassa 7 on esitetty mallin ristikkotyypit. Ristikoiden yläpaarre on ympyrän kaaren muotoinen, jolloin yläpaarteiden sauvojen diagonaalien solmukohtat sijaitsevat ympyrän kaarella, mutta sauvat ovat suorina solmujen välillä. Kuvassa 8 on esitetty työssä kehitetty

teräsristikon parametrinen malli. Parametrisellä mallilla voidaan valita ristikon malli N-ristikon tai K/KT-ristikon välillä. K-ristikko voidaan muuttaa KT-ristikoksi annettavien geometrian lähtötietojen avulla, jolloin KT-ristikolle määritellään pystysuuntaisten uumasauvojen paikat. Ristikon geometria muodostetaan ristikon kokonaispituuden ja korkeuden avulla. Antamalla yläpaarten harjakorkeuden, algoritmi antaa yläpaarteelle kaaren muodon, jossa kaari menee tuelta tuelle ja korkein kohta sijaitsee yläpaarten harjalla. Lähtötietoina annetaan alapaarten pystykorkeus tuelta katsottuna sekä alapaarten vinosauvan solmun vaakaetäisyys tuelta, jolloin alapaarten geometria pystyy muodostamaan.



Kuva 7: Ristikkomallit työssä, ylhäältä alas K-ristikko, KT-ristikko ja N-ristikko.

K-ristikossa ja KT-ristikossa diagonaalit muodostuvat siten, että tuen ja ristikon keskikohdan etäisyys jaetaan lähtötietona annetulla diagonaalien jakovälillä. Nämä diagonaalien ollessa tasaisesti jaettuna saadut pisteet projisoidaan yläpaarten kaaren muodolle. Alapaarteella diagonaalien solmukohtat sijoitetaan yläpaarten solmukohtien puoleen väliin alapaarten suunnassa. Kaikkia diagonaalien solmukohtia pystytään siirtämään

sekä yläpaarteella että alapaarteella erikseen, mutta etäisyydeltään rajoitetusti, jotta optimointialgoritmin satunnaisuus ei luo virheellisiä ristikoita diagonaalien mennessä ristiin toistensa kanssa. Solmukohtien sijaintia on myös pyritty rajoittamaan siten, ettei sauvojen välille tule liian teräviä kulmia, mutta sauvojen välisiä kulmia ei mitata tarkkaan, eikä optimoinnissa anneta sakkotermiä sauvojen välisten kulmien ollessa liian teräviä. Yläpaarten sauvat muodostetaan diagonaalien yläpaarten solmukohtien välillä siten, että yläpaarten sauvat menevät suoraan solmujen välillä. Diagonaalien solmukohtat sijaitsevat yläpaarteella ympyrään kaarella, kun välit ovat tasaisesti jaettuina. Siirrettäessä diagonaalien solmukohtia yläpaarteella solmukohtat siirtyvät vektorin mukaan, mikä on tuen ja harjakohdan välisen suoran suuntainen. Tällöin etenkin lähellä harjaa ympyrän kaaren tangentin ollessa lähes vaakasuuntainen diagonaalien yläsolmujen siirto vääristää hieman ympyrän kaaren muotoa. Solmujen siirtämistä on kuitenkin rajoitettu, jolloin kaaren muoto ei ole mahdollista vääristyä huomattavasti. Myös tarkasteltaessa optimointituloksia optimiristikkojen diagonaalien välit noudattavat suurin piirtein tasaväliä, jolloin muoto säilyy ympyrän kaarena. Ristikon geometriaa luodessa sauvat muodostetaan vain toiselle puolelle ristikköä, jolloin sauvat kopioidaan ja peilataan toiselle puolelle.

KT-ristikossa vertikaalisauvat toimivat yläpaarteiden tukina, jolloin vertikaalisauvat toimivat puristettujen yläpaarteiden nurjahdustukina ristikon tasossa. Vertikaalisauvojen määrä on myös käyttäjän valintana, jolloin vertikaalisauvoja voi poistaa halutessa tuelta tai harjalta katsoen haluamansa määrän.

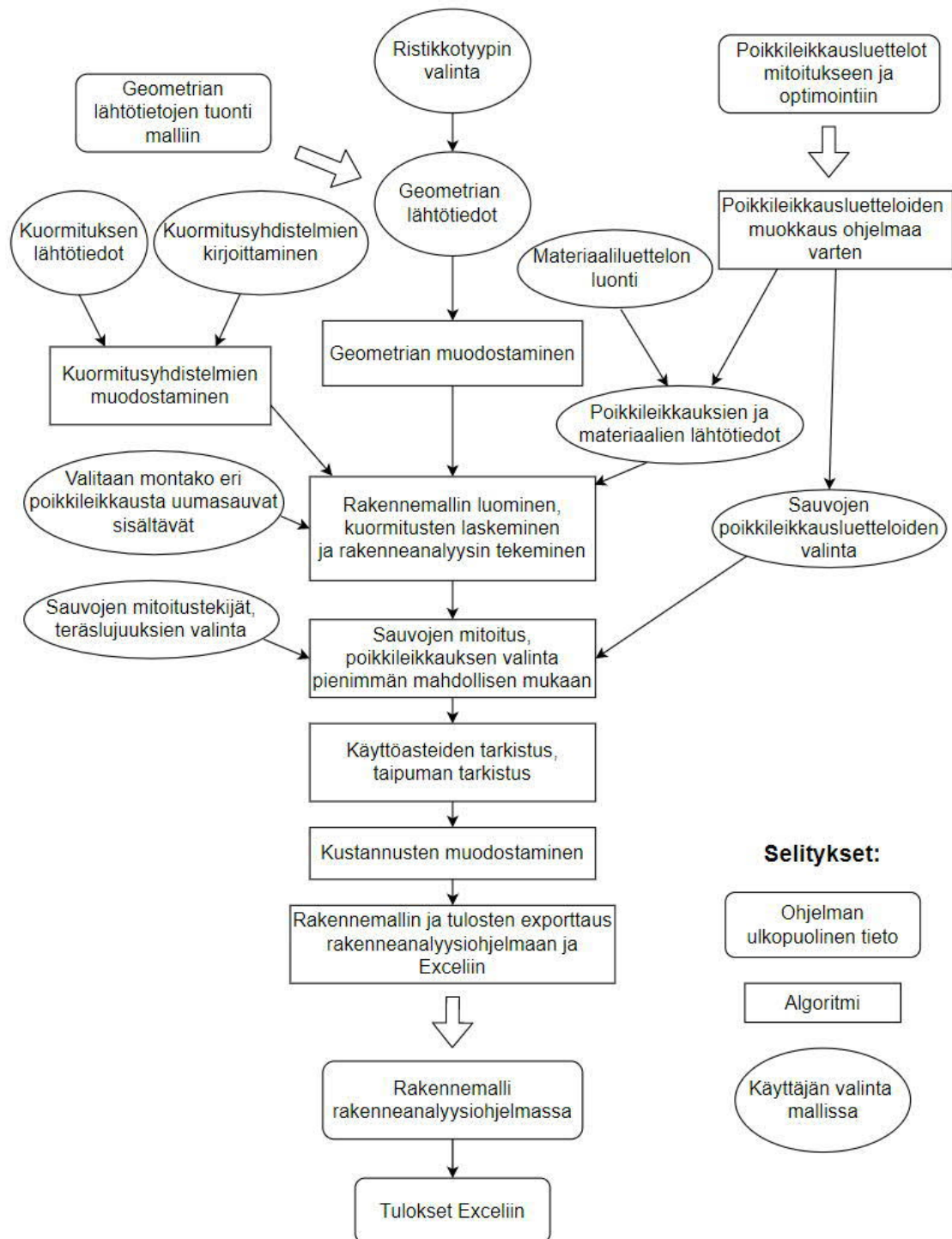
N-ristikolla vertikaalisauvojen määrittäminen tapahtuu samalla periaatteella kuin K-ristikolla diagonaalien osalta siten, että N-ristikon vertikaalisauvojen määrällä jaetaan vaakakaetäisyys tuelta ristikon keskelle, jonka jälkeen näistä pisteistä projisoidaan kaarelle yläpaarten ympyrän kaarelle. Siten N-ristikon diagonaalit voidaan luoda muodostamalla sauvan vertikaalisauvan yläsolmun sekä seuraavan vertikaalisauvan alasolmun välille. Ylä- ja alapaarten solmuja pystyy siirtämään samaan tapaan kuin K/KT-ristikon geometrian muodostamisessa.

Geometrian lähtötiedot voidaan halutessaan määrittää suoraan mallissa tai sitten lähtötiedot voidaan tuoda ulkoisesti Excelistä. Mallissa lähtöparametreja säätämällä pystyy helposti vertailemaan eri parametrien muutosten vaikutusta ristikon lopputulokseen, mutta Exceliä on selkeämpi ja järjestelmällisempi käyttää. Geometriasta muodostetaan kuvan 8 mukaisesti rakennemalli, johon tarvitaan tukien määrittely, kuormitukset sekä kuormitusyhdistelmät ja poikkileikkauksien lähtötietojen määrittäminen. Mallissa ristikoiden sauvat mallinnetaan taivutettuina palkkeina eikä vetosauvoina, koska ylä- ja alapaarteille kohdistuu tasaista kuormaa. Uumasauvatkin mallinnetaan taivutettuina, vaikka näille ei kohdistukaan tasaista kuormaa.

Ristikon päissä on pystytuennat, joista toinen on nivelliitos ja toinen on ristikon suunnassa vapaasti liikkuva pystytuki. Yläpaarteella on sivuttaistuennat diagonaalien solmukohdissa. Mallissa ei laitettu KT-ristikolla vertikaalisauvojen kohdalle sivuttaistuentoja, vaan vertikaalisauvat toimivat yläpaarteen sauvojen nurjahdustukina ristikon tasossa. KT-ristikon tapauksessa yläpaarteen sauvoja on yksinkertaistettu siten, että vertikaalisauva jakaa yläpaarteen sauvat kahteen osaan, mutta vertikaalisauvan kohdalla momentit jatkuvat yläpaarteen sauvoilla. Mallissa on oletuksena, että nurjahduspituutena käytetään ristikon sauvojen systeempituutta $L_{cr} = L$, jolloin KT-ristikolla yläpaarteella ei tarvitse muokata sauvojen nurjahduspituutta, kun vertikaalien molemmilla puolilla yläpaarre mallinnetaan omina sauvoina. Tällöin tosin tulisi asettaa sivusuuntaiset tuennat myös vertikaalisauvojen yläsolmujen kohdalle estääkseen ristikon tasosta kohtisuoraan nurjahduksen yläpaarteen sauvoilla, jotta KT-ristikon yläpaarteen sauvojen malli vastaisi todellisuutta.

Ristikoon kohdistuu kuormituksia lumikuormasta, ristikon ripustuskuormista, ristikon omasta painosta sekä kattorakenteiden pysyvistä kuormista. Ristikkojakoa eli kuormitusalan leveyttä tarkastellaan ristikkojoalla $k = 10$ m. Rakenteen seuraamusluokkana käytetään vaativinta luokkaa CC3, jolloin kuormat kerrotaan kertoimella luotettavuuden tasoluokitukseen käytettävällä kertoimella $K_{fi} = 1.1$. Lumikuorman ajatellaan kohdistuvan yläpaarteelle tasaisesti. Katon muoto ajatellaan tasaiseksi, jolloin kaarikaton kolmiomaista lumikuormaa ei tarkastella. Lumikuormasta tarkastellaan kolmea eri kuormitustapausta. Lumikuorman ollessa tasaisesti katolla, sekä lumikuorman ollessa epäsymmetrisesti molemmin puolin kattoa, siten että toisella puolella on täysi lumikuorma ja toisella puolella puolet lumikuormasta. Lumikuorman arvolle maassa käytetään arvoa 2.5 kN/m^2 . Lumikuorman katon muotokertoimelle käytetään arvoa $\mu = 0.8$. Tuulensuojaisuskertoimelle käytetään arvoa 1.0. Rakennukselle käytetään isoille katoille käytettävää tuulensuojaisuskertoimen korotuskertoimen suurinta arvoa 1.25. Kattorakenteiden pysyvinä kuormina käytetään yläpaarteelle kuormaa 1.0 kN/m^2 ja alapaarteelle kuormaa 0.3 kN/m^2 . Yläpaarteen ripustuskuormana käytetään arvoa 0.25 kN/m^2 ja alapaarteen ripustuskuormana käytetään arvoa 0.25 kN/m^2 . Pistevoimien vaikutusta ei tarkastella mallilla työssä, mutta niiden muodostaminen onnistuu mallilla. Murtorajatilan kuormayhdistelminä tarkastellaan kolmea eri yhdistelmää, joissa käsitellään lumikuorman eri tapaukset. Murtorajatilan yhdistelmissä pysyville kuormille käytetään kerrointa 1.15 ja lumikuormille kerrointa 1.5. Käyttörajatilanteessa tarkastellaan ominaiskuormayhdistelmä lumikuorman tasaisella tapauksella.

Teräsristikon parametrinen malli



Kuva 8: Teräsristikon parametrinen malli.

Ristikolle käytetään yksinkertaisuuden vuoksi kolmea teräslujuutta S355, S460 ja S690. Teräslujuus S355 on yleisin rakenneputkilla käytössä oleva teräslujuus ja S700 on nykyisten standardien korkein mainittu teräslujuus (SCI 2020. s.11.). Mallissa käytetään lujuuksia S690 lujuuksien S700 sijaan, sillä Robot-ohjelmassa S690 on korkein valmiiksi

oleva teräslujuus, jolloin ei tarvitse muodostaa uusia teräslujuuksia mallia vietäessä Robot-ohjelmaan. Teräslujuus S420 on myös melko yleinen rakenneputkilla, mutta työssä tarkastellaan lujuudella S460, jotta huomattaisiin selkeämmin myötölujuuden nousun vaikutus.

Mallilla pystyy tarkastelemaan suorakaide-, ympyrä- ja I-poikkileikkauksia. Malliin syötetään Excel-tiedosto, mikä sisältää tarvittavat poikkileikkaussuureet, josta Karamba muodostaa tarvittavan poikkileikkausluettelon. Työssä tarkastellaan mallin kanssa vain kylmämuovattuja suorakaidepoikkileikkauksia. Suorakaidepoikkileikkauksissa voidaan käyttää neliön tai suorakaiteen muotoisia profiileja. Mallissa käytetään poikkileikkausluokan 1-3 poikkileikkauksia, mutta rakenneputkien liitosten ehdot tavallisesti rajoittavat poikkileikkausluokan 3 profiilien käyttöä standardin EN 1993-1-8 ehdon 7.1.2 (2) mukaan. Poikkileikkausluettelot luodaan siten, että jokaiselle teräslujuudelle luodaan poikkileikkausluokkien mukaan oma poikkileikkausluettelo, jolloin poikkileikkauksen teräslujuutta vaihtamalla poikkileikkausluettelo vaihtuu myös automaattisesti. Tällöin korkeammilla teräslujuuksilla ei tule poikkileikkauksen valintaan mukaan poikkileikkausluokan 4 profiileja. Rakenneanalyysiohjelmista pystyy tavallisesti tuomaan ulos ohjelmien käyttämät poikkileikkausluettelot, joita muokkaamalla saadaan malliin sopivat poikkileikkausluettelot. Optimoinnissa on käytössä neliö- ja suorakaidepoikkileikkauksissa Euroopan suuret poikkileikkausvalikoimat 400x400x20 ja 500x300x20 poikkileikkauksiin asti. Suurien poikkileikkaukokojen valikoima vaihtelee eri valmistajien mukaan, jolloin suurimpia käytettävissä olevia poikkileikkaukokoja on vaikea arvioida mallissa käytettäväksi. Suurimmista poikkileikkaukko'ista tulee myös todennäköisesti lisäkustannuksia koon epätavallisuuden takia, mutta näitä lisäkustannuksia ei ole huomioitu ristikkomallin kustannusten muodostamisessa.

Yläpaarteella ja alapaarteella on yhtenäinen poikkileikkaus koko matkalla sekä diagonaaleilla saa ristikkomallissa päättää montako eri poikkileikkausta diagonaaleilla on. Ristikkomallissa kaikilla ristikkotyypeillä on diagonaaleilla kaksi eri poikkileikkausta sekä KT-ristikolla vielä vertikaalisauvojen poikkileikkaukset erikseen. Tällöin tosin ristikoilla, joilla on vähemmän diagonaaleja, on optimointimielessä etua diagonaalisauvoiltaan lukumäärältään suurempiin ristikoihin verrattuna. Tällöin jos ristikolla on paljon diagonaalisauvoja, joidenkin sauvojen käyttöaste voi jäädä pienemmäksi verrattuna ristikoihin, joissa on vähemmän diagonaaleja. Yksinkertaisuuden vuoksi diagonaalisauvoilla on vain kaksi eri poikkileikkausta. Diagonaalien vähemmällä poikkileikkausmäärällä on tosin etua liitoksien suunnittelussa ja tekemisessä, kun on enemmän samantyyppisiä liitoksia.

Tavallisesti rakenneputkien pituuksia valmistetaan 12 metriin asti, mutta teräsvalmistajilta saa myös erityispitkiä putkia 18-20 metriin asti. Yli 12 metrin sauvojen kustannuksiin tulee todennäköisesti lisäkustannuksia putken erikoispituudesta sekä kuljetusten lisäkustannuksista. Yli 12 metrin sauvoilla on siltikin merkittäviä etuja pitkillä jänneväleillä teräsristikoilla, kun sauvan pituus ei rajoita ristikon kokonaiskorkeutta. Ristikon sauvojen pituuksia on rajoitettu ristikkomallin optimoinnissa 18 metriin asti, mutta ristikon sauvojen erikoispituudesta johtuvia kustannuksia on hankala arvioida, joten ristikon kustannusten muodostumisessa ei ole tarkasteltu erikoispituuksista johtuvia kustannuksia.

Sauvat mitoitetaan murtorajatilassa luvussa 2.3 esitettyjen kestävyysien suhteen. Ristikon ja sauvojen rasitusten laskenta perustuu sekä parametrisessä mallin laskennassa Karamba3D:llä, että Robot-rakenneanalyysiohjelmalla FEM-laskentaan. Sauvojen nurjahduspituutena käytetään varmalla puolella olevaa sauvan systeempituutta. Nurjahduskäyrien kertoimet pystytään valitsemaan käyttäjän toimesta. Kylmämuovattujen rakenneputkien tapauksessa nurjahduskäyrän epätarkkuustekijänä käytetään c-käyrän kerrointa 0.49. Rakenneanalyysiohjelmassa rakennemallin sauvojen mitoituksessa ohjelma pystyy päättämään sauvan poikkileikkausluokan, jolloin rakenneanalyysiohjelma osaa käyttämään oikeassa poikkileikkausluokassa plastisuusteorian tai kimmoteorian mukaisia kestävyksiä. Karamba3D vaikuttaa tulosten mukaan hieman ylimitoitavan sauvojen käyttöasteita Robot-ohjelman sauvojen mitoituksen käyttöasteisiin verrattuna, parametrisen mallin Karamban mitoituksen ollen tällöin varmalla puolella. Robot-ohjelmalla pystytään luomaan rakennemalli, missä palkin keskelle liittyy sauva nivelellisesti ja palkin nurjahduspituuksia muokkaamalla onnistuu sauvan tuennan huomioon ottaminen. Karamban rakennemallissa sauvan nurjahduspituuksia pystytään muokkaamaan helposti, mutta palkin keskelle nivelellisesti asetettavan sauvan muodostaminen siten, että jatkuva palkki jaettaisiin elementteihin ei onnistu.

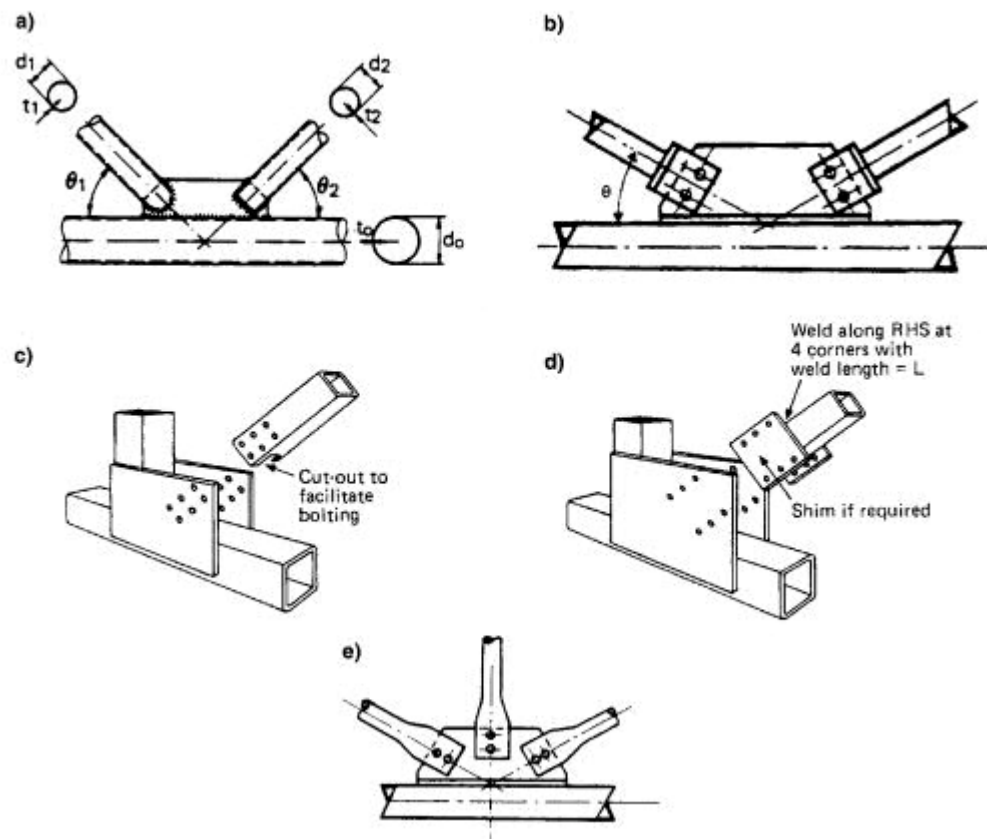
Käyttörajatilassa tarkastetaan ristikon kokonaistaipuma, jota verrataan teräseurokoodien kansalliseen liitteen arvoon $L/300$, missä L on ristikon jänneväli. Karamban poikkileikkauksen valinta ottaa huomioon taipuman sauvan mitoituksessa, mutta taipuma rajoitetaan kaikille mitoitettaville kuormitusyhdistelmille, jolloin poikkileikkauksen optimoinnissa ristikon taipuman raja-arvo kerrotaan murtorajatilalle arvioidulla kertoimella 1.3...1.4. Ristikon taipuma tarkistetaan erikseen käyttörajatilan ominaiskuormayhdistelmällä ja jos tällöin taipuman ehto ei täyty, optimoinnissa käytetään sakkotermiä, jolla optimointialgoritmi geometriaa muuttamalla saa taipuman raja-arvon mukaiseksi.

Ristikkomalli viedään C#-ohjelmointikielellä kirjoitetun skriptin avulla Robot-ohjelman ohjelmointirajapintaa, Robot API:a, käyttäen Robot-ohjelmaan sekä Robot-ohjelmasta viedään tulokset Exceliin. Karamba3D luo rakennemallista DStV-tiedoston, joka avataan

Robotissa. Skriptin avulla Robotissa suoritetaan FEM-laskenta sekä teräsristikon osien mitoitus teräsrakenteiden eurokoodien ehtojen mukaisesti. Skripti luo yläpaarteelle, alapaarteelle sekä uumasauvoille omat sauvatyypit sauvan mitoitusta varten, jolloin näille voi halutessaan muuttaa mitoitusparametreja skriptissä. Nurjahduskäyrien valinta on käyttäjän päätettävissä eri ristikon osille. Koska ristikon osat on erikseen määritelty skriptissä ristikon osille voi muuttaa poikkileikkauksen muotoa ja sitä kautta eri mitoitusparametreja. Robotista skripti tuo sauvojen mitoituksen tulokset Exceliin, missä jokaisen sauvan käyttöasteet, kuormitukset ja poikkileikkaussuureet on eritelty. Skripti lisää Exceliin myös Rhinon mallista ristikon geometrian lähtötiedot sekä kustannusten erittelyt.

Liitoksilla on suuri vaikutus ristikon kustannuksiin. Pitkän jännevälillä ristikot tulee suurien osien takia koota työmaalla tavallisesti pulttiliitoksia. Liitosten valintaan tulee kiinnittää huomiota jo ristikon suunnittelun alkuvaiheissa, sillä liitoksilla on vaikutusta käytettävien profiilien kokoihin, muotoihin ja teräslujuuksiin.

Rakenneputkien kehittämiseen liittyvän järjestön CIDECT:n suunnitteluohjeissa on esitetty pulttiliitoksiin liittyvää suunnittelua. CIDECT:n suunnitteluohjeessa 7 (1998) on esitetty kuvassa 7 erilaisia pulttiliitostyyppisiä ristikoille. Kuvassa 7 liitostyypit b) - e) sopivat suorakaiteen muotoisten ristikkosauvojen pulttiliitoksille. Liitostyypille b) sopii myös uumasauvoiksi I-profiilin muotoiset rakenneteräkset tai pyöreät rakenneputket sauvaan hitsattavan päätylevyn ansiosta. Liitostyyppien b) ja e) parresauvoiksi taas sopii myös I-profiilin muotoiset rakenneteräkset liitoslevyn ollessa I-profiilin uuman kohdalla. Liitostyyppillä c) ja d) sopii parhaiten suorakaiteen muotoiset rakenneputket. Liitostyyppissä c) ja d) uumasauvojen tulisi olla yhtä leveitä parresauvojen kanssa tai lähes yhtä leveitä, jolloin liitoslevyjen ja rakenneputken välille tulisi välilevyjä. Liitostyyppin valintaan voi vaikuttaa monenlaiset asiat, kuten esimerkiksi liitosvoimien suuruus, kustannustekniset asiat, käytettävät teräslujuudet tai ulkonäölliset syyt. Liitostyyppin valinnalla on myös vaikutuksia käytettävien profiilien muotoihin ja profiilien kokoihin.



Kuva 7: Erilaisia ristikkoliitoksia. (CIDECT. 1998. Fig. 4.89.)

4.2 Ristikon kustannukset

Ristikon kustannukset muodostetaan Haapion väitöskirjan (2012.) teräsrakenteiden kustannusarviointiin perustuen. Ristikon osien kustannuksista tarkastellaan ristikkomallilla koostuvat materiaalikustannuksia, suihkupuhalluskustannuksia, sahauksen kustannuksia sekä maalauksen kustannuksia. Liitoksen kustannukset arvioidaan Jaakko Haapion väitöskirjaan (2012.) pohjautuvan Jokelan V. diplomityön (2016.) pulttiliitoksen kustannusarvioinnin mallilla. Jokelan diplomityön pohjalta arvioitiin karkeasti yhden tyyppisen ristikon sauvojen välisen pulttiliitoksen kustannukset ristikkomallissa. Liitoksen kustannuksia ei voida arvioida tarkasti, koska liitoksia ei ole mitoitettu työn ristikkomallilla. Pulttiliitoksen arvioiduista kustannuksista voidaan kuitenkin päätellä, että ristikon kokonaiskustannuksiltaan on edullista vähentää sauvojen ja täten liitoksien lukumäärää. Tosin vähentämällä sauvojen määriä liitosvoimat kasvavat, ja siten liitoksen koko sekä kustannukset voivat myös kasvaa huomattavasti.

Haapion väitöskirjan (2012.) teräsrakenteiden kustannusten arviointimalli perustuu teräsrakenteiden valmistamisen jakamisen eri prosesseihin. Eri prosesseista lasketaan sit-

ten yksityiskohtaisesti kustannukset, jotka lasketaan yhteen muodostaen rakenteen kokonaiskustannukset. Joidenkin prosessien kustannuksia on vaikea arvioida ilman tarkkoja kustannusten lähtötietoja. Ristikon kustannusten arvioinnissa ei oteta huomioon kuljetukseen liittyviä kustannuksia eikä ristikon valmistuksen jälkeisiä kustannuksia. Ristikon kokonaiskustannukset koostuvat eri valmistuksen osista kaavan

$$C_T = C_M + C_B + C_S + C_P \quad (56)$$

mukaisesti, missä C_T on ristikon kokonaiskustannukset, C_M on ristikon osien materiaalikustannukset, C_B on sauvojen suihkupuhalluskustannukset, C_S on sahauskustannukset ja C_P on sauvojen maalaus-kustannukset. Ristikoille käytetään Melan väitöskirjan (2013.) mukaisia Haapion väitöstyöstä (2012.) muunnettuja kustannusten kaavoja, joita on sovellettu teräsristikoille. Ristikon osien materiaalikustannukset lasketaan Melan väitöskirjan mukaisilla ristikoille Haapion työstä muunnetulla kaavalla

$$C_M = \sum_{i=1}^{n_e} W_i c_{M,i}, \quad (57)$$

missä W_i on sauvan massa, $c_{M,i}$ on sauvan materiaalin kilohinta ja n_e on tarkasteltavien sauvojen lukumäärä. Rakenneputkille käytetään rakenneputkien teräksen kilohintana tutkimuksen RUOSTE (2013.) mukaisia arvoja. Tutkimuksessa RUOSTE käytetään rakenneputkille materiaalihintaa 0.8 €/kg lujuudella S355 ja korkeammille teräslujuuksille käytetään materiaalihinnalle lujuudella S500 kerrointa 1.15 ja lujuudella S700 kerrointa 1.3. Työssä ristikkomallilla käytettävällä lujuudella S690 käytetään samaa kerrointa 1.3 kuin lujuudella S700. Lujuuden S460 kertoimelle interpoloidaan lujuuden S500 kertoimesta arvo 1.11. Kustannusten arvioinnissa sahaukselle ja liitoksille käytetään vastaavia hintakertoimia teräslujuuden mukaan. Taulukossa 8 on esitetty teräslujuuden mukaan muuttuvat kustannusten hintakertoimet. Hintakertoimien lähde on jo melkein 10 vuotta vanha, jolloin korkeampien lujuuksien yleistyessä hintatiedotkin ovat voineet muuttua. Hintakertoimia päivittäessä voitaisiin saada tarkempi arvio kustannuksille teräslujuuden mukaan.

Taulukko 8: Kustannusten hintakertoimet teräslujuuksien mukaan. Lujuudelle S460 interpoloitu tutkimuksen RUOSTE (2013.) taulukosta 5.1 lujuuden S500 arvosta.

Rakenneputket, materiaalihinta 0.8 €/kg	S355	S460	S500	S690
Materiaalin hintakerroin	1.0	1.11	1.15	1.3
Sahauksen hintakerroin	1.0	1.11	1.15	1.3
Liitoksen hintakerroin	1.0	1.11	1.15	1.3

Sauvojen suihkupuhalluskustannukset lasketaan Melan väitöskirjan kaavalla

$$C_B = \sum_{i=1}^{n_e} 3.63 \cdot 10^{-4} \cdot L_i, \quad (58)$$

missä L_i on tarkasteltavan sauvan pituus. Suihkupuhalluksessa terässauvan pinta puhdistetaan puhaltamalla teräs-, alumiini-, lasikuula- tai hiekkaraetta sauvan pintaan.

Sahauksen kustannukset määritetään kaavan

$$C_S = c_S(T_{NS} + T_{PS}) + T_{PS}(c_{CS} + c_{ENS}) \quad (59)$$

mukaan, missä T_{NS} on tuottamaton työaika, T_{PS} on tehokas työaika, c_{CS} on kuluvien sahatarvikkeiden hinta, $c_{ENS} = 0.02\text{€}/\text{min}$ on energian hinta ja $c_S = 1.2\text{€}/\text{min}$ sisältää sahauksen kustannukset, kuten työnteon, koneiden, koneiden huollon ja tilojen kustannukset. Sahauksen kustannukset ovat kokonaiskustannuksista vain parin prosentin luokkaa, jonka takia sahauksen kustannuksille on käytetty yksinkertaistetusti 18€ per sahaus per puoli ja kaikki sauvat sahataan molemmilta puolilta. Sahauksen yksinkertaistetut kustannukset kerrotaan sitten taulukon 8 sahauksen hintakertoimella teräslujuuden mukaan.

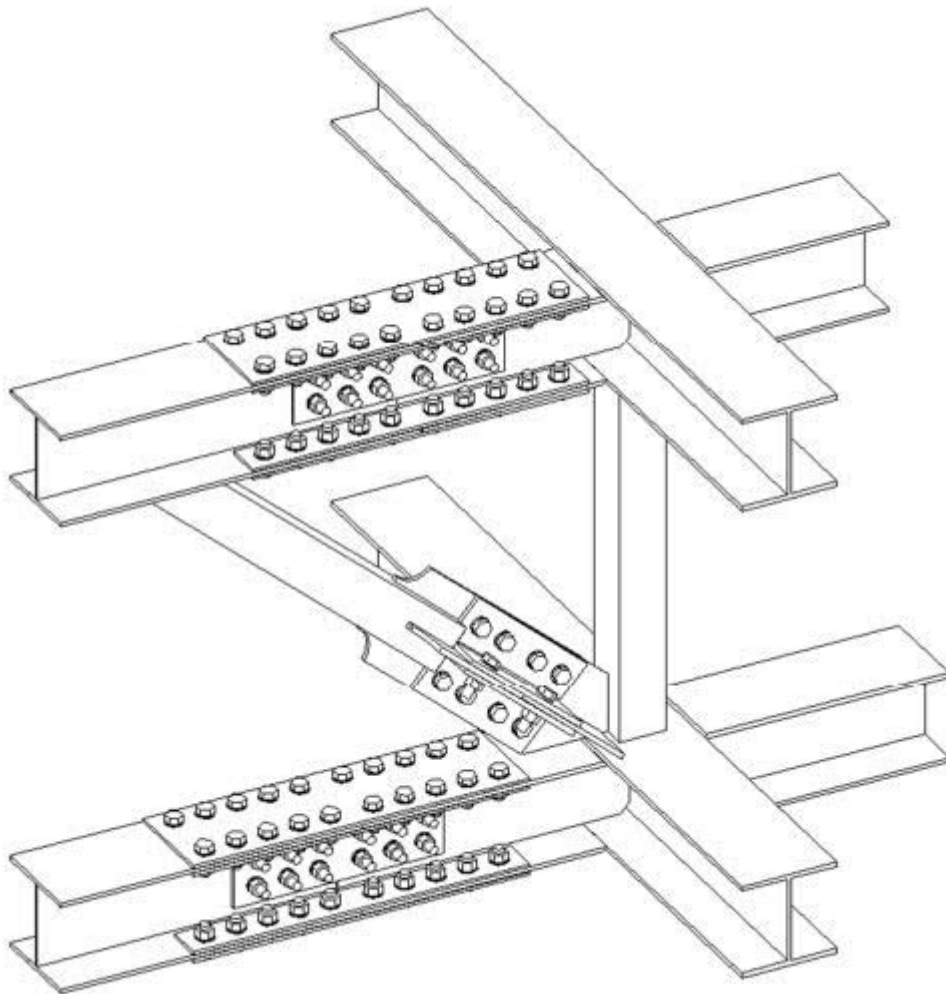
Maalauksen kustannukset C_p lasketaan luokan C3/M alkyylimaalijärjestelmällä yksinkertaistetulla kaavalla

$$C_p = \sum_{i=1}^{n_e} 3.87 \cdot 10^{-6} A_u L_i [\text{€}], \quad (60)$$

missä A_u on poikkileikkauksen maalattava pinta-ala pituutta kohden [mm^2/m], L_i on sauvan pituus millimetreissä ja n_e on sauvojen lukumäärä.

Liitoksen kustannukset arvioidaan karkeasti käyttäen liitosmallina Jokelan, V. diplomityössä (2016.) tarkasteltua universaaliliitosta, joka on esitetty kuvassa 9. Kuvan 9 liitoksen kustannuksista on eritelty erikseen kustannukset uumasauvan liitokselle sekä yksittäiselle paarreliitokselle. Liitoksen kustannuksissa otetaan huomioon liitoslevyjen materiaalien, suihkupuhalluksen ja leikkauksen kustannukset, liitoksen porauskustannukset, kokoonpanokustannukset, jälkikäsitteilyt ja tarkastukset, liitoslevyjen maalaus-kustannukset sekä asennuskustannukset. Uumasauvan liitokselle tulee kokonaiskustannuksiksi teräslujuudella S355 387,4€ per uumasauvaa liitoksessa. Paarresauvan yksittäiselle jatkosliitokselle tulee teräslujuudella S355 kokonaiskustannukseksi 1448,9€. Työn ristikkomallissa oletetaan diagonaalisauvojen solmukohdissa olevan paarteissa jatkosliitos. Solmukohdan liitoksen kokonaiskustannuksissa paarteen jatkosliitoksen kustannuksiin 1448,9€ lisätään uumasauvojen määrällä kerrottuna liituskustannukset 387,4€. KT-risti-

kon vertikaalisauvan ja yläpaarten liitoksen kustannukset lasketaan vain yhden uumasauvan liitoksen kustannuksina eli teräslujuudella S355 kustannuksiksi saadaan 387,4€. Kuvassa 9 olevan universaaliliitoksen I-profiilien jatkosliitoksen tyyppi ei sovi täysin sellaisenaan rakenneputkille, mutta I-profiilin jatkosliitosten kustannukset ovat tarpeeksi karkeat arviot rakenneputkien jatkosliitosta varten. Liitoksen kustannuksista pystytään arvioimaan työssä tutkittavasta ristikkomallista sen verran, että huomataan sauvojen ja sitä kautta liitosmäärien minimoimisen kannattavan kustannusmielessä. Ristikkomallin liitoskustannukset kerrotaan taulukon 8 liitoksen hintakertoimella liitoksessa olevien sauvojen korkeimman teräslujuuden mukaan.



Kuva 9: Työssä ristikon liitosten kustannusten arviointiin käytettävä ristikon universaaliliitos. [Jokela, V. 2016. Kuva 5.6.]

4.3 Mallin optimointi

Teräsristikkoa optimoidaan tavallisesti joko massan tai kustannusten suhteen. Koska tutkittavassa ristikossa tarkastellaan eri teräslujuuksien vaikutusta ristikkoon, niin optimoitavassa suureessa päädytään kustannusten suhteen optimointiin. Massan suhteen optimoimalla pyrittäisiin aina valitsemaan suurin teräslujuus, jotta saataisiin pienennettyä poikkileikkauksien kokoa täten pienentäen ristikon massaa.

Mallin optimointiin käytetään luvussa 3.2 esitettyä geneettisiin algoritmeihin kuuluvaa evoluutioalgoritmia. Evoluutioalgoritmi perustuu ratkaisujoukkojen luonnonvalintaan, jolloin optimointialgoritmin mukaan ratkaisusta etsitään parhaimmat ja niistä muodostetaan seuraavien joukkojen ratkaisut. Lisäämällä satunnaisia ratkaisuja parhaimpien ratkaisujen joukkoon, pystytään hakemaan optimoitavan kohdefunktion optimia.

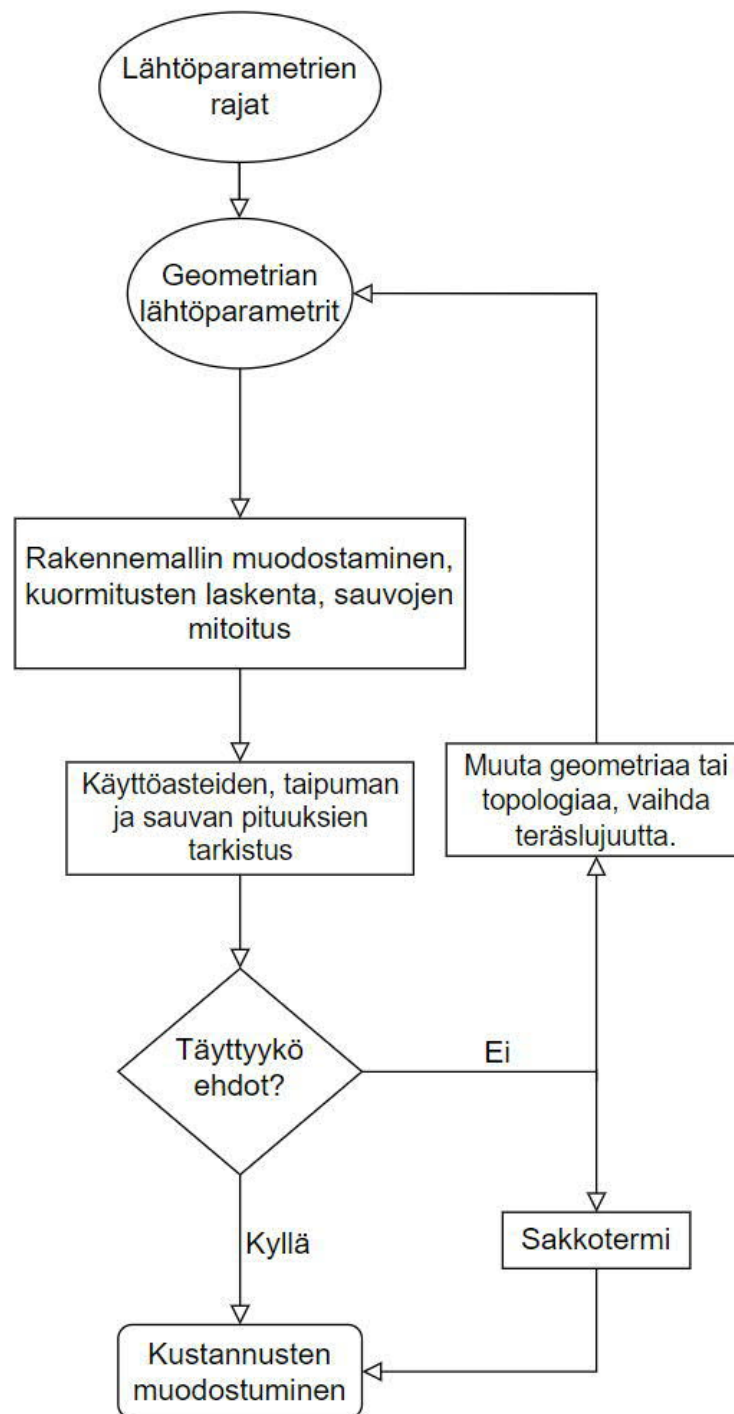
Parametrisen mallin optimointi on esitetty kuvassa 10. Kohdefunktion muuttujina toimii geometrian lähtöparametrit. Käyttäjän annetaan päättää ristikon topologia ja optimointialgoritmi pyrkii hakemaan optimoinnin mukaan geometrian kohdefunktion minimille. Antamalla optimointialgoritmin optimoida myös topologiaa, algoritmi voi jäädä helpommin paikalliseen optimiin topologian suhteen täten hidastaen optimointia. Ristikkomalli valitsee sauvojen poikkileikkaukset pienimmän mahdollisen poikkileikkauksen mukaan käyttäjän antamasta poikkileikkausluettelosta. Valittujen poikkileikkausten perusteella malli laskee ristikon kustannukset, joita optimointityökalu pyrkii minimoimaan ristikon geometrian lähtötietoja muuttamalla.

Optimointityökalun evoluutioalgoritmi pystyy suorittamaan ristikkomallille noin 150-200 iteraatiokierrosta minuutissa. Ristikoiden optimoinnissa evoluutioalgoritmi pystyy laskemaan sukupolvia 3-5 sukupolvea minuutissa. Evoluutioalgoritmilla yksittäisen ristikon optimointiin käytetty aika työssä on noin 10-20 minuuttia. Evoluutioalgoritmi voi myös jäädä optimoinnissa paikalliseen minimiin, mistä algoritmi ei pääse itse pois. Optimointityökalussa käyttäjä pystyy itse lisäämään optimoinnin aikana muuttujien satunnaisuutta lisäämällä mutaatioiden määrää havaitessaan, että algoritmi jää paikalliseen optimiin. Varsinkin ristikoilla, missä on paljon sauvoja, edes käyvän ratkaisun löytäminen on melko tarkkaa geometristen muuttujien suhteen. Evoluutioalgoritmin on välillä hankalaa löytää sakkotermien suhteen käypä ratkaisu, jolloin käyttäjä voi yrittää itse löytää käyvän ratkaisun lähtöparametreja muuttamalla. Syöttämällä evoluutioalgoritmille lähtöarvaukseksi käyvän ratkaisun algoritmi pystyy optimoimaan käypää ratkaisua välttämällä lähtöarvausta aikaisempia paikallisia optimeita.

Evoluutioalgoritmi pyrkii pääsemään lähemmäksi optimia luomalla sukupolvia. Ensimmäisessä sukupolvessa algoritmi hakee satunnaisesti eri ratkaisuja, joista parhaimmat

Ristikkomallilla evoluutioalgoritmeilla haetaan geometrian lähtöparametreja muuttamalla kohdefunktion minimiä ristikon kustannuksille. Käyttäjän valinnaksi jää ristikon topologian päättäminen, käytettävien teräslujuuksien valitseminen sekä käytettävien poikkileikkausluetteloiden valitseminen. Käyttäjä myös päättää geometrian lähtöparametrien rajat optimointia varten. Optimointia varten kohdefunktion optimoitaviksi parametreiksi valitaan ristikon harjan korkeus tuelta alapaarteen korkeus tuelta, alapaarteen solmun vaaketaisyys tuelta ja uumasauvojen solmujen sijainti paarteilla. Harjakorkeudelle tuelta annetaan alarajaksi 2500 mm ja ylärajaksi $L/13$, missä L on ristikon jänneväli. Alapaarteen korkeudelle tuelta annetaan alarajaksi 2000 mm ja ylärajaksi $L/18$. Korkeuksien ollessa molemmissa ylärajoilla ristikon kokonaiskorkeudeksi tulee $\sim L/7,5$. Alarajoilla 60 metrin ristikolla kokonaiskorkeudeksi tulee $\sim L/13$. Korkeuksien ylärajat ja alarajat on valittu kokeilemalla eri korkeuksien rajoilla, jotta optimointialgoritmi pystyy suhteellisen vapaasti etsimään optimikorkeutta. Harjan korkeudeksi tuelta valittiin hieman suuremmaksi optimoinnin tulosten perusteella.

Ristikkomallin optimoinnin tulokselle on tärkeää, että ratkaisu on käypä annettujen vaatimusten mukaisesti. Standardien vaatimusten mukaisesti ristikon sauvat mitoitetaan murtorajatilassa ja ristikon taipuma tarkastetaan käyttörajatilassa. Lisäksi vielä tarkastetaan, että sauvojen pituudet eivät ylitä haluttua pituutta. Murtorajatilassa tarkastetaan, että sauvojen käyttöasteet eivät ylitä sallittua sauvan kuormitusten ja kestävyyksien suhteen. Käyttörajatilassa ristikon taipuman arvo verrataan vaatimusten mukaiseen raja-arvoon. Ristikkomalli tarkastaa, että täyttyykö edellä mainitut ehdot, ja jos jokin ehdoista ei täyty, niin kohdefunktion arvo kerrotaan sakkokerroimella. Sakkokerroimelle käytetään jokaiselle ratkaisun kelpoisuuden ehdolle sakkokerrointa 10, jolloin jotakin ehtoa rikottaessa optimoidun ristikkoratkaisun kokonaiskustannukset kerrotaan arvolla 10. Tällöin käyvän ratkaisun ja ei-käyvän ratkaisun ero on niin suuri, että evoluutioalgoritmi löytäessään käyvän ratkaisun muodostaa uuden sukupolven ottaen huomioon käyvä ratkaisu. Käyttäessään kerrointa 10 myös optimoinnin aikana näkee selvästi, että milloin optimoitava ratkaisu on käypä.



Kuva 10: Ristikkomallin optimointi.

5. TUTKIMUSTULOKSET

Työssä optimoidaan kylmämuovatuista suorakaidepoikkileikkauksien muotoisista rakenneputkista koostuvia K-ristikoita, KT-ristikoita ja N-ristikoita eri jänneväleillä ja eri teräslujuuksilla käyttäen luvussa 4 esitettyä ristikon parametrissa mallia. Ristikoita tarkastellaan jänneväleillä 60 m – 120 m kymmenen metrin välein. Teräslujuuksina käytetään lujuuksia S355, S460 ja S690. Kaikilla ristikkotyypeillä tarkastellaan 60 m ristikoilla eri teräslujuuksien vaikutus ristikon kustannuksiin. Murtorajatiloina on käytetty määräävien lumikuormatapausten eri vaihtoehtoja. Käyttörajatilana on käytetty tasaisen lumikuormatapausten ominaiskuormayhdistelmää. Eri jänneväleillä haetaan kustannusten kannalta halvin ristikko kaikille ristikkotyypeille käyttäen eri teräslujuuksia. Liitteessä A on esitetty optimoinnissa käytettävät suorakaiteen muotoisten kylmämuovattujen rakenneputkien poikkileikkausluettelot. Optimointia varten liitteen A poikkileikkausluettelosta on rajattu korkeampien teräslujuuksien poikkileikkausluokkien mukaan poikkileikkausluokan 4 teholliset poikkileikkaukset. Liitteen A poikkileikkausluetteloiden pinta-alat ja sitä kautta poikkileikkauspainot eivät vastaa täysin Robotin vastaavien poikkileikkauksien pintaaloja ja poikkileikkauspainoja.

Liitteissä B, C ja D on esitetty optimoituja ristikkoja. Liitteessä B on esitetty optimoituja K-ristikoita tarkasteltavilla jänneväleillä. Liitteessä C on esitetty optimoituja KT-ristikoita tarkasteltavilla jänneväleillä. Liitteessä D on esitetty optimoituja N-ristikoita tarkasteltavilla jänneväleillä. Liitteiden B, C ja D erinimiset poikkileikkaukset liitteeseen A verrattuna johtuvat rakennemallin tuomisesta Robottiin, jolloin poikkileikkausten nimi tulee vaihtaa Robotin vastaaviksi. Liitteissä B, C ja D näkyvät poikkileikkaukset ovat kaikki suorakaidepoikkileikkauksia ja vastaavat liitteen A poikkileikkauksia. Liitteissä on pääosin esitetty ristikoita mahdollisimman pienellä sauvamäärällä sekä teräslujuuksia vaihtelemalla haettu kustannuksiltaan halvinta ristikköä. Liitteiden ristikoille on esitetty tietoina eri ristikon osille poikkileikkaukset, materiaali, ristikon osan suurin sauva pituus sekä ristikon osan suurin käyttöaste. Sauvojen pituudet ja käyttöasteet ovat Robotista saatuja arvoja. Ristikoille on eritelty myös kustannustiedot euroissa, ristikon kokonaiskorkeus millimetreissä, taipuma millimetreissä Karambasta tai Robotista saatuna ja ristikon paino kilogrammoina. Lisäksi ristikon rakennemallista on otettu kuva Robotista. Kaikille ristikkotyypeille on esitetty myös 60 m ristikolla teräslujuudeltaan S355 oleva ristikko. Joillakin jänneväleillä on myös vertailtu, kuinka uumasauvojen lisääminen vaikuttaa ristikon painoon ja kustannuksiin. KT-ristikoilla tulisi olla liitteen C ristikoiden kuvien rakennemallissa myös sivuttaistuenta vertikaalisauvojen yläsolmussa ristikon tasosta kohtisuoraan

nurjahdusta vastaan, koska mitoituksessa oletetaan yläpaarteen olevan jatkuva vertikaalisauvan ylitse, jotta kuva vastaisi todellista haettua rakennemallia.

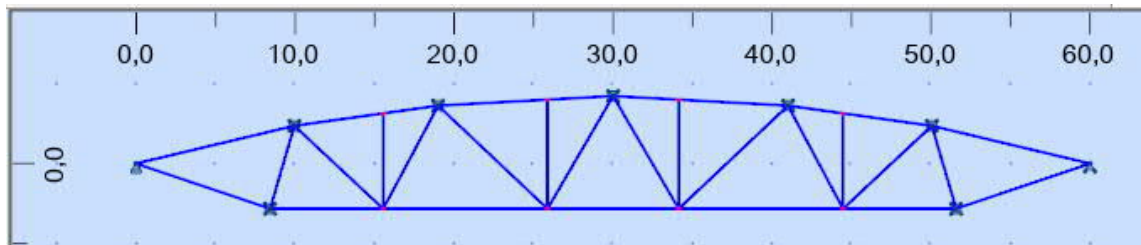
Taulukoissa 9, 10 ja 11 on esitetty optimoinnin tarkkuutta tekemällä optimointi uudelleen samoille ristikoille. Optimoinnin hajonnan tutkimista varten optimoitavista ristikoista on esitetty taulukoihin 9, 10 ja 11 tiedot ristikoiden massoista sekä ristikoiden kustannuksista ilman liitos- ja asennuskustannuksia. Kustannuksista ja massoista on laskettu keskiarvo ja keskihajonta. Optimoinnin tulosten hajontaa on tutkittu kaikilla ristikkotyypeillä. Optimointimuuttujat ovat samat geometrian lähtöparametrien muuttujat kuin muillakin tutkittavilla ristikoilla. Tosin lisäämällä sauvojen määrää ja sitä kautta sauvojen solmujen määrää, myös optimointimuuttujien määrä kasvaa. Suunnittelijan suorittama optimoinnin lähtöparametrien arvot muutettiin satunnaisesti, jotta edellisen ristikon optimiratkaisu ei vaikuta seuraavan ristikon optimointiin. Ristikoiden optimoinnin annettiin pyöriä jokaisella ristikolla evoluutioalgoritmilla 50 sukupolven ajan, johon meni aikaa noin 10-15 minuuttia. Taulukoista 9, 10 ja 11 on jokaisesta esitetty yksi ristikko liitteissä B, C ja D. Taulukossa 12 on esitetty liitteiden taulukoita 9, 10 ja 11 vastaavat ristikot.

Taulukoiden 9, 10 ja 11 mukaan optimoinnin tarkkuus on suhteellisen hyvä keskihajonnan ollessa noin 1 prosentin luokkaa K-ristikoilla ja N-ristikoilla taulukoissa 9 ja 11. N-ristikon optimointi on tulosten mukaan tarkin eri ristikkotyypeistä. N-ristikon optimoinnin tarkkuuteen voi vaikuttaa se, että N-ristikon parametrisessa mallissa on vähemmän muuttujia uumasauvojen sijainnin määrittämiseen verrattuna K/KT-ristikolle. N-ristikolla tarvitsee määrittää ristikkomallin mukaan vain pystysauvojen sijainti vaakaetäisyydellä, kun taas K/KT-ristikolla tarvitsee määrittää diagonaalisauvoilta sekä alasolmun ja yläsolmun sijainnit vaakaetäisyydellä. Tällöin K-KT-ristikolla on kaksi kertaa enemmän optimointimuuttujia uumasauvojen geometriaa määrittäessä. Mitä vähemmän optimointialgoritmilla on optimointimuuttujia, sitä vähemmän algoritmin tarvitsee käydä läpi eri vaihtoehtoja.

KT-ristikolla taulukossa 10 ristikon 4 optimointitulokset on jäänyt heikommaksi kuin muiden saman taulukon ristikoiden huonontaan näin KT-ristikoiden keskihajontaa noin 3 prosentin luokkaan. Jos taulukon 10 ristikkoa 4 ei oteta huomioon, keskihajonta olisi 1-2 prosentin luokkaa, joka on lähempänä taulukoiden 9 ja 11 arvoja, mutta tarkkuus on kuitenkin vähän heikompi kuin muiden ristikkotyyppien. K-ristikolla ja KT-ristikolla on yhtä monta optimointimuuttujaa, koska KT-ristikon vertikaali sijainti haetaan diagonaalien alasolmujen sijainnin mukaan. KT-ristikon sauvojen suurempi määrä verrattuna K-ristikkoon voi vaikuttaa KT-ristikon optimoinnin lievästi heikompaan tarkkuuteen verrattuna K-ristikkoon. Taulukon 10 ristikolla 4 on todennäköisesti päädytty paikalliseen optimiin optimoinnin aikana, ja evoluutioalgoritmi ei ole löytänyt parempaa optima annettussa ajassa.

Tällöin jos ristikkooa ei optimoida montaa kertaa, käyttäjän vastuulla on tarkastella optimoidusta ristikosta, että onko optimointitulost lähellä haluttua tulosta. Kuvassa 11 on esitetty taulukon 10 KT-ristikon 4 kuva. Vertaamalla kuvan 11 ristikon 4 kuvaa liitteen B taulukossa 12 eriteltyyn ristikon 3 kuvaan, silmämääräisesti voi olla hankalaa havaita ristikosta, että onko ristikkooa mahdollista vielä optimoida enemmän. KT-ristikolla 3, joka on esitetty myös kuvassa 13, harjan viereiset yläpaarteen sauvat ovat noin metrin lyhyempiä ja vertikaalisauvat ovat keskempänä harjan viereisiä sauvoja. Tällöin näiden yläpaarteen sauvojen nurjahduspituus lyhentyisi, jolloin voitaisiin saavuttaa pienempi poikileikkaus yläpaarteelle. Nykyisissä eurokoodeissa teräslujuuden kasvattaminen ei paranna kylmämuovatuilla rakenneputkilla nurjahduskäyrän valintaa, jolloin nurjahduskestävyydessä teräslujuuden parantaminen auttaa ainoastaan kestävyuden myötölujuuden kasvattamisessa.

Taulukoista 9, 10 ja 11 nähdään, että KT-ristikko on halvin ja kevyin ristikkotyyppi, jonka jälkeen tulee N-ristikko ja kalliimpina ja painavimpina ristikkotyypinä on K-ristikko. K-ristikolla on kuitenkin vähiten uumasauvoja, jolloin liitos- ja asennuskustannukset ovat pienemmät. Taulukon 9 K-ristikoilla on 10 uumasauvaa, kun taulukon 10 KT-ristikoilla on 14 uumasauvaa ja taulukon 11 N-ristikoilla on 13 uumasauvaa.



Kuva 11: Taulukon 10 KT-ristikko 4.

Taulukko 9: K-ristikoiden saman ristikon optimoinnin toistaminen. Jänneväli 60 m, teräslujuus kaikilla osilla S355 sekä ristikkojako $k = 10$ m.

K-ristikko	Kustannukset	Massa
1	20277.5	23750.4
2	20549.4	24063.8
3	20809.8	24314.7
4	20973.3	24569.4
5	20806.6	24355.5
Keskiarvo:	20683.3	24210.7
Keskihajonta:	244.1	280.7

Taulukko 10: KT-ristikoiden saman ristikon optimoinnin toistaminen. Jänneväli 60 m, teräslujuus kaikilla osilla S355 sekä ristikkojako $k = 10$ m.

KT-ristikko	Kustannukset	Massa
1	17526.4	19741.8
2	17652.9	19902.6
3	17064.1	18944.9
4	18565.5	21010.4
5	17285.9	19183.8
Keskiarvo:	17619.0	19756.7
Keskihajonta:	514.7	718.4

Taulukko 11: N-ristikoiden saman ristikon optimoinnin toistaminen. Jänneväli 60 m, teräslujuus kaikilla osilla S355 sekä ristikkojako $k = 10$ m.

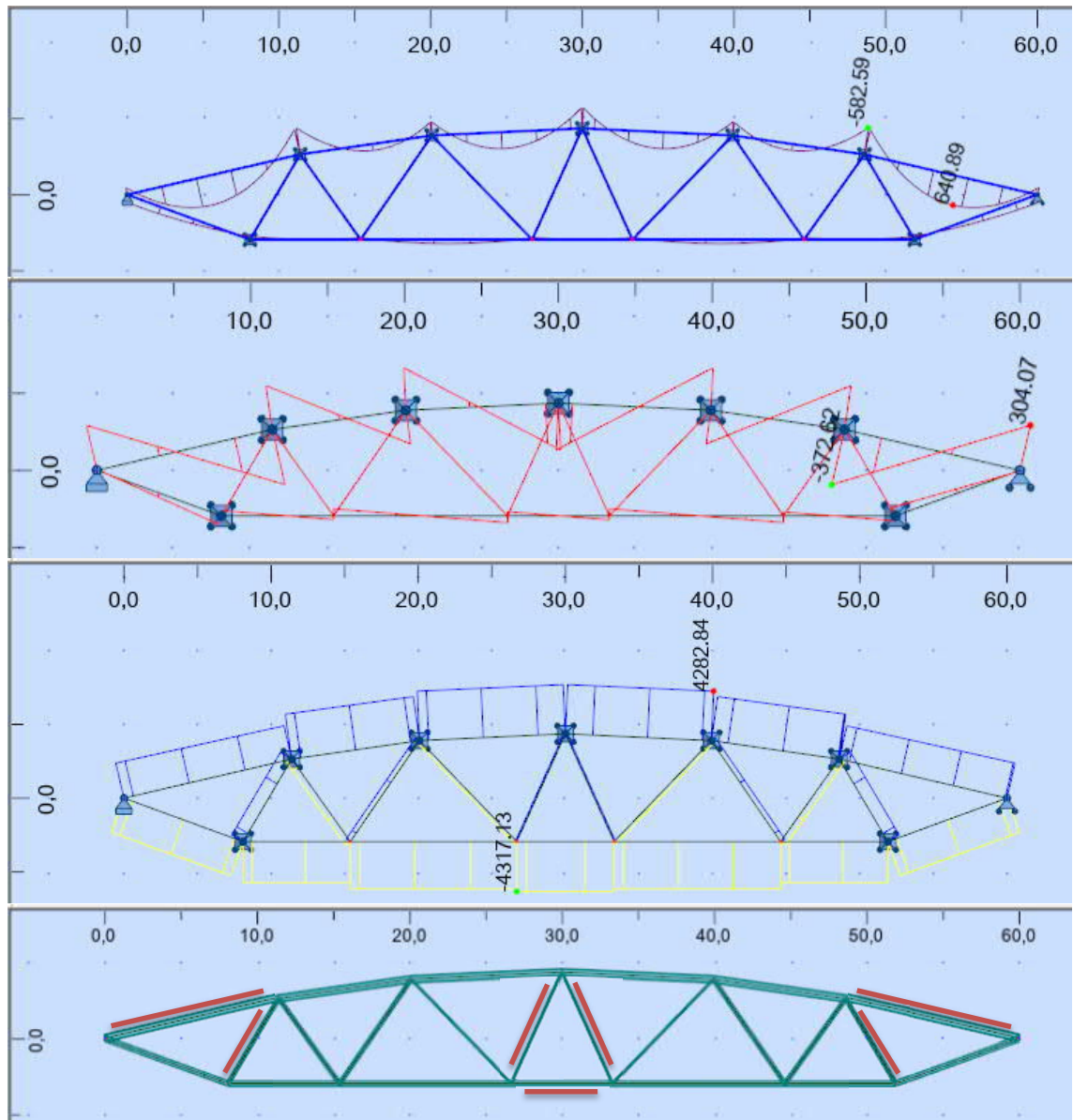
N-ristikko	Kustannukset	Massa
1	18822.8	21360.0
2	18804.2	21339.6
3	18526.5	20959.1
4	18944.6	21506.8
5	18814.5	21350.9
Keskiarvo:	18782.5	21303.3
Keskihajonta:	137.8	182.6

Taulukko 12: Liitteissä B, C ja D taulukoita 9, 10 ja 11 vastaavat ristikot. Ristikot ovat jokaisen liitteen ensimmäisiä.

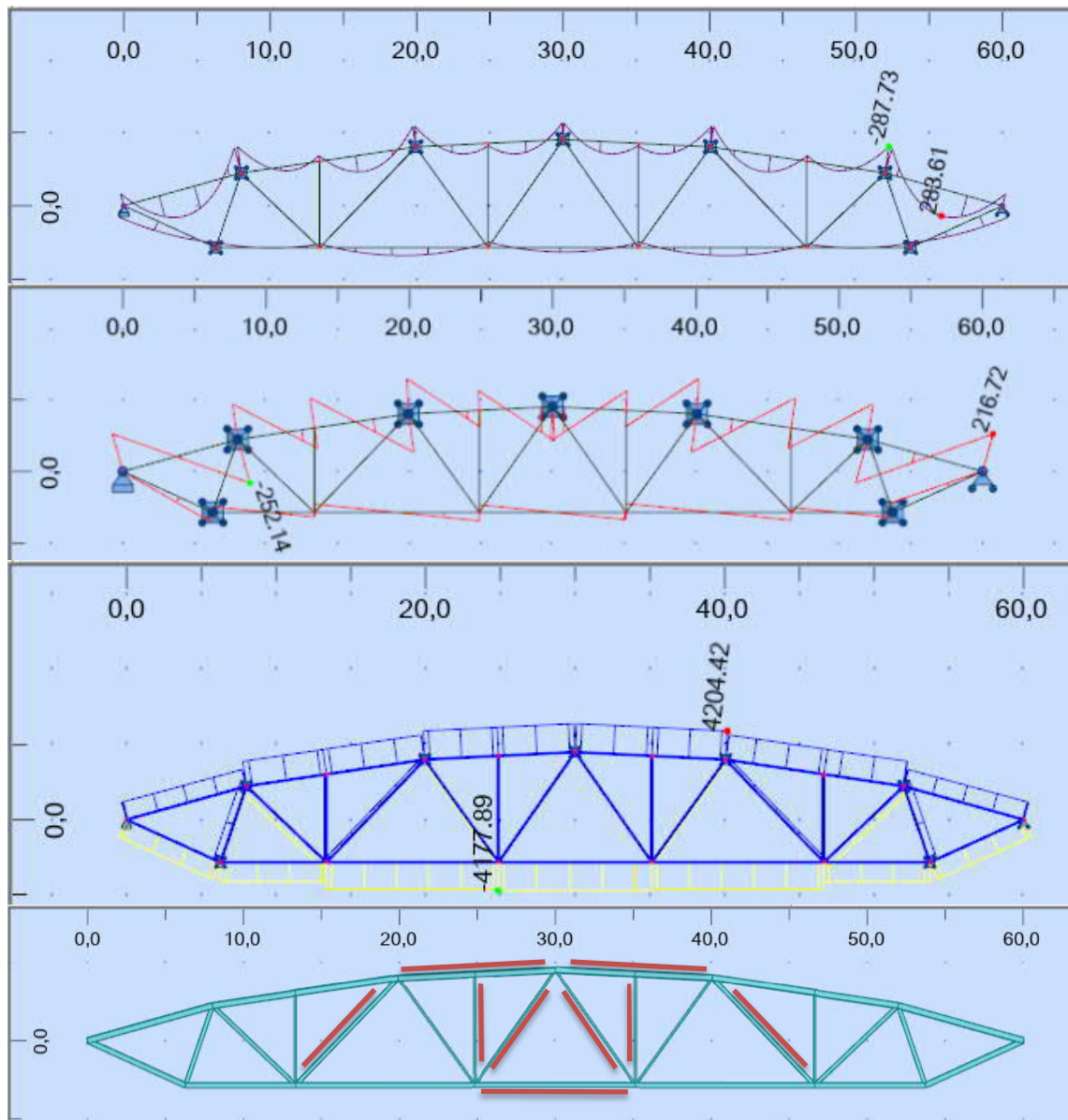
Taulukko 9	K-ristikko 2	Liite B, "K-ristikko 1, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3"
Taulukko 10	KT-ristikko 3	Liite C, "KT-ristikko 1, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3"
Taulukko 11	N-ristikko 2	Liite D, "N-ristikko 1, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3"

Kuvissa 12, 13 ja 14 on esitetty taulukon 12 ristikoiden kuormituskaaviot taivutusmomentille, leikkausvoimalle ja normaalivoimalle tasaisen lumikuorman murtorajatilan yhdistelmällä. Kuvissa on myös esitetty ristikoiden poikkileikkauskoot ja käyttörajoiltaan suurimmat sauvat eri ristikon osille. Poikkileikkauskokojen avulla nähdään, kuinka uumasauvat on jaettu eri poikkileikkauskokoihin. K-ristikolla ja KT-ristikolla kuvissa 12 ja 13 harjalta seuraavista uumasauvoista puristussauvat ja vetosauvat ovat pienempää poikkileikkauskokoa, jonka jälkeen seuraavasta puristussauvasta eteenpäin sauvat ovat suurempaa poikkileikkauskokoa. N-ristikolla huomataan kuvassa 14, että uumasauvojen poikkileikkauskoko ei menekään symmetrisesti molemmin puolin ristikkkoa. Harjalta katsoen järjestyksessä toiset vetosauvat ovat eri poikkileikkauskokoja harjan molemmin puolin. Tällöin uumasauvojen jako ei ole kustannuksien kannalta optimaalista, kuin vedossa oleva sauva on isompaa poikkileikkausta mitä sen tarvitsisi olla. Jatkoa varten N-ristikon uumasauvojen jako tulisi korjata siten, että molemmilla puolilla poikkileikkauskoot menevät symmetrisesti. Koska eri paria olevien vetosauvojen pienemmän poikkileikkauksen sauva ei ole käyttöasteeltaan mitoittava poikkileikkaukselle, sauvojen erikokoisuudesta ei ole paljon haittaa kustannuksille. Jos eri poikkileikkauskokoa olevat sauvat olisivat puristussauvoja, sauva olisi todennäköisesti mitoittava pienemmälle poikkileikkaukselle, jolloin tämä suurentaisi harjan viereisiä uumasauvoja, ja kustannuksille olisi tällöin enemmän vaikutusta. Paarteille mitoittava murtorajatilan yhdistelmä on tasaisen lumikuorman kuormayhdistelmä. Uumasauvoille mitoittava kuormayhdistelmä vaihtelee kaikkien murtorajatilayhdistelmien kesken.

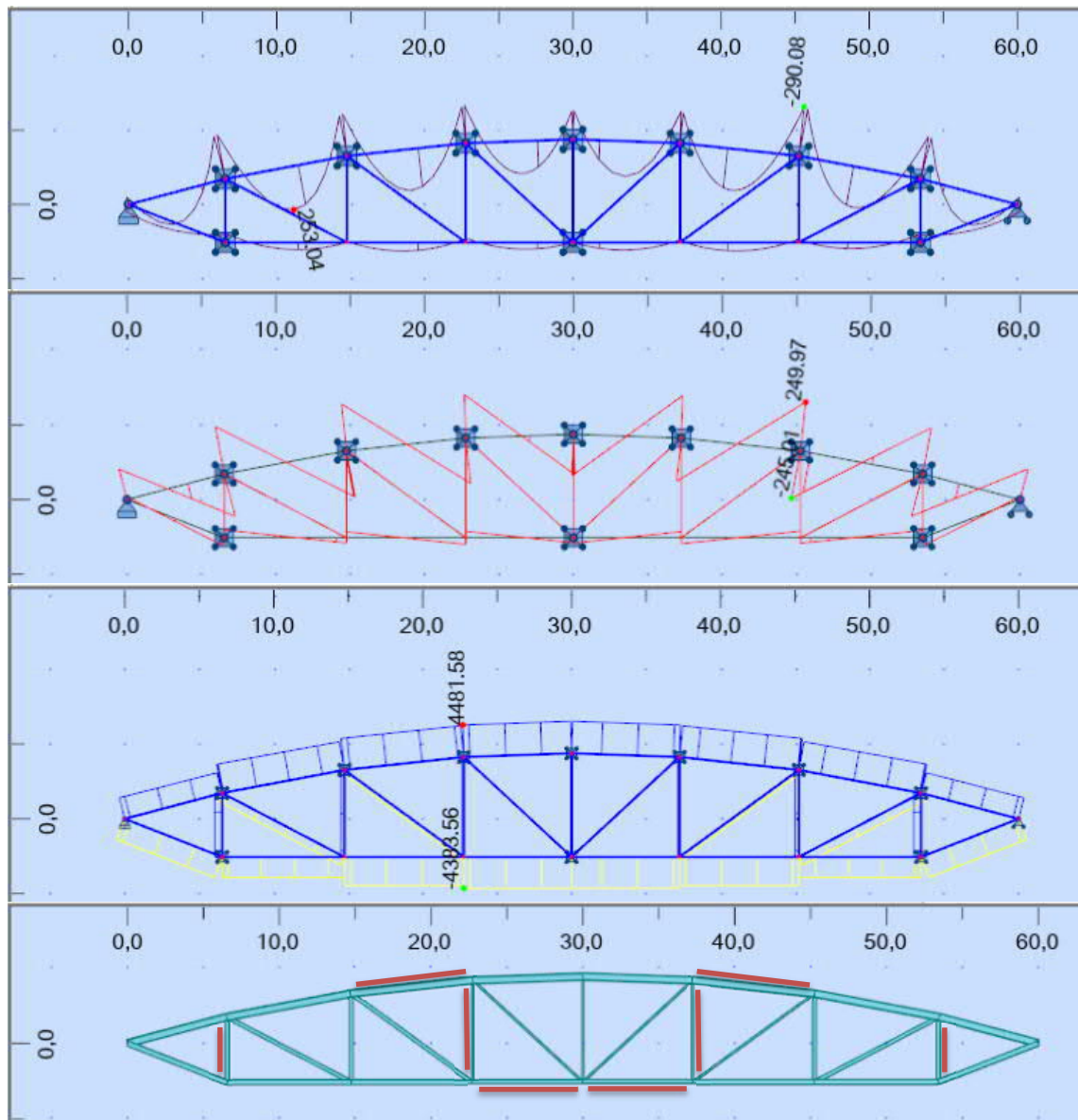
Kuvissa 12, 13 ja 14 kaikilla ristikkotyypeillä yläpaarteella on suurin normaalivoima harjalla ja alapaarteella keskellä. K-ristikolla ja KT-ristikolla yläpaarteen taivutusmomentti ja leikkausvoima ovat suurimpana tuen viereisellä paarteella, mutta N-ristikolla yläpaarteen taivutusmomentti ja leikkausvoima ovat suurimpana toisella ja kolmannella vertikaalivälillä. Kuormituksen tullessa ylhäältä päin ristikoilla yläpaarre on puristuksessa ja alapaarre on vedossa, kuten kuvista 12, 13 ja 14 huomataan. K-ristikolla ja KT-ristikolla diagonaalisauvoista joka toinen sauva puristuksessa ja joka toinen sauva vedossa uumasauvojen normaalivoiman kasvaessa tuelle päin mentäessä. N-ristikolla lyhyemmät vertikaalisauvat ovat puristuksessa ja pidemmän diagonaalisauvat ovat vedossa. Puristussauvojen ollessa pystysuoria N-ristikolla, saadaan pienennettyä puristussauvojen nurjahduspituus mahdollisimman lyhyeksi. Tällöin kuitenkin joudutaan kasvattamaan uumasauvojen määrää.



Kuva 12: Taulukon 12 K-ristikon 2 kuormituskuviot tasaisen lumikuorman murtorajatilayhdistelmällä sekä ristikon poikkileikkauuskoot Robotista saatuna. Punaisella merkitty saman poikkileikkauksen omaavien suurimpien käyttöasteiden sauvat. Kuormituskaaviot ovat ylhäältä alas taivutusmomentille, leikkausvoimalle sekä normaalivoimalle. Normaalivoiman kuormakaaviossa sininen tarkoittaa puristusta ja keltainen vetoa.



Kuva 13: Taulukon 12 KT-ristikon 3 kuormituskuviot tasaisen lumikuorman murtorajati-layhdistelmällä, sekä ristikon poikkileikkaukset Robotista saatuna. Punaisella merkitty saman poikkileikkauksen omaavien suurimpien käyttöasteiden sauvat.



Kuva 14: Taulukon 12 N-ristikon kuormituskaaviot tasaisen lumikuorman murtorajati-layhdistelmällä sekä ristikon poikkileikkauuskoot Robotista saatuna. Punaisella merkitty saman poikkileikkauksen omaavien suurimpien käyttöasteiden sauvat.

KT-ristikolla vertikaalisauvat ovat puristuksessa ja toimivat nurjahdustukina yläpaarteiden sauvoille ristikon tasossa. Tällöin KT-ristikolle saadaan yläpaarteelle pienempi poikkileikkauskoko kuin K-ristikon yläpaarteelle. Kuvan 13 KT-ristikon yläpaarteella on liitteen C mukaan poikkileikkaus QH 400x400x12 ja kuvan 12 K-ristikon yläpaarteella on liitteen B mukaan poikkileikkaus RH 500x300x20. K-ristikon yläpaarteiden poikkileikkaus on painoltaan 60 % suurempi kuin KT-ristikon yläpaarteiden.

KT-ristikoilla on päätetty ottaa yksi vertikaali pois tuen viereltä tarkasteltavilla KT-ristikoilla. Liitteessä C on vertailuna 60 metrin KT-ristikoilla tapaukset, joissa toisessa on vertikaalisauva tuen vierellä ja toisessa ei ole. Kun ei oteta liitos- ja asennuskustannuksia huomioon, tuen viereisellä vertikaalituella saadaan kustannusetua, mutta todennäköisesti lisäsauvojen liitos- ja asennuskustannuksilla menetetään sauvojen ko'oilta saavutettu kustannusetu. Lisäksi pidemmillä KT-ristikoilla uumasauvojen määrä kasvaa, jolloin työn ristikkomallilla pystysuora vertikaalisauva aiheuttaa pienemmän kulman kuin 30° tuen viereisen vertikaalisauvan ja diagonaalisauvan liitokselle.

Pystysuora vertikaalisauva ei ole myöskään optimaalisin KT-ristikolle tuen lähellä, koska vertikaalisauva ei jaa tuen viereisen yläpaarteiden sauvaa kahteen yhtä pitkään osaan. Tällöin toimisi paremmin vertikaalisauva, joka olisi tuen vierellä kohtisuoraan yläpaartetta vastaan.

Kuvien 12, 13 ja 14 kaikilla ristikkotyypeillä on alapaarteiden sauvoilla suurin käyttöaste keskellä alapaartetta suurimman normaalivoiman vuoksi. Alapaarteiden ollessa vedossa ei tarvitse ottaa huomioon sauvan nurjahduskestävyyttä. Yläpaarteiden suurimman käyttöasteen omaava sauva vaihtelee ristikkotyypien välillä riippuen yläpaarteiden sauvan nurjahduspituudesta sekä normaalivoiman ja taivutusmomentin suuruudesta. Yläpaarteella sauvan mitoittavana tekijänä toimii nurjahduksen ja lommahduksen yhteisvaikutuksen ehdot. Uumasauvoilla käyttöasteiltaan mitoittavat sauvat ovat puristussauvoja, joissa käyttöastetta rajoittaa sauvan nurjahdus. K-ristikolla ja N-ristikolla suuremman poikkileikkauksen omaavan uumasauvan mitoittava sauva on tuen vieressä oleva normaalivoimaltaan suurin puristussauva, kun taas KT-ristikolla mitoittavana sauvana toimii pituudeltaan pidempi puristussauva.

Seuraavaksi taulukoissa 13, 14 ja 15 tarkastellaan korkealujuuksisten terästen vaikutusta ristikoiden kustannuksiin ja massaan eri ristikkotyypeillä. Teräslujuudet määrätään mallissa siten, että yläpaarteella, alapaarteella sekä uumasauvoilla voi olla eri teräslujuudet. Taulukoista 13, 14 ja 15 on tutkittavat ristikot järjestetty kustannuksien mukaan alenevassa järjestyksessä. Kuvissa 15 – 20 on esitetty taulukoista 13, 14 ja 15 ristikoiden kustannuksien mukaan järjestetyt diagrammit ristikoiden kustannuksista ja massasta.

Tarkasteltavien ristikoiden lukumäärän vuoksi jokaisesta ristikosta on otettu vain yksi optimointitulos. Optimoidut ristikot on tarkastettu optimoinnin yhteydessä silmämääräisesti ja jos on havaittu poikkeamia ristikossa, niin optimointi on suoritettu uudelleen. Taulukoissa 13, 14 ja 15 on todennäköisesti siltikin hieman hajontaa. Taulukoissa on tarkasteltu kustannuksia vain ristikon sauvojen osalta, jolloin ei ole otettu huomioon liitos- ja asennuskustannuksia.

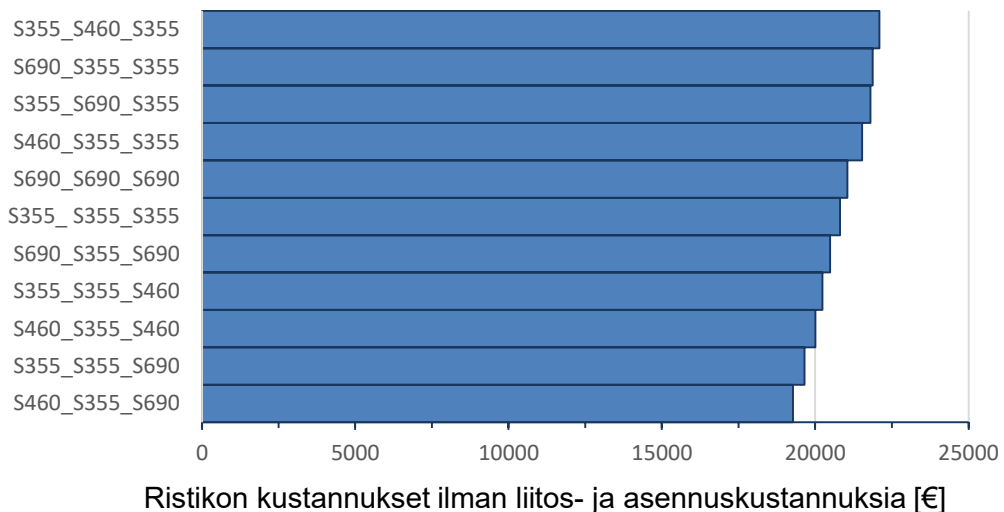
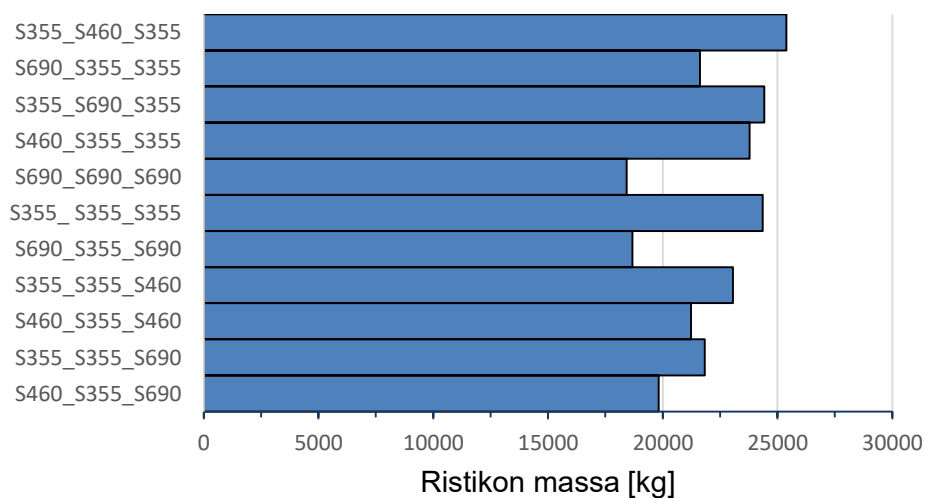
Taulukoiden 13, 14 ja 15 tuloksista huomataan, että käyttämällä korkealujuuksisia teräksiä oikeassa ristikon osassa voidaan saada pienennettyä ristikon kustannuksia. Alapaarteella korkealujuuksisten terästen käytön etu tulee parhaiten esille kustannuksissa ja massassa. Korottamalla pelkästään alapaarteen teräslujuutta saadaan pienennettyä kustannuksia ja massaa, kun taas korottamalla pelkästään yläpaarteen tai uumasauvojen teräslujuuksia kustannuksia tai massaa ei saada pienennettyä. Uumasauvoilla poikkileikkauskokojen jako ei ole todennäköisesti tehokkain mahdollinen, vaan lisäämällä poikkileikkauskokoja uumasauvoille, saadaan keskimäärin nostettua käyttöastetta uumasauvoilla. Kun uumasauvoissa puristussauvat ovat mitoittavia, niin teräslujuutta nostamalla vetosauvoissa lujuuden nostamisesta ei ole hyötyä, vaan vetosauvan kustannuksen kasvavat turhaan. Yläpaarteen ollessa puristuksessa, teräslujuuden nostamisella ei ole yhtä paljon hyötyä kuin vedossa olevalla alapaarteella.

Teräksen lujuuden nostaminen pitäisi pienentää ristikon massaa, mutta kuvassa 16 K-ristikolla S355_S460_S355 on suurempi massa kuin K-ristikolla S355_S355_S355. Samoin kuvassa 18 KT-ristikolla S460_S355_S355 on selvästi suurempi massa kuin KT-ristikolla S355_S355_S355, mutta tässä tapauksessa on ollut todennäköisesti kyseessä huono optimointitulos. Poikkileikkauskokojen väli voi olla niin suuri, että vaikka kasvat-taisi teräslujuutta, ei siltikään päästä pienempään poikkileikkauskokoon. Sen lisäksi voi olla syynä optimoinnin hajonta korkealujuuksisten teräsristikoiden korkeampaan massaan.

Taulukon 13 kustannuksiltaan halvin ristikko S460_S355_S690 on esitetty liitteessä B järjestyksessä toisena ristikkona nimeltään "K-ristikko 2, 60 m". Taulukon 14 halvin ristikko S460_S355_S460 on esitetty liitteessä C kolmantena ristikkona nimeltään "KT-ristikko 3, 60 m". Taulukon 15 halvin ristikko S460_S355_S690 on esitetty liitteessä D toisena ristikkona nimeltään "N-ristikko 2, 60 m".

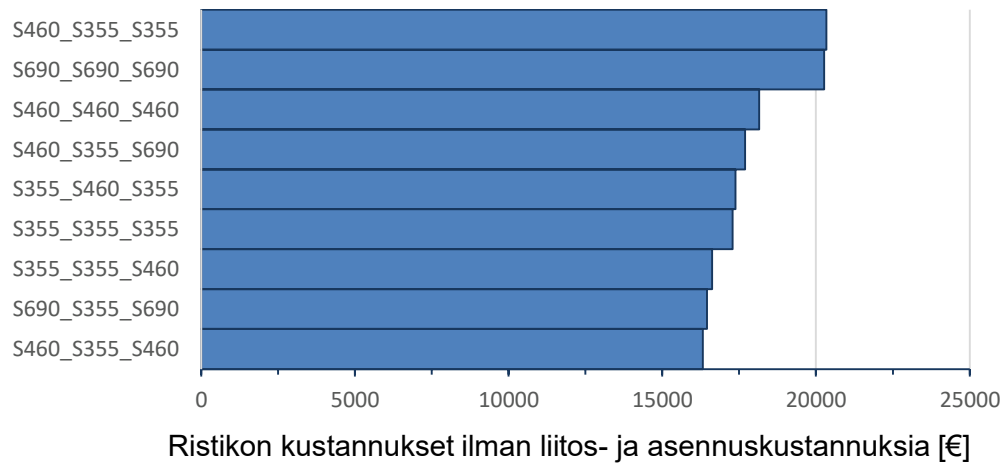
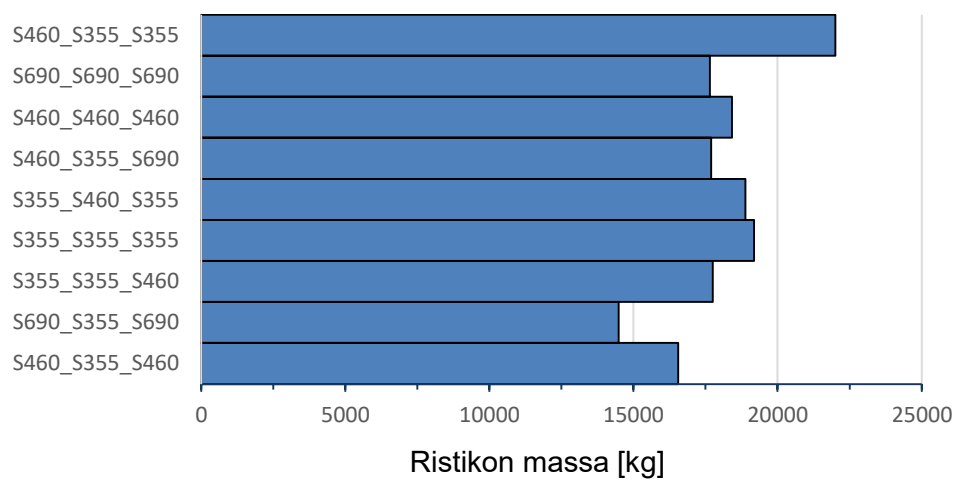
Taulukko 13: K-ristikon kustannuksien ja massan vertailu eri teräslujuuksilla.

K-ristikko, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3				
Yläpaarre	Uumasauvat	Alapaarre	Kustannukset [€]	Massa [kg]
S355	S460	S355	22091.0	25392.2
S690	S355	S355	21871.5	21620.6
S355	S690	S355	21807.0	24430.8
S460	S355	S355	21529.6	23783.7
S690	S690	S690	21055.2	18427.2
S355	S355	S355	20806.6	24355.5
S690	S355	S690	20492.3	18682.8
S355	S355	S460	20235.8	23059.1
S460	S355	S460	20007.5	21229.8
S355	S355	S690	19653.6	21828.1
S460	S355	S690	19281.1	19826.3

**Kuva 15:** Teräslujuuden vaikutus kustannuksiin K-ristikolla.**Kuva 16:** Teräslujuuden vaikutus ristikon massaan K-ristikolla.

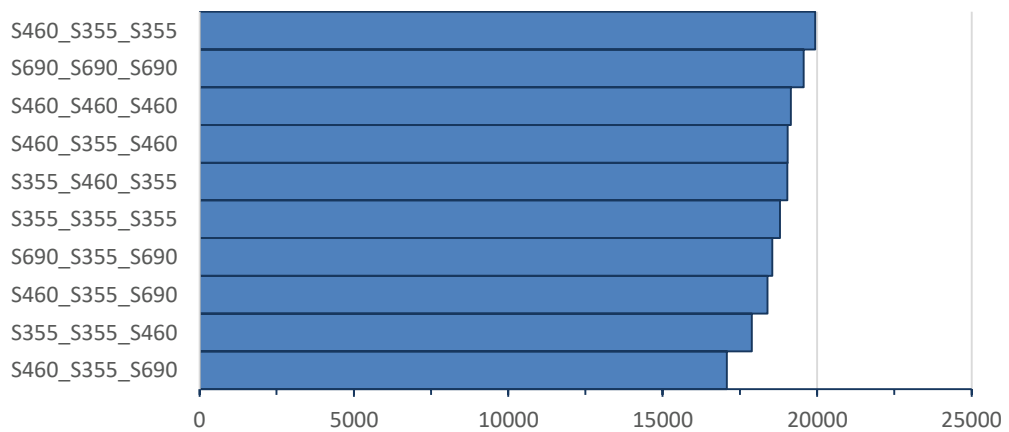
Taulukko 14: KT-ristikon kustannuksien ja massan vertailu eri teräslujuuksilla.

KT-ristikko, 60 m, k-jako 10 m				
Yläpaarre	Uumasauvat	Alapaarre	Kustannukset [€]	Massa [kg]
S460	S355	S355	20341.9	22008.8
S690	S690	S690	20267.0	17648.3
S460	S460	S460	18153.3	18419.7
S460	S355	S690	17697.4	17698.1
S355	S460	S355	17385.9	18889.3
S355	S355	S355	17285.9	19183.8
S355	S355	S460	16621.0	17752.0
S690	S355	S690	16449.7	14490.8
S460	S355	S460	16318.8	16553.8

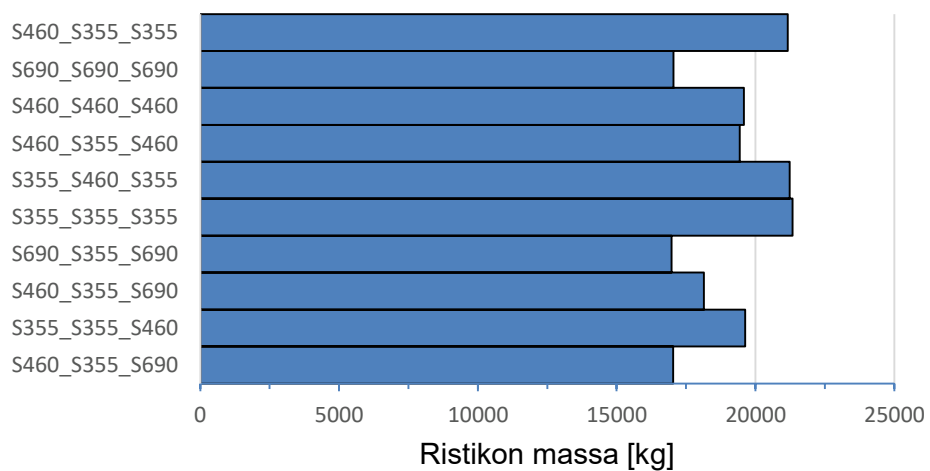
**Kuva 17:** Teräslujuuden vaikutus kustannuksiin KT-ristikolla.**Kuva 18:** Teräslujuuden vaikutus ristikon massaan KT-ristikolla.

Taulukko 15: N-ristikon kustannuksien ja massan vertailu eri teräslujuuksilla.

N-ristikko, 60 m, k-jako 10 m				
Yläpaarre	Uumasauvat	Alapaarre	Kustannukset [€]	Massa [kg]
S460	S355	S355	19941.2	21166.7
S690	S690	S690	19563.8	17050.4
S460	S460	S460	19148.4	19588.2
S460	S355	S460	19050.4	19434.6
S355	S460	S355	19034.8	21234.8
S355	S355	S355	18804.2	21339.6
S690	S355	S690	18554.9	16977.5
S460	S355	S690	18397.7	18142.8
S355	S355	S460	17889.5	19630.4
S460	S355	S690	17083.6	17041.0



Ristikon kustannukset ilman liitos- ja asennuskustannuksia [€]

Kuva 19: Teräslujuuden vaikutus kustannuksiin N-ristikolla.**Kuva 10:** Teräslujuuden vaikutus ristikon massaan N-ristikolla.

Taulukoiden 13, 14 ja 15 tuloksista huomataan, että vaikka pelkästään yläpaarteen teräslujuuden nostamisella ei ole hyötyä kustannuksiin, niin siltikin kustannuksiltaan halvimmissa ristikoissa kaikilla ristikkotyypeillä sekä alapaarteella että yläpaarteella on korkeammat teräslujuudet. Kaikkien ristikon osien teräslujuuksien nostamisella ei ole tuloksien mukaan hyötyä kustannuksilla, sillä uumasauvojen teräslujuuden nostamisesta ei työn mukaisen poikkileikkausjaon avulla saa etua kustannuksiin tai massaan. Nostamalla sekä yläpaarteen että alapaarteen lujutta, saadaan molempien paarteiden poikkileikkauksia pienennettyä helpommin kuin nostamalla vain toisen paarteen lujutta. Taulukossa 16 on eroteltu taulukon 13 K-ristikoista ristikoiden tiedot, missä on nostettu jommankumman paarteen tai molempien paarteiden lujutta. Taulukosta 16 nähdään, että yläpaarteen poikkileikkauskoko on suurimmassa mahdollisessa koossa ristikoilla S460_S355_S355 ja S355_S355_S355, ja suurimpien kokojen välillä on isommat erot kuin pienemmällä poikkileikkauksilla, jolloin ristikolla S460_S355_S355 teräslujuuden nostaminen ei riitä pienentämään yläpaarteen poikkileikkausta. Ristikolla S460_S355_S690 taas yläpaarteella on pienempi poikkileikkaus, jolloin alapaarteen teräslujuutta kasvattamalla on saatu mahdollistettua pienempi poikkileikkaus myös yläpaarteelle. Vertaamalla ristikkoa S460_S355_S690 ja ristikkoa S690_S355_S690 huomataan, että yläpaarteen teräslujuuden nostaminen ei ole riittänyt pienentämään yläpaarteen poikkileikkauskokoa kevyemmäksi suurien poikkileikkauksien suurien erojen vuoksi.

Taulukoiden 13, 14 ja 15 tuloksista huomataan myös, että kevyin ristikko ei ole aina kustannuksiltaan halvin. Vaikka ristikoilla S690_S355_S690 ja S690_S690_S690 on kaikilla ristikkotyypeillä kevyimmät ristikot, niin mikään niistä ei ole halvin 60 metrin jännevälillä. Pidemmällä jänneväleillä huomataan, että nostamalla yläpaarteen teräslujuutta saadaan lisähyötyä esimerkiksi siten, että voidaan pienentää uumasauvojen määrää ristikoilla, jolloin paarteiden pituudet kasvaa ja täten vaaditaan kestävämmät sauvat. Jos ei ole mahdollista enää kasvattaa poikkileikkausta tällöin, niin teräslujuutta kasvattamalla voidaan saada lisää kestävyyttä myös yläpaarteella.

Taulukko 16: Taulukosta 13 eroteltuja ristikoita. Ristikko S460_S355_S690 esitetty liitteessä B. Ristikon osat järjestyksessä ylhäältä alas ovat: yläpaarre, diagonaalit tuen lähellä, diagonaalit harjan lähellä sekä alapaarre.

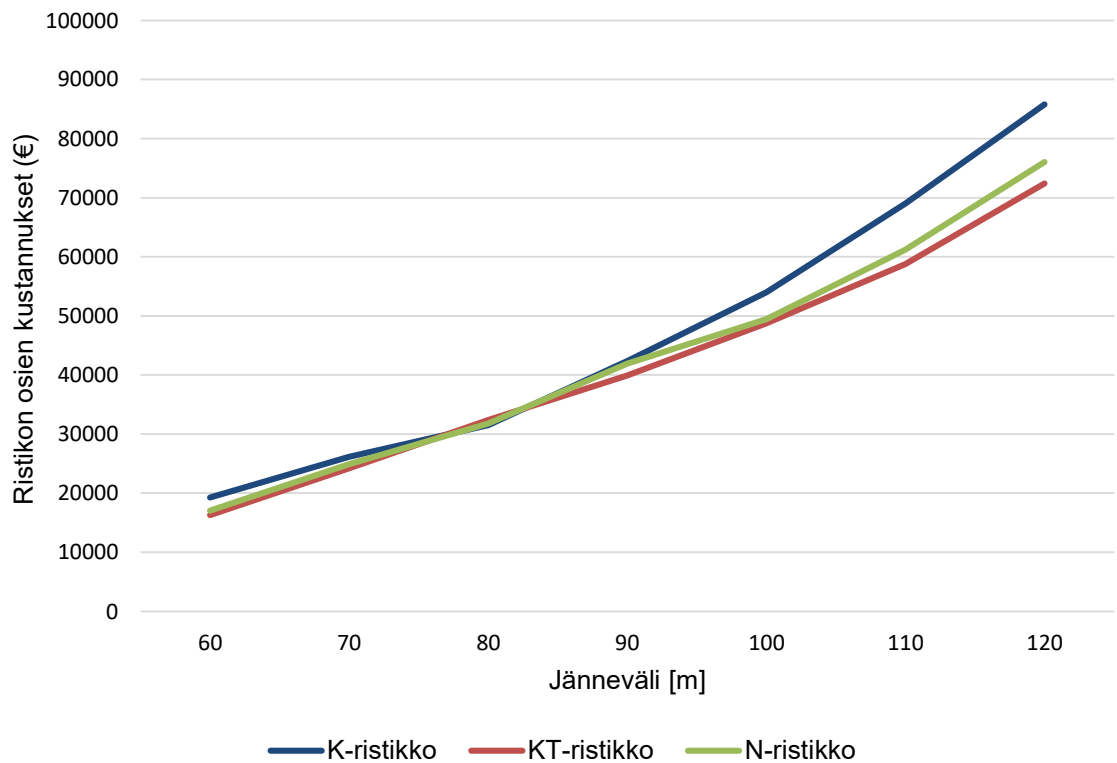
Taulukon 13 K-ristikot	Poikkileikkaukset osien mukaan	Poikkileikkauksen paino [kg/m]	Yhteispituus [m]	Suurin käyttöaste
S460_S355_S355 Hinta 21530 € Paino 23784 kg Korkeus 7143 mm	RH 500x300x20 RRHS 260x180x8 RRHS 140x140x5 QH 350x350x10	235.5 51.5 20.7 106.0	60.9 43.5 35.3 61.0	0.83 0.99 0.97 0.92
S355_S355_S690 Hinta 19654 € Paino 21828 kg Korkeus 7283 mm	RH 500x300x20 RRHS 260x260x8 RRHS 220x120x7.1 RRHS 250x150x10	235.5 61.5 34.9 57.0	60.8 45.4 34.6 61.4	0.82 0.88 1.00 0.86
S460_S355_S690 Hinta 19281 € Paino 19826 kg Korkeus 7273 mm	RH 500x300x16 RRHS 300x300x8.8 RRHS 220x120x6.3 RRHS 250x150x10	190.8 78.3 31.3 57.0	60.8 46.7 34.1 61.3	0.87 0.74 1.00 0.85
S690_S355_S690 Hinta 20492 € Paino 18683 kg Korkeus 7018 mm	QH 400x400x16 RRHS 260x260x7.1 RRHS 140x140x5.6 RRHS 260x180x10	190.8 55.0 23.0 63.3	60.9 43.6 34.7 61.2	0.92 0.89 0.93 0.80

Pidemmillä jänneväleillä on tutkittu eri ristikkotyyppejä käyttämällä korkealujuuksisia teräksiä ja haettu mahdollisimman kustannustehokkaita ristikoita. Nämä ristikot on esitetty liitteissä B, C ja D sekä ristikoiden kustannukset ilman liitos- ja asennuskustannuksia on esitetty taulukossa 17 ja kuvassa 21. Tarkasteltavien ristikoiden lukumäärän vuoksi ristikot ovat optimoitu vain kerran. Ristikoille on tutkittu monia eri teräslujuusvaihtoehtoja ja pyritty löytämään halvimmat ristikot, jotka on esitetty taulukossa 17. Ristikoista on esitetty ristikon osien tiedot ja kustannusten erittelyt liitteissä B, C ja D.

Kuvasta 21 huomataan, että KT-ristikoilla ja N-ristikoilla saadaan suhteellisen samankaltaisia kustannuksia halvimmille optimoiduille ristikoille eri jänneväleillä, kun taas K-ristikoiden halvimpien optimoitujen ristikoiden ovat suuremmat KT-ristikoihin ja N-ristikoihin verrattuna. Tarkastelemalla liitteen B K-ristikoita pidemmillä jänneväleillä huomataan, että 110 m ja 120 m jänneväleissä K-ristikoiden sauvamäärä kasvaa suureksi. Tällöin K-ristikolla voi tulla ongelmaksi uumasauvojen välinen liian pieni kulma.

Taulukko 17: Eri ristikkotyypin kustannuksiltaan halvimpien optimoitujen ristikoiden kustannukset (€) eri jänneväleillä käyttäen korkealujuuksisia teräksiä ottamatta huomioon liitos- ja asennuskustannuksia.

Pituus (m)	K-ristikko	KT-ristikko	N-ristikko
60	19281.1	16318.8	17083.6
70	26150.9	24186.0	24916.3
80	31516.6	32372.8	31754.7
90	42348.2	39912.0	41895.7
100	53978.6	48737.2	49427.3
110	68999.7	58754.2	61196.2
120	85813.7	72456.5	76091.0



Kuva 11: Kustannuksiltaan halvimmat eri ristikkotyypin korkealujuuksiset ristikot eri jänneväleillä, ristikkojako $k = 10$ m. Kustannuksissa ei ole otettu huomioon liitos- ja asennuskustannuksia.

Vaatimusten mukaan sauvojen välinen kulma tulisi olla yli 30° , mutta ainakin liitteen B viimeisellä ristikolla, "K-ristikko 2, 120 m, k-jako 10 m, sauvajako 9", sauvojen väliset kulmat ovat alle 30° . Ristikoiden optimoinnissa ei ole otettu huomioon sakkokertoimella liian pientä kulmaa ristikoilla, mutta sakkokertoimen avulla pystyisi välttämään liian pieniä kulmia.

Kun K-ristikolla on vähemmän uumasauvoja 60 m jännevälillä muihin ristikkotyyppeihin verrattuna, niin kasvattamalla jänneväliä K-ristikoiden tarve uumasauvoille kasvaa enemmän muihin ristikkotyyppeihin verrattuna. Taulukossa 18 on esitetty uumasauvojen pienin lukumäärä liitteiden ristikoille. KT-ristikolla on 70 m jännevälillä yhtä vähän uumasauvoja kuin K-ristikolla. N-ristikolla on taas 80 m jännevälillä vähemmän uumasauvoja verrattuna K-ristikkoon. KT-ristikolla ja N-ristikolla on pitkällä yli 100 m jänneväleillä melkein yhtä paljon uumasauvoja ja niiden määrä kasvaa melkein samassa suhteessa.

Taulukko 18: Uumasauvojen pienin lukumäärä eri ristikkotyypeillä eri jänneväleillä. Lukumäärät laskettu peräisin liitteiden B, C ja D ristikoista.

Jänneväli [m]	K-ristikko	KT-ristikko	N-ristikko
60	10	14	13
70	14	14	17
80	18	16	17
90	18	20	17
100	22	20	21
110	26	20	21
120	30	26	25

Liitteiden B, C ja D ristikoissa huomataan, että lähellä harjaa olevien uumasauvojen käyttöaste menee joillakin ristikoilla yli yhden. Tämä johtuu siitä, kun Karamba valitsee sattumalta poikkileikkausluokan 3 poikkileikkauksen sauvaan ja Karamba ei osaa valita automaattisesti kimmoteorian ja plastisuusteorian mukaisten kestävyyksien laskennan välillä. Kun Karamba on määritetty laskemaan poikkileikkauksien kestävyudet plastisuusteorian mukaan, Karamban voi valita poikkileikkausluokan 3 poikkileikkauksen, jolloin Robotin lasiessa kestävyudet oikein poikkileikkausluokan mukaan, käyttöaste voi ylittyä poikkileikkausluokan 3 poikkileikkauksilla. Poikkileikkausluokan 3 poikkileikkaukset kannattaa jättää myöhemmissä tutkimuksissa pois poikkileikkausluetteloista, jolloin ei tarvitse myöskään huolehtia liitoksen ehdosta, jonka mukaan liitokseen liittyvien sauvojen tulisi olla poikkileikkausluokkaa 1 tai 2.

Optimoiduista ristikoista huomataan, että optimointi hakee ristikkokorkeuksille lievästi suurempia korkeuksia, kuin eri lähteissä on kerrottu optimikorkeuksiksi luvun 2.1 mukaan. Liitteiden B, C ja D ristikoilla ristikon kokonaiskorkeus vaihtelee korkeuksien

$H = L/7,7 \dots L/8,5$ välillä. Ristikoiden optimikorkeuksia ei ole välttämättä tarkoitettu kaaren muotoisille harjaristikoille tai erityisen pitkille jänneväleille. Ristikkomalli pyrkii optimoinnissa hakemaan mahdollisimman korkeaa kaarta, mutta tämä kasvattaa uumasauvojen pituutta, jolloin uumasauvojen nurjahduskestävyys tulee mitoittavaksi ristikon kokonaiskorkeuden puolesta. Muuttamalla alapaarteen muodon myös kaaren muotoiseksi, voidaan ristikon korkeutta pienentää ristikon keskiosissa näin lyhentäen uumasauvojen pituuksia keskiosissa.

Liitteessä C N-ristikoilla "N-ristikko 2, 80 m, max 12 m" ja "N-ristikko 3, 80 m" on vertailtu ristikon sauvojen pituuden rajoittamista 12 metriin. Ristikolla "N-ristikko 2, 80 m, max 12 m" ristikon kokonaiskorkeus on metrin pienempi, jolloin on saatu rajoitettua sauvojen pituus haluttuun 12 metriin. Tällöin on kuitenkin jouduttu käyttämään isompia poikkileikkauksia verrattuna ristikkoon "N-ristikko 3, 80 m", jonka seurauksena sauvojen pituuksien suhteen rajoitetun ristikon kustannukset ilman liitoksia ovat noin 15 prosenttia suuremmat. Pidemmällä sauvolla voi kuitenkin olla pituutensa puolesta lisäkustannuksia, joita ei ole otettu huomioon. Lyhyemmällä jänneväleillä pystytään käyttämään helpommin lyhyempiä uumasauvoja ristikon pienemmän kokonaiskorkeuden takia, kun taas pitkällä jänneväleillä on pakko käyttää pitkiä sauvoja ristikon kokonaiskorkeuden kasvaessa jännevälin mukana.

6. YHTEENVETO

Työssä muodostettiin teräsristikolle parametrinen malli, joka algoritmiavusteisesti mitoitaa ja optimoi ristikon, luo rakennemallin rakenneanalyysiohjelmaan sekä listaa tulokset ristikon kustannuksista ja ristikon sauvoista. Työssä kehitetyn ristikon parametrisella mallilla pystyy muodostamaan halutun tyyppisen ristikon geometrian sekä rakennemallin. Muodostetun ristikon parametrisen mallin avulla tutkittiin teräsristikoiden eri ristikkotyyppisiä pitkillä jänneväleillä. Ristikkotyypeistä tutkittiin K-ristikkoa, KT-ristikkoa ja N-ristikkoa. Ristikkoja tutkittiin jänneväleillä 60 m – 120 m. Liitosten mitoitusta ja tarkastelua ei tehty työssä. Tällöin liitosten kustannusten ja sauvojen asennusten kustannuksia ei otettu huomioon ristikon kokonaiskustannuksissa muuta kuin karkean arvion avulla. Liitosten karkean kustannusarvion perusteella työssä optimoitavissa ristikoissa pyrittiin hakemaan ristikoita, joilla on mahdollisimman vähän uumasauvoja. Työssä tutkittiin myös korkealujuuksisten terästen vaikutusta ristikoiden kustannuksiin. Korkealujuuksisten terästen käytöllä voidaan saada työssä optimoitujen tulosten perusteella kustannusten puolesta hyötyä, jos korkealujuuksisia teräksiä käytetään oikeassa ristikon osassa. Ala- ja paarteella saadaan selkeästi kustannuksiin hyötyä, kun käytetään korkealujuuksisia teräksiä.

Teräsristikon mitoituksesta käytiin läpi korkealujuuksisten terästen vaikutusta teräsrakenteiden mitoitussääntöihin. Teräsrakenteiden suunnittelun eurokoodista 3 on tulossa tulevaisuudessa uusi versio, missä tuodaan uusia korkeampia teräslujuuksia eurokoodien piiriin sekä päivitetään vanhoja korkealujuuksisten terästen sääntöjä lähteen (SCI 2020.) mukaan. Korkealujuuksisten terästen vaikutuksesta nurjahduskäyrien valintaan pitäisi tulla myös uudessa eurokoodissa päivitystä, jolloin esimerkiksi kylmämuovatuilla rakenneputkilla voitaisiin käyttää edullisempaa nurjahduskäyrää korkealujuuksisilla teräksillä.

Algoritmiavusteisella suunnittelulla on rakennesuunnittelussa tarkoitus tehostaa eri ratkaisuvaihtoehtojen tarkastelua sekä suunnitelmien muunnosnopeutta. Algoritmiavusteisella suunnittelulla voidaan luoda parametrisia malleja suunnittelukohteista, joilla mallin tulos perustuu mallin luojan määrittämiin lähtöparametreihin, joita muuttamalla mallin käyttäjä pystyy vaikuttamaan mallin lopputulokseen tehokkaasti.

Ristikoiden optimoimiseen käytettiin työssä heuristisiin optimointimenetelmiin kuuluvaa evoluutioalgoritmia, joka luonnonvalinnan mukaisesti pyrkii hakeutumaan kohti optimia.

Evoluutioalgoritmi luo satunnaisesti alkupopulaation ratkaisusta, joista algoritmin valitsemat populaation jäsenet pariutuvat ja tuottavat jälkeläisiä muodostaen uuden sukupolven. Algoritmi valitsee pariutuvat jäsenet siten, että valitut alkiot ovat riittävän kelpoisia.

Työssä tarkasteltavista ristikoista tutkittiin optimoinnin tarkkuus eri ristikkotyypeillä, korkealujuuksisten terästen vaikutus ristikon kustannuksiin eri ristikkotyypeillä sekä eri jänneväliden vaikutus eri ristikkotyypin kustannuksiin käyttäen korkealujuuksisia teräksiä hyväksi. Ristikoiden optimoinnin tarkkuus on suhteellisen hyvä kaikilla ristikkotyypeillä keskihajonnan ollessa 1-2% luokkaa. Joskus ristikon optimointi voi kuitenkin jäädä paikalliseen optimiin, jota voi olla vaikea huomata ilman, että suorittaa optimointia moneen kertaan. Tutkittaessa korkealujuuksisten terästen vaikutusta eri ristikkotyypeille, ristikkotyypin väliltä ei löytynyt suuria eroja. Käyttämällä korkealujuuksisia teräksiä ristikon alapaarteella, saadaan sauvojen osien kustannuksia halvemmaksi. Nostamalla pelkääntään yläpaarten tai uumasauvojen teräslujuuksia, ei optimoitujen ristikoiden perusteella saatu kustannuksien kannalta hyötyä. Halvimmat optimointitulokset löytyivät kuitenkin ristikoista, joissa käytettiin korkealujuuksisia teräksiä sekä alapaarteessa että yläpaarteessa. Tutkittaessa eri ristikkotyyppejä eri jänneväleillä pyrittiin ristikoilla mahdollisimman pieniin kustannuksiin sekä hakemaan vaihtoehtoja, joilla olisi mahdollisimman vähän uumasauvoja. KT-ristikoilla ja N-ristikoilla saatiin pienemmät sauvojen osien kustannukset ja uumasauvojen lukumäärät verrattuna K-ristikoihin pitkällä, yli 100 m, jänneväleillä. Ristikoille joudutaan lisäämään sitä enemmän uumasauvoja, mitä pidempi jänneväli on tutkittavalla ristikolla. Tällöin erityisesti K-ristikolla, uumasauvojen määrä voi kasvaa suureksi, jolloin sauvojen väliset kulmat pienenevät. Työn ristikkomalliin voitaisiin lisätä optimoinnille ehto, joka rajoittaisi liian pieniä kulmia sauvojen välille.

Työssä kehitetyllä ristikkomallilla on jatkokehitykselle tarvetta erityisesti pulttiliitosten huomioon ottamisesta. Pulttiliitosten vaikutusta ristikon rakenteisiin sekä kustannuksiin tulisi tutkia, sillä niillä on suuri vaikutus ristikon kokonaiskustannuksiin sekä myös ristikossa käytettävien sauvojen poikkileikkauskokoihinkin. Ristikkomallista voitaisiin myös tarkistaa, kuinka yläpaarten geometrian muodostumisen muuttaminen voisi vaikuttaa optimointitulokseen. Työssä yläpaarten kaari on murtoviivan muotoinen ja yläpaarten yläsolmut voidaan liikuttaa suoralla. Tulisiko ristikoille parempia optimointituloksia, jos yläpaarten solmuja voitaisiin liikuttaa ristikon yläpaarten todellisen kaaren muodolla? Lisäksi KT-ristikon yläpaarten rakennemallia voitaisiin tarkentaa siten, että yläpaarten sauvat saisi todellisesti jatkuviksi ristikon vertikaalisauvojen yli. Ristikon parametrisessa mallissa voitaisiin ottaa myös huomioon palomitoitus tarkastelemalla algoritmiavusteisesti ristikon sauvojen kriittisiä lämpötiloja palotilanteissa. Jatkotutkimuksissa olisi myös hyvä tarkistaa muiden poikkileikkausmuotojen vaikutus ristikoiden tuloksiin.

LÄHTEET

- [1] ArcelorMittal. (2019). Tubular Products Europe Hollow Structural Sections. ArcelorMittal. Saatavilla (viitattu 20.03.2021) <https://tubulareurope.arcelormittal.com/repo/AMTP%20brochures/AMTP%20%20-%20Hollow%20Structural%20Sections.pdf?flipbook=1>
- [2] Bažant, Z., Cedolin, L. (2010). Stability of structures – Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 973 s.
- [3] CIDECT. (1998.) Design guide for fabrication, assembly and erection of hollow section structures. TÜV-Verlag GmbH. 169 s.
- [4] ECCS. (2006). Rules for Member Stability in EN 1993-1-1, Background documentation and design guidelines. ECCS. 240 s.
- [5] Haapio, J. (2012.) Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach. Tampere University of Technology. 140 s.
- [6] HILONG. (2017). High Strength Long Span Structures (HILONG). European Commission. 129 s.
- [7] Jalkanen, J. (2007.) Tubular Truss Optimization Using Heuristic Algorithms. Tampereen Teknillinen Yliopisto. 124 s.
- [8] Jokela, V. (2016.) Teräslitosten mitoitus ja kustannusvertailu, Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. 207 s.
- [9] Mela, K. (2013.) Mixed Variable Formulations for Truss Topology Optimization. Tampereen teknillinen yliopisto. 150 s.
- [10] RUOSTE. (2016). Rules on high strength steel (RUOSTE). European Commission. 149 s.
- [11] Rutten, D. (2010.) Evolutionary Principles applied to Problem Solving. Saatavilla (viitattu 16.4.2021) <https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>
- [12] Ruukki. (2010.) Hitsatut Profiilit EN 1993 -käsikirja. Rautaruukki Oyj. 610 s.
- [13] Sabau, G., Lagerqvist, O., Baddoo, N. (2019.) Statistical Analysis of Flexural-Buckling-Resistance Models for High-Strength Steel Columns. American Society of Civil Engineers. 15 s.
- [14] SCI. (2020). High strength steel design and execution guide. SCI (the Steel Construction Institute). 137 s.
- [15] SEMI-COMP. (2009). SEMI-COMP: Plastic member capacity of semi-compact steel sections – a more economic design. European Commission. 135 s.
- [16] SEMI-COMP+. (2013). Valorisation action of plastic member capacity of semi-compact steel sections – a more economic design (SEMI-COMP+). European Commission. 124 s.

- [17] SFS-EN 10210-1. (2006). Kuumamuovatut seostamattomista teräksistä ja hienoraeteräksistä valmistetut rakenneputket. Osa 1: Tekniset toimitusehdot. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 67 s.
- [18] SFS-EN 10210-3. (2020). Kuumamuovatut teräksiset rakenneputket. Osa 3: Lujien ja säänkestävien terästen tekniset toimitusehdot. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 42 s.
- [19] SFS-EN 10219-1. (2006). Kylmämuovatut hitsatut seostamattomista teräksistä ja hienoraeteräksistä valmistetut rakenneputket. Osa 1: Tekniset toimitusehdot. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 65 s.
- [20] SFS-EN 10219-3. (2020). Kylmämuovatut hitsatut teräksiset rakenneputket. Osa 3: Lujien ja säänkestävien terästen tekniset toimitusehdot. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 42 s.
- [21] SFS-EN 1993-1-1. (2005). Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 97 s.
- [22] SFS-EN 1993-1-1 + AC. (2006.) Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 99 s.
- [23] SFS-EN 1993-1-3. (2006). Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 127 s.
- [24] SFS-EN 1993-1-5. (2006). Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 57 s.
- [25] SFS-EN 1993-1-6. (2007). Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-6: Kuorirakenteiden lujuus ja stabiilius. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 92 s.
- [26] SFS-EN 1993-1-8. (2005). Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 147 s.
- [27] SFS-ENV 1993-1-1. (1993.) Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS ry. 436 s.
- [28] Spilles, W., MacBain, K. (2009.) Structural Optimization. Springer Science+Business Media. 299 s.
- [29] SSAB. (2016). SSAB Domex Tube Structural Hollow Sections. SSAB Europe Oy. 688 s.
- [30] SSAB. (2017). SSAB High Strength Structural Hollow Sections. SSAB Europe Oy. 259 s.
- [31] TRY. (2014.) Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Eurocode 3 -oppikirja. Teräsrakenneyhdistys ry. 183 s.
- [32] Ympäristöministeriö. (2019). Rakenteiden lujuus ja vakaus, Teräsrakenteet. Ympäristöministeriö. s. 94.

LIITE A: OPTIMOINNISSA KÄYTETTÄVÄT POIKKILEIKKAUSLUETTELOT

Poikkileikkaus	Korkeus [mm]	Leveys [mm]	Paksuus [mm]	PLL (S355)	Pinta-ala [cm ²]	Poikkileikkaus paino [kg/m]
SHS 100x100x3	100	100	3	2	11.41	9.0
SHS 100x100x4	100	100	4	1	14.95	11.7
SHS 100x100x5	100	100	5	1	18.36	14.4
SHS 100x100x6	100	100	6	1	21.63	17.0
SHS 100x100x6.3	100	100	6.3	1	22.25	17.5
SHS 100x100x7.1	100	100	7.1	1	24.65	19.4
SHS 100x100x8	100	100	8	1	27.24	21.4
SHS 110x100x3	110	100	3	3	12.01	9.4
SHS 110x100x4	110	100	4	1	15.75	12.4
SHS 110x100x5	110	100	5	1	19.36	15.2
SHS 110x100x6	110	100	6	1	22.83	17.9
SHS 110x100x6.3	110	100	6.3	1	23.51	18.5
SHS 110x110x3	110	110	3	3	12.61	9.9
SHS 110x110x4	110	110	4	1	16.55	13.0
SHS 110x110x5	110	110	5	1	20.36	16.0
SHS 110x110x6	110	110	6	1	24.03	18.9
SHS 110x110x6.3	110	110	6.3	1	24.77	19.4
SHS 120x100x4	120	100	4	2	16.55	13.0
SHS 120x100x5	120	100	5	1	20.36	16.0
SHS 120x100x6	120	100	6	1	24.03	18.9
SHS 120x100x6.3	120	100	6.3	1	24.77	19.4
SHS 120x120x4	120	120	4	2	18.15	14.2
SHS 120x120x5	120	120	5	1	22.36	17.5
SHS 120x120x5.6	120	120	5.6	1	24.82	19.5
SHS 120x120x6	120	120	6	1	26.43	20.7
SHS 120x120x6.3	120	120	6.3	1	27.29	21.4
SHS 120x120x7.1	120	120	7.1	1	30.33	23.8
SHS 120x120x8	120	120	8	1	33.64	26.4
SHS 120x120x8.8	120	120	8.8	1	36.48	28.6
SHS 120x60x4	120	60	4	2	13.35	10.5
SHS 120x80x4	120	80	4	2	14.95	11.7
SHS 120x80x5	120	80	5	1	18.36	14.4
SHS 120x80x6	120	80	6	1	21.63	17.0
SHS 120x80x6.3	120	80	6.3	1	22.25	17.5
SHS 120x90x4	120	90	4	2	15.75	12.4
SHS 120x90x5	120	90	5	1	19.36	15.2
SHS 120x90x6	120	90	6	1	22.83	17.9
SHS 120x90x6.3	120	90	6.3	1	23.51	18.5
SHS 140x100x4	140	100	4	3	18.15	14.2
SHS 140x100x5	140	100	5	1	22.36	17.5
SHS 140x100x6	140	100	6	1	26.43	20.7
SHS 140x100x6.3	140	100	6.3	1	27.29	21.4
SHS 140x110x4	140	110	4	3	18.95	14.9
SHS 140x110x5	140	110	5	1	23.36	18.3

Poikkileikkaus	Korkeus [mm]	Leveys [mm]	Paksuus [mm]	PLL (S355)	Pinta-ala [cm ²]	Poikkileikkaus paino [kg/m]
SHS 140x110x6	140	110	6	1	27.63	21.7
SHS 140x110x6.3	140	110	6.3	1	28.55	22.4
SHS 140x120x4	140	120	4	3	19.75	15.5
SHS 140x120x5	140	120	5	1	24.36	19.1
SHS 140x120x6	140	120	6	1	28.83	22.6
SHS 140x120x6.3	140	120	6.3	1	29.81	23.4
SHS 140x140x10	140	140	10	1	48.57	38.1
SHS 140x140x4	140	140	4	3	21.35	16.8
SHS 140x140x5	140	140	5	1	26.36	20.7
SHS 140x140x5.6	140	140	5.6	1	29.30	23.0
SHS 140x140x6	140	140	6	1	31.23	24.5
SHS 140x140x6.3	140	140	6.3	1	32.33	25.4
SHS 140x60x4	140	60	4	3	14.95	11.7
SHS 140x70x4	140	70	4	3	15.75	12.4
SHS 140x70x5	140	70	5	1	19.36	15.2
SHS 140x80x4	140	80	4	3	16.55	13.0
SHS 140x80x5	140	80	5	1	20.36	16.0
SHS 140x80x6	140	80	6	1	24.03	18.9
SHS 140x80x6.3	140	80	6.3	1	24.77	19.4
SHS 150x100x5	150	100	5	2	23.36	18.3
SHS 150x100x6	150	100	6	1	27.63	21.7
SHS 150x100x6.3	150	100	6.3	1	28.55	22.4
SHS 150x100x7.1	150	100	7.1	1	31.75	24.9
SHS 150x100x8	150	100	8	1	35.24	27.7
SHS 150x110x5	150	110	5	2	24.36	19.1
SHS 150x110x6	150	110	6	1	28.83	22.6
SHS 150x110x6.3	150	110	6.3	1	29.81	23.4
SHS 150x70x5	150	70	5	2	20.36	16.0
SHS 150x90x5	150	90	5	2	22.36	17.5
SHS 150x90x6	150	90	6	1	26.43	20.7
SHS 150x90x6.3	150	90	6.3	1	27.29	21.4
SHS 160x100x5	160	100	5	2	24.36	19.1
SHS 160x100x6	160	100	6	1	28.83	22.6
SHS 160x100x6.3	160	100	6.3	1	29.81	23.4
SHS 160x120x10	160	120	10	1	48.57	38.1
SHS 160x120x5	160	120	5	2	26.36	20.7
SHS 160x120x6	160	120	6	1	31.23	24.5
SHS 160x120x6.3	160	120	6.3	1	32.33	25.4
SHS 160x120x7.1	160	120	7.1	1	36.01	28.3
SHS 160x120x8	160	120	8	1	40.04	31.4
SHS 160x120x8.8	160	120	8.8	1	43.52	34.2
SHS 160x70x5	160	70	5	2	21.36	16.8
SHS 160x80x5	160	80	5	2	22.36	17.5
SHS 160x80x6	160	80	6	1	26.43	20.7
SHS 160x80x6.3	160	80	6.3	1	27.29	21.4

Poikkileikkaus	Korkeus [mm]	Leveys [mm]	Paksuus [mm]	PLL (S355)	Pinta-ala [cm ²]	Poikkileikkaus paino [kg/m]
SHS 160x90x5	160	90	5	2	23.36	18.3
SHS 160x90x6	160	90	6	1	27.63	21.7
SHS 160x90x6.3	160	90	6.3	1	28.55	22.4
SHS 160x90x7.1	160	90	7.1	1	31.75	24.9
SHS 180x100x5	180	100	5	3	26.36	20.7
SHS 180x100x5.6	180	100	5.6	2	29.30	23.0
SHS 180x100x6	180	100	6	2	31.23	24.5
SHS 180x100x6.3	180	100	6.3	1	32.33	25.4
SHS 180x100x7.1	180	100	7.1	1	36.01	28.3
SHS 180x100x8	180	100	8	1	40.04	31.4
SHS 180x120x10	180	120	10	1	52.57	41.3
SHS 180x120x5	180	120	5	3	28.36	22.3
SHS 180x120x6	180	120	6	2	33.63	26.4
SHS 180x120x6.3	180	120	6.3	1	34.85	27.4
SHS 180x120x7.1	180	120	7.1	1	38.85	30.5
SHS 180x120x8	180	120	8	1	43.24	33.9
SHS 180x120x8.8	180	120	8.8	1	47.04	36.9
SHS 200x100x6	200	100	6	2	33.63	26.4
SHS 200x100x6.3	200	100	6.3	2	34.85	27.4
SHS 200x100x7.1	200	100	7.1	1	38.85	30.5
SHS 200x100x8	200	100	8	1	43.24	33.9
SHS 200x120x10	200	120	10	1	56.57	44.4
SHS 200x120x6	200	120	6	2	36.03	28.3
SHS 200x120x6.3	200	120	6.3	2	37.37	29.3
SHS 200x120x7.1	200	120	7.1	1	41.69	32.7
SHS 200x120x8	200	120	8	1	46.44	36.5
SHS 200x120x8.8	200	120	8.8	1	50.56	39.7
SHS 200x80x6	200	80	6	2	31.23	24.5
SHS 200x80x6.3	200	80	6.3	2	32.33	25.4
SHS 220x120x10	220	120	10	1	60.57	47.5
SHS 220x120x6	220	120	6	3	38.43	30.2
SHS 220x120x6.3	220	120	6.3	3	39.89	31.3
SHS 220x120x7.1	220	120	7.1	2	44.53	35.0
SHS 220x120x8	220	120	8	1	49.64	39.0
SHS 220x120x8.8	220	120	8.8	1	54.08	42.5
SHS 250x150x10	250	150	10	1	72.57	57.0
SHS 250x150x12	250	150	12	1	84.06	66.0
SHS 250x150x12.5	250	150	12.5	1	87.04	68.3
SHS 250x150x7.1	250	150	7.1	3	53.05	41.6
SHS 250x150x8	250	150	8	2	59.24	46.5
SHS 250x150x8.8	250	150	8.8	1	64.64	50.7
SHS 260x140x10	260	140	10	1	72.57	57.0
SHS 260x140x7.1	260	140	7.1	3	53.05	41.6
SHS 260x140x8	260	140	8	2	59.24	46.5
SHS 260x140x8.8	260	140	8.8	1	64.64	50.7
SHS 260x180x10	260	180	10	1	80.57	63.2
SHS 260x180x12	260	180	12	1	93.66	73.5

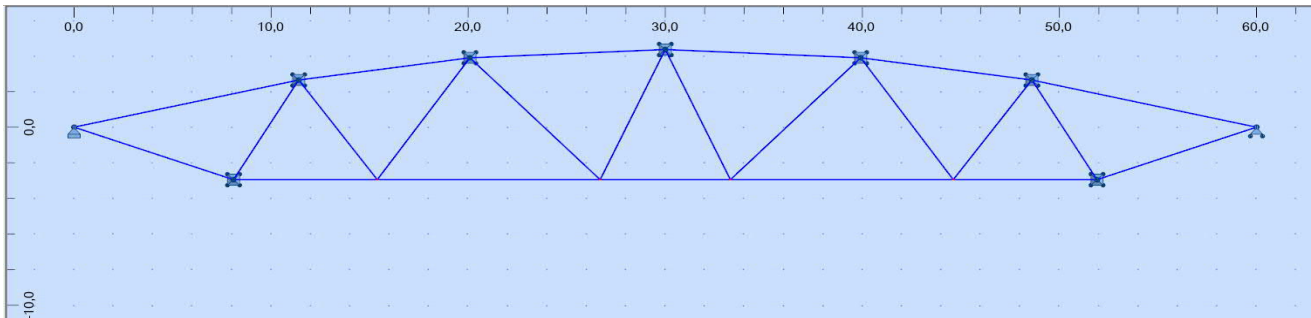
Poikkileikkaus	Korkeus [mm]	Leveys [mm]	Paksuus [mm]	PLL (S355)	Pinta-ala [cm ²]	Poikkileikkaus paino [kg/m]
SHS 260x180x7.1	260	180	7.1	3	58.73	46.1
SHS 260x180x8	260	180	8	2	65.64	51.5
SHS 260x180x8.8	260	180	8.8	1	71.68	56.3
SHS 260x260x7.1	260	260	7.1	3	70.09	55.0
SHS 260x260x8	260	260	8	2	78.44	61.6
SHS 260x260x8.8	260	260	8.8	1	85.76	67.3
SHS 300x150x10	300	150	10	2	82.57	64.8
SHS 300x150x8.8	300	150	8.8	3	73.44	57.7
SHS 300x200x10	300	200	10	2	92.57	72.7
SHS 300x200x12	300	200	12	1	108.06	84.8
SHS 300x200x12.5	300	200	12.5	1	112.04	88.0
SHS 300x200x8.8	300	200	8.8	3	82.24	64.6
SHS 300x300x10	300	300	10	2	112.57	88.4
SHS 300x300x12	300	300	12	1	132.06	103.7
SHS 300x300x12.5	300	300	12.5	1	137.04	107.6
SHS 300x300x16	300	300	16	1	170.77	134.1
SHS 300x300x8.8	300	300	8.8	3	99.84	78.4
SHS 350x350x10	350	350	10	3	132.57	104.1
SHS 350x350x12	350	350	12	1	156.06	122.5
SHS 350x350x16	350	350	16	1	202.77	159.2
SHS 400x200x12	400	200	12	2	132.06	103.7
SHS 400x200x12.5	400	200	12.5	2	137.04	107.6
SHS 400x200x16	400	200	16	1	170.77	134.1
SHS 400x400x12	400	400	12	2	180.06	141.3
SHS 400x400x16	400	400	16	1	241.36	189.5
SHS 400x400x20	400	400	20	1	286.83	225.2
SHS 450x250x16	450	250	16	1	202.77	159.2
SHS 500x300x16	500	300	16	2	234.77	184.3
SHS 500x300x20	500	300	20	1	286.83	225.2

LIITE B: OPTIMOIDUT K-RISTIKOT

K-ristikko 1, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	RH 500x300x20	S355	11.70	0.87
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x7.1	S355	8.30	0.72
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 140x140x6.3	S355	9.51	0.98
Alapaarre	QH 350x350x10	S355	11.31	0.90

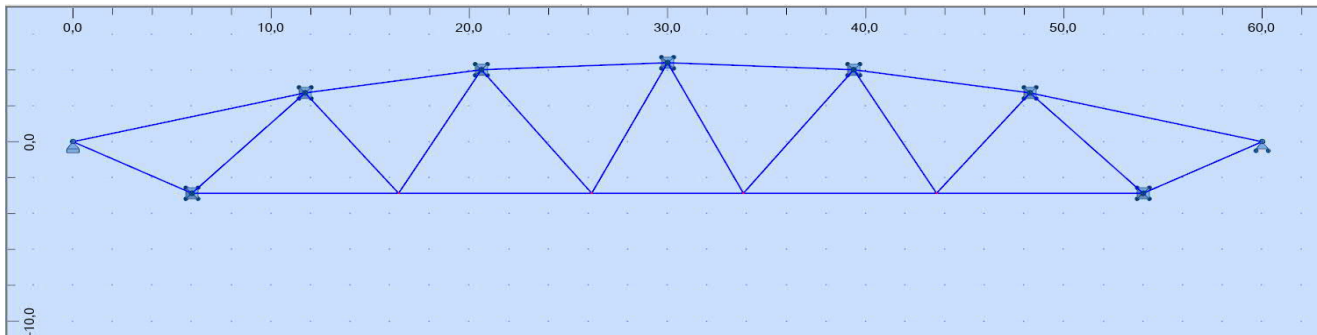
Materiaalikustannukset	18655.0
Liitos ja asennuskustannukset	25513.2
Suihkupuhalluskustannukset	72.7
Sahauksen kustannukset	864.0
Maalauksen kustannukset	957.7
Kokonaiskustannukset	46062.5
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	20549.4
Ristikkokorkeus	7307.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	130.6
Paino	24063.8



K-ristikko 2, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläparre	RH 500x300x16	S460	12.02	0.87
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 300x300x8.8	S355	8.05	0.74
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 220x120x6.3	S355	8.85	1.00
Alaparrre	RRHS 250x150x10	S690QL	10.43	0.85

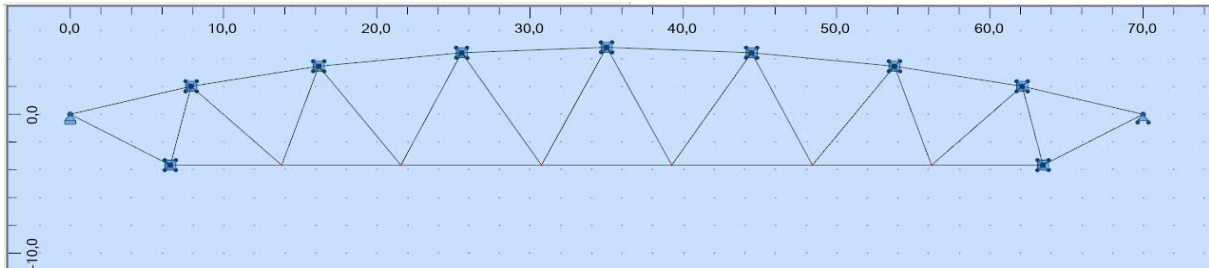
Materiaalikustannukset	17370.8
Liitos ja asennuskustannukset	31404.2
Suihkupuhalluskustannukset	73.7
Sahauksen kustannukset	963.4
Maalauksen kustannukset	873.2
Kokonaiskustannukset	50685.3
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	19281.1
Ristikkokorkeus	7273.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	198.3
Paino	19826.3



K-ristikko 1, 70 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S460	9.37	0.80
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x7.1	S355	8.91	0.86
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x180x7.1	S355	9.62	0.85
Alapaarre	RRHS 260x180x10	S690QL	9.17	0.90

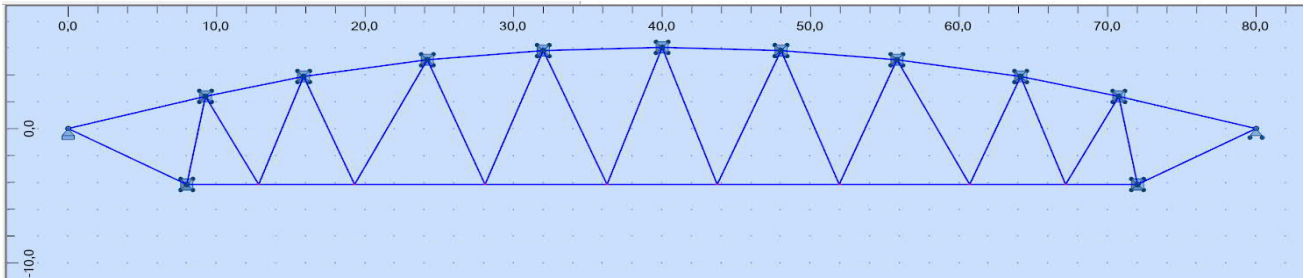
Materiaalikustannukset	23655.3
Liitos ja asennuskustannukset	42118.1
Suihkupuhalluskustannukset	94.4
Sahauksen kustannukset	1280.9
Maalauksen kustannukset	1120.4
Kokonaiskustannukset	68269.0
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	26150.9
Ristikkokorkeus	8482.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	233.0
Paino	27183.3



K-ristikko 1, 80 m, k-jako 10 m, sauvajako 5

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S460	9.55	0.92
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 300x300x8.8	S355	10.50	0.66
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x180x7.1	S355	10.86	0.88
Alapaarre	RRHS 260x180x12	S690QL	9.01	0.84

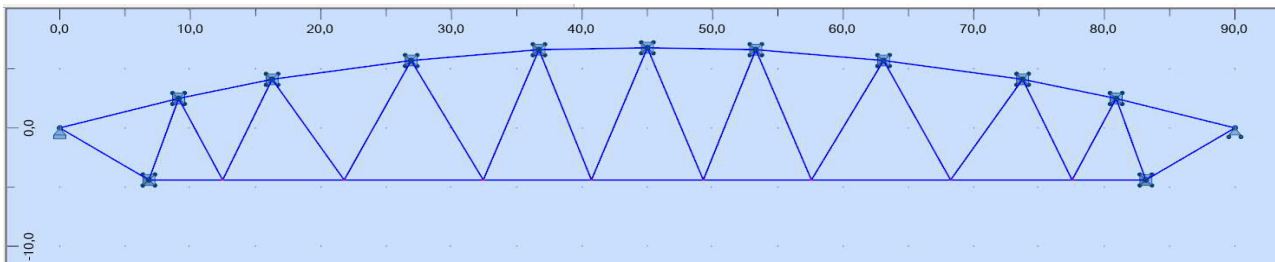
Materiaalikustannukset	28335.9
Liitos ja asennuskustannukset	52832.0
Suihkupuhalluskustannukset	120.6
Sahauksen kustannukset	1598.4
Maalauksen kustannukset	1461.7
Kokonaiskustannukset	84348.6
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	31516.6
Ristikkokorkeus	10210.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	263.1
Paino	32020.5



K-ristikko 1, 90 m, k-jako 10 m, sauvajako 5

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	10.77	0.92
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 300x300x8.8	S355	11.34	0.89
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x180x8	S355	11.98	0.91
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	10.65	0.85

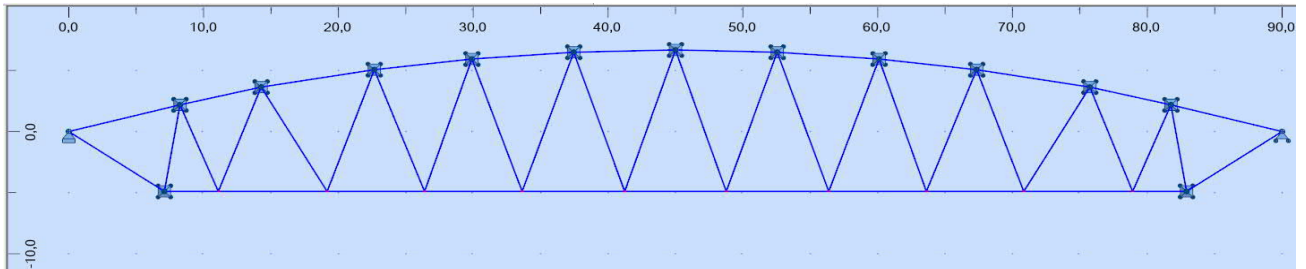
Materiaalikustannukset	39178.7
Liitos ja asennuskustannukset	56284.3
Suihkupuhalluskustannukset	134.2
Sahauksen kustannukset	1666.8
Maalauksen kustannukset	1669.5
Kokonaiskustannukset	98933.3
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	42649.1
Ristikkokorkeus	11187.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	300.0
Paino	41380.4



K-ristikko 2, 90 m, k-jako 10 m, sauvajako 6

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S690QL	8.53	0.72
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 300x300x8.8	S355	10.63	0.78
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	12.02	0.76
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	8.62	0.82

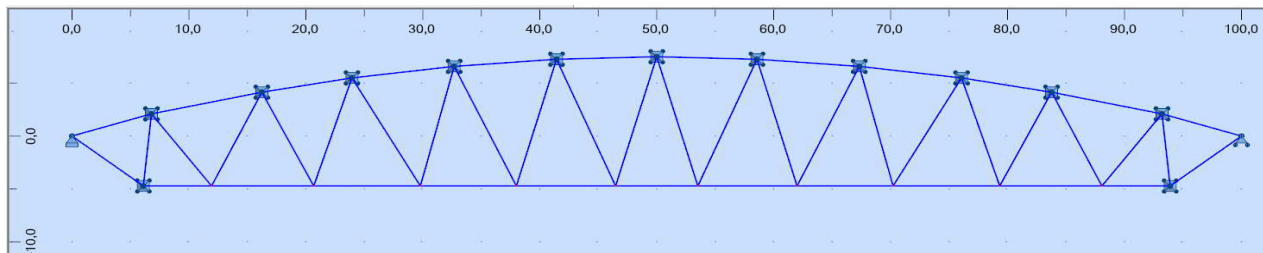
Materiaalikustannukset	38289.5
Liitos ja asennuskustannukset	67842.8
Suihkupuhalluskustannukset	149.7
Sahauksen kustannukset	1998.0
Maalauksen kustannukset	1911.1
Kokonaiskustannukset	110191.1
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	42348.2
Ristikkokorkeus	11578.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	296.0
Paino	40414.4



K-ristikko 1, 100 m, k-jako 10 m, sauvajako 6

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	9.66	0.83
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	11.77	0.68
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	13.00	0.85
Alapaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	9.12	0.79

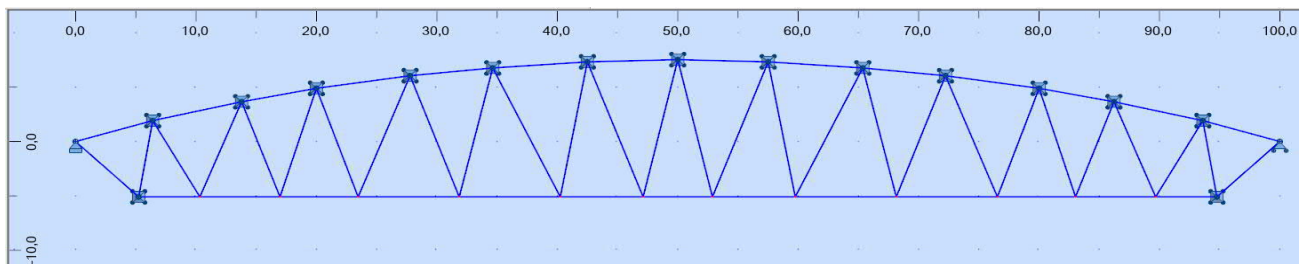
Materiaalikustannukset	49980.6
Liitos ja asennuskustannukset	67842.8
Suihkupuhalluskustannukset	161.4
Sahauksen kustannukset	1998.0
Maalauksen kustannukset	2234.1
Kokonaiskustannukset	122216.9
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	54374.1
Ristikkokorkeus	12216.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	332.7
Paino	53675.6



K-ristikko 2, 100 m, k-jako 10 m, sauvajako 7

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S690QL	7.88	0.85
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	11.94	0.71
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	13.24	0.81
Alapaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	8.39	0.77

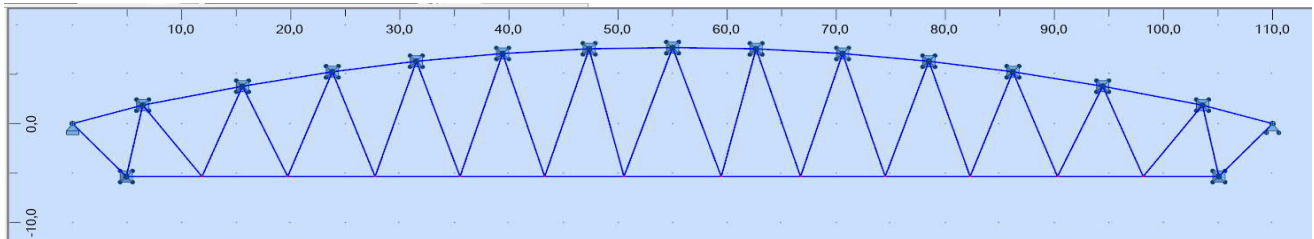
Materiaalikustannukset	49024.7
Liitos ja asennuskustannukset	79401.4
Suihkupuhalluskustannukset	178.2
Sahauksen kustannukset	2329.2
Maalauksen kustannukset	2446.5
Kokonaiskustannukset	133380.0
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	53978.6
Ristikkokorkeus	12610.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	333.3
Paino	52655.5



K-ristikko 1, 110 m, k-jako 10 m, sauvajako 7

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	9.34	0.80
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x12	S355	12.27	0.72
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x8	S355	13.79	0.87
Alapaarre	QH 300x300x16	S690QL	8.92	0.67

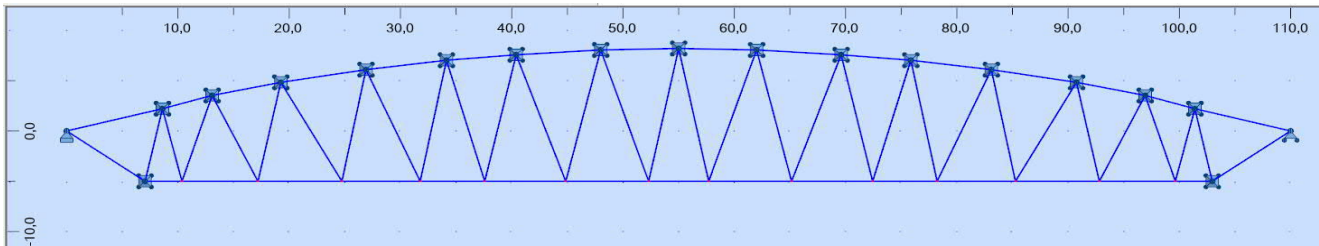
Materiaalikustannukset	63847.7
Liitos ja asennuskustannukset	79401.4
Suihkupuhalluskustannukset	191.2
Sahauksen kustannukset	2329.2
Maalauksen kustannukset	2631.5
Kokonaiskustannukset	148401.1
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	68999.7
Ristikkokorkeus	13051.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	366.0
Paino	70110.6



K-ristikko 2, 110 m, k-jako 10 m, sauvajako 8

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	8.89	0.76
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	12.12	0.77
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x8.8	S355	13.75	0.83
Alapaarre	QH 300x300x16	S690QL	8.64	0.67

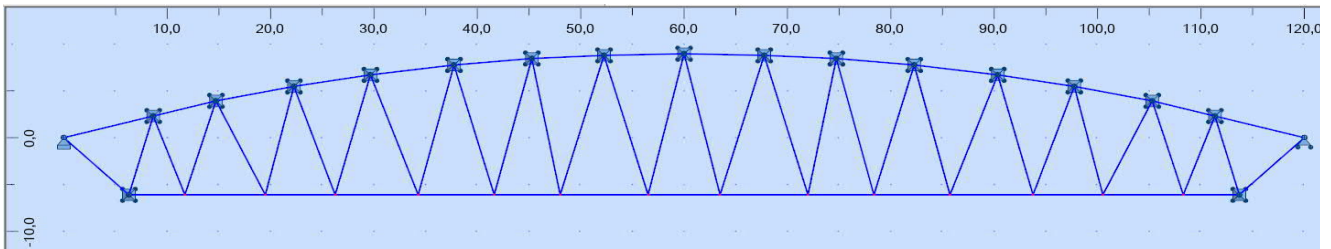
Materiaalikustannukset	64771.6
Liitos ja asennuskustannukset	90959.9
Suihkupuhalluskustannukset	204.7
Sahauksen kustannukset	2660.4
Maalauksen kustannukset	2799.3
Kokonaiskustannukset	161396.0
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	70436.1
Ristikkokorkeus	13200.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	365.9
Paino	71062.0



K-ristikko 1, 120 m, k-jako 10 m, sauvajako 8

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	RH 500x300x20	S690QL	8.95	0.94
Uumasauvat lähellä tukea	QH 400x400x12	S355	13.61	0.71
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 300x300x8.8	S355	15.48	0.84
Alapaarre	QH 300x300x16	S690QL	8.76	0.71

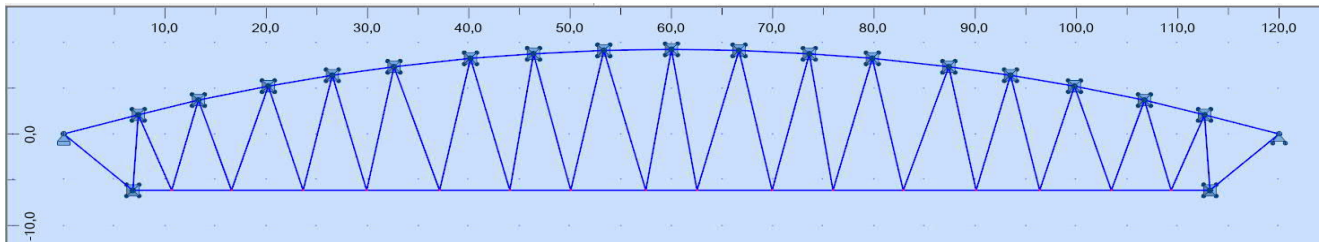
Materiaalikustannukset	79496.1
Liitos ja asennuskustannukset	90959.9
Suihkupuhalluskustannukset	231.2
Sahauksen kustannukset	2660.4
Maalauksen kustannukset	3426.0
Kokonaiskustannukset	176773.7
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	85813.7
Ristikkokorkeus	15059.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	399.6
Paino	88880.3



K-ristikko 2, 120 m, k-jako 10 m, sauvajako 9

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	7.65	0.72
Uumasauvat lähellä tukea	QH 400x400x12	S355	11.94	0.64
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 300x300x8.8	S355	15.83	0.74
Alapaarre	QH 300x300x16	S690QL	9.19	0.69

Materiaalikustannukset	84023.5
Liitos ja asennuskustannukset	102518.5
Suihkupuhalluskustannukset	251.1
Sahauksen kustannukset	2991.6
Maalauksen kustannukset	3713.7
Kokonaiskustannukset	193498.3
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	90979.8
Ristikkokorkeus	15387.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	392.2
Paino	94624.4

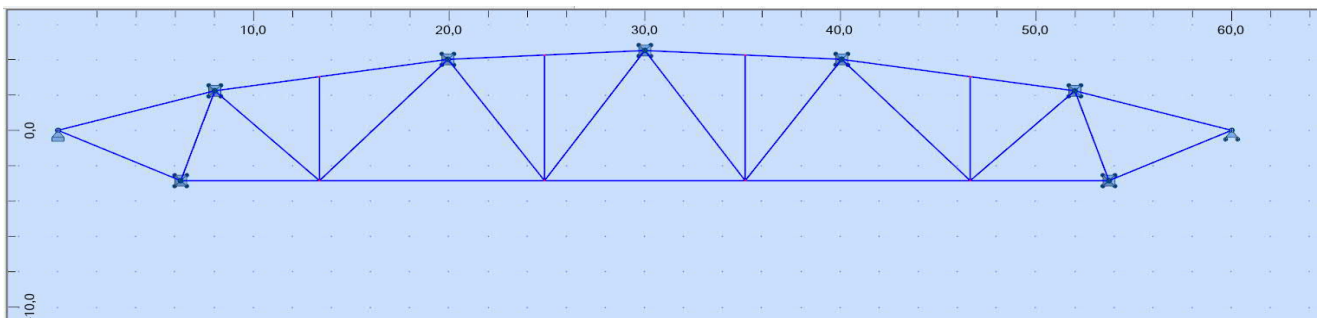


LIITE C: OPTIMOIDUT KT-RISTIKOT

KT-ristikko 1, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x12	S355	8.32	0.96
Vertikaalit	RRHS 140x140x5.6	S355	7.11	0.82
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x180x8	S355	9.50	0.86
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 140x140x5	S355	8.97	0.93
Alapaarre	QH 350x350x10	S355	11.50	0.87

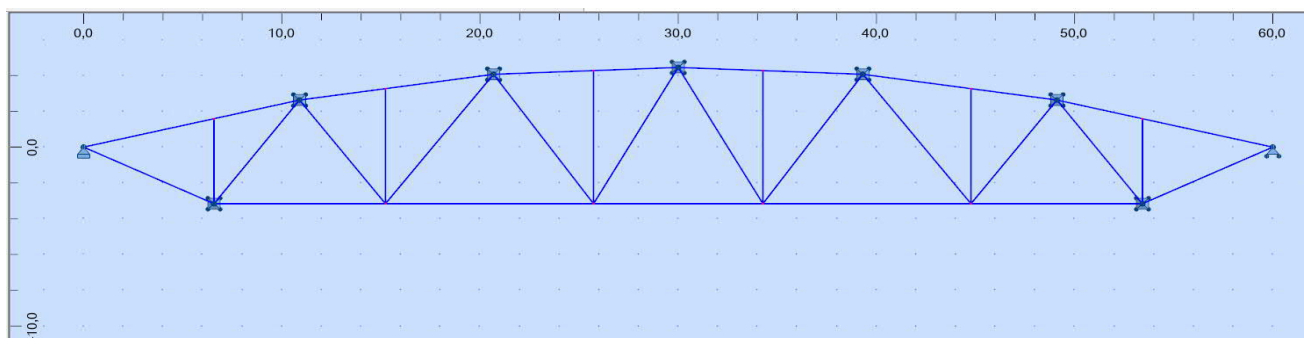
Materiaalikustannukset	14873.3
Liitos ja asennuskustannukset	28898.1
Suihkupuhalluskustannukset	82.6
Sahauksen kustannukset	1116.0
Maalauksen kustannukset	992.2
Kokonaiskustannukset	45962.2
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	17064.1
Ristikkokorkeus	7363.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	145.7
Paino	18944.9



KT-ristikko 2, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	10.56	0.85
Vertikaalit	RRHS 220x120x6	S355	7.44	0.88
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x7.1	S355	9.06	0.67
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 140x140x4	S355	8.82	1.00
Alapaarre	RRHS 260x180x10	S690QL	10.50	0.72

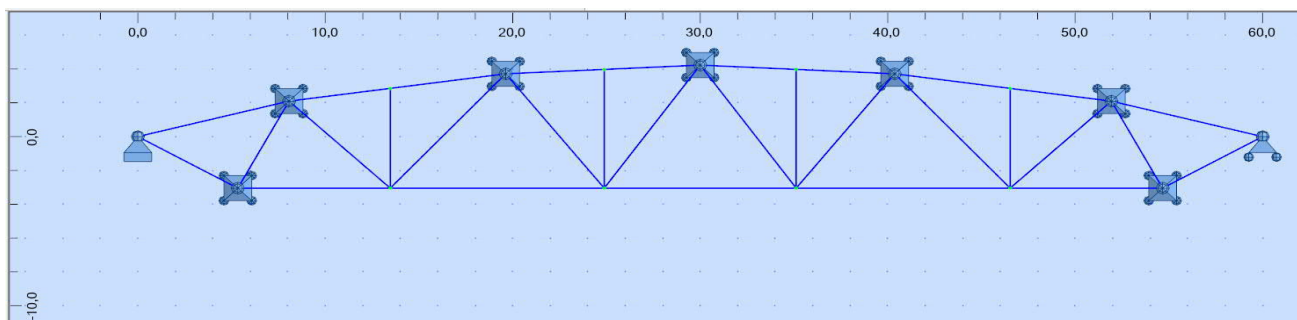
Materiaalikustannukset	14041.6
Liitos ja asennuskustannukset	38574.7
Suihkupuhalluskustannukset	87.7
Sahauksen kustannukset	1465.2
Maalauksen kustannukset	855.2
Kokonaiskustannukset	55024.5
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	16449.7
Ristikkokorkeus	7615.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	200.0
Paino	14490.8



KT-ristikko 3, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 350x350x12	S460	11.67	0.99
Vertikaalit	RRHS 140x140x5.6	S355	7.02	0.92
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x7.1	S355	9.14	0.77
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 140x140x4	S355	8.90	1.05
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S460	11.41	0.84

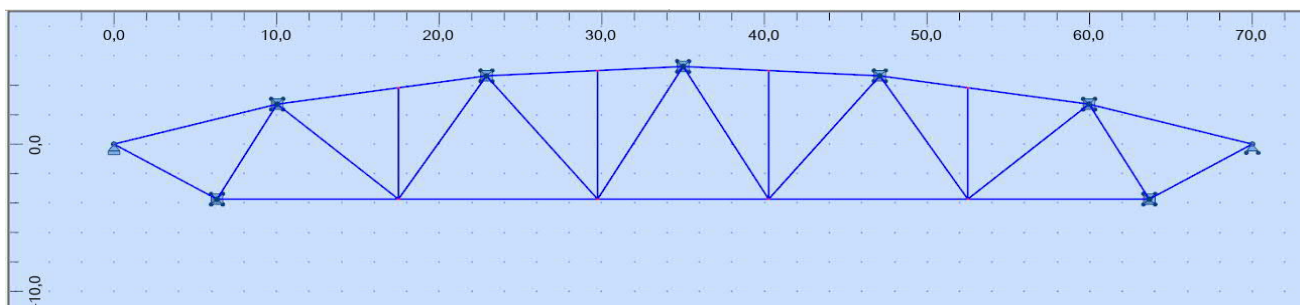
Materiaalikustannukset	14172.6
Liitos ja asennuskustannukset	32076.9
Suihkupuhalluskustannukset	82.8
Sahauksen kustannukset	1183.3
Maalauksen kustannukset	880.1
Kokonaiskustannukset	48395.7
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	16318.8
Ristikkokorkeus	7276.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	174.5
Paino	16553.8



KT-ristikko 1, 70 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 350x350x16	S690QL	10.40	0.91
Vertikaalit	RRHS 250x150x7.1	S355	8.74	0.84
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 300x300x8.8	S355	9.97	0.70
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 140x140x5	S355	10.81	0.86
Alapaarre	RRHS 260x180x10	S690QL	12.25	0.83

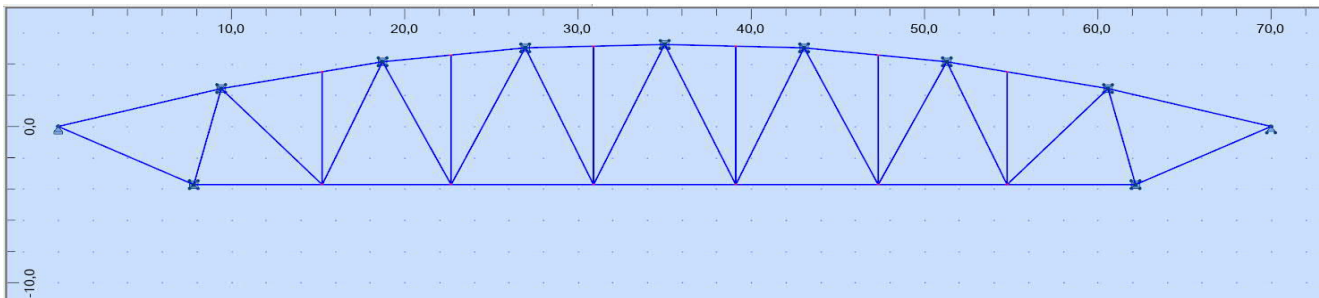
Materiaalikustannukset	21710.7
Liitos ja asennuskustannukset	37567.6
Suihkupuhalluskustannukset	99.0
Sahauksen kustannukset	1299.6
Maalauksen kustannukset	1076.8
Kokonaiskustannukset	61753.6
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	24186.0
Ristikkokorkeus	9018.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	232.0
Paino	22841.0



KT-ristikko 2, 70 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 350x350x16	S690QL	9.72	0.85
Vertikaalit	RRHS 140x140x6.3	S355	8.86	0.97
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x8	S355	8.80	0.75
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 250x150x7.1	S355	9.86	0.87
Alapaarre	RRHS 260x180x10	S690QL	8.66	0.84

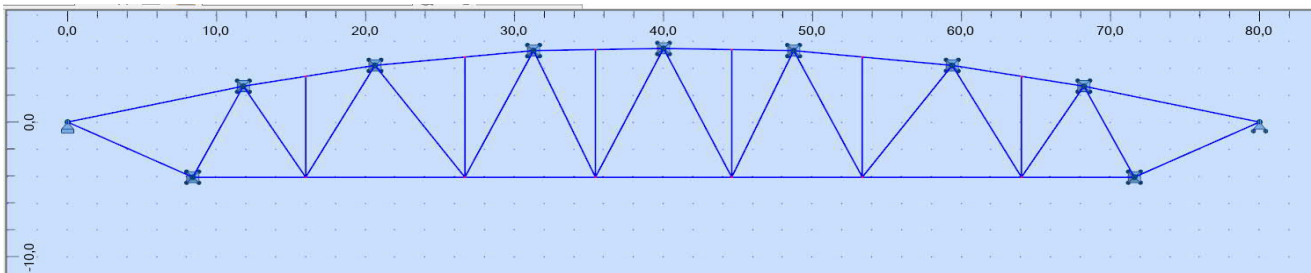
Materiaalikustannukset	22582.7
Liitos ja asennuskustannukset	50133.3
Suihkupuhalluskustannukset	114.1
Sahauksen kustannukset	1796.4
Maalauksen kustannukset	1174.7
Kokonaiskustannukset	75801.2
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	25667.9
Ristikkokorkeus	8968.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	232.0
Paino	23936.5



KT-ristikko 1, 80 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	12.09	0.81
Vertikaalit	RRHS 250x150x7.1	S355	9.49	0.78
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	10.27	0.53
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 250x150x7.1	S355	10.61	0.91
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	10.68	0.79

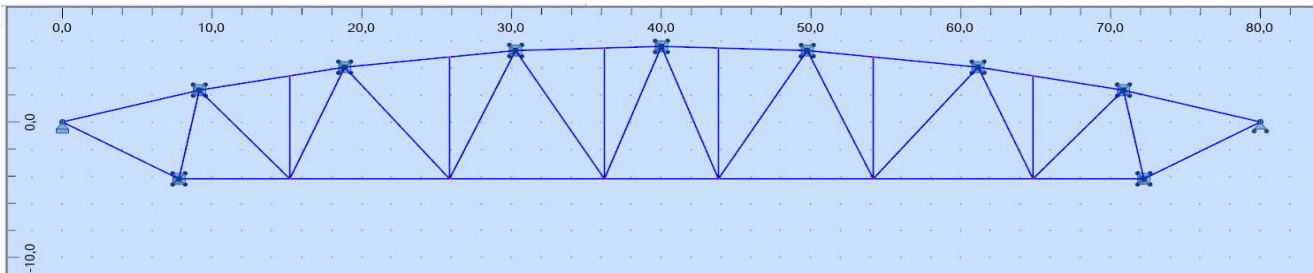
Materiaalikustannukset	35885.0
Liitos ja asennuskustannukset	50133.3
Suihkupuhalluskustannukset	126.4
Sahauksen kustannukset	1796.4
Maalauksen kustannukset	1555.8
Kokonaiskustannukset	89496.8
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	39363.5
Ristikkokorkeus	9573.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	256.1
Paino	38275.3



KT-ristikko 2, 80 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 350x350x16	S690QL	9.44	0.85
Vertikaalit	RRHS 250x150x7.1	S355	9.67	0.85
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 300x300x8.8	S355	10.82	0.67
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 250x150x7.1	S355	11.19	1.00
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	10.66	0.76

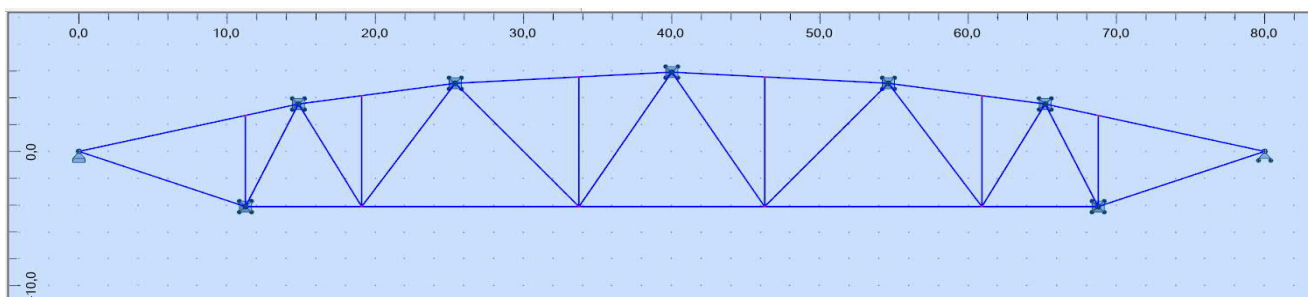
Materiaalikustannukset	29000.8
Liitos ja asennuskustannukset	50133.3
Suihkupuhalluskustannukset	127.4
Sahauksen kustannukset	1796.4
Maalauksen kustannukset	1448.1
Kokonaiskustannukset	82506.1
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	32372.8
Ristikkokorkeus	9790.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	261.0
Paino	30813.7



KT-ristikko 1, 80 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	11.55	0.85
Vertikaalit	RRHS 260x180x7.1	S355	9.67	0.82
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x7.1	S355	11.16	0.78
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 140x140x5.6	S355	12.42	0.92
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	14.66	0.74

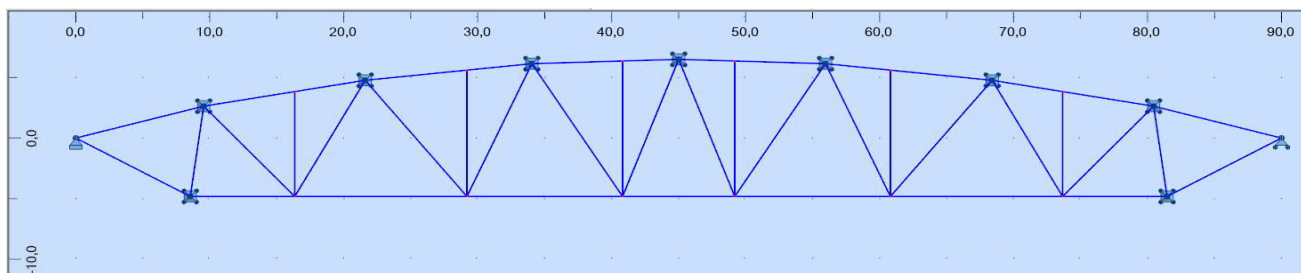
Materiaalikustannukset	31394.2
Liitos ja asennuskustannukset	38574.7
Suihkupuhalluskustannukset	115.2
Sahauksen kustannukset	1465.2
Maalauksen kustannukset	1319.5
Kokonaiskustannukset	72868.8
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	34294.0
Ristikkokorkeus	10032.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	262.1
Paino	32525.5



KT-ristikko 1, 90 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S690QL	12.52	0.72
Vertikaalit	RRHS 260x180x7.1	S355	11.18	0.79
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 300x300x8.8	S355	12.23	0.82
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x180x7.1	S355	12.88	0.95
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	12.86	0.83

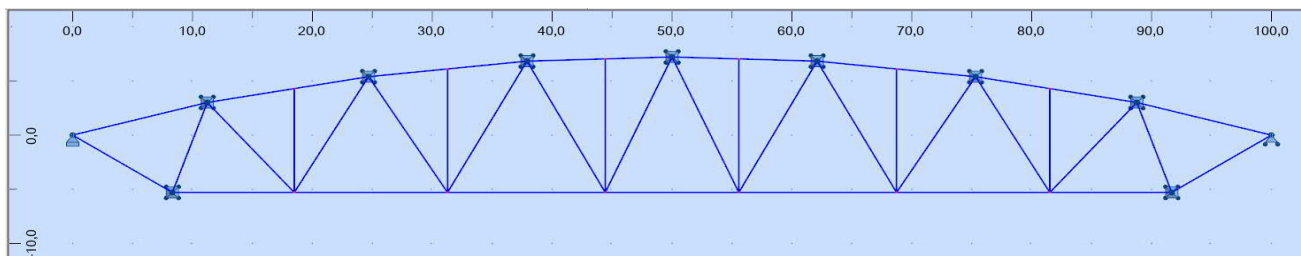
Materiaalikustannukset	36211.3
Liitos ja asennuskustannukset	50133.3
Suihkupuhalluskustannukset	145.1
Sahauksen kustannukset	1796.4
Maalauksen kustannukset	1759.3
Kokonaiskustannukset	90045.3
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	39912.0
Ristikkokorkeus	11314.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	299.8
Paino	37829.9



KT-ristikko 1, 100 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S690QL	13.66	0.95
Vertikaalit	RRHS 260x180x7.1	S355	12.33	0.96
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	12.55	0.74
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	13.81	0.83
Alapaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	13.16	0.77

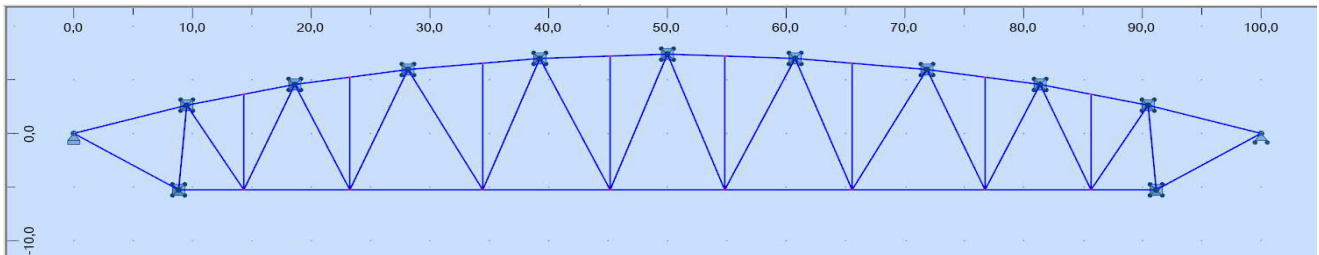
Materiaalikustannukset	44629.6
Liitos ja asennuskustannukset	50133.3
Suihkupuhalluskustannukset	160.8
Sahauksen kustannukset	1796.4
Maalauksen kustannukset	2150.3
Kokonaiskustannukset	98870.5
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	48737.2
Ristikkokorkeus	12506.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	333.2
Paino	47114.5



KT-ristikko 2 , 100 m, k-jako 10 m, sauvajako 5

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S690QL	11.16	0.74
Vertikaalit	RRHS 260x180x7.1	S355	12.47	0.85
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	12.24	0.64
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	13.61	0.66
Alapaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	11.19	0.76

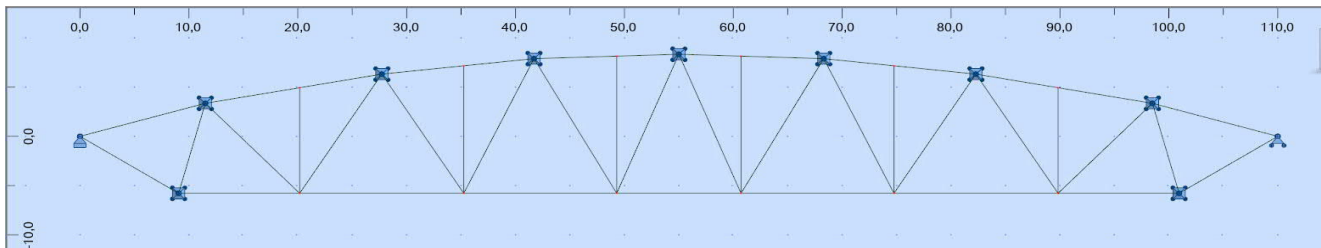
Materiaalikustannukset	47474.2
Liitos ja asennuskustannukset	62699.1
Suihkupuhalluskustannukset	181.5
Sahauksen kustannukset	2293.2
Maalauksen kustannukset	2384.0
Kokonaiskustannukset	115032.0
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	52332.9
Ristikkokorkeus	12653.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	332.8
Paino	50696.6



KT-ristikko 1 , 110 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	16.48	0.89
Vertikaalit	RRHS 260x260x7.1	S355	13.93	0.66
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x12	S355	14.27	0.72
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	15.65	0.95
Alapaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	15.07	0.83

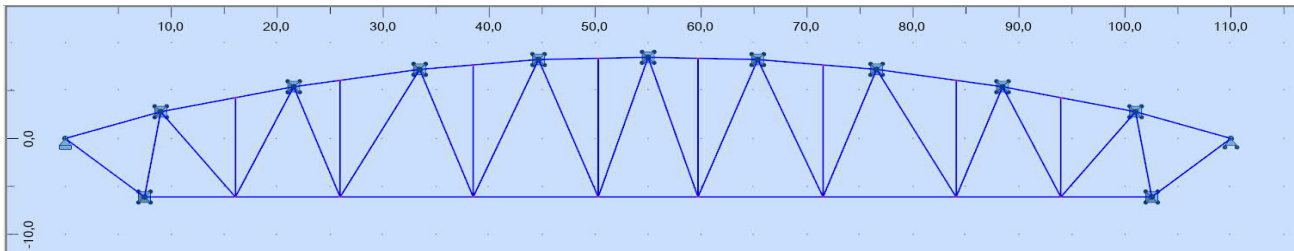
Materiaalikustannukset	55656.2
Liitos ja asennuskustannukset	50133.3
Suihkupuhalluskustannukset	179.1
Sahauksen kustannukset	1796.4
Maalauksen kustannukset	2439.5
Kokonaiskustannukset	110204.5
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	60071.2
Ristikkokorkeus	14125.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	364.8
Paino	60043.4



KT-ristikko 2 , 110 m, k-jako 10 m, sauvajako 5

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre Vertikaalit	QH 400x400x16	S690QL	12.82	0.71
	RRHS 260x180x7.1	S355	14.47	0.97
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	15.28	0.86
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	15.61	0.99
Alapaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	12.56	0.80

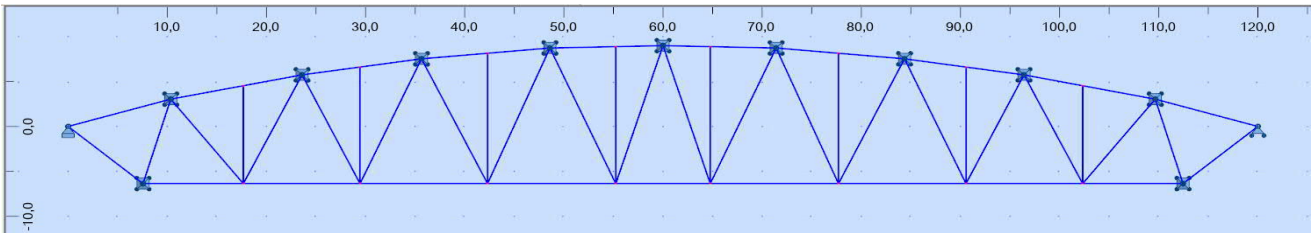
Materiaalikustannukset	53539.5
Liitos ja asennuskustannukset	62699.1
Suihkupuhalluskustannukset	207.0
Sahauksen kustannukset	2293.2
Maalauksen kustannukset	2714.5
Kokonaiskustannukset	121453.3
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	58754.2
Ristikkokorkeus	14573.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	365.4
Paino	57384.9



KT-ristikko 1, 120 m, k-jako 10 m, sauvajako 5

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S690QL	13.52	0.88
Vertikaalit	RRHS 260x260x7.1	S355	15.24	0.62
Uumasauvat lähellä tukea	QH 400x400x12	S355	15.21	0.70
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x8	S355	16.48	0.93
Alapaarre	QH 300x300x16	S690QL	12.93	0.68

Materiaalikustannukset	66869.2
Liitos ja asennuskustannukset	62699.1
Suihkupuhalluskustannukset	221.4
Sahauksen kustannukset	2293.2
Maalauksen kustannukset	3072.7
Kokonaiskustannukset	135155.5
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	72456.5
Ristikkokorkeus	15351.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	394.6
Paino	73104.7

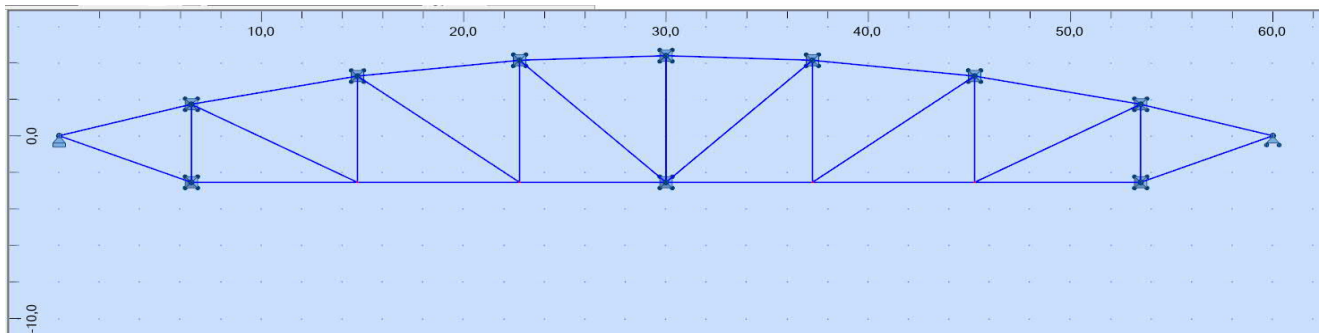


LIITE D: OPTIMOIDUT N-RISTIKOT

N-ristikko 1, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	RH 500x300x16	S355	8.36	0.87
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x180x7.1	S355	9.90	0.73
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 140x140x5	S355	9.90	0.87
Alapaarre	QH 350x350x10	S355	8.21	0.91

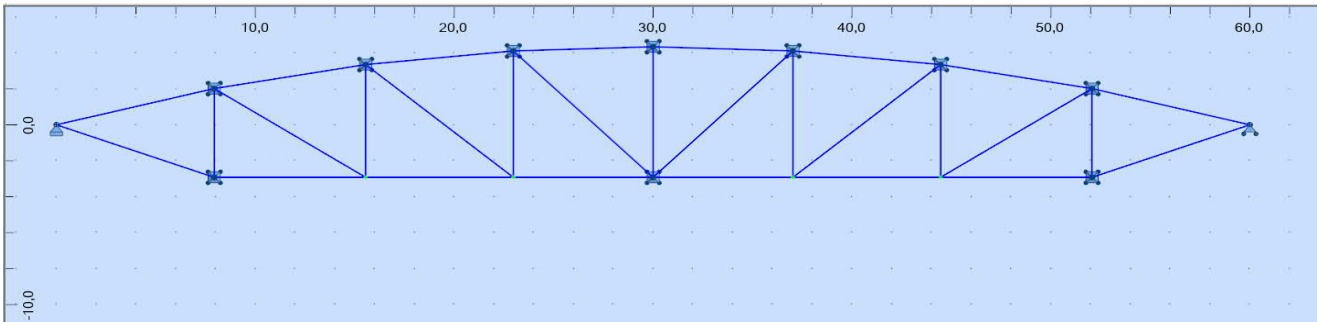
Materiaalikustannukset	16663.5
Liitos ja asennuskustannukset	32181.6
Suihkupuhalluskustannukset	80.0
Sahauksen kustannukset	1080.0
Maalauksen kustannukset	980.7
Kokonaiskustannukset	50985.7
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	18804.2
Ristikkokorkeus	6934.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Robot)	147.4
Paino	21339.6



N-ristikko 2, 60 m, k-jako 10 m, sauvajako 3

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 350x350x16	S460	8.19	0.95
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x180x7.1	S355	9.07	0.79
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 140x140x5.6	S355	9.94	0.92
Alapaarre	RRHS 250x150x10	S690QL	8.46	0.83

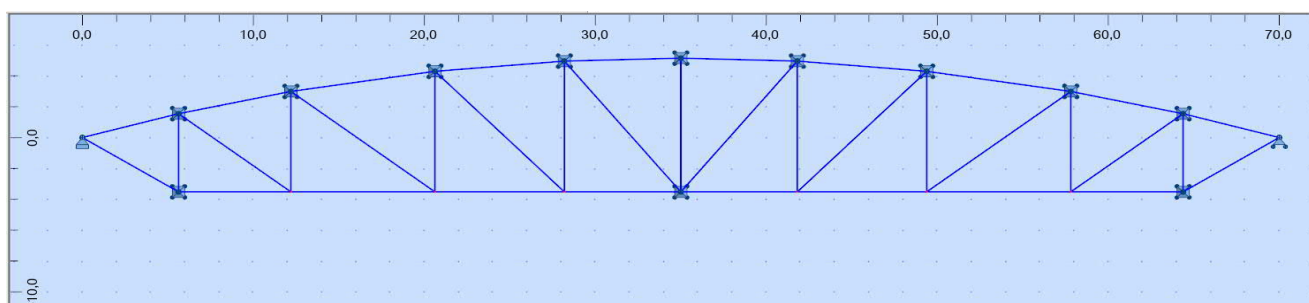
Materiaalikustannukset	15004.45
Liitos ja asennuskustannukset	39228.46
Suihkupuhalluskustannukset	80.97
Sahauksen kustannukset	1198.08
Maalauksen kustannukset	800.08
Kokonaiskustannukset	56312.04
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	17083.58
Ristikkokorkeus	7262.00
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	195.10
Paino	17041.03



N-ristikko 1, 70 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 350x350x16	S690QL	8.53	0.91
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x7.1	S355	10.65	0.80
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 250x150x7.1	S355	10.87	1.01
Alapaarre	RRHS 260x180x10	S690QL	8.42	0.86

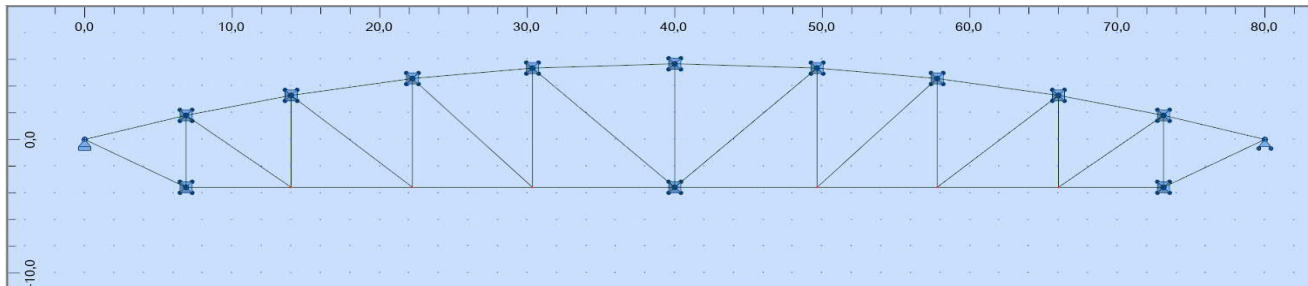
Materiaalikustannukset	22082.4
Liitos ja asennuskustannukset	53394.6
Suihkupuhalluskustannukset	104.8
Sahauksen kustannukset	1584.0
Maalauksen kustannukset	1145.1
Kokonaiskustannukset	78311.0
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	24916.3
Ristikkokorkeus	8664.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Robot)	228.0
Paino	23310.5



N-ristikko 1, 80 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	9.65	0.84
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x8	S355	10.72	0.81
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x180x7.1	S355	13.15	0.88
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	9.65	0.79

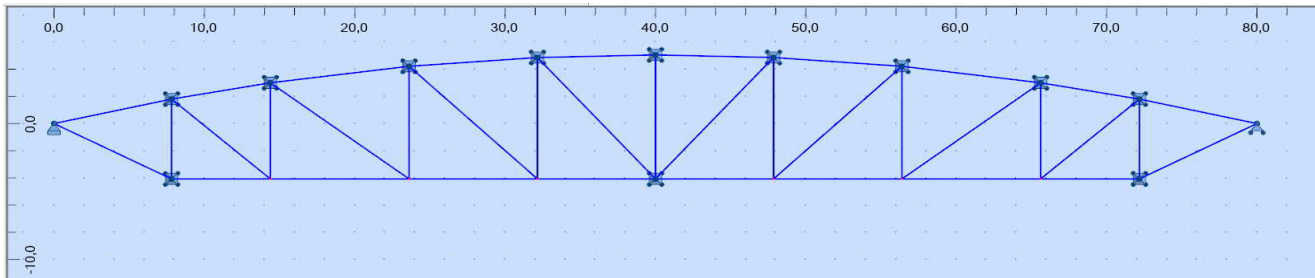
Materiaalikustannukset	32862.0
Liitos ja asennuskustannukset	53394.6
Suihkupuhalluskustannukset	116.0
Sahauksen kustannukset	1584.0
Maalauksen kustannukset	1396.3
Kokonaiskustannukset	89352.8
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	35958.2
Ristikkokorkeus	9255.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Robot)	262.8
Paino	34351.8



N-ristikko 2, 80 m, k-jako 10 m, sauvajako 4, max 12 m

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	9.30	0.73
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x8	S355	11.62	0.88
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x180x8	S355	11.89	0.88
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	9.22	0.81

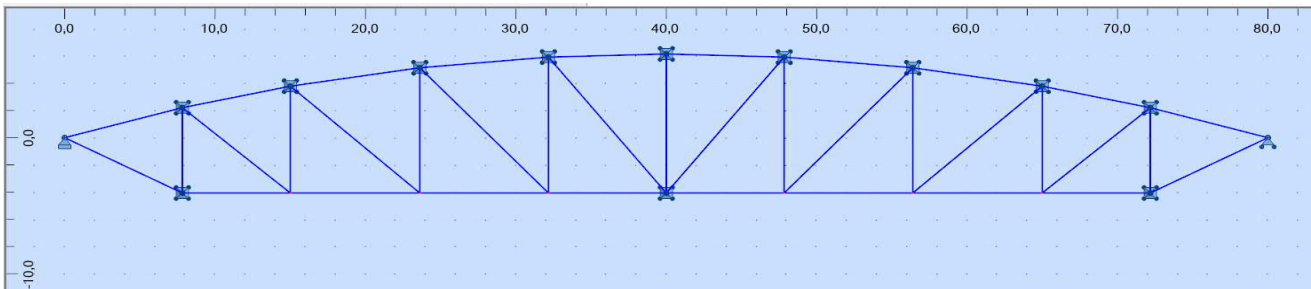
Materiaalikustannukset	33276.6
Liitos ja asennuskustannukset	53394.6
Suihkupuhalluskustannukset	116.4
Sahauksen kustannukset	1584.0
Maalauksen kustannukset	1402.1
Kokonaiskustannukset	89773.8
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	36379.2
Ristikkokorkeus	9124.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	266.7
Paino	34875.8



N-ristikko 3, 80 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S690QL	8.71	0.78
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x7.1	S355	11.65	0.96
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x180x7.1	S355	12.70	1.00
Alapaarre	RRHS 250x150x12.5	S690QL	8.82	0.89

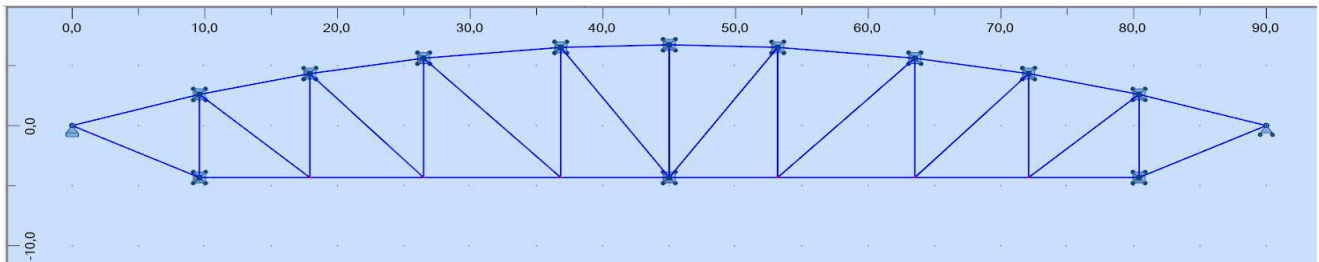
Materiaalikustannukset	28665.5
Liitos ja asennuskustannukset	53394.6
Suihkupuhalluskustannukset	120.9
Sahauksen kustannukset	1584.0
Maalauksen kustannukset	1384.4
Kokonaiskustannukset	85149.4
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	31754.7
Ristikkokorkeus	10219.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Karamba)	266.2
Paino	29633.4



N-ristikko 1, 90 m, k-jako 10 m, sauvajako 4

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	10.38	0.94
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 260x260x8.8	S355	12.18	0.92
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	14.33	0.63
Alapaarre	RRHS 300x200x12	S690QL	10.52	0.85

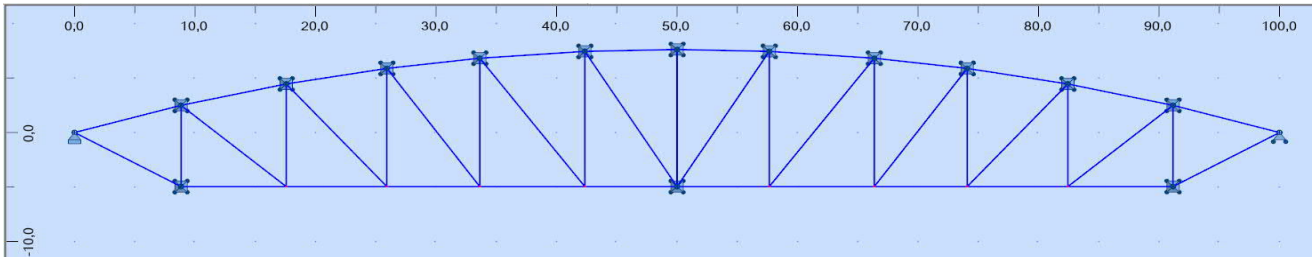
Materiaalikustannukset	38510.3
Liitos ja asennuskustannukset	53394.6
Suihkupuhalluskustannukset	133.8
Sahauksen kustannukset	1584.0
Maalauksen kustannukset	1667.6
Kokonaiskustannukset	95290.3
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	41895.7
Ristikkokorkeus	11048.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Robot)	294.6
Paino	40575.3



N-ristikko 1, 100 m, k-jako 10 m, sauvajako 5

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x16	S690QL	9.18	0.97
Uumasauvat lähellä tukea	RRHS 300x300x10	S355	13.30	0.81
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x7.1	S355	14.65	0.67
Alapaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	10.13	0.76

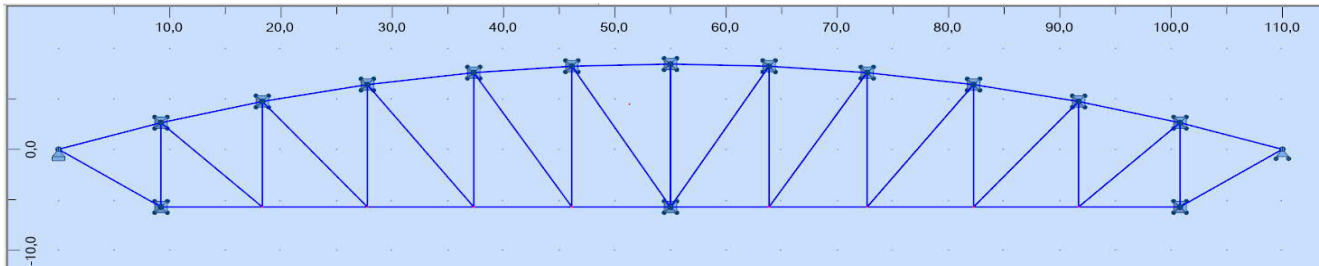
Materiaalikustannukset	45165.8
Liitos ja asennuskustannukset	64953.2
Suihkupuhalluskustannukset	164.7
Sahauksen kustannukset	1915.2
Maalauksen kustannukset	2181.6
Kokonaiskustannukset	114380.4
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	49427.3
Ristikkokorkeus	12575.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Robot)	328.0
Paino	47662.5



N-ristikko 1, 110 m, k-jako 10 m, sauvajako 5

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	9.63	0.98
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	15.46	0.75
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 260x260x8	S355	16.54	0.84
Alapaarre	RRHS 300x300x12	S690QL	10.84	0.82

Materiaalikustannukset	56573.3
Liitos ja asennuskustannukset	64953.2
Suihkupuhalluskustannukset	183.2
Sahauksen kustannukset	1915.2
Maalauksen kustannukset	2524.5
Kokonaiskustannukset	126149.4
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	61196.2
Ristikkokorkeus	14182.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Robot)	352.1
Paino	61042.5



N-ristikko 1, 120 m, k-jako 10 m, sauvajako 6

Ristikko-osa:	Poikkileikkaus:	Materiaali:	Suurin sauvapituus [m]:	Suurin käyttöaste:
Yläpaarre	QH 400x400x20	S690QL	9.34	0.97
Uumasauvat lähellä tukea	QH 350x350x10	S355	15.01	0.87
Uumasauvat lähellä harjaa	RRHS 300x300x8.8	S355	17.03	0.77
Alapaarre	QH 300x300x16	S690QL	10.66	0.69

Materiaalikustannukset	70581.6
Liitos ja asennuskustannukset	76511.7
Suihkupuhalluskustannukset	214.1
Sahauksen kustannukset	2246.4
Maalauksen kustannukset	3049.0
Kokonaiskustannukset	152602.8
Kokonaiskustannukset ilman liitoksia	76091.0
Ristikkokorkeus	15160.0
Taipuma käyttörajayhdistelmässä (Robot)	373.4
Paino	77375.8

