

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri, rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Rakennesuunnittelu

2022

Joonas Paasioksa

TERÄSRISTIKON PARAMETRINEN SUUNNITTELU

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Insinööri, rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2022 | 44 sivua, 5 liitesivua

Joonas Paasioksa

Teräsristikon parametrinen suunnittelu

Työn tavoitteena oli rakentaa parametrinen työkalu teräsristikon suunnittelun avuksi. Työssä haluttiin myös selvittää, miten parametrinen suunnittelumenetelmä soveltuu rakennesuunnitteluun sekä, mitä hyötyjä ja haittoja parametrisella suunnittelumenetelmällä on verrattuna tavanomaiseen suunnittelumenetelmään.

Työ koostuu kirjallisuustarkastelusta, käytännön työn toteutusosioista sekä laskentatulosten vertailusta. Kirjallisuustarkastelussa selvitettiin parametrinen suunnittelumenetelmän ominaisuuksia ja periaatteita sekä perehdyttiin tarkemmin Grasshopper- ja Rhino 7 -ohjelmistoihin. Kirjallisuustarkastelussa perehdyttiin myös teräsristikon suunnitteluprosessiin. Käytännön työn toteutusosiossa esitetään, miten parametrinen malli on rakennettu ja sen toimintaperiaatteet. Laskentatulosten vertailuosiossa vertailtiin parametrinen laskennan tuloksia tavanomaisesti tehtyyn FEM-laskentaan.

Työssä havaittiin, että parametrinen suunnittelumenetelmä soveltuu hyvin teräsristikoiden suunnitteluun ja sen avulla voidaan nopeuttaa teräsristikoiden suunnitteluprosessia sekä parantaa etenkin mallinnuksen tarkkuutta. Parametrinen prosessin heikkoutena havaittiin parametrinen mallin rakentamiseen kuluva aika. Parametrinen suunnittelumenetelmän hyödyt tulevat parhaiten esiin silloin, kun sitä käytetään samaan prosessiin pohjautuvien suunnitelmien toteutuksessa.

Asiasanat:

parametrinen suunnittelu, algoritmiavusteinen suunnittelu, parametrinen mallintaminen, teräsristikon suunnittelu

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Construction and Civil Engineering

2022 | 44 pages, 5 appendix pages

Joonas Paasioksa

Parametric design of steel truss structures

The goal in this study was to build a parametric tool to help the design process of steel truss structures. It was also studied how the parametric design method can be applied to structural design and what the pros and cons of the method are compared to traditional structural design.

The study consists of literary review, building the parametric model and comparing structural calculation results. The literary review section was conducted to determine the characteristics of parametric design. In the literary review section the design process of truss structures was also examined. The practical implementation section shows how the parametric model was built and how it works. In the last section the calculation results of the parametric model were compared to a traditional FEM calculation.

This study shows that the parametric design method is a good method to use when designing truss structures. The parametric design method can enhance the design process of truss structures and make the structural model more accurate. The greatest drawback with the parametric design method is the amount of time it takes to build the parametric model. The benefits of the parametric design method are most pronounced when the method is used in designs that are based on the same process.

Keywords:

parametric design, algorithm aided design, parametric modeling, design of truss structures

Sisältö

Käytetyt lyhenteet ja sanasto	5
1 Johdanto	6
2 Parametrinen suunnittelu	8
2.1 Algoritmit	8
2.2 Datatyypit ja muuttujat	9
2.3 Parametrisen suunnittelumenetelmän käyttö rakennesuunnittelussa	10
3 Rhino 7 ja Grasshopper	13
4 Teräsristikot	16
4.1 Ristikön muoto ja korkeus	17
4.2 Paarresauvojen valinta	18
4.3 Uumasauvojen valinta	19
5 Työn toteutus	23
5.1 Teräsristikön parametrinen suunnittelu	23
5.2 Ristikön mitoitus	24
5.3 Mitoitetun ristikon siirto 3D-mallinnusohjelmaan	25
6 Laskentatulosten vertailu	28
6.1 Mitoitettavan ristikon lähtötiedot	29
6.2 Tulosten vertailu	30
6.3 Työkalun jatkokehitys laskentavertailun perusteella	34
7 Johtopäätökset	36
Lähteet	38

Liitteet

Liite 1. Robot-laskennan tulokset.

Käytetyt lyhenteet ja sanasto

FEM	elementtimenetelmä, jota käytetään usein rakennelaskenta ja mitoitusohjelmistoissa ja voidaan hyödyntää optimoinnin apuna, finite element method (Tanska & Österlund 2014, 12)
iterointi	iteroinnilla tarkoitetaan tarkentuvaa toistoon perustuvaa menetelmää (Tanska & Österlund 2014, 12)
parametri	parametrilla tarkoitetaan lukuarvoa, muuttujaa tai määrettä, joka ohjaa ja informoi suunniteltavan algoritmisen prosessin osaa (Tanska & Österlund 2014, 13)
RHS	suorakaiteen muotoinen putkipalkki, rectangular hollow section
SHS	neliön muotoinen putkipalkki, square hollow section

1 Johdanto

Parametrisella suunnittelulla tarkoitetaan tietokonepohjaista suunnittelutapaa, jossa suunniteltavan mallin geometria jaetaan muuttujiksi, jotka ovat kriittisiä suunniteltavan rakenteen toiminnan kannalta. Parametrisen suunnittelumenetelmän avulla voidaan automatisoida monia suunnittelijan rutiinitehtäviä ja tehostaa suunnitteluprosessia. (Schumacher 2016)

Parametrinen suunnittelu mahdollistaa monimutkaisten pintojen ja muotojen suunnittelun ja sitä onkin käytetty apuna arkkitehtuurissa jo melko pitkään. Rakennesuunnittelussa parametrinen suunnittelu on kuitenkin monelle vielä vieras käsite ja pääasiallinen aiheeseen liittyvä kirjallisuus pohjautuu arkkitehtuuriin. Viime vuosien aikana monet yritykset ovat havainneet parametrisen suunnittelumenetelmän hyödyt ja sitä on ryhdytty käyttämään apuna myös rakennesuunnittelussa.

Opinnäytetyön tavoitteena on rakentaa parametrinen työkalu teräsristikon suunnittelun avuksi, jolla voidaan suorittaa teräsristikon alustava laskenta sekä teräsristikon 3D-mallinnus. Työkalun tulee olla ominaisuuksiltaan nopea ja helppokäyttöinen. Se tulee myös suunnitella niin, että sitä on tulevaisuudessa mahdollista kehittää. Parametrisen työkalun rakentamista varten halutaan selvittää, mitä parametrinen suunnittelu on ja miten sitä voidaan hyödyntää teräsristikon suunnittelussa. Työssä on tarkoitus myös selvittää, mitä hyötyjä ja haittoja parametrisella suunnittelulla on, kun sitä verrataan tavanomaiseen suunnittelumenetelmään.

Työkalun toimivuus rajataan K-, KT- ja N-ristikkotyypeille ja ristikon muoto rajataan harjaristikkoon sekä tasakorkeaan ristikkoon. Mitoituksen tulee tapahtua eurokoodin standardien mukaisesti. Työkalun ei ole tarkoitus suorittaa ristikon liitosten mitoitusta. Parametrinen malli rakennetaan Grasshopper- ja Rhino 7 -ohjelmilla. Ristikon 3D-mallinnus tapahtuu Tekla Structures -ohjelmistossa.

Työ tehdään toimeksiantona Rejlers Finland Oy:lle. Työn aihe valikoitui yrityksen tarpeiden perusteella. Yritys näkee, että parametrista suunnittelua hyödyntämällä

voidaan nopeuttaa ja helpottaa teräsristikon suunnitteluprosessia. Työn pohjalta on tarkoitus lähteä kehittämään parametrista suunnittelua edelleen myös muihin tarkoituksiin.

2 Parametrinen suunnittelu

Parametrinen suunnittelu on tietokonepohjainen suunnittelutapa, joka käsittelee suunniteltavan mallin geometriaa muuttujina. Mallin mittoja, kulmia ja muita geometrisia ominaisuuksia pystytään muuttamaan suunnitteluprosessin edetessä. Vaikkakin parametrinen malli esittää tietyn muodon määriteltyjen arvojen mukaan, parametrinen suunnittelu pohjautuu ennen kaikkea suunniteltavan mallin topologiaan, eikä niinkään mallin sen hetkiseen muotoon. Tämä tarkoittaa sitä, että malli koostuu lukuisista osista, joiden välinen suhde ei muutu. Parametrinen suunnittelu voidaan kuvitella osien välisten suhteiden ja riippuvuuksien verkostona. Tällä tapaa rakennetun mallin etuna on, että mallista voidaan tehdä tarkempi ja monimutkaisempi, mutta malli silti säilyttää sen muokattavuuden muuttuville vaatimuksille. Parametrisesti luotu muoto on vain yksi niistä monista vaihtoehdoista, joita parametrinen malli pystyy tuottamaan. Tämä parametrinen muokattavuus on hyödyllistä, kun suunnitteluprosessin edetessä malliin tulee tarve tehdä muutoksia. (Schumacher 2016)

2.1 Algoritmit

Algoritmi on sarja yksityiskohtaisesti määritettyjä tehtäviä. Algoritmi koostuu yksityiskohtaisista tehtävistä, jotka suoritetaan aina samalla tapaa ennalta asetettuiden sääntöjen mukaan ja sääntöjen määrämässä järjestyksessä. Tietyn päämäärän saavuttamiseksi algoritmin jokainen osatehtävä tulee kuvata tarkasti ja yksiselitteisesti. Jos algoritmin perusrakennetta ei muuteta, on algoritmin lopputulos sama jokaisella suorituskerralla. Parametrinen malli koostuu tyypillisesti useammasta algoritmista. (Tanska & Österlund 2014, 20)

Tavanomaisessa rakennesuunnittelussa suunnittelija yleensä pyrkii löytämään parhaan mahdollisen ratkaisun iteratiivisen prosessin kautta, joka pohjautuu vahvasti suunnittelijan kokemukseen ja intuitioon. Parametrisessa suunnittelussa tehtävä pitää jakaa useaan pienempään vaiheeseen, jotka asetetaan oikeaan järjestykseen. Parametrisen suunnittelun lopputulos pohjautuu tarkkoihin

sääntöihin ja parametreihin. Wassim Jabi (2013) kutsuu kirjassaan tätä sääntöihin pohjautuvaa ajattelutapaa nimellä algoritminen ajattelu. Suunnittelija, joka haluaa oppia parametrasta suunnittelua joutuukin opettelemaan algoritmisia käsitteitä, jotka usein ovat tutumpia ohjelmistokehittäjille kuin rakennesuunnittelijoille. Algoritminen ajattelu auttaa suunnittelijaa löytämään ja kontrolloimaan ratkaisuja tiettyjen rajojen sisäpuolella. (Jabi 2013, 47–49)

2.2 Datatyytit ja muuttujat

Muuttuja on tiedon tallennuspaikka, jolle voidaan antaa eri arvoja. Kun muuttujalle annetaan jokin arvo, siihen voidaan viitata myöhemmässä vaiheessa käyttämällä muuttujan nimeä. Parametrisessa suunnittelussa tulee tarve tallentaa eri tyyppistä tietoa kuten numeroita ja muotoja. Yleisimmät muuttujatyytit ovat seuraavat (Jabi 2013, 50):

Kokonaislukumuuttuja (eng. integer) on luku, jossa ei ole desimaalipistettä. Hyödyllinen esimerkiksi, kun halutaan laskea tiettyjen osien määrä.

Liukulukumuuttuja (eng. float) on luku, joka sisältää desimaaleja. Hyödyllinen, kun halutaan mitata jotain.

Merkkijonumuuttuja (eng. string) koostuu yhdestä tai useammasta merkistä. Hyödyllinen, kun halutaan tallentaa tietoa tekstimuodossa.

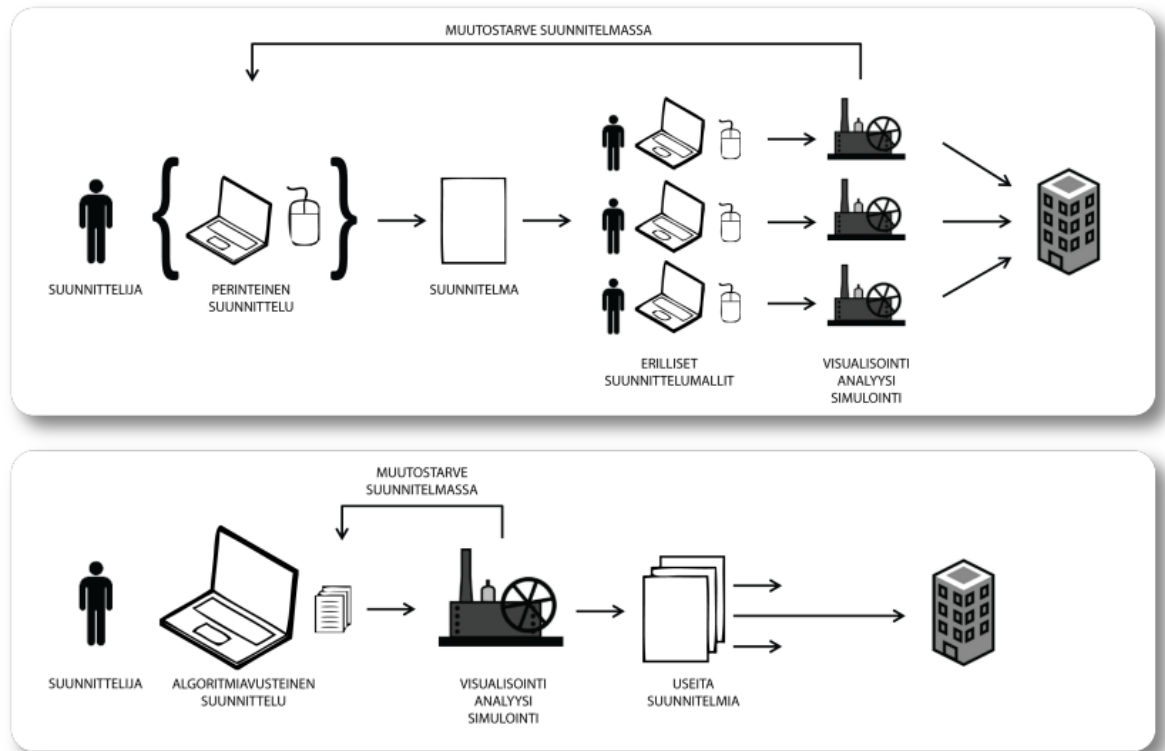
Listamuuttuja (eng. list) on lista, joka koostuu useammasta muuttujasta tai alkiosta.

Tosi-/epätosi-muuttuja (eng. Boolean) on muuttuja, jolle voidaan antaa yksi arvo kahdesta vaihtoehdosta: tosi tai epätosi.

2.3 Parametrisen suunnittelumenetelmän käyttö rakennesuunnittelussa

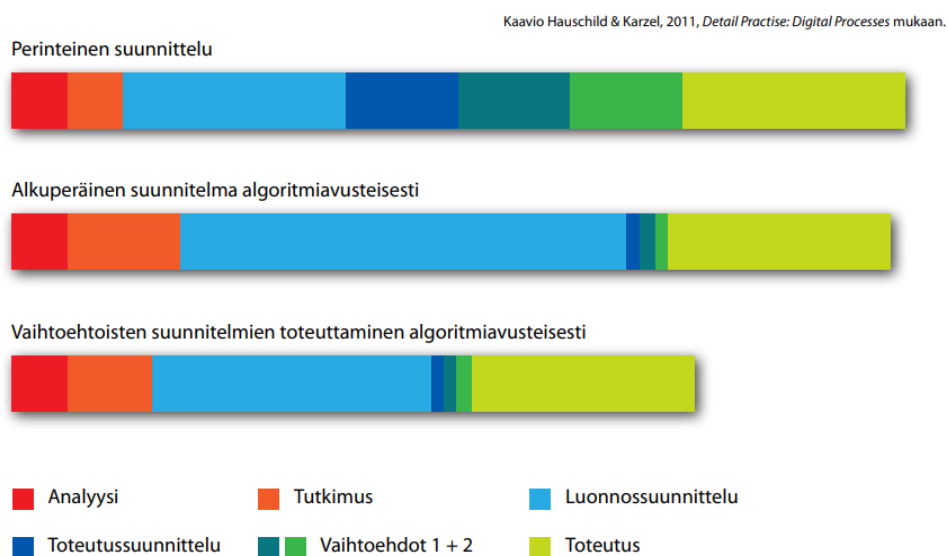
Normaali suunnittelumenetelmä rakennesuunnittelussa on lähes aina iteratiivinen. Suunnittelija tuottaa ratkaisuja, jotka taas asettavat uusia kysymyksiä, joiden pohjalta ratkaisuja kehitetään tai tehdään kokonaan uusia ratkaisuja. Suunnittelussa usein käytetään apuna tietokonepohjaisia työkaluja, joiden avulla ideat voidaan mallintaa ja visualisoida. Suurin osa näistä malleista joudutaan rakentamaan siten, että niiden interaktiivinen muokkaaminen on haastavaa. Ongelmia esiintyy etenkin geometrialtaan monimutkaisissa 3D-malleissa, joissa yhden osan muokkaaminen vaatii muutosten tekemistä myös useampaan muuhun osaan. Yhtenä vaihtoehtoisena suunnittelutapana tähän ongelmaan on parametrinen suunnittelu. (Jabi 2013, 19)

FEM-laskentaohjelmia käytetään yleisesti rakennesuunnittelussa rakenteiden mitoituksen ja optimoinnin apuna. Mallinnetun muodon mukaan rakenne mallinnetaan erikseen FEM-laskentaohjelmaan, jonka tulosten perusteella alkuperäistä mallia muokataan. Kun alkuperäistä mallia on muokattu, joudutaan muokkaamaan myös laskentaohjelman mallia. Projektin edetessä usean mallin tekeminen ja päivittäminen on työlästä. Geometrian manuaalinen muokkaaminen ja päivittäminen on myös hidasta ja epätarkkaa, sillä jos yhtä osaa mallista optimoidaan saattaa se aiheuttaa uusia ongelmia toisessa kohtaa mallia. Parametrinen mallintaminen mahdollistaa analyysimallien mallintamisen suoraan parametrinen mallin pohjalta. Parametristen mallinnusohjelmien avulla analyysiohjelmat ja niistä saatavat tulokset voidaan liittää suoraan osaksi mallia tai rakennetta määrittelevää prosessia. Tieto parametrinen mallinnusohjelman ja analyysiohjelman välillä liikkuu kaksisuuntaisesti, eli analyysimalli suorittaa ensin laskennan ja tulokset palautuvat takaisin parametriseen malliin, joka optimoi mallia analyysin perusteella. (Tanska & Österlund 2014, 56-59) Kuvassa 1 on esitetty, miten parametrinen suunnittelumenetelmän ja perinteisen suunnittelumenetelmän rakenne eroavat toisistaan.



Kuva 1. Parametrisesti määritellyn geometrian perusteella voidaan tuottaa interaktiivista tietoa muille ohjelmistoille reaaliaikaisesti (Tanska & Österlund 2014, 57).

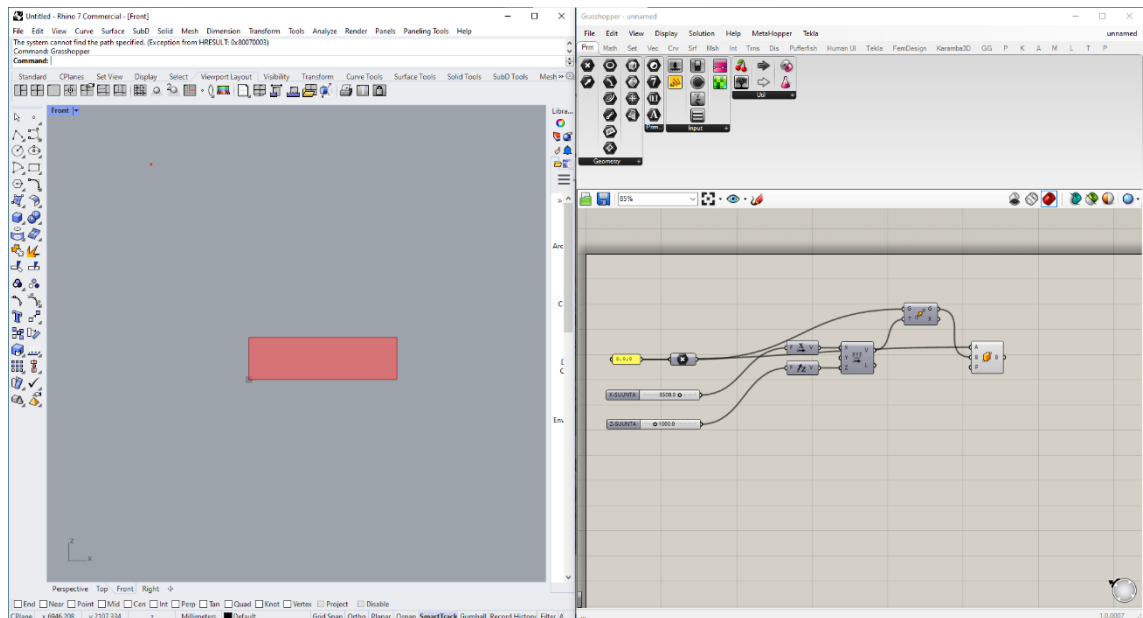
Parametrisen mallin rakentaminen on tyypillisesti manuaalista mallintamista hitaampaa, mutta valmiin mallin tuoma nopeus erilaisten vaihtoehtojen tuottamisessa on puolestaan huomattavasti manuaalista mallintamista nopeampaa (kuva 2). Parametrinen malli ei myöskään tarvitse rakentaa aina alusta asti, vaan aikaisempia malleja muokkaamalla voidaan nopeuttaa parametrisen mallin rakentamista. Parametrisen suunnittelumenetelmän etu näkyikin parhaiten, kun sitä käytetään samaan prosessiin pohjautuvien suunnitelmien toteutuksessa. (Tanska & Österlund 2014, 24)



Kuva 2. Ajankäyttö perinteisessä suunnittelussa verrattuna algoritmiavusteiseen suunnitteluun (Tanska & Österlund 2014, 24).

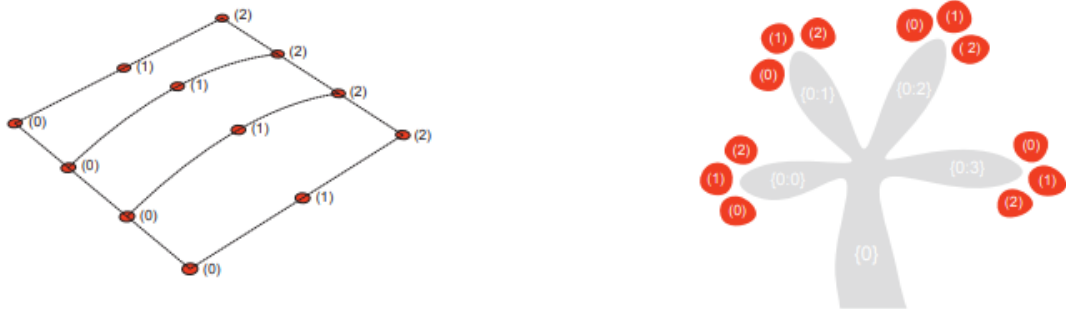
3 Rhino 7 ja Grasshopper

Yleisimmin käytössä oleva parametrinen suunnitteluohjelma on Grasshopper. Grasshopper on visuaalinen algoritmin kirjoitusohjelma, joka on integroituna Rhino 7 -mallinnusohjelmaan. Grasshopperin etuna moniin muihin ohjelmointikieliin on koodin visuaalinen esitystapa, joka mahdollistaa sen, että käyttäjällä ei välttämättä tarvitse olla aikaisempaa ohjelmointikokemusta luodakseen algoritmeja. Grasshopperia käytetään yhdessä Rhino-ohjelman kanssa. Itse parametrinen malli luodaan Grasshopperissa, mutta mallin visualisointi tapahtuu Rhino-ikkunassa, joka päivittyy reaaliajassa, kun Grasshopper-malliin tehdään muutoksia (kuva 3). (Schumacher 2016)



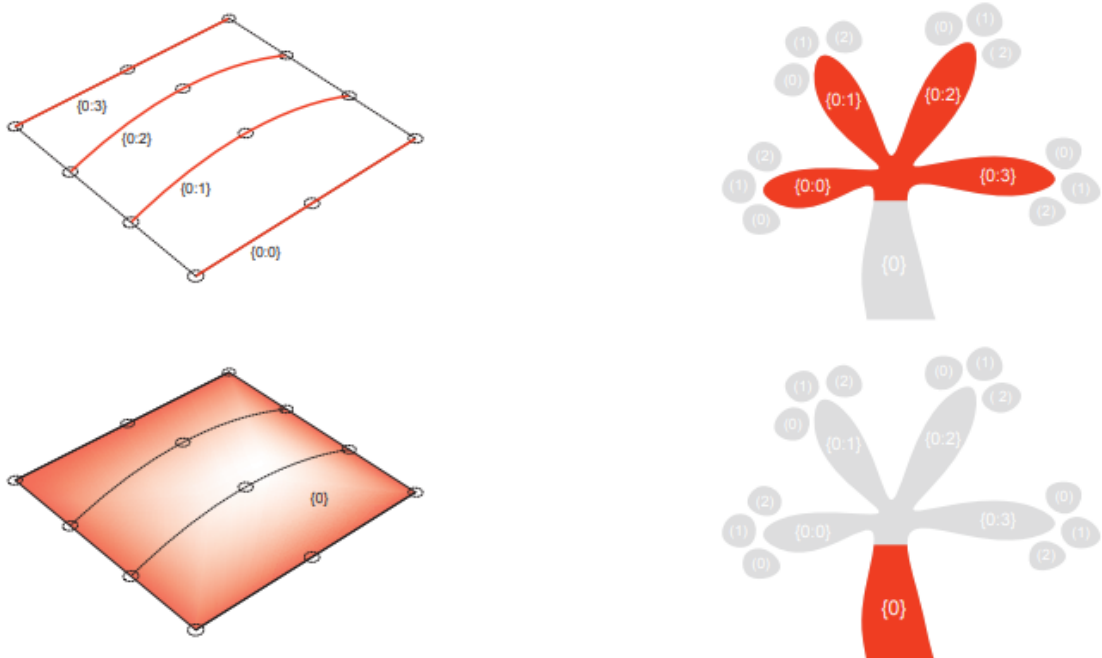
Kuva 3. Vasemmalla Rhino-ikkuna ja oikealla Grasshopper-ikkuna.

Grasshopper käsittelee tietoa puutietorakenteen tyypisesti. Puu koostuu useammasta oksasta (branch) ja oksalla voi olla alempia oksia (sub branch). Oksat koostuvat listoista, joissa voi olla useampia alkioita (item) ja jokaisella alkiolla on oma indeksinumeronsa. Esimerkkinä puussa voi olla neljä listaa ja jokaisessa listassa kolme alkioita (kuva 4). Numero sulkeissa on alkion indeksinumero.



Kuva 4. Esimerkki oksien alkioista (Sung 2010, 11).

Oksan numero ilmoitetaan aaltosulkeiden sisällä ja se erotetaan pääoksasta puolipisteellä. Oksalla voi olla ääretön määrä alempia oksia. Kuvan 4 listat voidaan laittaa neljään alaoksaan kuvan 5 mukaisesti ja alaoksista voidaan muodostaa yksi pääoksa, jota kuvaa numero "{0}".



Kuva 5. Yksi pääoksa ja neljä alempaa oksaa (Sung 2010, 11).

Kuvassa 6 on esitettyä yksi pääoksa, joka koostuu neljästä alaoksa, neljästä listasta ja yhteensä 12:sta alkiosta.



Kuva 6. Kuva puutietorakenteesta, jossa yksi pääoksa, neljä alaoksa ja 12 alkiota (Sung 2010, 11).

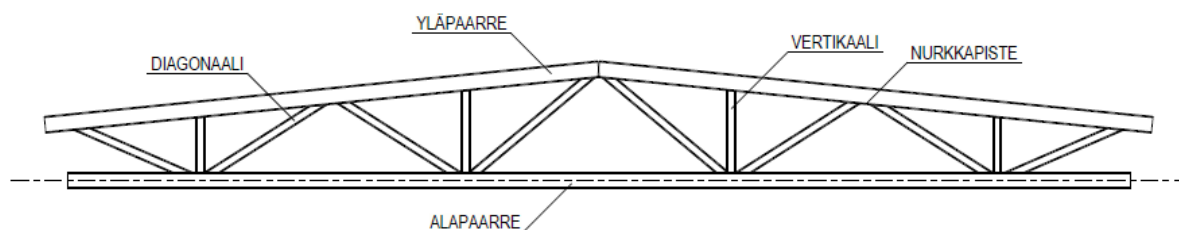
Grasshopper objektit on mahdollista jakaa kahteen pääkategoriaan: parametreihin ja komponentteihin. Parametreihin on mahdollista tallentaa tietoa, kun taas komponenteilla on mahdollista suorittaa jokin toiminto. Komponentit voidaan edelleen jakaa kahteen kategoriaan: komponentteihin, jotka muokkaavat sille annettua tietoa ja komponentteihin, jotka luovat geometriaa. (Sung 2010, 13-15)

4 Teräsristikot

Kun terästä aloitettiin käyttämään rakenteissa, oli suurin osa teräsrakenteista ristikoita. Tämä johtui teräksen hinnasta työkustannuksiin verraten. Sitten monet palkkituotteet ovat syrjäyttäneet ristikkorakenteet monissa tapauksissa, teräksen hinnan pudottua suhteessa muihin kustannuksiin. Teräsristikon kustannukset muodostuvat teräksen painosta, konepajavalmistuksesta ja työmaa-asennuksesta. Talonrakennuksessa ristikoita käytetään yleisimmin kattorakenteissa. Ristikkorakenteiden avulla on mahdollista toteuttaa pitkiä jännevälejä ja ne ovat kevyitä kantokykynsä nähden. (Kinnunen ym. 1992, 86)

Ideaaliristikko on kolmioiden muotoon liitetystä nivelnurkkaisista sauvoista muodostuva rakenne, jonka sauvat rasittuvat vain vedettynä tai puristettuna. Sauvojen päätepisteitä joissa sauvat liittyvä toisiinsa, kutsutaan ristikon nurkkapisteiksi. Ideaaliristikkoa kuormitetaan vain nurkkapisteistä tai solmukohdista. Ideaaliristikon mekaanista käyttäytymistä on suhteellisen helppo analysoida ilman laskentaohjelmiakin. (Leskelä & Kumar 2010, 76)

Kuvassa 7 on esitetty ristikon eri osien nimet.



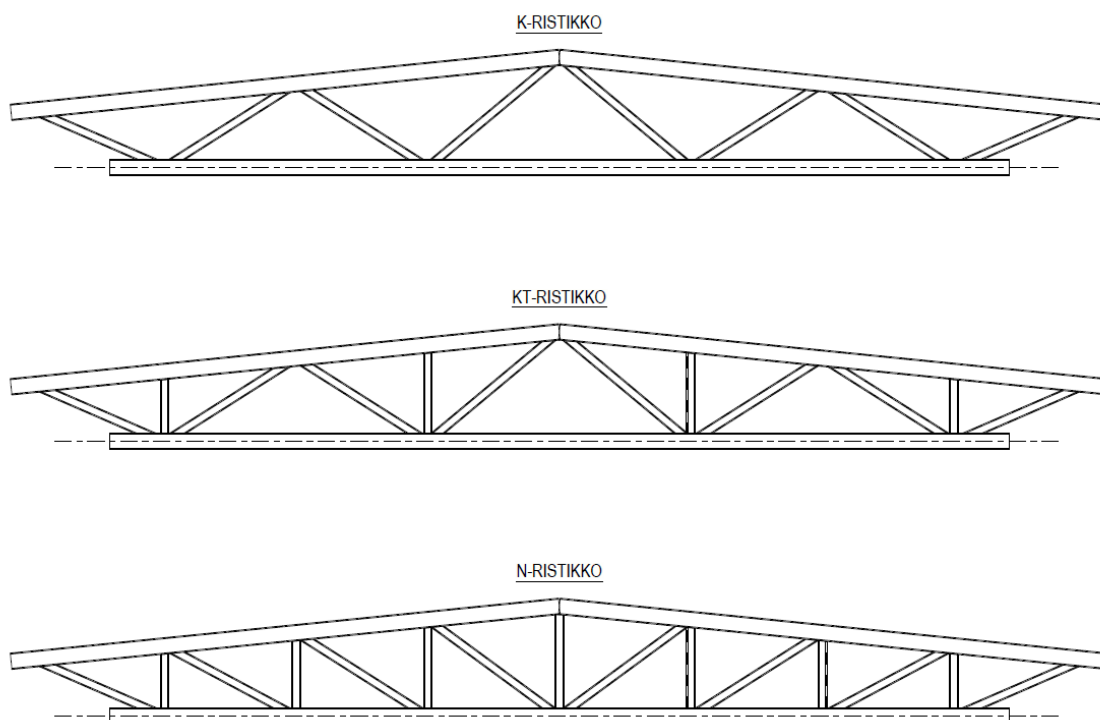
Kuva 7. Ristikon osat.

Todellisessa ristikossa nurkkapisteet eivät ole aina niveliä ja niissä on aina tietty kiertymäjäykkyys. Tämän lisäksi ristikoiden parresauvoissa on myös taivutusrasituksia, koska paarteet ovat jatkuvia rakenteita ja esimerkiksi yläpaarretta tyypillisesti kuormitetaan kattorakenteiden jakaantuneilla kuormilla. Ristikkorakenteita on kuitenkin mahdollista valmistaa niin, että niiden toiminta on hyvin lähellä ideaaliristikkoa. (Leskelä & Kumar 2010, 77)

4.1 Ristikon muoto ja korkeus

Tasoristikko muodostuu ylä- ja alapaarteesta sekä niiden välissä kulkevista uumasauvoista. Uumasauvat jaetaan sauvojen suunnan mukaan diagonaaleiksi ja vertikaaleiksi. On myös yleistä, että ristikoita esiintyy korkeudeltaan muuttuvina, pulpetti- tai harjapalkkia vastaavina. Kaltevuus määräytyy halutun kattokaltevuuden mukaan. Ristikon alapaarre on mahdollista tehdä suorana tai taitettuna. Monet tekijät kuten ristikön tilakustannukset, valmistustekniikka ja kuormitukset, vaikuttavat ristikön taloudelliseen rakennekorkeuteen. Työteknisesti tasakorkean ristikön valmistus on halvinta, koska vertikaalit ja diagonaalit ovat saman mittaisia. Ristikön korkeus määritetään jännevälän suhteen. Ristikön optimikorkeus tyypillisesti vaihtelee $L/9 - L/12$ välillä, jossa L on ristikön jänneväli. (Kinnunen ym. 1992, 86)

Ristikkotyypin valinta on oleellinen osa ristikön suunnittelua. Yleisimmin käytetyt ristikkotyypit ovat K-, KT- ja N-ristikot (kuva 8).



Kuva 8. Yleisimmät ristikkotyypit.

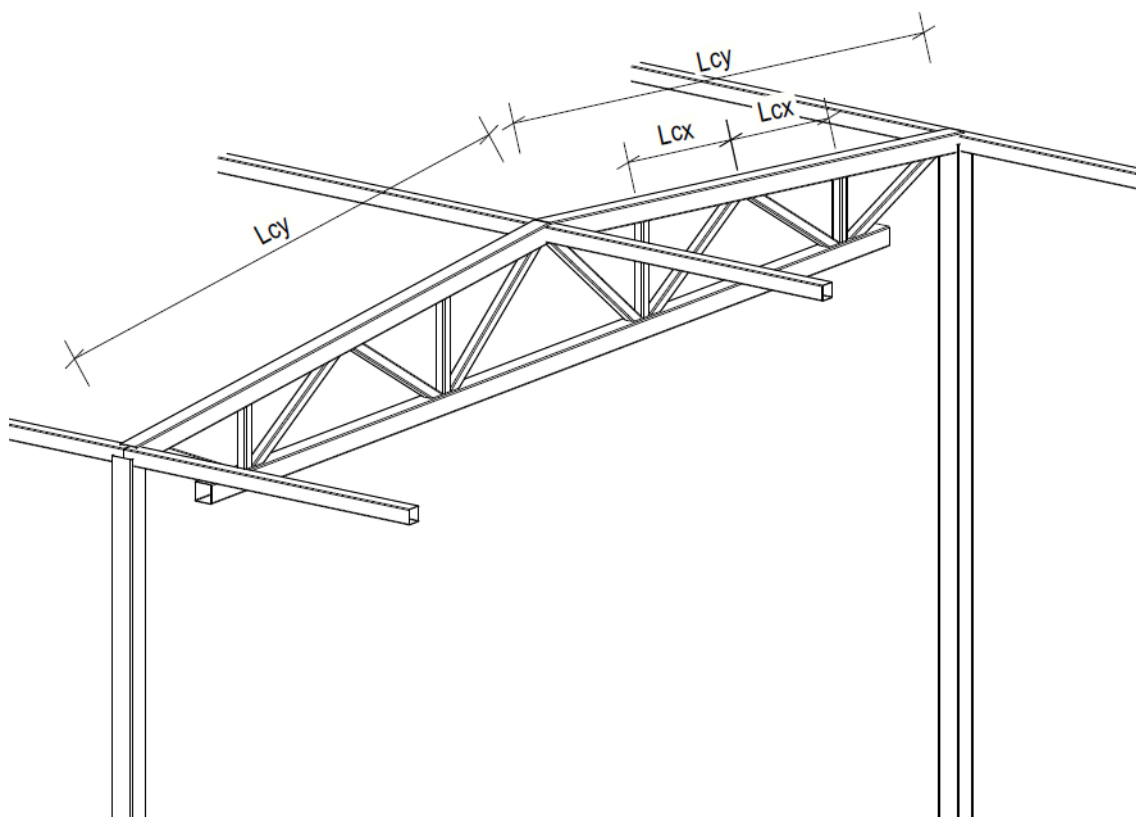
K-ristikko sopii käytettäväksi erityisesti silloin, kun kuormat on mahdollista siirtää ristikon liitoskohtiin. K-ristikossa uumasauvojen määrä on pieni ja liitokset ovat yksinkertaisia. Tästä syystä ristikko on myös edullinen valmistaa. Yläpaarteen nurjahduspituus on K-ristikossa suuri harvan sauvajaon takia, mikä saattaa johtaa raskaampaan paarteeseen. Sauvojen pieni määrä antaa myös tilaa esimerkiksi putkien läpiviennelle. (Rautaruukki 1997, 185)

KT-ristikon kestävyys on parempi verrattuna K-ristikkoon tiheämmän sauvajaon ansiosta. Liitoksia on kuitenkin enemmän ja ne ovat vaikeampia toteuttaa, mikä lisää valmistuskustannuksia. (Rautaruukki 1997, 185)

N-ristikossa puristetut uumasauvat ovat lyhyempiä kuin KT-ristikossa. N-ristikko on edullinen ristikkovaihtoehto, kun uumasauvojen voimat ovat suuria parrevoimiin verrattuna. Tämä tilanne pätee tyypillisesti korkeissa lyhyen jännevälillä ristikoissa. K-ristikkoon verrattuna liitoksia on enemmän, minkä vuoksi valmistuskustannukset ovat suuremmat. (Rautaruukki 1997, 185)

4.2 Paarresauvojen valinta

Yleensä paarresauvojen valinnassa määrääväksi tekijäksi muodostuu nurjahdus, joka voi tapahtua ristikon tasossa tai ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Nurjahduspituus L_{cx} ristikon tasossa on ristikon nurkkapisteiden väli. Ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa tapahtuvan nurjahduksen nurjahduspituus L_{cy} määräytyy paarteen jäykkien tukipisteiden välisen etäisyyden mukaan (kuva 9). Kun nurjahduspituudet ovat molempiin suuntiin lähes yhtä suuria, on neliön muotoinen putkipalkki edullisin valinta. Jos nurjahduspituudet poikkeavat merkittävästi toisistaan, voi suorakaiteen muotoisen putkipalkin käyttö olla perusteltua. (Kinnunen ym. 1992, 88)



Kuva 9. Yläpaarteen nurjahduspituudet.

4.3 Uumasauvojen valinta

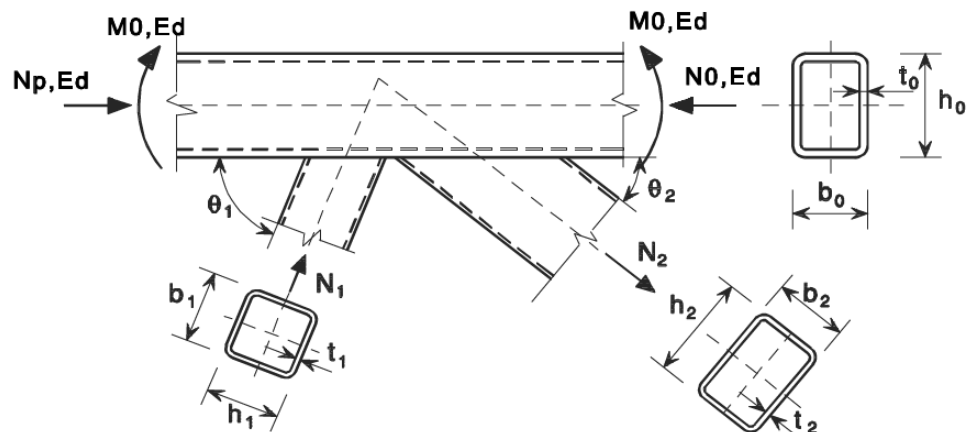
Uumasauvojen valinta on hieman selkeämpää kuin paarteen valinta. On aina varmallalla puolella käyttää uumasauvojen nurjahduspituutena sauvojen todellista pituutta. Uumasauvan liitoksessa on kuitenkin jäykkyttä, joten nurjahduspituutena voidaan käyttää 0,75 kertaa sauvan todellinen pituus. Paarteen ja uumasauvan väliseen hitsiliitoksen toteutukseen on kiinnitettävä huomiota uumasauvan valinnassa. Uumasauvan suositeltava leveys on 0,7–0,8 kertaa paarteen leveys (Rautaruukki 1997, 189.)

Ristikon liitosten suunnittelu

Suuri osa ristikon kustannuksista määräytyy ristikon liitosten yksinkertaisuuden perusteella. Ristikon sauvojen liitokset yleensä tehdään konepajalla hitsaamalla.

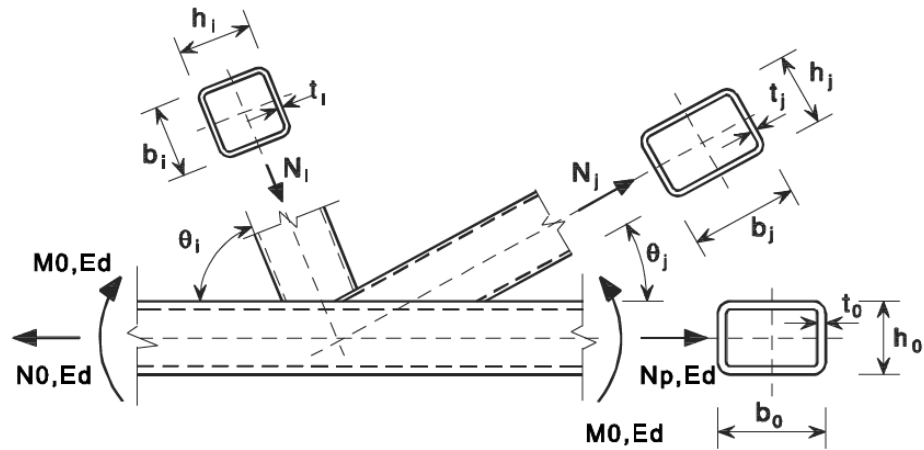
Hitsiliitoksia käytetään myös työmaalla, kun kootaan osissa kuljetettua ristikköä. Asennusliitoksina työmaalla käytetään tyypillisesti pulttiliitoksia. (Kinnunen ym. 1992, 92)

Ristikon sauvojen väliset liitokset on mahdollista jakaa kahteen pääryhmään: vapaavälisiin ja limitettyihin liitoksiin (kuvat 10 ja 11). Näistä kahdesta liitostyyppistä vapaaväliset liitokset ovat helpompia ja edullisempia valmistaa. Vapaavälisissä liitoksissa uumasauvat katkaistaan kerralla sopivaan kulmaan. Limitetyissä liitoksissa päälle asennettava sauva on leikattava kahdessa kulmassa ja osien sovitustoleranssit ovat tiukemmat verrattuna vapaavälisiin liitoksiin. (Rautaruukki 1997, 189)



Kuva 10. Vapaavälinen liitos, jossa on kaksi uumasauvaa (SFS EN 1993-1-8).

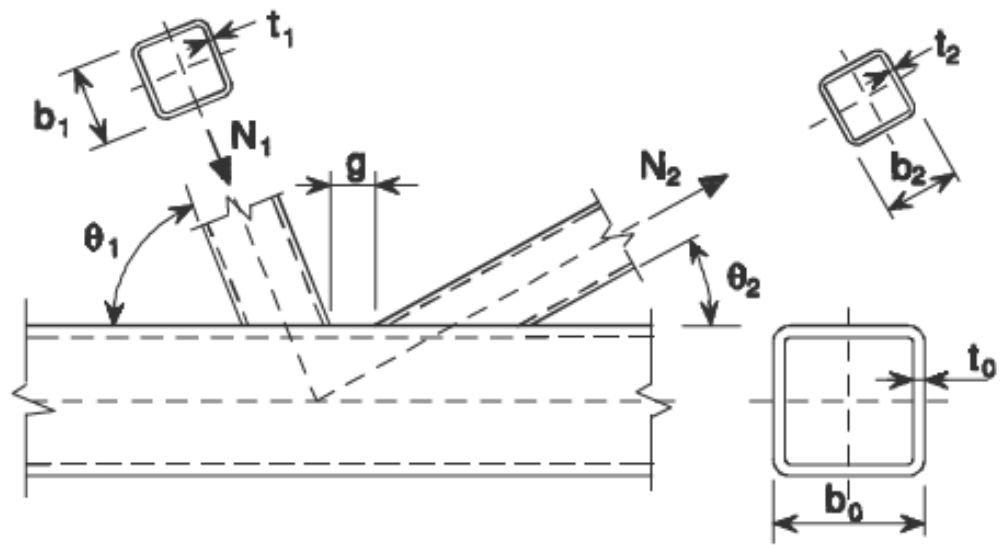
Limitetyissä liitoksessa uumasauva joudutaan leikkaamaan kahdessa kulmassa. Limitetyn liitoksen hitsaaminen on myös haastavampaa verrattuna vapaaväliseen liitokseen.



Kuva 11. Limitetty liitos, jossa on kaksi uumasauvaa (SFS EN 1993-1-8).

Liitoksia suunniteltaessa tulisi pyrkiä saamaan sauvojen painopisteakselit leikkamaan samassa pisteessä, koska epäkeskisyys lisää paarteen taivutuskuormaa. Tämän lisäksi diagonaalien ja vertikaalisten tai kahden diagonaalien epäkeskeisessä liitoksessa aiheutuu liitokseen leikkausvoimaa, joka pienentää paarteen puristuskestävyyttä uumasauvojen välisessä paarteen osassa. Liitosteknisistä syistä epäkeskisyydeltä ei kuitenkaan aina voida välttyä. Limitetyissä liitoksissa on mahdollista sopivalla limityksellä poistaa epäkeskisyys kokonaan. Limitetyissä liitoksissa limityksen tulee olla kuitenkin vähintään 25 %. Eurokoodi 3:n mukaan paarteiden ja uumasauvojen sekä viereisten uumasauvojen pienin sallittu liitoskulma on 30 astetta. Uumasauvojen liitoksissa tulisi pyrkiä välttämään pieniä liitoskulmia, koska pieni liitoskulma tekee hitsaamisesta vaikeaa. (Rautaruukki 1997, 189)

Vapaavälisissä liitoksissa liitoksen vapaavälin g tulee olla vähintään paarteiden yhteenlaskettu profiilien paksuus ($t_1 + t_2$) (kuva 12). Tällä varmistetaan, että liitoksissa on riittävästi tilaa hitsien aikaansaamiseksi. Vapaaväli mitataan liittyvän paarteen pinnan suunnassa viereisten uumasauvojen kärkien välisenä etäisyytenä. (SFS EN-1993-1-8)



Kuva 12. Liitoksen vapaaväli esitettyinä tunnuksella g (SFS EN-1993-1-8, 129).

5 Työn toteutus

Työssä rakennettu parametrinen malli luotiin jo aiemmin tässä työssä esitellyillä Rhino 7- ja Grasshopper-ohjelmistoilla. Ristikon rakenteellinen analyysi ja mitoitus toteutettiin Karamba3D-lisäosalla. Karamba3D on Grasshopper-lisäosa, joka toimii suoraan Grasshopper-ympäristössä ja on tehty suunnittelun alkuvaiheen rakenteellista analyysia varten (Tanska & Österlund 2014, 59). Karamba visualisoi, minkä tahansa rakenteen jännitys jakaumat ja siirtymät ennalta määritettyjen kuormien perusteella. Karamban avulla on myös mahdollista optimoida rakenteiden poikkileikkauksia. Ristikon 3D-mallinnus toteutettiin Tekla Structures -ohjelmassa, jota varten käytettiin Tekla live link -lisäosaa, joka mahdollistaa interaktiivisen toiminnan Grasshopperin ja Teklan välillä. Tekla live link -lisäosan avulla parametrisesti luotu geometria saadaan vietyä parametrisestä mallista 3D-mallinnusohjelmaan.

5.1 Teräsristikon parametrinen suunnittelu

Työn tavoitteena oli luoda parametrinen työkalu, jonka avulla on mahdollista suorittaa teräsrakenteisen harja- ja tasaristikon mallinnus sekä laskenta parametrisesti. Myös ristikkotyyppejä on tarkoitus pystyä muokkaamaan parametrisesti K-, KT- ja N-ristikon välillä. Parametrinen mallinnus tapahtuu Grasshopper- ja Rhino 7 -ohjelmilla. Teräsristikon mallinnus suoritetaan Karamba3D-lisäosan avulla. Grasshopperista parametrinen malli tulisi pystyä viemään suoraan Tekla Structures -3D-mallinnusohjelmaan. Työkalusta pyritään tekemään mahdollisimman yksinkertainen, jotta se olisi mahdollisimman monen suunnittelijan käytettävissä, ilman useamman tunnin opettelua. Työkalua luotaessa on myös tärkeää suunnitella se niin, että sitä olisi mahdollista kehittää tulevaisuudessa.

Työn ensimmäinen vaihe oli luoda teräsristikon geometria Grasshopper-ohjelmalla, niin että sitä pystytään parametrisesti muokkaamaan. Tätä varten

tulee määrittää pääparametrit, joiden perusteella muodostuu ristikon geometria. Teräsristikon geometrian luomista varten valittiin seuraavat pääparametrit:

- jänneväli
- korkeus harjalla
- korkeus tuella
- uumasauvojen määrä
- ristikkotyyppi

5.2 Ristikon mitoitus

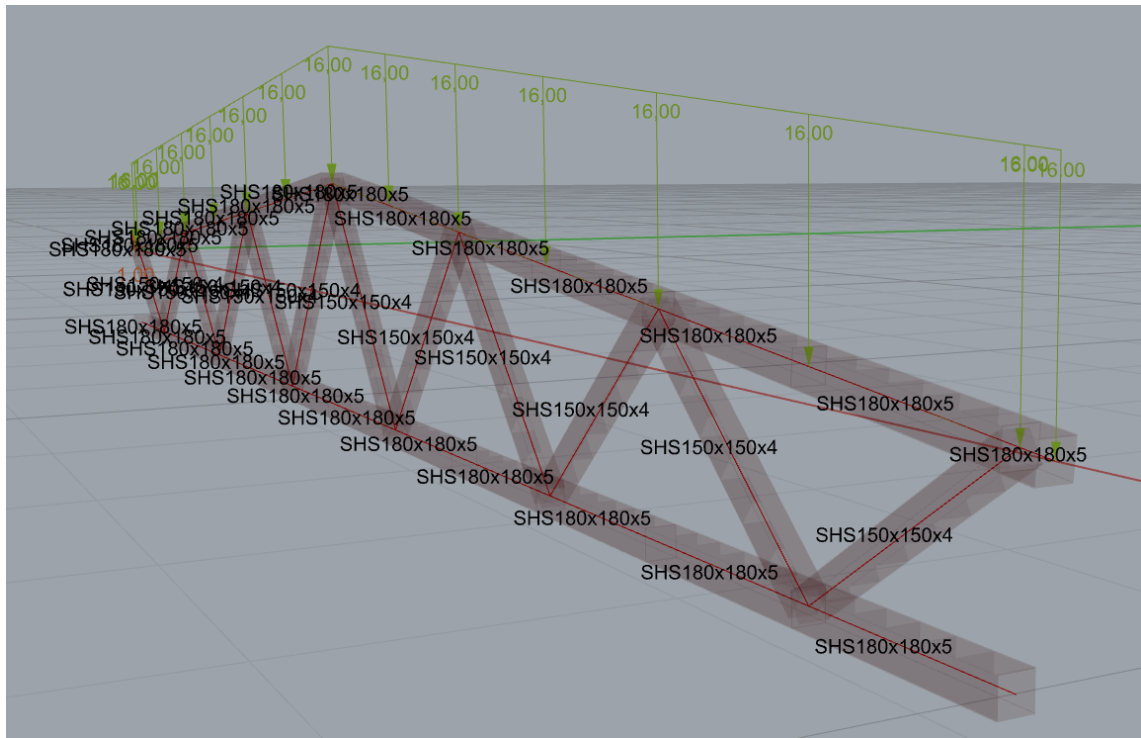
Ristikon mitoitus suoritettiin Karamba3D-lisäosalla. Karamban avulla voidaan visualisoida rakenteen jännitysjakaumat ja siirtymät ennalta määritettyjen kuormien perusteella. Karamban avulla on myös mahdollista optimoida rakenteiden poikkileikkauksia.

Paarteet ja uumasauvat muutettiin *line to beam* -komponentilla palkkielementeiksi, jotta Karamba osaa suorittaa laskennan oikein. Komponentissa määriteltiin myös nurjahduspituudet sauvoille. Uumasauvojen nurjahduspituudeksi annettiin 0,8 kertaa uumasauvan pituus. Eurokoodi 3:n mukaan ristikon aksiaaliset sauvavoimat voidaan määrittää olettamalla, että uumasauvat liittyvät toisiinsa sekä parresauvoihin nivelellisesti, joten myös Karamba-malliin asetettiin sauvojen päihin nivelet. (SFS EN 1993-1-8, 56.) Karamba laitettiin käyttämään parresauvojen nurjahduspituutena ristikon tasossa solmupisteiden välistä etäisyyttä.

Karamban avulla oli myös mahdollista suorittaa ristikon profiilien optimointi. Profiilien optimointia varten Karambaan luotiin profiilikirjasto, joista Karamba valitsee parhaiten sopivan vaihtoehdon. Profiilikirjasto tehtiin vain neliön muotoisille putkipalkeille, mutta kirjastoa on mahdollista myöhemmässä vaiheessa kasvattaa esimerkiksi lisäämällä suorakaiteen muotoiset putkipalkit mukaan laskentaan. Karamban optimointityökalu toimii niin, että se käsittelee sille annettua profiililuetteloa järjestyksessä ja poimii sieltä ensimmäisen sopivan

vaihtoehdon. Jotta ristikosta saataisiin tehtyä mahdollisimman kevyt, profiililuettelo annettiin Karamballe painojärjestyksessä kevyimmästä profiilista raskaimpaan. Profiilien myötölujuudeksi määritettiin 355 N/mm^2 .

Laskennan yksinkertaistamiseksi Karambaa käskettiin antamaan alapaarteelle profiilille sama leveys ja korkeus kuin yläpaarteelle, mutta lupa muuttaa profiilin seinämäpaksuutta. Samasta syystä Karambaa käskettiin käyttämään samaa profiilia kaikille uumasauvoille. Uumasauvojen profiilien leveys tulee myös olla vähintään 0,7 kertaa paarteiden leveys. Karamban avulla pystytään myös visualisoimaan ristikko 3D-muodossa (kuva 13).



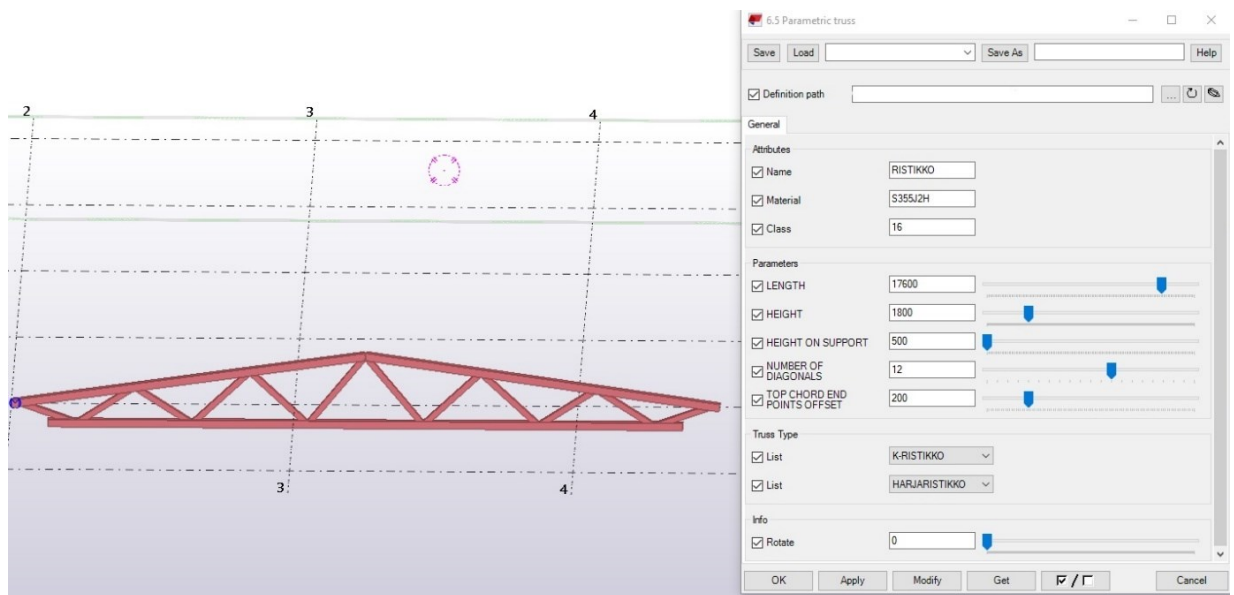
Kuva 13. Karamban mitoittamat profiilit.

5.3 Mitoitetun ristikon siirto 3D-mallinnusohjelmaan

Seuraavana vaiheena oli siirtää mitoitettu ristikko Tekla Structures -ohjelmaan. Tämä toteutettiin komponenttien Tekla Live Link ja Tekla Grasshopper avulla. Tekla Live Link -komponentti mahdollistaa parametrin mallin viemisen Tekla-mallinnusohjelmaan. Tekla Live Link koostuu Grasshopper komponenteista, joilla

voidaan tehdä rakenteita Tekla Structures -ohjelmaan. Parametrisen mallin teräsristikko koostui viivoista ja nämä viivat muutettiin palkkielementeiksi *line to beam* -komponentilla. *Line to beam* -komponenttiin liitettiin myös *attributes*-komponentti, jonka avulla pystytään muuttamaan palkkielementin materiaalia, nimeä ja muita ominaisuuksia.

Tekla Grasshopper -komponentti toimii samaan tapaan kuin muutkin Tekla-komponentit. Teklan komponentti-ikkunassa annetaan ristikon parametreille oikeat arvot ja mallinnus tapahtuu nappia painamalla. Ristikon profiilit määräytyvät Karamba-laskennan kautta ja Grasshopper-parametreja pystytään muuttamaan Tekla Structures -ohjelmassa. Ristikon parametreja voidaan muuttaa myös jälkikäteen. Jos esimerkiksi tulee tarve muuttaa ristikon korkeutta, se voidaan tehdä nopeasti *height*-parametrin arvoa muuttamalla (kuva 14). Manuaalisesti mallinnettuna ristikon korkeuden muuttaminen tarkoittaisi sitä, että suunnittelija joutuisi tekemään muutoksia useampaan ristikon osaan.



Kuva 14. Tekla-komponentti, josta pystytään muuttamaan ristikon parametrien arvoja.

Tyypillisesti ristikon mallinnus on melko työlästä ja mallinnuksessa voi tapahtua pieniä virheitä, jotka johtavat epätarkkaan mallinnukseen. Jos parametrinen malli on rakennettu oikein, ristikon mallinnuksessa ei tapahdu virheitä ja mallinnuksessa säästetään huomattavasti aikaa.

6 Laskentatulosten vertailu

Työssä suoritettiin laskentatulosten vertailu parametrinen mallin laskennan ja Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmiston kanssa tehtävän FEM-laskennan välillä. Laskentavertailun tavoitteena oli selvittää, kuinka lähellä parametrisesti tuotetun laskennan tulokset ovat verrattuna tavanomaisempaa FEM-laskentaa ja mitä mahdollisia puutteita laskennasta löytyy.

Laskentavertailua varten tehtiin kuvitteellinen lähtötilanne, johon ennaltamäärättiin mitoitettavan ristikon jänneväli, korkeus, muoto, kuormat ja ristikkotyypit. Laskennassa yläpaarteiden nurjahduspituus ristikon tasoa vasten kohtisuorassa suunnassa määritetään siten, että yläpaarteet on tuettuna molemmista päistä, harjalta sekä yläpaarteiden profiilien keskikohdasta. Ristikon profiilien teräslaatu on S355.

Ristikko siirrettiin parametriseen mallista FEM-laskentaohjelmaan ja FEM-laskentaohjelmassa ristikolle määritettiin manuaalisesti tuet, kuormitukset sekä Karamba-laskennan määrittelemät profiilit ristikolle.

Kuormat syötettiin ristikolle tasaisesti jakaantunena kuormana yläpaarteelle. Kuormien mitoitus laskettiin käsin murtorajatilan kuormina kaavojen 1 ja 2 mukaan (Saarinen 2010, 35). Kuormien yhdistelmänä käytettiin epäedullisemmän tuloksen antavaa kaavaa.

$$1,35 K_{FI} G_{kj.sup} + 0,9 G_{kj.inf} \quad (1)$$

$$1,15 K_{FI} G_{kj.sup} + 0,9 G_{kj.inf} + 1,5 K_{FI} Q_{k.1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

missä G_{kj} on pysyvän kuorman j ominaisarvo

$Q_{k.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$ on muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo

$\psi_{0,i}$ on kuormien pienennyskerroin

K_{FI} riippuu seuraamusluokasta:

seuraamusluokassa CC3 $K_{FI} = 1,1$

seuraamusluokassa CC2 $K_{FI} = 1,0$

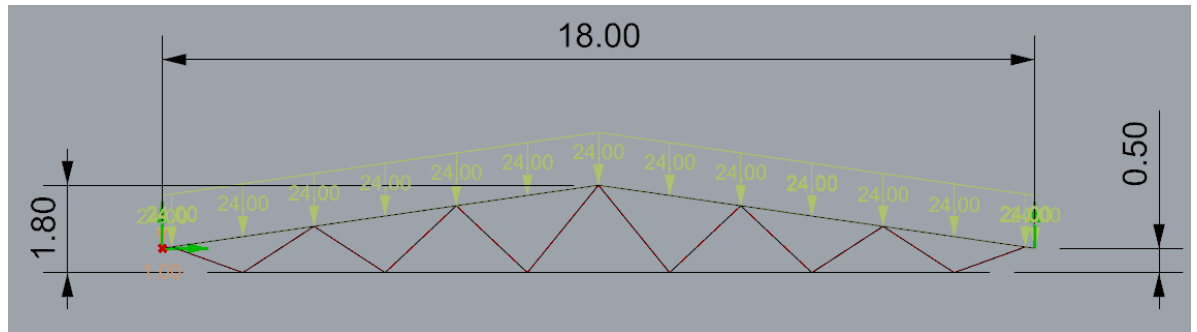
seuraamusluokassa CC1 $K_{FI} = 0.9$

6.1 Mitoitettavan ristikon lähtötiedot

Seuraavassa on esitetty mitoittettavan ristikon lähtötiedot, joiden pohjalta ristikon mitoitus suoritettiin. Lähtötiedot pyrittiin valitsemaan niin, että ne olisivat myös realistiset.

- Ristikon muoto: harjaristikko
- Ristikkotyyppi: K-ristikko
- Jänneväli: 18 m
- Korkeus harjalla: 1.8 m
- Korkeus tuella: 0.5 m
- Kattorakenteiden omapaino: 0.6 kN/m²
- Lumikuorma katolla: 2.2 kN/m²
- Ristikon kuormitusleveys: 6 m

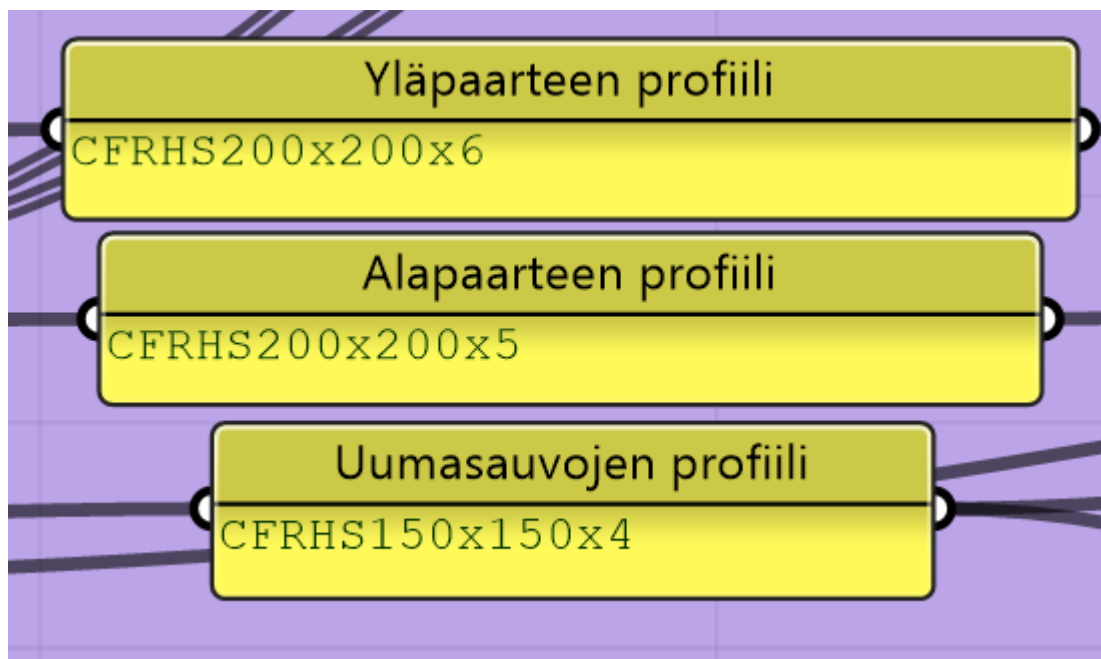
Parametrinen laskentamalli ei suorita ristikon uumasauvojen määrän automaattista optimointia. Laskentavertailun yksinkertaistamista varten uumasauvojen määräksi määritettiin 12 sauvaa. Ristikon mitoituskuormaksi annettiin yläpaarteelle 24 kN/m kuorma, joka laskettiin murtorajatilán kuormitusyhdistelmänä kaavojen 1 ja 2 mukaan. Rhino-ikkuna visualisoi parametrisesti mallinnetun ristikon geometrian sekä Karambassa tehdyt määritykset kuten kuormat ja tuet (kuva 15).



Kuva 15. Ristikko parametrisesti mallinnettuna Rhino-ikkunassa.

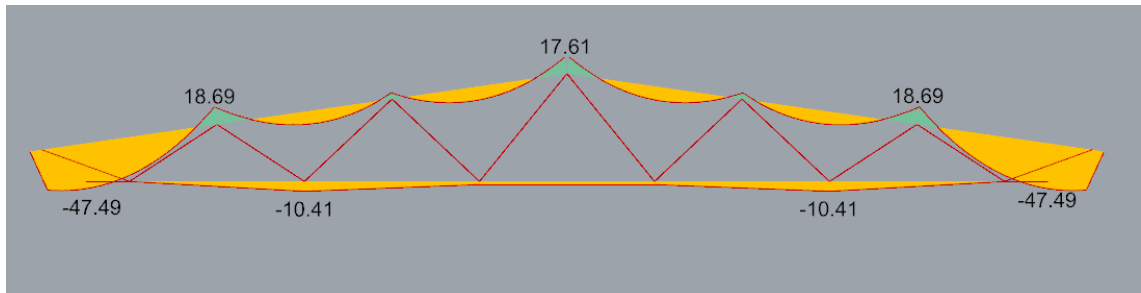
6.2 Tulosten vertailu

Parametrisen mallin Karamba-laskennan tulokset esitetään kuvissa 16–18. Robot-laskennan tulokset on esitetty liitteessä 1.



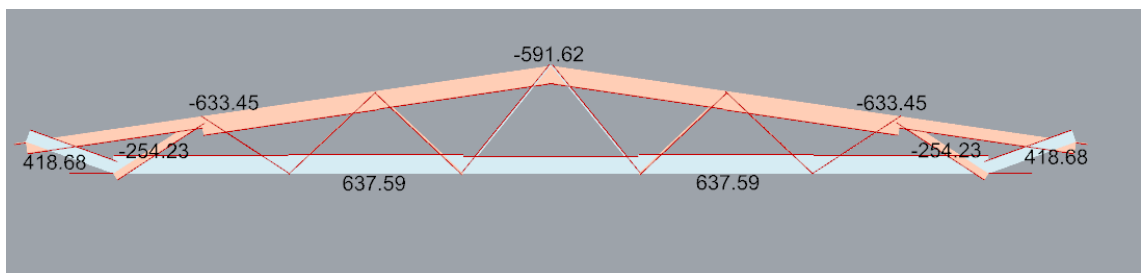
Kuva 16. Karamban määrittelemät profiilit ristikolle.

Karamban määrittelemien profiilien perusteella voidaan todeta, että se toimii annettujen sääntöjen mukaisesti. Alapaarteen korkeus ja leveys ovat samat kuin yläpaarteella, mutta seinämäpaksuus on ohuempi. Uumasauvojen profiilin leveys on myös suurempi kuin 0,7 kertaa yläpaarteen leveys.



Kuva 17. Karamba-laskennan momenttikuvaaja.

Yläpaarteen ulokkeiden takia momentin huiput ovat lähellä ristikon tukipisteitä. Kuvassa 18 on esitetty ristikon normaalivoimien jakautuminen.



Kuva 18. Karamba-laskennan normaalivoimakuvaaja.

Ristikon yläpaarre on puristettu rakenne ja alapaarre vedetty rakenne. Uumasauvojen suurimmat normaalivoimat ovat kahdessa ensimmäisessä lähellä tukea sijaitsevassa uumasauvassa. Lähempänä harjaa olevilla uumasauvoilla normaalivoimat ovat selvästi pienemmät.

Karamba-laskennan kuvaajat täsmäävät liitteessä 1 esitettyihin Robot-mallin kuvaajiin, joten voidaan olla melko varmoja, että parametrisen laskentamalli on rakennettu oikein. Taulukossa 1 on esitetty vertailu laskentaohjelmien antamien sauvavoimien maksimiarvojen välillä.

Taulukko 1. Mitoitettavan ristikon sauvojen maksimiarvot.

M_{0.Sd}					
	Karamba		Robot		
Yläpaarre	47.49	kNm	47.37	kNm	
Alapaarre	10.41	kNm	10.49	kNm	
Uumasauvat	0	kNm	0	kNm	
N_{0.Sd}					
	Karamba		Robot		
Yläpaarre	-633.45	kN	-633.57	kN	(puristusta)
Alapaarre	637.59	kN	637.41	kN	(vetoa)
Uumasauvat	-254.23	kN	-254.44	kN	(puristusta)
	418.68	kN	419.09	kN	(vetoa)

Taulukon 1 perusteella voidaan todeta, että laskentaohjelmien sauvavoimien maksimiarvot ovat vertailukelpoisia ja eroavaisuudet ohjelmien välillä ovat alle yhden prosentin.

Laskentavertailussa halutaan myös selvittää, onko Karamba optimoinut profiilit oikein sille annettujen sääntöjen mukaan. Karamba on määrittänyt ristikolle seuraavat profiilit:

- yläpaarre: CFRHS 200 x 200 x 6
- alapaarre: CFRHS 200 x 200 x 5
- uumasauvat: CFRHS 150 x 150 x 4

Taulukossa 2 on esitetty laskentaohjelmien käyttöasteiden maksimiarvot ristikon profiileille.

Taulukko 2. Mitoitettavan ristikon käyttöasteiden vertailu.

Käyttöasteet		
	Karamba	Robot
Yläpaarre	86 %	69 %
Alapaarre	58 %	47 %
Uumasauva (vedetty)	50 %	52 %
Uumasauva (puristettu)	35 %	32 %

Etenkin ylä- ja alapaarteiden käyttöasteissa on merkittäviä eroja. Yläpaarteiden käyttöaste määräytyy ristikon 1 tapauksessa puristetun ja taivutetun rakenteen yhteisvaikutusehdon perusteella, joka lasketaan kaavan 3 mukaan (Rautaruukki 1997, 47).

$$\frac{N_{Sd}}{N_{b.Rd}} + \frac{k_y \cdot M_{y.Sd}}{M_{y.Rd}} + \frac{k_z \cdot M_{z.Sd}}{M_{z.Rd}} \quad (3)$$

missä $N_{b.Rd} = \chi_{min} \cdot \beta_A \cdot A \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$

χ_{min} on nurjahduksen pienennyskertoimen minimiarvo (y- tai z-akselin suhteen laskettuna).

$$M_{y.Rd} = W_{pl.y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad M_{z.Rd} = W_{pl.z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Poikkileikkausluokissa 1 ja 2}$$

$$M_{y.Rd} = W_{el.y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad M_{z.Rd} = W_{el.z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Poikkileikkausluokassa 3}$$

$$M_{y.Rd} = W_{eff.y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad M_{z.Rd} = W_{eff.z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Poikkileikkausluokassa 4}$$

neliön ja suorakaiteen muotoisilla putkipalkeilla

Paarresauvoihin kohdistuu myös momenttia ja näissä käyttöasteiden erot olivat suurimmat. Haluttiin selvittää, määrittelevätkö Karamba ja Robot profiileille saman poikkileikkausluokan. Karamba määrittelee yläpaarteelle

poikkileikkausluokan 3, kun taas Robot määrittelee yläpaarteelle poikkileikkausluokan 2. Tämä ero poikkileikkausluokassa johtaa siihen, että toisessa laskennassa käytetään plastisuusteorian mukaisesti laskettua taivutuskestävyyttä, kun taas toisessa laskennassa käytetään kimmoteorian mukaisesti laskettua taivutuskestävyyttä. Neliönmuotoisten putkipalkkien plastisuusteorian mukaisessa ja kimmoteorian mukaisessa taivutusvastuksessa on 15-20 %:n ero (SSAB 2016, 540–543). Myös uumasauvoille Karamba ja Robot määrittelevät eri poikkileikkausluokan, mutta koska uumasauvat ovat joko puristettuja tai vedettyjä, ei tämä aiheuta kaavan 3 tuloksessa eroja. SSAB:n rakenneputket käsikirjan mukaan rakenneputkirakenteiden liitoksissa tulisi käyttää poikkileikkausluokkaa 1 tai 2 liitoksen voimassaoloehtojen perusteella (SSAB 2016, 639). Syy, miksi ja miten Karamban poikkileikkausluokan määrittely eroaa Robotin poikkileikkausluokan määrittelystä, vaatii lisää selvitystyötä, mutta tämä on todennäköisin syy sille, miksi käyttöasteissa on niin suuri ero.

6.3 Työkalun jatkokehitys laskentavertailun perusteella

Työkalun profiilien määrittäminen on vielä melko yksinkertaistettu ja sitä on mahdollista kehittää niin, että ristikon painoa saadaan pudotettua ja ristikon kustannukset pienenevät. Tavanomaisissa ristikoissa yleensä noin 50 % koko ristikon painosta on puristuspaarteessa ja noin 30 % veto- ja puristuspaarteessa, loput 20 % jää uumasauvoille (Leskelä & Kumar 2010, 78). Suurimmat säästöt saadaan, kun optimoidaan ristikon yläpaarteen profiili oikein. Yläpaarteen optimointia varten pitää selvittää, miten Karamba määrittelee profiilien poikkileikkausluokan ja miksi se eroaa Robotin poikkileikkausluokan määrittelystä.

Ristikon uumasauvojen profiilien optimointia on vielä myös mahdollista kehittää. Tällä hetkellä työkalu määrittää jokaiselle ristikon uumasauvalle saman SHS-profiilin suurimman rasituksen perusteella. Tämä tarkoittaa sitä, että uumasauvojen profiili muodostuu lähempänä tukea sijaitsevien uumasauvojen perusteella, joihin kohdistuu suurimmat veto- ja puristusvoimat. Lähempänä ristikon harjaa sijaitsevilla uumasauvoilla veto- ja puristusvoimat ovat pienempiä ja niissä olisi mahdollista käyttää myös pienempää profiilia. Uumasauvan

leveyden suhde paarteen leveyteen tulisi silti pysyä välillä 0,7–0,8. Ratkaisuna tähän olisi antaa Karamballe lupa käyttää myös RHS-profiilia uumasauvoissa ja poistaa Karambasta sääntö, että jokaisella uumasauvalla tulee olla sama profiili. RHS-profiilia käyttämällä uumasauvan leveyden suhde paarteen leveyteen pystytään pitämään samana, mutta profiilin toinen sivu voi olla kapeampi, jolloin uumasauvojen kokonaispainoa saadaan pudotettua.

7 Johtopäätökset

Työn tavoitteena oli rakentaa parametrinen työkalu, jota voidaan käyttää apuna teräsristikon suunnittelussa. Työssä haluttiin myös selvittää parametrisen suunnittelun etuja ja haittoja verrattuna tavanomaiseen suunnitteluun sekä miten parametristä suunnittelua voidaan käyttää apuna rakennesuunnittelussa.

Työssä saatiin rakennettua parametrinen malli jolla pystytään suorittamaan teräsristikon alustava mitoituslaskenta sekä mallinnus Tekla Structures -ohjelmaan. Laskennan tuloksissa esiintyi eroja profiilien käyttöasteissa verrattuna tavanomaiseen FEM-laskentaan. Syytä käyttöasteiden eroavaisuuksiin ei pystytty tässä työssä täysin ratkaisemaan. Työssä rakennetulla parametrisella työkalulla pystytään kuitenkin saamaan suuntaa antavia tuloksia, eikä testausvaiheessa havaittu ongelmia ristikon geometrian luomisessa tai sen siirtämisessä 3D-mallinnusohjelmaan.

Työkalua on mahdollista jatkokehittää lisäämällä siihen useampia ristikkotyyppejä ja -muotoja. Myös työkalun laskentaosuudesta pystytään tekemään tarkempi poistamalla siihen tehdyt yksinkertaistukset. Valmista parametrista mallia pystytään käyttämään apuna myös täysin uusien parametristen mallien luomisessa.

Yhteenvetona työstä voidaan todeta, että parametrinen suunnittelumenetelmä soveltuu hyvin teräsristikoiden suunnitteluun. Parametrisen mallin rakentamisen jälkeen erilaisia ristikkoratkaisuja voidaan vertailla nopeasti parhaan ratkaisun löytämiseksi. Myös mahdolliset muutokset on nopea ja helppo toteuttaa parametrisen mallin avulla. Parametrista mallia käyttämällä vältetään myös mallinnuksessa helposti tapahtuvat pienet virheet ja suunnitelmista saadaan tarkempia. Parametrisen suunnittelumenetelmän hyödyt verrattuna tavanomaiseen suunnittelumenetelmään voidaan tiivistää seuraavasti:

- muutosten nopea toteutus
- erilaisten ristikkoratkaisuiden nopea vertailu
- nopea ja tarkka mallinnus.

Työssä huomattiin, että parametrisen mallin rakentaminen on melko työläs prosessi. Tietenkin suurena tekijänä tähän oli, että työtä lähdettiin tekemään ilman aikaisempaa kokemusta parametrisesta suunnittelusta. Parametrisessa suunnittelussa käytettävien ohjelmistojen opettelu vie aikaa ja suunnittelijan ajattelumallin tulee olla erilainen, kuin tavanomaisessa suunnittelussa. Näistä syistä johtuen parametrisen malliin ja etenkin sen laskentaosuuteen jouduttiin tekemään yksinkertaistuksia.

Vaikka parametrisen mallin rakentamiseen kuluu huomattavasti aikaa, sen avulla pystytään nopeuttamaan suunnitteluprosessia huomattavasti jatkossa. Tämän vuoksi parametrisella suunnittelumenetelmällä voidaan saavuttaa hyötyjä, kun sitä käytetään suunnittelun apuna rakenteissa, jotka ovat geometrialtaan monimutkaisia ja jotka toistuvat usein joko samassa hankkeessa tai eri hankkeissa.

Parametrinen malli on myös mahdollista rakentaa eri tarkkuuksilla, jonka jälkeen sitä voidaan kehittää tarpeiden mukaan. Esimerkiksi jossakin hankkeessa voi olla järkevää tehdä ainoastaan tasakorkuisen teräsristikon 3D-mallinnus parametrisesti avustettuna ja kopioida parametrisen mallin kautta saatu geometria FEM-laskentaohjelmaan ja suorittaa profiilien mitoitus ohjelmassa. Parametrisen mallin rakentaminen tässä tapauksessa vie huomattavasti vähemmän aikaa, kuin se että siihen sisällyttäisiin myös laskenta ja useita eri ristikkomuotoja. Tämän jälkeen parametrista mallia voidaan kehittää seuraavassa hankkeessa hankkeen tarpeiden mukaan, jolloin parametrisen mallin rakentamiseen kuluva aika jakautuu useamman eri hankkeen välille. Parametrista mallia rakennettaessa tulee kuitenkin pitää mielessä, että se tulee rakentaa niin, että sitä on yksinkertaista muokata tulevaisuudessa.

Lähteet

Jabi, Wassim 2013: Parametric design for architecture. Laurence King publishing, Lontoo.

Kinnunen, Jukka ym. 1992: Teräsrakenteiden suunnittelu. Rakennustieto Oy, Helsinki.

Leskelä, Matti V. & Kumar, Ranjit 2010: Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 -oppikirja. Luku 3. Teräsrakenneyhdistys ry, Helsinki.

Saarinen, Eero 2010: Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 -oppikirja. Luku 2. Teräsrakenneyhdistys ry, Helsinki.

Schumacher, Patrik 2016: The routledge companion for architecture design and practice. Luku 1. Routledge, New York.

SFS-EN 1993-1-1 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 1993-1-3 + AC 2006. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 1993-1-8 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Suomen Standardisoimisliitto.

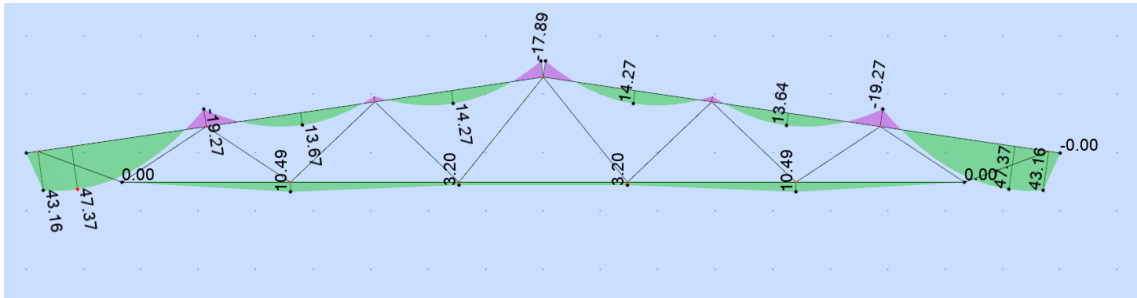
SSAB Domex tube structural hollow sections 2016. SSAB Europe Oy, Hämeenlinna.

Sung, Woojae 2010: Grasshopper learning material. Osoitteessa: <https://woosung.com/>. Viitattu 15.04.2022.

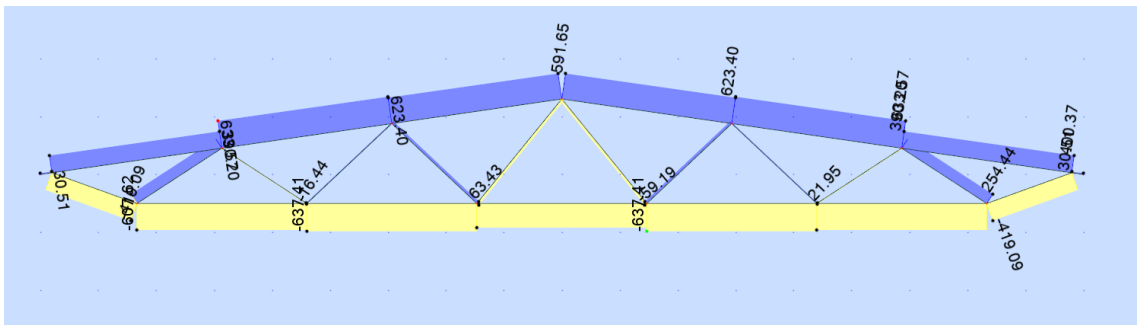
Tanska, Tuulikki & Österlund, Toni 2014: Algoritmit puurakenteissa. DigiWoodLab, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin tiedekunta.

Rautaruukki 1997: Rautaruukin putkipalkki käsikirja. Rautaruukki Oy, Hämeenlinna.

Robot-laskennan tulokset




Kuva 19. Robot momenttivoimakuvaja.



Kuva 20. Robot normaalivoimakuvaja.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020 Author: Address:	File: K-ristikko.rtd Project: K-ristikko
---	--

S355 (S355) $f_y = 355.00$ MPa




SECTION PARAMETERS: RRHS 150x150x4

h=15.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=15.0 cm	Ay=11.45 cm ²	Az=11.45 cm ²	Ax=22.90 cm ²
tw=0.4 cm	Iy=808.00 cm ⁴	Iz=808.00 cm ⁴	Ix=1260.00 cm ⁴
tf=0.4 cm	Wely=107.73 cm ³	Welz=107.73 cm ³	



INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:
N,Ed = 254.44 kN
Nc,Rd = 812.95 kN
Nb,Rd = 784.14 kN

Class of section = 3



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:

<div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;">  <div style="margin-left: 5px;">About y axis:</div> </div> <p>Ly = 1.75 m Lam_y = 0.27 Lcr,y = 1.22 m Xy = 0.96 Lamy = 20.61</p>	<div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;">  <div style="margin-left: 5px;">About z axis:</div> </div> <p>Lz = 1.75 m Lam_z = 0.27 Lcr,z = 1.22 m Xz = 0.96 Lamz = 20.61</p>
---	---

VERIFICATION FORMULAS:
Section strength check:
N,Ed/Nc,Rd = 0.31 < 1.00 (6.2.4.(1))
Global stability check of member:
Lambda,y = 20.61 < Lambda,max = 210.00 Lambda,z = 20.61 < Lambda,max = 210.00 STABLE
N,Ed/Nb,Rd = 0.32 < 1.00 (6.3.1.1.(1))

Section OK !!!

Date : 26/05/22	Page : 3
-----------------	----------

Kuva 24. Robot-laskennan tulokset puristetulle uumasauvalle.