



# Teräsrakenteiden parametrisen ja generatiivinen suunnittelu

Atte Hämäläinen

OPINNÄYTETYÖ  
Kesäkuu 2023

Insinööri (ylempi AMK)  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Insinööri (ylempi AMK)

HÄMÄLÄINEN, ATTE:

Teräsrakenteiden parametrinen ja generatiivinen suunnittelu

Opinnäytetyö 52 sivua  
Kesäkuu 2023

---

Opinnäytetyössä tarkastellaan parametrisen ja generatiivisen suunnittelun hyödyntämistä teräsrakennesuunnittelussa. Tutkimuksen tilaajana toimi Sitowise Oy. Tutkimuksessa kehitettiin laskentatyökalu, joka mahdollistaa korjausrakentamisessa kiinteistön vesikatolle rakennettavan IV-konehuonehuoneen teräsrungon mitoituksen liitoksineen. Laskentatyökalun rakenteen suunnittelussa pyrittiin luomaan pohja jatkokehitykselle ja visuaalisen ohjelmoinnin muuntojoustavuudelle. Laskentatyökalu toteutettiin ainoastaan työn tilaajalle, joten sen toiminta kokonaisuutena on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Laskentatyökalun algoritmin avulla voidaan paikka- ja geometriatietojen perusteella analysoida teräsrunkoiseen IV-konehuoneeseen kohdistuvia rasituksia ja muodonmuutoksia. Tutkimuksessa käytettiin Rhinoceros 3D -ohjelmaa ja sen visuaalisen ohjelmoinnin lisäosaa Grasshopper 3D:tä laskentatyökalun kehittämiseen. Teräsrakenteiden rakenneanalyysissä käytettiin Karamba3D-nimistä lisäpakettia Grasshopper 3D:lle. Liitosmitoitukset toteutettiin käyttäen olemassa olevia Microsoft Excel -taulukkolaskentapohjia, joihin kuormitustiedot siirrettiin Grasshopper 3D:stä.

Opinnäytetyössä tarkastellaan parametrista ja generatiivista suunnittelua käsitteellisinä lähestymistapoina. Lisäksi työssä tarkastellaan näiden suunnittelutapojen käytöstä johtuvia etuja ja haittoja rakennesuunnittelussa. Työssä käsitellään myös lyhyesti teräsrakenteita ja niiden liitosten mitoitusta yleisellä tasolla.

Tutkimuksessa suoritettiin laskentatyökalun testaus koetilanteessa, koska sopivaa projektityötä ei ollut saatavilla tutkimuksen aikana. Laskentatyökalun suorituskykyä vertailtiin toisen suunnittelijan tekemän vertailulaskennan avulla ja näiden tulosten perusteella voitiin todeta laskentatyökalun antamien tulosten olevan luotettavia. Jatkokehityksen myötä laskentatyökaluun voidaan lisätä uusia geometrioita, liitostyyppisiä ja teräsprofiileja, mikä lisää sen potentiaalia saavuttaa laajempia hyötyjä.

---

Asiasanat: algoritmi, parametri, rakenne, skripti, teräs

## **ABSTRACT**

Tampere University of Applied Sciences  
Master's Degree Programme in Civil Engineering

HÄMÄLÄINEN, ATTE:  
Parametric and Generative Design of Steel Structures

Master of Science thesis 52 pages  
May 2023

---

This master's thesis examines the utilization of parametric and generative design in structural engineering, particularly in the context of steel structures. The study was commissioned by Sitowise Oy. The primary objective of this thesis was to develop a parametric analysis model that enables structural analysis of steel structures and joints. The focus of the parametric model was on the design of HVAC machinery room structures, which are commonly encountered in renovation projects. The structure of the parametric model was designed in a way that allows for future development for larger-scale steel structures.

In this thesis, a successful algorithm was developed for the parametric analysis model of the steel structure in HVAC machinery rooms. The algorithm can analyze and optimize the steel structure and joints based on provided geometry and location data. The geometry was specifically tailored for smaller steel structures that do not rely on sway bracing. The parametric model was created using Rhinoceros 3D CAD software, along with its visual programming add-on, Grasshopper 3D. The analysis of the steel structure was performed using the Karamba3D add-on in Grasshopper 3D. Joint analysis was conducted using Microsoft Excel spreadsheets by transferring the analysis data from Grasshopper to Excel.

This master's thesis examines the conceptual approaches of parametric and generative design. It explores the benefits and potential disadvantages associated with the application of these design methods in structural engineering. Additionally, the thesis provides a brief overview of steel structures and general considerations for connection dimensioning.

The parametric analysis model was tested in an arbitrary situation, as no real project work was available for testing. An independent analysis was conducted to validate the results obtained from the parametric model. To further enhance the parametric model, additional steel profiles and joint types can be incorporated, thereby expanding its range of applications.

---

Key words: algorithm, parameter, script, steel, structure

## SISÄLLYS

1	Johdanto .....	6
1.1	Tausta .....	6
1.2	Tavoitteet .....	7
1.3	Suoritus .....	7
1.4	Rajaus .....	9
2	Parametrinen ja generatiivinen rakennesuunnittelu .....	11
2.1	Algoritmit .....	12
2.1.1	Parametrinen suunnittelu .....	13
2.1.2	Generatiivinen suunnittelu .....	16
2.1.3	Hyödyntäminen rakennesuunnittelussa .....	17
2.2	Teräsrakenteet .....	20
2.2.1	Kehärakenteiden luokittelu .....	22
2.2.2	Liitosten luokittelu .....	23
3	Parametrinen laskentatyökalu .....	26
3.1	Parametrisointi teräsrakennesuunnittelussa .....	28
3.1.1	Tietomallinnuksen parametrisointi .....	40
4	Toiminta ja vertailulaskelmat .....	42
5	Pohdinta .....	47
5.1	Tulosten saavuttaminen .....	47
5.2	Johtopäätökset ja jatkotutkimus .....	47
	LÄHTEET .....	50

**LYHENTEET JA TERMIT**

AAD	<i>Algorithms-Aided Design</i> , algoritmiavusteinen suunnittelu. Yleisnimi suunnittelumenetelmille, jotka hyödyntävät algoritmeja.
BIM	<i>Building Information Modelling</i> , rakennustietomallintaminen.
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> , tietokoneavusteinen suunnittelu.
FEM	<i>Finite element method</i> , elementtimenetelmä. Numeerinen ratkaisumenetelmä, jota voidaan soveltaa lujuuslaskelmissa.
Algoritmi	Sarja yksityiskohtaisesti määriteltyjä tehtäviä.
Parametri	Algoritmissa toimiva yksittäinen muuttuja.
Visuaalinen skriptaus	Visuaalisten ohjelmakomponenttien avulla luotu algoritmi.

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Rakentamisen monimuotoisuus ja vastuullisuus kasvaa Suomessa kiihtyvää vauhtia, jonka seurauksena myös suunnittelutyön haastavuus ja kilpailu kovenee jatkuvasti. Suunnittelulta vaaditaan toinen toistaan vaativampia rakenneratkaisuja sekä vaihtoehtoisia ratkaisuja kustannustehokkaimman, ekologisimman ja vastuullisimman rakenteen valintaan. Suomen ulkopuolella monikansallisten arkkitehtiyrietykset kuten Arup Group Ltd. käytössä olevaa parametristä ja generatiivista suunnittelua on alettu lähivuosien aikana hyödyntämään ja tutkimaan enemmän Suomessa. Parametrisen suunnittelun avulla voidaan käytännössä käsittelemään moninkertaisesti erilaisia rakenneratkaisuja samassa ajassa kuin perussuunnittelulla saadaan yksi rakenneratkaisu selvitettyä. Parametrisen ja generatiivisen suunnittelun avulla pystytään oikeiden raja-arvojen määrittelyllä saamaan suuri määrä haluttuja ratkaisuja, joiden vertailu ja visualisointi nopeuttaa suunnittelutyötä koko projektihenkilöstön kesken ja auttaa työn tilaajaa visualisoimaan rakenteita paremmin ennen varsinaista toteutusta.

Kasvava kilpailu pakottaa suunnittelualan yritykset kehittämään ja tehostamaan omaa toimintaansa, jossa parametrinen ja generatiivinen suunnittelu voi toimia tehokkaana työkaluna. Kuitenkin tämän kaltaisten työkalujen kehitykseen ja toteuttamiseen kuluu todella paljon aikaa, joten on tärkeää ensimmäisenä pohtia minkälaisessa käytössä parametrinen ja/tai generatiivinen suunnittelutyökalun tuottaa etua yritykselle. Usein tämän kaltaiset osa-alueet ovat rakenteita, jotka toistuvat usein yrityksen työkannassa. Tämän kaltaisia voivat olla esimerkiksi eri materiaaleista valmistetut pilari-palkkirakenteet, ristikkorakenteet, rakennuksen jäykkyystarkastelut tai monimuotoiset laattarakenteet. Parametrisen ja/tai generatiivisen laskentatyökalun laadinta ei ole usein kannattavaa kertaluontoiseen suunnittelutehtävään.

## 1.2 Tavoitteet

Tutkimuksen päätavoitteena on luoda parametrinen laskentatyökalu teräsrakenteiden suunnitteluun, jonka rakenne mahdollistaa jatkokehitys ja laajentamismahdollisuudet. Tutkimuksen työkalun tavoitteena on pystyä tarkastelemaan teräsrakenteiden liitoksista ja teräsprofiileista mahdollisimman monia eri ratkaisuvaihtoehtoja sekä mitoittaa ja mallintaa rakenteen saman algoritmin avulla. Laskentatyökalun tavoitteena on luoda pohja teräsrakenteisen hallirakennuksen teräsrungon kokonaissuunnittelulle pienemmässä mittakaavassa.

## 1.3 Suoritus

Tämän tutkimuksen yhteydessä parametrinen suunnittelun hyödyntämisestä rakennesuunnittelussa Suomessa löydettiin suomenkielisestä kirjallisuudesta alle 5 kohdetta. Tutkimuksen lähdekirjallisuuden hakusanoina käytettiin muun muassa:

- "Parametrinen suunnittelu"
- "Teräsrakenteiden suunnittelu"
- "Parametrinen" AND "Rakenne"
- "Grasshopper" AND "Rakenne"
- "Parametric design" AND "Steel structures" AND "grasshopper"
- "Automatic structural design by a set-based parametric design method"
- (Parametric OR generative) design AND "steel structures"
- Parametric design AND "steel structures"
- "Steel structure" AND (parametric or generative)

Tutkimuksessa käsitellään minkälaisia etuja parametrisella ja generatiivisella suunnittelulla pystytään saavuttamaan rakennesuunnittelussa ja minkälaisissa tilanteissa näillä saavutetaan toiminnallisia, taloudellisia, ajanhallinnallisia ja/tai kestävän kehityksen hyötyjä. Rakennesuunnittelussa parametreja tulee huomattavan paljon pelkästään Eurokoodin mukaisista määräyksistä, jonka takia taloudellisen ja ajanhallinnallisen hyödyn saavuttaminen voi olla hyvin haastavaa useissa tilanteissa. Tutkimuksessa käsitellään myös käytännöllisyyden ja taloudellisen näkökulman rajaa, joka usein on ratkaisevana kysymyksenä, onko kannattavaa

lähteä laatimaan suhteellisen raskasta ja aikaa vievää laskentamallia. Kannattavuus on suorittavan yrityksen osalta sidonnainen laskentamallin takaisinmaksu-aikaan ja sen hyödynnettävyyteen sekä muuntojoustavuuteen tulevaisuudessa.

Tässä tutkimuksessa on käsitelty parametrisen ja generatiivisen suunnittelun hyödyntämistä rakennesuunnittelussa ja syvennytty teräsrakennesuunnitteluun. Tutkimuksessa on käytetty esimerkkinä mitoitusteknisesti yksinkertaista kiinteistön vesikatolle rakennettavaa IV-konehuoneen teräsrunkoa, jolloin tutkimus on pystytty rajaamaan riittävän tarkasti käsittelemään yleisiä ongelmia ja hyötyjä parametrisestä ja generatiivisesta suunnittelusta rakennesuunnittelun työkaluna. IV-konehuoneen teräsrungolle tulevat ulkopuoliset rasitukset ovat yleisesti hyvin pieniä, jonka ansiosta liitos- ja kehämitoitus on pystytty vertailemaan ja tarkastamaan jo olemassa olevilla työkaluilla.

Tutkimuksessa on käsitelty ohjelmistojen yhteensopivuuden rajoituksia ja etuja. Ohjelmistojen välillä on osittain valmiita linkkejä, jotka avustavat tiedonsiirtoa ja mahdollistavat käyttäjien vapaamman toiminnan. Yleisesti ottaen yksinkertainen tiedonsiirto onnistuu ohjelmistojen välillä, mutta tämän tutkimuksen perusteella tarkempi ja yksityiskohtaisempi tiedonsiirto edellyttäisi ohjelmistokoodauksen käyttöä.

Tutkimuksessa on luotu laskentatyökalu, jolla voidaan parametrisesti suunnitella IV-konehuoneen teräsrungon mitoitus liitoksineen. Laskentatyökalun rakenteessa on pyritty mahdollistamaan tulevaisuuden kehitystarpeet ja sekä muuntojoustavuus. Eurokoodin mukaiset vaatimukset, profiilikirjastot, liitostyypit ja geometria rajaukset on eritelty toisistaan, joka mahdollistaa tulevaisuudessa yhden tai useamman osa-alueen poistamisen tai merkittävän muokkauksen. Toimintavalla haluttu etu on taloudellinen ja ajankäyttölinen hyöty työkalun jatkokehitykseen ja käyttöön projektityössä.



## 1.4 Rajaus

Tutkimuksessa käsitellään esimerkkinä teräsrakenteisen IV-konehuonehuoneen teräsrunkoa, jolle annetaan suuri määrä rajoituksia tutkimuslaajuuden selkeyttämiseksi. Tutkimuksessa teräsprofiilit on rajattu yleisesti korjausrakentamisessa käytettäviin profiileihin. Käytettävät teräsprofiilit ovat HEA-, RHS-, SHS- ja IPE-profiilit. Kehät rajataan kahteen erilaiseen kehärakenteeseen. Yksi mitoitettava kehä on rakenteen päätykehät, joissa tuulikuormien aiheuttavat vaakavoimat huomioidaan profiilien ja liitosten mitoituksessa. Rakenteen keskikehät ovat toisiaan vastaavat, joka rajoittaa huomattavasti saatavien rakenneratkaisuiden määrää. Kehärakenteen profiilit on rajattu vastaamaan toisiaan, jotta ratkaisuvaihtoehdot pysyvät hallittuna. Laskentatyökalussa kehien geometria on laadittu mahdollistamaan kehärakenteen jakamisen tarvittaessa esimerkiksi pilareihin ja kattoristikoihin lyhyellä toimenpiteellä. Tällä toimintatavalla tavoitteena on mahdollistaa laskentatyökalun toimivuus myös isommissa hallirakenteissa.

Liitosmitoitus on rajattu 3 erilaiseen liitokseen. Käytettävänä on 2 erilaista pulttiliitosta sekä hitsausliitos. Valinnat pohjautuvat käytössä oleviin Tekla Structures -ohjelman valmiisiin liitostyyppisiin, jolla mahdollistetaan parametrinen- ja generatiivisen suunnittelun yhdistämistä tietomallinnukseen. Liitosmitoituksen osuus on pyritty laatimaan helposti skaalattavaksi jatkokehitystä varten. Rajaukset on laadittu tutkimuksessa käytettäviin ohjelmistoihin, joten samoja parametrejä ei voida käyttää, jos käytettäviä ohjelmistoja vaihdetaan. Ohjelmistokoodaus on myös rajattu pois tästä tutkimuksesta. Ohjelmistokoodausta käsitellään kappaleessa 5.

Teräsrakenteiden liitosmitoituksen teoria on rajattu tutkimuksesta pois, koska tästä löytyy jo paljon kirjallisuutta ja tutkimuksia. Yleisesti teräsrakenteiden liitosmitoituksesta löytyy kattavasti tietoa Eurokoodista sekä insinööritöissä, esimerkiksi Hokkanen (2014) ja Puotunen (2019) käsittelevät teräsrakenteiden toimintaa sekä liitostyyppijä- ja mitoituksia. Tutkimuksen laskentatyökalussa käytetyt liitosmitoitukset on laadittu osittain olemassa olevien laskentapohjien avulla.

Teräsrakenteiden palomitoitus on rajattu täysin pois tästä tutkimuksesta. Palomitoitus tulee tehdä erikseen laskentatyökalusta saatavan FEM-laskentamallin avulla.

Rajauksessa huomioidaan myös rakenteen geometria, jotta tutkimuksen toteuttavuus pysyy hallittuna. Kehien jänneväleille ja kehäjaolle on määritetty raja-arvot, joilla saadaan myös rajattua vinojäykisteiden tarve pois tutkimuksesta. Yläpohjarakenteeksi on valittu käytettäväksi vaihtoehtoisiksi joko pulpetti- tai harjakatto.

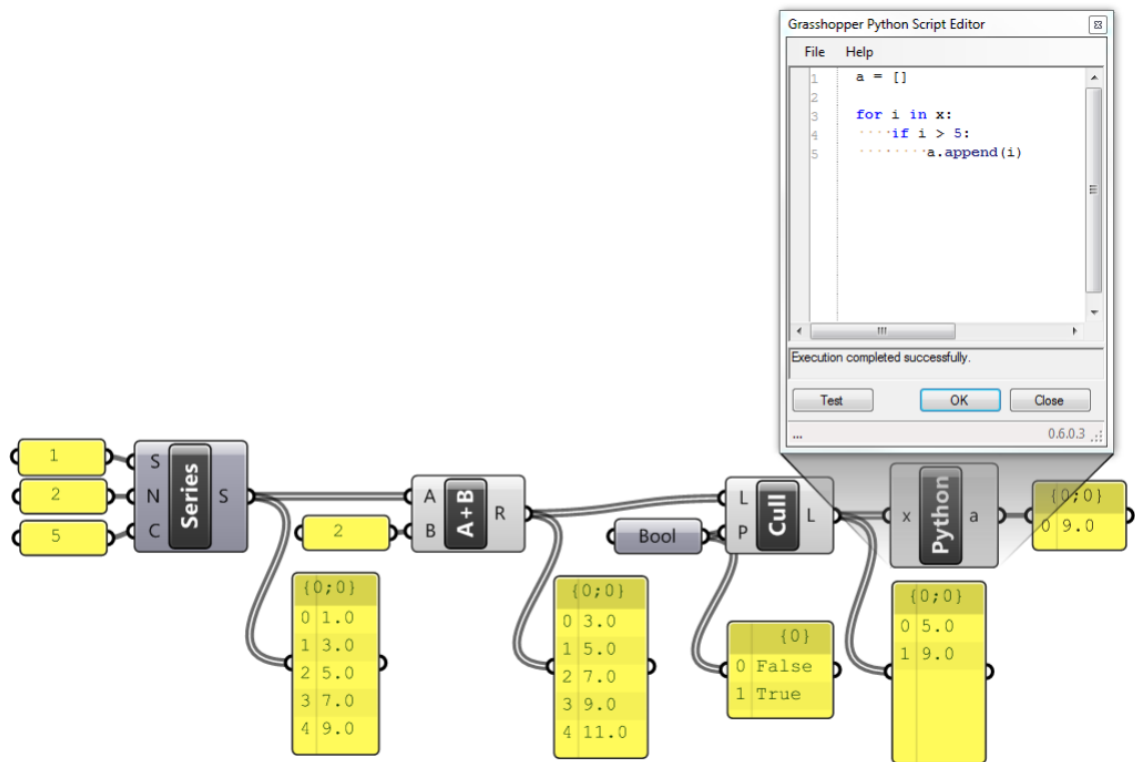
## 2 Parametrinen ja generatiivinen rakennesuunnittelu

Perinteisiä suunnitteluprosesseja voidaan kuvata tietoisiksi kokeiluprosesseiksi: Muodolliset ratkaisuhypoteesit luodaan, testataan (piirustuksissa ja malleissa) ja hylätään tai niitä korjataan, kunnes suunnittelija on tyytyväinen tulokseen. Tämä tarkoittaa, että hypoteeseja on vähän ja niillä on hyvin rajoitettu määrä iteraatioita, jotka suunnittelija pystyy tietoisesti käymään läpi optimoidakseen alkuperäiset suunnitteluideat. (Cruz, Arcipreste, Pinheiro & Ribas 2021).

Parametrinen ja generatiivinen suunnittelu ovat molemmat algoritmiavusteista suunnittelua (*Algorithms-Aided Design, AAD*), jotka toimivat tietokoneavusteisesti ja varsinkin generatiivisessa suunnittelussa korostuu ohjelmoinnin tarve luoda useita toteutuskelpoisia ratkaisuja käyttäjän määrittämien parametrien ja algoritmien avulla. Näillä tavoilla suunnittelu työn tehokkuutta, joustavuutta ja luotettavuutta pystytään tehostamaan huomattavasti verrattuna perinteisiin suunnittelutapoihin verrattuna, jossa pystytään tarkastelemaan vain yksi ratkaisuvaihtoehto kerrallaan. (Ajouz 2021).

Parametri on lukuarvo, muuttuja tai määre, joka ohjaa ja informoi suunniteltavan algoritmisen prosessin osaa. Parametri voi olla asetettu määrittelemään esimerkiksi rakennuksen kerroskorkeutta tai ulkomittoja. Parametri voi olla myös ympäristömuuttuja, kuten aurinkokulma tai tuulen suunta, tai jopa erillisen analyysialgoritmin tulos (Tanska & Österlund 2014).

Parametrinen malli luodaan visuaalisella ohjelmoinnilla, joita hyödyntäviä ohjelmia on monia erilaisia. Kuvassa 1 esitetty esimerkki visuaalisesti ohjelmoinnista. Tutkimuksessa käytetyn lähdekirjallisuuden perusteella rakennesuunnitteluun Suomessa tällä hetkellä käytetään yleisesti Autodesk Dynamo (Autodesk Revit plugin) ja McNeel Grasshopperia (Rhinoceros3D plugin). Visuaalinen skriptaus perustuu tekstimuotoisen ohjelmakoodin kirjoittamisen sijaan visuaalisten ohjelma komponenttien linkittämiseen siten, että suorituksen aikana syntyvä tieto kulkee linkkejä pitkin komponentilta toiselle. Jokainen komponentti suorittaa tietyn funktion ja yhdessä ne määrittelevät algoritmisen prosessin. Parametrin mallintamisen toiminta perustuu visuaaliselle skriptaukselle (Tanska & Österlund 2014).



Kuva 1. Esimerkki visuaalisesta ohjelmoinnista Grasshopper-ympäristössä. (Lalla 2017).

Parametrinen ja generatiivinen suunnittelu on ollut jo pidempään käytössä arkkitehtisuunnittelussa ja muotoilussa, jossa näillä tarkoitetaan lähinnä sopivan muodon etsimistä käyttäen parametrisia ja generatiivisia menetelmiä. Vasta lähivuosien aikana parametrista ja generatiivista suunnittelua on alettu hyödyntämään rakennesuunnittelussa, jossa suunnitellaan rakenteiden toimivuutta yksilönä ja kokonaisuutena. Eroavaisuus arkkitehtisuunnitteluun ja muotoiluun on huomattava, jossa parametreilla halutaan rajoittaa visuaalisia elementtejä, kun vastavasti rakennesuunnittelussa parametreilla voidaan haluta rajoittaa esimerkiksi materiaaleja, sijaintia, terveellisyttä, turvallisuutta ja vastuullisuutta. (Lalla 2017).

## 2.1 Algoritmit

Algoritmi on sarja yksityiskohtaisesti määriteltyjä tehtäviä, jotka on luotu tietyn päämäärän saavuttamiseksi päättyvässä prosessissa. Algoritminen prosessi voidaan suorittaa tietokoneen avulla aina tarkalleen annettujen sääntöjen mukaan ja niiden määräämässä järjestyksessä (Tanska & Österlund 2014). Algoritmi luodaan tietyn päämäärän saavuttamiseksi, kuvaamalla siihen johtavat osatehtävät

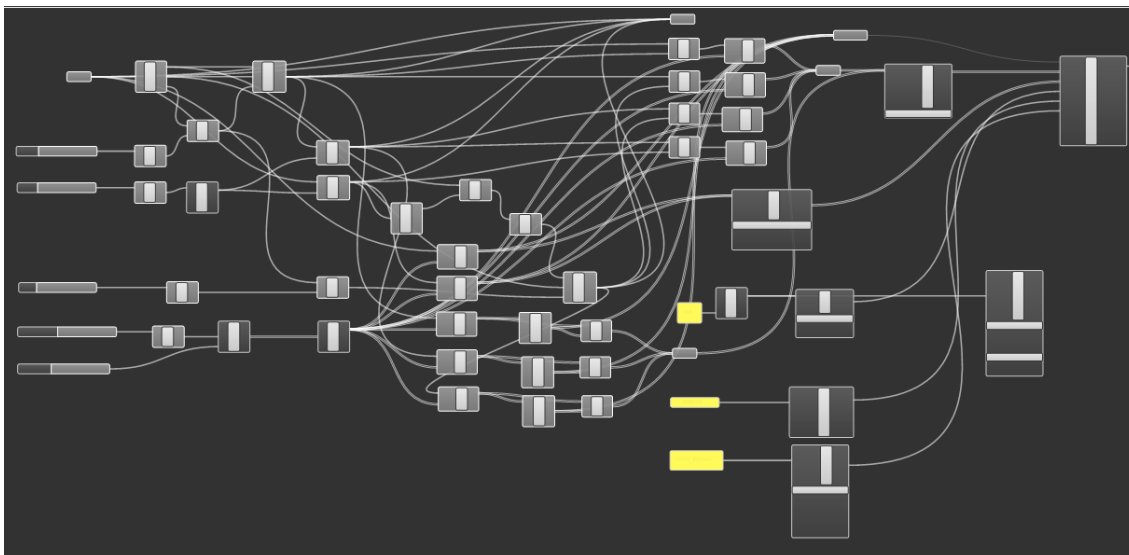
tarkasti ja yksiselitteisesti. Mikäli algoritmin lähtöarvoja tai sen perusrakennetta ei muuteta, on saavutettu lopputulos aina sama jokaisella suorituskerralla. Algoritmeihin perustuva prosessi kykenee tarkkailemaan ja evaluoimaan suoritustaan ja siten myös ohjaamaan toimintaansa yksinkertaisten *if-then-else* -määrittelyjen mukaisesti (Tanska & Österlund 2014). Toimivan algoritmin tulee toteuttaa seuraavat ehdot:

1. Algoritmille tulee antaa ulkoinen syöte.
2. Algoritmilla pitää olla tulos.
3. Jokaisen ohjeen tulee olla yksiselitteinen.
4. Algoritmin tulee olla päätyvä.
5. Jokaisen ohjeen on oltava toteuttamiskelpoinen (Horowitz & Sahni 1978).

Toistuvassa ja lopputulokseltaan tarkentuvassa eli iteroituvassa prosessissa algoritmi suoritetaan joko määrätyn monta kertaa tai kunnes algoritmin tarkentamassa tuloksessa saavutetaan tietty raja-arvo tai haluttu lopputulos. Yhtä algoritmin suorituskertaa alusta loppuun kutsutaan iteraatioksi, jolloin edellisen iteraation lopputulosta käytetään seuraavan suorituskerran lähtökohtana (Tanska & Österlund 2014).

### **2.1.1 Parametrinen suunnittelu**

Parametrisessa suunnittelussa algoritmille annetaan tarkat parametrit, joiden avulla algoritmin ratkaisuna saadaan parametrien mukainen yksiselitteinen tulos. Jos algoritmille annetaan parametrejä, jotka eivät ole yksiselitteisiä algoritmista ei saada ratkaisua. (Davis, 2013). Parametrinen suunnittelu mahdollistaa suunnittelijan muokkaamaan rakennetta reaaliaikaisesti sekä uudelleen käyttämään ja tallentamaan luotuja algoritmielementtejä toisissa laskentamalleissa. (Ajouz 2021). Kuvassa 2 havainnollistetaan algoritmielementtien ja parametrien mallintamista Grasshopperissa.



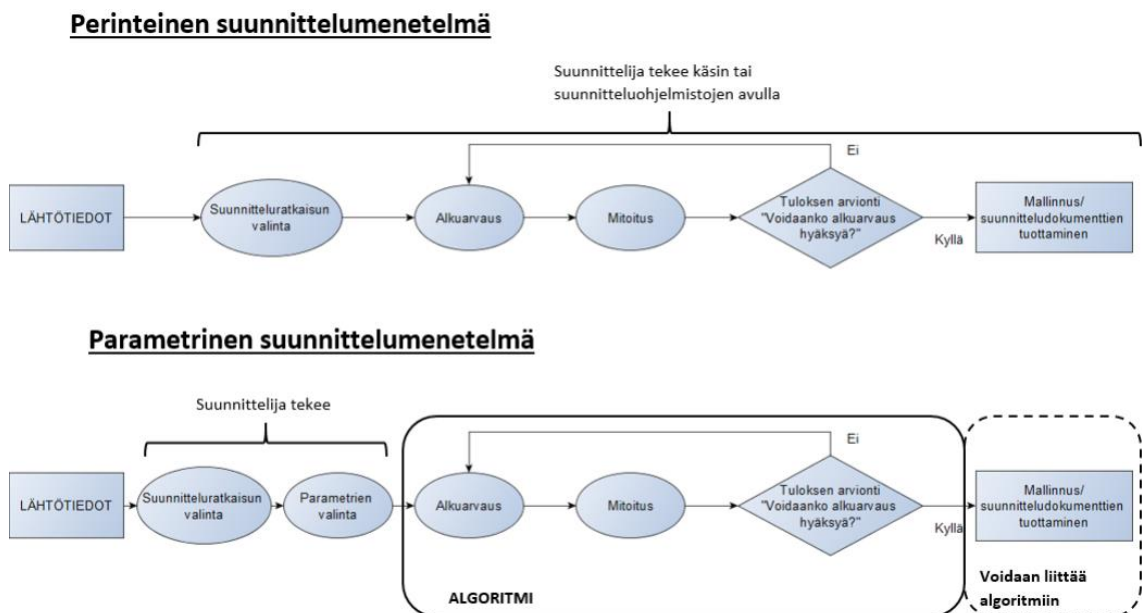
Kuva 2. Parametrinen mallintaminen Grasshopper -ympäristössä.

Parametrinen suunnittelu vaatii riittävän määrän rajoitteita, jotta algoritmi pystyy ratkaisemaan ongelman, jonka seurauksena yhtenä ongelmana parametriseissa suunnittelussa on liian suuri määrä rajoitteita. Liian suuri määrä rajoitteita voi joissain tilanteissa mahdollisesti hidastaa suunnittelutyötä ja kasvattaa rakennuskustannuksia. Tilanteissa, jossa valmiiseen parametriseen laskentamalliin lisätään uusia algoritmeja toimimaan olemassa olevan rinnalla, voi alkuperäiset ja uudet parametrit olla risteäviä sisällöltään, joka estää algoritmin toimivuuden. (Horowitz & Sahni 1978).

Pienemmissä laskentamalleissa virheen korjaaminen ja löytäminen on usein helppoa ja nopeaa, mutta isompien laskentamallien osalta virheen korjaus ja löytäminen voi viedä todella paljon aikaa. Huonoimmassa tilanteessa parametrien ristiriitaisuudet ovat niin merkittäviä, että alkuperäinen algoritmi joudutaan uudelleen kirjoittamaan kokonaisuudessaan ja yhdistämään uudet parametrit toimimaan alkuperäisen algoritmin sisällä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että alkuperäisestä eikä uudesta algoritmista ole suoranaisesti hyötyä yhdessä vaan näiden pohjalta luodaan uusi algoritmi, joka toteuttaa yhdistettyjen parametrien avulla ratkaisun. Toola (2017) on esittänyt omassa insinööriytössään ongelman, joka tähän liittyen kohdattiin. Toola (2017) esitti asian seuraavasti ”Visuaalisessa skriptauksessa algoritmin luettavuus ja selkeys ovat yksi tärkeimmistä asioista, jotta siihen voidaan tehdä muutoksia vielä myöhemmin. Algoritmia on myös vaikea lukea, jos

se ei ole selkeä ja toisen tekemää algoritmia voi olla vaikea tulkita. Esimerkkita-pauksessa havaittiin ongelma, jossa lähes koko algoritmi jouduttiin tekemään Grasshopperilla uudestaan, koska koodista ei pystynyt lukemaan yksiselitteisesti mitä siinä tapahtuu. Tämän lisäksi algoritmin muutoskyky heikkenee, jos se on vaikeasti ymmärrettävä, eikä muutoksen aiheuttamasta vaikutuksesta ole varmuutta.” (Toola 2017). Tämän perusteella voidaan todeta, että parametrisen mal-lin suunnitteluun on hyvä käyttää aikaa, jotta se olisi kannattavaa. (Toola 2017).

Varsinkin suurempien hankkeiden osalta, jossa ratkaisuvaihtoehtoja voi olla useita tai on suuri mahdollisuus merkittäviin rakenneratkaisujen muutokseen, saavutetaan parametrisella suunnittelulla huomattava etu. Parametrinen suunnit-telu mahdollistaa nopeaa muutosten tarkastelua, joka aikaisemmin esitetyn mu-kaisesti muokkaa kokonaisuutta reaaliaikaisesti huomioiden kokonaisuuden pa-rametrien ja rajausten mukaisesti. Tämä mahdollistaa ajankäytöllisen hyödyn, ku-ten kuvassa 3 esitetty. Parametrisella suunnittelulla voidaan saavuttaa jo luon-nossuunnitteluvaiheessa monia eri toimivia rakenneratkaisuja arkkitehtivaati-muksien mukaisesti. (Lalla 2017).



Kuva 3. Perinteisen ja parametrisen suunnitteluprosessin ero (Lalla 2017).

Usein luonnossuunnitteluvaiheessa rakennesuunnittelussa tarkastellaan karkeasti rakenneratkaisuja, mutta kokonaisuutta ei tarkastella detaljitasolla. Algoritmiavusteisella suunnittelulla saavutetaan jopa detaljitason mitoitustarkkuus jo

luonnossuunnitteluvaiheessa oikein tehtynä. Taloudelliset ongelmat voivat kuitenkin johtaa siihen, että luonnossuunnitteluvaiheessa tilaaja ei halua sitoa konsulttiyritystä suoraan toteutussuunnitteluvaiheeseen asti, joka käytännössä sulkee algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntämisen pois, koska luonnossuunnitteluvaiheen tarkastelut ovat todennäköisimmin tällä hetkellä nopeampi tarkastella perinteisillä suunnittelumenetelmillä. (Lalla 2017). Algoritmiavusteisen suunnittelun yleistyessä kuitenkin eri suunnittelualan yrityksillä tullaan luomaan valmiita parametrisiä laskentamalleja erilaisiin hankkeisiin, mutta tämän tutkimustyön kirjoitushetkellä rakennesuunnittelun osalta ei havaittu lähdekirjallisuudesta tämän kaltaisia laskentamallikirjastoja.

### **2.1.2 Generatiivinen suunnittelu**

Generatiivinen suunnittelu on sääntöihin perustuva iteratiivinen suunnitteluprosessi (Meintjes 2017). Se perustuu algoritmeihin ja parametrinen mallinnus, jonka avulla voidaan automaattisesti tutkia, iteroida ja optimoida suunnittelumahdollisuuksia määrittelemällä korkean tason rajoituksia ja tavoitteita (Nagy & Villaggi 2020). Shea (Shea, Aish & Gourtovaia 2005) totesi, että generatiivisen suunnittelun tavoite on "tutkia luovia ja rakennettavia malleja luomalla uusia suunnitteluprosesseja käyttämällä viimeisintä laskentateho- ja tuotantopotentiaalia". Tietokoneiden laskentatehon kehittymisen ja tutkijoiden sekä toimijoiden kasvavan kiinnostuksen johdosta, generatiivisesta suunnittelusta on tullut uusi älykäs suunnittelun lähestymistapaa ja sitä on tutkittu ja sovellettu monilla aloilla akateemisesti ja käytännössä Shean mukaan. (Ma, Wang, Wang, Xiang & Sun 2021).

Generatiivisen suunnittelun tehokkain ominaisuus on automaattisesti tutkia ja iteroida suunnittelu mahdollisuuksia ja muuttaa parhaat ratkaisut ihmisuunnittelijoille päätöksentekoon (Singh & Gu 2012). Tämä tilanne realisoituu yleensä luonnossuunnitteluvaiheessa, jossa generatiivisella suunnittelulla saadaan ratkaisuja, jota CAD-sovellukset eivät pysty antamaan (Krish 2011). Generatiivinen suunnittelu voi tutkia suunnittelumahdollisuuksia kaikentyypisiin rakennusalan suunnitelmiin (esim. arkkitehtisuunnittelu, rakennesuunnittelu, sisustussuunnittelu tai kaupunkisuunnittelu) luonnossuunnitteluvaiheessa. Tämän johdosta on erittäin hyödyllistä ottaa generatiivinen suunnittelu käyttöön rakennusalan suunnittelun varhaisessa suunnitteluvaiheessa (Ma, Wang, Wang, Xiang & Sun 2021).

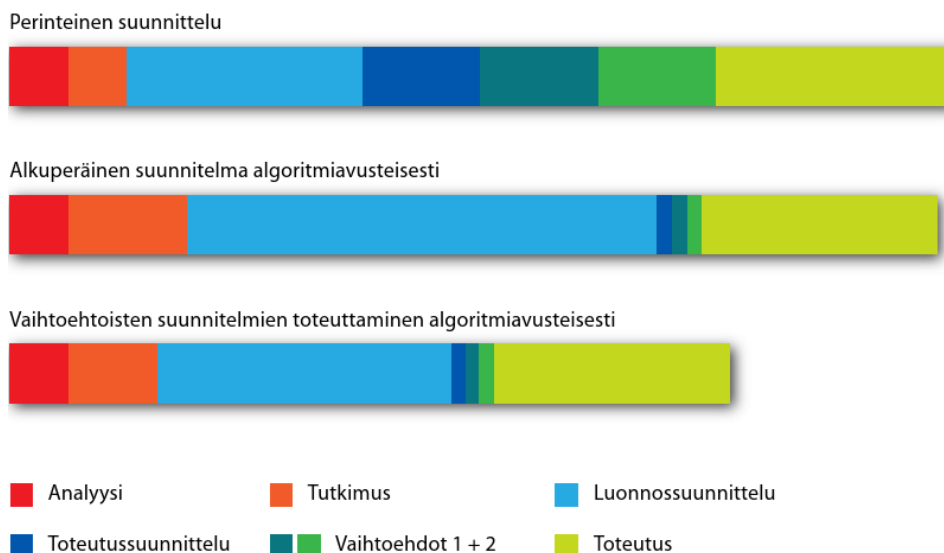


Generatiivisille suunnittelulla on pyritty lähinnä hakemaan muotoja ja täyttämään visuaalisia vaateita. (Lalla 2017). Maailmalla on yleisesti lähivuosina on alkanut syntyä enemmän keskustelua vastuullisuudesta ja ympäristöasioista, jotka vaikuttavat läheisesti rakentamiseen kaikilta osin. (Lommi 2021).

### **2.1.3 Hyödyntäminen rakennesuunnittelussa**

Yleisinä käsitteinä parametrinen ja generatiivinen suunnittelu voidaan mieltää molemmat parametriseksi suunnitteluksi, koska molemmissa luodaan parametrinen malli, joiden avulla algoritmi suorittaa valitun ohjeen mukaisen tehtävän. Parametrisella suunnittelulla viitataan tällä hetkellä yleisimmin yksityiskohtaisen ongelman ratkaisua algoritmin avulla, kun vastaavasti generatiivisessa suunnittelussa generoidaan algoritmin avulla saatuja ratkaisuja ja iteroidaan näistä valittujen parametrien ja raja-arvojen mukaisia ratkaisuja. (Tanska & Österlund 2014). Tässä kappaleessa parametrillä suunnittelulla käsitellään parametrista sekä generatiivista suunnittelua.

Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen on tehokkaimmillaan rakennesuunnittelussa, kun parametrinen malli tehdään usein toistuvalla tapauksella. Liian yksityiskohtaisten parametristen mallien laadinta ei ole kustannustehokasta, koska perinteisillä suunnittelumenetelmillä on mahdollista suorittaa yksittäisen tapauksen ongelman ratkaisu nopeammin. Kuvassa 4 esitetty yleisellä tasolla parametrisen suunnitteluprosessin ajankäytön tehokkuutta. (Hauschild & Karzel 2011).



Kuva 4. Perinteisen ja algoritmiavusteisen suunnitteluprosessin ajankäytön jakauma (Hauschild & Karzel 2011, muokattu).

Kuten yllä esitetty perinteinen suunnittelu ja parametrinen suunnittelu ei ajankäytännöllisesti poikkea merkittävästi toisistaan, kun tarkastellaan vain yhtä ratkaisua, mutta kun halutaan tarkastella useampaa vaihtoehtoa, saavutetaan parametrilla suunnittelulla jo huomattava hyöty. Parametrin suunnittelun hyödyt moninkertaistuvat, kun löydetään tilanteita, joissa samat ratkaistavat ongelmat toistuvat useammassa projektissa. (Hauschild & Karzel 2011). Esimerkkinä suhteellisen yksinkertaisella parametrilla mallilla pystytään tarkastelemaan usean erilaisen teräsristikon kapasiteetteja samassa tilanteessa ja vertailemaan kustannustehokkain ratkaisu perinteisiin suunnittelumenetelmiin verrattuna huomattavasti nopeammin. (Kantola 2021).

Parametrin suunnittelun hyödyt käytännössä tällä hetkellä ovat suurimmassa osin käytössä monimuotoisissa rakenteissa, joissa arkkitehdin määrittämät muodot ovat epälineaarisia ja kantavien rakenteiden täytyy noudattaa samoja muotoja. Tämän kaltaisissa tilanteissa rakennesuunnittelussa parametreinä voidaan käyttää arkkitehdin määrittämää geometriaa, jota kantavien rakenteiden esimerkiksi kattoristikoiden tulee noudattaa. (Kantola 2021). Arkkitehdin määrittämän geometrian algoritmien kuitenkin tulee olla tehty ohjelmalla tai ohjelmointikielellä, jota rakennesuunnittelija pystyy hyödyntämään omassa parametrissa mallissaan. (Lalla 2017). Helpoin tapa on hankkeen alussa sopia käytettävät ohjelmistot, ohjelmointikielet ja järjestelmät, jotta yhteistyötä ja parametrin suunnittelua

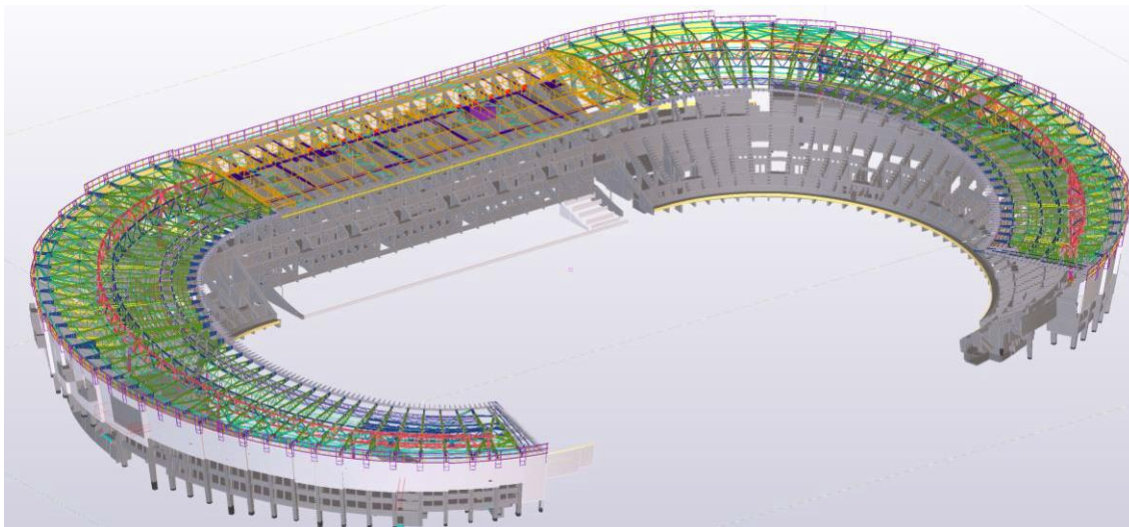
pystytään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Algoritmien avulla pystytään määrittämään geometriasta tasot, joita kantavat rakenteet seuraavat sekä sivujäykisteiden määrät ja sijainnit. Näitä tapoja noudattamalla rakennesuunnitteluun vaadittava aika on lähtökohtaisesti sama riippumatta rakenteen muodosta. (Kantola 2021).

Parametrinen suunnittelu myös osoittaa tehokkuutensa rakennesuunnittelussa, kun yritys tunnistaa heille usein toistuvat ongelmat, joihin algoritmiavusteista suunnittelua voidaan hyödyntää. (Lalla 2017).

Siltasuunnittelussa usein maatumien rauditus ja betonimäärä, joita pystytään parametrin mallin avulla optimoimaan poikkeuksellisen tehokkaasti, koska perinteisillä suunnittelumenetelmillä sopivaa rauditussuhdetta on määritetty hyväksi todettujen arvojen perusteella. Tilanteessa rauditussuhteen määrittäminen on perustunut kokemukseräiseen tietoon, mutta parametrin mallin avulla saadaan tarkasteltua muun muassa kustannuksia, ympäristövaikutuksia ja tilan tarvetta, joita ei perinteisillä menetelmillä tehokkaasti pystyisi tarkastelemaan. (Toola 2017). Infra-rakentamisessa vastaavasti löytyy kehityksessä olevia jatkuvien paalulaattojen parametrin mallien tutkimuksia ainakin isoimmilta suunnitteluyrityksiltä ja myös tämän tutkimuksen tilaajalta.

Rakennesuunnittelun osalta on havaittu teräsrakenteiden olevan tehokas materiaali lähteenä viemään kehityksen alkuvaiheita eteenpäin sen rakenteellisen toiminnallisuuden suoraviivaisuuden johdosta. Teräsrakenteiden toiminnassa monimuotoisuudesta aiheutuvat vääntörasitukset pystytään selkeästi osoittamaan tietylle rakenneosalle ja sen tietylle alueelle. (Lalla 2017). Vastaavasti teräsbetonirakenteissa monimuotoisuudesta aiheutuvat vääntörasitukset on suhteellisen haastavaa todistaa FEM-laskentaohjelmilla vastaavan parametrin mallin tuloksia. Vähänen (2019) sivuaa omassa diplomityössään yhtä suurimmista parametrin suunnittelun hyödyntämisiä Suomessa teräsrakenteiden osalta, jossa olympiastadionin katsomokatosten teräsrakenteet suunniteltiin algoritmiavusteisesti. Vähänen (2019) esittää diplomityössään algoritmiavusteisen suunnittelun käytön teräsrakentamisessa seuraavasti ”Olympiastadionin katsomokatosten teräsrakenteiden suunnitteluun käytettiin algoritmiavusteista menetelmää, joka mahdollisti rakenteiden suunnittelun ja optimoinnin nopeasti ja tehokkaasti. Algoritmiavusteinen suunnittelu mahdollisti myös rakenteiden muodon ja materiaalin optimoinnin. Tämä mahdollisti rakenteiden suunnittelun ja optimoinnin nopeasti ja tehokkaasti. Algoritmiavusteinen suunnittelu mahdollisti myös rakenteiden muodon ja materiaalin optimoinnin. Tämä mahdollisti rakenteiden suunnittelun ja optimoinnin nopeasti ja tehokkaasti.”

kenteiden algoritmiavusteinen suunnittelu on loistava erimerkki siitä, mitä suunnittelun parametrisoinnilla voidaan saavuttaa.” Kuvassa 5 esitetty Vähäsen (2019) sivuamaa katsomokatosta.



Kuva 5. Olympiastadionin katsomokatosten teräsrakenteet (Vähänen, 2021).

Yksinkertaisemmista parametrisista malleista Ruutikainen (2020) esittää selkeästi hyödyt myös liittorakenteiden suunnittelussa ja edut kun luonnossuunnitteluvaiheessa otetaan käyttöön algoritmiavusteinen suunnittelu. Ruutikainen (2020) osoittaa omassa työssään, että liittopilarien oikeiden dimensioiden löytäminen jo alustavassa mitoituksessa on suhteellisen kriittistä, joka pystytään algoritmiavusteisella suunnittelulla välttämään.

## 2.2 Teräsrakenteet

Suomessa teräsrakentamiseen käytetään standardeja, joissa on vaatimuksia, suosituksia ja tuotteiden ominaisuuksia rakennesuunnittelun ja rakentamisen yhtenäistämiseksi. Suomessa standardeista vastaava osapuoli on Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, jonka mukaan ”standardi on kirjallinen julkaisu, jossa määritetään esimerkiksi tuotteiden ja palvelujen ominaisuuksia ja vaatimuksia tai järjestelmien toimintaa.” (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2023). Standardien tarkoitus on toimia vakiintuneena asiakirjana suunnittelulle ja luoda yhtenäinen toimintatapa, jolloin voidaan taata kohteesta ja sijainnista riippumatta saman tasoisia sekä varmoja tuloksia (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2023).

Tässä tutkimuksessa ei käydä yksityiskohtaisemmin teräsrakenteiden suunnittelun perusteita läpi. Aiheesta löytyy laajasti kirjallisuutta, joiden mukaan Suomen teräsrakentamista suunnitellaan. Teräsrakenteista luotettavaa tietoa voi hakea muun muassa Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 – oppikirjasta sekä Suomen kansallisesta standardista (SFS). Alla esitetyt luokkien määrittelyt ja valinnat vaikuttavat mitoitukseen, mukaan lukien tämän tutkimuksen teräsrakenteiden mitoitukset. Valittujen luokkien vaikutus näkyy mitoituksessa käytettävissä varmuuskertoimissa.

Taulukko 1. Seuraamusluokat (SFS-EN 1990, Rakenteiden suunnitteluperusteet)

Seuraamusluokka	Kuvaus	Esimerkkikohteita
CC3	Suuret tai hyvin suuret seuraamukset	Julkiset rakennukset
CC2	Keskisuuret tai merkittävät seuraamukset	Asuin- tai liikerakennukset
CC1	Vähäiset tai pienet seuraamukset	Varastorakennukset

Taulukko 2. Toteutusluokan valinta (SFS-EN 1993-1-1/A1, Teräsrakenteiden suunnittelu)

Luotettavuusluokka (RC) tai Seuraamusluokka (CC)	Staattinen, kvasistaattinen tai seisminen DCL	Väsyttävä tai seisminen DCM tai DCH
RC3 / CC3	EXC3	EXC3
RC2 / CC2	EXC2	EXC3
RC1 / CC1	EXC1	EXC2

Seismiset sitkeysluokat: Matala = DCL; keskimääräinen = DCM; korkea = DCH  
Toteutusluokka EXC4 voidaan esittää rakenteille, joiden rakenteellinen vaurio voi aiheuttaa äärimmäiset seuraamukset

Taulukko 3. Käyttöluokan valinta (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 – oppikirja)

Luokka	Kriteerit
SC1	Rakenteet ja rakenneosat, jotka on suunniteltu vain staattisille kuormille
SC2	Rakenteet ja rakenneosat, jotka on suunniteltu väsytySKUORMILLE standardin EN 1993 mukaan Rakenneosat, jotka on suunniteltu maanjäristysvoimille standardin EN 1998-1 mukaan
Luokkaa SC1 käytetään tapauksille, jotka eivät kuulu luokkaan SC2	

Taulukko 4. Valmistusluokan valinta (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 – oppikirja)

Luokka	Kriteerit
PC1	Hitsaamattomat rakenneosat Hitsatut rakenneosat, joissa teräksen lujuusluokka on alempi kuin S355
PC2	Hitsatut rakenneosat, joissa teräksen lujuusluokka on S355 tai ylempi

Taulukko 5. Toteutusluokan valinta (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 – oppikirja)

Seuraamusluokka		CC1		CC2		CC3	
Käyttöluokka		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Valmistusluokka	PC1	EXC1	EXC1	EXC2	EXC3	EXC3	EXC3
	PC2	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3	EXC4
Erikoisrakenteille tai rakenteille, joiden sortumisella on äärimmäiset seuraamukset on kuitenkin valittava toteutusluokka EXC4							

### 2.2.1 Kehärakenteiden luokittelu

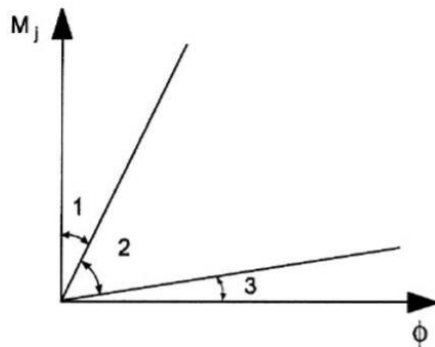
Kehä voidaan luokitella sivusiirtäväksi (sway) tai sivusiirtymättömäksi (non-sway). Sivusiirtävä kehä on herkkä toisen kertaluvun kokonaisvaikutuksille (ns.

P- $\Delta$  -vaikutus). Kun toisen kertaluvun vaikutukset ovat vähämerkityksellisiä, rakenne voidaan luokitella sivusiirtymättömäksi. Kehän epätarkkuudet huomioidaan kehän rakenneanalyysissä vain sivusiirtyvällä kehällä. Kehärakenteen sivusiirtymät yleisesti estetään jäykistysristikoilla tai vinositeillä. Alkuepätarkkuuksien vaikutukset otetaan huomioon jäykistysjärjestelmien analyysissä, kun jäykistysjärjestelmä stabiloi palkkeja tai puristettuja sauvoja poikittaissuunnassa. Tämä otetaan huomioon käyttämällä tuettaviin sauvoihin liittyviä ekvivalentteja geometrisia epätarkkuuksia. (SSAB 2016).

### 2.2.2 Liitosten luokittelu

Suomessa teräsrakenteiden liitosten mitoitus perustuu yleisesti standardiin SFS-EN 1993-1-8 ja ohutlevyrakenteilla SFS-EN 1003-1-3. Liitosten suunnittelu on erittäin keskeinen osa teräsrakenteiden suunnittelua, koska niiden jäykkyydet vaikuttavat rakenteeseen kokonaisuutena. Erilaiset liitokset siirtävät eri tavalla rakenteessa syntyviä jännityksiä, jonka takia väärin mitoitettu tai määritetty liitos voi pahimmassa tapauksessa johtaa rakenteiden kapasiteettien ylitykseen ja sitä kautta rakenteelliseen vaurioon tai rakenteen romahdukseen. Liitos käsittää liitosalueen, joka on kiinnityskohta ja sen lähialueen profiilissa, kiinnityksen sekä liitoskomponentit, joita ovat esimerkiksi ruuvit, hitsit ja päätylevyt. (SFS-EN 1993-1-8).

Yleisesti teräsrakenteiden liitokset luokitellaan joko jäykkyyden (kimmoteoria) tai lujuuden (jäykkäplastinen) mukaan. Liitokset voidaan myös luokitella kokeellisesti testattuihin liitoksiin perustuen, mutta näitä ei käsitellä tässä tutkimuksessa. Jäykkyyden mukaan luokiteltava liitokset jaetaan nivelellisiin, jäykkiin tai osittain jäykkiin liitoksiin. Lujuuden mukaan liitokset jaetaan nimellisesti nivelellisiin, täysin lujiin tai osittain lujiin liitoksiin. Joissain tapauksissa voidaan myös luokittelu tehdä liitoksen muodonmuutoskyvyn mukaan, jolloin liitokset jaetaan murtotavan mukaan joko sitkeään, osittain sitkeään tai hauraaseen murtoon. (SFS-EN 1993-1-8).



Alue 1: jäykkä, jos  $S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b$

Missä:

$k_b = 8$  kehät, joissa jäykistysjärjestelmä pienentää vaakasuuntaisia siirtymiä vähintään 80 %:lla

$k_b = 25$  muut kehät olettaen, että jokaisessa kerroksessa on voimassa  $K_b/K_c \geq 0,1$  <sup>\*)</sup>

Alue 2: osittain jäykkä:

Kaikki alueelle 2 kuuluvat liitokset luokitellaan osittain jäykiksi. Alueilla 1 tai 3 olevat liitokset voidaan vaihtoehtoisesti käsitellä myös osittain jäykinä.

Alue 3: nimellinen nivel, jos  $S_{j,ini} \leq 0,5 EI_b / L_b$

<sup>\*)</sup> Kehien, joille  $K_b/K_c < 0,1$ , liitokset luokitellaan osittain jäykiksi.

Merkinnot:

$K_b$  on tarkasteltavan kerroksen yläpäässä olevien kaikkien palkkien  $I_b/L_b$  - arvojen keskiarvo;

$K_c$  on tarkasteltavassa kerroksessa olevien kaikkien pilarien  $I_c/L_c$  - arvojen keskiarvo;

$I_b$  on palkin hitausmomentti;

$I_c$  on pilarin hitausmomentti;

$L_b$  on palkin jänneväli (pilarien keskiöiden välinen etäisyys);

$L_c$  on pilarin kerroskorkeus.

Kuva 6. Jäykkyyden mukainen liitosluokitus (SFS-EN 1993-1-8).

Taulukko 6. Liitosmalli riippuen liitosluokasta ja käytetystä analyysimenetelmästä. (SFS-EN 1993-1-8, muokattu).

Analyysimenetelmä	Liitosluokka		
	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä	Osittain jäykkä
Kimmeteoria	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä	Osittain jäykkä
Jäykkäplastinen malli	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä	Osittain luja
Kimmo-plastinen malli	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä tai täysin luja	Osittain jäykkä ja osittain luja Osittain jäykkä ja täysin luja Jäykkä ja osittain luja
Liitosmalli	Nivelellinen	Jäykkä	Osittain jäykkä

Tämän tutkimuksen teräsrakenteiden liitoksille on tarkasteltu seuraavat kapasiteetit:

- Teräsprofiilin poikkileikkauksen vetokestävyys
- Liitoslevyn nettopoikkileikkauksen vetokestävyys



- Ruuvien leikkauskestävyys
- Liitoslevyn reuna- ja palamurtumiskestävyys
- Hitsisaumojen kapasiteetti sekä teräsprofiilin palamurtokestävyys hitsaukselle.

Tässä tutkimuksessa ei tarkemmin käsitellä teräsrakenteiden liitosten suunnittelua ja mitoitusta, koska aiheesta on paljon kirjallisuutta. Liitoksista lisää tietoa löytää muun muassa Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 – oppikirjasta sekä Suomen kansallisesta standardista (SFS). Liitosten mitoituksesta on tehty myös insinööritöitä, joissa käsitellään liitosteoriaa tarkemmin esimerkiksi työssä Hokkanen (2014) käsittelee pulttiliitoksia ja Puotunen (2019) teräsrakenteiden tyyppiliitoksia.

### 3 Parametrinen laskentatyökalu

Tässä tutkimuksessa on selvitetty algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntämistä rakennesuunnittelussa ja selvitetty sen käytön etuja yleisellä tasolla ja käytännössä teräsrakennesuunnittelussa. Tutkimuksessa laadittu parametrinen malli on tehty korjausrakennesuunnittelussa usein toistuvalla IV-konehuoneen teräsrungolle, joka rakennetaan olemassa olevan kiinteistön vesikatolle. Parametrisen mallin avulla IV-konehuoneen teräsrunko pystytään mitoittamaan ja mallintamaan ilman erillistä välivaihetta yhdellä kerralla. Prosessina IV-konehuoneen teräsrungon tarkastelu perinteisillä suunnittelumenetelmillä on myös hyvin nopeaa ja suoraviivaista, mutta tutkimuksessa tehdyn parametrisen mallin avulla on selvitetty teräsrakenteiden algoritmiavusteisen suunnittelun ongelmakohtia, tehokkuutta ja hyödyntämistä jatkokehityksessä. Tutkimuksessa käytettävän IV-konehuoneen rungolle tulevat ulkopuoliset rasitukset ovat hyvin maltillisia ja jännevälit suhteellisen pieniä, jonka ansiosta työssä algoritmiavusteisen suunnittelun tuloksia on helpompi vertailla tarkastuslaskelmien avulla. Ulkopuolisten rasitusten ja lyhyiden jännevälien johdosta tutkimuksessa ei ole tarvetta käsitellä monimutkaisia eikä suurta kapasiteettia vaativia liitoksia.

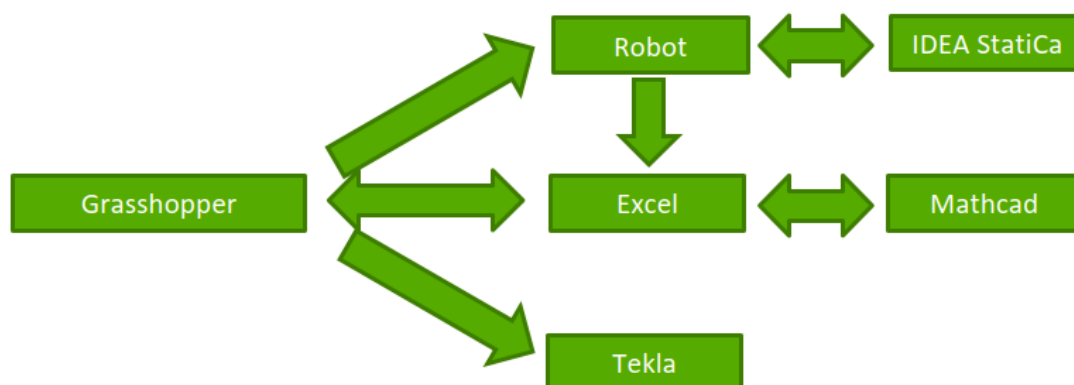
Tutkimuksessa on selvitetty ohjelmistojen yhteensopivuuksien rajoituksia ja tarpeen mukaisuutta seuraavilla ohjelmistoilla:

- Rhinoceros 3D: Rhino (Rhinoceros 3D, n.d.)
  - o McNeel Grasshopper (Grasshopper 3D, n.d.)

Ohjelmien yhteistoimintaa on vertailtu seuraavien ohjelmistojen välillä:

- Microsoft Excel (Microsoft Excel, n.d.)
- Autodesk Robot (Autodesk Robot, n.d.)
- IDEA StatiCA (IDEA StatiCA, n.d.)
- PTC Mathcad (PTC Mathcad, n.d.)
- Tekla Structures (Tekla Structures, n.d.)

Kuvassa 7 esitetty nuolilla yhteyksiä ohjelmien välillä. Osa yhteyksistä on yhden suuntaisia ja osa molempiin suuntiin.



Kuva 7. Ohjelmistojen yhteistoimintaa vertailun yhteyskaavio.

Tutkimuksessa käytetyt ohjelmat on valittu tutkimuksen tilaajalla Sitowise Oy:lla yleisesti käytössä olevien ohjelmien listalta. Ohjelmistojen välillä on osittain valmiita linkkejä ja lisäosia toisiensa välillä, joiden avulla esimerkiksi Rhinoceros 3D ja Tekla Structures saadaan toimimaan yhdessä reaaliaikaisesti. Tietomallinnuksen ja parametrin mallinnuksen yhteyttä käsitellään kappaleessa 3.2.

Kuten mainittu ohjelmien välillä on erillisiä erikseen asennettavia lisäosia, joiden avulla Grasshopper pystytään linkittämään eri ohjelmiin. Tutkimuksen parametrin laskentatyökalussa tavoitteena on saada ohjelmat toimimaan kaikki yhdessä tai vähintään selvittää minkälaista ohjelmistokoodausta tämä vaatii. Tavoitteena on, että mitoitus ja mallinnus pystytään tekemään saman käyttöliittymän kautta yhdellä kertaa. Tietomallinnusosuutta on tutkittu tutkimuksen yhteydessä, mutta vanhan Rhinoceros 3D -ohjelmistoversion takia tietomallinnusta ei saatu toteutettua tutkimuksen aikana. Käytössä ollut versio oli Rhinoceros 6.0 ja Tekla Structures tarjoaa lisäosan vain 7.0 ja uudempiin versioihin. Tutkimuksesta ohjelmistokoodaus on rajattu pois, mutta asiaa käsitellään kappaleessa 5.

Tässä tutkimuksessa on käytetty kuvassa 8 esitettyjä SKOL ry (SKOL ry. n.d.) laatimia Microsoft Excel -profiililistauksia. Profiililistauksista on valittu halutut profiilit työkaluun, jotta tarkasteltavien rakenteiden ja liitosten määrä on pysynyt perusteltuna. Profiililistauksista saadaan profiilien kapasiteetit, joiden avulla ollaan laskentatyökaluun laadittu teräsrakenteiden optimointi työkalu.

Profiili	Poikkileikkausmitat					Pinta-alat ja painot			Täivutus y-y akselin suhteen			Täivutus z-z akselin suhteen			Vääntö				
	(Pidem- män) sivun pituus	(Lyhyem- män) sivun pituus	Selän- män- paksuus	Kulman ulko- pyörästys- säde	Kulman sisä- pyörästys- säde	Poikki- leikkauk- sen pinta- ala	Ulko- puolinen pinta-ala pituus- yksikköä kohti	Poikki- leikkauk- tekkija	Pituus- massa	Hitaus- momentti	Plastinen täivutus- vastus	Elastinen täivutus- vastus	Hitaus- säde	Hitaus- momentti	Plastinen täivutus- vastus	Elastinen täivutus- vastus	Hitaus- säde	Vääntö- jäyhyys	Vääntö- vastus
	h	b	t	r <sub>e</sub>	r <sub>i</sub>	A	A <sub>m</sub>	A <sub>m</sub> /V	m	I <sub>y</sub>	W <sub>P,y</sub>	W <sub>E,y</sub>	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	W <sub>P,z</sub>	W <sub>E,z</sub>	I <sub>z</sub>	I <sub>t</sub>	W <sub>t</sub>
mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /m	m <sup>2</sup>	kg/m	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	mm	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	mm	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	
CFRHS 90x90x5	90	90	5,0	10,0	5,0	1636	0,343	210	12,8	1,929E+6	5,14E+4	4,29E+4	34,3	1,929E+6	5,14E+4	4,29E+4	34,3	3,163E+6	6,47E+4
CFRHS 90x90x6	90	90	6,0	12,0	6,0	1923	0,339	176	15,1	2,205E+6	5,95E+4	4,90E+4	33,9	2,205E+6	5,95E+4	4,90E+4	33,9	3,678E+6	7,42E+4
CFRHS 90x90x6.3	90	90	6,3	15,8	9,5	1973	0,333	169	15,5	2,211E+6	6,03E+4	4,91E+4	33,5	2,211E+6	6,03E+4	4,91E+4	33,5	3,823E+6	7,62E+4
CFRHS 90x90x8	90	90	8,0	20,0	12,0	2404	0,326	135	18,9	2,546E+6	7,13E+4	5,66E+4	32,5	2,546E+6	7,13E+4	5,66E+4	32,5	4,556E+6	8,88E+4
CFRHS 100x100x3	100	100	3,0	6,0	3,0	1141	0,390	342	9,0	1,770E+6	4,12E+4	3,54E+4	39,4	1,770E+6	4,12E+4	3,54E+4	39,4	2,787E+6	5,32E+4
CFRHS 100x100x4	100	100	4,0	8,0	4,0	1495	0,386	258	11,7	2,264E+6	5,33E+4	4,53E+4	38,9	2,264E+6	5,33E+4	4,53E+4	38,9	3,620E+6	6,81E+4
CFRHS 100x100x5	100	100	5,0	10,0	5,0	1836	0,383	209	14,4	2,711E+6	6,46E+4	5,42E+4	38,4	2,711E+6	6,46E+4	5,42E+4	38,4	4,405E+6	8,17E+4
CFRHS 100x100x6	100	100	6,0	12,0	6,0	2163	0,379	175	17,0	3,115E+6	7,51E+4	6,23E+4	37,9	3,115E+6	7,51E+4	6,23E+4	37,9	5,142E+6	9,41E+4
CFRHS 100x100x6.3	100	100	6,3	15,8	9,5	2225	0,373	168	17,5	3,142E+6	7,64E+4	6,28E+4	37,6	3,142E+6	7,64E+4	6,28E+4	37,6	5,360E+6	9,70E+4
CFRHS 100x100x8	100	100	8,0	20,0	12,0	2724	0,366	134	21,4	3,659E+6	9,11E+4	7,32E+4	36,7	3,659E+6	9,11E+4	7,32E+4	36,7	6,445E+6	1,14E+5
CFRHS 100x100x10	100	100	10,0	25,0	15,0	3257	0,357	110	25,6	4,111E+6	1,05E+5	8,22E+4	35,5	4,111E+6	1,05E+5	8,22E+4	35,5	7,498E+6	1,30E+5
CFRHS 100x100x12	100	100	12,0	36,0	24,0	3606	0,338	94	28,3	4,081E+6	1,10E+5	8,16E+4	33,6	4,081E+6	1,10E+5	8,16E+4	33,6	7,936E+6	1,36E+5
CFRHS 100x100x12.5	100	100	12,5	37,5	25,0	3704	0,336	91	29,1	4,104E+6	1,11E+5	8,21E+4	33,3	4,104E+6	1,11E+5	8,21E+4	33,3	8,036E+6	1,37E+5
CFRHS 120x120x3	120	120	3,0	6,0	3,0	1381	0,470	340	10,8	3,123E+6	6,02E+4	5,21E+4	47,6	3,123E+6	6,02E+4	5,21E+4	47,6	4,877E+6	7,82E+4
CFRHS 120x120x4	120	120	4,0	8,0	4,0	1815	0,466	257	14,2	4,023E+6	7,83E+4	6,70E+4	47,1	4,023E+6	7,83E+4	6,70E+4	47,1	6,366E+6	1,01E+5

Kuva 8. SKOL ry Excel-laskentataulukko eräiden teräsprofiilien ominaisuuksista. (SKOL ry. n.d.)

Liitosmitoituksessa on käytetty muokattuja työkaluun soveltuvia Microsoft Excel ja Mathcad -laskentapohjia sekä tehty tarkastuslaskentaa käyttäen aikaisemmin laadittuja laskentapohjia. Laskentatyökalun teräsrungon FEM-laskennan todennukaisuus on tarkastettu Autodesk Robot -ohjelmaan siirretyn FEM-mallin avulla. Laskentatyökaluun ei ole valmiiksi lisätty Robot-linkkiä, mutta halutessaan FEM-mallin saa laskentatyökalusta yhden komponentin avulla. Robotilla myös tehty vertailulaskenta parametrinen laskentamallin tuloksien vertailuun ja oikeellisuuden tarkastamiseen.

Tässä tutkimuksessa valitut liitostyypit on valittu Tekla Structures -tietomallinnusohjelmat löytyvien valmiiden liitostyyppien kirjaston perusteella, jotta tutkimuksessa ei ole tarvetta luoda uusia liitostyyppejä Teklaan. Liitostyypit on valittu vastaavanlaisissa korjausrakennushankkeissa käytettyjen liitostyyppien ja Teklan liitostyypien mukaan. Liitostyyppien määrä on rajattu 3 liitokseen, mutta parametrinen malli on pyritty luomaan niin, että liitostyyppien lisäys mitoituksineen on mahdollista mahdollisimman pienillä muutoksilla algoritmiin.

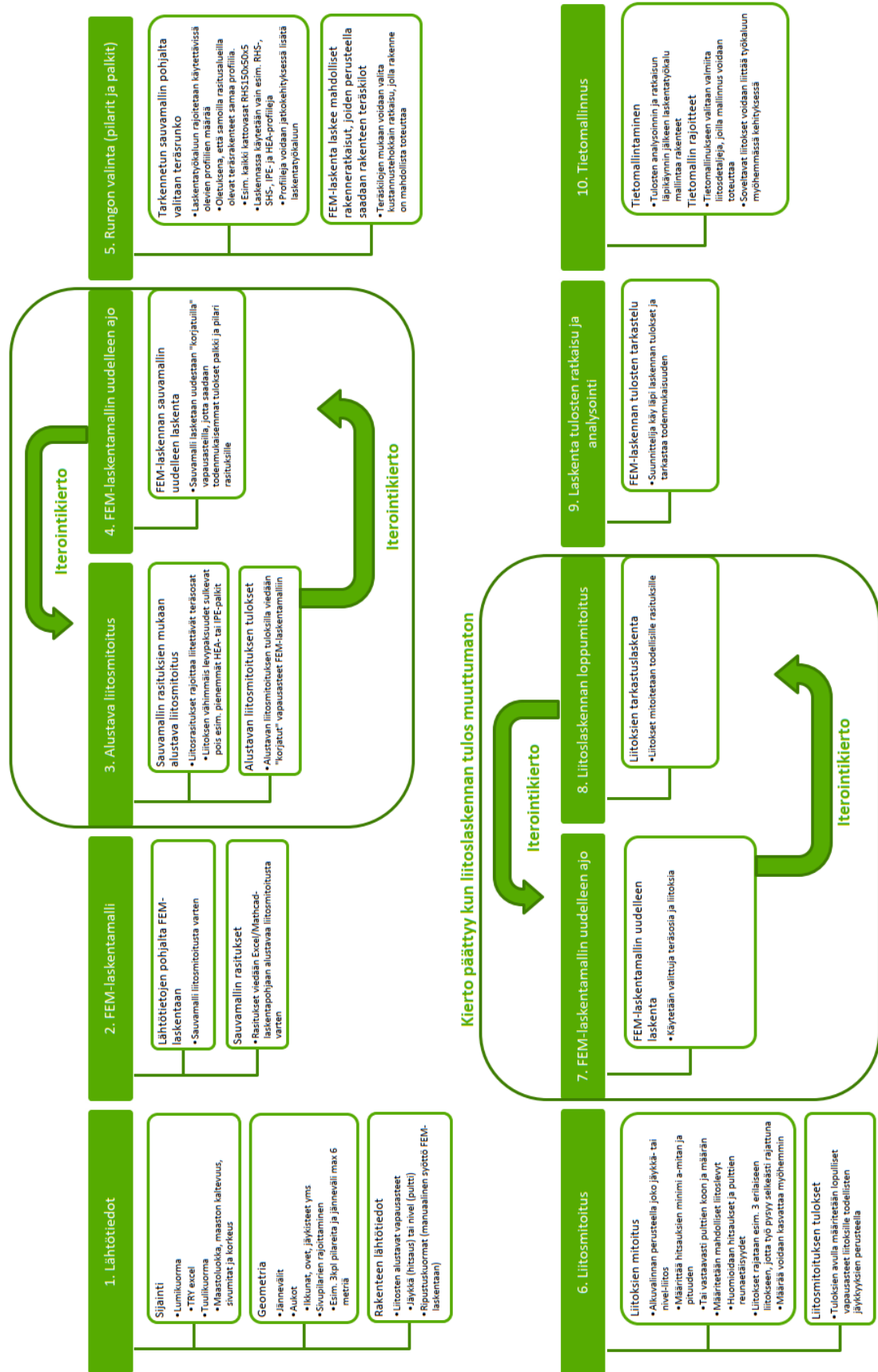
### 3.1 Parametrisointi teräsrakennesuunnittelussa

Ensimmäisenä ennen parametrinen mallin luontia tulee mallin rakenne suunnitella. Suunnittelulla tarkoitetaan, että käydään läpi mitä algoritmin halutaan toteuttavan ja mitä parametrejä halutaan tai voidaan pitää muuttuvina tai muuttumattomina. Suunnittelemalla nämä etukäteen varmistetaan, että parametrinen malli vastaa haluttua tarkoitusta, on taloudellisesti kannattava ja soveltuvin osin on myös hyödynnettävissä jatkokehityksessä.

Kun edellä mainitut asiat ovat suunniteltu voidaan määrittellä parametrinen mallin ominaisuudet, joilla voidaan määrittää ja rajoittaa algoritmi suorittamaan valitut tehtävät halutulla tarkkuudella. Ennen mallin laatimista täytyy myös käydä läpi mitä muita ohjelmistoja ja lisäosia halutaan käyttää. Raportoinnin, suunnitelmien laadinnan ja laskennan selkeyden vuoksi nämä voivat olla esimerkiksi rakenneosien mitoitukseen käytettävät FEM-laskentaohjelmat ja tietomallinnusohjelmistot.

Kun ohjelmistot ja käytettävät lisäosat on valittu, voidaan parametrille mallille määrittää rajaukset ja parametrit. Osa rajauksista (ts. reunaehdot) voivat määräytyä tilaajan tai arkkitehdin mukaisesti, joilla yleensä tavoitellaan haluttua geometriaa. Rajauksia voi olla lähestulkoon mitä vain esteettisten ja rakenteellisten ominaisuuksien väliltä. Rajauksien määrä tulee olla riittävän tarkka, jotta algoritmi antaa halutun tuloksen. Toisaalta liian suuri määrä rajoituksia voi johtaa ylimääräiseen työhön ja mahdollisesti rajoittaa parametrinen mallin muuntojoustavuutta ja hyödynnettävyyttä muissa hankkeissa.

Tässä tutkimuksessa ensimmäisenä laadittiin kuvan 9 mukainen käyntikaavio laskentatyökalun alustavasta algoritmista. Kappaleissa 4 ja 5 käsitellään alustavan suunnitelman toteutumista ja muutostarpeita.



Kuva 9. Algoritmin alustava käyntikaavion suunnitelma.

Kun parametrisen mallin suunnittelu on valmis ja yllä esitetyt asiat ovat päätetty voidaan aloittaa luomaan algoritmia. Algoritmin luonti käytännössä etenee hyvin samoilla periaatteilla kuin FEM-laskentaohjelmien kanssa. Ensimmäisenä luodaan sauvamalli yksinkertaisista viivoista (=sauva) ja pisteistä (=solmu), joille myöhemmin annetaan materiaali- ja profiilitiedot, ulkoiset rasitukset ja muut reunaehdot. Geometrian osalta reunaehdot voidaan ja täytyy osittain jo sisällyttää sauvamallin luontiin. Sauvamallin osalta voidaan halutessa linkittää yksittäisiä sauvoja toisiinsa, jonka avulla pystytään määrittämään valituille sauvoille samat lähtötiedot. Tämän avulla parametriseissa mallinnuksessa säästetään huomattavasti aikaa, mutta lähtötilanteen suunnittelussa tulee huomioida, ettei sauvoja linkitetä toisiinsa tarpeettoman paljon, jolloin voidaan tehdä algoritmista vaikea lukeisempi ja heikentää muuntojoustavuutta.

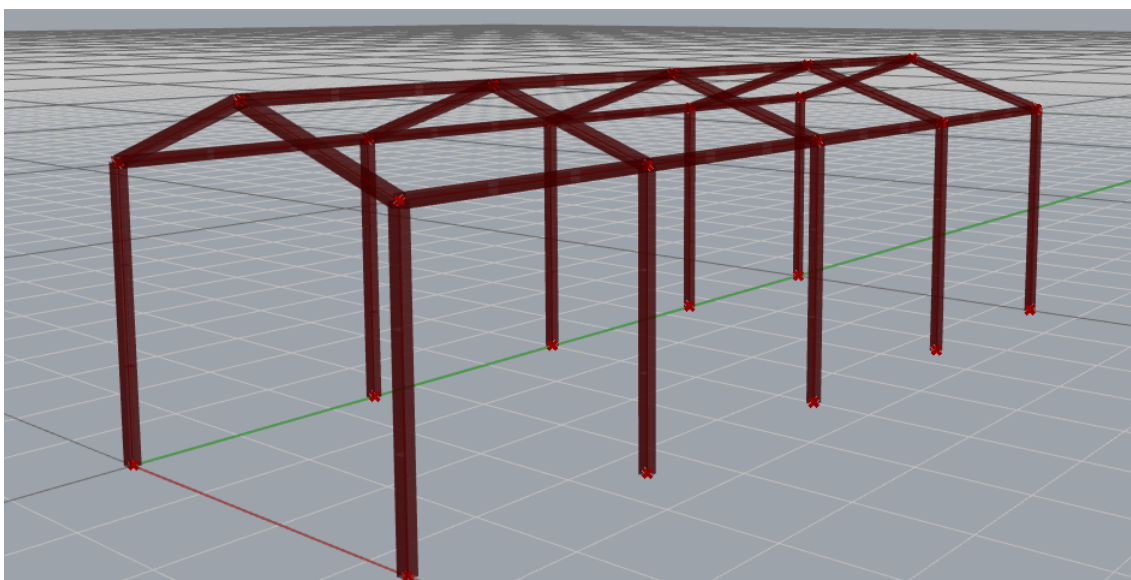
Tutkimuksessa laaditun laskentatyökalun geometria valinta on koottu Grasshopper -näkymän alkuun omana ryhmänä, jossa ensimmäisenä suunnittelija syöttää valitut parametrit komponenteille, joiden perusteella sauvamalli mallintuu. Kuvassa 10 esitetty geometrian valinta ja kuvassa 11 valintojen mukainen geometria. Kuvan 10 mukaiset asiat valikoitiin kokonaisuudessaan työkalun parametreiksi eli muuttujiksi.



Kuva 10. Geometrian valinta ryhmä Grasshopperissa.

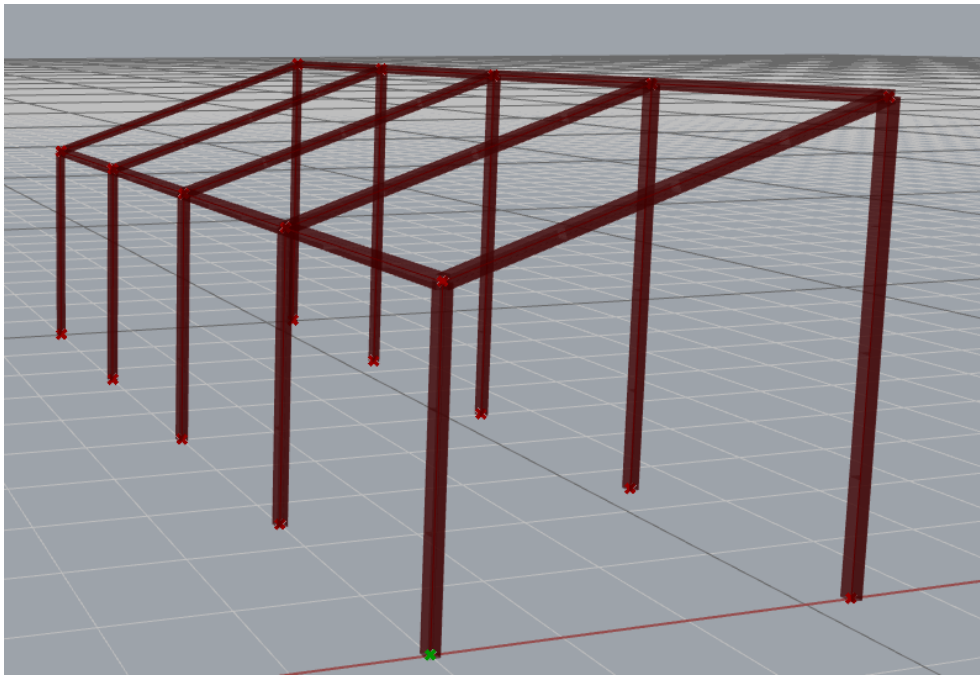
Geometrian skriptiin on tehty 2 eri polkua, joiden perusteella saadaan tehtyä valinnan mukaan kuvan 11 mukainen harjakatto tai kuvan 12 mukainen pulpettikatto. Kuvan 10 geometriassa pilarin korkeudelle voidaan antaa numeerinen arvo

joko kirjoittamalla tai säätämällä liukukytkimestä. Pilarin korkeuden säätö on nimensä mukaisesti selkeä pilarin korkeus, mutta pulpettikaton geometriassa tällä tarkoitetaan matalamman päädyn pilaria. Pulpettikaton korkeamman pilarin pituus määräytyy kattokaltevuuden mukaan. Rakennuksen leveydellä säädetään saman kehän leveyttä ja mitta on profiilin keskipisteestä (solmusta) keskipisteeseen (solmuun). Kattokaltevuus nimensä mukaisesti säätää kehien sauvojen kulmaa suoraa verraten sitä rakennuksen leveyteen. Kattokaltevuus on tutkimusvaiheessa päätetty tehdä kattokaltevuuden suhdelukuna, mutta mahdollisesti jatkokehityksessä muutetaan mittayksikkö [mm] syötteeksi. Pilarien k-jaolla pystytään säätämään kehien keskipisteiden välistä etäisyyttä ja kehien lukumäärää voidaan lisätä kuvan 10 alimmaisella valinnalla. Kaikki kuvassa 10 esitetyt arvot on tutkimusvaiheessa rajattu satunnaisesti mielivaltaisiin raja-arvoihin, mutta näiden muokkaus tarvittaessa onnistuu nopeasti.



Kuva 11. Geometria valinnan mukainen harjakatto Rhinoceros 3D näkymässä.

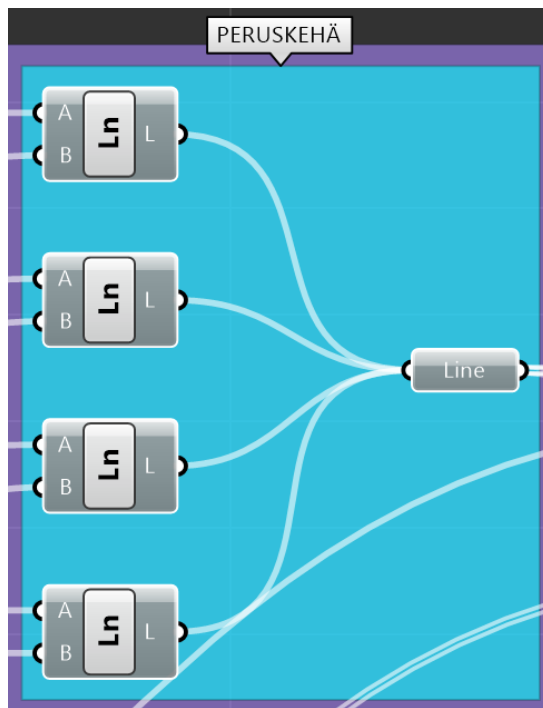




Kuva 12. Geometrian valinnan mukainen pulpettikatto Rhinoceros 3D näky-  
mässä.

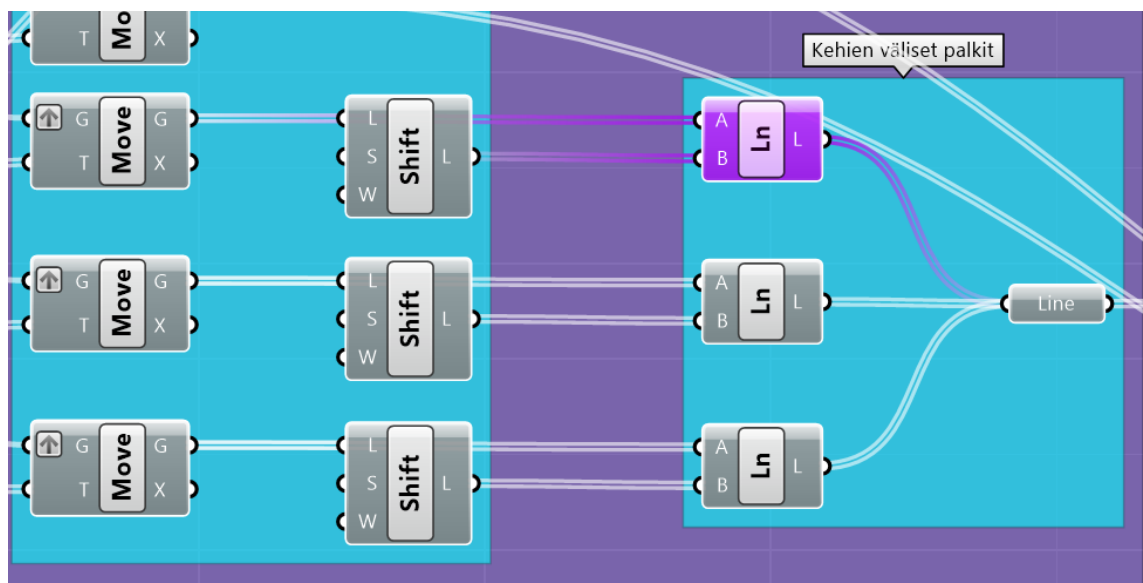
Kuvan 11 ja 12 mukaiset geometriat syntyvät automaattisesti kuvan 10 tietojen perusteella Grasshopperiin laaditun skriptin avulla, joka on eroteltu omiin ryhmiin seuraavasti: solmupisteiden luonti, peruskehä, solmupisteiden monistus ja kehien monistus.

Kehärakenne on rakennettu omaksi kokonaiseksi komponentiksi ja ryhmitelty erikseen, jotta tarvittaessa tämä voidaan purkaa ja jakaa esimerkiksi pilarit ja kat-  
topalkit toisistaan poikkeaviksi profileiksi. Kuvassa 13 esitetty ”Peruskehän”  
koonti, jossa jokainen ”Ln” komponentti vastaa kehässä olevaa sauvaa. Sau-  
voista on muodostettu kehä liittämällä nämä ”Ln” komponentit ”Line” komponent-  
tiin.



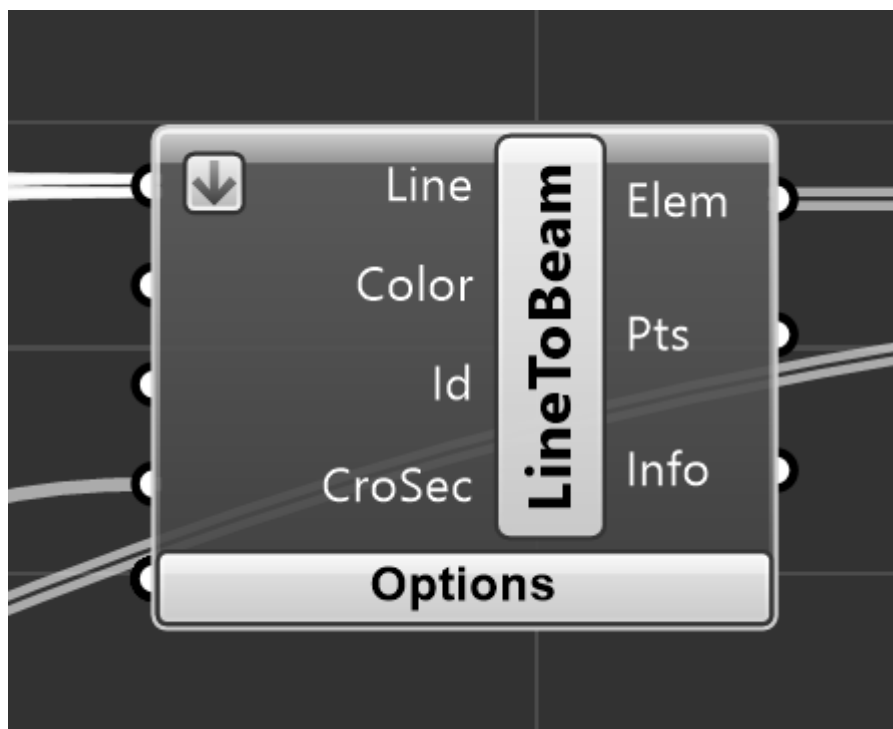
Kuva 13. Kehärakenteen luonti Grasshopperissa

Kehien väliset sauvat on mallinnettu monistettujen kehien huippupisteiden välille ja "Shift list" -komponentit avulla muokattu sauvat mallintumaan yksi aukkoisina rakenteina kehien välille. Käyttämällä "Shift list" -komponenttia vältetään myös sauvamalliin syntymästä päällekkäisiä sauvoja ja solmupisteitä. Kuvassa 14 esitetty kehien välisten sauvojen mallinnusta.



Kuva 14. Kehien välisten sauvojen luonti yksi aukkoisina

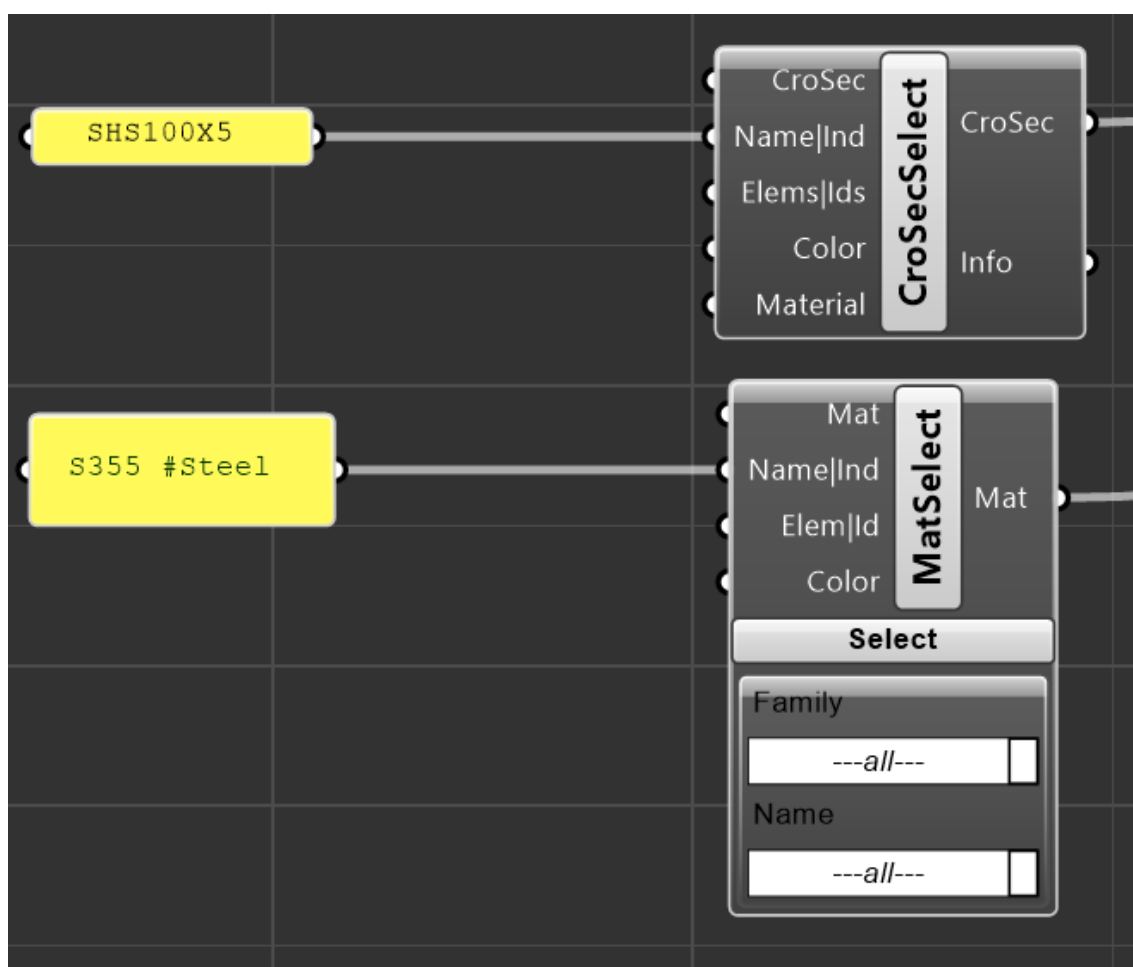
Kehien ja kehien väliset sauvat on parametrisessa mallissa muutettu Karamba3D -lisäosan "LineToBeam" -komponentin avulla teräsrakenteeksi, jolloin sauvoille pystytään määrittämään materiaali ja profiili. Tutkimuksen aikana kehärakenteiden muutoksia ja erillisten palkkien/pilarien jakamista toisistaan poikkeaviksi profiileiksi ei lähdetty tekemään vaan kaikki mallinnettavat sauvat muutetaan yhden parametrin mukaiselle materiaalille ja profiilityypille kuva 15 mukaan. Kehän sauvat on kuitenkin yksinkertaista muuttaa toisistaan poikkeaviksi kopioimalla "LineToBeam" -komponenttia haluttu määrä ja liittämällä kuvien 13 ja 14 sauvat erillisiin komponentteihin. Tässä ei tutkimuksessa havaittu ongelmaa, koska "LineToBeam" -komponentit kootaan kokoonpano -komponentille laskennan edetessä.



Kuva 15. Yksinkertaiset viivat muutetaan teräspilareiksi ja palkeiksi Karamba3D -lisäosan komponenttien avulla

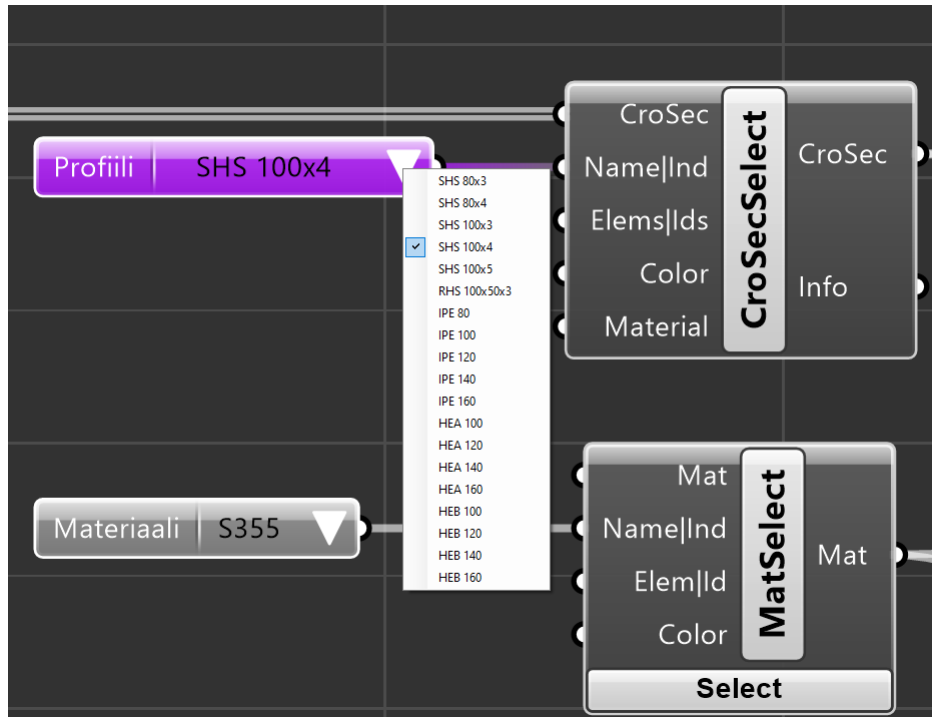
Parametriselle mallille tulee antaa valittu materiaali ja profiilityyppi, jotka voidaan syöttää yksinkertaisena tekstinä "Panel" -komponentin avulla kuvan 16 mukaisesti algoritmin komponenteille tai voidaan luoda erillinen materiaali- ja profiilikirjasto esim. Microsoft Excel -taulukkolaskennalla, jonka kautta voidaan lisätä parametriseseen malliin käyttäjäystävällisempi pudotusvalikko. Kuvan 16 Karamba3D -komponentti sisältää eri maiden profiileja ja materiaaleja, joten komponentille

annettava syöttö tekstinä tai pudotusvalikkona pitää vastata komponentista löytyvää tietoa. Pudotusvalikon avulla pystytään rajaamaan käyttäjävirheet pois komponentille annettavasta tiedosta. Samaa tapaa hyödyntäen voidaan halutessa teoriassa antaa parametrille kaikki Eurokoodin reunaehdot materiaali-kohtaiseen suunnitteluun, mutta lähtökohtaisesti on suositeltavampaa käyttää hyödyksi jonkinlaista FEM-laskentaohjelmaa tai Grasshopper -lisäosaa, jonka sisäisiä määräyksiä ja ohjeistuksia pidetään ulkopuolisen tahon puolesta aina ajan tasalla näiden muuttuessa. Jos määräykset ja ohjeistukset sisällyttää parametriseen malliin, on mallin ajantasaisena pitäminen ylimääräistä ja käytännössä turhaa työtä.



Kuva 16. Yksinkertaisena tekstinä syötettävä profiili- ja materiaalitieto Grasshopper -komponentille.

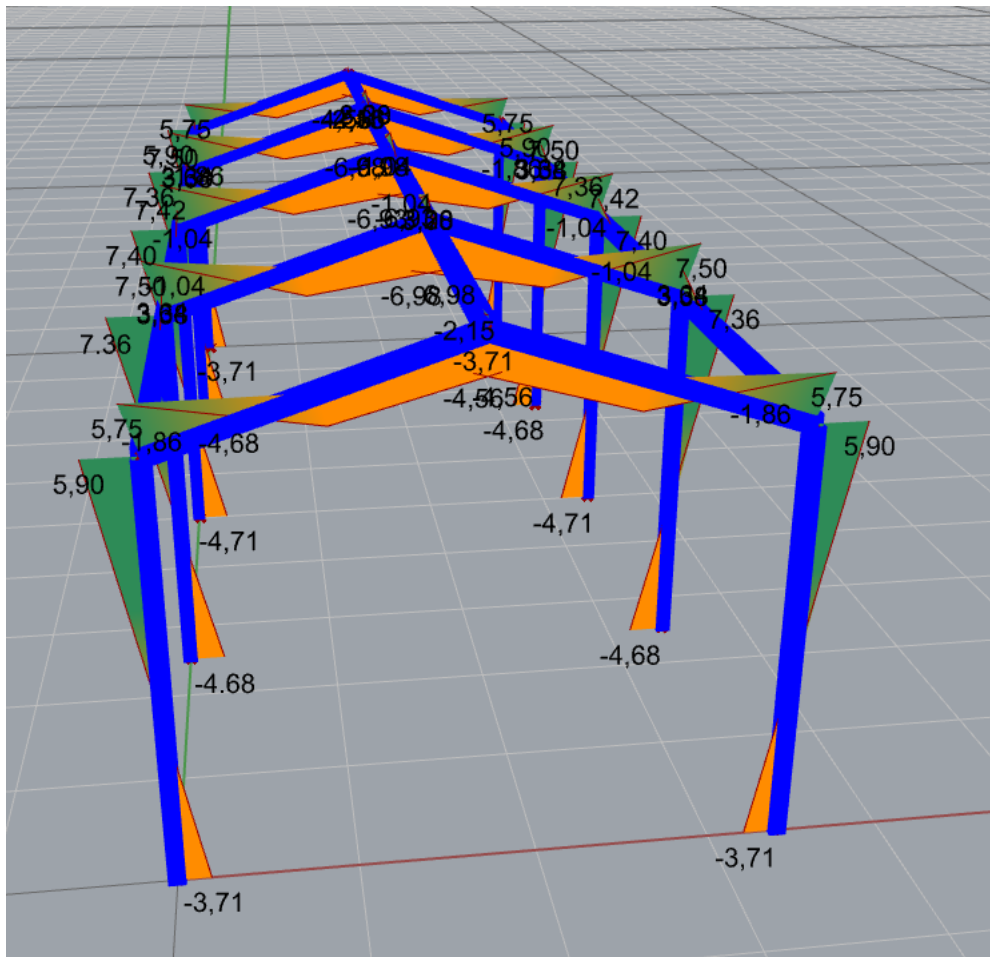
Tämän tutkimuksen kohdalla luotiin profiileista ja materiaaleista pudotusvalikot, joista voidaan valita näille esitetyt datat. Molemmat kuvassa 17 esitetyt pudotusvalikot ovat helposti muokattavissa, jonka ansiosta jatkokehityksessä voidaan lisätä profiileja ja materiaaleja tarpeen mukaan.



Kuva 17. Profiilien valinnan pudotusvalikko

Kuvan 17 valinnat ovat esivalintoja laskentatyökälulle, jotka suunnittelijan tulee tässä laskennan vaiheessa parhaan tiedon mukaan arvata. Esivalinta prosessin avulla mahdollistetaan rakennejärjestelmän rasituksen laskenta huomioiden rakenteiden omapaino liitosmitoitusta varten. Esivalinta perustuu teräsrakenteiden optimointiin, jota käsitellään myöhemmin tässä kappaleessa.

Profiilien ja materiaalien valintojen jälkeen voidaan muuttaa koko rakenne laskentamalliksi Karamba3D -lisäosan kanssa, jonka avulla pystytään suoraan Rhinoceros 3D:n näkymässä tarkastelemaan esimerkiksi momenttikuvaa, jotka esitetty kuvassa 18. Tarkastelu voidaan tehdä kaikille laskentamallin rasituksille sekä muodonmuutoksille.



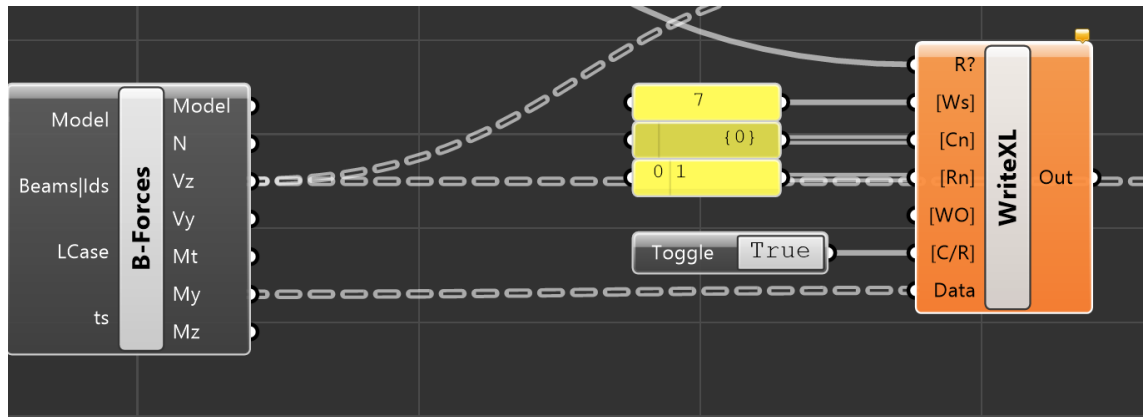
Kuva 18. Rakennejärjestelmän My-kuvaaja Rhinoceros 3D näkymässä

Kaikista laskentamallin rasituksista ja muodonmuutoksista saadaan numeeriset arvot Grasshopper -näkymään. Kuvassa 19 esitetty esimerkki muotoisesti näkymä kuvan 18 ja 17 valintojen mukaisille My-suunnan momenteille.

	{0;0;0;0;0}
0	0.785878
1	0.78755
2	0.785878
3	0.748293
4	0.738754
5	0.748293
6	0.748293
7	0.738754

Kuva 19. My-suunnan käyttöasteet sauvoittain.  $0,7858 \approx 79\%$ .

Tässä vaiheessa laskentatyökalun esivalinnan mukainen laskentamallin mitoitus on valmis ja rasiukset kirjoitetaan ulos Grasshopperista Microsoft Excel -taulukkolaskentaan. Kuvassa 20 esitetty ulos kirjoitus Grasshopperista Exceliin ja kuvassa 21 esimerkkinä miten valintojen mukaan kaikkien sauvojen leikkausvoimat saadaan numeroarvoina.



Kuva 20. Grasshopper - Excel rasiusten ulos kirjoitus

	A	B	C
1		Alku [kN]	Loppu [kN]
2	0	6,761337	6,761337
3	1	6,826869	6,826869
4	2	6,761337	6,761337
5	3	-12,143207	-2,656374
6	4	-12,154429	-2,667596
7	5	-12,143207	-2,656374
8	6	-12,143207	-2,656374
9	7	-12,154429	-2,667596
10	8	-12,143207	-2,656374
11	9	-6,761337	-6,761337

Kuva 21. Sauvojen leikkausvoimat Excelissä

Taulukkolaskentaan tuodaan tukireaktiot, momentit, leikkaus-, normaali- ja vääntövoimasuureet Grasshopperin TT-Toolbox -lisäosan avulla liitosmitoitusta ja profiilien optimointi varten. Profiilien optimointia varten käytetään SKOL ry:n laatiman profiililistauksen kapasiteetteja. Excel -laskennassa valitaan käytettävä profiili-perhe esimerkiksi "RHS", jonka perusteella Excel osaa hakea kaikki profiilit, joi-

den kapasiteetit täyttävät parametrisesta mallista siirretyt rasitukset. Tutkimusvaiheessa laskentatyökalussa asetettiin pienennyskerroin 0,9 kaikille rasituksille, jolla saadaan pieni lisävarmuus laskentaan. Kun laskentatyökalua on päästy testaamaan todellisissa projekteissa ja tekemään lisää vertailulaskelmia voidaan pienennyskerroin poistaa tarpeen mukaan. Excelistä saatu profiili koko vaihdetaan Grasshopperiin kuvassa 17 esitetty profiilivalintaan ja ulos kirjoitetaan rasitukset uudestaan. Päätykehien osalta suurin rasitus mitoittaa kaikki päätykehän profiilit samalle poikkileikkaukselle. Keskikehien osalta käytetään samaa toimintatapaa, jotta rakennuttavuus pysyy järkevänä. Kehien väliset palkit määritetään myös suurimman rasituksen mukaan ja kaikki nämä palkit tyyhitetään samalla profiililla. Profiilien optimoinnin jälkeen Excel -taulukkolaskennalla voidaan tehdä liitosten mitoitus.

Käytettäessä HEA- tai IPE-profiileja liitosmitoitukseen käytetään SKOL ry:n laatimaa ”Teräspilari-palkki-päätylevymitoitus” -taulukkolaskentaan, jossa voidaan Grasshopper-Excel -linkin avulla verratta liitoksen rasituksia ja automatisoida liitoksen ruuvien, päätylevyjen, hitsien ja kannakelevyjen koot ja määrät. Putkiprofiilien välisten liitosten mitoitukseen käytetään tämän tutkimuksen tilaajan Sitowise Oy:n laatimia taulukkolaskentapohjia.

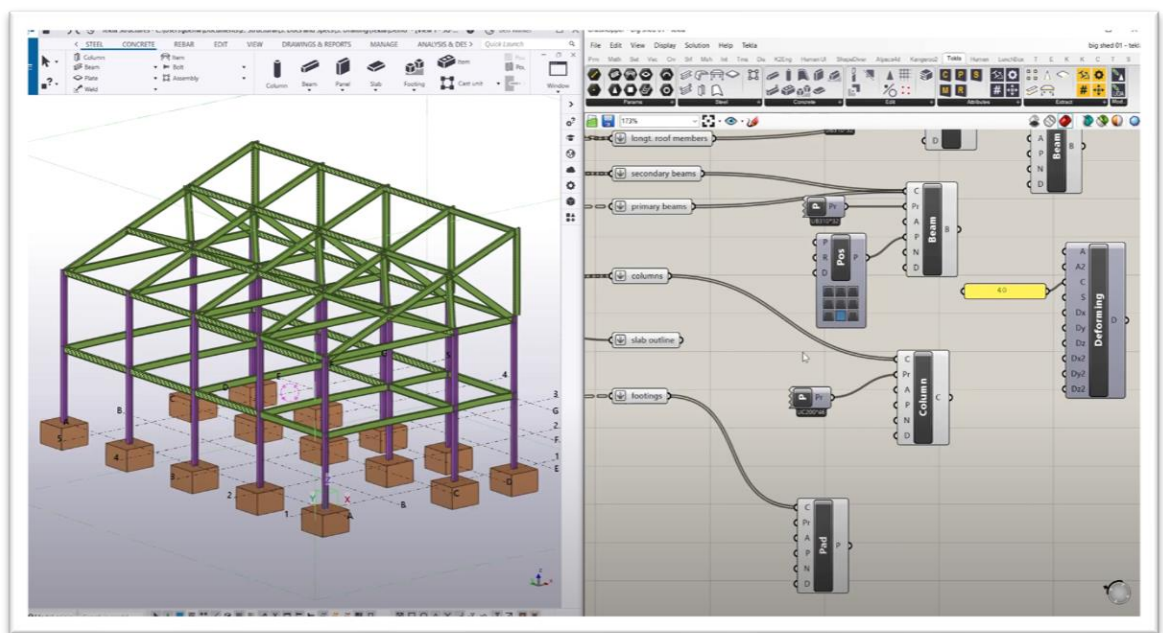
Laskentatyökalua päästiin koekäyttämään ja vertailemaan tuloksien eroavaisuuksia perinteiseen suunnittelumenetelmään, mutta projektityössä laskentatyökalua ei ehditty käyttämään tutkimuksen aikana. Vertailulaskenta tehtiin toisistaan riippumattomana eri henkilöiden toimesta. Vertailulaskennan tuloksia käsitellään kappaleessa 4.

### **3.1.1 Tietomallinnuksen parametrisointi**

Algoritmiavusteisessa suunnittelussa on käytännössä lähes jokaisessa tilanteessa kannattavaa hyödyntää tietomallinnusta mukana. Tietomallinnusta vaativien parametrien syöttäminen algoritmiin vähentää huomattavasti suunnitelmien laadinta aikaa, koska mitoitukseen luotu parametrinen malli on detaljitasoa vaille valmis rakenne käytettäväksi tietomallinnukseen geometrialtaan.



Visuaalinen skriptaus tietomallinnukselle on teoriassa samanlaista kuin rakennemallin laadinta. Rakenneosille lisätään tietomallinnusta varten omat parametrit ja reunaehdot. Ainakin visuaalista skriptauksta hyödyntävien ohjelmien Autodesk Dynamo ja Rhinoceros (Grasshopper) sisään on rakennettu reaaliaikaiset linkit BIM-ohjelmistojen kanssa. Autodesk Dynamo on pystytään linkittämään ainakin suoraan Autodesk Revit ohjelman kanssa ja Rhinoceros (Grasshopper) Tekla Structuresin kanssa, jotka mahdollistavat parametriseen mallinnukseen reaaliajassa. Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus käyttää Grasshopper – Tekla -linkkiä (kuva 22), mutta käyttöliittymä ongelmien johdosta tätä ei päästy toteuttamaan.



Kuva 22. Havainnollistava kuva Rhinoceros 3D: Grasshopper ja Tekla Structures reaaliaikaisesta linkityksestä. (Structured Parametrics, n.d.).

## 4 Toiminta ja vertailulaskelmat

Tutkimuksessa luodun työkalun toimintaperiaatteita muutettiin tutkimuksen aikana useasti, jotta jatkokehitykselle ja laskennan sujuvuudelle saatiin hyvät lähtökohdat. Kuvassa 9 esitettyä alustava käyntikaavion rakenne oli turhan monimutkaisesti laadittu, koska ennen tutkimuksen aloitusta ei ollut tietoa, miten ohjelmistojen sisäiset ja ulkoiset ominaisuudet toimivat yhteen. Ohjelman laskentatyökaluun käytettiin pääosin Rhinoceros 3D:tä ja sen visuaalisen skriptauksen lisäosaa Grasshopperia, joilla saatiin rakennejärjestelmän rasiukset liitosmitoitusta varten. Alkuperäisessä suunnitelmassa oli tarkoituksena laatia Grasshopperilla ainoastaan sauvamalli, joka voidaan siirtää FEM-laskentaohjelmiin rakennemitoituksia varten. Tutkimuksen tuloksena todettiin kuitenkin, että käyttämällä Grasshopperiin saatavaa Karamba3D -lisäosaa pystytään parametriseen suunnitteluun tuomaan materiaali ja profiilitietoja, joilla vähentää laskentavaiheita, koska erillistä laskentamallia ei tarvitse viedä erilliseen FEM-laskentaohjelmaan. Kuvan 9 alustava käyntikaavion rakenne oli lopullisessa laskentatyökalussa kuvan 23 mukainen.

- |  |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lähtötiedot             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Kuormatiedot</li> <li>b. Geometria</li> <li>c. Vapausasteet</li> </ol> </li> <li>2. Alustava mitoitus             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Profiilin ensi arvaus</li> <li>b. Alustava kehä- ja liitosmitoitus</li> </ol> </li> <li>3. Optimointi             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Alustava mitoitus laskee 90 % käyttöasteella olevat profiili koot, joiden pohjalta suunnittelija voi valita käytettäväksi optimoidun profiilikoon                 <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Pienien profiilien osalta iterointi prosessissa riittää yksi optimointi kierto, mutta isompien profiilien omapainon kasvaessa optimointi kierto mahdollisesti tulee suorittaa 2-3 kertaa</li> </ol> </li> <li>b. Optimoidun profiilikoon mukainen liitosmitoitus</li> </ol> </li> <li>4. Laskenta tulosten ratkaisu ja analysointi             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Suunnittelija käy läpi laskennan tulokset ja tarkastaa todenmukaisuuden</li> </ol> </li> <li>5. Tietomallinnus             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Profiilien ja liitosten mallinnus</li> </ol> </li> </ol> |
|--|

Kuva 23. Algoritmin käyntikaavio.



Sauva	Grasshopper (kNm)	Robot (kNm)	Erotus (kNm)	Erotus (%)
0	7,27	7,41	-0,14	1,89 %
1	7,33	7,46	-0,13	1,80 %
2	7,27	7,41	-0,14	1,89 %
3	7,43	7,56	-0,13	1,77 %
4	7,35	7,48	-0,13	1,82 %
5	7,43	7,56	-0,13	1,77 %
6	7,43	7,56	-0,13	1,77 %
7	7,35	7,48	-0,13	1,82 %
8	7,43	7,56	-0,13	1,77 %
9	7,27	7,41	-0,14	1,89 %
10	7,33	7,46	-0,13	1,80 %
11	7,27	7,41	-0,14	1,89 %
12	5,86	5,97	-0,11	1,80 %
13	5,70	5,8	-0,10	1,76 %
14	5,70	5,8	-0,10	1,76 %
15	5,86	5,97	-0,11	1,80 %
16	5,86	5,97	-0,11	1,80 %
17	5,70	5,8	-0,10	1,76 %
18	5,70	5,8	-0,10	1,76 %
19	5,86	5,97	-0,11	1,80 %
20	3,67	3,73	-0,06	1,72 %
21	3,41	3,46	-0,05	1,59 %
22	3,41	3,46	-0,05	1,59 %
23	3,67	3,73	-0,06	1,72 %
24	3,67	3,73	-0,06	1,72 %
25	3,41	3,46	-0,05	1,59 %
26	3,41	3,46	-0,05	1,59 %
27	3,67	3,73	-0,06	1,72 %
28	3,07	3,12	-0,05	1,74 %
29	3,21	3,26	-0,05	1,57 %
30	3,21	3,26	-0,05	1,57 %
31	3,07	3,12	-0,05	1,74 %

Kuva 26. Y-suuntaisten maksimimomenttien vertailulaskentaa sauvoittain.

Vertailulaskennan perusteella voidaan todeta laskentatyökalun toimivan yleisellä tasolla hyvin, koska suurin ero momenteilla on vain 1,89 %. Suurimmat poikkeamat olivat keskikehien pilareissa.

Vertailulaskennassa huomattiin kuitenkin kehien välisten palkkien y-suuntaisten momenttien poikkeavan huomattavasti Robot-laskennasta. Laskentatyökalun avulla saadaan keskikehien välisten palkkien kenttämomentiksi 1,04 kNm ja vastaavasti tarkastelulaskennassa 3,08 kNm, joka vastaavasti on prosenteissa jo 196,15 %. Tarkastelujen jälkeen todettiin, että laskentatyökalussa olevat kehien

väliset palkit siirtävät rasituksia huomattavasti enemmän pilareille kuin Robot-laskennassa. Palkkien tulisi toimia yksiaukkoisina palkkeina, jolloin 2,5 metrin jännevälillä ilman rasitusten siirtoa kenttämomentti 3,125 kNm. Laskentatyökalun poikkeamaa ei saatu tutkimuksen aikana korjattua, mutta päivitetään ennen laskentatyökalun käyttöönottoa.

Sauvojen käyttöasteissa, jotka esitetty kuvassa 27 havaittiin myös eroavaisuuksia, mutta laskentatyökalun käyttöasteet tällä vertailulaskennalla ovat varmalla puolella.

Sauva	Grasshopper (ka)	Robot (ka)	Erotus (ka)	Erotus (%)
0	0,97	0,87	0,10	9,90 %
1	0,93	0,84	0,09	9,59 %
2	0,97	0,87	0,10	9,90 %
3	0,80	0,64	0,16	20,29 %
4	0,77	0,64	0,13	17,05 %
5	0,80	0,64	0,16	20,29 %
6	0,80	0,64	0,16	20,29 %
7	0,77	0,64	0,13	17,05 %
8	0,80	0,64	0,16	20,29 %
9	0,97	0,87	0,10	9,90 %
10	0,93	0,84	0,09	9,59 %
11	0,97	0,87	0,10	9,90 %
12	0,87	0,73	0,14	16,44 %
13	0,68	0,53	0,15	22,24 %
14	0,68	0,53	0,15	22,24 %
15	0,87	0,73	0,14	16,44 %
16	0,87	0,73	0,14	16,44 %
17	0,68	0,53	0,15	22,24 %
18	0,68	0,53	0,15	22,24 %
19	0,87	0,73	0,14	16,44 %
20	0,37	0,32	0,05	14,54 %
21	0,33	0,29	0,04	12,48 %
22	0,33	0,29	0,04	12,48 %
23	0,37	0,32	0,05	14,54 %
24	0,37	0,32	0,05	14,54 %
25	0,33	0,29	0,04	12,48 %
26	0,33	0,29	0,04	12,48 %
27	0,37	0,32	0,05	14,54 %
28	0,41	0,34	0,07	18,07 %
29	0,34	0,28	0,06	16,58 %
30	0,34	0,28	0,06	16,58 %
31	0,41	0,34	0,07	18,07 %

Kuva 27. Käyttöasteiden vertailulaskentaa sauvoittain.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että parametrinen laskentatyökalu saatiin toteutettua, mutta vaatii vielä jatkokehitystä ennen käyttöönottoa. Sauvojen vapausasteita ei päästy tutkimuksen aikana tutkimaan tarkemmin.

Laskentatyökalulla saadaan ainakin alustavasti tarkasteltua kehä- ja liitosmitoitus nopeammin kuin perinteisellä suunnittelumenetelmällä, kun geometrian reunaehdot ovat laskentatyökaluun syötettyjen parametrien mukaiset. Tulosten poikkeamien selvittämiseksi tulee tarkastella Karamba3D -lisäosan komponentteihin syötettyjen varmuus- ja materiaalikertoimien oikeellisuus ennen käyttöönottoa.

Liitosmitoituksen tulokset vertailulaskennassa syntyvät laskentatyökalun rakenteen ja valmiiden laskentapohjien vuoksi yllä esitettyjen poikkeamien mukaisesti samoilla arvoilla. Käytetyt rasitukset ovat liitosmitoitukselle huomattavan pieniä, joten ruuvien ja hitsausten määrä ja koko osissa liitoksissa voi pysyä samana, mutta käyttöasteiden osalta poikkeamat eivät muutu.

## 5 Pohdinta

### 5.1 Tulosten saavuttaminen

Tutkimuksen laskentatyökalun tavoitteena oli algoritmin avulla automatisoida IV-konehuoneen rungon ja liitosten mitoitus, joka saavutettiin. Vertailulaskennassa havaittiin poikkeamia pienien rasitusten osalta pilarien ja palkkien käyttöasteissa, jotka vaikuttavat suoraan myös liitosmitoitukseen. Näiden poikkeamien syiden etsiminen on välttämätöntä ennen laskentatyökalun käyttöönottoa. Poikkeamat voivat mahdollisesti johtua Karamba3D ja Autodesk Robotin profiilien metatiedoista tai varmuus- ja materiaalikertoimista. Vertailulaskennalla pystyttiin todistamaan, että rasitukset ja käyttöasteet ovat karkealla tasolla oikean mukaiset. Tutkimukseen käytössä ollut aika oli rajoitettu, joten tarkkaa analyysia poikkeamista ei ehditty laatimaan. Tutkimuksen työkalua rajoitettiin huomattavan paljon, jotta saadaan luotua toimiva parametrinen malli.

Monessa algoritmin osuudessa olisi oletettavasti hyötynyt Grasshopper - Python-script -lisäosasta, jolla komponentteja olisi voitu koodata omien tarpeiden mukaisesti. Koodauksen avulla uskotaan, että työkalun geometrian luonti olisi onnistunut paremmin ja mahdollistanut monimuotoisuuden rakenteille. Tutkimuksen geometria rajattiin kahteen eri kehärakenteeseen, jotka valittiin satunnaisesti yleisesti korjausrakentamisessa käytettävien IV-konehuonerunkojen perusteella. Rajauksella heikennettiin laskentatyökalun tehokkuutta, koska mahdollisten IV-kanavien kantavien rakenteiden kohdalla joudutaan manuaalisesti muokkaamaan mallia eikä luotu geometria-algoritmi sovellu suoraan näihin tilanteisiin.

### 5.2 Johtopäätökset ja jatkotutkimus

Eri yritysten ja suunnittelijoiden välillä ohjelmistojen valinta voi vaihdella huomattavasti, jonka takia on todella kriittistä suunnitella mitä ohjelmistoja ja lisäosia halutaan käyttää, jotta parametrinen malli mahdollistetaan mahdollisimman laajasti kaikkien käyttöön.

Algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntämisen tärkeimpänä lähtökohtana kaikessa rakennesuunnittelussa on taloudellisuus. Parametrinen mallin luonti on taloudellisesta näkökulmasta kannattavinta, kun rakenteet ovat monimuotoisia, jolloin rakenteiden 3D-mallintaminen ja mitoitus on nopeampaa algoritmiavusteisen suunnittelun avulla kuin perinteisillä suunnittelumenetelmillä. Parametrinen malli on Hauschildin & Karzelin (2011) suunnitteluprosessin ajankäytön vertailun näkökulmasta taloudellisesti myös kannattavaa, kun havaitaan rakenteellisia tapauksia, jotka toistuvat usein suunnittelussa. Tutkimusta tehdessä havaittiin, että parametriseen suunnitteluun voi mahdollisesti olla myös hyödyllistä laatia aloitus pohjia, joihin on rajattu esimerkiksi tietynlainen materiaaliriippumaton geometria tai geometria riippumaton Eurokoodimitoitus.

Algoritmiavusteisella suunnittelulla suunnittelijan kannalta pystytään lyhentämään suunnittelu-aikaa huomattavasti (Hauschild & Karzel, 2011). Kuitenkin lähtökohtaisesti parametrinen mallin luomiseen tulee käyttää riittävästi aikaa parametrien ja oikeiden rajoitusten listaamiseen, joiden avulla mallia pystytään alusta alkaen laatimaan loogisesti eteenpäin huomioiden visuaalisen skriptauksen muuntojoustavuus muihin saman kaltaisiin hankkeisiin.

Yksittäisen yksinkertaisen rakenteen parametrinen suunnittelu ei välttämättä ole kannattavaa, mutta algoritmin luomiseen menevä aika ja taloudellinen näkökulma voi muuttua kannattavaksi jo muutaman saman tapaisen projektin jälkeen. Tässä korostuu, ettei parametrista mallia kannatta lähteä jokaisessa tilanteessa laatimaan vaan ensimmäisenä käydä tarkasti läpi hankkeen rajoitukset ja parametrit, joiden perusteella pystytään päättämään voisiko kyseinen algoritmi soveltua käytettäväksi myös myöhemmin. Toistuvuus on käytännössä suunnittelun näkökulmasta yleisin hyöty, jota voidaan algoritmiavusteisella suunnittelulla saavuttaa. Taloudellista etua voidaan myös saavuttaa tilaajan kannalta, kun rakenteita pystytään optimoimaan, jonka kautta rakennus- ja materiaalikustannuksia sekä toteutusaikatauluja saadaan mahdollisesti pienennettyä.

Parametrinen mallintamisen osalta pienissä hankkeissa ei ole havaittu reaaliaikaisen linkin häiritsevän työskentelyä, kun muutokset päivittyvät parametrien mukaan tietomallissa ja laskentamallissa. Isommissa hankkeissa mahdollisesti reaaliaikaista linkkiä ei ole kannattavaa pitää päällä jatkuvasti riippuen käytössä



olevasta laskentatehosta. Mahdollisesti isompien hankkeiden osalta on suositeltavampaa pitää tietomallinnus linkki suljettuna, kunnes parametrinen mallin muut vaiheet on tarkasteltu ja todettu toimiviksi.

Jatkokehityksessä olisi suotavaa, että geometrian skriptiä muokataan huomattavasti, jotta se mahdollistaa kaiken muotoisten teräsrakenteiden mitoitusta. Koe-käytön perusteella voidaan olettaa, että laskentatyökalun rakenteiden mitoitus-osa voidaan sellaisenaan liittää mihin vain geometriaan ja hyödyntää sauvojen ja liitosten mitoituksessa. Lisäämällä geometrian algoritmiin jäykistesauvat ja päätykehien keskelle tuulipilarit voidaan laskentatyökalua mahdollisesti soveltaa hal-lirakennuksen mitoitukseen.

Liitosmitoituksen suoraviivaisuus rajoittaa laskentatyökalun käyttöä huomattavasti eikä suoranaisesti mahdollista montaa erilaista käyttötarkoitusta, mutta koe-käytön perusteella voidaan olettaa, että uusien liitostyyppien lisäys mitoitukseen ei tule olemaan ongelma. Tietomallinnusta tässä tutkimuksessa ei valitettavasti päästy toteuttamaan, mutta oletuksena voidaan pitää, että Karamba3D -lisäosan tarjoama rakennemalli pystytään suoraan siirtämään metatietoineen Tekla Structuresiin. Laskentatyökalun taloudellinen ja ajankäytännöllinen hyöty voidaan olettaa moninkertaistuvan, jos kaikki rakenteet ja liitokset saadaan todenmukaisesti suoraan tietomalliin parametrisestä mallista.

## LÄHTEET

Arora, J. (2004). Introduction to optimum design. Academic Press

Ajouz, R. (2021). Parametric design of steel structures: Fundamentals of parametric design using Grasshopper. Steel Construction 14, No. 3, pp. 185–195. <https://doi.org/10.1002/stco.202100011>

Autodesk. Dynamo. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.autodesk.com/products/dynamo-studio/overview>

Autodesk. Robot. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Davis, D. (2013). Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture, RMIT University.

Grasshopper 3D. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.grasshopper3d.com/>

Hauschild, M. & Karzel, R. (2011). Digital Processes: Planning, Designing, Production (Detail Practice), Birkhäuser.

Hokkanen, A. (2014). Teräsrakenteiden välisten pulttiliitosten mitoitusohjelma EN 1993-1-8 mukaan. Insinööriyö. Metropolia-ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan osasto, Helsinki.

Horowitz, E. & Sahni, S. (1978). Fundamentals of computer algorithms, Computer Science Press.

IDEA StatiCA. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.ideastatica.com/>

Kantola, L. (2021). Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen teräskattoristikon mallinnuksessa. Kandidaatintyö, Oulun yliopisto, konetekniikan osasto, Oulu.

Krish, S. (2011). A practical generative design method. Comput. Des. 2011, 43, 88–100.

Kälkäjä, O. (2020). Yleisimmät teräsrakenteiden liitostyypit ja kiinnityksien mitoituksen pääperiaatteet. Insinööriyö. Oulun Ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma. Oulu

Lalla, A. (2017). Kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto, Tampere.

Lommi, J. (2021). Vastuullisuus rakennuttamisen toimialalla. Insinööriyö, LAB-ammattikorkeakoulu, Lappeenranta.

Ma, W. & Wang, X. & Wang, J. & Xiang, X. & Sun, J. (2021). Generative Design in Building Information Modelling (BIM): Approaches and Requirements. *Sensors* 2021, 21, 5439. <https://doi.org/10.3390/s21165439>

Meintjes, K. (2017). “Generative Design”—What’s That?—CIMdata’, CIMdata. Available online: <https://www.cimdata.com/en/news/item/8402-generative-design-what-s-that>

Microsoft Excel. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.microsoft.com/fi-fi/microsoft-365/excel>

Myung, S. & Han, S. (2001). Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method

Nagy, D. & Villaggi, L. (2020). ‘Generative Design for Architectural Space Planning’. Autodesk University. Available online: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Generative-Design-Architectural-Space-Planning-2020>

PTC Mathcad. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.mathcad.com/en>

Puotunen, M. (2019). Terästyypiliitosten suunnittelu. Insinööriyö, Turun Ammattikorkeakoulu, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Turku

Rhinoceros 3D. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.rhino3d.com/>

RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4

Ruutikainen, O. (2020). Universaalinen liittopilarin mitoitus korkeassa rakentamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto, Tampere.

SFS-EN 1990. (2002). Eurocode. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen standardoimisliitto

SFS-EN 1993-1-1. (2005). Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osat 1-1-10

Shea, K. & Aish, R. & Gourtovaia, M. (2005). Towards integrated performance-driven generative design tools. *Autom. Constr.*

Singh, V. & Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Des. Stud.* 2012, 33, 185–207.

SKOL ry. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://skol.teknologiateollisuus.fi/fi/teki-toiminta/eurocode-laskentapohjat>

Structured Parametrics. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.youtube.com/watch?v=rvj0aiXJjfc>

Tanska, T. & Österlund, T. (2014). Algoritmit puurakenteissa: menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto, B 32, 1st ed. DigiWoodLab, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin tiedekunta.

Tekla Structures. n.d. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.tekla.com/products/tekla-structures>

Teräsrakenneyhdistys ry. (2014). Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 – oppikirja (toinen painos). Teräsrakenneyhdistys ry

Toola, M. (2017). Teräsrakenteisten siltojen parametrinen mallinnus. Insinöörityö. Tampereen ammattikorkeakoulu, talorakennustekniikka. Tampere.

Vähänen, P. (2019). Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen teräsbetonisten runkorakenteiden luonnossuunnittelussa. Diplomityö, Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Oulu.

Whitley, D. (1994). A Genetic algorithm tutorial