



Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen putkisiltojen suunnittelussa

Robin Holappa

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2025

Rakennustekniikan ylempi tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan ylempi tutkinto-ohjelma
Rakennustekniikka

HOLAPPA, ROBIN:

Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen putkisiltojen suunnittelussa

Opinnäytetyö 45 sivua + liitteitä 3 sivua

Toukokuu 2025

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten parametrisen suunnittelun menetelmiä voitaisiin hyödyntää erityisesti putkisiltojen rakennesuunnittelussa, ja arvioida case-esimerkin ja asiantuntijakyselyn avulla kehitetyn mallin käyttökelpoisuutta käytännön suunnittelutyössä. Lisäksi tarkasteltiin, voidaanko sitä hyödyntää Elomatic Oy:n tavanomaisissa projekteissa. Tutkimus toteutettiin yhdistämällä kirjallisuuskatsaus, käytännön case-esimerkki sekä kyselytutkimus. Menetelmänä käytettiin laadullista tutkimusta, jonka tueksi kerättiin empiiristä aineistoa suunnittelijoilta ja analysoitiin parametrisen suunnittelun mahdollisuuksia sekä rajoitteita.

Kirjallisuudessa todetaan, että parametrinen suunnittelu soveltuu erityisesti toistuviin, geometrisesti säännönmukaisiin rakenteisiin, kuten putkisiltoihin. Kyselyvastauksista ilmeni, että käyttäjien suhtautuminen parametriseen mallintamiseen on positiivista, mutta käyttöönottoon liittyy haasteita kuten resurssipula ja ohjelmisto-osaamisen puute. Työssä kehitettiin Grasshopper- ja Tekla Live Link -työkaluihin perustuva prototyypimalli, jonka avulla voitiin tuottaa tehokkaasti muokattavia ja toistettavia rakenteita BIM-ympäristöön.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että parametrinen suunnittelu voi tarjota merkittävää potentiaalia suunnittelutyön tehostamiseen erityisesti toistuvissa kohteissa. Jatkokehitystä suositellaan algoritmien laajentamiseksi kattamaan monimutkaisempia rakenteita sekä käyttäjäystävällisyyden parantamiseksi. Lisäksi esitettiin konkreettisia suosituksia käyttöönoton tueksi, kuten koulutuksen ja sisäisten ohjeistusten kehittämiseksi.

Asiasanat: parametrinen suunnittelu, algoritmiavusteinen suunnittelu, grasshopper, putkisilta

TEKOÄLYN KÄYTTÖ

Opinnäytteessäni käytetyt tekoälytyökalut ja niiden käyttötarkoitukset on kuvailtu alla:

Työkalun nimi (ja versio): ChatGPT (GPT-4, versio gpt-4-turbo)

Käyttötarkoitus ja osio, jossa työkalua käytettiin: Työkalua käytettiin työn rakenteen suunnittelussa sekä kielenhuollossa.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ABSTRACT

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

HOLAPPA, ROBIN:

Utilizing Parametric Design in the Design of Pipe Bridges

Master of Engineering thesis 45 pages, appendices 3 pages
May 2025

The aim of this thesis was to explore the applicability of parametric design methods in the structural design of pipe bridges and assess the usability of a developed model through a case study and expert survey. The study also examined whether these methods could be applied in Elomatic Oy's typical projects. The research combined a literature review, a case example, and a qualitative survey supported by empirical input from designers.

Literature suggests that parametric design suits repetitive and geometrically consistent structures such as pipe bridges. Survey responses showed a positive attitude, but also highlighted challenges like limited resources and software skills. A prototype model was created using Grasshopper and Tekla Live Link to generate adaptable and repeatable BIM structures efficiently.

The findings indicate that parametric design can offer notable potential to streamline design processes, especially for repetitive tasks. Further development is recommended to cover more complex structures and improve usability. Practical suggestions for implementation include training and internal guidelines.

Key words: parametric design, algorithm-aided design, grasshopper, pipe bridge

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	2
TEKOÄLYN KÄYTTÖ	3
ABSTRACT.....	4
SISÄLLYS.....	5
LYHENTEET JA TERMIT	6
1 JOHDANTO	7
1.1 Tausta.....	7
1.2 Tavoite, tutkimuskysymykset	7
1.3 Suoritus.....	9
1.4 Rajaukset.....	10
2 PARAMETRINEN SUUNNITTELU	11
2.1 Määritelmä ja periaatteet.....	11
2.2 Tutkimusperusta.....	12
2.3 Sovellukset rakennesuunnittelussa.....	13
2.3.1 Geometrisesti haastavat ja monimuotoiset kohteet.....	14
2.3.2 Toistuvat rakenteet.....	15
2.4 Rhinoceros 3d & Grasshopper.....	17
3 CASE-ESIMERKKI	21
3.1 Testitapauksen valinta ja tutkimuksen toteutus.....	21
3.2 Aineiston kerääminen ja analysointi.....	23
3.3 Esimerkkisovellus.....	23
4 TULOKSET	25
4.1 Suunnittelutyökalun toimintaperiaate	25
4.1.1 Mallin siirto BIM-ohjelmistoon.....	31
4.2 Kyselyn tulokset	34
4.3 Esimerkkisovellus.....	36
5 TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA.....	37
5.1 Tulosten luotettavuus ja tutkimuksen rajoitteet	39
5.2 Käyttöönoton haasteet ja ratkaisut.....	40
5.3 Jatkotutkimusehdotukset.....	41
LÄHTEET.....	43
LIITTEET	45
Liite 1. Laadullisen tutkimuksen kysymykset ja vastaukset. 1 (3)....	45

LYHENTEET JA TERMIT

Algoritmi	Tarkasti määritelty tehtäväsarja, joka ohjaa suunnittelu- prosessia; se toimii "reseptinä", jonka mukaan muotoja luodaan.
BIM	(Building Information Modeling): Rakennustietomallin- taminen.
FEM	Finite Element Method eli elementtimenetelmä.
Iteraatio	Toistuva prosessi, jossa mallia kehitetään vaiheittain; jokainen iteraatio tuottaa uuden version suunnitel- masta, jolloin lopullinen ratkaisu lähestyy optimaali- suutta.
Ohjelmointi	Tekstimuotoisen ohjelmointikoodin avulla toteutettu prosessi, joka määrittelee ja ohjaa mallin päivitystä au- tomaattisesti.
Optimointi	Iteratiivinen prosessi, jossa parametrien avulla etsitään ratkaisuja, jotka parantavat suunnitelman toimivuutta (esim. rakenteellisesti tai esteettisesti).
Parametri	Lukuarvo tai muuttuja, joka ohjaa mallin ominaisuuksia (esim. mittasuhteita, kulmia).
Parametrinen mallintaminen	Menetelmä, jossa eri geometriset osat yhdistetään ma- temaattisesti määriteltyihin riippuvuussuhteisiin, jolloin mallia voi muuttaa joustavasti.
Visuaalinen ohjelmointi	Graafinen lähestymistapa, jossa käytetään visuaalisia komponentteja prosessin logiikan rakentamiseen ilman suoraa koodin kirjoittamista.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Parametrinen suunnittelu on ohjelmointiin perustuva suunnittelumenetelmä, jossa käytetään muuttujia ja niiden välisiä riippuvuuksia luomaan joustavia ja muokautuvia suunnitteluratkaisuja. Tämä menetelmä on saanut alkunsa arkkitehtuurin ja insinööritieteiden aloilta, mutta sen sovellukset ovat laajentuneet monille muille teollisuudenaloille, kuten valmistukseen ja tuotekehitykseen. Parametrisen suunnittelun avulla yritykset voivat optimoida suunnitteluprosessejaan, vähentää kustannuksia ja parantaa tuotteidensa laatua. Lisäksi se mahdollistaa nopean reagoinnin markkinoiden muutoksiin ja asiakastarpeisiin, mikä on erityisen tärkeää nykypäivän nopeasti muuttuvassa liiketoimintaympäristössä. Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että parametrinen suunnittelu voi merkittävästi tehostaa innovaatioita ja kilpailukykyä, mikä tekee siitä arvokkaan työkalun yrityksille, jotka pyrkivät pysymään kehityksen kärjessä. (Davis, 2013; Woodbury 2010).

1.2 Tavoite, tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten parametrinen suunnittelun menetelmiä voitaisiin hyödyntää erityisesti putkisiltojen rakennesuunnittelussa, ja arvioida case-esimerkin ja asiantuntijakyselyn avulla kehitetyn mallin käyttökelpoisuutta käytännön suunnittelutyössä. Tarkastelun kohteena oli sekä ala yleisesti että erityisesti työn toimeksiantaja, jolloin huomioon otettiin myös toimeksiantajayrityksen nykyiset käytännöt ja toimintamallit. Tarkoituksena oli arvioida, kuinka parametrinen suunnittelu voisi tehostaa perinteisiä suunnitteluprosesseja ja missä määrin se soveltuisi yrityksen nykyisiin käytäntöihin. Mikäli tutkimuksen tulokset osoittaisivat parametrinen suunnittelun hyödyllisyyden, se voitaisiin ottaa käyttöön uutena työkaluna esimerkiksi projektien esisuunnitteluvaiheessa.

Tärkeimpänä tutkimuskysymyksenä oli selvittää, miten parametrinen suunnittelun menetelmiä voidaan soveltaa putkisiltojen suunnittelussa ja onko se hyödynnettävissä toimeksiantajan tavanomaisiin projekteihin. Lisäksi tarkasteltiin tuottaako

kehitetty parametrinen malli käyttökelpoisia ratkaisuja käytännön suunnittelutyöhön.

Luvussa kaksi perehdytään parametriseen suunnitteluun käsitteenä ja sen keskeisiin periaatteisiin. Lisäksi esitellään aiheeseen liittyviä aikaisempia tutkimuksia ja sovelluksia sekä analysoidaan tutkimuksen kannalta oleellisia ohjelmistoja. Tässä osiossa tarkastellaan parametrisen suunnittelun hyödyntämismahdollisuuksia rakennesuunnittelussa, erityisesti geometrisesti haastavien kohteiden ja toistuvien rakenteiden näkökulmasta. Tarkoituksena on luoda teoreettinen perusta, joka tukee myöhemmissä luvuissa esitettyä kokeellista tutkimusta.

Luvussa kolme käsitellään työn kirjallisuustutkimusta sekä esimerkkitapausta. Lisäksi esitellään case-esimerkinä putkisilta, jonka avulla testataan parametrisen suunnittelun käytännön soveltuvuutta. Tässä yhteydessä kuvataan testitapauksen valinta, aineiston kerääminen ja analysointi sekä tutkimuksen rajaukset.

Luvussa neljä esitetään tutkimuksen tulokset, jotka perustuvat sekä kirjallisuustutkimukseen että case-esimerkin pohjalta tehtyihin havaintoihin. Erityisesti tarkastellaan, kuinka parametrinen suunnittelu vaikutti mallintamisprosessin tehokkuuteen verrattuna perinteiseen suunnittelumenetelmään.

Luvussa viisi arvioidaan tutkimuksen tuloksia, pohditaan niiden merkitystä ja tehdään johtopäätöksiä tutkimuskysymyksiin perustuen. Tässä osiossa tarkastellaan myös tutkimuksen suorittamista, valitun menetelmän toimivuutta ja tutkimuksen rajauksista aiheutuneita mahdollisia vaikutuksia. Lisäksi pohditaan parametrisen suunnittelun käyttöönottoon liittyviä haasteita ja mahdollisia ratkaisuja sekä ehdotetaan jatkotutkimusaiheita.

Tämä tutkimus pyrkii tarjoamaan kokonaisvaltaisen kuvan siitä, miten parametrinen suunnittelu voi integroitua osaksi toimeksiantajan suunnittelukäytäntöjä ja missä määrin sen käyttöönotto voi parantaa tehokkuutta ja suunnittelun laatua.

1.3 Suoritus

Työn ensimmäinen osio suoritettiin kirjallisuustutkimuksen keinoin tutkimalla olemassa olevia tutkimuksia sekä tutkielmia. Tarkoituksena oli muodostaa teoreettinen viitekehys, joka tukee työn myöhempiä kokeellisia osioita. Kirjallisuustutkimuksessa perehdyttiin erityisesti aihealueen keskeisiin käsitteisiin, aiempiin tutkimustuloksiin sekä käytettyihin menetelmiin.

Työn kokeellinen osio toteutettiin ohjelmoimalla testiaineisto yksiaukkoisesta putkisillasta ja tukijaloista. Ohjelmointi suoritettiin Rhinoceros 3D -ohjelmiston sisäänrakennetulla Grasshopper-visuaalisella koodausohjelmistolla, joka mahdollistaa parametrisen mallinnuksen ja automaattisen suunnitteluprosessin hallinnan. Lopputuloksena syntyi muokattava putkisillan rakennemalli, joka siirrettiin Tekla Structures -ohjelmistoon rakennesuunnittelua varten.

Tämän mallinnusprosessin tuloksena kehitettiin alustava mallinnustyökalu, joka mahdollistaa putkisillan rakenteellisten profiilien mallinnuksen. Työkalu toimii lähtökohtana jatkokehitykselle, jossa sitä voidaan laajentaa esimerkiksi liitosten mallinnukseen, FEM-laskentaan sekä rakenteellisten piirustusten tuottamiseen. Näin kehitetty mallinnustyökalu tarjoaa pohjan tarkemmille rakennesuunnittelun ja analyysin tarpeille tulevaisuudessa, mahdollistaen suunnitteluprosessin automatisoinnin ja optimoinnin eri sovelluskohteisiin.

Työkalun toiminnasta laadittiin esittelyvideo, jossa sen keskeisiä toiminnallisuuksia havainnollistettiin visuaalisesti. Video toimitettiin työn toimeksiantajan kollegoille arvioitavaksi, ja heidän palautteensa pohjalta arvioitiin sekä työkalun käytökelpoisuutta että parametrisen suunnittelun sovellettavuutta käytännön suunnittelutyöhön. Lisäksi työkalulla toteutettiin esimerkkisovellus, jossa sitä testattiin todellisessa suunnittelukohteessa.

1.4 Rajaukset

Tutkimus rajataan käsittelemään parametrinen suunnittelun soveltuvuutta erityisesti rakennesuunnittelun kontekstissa. Tarkastelun kohteena ovat toimeksiantajan tavanomaiset projektityypit, kuten teollisuuden hoitotasot, erilaisten laitteiden perustukset sekä putkisillat.

Tutkimuksen kokeellisessa osassa keskitytään yksiaukkoiseen teräksiseen putkisiltaan ja sen tukijalkoihin. Liitosten mallintaminen rajataan tämän työn ulkopuolelle. Kohderakenteisiin asetetaan lisäksi selkeät rajoitteet liittyen geometriaan, topologiaan sekä käytettäviin teräsprofiileihin.

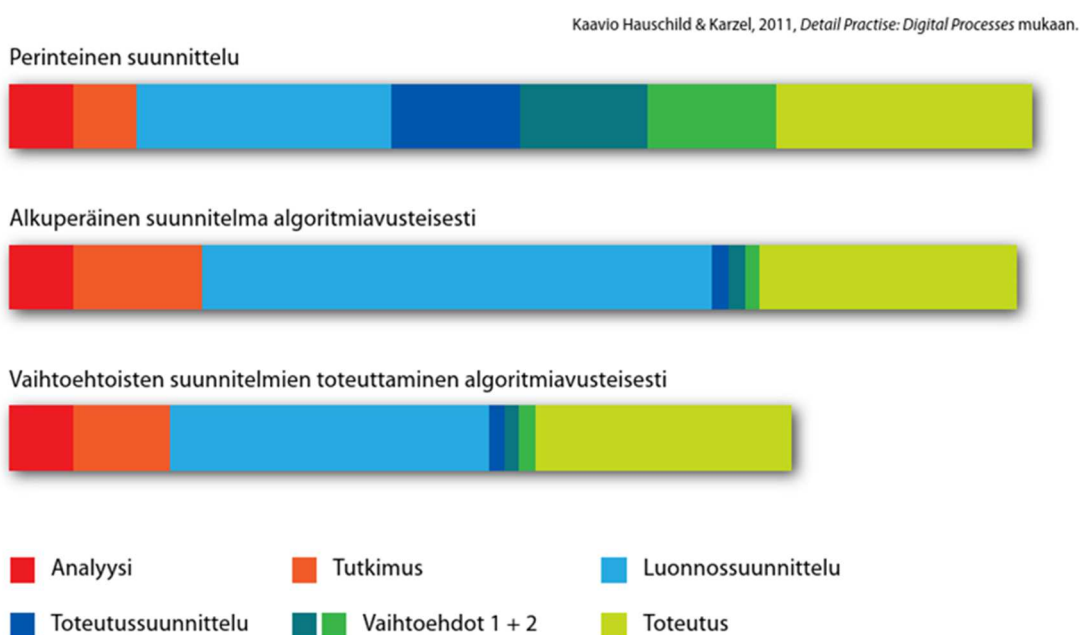
Tutkimuksessa ei tarkastella rakenteiden kantavuutta, mitoitusta tai muuta rakenneteknistä analyysiä, vaan huomio kohdistuu parametrinen suunnittelun toiminnalliseen hyödyntämiseen mallinnusprosessissa.

2 PARAMETRINEN SUUNNITTELU

2.1 Määritelmä ja periaatteet

Parametrinen suunnittelu tarkoittaa suunnitteluprosessin lähestymistapaa, jossa geometriset muodot ja rakenteet muodostetaan määrittelemällä niiden keskinäiset riippuvuussuhteet parametrien avulla. Menetelmä mahdollistaa dynaamisen ja reaaliaikaisen geometrisen mallin päivityksen, kun suunnitteluprosessin syöttämiä arvoja muutetaan. Tällä tavoin suunnittelija voi tutkia vaihtoehtoisia muotoja, optimoida rakenteita ja sopeuttaa ratkaisuja erilaisiin vaatimuksiin.

Kuvassa 1. esitetään ajankäytön jakauma perinteisen ja algoritmiavusteisen suunnittelun välillä. Parametrinen suunnittelu on yksi algoritmiavusteisen suunnittelun muoto, jossa suunnitelma luodaan ja muokataan joustavasti muuttujien ja niiden välisten suhteiden avulla. (Tanska & Österlund 2014).



KUVA 1. Perinteisen ja algoritmiavusteisen suunnittelun ajankäyttö (Hauschild & Karzel 2011).

Parametrinen suunnittelu – usein toteutettuna parametriseina mallintamisena – perustuu perusajatukseen, että suunnittelun eri osat määritellään suhteessa toi-

siinsa asetettujen parametrien avulla. Näin muutokset esimerkiksi mittoihin, kuluihin tai muihin geometrisiin ominaisuuksiin päivittyvät automaattisesti koko malliin reaaliajassa. Tämä lähestymistapa mahdollistaa joustavan, iteratiivisen ja analyysiä tukevan suunnitteluprosessin, jossa muutosten vaikutus voidaan nähdä välittömästi. (Tanska & Österlund 2014).

Tanskan ja Österlundin (2014) esittämä keskeinen havainto liittyy algoritmisen geometrian monikäyttöisyyteen ja muokkautuvuuteen. He korostavat, että algoritmiseen prosessiin perustuvan geometrian avulla voidaan tuottaa samasta mallista informaatiota eri käyttötarkoituksiin ja tarkkuustasoille. Tämä tarkoittaa, että suunnittelun alkuvaiheessa luotu generatiivinen malli toimii perustana useille eri lopputuotteille – esimerkiksi havainnekuville, teknisille detaljikuville tai analyysimalleille – ilman, että jokaista niistä tarvitsee erikseen mallintaa alusta alkaen.

Lisäksi he painottavat, että algoritmisen mallin reaktiokyky analyysin tuloksiin on nopea: havaittuihin muutostarpeisiin voidaan vastata lähes reaaliaikaisesti, ja geometria kykenee optimoitumaan esimerkiksi rakenteellisten tai tilallisten kriteerien mukaan. Tämä luo mahdollisuuksia iteratiiviseen suunnitteluprosessiin, jossa mallia ei ainoastaan muokata reaktiivisesti, vaan se voi ohjautua kohti optimaalisia ratkaisuja automaattisesti määriteltujen parametrien ja sääntöjen mukaisesti.

Tällainen suunnittelulogiikka poikkeaa olennaisesti perinteisestä CAD-pohjaisesta työskentelystä, jossa mallien mukauttaminen analyysin perusteella vaatii usein käsin tehtävää muokkausta. Parametrisen suunnittelun avulla rakenteet ja muodot voidaan kytkeä suoraan analytiikkaan, jolloin suunnittelijan rooliksi jää parametrien hallinta ja suunnittelulogiikan kehittäminen.

2.2 Tutkimusperusta

Tanska–Österlund–tutkimuksessa esitellään laaja-alaisesti algoritmivusteisia menetelmiä puurakenteiden suunnittelussa. Aiemmissa projekteissa, kuten NILA- veistoksessa, Ligna- ja Pudelma-paviljongeissa, on hyödynnetty parametrisen suunnittelun periaatteita:

- Muodon ja rakenteiden optimointi: Parametrinen mallintaminen on mahdollistanut monimuotoisten ja optimoitujen puurakenteiden luomisen. Parametrien muutokset päivittyvät automaattisesti rakenteen geometriaan.
- Iteratiiviset suunnitteluprosessit: Aikaisissa tutkimuksissa on korostettu iteraatioiden merkitystä, jolloin useiden suunnitteluvaiheiden kautta saavutetaan toimivia ja esteettisesti miellyttäviä ratkaisuja.
- Integroitu tuotantoon siirto: Algoritmiavusteinen suunnittelu tukee digitaalista tuotantoa, jolloin suunnittelumalleista saadaan suoraan tuotantoon soveltuva aineisto.

Daniel Davisin (2013) tutkimus ohjelmistotekniikan vaikutuksesta parametriseen suunnitteluun osoittaa, että ohjelmointilogiikan soveltaminen arkkitehtuurimallinnukseen voi tehdä parametrisista malleista joustavampia ja muokattavampia. Tämä viittaa siihen, että ohjelmistotekniikan periaatteet voivat auttaa parametriseen suunnittelun kehittämisessä entistä tehokkaammaksi.

Useissa aiemmissa tutkimuksissa on tarkasteltu parametriseen suunnittelun vaikutuksia paitsi tekniseen suunnittelutyöhön myös laajemmin suunnitteluprosessien ja toimintatapojen tasolla. Aish ja Woodbury (2005) korostavat, että parametrinen suunnittelu ei ole pelkästään uudenlainen ohjelmistotyökalu, vaan sen käyttöönotto edellyttää myös muutoksia suunnittelukulttuurissa ja projektinhallinnassa. Parametrinen lähestymistapa vaatii suunnittelijalta kykyä hallita sekä suunniteltavan kohteen ominaisuuksia että siihen liittyviä muutos- ja riippuvuussuhteita. Tämä tuo mukanaan uudenlaista kompleksisuutta, mutta tarjoaa samalla mahdollisuuksia joustavampaan ja muutosherkempään suunnitteluun.

2.3 Sovellukset rakennesuunnittelussa

Parametrinen suunnittelu on nykyaikaisessa rakennesuunnittelussa keskeinen menetelmä, joka mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden ja rakenteellisten järjestelmien hallinnan. Sen avulla suunnittelija voi määrittellä rakenteiden ominaisuudet muuttujina (parametreina), jolloin muutokset päivittyvät automaattisesti

koko malliin. Tämä lähestymistapa tukee sekä geometrisesti haastavien kohteiden että toistuvien rakenteiden suunnittelua ja optimointia, mahdollistaen suorituskykyisten ja kustannustehokkaiden ratkaisujen saavuttamisen. (Rolvink, van de Straat & Coenders, 2010; D. Fang & C. Mueller, 2021; Bompotas & Martins 2024).

Parametrinen suunnittelu soveltuu erityisesti projekteihin, joissa esiintyy joko merkittävää geometristä monimuotoisuutta tai toistuvia rakenteellisia elementtejä (Pirhonen, Vähänen & Forsman, 2023, s. 32–37). Tämänkaltaisista projekteista on kerrottu lisää luvuissa 2.3.1 ja 2.3.2.

Kirjoittajien mukaan parametrinen suunnittelu tarjoaa useita etuja, kuten mahdollisuuden hallita haastavia geometrisia muotoja kustannustehokkaasti, tuottaa useita rakennevaihtoehtoja ja optimoida ratkaisuja lähtötietoparametrien perusteella. Lisäksi parametrinen suunnittelu voi vähentää suunnittelun rutiinitehtäviin kuluva aikaa ja parantaa lopputuloksen laatua yhtenäistämällä suunnitteluratkaisuja sekä vähentämällä inhimillisten virheiden määrää. (Pirhonen, I., Vähänen, P. & Forsman, J. 2023, s. 32-37).

2.3.1 Geometrisesti haastavat ja monimuotoiset kohteet

Geometrisesti haastavien kohteiden suunnittelussa parametriset menetelmät tarjoavat ratkaisuja, joilla voidaan hallita epäsymmetrisiä, epälineaarisia ja monimutkaisia muotoja. Perinteiset suunnittelumenetelmät kohtaavat usein haasteita, kun rakenteet sisältävät monimutkaisia kaarevia tai vapaamuotoisia geometrioita, joiden käsin mallintaminen on työlästä ja aikaa vievää. Parametrinen suunnittelu mahdollistaa tällaisten rakenteiden joustavan ja tehokkaan mallintamisen määrittelemällä niiden muodonmuutoksia ohjaavat muuttujat. Kuvassa 4 esitetään esimerkki geometrisesti haastavasta rakenteesta.

Rolvinkin, van de Straatin ja Coendersin (2010) mukaan parametrinen suunnittelu mahdollistaa monimutkaisten ja vapaamuotoisten rakenteiden generoinnin sekä niiden muodonmuutosten automatisoinnin. Tämä lähestymistapa tarjoaa

suunnittelijoille mahdollisuuden optimoida rakenteen toiminnallisuutta ja estetiikkaa reaaliaikaisesti, sillä muutokset parametreihin päivittyvät automaattisesti koko malliin. Tällöin eri suunnitteluvaihtoehtojen kokeilu ja vertailu nopeutuu merkittävästi, mikä parantaa suunnitteluprosessin tehokkuutta.

Laskennalliset menetelmät ja simulointityökalut ovat keskeisessä roolissa geometrisesti haastavien rakenteiden suunnittelussa. Bompotasin ja Martinsin (2024) mukaan parametrinen suunnittelu mahdollistaa suunnitteluprosessin tehostamisen erityisesti monivaiheisissa ja iteratiivisissa tehtävissä. Sen avulla suunnittelijat voivat nopeasti arvioida useita vaihtoehtoisia ratkaisuja ja tarkentaa suunnitelmia suorituskykykriteerien pohjalta. Lisäksi parametrinen mallinnuksen ja analyysiohjelmistojen yhteensopivuus mahdollistaa rakenteiden suorituskyvyn arvioinnin reaaliaikaisesti, mikä tukee kestävien ja optimoitujen rakenteellisten ratkaisujen kehittämistä.

Näiden etujen (Rolvink, van de Straat & Coenders, 2010) ansiosta parametrinen suunnittelu on erityisen hyödyllinen suurikokoisissa ja epäsymmetrisissä rakennuskohteissa, joissa rakenteiden manuaalinen mallintaminen ei ole kustannustehokasta. Mallintamisen automatisointi vähentää virheiden määrää ja mahdollistaa suunnitteluratkaisujen iteroinnin, jolloin saavutetaan sekä rakenteellisesti toimivampi että visuaalisesti optimoitu lopputulos.

2.3.2 Toistuvat rakenteet

Fangin ja Muellerin (2021) artikkelin mukaan parametrinen suunnittelu mahdollistaa rakenteellisten elementtien automaattisen monistamisen ja muokattavuuden. Muutokset yksittäisiin parametreihin päivittyvät välittömästi koko malliin. Tämä vähentää suunnittelijan työkuormaa ja nopeuttaa suunnitteluprosessia, sillä esimerkiksi rakennejärjestelmän mittoja tai sijoittelua voidaan muuttaa ilman, että jokainen elementti täytyy muokata erikseen. Parametrinen mallinnus mahdollistaa myös eri vaihtoehtojen nopean vertailun, mikä tukee optimaalisten ratkaisujen löytämistä kustannustehokkuuden ja rakenteellisen toimivuuden näkökulmasta.

Parametrinen mallinnus soveltuvuutta toistuviin rakenteisiin on erityisesti korostettu ristikkorakenteiden yhteydessä, sillä näiden topologia voidaan määrittää suunnitteluvaiheessa ja eri vaihtoehtoja voidaan testata lyhyessä ajassa. Lallan (2017) mukaan parametrinen suunnittelu on erityisen hyödyllinen ristikkorakenteiden kehittämisessä, koska se mahdollistaa rakenteen geometrian ja optimointiprosessin automatisoinnin, mikä vähentää suunnittelijan manuaalista työtä ja parantaa lopputuloksen laatua.

Impolan (2021) tutkimuksen mukaan parametrinen mallinnuksen käyttöönotto lyhensi hoitotasojen ja portaiden suunnitteluun kuluva aikaa noin 50 % verrattuna perinteiseen mallintamistapaan. Tämä merkittävä ajan säästö saavutettiin automatisoimalla mallinnusprosessin kriittisiä vaiheita, kuten mittasuhteiden asettaminen ja standardien mukaisten reunaehtojen täyttäminen.

Suunnitteluprosessin nopeutuminen ilmeni erityisesti tarjousvaiheen esisuunnittelussa, jossa vaihtoehtojen tuottaminen asiakkaalle oli aiemmin manuaalista ja työlästä. Parametrinen mallintaminen mahdollisti dynaamisen muokattavuuden, jolloin muutokset toteutuivat automaattisesti ilman tarvetta manuaaliselle uudelleenmallinnukselle. Esimerkiksi hoitotasojen mittoja muuttamalla myös niihin liittyvät kaiteet ja tukirakenteet päivittyivät automaattisesti. Impola (2021).

Aiemmat tutkimukset osoittavat, että parametrinen suunnittelu voi merkittävästi parantaa rakennusalan suunnitteluprosesseja. Granberg ja Wahlstein (2020) ovat tutkineet putkisiltojen parametrista suunnittelua ja osoittaneet, että optimoitu suunnittelu voi vähentää materiaalikustannuksia sekä hiilidioksidipäästöjä. Tutkimus toi esiin, että algoritmipohjaisella optimoinnilla voidaan löytää kustannustehokkaita ratkaisuja samalla, kun rakenteiden suorituskyky säilyy.

Toisessa tutkimuksessa Kuuhiimo (2023) tutki algoritmivaihteista suunnittelua paalulaattojen mitoituksessa. Tulokset osoittivat, että parametriset mallit tehostivat toistuvien rakenteiden suunnittelua ja mahdollistivat nopeamman mallinnusprosessin. Tämä osoittaa, että parametrinen suunnittelu voi olla merkittävä tekijä rakenneteknisten ratkaisujen kehittämisessä.

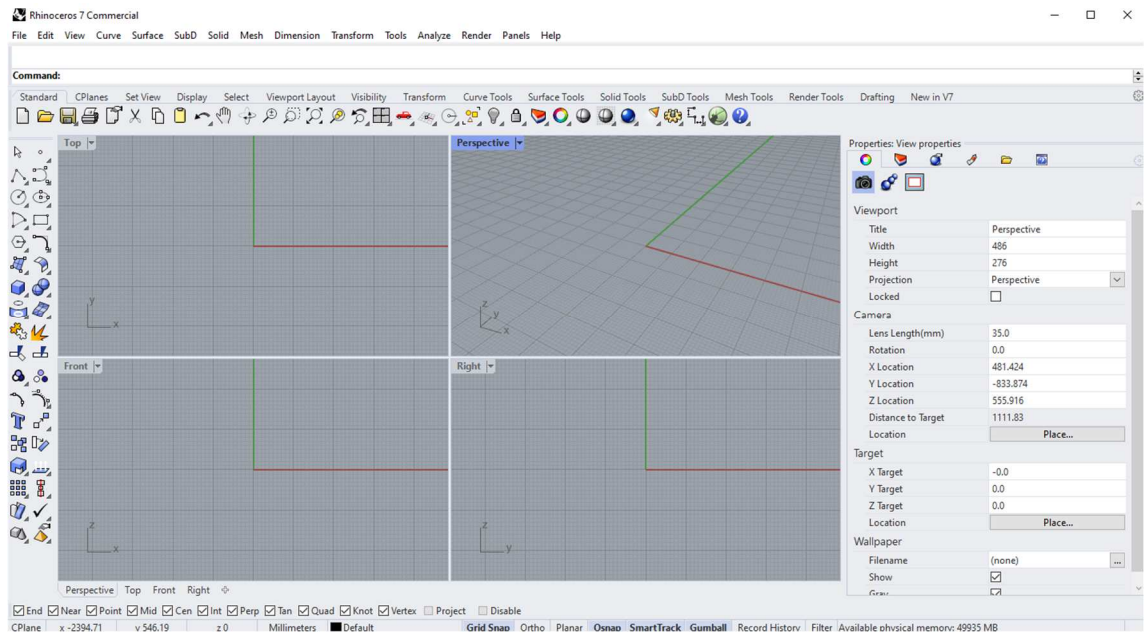
Yksi keskeinen hyöty parametrisessa suunnittelussa on Kuuhiimon mukaan toistuvien rakenteiden ja työvaiheiden automatisointi. Esimerkiksi paalulaattarakenteessa, joka koostuu useista lohkoista, algoritmiavusteinen työkalu voi luoda las-kentavalmiin rakennemallin ja BIM-mallin tehokkaammin kuin manuaalinen suunnittelu. Lisäksi se mahdollistaa paalujakojen optimoinnin rakenteellisten rasitusten perusteella. Tämä tuo merkittäviä etuja erityisesti suurissa infraprojekteissa, kuten Espoon kaupunkiratahankkeessa, jossa paalulaattojen suunnittelua hyödynnettiin laajasti. (Kuuhiimo, 2023).

Näiden ominaisuuksien ansiosta parametrinen suunnittelu voi tarjota merkittävän edun projekteissa, joissa esiintyy samankaltaisia ja säännönmukaisesti toistuvia rakenteellisia elementtejä. Se mahdollistaa työskentelytapojen standardoinnin, optimoi suunnitteluprosessin ja vähentää suunnittelun rutiinitehtäviin kuluvaa aikaa. Samalla se voi parantaa lopputuloksen tarkkuutta ja varmistaa, että suunnitteluratkaisut täyttävät sekä tekniset että valmistukselliset vaatimukset.

2.4 Rhinoceros 3d & Grasshopper

Parametrisen suunnittelun toteuttamisessa käytetään laajasti erilaista ohjelmistoa ja työkalukokonaisuutta, joka tukee sekä visuaalista että tekstimuotoista ohjelmointia. Näiden avulla voidaan rakentaa algoritmeja, jotka muokkaavat geometriaa reaaliaikaisesti. Tässä työssä esitellään erityisesti Rhinoceros 3D -ohjelmisto ja sen sisäänrakennettu visuaalinen ohjelmointiympäristö Grasshopper, joita käytettiin tämän tutkimuksen mallinnusprosessissa.

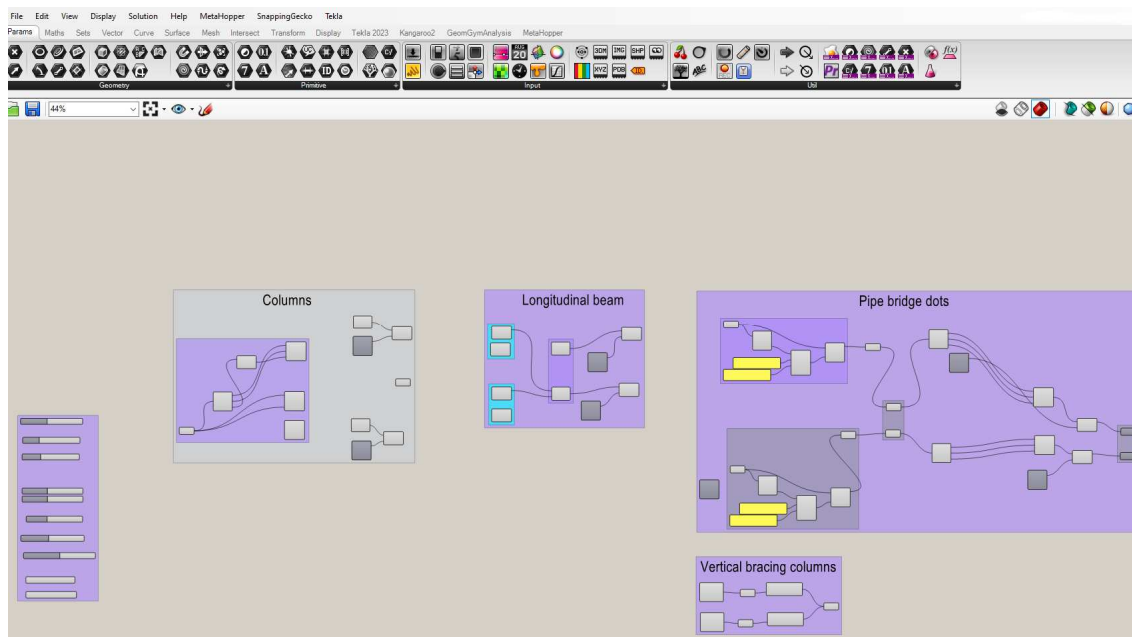
Rhinoceros 3D (Rhino) on kaupallinen 3D-tietokonegrafiikka- ja tietokoneavusteinen suunnitteluohjelmisto (CAD), jonka on kehittänyt Robert McNeel & Associates. Se perustuu NURBS-matematiikkamalliin (eng. Non-Uniform Rational B-Splines), joka mahdollistaa tarkkojen, joustavien vapaamuotoisten pintojen ja käyrien mallintamisen. Rhino-ohjelmistoa käytetään laajasti muun muassa arkkitehtuurissa, teollisessa muotoilussa (esimerkiksi autojen ja vesikulkuneuvojen suunnittelussa), tuotesuunnittelussa (kuten korumuotoilussa) sekä multimedia- ja graafisessa suunnittelussa. Kuvassa 2 on esitetty Rhinon käyttöliittymä (Rhinoceros 3d.)



KUVA 2. Rhinoceros 3D ohjelmiston käyttöliittymä.

Grasshopper on Rhinon sisällä toimiva visuaalinen ohjelmointiympäristö, joka mahdollistaa parametrisen mallinnuksen ilman perinteisen ohjelmoinnin osaaamista. Käyttäjät voivat luoda generatiivisia muotoja vetämällä komponentteja työalustalle ja yhdistämällä niiden lähtöjä ja tuloja toisiinsa. (Rhinoceros 3d).

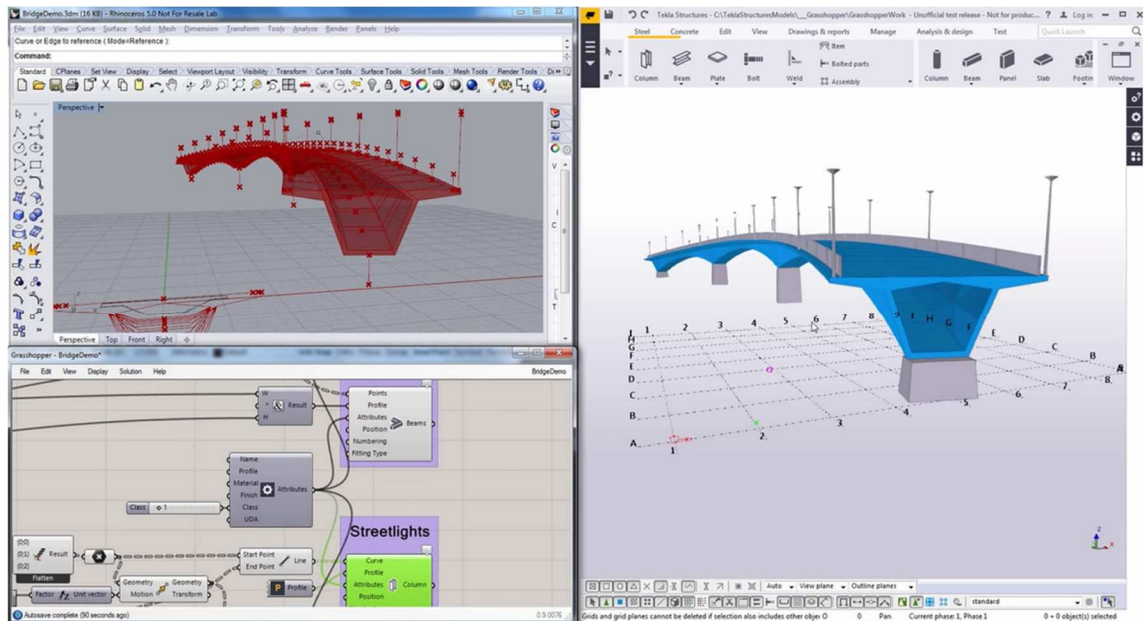
Grasshopperia käytetään laajasti generatiivisen suunnittelun luomiseen, ja monet sen komponenteista tuottavat 3D-geometriaa. Sitä hyödynnetään myös numeerisissa, tekstuaalisissa, audiovisuaalisissa ja haptisissa sovelluksissa. Kuvassa 3 on esitetty Grasshopper ohjelmiston käyttöliittymä sekä esimerkkitasolla visuaalisesta ohjelmoinnista. (Grasshopper).



KUVA 3. Grasshopper ohjelmiston käyttöliittymä.

Rakennesuunnittelussa Rhinon ja Grasshopperin yhdistelmä tarjoaa tehokkaan alustan parametriseen mallintamiseen. Tämä mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden ja muotojen suunnittelun, analysoinnin ja optimoinnin. Grasshopperin avulla suunnittelijat voivat luoda algoritmisia malleja, jotka mukautuvat helposti muuttuviin suunnitteluparametreihin. (Strusoft 2023).

Grasshopper-Tekla Live Link on työkalu, joka yhdistää Grasshopperin ja Tekla Structures -ohjelmiston, mahdollistaen algoritmisen mallintamisen Tekla Structuresissa. Tämä linkki koostuu Grasshopper-komponenteista, joiden avulla voidaan luoda ja muokata objekteja reaaliaikaisesti Tekla Structuresissa. Esimerkiksi linkin avulla voidaan luoda erilaisia teräs-, betoni- ja puuosia sekä määrittää niiden attribuuttitiedot. Lisäksi se mahdollistaa Grid-verkkojen, erilaisten liitoskomponenttien sekä betoniraidoitteiden luomisen. Linkin avulla voidaan myös linkittää Teklassa luotuja osia Grasshopperiin ja muuntaa Tekla-objekteja Grasshopperin ymmärtämäksi geometriatiedoksi. Kuvassa 4 esitetään yhteen linkitetty ohjelmistot. (Grasshopper-Tekla Live Link).



KUVA 4. Rhino, Grasshopper sekä Tekla Structures yhteen linkitettyinä (Grasshopper-Tekla Live link demovideo).

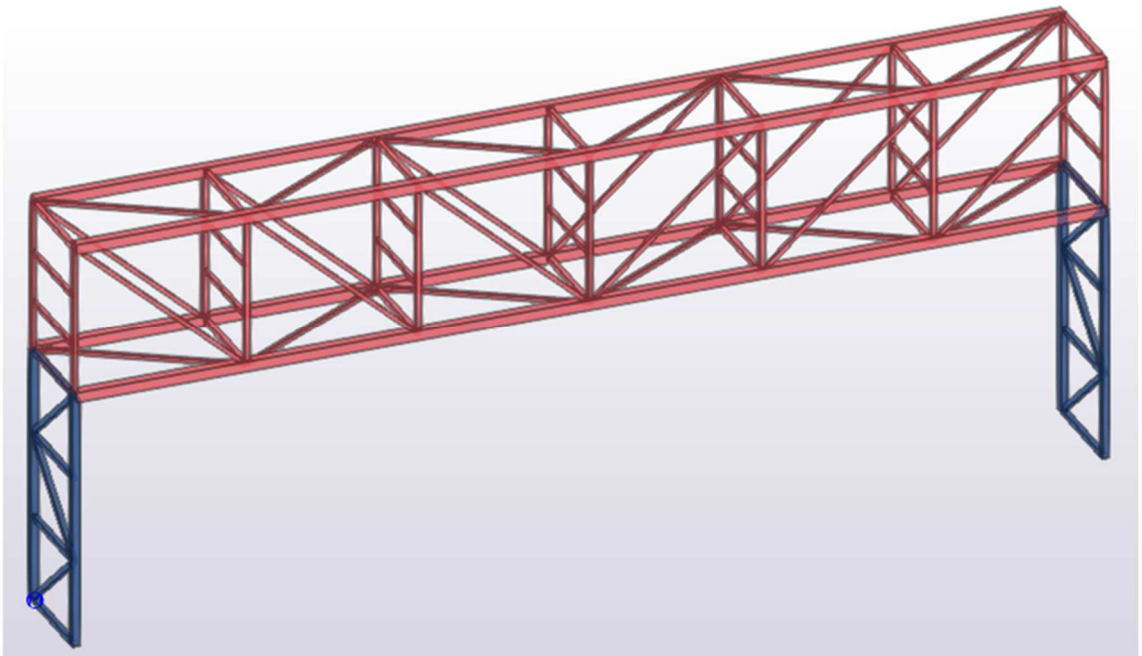
Yhteenvetona Rhinoceros 3D ja Grasshopper tarjoavat tehokkaan alustan parametrisen ja algoritmiseen suunnitteluun, erityisesti rakennesuunnittelussa. (Singh 2024). Grasshopper-Tekla Live Linkin avulla tämä suunnitteluprosessi voidaan integroida suoraan Tekla Structures -ohjelmistoon, mikä mahdollistaa saumattoman tiedonsiirron ja tehokkaan suunnittelun. (Grasshopper-Tekla Live Link).

3 CASE-ESIMERKKI

Tässä luvussa esitellään opinnäytetyön käytännön osuus, jossa kehitettiin ja arvioitiin parametrinen suunnittelun soveltuvuutta teollisuuden putkisillan rakenteelliseen suunnitteluun. Luvussa kuvataan tutkimusasetelma, aineiston keruu ja analyysi sekä testaus todellisessa suunnitteluprojektissa. Tavoitteena oli selvittää, millaisia mahdollisuuksia ja rajoitteita parametrinen suunnittelu tuo käytännön rakennesuunnitteluun, ja missä määrin se voisi täydentää toimeksiantajayrityksen nykyisiä suunnittelukäytäntöjä.

3.1 Testitapauksen valinta ja tutkimuksen toteutus

Kirjallisuuskatsauksen perusteella esimerkkitapauksena valikoitui teräsrakenteinen teollisuuden putkisilta (kuva 5). Valintaan vaikutti erityisesti se, että putkisillat ovat toimeksiantajalle tyypillisiä kohteita, ja niissä esiintyy rakenteellista toistuvuutta. Luvussa kaksi on käsitelty tämällytyypisiä rakenteita.



KUVA 5. Putkisilta ja tukijalat.

Tutkimuksen tavoitteena oli vertailla perinteisen ja parametrinen mallinnuksen tehokkuutta rakennesuunnittelussa. Tarkastelun kohteena olivat mallintamiseen

käytetty aika, suunnittelijoiden kokemukset parametrisen mallin käytöstä sekä sen vaikutus suunnitteluprosessin sujuvuuteen ja lopputuloksen laatuun.

Tutkimuksessa kehitettiin parametrinen suunnittelutyökalu, jolla voidaan mallintaa putkisillan runko ja tukirakenteet visuaalisesti ja tehokkaasti. Työkalun toimintaa ja käyttömahdollisuuksia esiteltiin lyhyellä videolla, joka toimi johdantona laadulliselle arvioinnille. Esiitysmateriaalin tarkoituksena oli havainnollistaa, millaisia suunnitteluratkaisuja työkalulla voidaan tuottaa ja miten parametriset kytkennät vaikuttavat mallin muodostumiseen.

Videon pohjalta kerättiin suunnittelijoiden näkemyksiä työkalun käyttökelpoisuudesta ja soveltuvuudesta heidän omaan työhönsä. Arviointi toteutettiin strukturoidun kyselyn avulla, ja sen tarkoituksena oli selvittää, kuinka relevantti ja käytökelpoinen kehitetty työkalu olisi yrityksen tavanomaisiin suunnitteluprojekteihin.

Parametrinen malli toteutettiin Tekla Structures -ohjelmistossa hyödyntäen siihen integroitua Grasshopper-sovellusta. Ratkaisu ei edellyttänyt käyttäjältä erillistä ohjelmointiosaamista. Parametrinen malli mahdollisti keskeisten suunnittelu-muuttujien säätämisen keskitetysti, jolloin muutokset päivittyivät automaattisesti mallin kaikkiin osiin.

Perinteinen suunnittelumenetelmä määriteltiin tässä tutkimuksessa mallinnustavaksi, jossa rakenteen osat luodaan ja muokataan yksitellen ilman keskinäisiä riippuvuuksia. Tällöin jokainen rakenneosaa – kuten palkki, tukirakenne ja liitos – mallinnetaan erikseen, ja mahdolliset muutokset on toteutettava manuaalisesti jokaiseen osaan. Tämä tekee mallin muokkaamisesta työläämpää ja altistaa virheille.

Mallinnettava putkisilta valittiin siten, että sen rakenne on toistettavissa ja esiintyy usein saman tyyppisissä hankkeissa. Mallista jätettiin pois liitokset, jotta voidaan keskittyä geometriseen rakenteeseen ja sen parametrisointiin. Parametrit valittiin kirjoittajan suunnittelukokemuksen ja kokeneen putkistosuunnittelijan haastattelun perusteella, ja ne edustavat keskeisiä mitoitustekijöitä kohteessa.

Tutkimuksessa tunnistettiin, että parametrisen suunnittelun objektiivinen arviointi voi olla haastavaa, koska suunnittelijan henkilökohtaiset ominaisuudet – kuten kokemus, työskentelytavat ja vireystila – vaikuttavat työn nopeuteen ja laatuun. Tästä syystä tutkimus toteutettiin laadullisin menetelmin, jotta saataisiin monipuolinen ja käyttökelpoinen käsitys työkalun toimivuudesta ja soveltuvuudesta käytännön suunnittelutyössä.

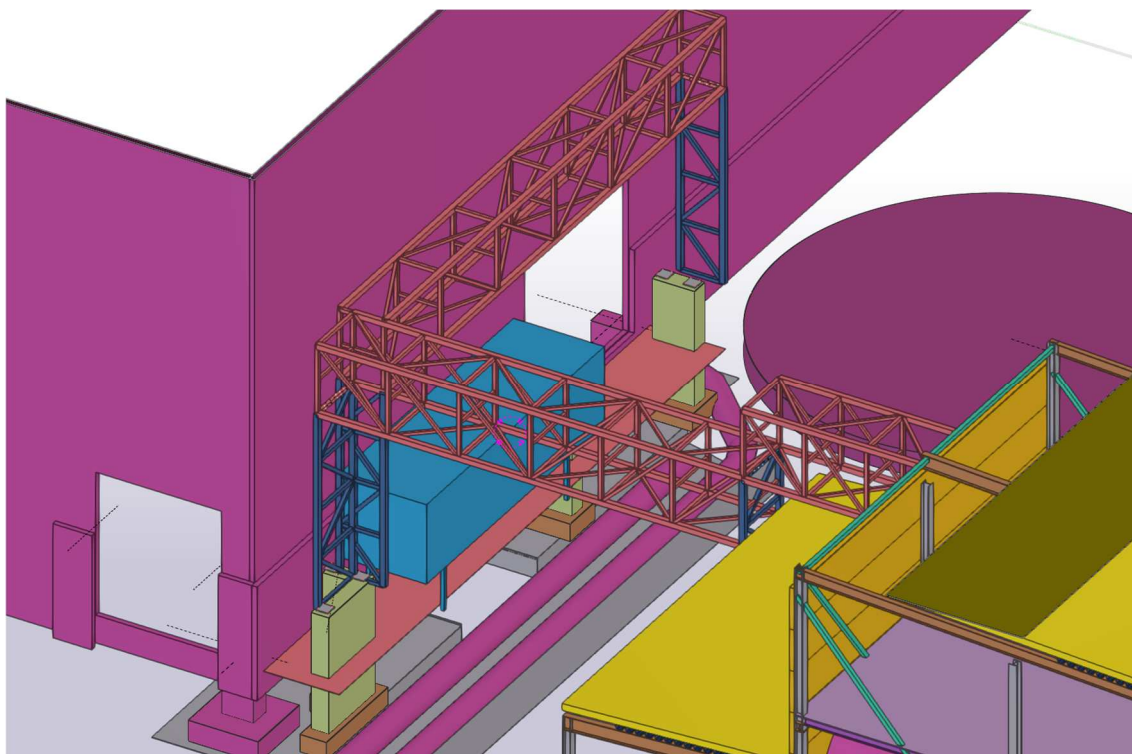
3.2 Aineiston kerääminen ja analysointi

Aineisto kerättiin strukturoiduilla kyselylomakkeilla, joihin osallistui kuusi toimek-siantajayrityksen suunnittelijaa. Ennen vastaamista osallistujille esitettiin lyhyt videoesitys kehitetystä työkalusta, jotta kaikille muodostuisi yhtenäinen käsitys sen toiminnallisuudesta ja käyttötarkoituksesta.

Haastatteluissa kartoitettiin suunnittelijoiden näkemyksiä työkalun hyödyllisyydestä, soveltuvuudesta ja mahdollisista haasteista. Lisäksi selvitettiin vastaajien työkokemus vuosissa, mikä mahdollisti näkökulmien vertailun eri kokemustason omaavien suunnittelijoiden välillä. Kyselyn tuloksia hyödynnettiin analyysissä, jossa arvioitiin työkalun potentiaalia yrityksen suunnitteluprosessien tukena.

3.3 Esimerkkisovellus

Opinnäytetyössä kehitettyä parametrista työkalua testattiin käytännössä erään sähkökattilalaitoksen putkisillan mallinnuksessa. Työkalun testaajalla ei ollut aiempaa kokemusta parametrisestä suunnittelusta, mutta työkokemusta yli 10 vuotta rakennesuunnittelusta. Tässä hankkeessa oli tarpeena mallintaa useita putkisiltavaihtoehtoja nopeasti, jotta eri reittivaihtoehtojen teknistä toteutettavuutta voitiin arvioida alustavasti. Kuvassa 6 on esitetty esimerkkisovellus rakennemallissa, jossa rakennetta monistamalla ja kääntämällä saatiin aikaan esisuunnitteluvaiheen malli muutamassa minuutissa. Testaajan mukaan tämä olisi vienyt aikaa moninkertaisesti perinteisin menetelmin.



KUVA 6. Esimerkkisovellus rakennemallissa

Mallin avulla pystyttiin luomaan tarvittavat geometriat sekä alustavat visualisoinnit ilman manuaalista mallinnusta jokaiselle vaihtoehdolle. Parametrinen lähestymistapa mahdollisti sen, että eri jännevälit ja kaltevuudet voitiin arvioida yhdestä mallipohjasta, mikä olisi ollut työlästä perinteisin menetelmin.

Rakenteen oikeellisuus todettiin usealla tavalla: alustavalla käsilaskennalla ja FEM-ohjelmiston avulla varmennettiin stabiliteetti ja kestävyys. Törmäykset ja päällekkäisyydet tarkastettiin silmämääräisesti. Putkistosuunnittelijan kanssa käytyjen keskustelujen perusteella rakenne todettiin toteutuskelpoiseksi. Se vastasi aiemmin toteutettuja ja toimiviksi havaittuja rakentamistapoja, mikä vahvisti sen valmistettavuuden, kuljetettavuuden ja asennettavuuden.

4 TULOKSET

4.1 Suunnittelutyökalun toimintaperiaate

Seuraavassa on esitetty tiivistetysti Grasshopperilla tehtävän parametrisen mallin rakentamisen keskeiset vaiheet tässä opinnäytetyössä:

1. **Lähtöparametrien määrittely:** Valittiin malliin sisällytettävät muuttujat (esim. mitat, topologia ja materiaalitiedot) ja määritettiin niille alkuarvot käyttäen esimerkiksi Number Slider- ja Value List -komponentteja.
2. **Geometrian luonti:** Muodostettiin kolmiulotteinen perusrakenne pisteiden ja viivojen avulla, hyödyntäen esimerkiksi komponentteja Construct Point, Line ja Move.
3. **Elementtien luonti ja yhdistely:** Geometrian osat yhdistettiin rakenteelliseksi kokonaisuuksiksi, kuten sillan palkistoiksi, tukijaloiksi ja vinotuenaksi.
4. **Integraatio BIM-ohjelmistoon:** Parametrinen malli siirrettiin reaaliaikaisesti Tekla Structures -ympäristöön Grasshopperin Tekla Live Link -liitännäisen avulla.
5. **Testaus ja validointi:** Tarkistettiin mallin mittatarkkuus, parametrien toimivuus sekä visualisointi. Samalla arvioitiin mallin muokattavuutta ja käytettävyyttä suunnitteluprosessin eri vaiheissa.

Toteutetussa työkalussa parametrisoitiin seuraavat muuttujat, joiden avulla mallin mittoja ja rakenteellisia ominaisuuksia voidaan säätää dynaamisesti:

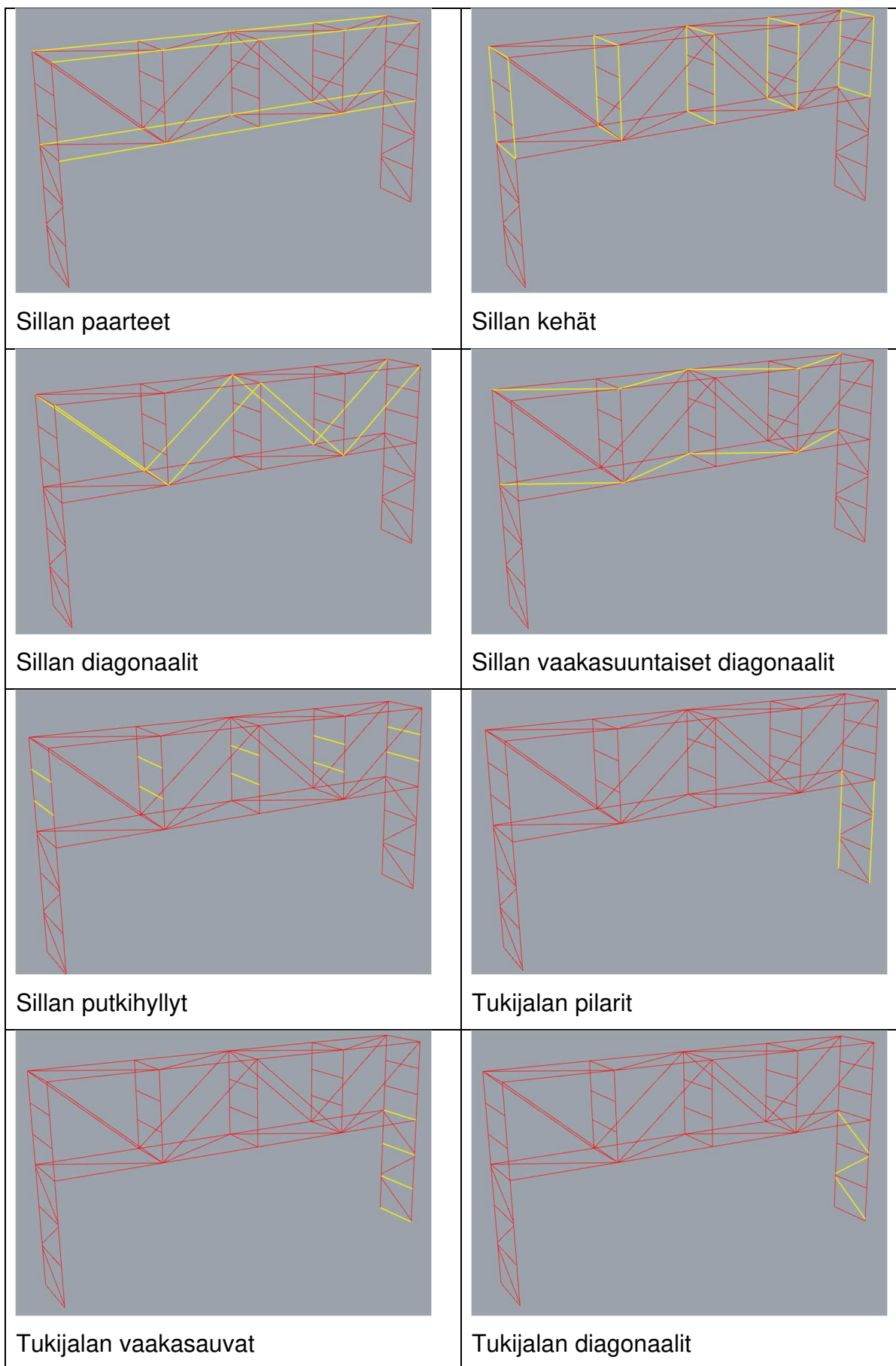
- Putkisillan jänneväli
- Vapaa korkeus putkisillan alla, joka jaettiin erikseen kahteen säädettävään parametriin (H1 ja H2).
- Tukijalan kaksi lähtökorko
- Putkisillan leveys ja korkeus
- Putkiston tuentaväli
- Tukijalkojen sauvojen kappalemäärä ja suunta
- Putkisillan diagonaalien kappalemäärä ja suunta

- Putkisillan diagonaalien kääntymiskohta, jos niitä on pariton määrä
- Putkisillan putkistokannakkeiden kappalemäärä
- Putkisillan ja tukijalkojen kääntö pystysuoran akselin suhteen
- Putkisillan ja tukijalkojen teräsprofiilit
- Putkisillan ja tukijalkojen materiaali
- Teräsprofiilien nimet
- Teräsprofiilien luokka
- Teräsprofiilien sijainti

Lähtöparametrien lisääminen jälkikäteen on teknisesti mahdollista, mutta se voi olla työlästä. Tämä koskee erityisesti tilanteita, joissa ohjelmointikoodin logiikka rakentuu alkuperäisten parametrien varaan. Tässä yhteydessä suunnittelutyökaluun lisättiin myöhemmin esimerkiksi mahdollisuus rakenteen kääntämiseen pystysuoran akselin suhteen.

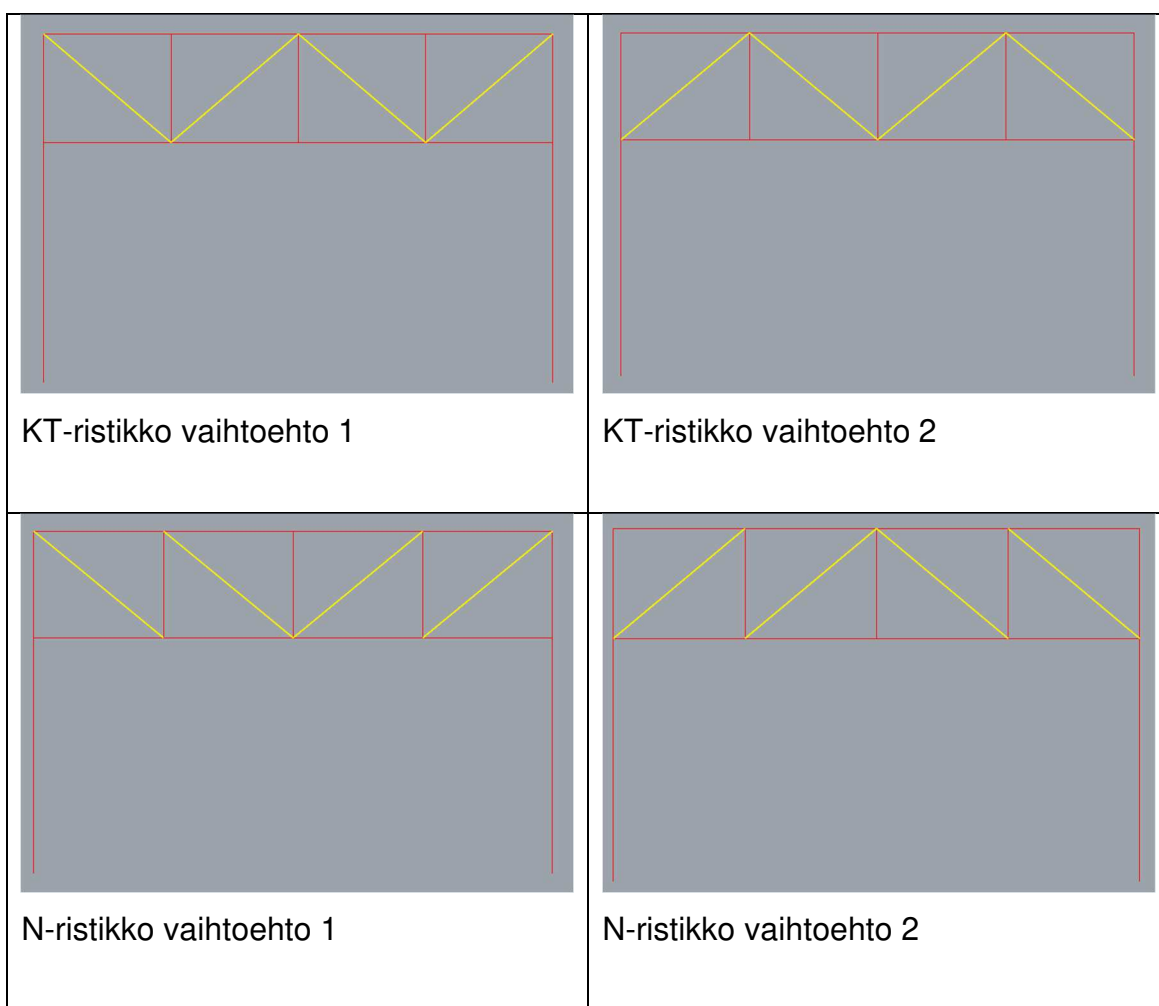
Parametrisen algoritmin kehitys käynnistyy lähtöparametrien määrittelystä, eli päätöksestä, mitkä muuttujat mallinnetaan parametrisina. Tässä työssä valitut parametrisoitavat ominaisuudet on lueteltu edellä.

Putkisillan ja tukijalkojen rakenne jaettiin kahdeksaan osaryhmään, jotka ovat: tukijalan pilarit, tukijalan vaakasauvat, tukijalan diagonaalit, sillan paarteet, sillan kehät, sillan diagonaalit, sillan vaakasuuntaiset diagonaalit sekä kaapelihyllyt. Näille ryhmille voidaan määrittää käyttäjän toimesta useita ominaisuuksia, kuten rakenneosien pituus, käytettävä materiaali sekä poikkileikkausmuoto. Kuvassa 7 havainnollistetaan kyseiset osaryhmät keltaisella värillä ja muut osat punaisella värillä.

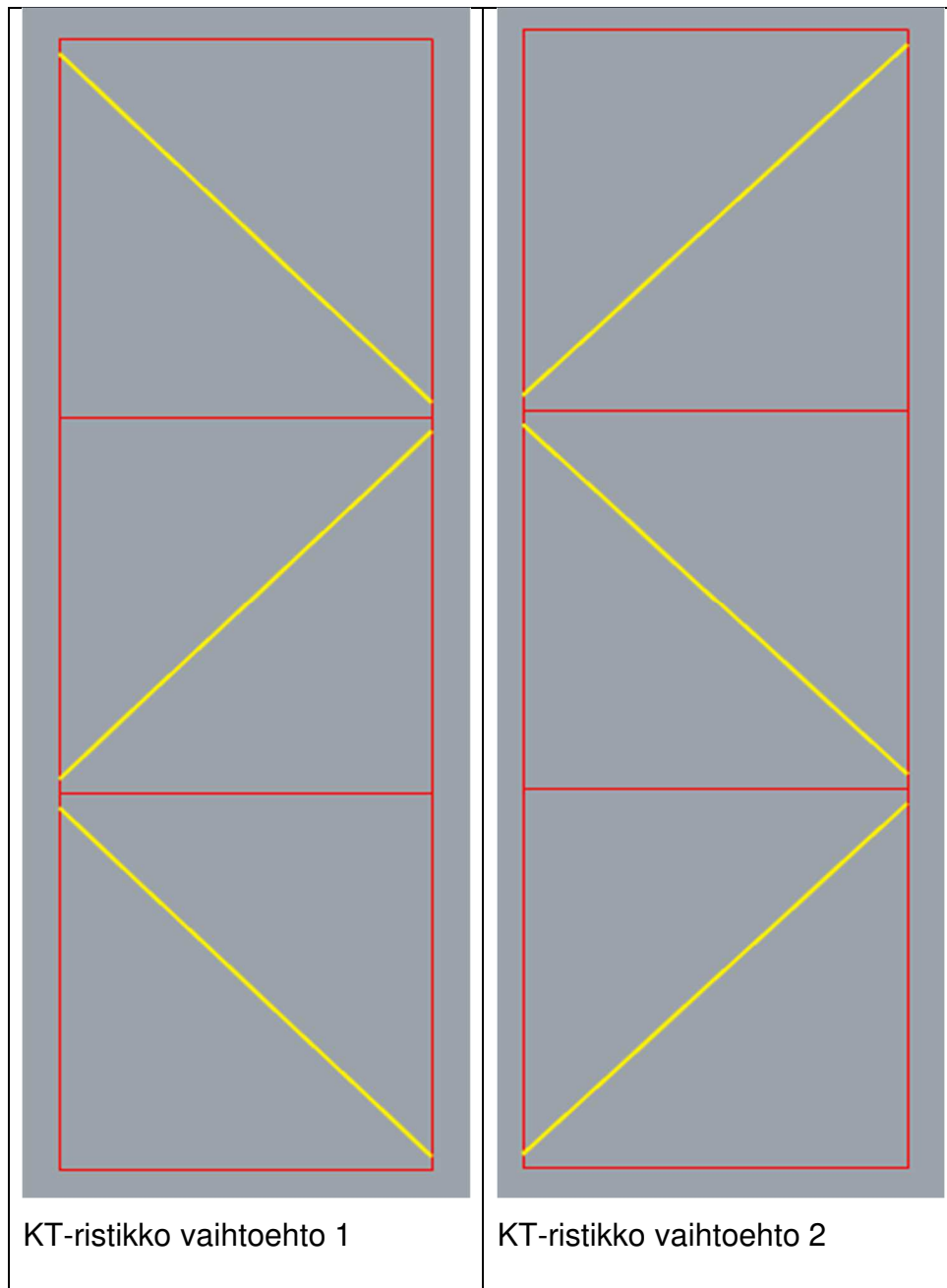


KUVA 7. Putkisillan ja tukijalkojen osien ryhmät.

Diagonaalit sekä putkisillassa että sen tukijaloissa parametrisoitiin valitsemalla neljä vaihtoehtoista topologista rakennetta: ns. KT-ristikko (jossa diagonaalien suunta vaihtuu jokaisessa kentässä), sen peilikuva, N-ristikko sekä N-ristikon peilikuva. Näiden avulla luotiin mahdollisuus vaihtaa diagonaalien järjestystä käyttäjän tarpeiden mukaan (kuvat 8 ja 9). Lisäksi diagonaalien kappalemäärä on parametrisoitu, jolloin käyttäjä voi säätää tuentojen lukumäärää rakenteen mitoituksen ja tarpeen mukaan. Keltainen väri osoittaa eri vaihtoehdot.



KUVA 8. Putkisillan topologia vaihtoehdot.



KUVA 9. Putkisillan topologia vaihtoehdot jaloissa.

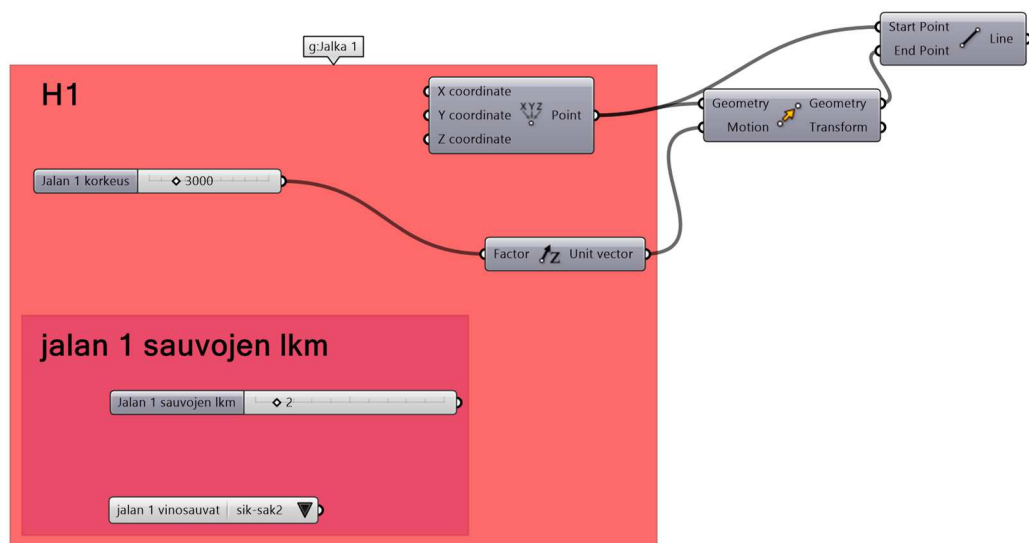
Parametrisen mallin mallinnusprosessin lähtöpiste määritettiin origoksi (koordinaatit 0,0,0), joka tässä työssä toimii tukijalan lähtöpisteenä. Kaikki algoritmin sisäiset mitta-arvot on ilmoitettu millimetreinä. Kuvassa 10 esitetään esimerkkejä parametrisoiduista arvoista, kuten ensimmäisen jalan korkeus, vaakasauvojen lukumäärä ja vinotuennan suunta.

Mallinnusprosessissa käytettiin mm. seuraavia Grasshopper-komponentteja:

- Construct Point: luo uuden pisteen käyttäjän määrittämällä koordinaateilla.

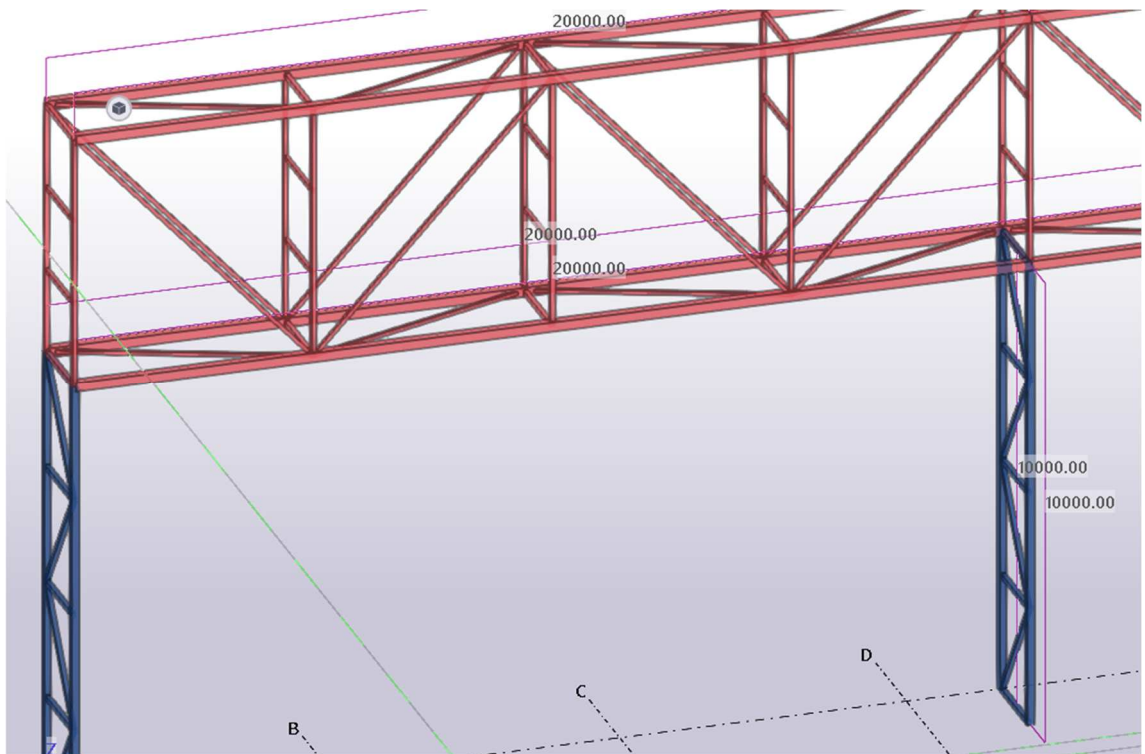
- Move: siirtää geometrian annettuun vektorisuuntaan.
- Line: muodostaa viivan kahden pisteen välille.
- Unit Z: luo yksikkövektorin Z-akselin suuntaan.
- Number Slider: mahdollistaa numeerisen arvon määrittämisen liukusäätimen avulla.
- Value List: mahdollistaa ennalta määritettyjen arvojen valitsemisen avattavasta listasta.

Ohjelmointikoodin hallittavuutta ja käytettävyyttä parannettiin ryhmittelemällä komponentteja ja parametreja visuaalisesti. Tällainen ryhmittely mahdollistaa esimerkiksi koko rakenteen segmenttien siirtämisen yhtenä kokonaisuutena ja parantaa työkalun muokattavuutta.



KUVA 10. Parametrit ja komponentit Grasshopperissa.

Visualisoinnin tukena käytettiin komponenttia Distance Display, joka tuo mitat näkyviin Tekla Structures -ohjelmassa. Tämä parantaa tarkkuutta ja mahdollistaa mittojen nopean visuaalisen tarkastelun (kuva 11).



KUVA 11. Mitat Teklassa.

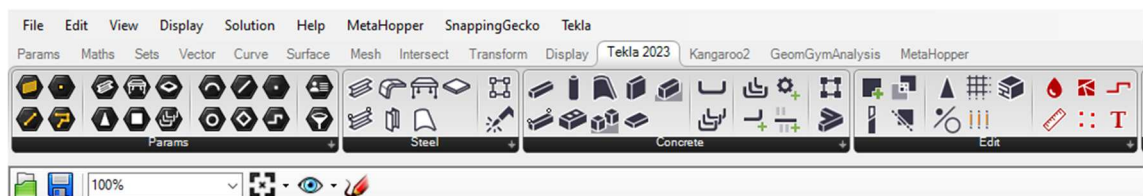
Lopullinen ohjelmointikoodi muodostaa putkisillan geometrian käyttäjän antamien syötearvojen perusteella. Malli sisältää sekä putkisillan rungon että tukijalat, ja sen rakenne seuraa määriteltyjä osaryhmiä ja topologisia sääntöjä.

4.1.1 Mallin siirto BIM-ohjelmistoon

Mallin siirtämiseen BIM-ohjelmistoon käytettiin Tekla Live Link -liitännäistä, jonka on kehittänyt Trimble Solutions Corporation. Tämä komponentti mahdollistaa reaaliaikaisen yhteyden Grasshopperin ja Tekla Structuresin välillä. Kun liitännäinen on asennettu, ilmestyy Grasshopperin käyttöliittymään uusi "Tekla"-välilehti, joka tarjoaa pääsyn kaikkiin tarvittaviin Teklaan liittyviin toimintoihin (kuvat 12 ja 13). (Trimble Solutions Corporation 2025).



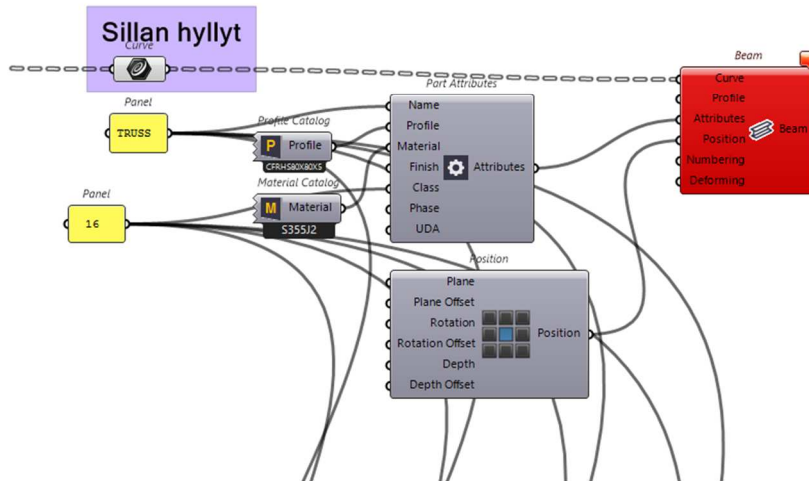
KUVA 12. Grasshopper – Tekla Live Link lisäosa.



KUVA 13. Osa Tekla Live Link lisäosan työkalupalkista.

Kuvassa 14 punaisella korostettu komponentti toimii rajapintana Grasshopperin ja Tekla Structuresin välillä. Sen tehtävänä on siirtää aiemmin Grasshopperissa määritellyt geometriatiedot, tässä tapauksessa putkihylyt, suoraan Teklan malliin. Siirto tapahtuu käyttäjän määrittämien parametrien mukaisesti, jolloin komponentti mahdollistaa reaaliaikaisen, parametripohjaisen mallin synkronoinnin suunnitteluympäristöjen välillä. Tämä mahdollistaa suunnitteluprosessin tehokkaan ohjaamisen ja mallin dynaamisen päivittymisen muutosten mukaan.

Export to Tekla

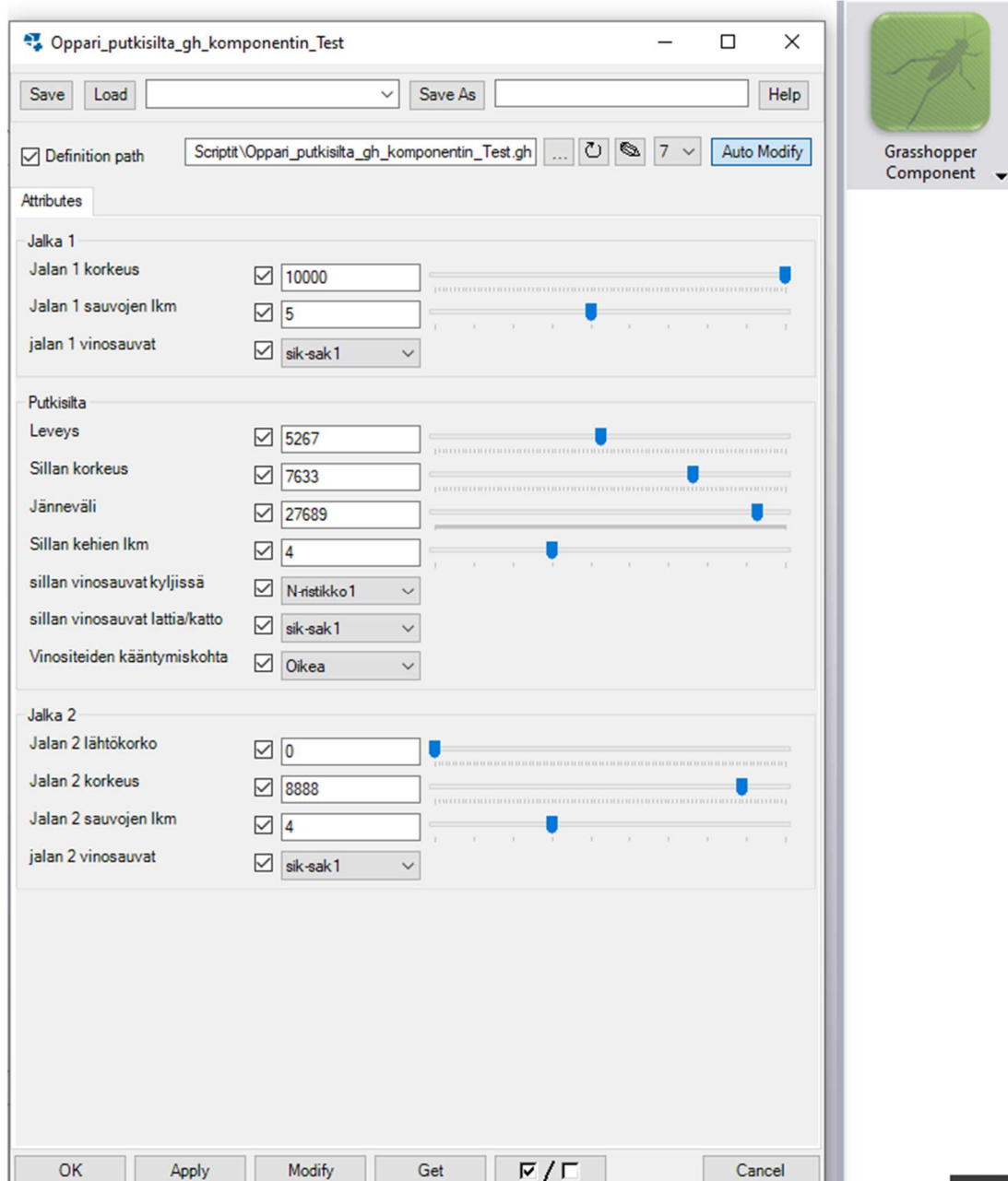


KUVA 14. Esimerkki Teklaan viennistä.

Työssä hyödynnettiin myös Grasshopper-komponenttia, joka mahdollistaa parametripohjaisen mallinnuksen ilman varsinaista ohjelmointiosaamista (kuva 15). Komponentin avulla valmiiksi määritellyt parametrit – kuten esimerkiksi putkisillan mitat, topologia ja materiaalitiedot – voitiin muokata graafisen käyttöliittymän kautta Tekla Structures -ympäristössä. Tämä mahdollistaa ohjelmointikoodin toiminnallisuuden hyödyntämisen ilman manuaalista koodin kirjoittamista.

On kuitenkin tärkeää erottaa työkalun kehittäjän ja käyttäjän roolit. Työkalun kehittäjä laatii parametripohjaisen mallin ja siihen liittyvän käyttöliittymän Grasshopperissa, mikä vaatii sekä algoritmista ajattelua että ohjelmoinnin perusteiden hallintaa. Loppukäyttäjä puolestaan käyttää valmista käyttöliittymää syöttämällä tai säätämällä parametreja ennalta määritettyjen ohjauskomponenttien, kuten Number Slider- ja Value List-tyyppisten valintojen kautta. Näin ollen käyttöliittymä voidaan toteuttaa siten, ettei käyttäjän tarvitse muokata itse koodia tai ymmärtää algoritmien rakennetta.

On kuitenkin huomattava, että työkalun käyttö edellyttää Rhino- ja Grasshopper-ohjelmistojen asentamista käyttäjän tietokoneelle, jotta yhteys Tekla Structuresin ja parametrisen mallin välillä voidaan muodostaa.



KUVA 15. Grasshopper komponentti Teklassa.

4.2 Kyselyn tulokset

Tutkimuksen laadullinen osuus toteutettiin kyselynä, jonka tarkoituksena oli kar-
toittaa suunnittelijoiden kokemuksia ja näkemyksiä parametrisen suunnittelun
käytöstä sekä sen vaikutuksista suunnittelutyöhön. Kyselyyn vastasi yhteensä

kuusi henkilöä, joilla oli vaihteleva määrä kokemusta rakennesuunnittelun alalta. Vastaajien jakauma kokemuksen mukaan oli seuraava: 3–5 vuotta (n=2), 6–10 vuotta (n=2) ja yli 10 vuotta (n=2). Alle kolmen vuoden kokemusta ei ollut yhdelläkään vastaajalla.

Parametrisen mallinnuksen omaksuttavuus arvioitiin pääosin erittäin helpoksi (n=4) tai melko helpoksi (n=1). Yksi vastaaja suhtautui asiaan neutraalisti, eikä kukaan kokenut omaksumista vaikeaksi. On tärkeää huomata, että arvio perustui esitettyyn videoon, jossa esiteltiin työkalun toimintaa visuaalisesti rajatussa suunnittelutilanteessa. Kysely ei käsitellyt koko parametrisen suunnitteluprosessin laajuutta.

Kaikki vastaajat kokivat parametrisen mallinnuksen vaikuttavan työn tehokkuuteen positiivisesti. Suurin osa (n=4) arvioi sen lisäävän tehokkuutta merkittävästi, ja kaksi vastaajaa koki tehokkuuden lisääntyvän jonkin verran. Heikentäviä vaikutuksia ei raportoitu.

Kysymykseen siitä, pitäisikö Elomatic Oy:ssä kokeilla parametrisen suunnittelun käyttöönottoa laajemmin, kaikki vastaajat vastasivat myöntävästi (n=6).

Niissä työvaiheissa, joiden nähtiin kuluttavan eniten aikaa ja joissa arvioitiin olevan potentiaalia automaatiolle tai parametrisoinnille, korostuivat erityisesti piirustusten tuottaminen (n=5) ja rakenteiden toteutussuunnittelu (n=4). Rakenteiden mitoitus mainittiin kolmessa vastauksessa, ja rakenteiden esisuunnittelua ei noussut esiin lainkaan.

Parametrisen suunnittelun käyttöönottoa rajoittavina tekijöinä mainittiin kustannukset (n=4), ajan puute (n=3), osaamisen puute (n=1), muutosvastarinta (n=1) ja käytettävyys (n=1).

Kyselyn viimeisessä osassa selvitettiin, minkälaisiin rakenteisiin vastaajat voisivat kuvitella käyttävänsä parametrista työkalua. Ylivoimaisesti yleisin vastaus oli toistoa sisältävät rakenteet kuten putkisillat (n=6). Myös perustukset (n=2) ja haastavat geometriat, kuten kaarevat palkit (n=1), mainittiin.

Kyselyn kaikki kysymykset ja vastausten jakaumat on esitetty liitteessä 1.

4.3 Esimerkkisovellus

Sähkökattilalaitoksen projektista saatujen käyttökokemusten perusteella kehitettyä parametrityökalua voidaan pitää potentiaalisesti hyödyllisenä työvälineenä erityisesti putkisiltojen esisuunnitteluvaiheessa. Malli vaikutti toimivan vakaasti, ja käyttäjä pystyi muokkaamaan parametreja ilman ohjelmointiosaamista. Lisäksi toistettavuus ja muunneltavuus, joita esisuunnittelussa usein tarvitaan, näyttivät toteutuvan tämän sovelluksen yhteydessä.

Myös käyttöliittymä ja parametrit koettiin tässä yksittäisessä tapauksessa varsin intuitiivisiksi. Nämä havainnot ovat linjassa kyselytutkimuksesta esiin nousseiden näkemysten kanssa.

5 TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA

Parametrisen suunnittelun hyödyllisyyttä on tarkasteltu aiemmin luvussa 2, jossa todettiin sen soveltuvan erityisesti geometrisesti haastaviin ja toistuviin rakenteisiin. Parametrisen lähestymistavan etuina ovat muun muassa mahdollisuus hallita geometrisesti haastavia rakenteita kustannustehokkaasti, tuottaa useita rakennevaihtoehtoja sekä optimoida ratkaisuja lähtötietoparametrien perusteella. Lisäksi sen on todettu vähentävän suunnittelun rutiinitehtäviin kuluvaan aikaan ja parantavan lopputuloksen laatua vakioimalla suunnitteluratkaisuja ja vähentämällä inhimillisten virheiden määrää.

Luvussa 2.4. artikkelissa (Pirhonen, I., Vähänen, P. & Forsman, J. 2023) esitetyt näkemykset perustuvat sen kirjoittajien omiin kokemuksiin ja mielipiteisiin, joten niiden yleistettävyyden laajempiin rakennesuunnittelun sovelluksiin vaatii lisätutkimusta. Näin ollen parametrisen suunnittelun todellista tehokkuutta ja sovellettavuutta eri projektityyppeihin tulisi tarkastella edelleen tapauskohtaisesti ja vertaamalla sitä perinteisiin suunnittelumenetelmiin laajemmassa mittakaavassa.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset esimerkkisovelluksesta tukevat osittain näitä havaintoja, sillä parametrinen mallinnus osoittautui hyödylliseksi erityisesti toistuvien rakenteiden, kuten putkisiltojen, mallintamisessa. Kuitenkin käytännön toteutuksessa havaittiin myös haasteita, kuten parametrien määrittämisen monimutkaisuus sekä ohjelmistoyhteensopivuuden asettamat rajoitukset.

Case-esimerkin ja kyselytutkimuksen tulokset osoittavat, että parametrinen mallinnus voi tarjota merkittäviä etuja toistuvien rakenteiden suunnittelussa, erityisesti silloin, kun rakenteellisten elementtien monistaminen ja muokkaaminen halutaan toteuttaa tehokkaasti ennalta määritettyjen sääntöjen mukaisesti. Perinteisessä suunnitteluprosessissa yksittäisten komponenttien, kuten palkkien, pilarien tai ristikkorakenteiden, manuaalinen muokkaaminen voi olla aikaa vievää ja altistaa suunnittelun virheille. Tämä korostuu erityisesti suurissa hankkeissa, joissa rakenteita on paljon ja ne voivat muuttua suunnitteluprosessin aikana.

Tässä tutkimuksessa uuden ohjelmiston ja visuaalisen ohjelmoinnin opettelu toivat työhön sekä haasteita että mielenkiintoisia mahdollisuuksia. Rhino 3D ja sen sisäänrakennettu Grasshopper-visuaalinen koodausympäristö tarjosivat tehokkaan työkalun parametriseen mallintamiseen, mutta niiden käytön oppiminen vaati aikaa ja totuttelua. Visuaalinen ohjelmointi eroaa perinteisestä koodaamisesta ja tarjoaa uudenlaisen lähestymistavan suunnitteluprosessiin, mikä teki työskentelystä luovaa ja samalla teknisesti haastavaa. Kokemukset Grasshopper-työkalun kehityksestä ja käytöstä vahvistivat käsitystä siitä, että parametrinen suunnittelu ei ainoastaan automatisoi mallinnusta, vaan myös muuttaa suunnittelijan työskentelytapaa ja ajattelumalleja.

Kyselyyn vastanneiden henkilöiden kokemus rakenneteknisestä suunnittelusta vaihteli kolmen ja yli kymmenen vuoden välillä, ja vastaajajoukko oli ammatillisesti pätevä arvioimaan parametrisen mallinnuksen soveltuvuutta käytännön suunnittelutyöhön. Tämä lisää tulosten uskottavuutta erityisesti sen suhteen, kuinka relevantteina ja käyttökelpoisina he näkivät esitellyn työkalun.

Parametrinen työkalun omaksuttavuus arvioitiin erittäin hyväksi, vaikka on huomioitava, että arviot perustuivat ainoastaan visuaaliseen esitykseen työkalun toiminnasta. Käyttöarvio ei näin ollen heijasta koko parametrisen suunnittelun oppimisprosessia tai siihen liittyvää teknistä ja prosessinomaista syvyyttä. Siitä huolimatta positiivinen suhtautuminen osoittaa, että työkalun lähestymistapa on intuitiivinen ja herättää kiinnostusta.

Kyselyaineiston perusteella merkittävä havainto oli kaikkien vastaajien kokema tehokkuuden parantuminen parametrisen mallinnuksen seurauksena. Tämä tukee aiempaa tutkimustietoa siitä, että parametrinen suunnittelu voi nopeuttaa toistuvia ja säännönmukaisia mallinnustehtäviä. Vastaajien yksimielinen näkemys siitä, että parametrisen suunnittelun laajempaa käyttöönottoa tulisi kokeilla, viittaa siihen, että työkalulla nähdään olevan käytännön arvoa ja potentiaalia yrityksen sisäisten prosessien kehittämisessä.

Työvaiheista, joissa nähtiin eniten automatisointi- ja parametrisointipotentialia, nousivat esiin erityisesti piirustusten tuottaminen ja rakenteiden toteutussuunnittelu. Tämä viittaa siihen, että parametrinen suunnittelu koetaan hyödylliseksi juuri niissä vaiheissa, joissa prosessit ovat hyvin jäsentyneitä ja sisältävät toistuvia elementtejä. Toistoa sisältävät rakenteet, kuten putkisillat, nousivat selkeästi tärkeimmäksi rakenteeksi, johon parametrinen työkalu soveltuisi parhaiten. Tämä tukee tutkimuksen kohteena olleen putkisiltamallin valintaa.

Kyselyssä esiin tulleet esteet ja epävarmuudet, kuten kustannukset, ajan puute ja osaamisen puute, ovat tyypillisiä teknologian käyttöönoton yhteydessä havaittuja haasteita. Ne osoittavat, että vaikka asenne parametrisen suunnitteluun on positiivinen, onnistunut käyttöönotto vaatii suunnitelmallista resursointia, koulutusta ja sitoutumista.

Yhteenvedon voidaan todeta, että parametrisen suunnittelun potentiaali nähtiin vastaajien keskuudessa selkeästi myönteisenä. Tulokset tukevat jatkotutkimusta ja pilotointia erityisesti toistuvien rakenteiden suunnittelussa, jossa parametrinen lähestymistapa voi parantaa tehokkuutta ja suunnittelutyön laatua.

Esimerkkisovelluksen perusteella voidaan todeta, että kehitetty parametrinen työkalu ei ole vain teoreettinen demonstraatio parametrisesta suunnittelusta, vaan se on siirrettävissä todellisiin projekteihin. Sen avulla voidaan aidosti tehostaa suunnittelutyötä, erityisesti silloin kun suunnittelu edellyttää useiden vaihtoehtojen nopeaa arviointia ja muunneltavuutta. Tämä vahvistaa parametrisen suunnittelun potentiaalia osana yrityksen normaalia suunnitteluprosessia.

5.1 Tulosten luotettavuus ja tutkimuksen rajoitteet

Tämän opinnäytetyön tulokset perustuvat rajattuun määrään kvalitatiivista aineistoa, jonka keruu tapahtui esittelyvideon ja strukturoitujen kysymysten avulla. Vastaajia oli yhteensä kuusi, ja he kaikki edustivat toimeksiantajayritystä. Koska vastaajat eivät itse käyttäneet kehitettyä suunnittelutyökalua itsenäisesti, vaan ainoastaan arvioivat sen toimintaa videon perusteella, on syytä tarkastella tulosten yleistettävyyttä kriittisesti.

Esimerkiksi johtopäätös, jonka mukaan vastaajat kokivat parametrisen suunnittelun tehostavan työskentelyä, on rohkea suhteessa käytettyyn menetelmään. Koska tutkimukseen ei sisältynyt vertailevaa asetelmaa (esim. työkalun käyttöä rinnakkain perinteisen menetelmän kanssa) eikä pitkittäisseurantaa, ei tehokkuutta voida kvantifioida tai verrata objektiivisesti. Lisäksi käyttäjien kokemuksia voi vääristää uutuuden viehätys tai yksittäisten käyttöliittymäratkaisujen visuaalinen vaikutelma.

Mahdollisia vääristymiä voivat aiheuttaa myös työkalun keskeneräisyys, käyttäjäkokemuksen puute sekä visuaalisen ohjelmoinnin vaativuus erityisesti niille, joilla ei ole aiempaa kokemusta vastaavista työkaluista. Näitä seikkoja ei systemaattisesti käsitelty analyysissä.

Näin ollen työn johtopäätökset tulee ymmärtää alustavina havaintoina, jotka vaativat lisätutkimusta suuremmalla otannalla ja pidempiaikaisella kokeellisella käyttöönotolla ennen kuin niitä voidaan pitää laajemmin yleistettävänä tai määrällisesti todennettavina.

5.2 Käyttöönoton haasteet ja ratkaisut

Vaikka parametrinen suunnittelu voi tarjota huomattavia etuja, kuten prosessien automatisoinnin ja suunnitteluratkaisujen optimoinnin, sen käyttöönotto ei ole ongelmaton. Suunnittelijoiden on opittava hallitsemaan uudet työkalut ja niihin liittyvät algoritmit, jotta menetelmän koko potentiaali saadaan hyödynnettyä. Lisäksi on varmistettava, että parametrisesti tuotetut mallit ovat yhteensopivia muiden käytettävien suunnittelu- ja valmistusohjelmistojen kanssa. Erityisesti monialaisissa projekteissa tiedonsiirron sujuvuus on keskeistä.

Parametristen mallien kehittäminen vaatii usein enemmän suunnittelua työn alkuvaiheessa kuin perinteiset menetelmät. Kuten teoriaosiossa (luku 2) on esitetty, parametrinen suunnittelun etupainotteisuus tarkoittaa lisääntynyttä työmäärää mallin rakentamisvaiheessa, mutta samalla se mahdollistaa joustavamman ja tehokkaamman suunnitteluprosessin projektin myöhemmissä vaiheissa. Algoritmien on oltava riittävän joustavia, jotta ne kestävät muutoksia ja mahdollistavat

vaihtoehtoisten ratkaisujen tarkastelun ilman mallin täydellistä uudelleenrakentamista.

Lisäksi parametrinen suunnittelu edellyttää uudenlaista ajattelutapaa. Teoriaosion (luku 2) mukaan kyse ei ole pelkästään uuden teknologian käyttöönotosta, vaan myös muutoksesta suunnittelukulttuurissa ja projektinhallinnan käytännöissä. Suunnittelijan on hallittava sekä lopullisen geometrian muodostaminen että siihen liittyvät rakenteelliset riippuvuudet ja muutosten hallintalogiikka. Tämä muuttaa suunnitteluprosessin dynamiikkaa ja edellyttää sekä yksilöllistä oppimista että organisaation tukea.

5.3 Jatkotutkimusehdotukset

Jatkokehityksen ensivaiheessa olisi perusteltua tarkastella, kuinka nykyistä esisuunnittelutason parametrissa mallia voitaisiin laajentaa detaljisuunnittelun vaatimuksia vastaavaksi. Tällä hetkellä malli mahdollistaa pääprofiilien ja geometrian tehokkaan generoinnin, mutta se ei sisällä liitoksia tai muita rakenteellisia yksityiskohtia, jotka ovat välttämättömiä toteutussuunnittelussa. Kysymys kuuluu, missä määrin mallia on tarkoituksenmukaista viedä yksityiskohtaisempaan suuntaan. Liian laaja ja monimutkainen parametrinen malli saattaa olla työmäärältään raskas ja joustavuudeltaan heikko, jolloin perinteisillä mallinnusmenetelmillä voidaan yksittäisessä tapauksessa päästä nopeammin ja tehokkaammin tavoitteeseen. Näin ollen olisi syytä punnita, missä määrin detaljointi voidaan toteuttaa parametrisesti, ja missä kohdassa siirtyminen tavanomaiseen mallinnukseen olisi edelleen perusteltua.

Yhtä tärkeänä jatkokehityksen kohteena voitaisiin pitää mallista tuotettavien suunnitteluasiakirjojen automaation tarkastelua. Grasshopperin ja Tekla Structresin välinen Live Link -yhteys mahdollistaa jo nyt tietomallien dynaamisen synkronoinnin, mutta sen soveltaminen automaattiseen piirustusten ja näkymien tuottamiseen vaatii vielä lisäkehitystä. Olisi syytä pohtia, missä määrin dokumentaation tuottaminen voidaan automatisoida niin, että tuotetut piirustukset mukautuvat mallin muuttuviin parametreihin ilman erillisiä manuaalisia työvaiheita. Tämä voisi

merkittävästi tehostaa suunnitteluprosessia ja vähentää virhealttiutta monimutkaisissa projekteissa.

Mallin laajentaminen kattamaan myös rakenteellista analyysiä herättää kysymyksen laskennan integroimisesta osaksi parametrinen suunnittelun prosessia. Esimerkiksi RFEM- tai Karamba3D-työkalujen liittäminen osaksi Grasshopper-pohjaista työkulkua mahdollistaisi mallin arvioinnin rakenteelliselta kannalta jo varhaisessa vaiheessa. Tällöin mallia voitaisiin käyttää paitsi geometrian luomiseen myös rakenteellisen toiminnan analysointiin ja optimointiin. Aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että tällainen yhdistäminen tukee sekä kustannustehokkuutta että ympäristöperusteista optimointia. Tässä yhteydessä olisi kuitenkin syytä arvioida kriittisesti, missä vaiheessa ja millä tarkkuustasolla FEM-laskenta on tarkoituksenmukaista kytkeä osaksi suunnittelua.

Yksi keskeinen jatkokehityksen näkökulma liittyy myös työkalun käytettävyyteen ja saavutettavuuteen. Grasshopper-ympäristö vaatii käyttäjältään visuaalisen ohjelmoinnin perustaitoja, eikä se ole välttämättä soveltuva työkalu laajalle suunnittelijajoukolle sellaisenaan. Olisi paikallaan tarkastella mahdollisuuksia kehittää käyttöliittymätasoisia ratkaisuja, jotka mahdollistavat parametrien syötön ja ohjauksen ilman ohjelmointikokemusta. Tässä opinnäytetyössä käyttöliittymän rakentaminen onnistui vielä suhteellisen helposti, koska mallin rakenne oli hallittavissa ja rajattu yksinkertaiseen käyttötarkoitukseen. Mikäli mallia jatkossa laajennetaan kattamaan monimutkaisempia geometrioita, detaljisuunnittelun tarpeita tai rakenteellista analyysiä, ei ole enää itsestään selvää, että parametrinen malli on suoraan käytettävissä ilman erityistä käyttöliittymäkehitystä. Tällöin on pohdittava, miten mallin ohjattavuus voidaan säilyttää niin, että sitä voidaan käyttää ilman syvempää ohjelmointiosaamista.

Lopuksi olisi aiheellista tarkastella mallin soveltuvuutta laajempien ja muodoltaan monimuotoisempien putkisiltarakenteiden suunnitteluun. Nykyinen malli on rajattu yksiaukkoiseen suoraviivaiseen kokoonpanoon, mikä rajoittaa sen käyttöä erityisesti silloin, kun siltalinja muodostaa L- tai T-muotoisia kokoonpanoja tai vaatii epäsäännöllistä aukko- ja tukijakoa. Näissä tilanteissa olisi perusteltua pohdita, miten algoritmia voidaan kehittää entistä topologisesti joustavammaksi.

LÄHTEET

Aish, R. & Woodbury, R. 2005. Multi-Level Interaction in Parametric Design. Proceedings of the 2005 International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).

Bompotas, N. & Martins, N. 2024. Harnessing computational and parametric design in structural engineering. KI Consulting Engineers. Verkkosivu. Viitattu 8.4.2025. <https://ki.dk/en/harnessing-computational-and-parametric-design-in-structural-engineering/>

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

D. Fang & C. Mueller 2021 Parametric Structural Design for High-Performance Buildings. <https://www.structuremag.org/article/parametric-structural-design-for-high-performance-buildings/>

Granberg, A. & Wahlstein, J. 2020. Parametric design and optimization of pipe bridges: Automating the design process in early stage of design. Department of Civil and Architectural Engineering. KTH Royal Institute of Technology.

Grasshopper - Algorithmic modeling for Rhino. 2025. Verkkosivu. Viitattu 8.4.2025. <https://www.grasshopper3d.com>

Grasshopper-Tekla Live Link. Tekla User Assistance. Verkkosivu. Viitattu 8.4.2025. <https://support.tekla.com/help/tekla-structures/not-version-specific/grasshopperteklalink>

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

Impola, H. 2021. Hoitotasojen ja portaiden parametrinen mallien kehittäminen. Energiatekniikan koulutusohjelma. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Insinöörityö.

Kuuhimo, M. 2023. Paalulaatan algoritmiavusteinen rakennesuunnittelu. Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Lalla, A. 2017. Kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen. Rakennustekniikan osasto. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Pirhonen, I., Vähänen, P. & Forsman, J. 2023. Suunnitteluprosessin tehostaminen parametrilla suunnittelulla. Rakennustekniikka 3, 32–37. Saatavilla: [[Rakennustekniikka 3-2023](#)] Viitattu 25.02.2025.

Robert McNeel & Associates. 2025. Rhinoceros 3D. Verkkosivu. Viitattu 8.4.2025. <https://www.rhino3d.com>

Rolvink, A., van de Straat, R., & Coenders, J. 2010. Parametric structural design and beyond. https://www.academia.edu/50754208/Parametric_Structural_Design_and_beyond

Singh, B. 2024. How Rhino Grasshopper is used in parametric designs & modelling. Novatr. Verkkosivu. Viitattu 8.4.2025. <https://www.novatr.com/blog/rhino-grasshopper-in-parametric-design-modelling>

Strusoft. 2023. Parametric design and Grasshopper: A great synergy in solving modern engineering challenges. Verkkosivu. Viitattu 9.4.2025. <https://strusoft.com/blog/blog/parametric-design-and-grasshopper-a-great-synergy-in-solving-modern-engineering-challenges/>

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

Woodbury, R. 2010. Elements of Parametric Design. Routledge.

LIITTEET

Liite 1. Laadullisen tutkimuksen kysymykset ja vastaukset.

1 (3)

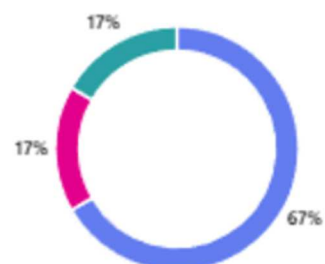
1. Kokemusvuodet alalla

● Alle 3 vuotta	0
● 3–5 vuotta	2
● 6–10 vuotta	2
● Yli 10 vuotta	2



2. Kuinka helppoa tai vaikeaa parametrinen mallinnuksen omaksuminen on ollut?

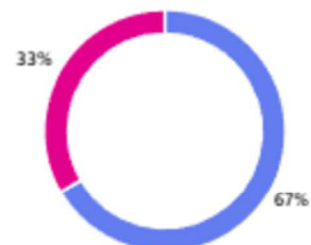
● Erittäin helppoa	4
● Melko helppoa	1
● Neutraalia	1
● Melko vaikeaa	0
● Erittäin vaikeaa	0



2 (3)

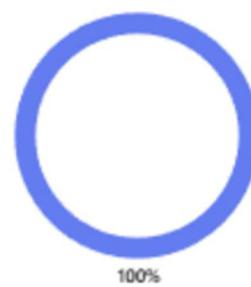
3. Vaikuttaako parametrinen mallinnus työskentelyn tehokkuuteen?

● Lisää tehokkuutta merkittävästi	4
● Lisää tehokkuutta jonkin verran	2
● En osaa sanoa	0
● Heikentää tehokkuutta jonkin verran	0
● Heikentää merkittävästi	0



4. Kannattaisiko Elomaticissa kokeilla laajemmin parametrissa suunnittelua?

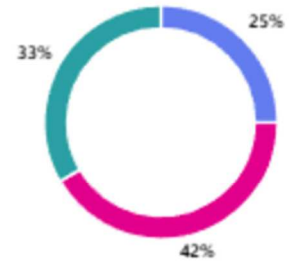
● Kyllä	6
● Ei	0



3 (3)

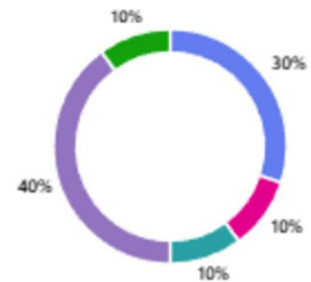
5. Mitkä työvaiheet nykyisessä työssäsi ovat eniten aikaa vieviä ja voisivat hyötyä automaatiosta tai parametrisoinnista?

● Rakenteiden mitoitus	3
● Piirustusten tuottaminen	5
● Rakenteiden toteutussuunnittelu	4
● Rakenteiden esisuunnittelu	0



6. Mitä epävarmuuksia tai esteitä näet parametrinen suunnittelun käyttöönotossa?

● Ajan puute	3
● Osaamisen puute	1
● Muutosvastarinta	1
● Kustannukset	4
● Käytettävyys	1



7. Minkälaisiin rakenteisiin voisit kuvitella käyttäväsi parametrista työkalua?

● Perustukset	2
● Toistoa sisältävät rakenteet kuten putkisilta	6
● Haastavat geometriat kuten kaarevat palkit	1

