



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Markus Lahti

Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen kustannusarvion laatimisprosessissa

Opinnäytetyö

Kevät 2022

Insinööri (ylempi AMK), Rakentaminen



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (ylempi AMK), Rakentaminen

Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu

Tekijä: Markus Lahti

Työn nimi: Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen kustannusarvion laatimisprosessissa

Ohjaaja: Samuel Suvanto

Vuosi: 2022

Sivumäärä: 55

Liitteiden lukumäärä: 3

Tämä opinnäytetyötutkimus tehtiin Sweco Rakennetekniikka Oy:lle. Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia ja selvittää voidaanko parametrissa suunnittelua hyödyntämällä tehostaa kustannusarvioiden laatimisprosessia.

Tutkimus toteutettiin toimintatutkimuksena, joka on eräänlainen muutokseen tähtäävä syklinen prosessi. Tutkimuksen aineistona käytettiin viittä aiemmin toteutettua teräsrunkoista rakennusta ja näiden alustavia ja toteutuneen rakennuksen määräluetteloita. Tutkimusta varten kehitettiin tietokantapohjaisesti toimiva algoritmi, jolla pystyttiin tuottamaan tutkittavia rakennuksia vastaavat esisuunnitteluvaiheen rakennemallit. Algoritmillä pystyttiin myös tuottamaan luodun rakennemallin rakennusosien määräluettelo, jota vertailtiin toteutuneen kohteen alustaviin ja toteutuneen rakennuksen määräluetteloihin. Näiden rinnalle laadittiin kunkin tutkimuskohteen alustavien, parametrisesti tuotettujen sekä lopullisten määräluetteloiden pohjalta kustannusarviot, joita vertailtiin keskenään. Lisäksi vertailtiin kustannusarvion laatimiseen käytettävää aikaa nyky menetelmin sekä parametrissa suunnittelua hyödyntämällä.

Tutkimuksella saatiin vahvistettua alkuoletukset, että parametrissa suunnittelua hyödyntämällä voidaan tehostaa kustannusarvioiden laatimisprosessia. Lisäksi saatiin kerättyä paljon hyödyllistä tietoa parametrin mallien soveltuvuudesta erilaisiin kohteisiin, kun tehdään kustannusarvioita. Myös jatkokehitystarpeita ja -mahdollisuuksia tunnistettiin paljon.

¹ Asiasanat: algoritmiavusteinen suunnittelu, automatisointi, kustannusarvio, parametrinen suunnittelu

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Master's Degree Programme in Construction

Specialisation: Structural Design

Author: Markus Lahti

Title of thesis: Utilizing parametric design in the process of making cost estimate

Supervisor: Samuel Suvanto

Year: 2022

Number of pages: 55

Number of appendices: 3

This thesis was conducted for Sweco Structures Ltd. The goal of the thesis was to examine if the process of creating cost estimates could be enhanced by using parametric design.

The thesis was conducted as an action study which is a type of cyclic process aiming for change. Preliminary and completed lists of building materials of five steel frame buildings previously built were used as a research material. A database-based algorithm was developed for research use to produce pre-design stage structural models and preliminary lists of building materials of the buildings under study. Preliminary, parametrically produced and completed lists and cost estimates drawn up on the basis of these were compared with each other. The time spent making the cost estimate using current methods and using parametric design were also compared.

The study established initial assumptions that the process of creating cost estimates could be enhanced by using parametric design. In addition, a lot of useful information was collected about the suitability of parametric models for various types of buildings when making cost estimates. Further development needs and opportunities were also identified.

¹ Keywords: algorithm aided design, automatization, cost estimate, parametric design

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva- ja kuvioluettelo.....	6
1 JOHDANTO	8
1.1 Tutkimuksen taustaa	8
1.2 Tutkimuksen tavoite	9
1.3 Tutkimuksen rajaus	10
1.4 Tutkimuksen rakenne	11
1.5 Tutkimusmenetelmät.....	11
2 PARAMETRINEN SUUNNITTELU	13
2.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu.....	13
2.2 Grasshopper ja Rhinoceros 3D	17
2.3 Tekla Structures ja Grasshopper-Tekla Live Link.....	19
2.4 Robot Structural Analysis Professional ja Grasshopper-Robot Link.....	20
2.5 Grasshopper ja Excel	20
3 RAKENNUSHANKKEEN KUSTANNUSLASKENTA.....	22
3.1 Kustannuslaskenta ja kustannusarvio	22
3.2 Rakennushankkeen kustannukset.....	23
3.3 Kustannusarvion laadinta parametrissa suunnittelua hyödyntämällä	24
4 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTY ALGORITMI	25
4.1 Tutkimuksessa käytetyn algoritmin toimintaperiaatteet	25
4.2 Lähtöparametrit	26
4.3 Tietokanta	27
4.4 Grasshopper-Robot-laskenta	29
4.5 Grasshopper-Tekla-mallinnus	30
4.6 Määrälaskurit.....	32
4.7 Kustannusarvio.....	33
4.8 Algoritmin käyttö ja ominaisuudet.....	33

5 TUTKIMUS.....	35
5.1 Tutkimuskohde 1	36
5.2 Tutkimuskohde 2	38
5.3 Tutkimuskohde 3	39
5.4 Tutkimuskohde 4	40
5.5 Tutkimuskohde 5	41
5.6 Kustannusarvioiden vertailu	42
5.7 Ajankäytön vertailu	47
5.8 Tutkimustulokset	48
6 YHTEENVETO JA POHDINTA.....	51
LÄHTEET	53
LIITTEET.....	55

Kuva- ja kuvioluettelo

Kuva 1. Algoritmiavusteisen suunnittelun ja perinteisen suunnittelun osatehtävien keskinäiset suhteet.	14
Kuva 2. Esimerkki huonosta ja epäselvästä datavirran mallintamisesta.	16
Kuva 3. Esimerkki hyvästä ja selkeästä Grasshopper algoritmista.	17
Kuva 4. NURBS-pinnalla ja mesh-verkoilla muodostettu pallogeometria.	18
Kuva 5. Näkymä Grasshopperin käyttöliittymästä.	19
Kuva 6. Grasshopper-Tekla Live Link -lisäosa Grasshopperin käyttöliittymässä.	20
Kuva 7. Hankkeen eri vaiheiden kustannushallinta.	22
Kuva 8. Tutkimuksessa käytetyn algoritmin prosessikaavio.	25
Kuva 10. Tietokannan ehtolausekealgoritmin toimintaperiaate.	29
Kuva 11. Tutkimuksessa käytetty teräsrungon geometria visualisoituna Rhinossa.	31
Kuva 12. Tutkimuksessa käytetty teräsrungon geometria mallinnettuna Teklaan.	31
Kuvio 1. Kohteen 1 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.	37
Kuvio 2. Kohteen 2 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.	38
Kuvio 3. Kohteen 3 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.	40
Kuvio 4. Kohteen 4 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.	41
Kuvio 5. Kohteen 5 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.	42
Kuvio 6. Tutkimuskohteiden teräsrunkojen kustannusarvioiden kokonaishintavertailu.	43
Kuvio 7. Tutkimuskohteen 1 kustannusarvioiden vertailu.	45

Kuvio 8. Tutkimuskohteen 2 kustannusarvioiden vertailu.	46
Kuvio 9. Ajankäytön vertailu parametrisesti sekä nyky menetelmin.	47

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen taustaa

Tämän ylemmän ammattikorkeakoulun opinnäytetyön toimeksiantajayrityksenä toimi Sweco Rakennetekniikka Oy, joka on rakennesuunnittelun markkinajohtaja Suomessa. Sweco toimii rakennusalalla digitalisaation edelläkävijänä, jonka digitaaliset laskenta- ja tietomallinnustyökalut ovat laadukkaan rakennesuunnittelun tae.

Rakentamisen ala on hyvin kilpailtu ala niin Suomessa kuin maailmanlaajuisestikin. Kilpailun koventuessa alan yritykset pyrkivät erottumaan edukseen niin laadun, hinnan kuin innovatiivisten ratkaisujen avulla. Yritykset panostavat jatkuvasti rakennesuunnittelun ja rakennusprojektien eri osa-alueisiin tehostamalla suunnitteluprosessejaan sekä projektien läpivientiä. Suunnitteluprosessien digitalisoinnin ja osittaisen automatisoinnin on uskottu olevan yksi ratkaisu, jolla voidaan saavuttaa merkittävää hyötyä niin laadun kuin tehokkuudenkin kannalta ja sillä voidaan nopeuttaa vaihtoehtoisten ratkaisujen tarkastelua (Sweco 2022). Suunnittelun automatisoinnista on hyötyä erityisesti työtehtävissä, joissa toistuvat samat kaavat ja samankaltaiset työsuoritukset. Tässä opinnäytetyössä hyödynnetään suunnittelun automatisointia tuottamalla parametrisesti teräsrunkoisen hallin luonnossuunnitteluvaiheen rakennemalli, josta saadaan nopeasti kustannusarviossa tarvittavat rakennuksen runkoon liittyvät eri rakennusosien määrät.

Nykyisin rakennusten rakennusosalaskelmia ja kustannusarvioita tehdään useimpiin kohteisiin pääasiassa manuaalisesti. Ensin suunnittelija luo rakennemallin jollain rakennesuunnitteluohjelmalla, esimerkiksi Tekla Structures -ohjelmistolla, ja mallintaa saatujen lähtötietojen pohjalta alustavan rakennemallin sovitulla tarkkuudella. Usein suunnittelija joutuu tässä vaiheessa myös tekemään kohteeseen alustavan laskentamallin haarukoidessaan sopivia profiileja runkorakenteisiin ja perustuksiin. Toisinaan voidaan säästää huomattavasti aikaa hyödyntämällä kokemusperäistä tietoa aiemmin suunniteltujen ja toteutettujen vastaavien tai samantyyppisten kohteiden pohjalta, mutta pääosin kustannusarvioita tehdään manuaalisesti. Kun rakennus on alustavasti suunniteltu ja mallinnettu riittävällä tarkkuudella, tulostetaan rakennemallista rakennuksen rakennusosien määräluettelo, jonka pohjalta rakennuksen kustannusarvio tehdään. Määräluettelosta kustannusarvion laatija poimii tarvitsemansa määrät erilliseen Excel-taulukkoon tai laskentaohjelmaan, johon käyttäjä syöttää kullekin riville käsin

kunkin rakennusosan yksikköhintatiedon. Mikäli rakennukseen tehdään myöhemmin muutoksia, joudutaan jälleen manuaalisesti päivittämään rakennemalli, laskentamalli, määräluettelo sekä kustannusarvio. Tässä opinnäytetyötutkimuksessa haetaan ratkaisua edellä kuvattujen työvaiheiden nopeuttamiseen.

Parametrisella suunnittelulla tarkoitetaan algoritmiseen ajatteluun perustuvaa prosessia, jossa kohteen suunnittelua ohjaavat tavoitteet kirjoitetaan algoritmiin parametrien avulla. Näillä parametreilla ja niitä varioimalla voidaan tehokkaasti etsiä tilanteeseen ja käyttötarkoitukseen soveltuvia suunnitteluratkaisuja. Parametrisesti tuotetulla rakennemallilla erikokoisten ja jopa erilaisten rakennevaihtoehtojen kustannusten vertailu on helppoa ja nopeaa, sillä rakennemallin muokkaus tapahtuu käytännössä vain lähtöarvoja muuttamalla, jolloin myös rakennemalli päivittyy reaaliajassa. Rakennemallin ohella myös rakennemallista saatava rakennusosien määräluettelo päivittyy reaaliaikaisesti, jolloin parametrisesta mallista saadaan vain sekunneissa vietyä Excelliin uusi ajantasainen määräluettelo. Kun määräluettelon Excel-pohja rakennetaan siten, että se sisältää kyseisessä projektissa käytettävät eri rakennusosien yksikköhintatiedot, myös kustannusarvio saadaan päivitettyä parametrisesta rakennemallista saatavien määrien osalta yhdellä napinpainalluksella. Tällöin asiakkaalle voidaan nopeasti esitellä useita eri rakennevaihtoehtoja kustannusarvioineen, mikä voi osaltaan auttaa ja helpottaa asiakkaan päätöstä tulevasta hankkeesta ja valittavasta rakenneratkaisusta.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tämän tutkimuksen tavoitteena ja tarkoituksena on tehostaa ja nopeuttaa kustannusarvioiden laatimisprosessia. Tavoitteena on selvittää, millaista hyötyä parametrisella suunnittelulla voitaisiin saavuttaa rakennushankkeen kustannusarviovaiheessa. Menettelyn voidaan todeta olevan hyödyllistä, kun sillä saavutetaan taloudellista tai muunlaista kilpailuetua. Tutkimuksen alkuoletta on, että parametrisella suunnittelulla hyödyntämällä rakennuksen luonnossuunnittelu ja kustannusarvion laatiminen nopeutuvat huomattavasti nykyisin käytössä oleviin menetelmiin verrattuna, jolloin saavutetaan ainakin ajallista eli taloudellista hyötyä. Lisäksi helpon ja nopean muokattavuuden ansiosta asiakkaalle voidaan esitellä erikokoisia rakennuksia ja jopa erilaisia rakenneratkaisuja kustannusarvioineen. Tämän voidaan olettaa auttavan asiakasta päätöksenteossa ja tarjoavan myös sitä kautta kilpailuetua.

Tutkimuksen tavoitteiden pohjalta tämän työn tutkimuskysymyksiksi valikoitui:

1. Voidaanko kustannusarvion laatimisprosessia nopeuttaa hyödyntämällä parametrista suunnittelua? Jos voidaan, niin kuinka paljon?
2. Saadaanko parametrista suunnittelua hyödyntämällä tuotettua aiempaa tarkempia kustannusarvioita? Kuinka paljon tarkempia?

1.3 Tutkimuksen raja

Tutkimus rajataan siten, että tässä työssä tutkitaan yksilaivaista teräsrunkoista hallia. Tutkimuksessa käytettäväksi rakennukseksi valikoitui teräsrunkoinen halli, sillä hallin todettiin olevan tähän tutkimustyöhön sekä parametrisesti suunniteltavaksi sopivan yksinkertainen ja helposti muokattavissa oleva rakenne. Lisäksi kyseinen rakennetyyppi palvelee oman tulosyksikön sekä koko organisaation tekemistä, sillä erilaisia halleja tulee toisinaan suunniteltaviksi ja niistä tehdään kustannus- ja rakennusosa-arvioita. Hallin rungon materiaaliksi valikoitui teräs tämän tutkimuksen tekijän suunnittelutaustan ja osaamisen perusteella.

Rungon rakennusosiksi valittiin seuraavat perustyytit ja tehtiin seuraavat oletukset:

- Kantava maapohja, anturaperustus
- Paikallavaletut pilarianturat ja peruspilarit
- Maanvarainen pohjalaatta betonipinnalla
- Elementtisokkelipalkit
- Pohjamaalattu teräsrunko
- Puolilämmin halli
- Metallisandwich-ulkoseinät
- Loiva bitumiharjakatto varusteineen, pystyräystäät

Parametrisesti tuotettu rakennemalli ja kustannusarvio ei sisällä:

- Tonttiin, liittymiin, rakennuskelpoisuuteen ja rahoitukseen liittyviä kustannuksia
- Hallin ulkopuolella tontilla tehtäviä rakennustöitä, rakenteita tai järjestelmiä
- Nosturipalkkeja, kulutasoja, kaiteita, tekniikkatiloja, osastointeja, toiminnan vaatimia tiloja (sosiaalitalat, asiakastilat, toimistotilat yms.), toiminnan vaatimia laitteita, varusteita, kalusteita eikä talotekniikan toiminnan mukaisia järjestelmiä
- Rakennuttamisen, työmaan käyttö- ja yhteiskustannusten, katteen tai varauksien kustannuksia.

Huomionarvoista on myös, että tässä tutkimuksessa parametrisesti tuotettava rakennemalli tuottaa vain kustannusarviovaiheen rakennemallin eikä valmista rakennusta. Detaljit ja muut edellä luetellut yksityiskohdat on rajattu tämän työn ulkopuolelle ja ne on huomioitava kustannusarviota laadittaessa muilla tavoin. Tämän opinnäytetyön tutkimuksessa käytetty parametrisesti luotu rakennemalli ei myöskään korvaa suunnittelijan tekemää lopullista suunnittelu-työtä eikä lujuuslaskentaa.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Teoriaosuudessa käsitellään parametrista suunnittelua ja sen tarjoamia mahdollisuuksia yleisesti sekä tämän tutkimuksen kannalta olennaisia asioita sekä ohjelmistoja. Lisäksi paneudutaan lyhyesti yleisellä tasolla rakennushankkeen kustannuksiin, kustannuslaskentaan ja kustannusarvioon. Tämän jälkeen käydään läpi tutkimusta varten kehitetty algoritmi ja sen toimintaperiaatteet. Tutkimusosiossa testataan tutkimusta varten kehitettyä algoritmia käytännössä aiemmin toteutettuihin kohteisiin ja vertaillaan saatuja tuloksia tutkimuskohteiden alustaviin sekä toteutuneen rakennuksen määräluetteloihin sekä näiden pohjalta tehtyihin kustannusarvioihin. Lisäksi vertaillaan parametrisesti sekä nyky menetelmin tuotettaviin kustannusarvioihin käytettävää aikaa. Saadut tulokset raportoidaan, analysoidaan ja näiden pohjalta tehdään johtopäätökset ja arvioidaan jatkokehitystarpeita. Lopuksi tehdään yhteenveto tutkimuksesta ja arvioidaan tutkimuksen onnistumista.

1.5 Tutkimusmenetelmät

Tämä tutkimus toteutettiin toimintatutkimuksena, joka on sekoitus kvalitatiivista ja kvantitatiivista tutkimusmenetelmää, eikä se sulje pois muiden tutkimusotteiden tiedonkeruu- ja aineiston analysointimenetelmiä. Toimintatutkimus on eräänlainen syklinen prosessi, joka pitää sisällään suunnittelun, toimeenpanon, havainnoinnin ja reflektoinnin. Sykliä seuraa uusi sykli, joka alkaa siitä mihin edellisen syklin aikana päästiin. Uuden syklin kohteena voi olla myös uusi ongelma ja sen poistaminen. Eräs toimintatutkimuksen elementti on pysyvä muutos, joten toimintatutkimus pitää sisällään myös lupauksen paremmasta. (Kananen 2014, 11–14.)

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää toimeksiantajayrityksen kustannusarvion laatimisprosessia. Tutkimuksessa toteutettiin yksi muutosprosessin sykli, joka sisälsi suunnittelun, toimeenpanon, havainnoinnin ja reflektoinnin. Tämän toteutetun syklin pohjalta tehtiin

johtopäätökset ja arvioitiin jatkokehitystarpeet ja ilmenneet ongelmat seuraavaa sykliä varten. Jatkokehitystarpeiden toteuttaminen on rajattu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

Tämän tutkimuksen keskeisenä aineistona käytettiin viiden aiemmin toteutetun teräsrunkoisen rakennuksen luonnos- tai urakkasuunnitteluvaiheen sekä toteutusvaiheen määräluetteloida. Näiden rinnalle tuotettiin tutkimusta varten kehitetyillä algoritmeilla luonnossuunnitteluvaiheen rakennemallit ja näiden määräluettelot. Kunkin tutkimuskohteen määräluetteloida vertailtiin keskenään, jotta saatiin käsitys siitä, millä tarkkuudella parametrisesti saadaan tuotettua rakennusosien määrät aiempiin menetelmiin verrattuna. Lisäksi kaikkien edellä mainittujen luetteloiden pohjalta tehtiin vertailua varten kustannuslaskelmat, joita vertailtiin keskenään. Tutkimuksen mittareina toimivat tutkimuskysymysten mukaisesti ajankäyttö sekä tarkkuus.

2 PARAMETRINEN SUUNNITTELU

Rakennesuunnittelu on kehittynyt vuosikymmenten kuluessa alana valtavasti uusien ja kehittyneempien suunnittelumenetelmien myötä. Aiemmin rakenteet ja rakennukset suunniteltiin vielä piirtopöydillä, jonka jälkeen tietokoneiden yleistyessä alkoi suunnittelua hallita tietokoneavusteinen Computer Aided Design (CAD) eli CAD-suunnittelu. Seuraava suuri kehityssaskel oli 3D-suunnittelu ja Building Information Modeling (BIM) eli tietomallit, jotka ovat vauhdittaneet rakennesuunnittelun kehitystä viimeisten vuosikymmenten ajan. Seuraava suuri kehityssaskel on parametrinen eli algoritmiavusteinen suunnittelu, joka on viime vuosien aikana yleistynyt ja on parhaillaan tekemässä läpimurtoa. (Erkkilä 2017, 1.)

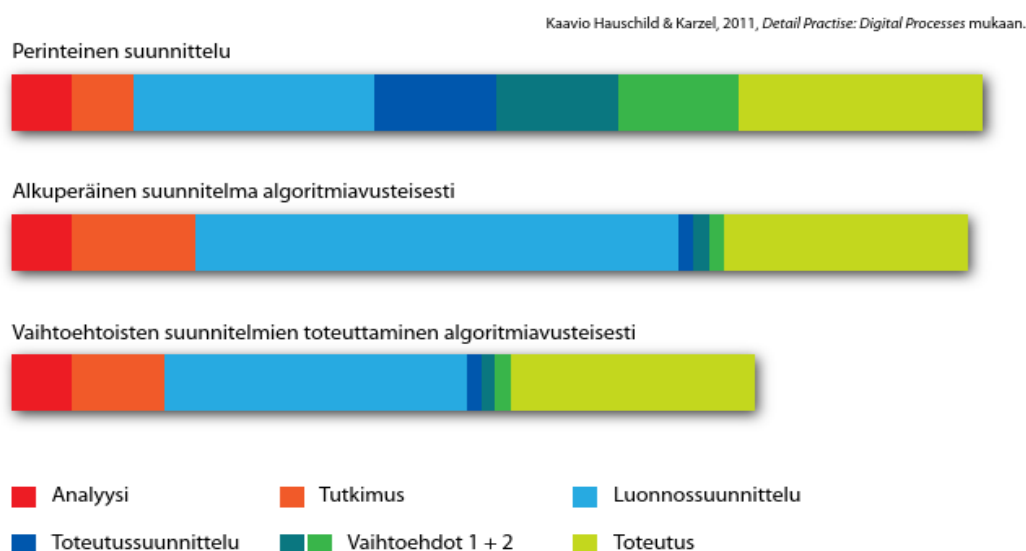
2.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu

Parametri tarkoittaa lukuarvoa, muuttujaa tai muuta määrettä, jolla ohjataan suunniteltavan algoritmisen prosessin osaa. Parametri voidaan asettaa määrittelemään esimerkiksi rakennuksen kerrokorkeutta, ulkomittoja tai muita haluttuja raja-arvoja. Algoritmi puolestaan tarkoittaa suoritettavaa komentosarjaa, joka on sarja yksityiskohtaisesti määriteltyjä tehtäviä, jotka suoritetaan tietokoneen avulla aina tarkasti ja annettujen sääntöjen mukaisesti niiden määräämässä järjestyksessä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kun parametria, eli lähtöarvoa muutetaan, algoritmin suorittama prosessi ja sitä kautta myös algoritmin tuottama tulos päivittyvät reaaliajassa. (Tanska & Österlund 2014, 13, 20.)

Algoritmiavusteisen suunnittelun idea on määritellä suunnitelman muotoon tai rakenteeseen vaikuttavat säännöt. Suunnittelumenetelmässä keskitytään ennalta määriteltyjen muotojen piirtämisen sijaan niitä luovien prosessien määrittelyyn. Nämä prosessit voivat perustua esimerkiksi sääntöihin tai ulkoisten parametrien keskinäisiin riippuvuussuhteisiin. (Tanska & Österlund 2014, 24.)

Kun verrataan algoritmiavusteista suunnittelua perinteiseen mallintamista hyödyntävään suunnitteluun, voidaan kuvan 1 mukaisesti havaita, että osatehtävien keskinäiset suhteet muuttuvat. Siinä, missä algoritmisen suunnitteluprosessin työstäminen on perinteistä mallintamista hitaampaa, valmiilla algoritmisella prosessilla saatava nopeus on huomattava, sillä algoritmi suorittaa automaattisesti sille määritellyn tehtävän. Automatisoinnilla saavutettavan nopeusedun ansiosta esimerkiksi erilaisia vaihtoehtoja voidaan tutkia ja vertailla vain sekunneissa pelkästään lähtöarvoja eli lähtöparametreja muuttamalla. Lisäksi samoja algoritmeja

voidaan hyödyntää ja käyttää uudelleen myös toisissa samankaltaisissa suunnittelukohteissa. Valmista algoritmia voidaan usein myös pienillä muutoksilla päivittää vastaamaan muuttuneita tarpeita, jolloin voidaan säästää huomattavasti aikaa. (Tanska & Österlund 2014, 24.)



Kuva 1. Algoritmiavusteisen suunnittelun ja perinteisen suunnittelun osatehtävien keskinäiset suhteet (Tanska & Österlund 2014, 24).

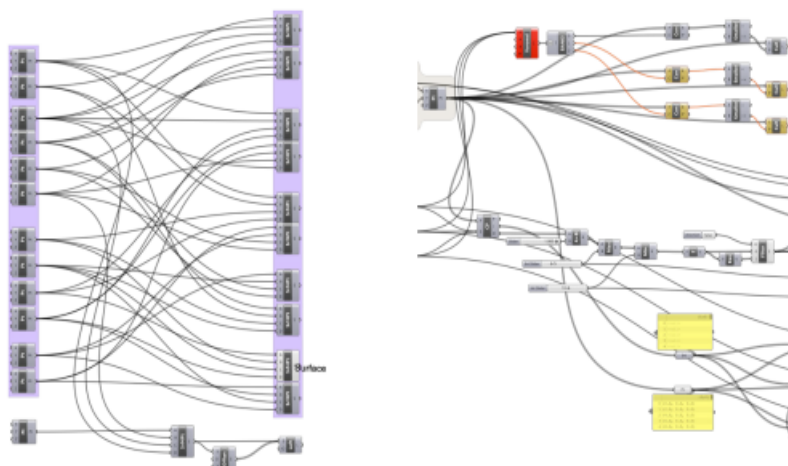
Vaikka yleisesti puhutaan, että parametrisia malleja ja niiden algoritmeja voidaan hyödyntää ja käyttää uudelleen ja täten säästää huomattavasti aikaa, Davis (2013, 4–6) esittää väitöskirjassaan omaan ja muiden kokemuksiin perustuen osittain eriävän mielipiteen. Hän kertoo kannattavansa ajatusta, mutta kuitenkin havainneensa sekä omissa että opiskelijoidensa ja kollegoidensa algoritmeissa niiden haurauden. Parametrisen mallin algoritmien muuttaminen ei välttämättä ole heidän kokemustensa mukaan niin yksinkertaista ja nopeaa, kuin yleisesti ajatellaan, eikä se ole aina edes mahdollista. Erityisesti suuret algoritmit voivat olla niin monimutkaisia ja epäselviä, että niitä voi olla lähes mahdotonta hyödyntää uudelleen.

Woodbury (2010, 24–29) esittelee teoksessaan muutamia uusia taitoja ja ajattelumalleja, joilla mahdollistetaan algoritmiavusteinen mallintaminen tehokkaasti. Ensimmäisenä taitona Woodbury esittelee parametrisessa mallissa kulkevan datavirran ymmärtämisen ja sen selkeän mallintamisen. Hän kuvailee parametrisen mallintamisen luonnetta kutsumalla sitä ketjusysteemiksi, joka tarkoittaa datavirran kulkemista määrättyjen reittien ja pisteiden kautta. Kun reitit ja pisteet, joiden kautta dataa kuljetetaan, on huolellisesti suunniteltu ja mietitty helpottaa se huomattavasti algoritmin toiminnan ymmärtämistä. Tästä syystä datavirran

mallintamiseen eli ketjusysteemin luomiseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota ja käyttää aikaa. (Woodbury 2010, 24–27.)

Toinen Woodburyn esittelemä taito on niin sanottu hajauta ja hallitse -tekniikka. Jokainen suunnitteluprosessi vaatii tietyn määrän tehtäviä ja tehtäväsarjoja. Jotta koko algoritminen prosessi olisi selkeä ja sen algoritmeja voitaisiin hyödyntää ja uusiokäyttää mahdollisimman tehokkaasti, kannattaa koko algoritminen prosessi pilkkoa pienempiin yksinkertaisiin kokonaisuuksiin. Hajauta ja hallitse -tekniikassa suunnittelukokonaisuuden osat suunnitellaan erikseen ja lopuksi kootaan yhdeksi algoritmiksi. Tällöin yhtä prosessin osaa muokkaamalla koko algoritminen prosessi ei rikkoonnu. Lisäksi koko algoritmisesta prosessista on helppo poimia yksittäisiä pienempiä kokonaisuuksia ja osioita uudelleenkäytettäviksi ja hyödynnettäviksi muissakin suunnittelukohteissa. (Woodbury 2010, 27–29.)

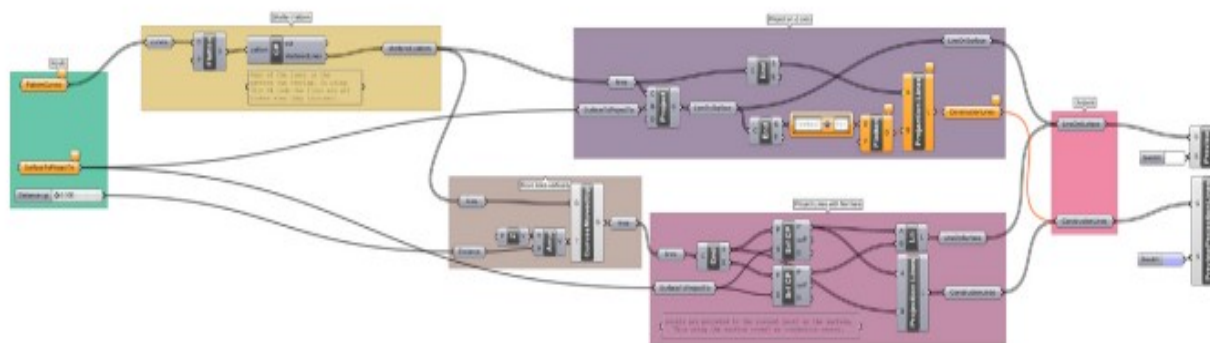
Kolmas tärkeä taito, josta Woodburyn (2010, 29) lisäksi myös Davis (2013, 140–141) tohtorintyössään puhuu, on nimeäminen. Algoritmisen prosessin eri osatehtävien, työvaiheiden ja muun olennaisen datan nimeäminen on äärimmäisen tärkeää, jotta saadaan luotua looginen ja helposti ymmärrettävä selkeä kokonaisuus. Selkeän nimeämisen pitäisi lähtökohtaisesti olla kaikille itsestäänselvyys, mutta todellisuudessa se on osoittautunut jopa väheksytyksi ja yllättävän vähän käytetyksi taidoksi. Esimerkiksi Davis (2013, 140–141) käytti omassa tutkimuksessaan yhteensä 2002 Grasshopperilla luotua parametrissa mallia ja havaitsi, että ainoastaan 19 %:ssa malleista yksi tai useampi solmukohta oli nimetty huolimatta siitä, että nimeäminen on äärimmäisen helppoa ja nopeaa. Lisäksi hän havaitsi, että 70 %:ssa malleista edellä mainitun hajauta ja hallitse -tekniikan mukaista ryhmittelyä ei ollut tehty. Kuvassa 2 on esimerkki huonosta ja epäselvästä datavirran mallintamisesta, jossa dataa ei ole ryhmitelty eikä nimetty mitenkään, joten sitä on vaikea ymmärtää ja tulkita.



Kuva 2. Esimerkki huonosta ja epäselvästä datavirran mallintamisesta (Davis 2013, 130).

Muut Woodburyn (2010, 30–35) mainitsevat taidot perustuvat ajattelutapojen muuttamiseen tai huomioon ottamiseen suunnittelussa. Näitä ovat abstrakti, matemaattinen ja algoritminen ajattelu. Abstraktilla ajattelulla tarkoitetaan sellaisten mallien ja pienempien osakokonaisuuksien luomista, jotka soveltuvat useaan kohteeseen joko sellaisenaan tai muokkaamalla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mallit ja osakokonaisuudet rakennetaan luomalla tapaukseen soveltuva pohja, jota muokkaamalla päästään haluttuun lopputulokseen. Matemaattinen ajattelu on kaiken mallintamisen lähtökohta. Riippumatta siitä onko kyseessä CAD- vai parametrinen malli, malli koostuu pisteiden välille piirretyistä viivoista, jotka ovat osa toteutettua mallia. Algoritminen ajattelu on tapa yhdistää kaikki edellä mainitut taidot toimivaksi kokonaisuudeksi. Algoritmi on kohta kohdalta määritelty prosessi, jossa kaiken on oltava oikein määritelty. Yksikin virhe prosessin määrittelyssä voi johtaa algoritmin toimimattomuuteen. (Woodbury 2010, 30–35.)

Algoritmisessa ajattelussa on tärkeää konkreettisen tehtävän sijasta ajatella suoritettavaa tehtävää erilaisina tehtäväsarjoina, jotka rakennetaan algoritmiin kohta kohdalta (Woodbury, 2010, 35). Kuvassa 3 on esimerkki hyvin rakennetusta selkeästä algoritmista, jossa eri osatehtävät on ryhmitelty ja nimetty. Tällaisen hyvin rakennetun algoritmin tulkinta on huomattavasti helpompaa, kuin kuvan 2 mukaisessa epäselvässä algoritmista.

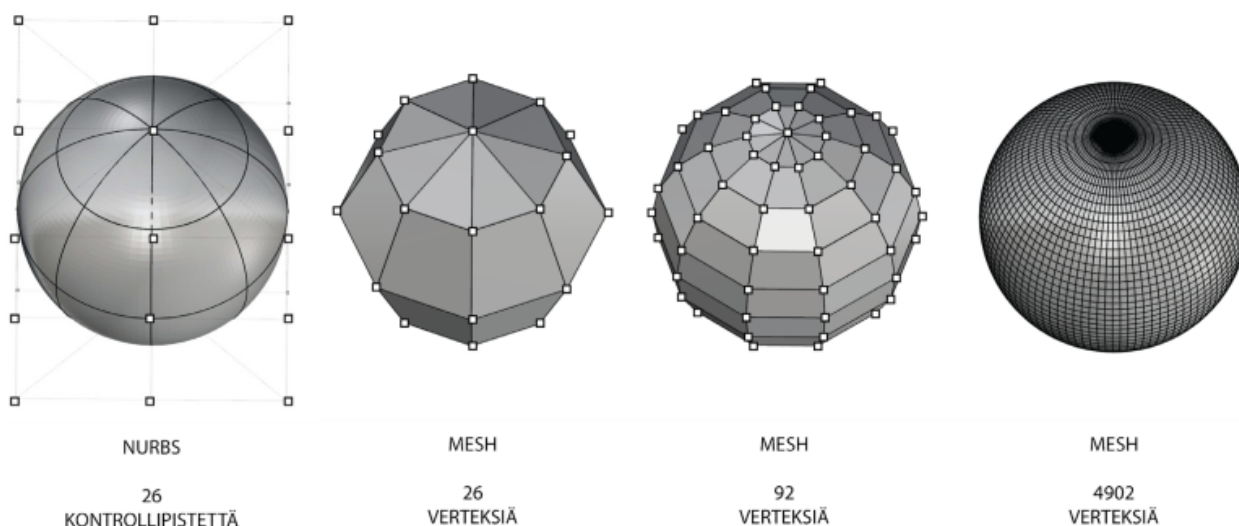


Kuva 3. Esimerkki hyvästä ja selkeästä Grasshopper algoritmista (Davis 2013, 138).

2.2 Grasshopper ja Rhinoceros 3D

McNeel-yhtiön Rhinoceros 3D, puhekielessä Rhino, on yleisimmin käytössä oleva monimuotoisten NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline) -pintojen ja -viivojen kolmiulotteinen mallinnusohjelma. NURBS-pinta määritetään matemaattisesti, joten se on aina hyvin tarkka, toisin kuin mesh-pohjainen malli, joka on aina likimääräinen kuvaus mallinnettavan kappaleen muodosta. Mesh-pohjaisessa geometriassa tarkkuus riippuu aina verkon solmupisteiden eli verteksien määrästä. Mitä tiheämpi mesh-verkko, sitä tarkempi kappaleen mallinnus on. Toisaalta mitä tiheämpi mesh-verkko, sitä raskaampi sitä on työstää tietokoneella. NURBS-pintojen muoto perustuu kontrollipisteiden välille matemaattisesti laskettavaan pintaan. (Robert McNeel & Associates 2022; Tanska & Österlund 2014, 30.)

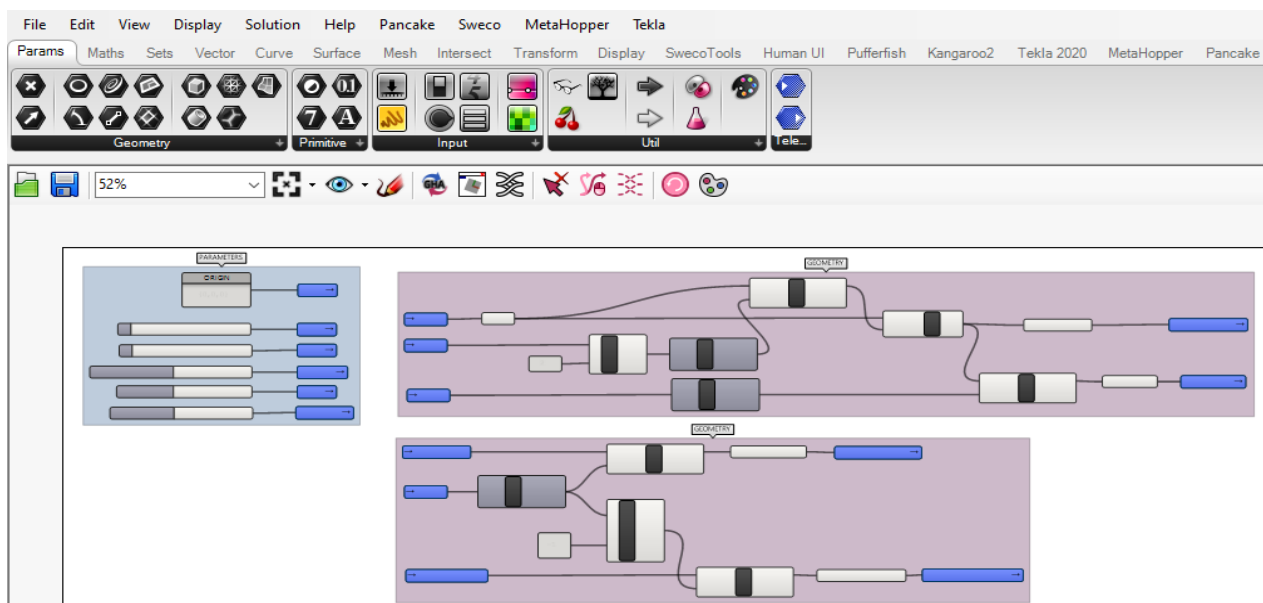
NURBS-pintojen mallintamiseen tarvitaan huomattavan paljon vähemmän informaatiota, kuin mesh-pohjaisen vastaavan kappaleen mallintamiseen. Kuvassa 4 on esitetty NURBS-pinnalla ja mesh-verkoilla mallinnettu pallogeometria. Kuten kuvasta nähdään, lähellä NURBS-pinnan tarkkuutta oleva mesh-pohjainen malli vaatii 4902 solmupistettä, kun taas NURBS-pinta on saatu tehtyä vain 26 kontrollipistettä käyttämällä. On melko ilmeistä, että NURBS-mallit ovat perinteisempiä mesh-malleja huomattavasti kevyempiä ja helpompia hallita. (Tanska & Österlund 2014, 30.)



Kuva 4. NURBS-pinnalla ja mesh-verkoilla muodostettu pallogeometria (Tanska & Österlund 2014, 30).

Grasshopper on ilmainen visuaalista skriptausta hyödyntävä työkalu ja lisäosa Rhinoon. Grasshopperilla algoritmit luodaan visuaalisesti linkittämällä valmiita ohjelmakomponentteja toisiinsa. Visuaalisen koodauksen etuna on, että tekstimuotoista ohjelmakoodia ei tarvitse itse kirjoittaa. Tämä madaltaa huomattavasti kynnystä algoritmiavusteiseen suunnitteluun. Ohjelma sisältää satoja erilaisia valmiita ohjelmakomponentteja, joita yhdistelemällä saadaan luotua monimuotoista geometriaa nopeasti ja suhteellisen yksinkertaisesti. Grasshopperin ominaisuuksia on myös mahdollista laajentaa lukuisilla kolmansien osapuolien kehittämillä lisäosilla, jotka on räätälöity tiettyihin tarpeisiin. Lisäksi Grasshopper sisältää komponentteja, jotka mahdollistavat myös tekstimuotoisen koodin kirjoittamisen VB.net- ja C#-ohjelmointikielillä tai Python-lisäosan avulla. Grasshopperilla tehtävä parametrinen mallintaminen on reaaliaikaista, joten parametrien muutokset näkyvät välittömästi mallin geometriassa esimerkiksi Rhinossa. (Tanska & Österlund 2014, 30–31.)

Kuvassa 5 on esitetty näkymä Grasshopperin käyttöliittymästä. Näkymän ylärivillä sijaitsee valikkopalkki, jossa on ohjelman yleisiä asetuksia ja toimintoja. Valikkopalkin alapuolella sijaitsee komponenttivalikko, jonka välilehdiltä löytyvät kaikki Grasshopperin työkalut. Komponenttivalikon alapuolella, kuvassa valkoisena sijaitsee canvas, johon koodi eli algoritmit kirjoitetaan. Tämän opinnäytetyön tutkimuksessa käytettävä algoritmi on luotu Grasshopperilla.

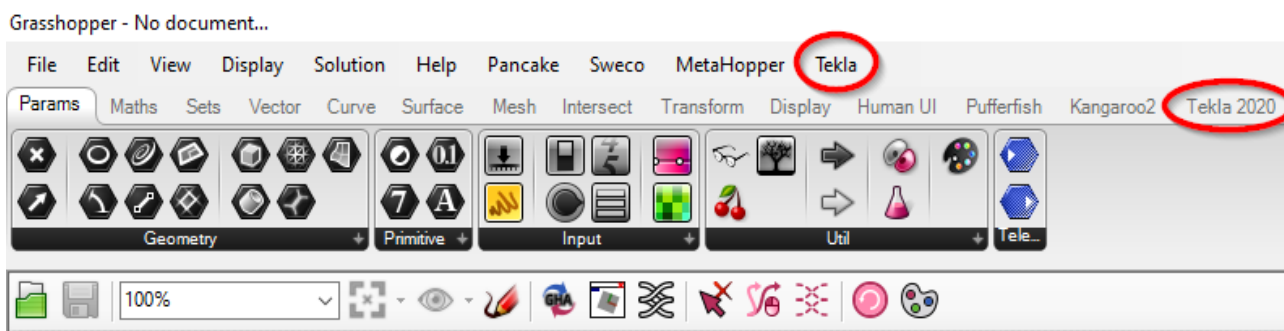


Kuva 5. Näkymä Grasshopperin käyttöliittymästä.

2.3 Tekla Structures ja Grasshopper-Tekla Live Link

Tekla Structures on tehokas rakennesuunnittelua varten kehitetty tietomalliohjelmisto, jolla pystytään mallintamaan äärimmäisen tarkkoja ja yksityiskohtaisia tietomalleja, jotka lisäävät tehokkuutta rakennushankkeen kaikissa vaiheissa (Trimble Solutions Corporation 2022a). Tekla hyödyntää BIM-teknologiaa, jolla luodaan digitaalisesti yksi tai useampi todellisuutta vastaava virtuaalimalli. Teklalla luodut mallit tukevat rakennuksen ja rakentamisen suunnittelua hankkeen kaikissa eri vaiheissa ja mahdollistavat paremman analytiikan, projektinhallinnan ja manuaaliset prosessit. Digitaalisesti koostettu malli sisältää rakennuksen täsmällisen geometrian ja tiedot, joita tarvitaan rakennushankkeen eri vaiheissa aina esisuunnitteluvaiheesta osien valmistukseen ja toteutukseen saakka. (Trimble Solutions Corporation 2022b.)

Trimble Solutions Corporation on kehittänyt Tekla Structures- ja Grasshopper-ohjelmistojen välille linkin, jonka avulla Teklaa voidaan komentaa reaaliajassa Grasshopperin avulla. Kun Grasshopper-Tekla Live Link on asennettu, Grasshopperin valikkopalkkiin avautuu kuvassa 6 esitetty Tekla-niminen välilehti, jonka alla on muutamia Teklan toimintoja. Lisäksi komponenttivalikkoon tulee ohjelmaa käynnistettäessä valitun Tekla-version mukainen, tässä tapauksessa Tekla 2020 -niminen komponenttivalilehti, joka sisältää Teklan komponentit. Näillä komponenteilla voidaan Grasshopperin kautta mallintaa Teklaan reaaliaikaisesti. (Trimble Solutions Corporation 2022c.) Grasshopper-Tekla Live Link -lisäosaa hyödynnetään tässä opinnäytetyössä olennaisena osana teräsrunгон ja betoniperustusten mallintamiseen ja määrien tuottamiseen.



Kuva 6. Grasshopper-Tekla Live Link -lisäosa Grasshopperin käyttöliittymässä.

2.4 Robot Structural Analysis Professional ja Grasshopper-Robot Link

Robot Structural Analysis Professional on Autodeskin kehittämä rakenteellisen kuormituksen analysointiohjelma, joka on kehitetty rakenteiden lujuuslaskentaa ja rakenneanalyysia varten. Robotilla voidaan mallintaa, analysoida ja suunnitella monipuolisesti esimerkiksi teräs- ja betonirakenteita Eurokoodien ja muiden maiden kansallisten liitteiden mukaisesti. Robot-laskenta perustuu elementtimenetelmään eli FEM-menetelmään (Finite Element Method). Elementtimenetelmä on tietokoneella käytettynä erittäin tehokas ja tarkka laskentamenetelmä, joka mahdollistaa yksinkertaisempien rakennelaskelmien lisäksi monimutkaisten ja haastavien laskelmien, kuten modaalisten, dynaamisten, epälineaaristen sekä monien muiden rakenneanalyysien tekemisen. Laskennan tuloksia voi helposti tarkastella paikallisesti suoraan geometriasta tai erilliseltä laskentatulokset -välilehdeltä. (GRAITEC USA 2022.)

Robotin ja Grasshopperin välille ei ole olemassa kummankaan valmistajan kehittämää Grasshopper-linkkiä. Ohjelmat on kuitenkin ohjelmoimalla mahdollista linkittää keskenään, jolloin laskentamalli voidaan luoda Grasshopperissa ja mallintaa Robotiin vain yhdellä napinpainalluksella.

2.5 Grasshopper ja Excel

Grasshopperiin on saatavilla komponentteja, joiden avulla Excelistä voidaan lukea tai Exceliin voidaan kirjoittaa tietoa. Esimerkiksi asentamalla Grasshopperiin Lunchbox -nimisen plug-inin eli liitännäisen Grasshopperiin avautuu Excel Write- ja Excel Reader -komponentit. (Grasshopper Docs 2021a.) Excel Write -komponentilla Exceliin voidaan kirjoittaa Grasshopperin kautta dataa ja Excel Readerin avulla Excelistä voidaan lukea dataa Grasshopperiin (Grasshopper Docs 2021b; Grasshopper Docs 2021c).

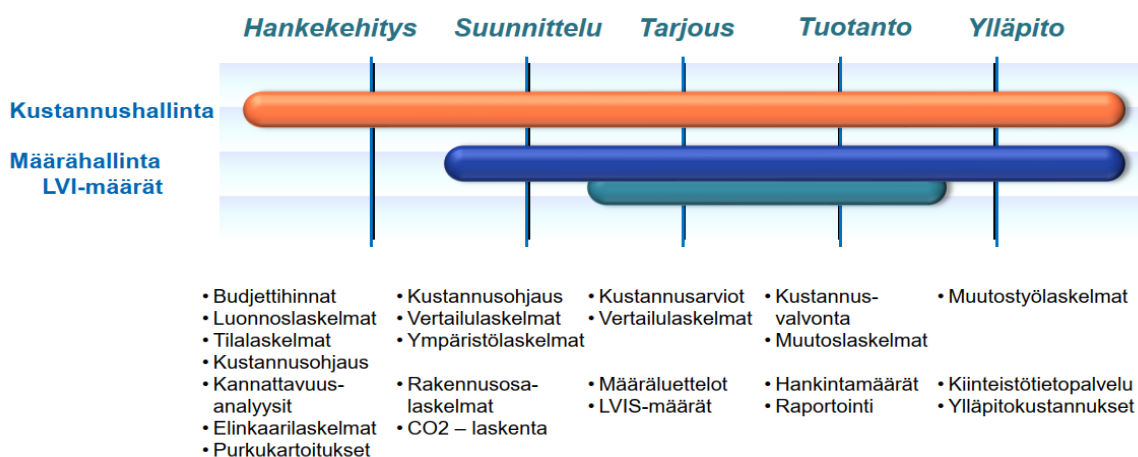
Grasshopperin ja Excelin keskinäistä yhteyttä on hyödynnetty tässä työssä molempiin suuntiin. Rungon teräsprofiilien ja perustuskuormien esivalinnassa hyödynnettävä profiili- ja perustuskuormatietokanta luetaan Excelistä Grasshopperiin. Kun tutkimuksessa käytetyn algoritmin lähtöparametrit on säädetty ja algoritmilla luotu geometria on Grasshopperissa valmis, viedään rakennemallista saatavat rakennusosien määrät Grasshopperista rungon hinnoittelua varten rakennettuun Excel-taulukkoon.

3 RAKENNUSHANKKEEN KUSTANNUSLASKENTA

3.1 Kustannuslaskenta ja kustannusarvio

FMC Laskentapalvelujen johtavan kustannusasiantuntija Laitisen (2022) mukaan kustannuslaskentaa tehdään rakennushankkeissa hankkeen kustannusten hallitsemiseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että hankkeen kustannukset pyritään ennakoimaan etukäteen, joten kustannuslaskentaa ja -arvioita tehdään ja päivitetään hankkeen joka vaiheessa. Hankkeen eri vaiheita on kuvan 7 mukaisesti hankekehitys-, suunnittelu-, tarjous-, tuotanto- ja ylläpitovaihe. Hankekehitysvaiheessa tehdään ensimmäisiä budjetteja ja luonnoslaskelmia tilaajan tarpeen pohjalta. Hankekehitysvaiheessa ensimmäiset kustannuslaskelmat ja budjetit ovat usein lähinnä tilaajan ja arkkitehdin visioita kohteesta ja siitä millainen kohde voisi olla. Suunnitteluvaiheessa aloitetaan kohteen luonnossuunnittelu, jossa suunnitellaan tarkemmin esimerkiksi tulevan kohteen rungon materiaali sekä rakennuksen muoto ja tilat. Suunnitteluvaiheessa pyritään ohjaamaan kustannuksia siten, että pysytään hankekehitysvaiheen budjettihinnassa. Urakkatarjousvaiheessa pyritään tekemään mahdollisimman tarkka ja vertailukelpoinen tarjous hankkeen toteuttamiseksi. Tuotantovaiheen kustannuslaskennassa valvotaan, että urakka pysyy budjetissaan ja ylläpitovaiheen kustannuslaskenta sisältää lähinnä muutostyölaskelmia ja kohteen ylläpitokustannuksia. (Laitinen 2022.)

Käytännössä kustannuslaskenta on sitä, että tehdään budjetteja, jotta hanke pysyy tavoitebudjetissa ja jotta pystytään ohjaamaan hankkeen kustannuksia. Laitisen (2022) ja Kilpeläisen (2021) mukaan hankkeen kannattavuuden arviointiin on kustannuslaskennalla ratkaiseva merkitys.



Kuva 7. Hankkeen eri vaiheiden kustannushallinta (FMC Laskentapalvelut 2021).

Kustannusarviolla pyritään siihen, että alkuperäinen budjetti pitää. Alkuperäinen hankekehitysvaiheen budjetti on karkea budjetti, joka on laskettu olemassa olevalla tiedolla, ja jossa on erilaisia varauksia kuluille. Tässä vaiheessa budjetissa voi olla tiedossa vasta asiakkaan tarve ja arkkitehdin suunnitelmat. Hankkeen alkuvaiheessa tieto on yleensä epätarkkaa. Tästä syystä budjettiin tarvitaan enemmän varauksia, sillä tietoa, jota ei vielä ole olemassa, ei voida myöskään tarkasti laskea. Hankkeen edetessä saatavilla oleva tieto päivittyy ja paranee, jolloin myös kustannusarviota ja budjettia päivitetään saatavilla olevan tiedon mukaiseksi. Jos luonnossuunnitteluvaiheessa vertaillaan esimerkiksi kahta eri runkomateriaaliratkaisua tai erikokoisia tai -muotoisia tiloja, on tärkeää, että kaikki vertailtavat suunnitelmat ovat keskenään samantasoisia. Jos suunnitelmat ovat keskenään eritasoisia, toinen suunnitelmista on tarkempi ja toinen vähemmän tarkka. Tämä johtaa siihen, että tulos ei ole vertailukelpoinen. (Laitinen 2022.)

3.2 Rakennushankkeen kustannukset

Rakennushankkeen kustannukset koostuvat erilaisista rakennuskustannuksista, kuten rakennuttajan kustannuksista, rakennusteknisistä töistä, LVI-töistä, sähkötöistä ja erillishankinnoista. Lisäksi hankkeeseen voi sisältyä muita pienempiä kuluja, kuten tontti, toimintavarustus, toiminnan ylläpito, rahoitus ja hankevaraukset. (Laitinen 2022.) Tässä luvussa ja opinnäytetyössä keskitytään vain tämän opinnäytetyön kannalta olennaisiin kustannuksiin, joita ovat:

- maa- ja pohjarakentamisen kustannukset kohderakennuksen alueella
- perustusten kustannukset
- runko- ja vesikattorakenteiden kustannukset.

Tässä opinnäytetyössä tuotetaan parametrisesti maa- ja pohjarakentamisen määrät, perustusten määrät sekä runko- ja vesikattorakenteiden määrät. Edellä mainittujen määrien osuus hankkeen viitteellisistä kokonaiskustannuksista on tässä tutkimuksessa käytetyillä rajauksilla noin 45–50 %. On kuitenkin muistettava, että edellä mainittu prosenttiosuus antaa vain suuruusluokkaisen käsityksen kustannusten jakautumisesta tässä työssä tehdyillä rajauksilla, eikä näitä yleistyksiä voi sellaisenaan käyttää hallihankkeissa kustannusarviona. Todelliset kustannusjakaumat ovat aina tapauskohtaisia.

3.3 Kustannusarvion laadinta parametrilla suunnittelua hyödyntämällä

Tanskan ja Österlundin (2014, 24) mukaan parametristen mallien tuoma nopeus eri vaihtoehtojen tuottamiseen ja vertailuun on huomattava. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että käytettävä parametrinen työkalu, eli algoritmi on jo olemassa. Valmiissa algoritmisessa prosessissa riittää suunnitelman ja parametrisesti luodun mallin päivitykseen pelkkä lähtöarvojen muuttaminen, jolloin saadaan vertailukelpoisia tuloksia eri vaihtoehtojen välillä. Algoritmiaivusteisen suunnittelun osatehtävien keskinäisiä suhteita ja niiden eroja on verrattu perinteiseen suunnitteluun kuvassa 1.

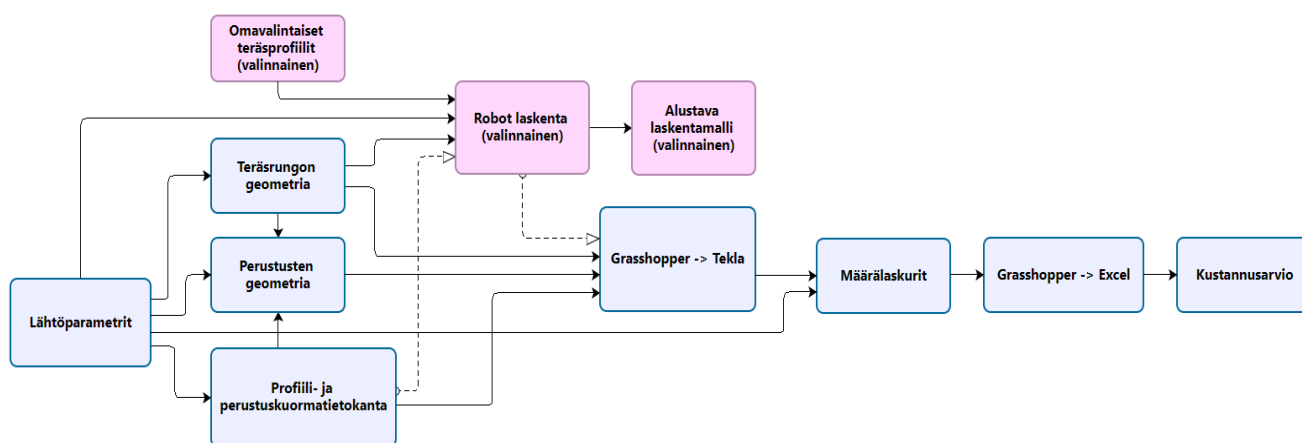
Laitisen (2022) mukaan parametrisille työkaluille, joilla voidaan tehdä kustannusvertailua nopeasti, olisi asiakkaiden keskuudessa kysyntää. Taloudellisen kasvun vaihtelut eli suhdanteet vaikuttavat ratkaisuihin ja kysyntään, millaisia ratkaisuja asiakas haluaa. Jos esimerkiksi teräsrunkoiseksi suunnitellun hallin tapauksessa teräksen hinta nousee tai materiaalin saatavuudessa on ongelmia, voidaan ryhtyä vertailemaan eri materiaalivaihtoehtoja ja jopa vaihtaa aiemmin valittuja ratkaisuja. Nykyisin rakennetyypit ja -ratkaisut mietitään usein vasta luonnossuunnitteluvaiheessa, mutta usein asiakkaan kannalta olisi parempi, jos rakennukset saataisiin optimoituja jo hankekehitysvaiheessa ennen luonnossuunnittelua. Rakennuttaja kuitenkin harvoin haluaa maksaa luonnos- tai esisuunnittelusta summia, joita useiden eri runkovaihtoehtojen tutkimisesta ja vertailusta aiheutuisi. Tähän tarkoitukseen algoritmeilla tuotettavat parametriset mallit olisivat erinomainen työkalu, sillä erilaisia ratkaisuja ja niiden vaikutuksia kustannuksiin voitaisiin vertailla keskenään nopeasti.

Laitinen (2022) arvioi, että tämän tutkimuksen rajausten mukaisen hallin tavoitehinnan laskeminen vie noin yhden työpäivän. Rakennusosa-arvion kanssa aikaa voi mennä useampi työpäivä ja tarkan laskelman tekemiseen kohteesta riippuen jopa viikko tai enemmän. Edellä esitetyt aika-arviot ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, sillä tarvittava aika riippuu aina lasketavasta kohteesta ja sen vaatimuksista. Tämän opinnäytetyön tutkimuksessa käytetyillä algoritmeilla saatavat rakennusosien määrät päivittyvät reaaliajassa aina mallia muokatessa, joten rakennusosien laskemiseen käytettävässä ajassa voidaan säästää tunteja ja jopa työpäiviä, sillä nopeus perinteiseen laskentatapaan verrattuna on huomattava. Lisäksi parametriseen suunnittelun etuna on, että samalla algoritmilla tuotetut rakennusosien määräluettelot ja niiden pohjalta tehdyt kustannusarviot ovat aina keskenään samantasoisia ja siten suoraan vertailukelpoisia.

4 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTY ALGORITMI

4.1 Tutkimuksessa käytetyn algoritmin toimintaperiaatteet

Tässä luvussa on esitelty tutkimuksessa käytetyn algoritmin toimintaperiaatteet. Eri vaiheita käydään tarkemmin läpi luvuissa 4.2–4.8. Kuvassa 8 on esiteltyä prosessikaavio algoritmin toiminnasta ja sen eri vaiheista. Kustannusarvion tuottaminen alkaa Grasshopperissa lähtöparametrien määrittämisestä. Lähtöparametreilla määritetään rakennuksen geometria sekä rakenteisiin liittyviä yksityiskohtia, kuten teräsrakenteiden teräslaatu, betonirakenteiden raudoitusmäärät sekä ulkoseinien paksuus. Lähtöparametreja on avattu tarkemmin luvussa 4.2.



Kuva 8. Tutkimuksessa käytetyn algoritmin prosessikaavio.

Kun tarvittavat lähtöparametrit on määritetty, siirtyy data Grasshopperissa eteenpäin geometriaa luoville algoritmeille, profiili- ja perustuskuormatietokantaan sekä tarvittaessa Robot-laskentaan. Lähtöparametrien mukaisesti tietokannasta valitut teräsrungon teräsprofiilit sekä tietokannan perustuskuormien mukaisesti mitoitettut pilarianturat sekä lähtöparametrien mukainen geometria ohjataan Grasshopperin Tekla Live Linkin kautta Teklaan. Teklaan mallinnuksen jälkeen algoritmi laskee Grasshopperiin rakennetuilla määrälaskureilla eri rakennusosien määriä. Osa laskureista toimii Teklan kautta, jolloin Grasshopper lukee Tekla Live Linkin avulla Teklasta esimerkiksi teräsrakenteiden määriä ja tuo tiedon takaisin Grasshopperiin määräluetteloon. Osa laskureista toimii pelkästään Grasshopperissa mitaten mallinnettavia geometrioita. Määrälaskureiden tuottamasta määräluettelosta määrätiedot kirjoitetaan tutkimusta varten tehtyyn Excel-taulukkoon, joka sisältää eri rakennusosien kustannustiedon. Taulukolla saadaan automaattisesti tuotettua kohteen kustannusarvio tutkimuksen rajausten mukaisesti. Yleiskuva tutkimuksessa käytetystä algoritmista on nähtävillä liitteessä 1.

Käytännössä algoritmin ohjaaminen tapahtuu pelkkien lähtöparametrien avulla ja lähtöparametrien määrittämisen jälkeen lopputuotteena saadaan kohteen kustannusarvio vain yhdellä napinpainalluksella, kun käytetään tietokantapohjaista profiilien esivalintaa. Tällöin kaikki vaiheet lähtöparametrien määrittämisen ja kustannusarvion tuottamisen välillä on automatisoitu. Algoritmin lähestymistavaksi valittiin tietokantapohjainen profiilien ja perustuskuormien esivalinta, mutta algoritmi sisältää myös option Robot-laskennasta ja laskentamallin parametrisesta tuottamisesta. Robot-laskenta voidaan suorittaa joko profiilitietokannan esivalittujen profiilien mukaisesti tai ohittamalla tietokanta ja käyttämällä omavalintaisia teräsprofiileja. Mikäli poiketaan tietokantapohjaisesta profiilien esivalinnasta ja halutaan käyttää Robot-laskentaa, vaaditaan myös hieman manuaalista työtä. Robot-laskentavaihtoehtoa on esitelty tarkemmin luvussa 4.4. Robot-laskennan lopputuotteena saadaan kohderakennuksen alustava laskentamalli, jota voidaan hyödyntää esisuunnitteluvaiheessa, mutta sitä ei voida sellaisenaan käyttää kohteen lopullisena laskentamallina.

4.2 Lähtöparametrit

Tutkimuksessa käytettyä algoritmia ohjataan sen lähtöparametrien avulla. Lähtöparametreilla määritetään kohteen teräs-, betoni- ja kuorirakenteiden reunaehdot ja raja-arvot. Tässä tutkimuksessa käytetyn algoritmin tärkeimmät lähtöparametrit ovat teräsrungon geometriaan liittyvät jänneväli, vapaakorkeus ja kehäjako. Tutkimuksessa käytetty profiili- ja perustuskuormatietokanta, jonka toiminta on esitelty luvussa 4.3, valitsee mallinnettavaan kohteeseen teräsprofiilit näiden kolmen lähtöparametrin perusteella. Lisäksi lähtöparametreilla voidaan säätää teräsrungon geometriassa kattoristikoita, tuulipilareita, sidejärjestelmää, teräsrakenteiden teräslaatua sekä asettaa teräsrakenteiden varusteluista aiheutuva teräsrakenteiden prosenttilisä.

Betonirakenteiden lähtöparametreina toimivat pilarianturoiden, peruspilarien ja maanvaraisen pohjalaatan raudoitusmäärä (kg/m^3), peruspilarien koko, maanvaraisen pohjalaatan paksuus sekä sokkelielementtien korkeus. Pilarianturoiden koon määrittäminen on automatisoitu, sillä käytettiin algoritmia, joka mitoittaa ja mallintaa pilarianturan Grasshopperista Teklaan hyödyntämällä tietokannasta saatavaa perustuskuormatietoa. Alun perin tarkoituksena oli mallintaa ja tuottaa myös raudoitusmäärä parametrisesti hyödyntämällä tietokantaa ja siitä saatavaa perustuskuormaa, mutta tätä tarkoitusta varten kehitteillä oleva algoritmi ei valmistunut ajoissa tähän tutkimukseen, joten se korvattiin toistaiseksi manuaalisesti syötettävällä

raudoitusmäärän arvolla. Maankaivun osalta käytetään oletusarvoja, mutta myös kaivannon syvyyteen ja kokoon liittyviä arvoja on mahdollista säätää. Kuorirakenteiden lähtöparametrina valitaan joko lämmin tai puolilämmin rakennus. Tämä vaikuttaa kohteen seinien paksuuteen ja äärimittoihin, joita tarvitaan eri rakennusosien määrien laskennassa.

Tavoitteena oli luoda helppokäyttöinen ja käyttäjäystävällinen parametrinen työkalu kustannusarvioiden laatimisen avuksi. Käyttäjäystävällisyyteen pyrittiin valitsemalla selkeät ja helposti ymmärrettävät lähtöparametrit, joita on helppo käyttää ilman parametrinen suunnittelun kokemustakin. Geometrian säätimiin on myös kirjoitettu käyttöohjeet suoraan Grasshopper-skriptiin, jolloin käyttäjän on helppo ymmärtää kunkin säätimen tarkoitus ja vaikutus. Lisäksi lähtöparametreissa määritetään kohteen nimi, joka siirtyy automaattisesti lopputuotteena tulevaan kustannusarvioon. Jos vertaillaan useampaa eri vaihtoehtoa, nimeämiseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota ja sopia asiakkaan kanssa yhteinen käytäntö eri vaihtoehtojen nimeämiseen, jotta kaikki osapuolet ymmärtävät aina, mistä vaihtoehdosta kulloinkin puhutaan. Epämääräisissä nimeämisissä piilee aina sekaannuksen vaara.

4.3 Tietokanta

Tutkimuksen ja tutkimuksessa käytetyn algoritmin toimintaperiaatteeksi valittiin tietokantapohjainen profiilien esivalinta, joka on koko tutkimuksen perusta. Tietokantaan päädyttiin, koska saatavilla oli pitkään käytössä ollut, tuhansiin teräsrunkoisiin halleihin perustuva teräsprofiilitietokanta. Toinen vaihtoehto oli sisällyttää algoritmiin reaaliaikainen laskenta, mutta siihen soveltuvaa algoritmia ei ollut opinnäytetyön aloitusvaiheessa saatavilla. Jos reaaliaikainen laskenta olisi lisätty geometria-algoritmiin itse, olisi työn laajuus kasvanut, joten tehtiin päätös hyödyntää jo olemassa olevia geometriaan ja laskentaan liittyviä algoritmeja, joiden rinnalle rakennettiin kustannusarvion laatimiseen tarvittavat muut prosessit.

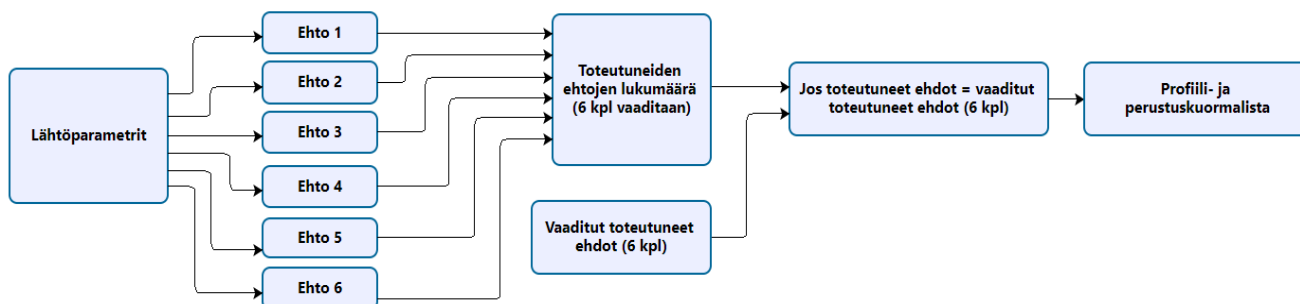
Olemassa oleva profiilitietokanta tarkistettiin algoritmin sisältämällä Robot-laskennalla ja tietokantaa korjattiin niiltä osin, kun rakenteet eivät läpäisseet lujuuslaskentaa. Laskennan suhteen jouduttiin valitsemaan rakennukselle kuormitusten suhteen perustapaus, jolla tarkistuslaskenta suoritettiin.

Tarkistuslaskennalle tehtiin seuraavat olettamukset ja huomioitiin seuraavat kuormat:

- Teräslaatu S355
- Kattokaltevuus 1:10
- Kattorakenteiden omapaino $0,75 \text{ kN/m}^2$
- Seinärakenteiden omapaino $0,5 \text{ kN/m}^2$
- Katon lumikuorma 2 kN/m^2
- Rakennuksen korkeuden ja sivumittojen mukaiset tuulikuormat

Yllä mainituista kuormituksista tehtiin Eurokoodien mukaiset murto- ja käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät, joilla profiilitietokanta tarkistettiin. Mikäli olemassa olevan tietokannan teräsprofiilit eivät näillä olettamuksilla läpäisseet laskentaa, kasvatettiin profiilikokoa aina yhdellä pykälällä, kunnes kyseinen rakennusosa läpäisi laskennan. Tietokannan profiileita ei lähdetty tätä enempää korjaamaan ja optimoimaan, sillä mahdolliset poikkeamat ilmenisivät myöhemmin tutkimusvaiheessa ja käytössä. Tarkistuslaskennan ohessa kerättiin kunkin tapauksen perustuskuormat mukaan tietokantaan, jotta näitä voitiin hyödyntää rakennuksen perustusten alustavassa mitoituksessa.

Tietokanta toimii eräänlaisella ehtolausekealgoritmillä, jonka toimintaperiaate on esitetty kuvassa 9. Algoritmi sisältää kuusi ehtoa, jotka sisältävät teräsrungon jännevälin, vapaakorkeuden ja kehäjaon minimi- ja maksimiarvot. Kun kaikki kuusi ehtoa toteutuvat, algoritmista tulee ulos toteutuneiden raja-arvojen mukainen profiili- ja perustuskuormalista, jota hyödynnetään geometrian Teklaan mallinnuksessa, määrälaskennassa ja tarvittaessa Robot-laskennassa. Mikäli ehtoja toteutuu viisi tai vähemmän, ehtolausekealgoritmin tulos on nolla eikä algoritmista tule ulos mitään dataa. Kuvan 9 mukaisia ehtolausekkeita tehtiin parametriseen malliin yhteensä 75 kappaletta, sillä tutkimuksessa käytetty teräsprofiilitietokanta sisälsi 75 erilaista hallivariaatiota. Jokaisessa ehtolausekkeessa vaaditut ehdot ovat erilaiset, jolloin ainoastaan yksi lauseke kerrallaan voi toteutua ja tuloksena saadaan aina yksi toteutuneiden ehtojen mukainen profiili- ja perustuskuormalista. Muiden ehtolausekkeiden tulokseksi tulee nolla, jolloin data ei siirry niistä eteenpäin.



Kuva 9. Tietokannan ehtolausekealgoritmin toimintaperiaate.

Algoritmissa ehtolausekkeitä sievennettiin clusteroimalla ehtolauseke. Clusterointi tarkoittaa sitä, että useaan kertaan toistuva algoritmi tai sen osa voidaan sieventää yhdeksi komponentiksi, jolloin algoritmista ja koko Grasshopper-skriptistä tulee huomattavasti siistimpi. (Archistar Academy 2018). Clusterin sisään tulee jättää vain algoritmin muuttumattomat osat, sillä päivittämällä yhtä clusteria päivittyvät myös muut samanlaiset clusterit (Davidson 2022). Muuttuvat arvot, eli tässä tutkimuksessa ehtolausekkeiden raja-arvot ja Excel-taulukosta luettavat rivit, tulee jättää clusterin ulkopuolelle, sillä ne ovat jokaisessa ehtolausekkeessa erilaiset. Jos ehtolausekkeeseen halutaan tehdä muutoksia tai korjauksia, clusterointi myös nopeuttaa huomattavasti muutostyötä, sillä muutos tarvitsee tehdä vain yhden kerran yhdessä clusterissa.

Tietokannan käyttämä data on kirjoitettu tutkimusta varten tehtyyn Excel-taulukoon. Taulukkoa luetaan Grasshopperin kautta Excel Reader -komponentilla. Kuhunkin ehtolausekealgoritmiin on kirjoitettu Excel-tiedoston rivit, joilta tiedot luetaan, kun kyseisen ehtolausekkeen kaikki kuusi ehtoa toteutuvat. Excel-taulukon riveiltä luettavat eri rakennusosien teräsprofiilit ohjataan eteenpäin Grasshopperin Tekla-komponentteihin ja tarvittaessa Robot-laskenta-algoritmiin. Taulukosta saatavat perustuskuormat ohjataan perustuksia mitoittaville ja mallintaville algoritmeille.

4.4 Grasshopper-Robot-laskenta

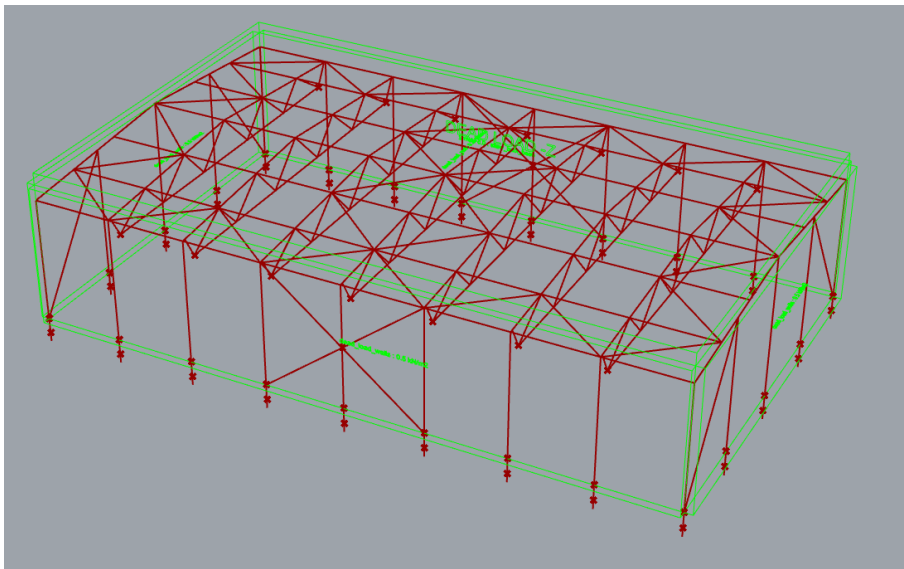
Sweco on sisäisesti kehittänyt ja ohjelmoinut oman linkin Grasshopperin ja Robotin välille. Grasshopper-Robot-linkin avulla Grasshopperilla mallinnettu geometria saadaan mallinnettua nopeasti Robottiin kuormituksineen ja kuormitusyhdistelyineen, jolloin Robotilla voidaan nopeasti suorittaa rakenteiden alustava laskenta ja mitoitus. Tämä on huomattavasti nopeampaa, kuin alusta alkaen manuaalisesti mallinnettu laskentamalli, sillä yksinkertaisenkin rakennuksen laskentamallin luominen ja rakenteiden laskenta manuaalisesti voi viedä kymmeniä

tunteja. Grasshopperin ja Robotin välisellä linkillä laskentamalli saadaan luotua vain sekunneissa. Grasshopper-Robot-linkkiä on hyödynnetty tässä työssä käytetyn tietokannan teräsprofiilien alustavaan mitoitukseen.

Grasshopperin ja Robotin välinen linkki on periaatteessa tässä opinnäytetyössä ja tutkimuksessa ylimääräinen asia eikä sen kehittäminen ja käyttäminen kuulunut työn rajauksiin. Robot-linkkiä kuitenkin hyödynnettiin olemassa olevan teräsprofiilitietokannan tarkistamiseen ja perustuskuormien tuottamiseen, joten se liitettiin osaksi algoritmia ja päätettiin profiilitietokannan tarkistuksen jälkeen jättää mukaan valinnaiseksi ominaisuudeksi. Näin tutkimusta varten luodusta algoritmista saatiin tehtyä monikäyttöisempi, sillä tietokantapohjainen mitoitus on melko rajallista. Rajallisuus johtuu siitä, että kohderakennuksen tulisi soveltua niihin oletuksiin, joiden pohjalta tietokanta on tehty. Robot-laskentavaihtoehdolla mahdollistetaan poikkeaminen näistä rajauksista ja pystytään alustavasti mitoittamaan myös muunlaisia, kuin tämän tutkimuksen rajausten mukaisia rakennuksia ja huomioimaan muitakin kuormia, kuin luvussa 4.3 mainitussa oletustapauksessa. Grasshopper-Robot-linkin avulla luotu laskentamalli on alustava eikä se sellaisenaan sovi eikä sitä saa käyttää rakennuksen lopullisena laskentamallina. Tutkimuksen lähtökohtana ja tarkoituksena oli laatia ja vertailla kustannusarvioita, kun käytetään tietokantapohjaista profiilien esivalintaa, joten Robot-laskentavaihtoehtoa ei hyödynnetty tämän opinnäytetyön tutkimusvaiheessa.

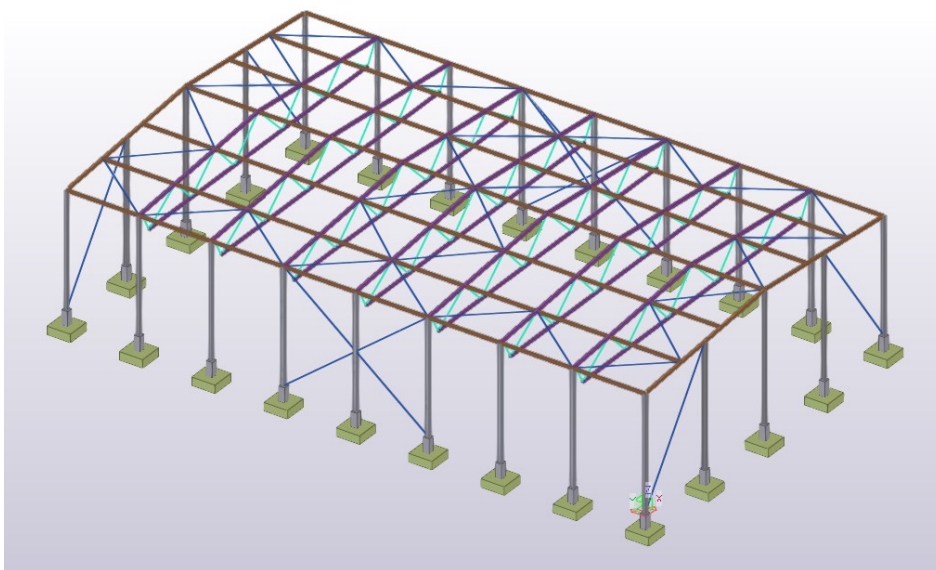
4.5 Grasshopper-Tekla-mallinnus

Tutkimusta varten kootussa algoritmista hyödynnettiin olemassa ollutta aiemmin kehitettyä teräsrunгон geometria-algoritmia, joka vastasi teräsprofiilitietokannan mukaista rakennusta. Geometria on luotu Grasshopperissa ja se voidaan visualisoida hyödyntämällä Rhino-mallinnusohjelmaa. Rhinoon on myös visualisoitu Robot-laskennassa käytettävät kuormitustapaukset. Kuvassa 10 on punaisella visualisoituna Grasshopperissa luotu teräsrunгон geometria ja vihreällä katto- ja seinärakenteiden omista painoista aiheutuvat kuormitukset.



Kuva 10. Tutkimuksessa käytetty teräsrunгон geometria visualisoituna Rhinossa.

Geometria-algoritmilla luotu runko sisältää teräspilarit, vapaasti tuetut kattoristikot, kattopalkit rakennuksen päätyihin, katto-orret sekä rakennuksen sidejärjestelmän. Työn aikana teräsrunгон geometrian sidejärjestelmään tehtiin pieniä muutoksia ja siihen lisättiin pilarianturat ja peruspilarit toisesta algoritmista. Näiden lisäksi algoritmin käytettävyyttä muokattiin helppokäyttöisemmäksi ja selkeämmäksi. Geometria-algoritmin luominen ja kehittäminen ei kuulunut tämän opinnäytetyön rajauksiin ja tavoitteisiin, joten sen toimintaa ei avata tarkemmin. Geometria mallinnettiin Teklaan Grasshopper-Tekla Live Link -lisäosan ja Grasshopperin Tekla-komponenttien avulla. Kuvassa 11 on esitetty tutkimuksessa käytetyn algoritmin Teklaan mallinnettu rakennuksen rungon geometria.



Kuva 11. Tutkimuksessa käytetty teräsrunгон geometria mallinnettuna Teklaan.

Kaikkia tutkimuksessa tutkittuja rakennusosia ei mallinnettu Teklaan, sillä enempää tähän tutkimukseen soveltuvia mallintavia algoritmeja ei ollut saatavilla ja niiden tuottaminen itse olisi ollut työlästä. Sen lisäksi todettiin, että kustannusarviovaiheessa kaikkia rakennusosia ei ole tarpeellista mallintaa, sillä mallintamattomien rakennusosien kustannusarviossa tarvittavat määrät pystyttiin tuottamaan riittävällä tarkkuudella erilaisilla laskureilla.

4.6 Määrälaskurit

Tutkimuksessa käytettyyn algoritmiin tehtiin tutkimusta varten erilaisia määrälaskureita laskemaan eri rakennusosien määriä. Määrälaskurit toimivat kahdella eri tavalla. Teklaan mallinnettavien rakennusosien eli teräsrakenteiden painot ja pinta-alat sekä pilarianturoiden ja peruspilarien betonitilavuus lasketaan Grasshopper-Tekla Live Linkin avulla Teklasta, josta tieto tuodaan takaisin Grasshopperissa olevaan määräluetteloon. Lopuille rakennusosille, joita ei mallinnetta Teklaan, rakennettiin määrälaskurit siten, että laskurit laskevat Grasshopperissa algoritmilla luotavaan geometriaan liittyviä mittoja ja tekevät näihin liittyvät tarvittavat laskutoimitukset, jolloin saadaan kunkin rakennusosan alustava kokonaismäärä halutussa yksikössä. Määrälaskurien tulokset päivittyvät reaaliajassa aina kun algoritmin lähtöparametreja muutetaan.

Määrälaskureilla pystytään tuottamaan seuraavat määrät:

- Hallin bruttoala (brm^2) ja piiri (jm)
- Paikallavalettujen anturaperustusten betonitilavuus (m^3), rauditusmäärä (kg), muotityön määrä (m^2) ja lukumäärä (kpl)
- Peruspulttiryhmiä määrä (kpl)
- Sokkelielementtien pinta-ala (m^2) ja lukumäärä (kpl)
- Maanvaraisen pohjalaatan pinta-ala (m^2), betonitilavuus (m^3) ja rauditusmäärä (kg)
- Teräsrungon massat rakennusosittain ja yhteensä (kg)
- Teräsrungon pinta-ala (m^2) pintakäsittelyä varten
- Ulkoseinien ja yläpohjan pinta-alat (m^2)
- Maankaivuutyön tilavuus (m^3)

4.7 Kustannusarvio

Määrälaskureilla tuotetut eri rakennusosien määrät kerätään Grasshopperissa yhdeksi listaksi, josta ne kirjoitetaan Excel Write -komponentilla tutkimusta varten tuotettuun Excel-tiedostoon. Excel-tiedosto sisältää sivun, jossa on listattu taulukkoon kaikkien rakennusosien määrät, joten sieltä voidaan helposti tarkastella eri rakennusosien kokonaismääriä tai tietoja eri käyttötarkoituksiin. Excel-tiedostosta löytyy myös sivu, joka sisältää rakennusosien määrien lisäksi rakennusosien yksikköhintatiedot. Taulukot on rakennettu siten, että Grasshopperista Excel-tiedostoon kirjoitetut rakennusosien määrät ohjautuvat automaattisesti oikeille riveilleen. Lisäksi kustannustiedot sisältävä sivu laskee automaattisesti määrälaskureilla laskettujen rakennusosien pohjalta kustannusarvion kyseisille rakennusosille.

Excel-tiedoston kustannustaulukkoon on myös mahdollista syöttää rakennuttajan kustannuksiin, työmaakatteeseen ja hankkeen varauksiin liittyviä prosentiosuuksia. Lisäksi taulukkoon voidaan syöttää täydentäviin rakenteisiin, pintarakenteisiin, kalusteisiin ja varusteluihin sekä koneteknisiin töihin liittyviä yksikköhintoja/ brm^2 , jolloin niiden osuus tulee huomioitua kustannusarvion kokonaishinnassa. Muut kuin parametrinen mallin tuottamat rakennusosat on kuitenkin luvun 1.3 mukaisesti rajattu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Oli kuitenkin tärkeää kehittää sellainen taulukko, jossa voidaan huomioida nämäkin osa-alueet, sillä ne joudutaan kustannusarviota laadittaessa huomioimaan joka tapauksessa jollain tavoin.

4.8 Algoritmin käyttö ja ominaisuudet

Tutkimusta varten rakennettu algoritmi on helppo ja nopea käyttää, sillä se vaatii vain lähtöparametrien määrittämisen eikä vaadi käyttäjältään erityistä parametrinen suunnittelun osaamista. Algoritmillä saavutetaan kustannusarviota laadittaessa huomattava nopeus verrattuna nyky menetelmiin. Lisäksi tarkkuudessa voidaan päästä erittäin lähelle toteutuneen rakennuksen rakennusosien määriä. Algoritmillä saadut hyödyt on osoitettu edempänä luvussa 5, jossa algoritmia ja sen toimivuutta on tutkittu käytännössä.

Algoritmit ovat yleensä pääosin automatisoituja ja niillä pystytään tehokkaasti suorittamaan yksinkertaisia ja toistuvia työtehtäviä (A-Insinöörit, [viitattu 2.3.2022]). On kuitenkin tärkeää muistaa, että algoritmeilla suoritettava kustannuslaskenta ja mallintaminen on rajallista verrattuna nyky menetelmiin. Rajallisuus johtuu siitä, että algoritmit on tehty aina tiettyä tarkoitusta varten, jolloin niillä voidaan suorittaa vain tarkoituksensa mukaisia tehtäviä. Mikäli

algoritmin rajauksista poiketaan, algoritmi ei enää pysty tehokkaasti toteuttamaan vaadittua tehtävää. Tästä syystä algoritmit tulisi kehittää riittävän yksinkertaisiksi, jotta niitä voisi soveltaa useampaan käyttötarkoitukseen ja -kohteeseen. Mitä enemmän automatisoidaan ja rajataan, sitä pienempi on algoritmin käyttöikkuna. Voidaan siis todeta, että algoritmiavusteisessa suunnittelussa vähemmän on toisinaan enemmän.

Tässä tutkimuksessa käytetyillä algoritmeilla ei edes pyritä luomaan täydellistä rakennusta, vaan pelkästään suuret linjat eli rakennuksen runko, sillä tämä on riittävä tarkkuus rungon kustannusarvion laatimista varten. Rakennukset voivat käyttötarkoituksesta riippuen vaatia kohteeseen räätälöityjä ratkaisuja ja varusteluja, joten näiden tuottaminen parametrisesti olisi hidasta ja siten kannattamatonta manuaaliseen mallintamiseen ja suunnitteluun verrattuna. Tutkimuksessa käytetyillä algoritmeilla luotu rakennus vaatii vielä runsaasti käsin muokkausta ennen kuin rakennus on valmis tuotantoon, sillä algoritmi ei tuota rakennukseen liitoksia eikä muita kohteen vaatimia yksityiskohtia tai lisävarusteluja. Algoritmeilla luotua rakennusta tulee muutenkin tarkastella kriittisesti, jotta mahdolliset virheet ja huonot ratkaisut huomataan. Käsin muokkausta voidaan halutessa tehdä myös kustannusarvion laatimisvaiheessa, jos halutaan mallintaa esimerkiksi kohteeseen tulevia kannakkeita tai hoitotasoja ja huomioida näistä aiheutuvia rakennusosien määriä. Käsin muokkaukseen tulee kuitenkin siirtyä vasta, kun rakennuksen rungon geometria on lukittu. Jos geometriaa muokataan käsin ja päivitetään myöhemmin algoritmeilla, algoritmi kirjoittaa käsin tehtyjen muokkausten yli ja käsin tehdyt muokkaukset menetetään.

Tutkimuksessa käytetty algoritmi on myös geometrialtaan melko rajallinen, sillä se pystyy tuottamaan vain yksiläivaisia teräsrunkoisia halleja vapaasti tuetuilla kattoristikoidella eikä valittavana ole erilaisia runkoratkaisuja. Tämä oli kuitenkin tietoinen valinta, sillä tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää voidaanko parametrisia malleja hyödyntää kustannusarvion laatimisprosessissa. Kun parametrisen suunnittelun mahdollistama potentiaali on tutkittu ja todettu käytännössä sekä mahdolliset ongelmakohdat on tunnistettu, seuraava askel voisi olla eri runkovaihtoehtojen lisääminen algoritmiin, jolloin algoritmista ja menetelmästä saadaan monikäyttöisempi ja useampiin erilaisiin kohteisiin sopiva. Jatkokehitystä ajatellen eri algoritmien datan sisään- ja ulosmenokohdat eli inputit ja outputit, kannattaa nimetä yhtenäisellä tavalla, jotta uusien algoritmin osien liittäminen tai korvaaminen olisi parhaimmillaan vain kopioi ja liitä -tyyppinen tehtävä.

5 TUTKIMUS

Tutkimuksessa käytettiin viittä aiemmin toteutunutta teräsrunkoista hallikohdetta ja näiden saatavilla olleita luonnos- tai urakkasuunnitteluvaiheen sekä toteutuneen rakennuksen määräluetteloita. Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa näiden rinnalle tuotettiin luvussa 4 esitellyillä algoritmilla luodut määräluettelot, joita vertailtiin aiemmin tuotettuihin määräluetteloihin. Tutkimuksen toisessa vaiheessa alustavien, parametrisesti luotujen sekä toteutuneiden määräluetteloiden pohjalta tehtiin kustannusarviot, joita vertailtiin keskenään. Lisäksi vertailtiin ajankäyttöä parametrisen ja nyky menetelmin tehtävän määrälaskennan ja kustannusarvion laatimisen välillä.

Kaikissa tutkimuskohteissa oli yhdistävänä tekijänä teräsrunko, mutta tutkimuskohteissa 3, 4 ja 5 tutkittavia rakennusosia jouduttiin rajaamaan, sillä toteutuneet rakenneratkaisut esimerkiksi perustusten osalta olivat erilaisia tässä työssä tehtyihin rajauksiin nähden. Edellä mainituissa kolmessa kohteessa tutkittiin vain sitä osa-aluetta, joka sopi tämän työn rajauksiin, tässä tapauksessa rakennuksen teräsrunkoa. Erilaisten rakenneratkaisujen määrien vertailu olisi ollut tässä tapauksessa hyödytöntä, sillä tulokset eivät olisi keskenään vertailukelpoisia. Lisäksi teräsrungon rakennusosia vertailtiin vain niiltä osin, mitä pystytään tuottamaan tässä työssä käytetyillä algoritmilla. Esimerkiksi nosturiratapalkit, erilaiset kannakkeet, ovien ja ikkunoiden piilirakenteet, hoitotasot, kaiteet sekä muut lisärakenteet on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

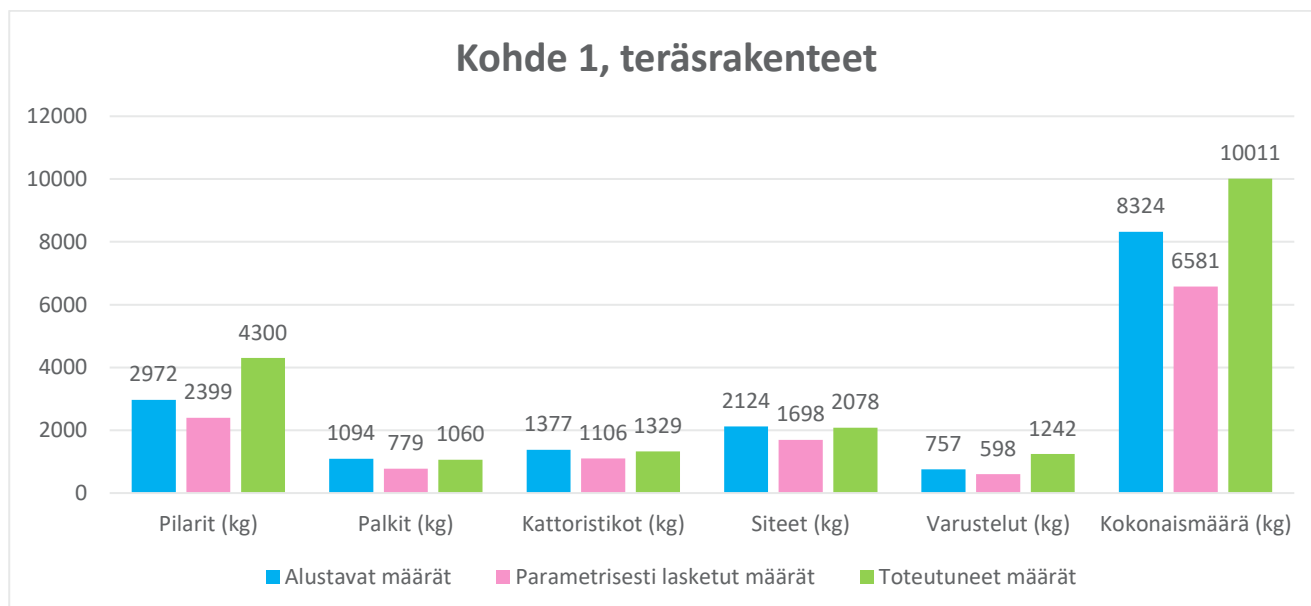
Vaikka tutkimuskohteissa 1 ja 2 vertailua pystyttiin tekemään kaikkien algoritmin tuottamien rakennusosien määrien osalta, luvuissa 5.1–5.5 raportoidaan ja esitetään työn selkeyden ja yhtenevyyden vuoksi graafisesti vain teräsrungon eri rakennusosien tutkittavat määrät, sillä tutkimuksen painopiste on teräsrungon parametrisessä tuottamisessa. Tutkimuskohteissa 1 ja 2 myös muiden rakennusosien määrät, saadut tulokset sekä havaitut poikkeamat ja näiden mahdolliset syyt selitetään ja perustellaan, mutta määrät on nähtävillä tämän opinnäytetyön lopussa liitteissä 2 ja 3.

Tutkimuksen suurimmaksi haasteeksi osoittautui, että tutkittava aineisto ei suurelta osin ollut sellaisenaan sopivassa muodossa tutkimusta varten ja sitä jouduttiin suurelta osin itse muokkaamaan, keräämään ja yhdistelemään ennen tutkimusta. Olemassa olevan aineiston ongelmista puhuu myös Kananen (2015, 74), joka kertoo valmiin aineiston ongelman piilevän usein siinä, että se on kerätty tiettyä tarkoitusta varten, joka harvoin sopii sellaisenaan

opinnäytetyön pohjaksi asetetun tutkimuksen ratkaisuksi. Toinen tutkimuksen aikana ilmennyt ongelma oli lähtötiedot ja niiden puute. Tutkimuksessa oli tarkoitus tuottaa kustakin tutkimuskohteesta parametrisesti luotu rakennemalli ja alustava määräluettelo samoilla lähtötiedoilla, joilla tutkittavien kohteiden suunnittelu oli aikanaan aloitettu. Kaikkia lähtötietoja ei kuitenkaan ollut saatavilla, sillä esimerkiksi eri osapuolten välistä sähköpostiviestintää tai suunnittelupalavereissa sovittuja asioita ja tietoja ei ollut kaikilta osin saatavilla. Tästä syystä tutkimus jouduttiin toteuttamaan niillä lähtötiedoilla ja oletuksilla, jotka olivat käytettävissä. Kolmas ongelma oli, että aiemmin tehtyyn luonnossuunnitteluun käytetystä työmäärästä ei ollut aikatietoja saatavilla. Tästä syystä luvussa 5.7 tehdyssä ajankäytön vertailussa jouduttiin tyytymään kokemukseräiseen ajankäytön arviointiin aiemmin tehdyn luonnossuunnittelun osalta. Edellä mainituista ongelmista johtuen tässä tutkimuksessa esitettävät tulokset eivät ole aivan tarkkoja ja täydellisiä, mutta kuitenkin suuruusluokaltaan oikeita ja tutkimuksen alkuvaiheessa tehdyt oletukset parametrisen suunnittelun tarjoamista hyödyistä saatiin vahvistettua.

5.1 Tutkimuskohde 1

Tutkimuskohteena 1 tutkittiin pienehköä, bruttoalaltaan 189 m²:n kokoista teräsrunkoista teollisuuskäyttöön suunniteltua rakennusta. Kuviosta 1 havaitaan, että teräsrakenteiden parametrisesti tuotettu määrä on kokonaismäärän osalta noin kolmanneksen toteutunutta määrää pienempi. Kuviosta nähdään, että suurin osa erosta muodostuu pilareista ja varusteluista. Tämä selittyy sillä, että kohteessa on tutkimuksen rajauksen mukaiseen yksinkertaisempaan rakennukseen verrattuna enemmän kuormitusta, sillä kohteessa on raskas siltanosturi, joka vaatii pilareihin asennetut nosturiratapalkit. Tällä on merkittävä vaikutus pilarien kuormitukseen, mitoitukseen ja varusteluihin, eikä tässä tutkimuksessa käytetyn algoritmin profiilitietokannan mitoituksessa ole huomioitu tällaisia kuormia.



Kuvio 1. Kohteen 1 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.

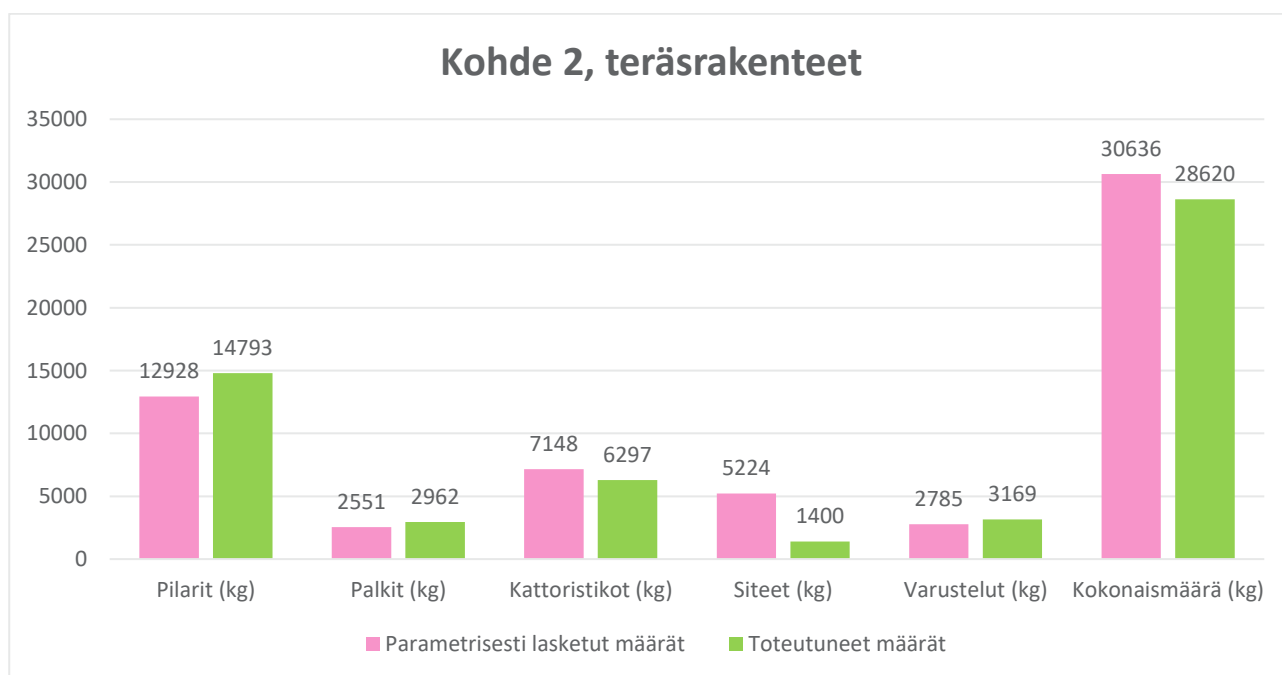
Liitteessä 2 on nähtävillä myös muut kohteessa 1 tutkitut rakennusosien määrät. Pilarianturoiden ja peruspilarien osalta parametrisesti lasketut määrät ovat huomattavasti pienempiä, kuin toteutuneet määrät. Tämä selittyy myös kohteen suuremmilla kuormituksilla tutkimuksessa käytetyn algoritmin profiilitietokannan mitoittamiseen verrattuna, sillä pilareilta perustuksille tulevat kuorma on siltanosturista johtuen huomattavasti suurempi. Algoritmi ei myöskään huomioi sokkelielementeistä aiheutuvaa kuormitusta, jonka lisäksi rakennus sisältää raskaita laitteita, joilla on myös vaikutusta rakennuksen perustuksiin. Parametrisesti lasketut määrät pohjalaatalle ovat puolestaan suurempia, kuin toteutuneet määrät. Tämä johtuu siitä, että toteutuneessa kohteessa laatassa on aukkoja, joita algoritmi ei huomioi. Mikäli aukot jätettäisiin huomioimatta, tulos vastaisi hyvin toteutuneita määriä. Myös ulkoseinien parametrisesti laskettu pinta-ala on suurempi kuin toteutunut pinta-ala. Tämä johtuu siitä, että kohteessa on melko korkeat sokkelielementit ja tutkimuksessa käytetyn algoritmin määrälaskuri laskee ulkoseinien pinta-alan teräspilarin alapäästä mitattuna, eikä se huomioi sokkelin korkeuden vaikutusta ulkoseinäpaneelin pinta-alaan. Sokkelielementtien ja yläpohjan pinta-alan sekä maankaivun tilavuuden osalta parametrisesti lasketut määrät vastaavat hyvin toteutuneita määriä ja erot ovat pieniä.

Kohteen 1 tutkimustuloksista voidaan tehdä johtopäätös, että mikäli kohteen kuormitukset poikkeavat tässä työssä käytetyn algoritmin käyttämästä oletustapauksesta, ei päästä kovin tarkkaan lopputulokseen, sillä algoritmi mitoittaa pilarit ja perustukset tällöin liian pieniksi. Tämä oli kuitenkin melko ilmeistä, sillä poikkeamalla työn rajauksista poistutaan alueelta, johon tukimusta varten koottu algoritmi on suunniteltu.

5.2 Tutkimuskohde 2

Tutkimuskohteena 2 tutkittiin bruttoalaltaan noin 700 m²:n kokoista liiketilaa. Kyseessä on lämmin teräsrunkoinen hallirakennus, joka sopi erinomaisesti tämän työn rajauksiin, sillä rakenneratkaisut vastaavat kaikilta osin tässä työssä tehtyjä rajauksia. Kohteen rungon mitoitettavia kuormia on tämän työn rajausten mukaisesti tuuli- ja lumikuormat, eikä rungolle tule muita suuria lisäkuormia, kuten tutkimuskohteessa 1. Kohdetta tutkittiin vain toteutuneiden sekä parametrisesti tuotettujen määrien osalta, sillä kohteeseen ei ollut saatavilla alustavaa määräluetteloa tai alustavia suunnitelmia.

Kuviosta 2 havaitaan, että parametrisesti tuotettu teräsrakenteiden alustava kokonaismäärä on melko lähellä toteutunutta määrää, eron ollessa vain noin 7 %, joka on erinomainen tulos. Kun vertaillaan eri rakennusosia tarkemmin, havaitaan eron tulevan suurelta osin pilareista ja siteistä. Parametrisesti mallinnettu sidejärjestelmä on toteutuneeseen kohteeseen verrattuna erilainen, mikä selittää eron siteiden osalta. Parametrisesti tuotettujen pilarien kokonaismassa on pienempi, kuin toteutuneessa rakennuksessa. Tämä johtuu siitä, että algoritmin käyttämässä profiilitietokannassa pilarien profiilit on mitoitettu lähelle 100 %:n käyttöastetta, kun todellisuudessa näin harvoin tehdään pilarien kohdalla. Toteutuneessa kohteessa pilarien profiili on yhden pykälän algoritmin antamaa pilarin teräsprofiilia suurempi. Mikäli pilari-koko korjattaisiin, päästäisiin pilarien kohdalla 99 %:n tarkkuuteen määrien osalta.



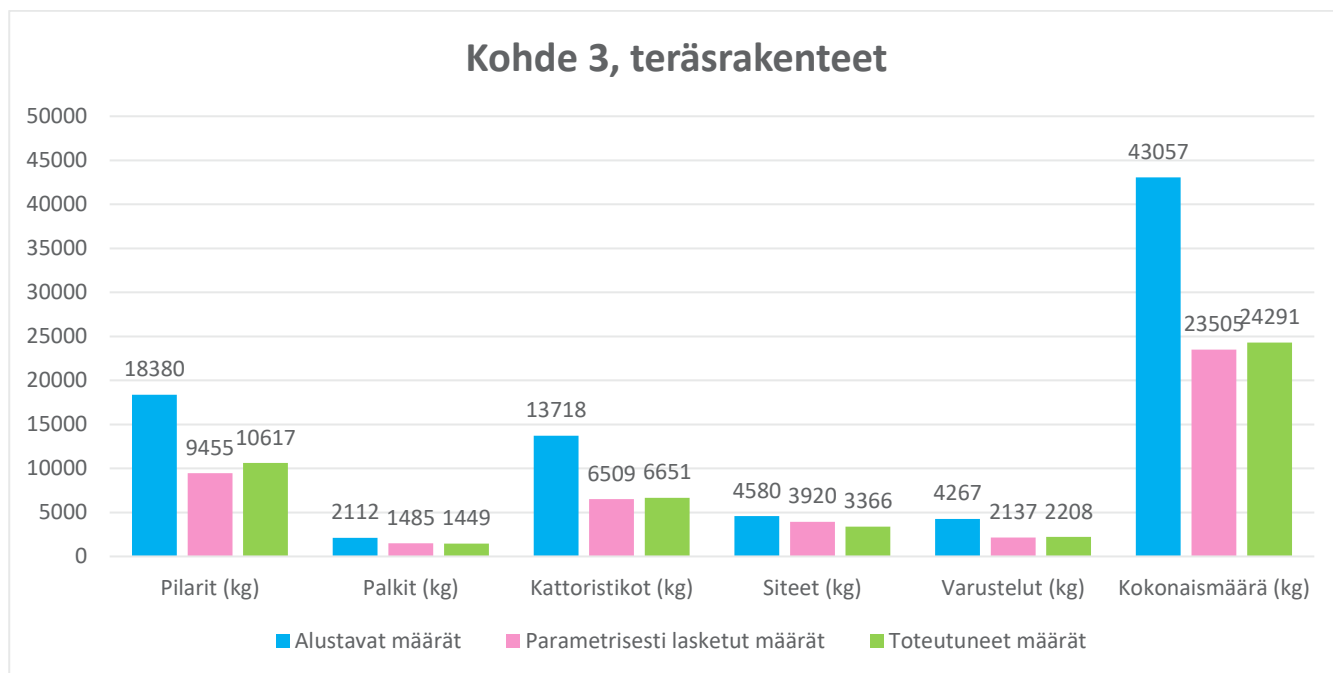
Kuvio 2. Kohteen 2 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.

Loput kohteessa 2 tutkituista määristä on nähtävillä liitteessä 3. Pääosin parametrisesti tuotetut määrät vastaavat erinomaisesti toteutuneita määriä, sillä pohjalaatan, sokkelielementtien ja yläpohjan määrät poikkeavat enimmilläänkin vain 2,5 % toteutuneista määristä. Pilariantuoroihin liittyvissä määrissä on isohkoja eroja, joista osa selittyy sillä, että algoritmi ei huomioi sokkelielementeistä perustuksille aiheutuvaa kuormaa. Ulkoseinien pinta-alan osalta törmättiin samaan ongelmaan kuin tutkimuskohteessa 1, sillä algoritmi ei huomioi sokkelielementtien vaikutusta ulkoseinäpaneelien pinta-alaan. Maankaivun osalta algoritmi antaa reilusti suuremman arvon, kuin toteutuneeksi oletettu tilavuus. Toteutuneen maankaivuutilavuuden arviointi oli kuitenkin käytettävissä olevan aineiston pohjalta hankalaa, joten arvioidussa toteutuneessa maankaivuutilavuudessa on olemassa myös virheen mahdollisuus, joten tuloksesta ei kannata tämän tutkimuskohteen osalta tehdä lopullisia johtopäätöksiä.

5.3 Tutkimuskohde 3

Tutkimuskohteena 3 tutkittiin bruttoalaltaan 615 m²:n kokoista teräsrunkoista varastorakennusta. Rakennus soveltuu käyttötarkoitukseltaan erinomaisesti tämän työn rajauksiin. Kohteessa on kuitenkin käytetty perustus- ja kuorirakenteiden osalta erilaisia rakenneratkaisuja tämän työn rajauksiin nähden, joten ainoastaan rakennuksen teräsrunko on tässä tutkimuksessa vertailukelpoinen. Rakennus ei sisällä työn rajauksista poikkeavia kuormia, joten rungon mitoittavia kuormia ovat tuuli- ja lumikuormat, kuten algoritmin käyttämässä profiilitietokannassakin.

Kuviosta 3 nähdään selkeästi, että algoritmilla tuotettu rungon teräsrakenteiden alustava kokonaismäärä on erittäin lähellä toteutuneen rungon teräsrakenteiden kokonaismäärää eron ollessa vain noin 3 %. Tulos on erittäin hyvä, vaikka eri rakennusosien välillä on pieniä eroavaisuuksia. Lisäksi tulos on huomattavasti parempi, kuin aiemmin tuotettu alustava rungon teräsrakenteiden kokonaismäärä, joka on ollut 77 % enemmän verrattuna toteutuneeseen määrään.



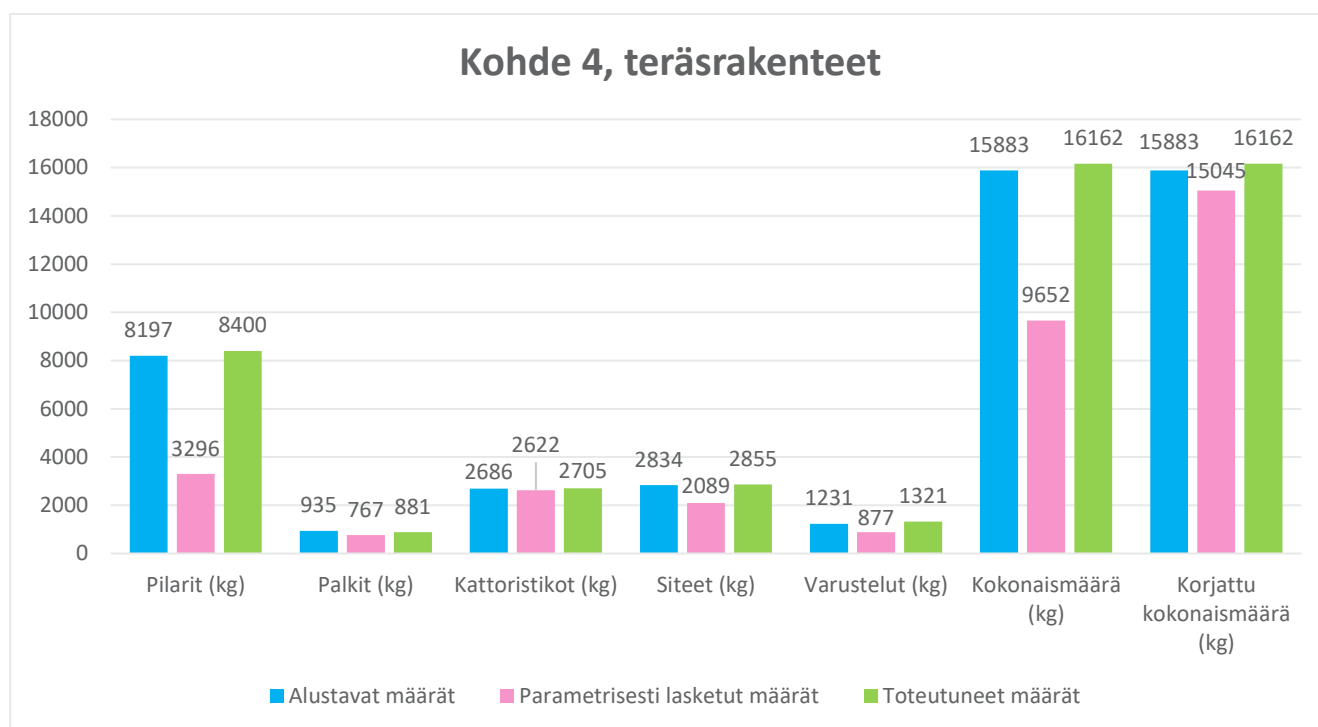
Kuvio 3. Kohteen 3 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.

5.4 Tutkimuskohde 4

Tutkimuskohteena 4 tutkittiin teräsrunkoista laajennusosaa, joka on rakennettu olemassa olevan rakennuksen jatkoksi. Rakennus on vaihtuvakorkuinen toisen päädyn ollessa 3 metriä toista päätyä korkeammalla. Tutkimus toteutettiin tutkimuksessa käytettyä algoritmia soveltamalla ja käyttämällä laajennusosan korkeuden keskiarvoa. Laajennusosa soveltuu teräsrungon osalta tämän työn rajauksiin, mutta muilta osin rakenneratkaisut poikkeavat tämän työn rajauksista, joten tässä kohteessa tutkittiin pelkkää teräsrunkoa.

Kuviosta 4 nähdään, että parametrisesti tuotetun rungon teräsrakenteiden kokonaismäärä on noin 60 % toteutuneesta kokonaismäärästä. Ero tulee lähes yksinomaan pilareista ja näiden vaikutuksesta varusteluiden määrään. Kohteen rakennemallia tutkimalla havaittiin, että kohteessa on käytetty laajennusosuudella samaa pilarikokoa, kuin olemassa olevassa rakennuksessa. Näin on todennäköisesti tilaajan kanssa sovittu, vaikka profiilit ovatkin reilusti ylimitoitettuja. Tutkimuksessa alkuperäisen profiilitietokantaan pohjautuvat parametrisesti tuotetun teräsrungon kokonaismääräarvion rinnalle tuotettiin vertailun vuoksi myös korjattu teräsrungon kokonaismäärän arvio. Korjattu rungon teräsrakenteiden kokonaismäärä saatiin ohittamalla algoritmin profiilitietokanta ja syöttämällä algoritmiin manuaalisesti haluttu pilarien profiilikoko. Muutoksen jälkeen pilarien kokonaismassaksi saatiin 8199 kg, joka on erittäin lähellä toteutunutta pilarien määrää. Kun huomioidaan pilarien kokonaismassan muutos myös

varusteluiden määrässä, saadaan parametrisesti lasketuksi rungon teräsrakenteiden korjauksi kokonaismääräksi tällöin 15045 kg, joka on enää noin 7 % päässä toteutuneesta kokonaismäärästä. Näin ollen voidaan tehdä johtopäätös, että algoritmilla saatavat tulokset voivat olla hyviä silloinkin, kun algoritmia joudutaan soveltamaan. Luvun 5.6 teräsrunkojen kustannusarviovertailussa käytetään teräsrungon korjattua kokonaismäärää.



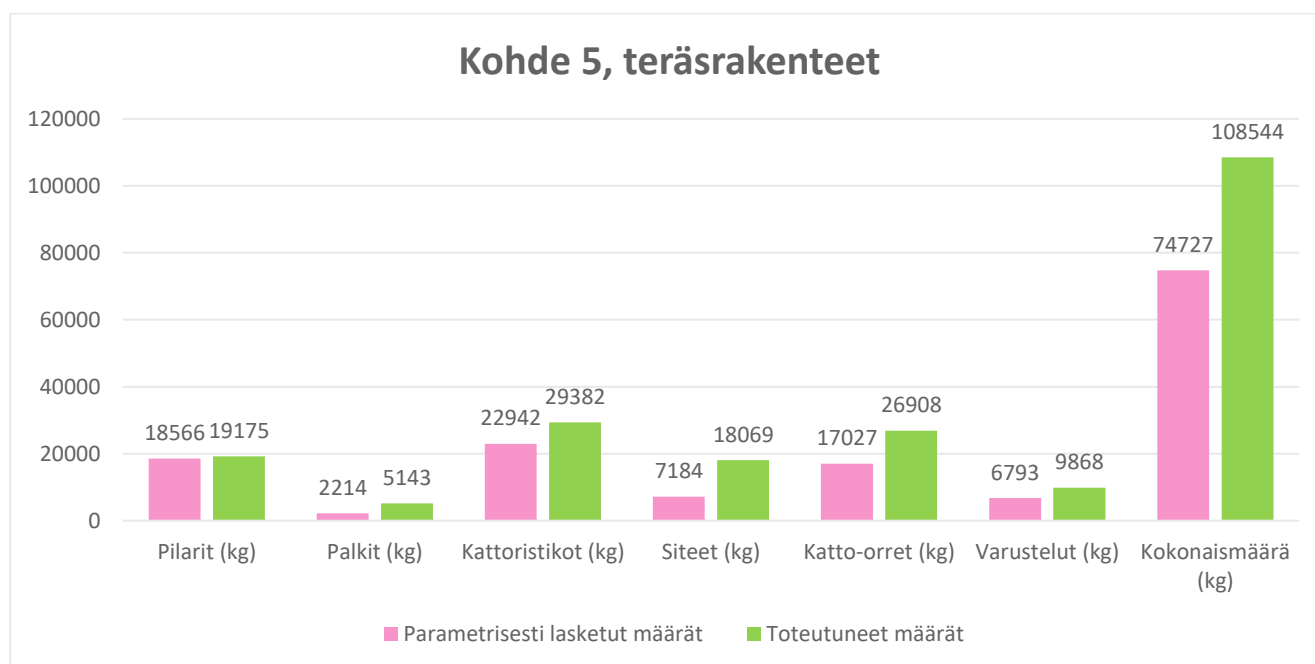
Kuvio 4. Kohteen 4 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.

5.5 Tutkimuskohde 5

Tutkimuskohdeena 5 tutkittiin bruttoalaltaan noin 1300 m²:n kokoista teräsrunkoista rakennusta. Kohde soveltui käyttötarkoitukseltaan hyvin tämän työn rajauksiin, mutta rakenneratkaisut perustusten ja kuorirakenteiden osalta olivat erilaisia, joten kohteessa tutkittiin pelkkää teräsrunkoa. Tutkittava kohde oli osa isompaa kokonaisuutta eikä itsenäinen rakennus. Kohde alustavien teräsmäärien vertailu oli mahdotonta, sillä alueen kaikki teräsrakenteet oli sisällytetty yhteen luetteloon eikä näitä oltu eritelty mitenkään. Tästä syystä vertailtiin pelkästään parametrisesti tuotettuja rungon teräsrakenteiden määriä sekä toteutuneita määriä.

Kuviosta 5 nähdään, että parametrisesti tuotettu rungon teräsrakenteiden kokonaismääräarvio on noin 69 % toteutuneesta kokonaismäärästä. Kaikkien eri rakennusosien toteutuneet määrät ovat suurempia, kuin parametrisesti tuotetut määrät. Pilarien kohdalla tulos on hieman vääristynyt, sillä osa kohteen pilareista on sijoitettu korkeiden betoniseinien päälle, joten

osa pilareista on todellisuudessa lyhyempiä. Algoritmi huomioi kaikki pilarit yhtä pitkinä, joten parametrisesti tuotettu geometria ei täysin vastaa todellista tilannetta, ja antaa pilareille väärän, tässä tapauksessa suuremman kokonaismassan. Koska eroja on kaikkien eri rakennusosien kohdalla, syy johtuu todennäköisesti kuormituksista ja mitoituksesta. Kohde sijaitsee melko pohjoisessa, joten rakennukseen kohdistuva lumikuorma on suurempi, kuin algoritmin käyttämän profiilitietokannan perustapauksessa käytetty oletusarvo. Lisäksi kohteessa on erilaisia ripustus- ja kaapelihyllykuormia, joita algoritmin profiilitietokannassa ei ole huomioitu. Koska kyseessä on teollisuuskäyttöön suunniteltu rakennus, on myös todennäköistä, että käyttöasteisiin on jätetty varaa mahdollisia tulevaisuuden muutoksia varten. Tällaisissa tapauksissa tietokantapohjainen profiilien esivalinta ei ole kovin toimiva, sillä tietokanta ei huomioi kohteen erityisvaatimuksia, eikä siksi anna kovin tarkkaa tulosta rungon teräsrakenteiden kokonaismäärän osalta.

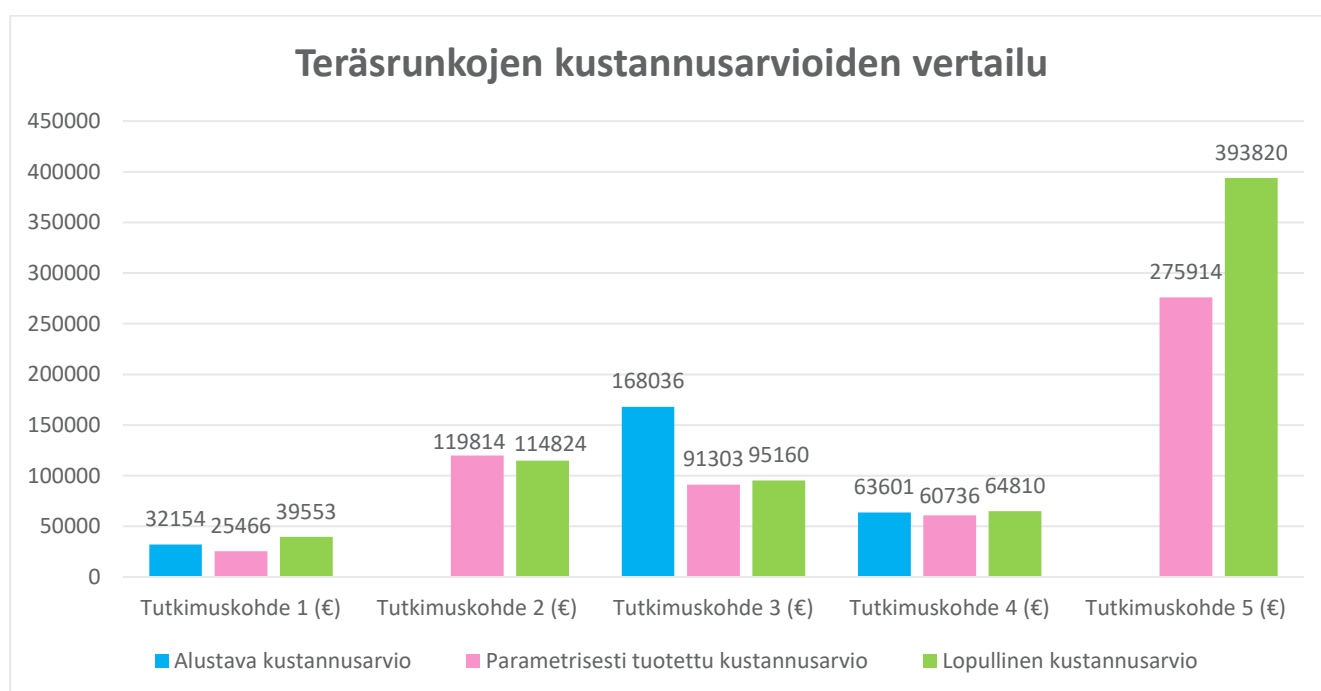


Kuvio 5. Kohteen 5 teräsrakenteiden eri rakennusosien määrien vertailu.

5.6 Kustannusarvioiden vertailu

Tässä luvussa vertaillaan kunkin tutkimuskohteen teräsrungosta tuotettuja kustannusarvioita. Kustannusarviot on tehty jokaisen tutkimuskohteen teräsrungon parametrisesti lasketuille määrille sekä toteutuneille kokonaismäärille. Lisäksi tutkimuskohteissa 1, 3 ja 4 on tehty kustannusarviot teräsrungon alustaville kokonaismäärille. Tutkimuskohteista 2 ja 5 ei ollut saatavilla alustavia määräluetteloita, joten niiden osalta ei voitu tuottaa ja vertailla alustavia kustannusarvioita.

Kuviossa 6 on esitetty kunkin tutkimuskohteen tässä tutkimuksessa tuotetun teräsrunгон kustannusarvion kokonaishinta. Tutkimuskohteet 2, 3 ja 4 soveltuivat kuormitusten osalta parhaiten tässä työssä tehtyihin rajauksiin ja oletuksiin. Taulukosta nähdään, että parametrisesti tuotetun kustannusarvion kokonaishinta on näiden kohteiden osalta melko lähellä toteutuneen rakennuksen teräsrunгон kustannusarvion kokonaishintaa. Erot toteutuneen rakennuksen rungon kustannusarvioon ovat +4,3 % tutkimuskohteessa 2, -4,1 % tutkimuskohteessa 3 ja -6,3 % tutkimuskohteessa 4. Tulos on alkuolettamuksiin ja -odotuksiin nähden erittäin hyvä. Tutkimuskohteiden 1 ja 5 kohdalla ero on suurempi, johtuen tutkittujen kohteiden erilaisista kuormituksista tässä työssä tehtyihin rajauksiin nähden. Näiden kohteiden osalta erot toteutuneen rakennuksen rungon kustannusarvion kokonaishintaan ovat -35,6 % tutkimuskohteessa 1 ja -29,9 % tutkimuskohteessa 5. Tuloksesta on selkeästi nähtävissä, että tietokantapohjaisella, johonkin alkuoletukseen perustuvalla profiilien mitoituksella tulos on hyvä ja tarkka vain, jos nämä olettamukset pätevät.



Kuvio 6. Tutkimuskohteiden teräsrunkojen kustannusarvioiden kokonaishintavertailu.

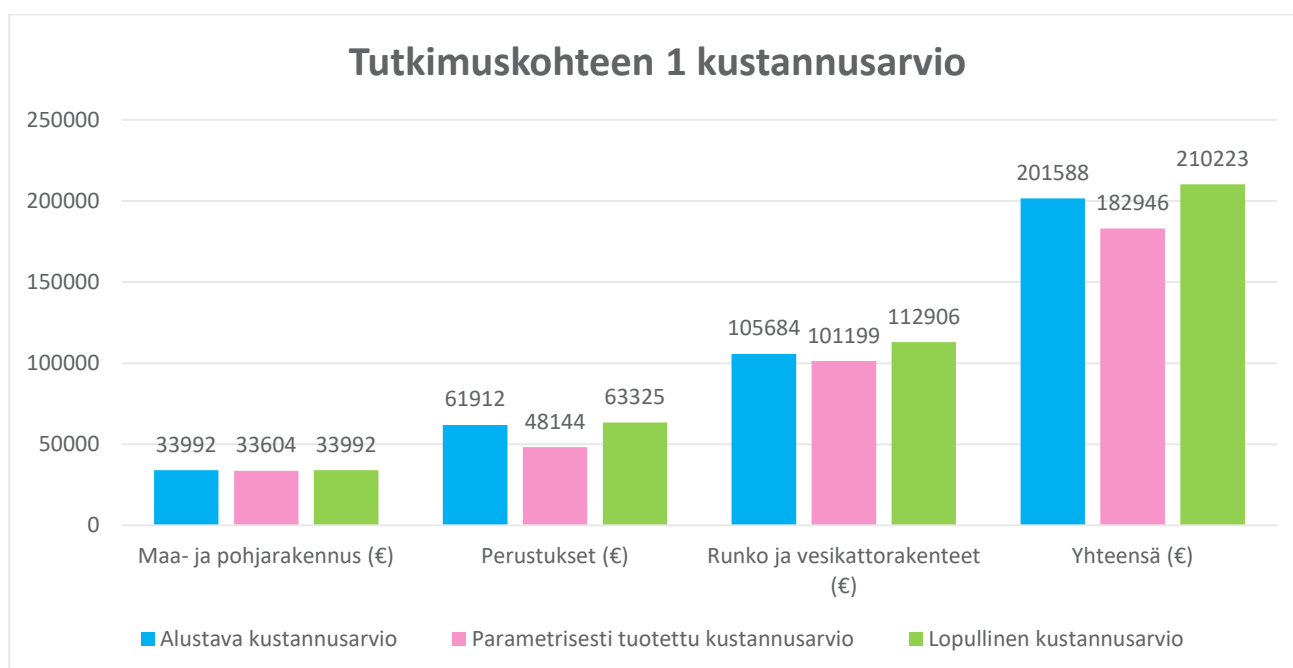
Taulukosta 6 nähdään myös alustavien määrien pohjalta tehtyjen teräsrunгон alustavien kustannusarvioiden kokonaishinnat. Näiden ero toteutuneen rakennuksen teräsrunгон kustannusarvioon oli -18,7 % tutkimuskohteessa 1, +76,6 % tutkimuskohteessa 3 ja -1,9 % tutkimuskohteessa 4. Alustavien kustannusarvioiden osalta tuloksissa on paljon hajontaa ja näiden pohjalta voidaan päätellä, että alustavat määräluettelot on tehty eri vaiheissa suunnittelua. Tutkimuskohte 3 poikkeaa peräti 76,6 % toteutuneista määristä, joten tämä on

todennäköisesti ollut lähimpänä luonnossuunnitteluvaihetta, johon tätä tutkimusta varten tuotetulla parametrisella mallillakin pyritään. Ero tarkkuudessa on huomattava, sillä parametrisesti tuotettu kustannusarvio on peräti 72,5 % tarkempi. Tutkimuskohteen 4 teräsrungon alustava kustannusarvio on erittäin lähellä, vain 1,9 % päässä toteutuneen rakennuksen teräsrungon kustannusarviosta. Todennäköisesti tulos on näin tarkka, koska kyseessä on urakatarjousvaiheen määräluettelo, jolloin rakennus luultavasti on ollut jo hyvin pitkälle suunniteltu. Tutkimuskohde 1 puolestaan asettuu jonkin kahden edellä mainitun väliin.

Koska alustavat määräluettelot on tehty eri vaiheissa suunnittelua, on näiden suora vertailu parametrisesti tuotettuihin kustannusarvioihin ja toteutuneiden määrien pohjalta tehtyihin kustannusarvioihin haastavaa. Paras vertailukohde tässä tutkimuksessa on tutkimuskohde 3, jonka pohjalta voidaan olettaa, että parametrisesti voidaan parhaimmillaan tuottaa huomattavasti tarkempia luonnos- ja esisuunnitteluvaiheen kustannusarvioita. Koska tutkimuskohteen 4 alustava määräluettelo oli tehty jo pitkälle suunnitellun ja lähes valmiin rakennuksen urakatarjousvaiheessa, ei alustavan ja parametrisesti tuotetun teräsrungon määräluetteloiden suora keskinäinen vertailu ole tässä tapauksessa järkevää, sillä tutkimuksessa käytetty algoritmi on tarkoitettu luonnos- ja esisuunnitteluun. Tärkeämpää on verrata parametrisesti tuotettua teräsrungon kustannusarviota toteutuneen rakennuksen teräsrungon kustannusarvioon. Näiden välinen 6,3 % ero on erittäin hyvä tulos tarkkuudessa. Tutkimuskohde 1 osoittaa, että kun kohde ei sovellu kuormituksiltaan algoritmin käyttämän profiilitietokannan olettamuksiin ja rajauksiin, parametrisesti ei todennäköisesti saada tuotettua tarkempaa teräsrungon kustannusarviota nyky menetelmiin verrattuna.

Kuviosta 7 nähdään tutkimuskohteen 1 alustava, parametrisesti tuotettu sekä toteutuneen rakennuksen kustannusarvio, kun on tutkittu kaikkia niitä osa-alueita, joita tutkimusta varten tehdyillä algoritmeilla pystytään laskemaan. Luvussa 5.1 on analysoitu ja tutkittu kyseisen kohteen eri rakennusosien määrät ja näissä havaitut poikkeamat. Kun kustannusarvio pilkotaan kolmeen osaan kuvion 7 mukaisesti, havaitaan parametrisesti tuotetun kustannusarvion poikkeamien muodostuvan niillä osa-alueilla, joiden määrissä oli eroja. Vaikka parametrisesti tuotetun kustannusarvion kokonaishinnan poikkeama lopulliseen kustannusarvioon on vain noin 13 %, joka on varsin kohtuullinen tulos, ei tulos todellisuudessa ole näin hyvä, sillä tulos on vääristynyt. Katsomalla tarkemmin lukujen taakse ja analysoimalla tutkimuskohteessa 1 tutkittuja rakennusosien määriä, havaitaan että kuvion perustukset-kohdassa maanvaraisen pohjalaatan liian suuri määrä kompensoi pilarianturoiden ja peruspilarien liian pientä määrää.

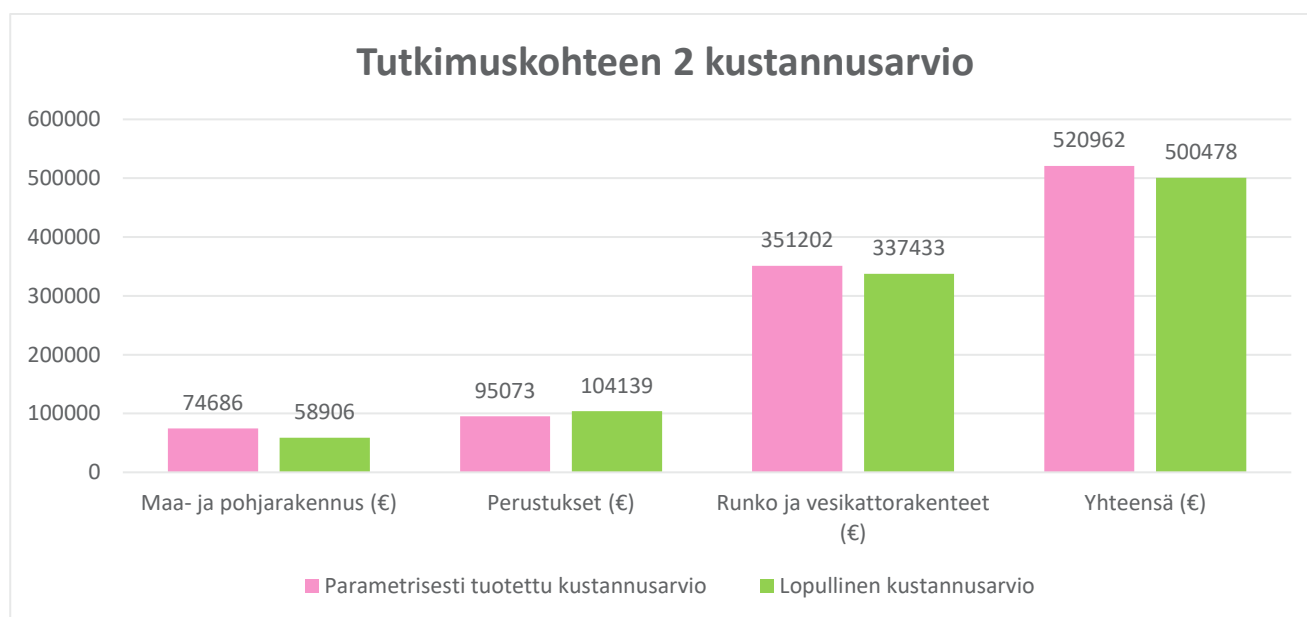
Runko ja vesikattorakenteet -kohdassa puolestaan ulkoseinien liian suuri pinta-ala kompensoi teräsrakenteiden liian pientä määrää. Vaikka kustannusarvioiden euromääräinen poikkeama ei ole erityisen suuri, on kustannusarviossa laskettu eri rakennusosien määriä väärässä suhteessa todelliseen tilanteeseen nähden, mikä vääristää tulosta, sillä rakennusosien keskinäinen hinta yksikköä kohti on erilainen. Tämä osaltaan vahvistaa aiemmin todettua päätelmää, että kun tutkittavan kohteen osalta poiketaan käytettävän algoritmin rajauksista, ei tulos enää ole suoraan vertailukelpoinen.



Kuvio 7. Tutkimuskohteen 1 kustannusarvioiden vertailu.

Kuviosta 8 nähdään tutkimuskohteen 2 parametrisesti tuotettu sekä toteutuneen kohteen kustannusarvio. Tässä kohteessa alustavaa määräluetteloa ei ollut saatavilla, joten alustavaa kustannusarviota ei voitu laatia. Luvussa 5.2 on analysoitu ja tutkittu kyseisen kohteen eri rakennusosien määrät ja niissä havaitut poikkeamat. Myös tässä kohteessa havaitaan kustannusarvion poikkeamien muodostuvan sinne, jossa rakennusosien määrissäkin oli eroja. Parametrisesti tuotetun kustannusarvion kokonaishinnan poikkeama toteutuneen kohteen kustannusarvioon verrattuna on +4,1 %, joka on erittäin hyvä tulos tarkkuudessa. Tässäkin kohteessa parametrisesti tuotettujen eri rakennusosien määrien suhde poikkeaa hieman toteutuneen kohteen rakennusosien määristä. Kokonaistulos on silti yleisesti ottaen hyvä, sillä poikkeamat ovat pienempiä tutkimuskohteessa 1 todettuihin poikkeamiin verrattuna, sillä tutkimuskohde 2 soveltui paremmin työn rajauksiin. Suurimmat heitot eri rakennusosien kustannuksissa tulevat perustuksista ja ulkoseinien pinta-aloista johtuen. Näihin liittyvät ongelmat on tunnistettu aiemmin tämän opinnäytetyön luvuissa 5.1 ja 5.2. Havaitut virheet pyritään

korjaamaan mahdollisimman nopeasti, jolloin parametrisesti tuotetun kustannusarvion tarkkuus eri rakennusosien välillä luonnollisesti paranee. Myös maa- ja pohjarakennuksen kohdalla on havaittavissa selvä poikkeama parametrisesti tuotetussa ja toteutuneen kohteen hinta-arviossa. Kyseisen osa-alueen tarkempi analysointi on hankalaa, sillä toteutuneen maankaivuumäärän arviointi oli käytettävissä olevan aineiston pohjalta vaikeaa.

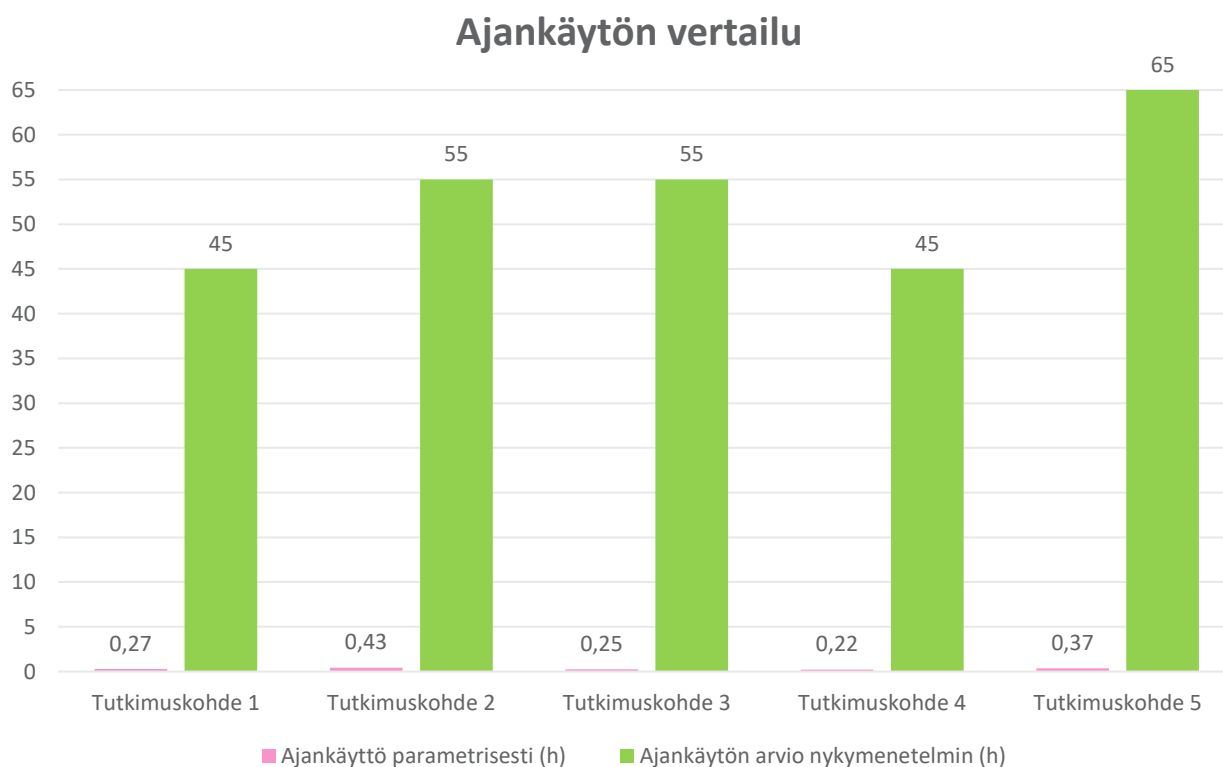


Kuvio 8. Tutkimuskohteen 2 kustannusarvioiden vertailu.

Kaikkien algoritmin tuottamien määrien osalta ja niiden pohjalta tehtyä kustannusarvioiden vertailua pystyttiin tekemään vain tutkimuskohteista 1 ja 2. Muut tutkitut kohteet soveltuivat vain teräsrungon osalta tässä työssä tutkittaviksi ja vertailtaviksi, joten tutkimuskohteissa 3, 4 ja 5 vertailtiin vain näiden kohteen teräsrungon kustannuksia. Tutkimuskohteet 1 ja 2 olivat keskenään varsin erilaisia, sillä tutkimuskohteessa 1 rakennuksen kuormitukset olivat suurempia, kuin algoritmin käyttämän profiili- ja perustuskuormatietokannan oletuskuormitustapaukset. Tämä johti siihen, että tutkimuskohteessa 1 parametrisesti tuotetut määrät olivat pienempiä, kuin toteutuneet määrät. Tutkimuskohde 2 soveltui erinomaisesti tämän työn rajauksiin ja tutkittavan rakennuksen kuormitukset vastaavat hyvin profiili- ja perustuskuormatietokannan oletuskuormitustapauksia. Tutkimuskohteen 2 kohdalla parametrisesti tuotetut määrät vastasivat melko hyvin toteutuneita määriä ja niiden osalta päästiin kustannusarvion laadinnassa hyvään tarkkuuteen. Poikkeamiakin havaittiin ja niiden syyt tunnistettiin, joten niihin osataan reagoida ja havaittuja virheitä tullaan tulevaisuudessa korjaamaan. Tutkimuksen näkökulmasta oli hyvä asia, että tutkimuskohteet, joista saatiin laadittua kokonainen kustannusarvio, olivat keskenään erilaisia. Tällä saatiin vahvistettua ajatusta, että mitä paremmin tutkittava kohde soveltuu työn rajauksiin, sitä tarkempia tuloksia saadaan.

5.7 Ajankäytön vertailu

Kuviossa 9 on vertailtu tutkimuskohteiden luonnossuunnitteluun ja kustannusarvion laatimiseen käytettyä aikaa algoritmin avulla sekä arvioimalla käytettävää aikaa, kun kustannusarvio laadittaisiin nykyisin käytössä olevin menetelmin. Tutkittavien kohteiden aiempaan luonnossuunnitteluun ja kustannusarvioiden laatimiseen käytetystä ajasta ei ollut tietoja saatavilla, joten tässä tutkimuksessa jouduttiin turvautumaan kokemusperäiseen ajankäytön arviointiin. Ajankäytön arvioinnissa arvioitiin luonnossuunnitteluvaiheen rakennemallin mallintamiseen, lujuuslaskentaan, rakennusosien määrälaskentaan sekä kustannusarvion laatimiseen käytettävää aikaa. Kokemusperäisesti arvioimalla ei välttämättä saada arvioitua käytettävää aikaa tarkasti, sillä todellinen käytettävä aika on esimerkiksi tekijästä riippuvainen, joten arvioidut ajat ovat suuntaa antavia. Ajankäytön arvioinnissa oletettiin, että tarvittavat lähtötiedot ovat saatavilla eikä lähtötietojen selvitystyöhön käytettyä aikaa ole huomioitu. Lisäksi ajankäyttöä arvioitiin siten, että käytettävää aikaa arvioitiin nykyisin käytössä olevien käytäntöjen mukaisesti, vaikka kunkin tutkimuskohteen toteutushetkellä menetelmissä on saattanut olla eroja. Kuvio 9 nähdään, että ero algoritmin avulla tuotetun sekä nyky menetelmin tehtävän kustannusarvion välillä on valtava. Jokaisessa tutkimuskohteessa rakennuksen kustannusarvio saatiin algoritmin avulla tuotettua yli 99 % nopeammin.



Kuvio 9. Ajankäytön vertailu parametrisesti sekä nykymenetelmin.

5.8 Tutkimustulokset

Luvuissa 5.1–5.7 on tutkittu ja analysoitu tässä tutkimuksessa käytetyt tutkimuskohteet. Rakennusosien määriä arvioitiin kussakin kohteessa erikseen, sillä analysoimalla eri rakennusosien määrät ja poikkeamat, saatiin tunnistettua algoritmin virheet, puutteet ja korjaustarpeet. On tärkeää, että määrät saadaan tuotettua mahdollisimman tarkasti, sillä kustannusarvio tehdään kohderakennuksen eri rakennusosien määrien pohjalta. Mitä tarkemmin määrät saadaan tuotettua, sitä tarkempi on kustannusarvio. Vertailemalla parametrisesti tuotettuja määriä toteutuneisiin määriin saatiin osoitettua, että tarkkuus on hyvä, jos kohde soveltuu algoritmin rajauksiin. Jos kohde poikkeaa algoritmin rajauksista, tarkkuus luonnollisesti huononee. Lisäksi ajankäytön osalta saatiin erinomaisia tuloksia.

Luvussa 1.2 on esitelty tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset, jotka olivat:

1. Voidaanko kustannusarvion laatimisprosessia nopeuttaa hyödyntämällä parametrilla suunnittelua? Jos voidaan, niin kuinka paljon?
2. Saadaanko parametrilla suunnittelua hyödyntämällä tuotettua aiempaa tarkempia kustannusarvioita? Kuinka paljon tarkempia?

Tutkimuskysymys 1. Luvun 5.7 kuviossa 9 on vertailtu kustannusarvion laatimiseen käytettävää aikaa parametrisella menetelmällä verrattuna nyky menetelmiin. Parametrisesti tuotettu kustannusarvio saatiin jokaisessa tämän työn tutkimuskohteessa tuotettua yli 99 % nopeammin nyky menetelmiin verrattuna. Vaikka tutkimuskohteiden aiemmasta ajankäytöstä ei ollut dataa saatavilla ja ajankäyttöä jouduttiin arvioimaan kokemukseräisesti, on parametrisen suunnittelun antama huomattava nopeus etu kiistaton. Voidaan siis todeta, että parametrilla suunnittelua hyödyntämällä voidaan nopeuttaa kustannusarvion laatimisprosessia. On kuitenkin tärkeää tiedostaa, että tässä tutkimuksessa ajankäytön suhteen käytettiin oletuksia ja yksinkertaistuksia. Lisäksi kun tuotettiin kustannusarvioita parametrisesti, oli tutkittavan rakennuksen geometria etukäteen tiedossa, joten se nopeutti algoritmin käyttöä ja kustannusarvion tuottamista. Näistä syistä johtuen ajankäytön vertailusta saatu tulos on suuntaa antava ja suuruusluokaltaan oikea, mutta ei tarkka. Kuitenkin vaikka parametrisen kustannusarvion tuottamiseen käytettäisiin joitakin tunteja, saataisiin kustannusarvio tuotettua algoritmillä tuotettavien määrien osalta todennäköisesti yli 90 % nopeammin, kuin nyky menetelmillä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että kohteen täydellinen kustannusarvio saataisiin tuotettua 90 % nopeammin. Lähtötietojen selvitykseen ja niihin tutustumiseen käytettyä aikaa ei ole tässä työssä huomioitu, jonka lisäksi luvussa 1.3 on kerrottu työn rajaukset ja asiat, joita algoritmi ei

huomioi. Nämä tutkimuksen ulkopuolelle rajatut asiat on huomioitava kustannusarviossa muilla tavoin. Ulkopuolelle rajattavien asioiden määrä ja laajuus riippuu kohteesta, joten on vaikea antaa yksiselitteistä vastausta paljonko todellinen ajallinen säästö voi olla. Tässä tutkimuksessa käytetyn algoritmin tuottamien määrien osuus kokonaishinnasta on noin 45–50 %. Karkeasti voidaan arvioida, että näiden laskemiseen käytettävä aika on vähintään puolet täydellisen kustannusarvion laatimiseen tarvittavasta ajasta. Tämän ja luvun 5.7 kuvion 9 pohjalta voidaan arvioida, että hyödyntämällä parametrissa suunnittelua täydellisen kustannusarvion laatimisessa voidaan kustannusarvion laatimiseen käytettävässä ajassa säästää kymmeniä tunteja, mikä on huomattava ajallinen säästö. Käytännössä tämä tarkoittaa kymmeniä prosentteja, jopa yli 50 % kokonaisajasta.

Tutkimuskysymys 2. Luvuissa 5.1–5.5 on tutkittu ja analysoitu kunkin kohteen tässä tutkimuksessa tutkitut rakennusosien määrät. Luvussa 5.6 on vertailtu tutkittujen määrien pohjalta tehtyjä kustannusarvioita. Tutkimuskohteet 2, 3 ja 4 soveltuivat kuormituksiltaan hyvin tämän työn rajauksiin ja näiden osalta päästiin teräsrungon kustannusarvioiden osalta hyvään tarkkuuteen poikkeamien ollessa +4,3 %, -4,1 % ja -6,3 % verrattuna toteutuneen rakennuksen teräsrungon kustannusarvioon. Tutkimuskohteet 1 ja 5 poikkesivat tämän työn rajauksista kuormitusten osalta, joten näiden kohdalla tulos on huonompi teräsrunkojen kustannusarvioiden poikkeamien ollessa -35,6 % ja -29,9 % verrattuna toteutuneen rakennuksen teräsrungon kustannusarvioon. Vain tutkimuskohteista 1 ja 2 pystyttiin tekemään kustannusarviot, jotka huomioivat kaikki tutkimuksessa käytetyn algoritmin tuottamat määrät. Tutkimuksen näkökulmasta oli hyvä asia, että tutkimuskohde 1 ei soveltunut kuormituksiltaan työn rajauksiin ja tutkimuskohde 2 soveltui. Näin saatiin osoitettua, että kun kohde soveltuu algoritmin rajauksiin, tarkkuuskin on hyvä. Tutkimuskohteen 1 kohdalla parametrisesti tuotetun kustannusarvion tarkkuus verrattuna toteutuneen rakennuksen kustannusarvioon oli -13 %, kun tutkimuskohteen 2 kohdalla ero oli vain +4,1 %. Näiden lukujen pohjalta voidaan tehdä johtopäätös, että kun kohde soveltuu parametrisen työn rajauksiin, voidaan päästä erittäin hyvään, jopa alle 5 %:n tarkkuuteen niiden rakennusosien osalta, jotka algoritmilla pystytään tuottamaan. Alustavien määrien osalta ei useinkaan päästä näin hyvään tarkkuuteen, joten parametrissa suunnittelua hyödyntämällä voidaan tuottaa aiempaa tarkempia kustannusarvioita, kunhan kohde on käytettävän algoritmin rajauksiin sopiva.

Tässä tutkimuksessa saatavilla olleet alustavat määrätiedot olivat tasoltaan ja tarkkuudeltaan vaihtelevia. Näiden pohjalta on haastavaa arvioida, kuinka paljon tarkempia

kustannusarvioita parametrisilla malleilla pystytään tuottamaan. Tutkimuskohteen 3 alustavat määrät ovat todennäköisesti lähimpänä luonnossuunnitteluvaiheen mallia, joka vertautuu parhaiten tässä työssä käytetyn algoritmin luomaan rakennuksen rungon geometriaan. Poikkeama algoritmin tuottamiin määriin on melko iso, eikä ero todennäköisesti suuremmalla otannalla olisi niin suuri. Voidaan kuitenkin päätellä, että parhaassa tapauksessa parametrista suunnittelua hyödyntämällä voidaan tuottaa jopa kymmeniä prosentteja tarkempia kustannusarvioita niiden rakenteiden osalta, jotka käytettävä algoritmi pystyy tuottamaan. Vaihteluväli voi kuitenkin olla suuri, sillä alustavien määrien tarkkuus voi vaihdella suuresti. Myös tarkkuuden osalta on huomioitava luvussa 1.3 esitetyt työn rajaukset, joita parametrisesti tuotetussa kustannusarviossa ei huomioida. Tässä tutkimuksessa käytetyn algoritmin tuottamat määrät ovat karkeasti noin 45–50 % koko hankkeen täydellisen kustannusarvion kokonaisuudesta. Voidaan siis arvioida ja olettaa, että parametrista suunnittelua hyödyntämällä voidaan tuottaa ainakin joitain prosentteja, jopa kymmeniä prosentteja tarkempia kustannusarvioita. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että kohde soveltuu käytettävän algoritmin rajauksiin.

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia ja selvittää voidaanko parametrissa suunnittelua hyödyntää kustannusarvioiden laatimisprosessissa. Algoritmeilla toimiva parametrinen suunnittelu on osittain automatisoitua suunnittelua, joten tutkimuksen alkuoletta oli, että parametrissa suunnittelua hyödyntämällä voidaan saavuttaa ainakin ajallista etua. Lisäksi tutkittiin parametrisesti tuotettujen rakennusosien määrien ja kustannusarvioiden tarkkuutta verrattuna nyky menetelmillä tuotettuihin rakennusosien määriin ja kustannusarvioihin.

Tutkimus toteutettiin toimintatutkimuksena, joka on eräänlaisen syklinen prosessi, joka pitää sisällään suunnittelun, toimeenpanon, havainnoinnin ja reflektoinnin. Tutkimustulosten perusteella tehtiin johtopäätökset, vastattiin tutkimuskysymyksiin sekä arvioitiin tutkimuksen onnistumista ja jatkokehitystarpeita. Tutkimuksen aineistona käytettiin viittä aiemmin toteutettua teräsrunkoista kohdetta, joiden alustavia ja lopullisia määräluetteloita, ja näiden pohjalta laadittuja kustannusarvioita vertailtiin parametrisesti tuotettuihin määräluetteloihin ja kustannusarvioihin. Tutkimustulokset olivat alkuodotuksiin nähden hyviä ja tutkimuksen aikana saatiin kerättyä paljon hyödyllistä tietoa parametrisen suunnittelun soveltuvuudesta erilaisiin kohteisiin. Tutkimuksen aikana kohdattiin myös erilaisia haasteita ja ongelmia. Suurimmat ongelmat liittyivät tutkimuksessa käytössä olleeseen aineistoon ja sen rajallisuuteen, joten tutkimusta ei ollut mahdollista toteuttaa kaikilta osin alkuperäisen suunnitelman mukaan. Tutkimuksessa käytetyn algoritmin geometria oli myös rajallinen, koska sillä pystyttiin tuottamaan vain yhdenlaisia rakennuksia, joten algoritmia jouduttiin myös soveltamaan tutkimusvaiheessa. Yleisesti ottaen tutkimuksessa kuitenkin onnistuttiin hyvin, odotukset täyttyivät ja tulokset ovat tulevaisuutta ajatellen lupaavia.

Koska tutkimuskohteet olivat keskenään erilaisia, tutkimuksella pystyttiin osoittamaan parametrisen suunnittelun vahvuudet ja toisaalta myös heikkoudet verrattuna nyky menetelmiin. Parametrinen suunnittelu on vahvimmillaan yksinkertaisissa työtehtävissä, joissa on paljon toistoa. Algoritmit on aina tarkoitettu tiettyyn tehtävään, joten kun tehtävästä ja sen rajoista poiketaan, algoritmi ei enää sovellu suoritettavaan tehtävään. Tutkimuskohteista kolme soveltui tutkimuksen rajauksiin hyvin tai erinomaisesti. Kaksi tutkimuskohdetta oli geometrisesti sopivia, mutta poikkesi kuormituksiltaan tutkimuksen rajoista. Tästä johtuen kolmen tutkimukseen hyvin soveltuneen kohteen tulokset olivat hyviä, kun taas kahden huonommin soveltuneen tulokset olivat huomattavasti heikompia. Tutkimuksessa käytetty algoritmi käytti rakennusosien mitoitukseen tietokantapohjaista mitoitusta, joka johtaa siihen, että kun

tietokannan rajauksista poiketaan, seurauksena on todennäköisesti virheellinen mitoitus. Tästä syystä kahdessa tutkimuskohteessa tulos oli heikompi.

Tietokantapohjainen mitoitus ja profiilien esivalinta voi parhaimmillaan olla erittäin nopea ja tehokas työkalu rakennuksen luonnos- ja esisuunnitteluvaiheen rungon ja sen rakennusosamäärien tuottamiseen. Toisaalta tietokanta on aina tehty joillakin alkuoletuksilla, joten kun näistä oletuksista poiketaan, tietokanta ei enää sovellu kohteeseen. Tämä johtaa tietokannan rajallisuuteen. Tietokanta soveltuu kuitenkin hyvin esimerkiksi tämän tutkimuksen rajausten mukaisesti hallikohteisiin, sillä hallit ovat pääasiassa yksinkertaisia rakennuksia, joissa rungolle kohdistuvia kuormia ja muuttujia on vähän. Esimerkiksi teollisuuskohteissa, joita tässä tutkimuksessa oli kaksi, rakennusten käyttötarkoitukset ja kuormitukset voivat vaihdella paljon. Tällaisissa kohteissa esimerkiksi reaaliaikainen laskenta voisi olla tietokantapohjaista mitoitusta parempi ja tehokkaampi vaihtoehto, kun hyödynnetään parametrissa suunnittelua.

Tutkimuksessa saatiin tuotettua toimiva parametrinen työkalu kustannuslaskennan avuksi, joka oli yksi tämän opinnäytetyön tavoitteista. Jatkokehitystarpeita ja mahdollisuuksia havaittiin ja tunnistettiin paljon, joten suunnitelmana on jatkaa tässä tutkimuksessa tuotetun algoritmin kehittämistä myös tulevaisuudessa ja jalkauttaa se opinnäytetyön toimeksiantajayrityksen sisäiseen käyttöön. Alkuvaiheessa algoritmia tullaan koekäyttämään muutaman käyttäjän toimesta ennen sen julkaisua laajempaan käyttöön. Näin pystytään tehokkaammin havaitsemaan sen mahdolliset ongelmakohdat ja korjaamaan virheet, jolloin laajempaan käyttöön saadaan aikanaan valmiimpi ja toimivampi algoritmi. Ensisijaisia päivitystarpeita, jotka pyritään korjaamaan mahdollisimman nopeasti, ovat tässä tutkimuksessa havaitut virheet rakennusosien määrälaskennassa teräspilareiden ja ulkoseinäpaneelien pinta-alan osalta sekä betoniperustusten mitoituksen osalta. Algoritmi on kuitenkin jo sellaisenaan pääasiassa toimiva ja sitä voidaan hyödyntää kohteissa, jotka soveltuvat algoritmin rajauksiin. Kuitenkin niitä rakennusosia, joiden määrälaskennassa havaittiin virheitä ja poikkeamia, tulee arvioida myös erikseen, eikä algoritmin antamaan tulokseen tule sokeasti luottaa ennen algoritmiin tehtäviä päivityksiä.

LÄHTEET

- A-Insinöörit. Ei päiväystä. Arkkitehdin ja rakennesuunnittelijan välisen algoritmiavusteisen suunnitteluprosessin kehittäminen. [Pdf-tiedosto]. [Viitattu 2.3.2022]. Saatavana: http://www.kiradigi.fi/media/hankemateriaali/loppuraportit/a-insinoorit-loppuraportti_uusi.pdf
- Archistar Academy. 2018. How to Define and Use Clusters in Grasshopper. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.2.2022]. Saatavana: <https://academy.archistar.ai/how-to-define-and-use-clusters-in-grasshopper>
- Davidson, S. 2022. Clusters. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.2.2022]. Saatavana: <https://www.grasshopper3d.com/page/clusters>
- Davis, D. 2013. Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture. [Thesis, RMIT University]. [Viitattu 9.10.2021]. <https://www.danieldavis.com/thesis/>
- Erkkilä, S. 2017. Algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntäminen betonielementtirakenteiden suunnittelussa. [Diplomityö]. Tampereen teknillinen yliopisto. Trepo. [Viitattu 22.9.2021]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201705241496>
- FMC Laskentapalvelut. 2021. Yritysesittely.
- GRAITEC USA. 2022. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.1.2022]. Saatavana: <https://www.graitecusa.com/cad-software/structural-engineering/robot-structural-analysis-professional>
- Grasshopper Docs. 2021a. LunchBox. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.1.2022]. Saatavana: <http://grasshopperdocs.com/addons/lunchbox.html>
- Grasshopper Docs. 2021b. Excel Write. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.1.2021]. Saatavana: <http://grasshopperdocs.com/components/lunchbox/excelWrite.html>
- Grasshopper Docs. 2021c. Excel Reader. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.1.2021]. Saatavana: <http://grasshopperdocs.com/components/lunchbox/excelReader.html>
- Kananen, J. 2014. Toimintatutkimus kehittämistutkimuksen muotona: Miten kirjoitan toimintatutkimuksen opinnäytetyönä? Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas: Näin kirjoitat opinnäytetyön tai pro gradun alusta loppuun. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kilpeläinen, T. 9.6.2021. Kustannuslaskennan merkitys onnistuneessa hankkeessa. [Blogikirjoitus]. [Viitattu 14.1.2022]. Saatavana: <https://ssa.fi/blogi/kustannuslaskennan-merkitys-onnistuneessa-hankkeessa/>

- Laitinen, L-K. 2022. Johtava kustannusasiantuntija, FMC Laskentapalvelut Oy. Haastattelu. 11.1.2022.
- Robert McNeel & Associates. 2022. What are NURBS? [Verkkosivu]. [Viitattu 6.1.2022]. Saatavana: <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>
- Sweco. 2022. Parametrinen suunnittelu automatisoi suunnittelijan rutiinitehtäviä. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.3.2022]. Saatavana: <https://www.sweco.fi/palvelumme/digitaaliset-ratkaisut/parametrinen-suunnittelu/>
- Tanska, T. & Österlund, T. 2014. Algoritmit puurakenteissa: menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto. Julkaisu B 32. DigiWoodLab, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin tiedekunta. <http://urn.fi/urn:isbn:9789526204567>
- Trimble Solutions Corporation. 2022a. Tekla Structures. [Verkkosivu]. [Viitattu 8.1.2022]. Saatavana: <https://www.tekla.com/fi/tuotteet/tekla-structures>
- Trimble Solutions Corporation. 2022b. Mitä on BIM? [Verkkosivu]. [Viitattu 8.1.2022]. Saatavana: <https://www.tekla.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/mit%C3%A4-on-bim>
- Trimble Solutions Corporation. 2022c. Grasshopper-Tekla Live Link. [Verkkosivu]. [Viitattu 9.1.2022]. Saatavana: <https://warehouse.tekla.com/#/catalog/details/b901f77d-cfe8-4a97-894b-f4053829c297>
- Woodbury, R. 2010. Elements of Parametric Design. Routledge.

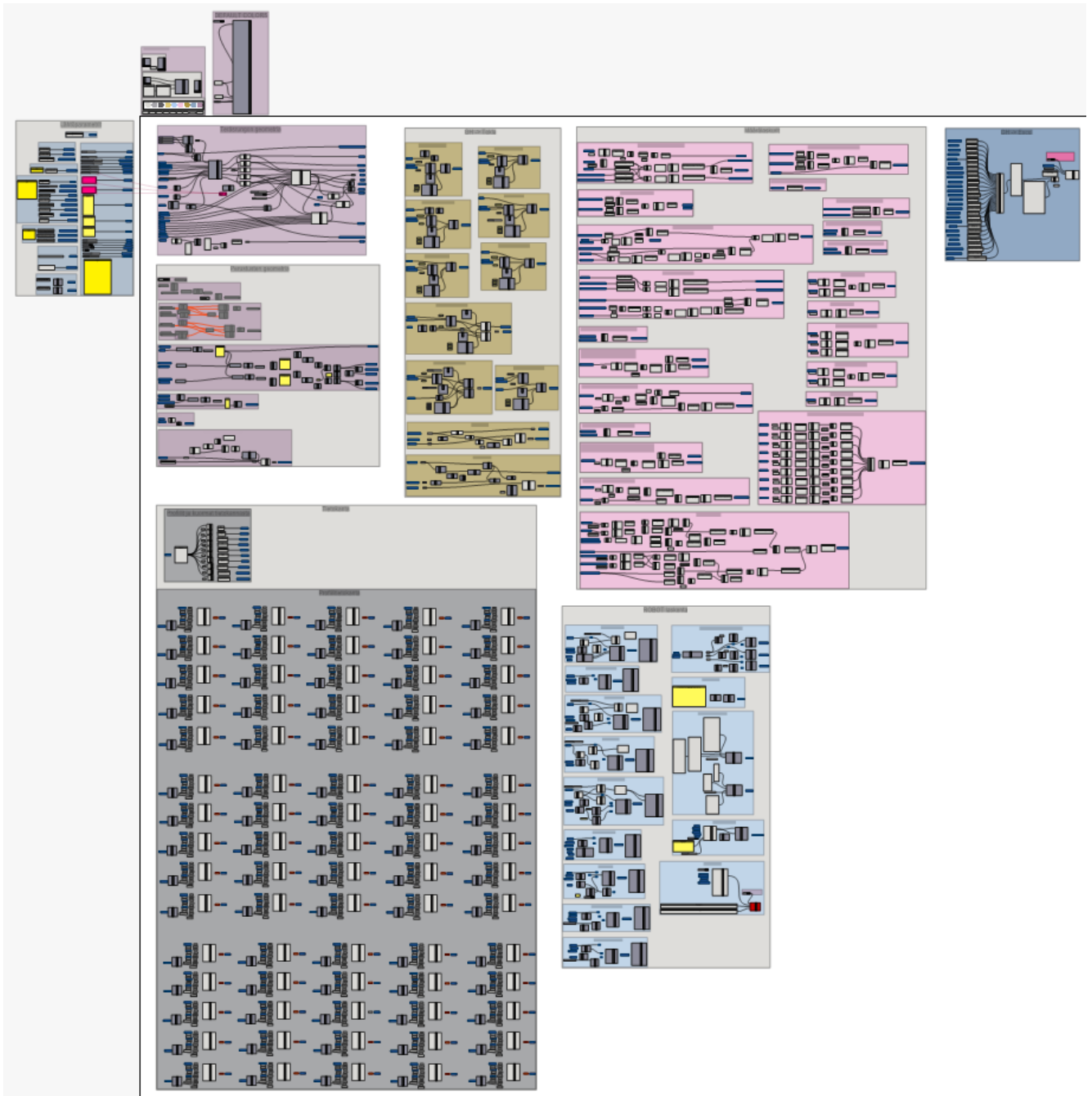
LIITTEET

Liite 1. Yleiskuva tutkimuksessa käytetystä algoritmista

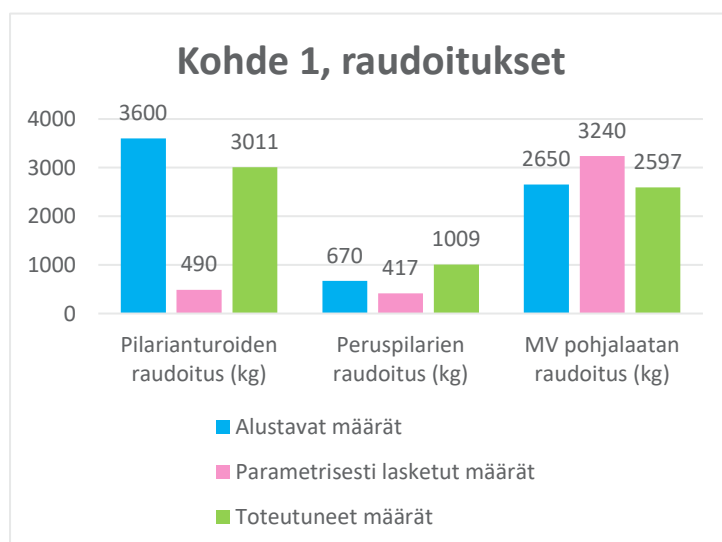
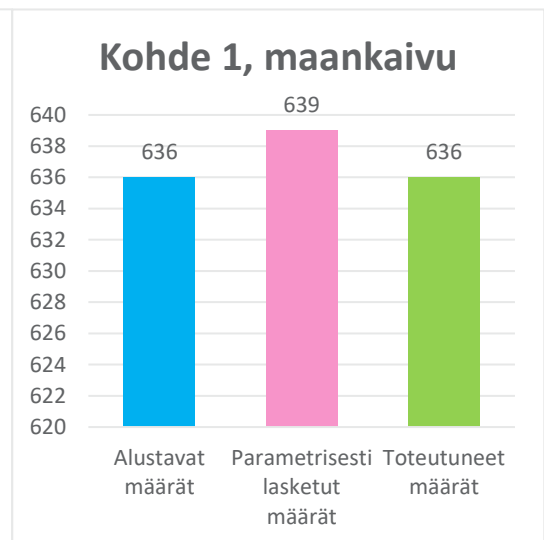
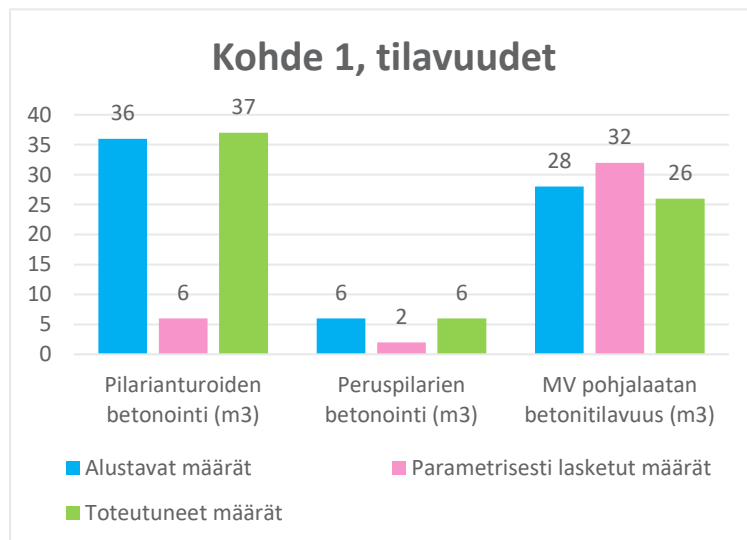
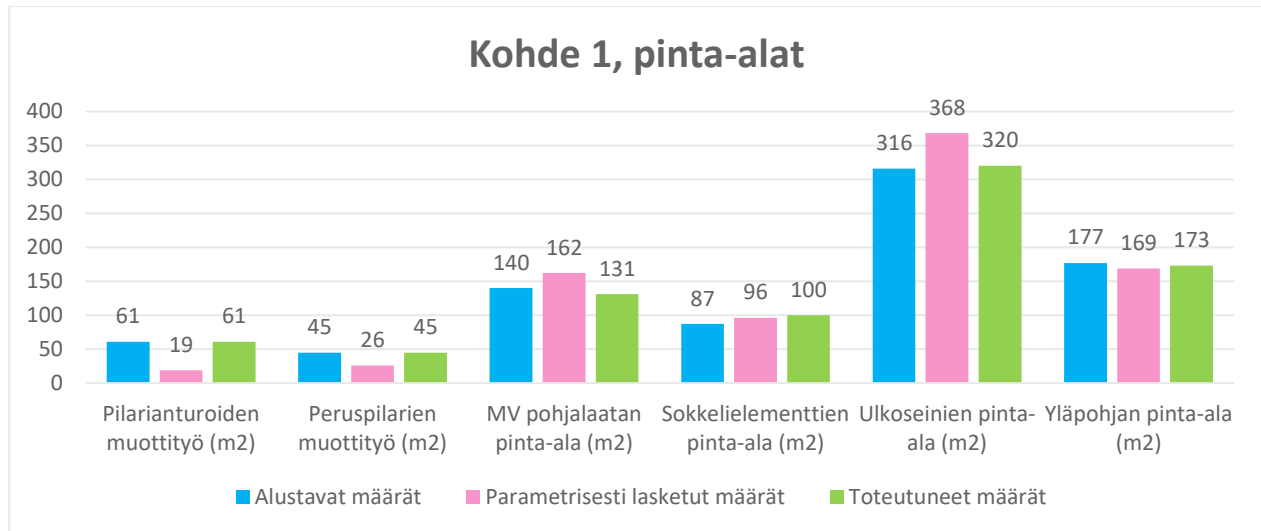
Liite 2. Kohteen 1 rungon määrätiedot

Liite 3. Kohteen 2 rungon määrätiedot

Liite 1. Yleiskuva tutkimuksessa käytetystä algoritmista



Liite 2. Kohteen 1 rungon määrätiedot



Liite 3. Kohteen 2 rungon määrätiedot

