



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SARA-PÄIVI PAUKKERI  
ALGORITMIAVUSTEINEN RAKENNESUUNNITTELU

Kandidaatintyö

Tarkastaja:  
professori Mikko Malaska

## TIIVISTELMÄ

**SARA-PÄIVI PAUKKERI:** Algoritmiavusteinen rakennesuunnittelu

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 28 sivua

Joulukuu 2018

Rakennetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Talonrakentaminen

Tarkastaja: professori Mikko Malaska

**Avainsanat:** algoritmiavusteinen suunnittelu, parametrinen suunnittelu, rakennesuunnittelu

Tässä kandidaatin työssä selvitetään, miten ja millaisissa tilanteissa algoritmiavusteista suunnittelua voi ja kannattaa hyödyntää rakennesuunnittelussa. Työssä tarkastellaan myös algoritmiavusteisen suunnittelun hyötyjä ja ongelmakohtia verrattaessa perinteiseen tietomallintavaan rakennesuunnitteluun. Työ toteutetaan kirjallisuusselvityksenä perehtymällä erityisesti uusimpiin diplomitoihin, joita aiheesta on Suomessa tehty.

Selvityksen perusteella algoritmiavusteista suunnittelua voidaan hyödyntää lähtökohtaisesti kaikessa rakennesuunnittelussa materiaalista ja kohteesta riippumatta. Erityisesti algoritmisen suunnittelu on perusteltua, jos projektissa on odotettavissa merkittäviä muutoksia suunnitelmissa, suuri erilaisten analyysien tarve, haastavat geometriat tai luodulle algoritmilta on oletettavissa myöhemmin muita hyödyntämiskohteita.

Keskeisimmät hyödyt algoritmiavusteisessa suunnittelussa verrattaessa tietomallintavaan suunnitteluun ovat lyhentyneessä suunnitteluajassa, suunnitelmien muutosjoustavuudessa, haastavien geometrioiden tehokkaassa suunnittelussa, optimoinnissa ja projekti-kustannusten alenemisessä. Lisäksi algoritmiavusteisuuden ansiosta pystytään vähentämään riskialtista manuaalista tiedonsiirtoa ja toisteista mallintamista.

Algoritmiavusteinen suunnittelu mahdollistaa eri suunnitteluosapuolien työskentelemisen samassa mallissa. Tällöin eri suunnittelijoilla on aina viimeisin suunnittelutieto saatavilla ja tiedonkulku suunnitteluosapuolien välillä on tehokasta. Eri suunnittelu- ja analyysiohjelmat on myös mahdollista yhdistää toisiinsa, jolloin analyysien tulokset ovat tehokkaasti hyödynnettävissä suunnittelussa.

Tällä hetkellä algoritmiavusteisen suunnittelun yksi keskeisimmistä haasteista on tietotaidon puute, erityisesti ohjelmointitaito on rakennusalalla puutteellista. Haasteita tuottaa myös algoritmiavusteisen suunnittelun ajattelutavan eroavuus tietomallintavasta suunnitteluprosessista.

## **ABSTRACT**

**SARA-PÄIVI PAUKKERI:** Algorithm-aided Structural Design

Tampere University of Technology

Bachelor's Thesis, 28 pages

December 2018

Bachelor's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Mikko Malaska

Keywords:

## ALKUSANAT

Kirjoitin tämän kandidaatintyön Sweco Rakennetekniikka Oy:lle. Haluaisinkin kiittää Swecoa erittäin mielenkiintoisesta aiheesta ja erityisesti ohjaajaani Rasmus Sainmaata vinkeistä työn parantamiseksi. Lisäksi haluaisin kiittää Tampereen teknillisen yliopiston ohjaajaani professori Mikko Malaskaa innostuksesta ja kannustavista kommentteista.

Tämän työn teko on ollut kuin tähänastinen opiskeluaikani tiivistetyssä paketissa. Siihen on kuulunut niin suunnatonta innostusta, tasaista puurtamista, ajoittaista epätoivoa kuin kiirettäkin. Kokonaisuutena olen nauttinut valtavasti tämän työn teon kautta löytyneen algoritmiavusteisen rakennesuunnittelun maailmaan tutustumisesta. Siksi tahtoisin kiittää mahtavia ystäviäni koulussa ja muualla. Kiitos tsemppauksesta ja siitä, että kouluun on aina mukava tulla. Erityisesti kiitän vielä perhettäni pohjattomasta luottamuksesta ja tuesta.

Tampereella, 14.12.2018

Sara-Päivi Paukkeri

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	ALGORITMIAVUSTEISEN SUUNNITTELUN PERUSTEET .....	2
	2.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu .....	2
	2.2 Esimerkkejä ohjelmistojen hyödyntämisestä algoritmeissa .....	4
3.	ALGORIMIAVUSTEINEN RAKENNESUUNNITTELU .....	7
	3.1 Suunnittelun muutosjoustavuus.....	7
	3.2 Rakenteen lujuuslaskenta ja optimointi.....	9
	3.3 Haastavat geometriat .....	9
	3.4 Uudelleenhyödynnettävyys .....	12
	3.5 Haasteet .....	14
4.	ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELUPROSESSI.....	16
	4.1 Päätöksenteko suunnittelussa .....	16
	4.2 Algoritmiavusteisen suunnittelun vaikutus projektin muihin osapuoliin.....	18
	4.2.1 Arkkitehtiyhteistyö.....	19
	4.2.2 Vaikutukset tilaajaan.....	20
	4.3 Tulevaisuus.....	21
5.	YHTEENVETO .....	24
	5.1 Johtopäätökset .....	24
	5.2 Jatkotutkimustarpeet.....	25
	LÄHTEET.....	27

## KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Perinteinen ja algoritmiavusteinen suunnitteluprosessi (Lalla 2017, s. 31).....</i>	<i>3</i>
<i>Kuva 2. Visuaalisesti ohjelmoimalla luotu ruudukko (Tedeschi 2014, s. 93).....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 3. Algoritmiavusteinen suunnitteluprosessi (Humppi 2015, s. 88, 90).....</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 4. Algoritmiavusteisesti mallinnetun ristikon vertailu (Lalla 2017, s. 59).....</i>	<i>7</i>
<i>Kuva 5. Algoritmiavusteisesti suunniteltu City of Dreams -hotelli Kiinassa (Permarini et al. 2016, s. 57) .....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 6. City of Dreams -hotellin kantavat rakenteet (Piermarini et al. 2016, s. 58).....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 7. Suunnitteluprosessien kestot (Hauschild &amp; Karze 2011, Tanska &amp; Österlund 2014, s. 24 mukaan).....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 8. MacLeamyn-kuvaaja (Davis 2013, s. 33).....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 9. Muunneltu MacLamey-kuvaaja muutosten kustannusvaikutuksista ja mahdollisuudesta vaikuttaa projektin kustannuksiin algoritmiavusteisella suunnittelulla (Davis 2013, s. 208).....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 10. Valmistavan teollisuuden ja rakentamisen erot lisäarvoa tuottavissa toiminnoissa (Construction Institute USA, 2004, Koskenvesa 2011, s. 140 mukaan).....</i>	<i>22</i>

## LYHENTEET JA KÄSITTEET

AAD	<i>Algorithm-Aided Design</i> , algoritmiavusteinen suunnittelu.
Algoritmi	Tarkkaan määritettyjen komentojen sarja, joka läpikäymällä toteutetaan haluttu tehtävä.
BIM	<i>Building Information Modeling</i> , tietomallintaminen
FEM	<i>Finite element method</i> , elementtimenetelmä. Lujjuuslaskennan numeerinen ratkaisumenetelmä
Grasshopper	Rhinoceros 3D -mallinnusohjelman lisäosa, visuaalinen ohjelmointialusta.
Moduuli	Itsenäinen pieni osa algoritmia, joka toteuttaa jonkin tehtävän
Parametri	Laskennan tai algoritmin suorittamisen lähtötieto, jonka perusteella saadaan aikaan tulos.
Rhino	Rhinoceros 3D –mallinnusohjelma
Robot	Autodeskin Robot Structural Analysis Professional (RSA) –ohjelmisto rakenteiden analysointiin
Solibri	Solibri Model Shecker -ohjelmisto, ohjelmisto tietomallin tarkastamiseen
Tekla	Tekla Structures –tietomallinnusohjelmisto

# 1. JOHDANTO

Tietotekniikan ansiosta rakennesuunnittelu on edistynyt viime vuosikymmeninä huomasti. Käsien piirtämisen syrjäytti ensin tietokoneavusteinen 2D-piirtäminen ja myöhemmin 3D-mallintaminen. Nykyisin rakennesuunnitelmat tuotetaan pääsääntöisesti 3D-tietomalleista. Seuraava suuri kehitysaskel voi olla algoritmipohjainen suunnittelu, jossa suunnittelija luo algoritmin, jonka avulla generoidaan optimoitu malli rakennuksesta. (Aish 2013) Algoritmiavusteinen suunnittelu tarjoaa osaltaan mahdollisuuden vastata rakennesuunnittelun erilaisiin haasteisiin.

Algoritmiavusteista suunnittelua käytetään Suomessa rakennesuunnittelussa vielä melko rajallisissa määrin, mutta esimerkiksi arkkitehtisuunnittelussa algoritmisen mallintaminen on jo laajasti käytössä. Tässä kandidaatintyössä selvitetään, miten ja millaisissa kohteissa algoritmiavusteisia suunnittelumenetelmiä olisi mahdollista ja järkevää hyödyntää. Työssä pyritään myös löytämään algoritmiavusteisen rakennesuunnittelun hyötyjä ja ongelmakohtia verrattaessa perinteiseen tietomallintavaan rakennesuunnitteluun. Hyödyksi luokitellaan tilanne, joka on rakennusprojektin kannalta joko suoraan tai välillisesti kustannuksia säästävä. Mahdollisuuksia kartoittaessa ei haluta pidättäytyä missään tietyssä rakennusmateriaalissa tai ohjelmistossa.

Tämän työn tutkimus tehdään kirjallisuusselvityksenä. Haasteita työhön asettaa se, että aiheesta ei ole saatavilla kovin paljoa suomalaista tutkimustietoa. Toisaalta tämä myös omalta osaltaan lisää aiheen kiinnostavuutta, sillä aihe on tällä hetkellä hyvin ajankohtainen rakennustekniikan tulevaisuutta ajatellen. Algoritmiavusteisen suunnittelun uskotaan olevan tulevaisuudessa olennaisesti osana rakennesuunnittelua sen tarjoamien mahdollisuuksien ansiosta.

Työn toisessa luvussa esitellään lyhyesti algoritmiavusteinen rakennesuunnittelu ja perehdytään eri ohjelmistojen hyödyntämismahdollisuuksiin algoritmien rinnalla. Kolmannessa luvussa tutustutaan algoritmiavusteisen suunnittelun vahvuuksiin ja heikkouksiin. Neljännessä luvussa tarkastellaan algoritmisuuden vaikutuksia koko projektin aikana eri osapuolien ja aikataulutuksen kannalta sekä algoritmien avaamia mahdollisia tulevaisuudennäkymiä. Lopuksi neljännessä luvussa tehdään johtopäätökset ja esitellään työn aikana esiin nousseita jatkotutkimusaiheita.



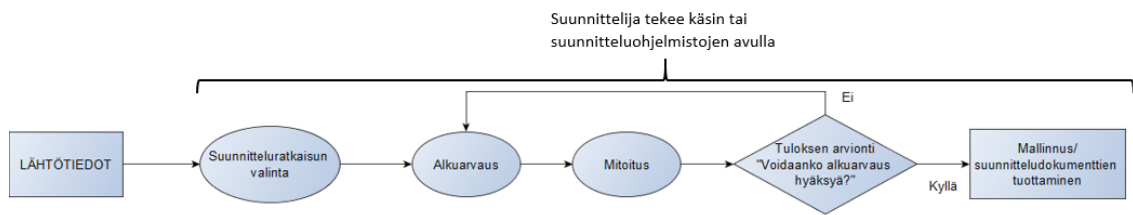
## 2. ALGORITMIAVUSTEISEN SUUNNITTELUN PERUSTEET

### 2.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu

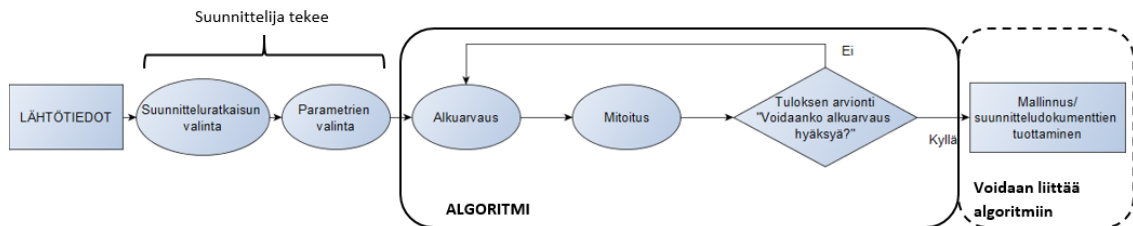
Algoritmiavusteisessa suunnittelussa ei ole suomen kielessä vielä vakiintuneita termejä käytössä. Tässä työssä algoritmiavusteisella rakennesuunnittelulla tarkoitetaan sitä, kun suunnittelija hyödyntää rakennesuunnitelmissaan luomaansa algoritmia. Rakennesuunnitelma voi olla tehty joko täysin algoritmipohjaisesti tai se voi olla yhdistelmä algoritmeja ja perinteistä suunnittelua. Perinteisellä suunnittelulla puolestaan tarkoitetaan tietomallintavaa (BIM) suunnittelua, joka on tällä hetkellä yleisimmin käytössä oleva suunnittelumenetelmä suomalaisessa rakennesuunnittelussa. Algoritmiavusteisesta suunnittelusta käytetään myös termiä parametrinen suunnittelu. Algoritmi on komentosarja, jonka läpikäymällä ohjelma suorittaa halutun tehtävän esimerkiksi valitsee sopivan rakenneratkaisun, generoi halutunlaisen rakenneosan esimerkiksi Tekla Structures -tietomallinnusohjelmaan (Tekla) tai siirtää suunnitelman elementtimenetelmää (FEM) hyödyntävään lujuuslaskentaohjelmaan.

Lalla (2017, s. 31) havainnollistaa perinteisen ja algoritmiavusteisen (parametrisen) suunnittelun eroa diplomityössään kuvan 1 mukaisesti. Molemmat prosessit perustuvat joko arkkitehdilta, tilaajalta tai molemmilta saatuihin lähtötietoihin. Aluksi suunnittelija valitsee molemmissa menetelmissä suunnitteluratkaisun, minkä jälkeen algoritmiavusteisessa suunnittelussa suunnittelija valitsee tarvittavat parametrit suunnitelmaan. Alkuarvauksen teko, mitoitus ja tuloksen arviointi tehdään automaattisesti luodun algoritmin avulla. Algoritmista on mahdollista tehdä linkki mallinnusohjelmaan, jolloin myös mallinnus automatisoituu algoritmille. Perinteisessä prosessissa puolestaan suunnittelija esittää itse alkuarvauksen, mitoittaa rakenteen ja analysoi tuloksen sekä tarvittaessa muuttaa alkuarvausta. Tämän tehtyään suunnittelija vielä tavallisesti mallintaa käsin rakenteet suunnitteludokumenttien tuottamista varten. (Lalla 2017, s. 31–32)

### Perinteinen suunnittelumenetelmä



### Parametrinen suunnittelumenetelmä



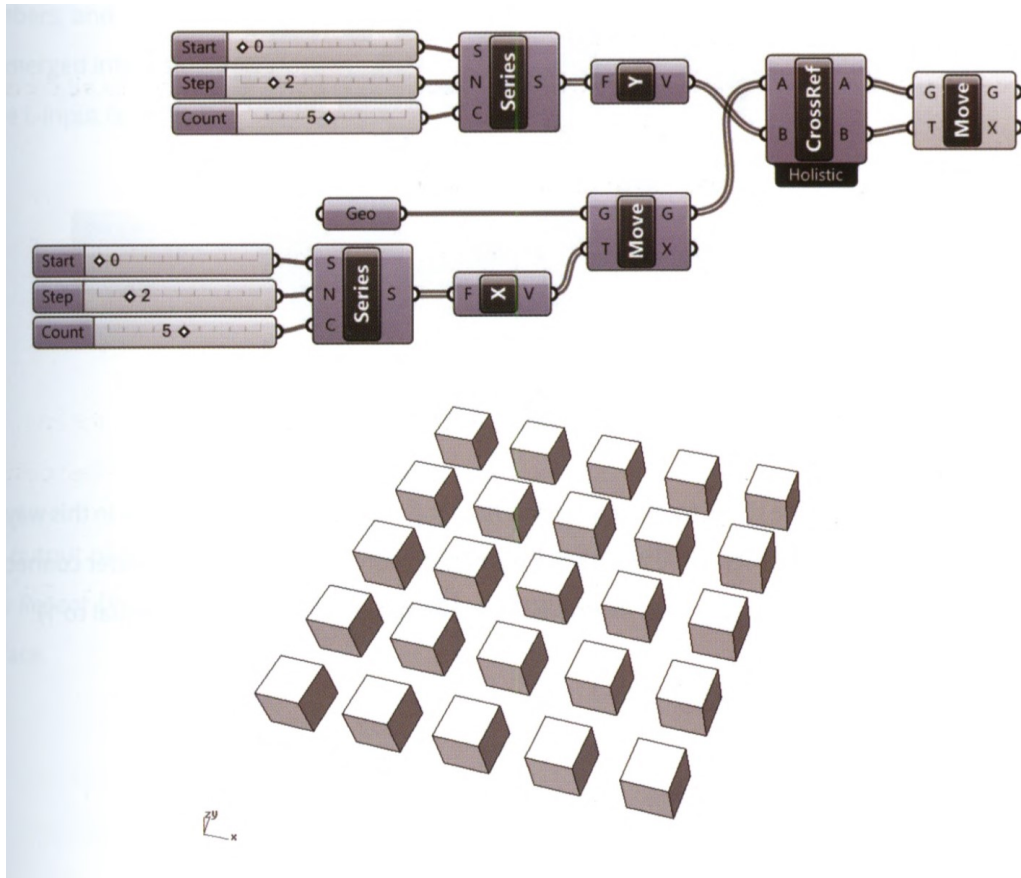
**Kuva 1.** Perinteinen ja algoritmiavusteinen suunnitteluprosessi (Lalla 2017, s. 31).

Keskeisenä erona perinteisen ja algoritmiavusteisen suunnittelumenetelmän välillä on suorittavien töiden, kuten mitoituksen ja mallinnuksen, määrä. Algoritmiavusteisessa suunnittelussa toisteiset ja rutiinomaiset työt automatisoidaan suunnittelijalta algoritmille. Perinteisessä suunnittelussa taas suunnittelun eri vaiheet tehdään manuaalisesti, mikä ei ole aina kaikkein tehokkain ja motivoivin toimintatapa. Algoritmiavusteinen suunnittelu vaatii kuitenkin suunnittelijalta algoritmin luomisen, jotta tarvittavat toiminnot pystytään suorittamaan.

Rakennesuunnittelussa algoritmi luodaan usein visuaalisesti ohjelmoimalla, vaikka se voitaisiin tehdä myös perinteistä tekstimuotoista koodia kirjoittamalla. Visuaalisessa ohjelmoinnissa suunnittelija yhdistelee sopivaa ohjelmistoa hyödyntäen valmiita visuaalisia komponentteja keskenään algoritmiksi. Visuaalisen ohjelmoinnin etuna on, että sitä käytettäessä suunnittelija ei tarvitse rakennusosalalla tällä hetkellä harvinaista ohjelmointitaitoa. Toki ohjelmoimisen ajattelutavasta on paljon hyötyä.

Grasshopper on yksi käytetyimmistä visuaalisen ohjelmoinnin alustoista suunnittelutyössä Revitin Dynamon ohella. Grasshopper on lisäosa Rhinoceros 3D -mallinnusohjelmaan (Rhino). Kuvassa 2 on Grasshopper:lla ohjelmoitu yksinkertainen algoritmi, jonka avulla saadaan luotua 5 x 5-ruudukko kuutioista. Visuaalisesti ohjelmoitu algoritmi koostuu siis visuaalisista komponenteista, jotka ottavat dataa sisäänsä, prosessoivat dataa halutulla tavalla ja syöttävät muokattua dataa seuraavalle komponentille. Lisäksi algoritmissa on linkkejä komponenttien välillä ja parametreja, jotka saavat arvoja joko käyttäjältä tai luotujen sääntöjen mukaan. Algoritmin data pystyy kulkemaan komponenttien välillä vain suunnittelijan luomia yhteyksiä pitkin. Visuaalinen ohjelmointi ei täysin vastaa perinteistä tekstimuotoista ohjelmointia, sillä esimerkiksi Grasshopper:lla silmukoita ei pystytä muodostamaan ilman erityistä komponenttia (Tedeschi 2014, s. 59). Grasshopper:ssa visuaaliseen algoritmiin voi yhdistää kuitenkin perinteistä, esimerkiksi Pythonilla

kirjoitettua, koodia, jolloin saadaan lisättyä myös tekstimuotoisen koodin tarjoamia ominaisuuksia suunnitelmiin.



**Kuva 2.** Visuaalisesti ohjelmoimalla luotu ruudukko (Tedeschi 2014, s. 93).

Kuvan 2 esimerkissä parametreilla voidaan määrittää, missä ensimmäinen kuutio on, kuinka kaukana edellinen kuutio on seuraavasta ja kuinka monta kuutiota rivillä tai sarakkeessa on. Samalla algoritmilla erilaisten ruudukkojen tekeminen on todella nopeaa, sillä käyttäjän tarvitsee vain muuttaa haluamiaan parametreja.

## 2.2 Esimerkkejä ohjelmistojen hyödyntämisestä algoritmeissa

Tässä työssä algoritmiavusteisuuden ohjelmistollisia hyötyjä käsitellään pääosin esimerkinomaisesti kuvaamalla Grasshopper:n hyödyntämismahdollisuuksia. Grasshopper:n ja Dynamon Revitin lisäksi rakennesuunnittelun visuaalisen ohjelmoinnin alustoja tarjoaa muun muassa Vectorworks, Bentley ja Allplan.

Algoritmilla on mahdollista ohjailta useita eri malleja, sillä samasta algoritmista saadaan tehtyä linkkejä erilaisiin perinteisiin suunnitteluohjelmiin. Linkit luodaan ohjelmointialustalla komponenteilla ja niiden kautta saadaan siirrettyä dataa algoritmista linkitettyyn ohjelmaan ja takaisin. Samoin kaikki ohjelmat, jotka voidaan linkittää algoritmiin,

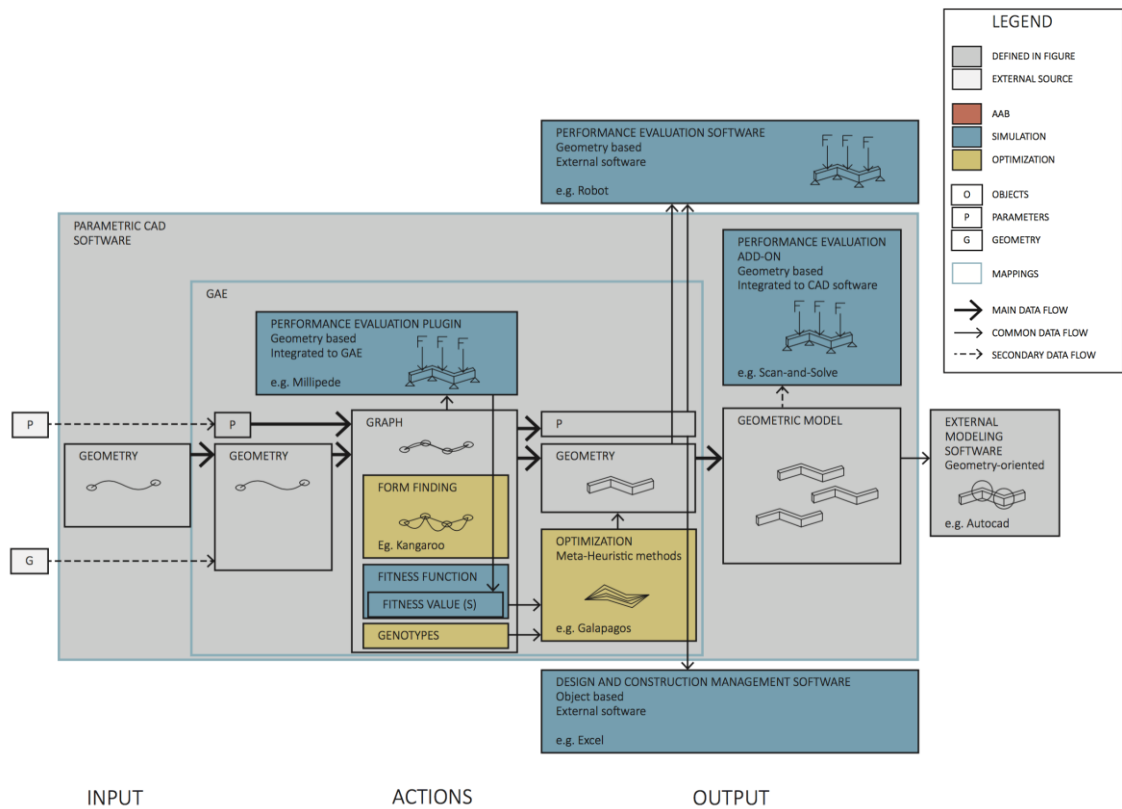
voidaan linkittää myös keskenään (Karjalainen 2018, s. 82). Karjalainen (2018) suunnittelei diplomityössään teräsrakanteisen hallin geometrisesti haastavat kattoristikot algoritmiaivusteisesti. Kuvitteellisen suunnittelukohteen katto on kaareva ja se on jaettu pitkittäisiin ja poikittäisiin osiin suorilla sauvoilla. Karjalainen muodosti linkit Grasshopper-ohjelmiston sekä Tekla-, RFEM-, Mathcad- ja Excel-ohjelmistojen välille ja välttyi näin riskialttiilta ja hitaalta manuaaliselta tiedonsiirrolta. Linkittäminen parantaa suunnittelijoiden välistä yhteistyötä ja vähentää päällekkäistä mallintamista. (Karjalainen 2018, s. 56, 82)

Algoritmillä luotu malli saadaan siirrettyä linkeillä mallinnusohjelmiin. Nämä kaksisuuntaiset linkit mahdollistavat rakenteiden monipuoliset analyysit. Analyysiohjelmasta saadun tuloksen perusteella algoritmi voi esittää laskelmille ja uusille analyyseille entistä parempia alkuarvauksia, jotka johtavat toimivaan suunnitteluratkaisuun. Yhdestä algoritmista mallista tuotettujen mallien käsitteleminen on yksinkertaisempaa tietomallintamiseen verrattuna, koska algoritmiin tehty muutos muuttaa kaikkien linkitettyjen ohjelmien malleja. (Tanska & Österlund 2014, s. 56)

Erkkilä (2017) suunnittelei diplomityössään algoritmien avulla betonisen väliseinäelementin ja hyödynsi SimpleBim-ohjelmistoa erotellessaan arkkitehdin IFC-mallista halutun väliseinän erilliseen IFC-tiedostoon. IFC-tiedoston siirtäminen algoritmiaivusteisen suunnittelun ohjelmistoon vaatii oman ohjelmansa, Erkkilä käytti ohjelmana Geometry Gymiä. Geometrioiden oikeellisuutta Erkkilä tarkasteli Rhinolla ja Solibri Model Checkerillä (Solibri). (Erkkilä 2017, s. 49–50, 59) Erkkilän mukaan algoritmiaivusteinen mallintaminen sujui hyvin, mutta detaljoinnissa ja kuvantuotannossa oli haasteita. Tutkimuksessa luotu elementtisuunnitteluprosessi ei kuitenkaan ole vielä täysin hyödynnettävissä, mutta havaittujen virheiden ja puutteiden korjaamisen jälkeen se olisi mahdollisesti elementtisuunnittelua tehostava prosessi. (Erkkilä 2017, s. 85–86)

Algoritmiaivusteinen suunnittelu mahdollistaa siis jo nykyään huomattavasti manuaalisesti tehtävän tiedonsiirron vähentämistä ja samalla koko suunnitteluprosessin tehostamista. Automatisoitu tiedonsiirto vähentää myös suunnitelmien välisiä ristiriitaisuuksia, kun suunnitelmiin ja laskelmiin tehdyt muokkaukset siirtyvät suoraan linkitettyihin ohjelmiin ja kaikki tieto on samalla alustalla.

Harri Humppi (2015) kuvaa diplomityössään yksinkertaistettua algoritmiaivusteista suunnitteluprosessia kuvan 3 avulla. Kuva visualisoi hyvin, miten algoritmiin saadaan linkitettyä eri ohjelmia, joilla saadaan suunnitelmaan lisäarvoa. Eri ohjelmien linkitys ei ole itseisarvo, vaan niiden avulla voidaan automatisoida suunnittelua. Esimerkiksi yhdellä ohjelmalla voidaan optimoida rakennetta ja toisella tarkastaa rakennejärjestelmän kestävyys. Koko suunnitteluprosessi saadaan yksiselitteisesti esitettyä ja toistettua algoritmien avulla. Algoritmin yksinkertaisuus tekee suunnitelman muokkaamisesta tietomallin muokkaamista yksinkertaisempaa (Karjalainen 2018, s. 52).



**Kuva 3.** Algoritmiavusteinen suunnitteluprosessi (Humppi 2015, s. 88, 90).

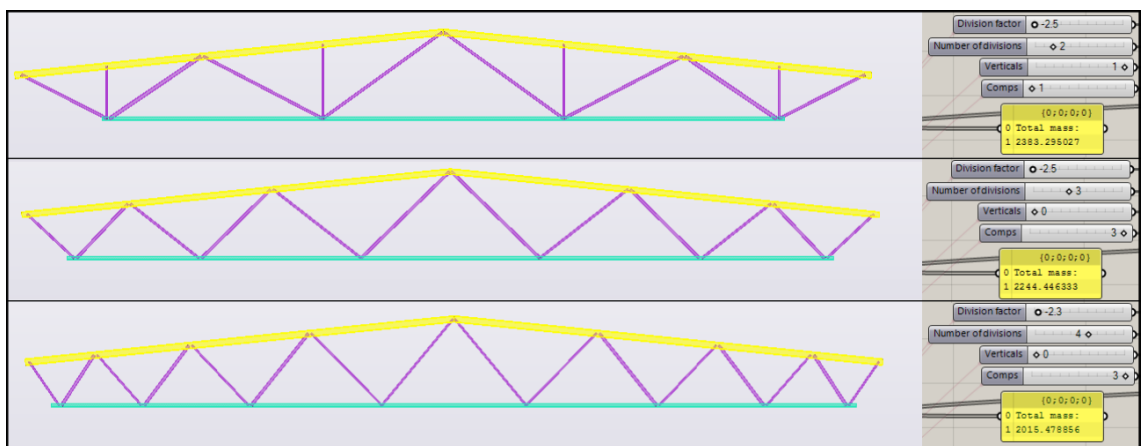
Algoritmisessa suunnitelmassa suunnittelutieto on hieman erilaisessa muodossa, kuin perinteisessä tietomallinnetussa suunnitelmassa. Algoritmisuudella saadaan tietomallintamiseen verrattuna huomattavasti pienemmät tiedostokoot, koska tieto on yksinkertaisessa muodossa (Karjalainen 2018, s. 52). Toisaalta algoritmin läpikäyminen voi vaatia tietokoneelta enemmän laskentatehoa kuin tietomallintamisessa (Karjalainen 2018, s. 82). Perinteisessä suunnitteluprosessissa tietoa siirretään usein manuaalisesti tai 2D-kuvien avulla, jolloin tiedon arvo vähenee tiedonsiirrossa ja se johtaa usein toisteiseen mallintamiseen. Algoritmiavusteisessa suunnitelmassa tiedostojen välille voidaan kuitenkin luoda kaksisuuntaisia linkkejä, joiden ansiosta suunnittelutieto ei köyhy, kun tietoja siirretään eri ohjelmien välillä.

## 3. ALGORIMIAVUSTEINEN RAKENNESUUNNITTELU

### 3.1 Suunnittelun muutosjoustavuus

Algoritmiavusteiseen suunnitteluun liittyy vahvasti suunnitelman parametrisuus. Parametrisuudella tarkoitetaan sitä, että suunnitelmaan jätetään joitain lähtötietoja käyttäjän valittavaksi ja muokattavaksi. Muokkaamalla parametreja saadaan siis eri tilanteissa erilaisia suunnitelmia samasta algoritmista hyvinkin nopeasti.

Lalla (2017) mallinsi osana diplomityötään teräsrakenteiseen halliin kantavat rakenteet algoritmiavusteisesti. Kuva 4 havainnollistaa algoritmiavusteisen suunnittelun etuja ristikkoratkaisua valittaessa. Kuvan oikeassa reunassa olevia parametreja muuttamalla saadaan muutettua ristikon topologiaa. Algoritmi muun muassa laskee kunkin ristikon poikileikkaukset nurjahduspituuden perusteella ja ristikon kokonaismassan, jolloin eri ratkaisuvaihtoehtojen vertailu massojen avulla helpottuu huomattavasti. Huomion arvoista on, että yhden ristikon algoritmin ohjelmoinnin jälkeen eri vertailukelpoisten ratkaisuvaihtoehtojen luominen onnistuu muutamissa sekunneissa vapaaksi jätettyjen parametrien avulla. Ristikoita on myös mahdollista kopioida komponenteilla, esimerkiksi hallin jokaiseen kehävälisiin. Perinteiseen suunnitteluun verrattuna tehokkuutta saadaan niin suunnitteluajassa, mallintamisessa kuin materiaalikustannuksissakin. (Lalla 2017, s. 58–59)



**Kuva 4.** Algoritmiavusteisesti mallinnetun ristikon vertailu (Lalla 2017, s. 59).

Algoritmin avulla luodut rakenneosat saadaan linkitettyä mallinnusohjelmaan suoraan algoritmista. Näin rakenneosien eri ratkaisuvaihtoehdot saadaan nopeasti visuaalisessa muodossa, jolloin tilaajalle voidaan helpommin esitellä erilaisia vaihtoehtoja ja niiden vaikutusta koko projektin kannalta. Visuaalisuus helpottaa toteutuksen vertailemista vaihtoehtojen välillä, jolloin voidaan vaikuttaa myös rakennusaikaisiin kustannuksiin. Vertailun voi tehdä käsin, kuten kuvassa 4, tai algoritmin voi ohjelmoida optimoimaan ristikon automaattisesti jonkin kriteerin, esimerkiksi massan, mukaan.

Rakenneosien vertailtavuudella voidaan saada useita erilaisia hyötyjä rakennusprojekti-kokonaisuuden kannalta. Vertailun perusteella voidaan päätyä rakenteeseen, joka poikkeaa alun perin parhaaksi oletetusta rakenneratkaisusta. Rakenteen hyöty voi olla joko pienempi materiaalmäärä, helpompi tuotettavuus, parempi visuaalinen ilme, nopeampi suunnittelu- tai toteutusaikataulu. Myös jokin muu haluttu ominaisuus voidaan saavuttaa vaihtoehtoisella rakenteella paremmin. Näistä ominaisuuksista monet vaikuttavat suoraan rakennuksen kustannuksiin. Esimerkiksi pienempi materiaalmäärä voi tarkoittaa pienempiä materiaalikustannuksia, pienempiä kuljetuskustannuksia tai nopeampaa asennusta työmaalla pienemmän massan ansiosta. Kokonaisuutena eri rakenneratkaisujen vertailtavuus tarkoittaa joustavampaa suunnitteluprosessia.

Rakennesuunnitelmien parametrisuus mahdollistaa malleihin nopeat muutokset, jos muutettava tieto on parametrisoitu. Tällöin oikeaoppisesti luodussa mallissa yhden parametrin muuttaminen muuttaa koko suunnitelman muutoksen mukaan. Samalla virheiden todennäköisyys pienenee, kun suunnittelija ei tarvitse itse yrittää muistaa muuttaa kaikkia arvoja, joihin muutos vaikuttaa. Tästä seuraa, että myöhemmässä vaiheessa projektia tehdyt muokkaukset rakennesuunnitelmaan ovat huomattavasti nopeampia ja kustannustehokkaampia kuin perinteisessä suunnittelumenetelmässä. Muokkauksen jälkeen on helppo palata alkuperäiseen suunnitelmaan, sillä algoritmista säilyy kaikki aikaisemmin luodut komponentit syötteineen ja tulosteineen (Karjalainen 2018, s. 52–53).

Suunnitelman muokattavuutta rajoittaa kuitenkin suunnitelmassa vapaaksi jätetyt parametrit. Parametrit valitaan heti suunnittelun alkupuolella ja suunnittelijan pitäisi jo silloin pystyä ennakoimaan tarvittavat muutos- ja vertailukohdat. Kaikkia lähtötietoja ei kuitenkaan kannata eikä pysty jättämään parametrisoitaviksi. Liian suuri parametrien määrä johtaa helposti suunnitelman huonoon käytettävyyteen tai tekee algoritmin liian raskaaksi toteuttaa nykyisellä laskentateholla. Liian pienellä parametrien määrällä puolestaan ei saada käyttöön kaikkea algoritmiavusteisen suunnittelun hyötyjä. Onkin suunnittelijan ammattitaitoa päättää, mitä asioita suunnitelmassa kannattaa jättää muokattavaksi. Suunnitteluprosessin myöhemmän vaiheen muutostarpeita on nykyisellä algoritmiavusteisen rakennesuunnittelun kokemuksella hankala pystyä ennakoimaan täydellisesti. Kuitenkin vain ne muutokset ovat mahdollisia, joihin on osattu varautua. Algoritmiavusteisessa rakennesuunnittelussa onkin tärkeä suunnitella jo itse suunnitteluprosessia.

## 3.2 Rakenteen lujuuslaskenta ja optimointi

Algoritmiavusteisessa suunnittelussa algoritmiin on mahdollista liittää rakenteiden optimointia. Algoritmin avulla optimointi saadaan automatisoitua osaksi mallinnusprosessia, sillä algoritmisessa mallissa rakenteiden dimensiot voidaan saada suoraan optimoinnin tuloksena. Algoritmia luodessa suunnittelija on määrittänyt rakenteelle reunaehdoja, joiden sisällä optimointi suoritetaan ja lopullinen rakenne saa mittansa optimoinnin lopputuloksesta. Toki suunnitelmissa tarvitaan aina suunnittelijan kriittinen arvio optimoinnin ja rakenteen toimivuudesta ja kohteeseen sopivuudesta, joten siinä suhteessa algoritmiin yhdistetty optimointi ei eroa perinteisestä optimoinnista. Keskeinen ero on toisteisen työn väheneminen ja suunnittelun nopeutuminen automatisoinnin kautta.

Optimoinnilla usein saavutetaan kustannuksellisia etuja rakennusprojektissa. Algoritmius mahdollistaa koko rakennejärjestelmän optimoinnin tietyn rakenteen sijasta ja tekee optimoinnista helpompaa (Karjalainen 2018, s. 47). Rakennesuunnittelu, mitoitus ja optimointi mukaan lukien, on iteratiivinen prosessi (Karjalainen 2018, s. 52–53). Algoritmien avulla tietokoneen suuri laskentateho saadaan hyödynnettyä myös lujuuslaskennassa ja optimoinnissa. Ohjelmoimalla laskentaprosessi yhden kerran algoritmiin, saadaan lasku laskettua tehokkaasti lukuisia kertoja. Edellisten tulosten perusteella algoritmi saadaan antamaan laskuille parempia ja parempia alkuarvauksia, kunnes päädytään tyydyttävään tai jopa hyvään lopputulokseen.

Optimoiminen voidaan tehdä joko suunnittelijan luoman optimointilaskennan perusteella tai valmiilla ohjelmalla. Esimerkiksi Grasshopper:ssa on optimointityökalu Galapagos rakenteiden optimointia varten. Galapagos hyödyntää evoluutioalgoritmia tai stimuloitua jäähdytystä. Optimoitaessa käyttäjä valitsee muuttuvat suunnitteluparametrit, niiden rajat ja laskettavien vaihtoehtojen määrän. Käyttäjä myös määrittää rakenteelle optimoitavan arvon, jonka avulla Galapagos pystyy päättämään, millaiseen ratkaisuun se pyrkii. Optimoitavalle arvolle määritellään, että halutaanko siitä minimi- vai maksimiarvo. Markkinoilla on myös muita optimointityökaluja Galapagoksen lisäksi. (Makris 2013, s. 49–50)

## 3.3 Haastavat geometriat

Algoritmiavusteisen rakennesuunnittelun yksi keskeisimmistä eduista on sen mahdollistama haastavien geometrioiden suunnittelu. Nykyään arkkitehtien on mahdollista suunnitella tietokoneavusteisesti hyvinkin haastavia geometrioita, joiden mallintaminen ja suunnittelu perinteisesti voi olla todella työlästä. Perinteisellä suunnittelulla esimerkiksi kahteen suuntaan kaarevan katon kattoristikoiden mallintaminen on hyvin haastavaa ja aikaavievää. Algoritmillä voidaan katon muoto mallintaa ja rakenne suunnitella melko helposti, kun katon kaarevuutta kuvaavat funktiot ovat tiedossa (Lalla 2017, s. 89).

Perinteisellä tietomallintamisella haastavien geometrioiden luonti malliin tai FEM-laskentaohjelmaan voi olla jopa mahdotonta. Esimerkiksi Tekla tukee kaarevia muotoja,



mutta niiden luoti ohjelman omalla käyttöliittymällä ei onnistu. Algoritmeilla haastavat geometriat saadaan generoitua huomattavasti vaivattomammin, jonka jälkeen ne voidaan tuoda Teklaan tai FEM-laskentaohjelmaan. (Karjalainen 2018, s. 53) Algoritmiavusteisuus tuo siis rakennesuunnitteluun uutta vapautta, kun geometriamuodot eivät ole tehokkaan suunnittelun rajoitteena. Algoritmisuuden tehokkuutta lisää, jos sekä laskentamallia että tietomallia ohjataan samalla algoritmilla.

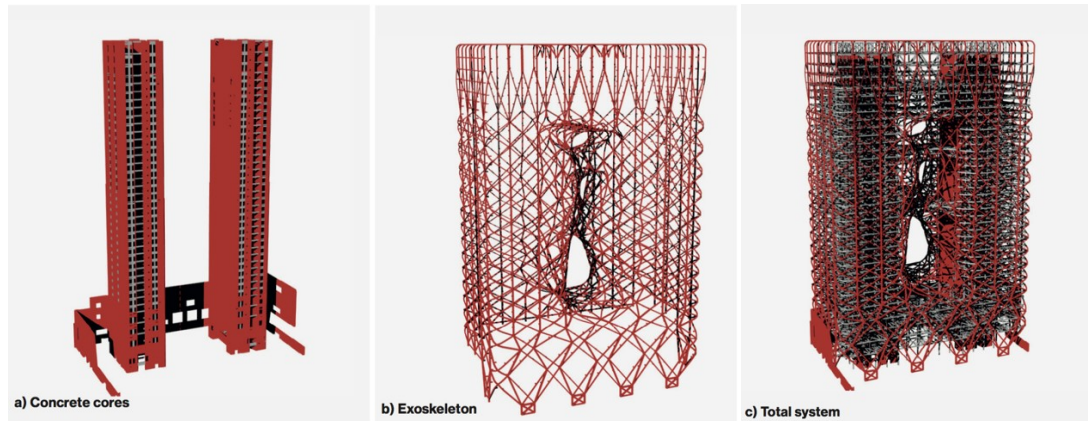
Kiinan Macauhun rakennetun kuvan 5 mukaisen City of Dreams –hotellin suunnittelu toteutettiin algoritmiavusteisesti Grasshopper:lla. Suunnittelussa Grasshopper:iin onnistuttiin linkittämään muun muassa rakenteiden suunnitteluun ja analysointiin tarkoitettua MIDAS-ohjelmisto, Robot Structural Analysis (RSA), Rhino 3D sekä Excel. Kohteessa on tähän mennessä analyttisesti ja geometrisesti ehkä haastavimpia liitoksia, mitä rakennusalalla ollaan suuressa mittakaavassa tehty. (Piermarini et al. 2016, s. 66)



**Kuva 5.** Algoritmiavusteisesti suunniteltu City of Dreams -hotelli Kiinassa (Permarini et al. 2016, s. 57)

Algoritmiavusteisesti mallintamalla päästään parempaan mallinnustarkkuuteen kuin perinteisesti tietomallintamalla (Erkkilä 2017, s. 90). Yksi keskeisimmistä syistä parempaan tarkkuuteen on, ettei algoritmiavusteisessa suunnittelussa tarvitse tehdä yksinkertaistuksia, koska tietokoneen laskentateho riittää hankalampienkin laskujen laskemiseen täsmällisesti. Perinteisessä menetelmässä ei esimerkiksi aina kannata käyttää tarkkoja kuormia laskennassa, koska laskentalausekkeet muuttuisivat liian monimutkaisiksi. Algoritmien avulla voidaan kuitenkin käyttää tarkkoja kuormia, jos ne ovat tiedossa esimerkiksi FEM laskennan tuloksena. (Karjalainen 2018, s. 82-83) City of Dreams -hotellissa on kuvan 6 mukaisesti kantavana rakenteena betoninen kaksoistorni ja ulkoinen teräsrunko, jotka toi-

mivat yhdessä. Teräskehikossa on noin 2500 liitosta, joista 400 on uniikkeja. Algoritmiuus mahdollisti suuren datamäärän käsittelemisen nopeasti, useat elementtimenetelmään perustuvat analyysit ja visuaalisen tarkistamisen virheiden poistamiseksi. Näin suunnittelijoiden oli mahdollista paneutua suunnittelun laatuun datan käsittelemisen sijaan. Perinteiset suunnitteluohjelmat eivät olisi olleet riittäviä näin haastavaan suunnitteluun. (Piermarini et al. 2016, s. 58–61)

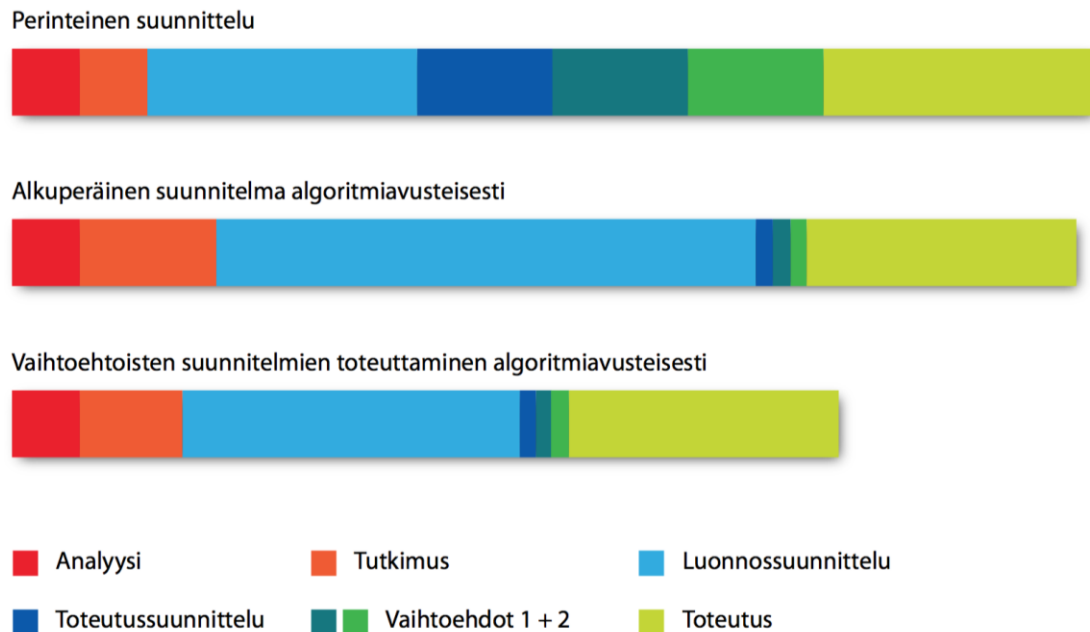


*Kuva 6. City of Dreams -hotellin kantavat rakenteet (Piermarini et al. 2016, s. 58)*

### 3.4 Uudelleenhyödynnettävyys

Lähtökohtaisesti suunnittelualgoritmin luominen on hitaampaa kuin perinteinen tietomallintaminen samoin kuin tietomallintaminen on CAD-piirtämistä hitaampaa kasvaneen suunnittelutiedon määrän ja laadun takia (Lassila 2016, s.39). Algoritmeista voidaan saada kuitenkin niin paljon muuta hyötyä, että sitä kannattaa hyödyntää rakennesuunnittelussa. Esimerkiksi rakenteiden vertailtavuus tai optimointi voivat laskea kokonaiskustannukset perinteistä rakennesuunnittelua matalammalle tasolle. Oleellista on tietää, milloin kohteissa algoritmiavusteista suunnittelua kannattaa käyttää.

Kuvassa 7 on havainnollistettu perinteisen ja algoritmiavusteisen suunnittelun eroja aikataulullisesti. Kuvaajasta nähdään, että analyysissä ja toteutuksessa ei menetelmien välillä ole eroa. Suurin ero on algoritmiavusteisen suunnittelun pidemmässä luonnossuunnitteluajassa ja perinteisen suunnittelun aikaa vievissä vaihtoehtoisissa suunnitelmissa. Vaihtoehtot mukaan luettuina algoritmiavusteinen suunnittelu on kokonaisuudessaan nopeampi suunnitteluvaihtoehto.



**Kuva 7.** Suunnitteluprosessien kestot (Hauschild & Karze 2011, Tanska & Österlund 2014, s. 24 mukaan).

Algoritmiavusteinen suunnittelu on erilainen tapa ajatella verrattuna perinteiseen suunnitteluun. Perinteisessä suunnittelussa pääpaino on lopputuotteessa, mutta algoritmiavusteisessa suunnittelussa suunnitteluprosessissa. (Tanska & Österlund, s. 37) Viisaasti suunniteltua algoritmia voidaan hyödyntää todella tehokkaasti. Jos tietystä rakenteesta halutaan vain tuottaa piirustukset algoritmiavusteisesti niin, että laskenta, optimointi ja analyysit tehdään edelleen perinteisin menetelmin, ei lopputulos todennäköisesti ole kovin tehokas. Jos suunnitelmasta kuitenkin halutaan tuottaa eri vaihtoehtoja ja tämä pidetään suunnittelussa mielessä, on algoritmiavusteisuus tehokas suunnittelutapa vaihtoehtojen tuottamiseen. Samoin modulaarisesti tuotetun algoritmin uudelleenhyödynnettävyyssaste toisessa projektissa voi olla korkea.

Modulaarisuudella tarkoitetaan algoritmin jakamista pienempiin osiin, moduuleihin, joista jokainen suorittaa jonkin pienemmän tehtävän osana algoritmia. Moduulien hyöty perustuu siihen, että moduulia käytettäessä sen sisäistä toimintaa tarvitsee ymmärtää samaan tapaan kuin laskentapohjia käytettäessä. Riittää siis kun antaa moduulille oikeat lähtöarvot ja tietää, miten moduuli käsittelee saamaansa dataa. Oikein luotu moduuli osaa itsessään reagoida kaikkiin vastaantuleviin virhetilanteisiin. Tämä mahdollistaa myös muiden luomien algoritmien tehokkaan hyödyntämisen, sillä usein algoritmin toiminnan ymmärtäminen on melko haastavaa ja aikaa vievää. Toki suunnittelijan tulee ymmärtää tulosten järkevyyttä ja tilanteet, joissa moduuleita ei tule käyttää. Modulaarinen suunnittelu vie aikaa suunnittelijalta, mutta algoritmista saadun hyödyn ja algoritmin ymmärrettävyyden kannalta se on todennäköisesti ainoa järkevä tapa tuottaa algoritmista rakennesuunnitelmaa.

Uudessa projektissa valmiiksi luotujen algoritmien uudelleenhyödynnettävyys nopeuttaa rakennesuunnittelua huomattavasti. Optimitilanteessa suunnittelijan tarvitsisi vain yhdistellä valmiit moduulit keskenään ja antaa moduuleille halutut lähtöarvot suunnitelman luomiseksi. Käytännössä tämä ei todennäköisesti ole täysin mahdollista, sillä projektien vaatimukset vaihtelevat suuresti ja kaikki variaatiot huomioivan algoritmin luominen olisi todella työlästä. Todellisuudessa algoritmiavusteisessa rakennesuunnittelussa voidaan kuitenkin hyödyntää joko kokonaan tai pienin muutoksin modulaarisesti toteutettuja ominaisuuksia osina suunnittelijan luomaa algoritmia.

Algoritmien luominen on tavallisesti melko virhealtista ja virheiden löytäminen usein hidasta. Modulaarisuuden ansiosta virhealttius kuitenkin pienenee ja virheiden etsintä helpottuu. Moduulin on tarkoitus olla itsenäinen pätkä algoritmia, joten algoritmin toiminnan voi testata moduuli kerrallaan. Tällöin virhetilanteessa virhettä joudutaan etsimään paljon pienemmästä algoritmipätkästä, kuin koko algoritmia kerralla testattaessa. Samoin algoritmiin tehtävien muutoksien ohjelmalliset vaikutukset pysyvät tavallisesti moduulin sisällä. Tällöin algoritmin muokkaaminen helpottuu, sillä jälleen moduuli voidaan erikseen testata virheiden löytämiseksi.

### 3.5 Haasteet

Tällä hetkellä yksi algoritmiavusteisen suunnittelun suurimmista haasteista Suomessa on tietotaidon puute. Monet suunnittelijat osaavat suunnitella rakennuksia määräysten mukaan, mutta ohjelmointikokemus on puutteellista. Vaikka algoritmiavusteinen suunnittelu onnistuu usein ilman ohjelmointitaitoa visuaalisen ohjelmoinnin ansiosta, ei visuaalisessa ohjelmoinnissa ole kaikkia tekstimuotoisen ohjelmoinnin ominaisuuksia. Ohjelmoimisen tuntemus myös helpottaa hyvän algoritmin luomista, sillä esimerkiksi modulaarisuus ja riittävä algoritmin kommentointi ovat tärkeitä algoritmin ymmärrettävyyden ja myöhemmän tehokkaan hyödyntämisen kannalta.

Perinteiseen suunnitteluprosessiin tottuneiden suunnittelijoiden voi olla vaikea muuttaa toimintatapojaan algoritmiavusteiseen suunnitteluun sopiviksi. Perinteinen suunnittelu poikkeaa oleellisesti ajankäytöltään suhteessa algoritmiavusteiseen suunnitteluun kuvan 7 mukaisesti. Tehokas algoritmiavusteisen rakennesuunnittelun hyödyntäminen edellyttäisi muutoksia myös suunnitteluprosessissa ja ajattelutavassa. Uuden, tehokkaamman toimintamallin ja suunnitteluohjeiden luomiseen tarvitaan paljon kokemusta, kokeilua ja työtä eri suunnittelun osapuolilta. Toisaalta suunnitteluprosessin uudistaminen voi olla mahdollisuus tehostaa rakennesuunnittelua osana koko rakennusprojektia.

Nykyisellä algoritmiavusteisen suunnittelun kokemuksella ja kustannustiedolla on vielä haastavaa tietää etukäteen, milloin algoritmiavusteinen suunnittelu on todennäköisesti perinteistä suunnittelua kannattavampaa (Lalla 2017, s. 94). Kannattavuuteen vaikuttaa muun muassa volyyymi, tarvittavien analyysien määrä, rakenteiden geometriat, suunnittelijoiden kokemus ja suunnittelun aikaiset muutostarpeet. Projektin alussa voi olla myös

ongelmallista päättää, mitkä asiat suunnitelmassa kannattaa parametrisoida ja mitkä osat suunnitelmasta tulisi tuottaa algoritmiavusteisesti ja mitkä perinteisellä suunnittelulla. Näidenkin ongelmien ratkaisemiseksi tarvittaisiin lisää kokemusta.

Nykypäivän tietotekniikan suuri laskentateho mahdollistaa monien asioiden tietoteknisen kehittämisen. Rakennesuunnittelussa ohjelmistot eivät vielä ole täysin toimivia, vaan niiden käytössä rakennesuunnittelussa esiintyy vielä puutteita. Esimerkiksi eri keskenään linkitettyjen ohjelmistojen välinen tiedonsiirto on toisinaan haastavaa saada toimimaan toivotulla tavalla (Karjalainen 2018, s. 83). Erityisesti epähomogeeniset rakenteiden, kuten teräsbetonin, suunnittelu ja siirto toiseen ohjelmaan voi olla suurten parametrien määrän takia haastavaa (Lalla 2017, s. 89, 92). Samoin kuvantuotanto saattaa olla paljon yksinkertaisempi tehdä esimerkiksi Teklan valmiilla kuvantuotannolla, vaikka se onnistuu-kin myös algoritmiavusteisesti (Erkkilä 2017, s. 54–75).

Karjalainen (2018) havaitsi diplomityönsä aikana, että algoritmin generoimisessa Teklaan pitää olla varovainen. Jos Teklaan generoitu tietomalli ensin tallennetaan ja sen jälkeen tehdään algoritmiin muutoksia, johtaa muutokset rakenteiden uudelleengenerointiin tietomallissa. Tämä johtaa siihen, että rakenteet on mallinnettu kaksinkertaisina. Tämän voi välttää tekemällä aina Tekla-mallit uuteen tiedostoon tai poistamalla vanhasta tiedostosta ensin vanhat rakenneosat ja vasta sen jälkeen generoidaan korjattu rakenne uudelleen malliin. (Karjalainen 2018, s. 84)

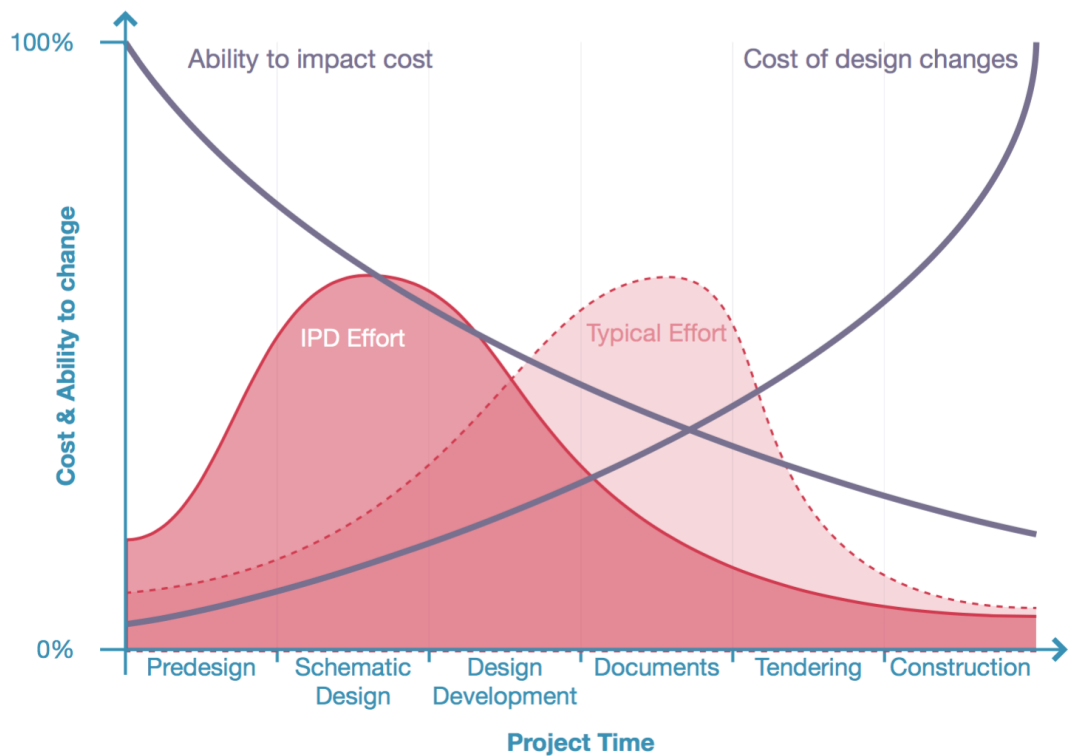
Uusi toimintatapa tuo mukanaan myös kysymykset tietoturvasta ja luodun algoritmin tekijänoikeuksista (Karjalainen 2018, s. 54). Algoritmiavusteisen rakennesuunnittelun myötä modulaarisesti toimivat suunnitteluratkaisut lisääntyvät, mutta toisen suunnittelijan luoman moduulin hyödyntämisestä tulisi sopia erikseen.

Erkkilä tutki diplomityössään algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntämismahdollisuuksia betonielementtisuunnittelussa. Hän suunnitteli pääosin onnistuneesti betonisen väliseinäelementin algoritmiavusteisesti. Tutkimuksen aikana ilmeni, että elementtijaon voi tehdä ainakin osittain algoritmiavusteisesti. Elementtijaon suunnitteluun vaikuttaa kuitenkin niin monet kustannukselliset, esteettiset ja rakenteelliset seikat, että luotettavan elementtijakosuunnitelman teko osoittautui hyvin haastavaksi. (Erkkilä 2017, s. 66–67)

## 4. ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELUPROSESSI

### 4.1 Päätöksenteko suunnittelussa

Suunnittelijalla on projektin alun päätöksillä kaikkein suurin mahdollisuus vaikuttaa rakennusprojektin hintaan ja tämä vaikuttamisen mahdollisuus vähenee koko ajan suunnitelmien edetessä. Samaan aikaan kun vaikuttamisen mahdollisuus pienenee, muutosten hinta nousee. Tätä havainnollistetaan kuvassa 8.



**Kuva 8.** MacLeamyn-kuvaaja (Davis 2013, s. 33).

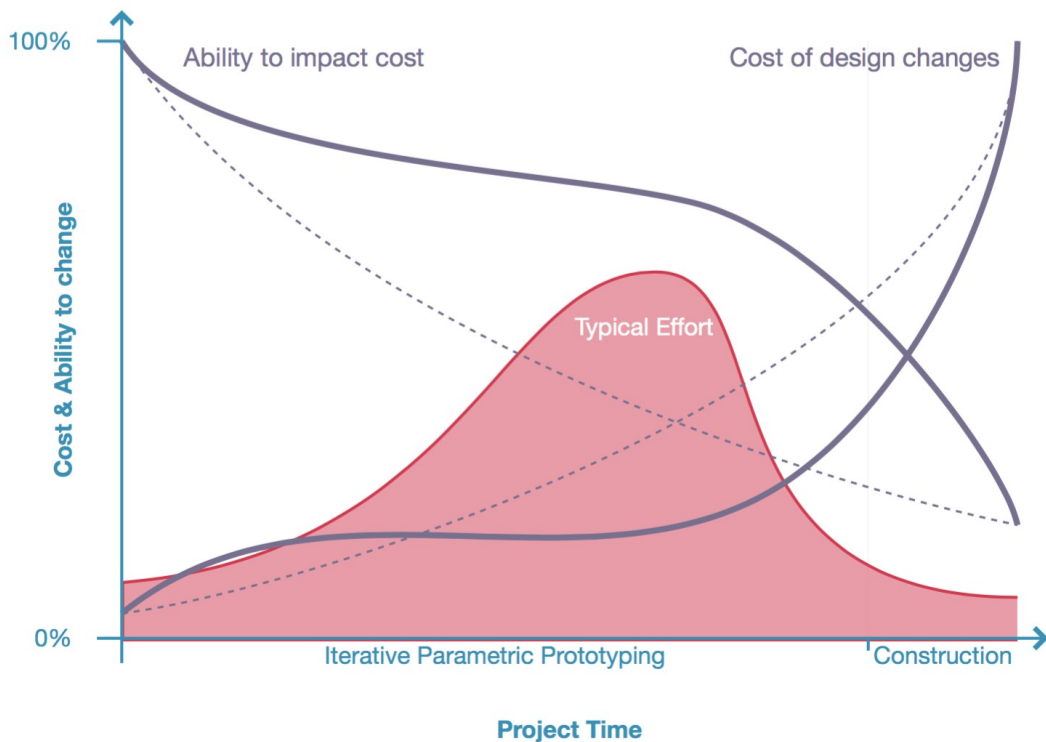
Kuvan 8 kuvaajaa kutsutaan MacLeamy-kuvaajaksi ja se havainnollistaa suunnittelumuutosten kustannuksien suhdetta mahdollisuuteen vaikuttaa muutoksilla kustannuksiin. Tästä voi päätellä, että mitä aikaisemmin tehdään päätöksiä suunnitteluratkaisuista, sitä halvempaa se on projektin kannalta. IPD effort kuvaa prosessia, jossa suunnitteluratkaisuja kannustetaan tekemään projektin aikaisessa vaiheessa. Kuitenkin suunnitteluratkaisujen pitäisi perustua tietoon siitä, miten ratkaisut vaikuttavat projektin hintaan. Davis

(2013) esittää väitöskirjassaan ongelman MacLeamy-kuvaajaan toteutuksessa. Aikaisessa vaiheessa tehdyt päätökset voivat aiheuttaa ongelmia myöhemmin projektin aikana, kun tieto päätösten vaikutuksista lisääntyy. Myöhemmässä vaiheessa suunnitelmien muokkaaminen taas on todella kallista. (Davis 2013, s. 34–35)

Perinteisesti tilaaja haluaa pyrkiä mahdollisimman alhaisiin suunnittelukustannuksiin. Davisin esittämän paradoksin mukaan suunnittelun siirtäminen aikaisempaan vaiheeseen projektia ei kuitenkaan ratkaise kalliiden muutoksien ongelmaa. Oikeaoppisesti tehdyn algoritmiavusteisen rakennesuunnitelman yhtenä suurena hyötynä on mahdollisuus vaikuttaa kustannusten määräytymiseen, päätöksenteon ajankohtaan ja muutosten kustannusvaikutuksiin (Erkkilä 2017, s. 54).

Väitöskirjassaan Davis (2013) esittää tutkimustensa perusteella kuvan 9 mukaisen muunnellun MacLeamy-kuvaajan. Siinä kuvataan mahdollisuutta vaikuttaa kustannuksiin projektin aikana ja muutoksesta aiheutuvia kustannuksia, kun käytetään algoritmiavusteista suunnittelua. Keskeisenä erona MacLamey-kuvaajaan on, että siinä mahdollisuus vaikuttaa kustannuksiin pysyy suurena hyvin pitkään suunnittelun aikana. Vastaavasti suunnitelmiin tehtävien muutosten kustannusvaikutukset pysyvät alhaisina huomattavasti pidempään, kuin perinteisellä suunnittelutavalla.





**Kuva 9.** Muunneltu MacLamey-kuvaaja muutosten kustannusvaikutuksista ja mahdollisuudesta vaikuttaa projektin kustannuksiin algoritmiavusteisella suunnittelulla (Davis 2013, s. 208).

Toisin kuin alkuperäisestä MacLamey-kuvaajasta nähdään, päätöksenteko kannattaisi Davisin mukaan siirtää myöhemmäksi vaiheeksi projektia. Hänen mukaansa päätökset olisi kustannustehokasta tehdä vasta silloin, kun suunnittelujoilla on tieto siitä, miten ratkaisu vaikuttaa rakenteisiin, tuotantoon, kustannuksiin ja aikatauluun. Algoritmiavusteista suunnittelua hyödyntämällä suunnittelijat pystyvät näkemään ratkaisujen vaikutukset ennen kuin joutuvat tekemään päätökset. (Davis 2013, s. 205) Näin myöhemmän vaiheen kalliita kustannuksia pystytään vähentämään.

## 4.2 Algoritmiavusteisen suunnittelun vaikutus projektin muihin osapuoliin

Tyypillisesti rakennushankkeissa on kireät aikataulut. Lassilan (2016) mukaan hyvä aikataulutusta koetaan kuitenkin tärkeäksi osaksi onnistunutta suunnittelua. Usein suunnittelijoiden välinen ymmärrys toisen suunnittelijan lähtötietovaatimuksista ja eri suunnitelmien keskinäisistä riippuvuuksista on kuitenkin puutteellista. Tähän osasyynä on eri suunnittelualojen samanaikaiset aikataulut, vaikka suunnittelija tarvitsisi toiselta suunnittelijalta lähtötiedot omiin suunnitelmiinsa. Puutteet kommunikoinnissa ja suunnittelunohjauksessa aiheuttavat osaltaan suunnittelun aikataulujen viivästyistä, kun kaikkea potentiaalia suunnitteluprosessista ei saada käyttöön. (Lassila 2016, s. 46-48)

Algoritmiavusteinen suunnittelu tarjoaa mahdollisuuden parantaa eri suunnittelualojen välistä kommunikointia. Jos saman projektin eri suunnittelijat voisivat työskennellä samassa mallissa, vähentyisivät muun muassa päällekkäinen mallintaminen ja vanhentuneen suunnittelutiedon hyödyntäminen. Algoritmisuus mahdollistaa mallien reaaliaikaisen päivittymisen, jolloin eri suunnittelualoilla olisi aina uusin tieto saatavilla. Nykyisin esimerkiksi Grasshopper:lla on useamman suunnittelijan mahdollista työskennellä samassa mallissa tiedostojen välisen linkityksen ansiosta (Karjalainen 2018, s.67).

Nykyisin monet suunnittelualat suunnittelevat samassa projektissa, mutta tavoittelevat lähinnä omaa etuaan vähentäen samalla projektin tuottavuutta (Karjalainen 2018, s. 27). Algoritmiavusteinen suunnittelu uutena ajattelumallina ja suunnitteluprosessina antaa mahdollisuuden muuttaa tätä toimintatapaa omasta hyödyistä projektin hyötyyn samaan tapaan kuin allianssihankeissa. Kuitenkaan mitkään työkalut eivät tätä tee, ellei suunnittelijoilla itsellään ole pyrkimystä tehdä suunnitelmiaan koko projektia hyödyntävästi.

#### **4.2.1 Arkkitehtiyhteistyö**

Rakennesuunnittelu on perinteisesti ollut vahvasti sidoksissa arkkitehtisuunnitteluun. Perinteisessä suunnitteluprosessissa rakennesuunnittelija lähtee toteuttamaan omia suunnitelmiaan käyttäen lähtötietoina arkkitehdilta saamiaan suunnitelmia. Tämä johtaa usein saman asian mallintamiseen useampaan kertaan.

Algoritmiavusteisella suunnittelulla rakennesuunnittelijan olisi mahdollista hyödyntää suoraan arkkitehdin luomia geometrioita, mikäli arkkitehti ja rakennesuunnittelija ovat sopineet käyttävänsä yhteistä tiedostomuotoa. Yhteisessä mallissa työskenteleminen mahdollistaisi rakennesuunnittelijan tietotaidon hyödyntämisen jo heti projektin alusta lähtien. Nykyään arkkitehti suunnittelee projektin alussa rakennusta tavallisesti itsenäisesti ja rakennesuunnittelija tulee mukaan suunnitteluun vasta myöhemmässä vaiheessa suunnitteluprosessia. Tämä johtaa usein siihen, että rakennesuunnittelija ei optimoi arkkitehtisuunnitelmia käytännössä ollenkaan (Karjalainen 2018, s. 47–48).

Algoritmisessa suunnitteluprosessissa arkkitehti voisi luoda rakenteiden geometriat, joihin rakennesuunnittelija lisäisi omat reunaehdonsa. Näin arkkitehti näkisi jo suunnittelun aikana valintojen rakennetekniset vaikutukset. Algoritmiin menetelmiin perustuvat suunnitteluratkaisut parantaisivat kustannusvaikutuksien seuraamista ja rakenteiden optimoitavuutta (Karjalainen 2018, s. 47). Samalla tiivistynyt yhteistyö vähentäisi erityisesti rakennesuunnittelijan mallintamiseen käyttämää aikaa, jolloin suunnittelijan olisi mahdollista panostaa tuottavaan suunnitteluun ja asiakassuhteiden ylläpitoon. Nykyisessä globaalissa kilpailutilanteessa suomalainen rakennesuunnittelu voi kilpailla halvemman

työvoiman maiden kanssa, jos suunnittelun rutiinitöitä voidaan siirtää algoritmilta (Pirhonen). Suunnitteluajan tehostaminen näkyy projektin kokonaiskustannuksissa. Yhteinen malli kuitenkin vaatii, että arkkitehti on mallintanut kaikki geometriat luotettavasti oikein.

Arkkitehdin ja rakennesuunnittelijan yhteistyössä on erilaisia toimintatapoja. Eräs vaihtoehto on, että rakennesuunnittelija luo arkkitehdin algoritmeilla luodusta mallista oman tiedostonsa, jota lähtee muokkaamaan (Lalla 2017, s. 71). Toimintatapa vastaa tuttua perinteisen suunnittelun toimintatapaa. Tällä tavalla kuitenkin menetetään paljon algoritmiavusteisen suunnittelun hyötyjä, sillä rakennesuunnittelijan pitää tehdä omaan malliinsa samat muokkaukset, jotka arkkitehti tekee omaansa. Karjalainen (2018) totesi diplomityössään, että käyttökelpoisin tapa on tehdä tiedonsiirto pilvipohjaisesti Speckle-lisäosan avulla. Specklen avulla tieto saadaan suoraan tiedostosta toiseen ja algoritmiin tehdyt muutokset päivittyvät reaaliaikaisesti suoraan pilvipalveluun ja sieltä algoritmimalleihin. (Karjalainen 2018, s. 67) Speckle-lisäosan lisäksi Grasshopper:lla voi jakaa mitä tahansa raakaa dataa reaaliaikaisen linkin välityksellä. Linkki luodaan kirjoittamalla data Data Output -komponentilla toiseen tiedostoon, josta sen voi lukea Data Input -komponentilla eteenpäin toiseen algoritmin hyödynnettäväksi.

#### 4.2.2 Vaikutukset tilaajaan

Lähtökohtaisesti suunnittelualgorithmisen luominen voi varsinkin kokemattomalle suunnittelijalle olla hitaampaa kuin perinteinen tietomallintaminen. Siinä on kuitenkin niin paljon muita hyötyjä, että kokonaisuudessaan suunnittelu-aika voi lyhentyä, rakentaminen voi olla edullisempaa tai laatu voi olla parempaa. Tilaajan kannalta algoritmiavusteisen suunnittelemisen edut ovat juuri matalammassa kustannuksissa, jotka johtuvat lyhyemmästä suunnitteluun käytetystä kokonaisajasta, suunnitelmien muokattavuudesta, optimoinnista ja eri vaihtoehtojen tehokkaasta vertailusta. Lisäksi suunnittelun automatisoiminen parantaa suunnittelutyön tasalaatuisuutta ja aikataulussa pysymistä (Pirhonen).

Algoritmiavusteinen rakennesuunnittelu mahdollistaa tietoon perustuvien päätöksien tekemisen varhaisemmassa vaiheessa hankkeessa. Kustannuspäätöksien ymmärtäminen aikaistuu ja parantuu, joten tilaajan on helpompi sitoutua kustannuksiin (Erkkilä 2017, s. 52) Rakenteisiin voidaan linkittää myös kustannustietoja, jolloin rakenneratkaisujen analysointi helpottuu (Karjalainen 2018, s. 83). Toisaalta tilaajalle esitetyt visuaaliset rakenneratkaisut auttavat ymmärtämään ratkaisujen vaikutuksen projektin kannalta muutenkin kuin pelkkien kustannusten osalta (Lalla 2017, s. 69). Luonnossuunnitteluvaiheessa tilaaja saa samaan aikaan ja samalla rahalla paremmat vertailtavuudet, kuin perinteisellä suunnittelulla.

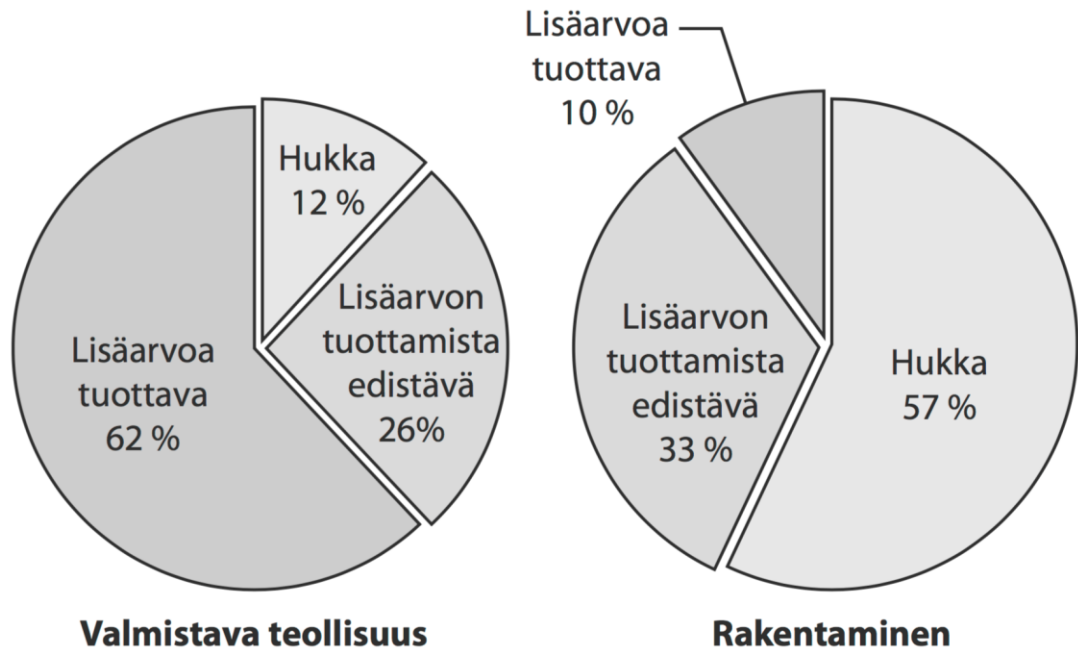
Algoritmiavusteisuus mahdollistaa arkkitehdeille ja rakennesuunnittelijoille hankala-geometristen rakenteiden suunnittelun (Tanska & Österlund 2014, s. 36) Vaikeiden rakennuskohteiden tarkemmat analyysit ja vaivaton suunnittelu tuovat tilaajankin näkökulmasta rakentamiseen uusia ulottuvuuksia, kun kohteen haastavuus ei ole enää esteenä. Tilaajan kannalta algoritmiavusteisuus tarkoittaa myös haastavien töiden parempaa tarkkuutta. Tästä esimerkkinä on todellisten kuormien tarkka laskenta yksinkertaistuksien sijaan (Karjalainen 2018, s. 83).

### 4.3 Tulevaisuus

Tulevaisuudessa algoritmiavusteisuuden voidaan olettaa mullistavan rakennesuunnittelua. Uudistumisen mahdollistaa erityisesti täysin uudentyyppinen lähestymistapa suunnitteluun ja sen myötä hyvin uudenlainen suunnitteluprosessi. Uuden suunnitteluprosessin kehittäminen vie aikaa ja toimivien ratkaisujen löytäminen vaatii erilaisten vaihtoehtojen kokeilemistä, mutta lopputulos voi olla hyvinkin tehokas verrattuna nykyiseen suunnitteluprosessiin. Erona perinteiseen suunnitteluun on myös digitaalisena säilyneen suunnitteluosaamisen hyödyntäminen myöhemmissä projekteissa muun muassa erilaisten moduulien avulla.

Tulevaisuudessa algoritmiavusteinen rakennesuunnittelu mahdollistaa rakenteiden parempilaatuisen suunnittelun. Korkeampaan laatuun sisältyy parantunut mittatarkkuus suunnittelussa, viimeisimpien suunnittelutietojen käyttö ja muokkauksien varma siirtyminen koko suunnitelmaan. Erityisesti laatua parantaa vaivattomampi koko rakennejärjestelmän kattava optimointi, päätöksien tukena oleva suurempi tiedon määrä ja suunnitelmista nopeammin tuotetut kattavat analyysit. Merkittävää on optimoinnin mahdollistaminen eri suunnittelualojen muodostamassa kokonaisuudessa niin, että saadaan kaikkia suunnittelualoja tyydyttävä optimoitu loppuratkaisu.

Tulevaisuudessakaan tietokone ei ajattele suunnittelijan puolesta, vaan tekee suunnittelijan määrittämiä töitä. Näin suunnittelijat voivat siirtää ajankäyttöään ja panostustaan toistuvasta peruslaskennasta ja mallintamisesta projektiin lisäarvoa tuottavaan suunnitteluun. Juuri lisäarvoa tuottavan työn määrässä ja tuottavuudessa on rakennusalalla paljon kehitettävää muihin teollisuudenaloihin verrattuna kuvan 10 mukaisesti. Suunnittelulla on osaltaan vaikutus hukan kokonaisuuteen. Koskenvesan (2011, s. 140) mukaan hukaksi lasketaan työ, jolla ei ole tilaajalle arvoa.



**Kuva 10.** Valmistavan teollisuuden ja rakentamisen erot lisäarvoa tuottavissa toiminnoissa (Construction Institute USA, 2004, Koskenvesa 2011, s. 140 mukaan)

Tulevaisuudessa voi syntyä palveluja tai ohjelmistoja, jolla on mahdollista suunnitella algoritmiavusteisesti vähemmän haastavia suunnittelukohteita ilman rakennesuunnittelijan panosta. Periaatteellisesti voisi olla mahdollista tuottaa esimerkiksi ohjelmisto, joka tuottaa pientalon rakenne tai -elementtipiirustukset pelkkien käyttäjän antamien geometrioiden perusteella. Geometriat, halutut materiaalit ja esimerkiksi toive tavallista paremmasta lämmöneristävyydestä voisivat olla algoritmissa parametreina ja algoritmi ohjaisi rakennuksen lujuuslaskennan, optimoinnin, kestävyystarkastelun ja dokumentoinnin automaattisesti.

Tulevaisuudessa rakenteiden tuotannon uudistumissuunta voi olla myös 3D-tulostaminen (Kerola 2016, s. 27). 3D-tulostamiseen algoritmiavusteinen suunnittelu sopisi mainiosti, koska siten saataisiin helposti tuotettua mitä erilaisempia muotoja rakenteisiin esimerkiksi tulostamalla terästä. Teräksen tulostus on kuitenkin toistaiseksi kustannustehotonta muun muassa sen vaatimista korkeista lämpötilaista johtuvien kustannusten takia (Kerola 2016, s. 26). Lisäksi kannattavuuteen vaikuttaa esimerkiksi tulostetun rakenteen kestävyys verrattuna perinteisiin menetelmiin. Euroopassa on jo 3D tulostettu yksittäisiä teräs- ja betonisilloja viime vuosina (Gustavsson, 2017; MX3D). 3D tulostuksen yleistymisen rakentamisessa näyttää kuitenkin vain tulevaisuus.

Toinen rakenteiden tuotantoa tehostamaan pyrkivä suuntaus on tuotantorobotiikka. Roboteille rakenteiden monimutkaisuus ei ole ongelma niin kuin ihmisille. Automatisoidulle rakenneosatuotannolle valmistuskustannukset ovat todennäköisesti samat, oli rakenneosa monimutkainen tai yksinkertainen, sillä robotiikka pystyy hyödyntämään digitaalisessa

muodossa olevaa tietoa hyvin tehokkaasti. Tämä tarjoaisi huimia mahdollisuuksia arkkitehtuurille. (Pirhonen)

Betonin raudoittamiselle tai nurkkien detaljoinneille on haastavaa tehdä toimiva algoritmi suunnitelmaan vaikuttavien tekijöiden suuren määrän takia. Tekoälyä suurella suunnitelludatamäärällä opettamalla voitaisiin kuitenkin saada luotettava arvaus liitoksista tai muista haastavista rakennesuunnittelun osa-alueista. Pitää kuitenkin muistaa, että algoritmi tekee täsmälleen niin kuin suunnittelija haluaa, mutta tekoälyä hyödyntävät suunnitteluratkaisut perustuvat opetusdataan. (Pirhonen)

## 5. YHTEENVETO

### 5.1 Johtopäätökset

Algoritmiavusteisella suunnittelulla on paljon hyödyntämiskohteita rakennesuunnittelussa. Sitä voidaan käyttää lähtökohtaisesti kaikessa rakennesuunnittelussa materiaalista ja kohteesta riippumatta.

Algoritmiavusteinen rakennesuunnittelu mahdollistaa useiden erilaisten analyysi- ja mallinnusohjelmien linkittämisen algoritmiseen suunnitelmaan. Kaksisuuntaisten linkkien avulla voidaan kaikkien linkitettyjen ohjelmien malleja ohjailta yhdellä algoritmisella mallilla ja analyysien tuloksia voidaan hyödyntää monipuolisesti suunnittelun eri vaiheissa. Linkittämisellä myös vältetään riskialttiilta ja työläältä manuaaliselta tiedonsiirrolta. Samalla vähenee muun muassa toisteinen mallintaminen ja eri paikoissa olevien tietojen aiheuttamat ristiriitaisuudet suunnitelmissa.

Eri ohjelmistojen linkittäminen algoritmiavusteiseen suunnitelmaan mahdollistaa myös rakenteiden tai jopa kokonaisien rakennejärjestelmien tehokkaan optimoimisen. Optimoinnissa voidaan käyttää valmiita optimointityökaluja tai suunnittelijan itse luomia optimointialgoritmeja. Algoritmiavusteisen suunnittelun hyötynä on, että laskenta voidaan automatisoida algoritmille ja esimerkiksi linkitetystä FEM-laskentaohjelmasta saadut tulokset voidaan yhdistää optimointialgoritmiin tai muuhun suunnitteluun.

Algoritmiseen suunnitteluun vahvasti liittyvä suunnitelman parametrisuus mahdollistaa rakenteiden helpon ja nopean muokattavuuden, jos muutettava tieto on suunnitelmassa parametrisoitu. Helpon muokattavuuden ansiosta rakenteista voidaan tuottaa useita vaihtoehtoisia ratkaisumalleja, joita voidaan vertailla esimerkiksi rakenteisiin integroitujen kustannustietojen avulla. Ratkaisut on myös mahdollista esittää helposti visuaalisessa muodossa, jolloin rakenneratkaisujen vertaileminen helpottuu merkittävästi.

Helppo muokattavuus on myös yksi osatekijä sille, että algoritmiavusteisessa suunnittelussa päätöksentekoa voidaan siirtää projektissa myöhempään vaiheeseen, kuin perinteisessä suunnittelussa ollaan totuttu. Myöhemmässä vaiheessa tehtyjen päätöksiensä etuna on, että suunnittelijat pystyvät ymmärtämään suunnitteluratkaisujen vaikutukset paremmin koko projektin kannalta. Tähän vaikuttaa erityisesti se, että päätökset tehdään kertyneen suunnittelutiedon pohjalta.

Algoritmiavusteinen suunnittelu mahdollistaa useamman suunnittelijan työskentelyn samassa mallissa. Näin eri suunnitteluosapuolien yhteistyö voi helpottua, kun suunnittelijoilla on aina viimeisin suunnittelutieto käytettävänä ja jokaisen suunnittelijan ei tarvitse itse esimerkiksi mallintaa kohdetta uudelleen. Esimerkiksi rakennesuunnittelija voi liittää omia rakenteisiin liittyviä reunaehtojaan arkkitehdin luomaan geometriamalliin. Rakennesuunnittelijan on myös mahdollista liittyä suunnitteluprojektiin nykyistä aikaisemmassa vaiheessa ja tällöin arkkitehdin on mahdollista nähdä rakennesuunnittelijan lisäämien reunaehtojen perusteella, miten hänen valintansa vaikuttavat kokonaisuuteen. Algoritmiavusteinen suunnittelu mahdollistaa myös hankalageometristen rakenteiden tehokkaan suunnittelun.

Kokonaisuudessaan algoritmiavusteinen suunnittelu voi nopeuttaa suunnittelua, mahdollistaa kustannussäästöjä ja parempaa laatua. Kustannussäästöt perustuvat erityisesti nopeampaan suunnitteluun, monipuolisempiin analyyseihin, helppoon muokattavuuteen ja tehokkaisiin optimointeihin. Nopeampi suunnittelu puolestaan mahdollistuu, kun rutiinityöt voidaan siirtää algoritmille ja samalla suunnittelijan aikaa jää enemmän lisäarvoa tuottavaan ja luovaan insinööriyöhön sekä asiakassuhteiden hoitoon.

Nykyään algoritmiavusteiselle suunnittelulle luo haasteita erityisesti rakennusalalla harvinainen ohjelmointitaito ja algoritmisen suunnittelun erilainen ajattelutapa verrattaessa perinteiseen tietomallintavaan suunnitteluun. Algoritmiavusteinen suunnittelu ei ole itseisarvo ja onkin vaikea tietää etukäteen, milloin algoritmiavusteinen suunnittelu on tehokas suunnittelumenetelmä ja milloin kannattaisi hyödyntää tietomallinnusta. Tämän aiheuttaa erityisesti toistaiseksi vähäinen kokemus ja kustannustietojen puute. Tällä hetkellä algoritmiavusteinen suunnittelu voi olla perusteltua, kun projektissa on esimerkiksi odotettavissa paljon muutoksia, geometriat ovat haastavia, suunnitelmista tarvitaan paljon erilaisia analyyseja tai luotu algoritmi on myöhemmin tehokkaasti hyödynnettävissä.

## 5.2 Jatkotutkimustarpeet

Algoritmiavusteisesta rakennesuunnittelusta on tehty Suomessa vielä niin vähän tutkimusta, että jatkotutkimusaiheita löytyy huomattavan paljon. Seuraavaksi on lueteltu joitakin mahdollisia tutkimus- ja kehityskohteita, joita on noussut esiin tämän työn teon aikana. Erilaisten toimivien laskentapohjien tapaisten moduulien kehittäminen voi edistää tehokasta algoritmiavusteista suunnittelua.

Koko algoritmiavusteinen elementti- tai rakennesuunnitteluprosessi vaatii kehitystä, joten myös uudenlaisen prosessin suunnittelunohjauksella voi olla suuri merkitys hyvien tapojen ja tehokkaiden menetelmien löytämiseksi. Lähitulevaisuutta ajatellen olisi hyödyllistä selvittää, millaisissa tilanteissa tällä hetkellä kannattaisi käyttää algoritmiavus-



teista rakennesuunnittelua ja millaisissa tilanteissa kannattaa turvautua perinteisiin menetelmiin. Algoritmiavusteisen suunnittelun järkevän hyödyntämisen kannalta olisi hyvä myös tietää tarkemmin, millaisia parametreja kannattaa jättää avoimiksi erilaisissa tilanteissa. Vielä ei ole myöskään selvää, kannattaako tulevaisuudessa kuvat tuottaa perinteisesti esimerkiksi Teklalla, algoritmilla vai jollain muulla tavalla.

## LÄHTEET

Aish, R. (2013). First Build Your Tools, in: Peters, B. & Peters, T. (ed.), Inside Smart-geometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. West Sussex. United Kingdom. pp. 36–49.

Davis, D. (2013). Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture. Doctoral Thesis. RMIT University. 234 p.

Erkkilä, S. (2017). Algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntäminen betonielementtira-kenteiden suunnittelussa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 98 s.

Gustavsson, J. (2017). Maailman ensimmäinen 3d-tulostettu silta avattiin liikenteelle – Rakentamiseen kului kolme kuukautta. Tekniikan Maailma. Saatavissa (Viitattu 9.12.2018): <https://tekniikanmaailma.fi/maailman-ensimmainen-3d-tulostettu-silta-avattiin-liikenteelle-rakentamiseen-kului-3-kuukautta/>

Humppi, H. (2015). Algorithm-Aided Building Information Modeling: Connecting Algorithm-Aided Design and Object-Oriented Design. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology. Tampere. 164 p.

Karjalainen, P. (2018). Kantavien rakenteiden algoritmiavusteisen rakennesuunnittelu-prosessin kehittäminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 97 s.

Kerola, L. (2016). Elävä rakennus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 58 s.

Koskenvesa, A. (2011) Rakennustyön tuottavuus 1975-2010. Rakentajain kalenteri 2011. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy ja Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry. s. 138-146.

Lalla, A. (2017). Kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 98 s.

Lassila, R. (2016). Rakennussuunnittelun resepti - Tietomallintaminen ja LEAN-työkentely rakennushankkeen suunnitteluohjauksen apuvälineenä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 149 s.

Makris, M.P. (2013). Structural Design Tool for Performative Building Elements: A Semi-Automated Grasshopper Plugin for Design Decision Support of Complex Trusses. Master's Thesis. University of Southern California. 174 p.

MX3D. MX3D Bridge. Saatavissa (Viitattu 9.12.2018): <https://mx3d.com/projects/bridge-2/>

Piermarini, E., Nuttall, H., May, R. & Janssens, V. (2016). City of Dreams, Macau – making the vision viable, *The Structural Engineer*, Vol. 94(3), pp. 56-67.

Pirhonen, I. Tulevaisuudessa suunnitellaan algoritmien ja keinoälyn avulla. A-Insinööri. Saatavissa (Viitattu 23.11.2018): <https://www.ains.fi/blogit/tulevaisuudessa-suunnitellaan-algoritmien-ja-keinoalyn-avulla/>

Tanska, T. & Österlund, T. (2014). Algoritmit puurakenteissa – menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto. Oulun yliopisto. 174 s.

Tedeschi, A. (2014). AAD\_ Algorithms-Aided Design: Parametric Strategies using Grasshopper. Le Penseur Publisher. Italy. 495 p.