



Pistepilvipohjainen FEM-malli

Jaakko Heinonen

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2023

Ylempi Ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ylempi Ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka

Heinonen Jaakko
Pistepilvipohjainen FEM-malli

Opinnäytetyö 101 sivua
Joulukuu 2023

Työssä esitellään pistepilven muokkaamista rakennesuunnittelun tarpeisiin. Alkumuokkauksista käsitellään pistepilven harventamista, pilkkomista, yhdistämistä ja jakamista soveltuviin leikkaustasoihin. Nämä muokkaustavat havaittiin olevan oleellisia saatettaessa pistepilvi hyödynnettävään muotoon rakennesuunnittelun kannalta. Muokattua aineistoa jalostetaan edelleen rakennelaskentamallin tarpeita varten. Lähtötiedon jalostusasteen tarve on määritettävä tehtäväkohtaisesti. Työssä löydettiin jatkokehitysmahdollisuuksia pistepilven hyödyntämisen tehostamiseksi.

Aiheen aluetta kehitetään tällä hetkellä paljon. Ohjelmistokehittäjät pyrkivät tuomaan markkinoille yhä automaattisempia ohjelmistoja pistepilven hyödyntämiseen. Korjaus- ja muutosrakentamisen liiketoiminnallinen potentiaali kasvaa vihreän siirtymän ajamana. Rakennusten käyttöikä on syytä pyrkiä nostamaan uudisrakentamisen sijaan rakentamisen hiilijalanjäljen pienentämiseksi.

Rakennesuunnittelun kannalta olennaiset mittatiedot, rakenteiden sijainnit ja asemat, voidaan kartoittaa nykyaikaisesti pistepilviaineiston avulla. Pistepilvi tehdään yleensä laserkeilauksen tai fotogrammetrian keinoin. Usein olemassa oleva rakennus saattaa olla ainoa lähtötietolähde korjaus- ja muutosrakentamisen suunnittelutehtävässä.

Pistepilvi on joukko pisteitä, joilla on sijaintitieto x-, y- ja z-koordinaatistossa. Pisteet ovat kartoitettavan kappaleen näkyvän pinnan pisteitä. Pisteet sisältävät sijaintitiedon lisäksi pisteen värin ja heijastuksen intensiteetin nykyaikaisilla välineillä kartoitettaessa. Pistepilveä voidaan hyödyntää mittatietona rakennesuunnittelun tehtävissä. Tarkka ja luotettava mittatieto on laadukkaan rakennesuunnittelun lähtökohtia.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin pistepilveä rakennesuunnittelun FEM-laskentamallinnuksen lähtötietona. FEM-malli perustuu elementtimenetelmään (Finite Element Method). Elementtimenetelmässä rakenneosia tai -järjestelmiä jaetaan elementteihin, joiden käyttäytymistä tutkitaan kuormitettaessa. Tavoitteena ratkaista muodonmuutoksia, siirtymiä ja jännityksiä rakenneanalyysiä varten. Pyrkimyksenä työssä oli löytää soveltuvia keinoja pistepilven hyödyntämiseksi rakennelaskennassa. Tarkasteltavana rakennelaskentamallintamisen ohjelmistona työssä oli Dlubal RFEM 5.25.

Asiasanat: rakennustekniikka, pistepilvi, FEM-laskenta, rakennesuunnittelu

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Master's Degree Program in Construction Engineering
Major: Structural Engineering

Jaakko Heinonen
Point Cloud Based FEM-model

Master's thesis 101 pages
December 2023

Editing a point cloud for the needs of structural design was presented in the work. The initial edits were dealt with reducing point data and dividing the point cloud. These editing methods were found to be essential for bringing the point cloud into a usable form in terms of structural design. The edited material was further refined for the needs of the structural calculation model. Further development opportunities were found to enhance the utilization of the point cloud.

The subject area is currently being developed a lot. Software developers are trying to bring to the market more automatic software for utilizing the point cloud. The business potential of repair and alteration construction is growing, driven by the green transition. It is necessary to try to increase the service life of buildings instead of demolishing old buildings for new construction in order to reduce the carbon footprint of construction industry.

In repair and alteration construction, the existing building serves as an important source of information. In terms of structural design, the essential measurement data, the positioning of the structures, can be mapped in a modern way with the help of point cloud data. The point cloud is usually made by laser scanning or by photogrammetry. Often, the existing building may be the only starting data source in the planning task of repair and alteration construction.

A point cloud is a set of points with location information in x-, y-, and z-coordinates. The points on the visible surface of the object to be mapped. The point cloud forms the surface of the piece. Point cloud data can be used as measurement data in structural designing tasks. Accurate and reliable measurement data are the starting points for high-quality structural design.

In this thesis, the point cloud was studied as the initial data for the structural analysis, more precisely the FEM modeling (Finite Element Method). In the finite element method structures are divided into elements whose behavior is studied under loading. The goal is to solve deformations, displacements and stresses for structural analysis. The aim of the work was to find suitable ways to utilize the point cloud in structural calculation. Dlubal RFEM 5.25 was used as the software for FEM-model in the work.

Key words: point cloud, FEM-model, structural engineering

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	10
1.1	Tutkimuksen tausta	10
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	11
1.3	Tutkimuksen menetelmät ja toteutus.....	12
1.4	Rajaukset	13
2	LÄHTÖTIEDOT JA FEM-RAKENNELASKENTAMALLI.....	14
2.1	Lähtötietoaineisto	14
2.2	Olemassa olevan rakennuksen inventointi.....	16
2.2.1	Takymetrimittaus	16
2.2.2	Laserkeilaus	17
2.2.3	Fotogrammetria	19
2.3	Pistepilvi pistepilvitiedon esitystapana	21
2.3.1	Mittatiedon tuottamistavat.....	23
2.3.2	Pistepilven pistemäärä ja pistetiheys.....	26
2.3.3	Pistepilven laadunvarmistus	26
2.4	Pistepilvi rakennesuunnittelun lähtötietona	28
2.4.1	Vanhat rakennesuunnitelmat pistepilviaineiston apuna	31
2.5	Pistepilven muokkaaminen rakennesuunnittelun tarpeisiin	31
2.5.1	Harventaminen	31
2.5.2	Pilkkominen	34
2.5.3	Yhdistäminen.....	35
2.5.4	Leikkaustasoesityksen tekeminen	36
2.6	Elementtimenetelmä ja FEM-laskenta.....	37
2.6.1	Elementtimenetelmä.....	37
2.6.2	FEM-malli	41
2.6.3	Mittatarkkuus toisen kertaluvun laskennassa	43
2.7	FEM-mallintaminen Dlubal RFEM 5.25	45
2.7.1	Laitevaatimukset.....	46
2.7.2	Mallintaminen	46
2.7.3	Solmupisteet ja viivat.....	50
2.7.4	Rakenneosa (member).....	51
2.7.5	Kuori (surface).....	53
2.8	Algoritmiavusteinen suunnittelu.....	55
2.8.1	Grasshopper.....	56
3	PISTEPILVEN HYÖDYNTÄMINEN FEM-LASKENNASSA	57
3.1	Tutkimusmenetelmä.....	57

3.2	Työn tilaaja.....	57
3.3	Case- ja testikohteiden esittely.....	57
3.4	Tutkimuksen rakenne.....	59
3.5	Käytetyt ohjelmistot.....	60
4	TUTKIMUKSEN KULKU JA TULOKSET	61
4.1	Pistepilven muokkaaminen.....	62
4.1.1	Pistepilven muokkaamisen työkalut.....	62
4.1.2	Harventaminen	63
4.1.3	Pilkkominen	63
4.1.4	Pistepilvien yhdistäminen	64
4.1.5	Jakaminen tarkasteltaviin leikkaustasoihin	64
4.1.6	Pistepilven muokkaamisen esimerkkiprojekti.....	65
4.1.7	Pistepilven muokkaaminen Grasshopperin avulla	69
4.2	Muokatun pistepilven hyödyntäminen FEM-mallissa.....	70
4.2.1	Pistepilven tuominen RFEM 5.25 – laskentamalliin	71
4.2.2	Tarkasteltavat leikkaukset pisteinä	72
4.2.3	Tarkasteltavat leikkaukset solmupisteiksi ja viivoiksi	74
4.2.4	Pistepilvidatan jalostaminen Excel – taulukossa.....	77
4.2.5	Pistepilvi BIM-mallin kautta laskentamalliksi.....	81
4.3	Rakenteiden kartoittaminen ja rakennelaskennan laadunvarmistus 83	
4.4	Mittatarkkuus rakennelaskennassa	86
4.5	Pistepilvestä FEM-laskentamallin projektikuvaus	88
5	TUTKIMUKSEN TARKASTELU.....	90
5.1	Tavoitteiden täytyminen	90
5.2	Havaitut haasteet	91
5.3	Tutkimusmenetelmän soveltumisen arviointi.....	92
6	YHTEENVETO.....	93
6.1	Tulosten yhteenveto.....	93
6.2	Tulosten pohdinta.....	95
6.3	Jatkotutkimusehdotukset.....	98

KUVALUETTELO

Kuva 1 Vanha rakennesuunnitelma skannattuna pdf-muotoon.....	14
Kuva 2 Takymetrin rakenne (Laurila, 2012)	17
Kuva 3 Laserkeilain Trimble X7 (BuildingPoint Finland, 2023).....	18
Kuva 4 Laserkeilauksella tuotettu pistepilvi (Rakennustieto, 2019, kuvan toteutus TAMK).....	19
Kuva 5 Vastinpisteiden paikallistaminen (Geodetic Services, Inc. 2023).....	20
Kuva 6 Vastinpisteitä todellisesta rakennuksesta (A-Insinöörit Suunnittelu Oy 2019).....	20
Kuva 7 Fotogrammetrian tarkkuuden pyramidi (Geodetic Services, Inc., 2023)	21
Kuva 8 Pistepilvi (n. 50 milj. pistettä) (A-Insinöörit Suunnittelu Oy).....	23
Kuva 9 Pistepilvimalli (sama kuin kuvassa 8) kuvattuna läheltä tiilipintaa (A-Insinöörit Suunnittelu Oy).....	23
Kuva 10 Havainnekuva pistepilven katvealueista (A-Insinöörit Suunnittelu Oy)	27
Kuva 11 Alalaattapalkisto, tyypillinen välipohjarakenne 1950-luvun alkuun saakka (Rakennustieto, 2006).....	29
Kuva 12 Pistepilven harvennus satunnaismenetelmällä (CloudCompare v2.12.3)	33
Kuva 13 Pistepilven harvennus pisteiden tavoite-etäisyydellä (CloudCompare v2.12.3).....	33
Kuva 14 Pistepilven harvennus datapuurakenteen avulla (CloudCompare v2.12.3).....	34
Kuva 15 Datapuurakenteen periaate (OpenGenus, 2023).....	34
Kuva 16 Pistepilvestä pilkottu piha-alue pois rajalaatikon avulla (A-Insinöörit Suunnittelu Oy)	35
Kuva 17 Pistepilvestä otettu tasokuva: lattiapalkistot.....	37
Kuva 18 Tasokehän elementtijako (Lähteenmäki, 2012-2013)	38
Kuva 19 Levyrakenteen elementtiverkko (Lähteenmäki, 2012-2013)	39
Kuva 20 Kaksisolmuisen sauvaelementin jännitykset ja jäykkyysmatriisi (Rombach, G.A., 2011).....	40
Kuva 21 FEM-laskentamalli: Kehärakenne ja ratkaistu siirtymä, RFEM 5.25....	41
Kuva 22 Epälineaarinen ja lineaarinen materiaalmalli (Jalkanen, 2022)	42
Kuva 23 Reunaehtojen epälineaarisuus kontaktin takia (Jalkanen, 2022)	43
Kuva 24 Jäykistetyin pilarin momenttijakauma (Betoniyhdistys, 2014).....	45

Kuva 25 Solmupisteet ja viivat (RFEM 5.25).....	48
Kuva 26 Kuori- ja rakenneosaelementit (RFEM 5.25).....	48
Kuva 27 Lisätty piste- ja viivatuot rakenteiden alle (RFEM 5.25)	49
Kuva 28 Lisätty rakenteelle piste-, viiva- ja pintakuormat (RFEM 5.25)	49
Kuva 29 Laskentatulokset: rakenteen muodonmuutokset [mm] (RFEM 5.25).....	49
Kuva 30 Dialogi solmupisteen lisäämiseksi (RFEM 5.25)	50
Kuva 31 Dialogi viivan lisäämiseksi (RFEM 5.25)	51
Kuva 32 Edit member -dialogi (RFEM 5.25).....	52
Kuva 33 Erilaisen member-tyypit (RFEM 5.25)	53
Kuva 34 Edit Surface -dialogi (RFEM 5.25)	54
Kuva 35 Eri kuorityypit (RFEM 5.25).....	55
Kuva 36 Pistepilvipohjaisen FEM-laskentamallin kulkukaavio	61
Kuva 37 Pistepilven muokkaus tutkimuksessa, osa kuvan 36 kulkukaaviosta ..	62
Kuva 38 Kulkukaavio esimerkkiprojektin pistepilven muokkauksessa	66
Kuva 39 Esimerkkiprojektin pilkkominen.....	67
Kuva 40 Esimerkkiprojektissa yhdistetty sisätilojen ja ulkopintojen pistepilvet..	68
Kuva 41 Esimerkkiprojektin xz-tasoleikkaus	69
Kuva 42 Pistepilven muokkaamisen sovellutus.....	70
Kuva 43 Jatkojalostus tutkimuksessa, osa kuvan 36 kulkukaaviosta.....	71
Kuva 44 Import - valikko (RFEM 5.25).....	71
Kuva 45 Kuvan 17 pisteet viety RFEM-malliin suoraan laskentamallin pisteiksi	73
Kuva 46 Esimerkkipalkiston tasoleikkaus (A-Insinöörit Suunnittelu Oy).....	75
Kuva 47 Esimerkkipalkkien kohta pisteinä ja viivoina	75
Kuva 48 Viivaesitys palkeista.....	76
Kuva 49 Linkki Rhinoceros - RFEM	76
Kuva 50 Edellä olleet viivat laskentamallin rakenneosina	76
Kuva 51 Pistepilven pisteiden sijaintitiedot MS Excel - taulukko-ohjelmassa....	77
Kuva 52 Import- ja Export table, MS Excel - RFEM linkki (Dlubal Software GmbH, 2020).....	78
Kuva 53 Teoriaosuuden kuvan 25 FEM-malli tuotuna MS Excel – ohjelmistoon	78
Kuva 54 Pistepilven osapohja tarkastelua varten.....	79
Kuva 55 Pisteet siistittyinä taulukko-ohjelmassa.....	79
Kuva 56 Pisteet siirretty RFEM:iin.....	80

Kuva 57 Pisteiden mukaan mallinnettu rakennejärjestelmä.....	80
Kuva 58 RFEM - MS Excel linkki	81
Kuva 59 RFEM 6.02 ja Tekla Structures 2023 suora linkki (Dlubal, 2023).....	82
Kuva 60 Aurivus - Revit Scan-to-BIM – käyttöliittymä, seinien mallinnus.....	83
Kuva 61 Tutkitun rakenteen rakennetyyppi.....	85
Kuva 62 Alalaattapalkisto.....	85
Kuva 63 Piipun leikkaustasoesitys ja keskipisteet.....	87
Kuva 64 Kulkukaavio ja osa tuloksista	89

LYHENTEET JA TERMIT

BIM	“Building Information Modeling”, rakennuksen tietomalli
CAD	”Computer-aided Design” eli suomeksi tietokoneavusteinen suunnittelu. Työssä käsitellään 2d-CAD tiedostoja.
dwg-tiedostomuoto	Tietokoneavusteisen suunnittelun työssä käsitelty tiedostomuoto
e57-tiedostomuoto	Työssä käsiteltävä pistepilven tiedostomuoto RIEGL E57 – tiedostotyyppi, joka tunnetaan myös LIDAR Point Cloud Data File – tiedostotyyppinä
elementtimenetelmä	Rakenneanalyysin metodi, jossa rakennejärjestelmä jaetaan osiin, elementteihin, joiden käyttäytymistä tutkitaan kuormitettaessa
FEM	”Finite Element Method”, eli suomeksi elementtimenetelmä
inventointi	Olemassa olevan rakennuksen kartoitus
inventointimalli	Olemassa olevan rakennuksen inventoinnin malli, yleensä 3d-malli
MS Excel	Microsoft Excel – taulukko-ohjelma
pistepilvi	Joukko pisteitä, jotka on saatu keräämällä mittatietoa olemassa olevasta kappaleesta. Pisteet sisältävät mitattujen pisteiden sijaintitiedon.
rakennelaskentamalli	Laskentaohjelmaan mallinnettu rakennejärjestelmä tai rakenneosia, jonka rakenneanalyysi tehdään, tässä tutkimuksessa FEM-malli
RFEM	Dlubalin ohjelmisto FEM-laskentamallin tekemiseen ja rakenneanalysointiin elementtimenetelmän keinoin
TAMK	Tampereen Ammattikorkeakoulu

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Korjaus- ja muutosrakentamisessa on tärkeää todentaa vanhojen rakenteiden todelliset asemat ja dimensiot. Vanhat piirustukset eivät aina pidä paikkaansa tai ne voivat olla puutteelliset. Todelliset rakenteet on aina syytä todeta paikan päällä. Rakennuksen inventoinnissa voidaan tuottaa tietoa rakenteiden asemista ja dimensioista mittausdatan perusteella. Mittausdatan esitystapana voi toimia pistepilvi, eli joukko pisteitä, jotka sisältävät inventoidun kappaleen pinnan pisteiden sijaintitiedon, värin, heijastuksen intensiteetin ja pinnan suunnan. Pistepilveä voidaan hyödyntää rakennesuunnittelun lähtötietona.

Rakennesuunnittelun rakenteiden mitoituksen työkaluna voidaan käyttää rakenteiden laskentamallia, joka hyödyntää elementtimenetelmän periaatteita. Elementtimenetelmäpohjaista rakenneanalyysimallia kutsutaan FEM-malliksi elementtimenetelmän englannin kielisen nimen ”Finite Element Method” mukaan. FEM-laskentamallien laskentaohjelmat on kehitetty, jotta voidaan ratkaista monimutkaisia lujuusopin tehtäviä.

FEM-laskentamallin pohjana on rakenteiden, esimerkiksi sauvojen tai kuorien, solmupisteiden väliset elementit, joille syötetään rakenteen dimensiot ja materiaaliominaisuudet. Olemassa olevan rakennuksen lähtötietojen jalostaminen toimivaksi laskentamalliksi vaatii usein paljon manuaalista työtä. Manuaalista työtä pyritään vähentämään automatisoituja prosesseja ja tietokoneohjelmia hyödyntäen. Rakennesuunnittelun kulkukaaviossa on oleellista löytää toimiva ja suoraviivainen polku lähtötiedosta suunnitelmaksi. Algoritmiavusteinen suunnittelu on yksi keino manuaalisen työn vähentämiseksi rakennesuunnitteluprosessissa.

Yleisesti rakennuksen suunnitteluprosessissa pyritään etenemään suoraviivaisesti ja loogisesti työn hukkaa välttäen. Perinteisessä uudisrakennuksen suunnittelujärjestyksessä rakennesuunnittelijalla on käytössään arkkitehdin tuottama aineisto, jota voidaan hyödyntää lähtötietona. Arkkitehdin aineistosta käy ilmi rakennuksen asema ja dimensiot. Korjaus- ja muutosrakentamisessa on projekteja, joissa tämä käytäntö ei toteudu. Esimerkiksi kerrostalon korotusrakentamisessa

rakennesuunnittelijan täytyy käsitellä suunnittelussa koko rakennuksen rakenteita määritettäessä esimerkiksi lisääntyneen vaakakuormituksen vaikutusta vanhan rakennuksen kantavaan runkoon tai perustuksiin. Arkkitehdillä ei ole kuitenkaan aina tarvetta koko rakennuksen suunnitteluaineistoon, jos pelkkä muutosalueesta tuotettu aineisto on riittävä. Rakennesuunnittelussa voidaan tarvita olemassa olevasta rakennuksesta kartoitettua tietoa lähtötietona. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan erilaisia tapoja jalostaa pistepilveä rakennelaskennan tarpeisiin.

Pistepilviaineisto on yleistynyt rakennesuunnittelun lähtötietona inventointiteknikkojen kehityksen myötä. Pistepilviaineiston jalostamiseen rakennesuunnittelun tarpeisiin kuluu resursseja.

Vanhaa rakennuskantaa peruskorjataan ja muutos- sekä täydennysrakentaminen on usein vaihtoehto purkavan rakentamisen sijasta. Rakennusten käyttöikä halutaan kasvattaa rakentamisen hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Tilaajien ympäristöarvojen painotukset ja yritysten vastuullisuus on megatrendi myös rakennusalalla. Tässä on korjaus- ja muutosrakentamisella iso rooli.

Näkyvä kehitysura olemassa olevien rakennusten inventoinnissa on niin sanottu Scan-to-BIM – prosessi. Scan-to-BIM tarkoittaa käytännössä pistepilviaineiston saattamista 3d-suunnitteluohjelmaan BIM-tietomalliksi (Building Information Modeling). Monet ohjelmistoyritykset pyrkivät automatisoimaan Scan-to-BIM – prosessia. Tässä työssä keskitytään olemassa oleviin työkaluihin ja työtapoihin, kun halutaan tuottaa pistepilviaineiston avulla FEM-laskentamalli.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Pistepilviaineiston tehokas jalostaminen hyödyttää suunnitteluprosessia. Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia soveltuvia reittejä olemassa olevasta rakennuksesta FEM-laskentamalliksi pistepilven avulla.

Työssä tutkitaan keinoja muokata pistepilveä rakennesuunnittelun kannalta hyödynnettävään muotoon. Työssä jäsennellään muokkaamisen prosesseja ja pyritään luomaan muokkaamista helpottavia toimintatapoja ja työkaluja.

Olemassa olevan rakennuksen lähtötietojen jalostaminen rakennesuunnittelun käyttöön tulee vastaan jokaisessa korjaus- ja muutosrakentamisen kohteessa. Tehokas pistepilviaineiston käyttö antaa mahdollisuuksia tehdä suunnitteluprosesseista tehokkaampia ja lopputuotteista tarkempia sekä laadukkaampia. Edellä mainituilla tavoitteilla pyritään saavuttamaan kokonaisuuden kannalta parempi pistepilven hyödyntäminen rakennesuunnittelun tehtävässä.

FEM-laskentamallia varten tuotettava tieto tulee olla tarkoitukseen soveltuvalla tasolla mittatarkkaa riittävän tarkan laskentatuloksen osoittamiseksi. Tarkan pistepilviaineiston avulla voidaan todeta myös rakennelaskennan kannalta oleellisia asioita, kuten dimensioita tai todellisia alkuvinouksia. Esimerkiksi voidaan todentaa pitkien sauvamaisten rakenneosien vinoutta suhteessa suunniteltuun asemaan. Työssä on tarkoitus tutkia, voidaanko pistepilviaineiston avulla tehdä olemassa olevien rakennusten rakenneanalyysistä laadukkaampia ja tarkempia.

Tutkimuksessa tehdään tilaajalle sovellutuksia pistepilviaineiston jalostamiseen rakennesuunnittelun näkökulmasta. Tavoitteena on löytää looginen polku olemassa olevasta rakennuksesta FEM-laskentamalliksi nykyaikaisia menetelmiä hyödyntäen. Lisäksi pyritään luomaan case-yritykselle uutta tapaa hyödyntää pistepilviaineistoa rakenneanalyysin tarpeisiin. Kulkukaavio ja metodit tuodaan esille työssä.

Tutkimuksessa pyritään ottamaan kantaa käsillä olevan prosessin laadunvarmistukseen. Laadunvarmistus on osa pistepilven tarkastusta ja käsittelyä sekä pistepilvipohjaisesti toteutettua laskentamallintamista. Lähtötietojen laatu ja hyödyntäminen vaikuttavat oleellisesti lopputuotteen laatuun.

1.3 Tutkimuksen menetelmät ja toteutus

Tutkimuksessa tutustutaan aikaisemmin tehtyihin kehitysprojekteihin ja testataan tällä hetkellä yrityksen käytössä olevia tietokoneohjelmia.

Toteutusta testataan todellisilla case- ja testikohteilla. Testikohteissa suoritetaan keinotekoisia tehtäviä todellisilla case-yrityksen hallussa olevilla pistepilvillä.

Case-kohteiden testaus tapahtuu työn tilaajan projekteissa. Kohteista ja testeistä kirjataan opinnäytetyöhöntyöhön havaintoja, metodeja ja työn kulkua.

1.4 Rajaukset

Tutkimuksessa on käytössä työn tilaajan määrittämät tietokoneohjelmistot, joihin työssä tutustutaan. Käsiteltävä FEM-laskentaohjelma työssä on Dlubal RFEM 5.25.

Pistepilvitiedon esitysmuodoista keskitytään pistepilveen. Pinta- ja kolmioverkko-mallit rajataan pois. Työssä käsitellään pistepilven tiedostomuotoa e57. Pistepilvitiedon mittatoleransseihin ei oteta kantaa.

Tutkintotyössä ei käsitellä BIM-mallin tekemistä pistepilvipohjaisesti. Tutkintotyössä käsitellään FEM-laskentamallin tuottamista BIM-mallin avulla vain pinta-puolisesti. Kuitenkin on todettava, että pistepilven muokkaamisen toimintatavat ja sovellutukset voivat olla samoja niin pistepilvipohjaisesti tehdyssä laskentamallissa kuin pistepilvipohjaisesti tehdyssä BIM-mallissakin.

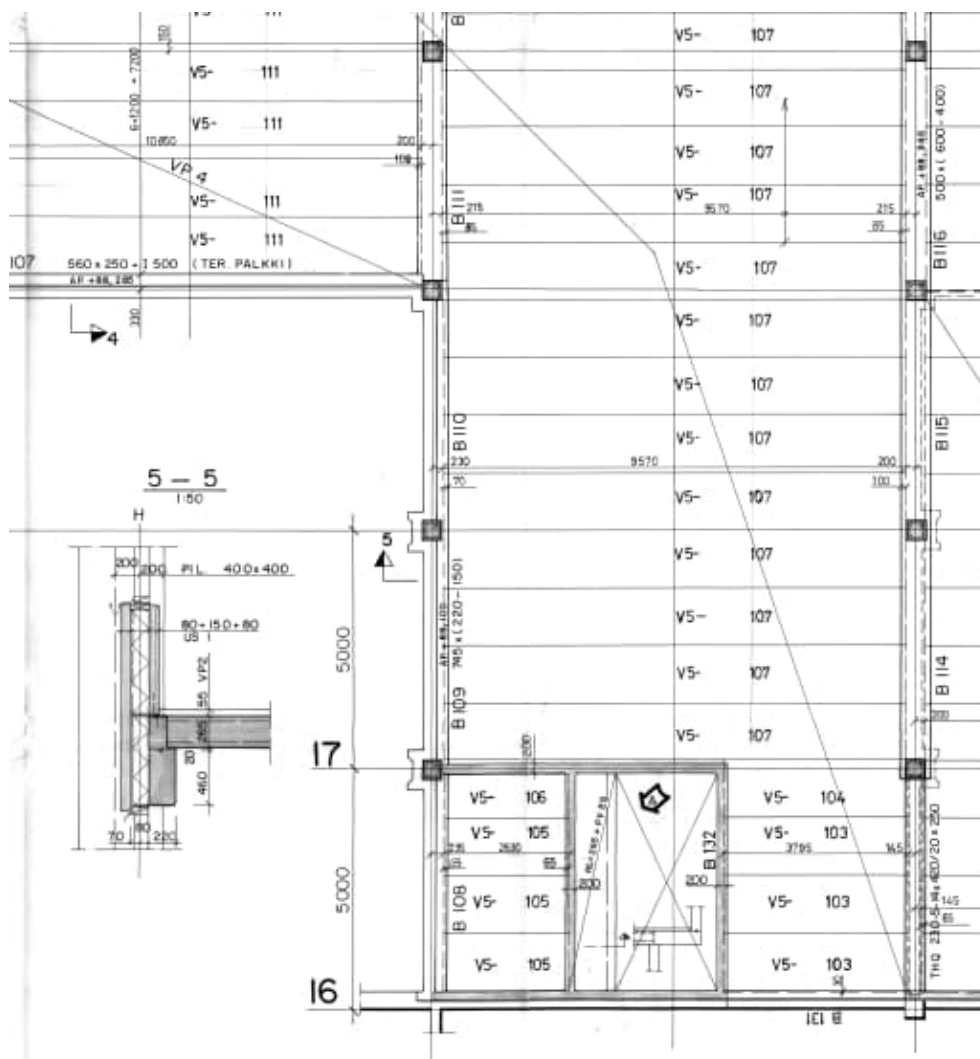
Laskentamallin lähtötietoina työssä käsitellään vain rakennuksen olemassa olevia vanhoja suunnitelmia ja pistepilveä.

Tutkimuksessa tehdään ohjelmallista kehitystä parametrisellä suunnitteluohjelmalla, mutta visuaalista ohjelmointia ei julkaista.

2 LÄHTÖTIEDOT JA FEM-RAKENNELASKENTAMALLI

2.1 Lähtötietoaineisto

Lähtötieto on saatavilla olevaa tai varta vasten tuotettua informaatiota, jota voidaan hyödyntää käsillä olevassa projektissa. Korjausrakennesuunnittelussa lähtötiedolla tarkoitetaan tietoja olemassa olevasta rakennuksesta. Näitä esitietoja rakennuksesta hyödynnetään suunnitteluprosessissa. Olemassa olevia lähtötietoja voivat olla esimerkiksi rakennuksen alkuperäiset suunnitelmat ja dokumentit tai rakennuksen elinkaaren aikana tehdyt aineistot. Olemassa olevien lähtötietojen jäädessä suunnitteluprosessin kannalta vajavaisiksi, on tuotettava lisää lähtötietoaineistoa projektia varten. Tuotettuja lähtötietoja voi olla esimerkiksi mitaukset, inventoinnit ja kuntotutkimukset. (Savisaari, 2017). Kuvassa 1 on esitetty vanha rakennesuunnitelma tallennettuna pdf – muotoon.



Kuva 1 Vanha rakennesuunnitelma skannattuna pdf-muotoon

Lähtötietojen laatu ja saatavuus vaihtelee tapauskohtaisesti. Lähtötietojen luotettavuutta, paikkansa pitävyyttä ja riittävää kattavuutta on arvioitava jokaisessa suunnitteluprosessissa tapauskohtaisesti. Olemassa oleviin lähtötietoihin, kuten vanhoihin suunnitelmiin, on aina suhtauduttava varauksella ja tiedostettava mahdolliset epävarmuustekijät. (Savisaari, 2017). Olemassa olevien suunnitelmien laatu vaihtelee monista eri syistä (Risulahti, Kesäkuu 2016):

- rakennusta ei ole toteutettu alkuperäisten suunnitelmien mukaan (esim. työnaikaiset muutokset saattavat olla dokumentoimatta, rakennuksen mittapoikkeamat suunniteltuun nähden)
- olemassa olevat suunnitelmat ovat vajavaisia tai niiden tarkkuus on heikko, kriittistä lähtötietoa ei löydetä suunnitelmista, suunnitelmia puuttuu
- rakennukseen on voitu sen elinkaaren aikana tehdä muutoksia, joita ei ole dokumentoitu ollenkaan tai dokumentaatio voi olla vajavaista

Uusilla varta vasten tuotetuilla lähtötiedoilla voidaan täyttää olemassa olevan lähtötietoaineiston aukkoja ja tarkentaa lähtötietoja suunnitteluprosessin mahdollistamiseksi.

Saatavilla oleva lähtötietoaineisto rakennuksen suunnittelussa eroaa aina kohdekohtaisesti. Uudisrakennuksen rakennesuunnitteluprosessi on suoraviivainen ja kaikki tarvittava lähtötietoaineisto on tuotettavissa ja lähtötiedon toimittaja on tiedossa. Korjaus- ja muutosrakentamisessa erilaisten lähtötietojen kirjo on suurempi ja niiden hankkiminen sekä oikeaksi todentaminen aina kohdekohtaisesti määriteltävä.

Vanhat suunnitelmat ovat lähes poikkeuksetta vaillinaiset laajuudeltaan ja laadultaan edellä mainittujen laadun epävarmuustekijöiden takia. Nykyaikaisen mitaustekniikan, kuten fotogrammetrian ja laserkeilauksen, avulla voidaan tuottaa pistepilviaineistoa rakennesuunnittelun hyödynnettäväksi. Tällöin itse rakennus toimii lähtötietona. (Risulahti, Kesäkuu 2016)

2.2 Olemassa olevan rakennuksen inventointi

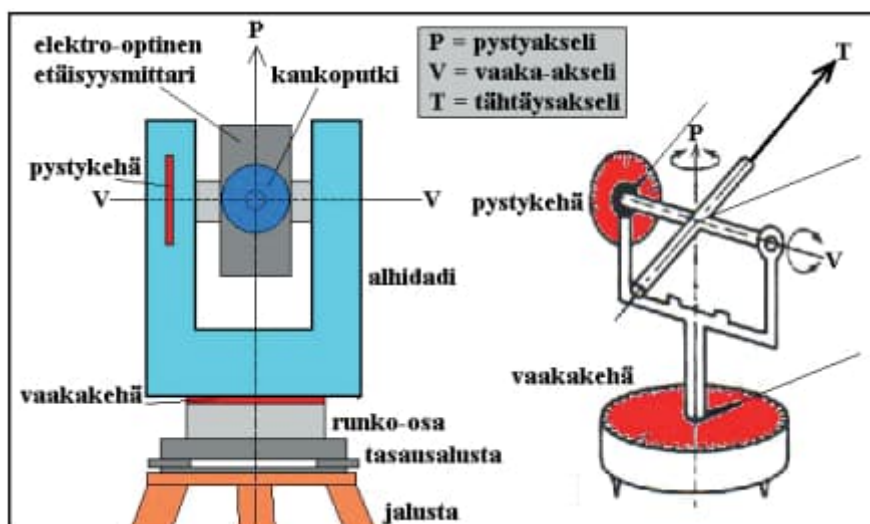
Inventoinnin tavoitteena on todeta olemassa oleva todellinen tilanne. Inventoidaan nykyhetki. Tavoitteena on saada tarkkaa tietoa inventoitavasta kappaleesta. Rakennuksia inventoitaessa pääpaino on olemassa olevan massan mittaamisessa. Inventoitu mittatieto voidaan saattaa hyödynnettävään digitaaliseen muotoon inventointimallinnuksen avulla.

Rakennuksen mittatietoa voidaan kerätä monin eri tavoin. Inventoinnin alkeellisin versio on mittaaminen ja mittaustulosten dokumentointi esimerkiksi paperille. Teknologian kehityksen myötä digitaaliset työkalut ovat kehittyneet. Inventointimallintamisen nykyinen valtavirta on takymetrimittaukseen perustuva laserkeilaus ja fotogrammetria. Fotogrammetriassa kerättyä kuvadataa yhdistelemällä saadaan objekteista sijainti- ja etäisyystietoa. Inventointimallintamista tehdään mittausdatan avulla tietokoneavusteisesti. (Savisaari, 2017)

Inventoinnin lopputuote voi olla inventointimalli tai muu räätälöity informaatiokonaisuus rakennuksesta. Yleisesti inventointimalli on BIM-tietomalli. Tässä työssä käsitellään lähtötietoja pistepilvien muodossa. Inventointia voidaan tehdä esimerkiksi takymetrimittauksen (2.2.1), laserkeilauksen (2.2.2) tai fotogrammetrian (2.2.3) avulla.

2.2.1 Takymetrimittaus

Takymetri on koje, joka mittaa kulmia ja etäisyyksiä. Etäisyyden mittaaminen tapahtuu elektro-optisesti. Kun tiedetään laitteen orientaatio ja sijainti valitussa koordinaatistossa, voidaan tutkia valitun kappaleen pisteen sijainti. Etäisyysmittauksen lisäksi täytyy tietää pysty- ja vaakakulma tähdättäessä valittuun pisteeseen. Laitetta käytetään kolmijalan päällä. (Laurila, 2012) Kuvassa 2 on havainnollistettu takymetrin rakennetta.



Kuva 2 Takymetrin rakenne (Laurila, 2012)

Pistepilven tuottamiseen käytetään pääosin laserkeilausta ja fotogrammetriaa. (Kalliomäki, 2023) Takymetrimittaus on tarkoitettu yksittäisten pisteiden mittaamiseen tarkasti. Mittaustapa on yleisessä käytössä esimerkiksi työmaalla. Näin ollen pistepilven tuottamistapana on olennaisempaa keskittyä laserkeilauksen ja fotogrammetrian vertailuun. Takymetri on käyttökelpoinen fotogrammetriaa varten yksittäisten referenssipisteiden sijaintien toteamiseen. Tällaista referenssipistettä voidaan käyttää sijainnin ja orientaation hakuun, kartoitetun kappaleen mitattiedon tarkastamiseen sekä skaalaamiseen.

2.2.2 Laserkeilaus

Laserkeilain on laite, joka mittaa objektin pisteitä lasersäteiden avulla. Laserkeilaimen toimintaperiaate on sama kuin takymetrissä. Pisteiden kartoitus perustuu tietoon laitteen orientaatiosta ja sijainnista.

Laitteessa on nollapiste, josta valosignaali (lasersäde) lähtee. Mittaus perustuu aikaan, jona valosignaali kulkee mittalaitteesta kohdepisteeseen ja palaa takaisin lähtöpisteeseen. Kun tiedetään valosignaalin lähtöpaikan sijainti ja lähtökulma, voidaan laskea kohdepisteen sijainti valitussa x-, y- ja z-koordinaatissa mittaamalla kohteen etäisyys signaalin lähtöpaikasta. Mittaustekniikan avulla saadaan tarkkaa mittatietoa inventoitavasta kohteesta. Mittatietoa ei tarvitse erikseen skaalata. (Joala, 2003) Kuvassa 3 on esimerkki laserkeilaimesta.



Kuva 3 Laserkeilain Trimble X7 (BuildingPoint Finland, 2023)

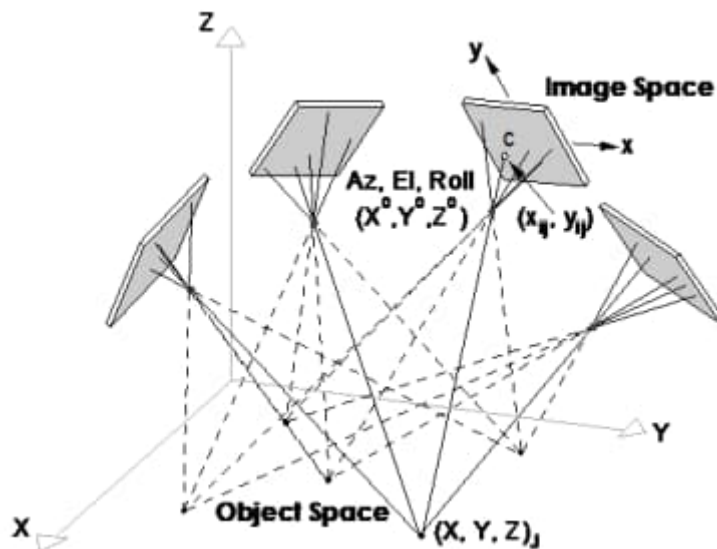
Kohdetta inventoitaessa kojeasemia (mittauspisteitä) otetaan riittävän kattavasti kohteen eri puolilta ja eri suunnista. Riittävä kojeasemien määrä riippuu kohteen koosta ja muodosta. Laserkeilainten etuna on se, että laite ottaa yhdellä mittauksella suuren määrän mittauksia kolmiulotteisesti eri suuntiin. Mittausdata eri asemista yhdistetään yhdeksi pistemalliksi. Mittausdatasta saadaan tietokoneavusteisesti tuotettua pistepilvi. Laserkeilaimen kamera tallentaa mitatun kohteen värin ja heijastuman intensiteetin. (Rakennustieto, 2019) Kuvassa 4 on esitetty esimerkki pistepilvestä.



Kuva 4 Laserkeilauksella tuotettu pistepilvi (Rakennustieto, 2019, kuvan toteutus TAMK)

2.2.3 Fotogrammetria

Fotogrammetrialla tarkoitetaan kolmiulotteista mittaustekniikkaa. Fotogrammetriassa käytetään nimensä mukaisesti valokuvia kohteen dimensioiden ja aseman määrittämiseen. Tekniikassa otetaan valokuvia kohteesta vähintään kahdesta eri asemasta niin, että molemmista kuvakulmista nähdään sama kappaleen piste. Laitteiden ja mitattujen pisteiden asemat voidaan osoittaa samaan koordinaatistoon. Kun valokuvan suunta on tiedossa, voidaan laskea kappaleen tietyn kuvattun pisteen paikka samassa koordinaatistossa kolmiomittauksen periaatteiden mukaan. (Geodetic Services, Inc., 2023) Kuvissa 5 ja 6 on havainnollistettu vastinpisteiden periaatteita fotogrammetriassa.



Kuva 5 Vastinpisteiden paikallistaminen (Geodetic Services, Inc. 2023)



Kuva 6 Vastinpisteitä todellisesta rakennuksesta (A-Insinöörit Suunnittelu Oy 2019)

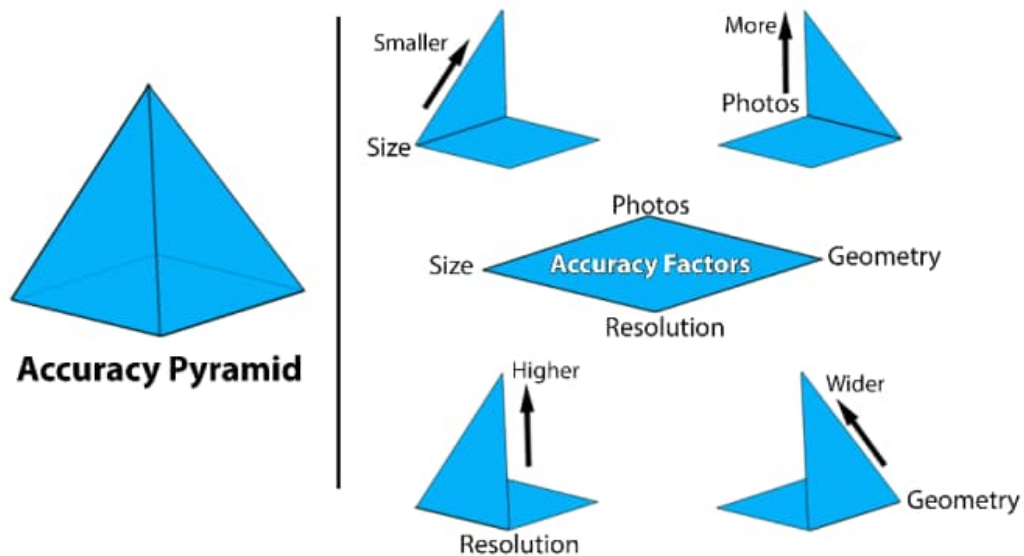
Valokuvia kerätään samasta objektista suuri määrä. Tietokoneavusteinen laskeinta muodostaa edellä mainittua logiikkaa käyttäen kuvatusta kappaleesta valokuvamallin, jossa valokuvassa näkyvät objektin pinnan pisteet ovat mitattu ja asemoitu valittuun koordinaatistoon ja asemaan suhteessa toisiinsa. Näin saadaan kuvatun kohteen pinnan pisteet suhteessa toisiinsa määritettyä. (Savisaari, 2017)

Koottu valokuva-aineisto skaalataan todelliseen mittasuhteeseen syötetyn mittatiedon avulla. Kun kohteesta mitataan useiden eri referenssipisteiden välinen

etäisyys, saadaan fotogrammetrialla tuotettu aineistoon todelliset dimensiot. Tarkastusmitatut pisteet syötetään fotogrammetrian ohjelmaan. Ohjelma pakottaa annetun mittatiedon mukaisesti objektin todelliseen mittakaavaan. (Savisaari, 2017)

Edellä mainittujen referenssipisteiden määrä ja sijainnin sekä keskinäisen etäisyyden mittatarkkuus on keskeinen fotogrammetrialla tuotetun aineiston tarkkuuden tekijä. Muita tarkkuuteen vaikuttavia asioita ovat (kuva 7) (Geodetic Services, Inc., 2023):

- valokuvien laatu (esim. resoluutio, valotus)
- inventoitavan kohteen dimensiot
- valokuvien määrä
- kohteen geometrinen muoto suhteessa valokuvien sijaintiin ja vastinpisteiden keskinäiset sijainnit toisiinsa nähden



Kuva 7 Fotogrammetrian tarkkuuden pyramidi (Geodetic Services, Inc., 2023)

2.3 Pistepilvi pistepilvitiedon esitystapana

Pistepilvi on yksi mittatiedon, tässä tapauksessa olemassa olevan rakennuksen inventoinnin, esitystapa. Pistepilven lisäksi muita tapoja esittää mittatietoa löytyy useita. Mittatieto itsessään voi olla esitystavaltaan esimerkiksi taulukko pisteiden sijainneista, tai mikä tahansa tapa, josta ilmenee kartoitettujen pisteiden sijainti.

Pistepilven lisäksi vakiintuneita digitalisoituja esitystapoja on pinta-/kuorimalli ja kolmioverkko. (Savisaari, 2017)

Pintamallissa mitattujen pisteiden välille muodostetaan tasopinta, jolla on sijainnin lisäksi orientaatio ja pinta-ala. Kolmioverkkomallissa mitattujen pisteiden välille muodostetaan viivat niin, että piste muodostaa viivan kolmen lähimmän ympäröivän pisteen kanssa muodostaen verkon. Verkossa on solmupisteiden lisäksi niiden välisiä viivamaisia objekteja, joilla on sijaintitiedon lisäksi suunta ja pituus. (Savisaari, 2017)

Edellä mainitut kolmioverkko- ja pintamalli on koottu samanlaisen inventoinnin avulla kuin pistepilvi. Pistepilvestä voidaan tuottaa kolmioverkko- ja pintamalleja ja päinvastoin.

Tässä työssä käsitellään jatkossa vain esitystapaa pistepilvi.

Yksittäinen piste (pistepilvessä) on objekti, jonka ominaisuudet ovat sijainti ja heijastuksen intensiteetti. Mikäli inventointilaitteessa on kamera, pisteelle on määritetty väri. Tietokoneavusteisesti pisteelle määritetään normaalisuunta, joka kertoo inventoidun kappaleen pinnan suunnan. Pisteeltä ei ole dimensioita tai massaa. Kun suuri joukko näitä pisteitä laitetaan samaan aineistoon ja valitaan keinotekoinen pisteen visuaalinen esitystapa, saadaan pistepilvi. Kuvien 8 ja 9 mukaisessa esimerkkipistepilvessä visualisointiin on otettu kartoitetun kohteen todelliset värit.



Kuva 8 Pistepilvi (n. 50 milj. pistettä) (A-Insinöörit Suunnittelu Oy)



Kuva 9 Pistepilvimalli (sama kuin kuvassa 8) kuvattuna läheltä tiilipintaa (A-Insinöörit Suunnittelu Oy)

2.3.1 Mittatiedon tuottamistavat

Mittatietoa voi tuottaa monilla eri tavoilla. Edellä esitellyiden tapojen (takymetri-mittaus, laserkeilaus ja fotogrammetria) lisäksi voidaan eri pisteiden sijainteja (pistepilvitietoa) kerätä myös muilla tavoin. Esimerkiksi mitta-aineistoa voidaan kerätä perinteisillä mittavälineillä ja kirjata taulukkoon. (Savisaari, 2017). Tässä työssä painotetaan vakiintuneimpia elektronisia ja tietokoneavusteisia tapoja

tuottaa mitta-aineistoa, tässä tapauksessa pistepilveä. Vakiintuneimmat tavat tuottaa pistepilviä ovat laserkeilaus ja fotogrammetria.

Pistepilven tuottamisen tapa vaikuttaa pistepilven laatuun. Pistepilven käyttäjän on tiedostettava toteutustavan erot. Fotogrammetrisesti tuotettu pistepilviaineisto voi olla laserkeilaamalla tuotettua aineistoa epätarkempaa, koska pisteiden sijainnin määrittäminen perustuu tietokoneavusteiseen kuvatulkiintaan toisin kuin laserkeilauksessa tai takymetriassa. Laserkeilauksessa ja takymetriassa mitataan fyysisiä pisteitä suoraan ilman tulkiintaa. Lisäksi laserkeilaimella tuotettu pistepilvi on suoraan oikeassa mittakaavassa, joka poistaa skaalaamisessa tulevan mahdollisen mittavirheen mahdollisuuden. (Savisaari, 2017) Riittävästä mittatarkkuudesta on hyvä varmistua projektikohtaisesti. Rakennelaskennan sovellutuksissa mittatarkkuudella on sitä enemmän merkitystä, mitä tarkempaan rakenneanalyysiä halutaan suorittaa. Seuraavassa taulukossa on vertailtu yleisimpiä pistepilven tuottamistapoja.

Taulukko 1 Pistepilvitiedon tuottamistapa

Tuottamistapa	Edut	Heikkoudet
Laserkeilaus	<ul style="list-style-type: none"> + tarkka + yhdellä mittauksella mitataan kolmiulotteisesti ympäröivät pisteet + laitteistoa kehitetään ja mittausten automatisointiin panostetaan + aineisto on automaattisesti oikein skaalattu 	<ul style="list-style-type: none"> - fotogrammetriaa hitaampi mitta - fotogrammetriaa kalliimpi laite - suuri datamäärä vaatii tietokoneen laskentatehoa
Fotogrammetria	<ul style="list-style-type: none"> + kattava mitta + laserkeilausta nopeammin suoritettua + kohteen valokuvaus samalla + samat laitehankinnat käyvät valokuvauksen tarpeisiin + laitteistoa kehitetään ja mittausten automatisointiin panostetaan + kartoitettaessa miehittämättömällä ilma-aluksella (drone), aineistoa voidaan kerätä vaivattomasti esimerkiksi katolta tai ulkoseinäpinnoilta 	<ul style="list-style-type: none"> - pistepilviaineiston tarkkuus riippuu tietokoneavusteisen kuvatulkin laadusta ja erikseen mitattujen referenssipisteiden määrästä - suuri datamäärä vaatii tietokoneen laskentatehoa - tehtävän kannalta riittävän mittatarkkuuden todentaminen - mallien skaalaaminen tarvitsee referenssimittan ja lisää mittavirheen mahdollisuutta

2.3.2 Pistepilven pistemäärä ja pistetiheys

Pistepilven pisteiden määrä riippuu kartoitetun kohteen koosta, muodosta ja mitausaineiston tekotavasta ja laadusta. Puhuttaessa pistetiheydestä voidaan ajatella, kuinka monta pistettä on tietyn kokoisessa tilavuudessa. Pistepilven pistetiheys on pistepilven laatuun vaikuttava tekijä. On tärkeää tiedostaa pistepilven käyttötarkoitus ja suhteuttaa käyttötarkoitukseen sopiva pistetiheys. Mitä enemmän pisteitä on tiedostossa, sitä enemmän tietokoneen kapasiteettiä pistepilven käsittely vie. Näin ollen pistepilvitiedostoja on usein tarpeen harventaa, eli tietokoneavusteisesti vähentää pisteiden määrää pistepilviaineistossa. Harvennetaessa on mietittävä riittävää tarkkuustasoa tehtäväkohtaisesti. Harvennus poistaa pisteitä, jolloin tarkkuus heikkenee. (Hyypä; Ahlavuo; & Kukko, 2009)

Tiedoston käsittelyn helpottamiseksi on pistepilviaineistosta syytä poistaa pisteet, joita ei tarvita käsillä olevan tehtävän suorittamiseen. Esimerkiksi pihalla olevan puun voi poistaa pistepilvimallista, kun tarkastellaan pelkkää rakennusta. (Hyypä; Ahlavuo; & Kukko, 2009) Harvennusta (2.4.1) ja pilkkomista (2.4.2) käsitellään tarkemmin työn myöhemmässä vaiheessa.

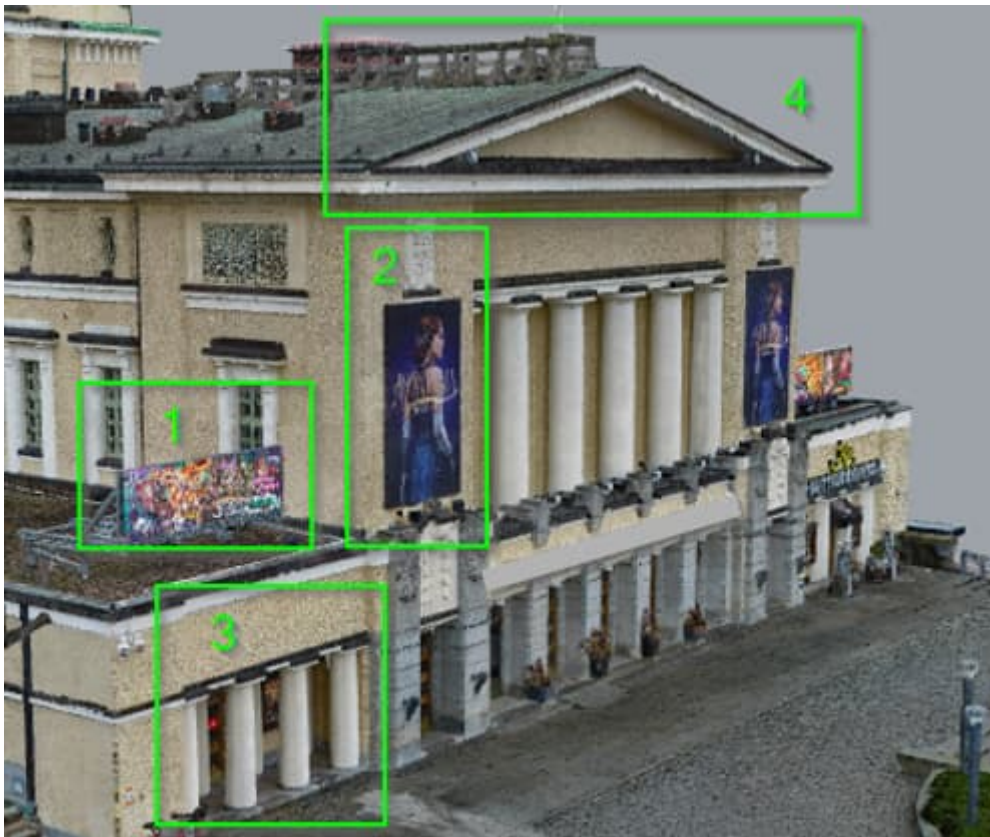
2.3.3 Pistepilven laadunvarmistus

Tärkein pistepilven laadunvarmistuksen muoto on visuaalinen laadunvarmistus. Näyttääkö pistepilvi kartoitetulta kohteelta. Onko pistepilvessä räikeitä vinouksia tai muita epäjohdonmukaisuuksia verrattuna alkuperäiseen kohteeseen. Visuaalista laadunvarmistusta voi tehdä esimerkiksi valokuvien perusteella.

Visuaalisessa laadunvarmistuksessa on tärkeää kartoittaa pistepilven mahdolliset katvealueet. Onko pistepilvestä jäänyt alueiden pintoja mittaamatta. Katvealueita kartoitettaessa on hyvä tiedostaa, millä laitteella pistepilvitieto on kerätty. Esimerkiksi miehittämättömällä ilma-aluksella suoritettu kuvaus fotogrammetriaa varten mahdollistaa helposti vesikaton kartoittamisen verrattuna maantasolla olevaan laserkeilaimeen. Näiden katvealueiden takia on hyvä pohtia projektikohtaisesti, mikä on oleellista tietoa, sekä räätälöidä tehtävään sopiva kartoitussuunnitelma ja valita tähän suunnitelmaan sopiva laitteisto. Katvealueita voidaan välttää myös yhdistelemällä malleja. Esimerkiksi yhdistämällä ilmakuvatun rakennuksen

ulkovaipan pistepilven ja sisältä laserkeilatun pistepilven saadaan yhteen tiedostoon kokonaisvaltaisempaa mittatietoa kohteesta. Kuvassa 10 on esitetty havaittuja katvealueita rakennesuunnittelun näkökulmasta esimerkinomaisesti:

1. mainosseinämät
2. mainoslakanat
3. ahtaat välit rakenteiden (pilarien) takana
4. vesikaton varustelu sekä räystäään ulokkeet ja koristeaiheet



Kuva 10 Havainnekuva pistepilven katvealueista (A-Insinöörit Suunnittelu Oy)

Rakennesuunnittelun näkökulmasta on hyvä poistaa kaikki mahdolliset näkyvyyden estävät haitat kantavien rakenteiden ja mittalaitteen väliltä, mikäli se on mahdollista. Esimerkiksi kartoitusta tehdessä sisätiloissa, saattaa kantavan pilarin edessä olla kalusteita. Kaikki poistettavissa olevat esteet on syytä poistaa ennen kartoitusta. (Kalliomäki, 2023)

Laadunvarmistuksessa on hyvä tarkastaa, onko pistepilvi skaalautunut oikein tarkastamalla mittoja. Lisäksi on tarkastettava, onko pistepilvi määritellyssä ja jär-

kevässä suunnittelukoordinaatistossa sekä oikeassa kiertokulmassa. Pistepilvi-tiedon tuottajalta on hyvä tiedustella mittavirheistä ja mittatoleransseista. Valittu pistepilvitiedon tuottamistapa vaikuttaa oleellisesti mittatoleranssiin. Tarkkuuden kannalta merkityksellisten, esimerkiksi takymetrillä kartoitettujen, referenssipis-teiden määrä ja sijainti on hyvä olla tiedossa.

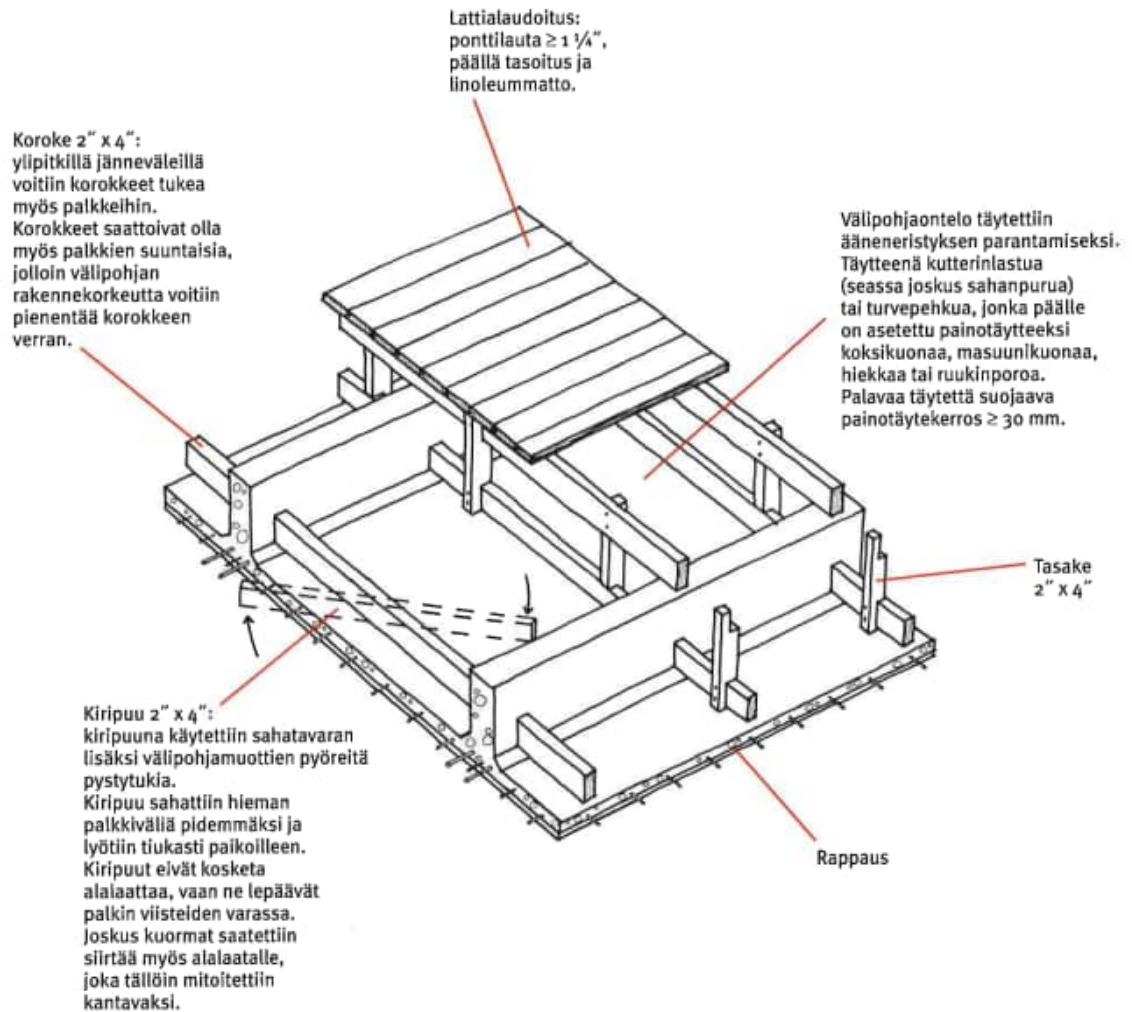
2.4 Pistepilvi rakennesuunnittelun lähtötietona

Pistepilviaineisto on aina tietoa kartoitetun kohteen pinnasta. Rakennesuunnitte-lun näkökulmasta pelkän pinnan sijainti ja kappaleen pinnan dimensiot eivät it-sessään ole kattavaa tietoa, vaan informaatiota on lisättävä muilla lähtötiedoilla rakenneanalyysin mahdollistamiseksi. Kantavat rakenteet voivat olla piilossa ke-vyiden pintarakenteiden takana. Myös kantava rakenne voi suojata itseään. (Rakennustieto, 2006). Esimerkiksi toiminnalliset rakenneteräkset ovat teräsbe-tonirakenteessa betonipeitteen alla. Kantavia rakenteita ei voida kartoittaa pelkän pistepilviaineiston perusteella.

Tarkasteltavat kantavat rakenteet on kartoitettava jokaisessa rakennesuunnitte-lun projektissa. Kartoitukseen on valittava toimintatavat projektikohtaisesti. Piste-pilviaineiston lisäksi kartoitusta voidaan suorittaa monin eri tavoin (Risulahti, Kesäkuu 2016):

- vanhat suunnitelmat
- rakenneavaukset, kevyiden rakenteiden purku
- silmämääräinen tarkastelu
- tieto ajanmukaisesta rakentamisesta

Tarkasteltavat kantavat rakenteet on syytä kartoittaa ennen pistepilviaineiston ja-lostamista ja mielellään ennen pistepilviaineiston tekoa. Aineisto on hyvä räätä-löidä tarkoituksenmukaiseen pakettiin suunnitteluprosessin sujuvoittamiseksi. Esimerkiksi kuvan 11 mukaisessa rakenteessa, kartoitettaessa kantavia palkis-toja, on syytä tehdä mahdollisimman kattava purkaminen palkiston yläpuolella oleville kantamattomille rakenteille.



Kuva 11 Alalaattapalkisto, tyypillinen välipohjarakenne 1950-luvun alkuun saakka (Rakennustieto, 2006)

Pistepilviaineiston käyttö rakennesuunnittelun lähtötietoa edellyttää riittävää ymmärrystä rakenteiden toiminnasta ja tyypillisten rakenteiden tunnistamista. Usein piiloon jäävät rakenteet on käytävä toteamassa paikan päällä esimerkiksi kattavien rakennevausten avulla. Vanhojen suunnitelmien avulla voidaan tulkita pistepilviaineistoa. Rakennesuunnittelussa pistepilvi on hyvä lähtötieto, mutta sen puutteet on tiedostettava. (Risulahti, Kesäkuu 2016)

Pistepilven ollessa nykyhetken tilanne näkyvien pintojen osalta, on sitä hankala käyttää suoraan esimerkiksi FEM-laskentamallin lähtötietona. Laskentamallia varten tulee pistepilvestä jalostaa vain kantavat rakenteet sisältävä malli sähköisessä formaatissa.

Usein paikalla kartoitettua aineistoa käytetään, jotta voidaan todentaa vanhojen suunnitelmien paikkansapitävyys. Pistepilvitieto antaa mahdollisuuksia kartoittaa rakennuksien ja rakenteiden todelliset dimensiot. Rakennesuunnittelun lujuusopin tehtävissä sijainnin mittatarkkuus on usein tärkeä tieto. Esimerkiksi kantavat rakenteet tulisi olla mahdollisimman keskeisesti päällekkäin rakennuksessa, jotta vältetään epäkeskisyyden aiheuttamasta pakkovoimista. Kerrostalojen korotusrakentamisessa voidaan pistepilvitiedon avulla todeta alempien kerrosten kantavien rakenteiden sijainnit ja suunnitella uuden rakenteet keskeisesti niiden päälle. Näissä tehtävissä on tärkeää saada kerrokset luotettavasti samaan koordinaatistoon esimerkiksi referenssipisteiden avulla.

Pistepilvestä saatuja leikkauksia voidaan verrata vanhoihin rakennesuunnitelmiin ja todeta piiloon jääneiden rakenteiden asemia. Rakennelaskentamallin toiminnan kannalta on tärkeä saada mahdollisimman kattavaa informaatiota rakennjärjestelmästä. Rakenteiden kartoittaminen on tärkeä osa pistepilven puutteiden täyttämiseksi. (Savisaari, 2017)

Kantavien rakenteiden kartoitus on suunniteltava. On tiedostettava vanhan rakennuksen rungon perusrakenteet, rakennejärjestelmä ja nykytilanne, jotta pistepilviaineiston keräämisen mielekkyys voidaan todeta ja maksimoida. On suunniteltava, voidaanko kevyitä purkuja tehdä ennen rakennuksen inventoinnin tekemistä, jotta kantavat rakenteet olisivat paremmin näkyvillä. Kevyet paikalla siirreltävät esteet on syytä myös kartoittaa. Vanhoihin suunnitelmiin on tutustuttava ennen kartoitusta kartoitussuunnitelman optimoimiseksi. On tiedostettava mihin tarkoitukseen mittausdataa kerätään. Tästä on kuitenkin poikkeuksia.

Usein pistepilviaineistot tulevat ulkopuoliselta toimijalta. Kartoitus voi olla tehty ennen kuin aineiston hyödyntäjä on mukana projektissa. Tämä saattaa aiheuttaa hukkaa ja lisäselvitystarpeita, jos projektin kannalta oleellisia asioita jää kartoittamatta tai aineisto on oleellisilta osin laadultaan heikkoa. Kartoitusta tehdessä on hyvä tietää aineiston käyttötarkoitus. (Risulahti, Kesäkuu 2016)

2.4.1 Vanhat rakennesuunnitelmat pistepilviaineiston apuna

Vanhojen suunnitelmien avulla voidaan etukäteen selvittää, mikä on oleellista mittatietoa rakennesuunnittelun kannalta. Vanhat rakennesuunnitelmat voivat olla erilaisissa formaateissa paperiversioista rakennemalliin. Mitä vanhempi rakennus on, sitä alkeellisemmassa formaatissa ja sitä puutteellisempaa tieto yleensä on. (Risulahti, Kesäkuu 2016)

Vanhat suunnitelmat ovat usein puutteelliset tai saattavat puuttua kokonaan. Rakennuksen elinkaaren aikana tehdyistä muutoksista ei aina löydy riittävää dokumentointia. Rakennusaikaisia muutoksia ei välttämättä ole dokumentoitu. Valmiiksi sähköisessä muodossa olevia vanhoja suunnitelmia löytyy vain riittävän uusista kohteista, tai kohteista, joissa on tehty muutostyötä varten suunnitelmat aikaisemmin sähköiseen muotoon. (Risulahti, Kesäkuu 2016)

Vanhoihin suunnitelmiin tulee aina suhtautua varauksella. Suunnitelmien paikansapitävyys on viimeistään työmaalla todettava. Vanhojen rakenteiden poikeksessa suunnitellusta, tulee mahdolliset tarvittavat toimenpiteet tehdä toteutuskelppoisuuden varmistamiseksi.

Rakennesuunnittelu tehdään nykyään tietokoneohjelmistojen avulla. Vanhojen paperisten suunnitelmien jalostaminen käyttökelpoiseen sähköiseen muotoon on pakollinen prosessi osassa suunnitteluprojekteja. Aineiston digitalisoinnissa voidaan käyttää apuna vanhojen suunnitelmien lisäksi olemassa olevasta rakennuksesta mitattua dataa. Mittausaineistoa ja vanhoja suunnitelmia on tarkasteltava ristiin. (Risulahti, Kesäkuu 2016)

2.5 Pistepilven muokkaaminen rakennesuunnittelun tarpeisiin

2.5.1 Harventaminen

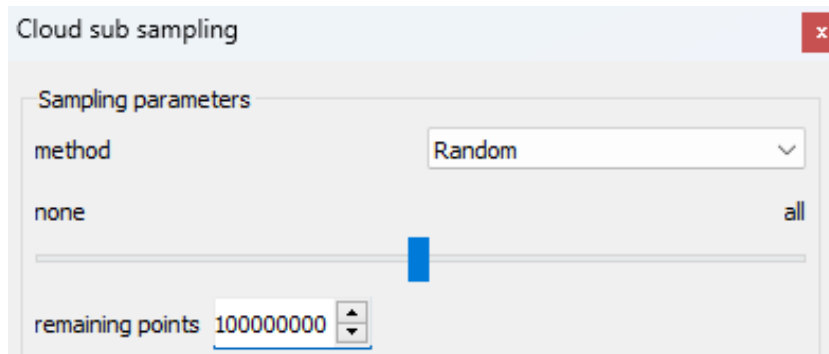
Alkutilanteessa pistepilvien tiedostokoot saattavat olla suuria johtuen suuresta pistemäärästä. Pistemäärää voidaan pienentää pistepilven harvennuksella.

Pistepilven harventaminen tehdään tietokoneavusteisesti. Harventamista voidaan tehdä monilla eri ohjelmistoilla. Harventaminen on tarpeellista liian suurien tiedostokokojen pienentämiseksi, jotta pistepilvi käyttää vähemmän tietokoneen resursseja myöhemmissä pistepilven muokkaamisen vaiheissa. Harvennuksen voi suorittaa erilaisia logiikoita hyödyntäen. Erilaisia menetelmiä ovat esimerkiksi satunnaismenetelmä, pisteiden välisen etäisyyden pakottamisen menetelmä ja datapuukurakenteen mukainen menetelmä. (CloudCompare, 2023)

Harvennuksessa on aina huomioitava, että pistepilven tarkkuustaso heikkenee harvennuksen seurauksena. Riittävä tarkkuustaso on määritettävä tehtäväkohtaisesti.

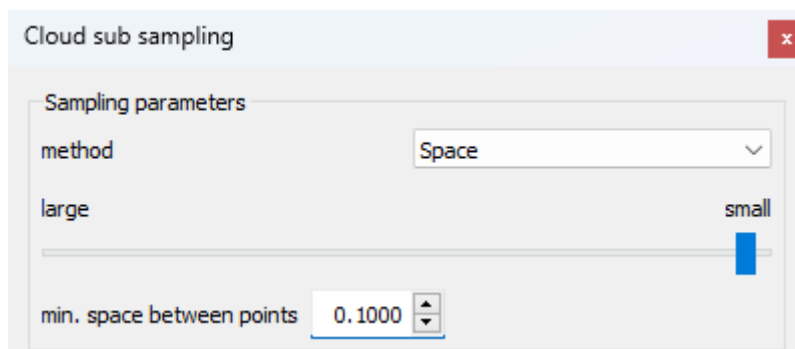
Satunnaismenetelmässä harvennuksessa pistepilven pistemäärää rajoitetaan poistamalla pisteitä satunnaisotannalla. Harvennuksen tavoite ilmoitetaan käytävästä ohjelmistosta riippuen tavoitepistemäärällä tai prosenttiosuudella. Tavoitepistemäärässä ilmoitetaan haluttu pistemäärä harvennuksen jälkeen ja ohjelmisto poistaa ylimääräiset pisteet satunnaisotannalla. Kuvassa 12 on esimerkki harvennuksesta tavoitepistemäärällä, 100 miljoonaa pistettä, CloudCompare v2.12.3 – ohjelmistolla. Prosenttiosuudella harvennettaessa ilmoitetaan koko datamäärästä haluttu jäännösprosenttiosuus. Ohjelmisto poistaa puolet pisteistä satunnaisotannalla, kun ilmoitetaan harvennuksen jälkeen tavoitepistemääräksi 50 % alkuperäisestä.

Satunnaisotannalla harvennettaessa pistepilven pistetiheys muuttuu samassa suhteessa harvennuksen kanssa. Alueilla, joilla on alkuperäisessä pistepilvessä paljon pisteitä tilavuusyksikössä suhteessa mallin muihin alueisiin, on todennäköisesti enemmän pisteitä tilavuusyksikössä myös harvennuksen jälkeen. (CloudCompare, 2023)



Kuva 12 Pistepilven harvennus satunnaismenetelmällä (CloudCompare v2.12.3)

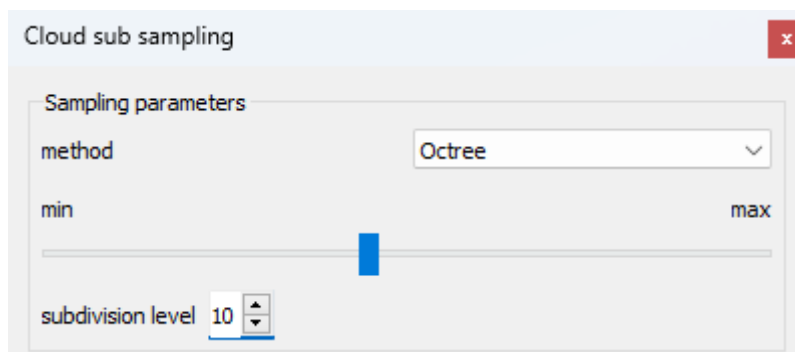
Harvennetaessa pakottamalla pisteille tietty tavoite-etäisyys, ohjelmisto poistaa määrättyä etäisyyttä lähempänä toisiaan olevat pisteet. Kuvassa 13 on esimerkki harvennuksesta pisteiden tavoite-etäisyydellä, 10 cm, CloudCompare v2.12.3 – ohjelmistolla. Kuvassa 13 on esitetty pistepilven harvennus tavoite-etäisyyden perusteella CloudCompare v2.12.3 – ohjelmistossa. Harvennetaessa tavoite-etäisyydellä, pistetiheydestä tulee vakio koko pistepilven osalta.



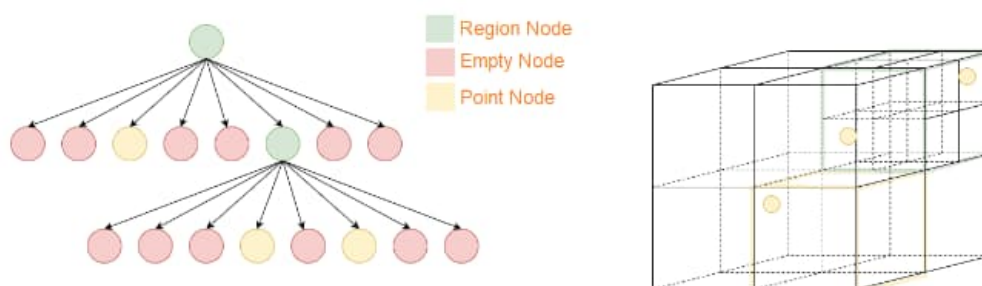
Kuva 13 Pistepilven harvennus pisteiden tavoite-etäisyydellä (CloudCompare v2.12.3)

Harventaa voidaan myös datapuurakenteen (CloudComparessa Octree) avulla. Datapuurakenteessa (kuva 15) pistepilvi jaetaan tasan määrättyihin laatikoihin. Pistepilvi koostuu alkuvaiheessa yhdestä laatikosta, joka pitää sisällään kaikki pisteet. Tämä laatikko voidaan jakaa datapuurakenteen mukaisesti laatikoihin. Tässä tapauksessa jako tapahtuu kahdeksaan laatikkoon. Tämä prosessi toistetaan halutun kertamäärän mukaan, jolloin jo jaetut laatikot jaetaan edelleen kahdeksaan pienempään, ja niin edelleen. Jokaisessa laatikossa määrätään olevaksi enintään yksi piste. Laatikko voi olla myös ilman pistettä. Kuvassa 14 on esimerkki harvennuksesta datapuurakenteen perusteella CloudCompare v2.12.3 –

ohjelmistolla. Datapuurakenne jaetaan kahdeksaan osaan kuvan esimerkin tapauksessa kymmenen kertaa. (OpenGenus, 2023) (CloudCompare, 2023).



Kuva 14 Pistepilven harvennus datapuurakenteen avulla (CloudCompare v2.12.3)



Kuva 15 Datapuurakenteen periaate (OpenGenus, 2023)

Harventamista voidaan tehdä monilla eri ohjelmistoilla ja se tehdään aina tietokoneavusteisesti. Edellä mainitut harvennuksen eri vaihtoehdot löytyvät ohjelmistosta CloudCompare v2.12.3, mutta samoja tai samankaltaisia harvennustyökaluja löytyy myös muilta pistepilven käsittelyyn kehitetyistä ohjelmistoista. Harvennus tehdään käytännön sovellutuksissa valtaosalle pistepilvistä.

2.5.2 Pilkkominen

Pistepilvissä on usein hyvin paljon projektin kannalta tarpeetonta informaatiota. Tätä tarpeetonta dataa, eli pisteitä, vähennetään harventamisen lisäksi pistepilveä pilkkomalla. Pilkkomalla ylimääräiset alueet pois pistepilvessä päästään paremmin tiettyyn jalostamiseen soveltuvaan pistepilveen eikä tarpeettomat pisteet häiritse tai vie tietokoneen kapasiteettia. Tiedostokoko pienenee pistepilvimallia

pilkottaessa. Pilkkominen tehdään aina pistepilven käyttötarkoitusta silmällä pitäen. Esimerkiksi rakennuksen pihamaalta voidaan poistaa piharakenteita, jos pistepilven informaatiota käytetään itse rakennuksen kantavien rakenteiden määrittämiseksi. Kuvassa 16 on esitetty savupiippurakenteen pilkkominen. Rajalaatikon (kuvassa vihreä alue) avulla pistepilvestä poistetaan ylimääräiset piha-alueet, koska kyseisen testikohteen tutkimuksen tehtävänä on vain piipun rakenteet. (CloudCompare, 2023) (McNeel, 2023)



Kuva 16 Pistepilvestä pilkottu piha-alue pois rajalaatikon avulla (A-Insinöörit Suunnittelu Oy)

Pilkkominen suoritetaan tietokoneavusteisesti. Pilkkomiseen tarkoitettuja työkaluja löytyy pistepilven muokkaamiseen tarkoitetuista ohjelmista. Pilkkominen suoritetaan esimerkiksi määritettyjen koordinaatiston raja-arvojen avulla. Rajattua aluetta kuvataan usein laatikkona. Laatikon sisäpuolelle jäävät pisteet otetaan mukaan pilkottuun pistepilveen. (McNeel, 2023)

2.5.3 Yhdistäminen

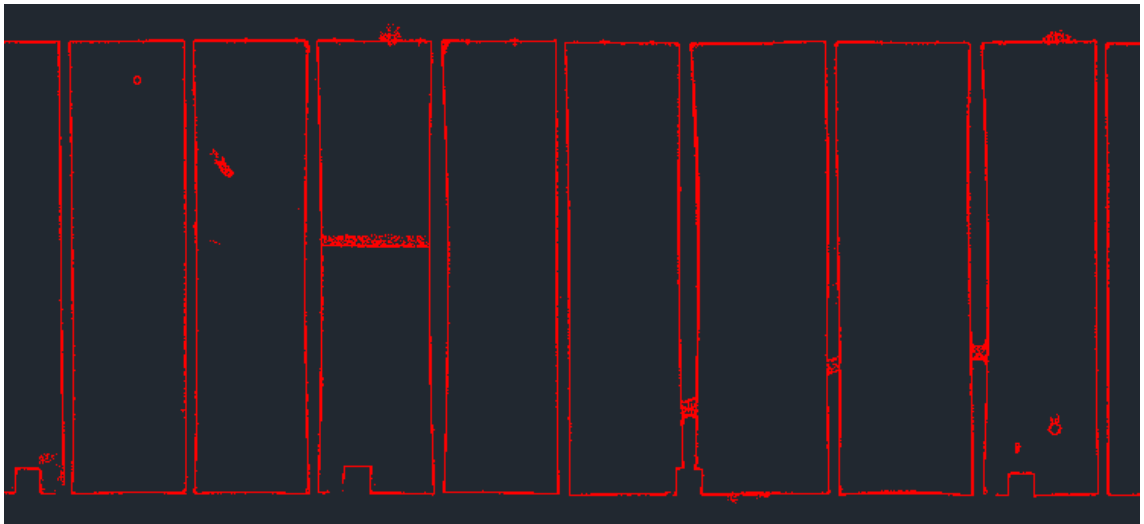
Pistepilviä on monesti syytä yhdistää projektikonaisuuden myöhemmän jalostamisen takia. Pistepilvien tuottaminen koko rakennuksesta tehdään usein use-

ampaan tiedostoon. Esimerkiksi pistepilvet voidaan koota rakennuksesta kerroksittain eri tiedostoihin tai sisätiloja voidaan kartoittaa laserkeilaamalla ja rakennuksen ulkovaipan ulkopintaa fotogrammetrialla kopterikuvauksen keinoin. Näin ollen projektikonaisuus on useammassa pistepilviaineistossa. Pistepilviaineistoja on yhdistettävä, mikäli on tarve saada koko rakennus samaan pistepilvitiedostoon. (CloudCompare, 2023)

2.5.4 Leikkaustasoesityksen tekeminen

Pistepilvi voidaan jakaa leikkauksiin tarkasteltavan osakokonaisuuden mukaan. Leikkauksessa otetaan tarkasteluun tietty tasomainen leikekohta pistepilvestä. Esimerkiksi leikkaus voidaan ottaa koordinaatiston xy -tasossa korkeudelta z , jolloin saadaan tietyllä korkeudella sijaitsevat pisteet pistepilvestä mukaan. Tällöin lopputulos muistuttaa rakennuksen tasokuvaa tietyistä kerroksesta. Leikkaustaso voi olla myös xz - tai yz -taso, tai mikä tahansa mielivaltaisesti orientoitu taso koordinaatistossa. Tason asema siirtyy tasoon nähden kohtisuoran vektorin muuttujan perusteella. (CloudCompare, 2023) (McNeel, 2023)

Rakennesuunnittelussa leikkaustasot ovat usein kiinnostavaa informaatiota. Myös suunnittelun lopputuotteena toimivat usein piirustukset, jotka kuvaavat tiettyjä leikkaustasoja tietyistä rakennuksesta. Näin ollen rakennesuunnittelussa on usein oleellista jakaa pistepilviaineistoa haluttuihin leikkaustasoihin. Leikkaustasoista saadaan rakennelaskentaan ja rakennelaskentamallia varten informaatiota, kuten kantavien rakenteiden asemia ja dimensioita. Leikkaustasoja jalostamalla saadaan hyödyllistä referenssiaineistoa laskentamallin lähtötietotarpeisiin. Pistepilven pisteet voidaan muuttaa suoraan esimerkiksi pisteiksi dwg-tiedostoon, jota voi hyödyntää RFEM 5.25 – laskentamallin referenssitiedostona. Kuvassa 17 on esitetty pistepilvistä otettu tasoleikkaus dwg-tiedostona. Tarkasteltavana kohteena on esitetty kantava palkisto.



Kuva 17 Pistepilvestä otettu tasokuva: lattiapalkistot

2.6 Elementtimenetelmä ja FEM-laskenta

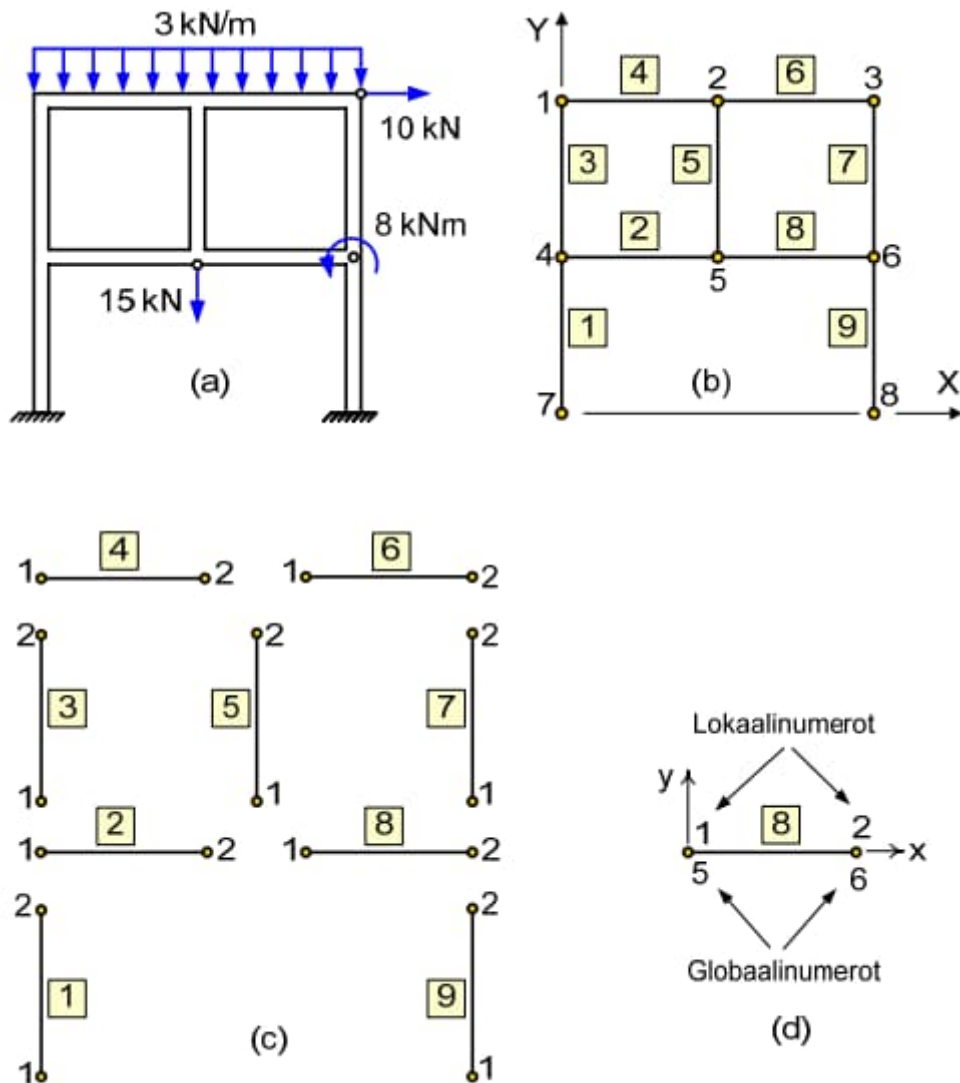
2.6.1 Elementtimenetelmä

FEM-analyysi (Finite Element Method) on kehitetty mekaniikan ja statiikan tehtävien ratkaisemiseksi. Suomeksi tätä metodia kutsutaan elementtimenetelmäksi. Elementtimenetelmässä rakennejärjestelmä tai rakenne jaetaan elementteihin, joiden käyttäytymistä tarkastellaan kuormitettaessa. Tavoitteena tehtävissä on ratkaista rakenneosien siirtymiä, muodonmuutoksia ja jännityksiä. (Lähteenmäki, 2012-2013)

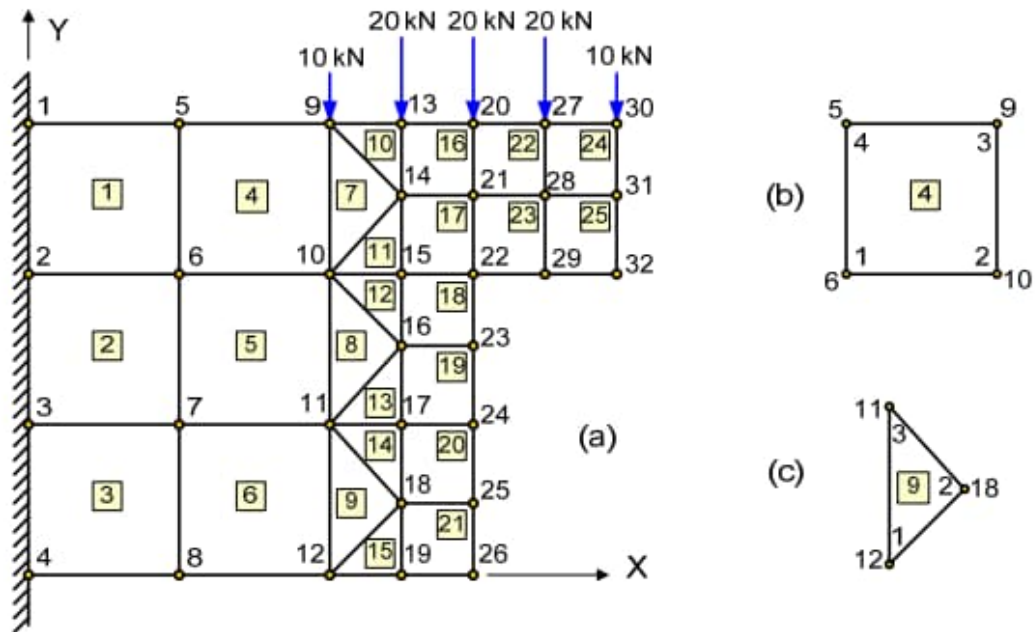
Tuloksia verrataan käytetyn rakennusmateriaalin (esim. teräsbetoni, teräs, puu) sallittuihin jännityksiin ja tapauskohtaisesti valittuihin muodonmuutoksien sekä siirtymien sallittuihin raja-arvoihin. Raja-arvojen ylittyessä rakenteen kapasiteettia on kasvatettava tai kuormitusta vähennettävä, jotta rakenne toimii hyväksytyllä tavalla. Näin elementtimenetelmää voidaan hyödyntää rakenteiden mitoituksessa.

Rakenneosien tuentaehdot ja kuormitukset ovat tiedossa. Ratkaisuja haetaan lujuusopin yhtälöiden avulla. Lujuusopin tehtäviä voidaan ratkaista elementtimenetelmällä. Ratkaisuja haetaan yhtälöryhmän analyttisellä ratkaisulla tai likimääräisellä numeerisella menetelmällä. Analyttinen menetelmä soveltuu tapauksiin,

joissa rakenneosalla tai rakennejärjestelmällä on yksinkertainen geometria, tuen-
taehdot ja kuormitustapaukset. Tietokoneiden laskentatehoa hyödyntäen liki-
määräisestä numeerisesta elementtimenetelmän metodista on tullut vallitseva
tapa suorittaa monimutkaisia lujuusopin tehtävien ratkaisuja. (Liu & Quek, 2003)
(Lähteenmäki, 2012-2013) Kuvassa 18 ja 19 on kuvattu esimerkit tasokehän ja
levyrakenteen elementtijaosta.



Kuva 18 Tasokehän elementtijaoko (Lähteenmäki, 2012-2013)



Kuva 19 Levyrakenteen elementtiverkko (Lähteenmäki, 2012-2013)

Kuvissa 18 ja 19 on kuvattu esimerkinomaisesti erilaisten rakenteiden elementtijakoa. Kuvassa 18 on kuvattu sauvamaisista rakenneosista (esim. pilareista ja palkeista) rakentuva tasokehä:

- tasokehä
- elementteihin jako ja solmupisteet (yksi mahdollisuus)
- eri elementit
- elementti numero 8

Kuvassa 19 on kuvattu levymäinen rakenneosa (esim. laatta, seinä tai levy):

- elementteihin jako ja solmupisteet (yksi mahdollisuus)
- tyypillinen nelikulmioelementti ja sen lokaali- ja globaalinumerointi
- tyypillinen kolmioelementti ja edellä mainittu numerointi

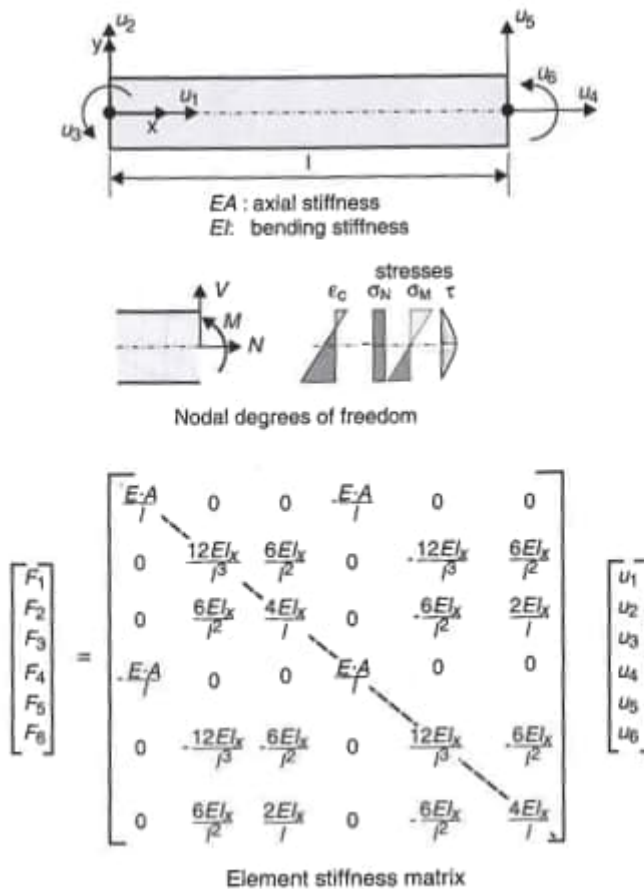
(Lähteenmäki, 2012-2013)

Elementtijaossa rakenneosa tai -järjestelmä jaetaan geometrialtaan yksinkertaisiksi osiksi. Vaikeasti analysoitava kappale tai järjestelmä jaetaan osiin, joilla on alku ja loppu. Nämä elementit kiinnittyvät toisiinsa ja rakenteen tukipisteisiin solmupisteiden avulla. Elementtien järjevä koko vaihtelee käsillä olevan tehtävän mukaan. Myös rakennejärjestelmän yksittäisen kohdan tai osan elementtiverkon koko voi vaihdella.

Elementtijaon jälkeen oleellista on selvittää lujuusopin menetelmin elementtiverkon solmupisteiden siirtymä- ja voimasuureet.

- solmuisiirtymät
 - o translaatio
 - o rotaatio
- solmujen voimasuureet
 - o jännityskomponentit
 - o valitun poikkileikkauksen rasitukset
 - o pintarakenteen leikkauksen rasitustiheydet

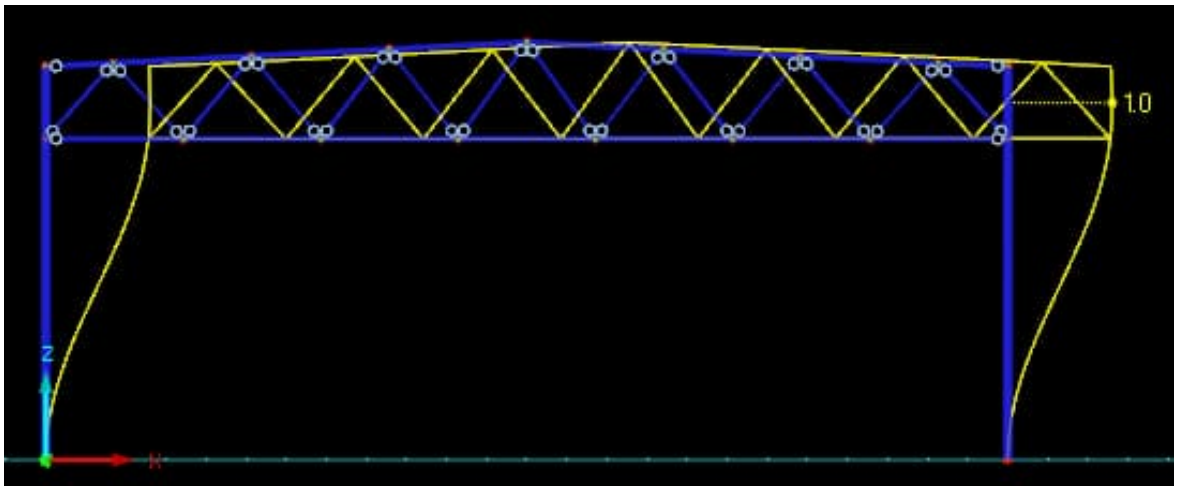
Selvitettävät solmujen suuret riippuvat selvitetävän objektin ominaisuuksista. Solmupisteiden ja elementtien määrä on usein suuri elementtiverkossa. Elementtimenetelmässä numeroidaan eri elementtiverkon osat systemaattisesti ja laskennassa käytetään matriisilaskentaa. (Lähteenmäki, 2012-2013) Kuvassa 20 on esitetty sauvaelementin jännitykset ja jäykkyyismatriisi.



Kuva 20 Kaksisolmuisen sauvaelementin jännitykset ja jäykkyyismatriisi (Rom-bach, G.A., 2011)

2.6.2 FEM-malli

Tietokoneiden laskentatehon kehitys on mahdollistanut tietokoneavusteisten lujuusopin ongelmien ratkaisemisen. Tämä on avannut rakennesuunnittelijoille mahdollisuuden monimutkaisten numeeristen simulaatiotyökalujen käyttöön. Monia näistä ongelmista oli aikaisemmin mahdollisuus ratkaista vain kokeellisin menetelmin. Lujuusopin tehtävät johtavat usein differentiaaliyhtälöihin, joihin elementtimenetelmä on tarjonnut ratkaisutapoja. FEM-laskentaohjelmat hyödyntävät esimerkiksi edellisessä kappaleessa mainittua likimääräistä numeerista elementtimenetelmää rakenneanalyysin toteuttamiseksi. Monesti rakenneanalyysissä on syytä ottaa epälineaarisuus huomioon. Rakennemallien epälineaarinen analysointi on lineaarisia malleja raskaampaa ja vaatii entistä enemmän resursseja. (Wriggers, 2008) (Rombach, 2011) Kuvassa 21 on esimerkki FEM-laskennan tuloksena saadusta kehärakenteen siirtymästä.



Kuva 21 FEM-laskentamalli: Kehärakenne ja ratkaistu siirtymä, RFEM 5.25

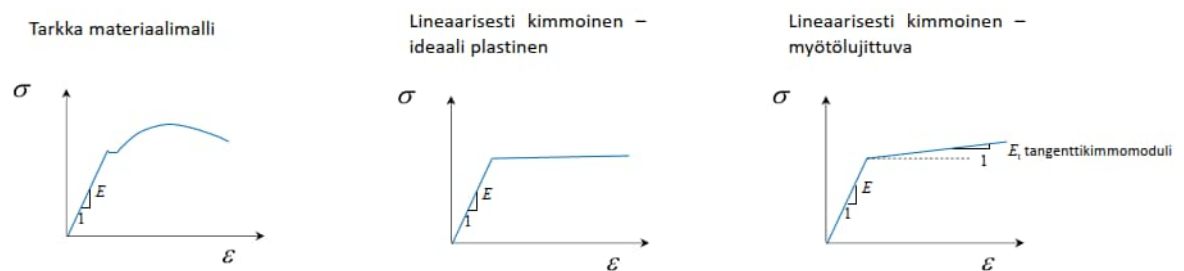
Epälineaarisuus kuvaa yksinkertaistettua lineaarista analyysiä paremmin rakenteiden todellista käyttäytymistä. Todellisuudessa rakenteet käyttäytyvät aina enemmän tai vähemmän epälineaarisesti. Myös tähän lujuusopin ongelmaan FEM-laskenta on tuonut ratkaisumahdollisuuksia. FEM-laskennan yleistyttyä on pystytty tekemään tarkempia ja todellista tilannetta kuvaavampia analyysejä ottaen huomioon myös epälineaarisen käyttäytymisen.

Rakenteiden epälineaarisuus esiintyy kolmella eri tavalla.

1. Geometrinen epälineaarisuus
2. Materiaalin epälineaarisuus
3. Reunaehtojen epälineaarisuus

Geometrisen epälineaarisuuden ilmiö tarkoittaa käytännössä sitä, että kuormitus aiheuttaa rakenteeseen tietyn muodonmuutoksen, jolloin edellinen rakennemalli on muuttunut oleellisesti, mutta rakenteen kuormitus on pysynyt ennallaan. Näin ollen rakenteen käyttäytyminen on tarkastettava tilanteessa, jossa muodonmuutokset ovat tapahtuneet, mutta rakennetta edelleen kuormitetaan. Kun tämä toistetaan monta kertaa, saadaan lopullinen muodonmuutos. Eli voidaan tehdä esimerkiksi lineaarinen rakennetarkastelu useaan kertaan niin, että edellisen vaiheen muodonmuutokset jätetään seuraavan tarkastelun lähtötilanteeksi. Esimerkiksi näin voidaan tehdä likimääräistä numeerista tarkastelua. Staattinen tasapaino toteutuu deformatiivisessa lopputilanteessa. (Jalkanen, 2022)

Rakenteen materiaalmalli voi olla myös epälineaarinen. Lineaarinen materiaalmalli on yksinkertaistus todellisesta tilanteesta, jossa jännitys ja venymä on suoraan verrannolliset. Epälineaarinen materiaalmalli on lähempänä todellista tilannetta. Jännitysten kasvaessa materiaalin venymä ei kasva enää samassa suhteessa. Erilaisia materiaalmalleja on esitelty kuvassa 22.



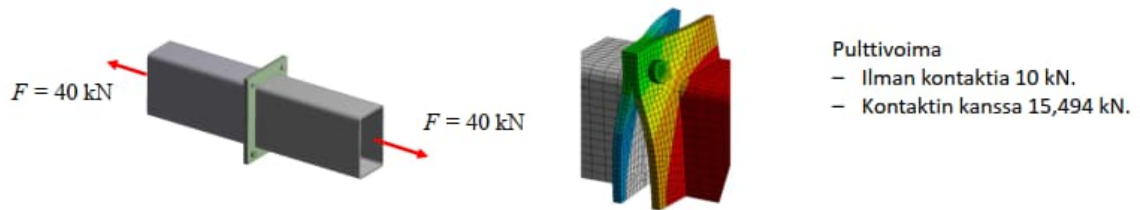
Kuva 22 Epälineaarinen ja lineaarinen materiaalmalli (Jalkanen, 2022)

Materiaalin ja geometrian lisäksi rakenne voi olla epälineaarinen reunaehtojensa suhteen:

- kuormitus: rakenteen kuormituksen suuruus tai suunta muuttuu esimerkiksi muodonmuutosten takia
- kontakti: muodonmuutos aiheuttaa kontaktin toiseen rakenteeseen ja generoi muutoksia jännityksiin ja reunaehtoihin

- tukiehdot: rakennejärjestelmän tukiehdot muuttuvat muodonmuutoksien tapahduttua kuormitettaessa

Kuvassa 23 on esitetty esimerkki reunaehtojen epälineaarisuudesta (pulttien lisäksi kuormitus vipuvoimien vaikutuksesta).



Kuva 23 Reunaehtojen epälineaarisuus kontaktin takia (Jalkanen, 2022)

FEM-laskenta mahdollistaa edellä mainittujen epälineaaristen ilmiöiden mukaan ottamista osaksi rakenneanalyysiä. Perinteinen manuaalinen laskenta on tavallisesti yksinkertaistettua, joissa käsitellään rakenneratkaisuja lineaarisesti. RFEM – ohjelmistossa voidaan käyttää lineaarisen laskennan lisäksi epälineaarista analyysiä. Esimerkiksi RFEM:ssä voidaan tehdä likimääräinen geometrisesti ja materiaalisesti epälineaarinen analyysi (GMNIA: Geometrically and Materially Non-linear Analysis with Imperfections). (Wald & Jandera, 2019) Laskentaominaisuuksien ja -oletuksien variointi on yksi tietokoneavusteisen FEM-laskennan etuja.

Tietokoneiden hinnan ja laskentatehon kehitys sekä laskentaohjelmien ominaisuuksien, saatavuuden ja käyttäjäystävällisyyden parantuminen on tehnyt FEM-analyysistä valtavirtaa rakennelaskennassa. Rakennesuunnittelijan on kuitenkin aina hyvä muistaa, että FEM-malli on vain numeerinen työkalu, joka perustuu moniin oletuksiin ja yksinkertaistuksiin. Näin ollen rakennelaskelmiin ei voida luottaa sokeasti vaan niitä on arvioitava luotettavuuden ja laadun näkökulmasta. (Rombach, 2011)

2.6.3 Mittatarkkuus toisen kertaluvun laskennassa

Rakeneanalyysissä voidaan tehdä sitä tarkempaa laskentaa, mitä tarkemmat lähtötiedot ovat. Niin sanottu toisen kertaluvun laskenta ottaa huomioon rakeneosan muodonmuutokset ja analysoi rakennetta muodonmuutosten tapahduttua. (Jalkanen, 2022)

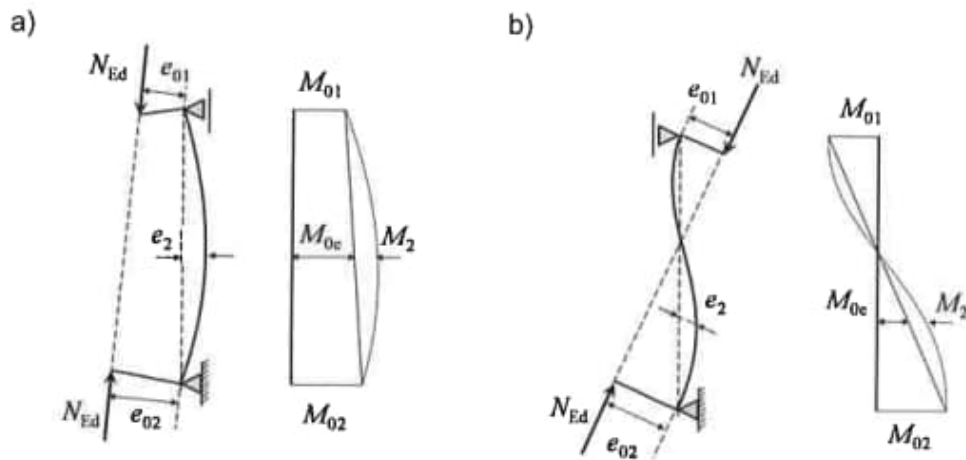
Rakenneanalyysi aloitetaan muuttuneesta tilanteesta. Analyyttisiin rakennelaskennan differentiaaliyhtälöihin on otettu huomioon alkutilanteen muodonmuutokset tai reunaehtojen muutokset, jotka voivat aiheuttaa rakenteelle lisäjännityksiä. Esimerkiksi kuormitetun palkin rakenneanalyysi aloitetaan taipuman tapahduttua. Toisen kertaluvun laskenta on epätarkempaa FEM-laskennassa tehtävän likimääräisen geometrisesti epälineaarisen analyysiin verrattuna. (Wald & Jandera, 2019) FEM-laskennan menetelmiä voidaan yhdistää toisen kertaluvun menetelmän kanssa. Likimääräinen geometrisesti epälineaarinen laskenta voidaan aloittaa toisen kertaluvun muuttuneesta lähtötilanteesta. Lähtötilanne voidaan määrittää esimerkiksi tarkan mittausaineiston avulla.

Rakennelaskennassa rakenneosille voidaan määrittää alkuvinoumia ja kuormien epäkeskisyyksiä. Vinoudet ja epäkeskisyydet aiheuttavat rakenneosille sisäisiä jännityksiä. Vinoudet ja epäkeskisyydet voidaan määrittää ohjearvojen perusteella, jolloin rakenneosalle määritetään arvio mittapoikkeamista. Laskenta ei välttämättä vastaa todellista tilannetta.

Tarkalla mittatiedolla rakenteesta voidaan saada rakenneosan todelliset alkuvinoumat, muodonmuutokset (esim. taipumat tai kiertymät) tai kuorman epäkeskeisyys. Tarkalla mittatiedolla voidaan osoittaa tarkemmat laskentaoletukset rakenneanalyysiä varten. Näin ollen pistepilven mitta-aineisto voi tuoda hyötyjä yksittäisten osien rakenneanalysointiin. Voidaan esimerkiksi tehdä laskentamalli, jossa pilarin alkuvinouma on mallinnettu analyysia varten. Vanhan palkin taipuma voidaan huomioida tarvittaessa laskennan alkutilanteessa.

Esimerkiksi pystykuormitetun teräsbetonipilarin mitoituksessa otetaan huomioon mittaepätarkkuudesta johtuva kuorman epäkeskeisyyden aiheuttama momentti sekä toisen kertaluvun momentti. Tarkan mittaustuloksen perusteella voidaan teoriassa todeta kuorman epäkeskisyydestä aiheutuva momentti, joka johtuu pystykuorman asemasta ja suunnasta ja/tai pilarin alkuvinoumasta. Usein mitausdata kerätään kuormitetussa tilanteessa, jolloin esimerkiksi taipumasta aiheutuvaa toisen kertaluvun momenttia voidaan myös arvioida. (Betoniyhdistys, 2014)

$$M_{Ed} = \max \begin{cases} M_{0e} + M_2 \\ M_{02} \\ M_{min} \end{cases} \quad (43/7)$$



Kuva 24 Jäykistetyin pilarin momenttijakauma (Betoniyhdistys, 2014)

Kuvassa 24 kuvataan jäykistetyin pilarin momenttikuormitusta kuorman epäkeskisyydestä ja toisen kertaluvun vaikutuksista johtuen.

- a) samanmerkkiset päiden momentit
- b) erimerkkiset päiden momentit

Vähimmäismomentti, M_{min} , tulee minimiepäkeskisyyden kautta. Vähimmäismomenttia ei tarvitse lisätä muihin momenttikuormituksiin, mutta ollessaan muuta momenttikuormista suurempi, vähimmäismomentista tulee mitoittava momentti. (Betoniyhdistys, 2014) Olemassa olevasta rakennuksesta on mitattavissa epäkeskisyydet, e_{01} ja e_{02} , sekä taipuman esiintyessä e_2 .

Kuorman epäkeskisyyden ja toisen kertaluvun aiheuttamat momentit ovat yleispäteviä mitoitus tapauksesta ja materiaalista riippumatta. Näitä voidaan tarkastella tarkan mittausaineiston avulla.

2.7 FEM-mallintaminen Dlubal RFEM 5.25

Tässä työssä FEM-laskennan ohjelmistona toimii RFEM 5.25. Työn kohdassa 3 ei oteta huomioon muiden ohjelmistojen lainalaisuuksia tai eriäviä ominaisuuksia.

2.7.1 Laitevaatimukset

RFEM mallintaminen ja rakenneanalyysit vaativat tietokoneen laskentatehoa. Seuraavassa taulukossa Dlubalin ilmoittamat tietokoneen vähimmäisvaatimukset. Taulukossa ilmoitettu myös suositellut laiteominaisuudet monimutkaista laskentaa varten. (Dlubal Software GmbH, 2020)

Taulukko 2 RFEM 5 laitevaatimukset (Dlubal Software GmbH, 2020)

Osa-alue	Vähimmäisvaatimus (suluissa suositeltu vaatimus)
Suoritin	x86 CPU, 2 GHz (neliydinprosessori)
Muisti	2 GB RAM (8 GB RAM)
Näytönohjain	OpenGL, resoluutio 1024x768
Käyttöjärjestelmä	Windows 7 tai uudempi, 64bit

2.7.2 Mallintaminen

RFEM-mallissa on käytössä eri mallinnustyökaluja ja osia (termit), joita käyttämällä tuotetaan haluttu rakennemalli. Eri termit on esitelty seuraavassa taulukossa. RFEM:ssä ei ole suomenkielistä käyttöliittymää, joten termit on esitetty myös mallinnuskielellä englanti. (Dlubal Software GmbH, 2020)

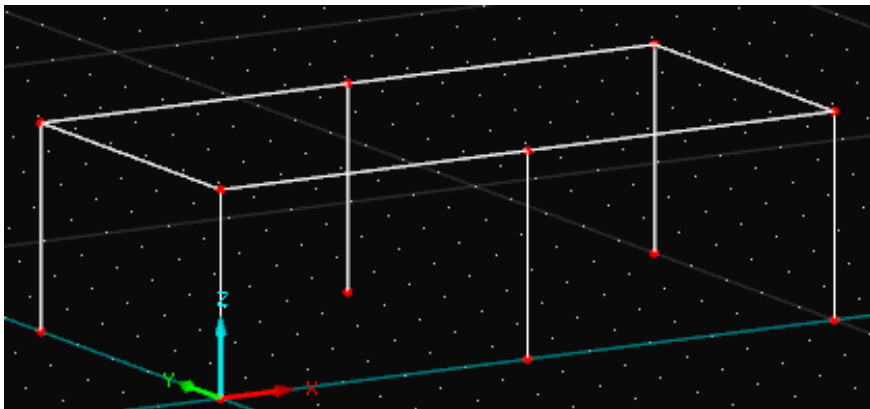
Taulukko 3 RFEM mallintamisen termit (Dlubal Software GmbH, 2020)

Termi	Lyhyt kuvaus
Node (solmupiste)	Piste, jolla on sijainti. Käytetään solmupisteenä rakenteen muodostamiseksi.
Line (viiva)	Kaksi pistettä voi yhdistää viivalla. Käytetään rakenteen muodostamiseksi (viivamaiset objektit).
Member (jäsen, rakenneos)	Memberillä syötetään viivalle ominaisuudet, kuten materiaalin, poikkileikkaus, jäykkyysominaisuudet ja vapautusasteet. Tässä työssä jäsenestä käytetään nimitystä rakenneos tai eng. versiota member (vakiintunut ilmaisu puhekielessä).

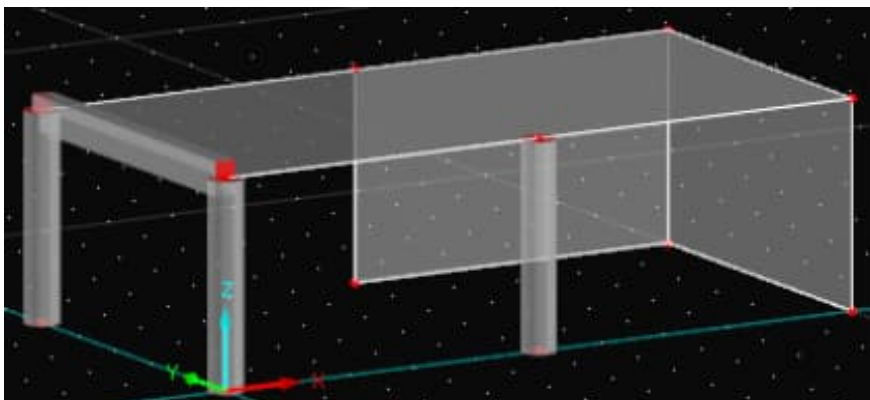
Set of members (yhdistetyt jäsenet)	Useampi member yhdistettynä. Yhdistetyt memberit ovat yhtenäisesti kiinnitetty solmupisteeseen (esim. jatkuva palkki).
Surface (kuori)	Vähintään kolmen viivan rajaama alue, joka muodostaa kuoren. Kuorelle syötetään ominaisuuksia, kuten materiaali, paksuus, jäykkyysominaisuudet ja vapautusasteet.
Solid (kappale)	Kappale on kuorien rajaama alue. Kappaleelle voidaan syöttää ominaisuuksia, kuten materiaali, jäykkyys ja vapautusasteet.
Nodal support (pistemäinen tuki)	Pistemäinen tuki on pisteeseen sidottu tuki, jolle syötetään tukiehdot ja vapautusasteet.
Line support (viivamainen tuki)	Viivamainen tuki on viivaan sidottu tuki, jolle syötetään tukiehdot ja vapautusasteet.
Surface support (kuorimainen tuki)	Kuorimainen tuki on kuoreen sidottu tuki, jolle syötetään tukiehdot ja vapautusasteet.
Nodal load (pistekuorma)	Pistekuorma on pisteeseen sidottu kuorma, jolle syötetään suuruus ja suunta. Kuorma voi olla voima (esim. kN) tai momentti (esim. kNm).
Line load (viivakuorma)	Viivakuorma on viivaan sidottu kuorma, jolle syötetään suuruus, suunta ja muoto (tasainen tai muuttuva kuorma). Kuorma voi olla voima (esim. kN) tai momentti (esim. kNm).
Member load (kuorma jäsenelle)	Kuorma rakenneosalle on memberiin sidottu kuorma, jolle syötetään suuruus, suunta ja muoto. Kuorma voi olla voima tai momentti, mutta myös lämpötilan muutos tai pakkovoima.
Surface load (pintakuorma)	Pintakuorma on kuoreen sidottu kuorma, jolle syötetään suuruus, suunta ja muoto. Kuorma voi olla voima tai momentti, mutta myös lämpötilan muutos tai alkumuodonmuutos.
Solid load (kappaleen kuorma)	Kappaleen kuorma on kappaleeseen sidottu kuorma, jolle syötetään suuruus, suunta ja muoto. Kuorma voi olla voima tai momentti.

Load case (kuormitustapaus)	Kuormitustapaus on määritetty joukko samasta ilmiöstä johtuvia kuormia. Esimerkiksi omat painot, lumikuorma tai tuulikuorma. Määritetyt kuormat syötetään kuormitustapaukselle käyttörajatilassa ilman varmuuskertoimia.
Load compination (kuormitusyhdistely)	Kuormitusyhdistelyt koostuvat eri kuormitustapauksia, jotka oletetaan vaikuttavan rakenteeseen samanaikaisesti. Esimerkiksi omat painot + lumikuorma. Kuormitusyhdistelyissä lisätään halutut varmuuskertoimet kuormitustapauksille.
Result compination (tulosten yhdistely)	Tulosten yhdistely yhdistää eri kuormitustapausten tulokset.

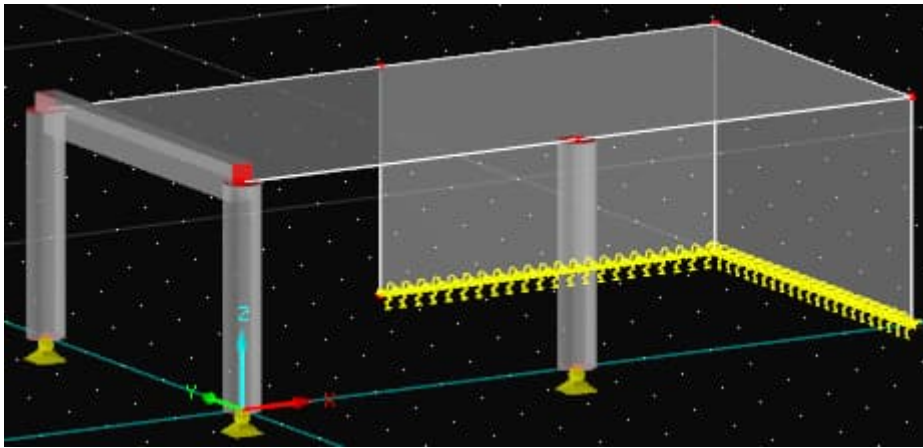
RFEM-laskentamalli muodostuu taulukon 3 mukaisista termeistä. Termejä yhdistelemällä saadaan aikaiseksi haluttu laskentamalli. Kuvissa 25–29 esitetty taulukon 3 mallintamiseen liittyviä termejä visuaalisesti.



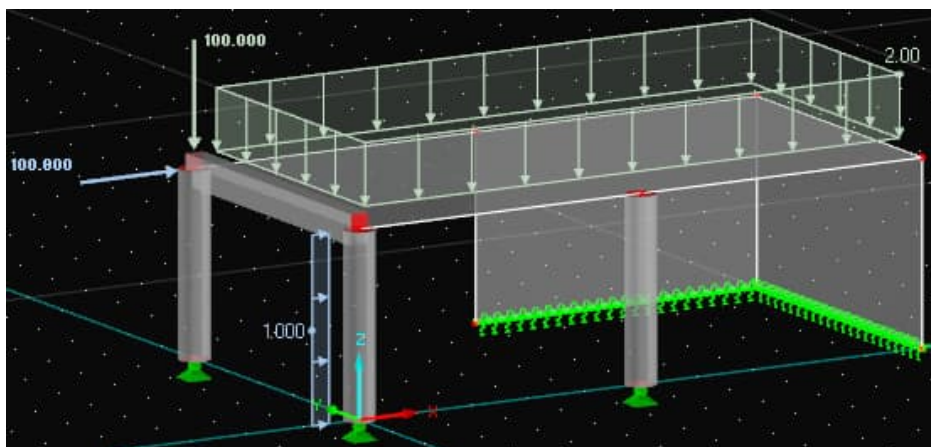
Kuva 25 Solmupisteet ja viivat (RFEM 5.25)



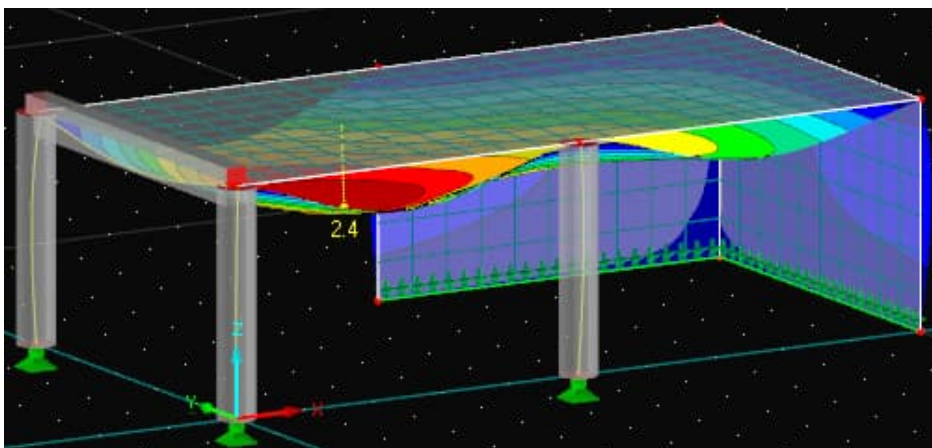
Kuva 26 Kuori- ja rakenneosaelementit (RFEM 5.25)



Kuva 27 Lisätty piste- ja viivatuet rakenteiden alle (RFEM 5.25)



Kuva 28 Lisätty rakenteelle piste-, viiva- ja pintakuormat (RFEM 5.25)



Kuva 29 Laskentatulokset: rakenteen muodonmuutokset [mm] (RFEM 5.25)

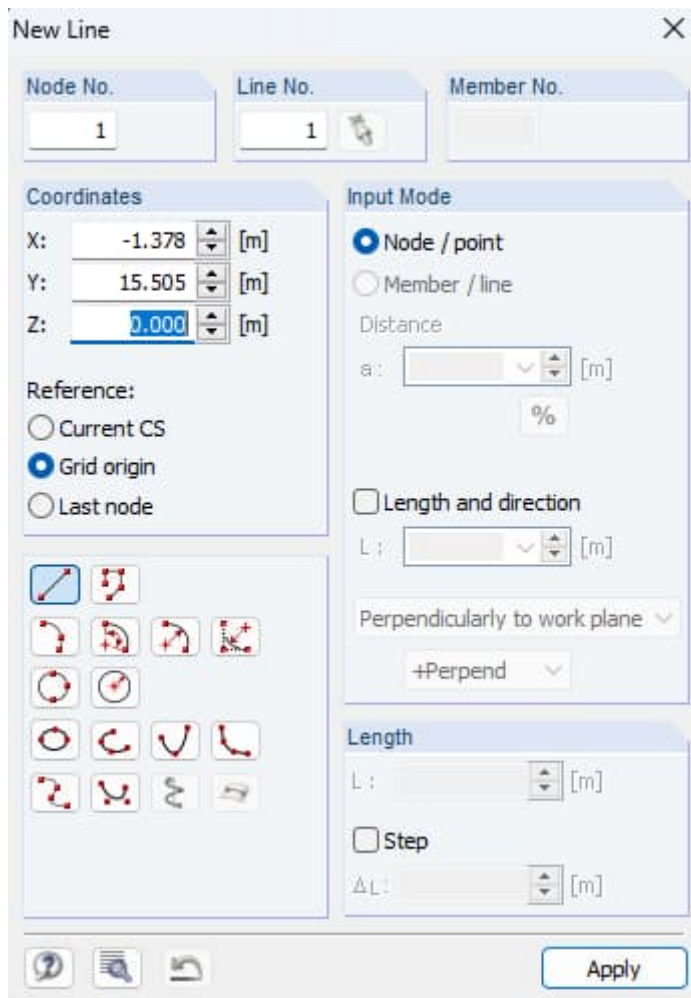
2.7.3 Solmupisteet ja viivat

Mallintaminen rakentuu solmupisteiden ympärille. Jokaisella solmupisteellä on sijainti mallissa. Solmupisteitä yhdistämällä saadaan viivoja, joista saadaan rakenteosia. Kaikki mallintaminen lähtee solmupisteistä. Pisteiden sijainnin hallinta on oleellista laskentamallia tehdessä, jotta rakenteen dimensiot vastaavat todellista tilannetta. Pisteillä ei ole muita ominaisuuksia kuin sijainti. (Dlubal Software GmbH, 2020) Kuvassa 30 esitetty pisteen luomisen dialogi RFEM 5.25 – ohjelmistossa.

Kuva 30 Dialogi solmupisteen lisäämiseksi (RFEM 5.25)

Viivat muodostavat laskentamallin muodon ja rankarakenteen yhdistelemällä pisteet. Viivalla on sijainnin (sidottuna alku- ja loppupisteen) lisäksi pituus, suunta ja muoto (esim. suora tai kaari). (Dlubal Software GmbH, 2020)

Solmupisteet ja viivat ovat laskentamallin lähtökohta ja kaikki muut laskentamallin ominaisuudet syötetään pisteiden ja viivojen ominaisuuksien mukaan (esim. rakenneosat, tuentaehdot ja kuormat). (Dlubal Software GmbH, 2020) Kuvassa 31 esitetty viivan luomisen dialogi RFEM 5.25 – ohjelmistossa.



Kuva 31 Dialogi viivan lisäämiseksi (RFEM 5.25)

Seuraavaksi käydään läpi muut oleellimmat laskentamallin osa-alueet menemättä syvemmälle eri kuormitustapauksiin tai tuloksien hallintaan.

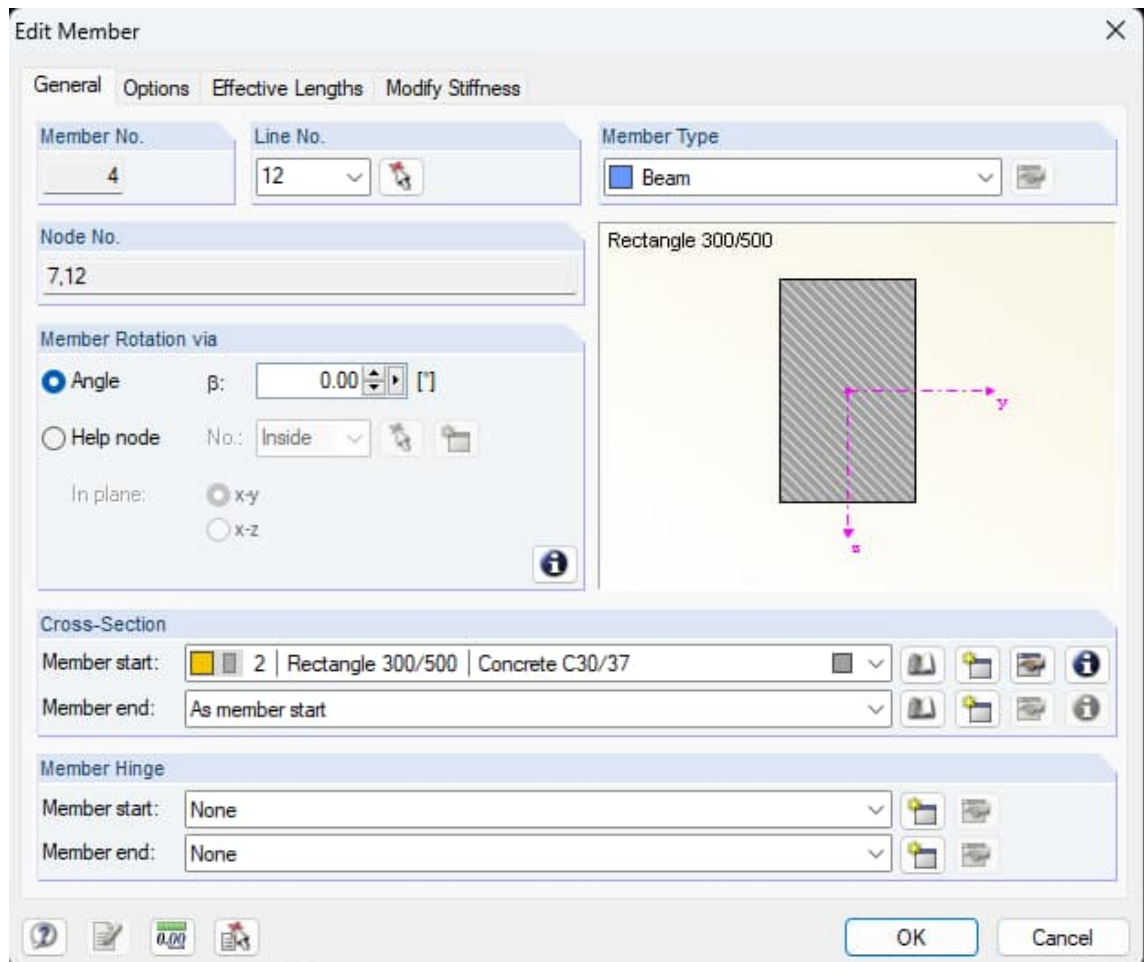
2.7.4 Rakenneosa (member)

Rakenneosaa muodostettaessa syötetään viivalle halutut rakenneosan ominaisuudet. (Dlubal Software GmbH, 2020) Ominaisuuksia ovat mm.

- materiaaliominaisuudet
- poikkileikkaus
- rakenneosan tyyppi

- alku- ja loppupisteen vapautusasteet

Kuvassa 32 esitetty rakenneosan luomisen ja muokkaamisen dialogi RFEM 5.25 – ohjelmistossa.



Kuva 32 Edit member -dialogi (RFEM 5.25)

Rakenneosan tyyppi vaikuttaa rakenneosan käyttäytymiseen osana laskentamallia. Seuraavassa kuvassa on kuvattu erilaisia tyyppejä. (Dlubal Software GmbH, 2020) Yleisimpiä ovat mm.

- palkki (beam)
- jäykkä kappale (ridig): ideaalijäykkä kappale, sitoo kaksi pistettä jäykästi
- köysi (cable): ottaa vain vetorasitusta
- sauva (truss (only N)): ottaa vain normaalivoimaa, puristus ja veto

Kuvassa 33 on esitetty erilaisia rakenneosien tyyppejä RFEM 5.25 – ohjelmistossa.

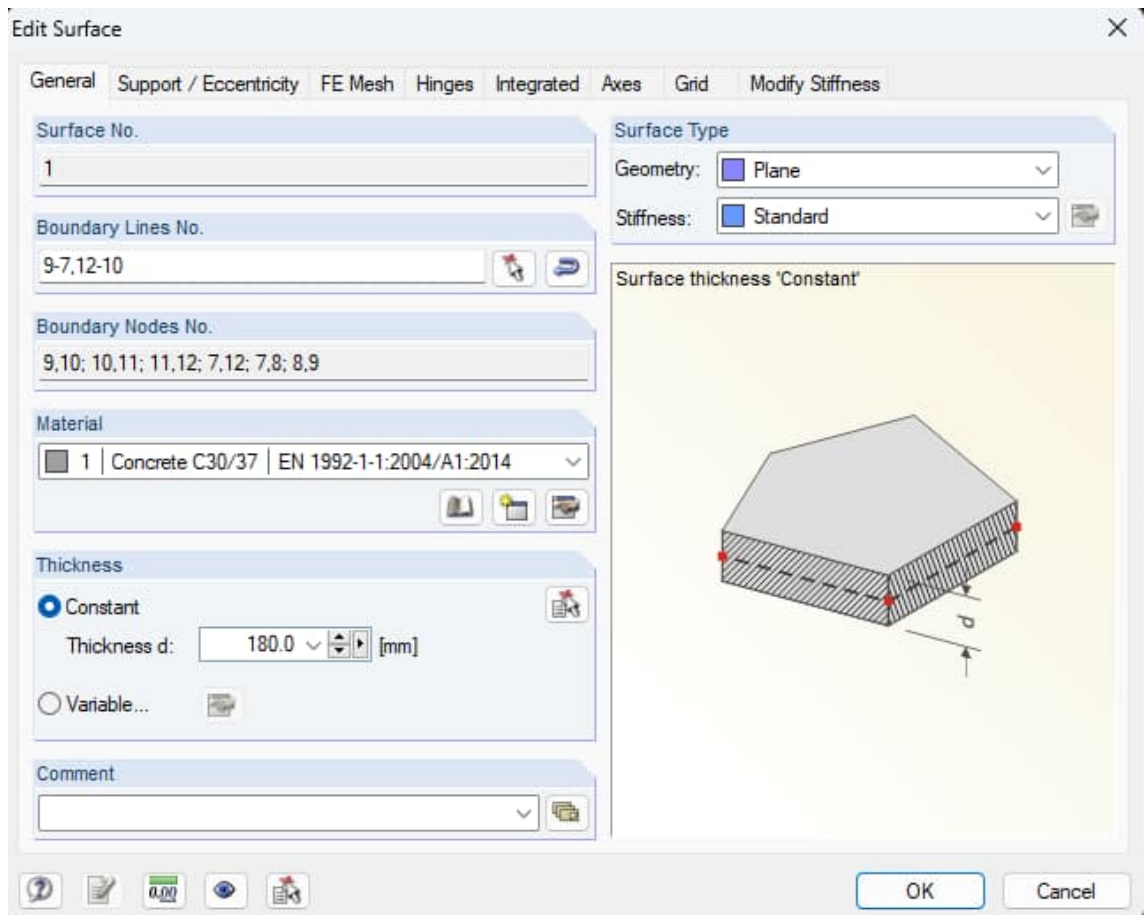


Kuva 33 Erilaisen member-tyypit (RFEM 5.25)

Elementtiverkkoa muodostettaessa rakenneosia on elementtejä, jotka jaetaan yhteen tai useampaan sauvamaiseen elementtiin. Elementtiverkon koko vaikuttaa oleellisesti laskentatarkkuuteen ja vaadittuun laskentakapasiteettiin. Yksi rakenneosa liittyy aina yhteen viivaan. (Dlubal Software GmbH, 2020)

2.7.5 Kuori (surface)

Kuori on elementti, joka rajautuu viivoihin. Kuorelle syötetään ominaisuuksia kuten materiaali ja paksuus. Ominaisuuksien perusteella kuorelle tulee ominainen jäykkyys. (Dlubal Software GmbH, 2020) Kuvassa 34 esitetty kuoren luomisen ja muokkaamisen dialogi RFEM 5.25 – ohjelmistossa.

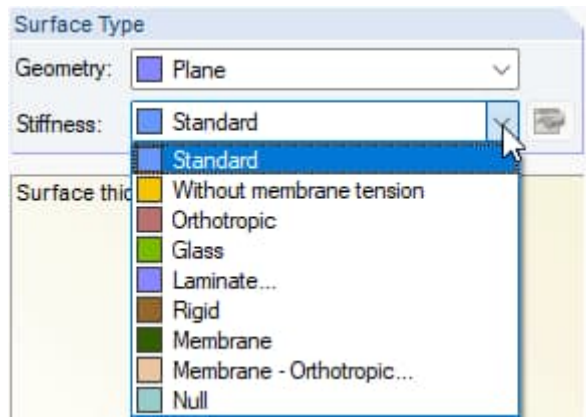


Kuva 34 Edit Surface -dialogi (RFEM 5.25)

Kuorityyppi vaikuttaa kuoren käyttäytymiseen osana laskentamallia. Seuraavassa kuvassa on kuvattu erilaisia tyyppejä. (Dlubal Software GmbH, 2020) Yleisimpiä ovat mm.

- normaali laatta (standard), yhtenevä jäykkyys eri suuntiin)
- ortotrooppinen laatta (orthotropic), ortotrooppinen materiaali, eli erilainen jäykkyys eri laatan suunnissa
- kalvomainen rakenne (membrane), ottaa vain vetorasitusta ja muodostaa kalvon

Kuvassa 35 on esitetty erilaisia kuorityyppejä RFEM 5.25 – ohjelmistossa.



Kuva 35 Eri kuorityypit (RFEM 5.25)

Elementtiverkkoa muodostettaessa kuori on elementti, joka jaetaan yhteen tai useampaan elementtiin, jotka muodostavat verkkomaisen muodon. Elementtiverkon koko vaikuttaa oleellisesti laskentatarkkuuteen ja vaadittuun laskentakapasiteettiin. (Dlubal Software GmbH, 2020)

Kuoren muoto ja asema voi vaihdella tilanteen mukaan. Kuorella mallinnetaan esimerkiksi laatat ja seinät. Kuori on vapaamuotoinen kappale. Yleisimmät poikkeavat muodot ovat kaari ja sylinteri/putki. Kuoriin voidaan tehdä aukotuksia todellisen sovelluksen mukaisesti. Esimerkiksi seinään voidaan tehdä ovi- ja ikkuna-aukot, jotta laskentamallista tulee todellista tilannetta vastaava. (Dlubal Software GmbH, 2020)

2.8 Algoritmiavusteinen suunnittelu

Algoritmisia työkaluja voidaan käyttää suunnitteluprosesseissa. Suunnittelun päämäärä ei eroa perinteisten menetelmien mukaisesta suunnitteluprosessista, mutta työvaiheita ohjataan ja linkitetään toisiinsa ohjelmoinnin keinoin. Algoritmiavusteisessa suunnittelussa on käytössä samat ohjelmistot kuin perinteisessä suunnittelussa. Ohjelmoinnin avulla voidaan kuitenkin ohjelmistoja ja työvaiheita yhdistää toisiinsa algoritmin avulla. Voidaan esimerkiksi ohjelmoida ohjeet rakennuksen rankamallin toteutuksesta ja linkittää tämä samanaikaisesti tietomallinnuksen ja rakennelaskentamallinnuksen ohjelmistoihin. Näin ollen ohjeen sisältämää parametriä muuttamalla voidaan samanaikaisesti muuttaa niin tietokuin rakennelaskentamallia. Tätä voidaan kutsua myös parametriseksi suunnit-

teluksi. Algoritmiavusteista suunnitteluprosessia voidaan hyödyntää niin yksittäisessä suunnitteluprosessin vaiheessa kuin koko suunnitteluprosessissa. (Karjalainen, 2018)

2.8.1 Grasshopper

Algoritmiavusteista suunnittelua tehdään yleisesti visuaalisen ohjelmoinnin työkaluilla. Yksi yleisimmin käytetyistä visuaalisen ohjelmoinnin työkaluista on Grasshopper. Grasshopper toimii lisäosana yhdessä suunnitteluohjelmisto Rhinocerosin kanssa. Grasshopper on Rhinocerosin graafinen algoritmieditori. Visuaalisen ohjelmoinnin avulla luoduilla algoritmeilla voidaan ohjata Rhinocerosissa tapahtuvaa suunnittelua. (Karjalainen, 2018)

Grasshopperissa luodaan looginen ketju komponentteja, jotka käsittelevät ja muokkaavat tietoa, eli ohjaavat toimintaa. Komponentit toteuttavat tehtäviä niiden sisään ohjelmoitujen sääntöjen mukaisesti. Komponentteihin vaikutetaan parametreillä, jotka sisältävät tietoa. Tietoa, eli parametriä, muuttamalla muutetaan lopputulosta visuaalisen ohjelmoinnin ketjun logiikan mukaan. Tätä voidaan kutsua myös parametriseksi suunnitteluprosessiksi. (Karjalainen, 2018)

3 PISTEPILVEN HYÖDYNTÄMINEN FEM-LASKENNASSA

3.1 Tutkimusmenetelmä

Tutkimuksessa etsittiin soveltuvia reittejä pistepilvestä FEM-laskentamalliksi. Tutkimus toteutettiin erilaisten case- ja testikohteiden avulla. Case-kohteissa toteutettiin todellisia toimeksiantoja ja muu tutkimus suoritettiin testikohteilla.

Testikohteiden tarkoituksena oli ratkaista hypoteettisia haasteita ja etsiä vastauksia tutkimuksessa määritettyjä tavoitteita silmällä pitäen. Testikohteiden pistepilvet olivat todellisista kohteista.

Teoriasta ja kirjallisuudesta etsittiin toimintatapoja tutkimushaasteen ratkaisemiseksi. Tutkimuksessa tutustuttiin aikaisemmin tehtyihin kehitysprojekteihin ja testattiin tällä hetkellä yrityksen käytössä olevia tietokoneohjelmistoja.

Tutkimuksen aikana havaitut haasteet, mahdollisuudet ja tulokset kirjattiin tähän opinnäytteeseen.

Tutkimuksessa tehtiin ohjelmallista kehitystä parametrisellä suunnitteluohjelmalla, mutta visuaalista ohjelmointia ei julkaistu työssä.

3.2 Työn tilaaja

Tutkimuksen tilaajana toimi A-Insinöörit suunnittelu Oy. A-Insinöörit Suunnittelu Oy toimii pääasiassa konsulttiyrityksenä rakennusalan toimialalla. Suurimpana osa-alueena yrityksessä on rakennesuunnittelun konsulttipalvelut.

Työ on tilattu etsimään soveltuvia keinoja hyödyntää pistepilveä rakennesuunnittelun, tarkemmin FEM-laskentamallintamisen, tehtävissä.

3.3 Case- ja testikohteiden esittely

Työ on tehty case- ja testikohteita tutkimalla.

Case-kohteissa suoritettiin todellisia toimeksiantoja. Toimeksiantojen aikana havaittuja toimintamalleja ja ratkaisuja kirjattiin työn tuloksiin. Case-kohteita tutkimuksen aikana tehtiin kaksi kappaletta. Molemmissa case-kohteissa oli tarkoitus muokata pistepilvestä dwg-tasokuva rakenne- tai arkkitehtisuunnittelun hyödynnettäväksi. Case-kohteiden avulla tutkittiin muokausprosessia ja prosessin työkaluja. Seuraavassa tutkimuksen kannalta olennaiset tiedot case-kohteista.

1. Case-kohde

- olemassa oleva julkinen rakennus
- tiili- ja teräsbetonirunko
- valmistunut 1912
- tutkimuksen menetelmät olivat osa projektia niiltä osin, joilta sen todettiin edistävän projektia muita menetelmiä tehokkaammin
- toimeksiantona tuottaa dwg-leikkaustasoja xy-, xz- ja yz-tasoista arkkitehdin lähtötiedoksi
- inventoitu 2022

2. Case-kohde

- olemassa oleva julkinen rakennus
- teräsbetonirunko
- valmistunut 1959
- tutkimuksen menetelmät olivat osa projektia niiltä osin, joilta sen todettiin edistävän projektia muita menetelmiä tehokkaammin
- toimeksiantona tuottaa sijaintitietoa olemassa olevista palkistoista osaksi muuta suunnitteluprosessia
- toteutettiin tuottamalla palkistojen korkeudelta dwg-leikkaustasoja, jotka vietiin taustatiedostoiksi tietomallintamisen ohjelmaan
- inventoitu 2023

Testikohteissa tutkittiin ennen kaikkea case-kohteiden tutkimuksen jatkoksi muokatun pistepilven jalostamista nimenomaan FEM-mallia varten. Todellisten toimeksiantojen puuttuessa tutkimus suoritettiin testikohteiden avulla. Ennen testikohteiden tutkimista pohdittiin soveltuvia polkuja teorian tasolla. Löydetyt erilaiset reitit muokatusta pistepilvestä rakennelaskentamalliksi on esitelty tutkimuksen tu-

loksissa. Testikohteissa on käytetty tutkimuksen tilaajan hallussa olevia pistepilviä todellisista kohteista. Testikohteilla simuloitiin todellisia rakennesuunnittelun tehtäviä.

Testikohteita varten rakennetut keinotekoiset tehtävät olivat seuraavia:

- pistepilven pisteet FEM-laskentamallin taustatiedostoksi
- tarkasteltavien leikkausten tuominen pisteinä FEM-mallin taustatiedostoksi
- tarkasteltavat pisteet solmupisteiksi ja viivoiksi FEM-malliin
- pisteet taulukko-ohjelman kautta solmupisteiksi FEM-malliin

3.4 Tutkimuksen rakenne

Tutkimus suoritettiin pääasiassa vuoden 2023 aikana. Tutkimuksessa edettiin loogisessa järjestyksessä lähtötietoaineistosta kohti laskentamallia. Jokaisessa käytännön case- ja testikohteessa oli spesifi lähtöpiste ja päämäärä.

Tutkimuksessa keskityttiin ensin pistepilven muokkaamiseen ja muokkaamisen toimintamallien kehitykseen pääasiassa case-toimeksiantojen kautta. Testikohteet jatkoivat käytännössä edellä tehtyjen pistepilven muokkausten ja tutkimusten tulosten jatkojalostamista laskentamallintamisen näkökulmasta.

Tutkimuksessa pistepilven muokkaamisen ja jatkojalostamisen lisäksi, edellä mainittujen rinnalla, tutkittiin rakennelaskentamallin laadunvarmistusta ja tarkkuutta työssä käsiteltyjen lähtötietojen ja rajausten näkökulmasta. Laadunvarmistusta pohdittiin tutkimuksen kaikissa vaiheissa. Tarkkuuden kannalta tutkittiin tarkan mittausaineiston hyödynnettävyyttä rakennelaskennan tarkkuuden parantamiseksi.

Case- ja testikohteiden aikana kirjoitettiin muistiinpanoja edellä olevien tutkimuskohteiden näkökulmasta. Tutkimuksen edetessä tutkimusmenetelmästä tuli sujuvampi edellisten testitulosten sisäistämisen vaikutuksesta.

3.5 Käytetyt ohjelmistot

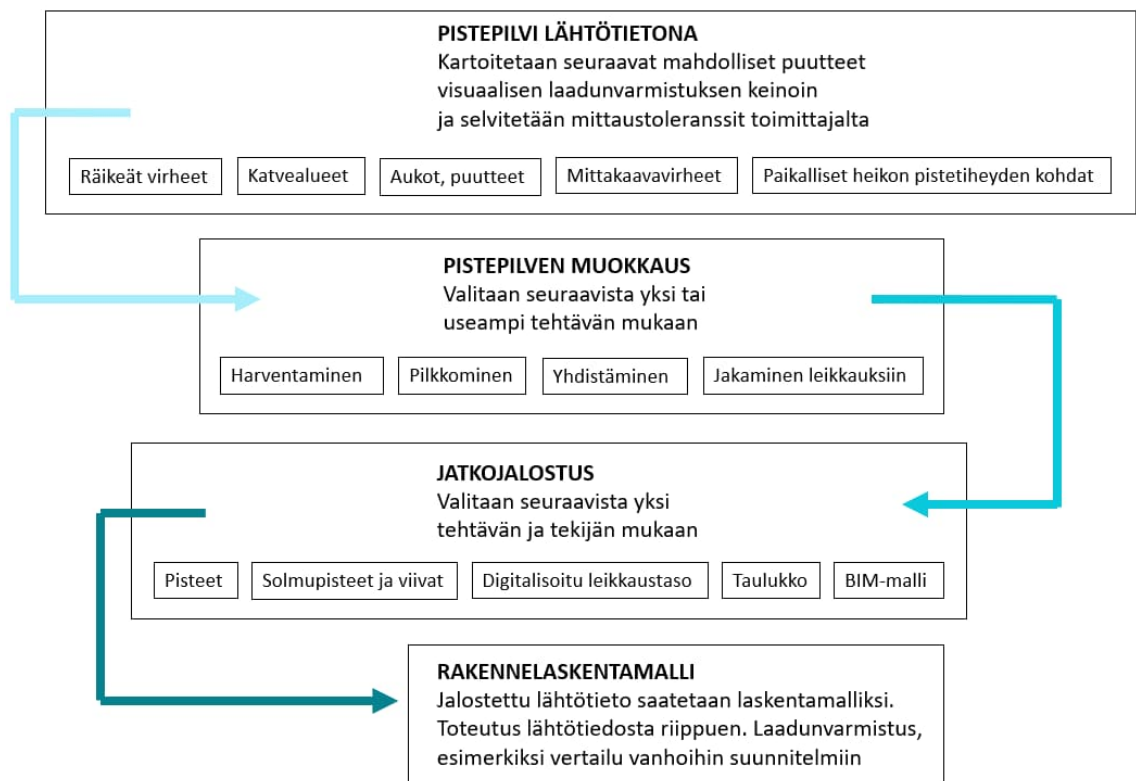
Tutkimuksessa käytettiin case-yrityksessä käytössä tai testauksessa olevia ohjelmistoja. FEM-mallin ohjelmistona käytettiin RFEM 5.25 – ohjelmistoa. Käsiteltävä pistepilven tiedostomuoto työssä oli e57-tiedostomuoto. Pistepilven muokkaamiseen käytettiin tai testattiin seuraavia ohjelmistoja:

- CloudCompare v2.12.3
- Autodesk ReCap Pro
- Trimble RealWorks 12.2
- Rhinoceros 7 + Grasshopper

4 TUTKIMUKSEN KULKU JA TULOKSET

Tutkimuksessa etsittiin soveltuvia polkuja pistepilven hyödyntämiseksi rakenne-laskennassa, tarkemmin RFEM 5.25 – rakennelaskentamallissa. Pistepilven jalostaminen lähtee käytännön sovellutuksissa aina pistepilven muokkaamisella. Pistepilveä on harvennettava, pilkottava ja muokattava käsiällä oleva tehtävän kannalta soveltuvaksi. Näiden toimenpiteiden jälkeen voidaan siirtyä tarkempaan muokkaukseen. Tarkemmassa muokkauksessa pohditaan formaattia, jossa pistepilvi saatetaan laskentamallintamisen lähtötiedoksi. Tähän vaikuttaa itse tehtävä ja suorittajan valmiudet käyttää erilaisia tietokoneohjelmistoja. Laskentamallintaminen on työn viimeinen vaihe, jonka toteutus riippuu lähtötiedoista.

Tutkimus aloitettiin pohtimalla mahdollisia formaatteja tuoda pistepilvi laskentamallin lähtötiedoksi. Tuloksena tästä saatiin tietylainen hypoteesi toimivista poluista. Kuvassa 36 on esitetty tutkimuksen osa-alueet kulkukaavion muodossa. Kulkukaaviota tarkasteltiin tutkimuksen päätyttyä uudestaan tulosten valossa.

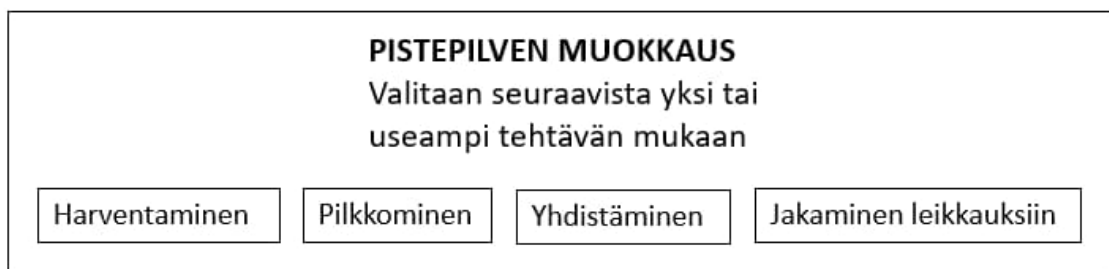


Kuva 36 Pistepilvipohjaisen FEM-laskentamallin kulkukaavio

Kuvan 36 kaavion lisäksi tutkimuksen aiheet prosessin laadunvarmistuksesta ja mittatarkkuuden vaikutuksista rakenneanalyysin laatuun pidettiin mukana koko tutkimuksen ajan.

4.1 Pistepilven muokkaaminen

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa keskityttiin pistepilven muokkaamiseen hyödynnettävään muotoon, eli kuvan 36 kulkukaavion osaan pistepilven muokkaus (kuva 37).



Kuva 37 Pistepilven muokkaus tutkimuksessa, osa kuvan 36 kulkukaaviosta

Pistepilven muokkauksesta saatiin monta testikohdetta, koska muokkaamisen toimenpiteitä suoritettiin kaikille case- ja testikohteille. Pistepilven muokkauksesta valittiin tehtävän mukaan yksi tai useampi muokkauksen tapa. Seuraavassa käydään läpi havainnot eri muokkauksen osa-alueista ja esimerkkikohteen muokkaaminen.

4.1.1 Pistepilven muokkaamisen työkalut

Tutkimuksessa huomattiin, että muokkaamisen tehokkuus riippuu tekijän harjaantuneisuudesta kyseisen ohjelman käyttöön, kuten oletettu. Ohjelmistoja voidaan käyttää ristiin ja tehdä tietyt muokkaamisen vaiheet eri ohjelmassa. Ohjelmistoissa kannattaa pohtia käytön vaatimia resursseja ja käyttöastetta. Ohjelmistojen lisenssien hintaa on pohdittava ja suhteutettava saavutettuun hyötyyn.

4.1.2 Harventaminen

Tutkimuksessa huomattiin harvennettaessa pistepilveä rakennelaskentamallintamista varten tarkkuustason heikkeneminen rakennelaskennan kohteen osalta. Harvennuksen jälkeen analysoitava kohde tulee olla riittävällä tarkkuudella esitetty.

Harvennus havaittiin työssä erittäin tarpeelliseksi tavaksi laskea pistepilven tiedostokokoa. Suuret tiedostokoot vaativat paljon tietokoneen resursseja. Liian suuret tiedostokoot olivat ongelma pistepilven käytettävyyden kannalta, mutta liian voimakkaasti harvennettu aineisto oli tehtävän kannalta liian epätarkka. Pilkkomista (kts. kappale 2.5.2) voidaan näin ollen perustellusti pitää ensisijaisena tiedostokoon pienennyksen muotona, koska siinä tehtävän kohteen tarkkuustaso ei heikkene.

Tutkimuksessa havaittiin kaikkien testattujen pistepilven käsittelyyn tarkoitettujen ohjelmistojen olevan käyttökelpoisia harventamiseen. Harvennus on pistepilven käsittelyohjelmien perustoimintoja.

Tutkittaessa eri harvennuksen menetelmiä, huomattiin satunnaisharvennuksen olevan rakennelaskennan kannalta käyttökelpoisin. Pistepilviaineiston luontia voidaan ohjata valmiiksi painottamaan kantavia rakenteita. Satunnaisotannalla harvennettaessa suuren pistetiheyden omaavat kohdat pysyivät pistetiheinä verrattuna muihin kohtiin pistepilvessä. Kantaviin rakenteisiin on kiinnitettävä huomiota pistepilven visuaalisessa laadunvarmistuksessa harvennuksen jälkeen.

4.1.3 Pilkkominen

Pilkkominen havaittiin olevan rakennelaskennan kannalta paras tapa pienentää pistepilven tiedostokokoa, koska pilkkottaessa tarkasteltavan alueen tarkkuus ei heikkene. Esimerkiksi sisällä olevaa palkistoa analysoitaessa pihamaa-alueet eivät ole oleellista informaatiota. Pilkkominen on syytä tehdä kaikille pistepilville rakennelaskennan tehtävää suorittaessa.

Pilkkominen onnistuu kaikilla tutkituilla pistepilven muokkaukseen tarkoitetuilla ohjelmistoilla. Mukaan otettavien pisteiden rajalaatikon luomisen logiikka huomattiin eroavan ohjelmistokohtaisesti.

4.1.4 Pistepilvien yhdistäminen

Rakennelaskennan tehtävissä todettiin tulevan vastaan tarvetta yhdistellä eri pistepilviaineistoja samaan tiedostoon. Käytännön esimerkki yhdistämisestä on esimerkiksi kerroksittain tehty pistepilvi. Yhdistetyistä pistepilvistä voidaan tutkia esimerkiksi kuinka hyvin kantavat rakenteet ovat linjassa toistensa päällä. Päällekkäisten rakenteiden epäkeskisyys suhteessa toisiinsa lisää jännityksiä rakenteisiin. Pistepilviä yhdistettäessä on varmistuttava, että pistepilvet ovat yhtenevässä koordinaatistossa, orientaatioissa ja oikein skaalattuna.

Tarkastelluilla pistepilven käsittelyyn tarkoitetuilla ohjelmilla pystyi avaamaan useita pistepilvitiedostoja ja tallentaa ne yhtenäiseksi tiedostoksi. Yhdistäminen kasvattaa tiedostokokoa. Edellä mainitut harventaminen ja pilkkominen on syytä tehdä osatiedostoille ennen niiden yhdistämistä liian suurten tiedostokokojen välttämiseksi.

Pistepilvien yhdistämisen jälkeen on tärkeä muistaa yhdistetyn pistepilven visuaalinen laadunvarmistus. Yhdistämisen jälkeen on varmistuttava siitä, että pistepilvet ovat yhtenevässä koordinaatistossa, orientaatioissa ja mittakaavassa.

4.1.5 Jakaminen tarkasteltaviin leikkaustasoihin

Rakennelaskennan kannalta havaittiin tarve jakaa rakennus tarkasteltaviin leikkaustasoihin. Leikkaustasot ovat yleensä xy -, xz - tai yz -tasoja rakennuksen paikallisessa koordinaatistossa. Leikkaustasoista voidaan tarkastella rakennuksen läpileikkausta, tunnistaa kantavia rakenteita ja määrittää niiden asemia ja dimensioita.

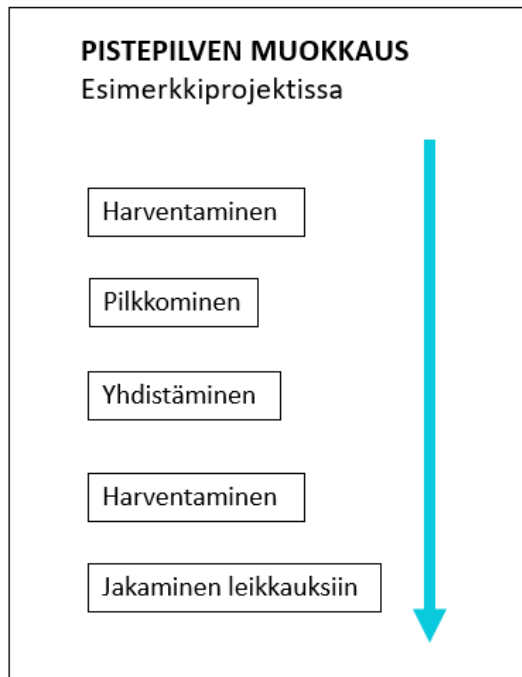
Tutkimuksessa tuli eteen tarve saada leikkaus pakotettua tiettyyn koordinaattiin, mikäli halutaan siirtää leikkaustaso tiettyyn koordinaattiin suunnitteluohjelmistossa. Esimerkiksi xy -tasopiirustus voidaan siirtää suunnittelukoordinaatistoon

kyseisen kerroksen lattiatasoon. Pistepilven ominaisuudet huomioiden mukaan on otettava pisteet tietyllä toleranssilla. Jos haluttu leikkaustaso on korkeudelta z , on pisteitä otettava määrättyltä korkeudelta tason z ylä- ja alapuolelta, koska pistepilven pisteet eivät ole järjestäytyneet tasoihin vaan ovat kaikki omassa tietyssä asemassaan. Esimerkiksi voidaan ottaa huomioon tason z -tasolta pisteet ± 5 cm korkeudelta, jolloin saadaan aineistoon mukaan pisteet yhteensä 10 cm korkeudelta. 5 cm tason z yläpuolelta ja 5 cm tason z alapuolelta. Nämä leikkaustason pisteet voidaan pakottaa samaan tasoon muokatessa, jolloin kaikilla pisteillä on sama koordinaatti z . Leikkaustaso voi olla myös xz - tai yz -taso, tai mikä tahansa mielivaltaisesti orientoitu taso koordinaatistossa. Tason asema siirtyy tasoon nähden kohtisuoran vektorin muuttujan perusteella. Tätä koordinaatiston pakottamista tehtiin tutkimuksessa taulukko-ohjelmalla ja Rhinoceros Grasshopper – ohjelmistolla.

4.1.6 Pistepilven muokkaamisen esimerkkiprojekti

Tutkimuksen aikana tehtiin kaksi case-projektia, jossa käytettiin edellä mainittuja pistepilven muokkauksen keinoja. Molemmissa case-kohteissa tuli tarve tuottaa pisteiden leikkaustaso tarkasteltavasta kohdasta. Rakennesuunnittelun tehtävissä tämä voidaan todeta olevan yleistä.

Seuraavassa käydään läpi pistepilven muokkaaminen leikkaustasoihin case-kohteessa 1. Kohteessa tehtiin xz -leikkaustaso rakennuksesta. Rakennuksesta oli lähtötietona käytössä fotogrammetrialla tehty pistepilvi rakennuksen ulkopuolelta. Ulkopuolen kartoitukseen käytettiin miehittämätöntä ilma-alusta, eli dronea. Rakennuksen sisätilat oli inventoitu laserkeilaimella. Laserkeilausaineisto oli tuotettu kerroksittain. Projektissa käytettiin kaikkia edellä kuvattuja muokkaustapoja. Kuvassa 38 on esitetty kulkukaavio esimerkkiprojektin pistepilven muokkauksesta.



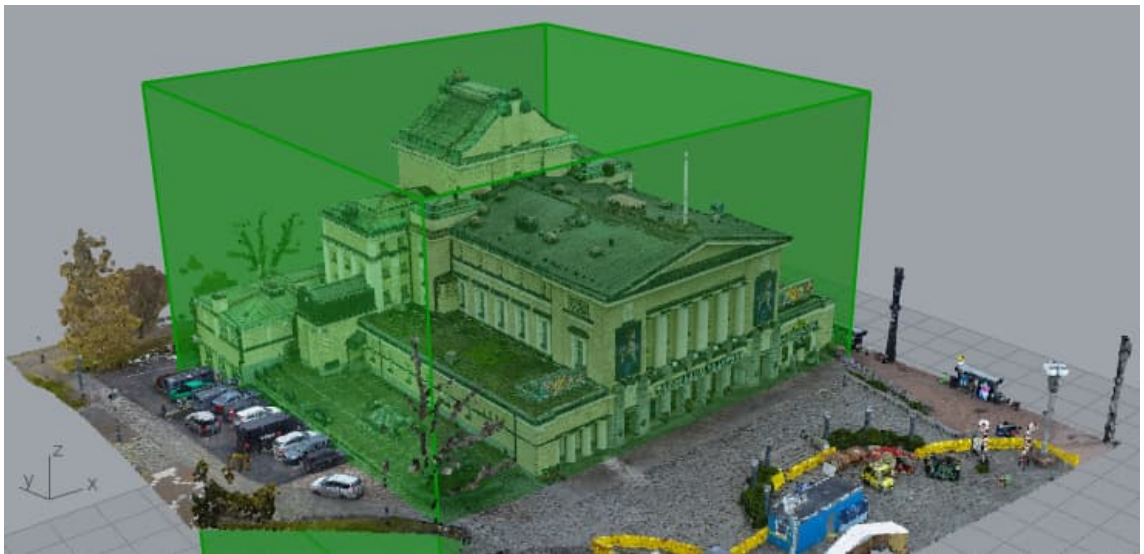
Kuva 38 Kulkukaavio esimerkkiprojektin pistepilven muokkauksessa

Ensimmäisenä työnä kaikki pistepilvet tallennettiin samaan tiedostomuotoon (e57). Pistepilvelle tehtiin visuaalinen laadunvarmistus ja todettiin pistepilvet tehtävään soveltuvaksi.

Kaikki pistepilvet harvennettiin CloudCompare v2.13.3 – ohjelmistolla jatkokäsittelyn sujuvoittamiseksi. Harvennus tehtiin satunnaismenetelmällä. CloudComparissa harvennus tehdään tavoitepistemäärän mukaan. Alkuperäisissä pistepilvissä oli noin 500–800 miljoonaa pistettä. Tavoitepistemääräksi valittiin 10–20 % alkuperäisestä pistemäärästä. Harventaminen huomattiin tutkimuksessa olevan iteratiivinen prosessi, jossa sopivaa harvennuksen määrää haetaan osittain testaamalla. Harvennus heikentää tarkkuutta, mutta liian suuret tiedostokoot ovat liian raskaita jatkojalostukseen. Tarkkuuden ja tiedostokoon välillä jouduttiin tekemään kompromisseja tehtävän ominaispiirteiden mukaan. Dronella kuvattu ulkopinnan pistepilvimalli siirrettiin ja tallennettiin samaan koordinaatistoon sisäpuolisten pistepilvien kanssa.

Pilkkomisessa poistettiin rakennuksen ulkopuolisesta pistepilvimallista parkkipaikat ja muut tehtävän kannalta turhat ulkopuoliset osat. Pilkkominen pyrittiin suorittamaan mahdollisimman läheltä ulkoseinien ulkolinjoja. Pilkkominen päätettiin tehdä yhdellä suorakaiteen muotoisella rajalaatikolla, jolloin kaikkia ylimääräisiä

piha-alueita ei saada pois monimuotoisesta rakennuksesta. Suurin osa turhista alueista saatiin kuitenkin pois. Tarkemman pilkkomisen todettiin olevan turhaa hyötyyn nähden. Rakennuksen sisäpuolisia malleja ei pilkottu. Pilkkominen suoritettiin Rhinoceros 7 Grasshopper – ohjelmiston avulla. Kuvassa 39 kuvataan esimerkkiprojektin pilkkominen rajalaatikon avulla. Kuvassa vihreän laatikon sisällä olevat pisteet otettiin muokkauksen seuraavaan vaiheeseen. Kuvan mukaisessa pilkkomisessa alkuperäisestä pistemäärä väheni noin 20 %. Tehtävän kannalta tarkkuustaso ei heikentynyt.



Kuva 39 Esimerkkiprojektin pilkkominen

Harvennetut ja pilkotut pistepilvet yhdistettiin samaan pistepilvitiedostoon. Yhdistäminen tehtiin avaamalla tiedostot pistepilven muokkaamiseen tarkoitettuun ohjelmaan ja tallentamalla pistepilvet samaan tiedostoon. Yhdistämisessä on varmistuttava, että pistepilvet ovat samassa koordinaatistossa ja orientaatiossa. Yhdistetylle pistepilvelle kannattaa tehdä visuaalinen laadunvarmistus. Kuvassa 40 on esitetty case-kohteen yhdistetty pistepilvi. Pistepilvet yhdistettiin CloudCompare v2.13.3 – ohjelmistolla.

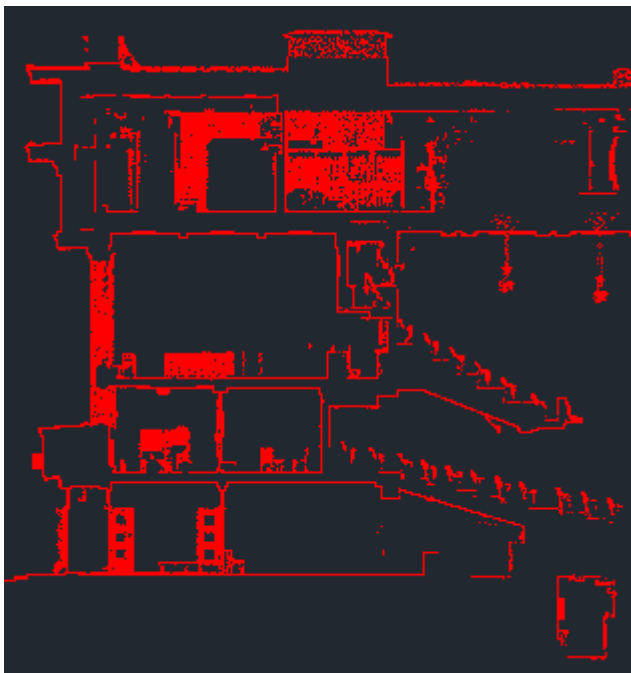


Kuva 40 Esimerkkiprojektissa yhdistetty sisätilojen ja ulkopintojen pistepilvet

Yhdistäminen kasvattaa pistepilven tiedostokokoa. Esimerkkiprojektissa tuli tarve harventaa yhdistetty pistepilvi. Harvennuksia voidaan joutua tekemään muokkauksen eri vaiheissa. Projektissa harvennus suoritettiin kahdessa eri vaiheessa.

Yhdistetty ja harvennettu pistepilvi jaettiin tarkasteltavaan xz-leikkaustasoon tehtävän suorittamiseksi. Leikkaustaso oli tarkoitus tehdä mahdollisimman keskeltä rakennusta kuvaavan yleisleikkauksen tekemiseksi. Projektikohteessa selvitettiin halutun leikkaustason y-koordinaatti. Leikkaustaso tehtiin kyseisestä y-koordina-

naatista niin, että mukaan otettiin pisteitä +/- 10 cm matkalta y-koordinaatista. Mukaan otettiin näin ollen pisteitä yhteensä 20 cm kaistaleelta. Pisteet pakotettiin samaan y-koordinaattiin, jolloin saatiin haluttu leikkaustasopiirustus. Leikkaustaso on esitetty kuvassa 41. Leikkaustasopiirustusta voidaan käyttää rakennesuunnittelun ohjelmistoissa, kun tason pisteet tallennetaan hyödynnettävään muotoon. Tutkimuksessa leikkaustaso tallennettiin dwg-tiedostoksi jatkojalostusta varten. Leikkaustasot tehtiin kaikista kerroksista xy-tasoina sekä pystyleikkaus myös yz-tasosta. Leikkaukseen jako suoritettiin Rhinoceros 7 Grasshopper – ohjelmiston avulla.



Kuva 41 Esimerkkiprojektin xz-tasoleikkaus

Tutkimuksessa onnistuttiin saattamaan pistepilvi leikkaustasoesitykseksi. Sovelluksesta oli hyötyjä annetussa suunnittelutehtävässä. Saman kaltaista sovellusta on hyödynnettiin myös toisessa case-kohteessa.

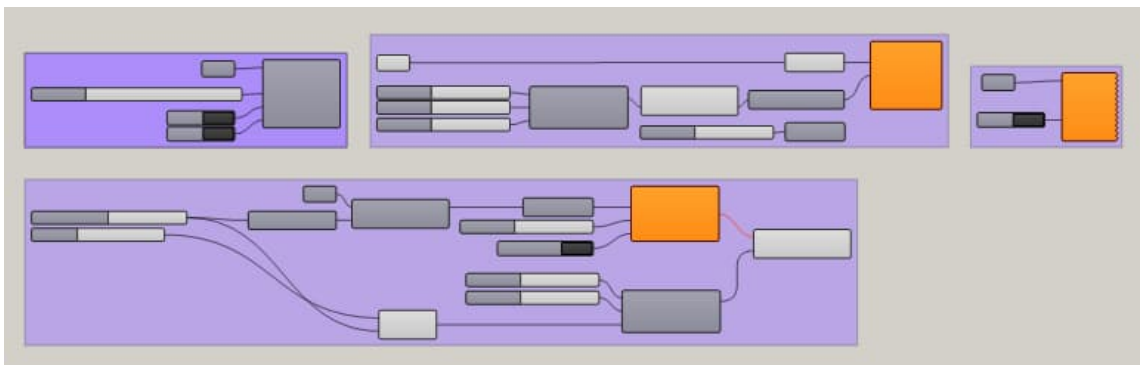
4.1.7 Pistepilven muokkaaminen Grasshopperin avulla

Tutkimuksessa tutkittiin vaihtoehtoa tehdä kaikki muokkauksen osa-alueet Rhinoceros 7 Grasshopperin avulla. Grasshopper on parametrisen suunnittelun työ-

kalu. Tutkimuksessa todettiin kaikkien muokkausten olevan mahdollisia työkalussa. Alla olevassa kuvassa kuvataan sovellutusta. Kehitystyötä ei kuitenkaan työssä avata tarkemmin.

Muutama haaste havaittiin tässä sovelluksessa. Tiedostomuoto on rajattu e57-tiedostomuotoon. Liian suuret tiedostokoot eivät auenneet ohjelmistossa. Esimerkiksi CloudCompare havaittiin olevan parempi suurien tiedostojen avaamiseen. Tämän takia edellä mainitussa esimerkkiprojektissa harvennukset oli tehty CloudComparessa.

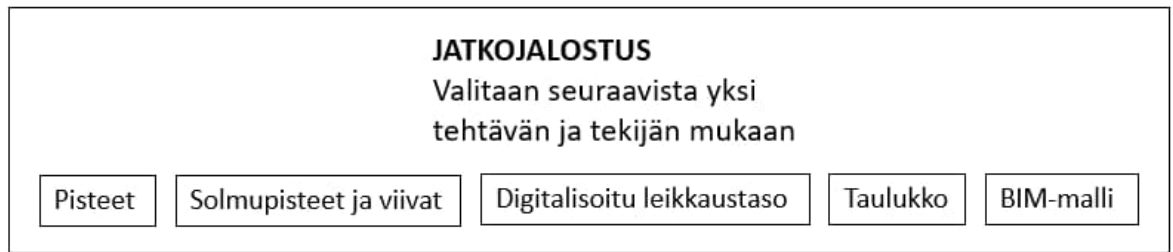
Etuna tässä sovelluksessa havaittiin olevan kaikkien toimintojen suorittaminen samassa ohjelmistossa sekä ominaisuus, jossa pistepilven harvennuksen voi suorittaa tiedostoa avatessa. Ohjelmistossa havaittiin tasoleikkauksen pisteiden siirtäminen samaan tasokoordinaattiin onnistuvan verraten kätevästi. Kuvassa 42 on esitetty sovellutus Grasshopper – ohjelmistossa ja visuaalisen ohjelmoinnin käyttöliittymä.



Kuva 42 Pistepilven muokkaamisen sovellutus

4.2 Muokatun pistepilven hyödyntäminen FEM-mallissa

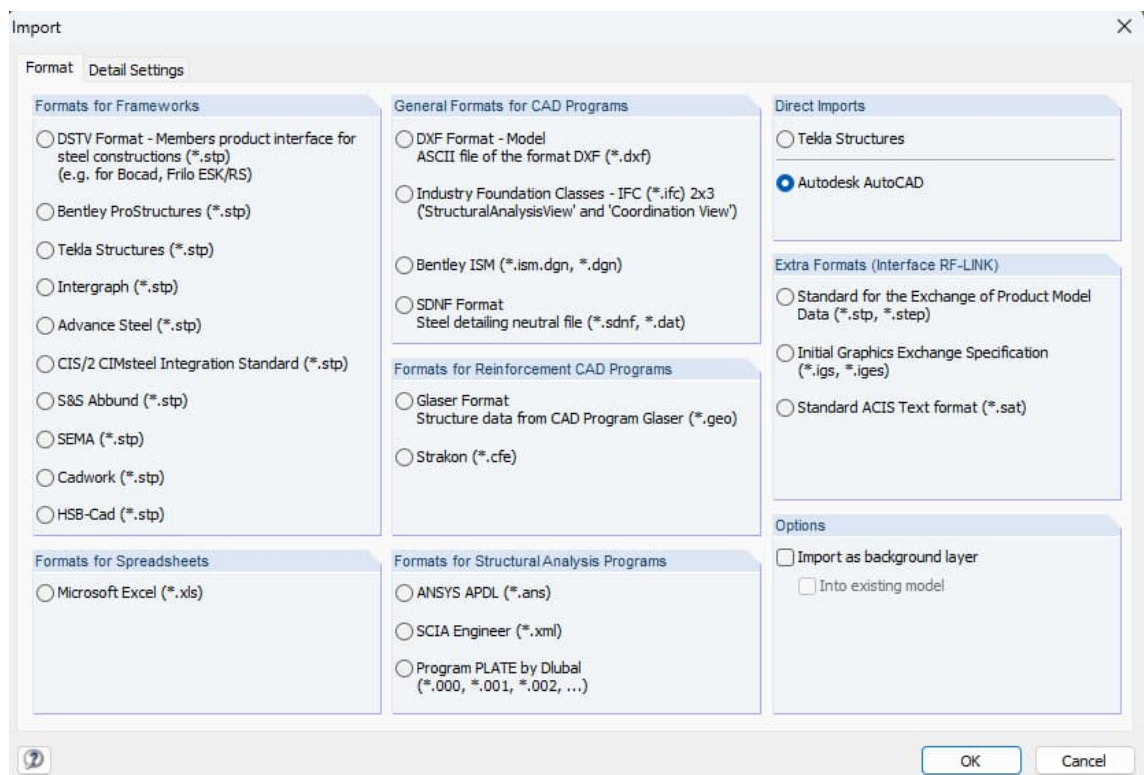
Tutkimuksen toisessa vaiheessa keskityttiin muokatun pistepilven hyödyntämiseen laskentamallintamisessa, eli kuvan 36 kulkukaavion osaan jatkojalostus (kuva 43).



Kuva 43 Jatkojalostus tutkimuksessa, osa kuvan 36 kulkukaaviosta

4.2.1 Pistepilven tuominen RFEM 5.25 – laskentamalliin

RFEM 5.25 – laskentamalliin voidaan tuoda monia erilaisia tiedostomuotoja. Pistepilven tässä työssä pääasiallisesti tarkasteltavaa tiedostomuotoa, e57, ei voida tuoda suoraan RFEM – malliin. Kuvassa 44 on kuvattu RFEM 5.25 – ohjelman import – dialogi, eli mitä eri tiedostomuotoja voidaan tuoda laskentamalliin lähtötiedoksi mallinnuksen avuksi. (Dlubal Software GmbH, 2020)



Kuva 44 Import - valikko (RFEM 5.25)

Kuten kuvasta 44 voidaan havaita, on pistepilveä muokattava sopivaan tiedostomuotoon, jotta se saadaan suoraan lähtötiedoksi laskentamalliin. Itse pistepil-

vestä voi ottaa erilaisia mittauksia ja esityksiä laskentamallia lähtötiedoksi ja mallintaa näiden lähtötietojen mukaisesti. Tutkimuksessa havaittiin, että tehtäväkohtaisesti on harkittava jatkojalostukseen ryhtymistä. Erityisesti pienissä yksittäisten osien rakenneanalyysissä voi olla nopeampaa mallintaa esimerkiksi pistepilvestä saatavien mittojen avulla, kuin jatkojalostaa pistepilveä pitkälle helposti hyödynnettävään muotoon.

Seuraavassa käydään läpi esimerkkejä, kuinka pistepilveä voidaan hyödyntää osana laskentamallintamista. Tavoitteena on löytää käyttökelpoisia tapoja hyödyntää pistepilveä FEM-mallin lähtötietona. Parhaiten soveltuva tapa on aina valittava tapauskohtaisesti tehtävän, tekijän ja lähtötietojen erityispiirteet huomioon.

4.2.2 Tarkasteltavat leikkaukset pisteinä

Työn kohdassa 2.5.4 on käsitelty pistepilven jakamista leikkauksiin. Näistä leikkauksista voidaan tuottaa taso- ja leikkauskuvia, jotka koostuvat pisteistä. Pisteet voidaan tallentaa laskentaohjelman tukemaan muotoon, esimerkiksi dwg-tiedostoksi. Leikkausten lisäämistä laskentamalliin tutkittiin työssä. Näitä dwg-tiedostoja voidaan tuoda laskentaohjelmaan aputiedostoiksi helpottamaan laskentamallintamista.

Pisteet voidaan tuoda suoraan RFEM:in pisteiksi tai niin sanotulle background – layerille, eli mallin taustalle. Mallin taustalle lisättäessä referenssitiedostoon voi tarttua, mutta ohjelmisto ei luo tiedostosta suoraan malliobjekteja, tässä tapauksessa pisteitä, laskentamalliin. Referenssipisteiden paikalle voi luoda pisteen manuaalisesti laskentaohjelmassa. Kuvassa 45 on kuvassa 17 esitellyt pisteet esitettynä RFEM – laskentaohjelmassa. (Dlubal Software GmbH, 2020)

4.2.3 Tarkasteltavat leikkaukset solmupisteiksi ja viivoiksi

Kuten edellisen osion päätelmissä todettiin, on suuria pistemääriä syytä jalostaa pidemmälle ennen niiden käyttöä laskentamallin lähtötietona. Yksi vaihtoehto on jalostaa pisteaineistosta viivoja, joilla on alku ja loppu. Viivoilla on näin ollen myös laskentamallin kannalta solmupisteet alussa ja lopussa. Tutkimuksessa tutkittiin solmupisteiden ja viivojen tuomista laskentamalliin.

Alkutilanteessa pistedatalle oli tehty muokkauksia, kuten harvennus, pilkkominen ja leikkauksien ottaminen. Leikkaukset olivat esimerkiksi kuvan 17 mukaisia tasoja. Leikkausten pisteistä generoitiin viivoja, joilla on alkupiste ja loppupiste. Viivoja tuotiin laskentamalliin mallintamisen pohjaksi.

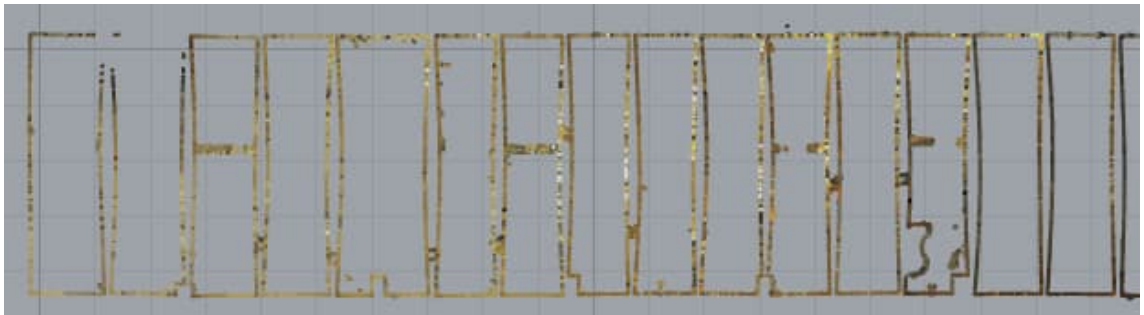
Viivojen generointi suoritettiin manuaalisesti esimerkiksi CAD-ohjelmiston avulla. Ohjelmistoon voidaan ladata edellä kuvattu halutussa tasossa oleva pistepilvi-data referenssitiedostoksi, jonka avulla piirretään tasopiirustus. Pisteistä voidaan generoida viivoja myös automaattisemmin vektoroinnin avulla. Vektorointiin löytyy omat ohjelmistonsa, joita ei tässä työssä ole testattu. Vektorointia voidaan tehdä myös Rhinocerosin Grasshopperin avulla, jossa valituista pistejonoista voidaan muodostaa viiva pisteiden keskiarvosijainnin mukaisesti. Pisteiden valintaa voidaan tehdä automaattisesti.

Muodostetuista viivoista saadaan laskentaohjelman puolella solmupisteitä (viivan alku ja loppupiste) sekä itse viiva. Viivoille voidaan laskentaohjelmassa määrittää rakenneseosan ominaisuudet rakennelaskentaa varten. Viivojen avulla luodaan laskentamalliin palkit, pilarit ja kuoret. Mahdollisuutena on automaation lisääminen ohjelmistojen linkitystä hyödyntäen.

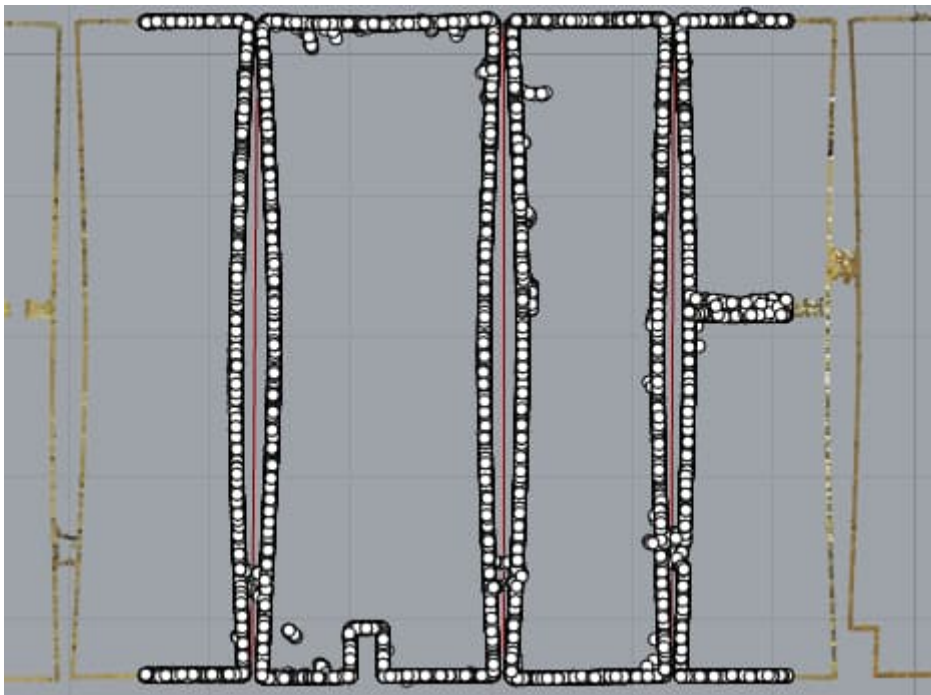
Tämä lähtötiedon jalostusaste soveltuu hyvin pienille rakennemalleille, jossa generoidaan esimerkiksi kerrostason palkisto viivoiksi rakennemalliin.

Tutkimuksen testikohteessa tehtiin esimerkiksi sovellutus betonipalkiston laskentamallintamisesta, jossa leikkaukseksi muokatusta pistepilvestä saatettiin palkit

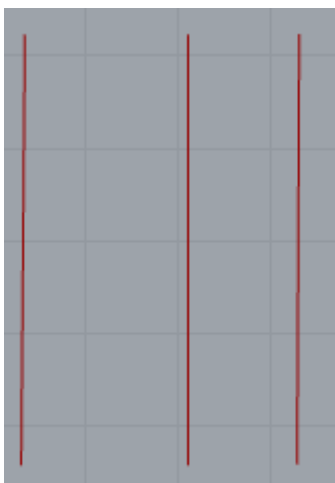
keskilinjaesityksinä laskentamalliin. Leikkaustasosta valittiin halutut palkit mukaan, joiden mukaan muodostettiin viivoja. Tehtäessä jatkojalostus Rhinocerossa voidaan siirtää palkit RFEM:iin suoran linkin kautta. Linkissä voidaan syöttää rakenneosalle myös ominaisuuksia, kuten materiaalia, profiili, tuentaehdot ja kuormitus. Alla on osa prosessista kuvattuna yksinkertaistetussa muodossa. Viivoille on annettu ominaisuudet materiaali ja poikkileikkaus. RFEM – Rhinoceros linkki on dynaaminen, eli viivoja muokattaessa muutokset tulevat myös laskentamallin puolelle saman aikaisesti. Työssä ei mennä parametriseen rakennesuunnitteluun tämän syvemmälle, mutta toimintatavan potentiaali on ilmeinen. Kuvissa 46–50 on esitetty edellä kuvattu prosessi kuvien muodossa.



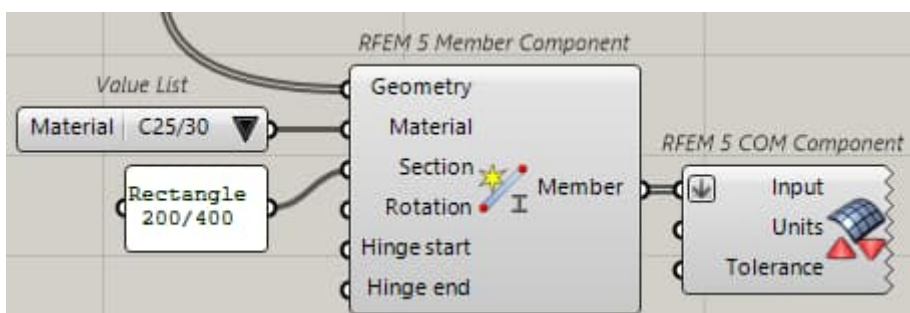
Kuva 46 Esimerkkipalkiston tasoleikkaus (A-Insinöörit Suunnittelu Oy)



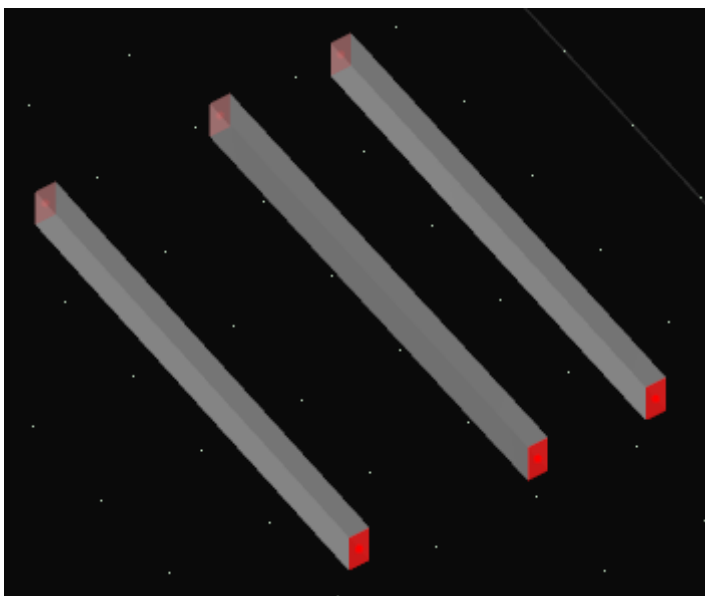
Kuva 47 Esimerkkipalkkien kohta pisteinä ja viivoina



Kuva 48 Viivaesitys palkeista



Kuva 49 Linkki Rhinoceros - RFEM



Kuva 50 Edellä olleet viivat laskentamallin rakenneosina

Samalla toimintaperiaatteella voidaan tehdä halutusta leikkaustasosta kokonainen leikkauspiirustus. Piirustus voi olla pysty- tai vaakaleikkaus riippuen tehtävästä ja esimuokkauksesta. Leikkauspiirustukseen generoidaan viivoiksi kaikki

tason rakenteet. Generoinnissa voidaan käyttää samoja työkaluja kuin yksittäisten viivojen tapauksessa.

Digitalisoidun (esim. dwg-tiedosto) tasopiirustuksen avulla voidaan tehdä laskentamalli rakennuksen kokonaisuudesta. Jalostusaste on tässä tapauksessa suuri. Toimintatapaa voidaan käyttää esimerkiksi kerrostalon stabiliteettimallin tapauksessa. Yhden kerroksen jälkeen kerroksia voidaan tavallisesti kopioida, jolloin yhden tasopiirustuksen tiedot saattavat riittää laskentamallin lähtötiedoksi. Mahdollisuutena on automaation lisääminen ohjelmistojen linkitystä hyödyntäen.

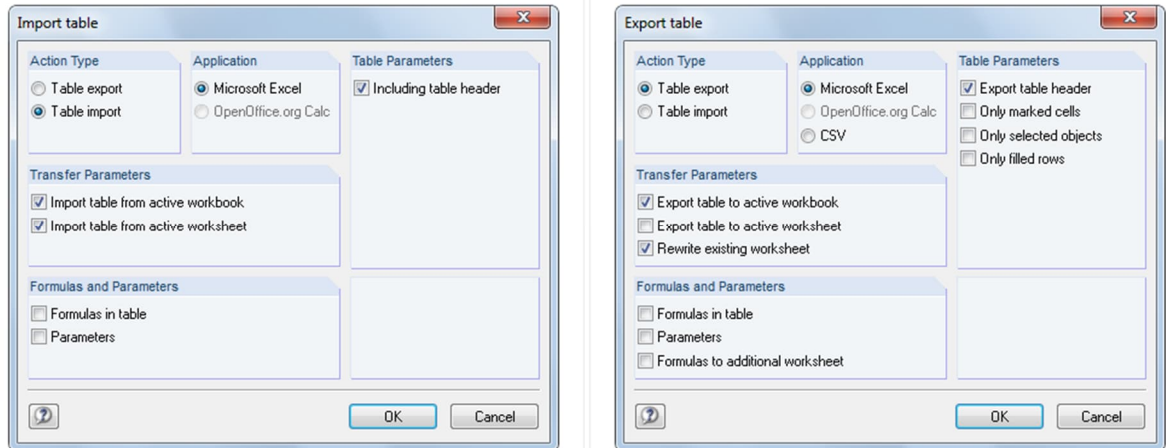
4.2.4 Pistepilvidatan jalostaminen Excel – taulukossa

Kaikilla pistepilviaineiston pisteillä on sijaintikoordinaatit x, y ja z. Tutkimuksessa vietiin pisteiden sijaintikoordinaattitieto MS Excel – taulukkoon, kuten esimerkiksi kuvassa 51 on esitetty. Taulukointi voidaan suorittaa valittujen pisteiden osalta esimerkiksi Rhinocerosin Grasshopperin avulla. Pisteiden valinnassa auttaa edellä mainitut pistepilven muokkaamisen tavat, kuten harvennus, pilkkominen ja leikkauksiin jakaminen.

	A	B	C
1	x [m]	y [m]	z [m]
2	41,72079	43,80	127,412
3	41,75334	44,88441	127,412
4	41,75702	44,49443	127,412
5	41,75797	44,64645	127,412
6	41,7779	44,21857	127,412
7	41,77991	43,92458	127,412
8	41,78389	43,9276	127,412
9	41,7844	43,99961	127,412
10	41,78691	43,92463	127,412

Kuva 51 Pistepilven pisteiden sijaintitiedot MS Excel - taulukko-ohjelmassa

Tutkimuksessa testattiin Excel – taulukon avulla tehtävää laskentamallia RFEM-ohjelmistossa. Excel – taulukon pisteet voidaan siirtää pisteiksi laskentamalliin. Kuvassa 52 on esitetty RFEM – ohjelmiston käyttöliittymä pisteiden siirtämisestä taulukko- ja laskentaohjelmiston välillä. Kuvassa 53 on esitetty kuvan 25 FEM – mallin pisteet tuotuna Excel – taulukkoon. (Dlubal Software GmbH, 2020)



Kuva 52 Import- ja Export table, MS Excel - RFEM linkki (Dlubal Software GmbH, 2020)

Node No.	Node Type	Reference Node	Coordinate System	Node Coordinates		
				X [m]	Y [m]	Z [m]
1	Standard	0	Cartesian	0,000	0,000	0,000
2	Standard	0	Cartesian	5,000	0,000	0,000
3	Standard	0	Cartesian	10,000	0,000	0,000
4	Standard	0	Cartesian	10,000	5,000	0,000
5	Standard	0	Cartesian	5,000	5,000	0,000
6	Standard	0	Cartesian	0,000	5,000	0,000
7	Standard	0	Cartesian	0,000	0,000	3,000
8	Standard	0	Cartesian	5,000	0,000	3,000
9	Standard	0	Cartesian	10,000	0,000	3,000
10	Standard	0	Cartesian	10,000	5,000	3,000
11	Standard	0	Cartesian	5,000	5,000	3,000
12	Standard	0	Cartesian	0,000	5,000	3,000

Kuva 53 Teoriaosuuden kuvan 25 FEM-malli tuotuna MS Excel – ohjelmistoon

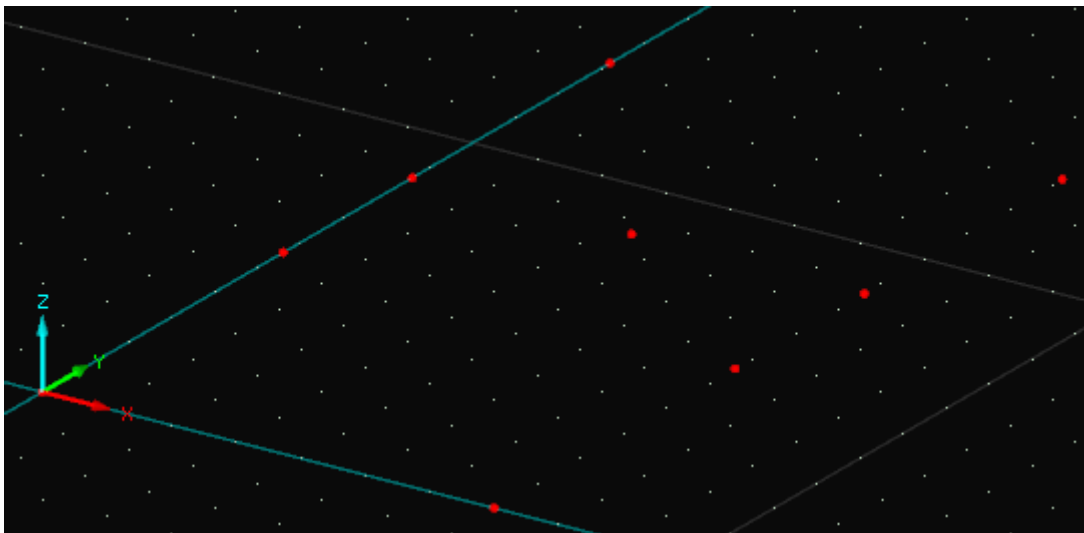
Testikohteessa pyrittiin tuottamaan yksinkertaisen pistepilvipohjaisen tasopiirustuksen laatta ja pilarit taulukko-ohjelman kautta FEM-laskentamalliksi. Kuvissa 54–57 on esitetty edellä mainittu testikohteen prosessi vaiheittain pisteiden luonnista pistepilvitiedoston avulla rakennelaskentamallintamiseen. Työssä siistittiin pisteiden koordinaatit taulukko-ohjelmassa tasaluvuiksi.



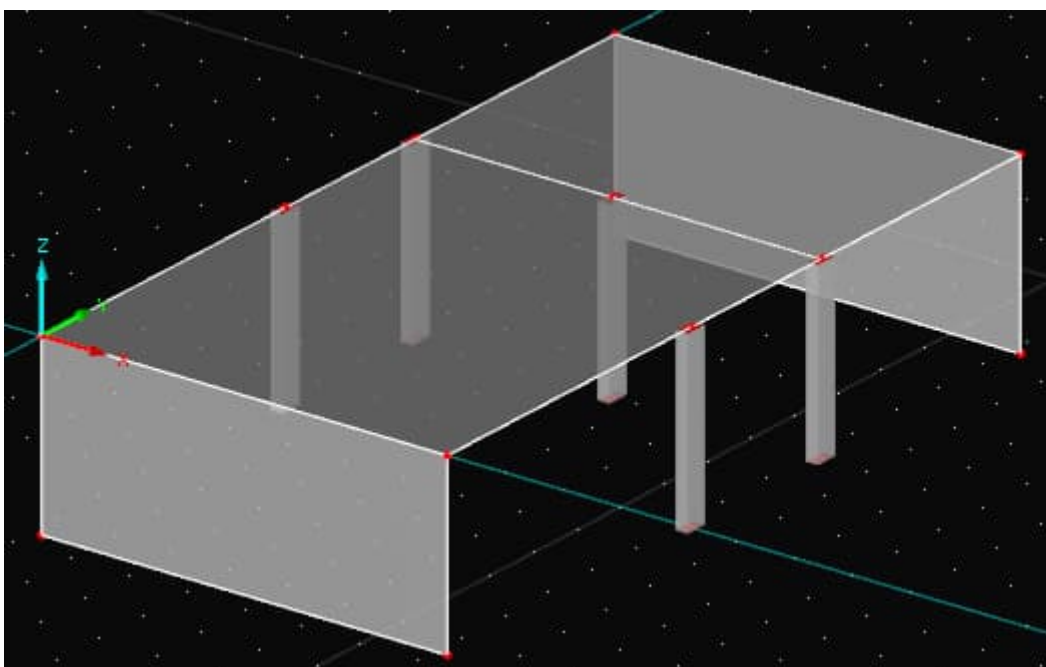
Kuva 54 Pistepilven osapohja tarkastelua varten

	C	D	E	F	G
1	Reference	Coordinate	Node Coordinates		
2	Node	System	X [m]	Y [m]	Z [m]
3	0	Cartesian	0,000	13,200	0,000
4	0	Cartesian	7,000	13,200	0,000
5	0	Cartesian	3,400	8,600	0,000
6	0	Cartesian	7,000	8,600	0,000
7	0	Cartesian	0,000	8,600	0,000
8	0	Cartesian	7,000	5,600	0,000
9	0	Cartesian	0,000	5,600	0,000
10	0	Cartesian	0,000	0,000	0,000
11	0	Cartesian	7,000	0,000	0,000

Kuva 55 Pisteet siistittyinä taulukko-ohjelmassa



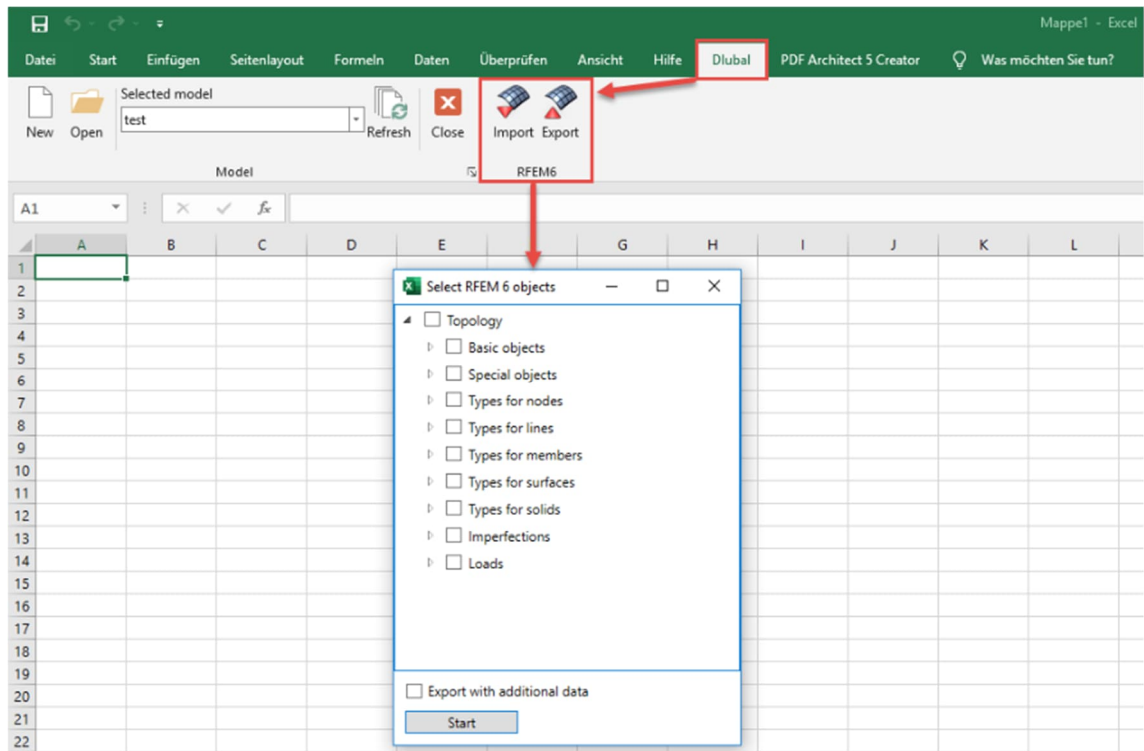
Kuva 56 Pisteet siirretty RFEM:iin



Kuva 57 Pisteiden mukaan mallinnettu rakennejärjestelmä

Taulukointiin voi rakentaa automatiikkaa ohjelmistojen linkityksen ja ohjelmoinnin avulla. Työssä testattiin vain pisteiden tuomista taulukko-ohjelmasta laskentamalliin. Ohjelmistot mahdollistavat myös esimerkiksi rakenneosien ja kuormitusten tuomista taulukko-ohjelmistosta laskentamalliin. Myös taulukon aineiston muokkaamiseen ja hallintaan on paljon mahdollisuuksia taulukko-ohjelmistoissa. MS Excel – ohjelmistoon on suora RFEM – linkki, jonka avulla voidaan luoda

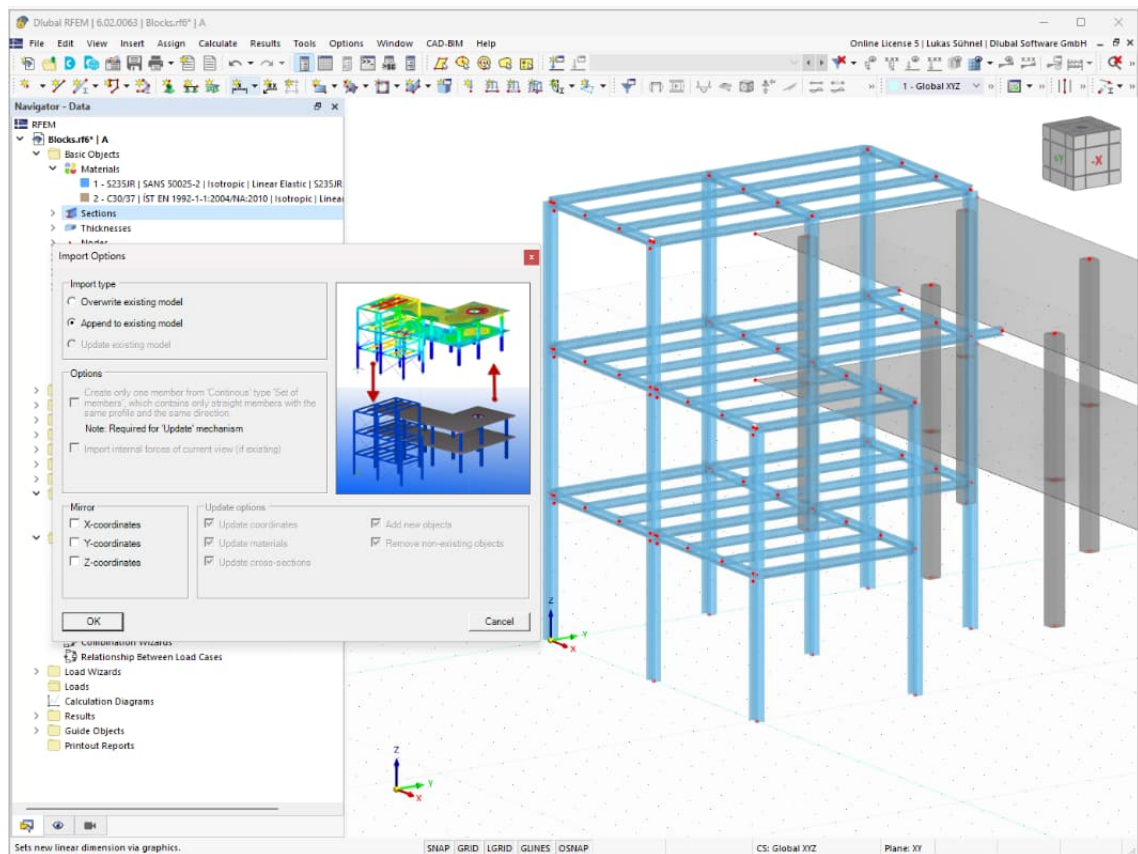
objekteja laskentamalliin. Taulukko-ohjelmassa on mahdollisuus luoda malli kokonaisuudessaan ja tarkastella tuloksia. Kuvassa 58 on esitetty suora ohjelmien välinen linkki RFEM:in ja MS Excelin välillä.



Kuva 58 RFEM - MS Excel linkki

4.2.5 Pistepilvi BIM-mallin kautta laskentamalliksi

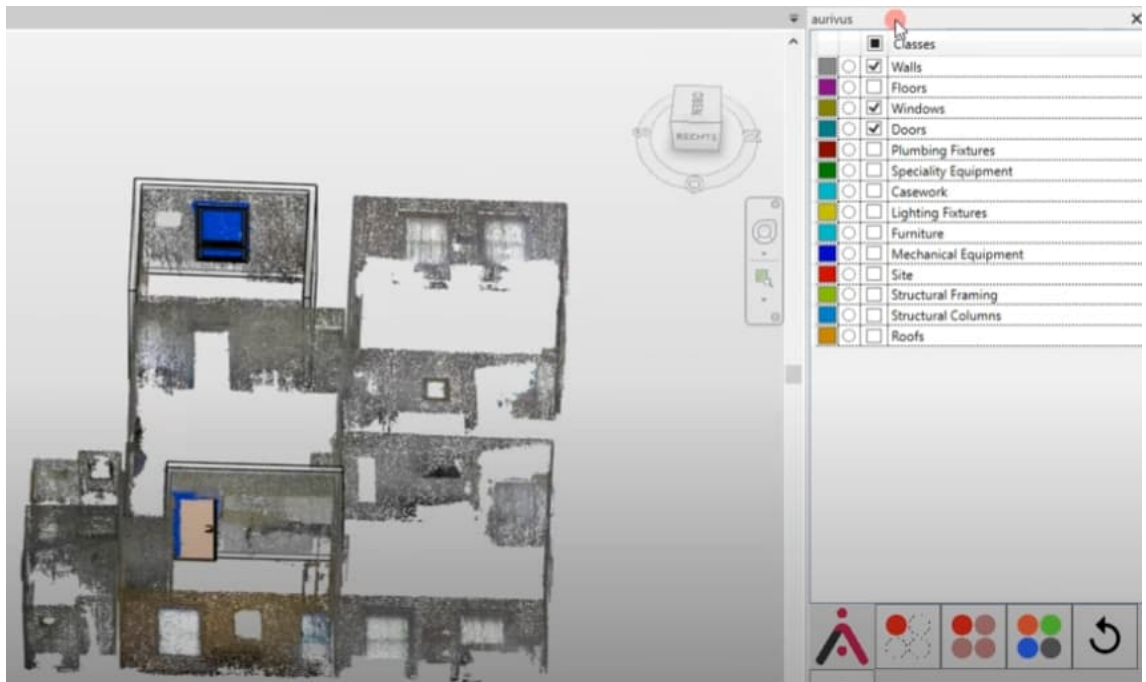
Vaikka työssä on rajattu pois pistepilven jalostaminen BIM-tietomalliksi, on se kuitenkin toimintatapa, jonka tutkimukseen käytetään jatkuvasti resursseja. Esimerkiksi Trimblen Tekla Structures ohjelmistolla luotua tietomallia voidaan hyödyntää laskentamallin lähtötietona RFEM 5.25 – ohjelmistossa. Kuvassa 59 on esitetty suora ohjelmien välinen linkki RFEM:n ja Tekla Structuresin välillä.



Kuva 59 RFEM 6.02 ja Tekla Structures 2023 suora linkki (Dlupal, 2023)

Olemassa oleviin rakennuksiin keskittyvät rakennesuunnittelutoimijat seuraavat Scan-to-BIM – kehitystä automaattisemman ja tehokkaamman tietomallintamisen takia. Tämä automatisaatiokehitys voi ratkaista myös tässä työssä käsiteltyä haastetta saattaa olemassa oleva rakennus laskentamalliin. (Trimble, 2023) Tutkimuksessa havaittiin toimintatavan potentiaali, vaikka varsinaisesti pistepilvestä BIM-mallin tekemistä ei työssä tutkittukaan.

Kuvassa 60 Scan-to-BIM kehitykseen osallistuvan Aurivuksen käyttöliittymää ja linkitystä arkkitehtimallintamiseen keskittyvän Revit-ohjelmistossa.



Kuva 60 Aurivus - Revit Scan-to-BIM – käyttöliittymä, seinien mallinnus

4.3 Rakenteiden kartoittaminen ja rakennelaskennan laadunvarmistus

Tutkimuksessa yksi oleellinen vaihe todettiin olevan rakennelaskentamallin laadunvarmistus. Laadunvarmistusta haluttiin tuoda esille osana tutkimusta, jotta laatuseikat eivät jää kehitystyössä huomioita.

Tärkeää on saada rakennelaskentamallin lähtötiedoksi mahdollisimman luotettavaa tietoa. Tätä voidaan prosessin aikana huomioida ja mahdollistaa. Laadunvarmistus lähtee inventoinnin toimeksiannosta ja päättyy rakennelaskentamallin tarkastukseen. Kantavien rakenteiden dimensiot ja asemat tulee olla tiedossa. Rakennuksen tai rakenteen inventoinnin toimeksiannon ja toteutuksen hallinta on tärkeää koko projektin laadunhallinnan kannalta.

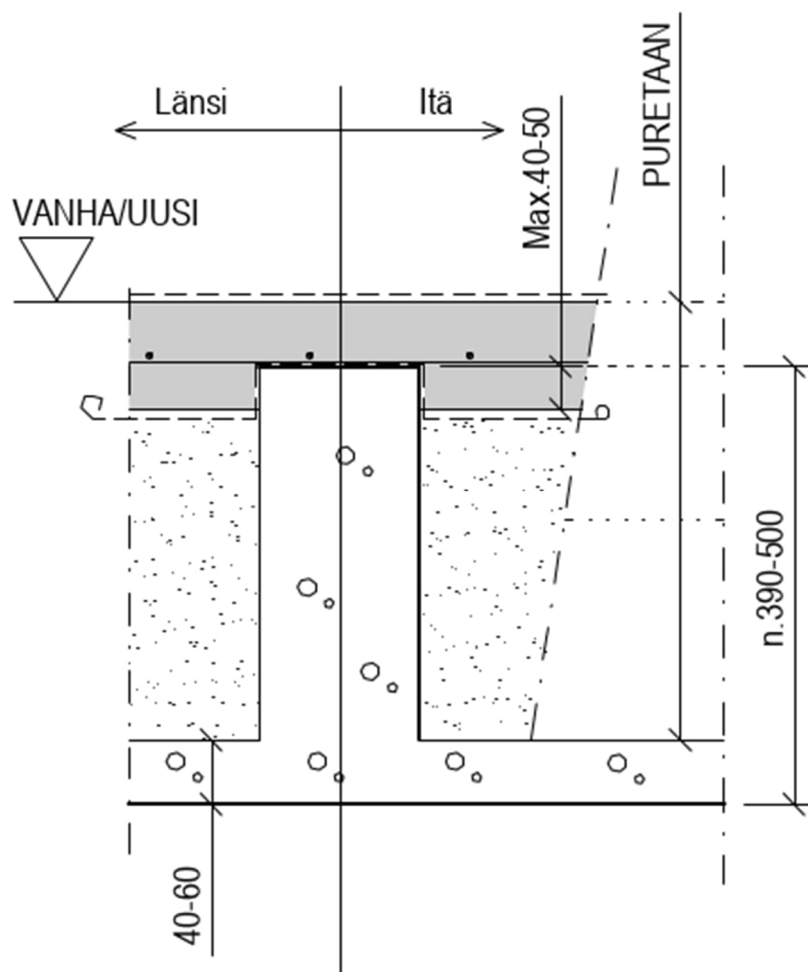
Inventoinnin suorittajan kanssa on hyvä kommunikoida, mikäli siihen on mahdollisuus. On kuitenkin projekteja, joissa rakennesuunnittelija tulee projektiin vasta inventoinnin jälkeen. Näissä tapauksissa havaittiin pistepilven visuaalisen laadunvarmistuksen olevan erityisen tärkeää.

Inventoinnin tarkoitus hyvä olla kartoittajalla tiedossa. Kantavat rakenteet on hyvä käydä läpi inventoijan kanssa ennen suorittamista. Kevyet esteet voidaan siirtää

kartoitettaessa, jotta kantavat rakenteet ovat mahdollisimman hyvin esillä. Mahdolliset katvealueet voidaan kartoittaa osana pistepilven laadunvarmistusta. Inventoinnin toteuttaja voi raportoida katvealueet ja puutteet, joita ei voitu kartoituksessa välttää. Pistepilven tekotavan on sovelluttava tehtävään.

Itse pistepilven laadunvarmistus on esitetty kappaleessa 2.3.3. Esitelty visuaalinen laadunvarmistus todettiin tutkimuksessa soveltuvaksi.

Usein inventointi tehdään kuitenkin rakennusprojektin alkuvaiheessa, jolloin monia rakenteita jää piiloon kevyiden rakenteiden, esimerkiksi alakaton, taakse. Projekteissa havaittiin tarvetta rakenteiden uudelleenkartoitukseen kevyiden purkujen jälkeen. Tutkimuksen aikana toteutettiin projekti, jossa kartoitettiin alalaattapalkiston palkit rakennesuunnitteluprojektin ollessa käynnissä. Ennen laserkeilausta kelluva teräsbetoni-laatta purettiin palkistojen päältä. Rakenteiden kartoituksen tietoa käytettiin muun muassa rakennelaskennan tarpeisiin. Palkistojen pistepilvestä muokattiin leikkaustasokuva. Siinä vaiheessa projektia palkkien rakenneanalyysit olivat pääosin jo tehty ja pistepilviaineistoa käytettiin tehdyn aineiston mittojen tarkastamiseen, eli laadunvarmistukseen. Rakennetyyppi kuvassa 61 kuvaa tilannetta. Kuvassa 62 on esitetty kohdan pistepilvi kartoituksen aikana. Kartoitus tehtiin työmaan ollessa käynnissä kantamattomien rakenteiden purkujen jälkeen.



Kuva 61 Tutkitun rakenteen rakennetyyppi



Kuva 62 Alalaattapalkisto

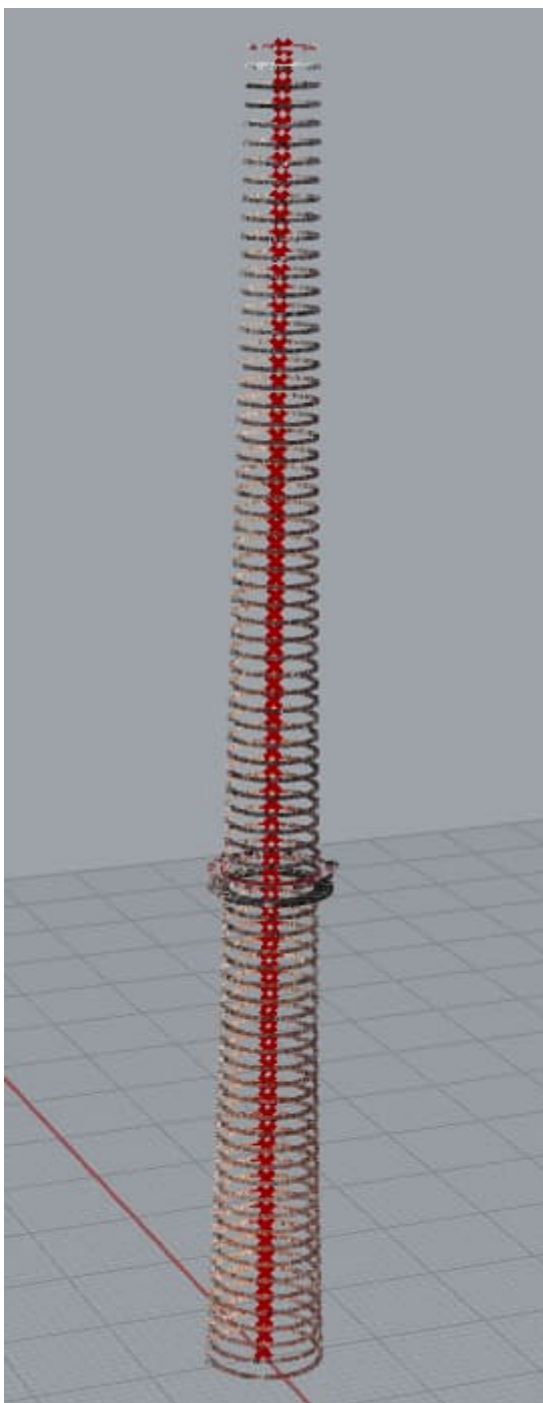
Tärkeä rakennelaskentamallin laadunvarmistuksen tapa on mallin vertailu vanhoihin suunnitelmiin. Vanhoja suunnitelmia verrataan projektin aikana kaikissa vaiheissa tuotokseen. Lopuksi rakennelaskentamallia verrataan rakenteellisen toiminnan osalta vanhoihin suunnitelmiin. Alkuperäisten suunnitelmien luotettavuutta on arvioitava ja olemassa olevaa rakennusta on tarkasteltava ristiin suunnitelmien kanssa. Alkuperäisten suunnitelmien lisäksi pitää muistaa lähtötietojen vertailu mahdollisiin rakenneavauksiin ja saatavilla olevaan tietoon rakennuksen aikaisesta rakennustavasta. Näiden muiden tietojen perusteella voidaan suorittaa laadukkaita oletuksia myös inventoinnissa piiloon jääneistä rakenteista rakennelaskentaa varten.

Kehitysprojektissa todettiin parhaaksi tavaksi suunnitelmien ja pistepilven vertailuun tuottaa pistepilvestä vastaava leikkaustaso. Esimerkiksi tarkastaessa 1. kerroksen runko ja katto piirustusta, avuksi voidaan tuottaa pistepilven leikkaustaso 1. kerroksen huonekorkeuden keskeltä. Leikkaustasoa ja vanhaa piirustusta voidaan verrata keskenään.

4.4 Mittatarkkuus rakennelaskennassa

Tutkimuksessa otettiin kantaa mittatarkkuuden parantumisen tuomiin sovellutuksiin rakennelaskennassa. Teoreettisia sovellutuksia löydettiin tutkimuksessa. Käytännön projektia ei tullut vastaan tutkimuksen ajanjaksona.

Testiprojektissa käsiteltiin savupiipun pistepilveä. Testikohteen tarkoituksena oli tarkastaa savupiipun alkuvinous rakennelaskennan näkökulmasta. Pistepilvelle suoritettiin harvennus ja pilkkominen pistepilven muokkaamisen vaiheessa. Seuraavaksi piippu jaettiin leikkaustasoihin 900 mm välein maan tasosta lähtien. Pistteistä etsittiin leikkaustasojen keskipisteet ja generoitiin pisteet piipun keskelle tarkastelua varten. Kuvassa 63 on kyseinen piipun leikkaustasoesitykset ja leikkaustasojen keskipisteet.



Kuva 63 Piipun leikkaustasoesitys ja keskipisteet

Piipun alkuvinoutta voidaan tarkastella monin eri tavoin. Pisteitä voidaan tarkastella suunnitteluohjelmistossa tai viedä esimerkiksi taulukko-ohjelmaan. Tutkimuksessa saatiin myös tieto piipun poikkileikkauksen ulkopinnan muutoksesta pituuden funktiona, kun leikkaustasojen mukaisesti generoitiin ympyrät tasoihin. Tiilirakenteen paksuus selvitetiin vanhoista piirustuksista.

Haasteena testikohteessa oli, että pistepilven mittaustoleranssi ei ollut tiedossa. Tämän takia ei ole mielekäästä esittää tuloksia numeraalisesti.

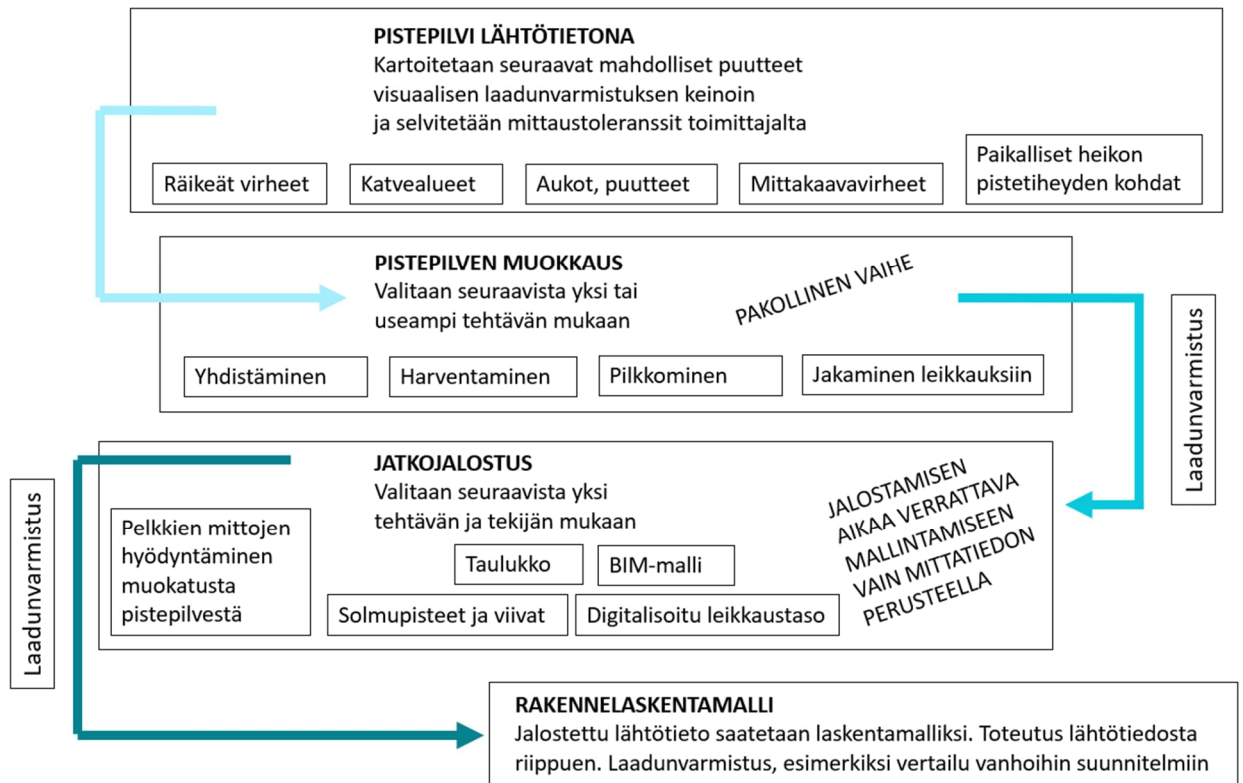
Pistepilviaineistojen hyödyntäminen rakennelaskennan laadun tai tarkkuuden lisäämiseksi todettiin vaativan tarkempaa lisätutkimusta pistepilvimallin mittaustoleransseista tuottamistavan mukaan. Mittaustoleranssit tulee olla tiedossa, jos pistepilviaineistoa käytetään todellisten mittojen mukaan tarkkaan rakenneanalyysiin. Tarvittaessa mittatoleranssi on lisättävä laskennassa mitattuun alkuvinoutteen, epäkeskisyyteen tai tapahtuneeseen muodonmuutokseen. Mittaustoleranssia tulee pyrkiä pienentämään mahdollisuuksien mukaan esimerkiksi takymetrillä tehtävillä tarkastusmittauksilla ja referenssipisteillä.

4.5 Pistepilvestä FEM-laskentamallin projektikuvaus

Tehtävän ollessa FEM-laskentamallintaminen, on hyvä pohtia, minkälaisella lähtötiedolla se on tehtävissä tehtävän ja toteuttajan kannalta mahdollisimman tehokkaasti. Tutkimuksessa löydettiin erilaisia jalostusasteita valmiista rakennesista pelkkään mittatietoon. Jalostamiseen käytettyä aikaa on peilattava rakennemallintamiseen tyhjistä pelkän mittatiedon perusteella. Mielekäs polku riippuu toteuttajasta ja tehtävästä.

Tutkimuksessa suoritettiin case- ja testikohteiden tehtäviä. Tulosten mukaan tutkimuksen alussa esitelty kulkukaavio voidaan todeta vastaavan pitkälti prosessia, jossa FEM-malli toteutetaan pistepilvipohjaisesti. Alla kuvan 36 kulkukaavio esitettyinä laajemmin tulosten valossa (kuva 64).

Kuvan 64 kulkukaavioon on lisätty informaatiota verrattuna kulkukaavioon kuvassa 36. Vainoilla teksteillä on lisätty huomiot tutkituista vaiheista. Laadunvarmistus on lisätty osaksi kaaviota kaikkiin vaiheisiin. Pienissä laatikoissa olleet toimenpiteet ovat asetettu tutkimuksen tekijän mukaan teknisesti helpoimmasta haastavimpaan vasemmalta oikealle. Haastavuus on asetettu tekijän henkilökohtaisen näkemyksen mukaisesti. Turhia vaiheita poistettu ja uusi lisätty: poistettu vain pisteiden käyttö ja lisätty mallintaminen vain mittatietojen perusteella.



Kuva 64 Kulkukaavio ja osa tuloksista

5 TUTKIMUKSEN TARKASTELU

5.1 Tavoitteiden täyttyminen

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia soveltuvia reittejä olemassa olevasta rakennuksesta FEM-malliksi. Soveltuvia reittejä löydettiin useita. Suunnitteluprosessin kulku tulee suunnitella tapauskohtaisesti tehtävän ja tekijän mukaisesti.

Työssä oli tarkoitus tutkia keinoja muokata pistepilveä rakennesuunnittelun kannalta hyödynnettävään muotoon. Työssä jäsenneltiin muokkaamisen prosesseja ja onnistuttiin luomaan muokkaamista helpottavia toimintamalleja ja sovellutuksia. Erilaisten sovellutusten tarkoituksena oli poistaa manuaalista työtä suunnitteluprosessissa. Pistepilven muokkaamiseen tarkoitettu sovellutus ja jäsennely prosessi voi poistaa oikein käytettynä manuaalista työtä. Sovellutusten prosesseja tehostava vaikutus jäi kuitenkin tarkemmin tutkimatta.

Työssä pyrittiin tehostamaan lähtötietojen käyttöä työn kontekstissa. Samalla työn tarkoituksena oli ylläpitää tai lisätä rakennelaskennan laatua. Prosessien kulku ja reittien valinta havaittiin olevan tapauskohtaista. Ei voida näin ollen suoraan sanoa, että löydetyt reitit tehostaisivat suunnitteluprosessia tai tekisivät siitä laadukkaampia. Voidaan kuitenkin todeta, että soveltuvia tapoja hyödyntää pistepilviaineistoa rakennelaskennan tehtävässä esiteltiin työssä. Oikein käytettynä tietyyssä tehtävässä niillä on mahdollisuus tehdä prosessista tehokkaampia ja laadukkaampia.

Tutkimuksessa löydettiin case-yritykselle uusia toimintamalleja ja sovellutuksia pistepilven hyödyntämiseen rakennelaskennan tehtävissä. Tutkimuksessa havaittiin myös pistepilven muokkauksen sovellutusten olevan käyttökelpoisia muissakin kuin rakennelaskennan tehtävissä.

Työssä yhtenä tutkinnan osa-alueena oli tarkan mittatiedon vaikutus rakennelaskennan tarkkuuteen. Tutkimuksessa otettiin asiaan kantaa. Voidaan todeta, että mittatarkkuuden lisääntyminen mahdollistaa tarkempia rakenneanalyysyjä. Soveltuvat kohteet ovat aina rakennesuunnittelijan harkinnan varaisia.

Pääasiallisena tavoitteena oli löytää looginen polku olemassa olevasta rakennuksesta FEM-malliksi nykyaikaisia menetelmiä hyödyntäen. Tutkimuksessa vastattiin tavoitteeseen kulkukaavion avulla.

5.2 Havaitut haasteet

Prosessien tehostaminen automatisaation avulla vaatii paljon kehittämisen resursseja. Työn sovellutuksissa ja toimintamalleissa jäätiin yksittäisten työvaiheiden tasolle. Koko prosessin automatisointi vaatii paljon laajempaa kehitystyötä.

Käsiteltyjen pistepilvien mittaustoleranssi ei ollut tiedossa.

Pistepilveä jalostettaessa tarvitaan useita tietokoneohjelmia. Erialaisten ohjelmien hallitseminen vaati selvitystyötä. Työssä oli käytössä vain case-yrityksen käytössä olevat ohjelmistot. Näin ollen tutkimuksen ulkopuolelle on voinut jäädä käytökelpoisia ohjelmistoja.

Mitta-aineistoja on lähtötietoina monissa eri formaateissa ja tiedostomuodoissa. Työssä on esitelty pintamallit, kolmioverkkomalli ja pistepilvet. Eri ohjelmistot käyttävät eri tiedostomuotoja. Työssä on käsitelty vain e57 – tiedostomuotoa. Tämä luo haasteita aineistojen käsittelyyn.

Pistepilvet ovat suuria tiedostokooltaan ja vaatii paljon tietokoneen laskentatehoa. Pistepilvien käsittely vaatii usein tiedostokoon pienentämistä pienemmillä resursseilla käsiteltävään muotoon. Pistepilven muokkausta pienempään tiedostokokoon on käsitelty työssä.

Aihealuetta tutkittaessa huomataan aiheen kehitystyö muualla. Tutkinnan haasteena on aikasidonaisuus. Tämän hetken tieto voi olla irrelevanttia seuraavan kehitysaskelen, esimerkiksi tietyn ohjelmiston päivityksen, jälkeen. Rakennesuunnittelu, osana koko rakennusalaan, on suuressa digitaalisessa murroksessa. Uusia digitaalisia toimintamalleja otetaan käyttöön kiihtyvällä tahdilla. Haasteena yksittäisellä toimijalla on pysyä kehityksen mukana ja keskittyä oman toiminnan kannalta olennaisiin kehityslinjoihin.

5.3 Tutkimusmenetelmän soveltumisen arviointi

Tutkimuksessa tutustuttiin aikaisemmin tehtyihin kehitysprojekteihin ja testattiin tällä hetkellä yrityksen käytössä olevia tietokoneohjelmistoja. Teoriapuolelta aiheista löytyi paljon materiaalia. Saman kaltaisia tehtäviä oli suoritettu muissa tutkimuksissa. Esimerkiksi pistepilven hyödyntämisessä arkkitehtisuunnittelussa laajasti tutkittu aihe.

Toteutusta testattiin todellisilla case-kohteilla ja keinotekoisilla testikohteilla. Case-kohteiden testaus tapahtui työn tilaajan projekteissa. Kohteista ja testeistä kirjattiin opinnäytetyöhön havaintoja, metodeja ja työn kulkua. Toteutus-tapa todettiin toimivaksi tutkimuksen kaltaiseen kehitystyön aloitukseen.

Kehitystyön aloituksessa pyrittiin luomaan kuva mahdollisuuksista ja löytää erilaisia toimintatapoja. Oletettujen polkujen kokeileminen käytännössä oli tutkimuksen tulosten kannalta oleellista. Jatkokehityksessä on syytä keskittyä tarkemmin spesifimpään osa-alueeseen tutkimuksen mielekkyyden takaamiseksi.

6 YHTEENVETO

6.1 Tulosten yhteenveto

Olemassa oleva rakennus on korjaus- ja muutusrakentamisessa tärkeimpiä lähtötietoja. Suunnittelija tarvitsee ajantasaista mittatietoa rakennuksesta. Vanhoissa piirustuksissa on usein puutteita laadussa ja kattavuudessa. Olemassa olevaan rakennukseen joudutaan näin ollen tukeutumaan lähtötietojen hankinnassa.

Mittausdataa on mahdollisuus kerätä vanhasta olemassa olevasta rakennuksesta monin eri tavoin. Manuaalinen mittaaminen ja taulukointi on väistynyt laserkeilauksen ja fotogrammetrian tieltä. Tietokoneiden laskentakapasiteetti on avainasemassa tässä kehityksessä. Mittaustietoa saadaan kerättyä laajoista kokonaisuuksista helposti ja nopeasti. Mittausdatan jalostaminen hyödynnettävään muotoon tehdään tietokoneavusteisesti.

Työssä käsiteltiin pääasiassa mittausdataa pistepilven muodossa. Pistepilvi on joukko pisteitä, joilla on kartoitetun kappaleen pinnassa olevien pisteiden sijaintitieto. Sijainnin lisäksi pisteiden ominaisuuksia ovat heijastuksen intensiteetti ja väri. Tietokoneavusteisesti pisteelle määritetään normaalisuunta, joka kertoo inventoidun kappaleen pinnan suunnan. Pisteeltä ei ole dimensioita tai massaa.

Pistepilvi on usein laaja aineisto ja sen suuri tiedostokoko vaikeuttaa pistepilven käsittelyä. Pistepilveä täytyy muokata tarpeeseen sopivaksi jalostettaessa sitä rakennesuunnittelun tarpeisiin. Yksi tapa hyödyntää pistepilven sisältämää mittausdataa on käyttää sitä lähtötietona rakennelaskentamallia varten.

Pistepilviaineistoa on muokattava laskentamallia varten. Tähän on monia eri tapoja. Oikea polku lähtötietoaineistosta laskentamalliksi on arvioitava tehtäväkohtaisesti ottaen huomioon lopputuotteen ja lähtötietojen erityispiirteet. Pistepilvestä muokataan rakennesuunnitteluun soveltuvaa lähtötietoa esimerkiksi harventamalla, pilkkomalla, yhdistelemällä ja leikkaustasoja tekemällä. Muokkaamisen tarve määräytyy tehtäväkohtaisesti. Muokkaamisella on tarkoitus tehdä

suunnittelutoiminnosta jouhevampaa ja tehokkaampaa. Muokkaaminen ei ole itse tarkoitus vaan työkalu lopputuotetta varten.

Muokattua pistepilviaineistoa voidaan hyödyntää rakennelaskennan tehtävässä. Aineistoa voidaan hyödyntää laskentamallin lähtötietona. Lähtötiedosta saadaan tietoa rakenteiden asemista ja dimensioista. Pistepilven käyttöön rakennelaskentamallin lähtötietona on monia vaihtoehtoja. Tärkeintä on saattaa pistepilviaineisto mahdollisimman helposti hyödynnettävään muotoon laskentamallin kannalta.

Erilaisia lähtötiedon muotoja löydettiin työssä useita. Muotojen jalostusasteet vaihtelevat. Päätös käytettävästä jalostusasteesta on tehtävä tapauskohtaisesti. Jalostusasteen kasvaessa lähtötietoaineiston työstämiseen käytetty aika kasvaa. Toisaalta myös laskentamallintamisen nopeus saattaa kasvaa. Lähtötietoaineistosta tehdään tarkoituksen mukaisia. Laskentamallintamiseen on monia vaihtoehtoisia tapoja. Laskentaohjelma voidaan linkittää muiden ohjelmien kanssa ja laskentaohjelmaan voidaan tuoda tiettyjä tiedostoja taustatiedostoiksi mallintamisen helpottamiseksi. Dwg-muotoiset viivat ja pisteet voidaan tuoda joko taustatiedostoksi tai suoraan laskentamallin objekteiksi algoritmiavusteisen suunnittelun avulla. Työssä esiteltyjä erilaisia soveltuvia aineiston muotoja laskentamallintamiseen olivat (RFEM 5.25):

- Rakenteiden leikkauksista solmupisteitä ja viivoja laskentaohjelmaan (.dwg)
- Rakennuksen leikkauspiirustus laskentaohjelmaan (.dwg)
- Pistepilvidata taulukko-ohjelmaan laskentaohjelmaa varten (excel)
- Pistepilvi laskentaohjelmistoon BIM-mallin kautta (Tekla Structures)
- Linkitys laskentaohjelman ja eri ohjelmien välillä (esim. Rhinoceros – RFEM linkki)

Rakennelaskentamalli, työssä RFEM 5.25 – malli, on rakenneanalyysiä varten kehitetty työkalu. Laskentamallilla voidaan ratkaista monimutkaisia rakenneanalyysijä elementtimenetelmän keinoin. Analyysijä voidaan tehdä rakennejärjestelmistä, joiden laskeminen ilman tietokoneavusteisuutta olisi käytännössä mahdotonta.

6.2 Tulosten pohdinta

Lähtötietojen monimuotoisuus ja vaihtelevuus projektikohtaisesti luo paineen löytää erilaisia lähestymistapoja tietyn tehtävän suorittamiseksi. Laadukkaan rakennelaskentamallin tekemiseen on monia reittejä. Lähtötietojen muodot muuttuvat ja kehittyvät. Lähtötietojen muokkaamisesta tulee tietokoneavusteisesti koko ajan helpompaa tietokoneiden ja ohjelmistojen kehityksen myötä. Tutkimuksessa löydettiin erilaisia tapoja muokata ja jalostaa pistepilvitiedostoja laskentamallintamista varten.

Tutkimuksessa löydettiin useita pistepilven jatkojalostuksen toimintamalleja, joiden avulla voidaan tehdä rakennelaskentamallia. Tutkimuksessa ei vertailtu eri toimintamallien soveltuvuutta erilaisten rakennelaskennan tehtävien suorittamiseksi. Tässä on kuitenkin tapauskohtaisesti pohdittu mahdollisia soveltamisen kohteita ja toimintatapojen ominaispiirteitä.

- Rakenteiden leikkauksien solmupisteitä ja viivoja tuodaan taustatiedostoksi tai objekteiksi laskentaohjelmaan
 - o yksittäisten rakenneosien rakenneanalyysi, esim. palkki
 - o selkeiden rakennekokonaisuuksien rakenneanalyysi, esim. palkisto
 - o parametristen suunnitteluohjelmistojen hyödynnettävyys rakennelaskentamallintamisessa
- Rakennuksen leikkauspiirustus tuodaan taustatiedostoksi tai objekteiksi laskentaohjelmaan
 - o rakennekokonaisuuksien mallintaminen, esim. kehäristikko tai kerrostaso
 - o käyttökelpoinen etenkin kohteissa, joissa suunnittelua tehdään 2d-leikkaustasokuvina joka tapauksessa
 - o parametristen suunnitteluohjelmistojen hyödynnettävyys rakennelaskentamallintamisessa
- Pistepilvidata tuodaan taulukko-ohjelman kautta laskentaohjelmaan pisteiksi (MS Excel)
 - o yhtenäiset mahdollisuudet soveltamiselle kuin kahdella edellisellä tekotavalla
 - o pistejoukkojen hallinta taulukkomuotoisesti
 - o vaatii taulukko-ohjelmiston edistynyttä käyttöä

- mahdollistaa kokonaisuuksien hallinnan ja rakennelaskentamallintamisen MS Excel – RFEM linkin avulla
- Pistepilvi tuodaan laskentaohjelmistoon BIM-mallin kautta suoraan objekteiksi (Tekla Structures)
 - rakennekokonaisuuksien rakenneanalyysi
 - käyttökelpoinen etenkin kohteissa, jossa kohteesta tehdään BIM-malli joka tapauksessa

Tutkimuksessa tutkittiin tapauksia, joissa rakennelaskennan lähtötietona ovat vain pistepilvi ja vanhat rakennesuunnitelmat. Tuloksissa huomattiin, että pistepilven muokkaaminen vaatii aikaa ja resursseja. Näin ollen on perusteltua pohtia, että pistepilven muokkaamista ja sen käyttöä rakennelaskennan lähtötietona on syytä välttää, mikäli muita jo tapaukseen muokattuja lähtötietoja on saatavilla. Ensisijaisesti kannattaa käyttää arkkitehdin tuottamaa digitalisoitua aineistoa laskentamallin lähtötietoina. Arkkitehdin BIM-mallia ja leikkaus- ja tasopiirustuksia voidaan hyödyntää laskentamallin lähtötietona, kuten tutkimuksessa jalostettua pistepilveäkin. Perinteisessä projektissa arkkitehti vastaa rakennuksen asemasta ja dimensioista. Arkkitehdin mallintaessa olemassa olevaa rakennusta tulisi mahdollisen käytössä olevan pistepilven olla arkkitehdin lähtötietona. Kuitenkin korjaus- ja muutosrakennesuunnittelussa tulee vastaan tehtäviä, joissa pistepilveä täytyy hyödyntää laskentamallin lähtötietona. Rakennesuunnitteluprosessi on optimoitava tehtäväkohtaisesti.

Tutkimuksen aikana huomattiin, että tutkimuksen osuus pistepilven muokkaamisesta voi liittyä moniin muihinkin pistepilven hyödyntämisen tehtäviin, kuin pelkästään rakennelaskentamallintamisen tehtävään. Muokkausten jälkeen pistepilveä voisi olla helpompi käsitellä esimerkiksi tietomallintamisen tehtävissä tai edellisen kappaleen mukaisesti arkkitehdin lähtötietona.

Digitalisaatio ja suunnitteluprosessien automatisaatio alati kasvava ja muuttuva trendi. Tutkimuksessa huomattiin teknologinen murros suunnittelun automaatioissa ja parametrisen suunnittelun hyödyntämisessä rakennesuunnitteluprosessissa. Tutkimuksen aikana havaittiin scan-to-bim sovellutuksien keskeneräisyys. Pistepilvistä ei vielä pystytä tuottaa automatisoidusti ja luotettavasti BIM-malleja.

Ohjelmistojen lisenssit maksavat ja niiden kehitys on ohjelmistoyrityksen takana. Kehityksen prioriteetit eivät aina kohtaa käyttäjän prioriteettien kanssa. Yritykset ja yksityishenkilöt joutuvat ohjelmistojen osalta käyttäen tarveharkintaa. Välillä kalliit ohjelmistot on syytä korvata muilla toimintatavoilla, vaikka se lisäisi työmäärää. Kaikkia käytössä olevia tarpeellisia ohjelmistoja on osattava käyttää sujuvasti, jotta työvaiheet etenisivät ilman katkoja. Kalliit ohjelmistolisenssit voivat vaatia isoa ja kannattavaa tilauskantaa ollakseen perusteltuja hankintoja.

Kehitystyön organisointi ja priorisointi on myös pohdittava asia. Kuinka paljon konsulttiyrityksen on syytä laittaa panoksia kehitykseen, jota samaan aikaan tekevät ohjelmistokehittäjät. Onko kannattavampaa kehittää omilla resursseilla vai hankkia uusimmat teknologiat markkinalta? On harkittava, saadaanko omalla kehitystyöllä kilpailukykyisiä vaihtoehtoja ohjelmistoille.

Työ antaa suuntaviivoja pistepilven saattamiseksi rakennelaskentamalliksi, mutta jatkokehitys on tarpeen. Työn tuloksena syntyi kuitenkin kehitystä. Pohdinta jatkoa silmällä pitäen on tärkeää. Monet ohjelmistoyritykset kehittävät pistepilvien hyödyntämistä sovellutuksissaan. Teknologista kehitystä tulee seurata ja ohjelmistojen tarjontaa on kartoitettava säännöllisesti.

Lisääntynyt automatisaatio rakennesuunnitteluprosessissa hyödyttää oikein käytettynä rakennusprojektin kaikkia osapuolia. Rakennesuunnittelija pääsee nopeammin lähtötietojen muokkauksesta lopputulokseen ja voi allokoida resurssejaan projektin havaittuihin haasteisiin ja sovelluksia vaativiin osa-alueisiin. Tarkemman mittatiedon sisällyttäminen suunnitteluprosessiin voisi auttaa tuottamaan tarkempia ja laadukkaampia lopputuotteita. Materiaalin hukkaa voidaan vähentää. Mittatarkkuus ja asennettavuus voi parantua.

Automatisaatio tuo kuitenkin myös haasteita. Teknologinen kehitys on nopeaa ja uusia toimintamalleja ja ohjelmistoja on opittava käyttämään. Tietokoneiden laskentatehon kasvaessa ohjelmistoista on tullut entistä monikäyttöisempiä, siten mahdollisesti monimutkaisempia käyttäjälle. Suunnitteluratkaisujen tullessa automaattisemmin saattaa vähentyä suunnittelijan oma ajattelu ja kriittinen pohdinta lopputulosta kohden. Suunnittelu-aika vähenee ja suunnittelusta voi tulla entistä hektisempää. Tämä saattaa vaikuttaa lopputuotteen laatuun. Hiljaisen tiedon

omaavat kokeneet työntekijät eivät välttämättä ota uusia toimintatapoja ja ohjelmistoja haltuun yhtä sujuvasti kuin nuoret suunnittelijat. Kehityksessä voi hävitä arvokasta tietoa.

Uudet toimintamallit ja automatisaatio oikein valjastettuna rakennesuunnitteluorganisaation käyttöön antaa paljon mahdollisuuksia parempaan suorittamiseen laadullisesti ja taloudellisesti. Teknologia voi mahdollistaa tuotteen lisäarvon kasvun, joka voi johtaa asiakas- sekä sidosryhmätyytyväisyyden kasvuun.

6.3 Jatkotutkimusehdotukset

Korjaus- ja muutosrakentamisella on tärkeä rooli kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttamiseksi. Kestävä kehitys on suuri markkina-ajuri. Tämän vuoksi teknologinen kehitys on edennyt korjaus- ja muutosrakentamisen työkaluissa. Yksi alan haaste on vanhan rakennuksen kartoittaminen suunnittelun lähtötiedoksi. Pistepilvet ja sovellutukset pistepilvien ympärillä vastaavat tähän haasteeseen. Olemassa olevien rakennusten kartoittamisen ja mittausdatan hyödyntämisen automatisointi hyödyttää ratkaisevasti korjaus- ja muutosrakentamisen toimijoita. Pistepilviä käsittelevien ohjelmistojen toimittajat pyrkivät entistä automaattisempaan tapaan hyödyntää pistepilviä. Tämä kehitys hyödyttää työssä tutkittua rakennelaskentamallintamista ja sitä on syytä tutkia tarkemmin.

Ohjelmistokehittäjien suurimpia kehityskohteita on niin sanottu Scan-to-BIM sovellutukset pistepilviaineistojen jalostamiseksi. Scan-to-BIM sovellutuksessa pistepilvestä tuotetaan BIM-malli mahdollisimman automatisoidusti. Tätä kehitystä on seurattava ja kehitykseen on hyvä osallistua resurssien mukaisesti. Automatisoitu tapa tuottaa BIM-malli pistepilven avulla tarkoittaa paremmin automatisoitua tapaa tehdä rakennelaskentamalli pistepilven avulla. Kehitys rakennelaskentamallin tuottamisesta BIM-mallin avulla on nykyisin jo pitkällä ja prosessiin on kehitetty automatisoituja toimintoja. BIM- ja laskentaohjelmien välillä on rajapintoja, jotta ohjelmien välillä voidaan siirtää informaatiota. BIM-malli on hyvin yleinen rakennelaskentamallin lähtötieto.

FEM- ja BIM-mallin yhdistämistä on syytä tutkia. Yhdistäminen on mahdollista esimerkiksi pilvipalveluiden avulla. Tietokoneiden laskentatehon lisääntyessä

voisi laskentamalli ja BIM-malli olla yhdistettävissä ohjelmistolla. BIM- ja laskentamallin yhdistäminen on oleellista tutkimuksen alueella. Yhdistettäessä formaatteja on tieto vähemmän sirpaloituneessa muodossa ja BIM-mallin tekemiseen voitaisiin keskittyä projektissa laskentamallin ollessa BIM-malliin sidoksissa.

Laskentamallin laadulliset seikat vaativat lisätutkimusta. Lisääntynyt mittatarkkuus ja todellisen tilanteen kartoitus tuo lisää tarkkuutta laskentamallia varten. Projekteissa voi tulla rakenneanalyysin kannalta haastavia ja ratkaisevia paikkoja, joihin tulee soveltaa tarkempaa laskenta-analyysia. Tarkemmalla mittaamisella voidaan saavuttaa hyötyjä toteamalla todellisesta tilanteesta esimerkiksi alkuvirheitä ja taipumia epälineaarista laskenta-analyysia varten. Tässä työssä on rajattu pois lähtötietoaineiston mittaustoleranssi ja pistepilviaineistojen asemoinnin mahdolliset haasteet. Nämä ovat avainasemassa kartoituksen käytön ja laadun kannalta. Mittaustoleranssi ja asemoinnin haasteet vaativat jatkotutkimusta, jotta voidaan todeta edellä esitellyn toimintatavan mielekkyys. Jatkotutkimuksessa voitaisiin myös ottaa kantaa erilaisiin tapoihin varmistua ja parantaa mittaustarkkuutta ja -toleranssia.

Käytännön sovellutuksissa jatkotutkimuksen aiheita voisi olla tutkimuksessa esitellyjen ratkaisujen laajempi automatisointi algoritmiavusteisen suunnittelun avulla. Myös taulukkomuotoisen pistepilviaineiston automaattinen jalostaminen rakennesuunnittelun käyttöön on jatkotutkimukseen mahdollinen aihe. Taulukko-ohjelmistoon on mahdollisuus rakentaa automaattisia toimintoja pistedatan muokkaamiseen ja hallintaan. Koneäön sovellutuksia voisi olla syytä tutkia rakenneseosten tunnistamisen ja mallintamisen haasteissa.

Käsitellyn pistepilven tarkkuus ja laatu voisi olla jatkotutkimuksen aihe. Harvennuksen vaikutuksia tarkkuuteen ja eri harvennusmenetelmien eroja tarkkuuden näkökulmasta on hyvä pohtia.

LÄHDELUETTELO

- Betonyhdistys, S. (2014). *BY211: Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja - osa 2*. Suomen betonyhdistys.
- BuildingPoint Finland. (2023). <https://buildingpointfinland.fi/trimble-x7/>.
- CloudCompare. (2023). *CloudCompare User Manual Version 2.6.1*. CloudCompare.
- Dlubal. (27. 11 2023). *Dlubal: Structural Analysis and Design Software*. Noudettu osoitteesta dlubal.com: <https://www.dlubal.com/en/solutions/application-areas/building-information-modeling-bim/rfem-rstab-and-tekla-structures>
- Dlubal Software GmbH. (2020). *RFEM 5 Spatial Models Calculated According to Finite Element Method User Manual*. Tiefenbach 93468 Germany: Dlubal Software GmbH.
- Geodetic Services, Inc. (2023). *Basics of Photogrammetry*. Noudettu osoitteesta https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/#basics-photogrammetry-_Toc496190789
- Hyyppä, H.; Ahlavo, M.; & Kukko, A. (2009). *Lähilaserkeilauksella kohde kolmiulotteiseksi*. Maanmittauslaitos; Positio 1/2009.
- Jalkanen, J. (2022). *Luentomoniste (TAMK, YAMK): Epälineaarinen lujuusopin ongelma - Toisen kertaluvun teoria*. Tampere: TAMK.
- Joala, V. (2003). *Laserkeilaimen toimintaperiaatteet ja kalibrointi*. Espoo: Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu 40.
- Kalliomäki, M. (15. 02 2023). Asiantuntijahaastattelu. (J. Heinonen, Haastattelija) Tampere.
- Karjalainen, P. (2018). *Kantavien rakenteiden algoritmiavusteisen rakennesuunnittelun kehittäminen*. Tampere.
- Lappi, H. (2020). *Teollisuuskohteen pistepilvien vertailu ja hyödyntäminen*. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT.
- Laurila, P. (2012). *Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet* (Julkaisusarja D nro. 3 p.). Rovaniemen Ammattikorkeakoulu.
- Liu, G.; & Quek, S. (2003). *The Finite Element Method: A Practical Course*. Oxford: Elsevier Science Ltd.
- Lähteenmäki, M. (2012-2013). *Opintojakson K-12120 Elementtimenetelmän perusteet arkistomateriaali*. Tampere.

- McNeel. (2023). *Rhinoceros modeling tools for designers - Training Manual Level 1*. McNeel. Noudettu osoitteesta https://docs.mcneel.com/rhino/6/training-level1/en-us/Default.htm#topics/_title_page.htm%3FTocPath%3D_____1
- Methods, N. F. (2008). *Wriggers, Peter*. Hannover: Springer.
- Moffit, F.; & Mikhail, E. M. (1980). *Photogrammetry* (3rd p.). Harper & Row, Inc.
- OpenGenus. (2023). Haettu 21.09.2023 osoitteesta <https://iq.opengenus.org/about/>
- Rakennustieto. (2006). *Kerrostalot 1880-2000: Arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen*. Helsinki : Rakennustieto Oy.
- Rakennustieto. (2019). *Ohjekortti RT103133 Rakennuksen laserkeilaus*.
- Risulahti, J. (Kesäkuu 2016). *Tietomallipohjainen rakennesuunnittelu ja lähtötietojen selvitys korjausrakennuskohteessa*. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto. Noudettu osoitteesta <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/24265>
- Rombach, G. (2011). *Finite-element Design of Concrete Structures - Practical problems and their solutions* (Second p.). University of Hamburg-Harburg: Institution of Civil Engineers publishing.
- Savisaari, A. (2017). *Pistepilvitiedon hyödyntäminen korjausrakennushankkeen arkkitehtisuunnittelussa*. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto. Noudettu osoitteesta <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/24774>
- Trimble. (21. 11 2023). *Trimble RealWorks - 3D Scanning Software*. Noudettu osoitteesta <https://fieldtech.trimble.com/en/product/trimble-realworks> FieldTech Trimble:
- Wald, F.; & Jandera, M. (2019). *Stability and Ductility of Steel Structures*. Praha: Czech Technical University in Prague.
- Wriggers, P. (2008). *Nonlinear Finite Element Methods*. Hannover: Springer.