

Elementtiliitosten parametrinen suunnittelu



Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Visamäki, Rakentaminen

Syksy 2020

Markus Paloposki

Rakentaminen (YAMK)
Visamäki

Tekijä	Markus Paloposki	Vuosi 2020
Työn nimi	Elementtiliitosten parametrinen suunnittelu	
Työn ohjaaja /t	Seppo Aalto (HAMK) Sanna Kalanti (Sweco), Ilkka Wirkkala (Sweco)	

TIIVISTELMÄ

Rakentamisen ala on hyvin kilpailtu ala Suomessa ja kilpailun koventuessa rakennusalan konsultointiin erikoistuneet yritykset ovat pyrkineet erottumaan toisistaan niin laadun, hinnan kuin innovatiivisten ratkaisujen avulla. Suunnitteluprosessien digitalisoinnin ja osittaisen automatisoinnin on uskottu olevan ratkaisu, jolla saavutetaan suuri kilpailuetu niin laadun kuin tehokkuudenkin näkökulmasta. Kilpailuasetelman takia rakenteiden tietomallintaminen sekä tietomallien käyttö on yleistynyt voimakkaasti rakennesuunnittelussa ja tietomallintaminen on syrjäyttämässä periteisempänä suunnittelutapana pidetyn kaksiulotteisen CAD-suunnittelun.

Tutkimustyö toteutettiin Sweco Rakennetekniikka Oy:lle. Tutkimustyön tavoitteena oli perehtyä parametriseen tietomallintamiseen sekä selvittää sen soveltuminen rakenne- ja elementtisuunnitteluun. Elementtisuunnittelun prosessit sisältävät paljon toistuvia työsuorituksia, joiden automatisoinnilla pyritään tehostamaan suunnittelutyötä. Tutkimustyö rajattiin laattamaisten teräsbetonielementtien välisiin leukaliitoksiin erilaisten elementtiliitosten suuren määrän vuoksi ja leukaliitoksien suunnittelussa havaitun kehitystarpeen vuoksi.

Laattamaisten rakenneosien leukaliitosten mitoittamisen yhtenäistämiseksi ja tehostamiseksi tutkimustyössä tuotettiin ristikkomenetelmään perustuva laskentapohja. Tutkimuksessa selvitettiin myös laskennan ja tietomallintamisen yhdistämisen mahdollisuuksia.

Avainsanat Parametrinen suunnittelu, parametrinen mallintaminen, algoritmiavusteinen suunnittelu, ristikkomenetelmä, strut-and-tie

Sivut 51 sivua, joista liitteitä 6 sivua

Degree Program in Construction and Environmental Engineering
Visamäki

Author	Markus Paloposki	Year 2020
Subject	Parametric Design of Element Joints	
Supervisors	Seppo Aalto (HAMK), Sanna Kalanti (Sweco), Ilkka Wirkkala (Sweco)	

ABSTRACT

Construction is very competitive business in Finland. Construction consultancy companies compete against each other in price, quality and innovative design solutions. Computer aided design (CAD) is the most common way to design structures. Digital form-based design methods like BIM (Building information modelling) are become more common and it is suspected that they will replace CAD-designing. Parametric and algorithm aided designing will be the next level of BIM designing. Parametric design is assumed to give the competitive edge in relation to other companies.

This thesis was commissioned by Sweco Rakennetekniikka Oy. The goal in this study was to examine parametric design and to find out how it fits to construction designing. Element design processes are repetitive, and those processes are intended to automatize in order to get element design more efficient. This study focused on element joints between two concrete slabs.

Before this study was made there were many kinds of calculation methods which were difficult and slow ways to design concrete slab joints. The second goal of this thesis was to create calculation programme which offers faster and more reliable way of designing. Possibility of combining design and calculation programmes were also examined.

Keywords Parametric design, parametric modelling, algorithm aided design, strut-and-tie method

Pages 51 pages including appendices 6 pages

SISÄLLYS

LYHENTEET JA MERKINNÄT	
1 JOHDANTO	1
1.1 Tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoite	2
1.3 Tutkimuksen rajaaminen	2
2 TALONRAKENNUS JA SUUNNITTELU SUOMESSA	3
2.1 Rakentamista koskevat säädökset	3
2.1.1 Suomen rakentamismääräyskokoelman uudistaminen	4
2.2 Rakennushankkeen eri osapuolet ja rakennesuunnittelu	5
2.3 Tehokkuus	9
2.4 Betoni rakennusmateriaalina	9
2.5 Betonielementit ja elementtisuunnittelun taustaa	11
2.6 Elementtiteollisuuden nykytilanne	12
2.7 Elementtisuunnittelun kehitys	13
3 TIETOMALLIPOHJAINEN RAKENNESUUNNITTELU	13
3.1 Tietomallipohjainen rakenne- ja elementtisuunnitteluprosessi	14
3.2 Tietomallin vaiheet	15
3.2.1 Hankesuunnittelu (vaatimusmalli)	16
3.2.2 Ehdotussuunnittelu	16
3.2.3 Yleissuunnittelu	17
3.2.4 Hankintoja palveleva suunnittelu	17
3.2.5 Toteutussuunnittelu	17
3.2.6 Käyttöönotto ja ylläpito (toteumamalli)	17
3.3 Algoritmiavusteinen suunnittelu ja parametrinen mallintaminen	18
3.4 Parametrinen mallin lähtötiedot ja edellytykset	21
3.5 API-ohjelmointirajapinta	22
3.6 Teräsbetoniset laatat ja massiivilaattaelementit	22
3.6.1 Massiivilaattaelementtien liitokset	24
3.7 Ristikkomenetelmä (strut-and-tie)	24
3.7.1 Ristikkomallin luominen	25
3.7.2 Vetosauvat (tie)	27
3.7.3 Puristussauvat (strut)	28
3.7.4 Solmut (node)	29
3.8 Mitoituksen kulku	32
3.8.1 Puristussauvat	32
3.8.2 Vetosauvat	33
3.8.3 Solmut	34
3.9 Leukaliitoksen mitoitus	36
3.9.1 Sauvavoimat	37
3.9.2 Solmu S1 (CT)	37
3.9.3 Solmu S2 (CCT)	38

3.9.4	Solmu S3 (CTT).....	38
3.9.5	Lyhyen ulokkeen mitoitus	39
4	CASE- TUTKIMUS JA TUTKIMUSTULOKSET	40
4.1	Tutkimuskysymykset	41
4.2	Tutkimuksen toteutus ja vaiheet	42
4.2.1	Excel-laskentapohja.....	43
4.2.2	Laskentapohjan testaaminen	44
4.2.3	Parametrisen suunnittelun työkalu.....	46
4.2.4	Laattaelementin leukaliitoksen parametrinen mallintaminen	48
4.2.5	Leukaliitoksen suunnittelutehtävä	49
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	49
5.1	Haasteet ja kehitysmahdollisuudet.....	50
6	YHTEENVETO	51
	LÄHTEET	53

Liitteet

Liite 1	Maankäyttö- ja rakennuslaki
Liite 2	RFEM-laskenta
Liite 3	Lyhyen ulokkeen mitoitus: laskentapohja

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AAD	Algorithms-Aided Design, algoritmiavusteinen suunnittelu
API	Application Programmin Interface, ohjelmointirajapinta
BES	Avoin betonielementtijärjestelmä
BIM	Building Information Model, rakennuksen tietojen kokonaisuus digitaalisessa muodossa
CAD	Computer-Aided Design, tietokone avusteinen suunnittelu
DWG	CAD-ohjelmiston tallennusmuoto
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmällä suoritettu laskenta
FIB	Fédération Internationale du béton (International Federation for Structural Concrete), Betonirakenteiden Kansainvälinen organisaatio
IFC	Industry Foundation Classes Avoin tiedonsiirto muoto tietomallien siirtämiseen ohjelmistosta toiseen

1 JOHDANTO

Tämä ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö tutkimus tehdään Sweco Rakennetekniikka Oy:lle, mikä on Suomen rakennetekniikan markkinajohtaja ja tietomallintamisen edelläkävijä. Tietomallintaminen on Swecolla tärkeässä osassa suunnitteluprojekteja niin visualisoinnin kuin projektien läpivienninkin kannalta. Virtuaalisella suunnittelulla Sweco pyrkii varmistamaan suunnitelmien korkean laadun sekä rakennettavuuden.

Rakentamisen ala on hyvin kilpailtu ala niin Suomessa kuin maailman laajuisesti. Kilpailun koventuessa rakennusalan konsultointiin erikoistuneet yritykset ovat pyrkineet erottumaan toisistaan niin laadun, hinnan kuin innovatiivisten ratkaisujen avulla. Yritykset ovat panostaneet eri osa-alueisiin, mutta erityisesti yritykset ovat pyrkineet tehostamaan suunnitteluprosesseja ja projektien läpivientä. Suunnitteluprosessien digitalisoinnin ja osittaisen automatisoinnin on uskottu olevan ratkaisu, jolla saavutetaan suuri hyöty niin laadun kuin tehokkuudenkin kannalta. Suunnittelun automatisointia pyritään suuntaamaan töihin, joissa toistuvat kaavat ja samankaltaiset työsuoritukset, eikä innovatiivisuudella tai luovuudella ole merkittävän suurta roolia lopputuloksessa. Elementtisuunnittelun prosessit soveltuvat hyvin automatisoitavaksi, sillä ne sisältävät hyvin paljon toistuvia työsuoritteita, joiden automatisoinnilla saavutetaan ajallista hyötyä.

1.1 Tausta

Tietotekniikan käyttö suunnittelutyössä on mahdollistanut suunnittelijoille uusia työtapoja ja -menetelmiä perinteisemmän kaksiulotteisten tietokoneavusteisen CAD (Computer-Aided Design) suunnittelun rinnalle. Tietomallintaminen on tuonut mukanaan suuren potentiaalin rakennusalan kehittämiseen, mutta myös valtavan määrän lisätyötä ja kehittämisen aiheita. Tietomallintamisen työmäärä ja suunnitelmien uudistuneet laatuvaatimukset ovat luoneet suunnittelualalle selkeän tarpeen prosessien tehostamiseen, projektien muuttuessa entistä haasteellisemmiksi ja monimuotoisemmiksi.

Tietomallinnukseen rakennesuunnittelun alalla on uutena osana tullut mukaan parametrinen rakennesuunnittelu, jonka mahdollisuuksia ja potentiaalia on alettu tutkimaan tarkemmin. Parametrinen rakennesuunnittelun on tarkoitus olla askel eteenpäin nykyisin vallitsevasta komponenttipohjaisesta rakennusosien tietomallinnustavasta. Parametrisella rakennesuunnittelulla voidaan tutkia samalla kertaa useampaa joukkoa muuttujia kuin perinteisellä geometria valtaisella suunnittelulla. Näitä muuttujia voivat olla esimerkiksi rakenteen kuormitustiedot, rasitusluokat tai siihen liittyvät muiden rakenteiden asettamat reunaehdot kuten esimerkiksi rakenteiden väliset liitokset.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on perehtyä parametriseen suunnitteluun ja siihen, miten sitä voidaan hyödyntää rakenteiden ja elementtien välisten liitosten suunnittelussa. Tutkimustyötä aloitettaessa alkuolettamuksena on, että parametrisella elementtiliitossuunnittelulla voidaan automatisoida suunnittelijoiden työtä ja tällä tapaa saavuttaa taloudellista hyötyä yritykselle sekä saavuttaa kilpailuetua muihin alalla toimijoihin nähden. Tutkimuksen tavoitteena on myös selvittää, voidaanko parametrien hyödyntämisellä rakennesuunnittelussa tuottaa laadukkaita ja alhaisen riskitason suunnitelmia.

Tutkimuksen tavoitetta on tarkoitus lähestyä asteittain. Ensimmäisenä on tarkoituksena ymmärtää elementtien välisten liitostensuunnitteluun käytettäviä työkaluja, mallinnusvälineitä ja elementtisuunnitteluun liittyviä prosesseja. Kun prosessit ja käytössä olevat yleisimmät työkalut ymmärretään tutkimuksen kannalta riittävän hyvällä tasolla, voidaan arvioida menetelmien ja prosessien hyötyjä ja haittoja sekä selvittää parhaat mahdolliset menettelytavat ja kehityskohteet. Tutkimuksen tavoitteena on edistää ja tehostaa elementtisuunnittelua, jolloin tutkimuksen pääpainopiste on parametrisen mallintamisen positiivisissa puolissa negatiivisten puolien sijaan. Elementtisuunnittelun onnistumista mitataan usein myös kustannustehokkuuden näkökulmasta. Tutkimuksen yhtenä tavoitteena on optimoida elementtiliitoksen suunnittelua siten, että lopputulokseen syntyy mahdollisimman kustannustehokas, käytännöllinen ja turvallinen ratkaisu.

Tutkimuksen tuloksena on tarkoituksena tuottaa Sweco Rakennetekniikka Oy:n suunnittelijoiden käyttöön ohjelmistopohjainen työkalu, jonka avulla elementtiliitosten suunnittelu ja mallintaminen on turvallista sekä tehokasta. Tietomallintamisessa käytettävään työkaluun on myös tarkoitus yhdistää liitoksen kestävyyslaskenta, jotta suunnitteluratkaisua voidaan arvioida myös lujuusopillisesta näkökulmasta.

1.3 Tutkimuksen rajaaminen

Sweco Rakennetekniikka Oy käyttää tietomallintamiseen Trimble Solutions Oy:n Tekla Structures rakennesuunnitteluohjelmaa. Tekla Structures on yleisesti rakennesuunnittelijoiden käytössä oleva tietomallinnusohjelmisto, jolla voidaan mallintaa esimerkiksi rakenteita ja rakenneosia. Tästä syystä tutkimuksessa keskitytään kehittämään parametrista mallintamista juuri Tekla Structures ohjelmistolle. Ohjelman kehittäminen tukee Sweco Rakennetekniikka Oy:n strategiaa ja liiketoimintasuunnitelmaa. Työ rajataan tutkimaan suomalaista uudisrakentamista ja sitä koskevia määräyksiä.

Tietomallinnusohjelmistojen ja -käytäntöjen kehittymisen myötä rakenteiden ja elementtien mallintamisesta on tullut yksinkertaista ja nopeaa. Rakenteita ja niiden osia pystytään mallintamaan työkaluilla, jotka sisältävät

jo ennalta asetettuja esiasetuksia, jolloin toistuvia suunnitteluratkaisuja pystytään toteuttamaan suhteellisen nopeasti. Mallintaminen ja sen tehokkuus riippuu kuitenkin suunnitteluohjelman käyttäjästä eli ihmisestä, kuka tekee päätökset käytetyistä suunnitteluratkaisuksista sekä niiden mallintamisesta. Tehokkuusajattelun myötä toistuvien suunnitteluratkaisujen mallintamiseen onkin alettu kehittää ratkaisuja, jotka säästäisivät suunnittelijoiden aikaa sekä tehostaisivat mallinnussuoritusta. Seuraavana kehitysvaiheena tietomallintamisessa pidetäänkin suunnittelun automatisointia (parametrissa mallintamista). Parametrissa mallintamista on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.3.

Parametrinen mallintamisen tutkimustyö rajataan elementtiliitoksiin niissä ennalta havaitun kehitystarpeen vuoksi. Elementtiliitosten suuren määrän vuoksi tutkimusta rajataan vain pieneen määrään elementtiliitostyyppisiä, jottei opinnäytetyön työmäärä kasva kohtuuttomaksi. Tutkimuksesta saatua tietoa ja osaamista on tarkoitus hyödyntää myös opinnäytetyön jälkeen muihin elementtiliitostyyppisiin. Tutkimukseen on valittu tarkasteltavaksi massiivilaattaelementtien leukaliitokset yhdessä opinnäytetyön tilaajan kanssa, koska niiden laskentatavat ovat olleet vaihtelevia eikä leukaliitosten mallintamiseen ole aiemmin ollut sopivia mallinnustyökaluja.

2 TALONRAKENNUS JA SUUNNITTELU SUOMESSA

Suomessa rakentamista koskevat tekniset vaatimukset sekä viranomaisvalvonnan ja lupamenettelyn määräykset on esitetty Maankäyttö- ja rakennuslaissa. Tarkemmat tekniset vaatimukset on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelmassa ja Eurokoodeissa. Rakentamista ohjaavien säädösten ja lakien tarkoituksena on luoda edellytykset laadukkaalle rakentamiselle sekä valvoa rakentamisen laadukkuuden toteutumista. Rakentamisen laatua Suomessa valvovat kuntien rakennusvalvontaviranomaiset (Ympäristöministeriö).

2.1 Rakentamista koskevat säädökset

Eurokoodit ovat Euroopan standardisoimisjärjestön (CEN) standardeja, joita sovelletaan kaikkiin tärkeimpiin rakennusmateriaaleihin. Eurokoodien tarkoituksena on yhtenäistää CENin jäsenmaiden suunnittelua sekä poistaa kaupan teon esteitä jäsenmaiden kesken. Eurokoodit ovat kymmenen pääosaa sisältävä asiakirjakokonaisuus, joita käytetään yhdessä kansallisen liitteen (National Annex, NA) parametrien (Nationally Determined Parameters, NDP) kanssa. Kansalliset liitteet ovat erillisinä asiakirjoina julkaistuja ympäristöministeriön vahvistamina asetuksia. Suomessa Eurokoodit julkaisee Standardisoimisliitto. Eurokoodit julkaistaan Suomessa sekä suomen- (SFS-EN) että englanninkielisinä (EN) (BY21 2013, 13).

Suomessa rakenteiden suunnittelua säätelevät erilaiset säännökset ja suunnitteluohjeet. Rakenteiden säännökset voidaan jakaa seitsemään eri luokkaan niiden arvojärjestyksen mukaan:

1. Määräykset
2. Viranomaisohjeet
3. Standardit
4. Yhdistysten suositukset
5. Oppikirjat
6. Tutkimusjulkaisut
7. Tuotevalmistajien omat esitteet ja käyttöselosteet

Määräykset ovat vaatimuksia, joita suunnittelijan on noudatettava. Määräykset velvoittavat suunnittelemaan ja rakentamaan rakenteita, jotka ovat turvallisia ja terveellisiä. Viranomaisohjeet sisältävät hyväksyttäviä menetelmiä suunnittelun toteuttamiseksi. Standardit sisältävät viranomaisohjeita täydentäviä ja rinnakkaisia tietoja, joilla saavutetaan viranomaisohjeiden mukaisesti hyväksyttävä tulos. Yhdistysten suositukset ja yhdistystason ohjeet ovat myös viranomaisohjeisiin verrattavia, mutta eivät omaa viranomaisohjeiden statusta. Suosituksia on teetetty rakenteille, joille ei ole viranomaisohjeita. Oppikirjat ovat sisällöltään vaihtelevia ja saattavat sisältää vielä todentamattomia väittämiä ja tekijöidensä mielipiteitä. Oppikirjoja voidaan käyttää viranomaisohjeiden selityksinä ja teoriatietona. Tutkimusjulkaisut käsittelevät yleensä rajattua ongelmaa tai kokonaisuutta. Tutkimusjulkaisuihin tulee suhtautua kriittisesti ja tunnistaa niiden joukosta luotettavat julkaisut. Tuotevalmistajien esitteet ja käyttöselosteet voivat perustua tuotteiden alkuperämaan suunnitteluperusteisiin tai muihin kansainvälisiin ohjeistuksiin. Esitteiden ja käyttöselosteiden laskentaperusteet tulisi olla esitettyinä, jotta esitettyjä suunnitteluarvoja voidaan luotettavasti käyttää suunnittelussa. (By210 2005, 20-21.)

2.1.1 Suomen rakentamismääräyskokoelman uudistaminen

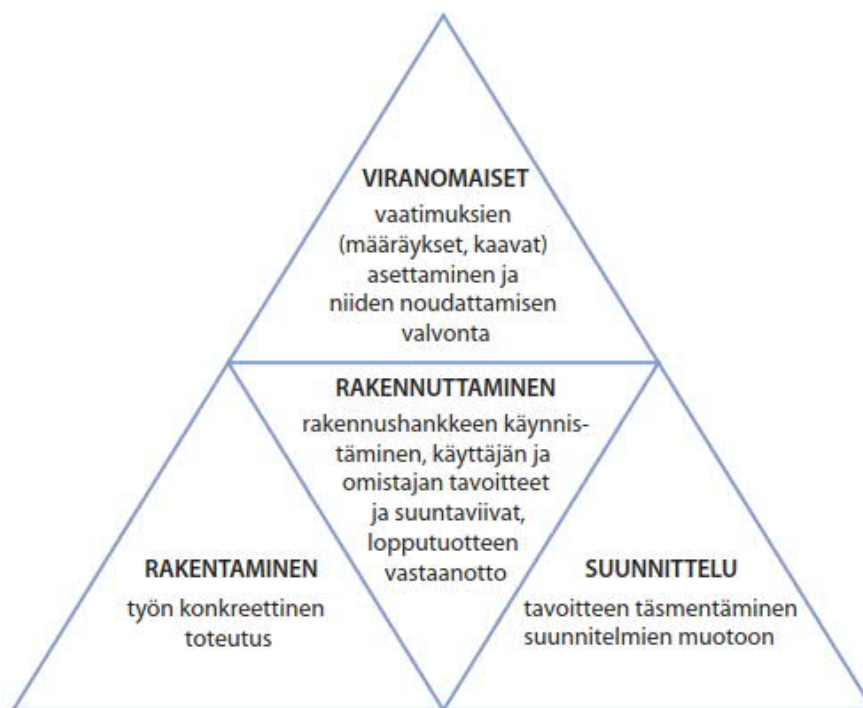
Joulukuussa 2017 valmistui Ympäristöministeriön vuonna 2013 käynnistynyt rakentamismääräyskokoelman uudistustyö. Uudistuksessa määräyskokoelma päivitettiin, jotta se vastaisi nykyaikaisia hyvän ja kestävä rakentamisen vaatimuksia, vuonna 2013 voimaan astuneen maankäyttö- ja rakennuslain mukaisella tavalla. Rakentamismääräyskokoelman uudistaminen toteutettiin vaiheittain ja uudet vaatimukset astuivat voimaan kokonaisuudessaan 1.1.2018. (Ympäristöministeriö.)

Ympäristöministeriön asetuksen (477/2014) mukaan rakennuksen kantavia ja jäykistäviä rakenteita koskevat olennaiset tekniset vaatimukset täyttyvät, kun rakenteet suunnitellaan ja toteutetaan eurokoodien sekä niitä koskevien ympäristöministeriön asetuksina annettujen kansallisten valintojen mukaan. Suunnittelijan on lisäksi otettava huomioon rakennuspai-kasta johtuvat olosuhteet. Sovellettaessa muuta kuin 1 momentissa

esitettyä suunnittelu- ja toteutusjärjestelmää, tulee rakennushankkeeseen ryhtyvän osoittaa rakennusvalvontaviranomaiselle rakennusvalvontaviranomaisen niin edellyttäessä, että suunnittelu- ja toteutus johtaa rakenteiden lujuuden ja vakauden, käyttökelpoisuuden ja käyttöiän kannalta olennaisten teknisten vaatimusten täyttymiseen. Rakenteellisesti yhtenä kokonaisuutena toimivissa uusissa rakenteissa saa käyttää vain yhtenäistä suunnittelu- ja toteutusjärjestelmää. Eurokoodeissa ja kansallisissa valinnoissa esitetään rakenteiden kuormituksille vähimmäisarvot, joita suunnittelussa tulee noudattaa. Rakennusvalvontaviranomainen voi hyväksyä muun suunnittelujärjestelmän käytön tapauskohtaisesti edellyttäen, että käytetyn suunnittelujärjestelmän luotettavuustaso on likimain sama kuin eurokoodeilla ja niitä koskevien kansallisten valintojen mukaisesti suunnitellun rakenteen luotettavuustaso. (Ympäristöministeriö.)

2.2 Rakennushankkeen eri osapuolet ja rakennesuunnittelu

Rakennushanke sisältää rakennuksen rakentamisen toimenpiteet rakennustarpeen toteutamisesta ja takuutarkastukseen. Rakennushankkeen vaiheet ja toteutus riippuvat hankkeen laajuudesta ja luonteesta. Rakennushanke voi olla luonteeltaan uudisrakentamista tai korjaamista. Hankkeen toteuttamistapaan vaikuttavat myös esimerkiksi rakennuksen käyttötarkoitus ja sijainti. Rakennushankkeen vaiheita toteutustavan mukaan ovat esimerkiksi hankepäätös, sopimukset, tutkimukset, suunnittelu, rakennusluvan hakeminen, rakentaminen, valvonta, käyttöönotto ja tarkastukset. (Betoniteollisuus ry n.d.) Rakennushankkeen eri osapuolet voidaan jakaa RT10-11222 ohjekortin mukaan karkeasti neljään osapuoleen: viranomaiset, rakennuttaminen, rakentaminen ja suunnittelu.



Kuva 1. Rakennushankkeen osapuolet (RT 10-11222 2016, 1)

Rakennushankkeen osapuolia ja keskeisiä tehtävänimikkeitä on esitetty Rakennustieto Oy:n ohjekortissa RT 10-12222:

1. RAKENNUTTAMINEN

- a. Rakennushankkeeseen ryhtyvä
- b. Rakennuttaja
- c. Käyttäjät

2. SUUNNITTELU

- a. pääsuunnittelija
- b. rakennussuunnittelija (arkkitehti)
- c. erityissuunnittelijat (rakenne-, LVI- ja S-suunnittelijat)
- d. asiantuntijat
- e. erityismenettely ja ulkopuolinen tarkastus

3. RAKENTAMINEN

- a. pää toteuttaja
- b. pää-, sivu- ja aliurakoitsija
- c. osaurakoitsija
- d. erityisalan urakoitsija
- e. tuoteosatoimittaja
- f. käyttäjien erillistoimittajat

4. VIRANOMAISET

Rakennushankkeeseen ryhtyvällä on oltava riittävät edellytykset rakennushankkeen toteuttamiseksi, hankkeen vaativuus huomioon ottaen. Rakennushankkeeseen ryhtyvän on varmistettava, että rakennus rakennetaan ja suunnitellaan rakennusluvan sekä rakentamista koskevien määräysten ja säädösten edellyttämällä tavalla. Rakennushankkeeseen ryhtyvän on myös varmistettava, että rakennushankkeen suunnittelijat ja työnohtajat täyttävät heille asetetut kelpoisuusvaatimukset. Rakennushankkeeseen ryhtyvän on myös varmistettava, että rakennushankkeessa toimivilla on vaatimukset täyttävä asiantuntemus ja ammattitaito. Rakennushankkeeseen ryhtyvä voi siirtää velvoitteitaan eri osapuolille, mutta huolehtimisvelvollisuus velvoitteiden hoitamisesta säilyy hänellä itsellään. (RT 10-11222 2016, 1.)

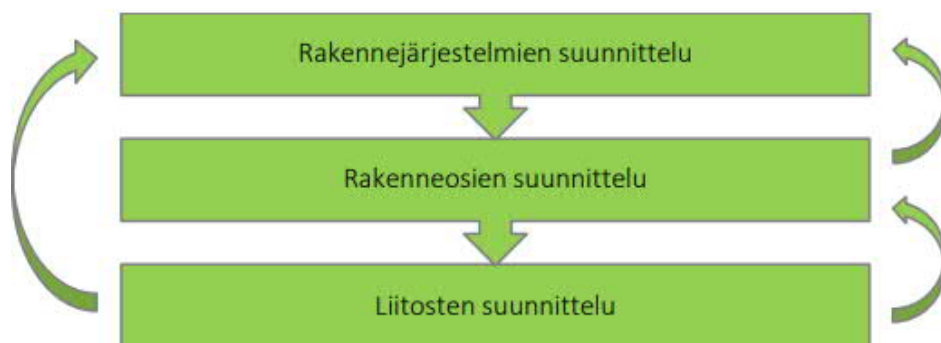
Rakennuksen suunnitteleminen etenee rakennuttajan ideasta valmiiksi suunnitteluasiakirjoiksi. Rakennuksen suunnittelu on eri suunnittelualojen suunnittelijoiden yhteistyötä. Rakennuksen suunnitteluun osallistuvat mm. rakennus-, rakenne-, GEO-, LVI- sekä sähkösuunnittelija. Rakennushankkeella tulee aina olla Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan pääsuunnittelija. Pääsuunnittelijana toimii usein kohteen rakennussuunnittelija eli arkkitehti. Pääsuunnittelijan tehtävänä on ohjata hankkeen suunnittelua yhdessä hankkeen rakennuttajan kanssa. Pääsuunnittelija vastaa erityissuunnitelmien yhteensovituksesta ja ristiriidattomuudesta, kuitenkin

siten, että jokainen erityissuunnittelija vastaa omasta suunnittelutyöstään ja laadunvarmistuksestaan. (Ympäristöministeriö.)

Rakennesuunnittelu on rakennuksen suunnittelemisen osa-alue, jossa suunnitellaan rakennuksen rakennetekninen toteutustapa. Rakennesuunnittelija toimii rakennushankkeen rakenneteknisenä asiantuntijana ja vastaa omalta osaltaan laadunvarmistuksesta ja riskien hallinnasta. Rakennesuunnittelijat ovat koulutukseltaan rakennusalan insinöörejä tai diplomi-insinöörejä. Rakennesuunnittelijan pätevyysvaatimukset perustuvat maankäyttö- ja rakennuslakiin sekä sitä täydentäviin asetuksiin ja ohjeisiin. Rakennesuunnittelijan tehtävänä on tuottaa rakennuksen laatu ja laajuus huomioon ottaen rakennesuunnitelmat, joista käyvät ilmi riittävässä tarkkuudessa rakennuksen perustamistapa, runkojärjestelmä, rakenteet sekä käytettävät rakennusmateriaalit. Rakennesuunnitelmat koostuvat rakennepiirustuksista sekä laskelmista ja selvityksistä. Rakennesuunnitelmista tulee käydä ilmi esimerkiksi rakennuksessa käytetyt lämmön, kosteuden, veden ja äänen eristämisen ratkaisut. Rakennepiirustuksia ovat yleensä paalutus-, perustus-, taso-, vesikatto-, rakenneosa- ja detaljipiirustukset sekä toimeksiannon sisällön mukaan myös elementtien valmistus-, asennus- ja sijoituspiirustukset. (Ympäristöministeriö.)

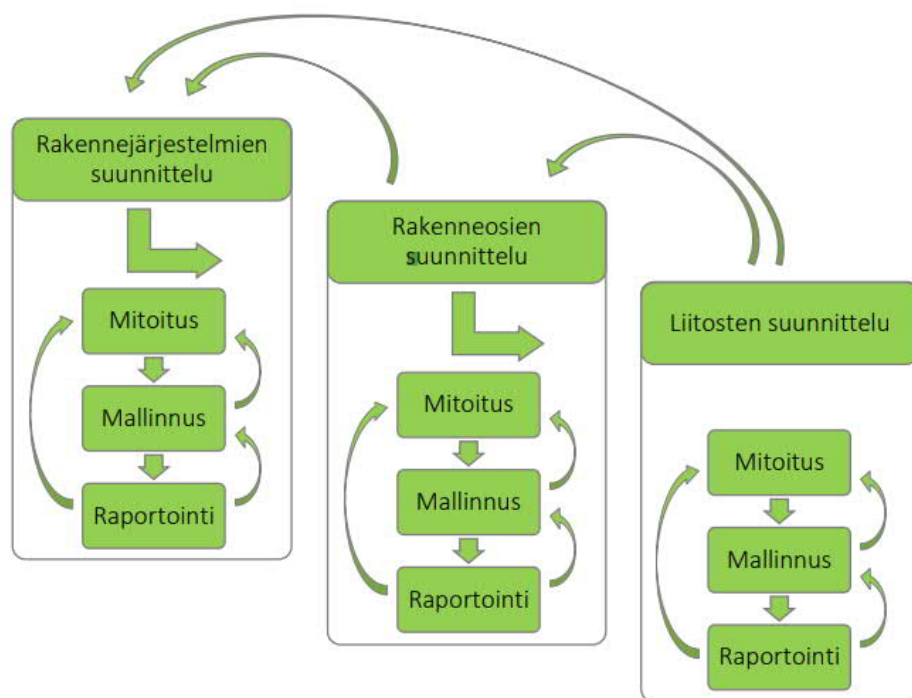
Rakennesuunnittelijalla tulee olla suunnittelutehtävän vaativuuden edellyttämä pätevyys. Suunnittelutehtävien vaativuusluokat ovat vähäinen, tavanomainen, vaativa (V ja V+) ja poikkeuksellisen vaativa. Vaativuusluokien ja suunnittelijan pätevyysvaatimusten määritelmät on esitetty Ympäristöministeriön ohjeissa. Suunnittelijan pätevyys koostuu tutkinnosta, tutkintoon liittyvistä opinnoista sekä työkokemuksesta. Pätevyysä voi hakea erikseen uudisrakentamisessa ja korjaus- ja muutostöissä. (Ympäristöministeriö.)

Rakennesuunnittelu etenee suuremmista ja laajemmista kokonaisuuksista kohti tarkempia suunnittelun yksityiskohtia. Rakennushankkeen rakennepiirustelmien alustavat selvitykset ja luonnossuunnitelmat tarkennetaan hankkeen edetessä rakentamisvaiheen toteutusta vastaaviksi toteutus-suunnitelmiksi. Rakennesuunnittelijan tehtävät voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri vaiheeseen: rakennepiirustelmien suunnitteluun, rakenneosien suunnitteluun ja liitosten suunnitteluun. Rakennushankkeiden eroavaisuuksien vuoksi yksiselitteinen tehtävien vaiheistaminen on vaikeaa. (Karjalainen 2018, 8.)



Kuva 2. Rakennesuunnittelun vaiheet (Karjalainen 2018)

Tietomallipohjainen rakennesuunnittelu voidaan jakaa kolmeen työvaiheeseen: mitoittamiseen, mallintamiseen ja raportointiin. Mitoittamisen ja mallintamisen työvaiheiden järjestys voi myös vaihdella tapauskohtaisesti. Mallintamisen voidaan liittää osittain myös mitoittamisen ja raportoinnin työvaiheisiin, mutta yleisesti katsoen mallintaminen on hyvin merkittävä osa rakenteiden suunnittelua, jolloin sitä voidaan käsitellä omana kokonaisuutena. Suunnitteluohjelmistojen ja -käytäntöjen monipuolistuessa rakennesuunnittelun työvaiheiden erottelu ei ole enää yhtä selkeää kuin ennen. Esimerkiksi rakenteiden mitoittamisessa voidaan käyttää erilaisia FEM-laskentaohjelmia, jolloin rakenteiden mallintamisen ja mitoittamisen vaiheet saattavat vaihdella useita kertoja suunnitteluprosessin sisällä. (Karjalainen 2018, 15-16.)



Kuva 3. Rakennesuunnitteluprosessin sisältö ja vaiheet (Karjalainen 2018)

Rakennesuunnittelu on projektityötä, jolle ominaisia piirteitä ovat kova kilpailu, tiukat aikataulut sekä suhdanneriippuvuus. Rakennusalan kehittymisen ja vaatimustason kasvamisen myötä projektien kokonaisvaltainen hallitseminen ja tehokas toteuttaminen on muodostunut entistä tärkeämmäksi. Suunnittelun tehostamiseksi on suunnittelussa siirrytty hyödyntämään entistä enemmän tietotekniikkaa, jonka käyttäminen mahdollistaa aikaisempaa suuremman ja tarkemman informaatio määrän tuottamisen. Erilaiset laskentaohjelmistot, BIM-tietomallit ja CAD-ohjelmat ovat tyypillisimpiä rakennesuunnittelun työkaluja.

2.3 Tehokkuus

Rakennesuunnittelu on projektityötä. Projektit ovat kooltaan ja luonteeltaan hyvinkin erilaisia, jonka vuoksi projektien organisoinnissa ja seurannassa painotetaan projektikohtaisesti eri asioita. Projektille määritetään etukäteen tavoitteet, joiden toteutumista seurataan tiiviisti projektin edetessä. Projektien toteutuksen onnistumisen kannalta tärkeitä tavoitteita ovat esimerkiksi kustannustehokkuus, ajanhallinta sekä laatu. (Leppänen 2019.)

Tehokkuus on yksi hyvän projektijohtamisen peruskomponenteista. Tehokkuutena pidetään kykyä saavuttaa ennalta asetetut tavoitteet käyttämällä resursseja kustannustehokkaasti. Tehokkuus käsite sisältää menetelmien, työskentely- ja toimintatapojen tehokkaan käyttötavan. Tehokkuuden saavuttaminen projektityössä vaatii työtehtävien ja ajankäytön yksityiskohtaista suunnittelua sekä kustannusten tarkkaa arviointia. Projektityön tehokkuutta voidaan parantaa kouluttautumalla ja valmentautumalla tehokkaaseen työskentelyyn sekä sitouttamalla projektitiimi tekemään tehokasta projektityötä. (Projektiyhdistys ry 2012, 54.)

Rakennesuunnitteluprojektin tehokkuus on monien eri osatekijöiden summa. Tehokkuus projektityössä sisältää esimerkiksi ajankäytön ja resurssien hallintaa, erilaisten työtapojen tuntemusta, kustannusten arviointia sekä laadun varmistusta. Projektin toteuttamisen laatu liittyy olennaisesti projektin tehokkuuteen. Laadukkaasti toteutetut suunnitelmat ja kerralla oikein tehty työ vähentävät yksittäisiin työsuoritteisiin kuluva aikaa ja edesauttavat tehokasta ajankäyttöä. Projektin vaatimukset tehokkuuden ja laadun näkökulmasta määritellään aina projektikohtaisesti. (Leppänen 2019.)

2.4 Betoni rakennusmateriaalina

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, jota tuotetaan vuosittain noin 13 miljardia kuutiometriä. Suomessa talonrakentamisessa käytetään betonia noin 5 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Betonia käytetään moniin eri käyttökohteisiin kuten infra- ja talonrakentamiseen ja siitä valmistetaan myös lukuisia erilaisia rakentamisen tuotteita kuten muun

muassa putkia, laattoja ja harkkoja. Betonia käytetään rakennustyömailla niin paikallavalettavissa rakenteissa kuin valmisosarakenteissakin. (Betonteollisuus ry n.d.)

Betonirakentaminen on erittäin vanha rakentamistapa, sillä sitä on käytetty jo antiikin Roomassa 200-100 eKr. Roomalaiset betonirakenteet kehittyivät ensimmäisen vuosisadan aikana eri kansojen savi- ja kalkkilaastirakenteista. Roomalainen betoni ei kuitenkaan vastannut nykypäivän betonia. Roomalaisen betonin sideaineena käytettiin potsolaania, mikä oli punertavan hiekan näköistä vulkaanista tuhkaa. Potsolaanin lisääminen kalkkilaastiin teki laastista erittäin lujaa ja mahdollisti myös vedenalaiset rakenteet. Potsolaanin lisäämisen myötä laasti kovettui myös vedenalla. Roomalaista betonia käytettiin yhdessä muiden rakennusmateriaalien kanssa liittorakenteissa ja sillä korvattiin muita arvokkaampia rakennusmateriaaleja kuten esimerkiksi kalliita kivilaatuja. Betonirakenteet perustuivat alkujaan puristusliitoksiin, joissa kappaleet tukeutuivat toisiinsa puristusvoiman avulla. (Väisänen 2005, 6, 7, 8, 9.)

Yksi tunnetuimmista betonirakenteista on vuosina 118-128 rakennettu Rooman Pantheonin (Santa Maria della Rotonda) betonikupoli, mikä on halkaisijaltaan 43,44 metriä. Kupolissa on valmistettu raudoittamattomasta betonista ja sen keskellä on 9 metriä halkaisijaltaan oleva reikä (oculus). Alkujaan betoni ei ollut yleinen rakennusmateriaali sen valmistukseen tarvittavan tulivuorituhkan heikon saatavuuden vuoksi, mutta nykyisenkaltaisen portlandsementin keksimisen myötä betonirakentaminen alkoi yleistymään 1800- ja 1900-luvuilla. Ensimmäiset sementtitehtaat aloittivat toimintansa Englannissa ja Ranskassa sekä sittemmin Ranskassa ja Tanskassa. Suomeen sementtiä alettiin tuoda vuonna 1856. Betonia hyödynnettiin aluksi laastina. Betonista valmistettiin aluksi myös kaivonrenkaita, viemäriputkia sekä erilaisia harkkorakenteita. (Väisänen 2005, 6, 7, 8, 9.)

Suomessa sementtiä on käytetty tietävästi ensimmäisen kerran Saimaan kanavan muurirakenteissa vuonna 1856. Saimaan kanavan rakennustöissä käytetty sementti oli vielä tuotu ulkomailta. Keravan Saviolle perustettiin Suomen ensimmäinen sementtitehdas vuonna 1869. Savion sementtitehtaan tuotanto lopetettiin 1894, kun tehtaan tuotantomäärät jäivät pieniksi ja ulkomainen kilpailu oli kovaa. Savion sementtitehtaan sulkeminen johti parinkymmenen vuoden taukoon suomalaisessa sementin tehdasvalmistuksessa. Kotimainen sementtituotannon käynnistyminen toimi kuitenkin lähtölaukauksena suomalaisen betonirakentamisen yleistymiselle. Aluksi betonia käytettiin Suomessa lähinnä perustuksiin ja vesirakenteisiin. Suomessa seurattiin kansainvälistä betonirakentamisen kehittymistä tiiviisti ja 1900-luvun alkupuolella teräsbetonirakenteet alkoivat yleistymään suomalaisissa rakennuskohteissa. (Hytönen 2009, 14, 15.)

2.5 Betonielementit ja elementtisuunnittelun taustaa

Betonin raudoittamista alettiin kokeilemaan 1800-luvun puolivälissä. Raudoitettua betonia kutsuttiin aluksi rautabetoniksi. Rautabetoni nimitystä käytettiin toiseen maailman sotaan asti, jonka jälkeen se nimettiin teräsbetoniksi. Joseph Monier on kuuluisin rautabetonin kehittäjä. Monier oli ranskalainen puutarhuri, joka haki vuonna 1855 patenttia kukkaruukkujen raudoitusmenetelmälle. Myöhemmin Monier sovelsi raudoitusmenetelmäänsä putkiin, seinälevyihin ja siltoihin. Sullo betonista valmistetut rakenteet olivat hyvin lähellä raudoitettuja elementtejä. Sullo betonirakenteissa betoni sullottiin puusta valmistettuihin muotteihin ilman raudoitusta. Raudoitusmenetelmien kehittämisen myötä 1850-luvulla patentoitiin lukuisia erilaisia teräsbetonirakenteita. 1850-luvulla alettiin myös tutkimaan raudoitusten jännittämistä. (Väisänen 2005, 9.)

Ensimmäisen kerran betonista valmistettua julkisivuelementtiä on tietävästi käytetty Lontoolaisessa rivitalossa vuonna 1882. Teräsbetonin varsinainen läpimurto tapahtui vuonna 1900, kun Francois Hennebique esitteli monoliittisen pilari-palkkirakenteen Pariisin maailmannäyttelyssä. Betonirungon kehittymisen myötä 1900-luvun alkupuolella alettiin Euroopassa ja Amerikassa kokeilemaan ensimmäisten kokonaisten elementtitalojen rakentamista. 1900-luvun alkupuolella käytyjen sotien jälkeen alettiin uudisrakentamiseen etsiä mahdollisimman tehokkaita ja taloudellisia tapoja rakentaa, jonka myötä betonielementtirakentamisen vauhti kiihtyi entisestään. (Väisänen 2005, 9.)

Suomessa esivalmistettujen betonituotteiden valmistus alkoi 1900-luvun alussa. Betonielementtiteollisuus alkoi yleistymään Suomessa 1950-luvulla, aluksi rakennustyömailla tai niiden lähellä tehtävin elementein ja myöhemmin tehdastuotannon myötä. Elementit olivat aluksi hyvin pieniä nosto- ja kuljetuskaluston rajallisuuden vuoksi. 1960-luvulla jo puolet rakennustuotannosta oli elementtitehtaissa tuotettuja elementtirakenteita. Betonirakentamisen heikkona ajanjaksona laadullisesti pidetään 1960-1970-lukua, jolloin voimakkaan kaupungistumisen myötä kaupunkilähiöihin piti rakentaa nopeasti ja edullisesti hyvin varusteltuja asuntoja. (Väisänen 2005, 11.)

1970-luvun vaihteessa Suomessa kehitettiin BES-järjestelmä (Betonielementtistandardi), jolla standardisoitiin betonielementit ja elementtiliitokset. BES-järjestelmää pidetään käänteentekeväenä asiana Suomen asuntorakentamisen nopean kasvun mahdollistamisessa. BES-järjestelmä perustui kantaviin päätyseinä- ja väliseinäelementteihin. Ei-kantavat julkisivut olivat sandwich-tyyppisiä ulkoseiniä ja välipohjarakenteena käytettiin esijännitettyjä ontelo- ja kotelolaattoja. Standardisoinnin tavoitteena oli luoda tuotantojärjestelmä, jolla saataisiin laskettua betonirakentamisen kustannuksia ja luotua perusta avoimelle asuntoteollisuuden sarjatuotannolle. Vuonna 1968 Suomen Betonteollisuuden Keskusjärjestön aloittama tutkimus valmistui vuonna 1970. (Väisänen 2005, 12.)

Suomen asuntotuotanto oli ennätysellisen kiivasta 1970-luvulla. Nopea rakentamistahti ja kustannusten minimointi johtivat siihen, että 1980-luvun alussa asuntotuotantoon alkoi kohdistua myös kasvavaa kritiikkiä. Kritiikki kohdistui erityisesti rakennusten ja asuinalueiden arkkitehtoniseen ilmeeseen ja heikkoon laatuun, jotka jäivät useasti asuntotuotannon tehokkuusajattelun jalkoihin. Betonielementeistä rakennettujen asuinrakennuksien yksipuolinen arkkitehtuuri alkoi vähentämään arkkitehtien kiinnostusta elementtitalojen suunnitteluun. BES-tutkimusta jatkettiin 1980-luvulla (Asukas-BES ja Runko-BES). Asukas-BES tutkimuksessa selvitettiin rakennuksien äänitekniikkaa ja julkisivujen suunnittelumahdollisuuksia. 1980-luvulla standardisointi siirtyi myös teollisuus- ja toimitilarakentamisen puolelle Runko-BES-aineiston myötä. Runko-BES yhtenäisti pilari-palkkirunkoisten rakennusten mittajärjestelmän. (Betoniteollisuus ry n.d.)

2.6 Elementtiteollisuuden nykytilanne

Talonrakentamisessa betonielementtejä käytetään kaikentyyppisissä rakennuksissa koosta ja käyttötarkoituksesta riippumatta. Yleisimmät betoniset runkojärjestelmät ovat vakioituja. Yleisimpiä Suomessa käytössä olevia runkojärjestelmiä ovat pilari-palkki-laattajärjestelmä sekä kantavat seinät-laattajärjestelmä. Vuoden 2008 tilastojen mukaan rakennusten rungoista oli betonielementtejä asuinkerrostaloissa ja toimistorakennuksissa 74%, toimitila ja varasto rakennuksissa 46%, teollisuusrakennuksissa 35% ja rivitaloissa 22%. Betonielementtien osuus kaikista runkorakenteista oli noin kolmannes. (Betoniteollisuus ry n.d.)

Rakennusallalla on alettu kiinnittämään aikaisempaa enemmän huomiota rakentamisen laatuun ja tehokkuuteen. Koko rakentamisprosessia on pyritty kehittämään entistä terveellisempään, turvallisempaan ja ympäristöystävällisempään suuntaan, mikä luo uudenlaisia haasteita rakennusallalle. Rakentamisen ja siihen liittyvien prosessien valvonnan kiristymisen ja laadunvarmistamisen myötä rakentaminen on mennyt entistä vahvemmin valvotuissa olosuhteissa tuotetuista teollisista valmisosista rakennettujen elementtirakennusten suuntaan. Tehdasolosuhteissa tuotetuilla valmisosilla saavutetaan parempi rakentamisen laatu, luotettavuus ja mittatarkkuus. Elementtirakenteilla säästetään myös rakentamiseen kuluvassa ajassa ja kustannuksissa. Elementtirakentamisen on tutkittu parantavan rakennustyömaiden työturvallisuutta. (Hakala 2018, 17-18.)

Betonielementtien tuotantovaihe koostuu useasta työvaiheesta. Näitä työvaiheita ovat muotti-, rauditus-, eristys-, varustelutyöt, betonointi, jälkihoito, muottien purku sekä viimeistely ja varastointi. Betonielementtien valmistus on ollut pitkään hyvin käsityövoittoinen teollisuuden ala. Elementtituotannon kehittymisen myötä betonielementtien valmistusprosessit ovat alkaneet hiljalleen koneellistumaan ja osaa elementtituotannosta on pystytty osittain jopa automatisoimaan. Betonitehtaiden kertakäyttöinen puu- ja vanerimuottikalusto on muuttunut uudelleen käytettäväksi

teräsmuottikalustoiksi. Betonielementtitehtailla on käytössä pääasiallisesti kaksi erilaista muottiratkaisua, kippimuotit sekä patterimuotit. Betonielementtien koot ovat suurentuneet nosturikapasiteettien kasvamisen myötä. Betonielementit ovat myös muodoltaan, pintakäsittelyiltään ja materiaaleiltaan entistä monimuotoisempia, mikä vaatii elementtisuunnittelulta aikaisempaa enemmän tarkkuutta ja lähtötietojen hallintaa. (Hakala 2018, 25-39.)

2.7 Elementtisuunnittelun kehitys

Rakentamisessa pyritään hyödyntämään entistä enemmän tehdas olosuhteissa valmistettavia työmaalla asennettavia valmisosia. Elementtirakentaminen on nopeampaa ja kustannustehokkaampaa kuin paikallarakentaminen. Teollisella valmisosarakentamisella pystytään säästämään sekä resursseja että rakennusmateriaaleja, sillä tuotannon ohjaaminen ja tuotanto olosuhteiden hallinta on helpompaa. Elementtisuunnittelulta vaaditaan entistä nopeampaa ja tarkempaa suunnittelua. Suunnittelun vaatimustason noustessa myös suunnitteluprosessit ovat kehittyneet. (Betonteollisuus ry n.d.)

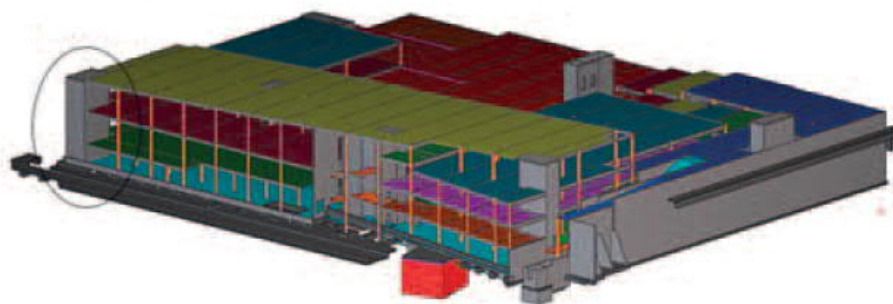
Betonivalmisosien suunnitteleminen tehdään nykyään täysin tietokoneavusteisesti. Elementtisuunnittelussa käytössä olevat yleisimmät työkalut ovat CAD- ja BIM-ohjelmistoja, joilla tuotetaan valmisosien valmistuskuvat. Valmisosakuvat sisältävät kaiken elementin valmistukseen tarvittavan tiedon kuten elementille asennetut vaatimukset, käytettävät materiaalit, geometrian, valutarvikkeet, nosto-osat ja raudoitteet.

Elementtisuunnittelun luonteeseen kuuluvat toistuvuus ja korkea valmisosien hyödyntämisaste. Elementtisuunnittelulla pyritään mahdollisimman tehokkaaseen tuotantotapaan, jolla säästetään materiaaleja ja tuotantoprosessiin kuluva aikaa. Elementtien suunnittelussa pyritään myös toistuvuuteen sekä valmiiden komponenttien käyttöön, joilla vähennetään suunnitteluun kuluva aikaa ja hyödynnetään jo olemassa olevia turvalliseksi ja käytännölliseksi todettuja ratkaisuja.

3 TIETOMALLIPOHJAINEN RAKENNESUUNNITTELU

Rakennuksen tietomallipohjaisen suunnittelun ajatuksena on tuottaa yhteinen tietomalli rakennuskohteesta eri suunnitteluosapuolten kanssa. Tietomallipohjaisella suunnittelulla pystytään yhteensovittamaan eri suunnittelualojen suunnitelmia entistä havainnollisemmin sekä vähentämään toteutusvaiheen virheitä ja ristiriitoja. Tietomallipohjaisessa rakennesuunnittelussa on pääasiallisena lopputuotteena CAD-suunnittelun tavoin perinteiset rakennepiirustukset, jotka ovat ulkoasultaan hyvin 2D-suunnittelulla toteutetun kaltaisia. Tietomallipohjaisen suunnittelun erona

perinteisempään suunnittelumalliin on se, että piirustukset voidaan tuottaa vasta kunkin suunnitteluvaiheen päättyessä. Piirustusten lisäksi tietomallintamisella saadaan lopputuotteeksi myös tietomalli, josta saatua dataa voidaan hyödyntää rakennusprojektin eri vaiheissa. Tietomalli poikkeaa CAD-ohjelmilla tuotetusta 3D-mallista siten, että osille syötetään geometriatietojen lisäksi myös muita osaa koskevia tietoja kuten esimerkiksi materiaaliominaisuuksia. Tietomallia hyödynnetään rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa. Tietomallin hyödyntäminen alkaa suunnitteluvaiheessa ja jatkuu aina rakennuksen toteutusvaiheen läpi. Tietomallia voidaan käyttää myös kunnossapidon ja ylläpidon apuna. (RT 10-11066 2012.)



Kuva 4. Tietomalli yleissuunnitteluvaiheessa (RT 10-11070, 4)

Rakennusten tietomallien käyttö on yleistynyt voimakkaasti ja tietomallintaminen on syrjäyttämässä periteisen kaksiuolotteisen CAD-suunnittelun. Tietomallipohjainen rakennesuunnittelu ja siihen liittyvät projektikäytännöt ovat uutta rakennesuunnittelualalla. Suunnittelutapojen kehittyminen ja monipuolistuminen on aiheuttanut myös projektikäytännöille sekä projektin johtamistavoille muutostarvetta. Tietomallin tietosisällön hallitseminen edellyttää suunnittelulle aikaisempaa tarkemmin asetettuja tavoitteita ja vaatimuksia. Tietomallintamista ja tietomallien käyttöä on tutkittu ja niiden pohjalta on luotu tietomallien tietosisältöä koskevia ohjeistuksia. Rakennusala on laatinut omat yhteiset periaatteet tietomallipohjaiselle suunnittelulle. Periaatteet on esitelty ”Yleiset tietomallivaatimukset 2012” julkaisussa ja ne ovat räätälöitävissä hankekohtaisesti.

3.1 Tietomallipohjainen rakenne- ja elementtisuunnitteluprosessi

Rakennushankkeen tietomallipohjainen rakenne- ja elementtisuunnitteluprosessi noudattelee hyvin paljon samaa kaavaa kuin perinteinen 2D-pohjainen rakennesuunnitteluprosessi. Tietomallipohjainen suunnitteluprosessi alkaa tarjousvaiheessa tarjousasiakirjoissa määritellyllä hankkeen tietomallintamisvaateella. Suunnittelijoiden valintojen yhteydessä tehdyissä suunnittelusopimuksissa määritellään tilaajan toimesta hankkeen tietomallintamista ja toteutuksen tietosisältöä koskevat määrittelyt ja vaatimukset. Rakennuskohdetta tietomallinnettaessa tehtävän työn määrä kasvaa suunnittelun edetessä ja tietomallin tarkentuessa.

Tietomallinnettavan hankkeen alkuvaiheessa ja suunnittelusopimuksissa on tärkeää määritellä mallinnuksen tarkkuus hankkeen eri vaiheissa, jotta mallinnusprosessi olisi tehokasta ja mallinnustarkkuus hanketta parhaiten palvelevalla tasolla. Tietomallien tiedon esittämiseen ja muutokseen liittyy myös suuri ylimääräisen työn riski, mikäli tietosisältöä joudutaan muuttamaan hankkeen edetessä. Tietomallit ovat hankekohtaisia, joten tietomallin asiasisällön määrittely tulee tehdä jokaiselle tietomallille erikseen. Rakennushanke saattaa sisältää useita eri tietomalleja hankkeen sijainti- ja laajuustietojen takia. Tietomallin luovuttamisesta ja julkaisemisesta eri suunnittelijoiden välillä sovitaan projektikohtaisesti ja tehdään tarvittavat tietomallien luovutussopimukset. (RT 10-11078.)

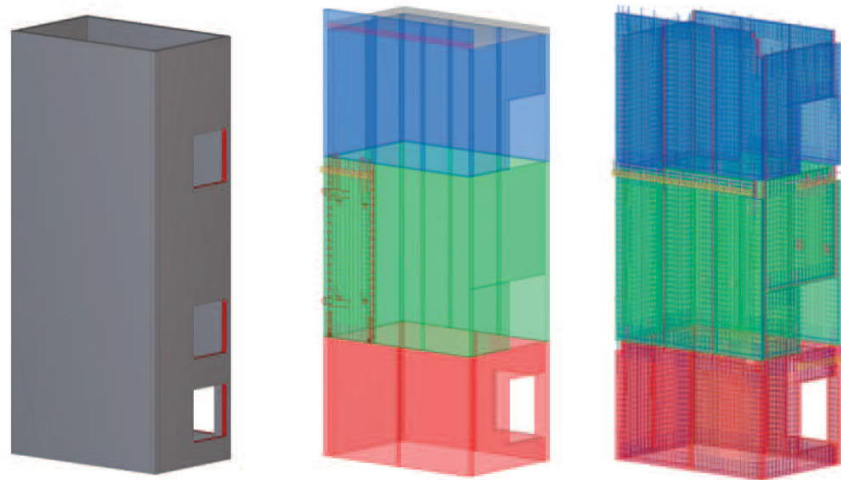
Rakennushankkeen tietomallinnustarpeet vaihtelevat kohde kohtaisesti ja rakennemallin tarve rakennussuunnittelun eri vaiheissa tulee sopia tilaajan sekä projektin eri osapuolten kanssa. Hankesuunnitteluvaiheessa rakennesuunnittelijalla ei ole varsinaista mallintamisvaatimusta. Projekti-kohtaisesti voi olla kuitenkin tarpeen luoda esimerkiksi erilaisista runkorakennusratkaisuista rakennemalleja jo hankesuunnitteluvaiheessa. Rakennemallin luominen aloitetaan yleissuunnitteluvaiheessa pääsuunnittelijan hyväksytyjen ehdotussuunnitelmien pohjalta ja kun rakennemallin aloittamiselle määritellyt lähtötiedot ovat täyttyneet. Rakennemalli kehittyy rakennesuunnittelun edetessä läpi suunnittelun eri vaiheiden, aina rakentamisvaiheen loppuun asti. Rakennemallin tavoitteena on toteumamalli, mikä vastaa rakennuksen lopullista rakenteellista toteutusta. (RT 10-11070, 2-5.)

Tietomallihanke on jatkuvasti kehittyvä prosessi, mikä vaatii eri suunnittelijoiden välistä yhteistyötä ja kommunikaatiota. Tietomallihankkeessa suunnittelualojen välinen yhteensovittaminen tapahtuu pääsääntöisesti tietomallien avulla. Tietomallien yhteensovittamista organisoii hankkeeseen erikseen määritellyt tietomallikoordinaattori. Tietomallien yhteensovittamiseen osallistuvat kaikki kohteen suunnittelijat. Tietomallikoordinaattori voi olla kohteen pääsuunnittelija tai hänen nimeämänsä henkilö. Tietomallikoordinaattorin tehtäviin kuuluvat tietomallisuunnitelman laatiminen, tietomallien yhteensovittaminen, laadunvarmistus ja raportointi sekä yhteensovituspalaverien vetovastuu. (RT 10-11066, 4-5.)

3.2 Tietomallin vaiheet

Rakennushankkeen tietomallilla on rakennushankkeen tavoin erilaiset vaiheet kuvaamaan tietomallille ja sen sisällölle asetettuja vaatimuksia. Tietomallin vaiheistus voi vaihdella hanke- ja tarvekohtaisesti. Tietomallihankkeen vaiheilla ei ole rakennushankkeen tavoin selkeitä vaiheiden välisiä rajoja, koska mallintamisen työtehtävät limittyvät eri työvaiheiden ja suunnittelualojen kanssa. Hankkeen tietomallintaminen on jatkuvaa kehitystyötä yhteistyössä hankkeen muiden osapuolten kanssa ja tietomalli saattaa sisältää eri mallinnusvaiheissa olevia rakennusosia. ”Yleiset tietomallivaatimukset 2012” julkaisu käsittelee rakennesuunnittelun

tietomallintamista ja rakennemallien tietosisällön vaatimuksia hankkeen eri vaiheissa.



Kuva 5. Mallinnustarkkuus (yleissuunnitteluvaihe, hankintoja palveleva suunnitteluvaihe, toteutussuunnitteluvaihe (RT 10-11070, 4-8)

3.2.1 Hankesuunnittelu (vaatimusmalli)

Tietomallinnettavan rakennushankkeen ensimmäinen tuotettava tietomalli on arkkitehdin tuottama vaatimusmalli. Vaatimusmalli ei ole tietomallinnettavan rakennushankkeen kannalta välttämätön, koska se ei sisällä varsinaista tietoa rakennetavasta kohteesta. Rakennesuunnittelijalle ei ole vaatimusmallin osalta mallinnusvaatimuksia. Rakennuksen vaatimusmalli on ilman tarkempia suunnitelmia alustavaa massoittelua varten tuotettu visuaalinen kuvaus, mikä voi olla myös kirjallisessa muodossa. Vaatimusmalli ei sisällä tilavarauksia. Vaatimusmalli on kuvaus asiakkaan tarpeista ja ympäristön reunaehdoista ja sitä käytetään lähinnä markkinoinnin työkaluna. Rakennesuunnittelun vaatimusmalli sisältää yleensä tilaajan antamat lähtötiedot ja vaatimukset sekä hankkeessa käytössä olevat määräykset ja ohjeet. (RT 10-11070 2012.)

3.2.2 Ehdotussuunnittelu

Ehdotussuunnitteluvaiheessa rakennesuunnittelijalla ei ole varsinaisia mallinnusvaatimuksia. Hanke- ja projektiokohtaisesti voidaan kuitenkin erikseen sopia, että ehdotussuunnitteluvaiheessa mallinnetaan esimerkiksi erilaisia runkovaihtoehtoja hankkeen kustannusten arvioimiseksi sekä arkkitehtisuunnitelmien toteutettavuuden arvioimiseksi. Ehdotussuunnittelu vaiheen mallinnustarkkuus vastaa yleissuunnitteluvaiheen mukaista mallinnustarkkuutta. (RT 10-11070 2012.)

3.2.3 Yleissuunnittelu

Yleissuunnitteluvaiheessa rakennemalli kehitetään hyväksytyn ehdotussuunnitelman pohjalta, ennalta määriteltyjen ohjeiden ja vaatimusten mukaiseksi toteutuskelpoiseksi yleissuunnitelmaksi. Yleissuunnitteluvaiheessa rakennemalli yhteensovitetään muiden suunnittelualojen suunnitelmien kanssa, kuten esimerkiksi taloteknisten järjestelmien kanssa. Yleissuunnitteluvaiheen tietomallintamisen hyötyinä voidaan pitää hankkeen visuaalista tarkastelua sekä suunnitelmien yhteensovittamista. Rakennemallia voidaan myös käyttää lähtötietona laskentamallille. Yleissuunnitteluvaiheen rakennemallista voidaan tuottaa yleissuunnitelmien tulosteita kuten esimerkiksi tasojen mittapiirustuksia ja yleisleikkauksia. Yleissuunnittelu vaiheen lopputuloksena on yleissuunnittelu tasoinen IFC-rakennemalli sekä sovituissa formaatissa tulostetut 2D-piirustukset. (RT 10-11070 2012.)

3.2.4 Hankintoja palveleva suunnittelu

Hankintoja palvelevassa suunnitteluvaiheessa yleissuunnitteluvaiheen rakennemalli kehitetään hankintakyselyjen vaatimuksia vastaavalle tasolle. Kantavien ja ei-kantavien betonisten rakennusosien koko, laajuus, määrät ja sijainnit tulee esittää mallissa. Teräsbetonisista elementtirakenteista tuotetaan elementtikaaviot sekä tyyppielementtipiirustukset. Teräsrakenteista tuotetaan mallikokoonpanot mallinnusvaatimusten mukaisesti. Teräs- ja betonirakenteista tuotetaan tarvittavat määräluettelot ennalta sovituissa laajuudessa. Vaiheen rakennemallia voidaan hyödyntää määrälaskennassa, sekä rakentamisaikataulun, elementtien asentamisen ja työjärjestyksen suunnittelussa. (RT 10-11070 2012.)

3.2.5 Toteutussuunnittelu

Rakennesuunnittelijan mallinnusvaatimukset toteutussuunnitteluvaiheessa vaihtelevat projektikohtaisesti. Rakennesuunnittelijan toimiessa projektissa elementti- ja/tai konepajasuunnittelijana kaikki elementit ja teräsrakennekokoonpanot mallinnetaan hankintoja palvelevan suunnitteluvaiheen tyyppielementtien ja mallikokoonpanojen tasolle. Jos edellä mainittu suunnittelu tapahtuu muun kuin rakennesuunnittelijan toimesta, rakennesuunnittelija jatkaa rakennemallin kehittämistä muiden rakenteiden osalta. Tällaisessa tapauksessa tulee mallin jakamisesta ja luovutuksesta sekä yhteistyöstä eri suunnittelijoiden kanssa sopia projektikohtaisesti. (RT 10-11070 2012.)

3.2.6 Käyttöönotto ja ylläpito (toteumamalli)

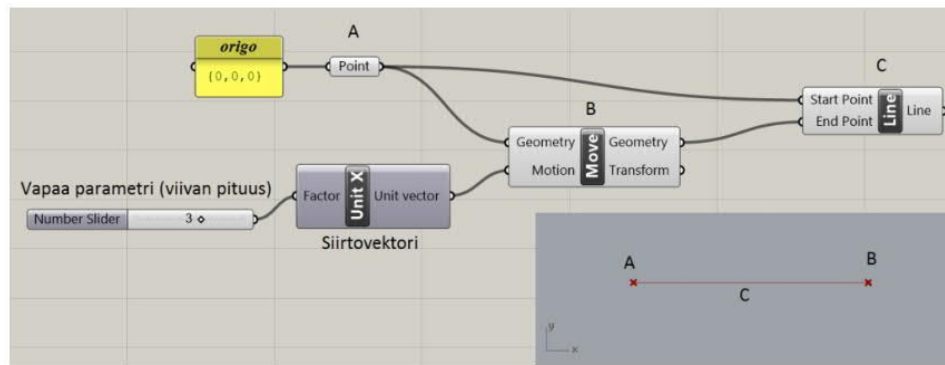
Rakennesuunnittelija jatkaa rakennemallin päivittämistä läpi hankkeen toteutusvaiheen, jolloin rakennemalli pysyy ajan tasalla hankkeen päättymiseen asti. Toteumamallin tulee vastata mahdollisimman paljon

toteutunutta rakennusta. Yleensä erilliselle toteumamallille ei ole tarvetta, vaan toteutussuunnitteluvaiheen rakennemalli toimii hankkeen toteumamallina. Rakennusaikaiset rakenteelliset muutokset päivitetään toteumamalliin. Rakennesuunnittelusta eriytetyn valmisosasuunnittelun lisäämisestä toteumamalliin tulee sopia erikseen. Toteumamallin tehtävänä on tuottaa visuaalinen kuvaus rakennetusta rakennuksesta ja se voidaan liittää huoltokirjan yhteyteen virtuaalimalliksi rakennuksen ylläpidon ja huollon työkaluksi. (RT 10-11070 2012.)

3.3 Algoritmiavusteinen suunnittelu ja parametrinen mallintaminen

Algoritmiavusteisella suunnittelulla tarkoitetaan tietokoneavusteista suunnittelua, jossa suunnittelutehtävän suorittamiseksi käytetään algoritmeja hyödyntäviä ohjelmistoja ja menetelmiä. Algoritmiavusteista suunnittelua voidaan hyödyntää monilla eri tavoin suunnittelijan tarpeiden, luovuuden ja taitojen mukaan. Algoritmiavusteista suunnittelua voidaan hyödyntää esimerkiksi toistuvien tehtävien suorittamisessa tai rakenteiden generoinnissa. Algoritmiavusteista suunnittelu on vielä hyvin vähän hyödynnetty työkalu rakennusalalla, eikä sille ole vielä muodostunut vakiintunutta suomenkielistä käsitteistöä ja termistöä. Yhtenäisen termistön puuttumisen takia käsitteet algoritmiavusteinen suunnittelu, parametrinen suunnittelu ja parametrinen mallintaminen esiintyvät usein puhekielessä rinnakkain. Aiheesta löytyy englanninkielistä kirjallisuutta hyvin, mutta aiheen termistö vaihtelee suuresti kirjallisuuslähteiden välillä. (Tanska & Österlund 2014, 18, 36.)

Algoritmiavusteista suunnittelua voidaan toteuttaa tekstimuotoista ohjelmointikoodia kirjoittamalla tai visuaalisesti ohjelmoimalla. Tekstimuotoisessa ohjelmoinnissa algoritmi tuotetaan lähdekoodiksi valittuun ohjelmointiympäristöön. Tekstimuotoisia ohjelmointikieliä on useita, kuten esimerkiksi C-kieli, Java ja PHP. Visuaalisessa ohjelmoinnissa ohjelmiston valmiita visuaalisia komponentteja linkitetään toisiinsa halutun kaltaiseksi algoritmiksi. Data pystyy kulkemaan komponenttien välillä vain käyttäjän määrittämiä linkkejä pitkin. Komponentit prosessoivat ja muokkaavat syötetyn datan ja siirtävät datan seuraavalle komponentille. Komponentteihin linkitetään myös parametreja eli muuttujia, joilla lopputulosta voidaan manipuloida halutunlaiseksi. Parametreille voidaan määrittää sääntöjä, joiden mukaan arvot määräytyvät tai käyttäjä voi syöttää itse parametreille halutut arvot. Visuaalinen ohjelmointi on rakennusalalla yleisempi tapa tuottaa algoritmia, koska se ei vaadi suunnittelijalta varsinaista ohjelmointitaitoa. Visuaalisia ohjelmointialustoja on useita erilaisia, joista yksi käytetyimmistä on Grasshopper. (Lalla 2017, 30-33.)



Kuva 6. Visuaalinen ohjelmointi, Grasshopper (A-insinöörit n.d.)

Algoritmi on määrätty joukko ohjeita, jotka suorittamalla saadaan toteutettua ennalta määrätty tehtävä. Algoritmin tulee täyttää seuraavat kriteerit:

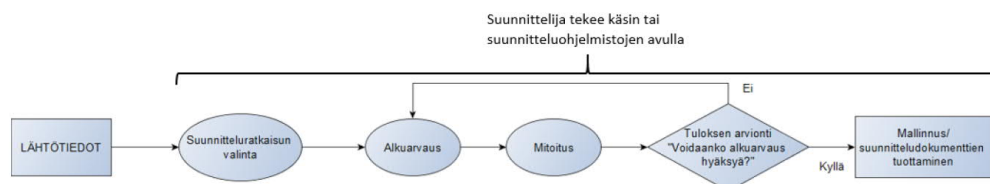
1. Algoritmille tulee määritellä yksi tai useampi syöte
 2. Algoritmilla tulee olla yksi tai useampi tulos
 3. Algoritmin alusteiden tulee olla yksiselitteisiä
 4. Algoritmin alusteiden tulee olla päättyviä
 5. Algoritmin tulee olla toteuttamiskelpoinen
- (Horowitz & Sahni & Rajasekaran 1997, 1)

Algoritmiavusteisen suunnittelun toimivuutta voidaan arvioida sen uudelleen hyödynnettävyyden ja muokattavuuden näkökulmista. Algoritmiavusteisen mallin muokattavuus on yhteydessä sen tehokkuuteen, sillä luotaessa monimuotoisempaa ja taipuisampaa mallia työmäärä ja työn haasteellisuus kasvavat huomattavasti. Algoritmiavusteiden mallin koodin toimivuuden arvioimiseksi voidaan hyödyntää ohjelmistotekniikan puolella hyväksi havaittuja määrällisiä ja laadullisia kriteerejä. (Erkkilä 2017, 18.)

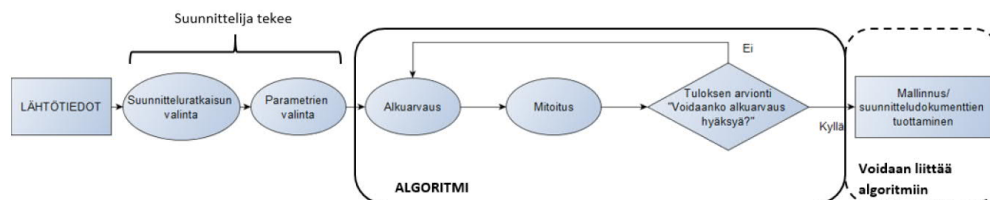
- Määrälliset kriteerit
 - o Koodin rivimäärä
 - o Koodin kompleksisuus
 - o Luomiseen käytetty aika
 - o Muokkaamiseen käytetty aika
 - o Viive
 - o Syötteiden määrä
- Laadulliset kriteerit
 - o Oikeellisuus
 - o Taipuisuus (kyky mukautua muutoksiin)
 - o Uudelleenkäyttämisen mahdollisuus
 - o Tehokkuus
 - o Helppokäyttöisyys
 - o Toiminnallisuus

Parametrisessa suunnittelussa suunniteltava kohde jaetaan avoimiin parametreihin eli muuttujiin, jotka ovat toiminnan tai käytön kannalta kriittisiä. Parametreja voivat olla esimerkiksi kappaleen geometria-, kuormitus- tai sijaintitiedot. Rakenteiden geometriaa suunniteltaessa tietokonealgoritmeilla, tulee niiden geometria määritellä matemaattisesti. Parametreja algoritmiaivusteisesti vaihtelemalla voidaan tehokkaasti etsiä erilaisia ennalta määrättyihin rajaehdoin soveltuvia suunnitteluratkaisuja. Annetuilla rajaehdoilla muuttujat sidotaan toisiinsa ja lopputulosten määrää saadaan rajattua halutuksi. Parametrissa suunnittelua on aiemmin käytetty hyödyksi muotojen suunnittelussa kuten esimerkiksi arkkitehtuurissa tai teollisessa muotoilussa. Rakennesuunnittelu poikkeaa tästä ajattelutavasta merkittävästi, sillä usein geometria on jo ennalta määriteltyä ja suunnitteluratkaisun reunaehdot ovat tarkoin määriteltynä. (Lalla 2017, 31, 34.)

Perinteinen suunnittelumenetelmä



Parametrinen suunnittelumenetelmä



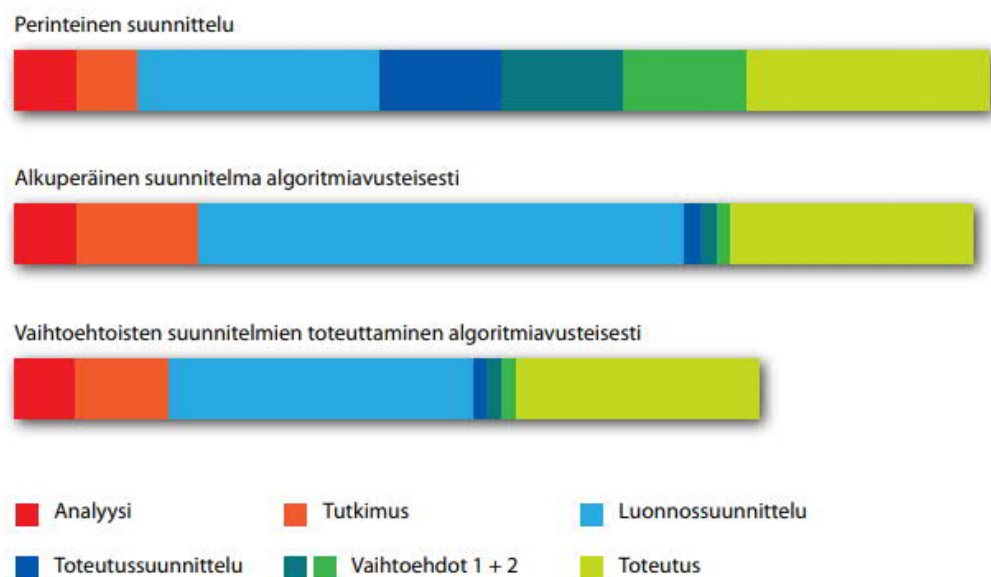
Kuva 7. Perinteinen- ja parametrinen suunnittelumenetelmä (Lalla 2017, 31)

Parametrisella mallintamisella kuvataan mallinnustapaa, jolla geometrisen malli luodaan lopputulosta ohjaavien parametrien ja algoritmien avulla. Parametrinen mallintaminen perustuu visuaaliseen ohjelmointiin, jossa suoritus kulkee linkkejä pitkin komponentilta toiselle. Parametreja muuttamalla malli päivittyy reaaliajassa, toisin kuin tekstimuotoisessa ohjelmoinnissa, jossa muutos päivittyy vasta skriptin päivittämisen jälkeen. Parametrinen mallintaminen nopeuttaa suunnittelu vaihtoehtojen löytämistä ja erilaisten variaatioiden etsintää. (Tanska & Österlund 2014.) Parametrin mallin luominen tulee aina suunnitella etukäteen, jotta voidaan muodostaa käsitys parametrin mallin toteutuksesta, vaatimuksista ja tavoitteista. Ennalta määritettyjen tavoitteiden saavuttamiseksi mallille määritetään käyttötarkoitus. Parametrin mallin käyttötarkoitus voi olla esimerkiksi:

1. Erilaisten suunnitteluratkaisujen ja vaihtoehtojen vertaileminen
2. Muutoksista aiheutuvan työmäärän minimointi
3. Monimutkaisen geometrian luominen

Käyttötarkoituksen ja tavoitteiden asettamisen jälkeen voidaan suunnitella parametrisessa mallintamisessa käytettävät ohjelmistot sekä tiedonsiirron toteutus sekä määrittää mallin kannalta oleelliset reunaehdot ja parametrit. (Lalla 2017, 46-47.)

Suunniteltavan rakenteen suunnittelutyön toteuttaminen parametrinen mallin avulla on lyhyellä aikavälillä tarkasteltaessa aikaa vievää. Parametrinen mallien luominen vie aikaa, joten niiden tuottama hyöty alkaa näkyä vasta suunnittelun edetessä. Parametrinen suunnittelun taloudellinen tehokkuus kasvaa, mikäli suunnitteluratkaisut ovat toistuvia, suunniteltavat geometriat haasteellisia tai jo saatuihin ratkaisuihin on oletettavissa tulevan paljon muutoksia. Parametrinen malli ja sen algoritmit ovat uudelleen hyödynnettävissä, jolloin jo luotua parametrista mallia voidaan hyödyntää eri rakennusprojekteissa ja suunnittelutehtävissä. Lopputuloksen saavuttamiseksi kuluu vähemmän aikaa, kun parametrista mallia ei tarvitse luoda uudelleen. (Lalla 2017, 34-43.)



Kuva 8. Suunnitteluvaiheisiin kuluvan ajan vertailu eri suunnittelumenetelmillä (Tanska & Österlund 2014, 24)

3.4 Parametrinen mallin lähtötiedot ja edellytykset

Luotaessa parametrista mallia tulee malliin valita tarkasteltavien parametrien määrä. Parametrien määrää pyritään lukitsemaan ja rajaamaan suunnittelukohteen mukaan siten, että vain rakenneratkaisun kannalta olennaiset parametrit valitaan. Suuri valittujen parametrien määrä tekee parametrinen mallin luomisesta työlästä, kun taas pieni parametrien määrä

rajaa mallilla tuotettavien ratkaisujen määrää. Parametrien valitsemisen perusteena on mallin käyttötarkoitus ja saatujen tulosten hyödynnettävyys. Parametrien valinnan jälkeen algoritmi käy suunnitteluprosessi eri vaiheet läpi ja tuottaa määrittelyt reunaehdot toteuttavan joukon suunnitteluratkaisuja. Käytettävän suunnitteluratkaisun valinnan jälkeen tulee tulos dokumentoida toteutusta varten. Tietomallipohjaisessa rakennushankkeessa dokumentointi tarkoittaa rakenneosan mallintamista valitulla suunnitteluohjelmistolla sekä tarvittavien suunnitelmien tuottamista. Algoritmisessa suunnittelussa suunnitteluratkaisun tuottaman ohjelman algoritmi on mahdollista linkittää suoraan mallinnusohjelmistoon, jolloin vältetään ylimääräisiltä työvaiheilta, joissa rakennesuunnittelija mallintaa saadun rakenneratkaisun mallinnusohjelmistoon. Algoritmiavusteisen suunnitteluohjelmiston ja mallinnusohjelman linkittäminen mahdollistaa myös rakennusosaan liittyvän lisätiedon parametrisoinnin, kuten esimerkiksi rakenneosan kapasiteetin laskennan. (Lalla 2017, 15,32.)

3.5 API-ohjelmointirajapinta

Ohjelmointirajapinta mahdollistaa ohjelmistojen välisen integraation. Integraatiolla tarkoitetaan eri ohjelmistojen yhdistämistä toisiinsa tietojen siirtämiseksi. Integraatioita voi olla yksi- tai kaksisuuntaisia. Yksisuuntaisessa integraatiossa tietoa kulkee ohjelmistojen välillä vain yhteen suuntaan, jolloin ohjelmisto joko lähettää tai vastaanottaa tietoja. Kaksisuuntaisessa integraatiossa ohjelmistot lähettävät ja vastaanottavat tietoja. Ohjelmointirajapinta määrittää mitä ja miten tietoja ohjelmistosta voidaan jakaa muille tietojärjestelmille. Rajapinta voi olla joko datarajapinta, jossa sen kautta saadaan siirrettyä dataa järjestelmien välillä tai toiminnallinen rajapinta, jossa tiedon siirtäminen voi sisältää myös tietoa muuttavia toimintoja kuten esimerkiksi laskenta-algoritmeja. (Open Knowledge Finland 2014.)

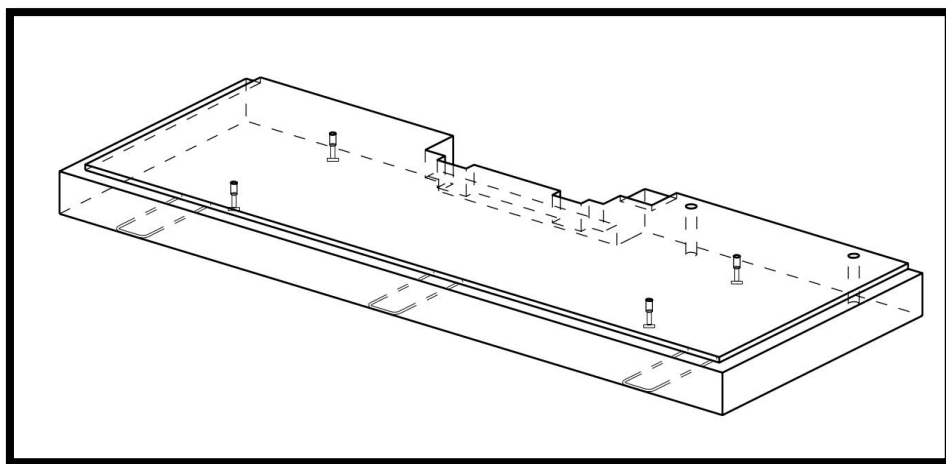
3.6 Teräsbetoniset laatat ja massiivilaattaelementit

Rakennusosat luokitellaan mittasuhteiden ja toimintatapojen mukaan. Mittasuhteille ei ole määritelty takkoja fysikaalisia rajoja, vaan rajat on esitetty suunnittelusäännöissä. Laatat ovat yleensä rakennusten vaakasuoria rakenteita kuten tasorakenteita, ala-, väli-, ja yläpohjia. Laatat siirtävät niihin kohdistuvat rasitukset tukeville rakenteille kuten esimerkiksi pilareille, palkeille ja seinille. Laatat siirtävät monesti myös vaakasuuntaisia voimia ja toimivat näin monesti myös jäykistävänä rakenteena. Laattarakenne voidaan toteuttaa monella tavalla, joista tyypillisimmin käytettyjä laattarakenteita ovat: massiivilaatta, ripalaatta, arinalaatta, kuorilaatta, ontelolaatta ja liittolaatta. (BY211 2013, 7.)

Laatat ovat tasorakenteita, joiden sivumitat ovat huomattavasti suuremmat kuin paksuus. Eurokoodissa laatan leveyden ja korkeuden raja-arvoksi

on asetettu 5 eli laataksi mielletään palkkimainen rakenne, jonka leveys on viisi kertaa suurempi kuin korkeus. Laatat jaotellaan usein myös niiden tuentatavan mukaan yhteen suuntaan kantaviin, ristiin kantaviin tai pilari laattoihin. Yhteen suuntaan kantavien laattojen kuormat siirtyvät yhdelle tai useammalle yhdensuuntaiselle viivamaiselle tuelle. Yhteen suuntaan kantavien laattojen voimasuureiden jakautuminen on hyvin samankaltaista kuin palkeissa. Ristiin kantavat laatat toimivat kahdessa toisiaan kohtisuorassa olevassa suunnassa. Laatan rasisutusten jakautuminen riippuu laatan taivutusjäykkyysien ja jännemittojen suhteesta. Laatan pidempi sivu kerää vähemmän kuormaa kuin laatan lyhyempi sivu. Suoraan pilarien päälle tuettua laattamaista rakennetta kutsutaan pilarilaataksi. Pilarilaattoihin muodostuu pilarien välille yhteen suuntaan kantavia kaistoja, ja kaistojen väliset alueet toimivat ristiin kantavina. Pilarilaattojen kestävyys määräytyy usein pilareiden kohtien lävistyskestävyyden mukaan (BY211 2013, 9.)

Teräsbetonisia massiivilaattaelementtejä käytetään yleisesti porrashuoneiden kerrostaso- ja välitasolaattoina. Massiivilaattaelementit voidaan kohteen mukaan toteuttaa jännitettyinä tai teräsbetonilaattoina. Tässä opinnäytetyössä käsitellään teräsbetonisia massiivilaattaelementtejä sekä niiden liitoksia. Massiivilaattojen vakiopaksuudet ovat 240, 250, 260 ja 280mm. Massiivilaatan rakennepaksuuden valintaan vaikuttavat muun muassa rakennuksessa käytetyn välipohjatyypin paksuus, kuormitus, jännemitat, paino sekä palo- ja äänitekniset vaatimukset. Massiivilaattaelementin maksimikoot ovat elementtitehdaskohtaisia, mutta yleisesti massiivilaattojen suositeltavana maksimipituutena pidetään 8 metriä ja maksimileveytenä 3 metriä. Suuri kokoisia massiivilaattoja suunniteltaessa laatan paino saattaa muodostua kriittiseksi tekijäksi tehtaan ja työmaan nostokaluston kannalta. Yleinen suositus elementtien maksimi painolle on 100 kilo Newtonia eli 10 tonnia. Massiivilaattaelementit voidaan suunnitella joko yhteen suuntaan tai ristiin kantavana. (Betoniteollisuus ry n.d.)

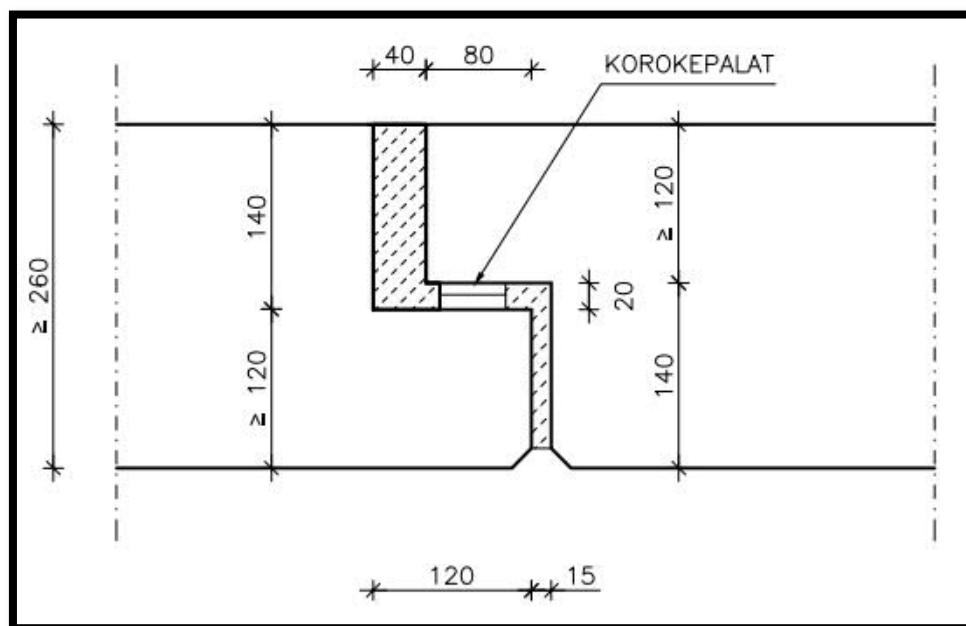


Kuva 9. Massiivilaattaelementti (Betoniteollisuus ry n.d.)

3.6.1 Massiivilaattaelementtien liitokset

Massiivilaattoja liitetään rakenneosan kannattelun vuoksi muihin rakenteisiin kuten esimerkiksi portaisiin, pilareihin, palkkeihin, laattoihin ja seiniin. Massiivilaatta voidaan liittää myös toiseen massiivilaattaelementtiin. Porashuoneissa massiivilaattaelementit liitetään seiniin usein ääntä eristävillä konsoliliitoksilla. Konsolirakenne on usein laattaelementtiin asennettava neliön muotoinen teräsputki, mikä tuetaan seinässä olevaan varauskoloon. Teräskonsoli irrotetaan seinärakenteesta ääntä eristävien neopreenikaistojen avulla. Kannatukseen voidaan käyttää myös eri valmistajien valmiita piilokonsolituotteita kuten esimerkiksi RVK-, TSS- tai LEPO-tasokannakkeita. (Betoniteollisuus ry n.d.)

Massiivilaattojen sekä massiivilaatan ja porraselementin välisissä liitoksissa käytetään usein erilaisia leukaliitoksia. Leukaliitoksien mitat valitaan laattojen rakennepaksuuden sekä kuormituksen mukaan. Leukaliitoksessa laattaelementin sivun alareunaan muodostetaan lyhyt uloke, jonka päälle toinen elementti tuetaan. Leukaliitoksessa vaikuttavat leikkausvoimat otetaan vastaan leuan erilaisilla hakaraudoitteilla valitun mitoitusvoiman mukaan. Leukaliitos voidaan mitoittaa käyttämällä esimerkiksi ristikkomenetelmää (strut-and-tie).



Kuva 10. Kerrostasolaattojen välinen leukaliitos (Betoniteollisuus ry n.d.)

3.7 Ristikkomenetelmä (strut-and-tie)

Ristikkomenetelmä on yleisesti käytetty teräsbetonirakenteiden mitoitusmenetelmä. Ristikkomenetelmää kutsutaan myös ristikkoanalogiaksi ja sitä voidaan käyttää hyvinkin monimutkaisten teräsbetonirakenteiden analysoimiseen. Standardin EN-1992-1-1 mukaisesti ristikkoanalogiaa

voidaan käyttää murtorajatilassa toimivia teknisen taivutusteorian mukaisiin rakennekohtiin. Ristikkoanalogiaa voidaan hyödyntää myös, mikäli rakenteissa on epäjatkuvuuskohtia eli D-alueita (discountinuity region). Epäjatkuvuuskohtia voivat olla esimerkiksi teräsbetonisten palkkien ja pilareiden konsolit tai rakenteen geometrian vaihtuvuuskohtat kuten reikien reuna-alueet.

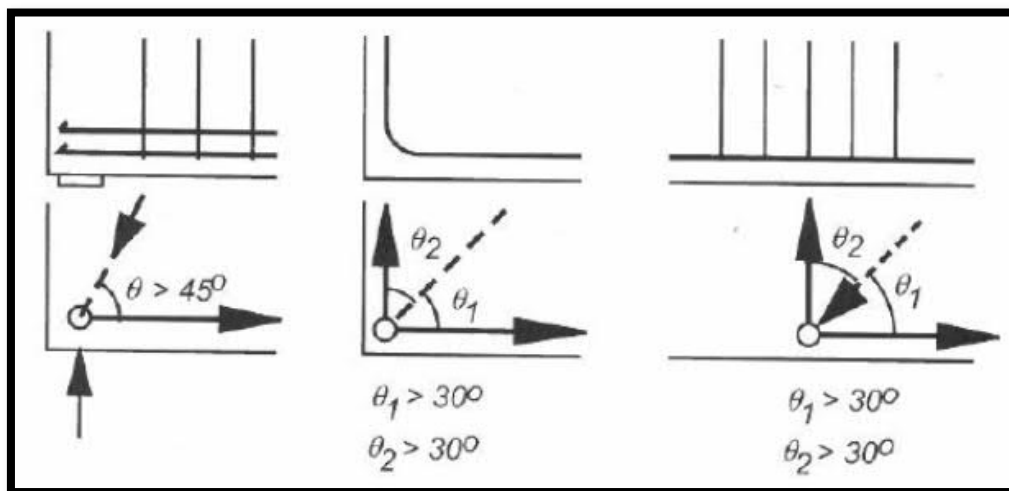
Ristikkomenetelmän teräbetonirakenteille kehitti vuonna 1902 saksalaisen professori Emil Mörsch. Ristikkoanalogian perusolettamuksena on, että halkeilu tapahtuu 45° kulmassa, koska Mörschin toteamuksen mukaan ”vinohalkeamien suuntakulmaa ei voi matemaattisesti mitenkään määrittellä”. Ristikkomenetelmässä tarkastellaan rakenteen sisälle hahmoteltavien monikulmioiden avulla rakennemallin staattista voimatasapainoa. Ristikkomalli koostuu puristussauvoista (strut), vetosauvoista (tie) ja solmuista (nodes). Teräsbetonirakenteessa betoni toimii puristussauvoina ja raudoitukset vetosauvoina. Solmut muodostuvat veto- ja puristussauvojen risteyskohtiin. Rakenteen puristus- ja vetosauvojen jännitykset ratkaistaan siten, että sauvat ovat murtorajatilan kuormien suhteen tasapainossa. (Leskelä 2008, 13, 251.)

3.7.1 Ristikkomallin luominen

Ristikkomallilla pyritään kuvaamaan rakenteessa esiintyviä sisäisiä voimasuureita. Ristikkomallin valittu muoto vaikuttaa oleellisesti laskennan lopputuloksiin. Ristikkomalli ei saa merkittävästi poiketa rakenteen kimmoteorian mukaisista jännitysjakaumista, sillä muutoin rakenteen muodonmuutoskapasiteetti saattaa ylittyä. Muodonmuutoskapasiteetin ylittyminen saattaa johtua rakenteen halkeiluun ja rakenteen kantavuuden menettämiseen. Ristikkomallia määritettäessä onkin tutkittava rakenteen kimmoteorian mukaisen rakenneanalyysin jännitysjakaumat esimerkiksi FEM-laskennan avulla. FEM-laskennan mukaisesti ristikkomallin puristussauvat sijoitetaan puristava pääjännityskentän resultantin kohdalle, kun taas ristikkomallin vetosauvat sijoitetaan vetävän pääjännityskentän resultantin kohdalle. Ristikkomallin sauvat ovat aina suoria. (Leskelä 2008, 431.) Ristikkomallin luomiselle on olemassa ohjeita ja perussääntöjä, joita on esitelty esimerkiksi betonirakenteiden kansainvälisen organisaation fib Bulletin 3-julkaisussa:

- 1) Perusmallin tulee olla mahdollisimman yksinkertainen ja sisältää mahdollisimman vähän puristus- ja vetosauvoja. Mallia voidaan parantaa lisäämällä sauvoja tarvittaessa.
- 2) Kimmoteorian mukaisen jännitysjakauman tarkka noudattaminen ei ole tarpeellista. Jännitysjakauman avulla puristussauvojen suunnat saadaan asetettua luontevimmin puristavien pääjännityssuuntien mukaisiksi.
- 3) Vetosauvat sijoitetaan raudoitusten todellisen järjestelyn mukaisesti ja raudoitteet suunnitellaan suorina tankoina, joiden päässä voi olla päätykoukku.

- 4) Puristus- ja vetosauvojen välinen kulma oletetaan mahdollisimman suureksi (yli 45°) aina kun se on mahdollista. Alle 30° kulmia ei voida käyttää, koska niihin liittyy muodonmuutosten yhteensopimattomuus.
- 5) Pistemäiset kuormat, tukireaktiot ja ripustettavat kuormat, jotka vaikuttavat seinälevyn reunalla, huomioidaan kuvan 10 mukaisesti.

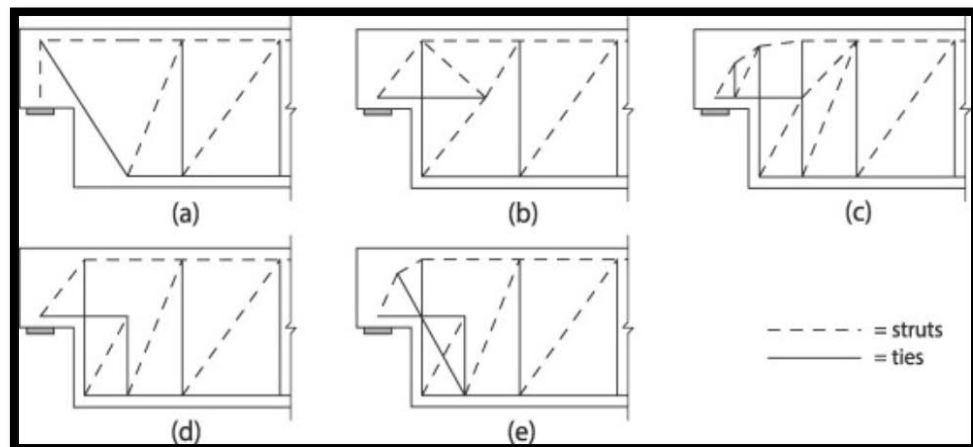


Kuva 11. Kulmien määrittäminen levyn kulmassa (BY210 2008, 432)

- 6) Jännemitan ja korkeuden suhteen tulesa suureksi, otetaan käyttöön välivetosauvat ja välivertikaalit, jotta diagonaalikulma saadaan sopivaksi.
- 7) Puristussauvat edustavat leveitä puristusjännityskenttiä ja niiden akselien tulee sijaita tarpeeksi etäällä reunoista. Jakautunutta haka raudoitusta kuvaava vetosauva ei voi myöskään sijaita aivan reunassa.
- 8) Välivertikaaleja sisältävät mallit ovat yleensä kinemaattisesti määräämättömiä malleja eikä niitä voida ratkaista voimatasapainotarkastelulla. Malli voidaan tehdä staattisesti määrättyksi lisäämällä siihen nollasauvoja, jotka eivät kannattele huomattavia kuormia
- 9) Kinemaattisesti määräämätön malli on yhteensopiva vain yhden kuormitustapauksen kanssa.
- 10) Staattisesti määrätty malli kattaa paremmin erilaiset kuormitustapaukset, mutta se ei voi yhtä hyvin vastata eri tapausten voimajakautumia.

Ristikkomalli voidaan luoda myös vaikka rakenteen tarkka jännitys jakauma ei olisi tiedossa. Ristikkomalli voidaan luoda myös valmiiden tyyppi ristikkomallien avulla tai kuormituspolkumenetelmän avulla. Kuormituspolkumenetelmässä rakenteen epäjatkuvuusaluetta tarkastellaan erillään muusta rakenteesta ja sitä kuormitetaan alueen reunojen rajajännityksillä.

Rajajännitykset jaetaan osiin siten, että niille löytyvät vastavoimat rakenteen vastakkaiselta puolelta. Rajajännitysten resultantit ja vastakkaisen puolen vastavoimat yhdistetään kuormapolulla siten, että voimat kulkevat lyhintä mahdollista reittiä kulkematta ristiin. Rakenteen riittävän muodonmuutoskapasiteetin varmistamiseksi, puristus- ja vetosauvojen väliset kulmat eivät saa olla liian pieniä. Puristussauvan kulma, mikä lähtee keskiteytystä kuormalta ei myöskään saa olla liian pieni. (Koskimies 2014, 10-13.)



Kuva 12. Esimerkkejä ristikkomalleista (Desnerck P. 2018)

Ristikkomallia voidaan hyödyntää monissa erilaisissa kuormitusilanteissa sekä rakennemalleissa, mikä tekee ristikkomallista monipuolisen työkalun rakenteiden voimasuureiden ratkaisemiseksi. Ristikkomallin käyttö vaatii suunnittelijalta tuntemusta rakenteiden käyttäytymisestä sekä riittävää perehtymistä ristikkomenetelmän käyttöön. Ristikkomenetelmää käytettäessä saadaan tuotettua lukuisia erilaisia ristikkomalleja samasta rakenteesta, mikä saattaa aiheuttaa hämmennystä ja epävarmuutta ristikkomenetelmää kohtaan. Ristikkomenetelmää käytettäessä yhtä ainoaa oikeaa ratkaisua ei ole, jolloin suunnittelijan kokemus ja tietämys rakenteiden toiminnasta on ensi arvoisen tärkeää.

3.7.2 Vetosauvat (tie)

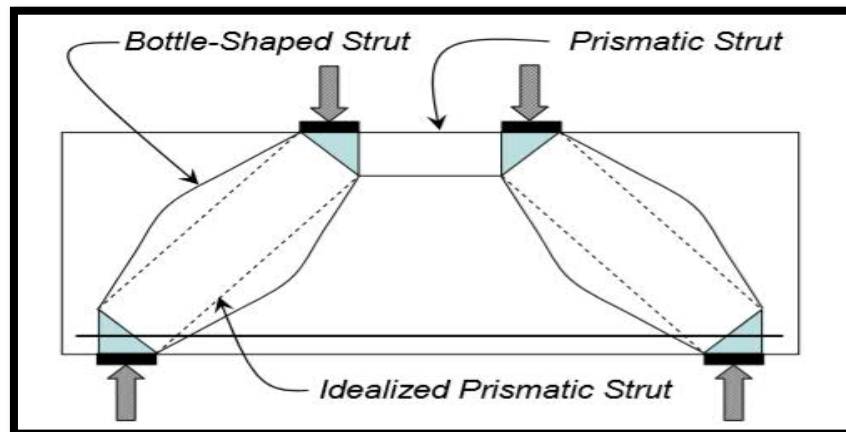
Ristikkomallin vetosauvat muodostetaan kohtiin, joissa esiintyy vetojännitystä. Vetosauvat merkitään ehjällä yhtenäisellä viivalla. Teräsbetonirakenteessa esiintyvien vetosauvojen voimat mitoitetaan kokonaisuudessaan teräksille laskennan selkeyttämiseksi. Betonin omaa vetokestävyyttä ei laskennassa oteta huomioon, mikä aiheuttaa rakenteelle hieman ylimääräistä varmuutta. Yksiaukkoisissa yläreunastaan kuormitetuissa rakenteissa vetorautoitus sijoitetaan rakenteen alareunaan, johon rakenteen vetorasitus muodostuu. (Leskelä 2008, 434.)

Moniaukkoisissa palkeissa vetorasitusta muodostuu välitukien kohdalla myös rakenteen yläreunaan, jolloin vetorautoite tulee myös sijoittaa näihin kohtiin. Ripustuskuormitetuissa rakenteissa rakenteen sisällä esiintyy pystysuuntaisia vetojännityksiä, jolloin rakenne tulee rautoittaa pystyraudoittein. Puristussauvoissakin esiintyy puristussauvaan nähden kohtisuoria vetojännityksiä. Nämä jännitykset aiheuttavat puristusdiagonaalinsuuntaista halkeilua, mikä voi johtaa rakenteen murtumiseen. (Leskelä 2008, 434.)

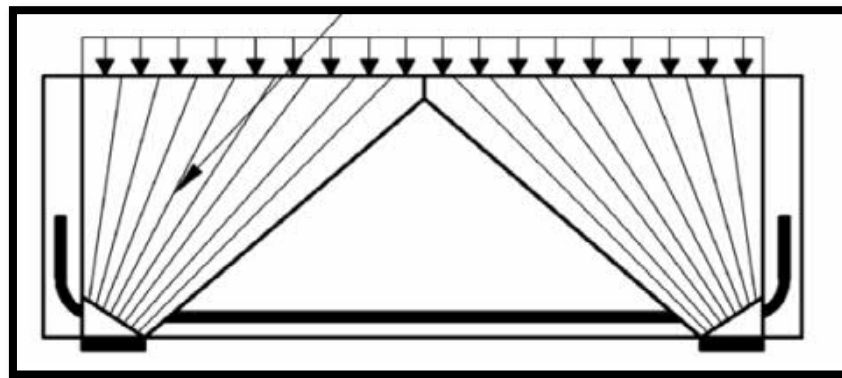
3.7.3 Puristussauvat (strut)

Teräsbetonirakenteen mitoituksessa betonin puristuskestävyys on yksi olennaisimmista kantavuuteen vaikuttavista tekijöistä. Puristuskestävyyden merkitys korostuu seinämäisissä rakenteissa, joiden pituuden suhde korkeuteen on pieni. Seinämäisen rakenteen kuormat siirretään puristussauvojen avulla tuille. Puristussauvojen puristuskestävyys riippuu betonin puristuskestävyydestä. Seinämäiseen rakenteeseen saadaan kantokestävyyttä nostamalla betonin puristuskestävyyttä. Ristikkomallissa puristuskaistaa merkitään katkoviivalla, mikä kuvaa puristuskaistan resultanttia. (Khatab 2016, 14.)

Puristusdiagonaalien perusmuotoja on kolme: pullomainen, viuhkamainen ja prisma. Puristussauvojen kestävyys laskentaan vaikuttavat puristuskaistojen muodot ja niihin vaikuttavien voimien suunnat. Pullomaisia puristusjännityskaistoja esiintyy pistevoimien yhteydessä epäjatkuvuuskohdissa eli ns. D-alueilla. Pullomainen jännitysjakauman muoto syntyy, kun pistemäisellä voimalla on rakenteessa tilaa laajentua. Tällaisesta tapauksesta hyvä esimerkki on yläreunastaan pistekuormitettu seinämäinen palkki. Pullomaiselle puristuskaistalle on ominaista siinä esiintyvät puristuskaistaa kohtisuorat vetorasitukset pullon kaulan molemmissa päissä. Viuhkamaisia puristusjännityskaistoja esiintyy rakenteissa, joissa laajalainen kuormitus siirtyy pienemmälle alueelle. Tällaisesta tapauksesta hyvä esimerkki on yläreunastaan tasaisesti kuormitettu seinämäinen palkki. Prismen eli suorakaiteen muotoisia puristuskaistoja muodostuu rakenteissa kahden pistevoiman välille. Esimerkiksi yläreunastaan pistekuormitetun seinämäisen palkin pistevoimien välille rakenteen yläreunaan syntyy suorakaiteen muotoinen puristusvoimakaista. Suorakaiteen muotoisissa eli prismaattisissa puristussauvoissa ei esiinny poikittaisjännityksiä. (Leskelä 2008, 435-436.)



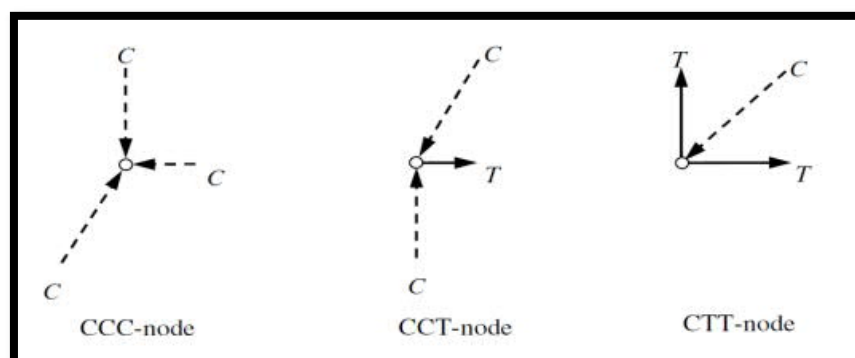
Kuva 13. Puristusdiagonaalien perusmuodot: pullomainen ja prisma (Bircher 2009, 11)



Kuva 14. Puristusdiagonaalien perusmuodot: viuhka (Barney 2007, 3)

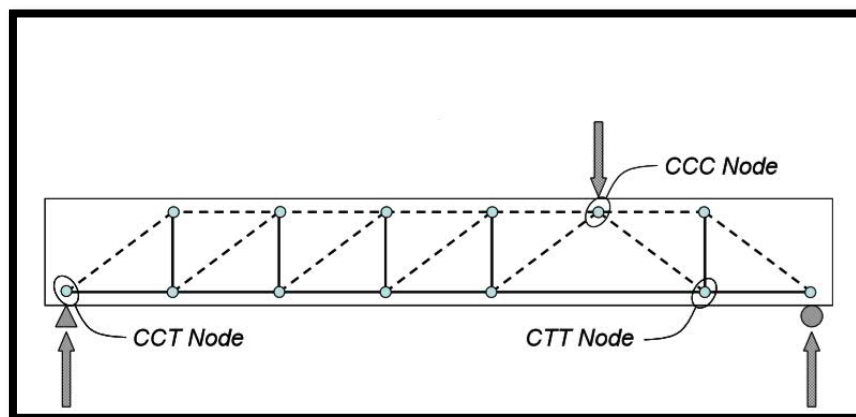
3.7.4 Solmut (node)

Solmut ovat yhtymäkohtia, joissa puristus- ja vetosauvojen sauvavoimien suunnan muutokset tapahtuvat. Solmuja mitoittaessa niitä käsitellään alueina. Solmualue on jännitysalue, jossa sauvavoimien suunnan muutokset tapahtuvat. Solmukohdissa siihen vaikuttavien resultanttivoimien tulee olla tasapainossa. (Leskelä, 2008, 437.)



Kuva 15. Solmujen perustyyppit

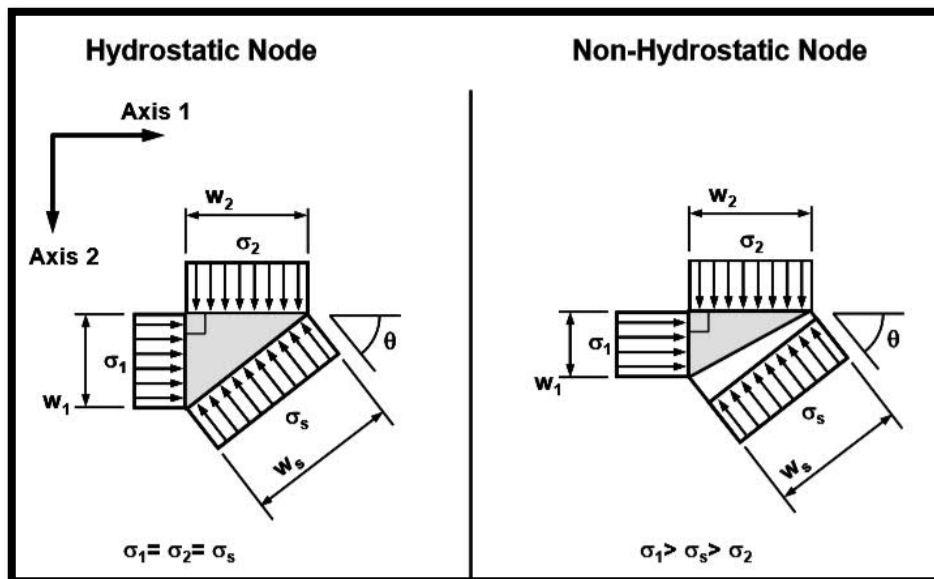
Solmuja on kolmea perustyyppiä: CCC-, CCT- ja CTT-solmu. CCC-solmuun (compression-compression-compression) liittyy vain puristussauvoja. CCT- (compression- compression-tension) ja CTT-solmuihin (compression-tension-tension) liittyy erilainen yhdistelmä puristus- ja vetosauvoja. Solmutyypin mitoituksessa tulee tarkastella seuraavat asiat: geometria, betonin puristusjännitykset sekä raudoitusten ankkuroinnit. (Birrcher 2009, 16.)



Kuva 16. Solmujen perustyyppit (Birrcher 2009, 11)

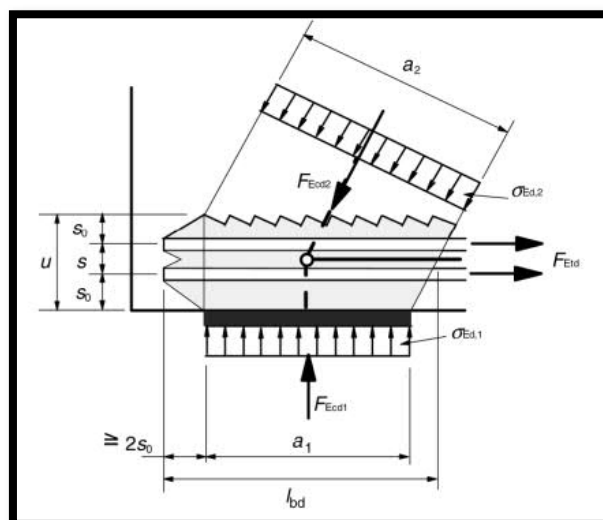
Solmut usein jaotellaan myös niiden sijaintinsa mukaisesti jatkuviin solmuihin (ns. välisolmuihin) ja keskittyneisiin solmuihin. Solmujen sijaintiin perustuvalla jaotellulla pystytään erottelemaan mitoituksen kannalta kriittiset solmut sekä päättämään eri solmuille tarvittavat ankkurointi- ja lujuustarkastelut. Keskittyneet solmut sijaitsevat usein rakennemallin reunalueilla, esimerkiksi pistetukien ja -kuormien läheisyydessä. Keskittyneet solmut ovat lujuustarkastelun kannalta kriittisiä, sillä solmujen sijainnista johtuen sauvavoimien suunnanmuutokset tapahtuvat pienillä alueilla. Jatkuvat solmut sijaitsevat rakenteiden keskialueilla, jolloin jännitykset jakaantuvat laajalle alueelle. Jatkuvia solmuja tarkastellessa usein vetoteräksien ankkuroinnin riittävyys solmun taakse on tarkasteltava. Betonin puristuskestävyyttä ei välisolmuissa ole tarpeen tarkastella. (Leskelä 2008, 439-442.)

Jatkuvien tukien ja pistekuormien vaikutusalueilla esiintyvien solmualueiden, joihin liittyy vain puristussauvoja (CCC-solmut) korkeus määritellään liittyvien sauvojen geometrian ja tukipinnan leveyden mukaan. Kolmion muotoisen solmualueen sivut ovat kohtisuorassa sauvavoimaa vastaan. Mikäli kaikkien jännitysalueen rajapintojen jännitykset ovat yhtä suuria kutsutaan tasojännitystilän muotoa hydrostaattiseksi. Hydrostaattisen solmun voimat ovat puristavia eikä solmuun vaikuta leikkausvoimia. Mikäli solmualueen korkeus on suurempi tai yhtä suuri kuin hydrostaattisen solmun korkeus, on mitoittavana tekijänä tukipaine. Mikäli solmualueen korkeus on pienempi kuin hydrostaattisen solmun korkeus, mitoittavana tekijänä on pääjäännitys. (Leskelä 2008, 439.)



Kuva 17. Hydrostaattinen ja ei-hydrostaattinen solmu (Bircher 2009, 12)

Mitoitettaessa keskittyneitä puristus- ja vetosolmuja, tulee mitoittamisen onnistumiseksi muodostaa solmualueen ala. Solmu alueen korkeuteen vaikuttaa vetosauvan leveys (u), mikä riippuu ankkuroitavien vetoterästen kerrosten määrästä (n) sekä vetoraudoitteen ankkuroituspituudesta solmualueen taakse (c). Solmuun kohdistuvat jännitykset ovat suuremmat vetoterästen sijaitessa yhdessä kerroksessa, kuin jos ne olisivat useammassa kerroksessa, sillä solmuvoimat keskittyvät pienemmälle alueelle. Solmualueeseen vaikuttavan puristusdiagonaalin leveys pystytään määrittelemään, kunhan tuen leveys, diagonaalin suuntakulma ja vetosauvan korkeus ovat määriteltynä. Solmualueesta tulee vetoteräksen ankkurointipituuden lisäksi tarkastella tukipaine sekä diagonaalin puristusjännitys. (Leskelä 2008, 439.)



Kuva 18. Keskittynyt solmu (SFS EN 1992-1-1, 108)

3.8 Mitoituksen kulku

Ristikkomenetelmällä mitoittettavan rakenteen mitoitus toteutetaan ristikkorakenteen kaltaisesti mitoittamalla ensin ristikkomallin sauvat. Sauvojen mitoittamisen jälkeen mitoitetaan rakenteen sauvojen liitoskohdat eli solmut, jotka ovat usein laskentamallin toiminnan kannalta kriittisiä. Eurokoodissa SFS EN 1992-1-1 annetaan ohjeita ristikkomenetelmän käyttämisestä rakenteiden mitoittamiseen.

3.8.1 Puristussauvat

Puristussauvojen mitoituslujuutena voidaan käyttää puristuslujuuden mitoitusarvoa f_{cd} , mikäli tarkasteltavassa puristuskaistassa ei esiinny poikittaista vetävää jännitystä. (SFS EN 1992-1-1, 105.)

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}$$

γ_c = betonin osavarmuusluku ks. taulukko 1

$\alpha_{cc} = 0,85$

Mitoitustilanteet	betonin γ_c	betoniteräksen γ_s
Normaalisti vallitseva ja tilapäinen	1,5	1,15
Onnettomuus	1,2	1,0

Taulukko 1. Murtorajatilojen materiaaliosavarmuusluvut (SFS-EN-1992, 26)

Mikäli poikittaista vetoa esiintyy puristuskaistassa, lasketaan mitoituslujuus käyttämällä kaavaa

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd}$$

$$v' = 1 - (f_{ck} / 250)$$

Kerrointa v' kutsutaan myös halkeilleen betonin lujuuden pienennyskertoimeksi. Kaavalla laskettua arvoa voidaan käyttää pullomaisilla ja viuhkamaisilla jännityskentillä, joissa esiintyy aina voimien laajenemisen aiheuttamaa halkeilua. Kaavalla rajoitetaan betonin puristusjännitysten ylittymistä puristussauvoissa. Suuri puristusjännitysten ylitys aiheuttaa suurta halkeilua ja johtaa kappaleen puristusmurtoon. (BY211 2013, 134.)

3.8.2 Vetosauvat

Eurokoodeissa SFS-EN-1992-1-1 kohdassa 6.5.3 annetaan vetosauvoihin liittyen seuraavat ohjeet:

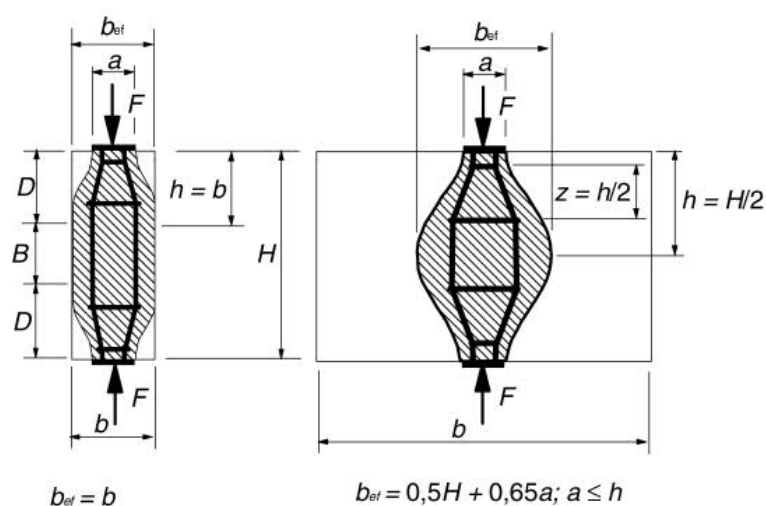
- 1) Poikittaisten vetosauvojen ja raudoitusten mitoituslujuutta rajoitetaan kohtien 3.2 (ei-jännitetyt betoniteräksiset) ja 3.3 (jännitetyt betoniteräksiset) mukaisesti
- 2) raudoitus ankkuroidaan riittävästi solmuihin
- 3) solmukeskittymien kohdalla vaikuttavien voimien edellyttämä raudoitus voidaan jakaa tietylle pituudelle. Kun solmualueen raudoitus ulottuu rakenneosassa huomattavalle matkalle, raudoitus jaetaan pituudelle, missä puristustrajektoriat ovat kaarevia (veto- ja puristussauvat). Vetovoima T saadaan:

- a) osittain muuttuvassa jännityskentässä alueille ($b \leq H/2$)
ks. kuva 20 a

$$T = \frac{1}{4} \frac{b-a}{b} F$$

- b) täysin muuttuvassa jännityskentässä alueille ($b > H/2$)
ks. kuva 20 b

$$T = \frac{1}{4} \left(1 - 0,7 \frac{a}{H} \right) F$$



B Tasainen jännityskenttä

D Muuttuva jännityskenttä

a) Osittain muuttuva jännityskenttä

b) Täysin muuttuva jännityskenttä

Kuva 19. Puristuskentän poikittaisten vetovoimien määrittämisen parametrit (SFS EN 1992-1-1, 107)

Vetosauvojen raudoitukset mitoitetaan kokonaisuudessaan sauvoissa vaikuttaville vetorasituksille. Yleensä betonin vetokapasiteettia ei huomioida vetorasituksia mitoitettaessa. Mitoitettavan poikkileikkauksen vaadittava raudoituksen pinta-ala saadaan kaavalla:

$$A_s > T / f_{yd}$$

A_s = raudoituksen pinta-ala

T = mitoitettava vetosauvan voima

f_{yd} = betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo (400...600 MPa)

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

γ_s = betoniteräksen materiaaliosavarmuusluku ks. taulukko 1

Vetovoiman (T) ankkuroinnin riittävyttä tarkastellaan SFS-EN-1992-1-1 luvussa 8. Raudoitustankojen, -lankojen ja hitsattujen verkkojen tartuntavoimien tulee siirtyä luotettavasti betonille aiheuttamatta lohkeilua tai tangon suuntaista halkeilua. Ankkuroinnin varmistamiseksi tulee tarvittaessa käyttää poikittaista raudoitusta. Ankkurointi voidaan toteuttaa suorilla tai taivutetuilla tangoilla, hakaraidoiteilla, hitsattavilla ankkurointilevyillä tai ankkurointitangoilla. Ankkurointipituus alkaa solmun reunakohdasta, jossa puristusjännitys kohtaa vetoteräksen. Ankkuroinnin tulisi ulottua vähintään solmualueen vastakkaiseen reunaan.

3.8.3 Solmut

Solmukohtien mitoittaminen eroaa sauvojen mitoittamisesta siten, että niissä kohtaavat puristus- ja vetosauvat. Solmukohdan mitoittaminen perustuu solmun perustyyppiin, jotka on esitelty tarkemmin kohdassa 3.7.4. Solmuun liittyvien puristus- ja vetosauvojen määrä määrittää solmun perustyyppin (CCC, CCT ja CTT) sekä solmun mitoituskestävyyden laskennassa käytettävät mitoitusarvot. Eurokoodissa ja Betoniyhdistyksen julkaisussa BY210 määritetyt mitoituskestävyyden arvot hieman vaihtelevat. Eurokoodin mukaisesti laskettuna saadut kestävyiden arvot ovat suurempia kuin BY210 julkaisussa.

1) Solmun mitoituskestävyys, kun solmuun liittyy vain puristussauvoja:

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 (1 - f_{ck} / 250) f_{cd} \quad (\text{SFS-EN-1992-1-1 kohta 6.5.4})$$

Eurokoodin kansallisen liitteen suositusarvo $k_1=1$.

$$f_{cd1} = 0,85 (1 - f_{ck} / 250) f_{cd} \quad (\text{By210 2005, 437})$$

- 2) Solmun mitoituskestävyys, kun solmuun liittyy vetosauva vain yhdestä suunnasta:

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 (1 - f_{ck} / 250) f_{cd} \quad (\text{SFS-EN-1992-1-1 kohta 6.5.4})$$

Eurokoodin kansallisen liitteen suositusarvo $k_2=0,85$.

$$f_{cd2} = 0,6 (1 - f_{ck} / 250) f_{cd} \quad (\text{By210 2005, 437})$$

- 3) Solmun mitoituskestävyys, kun solmuun liittyy useampi vetosauva eri suunnasta:

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 (1 - f_{ck} / 250) f_{cd} \quad (\text{SFS-EN-1992-1-1 kohta 6.5.4})$$

Eurokoodin kansallisen liitteen suositusarvo $k_3=0,75$.

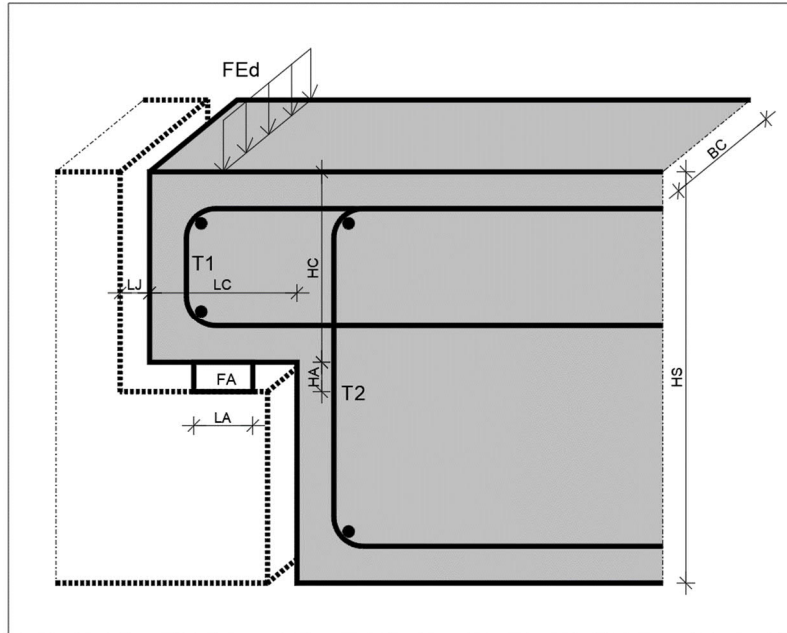
$$f_{cd3} = 0,7 (1 - f_{ck} / 250) f_{cd} \quad (\text{By210 2005, 437})$$

Eurokoodin mukaisesti solmujen puristusjännityksen mitoitusarvoja on mahdollista suurentaa 10%, mikäli jokin seuraavista ehdoista täyttyy:

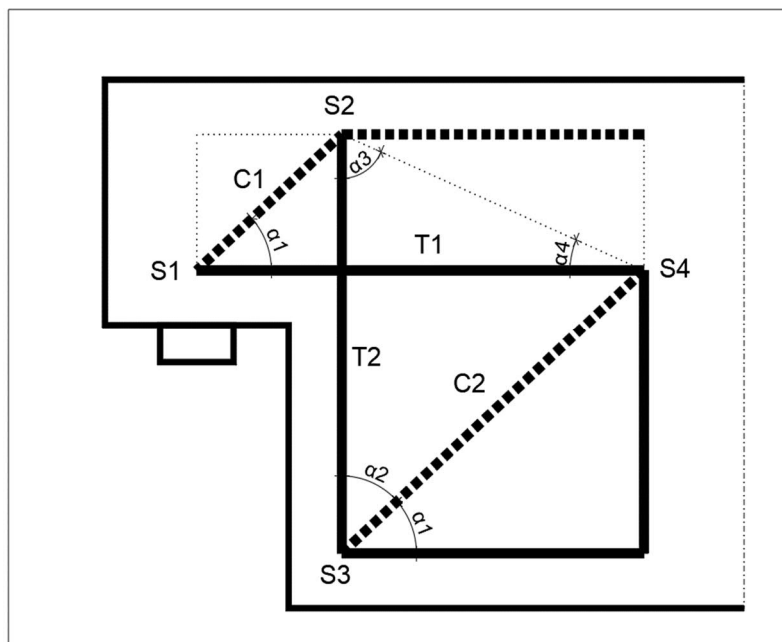
- 1) kolmiakselinen puristustilan kehittyminen on varmistettu
- 2) kaikki puristus- ja vetosauvojen kulmat ovat $\geq 55^\circ$
- 3) tuilla tai pistekuormien kohdalla vaikuttavat jännitykset jakautuvat tasaisesti, ja solmussa on laajenemista estävä haoitus
- 4) raudoitus on jaettu useaan kerrokseen
- 5) solmun laajeneminen on estetty luotettavasti laakerijärjestelyin tai kitkan avulla

3.9 Leukaliitoksen mitoitus

Leukaliitoksen mitoittamiseksi käytetään ristikkomenetelmää kuvien 21 ja 22 mukaisesti. Ristikkomallin määrittämisessä on hyödynnetty eri lähteiden ristikkomalleja, sekä RFEM-laskentaohjelmalla tuotetun laskentamallin mukaista jännitysjakamaa. Laatan leuka raudoitetaan käyttämällä kuvan 21 mukaisesti hakaraidoitteita (T1 ja T2) laatan pituussuunnassa. Tässä opinnäytetyössä on keskitytty leuan kestävyysmitoitukseen eikä laatan muuta raudoitustarvetta ole huomioitu.



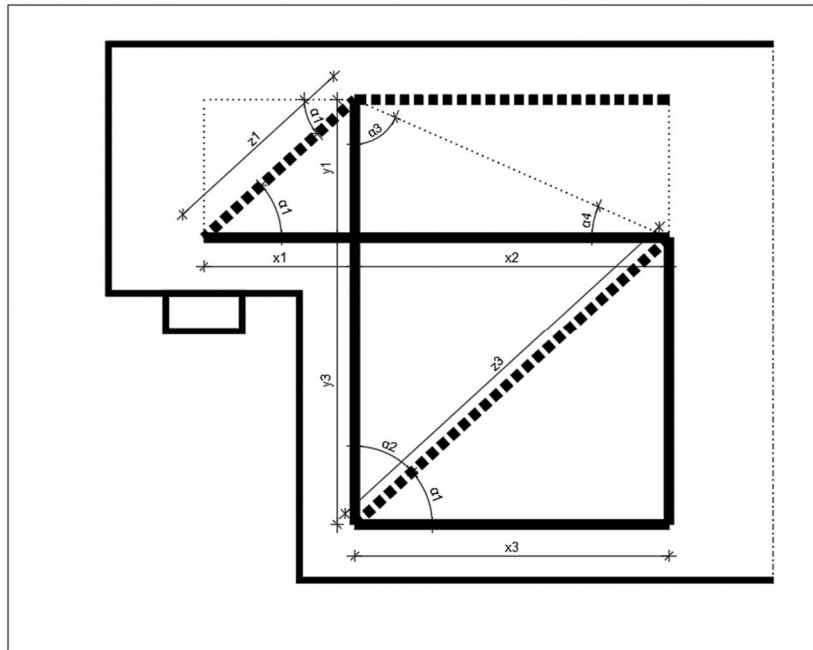
Kuva 20. Laattaelementtien välinen leukaliitos, kuormitus ja raudoitukset



Kuva 21. Leukaliitoksen ristikkomalli

3.9.1 Sauvavoimat

Sauvavoimien C1, C2, T1 ja T2 ratkaisemiseksi tulee määritellä ristikkomallin geometria eli solmujen ja sauvojen sijainnit. Ristikkomallin sauvat sijoitetaan raudoitteiden keskiakseleiden kohdalle ja solmut sauvojen yhtymäkohtiin. Ristikkomallista ratkaistaan trigonometriaa ja voimien tasapainoehtoja hyödyntäen sauvojen pituudet ja sauvoissa vaikuttavat voimat. Lisäksi ristikkomallista ratkaistaan sauvojen väliset kulmat.



Kuva 22. Ristikkomallin mukainen geometria

3.9.2 Solmu S1 (CT)

Ristikkomallin solmuun S1 liittyy yksi vetosauva (T1) ja yksi puristussauva (C1). Solmun S1 puristuskestävyys saadaan laskettua kaavalla:

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 * (1 - f_{ck} / 250) * f_{cd}$$

Puristusjännityksen kokonaisarvo saadaan kaavalla:

$$\sigma_c = F_{C1} / S_{1Az}$$

F_{C1} = sauvassa C1 vaikuttava puristusvoima

S_{1Az} = solmun S1 sauvaa C1 vastaan kohtisuoran puristuspinnan pinta-ala

Solmun S1 mitoitusehto:

$$\sigma_{Rd,max} > \sigma_c$$

Solmun S1 raudoitus mitoitetaan kokonaisuudessaan vetovoimalle F_{T1} . Vetovoiman F_{T1} ankkuroinnin aiheuttama nimellinen vaakasuora puristusjännitys lasketaan kaavalla:

$$\sigma_c = F_{T1} / (b * u)$$

F_{T1} = sauvassa T1 vaikuttava vetovoima

b = poikkileikkauksen leveys

u = vetosauvan leveys

Raudoituksen ankkuroituminen vaikuttaa vetosauvan leveyteen:

$u = 0$ kun yhdessä kerroksessa oleva raudoitus ei ankkuroidu solmun alueen taakse

$u = 2 * s_0$ kun yhdessä kerroksessa oleva raudoitus ankkuroituu vähintään mitan c solmun taakse

$u = 2 * s_0 (n + 1) * s$ kun n kerrosta käsittävä raudoitus ankkuroituu vähintään mitan $\max(c, s/2)$ solmun alueen taakse

s = tankoväli pystysuunnassa (kuva 19)

s_0 = tangon keskipisteen etäisyys vetosauvan reunasta (kuva 19)

3.9.3 Solmu S2 (CCT)

Ristikkomallin solmuun S2 liittyy puristussauvojen lisäksi vain yhdestä suunnasta vetosauva (T2), joten solmun puristuskestävyys saadaan kaavasta:

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 * (1 - f_{ck} / 250) * f_{cd}$$

Puristusjännityksen kokonaisarvo saadaan kaavalla:

$$\sigma_c = F_{C1} / S_{2Az}$$

Solmun S2 mitoitusehto:

$$\sigma_{Rd,max} > \sigma_c$$

3.9.4 Solmu S3 (CTT)

Ristikkomallin solmuun S3 liittyy puristussauvan lisäksi useammasta suunnasta vetosauvoja (T2 ja laatan alareunan vetosauva), joten solmun puristuskestävyys saadaan kaavasta:

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 * (1 - f_{ck} / 250) * f_{cd}$$

Puristusjännityksen kokonaisarvo saadaan kaavalla:

$$\sigma_c = F_{C2} / S_{Az}$$

Solmun S3 mitoitusehto:

$$\sigma_{Rd,max} > \sigma_c$$

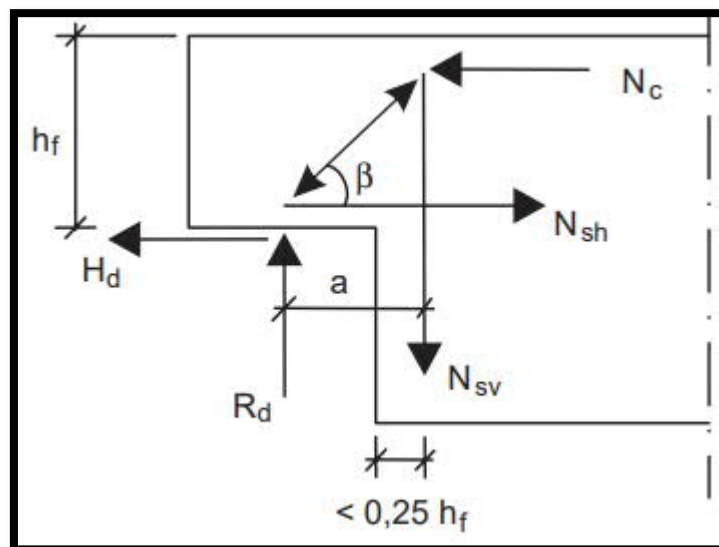
3.9.5 Lyhyen ulokkeen mitoitus

Leukaliitosten mitoittamisen perusteet on aiemmin esitetty Suomen Betoniyhdistyksen julkaisuissa (Saarinen, joissa on esitetty lyhyen ulokkeen mitoituksen kulku. Julkaisujen vetorasitusten mitoitus tapa on hyvin samankaltainen Eurokoodin mitoituksen kanssa, mutta puristusrasitusten mitoittaminen eroaa huomattavasti ristikkomenetelmästä. Lyhyen ulokkeen menetelmässä solmukohtien puristusjännityksiä ei tarkastella ollenkaan.

Leuan pystysuuntainen vetovoima N_{sv} saadaan kaavalla:

$$N_{sv} = R_d$$

R_d = leukaan vaikuttava pystysuuntainen mitoitusvoima



Kuva 23. Lyhyen ulokkeen rakennemalli (Saarinen E, 522)

Leuan vaakasuuntainen vetovoima N_{sh} saadaan kaavalla:

$$N_{sh} = (R_d * a) / z_f + H_d$$

H_d = leukaan vaikuttava vaakasuuntainen voima
 z_f = leuan raudoitteiden keskipisteiden välinen mitta

$$H_d \geq k \cdot R_k \geq 30 \text{ kN}$$

$$z_f = 0,8 \cdot d_f$$

d_f = leuan tehollinen korkeus

$k = 0,2$ kun liitoksessa on kuminen tasauslevy, kumilevylaakeri tai vastaava

$k = 0,3$ kun molemmat liitospinnat ovat terästä

$k = 0,4$ kun liitospinnassa on teräs betonipintaa vasten

$k = 0,5$ muissa tapauksissa

Vetoraudoitteiden pinta-alat saadaan kaavalla:

$$A_s = N_s / f_{yd}$$

Betonin puristusmurron estämiseksi ulokkeen tulee täyttää ehto:

$$N_{cw} \leq 0,15 \cdot f_{cd} \cdot b_f \cdot d_f$$

b_f = leuan tehollinen leveys

N_{cw} = Sauvavoimien N_{sh} ja N_{sw} välinen diagonaalipuristusvoima

4 CASE- TUTKIMUS JA TUTKIMUSTULOKSET

Elementtisuunnittelu ja rakennetekniikan ala yleisesti ovat hyvin kilpailtuja aloja niin Suomessa kuin maailman laajuisesti. Rakennusalan konsultointiin erikoistuneet yritykset pyrkivät erottumaan toisistaan laadun, hinnan ja innovatiivisten ratkaisujen avulla ja siksi monet yritykset pyrkivät jatkuvasti etsimään uusia ja entistä tehokkaampia tapoja suunnitteluun. Suunnittelun eri osa-alueiden osittaisen automatisoinnin on uskottu olevan se ratkaisu, jolla saavutetaan suurin hyöty niin laadullisesti kuin tehokkuudenkin kannalta. Automatisointia pyritään suuntaamaan töihin, joissa toistuvat kaavat ja samankaltaiset työsuoritukset, eikä innovatiivisuudella tai luovuudella ole niinkään suurta roolia lopputuloksessa. Tällaista työtä on hyvin paljon elementtisuunnittelussa, mikä on alun alkaenkin luotu tehostamaan rakentamista.

Tietotekniikan hyödyntäminen on yleistynyt rakentamisen ja rakennesuunnittelun alalla voimakkaasti, mutta tietotekniikan tarjoamaa potentiaalia hyödynnetään vasta varsin vähän. Suunnittelutyö toteutetaan nykyään lähes täysin tietokoneavusteisesti, mutta hyvin paljon suunnittelijälähtöisesti. Tietokoneohjelmat ovat lähinnä tietokoneavusteisia piirustusohjelmia tai vasta yleistymässä olevia tietomalleja, joissa suunnittelija kontrolloi ja valvoo jokaista suoritettavaa prosessia. Tällä tavoin suunnittelutyössä ei hyödynnetä tietokoneen tarjoamia vahvuuksia, joita voidaan pitää suoritusnopeutta ja tarkkuutta verrattuna ihmiseen.

4.1 Tutkimuskysymykset

Vuoden 2018 alussa Suomen rakentamismääräyskokoelman uudistamisen ja uusien asetusten voimaan astumisen myötä, rakennusalan konsulttiyritykset ovat joutuneet päivittämään vanhojen määräysten mukaiset työkalut ja laskentapohjat vastaamaan eurokoodien suunnittelustandardien mukaista laskentaa. Suunnittelutoimistojen käytössä olevat rakennusosien kuormitusten määrittämiseen ja rakenteiden mitoittamiseen tarkoitetut laskentatyökalut ovat perinteisesti olleet Excel- tai MathCad-ohjelmistopohjaisia laskentapohjia. Laskentapohjien käyttö on ollut hyvin kirjavaa ja käytössä on ollut yritysten ja suunnittelijoiden itse tekemiä laskentapohjia sekä erilaisissa rakennesuunnittelutoimistojen ja ammattikorkeakoulujen kehityshankkeissa tuotettuja laskentapohjia kuten esimerkiksi SKOL-laskentapohjia. Suunnittelustandardien uudistumisen kanssa samanaikaisesti tietokoneen käyttäminen ja hyödyntäminen rakenteiden kantavuuden ja lujuuden laskennassa on ottanut suuria askelia eteenpäin. FEM-pohjainen laskenta on yleistynyt ja tietomallien hyödyntäminen myös rakenteiden laskennassa on yleistymässä. Laskentatyökalujen kehittämisessä onkin otettava huomioon, että niiden on sovittava yhteen käytössä olevien uusien suunnitteluohjelmistojen kanssa sekä soveltua eurokoodien mukaiseen laskentaan.

Tämän opinnäytetyön tutkimustyön tarkoituksena on kehittää ja automatisoida elementtisuunnittelun prosesseja, jotta elementtisuunnittelu olisi mahdollisimman tehokasta ja laadukasta. Kehitystyön tarkoituksena on ylläpitää ja parantaa yrityksen kilpailukykyä jatkuvasti kiristyneessä kilpailussa elementtisuunnittelun toimeksiannoista. Tutkimustyö rajataan massiivilaattaelementtien välisiin leukaliitoksiin, mutta tutkimustyön tuloksia on tarkoitus hyödyntää myös muissa elementtityypeissä ja -liitoksissa. Parametrin suunnittelun on ennakoitu olevan tulevaisuudessa selkeä suunnittelun tehokkuutta parantava tekijä, jonka käyttöönotto luoo uudenlaisia mahdollisuuksia perinteisten työtapojen rinnalle.

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena on selvittää parametrin suunnittelun hyödyt ja mahdolliset riskitekijät rakennesuunnittelun tehtävissä erityisesti elementtisuunnittelun näkökulmasta tarkasteltuna. Tutkimusta aloitettaessa perusolettamuksena on, että parametrin suunnittelu lyhentää yksittäiseen suunnittelutehtävään kuluvaa aikaa sekä parantaa sen

laatua erityisesti toistuvissa työsuoritteissa. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää voidaanko parametrinen suunnittelun työkalulla parantaa suunnittelun kustannustehokkuutta, laatua sekä ajankäyttöä ja tuottaa lisäarvoa perinteiseen suunnitteluun verrattaessa.

4.2 Tutkimuksen toteutus ja vaiheet

Tutkimustyö tehdään Sweco Rakennetekniikka Oy:lle, mikä on Suomen rakennetekniikka-alan markkinajohtaja ja yksi tietomallintamisen edelläkävijöitä Suomessa. Tietomallintaminen on Swecolla tärkeässä osassa suunnitteluprojekteja niin visualisoinnin kuin projektin läpiviennin kannalta. Virtuaalisella suunnittelulla Sweco pyrkii varmistamaan suunnitelmien korkean laadun sekä rakennettavuuden. Tietomallintaminen on voimakkaasti kasvavassa roolissa rakennesuunnittelun alalla ja sen ohella myös elementtisuunnittelussa. Sweco on kokenut, että tietomallintamisen kehittäminen on tärkeää ja sillä saavutetaan haluttua kilpailuetua muihin toimijoihin nähden. Tutkimustyö kohdennettiin erityisesti elementtisuunnitteluun, koska parametrinen suunnittelu on parhaimmillaan, kun suunnittelussa on toistuvuutta ja ratkaisut noudattavat mallia tai tiettyä kaavaa. Tietomallintaminen on melko uusi työmenetelmä rakentamisen suunnittelussa ja suunnittelun tehostamiseksi tietomallintamalla kehitetään jatkuvasti uusia työkaluja.

Tutkimustyö kohdistettiin betonirakenteisiin oman betonirakenteiden suunnittelukokemukseni vuoksi. Osastomme suunnittelukohteita ovat esimerkiksi asuinkerrostalot, teollisuushallit, sairaalat, toimistotalot ja koulut. Asuinkerrostalot muodostavat suurimman osan suunnittelutoimeksiannoista ja tämän vuoksi oli luontevaa rajata kehitystyö asuinkerrostalojen suunnittelun kehittämiseen. Laattamaisten elementtien kuten esimerkiksi parveke- ja massiivilaattojen leukaliitokset ovat asuinkerrostalo kohteissa hyvin yleisiä. Leukaliitosten mitoituksen koettiin olevan haastavaa ja suunnittelukäytäntöjen vaihtelevia. Leukaliitosten suunnittelun tueksi ei ollut valmista työkalua vaan suunnittelijat pitivät yllä omia laskentapohjiaan. Työkalun tarkoituksena on yhdenmukaistaa ja tehostaa leukaliitosten suunnittelua sekä madaltaa uusien suunnittelijoiden kynnystä leukaliitosten suunnitteluun.

Tutkimustyö toteutettiin vaiheittain. Työn ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin tutkimustyön tarve sekä mahdolliset ongelmakohdat. Leukaliitosten laskentapohjan tarve oli noussut esille osastomme suunnittelijoiden keskuudessa ja tarve oli havaittu myös muissa suunnittelu yksiköissä. Laskentapohja haluttiin toteuttaa Excel-ohjelmistopohjaisena sen helppokäyttöisyyden vuoksi. Alustavassa ideoinnissa laskentapohja haluttiin liittää Tekla Structures suunnitteluohjelmistoon komponentiksi, jolla voitaisiin mallintaa leukaliitos suunnittelija lähtöisesti valmiiden esiasetusten mukaisesti. Komponentilla tarkoitetaan työkalua, mikä sisältää osien tai liitosten tietomallintamista tehostavia esivalintoja ja -asetuksia. Suunnittelutyökalujen kehittyminen entistä automatisoidumpaan suuntaan ohjasi tutkimustyötä

siten, että laskentapohjaa haluttiin liittää parametriseen suunnittelun avulla tietomallinnukseen. Parametrisella suunnittelulla työkalusta haluttiin saada entistä informatiivisempi sekä nopeampi työkalu, jolla pystyttäisiin mitoittamaan rakenne tietomallintamisen yhteydessä ilman rakenteen erillistä mitoitusvaihetta.

Tutkimustyöhön liittyvien mahdollisten riskien ja ongelmakohtien selvitystyö toteutettiin suullisin kyselyin sekä kirjallisuuslähteiden perusteella. Erilaisten näkökulmien saamiseksi haastatteluja tehtiin eri suunnittelutehtävissä toimiville henkilöille. Haastateltavat henkilöt toimivat rakennesuunnittelun eri tehtävissä sekä suunnitteluohjelmistojen kehittämistehtävissä. Haastattelujen perusteella haluttiin saada näkemys toteutettavan työkalun tekniseen toteuttamiseen liittyvistä haasteista sekä saada opinäytetyö rajattua sille asetetut tavoitteet saavuttavaksi toimivaksi kokonaisuudeksi.

Tutkimustyön toisessa vaiheessa tutustuttiin kirjallisuuslähteiden avulla tutkimuksen kohteena olevaan teräsbetoniin rakennusmateriaalina sekä sen käyttöön rakentamisessa. Lisäksi selvitettiin rakennesuunnittelun ja elementtisuunnittelun nykytila sekä tulevaisuuden näkymät. Tässä tutkimustyön vaiheessa perehdyttiin erityisesti tietomallintamisen näkökulmasta rakennesuunnitteluun sekä elementtisuunnittelun käytössä oleviin työkaluihin ja prosesseihin. Lisäksi kartoitettiin elementtisuunnittelussa suunnittelijoiden kokemia ongelmakohtia sekä pohdittiin mahdollisia kehitystarpeita jo olemassa oleviin työkaluihin. Vaiheen tarkoituksena oli saavuttaa riittävä teoreettinen pohja tutkimustyön toiminnallisen osan toteuttamiseksi.

Tutkimuksen kolmannessa vaiheessa tutkimusongelman ratkaisemiseksi luotiin selvitystyön perusteella työkalut, joilla pyrittiin ratkaisemaan ennalta määritellyt leukaliitosten mallintamiseen ja mitoittamiseen liittyvät ongelmat. Tutkimustyön tuloksena oli tarkoitus toteuttaa kaksi työkalua: Excel-ohjelmistopohjainen massiivilaattojen leukaliitoksen laskentapohja sekä leukaliitoksen Tekla Structures ohjelmistolla tietomallintamista tehostava algoritmiavusteinen työkalu. Työvaiheeseen kuului myös työkalujen kokeileminen käytännön ongelman ratkaisussa, jotta työkalujen toimivuus ja luotettavuus voitiin arvioida ja mahdolliset virheet korjata.

4.2.1 Excel-laskentapohja

Tutkimustyön yhtenä tavoitteena oli tuottaa suunnittelijoiden käyttöön massiivilaattojen leukaliitoksien mitoittamiseksi Eurokoodi standardeihin perustuva helppokäyttöinen laskentapohja. Leukaliitoksen mitoitusmenetelmäksi valittiin ristikkomenetelmä (strut-and-tie), mikä soveltuu standardin EN-1992-1-1 mukaisesti rakenteiden epäjatkuvuuskohtien mitoittamiseen.

Excel-laskentapohja perustuu laskentasoluihin, joiden arvoja muuttamalla laskentaohjelma laskee määritetyn laskelman. Laskentapohjassa käytetään yleisesti kahdenlaisia erilaisia tietosoluja: käyttäjän muokattavissa olevia tietosoluja, kuten lähtötietosolut sekä soluja, joita käyttäjän ei ole tarvetta muokata kuten laskentasolut, tulossolut ja laatusolut. Laskentapohjan helppo- ja nopeakäyttöisyyden takia käyttäjän muokattavissa olevien tietosolujen määrä tulee pitää mahdollisimman pienenä. Toisaalta laskentapohjan tulee sisältää myös valittavissa olevia tietosoluja, jotta laskenta soveltuisi mahdollisimman monenlaiseen mitoitusapaukseen.

Tutkimustyötä aloitettaessa suunnittelijoiden käytössä ei ollut valmista laskentapohjaa laattamaisten rakenteiden leukaliitoksen mitoittamiseksi. Leukapalkkien ja pilarikonsolien mitoittamiseen oli käytössä laskentapohjia, mutta niiden käyttö oli melko työlästä eivätkä soveltuneet sellaisenaan laattamaisten elementtien mitoittamiseen. Laattamaisten elementtien liitosten laskennat oli toteutettu aiemmin käsin laskemalla, joko kynällä ja paperialla tai tietokoneen laskentapohjia käyttäen. Mitoitustapa oli koettu melko työlääksi ja aikaa vieväksi, koska laskelmissa ei hyödynnetty toistuvuutta. Laskentatapa pohjautui monessa tapaa vanhoihin rakentamismääräyskokoelman asetuksiin. Koska Eurokoodi standardeihin perustuvia laskentapohjia ei ollut käytettävissä, saatujen tulosten luotettavuuden arvioimiseksi laskentapohjaan tehtiin Eurokoodi mitoituksen rinnalle myös vanhojen rakentamismääräyskokoelman asetusten mukainen laskenta. Saatuja laskentatuloksia verrattiin myös jo toteutuneiden leukaliitosten laskelmiin.

Laattamaisten elementtien leukaliitosten mitoittamiseksi tuotettua Excel-laskentapohjaa on tarkoitus hyödyntää sellaisenaan liitostensuunnittelussa. Laskentapohjaa hyödynnetään myös osana liitosten tietomallintamista. Laskentapohjan käytön ja työkalun toimivuuden yksinkertaistamiseksi laskentapohjasta tuotettiin myös esivalintataulukko yleisimmistä leukaliitoksista ja kuormitustapauksista. Työkalun ensimmäisen version on tarkoitus hyödyntää esivalintataulukkoa liitoksen mitoittamisessa ja tulevaisissa kehitysvaiheissa laskentaa voidaan laajentaa kattamaan yhä useampi erilainen liitostyyppi.

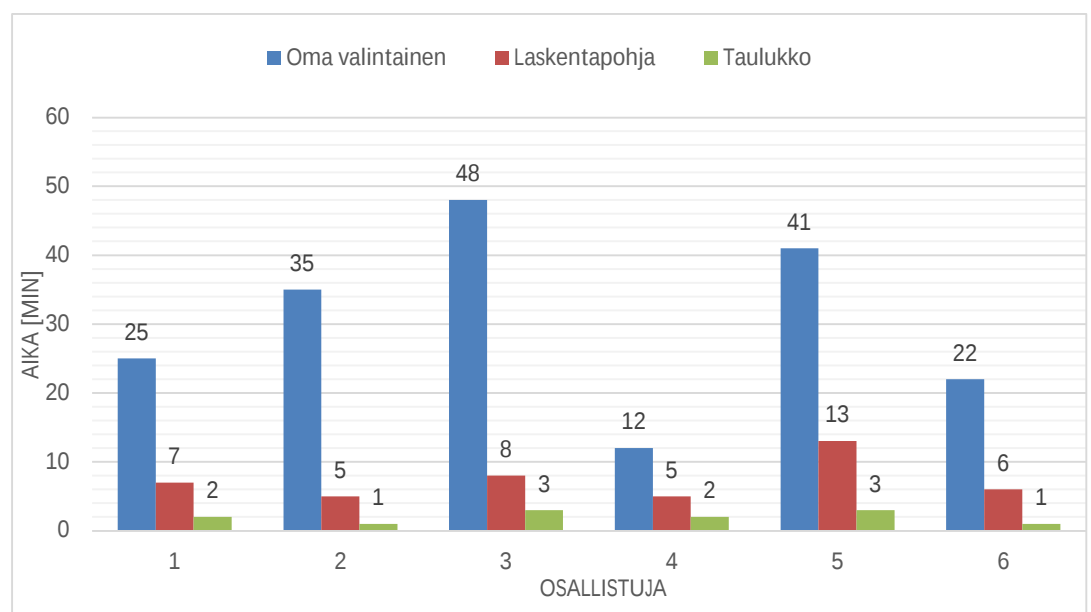
4.2.2 Laskentapohjan testaaminen

Tutkimustyön tuloksena syntyneen laskentapohjan testausvaiheeseen osallistui Sweco Rakennetekniikka Oy:n työntekijöitä. Tutkimustyöhön osallistuneiden työntekijöiden työkokemus ja roolit yrityksessä olivat vaihtelevia, mutta kaikille osallistujille oli entuudestaan tuttua betonirakenteiden suunnittelu sekä yleiset käytössä oleviin laskentapohjiin liittyvät käytännöt. Osallistujille jaettiin tehtävänanto sekä laskentapohjan testiversio ja mitoitusaulukko. Mitoitusaulukon lähtöarvot olivat kaikille osallistujille samanlaiset ja tehtävä suoritettiin jokaisen osallistujan kanssa eri aikaan, siten että osallistujat eivät olleet tietoisia muista tehtävän suorittajista tai

heidän suorituksistaan. Jokaisen testiryhmän jäsenen tehtävänä oli mitata mitoitustehtävän suorittamiseen kuluva aika. Tehtävään suorittamiseen kuluva aika kirjattiin ylös kunkin suorituksen jälkeen. Testausryhmän tehtävänä oli vertailla leukaliitoksen mitoitamiseen kuluvaa aikaa kolmella eri tavalla mitoittaessa:

- 1) Oma valintainen laskentatapa
- 2) Tutkimuksen laskentapohja
- 3) Tutkimuksen laskentapohjan mukainen taulukko mitoitus

Mitoitustehtävän jälkeen osallistujat vastasivat kysymyksiin, joilla selvitetiin oma valintaista laskentatapaa sekä vertailtiin uuden laskentapohjan ja mitoitustavan hyötyjä ja haittoja verrattuna vanhoihin mitoitustapoihin.



Kuva 24. Pylväsdiagrammi mitoitustehtävän suorittamiseen kuluneesta ajasta eri mitoitustavoilla.

Tutkimustehtävään osallistui kuusi henkilöä. Tehtävän suorittamiseen osallistuneet kokivat laskentapohjan ja taulukkomitoituksen nopeuttavan leukaliitoksen suunnittelua huomattavasti. Kuvassa 24 on esitettyä kuuden testiryhmän jäsenen mitoitustehtävään kuluneet ajat eri mitoitustavoilla. Kuvan 24 mukaisesti mitoitustehtävän suorittamiseen laskentapohjalla kului peräti 76% vähemmän aikaa kuin mikäli liitos olisi mitoitettu oma valintaisella tavalla. Taulukko mitoitus oli tutkimuksen mukaan selkeästi nopein tapaa suorittaa mitoitustehtävä. Taulukkomitoitus oli 93% nopeampi tapa suorittaa tehtävä kuin oma valintainen mitoitustapa.

Yleisin käytössä ollut oma valintainen laskentatapa oli oma aiemmin käytetty leukaliitoksen laskelma. Kahdessa tapauksessa leukaliitoksen mitoitaminen ei ollut entuudestaan tuttua. Käytössä olleet laskelmat olivat pääsääntöisesti tehty Excel-ohjelmistolla tai käsin laskemalla. Laskentapohjien

uudelleen käyttäminen vaati useassa tapauksessa uudelleen perehtymistä vanhan laskelman teoriaan, mikä koettiin hankalaksi ja aikaa vieväksi vaiheeksi. Lisäksi vanhojen laskelmien dokumentaation koettiin olevan heikkoa. Vanhojen laskelmien laskennan kulun ymmärtäminen ja tulkitsemisen koettiin aiheuttavan laskennan lopputulokseen epävarmuutta. Laskentapohjan käyttämisen koettiin olevan hyödyllinen myös laskennan luotettavuuden ja dokumentoinnin kannalta.

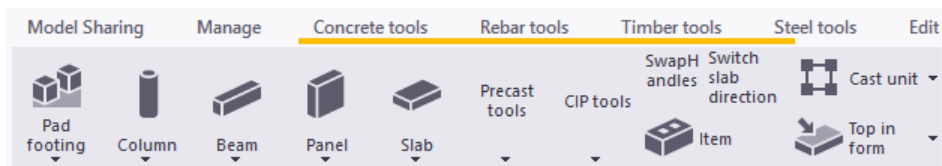
4.2.3 Parametrinen suunnittelun työkalu

Toinen tutkimustyön päätavoitteista oli tuottaa elementtisuunnittelun tehostamiseksi algoritmeja hyödyntävä ohjelmistopohjainen työkalu. Työkalu haluttiin Tekla Structures-suunnitteluohjelmistoon yhteensopivaksi, koska ohjelmisto on hyvin yleisesti käytössä rakennesuunnittelun alalla. Työn tavoitteena oli automatisoida elementtisuunnittelulle tyypillistä toistuvaa suunnittelutyötä sekä vähentää leukaliitosten mitoittamiseen kuluvaa aikaa. Työkalun oli myös tarkoitus tuottaa aiempaa laadukkaampia ja tasalaatuisempia suunnitelmia ja mahdollistaa laskelmien tarkastaminen jälkikäteen.

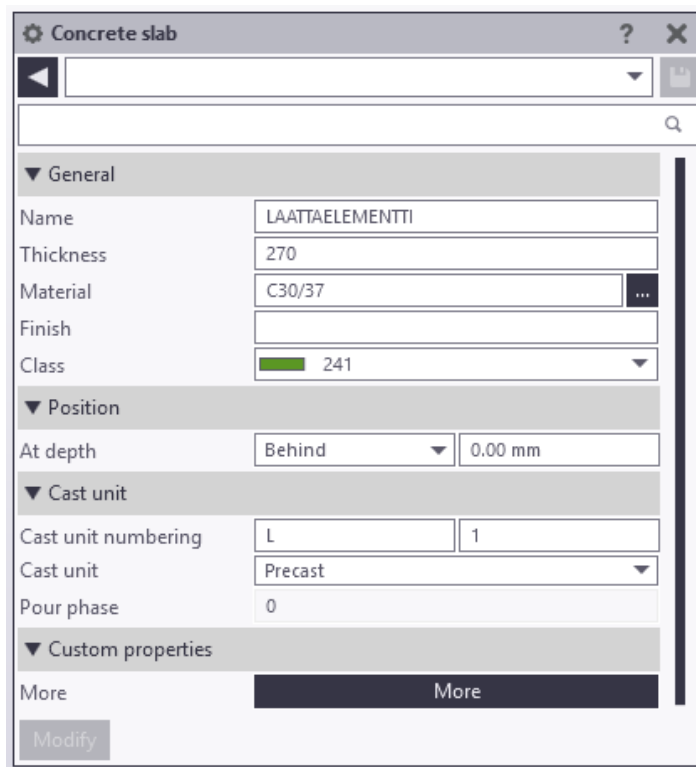
Teklassa yksittäisten rakenteiden (part/object) kuten esimerkiksi seinien, laattojen ja pilareiden geometria luodaan rakennusmateriaaleittain valittavissa olevilla työkaluilla. Työkalut löytyvät mallinnusohjelman oletusnäkyvän yläreunasta. Työkalut on ryhmitelty rakennusmateriaalin mukaan betoni-, puu- ja teräsmallinnustyökaluihin. Lisäksi Teklasta löytyvät työkalut esimerkiksi raudoitteiden, aukkojen ja valutarvikkeiden mallintamiseen. Jokaiselle rakenteelle voidaan syöttää Properties ikkunassa käyttäjälähtöisiä ominaisuuksia kuten esimerkiksi koko ja materiaalitietoja. Rakennesan Custom properties ikkunassa voidaan betonirakenteille määrittää lisäominaisuuksia kuten betonin käyttöikä sekä rasitus-, palo- ja toteutusluokat. Rakenteet ja niiden osat yksilöidään numerointi- ja nimeämisohjeen mukaisesti niille annettavien class, cast unit numbering ja cast unit määrittelyjen mukaan (Yleiset tietomallivaatimukset 2012). Numerointitunnusten ja määrittelyjen tarkoituksena on erottaa rakenneosat toisistaan sekä mahdollistaa eri suunnitteluohjelmistojen välinen tiedonsiirto. Määritettyjä ominaisuuksia voidaan hyödyntää myös mallinnus- ja piirustusnäkyvien filtteröinnissä eli suodattamisessa, jolla voidaan piilottaa tai tuoda näkyviin eri rakenneosia.

Erilaisten rakenneosien mallinnustavat eroavat toisistaan, mutta mallintamisen peruseräpäätteet ovat hyvin samankaltaiset. Rakenneosat tulee mallintaa niille tarkoitetuilla työkaluilla, jotta tiedonsiirtäminen onnistuu luotettavasti eri suunnittelualojen välillä. Geometrian mallintamiseksi käytetty työkalu vaikuttaa myös sen yksityiskohtien mallintamiseen käytettävien mallinnustyökalujen toimivuuteen, sillä tietyt komponentit toimivat vain tiettyjen rakenneosien mallinnustyökalujen kanssa. Rakenneosien detaljoinnin kuten esimerkiksi raudoitteiden ja liitosten mallintamiseksi Teklassa on käytettävissä erilaisia custom-komponentteja. Applications &

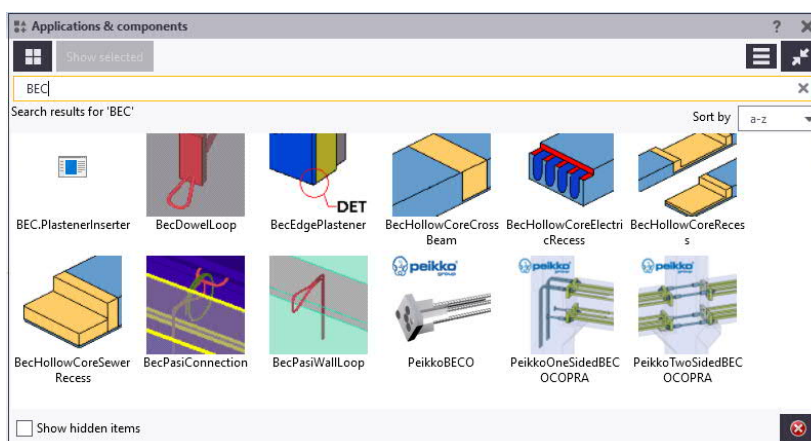
components catalogista löytyvät komponentit ovat mallinnustyökaluja, jotka sisältävät erilaisia käyttäjän muokattavissa olevia esiasetuksia. Komponentteja käytetään mallintamisessa rakenneosien ja liitosten luomiseen ja detaljoimiseen.



Kuva 25. Concrete tools työkalupaletti (Tekla Structures 2018i)



Kuva 26. Concrete slab properties ikkuna (Tekla Structures 2018i)



Kuva 27. Applications & components catalog (Tekla Structures 2018i)

API-ohjelmointirajapintaa hyödyntämällä Teklaan voidaan lisätä myös laajennusosia (plug-ins) sekä sovelluksia (applications). Pluginien eli plugareiden ja applicationeiden suurin ero on niiden käytettävyydessä. Plugin-komponentteja voidaan käyttää Tekla mallin sisällä esimerkiksi Applications & components catalogista valitsemalla, kun taas applicationit käynnistetään Tekla ohjelmiston ulkopuolella. Applicationeiden luominen on usein yksinkertaisempaa ja niiden testaaminen helpompaa kuin pluginien.

4.2.4 Laattaelementin leukaliitoksen parametrinen mallintaminen

Rakenneosien tietomallinnusprosessi aloitetaan kokoamalla tarvittavat lähtötiedot. Lähtötietoja ovat mm. geometrian reunaehdot, liitokset ympäröiviin rakenteisiin (liitosdetaljit) sekä rakenteen lujuuslaskelmat. Edellä mainitut tiedot toimivat myös suunnittelun parametrisoinnin lähtökohdina.

Laattaelementin mallinnusprosessi aloitetaan laatan päägeometrian luomisella. Tekla Structures-ohjelmistossa betoniset massiivilaatat mallinnetaan concrete slab-työkalua. Laattojen geometria mallinnetaan mahdollisimman tarkkaan ympäröivien rakenteiden sekä käytössä olevien referenssien mukaisesti. Käytettävät referenssi voivat olla esimerkiksi arkkitehdin IFC-malli tai 2D-pohjapiirustus. Concrete slab-työkalun properties ikkunassa rakenneosalle määritetään betonin lujuusluokka ja paksuus sekä kohdekohtaisen numerointi- ja nimeämisohjeen mukaiset yksilöinti tiedot. Päägeometrian luomisen jälkeen voidaan laattaelementin yksityiskohtaisempi geometria mallintaa, kuten esimerkiksi reikävaraukset sekä liitosten vaatimat syvennykset ja kolot.

Leukaliitoksen kestävyyskannalta kriittisiä lähtötietoja ovat kuormitus, geometria (leuan pituus ja korkeus), betonin puristuslujuus sekä rauditus. Leukaliitoksen suunnittelussa hyödynnetään Teklan API-rajapintaa, jonka avulla tietomalliin luotua laattaelementtiä voidaan hyödyntää osana lähtötietojen määrittelyä. Algoritmi sisältää myös avoimia muuttujia eli parametreja, joita muuttamalla leukaliitos saadaan muokattua halutun laiseksi.

Lähtötiedot tietomallista:

- Laatan korkeus
- Betonin puristuslujuus

Avoimet muuttujat:

- Terästen suojabetoni
- Terästen lujuus
- Kuormitus

Parametrin mallintamisen työkalu sisältää Excel-laskentapohjaan pohjautuvan esivalintataulukon, jossa on taulukoituna yleisimpien leukaliitosten mitat, rauditusmäärät sekä maksimi kuormitukset. Algoritmi käyttää

esivalintataulukon tietoja leukaliitoksen ja raudoituksen geometrian sekä raudoitteiden koon ja määrän mallintamiseksi. Algoritmi tunnistaa yhdistettävät rakenneosat class-tiedon perusteella sekä määrittää leukaliitoksen tarpeen laattaelementtien reunoissa yhdenmukaisten rakenneosien keskinäisen etäisyyden perusteella. Geometrian lisäksi leukaliitokseen tulee määrittää raudoitus, jolla on olennainen merkitys liitoksen kestävyys-teen. Algoritmi määrittää leukojen ja laattojen reunojen hakaraidoitusten koot ja määrät käyttäjän valitseman leukaliitoksen maksimi kuormituksen mukaan. Raidoitusten geometrian määrittämiseksi käyttäjän tulee syöttää parametriin raudoitteiden suojabetonietäisyys.

Algoritmin tulos:

- Leuan geometria (korkeus ja pituus)
- Leuan raudoitus (määrä ja geometria)
- Leukaliitoksen sijainti

Lähtötietojen määrittämisen jälkeen algoritmi mallintaa massiivilaattojen välisen liitoksen API-ohjelmointirajapintaa käyttäen. Leukaliitoksen luomisen jälkeen suunnittelijan tehtävänä on tarkistaa mallinnuksen onnistumisen sekä kokonaisuuden tarkastelu.

4.2.5 Leukaliitoksen suunnittelutehtävä

Leukaliitoksen mitoitustyökalujen ja laskentapohjien toimivuuden arvioimiseksi suunnitteluryhmälle annettiin leukaliitoksen suunnittelutehtävä. Suunnittelutehtävässä Sweco Rakennetekniikka Oy:n työntekijöiden tuli mitoitaa tehtävänannon mukainen leukaliitos kolmella eri tavalla ja ennalta määritetyssä järjestyksessä. Tehtävän suorittajia pyydettiin seuraamaan eri tavoin mitoitettaessa työhön kulunutta aikaa. Ensimmäiseksi suunnittelijoiden tuli käyttää mitoittamiseen oma valintaista mitoitustapaa. Mitoitustapaa ei rajattu mitenkään. Toiseksi mitoitus tuli tehdä tutkimustyön tuloksena tuotetulla Excel-laskentapohjalla. Viimeiseksi suunnittelijan käyttöön annettiin tutkimustyön Excel-laskentapohjaan perustuva esivalintataulukko, jolla mitoitus tuli suorittaa. Lopuksi eri mitoitustavoilla kulunutta aikaa vertailtiin toisiinsa ja haastateltiin tehtävän suorittajien kokemuksia, liittyen annettuihin mitoitustapoihin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ristikkomenetelmää voidaan käyttää teräsbetonirakenteiden ja niiden osien suunnitteluun. Yksinkertaista ristikkomallia voidaan käyttää erityisesti rakenteiden paikallisten epäjatkuvuuskohtien mitoittamiseen. Rakenteiden voimasuureiden ratkaiseminen kimmoteorian mukaisten jännitys-kenttien mukaisella ristikkomallilla on usein toimiva tapa mitoitaa rakenteiden erityiskohtia. Ristikkomallin käyttäminen vaatii kuitenkin

suunnittelijalta ristikkomenetelmän ja siihen liittyvän teorian riittävää tuntemista. Monimutkaisissa rakenteissa joudutaankin usein vielä laskenta suorittamaan tietokoneen FEM-laskentaohjelmia hyödyntäen.

Tutkimuksen perusteella tehokkaan liitoksen mitoittamisen perusta on helppokäyttöiset ja tarpeeksi yksinkertaiset laskentatyökalut. Laskentatyökaluina käytetään useimmiten erilaisia laskentapohjia, joiden käyttäminen tehostaa suunnittelua huomattavasti. Laskentatyökalujen tulee kuitenkin olla riittävän monipuolisia, jotta ne soveltuisivat mahdollisimman moneen erilaiseen suunnittelutehtävään. Puutteelliset ja vaikea käyttöiset työkalut aiheuttavat suunnittelutyössä epävarmuutta ja johtavat mitoitus tulosten vaihtelevuuteen sekä mitoitus työhön kuluneen ajan kasvamiseen. Luottamuksen puute olemassa olevien laskentapohjien käyttämiseen, johtaa usein myös liitosten tarpeettomaan suuriin rauditusmääriin.

Uusien laskentapohjien tekeminen on työlästä ja aikaa vievää työtä. Laskentapohjien hyöty tulee esiin suunnitteluvaiheessa, kun suunnittelutyöhön kuluva aika lyhenee ja suunnittelija voi hyödyntää ajan muiden suunnittelutehtävien tekemiseen. Laskentapohjien hyöty kasvaa niiden käyttömäärien kasvamisen myötä, jolloin yksittäiseen mitoitus tehtävään kulunut aika saadaan tehostettua. Laskentapohjien avulla saadaan tuotettua yksinkertaisiin mitoitus tilanteisiin soveltuvia mitoitus taulukoita, joiden käyttäminen on erittäin nopeaa, mutta käyttömahdollisuudet laskentapohjia rajallisempia.

Tutkimustyön aikana vastaavanlaisia algoritmeja oli kehitteillä muiden Teklan mallinnustyökalujen osalta. Tutkimuksen aikana leukaliitosten parametrinen suunnittelun työkalua ei ehditty toteuttamaan valmiiksi, eikä työkalua päästy kokeilemaan käytännön suunnittelutyössä. Työkalun toiminta kuvattiin tämän takia kirjallisena simulaationa ja työkalun tekninen toteutus toteutetaan tutkimustyön jälkeen. Parametrinen suunnittelun ensimmäiset kokemukset ovat olleet yleisesti hyvin positiivisia ja niistä saadut tulokset lupaavia. Parametrinen mallintaminen on koettu hyödylliseksi ja sen kehittämistä on haluttu jatkettavan myös tulevaisuudessa.

5.1 Haasteet ja kehitysmahdollisuudet

Liitosten parametrinen mallintamistyökalua ei saatu valmiiksi tutkimustyön aikana, joten sen toimivuutta ja käytännöllisyyttä ei voitu tutkimustyön puitteissa arvioida. Tutkimuksen aikana Sweco Rakennetekniikka Oy:ssä kehitettiin ja toteutettiin myös muiden rakenneosien liitosten algoritmiaivusteisia mallinnustyökaluja, joiden pohjalta parametrinen suunnittelun kehitystarvetta ja -mahdollisuuksia voidaan arvioida. Toteutetuista mallinnustyökaluista puuttui tässä tutkimustyössä tutkittu laskentapohjan yhdistäminen mallinnus algoritmiin, mikä on ollut hyvin toivottu ominaisuus mallintamisen yhteyteen. Laskennan yhdistämistä tietomallintamiseen on pidetty seuraavana selkeänä kehitysaskeleena

tietomallintamisessa, jolloin rakennetta ei tarvitsisi enää mitoittaa erillisessä laskentaohjelmistossa.

Laattamaisten ja geometrialtaan monimuotoisten rakenneosien kuormitusten jakautuminen todellisuudessa on hyvin monimutkaista ja vaatii usein FEM-laskentaa. Tässä tutkimustyössä leukaliitoksen laskenta on toteutettu yksinkertaistetusti Excel-ohjelmistolla, vaikka laskentasovelluksen tuottamiseksi ja leukaliitoksen jännitysjakauman selvittämiseksi on hyödynnetty FEM-laskentaa. Työkalun selkeä kehitysmahdollisuus on FEM-laskennan ja tietomallintamisen yhdistämisessä, mikä tutkimustyön toteuttamisen aikana todettiin vielä liian haasteelliseksi toteutuksen kannalta ja toteutuksen onnistumiseksi vaaditaan selkeästi lisätutkimuksia ja kehitystyötä.

Tutkimustyön aloittamisen jälkeen joulukuussa 2019 alkoi maailmalla levitä tieto koronaviruksesta (COVID-19). Viruksen leviäminen alkoi tiettävästi Aasiasta, mutta levisi nopeasti maailmanlaajuisesti pandemiaksi. Myös Suomessa koronavirus on aiheuttanut poikkeuksellisia toimia kuten esimerkiksi koulujen, kirjastojen ja työpaikkojen sulkemisia sekä erilaisia liikkumis- ja kokoontumisrajoituksia. Koronavirus on vaikuttanut opinnäytetyön osalta erityisesti kirjallisten lähdeostosten hankkimisen hankaloitumiseen sekä ajankäytön haasteisiin. Pidempi aikaisten etätöiden, tutkimustyön tekemisen sekä lapsiperheen arjen yhdistäminen tuntui aika ajoin haasteelliselta.

Tutkimustyön haasteena oli myös ristikkomenetelmän soveltaminen laattamaisiin rakenneosiin. Vastaavanlaista laskentaa ei ollut tiettävästi aiemmin julkaistu, jolloin laskentapohjan laskentaosion kokoaminen muodostui hyvin työlääksi ja aikaa vieväksi prosessiksi. Laskentapohjassa sovellettu strut-and-tie menetelmän teoria oli hyvin paljon ulkomaisista lähteistä, joiden tulkitseminen osoittautui aika ajoin haastavaksi. Muilta osin tutkimus-työprosessi eteni suunnitellusti eikä suurempia haasteita esiintynyt.

6 YHTEENVETO

Tutkimustyössä tutkittiin parametrisen suunnittelun soveltuvuutta teräsbetonisten laattaelementtien leukaliitosten suunnitteluun. Työn tavoitteena oli tuottaa työkalu, jolla voidaan tuottaa laattaelementtien leukaliitoksia ja niiden laskelmia luotettavalla ja suunnittelua tehostavalla tavalla. Työn tarkoituksena oli myös tuottaa suunnittelijoiden käyttöön laskentapohja laattamaisten rakenneosien välisten leukaliitosten mitoittamiseksi.

Tutkimuksen osana suunnittelijaryhmälle annettiin leukaliitoksen suunnittelutehtävä, jolla pyrittiin selvittämään suunnittelijoiden valmiuksia leukaliitoksen mitoittamiseksi sekä testattiin tutkimustyössä tuotettua

laskentapohjaa käytännössä. Suunnittelutehtävän päätteeksi pyydettiin palautetta laskentapohjan toimivuudesta ja hyödyllisyydestä.

Tutkimustyön osana oli myös tarkoitus toteuttaa Case-tutkimus, jossa parametrinen suunnittelu työkalua kokeiltaisiin käytännössä. Case-tutkimusta ei saatu toteutettua tutkimustyön puitteissa. Tutkimustyön aikana yrityksessä toteutettiin joitakin samankaltaisia parametrinen suunnittelun työkalu kokeiluja, joiden pohjalta voidaan parametrinen suunnittelun tarpeellisuutta sekä käyttömahdollisuuksia arvioida. Laattaelementtien parametrinen työkalun suunnittelu tehtiin osana tätä opinnäytetyötä kirjallisena simulaationa ja tekninen toteutus suoritetaan myöhemmänä ajankohtana.

Työn aikana saatiin tärkeää tietoa parametrinen suunnittelun hyödyntämismahdollisuuksista rakennesuunnittelussa. Tutkimustuloksena voidaan todeta, että parametrinen suunnittelu on hyödyllinen työkalu erityisesti elementtisuunnittelun prosessien tehostamisessa. Algoritmiavusteisen suunnittelun käyttö vaatii kuitenkin jatkotutkimusta ja jatkuvaa kehitystyötä. Parametrinen suunnittelu työkalun yhteydessä saatiin luotua myös suunnittelijoiden käyttöön Excel-laskentapohja leukaliitosten mitoittamiseksi. Laskentapohjan koettiin olevan kaivattu ja hyödyllinen työkalu liitosten mitoittamiseksi ja laadun yhtenäistämiseksi.

LÄHTEET

A-insinöörit (n.d.). Tulevaisuudessa suunnitellaan algoritmien ja keinoälyn avulla. Blogijulkaisu.

Haettu 18.05.2020 osoitteesta

<https://www.ains.fi/blogit/tulevaisuudessa-suunnitellaan-algoritmien-ja-keinoalyn-avulla/>

Betoniteollisuus ry (2016) BEC 2012 Elementtisuunnittelun mallinnusohje.

Haettu 07.03.2020 osoitteesta

<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/suunnitteluprosessi/mallintava-suunnittelu>

Betoniteollisuus ry (n.d.). Betoni rakennusmateriaalina.

Haettu 25.02.2020 osoitteesta

<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>

Betoniteollisuus ry (n.d.). Betoni rakennusmateriaalina. Käyttö talonrakentamisessa.

Haettu 18.02.2020 osoitteesta

<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/kaytto-talonrakentamisessa/>

Betoniteollisuus ry (n.d.). Elementtirakentamisen historia.

Haettu 03.03.2020 osoitteesta

<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen/elementtirakentamisen-historia>

Betoniteollisuus ry (n.d.). Massiivilaattaelementit

Haettu 09.05.2020 osoitteesta

<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/laatat/massiivilaatat>

Betoniteollisuus ry (n.d.). Massiivilaattaelementti. L-12 Laattaelementti

Haettu 09.05.2020 osoitteesta

<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/suunnitteluprosessi/mallipiirustukset>

Betoniteollisuus ry (n.d.). Talonrakentaminen.

Haettu 04.03.2020 osoitteesta

<https://betoni.com/betonirakentaminen/elementtirakentaminen/talonrakentaminen/>

Betoniteollisuus ry (n.d.) Valmisosarakentaminen.

Haettu 04.03.2020 osoitteesta

<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen>

Birrcher, D. (2008). Design of reinforced concrete deep beam for strength and serviceability. Master of Science. The University of Texas at Austin.
Haettu 11.06.2020 osoitteesta
http://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/0_5253_1.pdf

Brännare S., Kuukkanen T. (2018). Nyt se on selvitetty: Rakentamisen maine on mennyt.
Haettu 22.07.2020 osoitteesta
<https://yle.fi/uutiset/3-10458109>

Desnerck P., Lees J. M., Morley C. T. (2018) Engineering Structures, Volume 161
Haettu 11.06.2020 osoitteesta
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617304492>

Erkkilä S. (2017). Algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntäminen betonielementtirakenteiden suunnittelussa. Diplomityö. Rakennesuunnittelu. Tampereen teknillinen yliopisto.
Haettu 18.02.2020 osoitteesta
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24891/erkkil%C3%A4.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Hakala T. (2018). Betonielementin valmistusprosessin tehostaminen leanin avulla. Diplomityö. Rakennustuotanto. Tampereen Teknillinen Yliopisto.
Haettu 21.03.2020 osoitteesta
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/26580/Hakala.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Harmanen, M (2010). Betonielementtikohteiden tietomallipohjainen suunnitteluprosessi. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Horowitz E., Sahni S., Rajasekaran B. (1997). Computer Algorithms

Hytönen Y., Seppänen M. (2009). Tehdään elementeistä - Suomalaisen betonielementtirakentamisen historia. Suomen betonitieto

Hyypä H. (2012). Rakennus- ja kiinteistöalan tulevaisuuden näkymiä. Metropolia Ammattikorkeakoulu, rakennus- ja kiinteistöala.
Haettu 07.04.2020 osoitteesta
https://metropolia.fi/sites/default/files/images/content/content-files/met_rakennusalan_tulevaisuudennakymia_web-1.pdf

Karjalainen P. (2018). Kantavien rakenteiden algoritmiavusteisen rakennesuunnitteluprosessin kehittäminen. Diplomityö. Rakennesuunnittelu. Tampereen Teknillinen Yliopisto.
Haettu 18.03.2020 osoitteesta

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/123456789/26569/4/karjalainen.pdf>

Khatab M. A. T. (2016). Behaviour of continuously supported self-compacting concrete deep beams. University of Bradford.

Haettu 17.05.2020 osoitteesta

<https://core.ac.uk/download/pdf/153515788.pdf>

Koskela L., Silen P., Alasalmi M. (1988). Rakentamisen tietotekniikan tulevaisuus. VTT.

Koskimies J. (2014). Ristikomenetelmä (Strut-and-tie modeling). Insinööritö. Rakennustekniikka. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Haettu 16.05.2020 osoitteesta

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77157/theseus_koskimies.pdf?sequence=1

Laitinen H. (2019). Uudisasuntorakentaminen.

Haettu 22.07.2020 osoitteesta

<http://www.epsi-finland.org/report/uudisasuntorakentaminen-2019/>

Lalla A. (2017). Kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen. Diplomityö. Rakennustekniikka. Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Haettu 07.03.2020 osoitteesta

<http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201712212481>

Leppänen A. (2019). Projektipääällikkö koulutus. Sweco Rakennetekniikka Oy.

Leskelä M. V. (2005). BY 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Suomen Betonitieto Oy.

Lonka H. (2018). Paremmen laadun puolesta. RT, SKOL, RALA, ATL, RAKLI

Haettu 22.07.2020 osoitteesta

https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/laatu/2018/paremmen_laadun_puolesta_hankkeen_loppuraportti.pdf

Martin B. T. (2007). Verification and Implementation of Strut-and-Tie Model in LRFD Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Haettu 16.05.2020 osoitteesta

[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/NotesDocs/20-07\(217\)_FR.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/NotesDocs/20-07(217)_FR.pdf)

Mäki T., Sami P., Kerosuo H., Miettinen R. (2012). Tietomallintamisen käytöt rakentamisessa. Toiminnan, kehityksen ja oppimisen tutkimusyksikkö CRADLE, Käyttätymistieteiden laitos, Helsingin yliopisto.

Haettu 29.04.2020 osoitteesta

<http://hdl.handle.net/10138/153347>

Nykyri P. (2014). BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 2. BY-koulutus.

Pajakkala P. (2017) Asuntotuotannon menneet ja tulevat trendit. Forecon Oy.

Haettu 05.04.2020 osoitteesta

https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5oJ5FjIGF/bC0gVTzpZ/Pajakkala_Asuntotuotannon_menneet_ja_tulevat_trendit_Rakennusfoorumi_7.11.2017.pdf

Projektiyhdistys ry (2012). Projektin Johdon Pätevyys. PRY

Haettu 30.07.2020 osoitteesta

https://www.pry.fi/files/108/PMAF_NCB_3.0_v1.3.pdf

Open Knowledge Finland 2014. Avoimen rajapinnan määritelmä.

Haettu 07.05.2020 osoitteesta

<http://avoinrajapinta.fi/>

Rakennusteollisuus RT ry. Tietoa alasta.

Haettu 21.07.2020 osoitteesta

<https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Talous-tilastot-ja-suhdanteet/Kuviopankki/>

Rakennusteollisuus RT ry. Kymmenen kysymystä rakentamisen laadusta.

Haettu 22.07.2020 osoitteesta

<https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Laatu/kymmenen-kysymysta-rakentamisen-laadusta2/>

Rakennusteollisuus RT ry. Rakentamisen laatu.

Haettu 22.07.2020 osoitteesta

<https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Laatu/>

Rakennusteollisuus RT ry. Talous, tilastot ja suhdanteet.

Haettu 21.07.2020 osoitteesta

<https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Talous-tilastot-ja-suhdanteet/Kuviopankki/>

RT 10-10992 (2010). Tietomallinnettava rakennushanke. Rakennustieto Oy.

RT 10-11066 (2012). Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 1. Yleinen osuus. Rakennustieto Oy.

RT 10-11070 (2012). Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 5. Rakennesuunnittelu. Rakennustieto Oy.

RT 10-11078 (2012). Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 13. Tietomallien hyödyntäminen rakentamisessa. Rakennustieto Oy.

RT 10-103087 (2019) RAK18 Rakennesuunnittelun tehtäväluettelo. Rakennustieto Oy.

RT 10-11222 (2016). Talonrakennushankkeen kulku. Rakennushankkeen osapuolet. Rakennustieto Oy.

RT 10-11224 (2016). Talonrakennushankkeen kulku. Rakennushankkeen vaiheet ja osittelu. Rakennustieto Oy.

RT 10-11256 (2016). Talonrakennushankkeen kulku. Yleistä. Rakennustieto Oy.

Saarinen E. (2000). Betonirakenteiden suunnittelu, Rakentajain Kalenteri. Haettu 23.11.2020 osoitteesta
<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK010302.pdf>

Sainio O. (2007). BY 203 Betonirakenteiden perusteiden oppikirja. Suomen Rakennusmedia.

SFS-EN 1992-1-1 (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt (2.painos 2015)

Simola L. (2014). Suomalaista sementtiä sata vuotta. Betonteollisuus ry. Haettu 19.04.2020 osoitteesta
https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1401_78-81.pdf

Suomen Betoniyhdistys ry (2013). BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1. Betoniyhdistys.

Suomen Betoniyhdistys ry (2018). BY 201 Betonitekniikan oppikirja. BY-koulutus

Uusitalo J., Ihamäki J., Rajala R., Vallin O. (2013). BY 205 Betonityöt. Rakennustieto.

Väisänen Päivi (2005). Betoni – Perustietoa arkkitehtipiskelijälle. Aalto yliopisto, Teknillinen korkeakoulu

Valtiovarainministeriö (2019). Rakentaminen 2019-2020: Rakennusalan suhdanneryhmä. Haettu 21.06.2020 osoitteesta
https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161357/VM_14_2019_Rakentaminen%202019_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ympäristöministeriö. Suomen rakentamismääräyskokoelma – Rakenteiden lujuus ja vakaus – Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet.

Haettu 02.05.2020 osoitteesta

[https://www.ym.fi/fi-](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus)

[FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus)

Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön ohje rakennustyön suorituksesta ja valvonnasta.

Haettu 02.05.2020 osoitteesta

[https://www.ym.fi/fiFI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suunnittelu_ja_valvonta](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suunnittelu_ja_valvonta)

[danto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suunnittelu_ja_valvonta](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suunnittelu_ja_valvonta)

Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön ohje rakentamista koskevista suunnitelmista ja selvityksistä.

Haettu 02.05.2020 osoitteesta

[https://www.ym.fi/fi-](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suunnittelu_ja_valvonta)

[FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suunnittelu_ja_valvonta](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suunnittelu_ja_valvonta)

Ympäristöministeriö. Rakentamismääräyskokoelman mittava uudistus 2013-2017 valmis.

Haettu 03.05.2020 osoitteesta

[https://www.ym.fi/fiFI/Ajankohtaista/Rakentamismääräyskokoelman_mittava_uudis\(45560\)](https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Rakentamismääräyskokoelman_mittava_uudis(45560))

Ympäristöministeriö. Suomen rakentamismääräyskokoelma ja rakentamista koskevat asetukset.

www.ym.fi

Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön asetus rakentamista koskevista suunnitelmista ja selvityksistä.

Haettu 02.05.2020 osoitteesta

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150216>

Österlund T., Tanska T. (2014). Algoritmit puurakenteissa; menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto. Oulun Yliopisto. Arkkitehtuurin tiedekunta.

Haettu 21.04.2020 osoitteesta

<http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526204567.pdf>

MAANKÄYTTÖ- JA RAKENNUSLAKI

Maankäyttö- ja rakennuslaki [\(21.12.2012/958\)](#)*117 a § Rakenteiden lujuus ja vakaus*

Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan siten, että sen rakenteet ovat lujia ja vakaita, soveltuvat rakennuspaikan olosuhteisiin ja kestävät rakennuksen suunnitellun käyttöiän. Kantavien rakenteiden suunnittelun ja mitoituksen on perustuttava rakenteiden mekaniikan sääntöihin ja yleisesti hyväksyttyihin suunnitteluperusteisiin taikka luotettaviin koetuloksiin tai muihin käytettävissä oleviin tietoihin. Rakennuksen rakentamisessa on käytettävä rakenteiden lujuuden ja vakauden kannalta soveltuvia rakennustuotteita. Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, etteivät siihen rakentamisen ja käytön aikana kohdistuva kuormitus aiheuta sortumista, lujuutta tai vakautta häiritseviä muodonmuutoksia eikä vaurioita rakennuksen muita osia taikka rakennukseen asennettuja laitteita tai kiinteitä varusteita. Lisäksi rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että ulkoisen syyn rakenteille aiheuttama vaurio ei ole suhteettoman suuri sen aiheuttaneeseen tapahtumaan verrattuna.

Ympäristöministeriön asetuksella voidaan antaa uuden rakennuksen rakentamista, rakennuksen korjaus- ja muutostyötä sekä rakennuksen käyttötarkoituksen muutosta varten tarvittavia tarkempia säännöksiä rakennuksen:

- 1) rakenteilta vaadittavasta lujuudesta ja vakaudesta;
- 2) kantavien rakenteiden suunnittelusta ja mitoituksesta;
- 3) rakentamisen ja käytön aikaisista kuormituksista;
- 4) kantavissa rakenteissa käytettävistä rakennustuotteista.

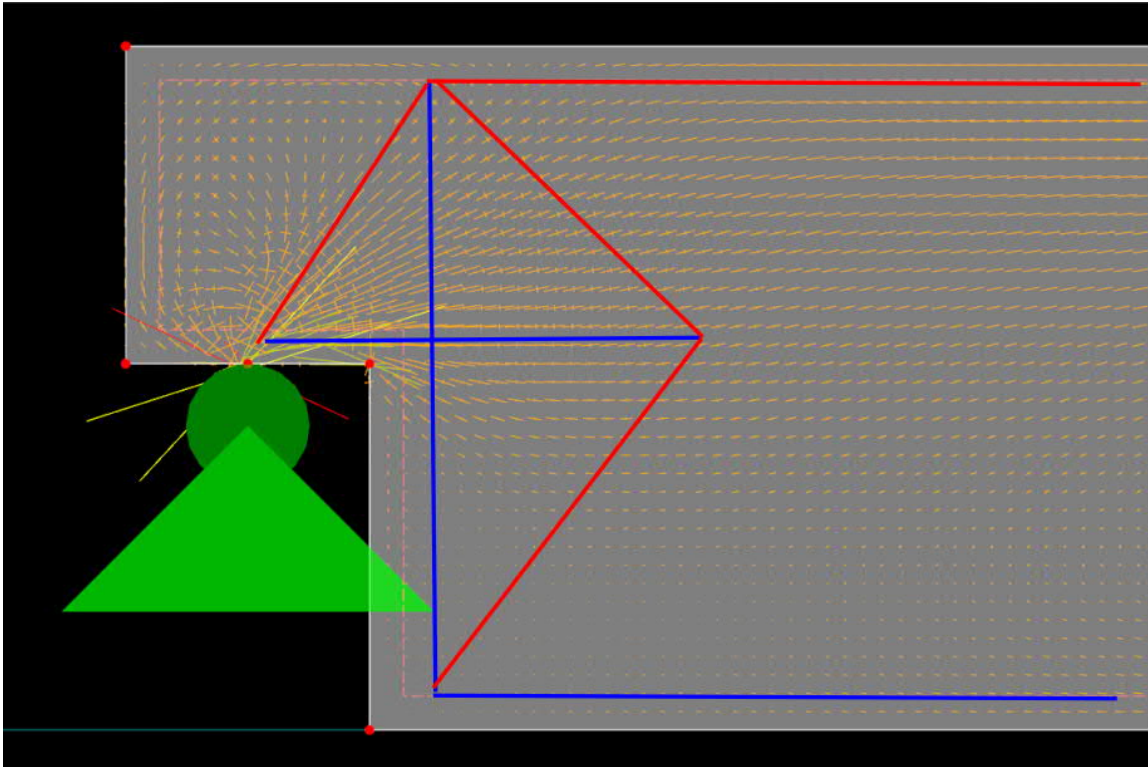
Maankäyttö- ja rakennuslaki [\(21.12.2012/958\)](#)*117 b § Paloturvallisuus*

Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan sen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla paloturvalliseksi. Palon syttymisen vaaraa on rajoitettava. Rakennuksen kantavien rakenteiden on oltava sellaiset, että ne palon sattuessa kestävät vähimmäisajan ottaen huomioon rakennuksen sortuminen, poistumisen turvaaminen, pelastustoiminta ja palon hallintaan saaminen. Palon ja savun kehittymistä ja leviämistä rakennuksessa sekä palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin on pystyttävä rajoittamaan. Rakennuksen rakentamisessa on käytettävä paloturvallisuuden kannalta soveltuvia rakennustuotteita ja teknisiä laitteistoja.

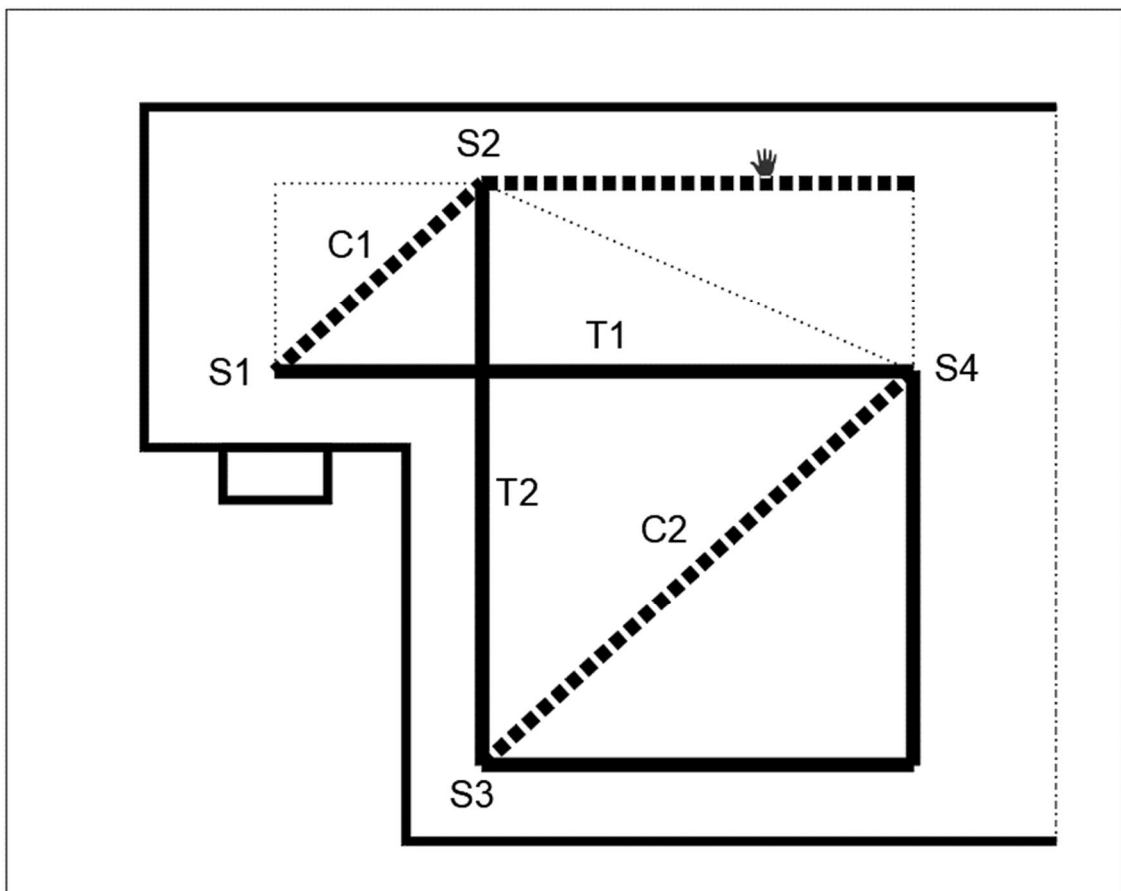
Rakennuksen on oltava sellainen, että siinä olevat voivat palon sattuessa pelastautua tai heidät voidaan pelastaa. Pelastushenkilöstön turvallisuus on rakentamisessa otettava huomioon. Lupaviranomainen voi edellyttää laadittavaksi turvallisuusselvityksen poistumisturvallisuuden kannalta erittäin vaativasta kohteesta.

Ympäristöministeriön asetuksella voidaan antaa uuden rakennuksen rakentamista, rakennuksen korjaus- ja muutostyötä sekä rakennuksen käyttötarkoituksen muutosta varten tarvittavia tarkempia säännöksiä:

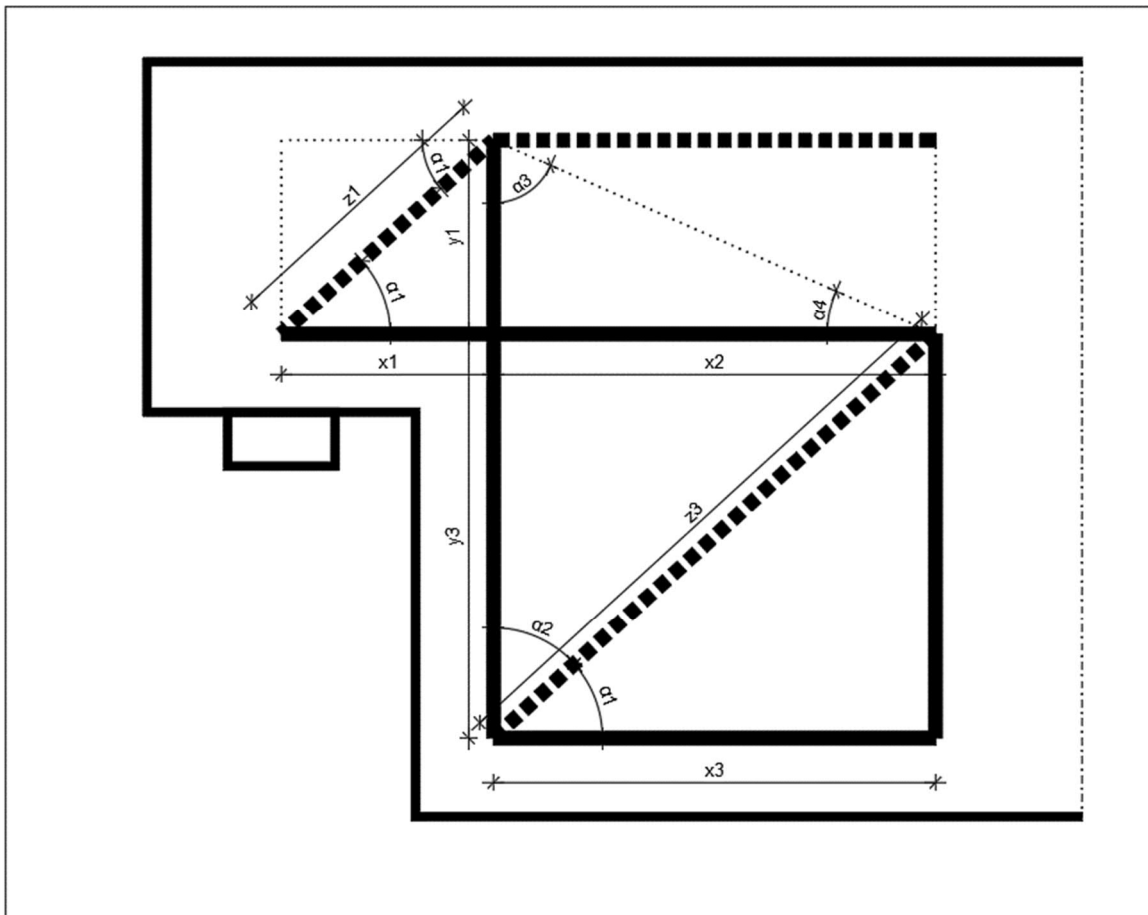
- 1) palon syttymisen ja leviämisen rajoittamisesta sekä taloteknisten ja lämmitykseen käytettävien laitteistojen paloturvallisuudesta;
- 2) rakenteiden kantavuudesta palotilanteessa ja tähän liittyvistä rakennustuotteiden ominaisuuksista;
- 3) palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rajoittamisesta ja tähän liittyvien rakennustuotteiden ja laitteistojen ominaisuuksista;
- 4) poistumisturvallisuudesta ja turvallisuusselvityksestä;
- 5) sammutus- ja pelastustehtävien järjestelystä.



Laatan leuan pääjännitykset



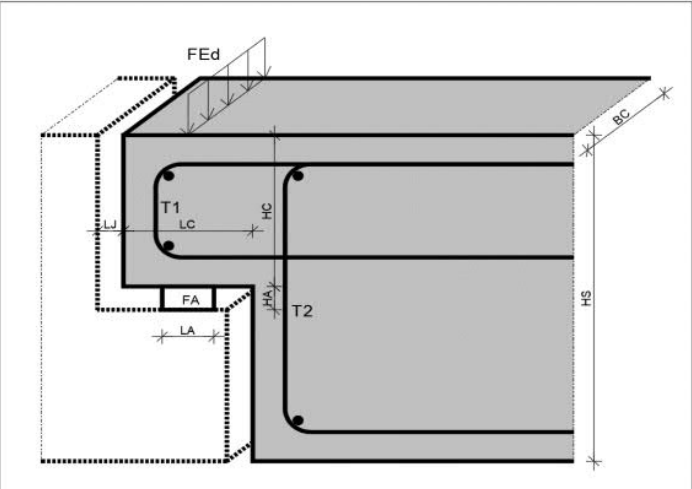
Leuan ristikkomalli

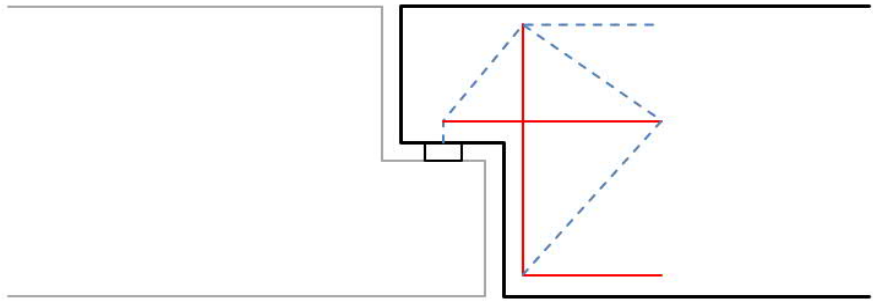


Leuan ristikkomalli

LYHYEEN ULOKKEEN MITOITUS: LASKENTAPOHJA

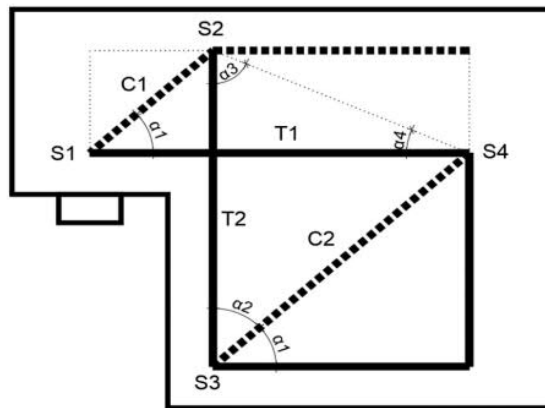
SWECO  Sweco Rakennetekniikka Oy, Ilmalanportti 2, 00240 HELSINKI			Rakennelaskelma, lähtötiedot		
Rakennuskohde:			Työ no:		Tekijä:
Työ no:			Sisältö:		Päiväys:
Työ no:			Sisältö:		Sijainti:
Massivilaatan leikkiliitos					Versio 1.0
SWECO laskentapohja 2020					
Geometria:					
H_s	320 mm	OK	Mitta: 220...320		
H_c	150 mm				
L_c	110 mm		Suositus: 150		
B_c	1000 mm	OK			
L_A	40 mm	OK			
H_A	20 mm	OK			
F_A	235 MPa				
L_j	20 mm				
f_{ck}	30 MPa				
c_{nom}	20 mm	OK			
f_{yk}	500 MPa				
F_{Ed}	35 kN/m				
ϕ_s	8 mm	OK			
N_s	5 kpl				
k_s	200 mm				
N_l	1 kpl				
$A_{s,tot}$	251 mm ²	OK			
$A_{s,vaad}$	105 mm ²				
KA	42 %				



Ristikkomalli:					
					
Laatan alapinnan raudoitteet:					
ϕ_s	10 mm				
N_s	5 kpl				
k_s	192 mm				
A_s	393 mm ²				

Voimat ja voimien väliset kulmat:

T_1	46 kN/m		
T_2	29 kN/m		
C_1	46 kN/m		
C_2	19 kN/m		
C_3	21 kN/m		
α_1	50,2 deg	OK	
α_2	39,8 deg		
α_3	55,5 deg		
α_4	34,5 deg		



Tulokset:

[illegible]