

Julius Latvala

# PERUSPULTTILIITOKSEN ALGO- RITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastaja: Professori Mikko Malaska  
Tarkastaja: Apulaisprofessori Kristo Mela  
Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Julius Latvala: Peruspulttiliitoksen algoritmiavusteinen suunnittelu  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2022

---

Tämän diplomityötutkimuksen tavoitteena on luoda algoritmiavusteinen suunnittelutyökalu, joka helpottaa sekä nopeuttaa perustusliitoksen suunnitteluprosessia. Työkalun avulla voidaan suorittaa liitoksen lujuuslaskenta, liitosdetaljin määrittäminen sekä liitoksen mallinnus Tekla Structures -tietomallinnusohjelmaan jokaiselle perustusliitosta vaativalle kohdalle. Työkalu toimii yhtenä osana suurempaa kehityskokonaisuutta, jonka avulla pyritään vastaamaan esisuunnitteluvaiheen tiukkojen aikataulujen asettamiin rajoitteisiin.

Työkalun esitietoina toimii kehityskokonaisuuden aikaisemmassa vaiheessa luodun työkalun ja suunnittelutyön tulokset, jonka avulla saadaan tarvittavat esitietovaatimukset tämän työkalun toiminnalle. Työkalu hakee olemassa olevien Tekla- ja Robot -mallien avulla liitoksen voimasuureet, ja yhdistää tulokset liitoskohtaa kuvaavalle perustus-ID:lle. Liitoslaskenta ja liitoksen detaljin määrittäminen toteutetaan Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla ja Microsoftin Visual Basic Application ohjelmoinnilla. Liitoksen mallinnuksessa hyödynnetään Rhinoceros-ohjelman päällä toimivaa, visuaalisen ohjelmointikielen ja -ympäristön työkalua nimeltään Grasshopper.

Perustusliitoksen laskennassa sovelletaan Eurokoodin osan 1993-1-8 (EC3) ohjeistusta, jonka mukaan liitoksen kestävyys voidaan arvioida käyttäen komponenttimenetelmää. Eurokoodin mukainen ohjeistus on kuitenkin suppea, sillä se ottaa huomioon vain tapaukset, joissa pohjalevyyn kiinnittyvä profiili on H- tai I- profiili, ja pultit sijaitsevat laippalinjan sisäpuolella. Eurokoodin ohjeistus ei myöskään ota kantaa tilanteeseen, jossa perustusliitosta rasittaa kahden suunnan taivutus. Työkalun nopeuden ja helppokäyttöisyyden kannalta on olennaista, että lujuuslaskenta saadaan suoritettua nopeasti ja suoraviivaisesti turvautumatta erilliseen FEM ohjelmistoon. Tästä syystä työkaluun tulee sisällyttää toimintamenetelmät myös näihin tilanteisiin, joihin ei löydy EC3:n mukaista ohjeistusta.

Työkalun laskentamenetelmien tuloksien oikeellisuus varmistettiin vertailemalla saatuja tuloksia RFEM-ohjelmalla luodun kuorimallin tuloksiin. Tarkastelu kohdennettiin pohjalevyyn taivutuskestävyyden ja pulttivoimien tutkimiseen, kun pohjalevyyn vaikuttaa taivutusmomentit kahden eri pääakselin suhteen. Saaduista tuloksista varmistui, että työkalun laskentamenetelmät johtavat varmalla puolen oleviin laskentatuloksiin.

Työkalun kehittäminen sen nykyiseen tilaan vaati paljon työtä. Työkalun voimaperusteisessa mitoituksessa onnistuttiin hyvin, eikä sen muokkaaminen ollut tarpeellista suunniteltavan tapaus-tutkimuksen kohteen aikana. Suurimmat muutokset kohdistuivat liitosten visualisessa tarkastelussa havaittujen epäkohtien korjaamiseen, sekä algoritmin eri osa-alueiden tehokkuuden parantamiseen. Tapaus-tutkimuksen kohteen suunnittelun aikana syntyi myös uusia kehitysideoita, joilla perustusliitosten suunnittelua pystytään nopeuttamaan entisestään. Nämä ideat toteutettiin ja liitettiin osaksi työkalun toimintaa case-kohteen suunnittelun jälkeen.

Tapaus-tutkimuksen kohteen viimeisenä toteutetun rakennuksen 163:n liitoskohdan määrittäminen kuormatiedoista detaljin määrittämiseen kesti algoritmilta noin 30 minuuttia. Kun huomioon otetaan vielä mallinnuksessa sekä piirustuspuolella säästetty aika, työkalua ja sen avulla saavutettuja tuloksia voidaan pitää onnistuneina. Tämän lisäksi työkalu laskee kynnystä aloittaa peruspulttien suunnittelu myös niiden suunnittelijoiden kohdalla, joilla ei ole aikaisempaa kokemusta peruspulttien suunnittelusta. Parhaillaan työkalu myös yksinkertaistaa koko peruspulttien suunnitteluprosessia: projekteissa mahdollinen erittely laskenta- ja mallinnushenkilön välillä ei ole tarpeellinen, sillä molemmat nämä suunnittelun vaiheet ovat helposti omaksuttavissa työkalun avulla.

Avainsanat: Peruspulttiliitos, pohjalevy, teräsrakenteet, algoritmiavusteinen suunnittelu, rakennesuunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Julius Latvala: Algorithm aided base plate design  
Master's Degree Programme in Civil Engineering  
Tampere University  
Structural Engineering  
May 2022

---

The scope of this work was to create algorithm-aided design tool for base plate connections to help and speed up the design process of column bases. The tool should be able to determine suitable connection detail that satisfies given strength requirements and model chosen connections to Tekla Structures 3D model. The objective of the tool is to work as one piece of larger entity to cut the time spent on pre-design phase of the project.

The results from previous tool of pre-design project entity are used to obtain required connection forces. A column specific foundation ID is used to link force data and connection location between Tekla- and Robot -models. Microsoft's Excel sheets and Visual Basic Application are used on strength calculations and determining correct connection detail for given ID. 3D modeling is done with Grasshopper algorithm that runs within the Rhinoceros 3D application.

The basic methods of calculations have been adapted from standard EN 1993-1-8 (EC3). According to EC3 the strength of the joint can be determined using component method. The design according to EC3 is somewhat restricted because of the lack of information in different kind of design situations. EC3 does not include design methods on cases when the bolt is located outside of the flange line or when biaxial moment occurs in the connection. For the convenient and fast use of the tool it is necessary not to use FEM based strength calculation for the connections. Thus, the design methods for situations not covered in the EC3 needs to be represented.

The calculation methods used in the design tool were checked by comparing results to the ones given by RFEM structural analysis software. The behavior of the base plate connection was examined during biaxial bending. The analysis of the results led into conclusion that the results of this design tool tend to give to conservative values.

The development of the current design tool took a lot of work. Strength calculations for base plate connections worked good throughout the case project and no major changes were needed. The biggest changes occurred when visual design method was incorporated, and overall changes were made to enhance the performance of existing algorithms. During the design of case project, new ideas of performance-enhancing actions were invented that were not part of the original plan but helped the main goal of more efficient pre-design phase designing. New ideas cut down the time needed when creating drawings by writing UDA fields from existing Excel sheet that includes all the information of the created connection details. Those ideas were included into the design tool after the case project was done.

On the last phase of the project, the time spent on strength calculations and detail assigning for foundation IDs were measured. For the total of 163 IDs the algorithm run approximately 30 minutes. That alone is a good result, but the result is even better when the saved time from modeling and doing drawings with help of the tool is considered. With the help of this design tool, it is also easier to start designing base plate connections without former background from base plate design. At the best, this design tool also removes the need of two separate designers, the one doing strength calculations and the other doing modeling. Both actions are easy to handle with this current design tool.

Keywords: Base plate connection, Steel structures, Anchor rod design, biaxial bending

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Isot kiitokset Sweco Rakennetekniikka Oy:lle mahdollisuudesta tehdä diplomityö yritykselle. Erityiskiitos Sweco Rakennetekniikka Oy:n puolelta diplomityölle ohjausta tarjonneille henkilöille Ilari Pirhoselle sekä Erkki Hömmölle. Kiitos myös kavereille, joiden kanssa on saanut vapaamuotoisesti keskustella diplomityöhön liittyviä asioita. Kiitokset myös Tampereen yliopiston professoreille Mikko Malaskalle sekä Kristo Melalle työn tarkastamisesta.

Tampereella, 18.5.2022

Julius Latvala

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tausta .....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja aiheen rajaus .....	2
1.3 Tutkimusmenetelmät .....	3
1.4 Rakenne .....	4
2. ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU .....	6
2.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu .....	6
2.2 Ohjelmointikielen valinta .....	7
2.3 Perehdytys peruspulttiliitokseen ja algoritmin toiminnan rajaus .....	9
2.3.1 Peruspulttiliitos .....	9
2.3.2 Liitoksen jäykkyys .....	10
2.3.3 Peruspultit .....	12
2.3.4 Esisuunnitteluvaiheen peruspulttisuunnittelu .....	14
3. PERUSPULTTIEN MITOITUS .....	16
3.1 Puristusvoimien välitys .....	16
3.1.1 Vahvan suunnan puristuskestävyys .....	16
3.1.2 Heikon suunnan puristuskestävyys .....	20
3.2 Vetovoimien välitys .....	22
3.2.1 Vahvan suunnan vetokestävyys .....	23
3.2.2 Heikon suunnan vetokestävyys .....	26
3.3 Leikkausvoimien välitys .....	28
3.3.1 Kitkan vaikutus liitoksessa .....	28
3.3.2 Peruspulttien leikkautuminen .....	29
3.3.3 Leikkauspala .....	30
3.4 Voimien yhteisvaikutuksen tarkastelu .....	33
4. SUUNNITTELU TYÖKALUN TOIMINTA .....	37
4.1 Algoritmien muodostama kokonaisuus .....	37
4.2 Työkalun esitietovaatimukset .....	41
4.3 Kuormadatan järjestely .....	43
4.4 Liitosparametrien määrittely .....	43
4.4.1 Liitoksen lähtötiedot .....	44
4.4.2 Pultit ja geometriaehdot .....	45
4.4.3 Jäykisteet .....	46
4.4.4 Leikkauspala .....	47
4.5 Detaljien tyypitys .....	48
4.6 Tarkastusraportti .....	49
4.7 Liitoksen mallinnus .....	51
4.7.1 Tiedostoattribuutit .....	51
4.7.2 Liitoksen mallinnus Grasshopper-algoritmia hyödyntämällä .....	52
4.8 Peruspulttipiirustus .....	53

5.TAPAUSTUTKIMUS: KATTILALAITOKSEN PERUSPULTTILIITOS.....	56
5.1    Suunnittelukohteen esittely .....	56
5.2    Suunnittelun eteneminen .....	57
5.2.1 Vaihe 1: Työkalun testaus.....	57
5.2.2 Vaihe 1: Ongelmakohdat ja korjaukset.....	59
5.2.3 Vaihe 2: Tehokkuus ja tulokset .....	60
5.3    Projektin jälkeinen jatkokehitys .....	62
6.VERTAILULASKELMAT .....	64
7.YHTEENVETO.....	71
LÄHTEET .....	73
LIITE A: ESIMERKKILASKELMA .....	75

# KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.1</b> Työkälun tehtävä ja tavoite kiteytettynä kuvaan.....	2
<b>Kuva 2.1</b> Perustusliitoksen osat. ....	10
<b>Kuva 2.2</b> Pohjalevyn paksuuden vaikutus liitoksen käyttäytymiseen. ....	11
<b>Kuva 2.3</b> Voimien jakautuminen elastisen- ja plastisen jännitysjakautuman mukaisesti.....	13
<b>Kuva 2.4</b> Peikon pulteille asetetut minimiarvot keskiöetäisyyksistä (muokattu lähteessä HPM-harjateräspultit ETA, tekninen käyttöohje 2019, PPM-ankkurointipultit, tekninen käyttöohje 2019).....	14
<b>Kuva 2.5</b> Kiinnittimien pääty- ja reunaetäisyyden sekä keskiövälin merkinnät (muokattu lähteessä EN 1993-1-8 2005 s. 25).....	14
<b>Kuva 2.6</b> Esimerkki peruspulttipiirustuksessa esitetyistä tiedoista. ....	15
<b>Kuva 3.1</b> Paikallisen puristusalueen jakautuminen (EN 1992-1-1, 2004).....	17
<b>Kuva 3.2</b> Vahvemman suunnan taivutuksen tehollinen puristusalue.....	19
<b>Kuva 3.3</b> Heikomman suunnan taivutuksen tehollinen puristusalue (muokattu lähteestä Amaral, 2014 s.53). ....	21
<b>Kuva 3.4</b> Alapuolisen pulttirivin $\alpha$ :n arvot (muokattu lähteestä EN 1993-1-8 2005, s.88).....	25
<b>Kuva 3.5</b> Myötöviivan approksimoinnissa käytössä olevat parametrit $x_1$ ja $y_1$ (Muokattu lähteestä Laine 2007, s. 49). ....	26
<b>Kuva 3.6</b> Leikkauspalan suunnittelumall (muokattu lähteestä NCCI: Design of simple column bases with shear nibs, 2013). ....	31
<b>Kuva 3.7</b> Täysin puristetun liitoksen tehollinen puristusalue. ....	34
<b>Kuva 4.1</b> Työkälun algoritmimoduulien prosessikaavio.....	38
<b>Kuva 4.2</b> Algoritmimoduulien lähtötiedot, toiminta sekä lopputuotos.....	39
<b>Kuva 4.3</b> Grasshopper-algoritmin suoritusvaiheet. ....	40
<b>Kuva 4.4</b> Havainnekuva perustus-ID-kohtaisista lähtötiedoista.....	41
<b>Kuva 4.5</b> Pilarin geometrian tuonti laskentapohjaan. ....	44
<b>Kuva 4.6</b> Pilarin geometriatietojen tuonti laskentapohjaan. Kuvassa keltainen alue kuvaa laipasta c-mitan päässä olevaa puristusalaa. ....	45
<b>Kuva 4.7</b> Pulttien sijaintirajoitus havainnollistettuna puttimäärän kasvaessa. ....	46
<b>Kuva 4.8</b> Leikkauspalan suunnat. Vasemmanpuoleisessa tapauksessa leikkauspalan suunta määräytyy suurimman leikkausvoiman mukaisesti. Oikeanpuoleisessa tapauksessa leikkauspalan suunta määräytyy liittyvän siteen mukaisesti. ....	48
<b>Kuva 4.9</b> Esimerkkikuva detaljitietojen tyyppityksestä. ....	49
<b>Kuva 4.10</b> Liitosdetaljikohtainen laskentavälilehti. ....	50
<b>Kuva 4.11</b> Liitoksen yksityiskohtaisempi tarkastelu. ....	50
<b>Kuva 4.12</b> Havainnollistava kuva attribuuttitiedostojen sisältämistä parametreista. ....	51
<b>Kuva 4.13</b> Valmis liitos tietomallissa.....	53
<b>Kuva 4.14</b> Liitostietojen hakeminen Tekla-mallin piirustuspuolella.....	54
<b>Kuva 4.15</b> Liitostietojen esitys peruspulttipiirustuksessa.....	55
<b>Kuva 5.1</b> Täysin puristetun pilarin ongelma algoritmin kehitysvaiheessa. Pulttikoko voimaperusteisen laskennan myötä pieni, koska vetäviä voimia ei esiintynyt.....	59
<b>Kuva 5.2</b> Kotelopilarille geometrisen ja visuaalisen tarkastelun mukaiset vaatimukset.....	60
<b>Kuva 5.3</b> Tyyppitetyt detaljit liitosdetaljien koontivälilehdellä. ....	61
<b>Kuva 5.4</b> Koko alueen valmiit liitokset Teklassa. Kuvan oikeanpuoleisessa gridilinjastossa on vaiheen 2 sähkösuodatinrakennus. Liitoskohtien suurta määrää havainnollistava kuva. ....	62

<b>Kuva 5.5</b> Leikkauspalan tilavarausobjekti (vihreä) sekä pilarinosto (harmaa). Tilavarausobjekti kuvaa perustuksessa leikkauspalan asentamista varten vaadittua varauksoa pilarinoston valussa. ....	63
<b>Kuva 6.1</b> Pohjalevyliitoksesta muodostettu kuorimalli RFEM-ohjelmassa. ....	64
<b>Kuva 6.2</b> Betonin ja teräslevyn välisen tukipinnan parametrit RFEM- ohjelmistossa. ....	65
<b>Kuva 6.3</b> Pohjalevyn reiän tukiehdot. ....	66
<b>Kuva 6.4</b> Pilarin yläosan jäykkä taso. ....	67
<b>Kuva 6.5</b> Mallissa käytetyn materiaalin ominaisuudet. ....	67
<b>Kuva 6.6</b> Jousivakion asettaminen pistetuella. ....	68
<b>Kuva 6.7</b> Vipuvoimien aiheuttama puristusjännitys vetopuolella, kun pulttia kuvaava tuki on z-suunnassa siirtymätön (vas.). Vipuvoimat poistuneet, kun pultille asetettu jousijäykkyys EA/L (oik.). ....	69
<b>Kuva 6.8</b> Puristuspinnan sijainti FEM-laskennassa. ....	70



# TAULUKKOLUETTELO

<b>Taulukko 3.1</b> <i>T-osan teholliset pituudet (muokattu lähteestä P398, 2013).</i> .....	24
<b>Taulukko 3.2</b> <i>Laipan alapuolisten pulttirivien teholliset kokonaispituudet (muokattu lähteestä P398, 2013).</i> .....	25
<b>Taulukko 3.3</b> <i>Heikomman suunnan taivutuksen T-osan teholliset pituudet (muokattu lähteestä Amaral, 2014 s.48).</i> .....	27
<b>Taulukko 4.1</b> <i>Levyypaksuuden ja peruspultin keskinäinen vuorovaikutus.</i> .....	42
<b>Taulukko 6.1</b> <i>FEM-ohjelmalla saadut tulokset.</i> .....	69
<b>Taulukko 6.2</b> <i>Laskentapohjalla ja lineaarisia yhteisvaikutuskaavoja käyttäen saadut tulokset.</i> .....	69

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

BIM	Tietomalli, engl. Building Information Model
Eurokoodi 3	Eurooppalainen suunnittelustandardi, SFS-EN-1993
FEM	Elementtimenetelmä, engl. Finite element method
VBA	Visual Basic Application
$A_{c0}$	Kuormitusalue
$A_{c1}$	Suurin mitoituksessa käytettävä puristuksen jakautumisalue
$A_{fn}$	Leikkauspalan laipan pinta-ala
$A_{vs}$	Leikkauspalan leikkauspinta-ala
$C_{f,d}$	Pohjalevyn ja jälkivalun pinnan välinen kitkakerroin
$F_{c,fb,Rd}$	Pilarin laipan ja uuman puristuskestävyys
$F_{c,pl,Rd}$	Teräksen ja betonin välinen puristuskestävyys
$F_{c,Rd}$	T-osan puristuskestävyyden mitoitusarvo
$F_{f,Rd}$	Pohjalevyn ja jälkivalun välisen kitkan kestävyysarvo
$F_{Rdu}$	Betonin pistekuormakestävyys
$F_{t,Ed}$	Pultissa vallitseva vetovoima
$F_{t,Rd}$	Yhden pultin vetokestävyys
$F_{tr,Rd}$	Pulttirivin rajoitettu kestävyys
$F_{tx,Rd}$	Puristuskeskiöstä kaukaisimman pulttirivin kestävyys
$F_{T,1-2,Rd}$	T-osan yhdistetty murtumismalli, kun vipuvoimia ei synny
$F_{T,3,Rd}$	Pulttirivin vetokestävyys
$F_{v,Ed}$	Pultissa vallitseva leikkausvoima
$F_{v,Rd}$	Yhden pultin leikkauskestävyys
$M_{c,Rd}$	Pilarin poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo
$M_{p,Ed}$	Betonin pintapaineesta pohjalevyyn kohdistuva taivutus
$M_{pl,1,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys
$M_{sec,Ed}$	Leikkauspalasta aiheutuva sekundäärimomentti
$M_{y,Ed}$	Liitoksen taivutusmomentin mitoitusarvo y-akselin suhteen
$M_{y,c,Rd}$	Liitoksen taivutusmomenttikestävyys puristukselle y-akselin suhteen
$M_{y,t,Rd}$	Liitoksen taivutusmomenttikestävyys vedolle y-akselin suhteen
$M_{z,Ed}$	Liitoksen taivutusmomentin mitoitusarvo z-akselin suhteen
$M_{z,c,Rd}$	Liitoksen taivutusmomenttikestävyys puristukselle z-akselin suhteen
$M_{z,t,Rd}$	Liitoksen taivutusmomenttikestävyys vedolle z-akselin suhteen
$N_{c,Ed}$	Pilarin puristavan normaalivoiman mitoitusarvo

$N_{C,Rd}$	Pilarin puristavan normaalivoimakestävyys
$N_{Ed}$	Pilarin normaalivoiman mitoitusarvo
$N_{sec,Ed}$	Leikkauspalan laippaan kohdistuva sekundäärinen normaalivoima
$N_{t,Ed}$	Pilarin vetävän normaalivoiman mitoitusarvo
$V_{Ed}$	Leikkausvoiman suunnitteluarvo
$V_{Rd}$	Leikkausvoimakestävyys
$V_{R,Ed}$	Leikkausvoimien resultanttivoima
$V_{y,Ed}$	Leikkausvoiman mitoitusarvo y-akselin suuntaisesti
$V_{y,Rd}$	Leikkausvoimakestävyys y-akselin suuntaisesti
$V_{z,Rd}$	Leikkausvoiman mitoitusarvo z-akselin suuntaisesti
$V_{z,Ed}$	Leikkausvoimakestävyys z-akselin suuntaisesti
$b_c$	Pilarin leveys
$b_{eff}$	T-osan laipan tehollinen leveys
$b_n$	Leikkauspalan leveys
$c$	Kuormia kantavan pinnan ulottuma
$d_0$	Reiän halkaisija
$d_{eff,n}$	Leikkauspalan tehollinen pituus
$e$	Pultin reiän reunaetäisyys y-suunnassa
$e_x$	Pultin reiän reunaetäisyys z-suunnassa
$e_1$	Reiän reunaetäisyys voiman suunnassa mitattuna
$e_2$	Reiän reunaetäisyys voimaa nähden kohtisuorassa mitattuna
$f_{cd}$	Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{ck}$	Betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä
$f_{jd}$	perustuksen pintapaineen mitoituslujuus
$f_{yp}$	Pohjalevyn nimellinen myötölujuus
$f_{yn}$	Leikkauspalan myötölujuus
$f_{ys}$	Leikkauspalan myötölujuus
$h_c$	Pilarin poikkileikkauksen korkeus
$h_g$	Jälkivalun paksuus
$h_n$	Leikkauspalan korkeus
$h_r$	Tarkasteltavan pulttirivin etäisyys puristuskeskiöstä
$h_x$	kaukaisimman pulttirivin etäisyys puristuskeskiöstä
$l_{eff}$	T-osan tehollinen pituus
$l_{eff,req}$	Tehollisen alueen vaadittu pituus
$m$	Pultin reiän keskiön etäisyys uuman hitsiin
$m_x$	Laipan yläpuolisen pultin reiän keskiön etäisyys laipan hitsiin

$m_2$	Laipan alapuolisen pultin reiän keskiön etäisyys laipan hitsiin
$n$	Käytettävien pulttien määrä
$p_1$	Pulttien reikien keskiöiden keskinäinen etäisyys voiman suunnassa
$p_2$	Pulttien reikien keskiöiden keskinäinen etäisyys voimaa vastaan kohtisuorassa
$s$	Pohjalevyn ulokkeellisen osan pituus
$t_f$	Pilarin laipan paksuus
$t_{fn}$	Leikkauspalan laipan paksuus
$t_{pl}$	Pohjalevyn paksuus
$x_1$	Myötöviivan approksimoinnissa käytössä oleva parametri
$y_1$	Myötöviivan approksimoinnissa käytössä oleva parametri
$z_{c,weak}$	Puristuskeskiön etäisyys neutraaliakselilta heikomman akselin suuntaisesti
$\alpha_{cc}$	Betonin lujuudelle käytettävä kerroin
$\beta_j$	Jälkivalun ominaisuuksia kuvaava kerroin
$\gamma_c$	Betonin osavarmuusluku
$\gamma_{M0}$	Teräksen osavarmuusluku

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Algoritmiavusteisen suunnittelun suosio on kasvanut viime vuosina rakennesuunnittelijoiden keskuudessa, minkä seurauksena yhtiöiden sisällä on kehitetty lukuisia työkaluja suunnitteluprosessin helpottamiseksi ja nopeuttamiseksi. Tämän diplomityön aikana kehitetty työkalu kuuluu useampien aiemmin kehitettyjen teräsrakenteiden mallinnusta ja analyysiä nopeuttavien työkalujen kokonaisuuteen, erityisesti kattilalaitosprojektien esisuunnitteluvaiheen aikatauluhaasteita helpottamaan. Aihepiiriin liittyy muun muassa kaksi aiempaa diplomityötä (Koivuniemi, 2021; Höyhty, 2021) joissa pääpaino on ollut kattilarakennuksien pää- ja sekundäärirakenteiden algoritmiavusteisessa suunnittelussa. Tässä diplomityössä hyödynnetään esisuunnitteluvaiheen aikana suunniteltua primäärirunkoa, ja paneudutaan suunnittelutyön kehittämiseen peruspulttiliitoksien osalta.

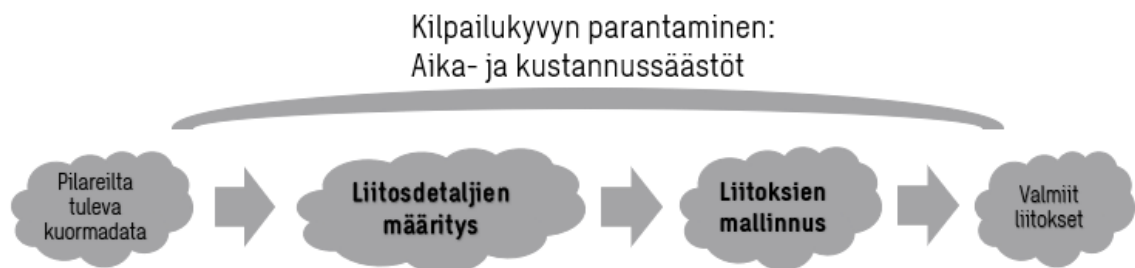
Rakenteiden liitokset ovat tärkeä osa rakennuksen suunnittelukokonaisuutta. Liitoksien tulee siirtää kuormia eri rakenneosilta eteenpäin aina rakenteen perustuksiin asti. Rakenneosien väliset liitokset puolestaan vaikuttavat suoraan koko rakenteen jäykkyyteen ja kuormankantokapasiteettiin. Liitoskohtien oikeaoppinen suunnittelu on näin ollen vaativa ja vastuullinen tehtävä, joka vaatii paljon aikaa ja huolellisuutta rakenteiden suunnitteluprosessista.

Peruspulttiliitoksien suunnitteluohjeet ja standardien laskentakaavat ovat rajoittuneet reunaehtoihin, jotka rajaavat merkittävän osan todellisissa suunnittelukohteissa esiintyvistä liitoksista ohjeiden ja standardien ulkopuolelle. Standardin EN 1993-1-8 (2005) perustusliitoksia koskeva ohjeistus rajautuu tilanteisiin, joissa pohjalevyyn kohdistuu joko suora puristava tai vetävä normaalivoima, tai normaalivoiman ja vahvemman suunnan taivutus. Lisäksi standardin EN 1993-1-8 (2005) (EC 3) tarjoama ohjeistus rajoittuu edellä mainituille kuormitustapauksille tapauksiin, joissa pohjalevyyn kiinnittyvä pilari on H- tai I-profiili ja pultit sijaitsevat laippalinjan rajaamalla sisäpuolisella alueella. Tilanteille, joissa pohjalevyyn kohdistuu heikomman akselin suhteen- tai heikomman ja vahvemman akselin suhteen tapahtuva samanaikainen taivutus, ei ohjeistusta ole saatavilla. Näitä kahden akselin suhteen taivutettuja tilanteita esiintyy rakenteiden reunapilareissa, joihin kohdistuu tuuli- tai maanjäristyskuormia. Myös useissa teollisuuskohteissa jo rakenteiden omat painot aiheuttavat merkittäviä kuormituksia molempien pääakselien suhteen.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja aiheen raja

Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda työkalu, joka tehostaa teräsrunkojen ja perustusten välistä liitossuunnittelua. Työkalun tulee määrittää oikeanlainen liitos usealle liitoskohdalle samanaikaisesti. Jokaiselle liitoskohdalle tulee määrittää liitosdetalji, joka toteuttaa annetut suunnittelukriteerit sekä mallintaa kyseisen liitosdetaljin tietomallin puolelle. Suunnittelukriteerien tulee ottaa huomioon liitoksen voima- sekä geometriaperusteiset ehdot, sekä visuaalisen tarkastelun kriteerit. Työkalun tulee kattaa tapaukset, joissa esiintyy

- Normaalivoima ja mahdollinen taivutus molemman pääakselin suhteen
- Erillinen leikkausvoimia siirtävä leikkauspala
- Pultti suorakaideprofiilin profiililinjan ulkopuolella
- Pohjalevyn jäykistys erillisillä jäykistyslevyillä.



**Kuva 1.1** Työkalun tehtävä ja tavoite kiteytettynä kuvaan.

Tämän diplomityön aihealue on rajattu kehityshankkeen muiden työkalujen ja teräsraakennesuunnittelijan näkökulman perusteella: Tarkoitus on hyödyntää yhdenmukaisten laskenta- ja tietomallin avulla saatuja lähtötietoja perustussuunnittelussa ilman, että yllä oleviin rakenteisiin ja niiden mitoitusperusteisiin otetaan kantaa. Lisäksi ankkuripulttien oletetaan saavuttavan peruspulttitoimittajan ilmoittamat mukaiset täydet kapasiteettiarvot, eikä betonin eri murtomekanismeja tarkastella liitoskestävyyttä määritettäessä.

Kuten työn taustaselvityksessä kerrottiin, on liitoksen todellisella jäykkyydellä vaikutus koko rakenteen kestävyyttä tarkasteltaessa. Tutkimuksen tarkoituksena ei ole tutkia liitoksen jäykkyyden vaikutusta rakenteisiin, vaan liitos suunnitellaan oletuksella, että se toimii jäykästi. Jäykkä liitos on kattilarakennuksen rungossa normaali toimintatapa, ja liitoksen jäykkyyttä hyödynnetään alimman lohkon pilarien nurjahduspituuden laskennassa. Liitoksen tarkka jäykkyys riippuu vallitsevasta kuormituksesta, eli kullakin kuormitusyhdistelmällä pitäisi olla erikseen määritetty jäykkyys. Tällaisen määrittelyn tekeminen käytettävissä olevilla soveltuvilla FEM-ohjelmilla ei ole mahdollista. Lisäksi toimintatapa johtaisi iteraatioon liitoksen mitoituksen, jäykkyyden laskennan ja pilarin mitoituksen

välillä. Liitosjäykkyyksien optimoinnilla voidaan saavuttaa hyötyä esimerkiksi portaalikehien suunnittelussa säätämällä momenttipinta profiilien kannalta optimaaliseksi. Jäykkyyksillä kikkailu ei näin ollen toisi mitään hyötyä voimalaitoshankkeessa.

Tämän tutkimuksen lähtökohtana toimii tilanne, jossa liitoskohdan rasitukset ovat selvillä peruspultteja määritettäessä. Eurokoodin mukainen laskenta pohjalevyn kestävyydelle esitetään vetopuolen rasituksia vastaan, mutta pohjalevyn paksuus ja mahdollinen jäykistys valitaan siten, etteivät ne muodosta rajoittavaa tekijää liitoksen kapasiteetilaskennassa. Näin liitokset voidaan suunnitella vetopuolella pultin täyden kapasiteetin mukaisesti.

Työssä pyritään vastaamaan seuraavaan tutkimuskysymykseen: Kuinka paljon peruspulttien suunnitteluprosessia voidaan nopeuttaa algoritmiavusteisen suunnittelun avulla? Nopeustavoitteiden onnistuneisuuden mittarina toimii pääsääntöisesti suunnittelussa säästetty aika, sillä liitoksien suunnittelu on vaativaa ja hyvin paljon aikaa vievä suunnittelutehtävä. Ajankäytön parantuessa myös liitossuunnittelun kustannukset alenevat. Työkalu on suunniteltu laskevan monia liitoskohtia samanaikaisesti, joten työkalun hyödyllisyys kasvaa sitä mukaan, mitä enemmän liitosta vaativia kohtia on. Jotta tähän suurempaan ajansäästötavoitteeseen päästäisiin, tulee peruspulttiliitoksen mitoitukselle valita menetelmä, jonka avulla voidaan määrittellä myös vaativampien liitostyyppien riittävä kestävyys. Liitoksen mitoitus tulisi algoritmin nopeuden ja näin hyödyllisyyden takia pysyä mitoittamaan ilman elementtimenetelmään tukeutuvaa ohjelmistoa.

Työn aikana pyritään muodostamaan myös näkemys seuraavaan tutkimuskysymykseen: Voidaanko peruspulttiliitoksien suunnittelua yksinkertaistaa valmistetun työkalun avulla suurissa kohteissa? Tähän tutkimuskysymykseen pyritään muodostamaan näkemys tapaustutkimuksen kohteena toimivan laitoksen peruspulttien suunnitteluprosessin avulla. Yhtenä merkittävänä suunnitteluprosessia yksinkertavana mittarina voidaan pitää suunnittelun eri osapuolten välisen riippuvaisuuden vähentämistä: Voidaanko peruspulttien laskenta ja mallinnus hoitaa luodun työkalun avulla yhden suunnittelijan toimesta, vai tarvitaanko näihin tehtäviin erilliset suunnittelijat?

### **1.3 Tutkimusmenetelmät**

Tässä diplomityössä käytettävät tutkimusmenetelmät ovat kirjallisuuskatsaus, haastattelu sekä tapaustutkimus. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on kartoittaa mitä aihepiiristä tiedetään ja miten aihepiirin sisältöä on sovellettu eri käyttökohteisiin. Kirjallisuus-

katsauksen tavoitteena on luoda syvä ymmärrys aihepiiriin liittyvästä teoriasta, sekä käytettävistä menetelmistä. Kirjallisuuskatsauksen lähestymisnäkökulmia on useita, mutta pääpiirteittäin ne voidaan jakaa työssä kolmeen eri osioon:

- Esisuunnitteluvaiheeseen perehdyttäminen
- Ohjelmoinnin tehokas hyödyntäminen (Visual Basic Application (VBA) & Grasshopper)
- Perustusliitoksen teoria ja laskentamenetelmät

Haastatteluiden avulla työkalun toimintoja voidaan ohjata projektien- sekä käytännön suunnittelutyön vaatimaan suuntaan. Haastattelujen tehtävänä on myös varmistaa, että työkalussa hyödynnettävät menetelmät ovat käyttäjälle helposti ymmärrettävissä, teoreettisesti korrekkeja, sekä tarpeeksi tehokkaita käytännön työtehtävissä.

Tapaustutkimuksen avulla tutkitaan työkalun avulla saavutettua lopputulosta ja sen hyödyllisyyttä. Tapaustutkimus suoritetaan esisuunnitteluvaiheessa olevaan kattilarakennuskohteeseen, joka testaa työkalun soveltuvuutta useiden erityyppisten liitoskohtien avulla. Lopputuloksen ja hyödyllisyyden mittareina toimivat käytetty aika, sekä manuaalisen työn tarpeen väheneminen.

## 1.4 Rakenne

Työn alussa luodaan yleiskatsaus peruspultteihin, sekä esitetään niiden osuus osana esisuunnitteluvaihetta. Tässä vaiheessa esitetään myös tietoa työkalun rakentamiseen liittyvistä valinnoista niin algoritmin, kuten myös peruspulttisuunnittelun osalta. Alun yleiskatsauksen tavoitteena on luoda lukijalle käsitys työn aiheesta ja siihen liittyvistä asioista.

Seuraavana työssä esitetään suunnittelutyökalun tekemisessä hyödynnetyt peruspulttiliitoksen teorit. Työssä valittujen laskentamenetelmien oikeellisuutta on tutkittu työn myöhemmässä vaiheessa, jossa menetelmän avulla saavutettuja tuloksia verrataan FEM-laskentaohjelman tuloksiin.

Työn kolmannessa luvussa esitetään työkalun toiminnan kannalta oleelliset ominaisuudet, sekä niiden luonnissa tehdyt valinnat. Luvun tarkoituksena on perehdyttää lukija sekä mahdollinen työkalun käyttäjä sen toimintaan ja valittuihin menetelmiin.

Työkalun toimivuutta sekä mahdollisia siihen liittyviä ongelmia päästään tarkastelemaan luvussa viisi, kun työkalua hyödynnettiin tapaustutkimuksessa esiintyneen kohteen



suunnittelussa. Luvussa esitetään kohde niiltä oleellisilta osilta, jotka ovat suorassa yhteydessä työkalun käytön kanssa. Luvussa kerrotaan myös suunnitteluprosessin aikana esiin nousseista ongelmista, sekä toimintatavoista näiden ongelmien ratkaisemiseksi.

## 2. ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU

Tämän luvun tarkoitus on luoda yleiskuva työkalun toimintaan liittyvästä aihepiiristä. Kappaleessa esitellään algoritmiavusteista suunnittelua, peruspulttiliitosta, sekä näiden kahden aihealueen yhdistämistä työssä käytettyjen parametrien sekä tehtyjen valintojen näkökulmasta. Näiden lisäksi tuodaan esille haluttu päämäärä peruspulttien esisuunnitteluvaiheen osalta.

### 2.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu

Nykyteknologia ja tietotekniikan kehittynyt osaaminen mahdollistavat suunnitteluprosessin eri osa-alueiden algoritmiavusteisen suunnittelun. Algoritmilla tarkoitetaan ohjesarjaa, joka on luotu ongelman tai työtehtävän suorittamiseksi. Algoritmin tavoitteena on luoda annetuista lähtöarvoista lopputulos seuraamalla algoritmille määritetyjä komentoja. Algoritmien avulla voidaan muokata ja prosessoida dataa, luoda laskelmia ja suorittaa erilaisia toimintoja useilla eri tavoilla. (Thinkautomation, 2021)

Algoritmiavusteisella suunnittelulla tarkoitetaan menetelmää, jossa suunnitteluvaiheen osa korvataan algoritmilla tai useiden algoritmien sarjojen avulla muodostetulla kokonaisuudella. Algoritmin jokainen komento esitetään tavalla, joka johtaa yksiselitteiseen tietokoneen ymmärtämään toimintoon. Toimintoja ja algoritmeja voidaan käyttää useiden algoritmien sarjana, jolloin yksittäinen algoritmi vastaa pienemmästä osakokonaisuudesta. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa osakokonaisuuden päivitys tapahtuu yksittäistä algoritmeja muokkaamalla, eikä muiden algoritmien suoritukseen tarvitse puuttua.

Algoritmiavusteisen suunnittelun tavoitteena on nopeuttaa suunnitteluprosessia ja vähentää manuaalisen työn määrää. Heckstallin (2013) mukaan algoritmien suunnittelu voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen:

- 1) Läpikohtainen perehdytys aihealueeseen
- 2) Ohjelman analysointi
- 3) Algoritmien kirjoittaminen
- 4) Testaus ja tehokkuuden parantaminen

Läpikohtainen perehdytys aiheeseen on tärkeää, jotta ymmärretään työn eri vaiheet ongelman tai työtehtävän suorittamiseksi. Oleellista on erottaa, mitä jokainen yksittäinen algoritmi saa lähtötietona ja millainen lopputulos tulee saavuttaa, jotta algoritmin seuraava vaihe on toteutettavissa.

Analysointivaiheessa tarkastellaan ohjelmointikoodin soveltuvuutta algoritmin toteuttamiseksi. Tässä vaiheessa algoritmin suunnittelijan tulee tarkastella muun muassa käytettäviä datatyyppejä sekä suunniteltavan ohjelman rakennetta. Datatyypit ja ohjelman rakenne tulee valita siten, että algoritmin suoritus on mahdollisimman tehokasta. (Heckstall, 2013)

Huolellisen alkusuunnittelun jälkeen alkaa algoritmin toteutus valitun ohjelmointikielen mukaisen koodin kirjoittamisella. Jokainen koodirivi tulee kirjoittaa mahdollisimman selkeästi, ja suurempien osakokonaisuuksien tehtävä tulee kommentoida. Myös keskellä koodia olevia osuuksia tulee kommentoida, mikäli koodiosuuksien toiminta ei ole helposti ymmärrettävissä. Näin varmistutaan siitä, että koodi on helposti luettavaa ja ymmärrettävissä myös jatkossa, olipa lukija sitten algoritmin tekijän tai muu koodin toimintaa tarkasteleva ulkopuolinen henkilö.

Algoritmin kirjoittamisen jälkeen sen toimivuutta tulee testata mahdollisten ongelmakohtien löytämiseksi. Testaus tulee suorittaa käyttämällä mahdollisimman laajaa lähtöarvojen kirjoa, jotka sopivat kyseisen algoritmin toteutukseen. Ohjelman pienempiä osakokonaisuuksia on hyvä testata jo algoritmia luodessa. Näin varmistutaan kirjoitetun koodin toimivuudesta jo algoritmin varhaisessa vaiheessa. Tässä vaiheessa ohjelmakoodia on myös vielä helppo muokata haluttuun suuntaan. Ohjelmaa kirjoitettaessa voidaan esimerkiksi huomata jokin muu tehokkaampi menetelmä halutun lopputuloksen saavuttamiseksi.

Algoritmiavusteinen suunnittelu on hyvin suuressa kasvussa varsinkin rakennesuunnittelijoiden keskuudessa. Kasvava ymmärrys ohjelmointia kohtaan on johtanut tilanteeseen, jossa suunnittelijat enemmässä määrin valmistavat omia työkaluja helpottaakseen arjen suunnittelutehtäviä. Eri algoritmien suunnitteluun voi kuitenkin liittyä usein oletuksia sekä yksinkertaistuksia, jotta kyseisen algoritmin käyttäminen olisi kannattavaa arjen suunnittelutehtävissä. Yksinkertaistuksiin ja oletuksiin päätyminen ei kuitenkaan välttämättä kerro algoritmin luojan ohjelmointi- tai suunnittelutaidoista, vaan näillä valinnoilla voidaan saavuttaa lopputulos, joka vastaa haluttua lopputulosta tarpeeksi hyvällä tarkkuudella.

## 2.2 Ohjelmointikielen valinta

Eri ohjelmointikieliä on käytössä useita satoja, ja eri ohjelmointikielien pitävyt usein sisältää omia erityispiirteitä sekä monimutkaisuuksia. Vaatimukset ohjelmointikielen oppimiseen voivat olla hyvinkin suuret, ohjelmointikielestä riippuen. Näistä syistä omat intressit ja tarpeet ovat olennainen osa ohjelmointikielen valintaa.

Tämän työn lujuuslaskennassa ja detaljien määrittämisessä käytetään Microsoftin VBA-ohjelmointikieltä yhteistoiminnassa Microsoft Excelin kanssa. VBA on sisällytetty Office-ohjelmistoihin, joten se on helposti saatavilla, eikä se tarvitse erillistä sovellusta toimivien algoritmien luomiseksi (Birnbaum, 2005). Laskennan suorittaminen käyttäen Excel-laskentapohjaa sekä VBA ohjelmointia on hidasta verrattuna tilanteeseen, missä laskenta suoritetaan kokonaan sisäistä muistia hyödyntäen. Suuren ja monimutkaisen laskentakokonaisuuden hallinta pelkästään sisäistä muistia hyödyntäen on kuitenkin haastavaa, ja mahdollisten laskentamenetelmien päivityksien tekeminen käyttäjän haluttuun suuntaan on työlästä. Tällaisessa tapauksessa myös laskentaparametrien mahdollinen päivittäminen vaatii työkalun käyttäjältä laajempaa ohjelmointiosaamista. Yksi Excel-laskentapohjan hyödyistä on myös se, että laskennan eri välivaiheet ovat helposti kaikkien työkalua käyttävien henkilöiden nähtävillä.

VBA-ohjelmointikieli on pienellä vaivalla omaksuttavissa oleva ohjelmointikieli, mutta sen avulla luotujen algoritmien suoritusajat voivat vaihdella hyvin paljon käyttäjän valitsemista menetelmistä riippuen. Datan muokkaaminen taulukoiden soluissa ja yksinkertaisien algoritmien luonti VBA avusteisesti on pienellä vaivalla opittavissa, mutta käsiteltäessä suurta määrää dataa, ohjelmointitaustan puuttuminen näkyy usein algoritmien toimintanopeuksissa. Toimiakseen tehokkaasti VBA vaatii laajempaa käsitystä ohjelmoinnista. Käyttäjällä tulee olla ymmärrys esimerkiksi eri datatyypeistä, tietorakenteista, tehokkaasta muistin käytöstä ja virheenjäljityksestä eli niin sanotusta debuggauksesta. (Sagmon, 2020)

Tässä työssä Excelissä tuotettu data siirretään BIM-malliin visuaalista ohjelmointia hyödyntävän Grasshopper - ohjelman avulla. Woodburyn (2010) mukaan visuaalinen koodi on yhden tai monen parametrisen tehtävän sarja, jossa yhteneväisien sekä toisistaan riippuvien parametrien avulla muodostuu lopputulos. Työskennellessä visuaalisen mitoituksen parissa tavanomaista koodausosaamista ei siis välttämättä tarvita, mikäli haluttuun lopputulokseen päästään alkutietojen sekä ”valmiiksi koodattujen” komponenttien avulla. Halutessaan käyttäjä voi myös implementoida Grasshopper -komponenttiin itse luotua koodia, mikäli valmiiksi löytyvillä komponenteilla ei päästä haluttuun lopputulokseen.

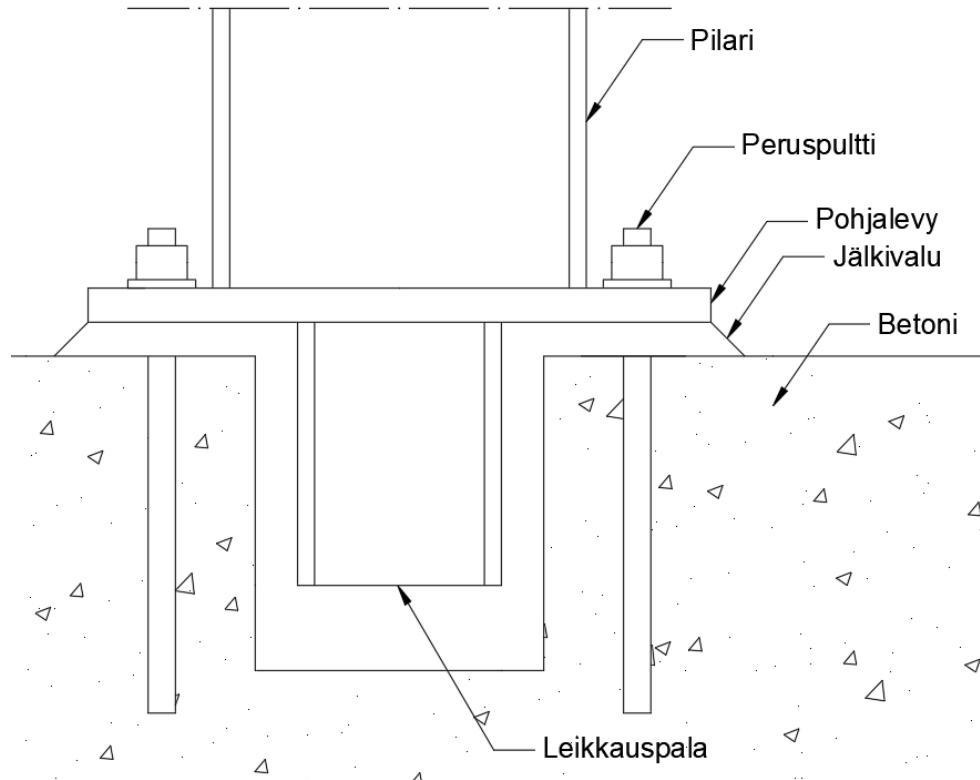
Eriyisen hyödyllisen Grasshopper-ohjelmasta tekee Grasshopper-Tekla live link. Trimble Solutions Corporation (2021) mukaan Grasshopper-Tekla live link on joukko Grasshopper komponentteja, jotka voivat luoda Tekla Structures objekteja ja olla reaaliaikaisessa vuorovaikutuksessa niiden kanssa. Grasshopperin avulla voidaan myös reaaliaikaisesti kirjoittaa ja lukea dataa ohjelmien, kuten Excelin ja Autocadin plug-inien kautta (Tedeschi 2014).

## **2.3 Perehdytys peruspulttiliitokseen ja algoritmin toiminnan rajaus**

Algoritmiavusteisen suunnittelun ensimmäinen vaihe on läpikohtainen perehdytys aihealueeseen. Suunnittelussa tulee tehdä selväksi, mitkä ovat algoritmin lähtötiedot, ja mitä kaikkea pitää ottaa huomioon halutun lopputuloksen saavuttamiseksi. Rakennesuunnittelussa myös laskennan tarkkuus ja käytettävät oletukset tulee miettiä hyvissä ajoin ennen algoritmin luomista. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi peruspulttiliitosta ylisesti, esitetään työkalun algoritmin luomiseen vaikuttavia valintoja, sekä tarkastellaan esisuunnitteluvaiheen tavoiteltua lopputulosta.

### **2.3.1 Peruspulttiliitos**

Peruspulttiliitos on yllä olevan rakenteen ja rakenteen perustuksen välinen, ylemmän rakenteen voimia siirtävä liitos. Peruspulttiliitos koostuu eri komponenteista. Tämä tutkimus tarkastelee kuvan 2.1 mukaista peruspulttiliitosta, joka koostuu pilarin pohjaan hitsatusta pohjalevystä, ankkurointipulteista, jälkivalusta sekä betonisesta perustuksesta. Työssä otetaan kantaan myös tapauksiin, joissa leikkausvoimien siirtämisessä hyödynnetään erillistä leikkauspalaa. Myös mahdollisten jäykisteiden tarve kartoitetaan, ja niiden vaikutusta liitoksen mitoitukseen tarkastellaan. Liitoksessa esiintyvät komponentit tulee suunnitella siten, että jokaisen eri komponentin kestävyys siihen vaikuttavia voimia vastaan on riittävä.



**Kuva 2.1** Perustusliitoksen osat.

Liitoksen kestävyys määrittämisessä käytetään standardin EN 1993-1-8 mukaista komponenttimenetelmää ja sen mukaisia sovellutuksia. Liitoksen mitoitus perustuu eri komponenttien tunnistamiseen, ja niiden kestävyys määrittämiseen puristus-, veto- ja leikkausvoimia vastaan. Liitos voidaan jakaa kuormituksen mukaisesti puristus- ja vetoalueisiin siten, että liitoksen komponenttien sisäiset voimat noudattavat tasapaino-ehdot. Liitoksen kapasiteetin määrittämisessä veto- ja puristuspuolella käytetään niin sanottua ekvivalenttia T-osaa, jolle lasketaan kestävyys. Eurokoodi 3:n mukainen liitoksen kestävyys ja kiertymisjäykkyys määrittäminen riippuu myös kuormista siten, että liitos voi olla joko täysin puristettu, täysin vedetty, tai toiselta puolelta puristettu ja toiselta vedetty.

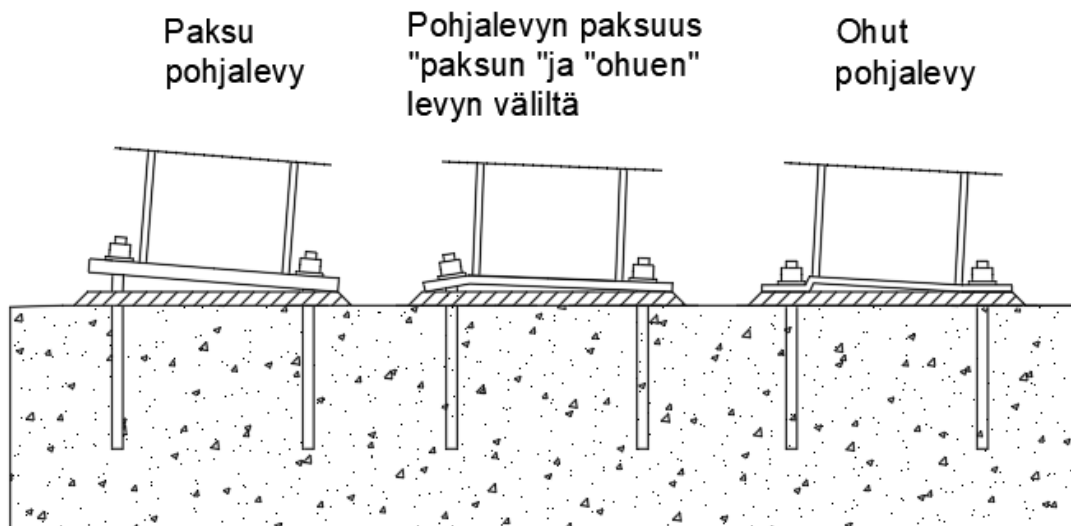
### 2.3.2 Liitoksen jäykkyys

Pohjalevyn paksuudella ja sen tuomalla jäykkyydellä on suuri vaikutus liitoksen, ja tätä myötä koko rakenteen käyttäytymiseen. Liitokset voidaan luokitella jäykkyys- tai lujuusperusteisesti. Jäykkyyden perusteella liitos voidaan luokitella kolmeen eri luokkaan: nimellisesti niveellinen liitos, täysin jäykkä liitos sekä osittain jäykkä liitos. Lujuusperusteisen luokittelun mukaan liitos voidaan jakaa nimellisesti nivelellisiin liitoksiin, täysin lujiin liitoksiin ja osittain lujiin liitoksiin. Jäykkyyden mukaan luokittelu suoritetaan liitoksen kier-

tymisjäykkyyden avulla, kun lujuuteen perustuva luokittelu suoritetaan vertaamalla liitoksen taivutuskestävyyden mitoitusarvoa liitokseen liittyvän sauvan taivutuskestävyyden mitoitusarvoon. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 302)

Liitoksen luokitus vaikuttaa liitoksen mitoitusmenetelmään. Nimellisesti nivelelliset liitokset tulee suunnitella siten, ettei niissä vaikuta suurta momenttia, joka vaikuttaa haitallisesti rakenteen sauvoihin. Jäykät ja täysin lujat liitokset puolestaan suunnitellaan siten, että ne pystyvät kantamaan liitettävältä saualta tulevat momentit, eikä liitoksen muodonmuutokset muodosta merkittävästi voimasuureiden jakautumiseen tai rakenteen siirtymätilaan. Osittain jäykän- ja osittain lujan liitoksen kohdalla liitos ei täytä nivelellisen tai jäykän liitoksen vaatimuksia, mutta liitos pystyy kantamaan siihen kohdistuvat voimasuureet. (Ongelin & Valkonen, 2010)

Mikäli pohjalevy on hyvin jäykkä, siihen ei pääse muodostumaan plastista niveltä. Tällöin liitoksessa esiintyvät jännitykset tulee arvioida elastisen teorian mukaisesti. Tämä kasvattaa paikallisia jännityshuippuja betonissa ja uloimmassa vedetyssä pulttirivissä. Paksujen pohjalevyjen tapauksessa liitoksen kestävyys rajoittavaksi tekijäksi muodostuu yleensä pulttien kestävyys tai betonin paikallinen puristuskestävyys. Joustavan pohjalevyn tapauksessa pohjalevyyn voi syntyä plastinen nivel, jonka seurauksena liitoksen kestävyyslaskennassa voidaan hyödyntää plastista jännitysjakaumaa. Pohjalevyn paksuuden ja sen tuoman jäykkyyden vaikutus liitoksen käyttäytymiseen voidaan esittää kuvan 2.2 mukaisesti.



**Kuva 2.2** Pohjalevyn paksuuden vaikutus liitoksen käyttäytymiseen.

Liitoksen varsinainen kiertymisjäykkyys määritetään Eurokoodi 3:n mukaan liitoksen peruskomponenttien jäykkyystekijöiden avulla. Jäykkyyden vetokomponentteina toimivat

pultin ja pohjalevyn vetojäykkyystekijät. Puristuspuolella komponentteja on vain yksi, puristetun betonin jäykkyystekijä. Tässä puristuspuolen komponentissa on kuitenkin otettu huomioon levyn taivutus puristuspuolella, sekä liitoksen jälkivalu. Ville Laine (2007) on tutkinut diplomityössään jäykkyyden vaikutusta liitoksen komponentteihin. Hänen työssään nousee esille useita epäkohtia eurokoodi 3:n mukaisesta jäykkyydentarkastelusta. Laineen mukaan suurimmat epäkohdat kyseisen ohjeistuksen mukaan löytyvät puristuskomponentin laskennassa: jäykkyydet on koitettu saada mahdollisimman yksinkertaiseen muotoon, jolloin ne pitävät sisällään oletuksia liitoksen eri komponenttien parametreista. Epätarkkuutta hänen mukaansa kuvaa hyvin se, että johdettuja jäykkyyksiä on pienennetty jälkivalun laatuerojen takia kertoimella 1.5.

Tämän diplomityön aikana ei ole tarkoitus syventyä jäykkyyden laskentaan, sillä liitoksien todellista jäykkyyttä ei tässä työssä ole tarkoituksena implementoida rakenteiden FEM-malliin. Peruspulttiliitoksen laskenta suoritetaan tarpeeksi paksua pohjalevyä käyttäen, jolloin pohjalevyn voidaan ajatella toimivan jäykän liitoksen tavoin. Rakenteen kokonaistarkastelun kannalta on kuitenkin otettu huomioon liitoksen mahdollinen osittainen jäykkyys kasvattamalla pilarin nurjahduspituutta.

### 2.3.3 Peruspultit

Ankkuriryhmien pääasiallinen tehtävä on siirtää liitoksessa esiintyvät vetovoimat perustuksille. Mikäli liitoksessa esiintyviä leikkausvoimia oletetaan siirtyvän pulttien välityksellä, tulee niiden veto- ja leikkausvoimien yhteisvaikutus ottaa huomioon pulttien kestävyttä määritettäessä. Tapauksissa, joissa esiintyy suuri leikkausvoima, leikkausvoimien siirrossa tulisi suosia esimerkiksi pohjalevyn alapuolelle asennettavaa erillistä leikkauspalaa. Tällöin pultille ei muodostu moniaksaalista jännityskenttää, eikä vedon ja leikkauksen yhteisvaikutuskaavaa tarvitse ottaa huomioon.

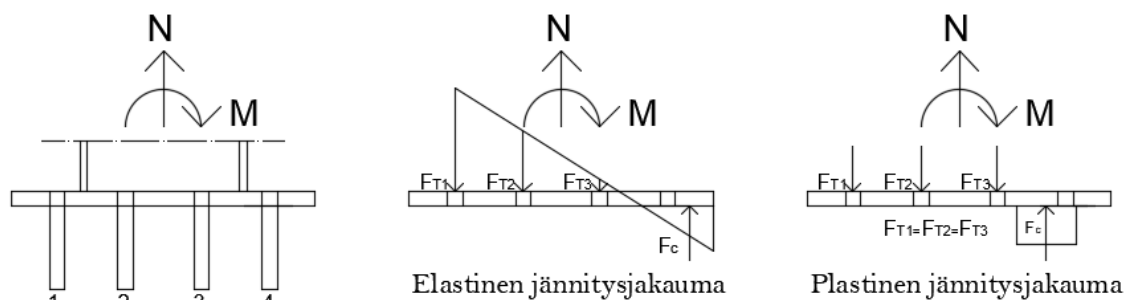
Määritettäessä yhteen ankkuriin kohdistuvaa vetovoimaa, tulee ottaa huomioon pohjalevyn jäykkyys, sekä ankkurien ja betonin jännityskäyttäytyminen. Kun ankkureita on useassa rivissä, tarvitaan pulttien suurta plastista venyvyyttä, jotta ankkuriryhmän suurin mahdollinen vetokestävyys on saavutettavissa. Mikäli plastista venyvyyttä ei ole saatavissa, on ankkurin murtotapa hauras. Murtumisen tapahtuessa hauraasti, lähempänä puristuskeskiötä olevien pulttirivien kestävyyttä on rajoitettava. (P398, 2013)

Kuormien jakautuminen pulteille tulee määrittää elastisen teorian mukaan, mikäli pohjalevy on jäykkä tai käytettävän ankkurin murtotapa on hauras. Elastisen teorian mukaista voimien jakautumista ankkureille voidaan käyttää aina, sillä se johtaa konservatiivisiin



tuloksiin. Tällöin voimat jakautuvan suoraan verrannollisesti etäisyyteen kiertokeskiöstä. (Ongelin, P. & Valkonen 2010)

Plastisuusteorian mukaista kuormien jakautumista voidaan puolestaan käyttää tapauksissa, joissa plastinen nivel muodostuu joko pilarin laippaan, pohjalevy käyttäytyy plastisesti, ankkurit myötävät vetovoiman vaikutuksesta tai ankkurien ulosvetokestävyys betonista saavutetaan (AISC 2006, s. 13). Pulttien plastista venyvyyttä vaaditaan hyvin usein esimerkiksi maanjäristyskohteissa.



**Kuva 2.3** Voimien jakautuminen elastisen- ja plastisen jännitysjaakaman mukaisesti

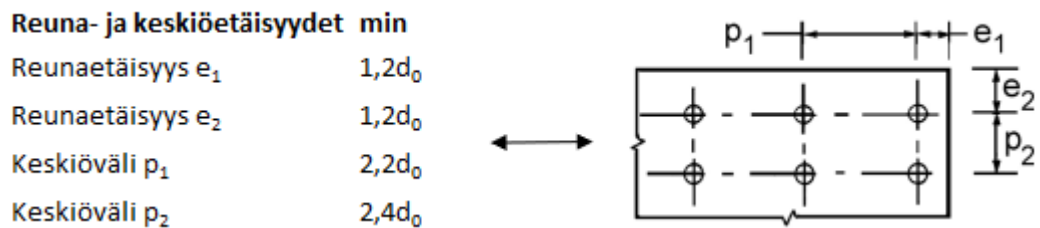
Jotta pulttirivien täydet kapasiteetit ovat saavutettavissa, on varmistuttava liitoksen plastisesta käyttäytymisestä. Käytettäessä hauraita pultteja sekä paksua pohjalevyä, on järkevää tehdä pulttivoimien jakautumisesta oletus, jonka mukaan voimat jakautuvat elastisen teorian mukaisesti. Kun edellä mainitut asiat otetaan huomioon, on työkalun toimivuuden ja yksinkertaisuuden kannalta suotavaa sijoittaa voimia vastaanottavat pultit yhdelle pulttiriville, jolloin pulttirivin pulttien kestävyys voidaan ottaa huomioon sellaisenaan. Tällöin pulttirivien kapasiteettien redusointia tai pultin haurasta murtoa ei tarvitse tutkia erikseen. Erikoistapauksissa tarkemman liitoskapasiteettitiedon saamiseksi, laip-pavälin sisäpuolella olevat pulttirivit voidaan ottaa huomioon.

Ankkurointi voidaan luokitella hauraaksi myös tapauksissa, joissa vetovoiman aiheuttama kartiomurto betonissa tapahtuu ennen ankkurin teräksen vetomurtoa (Eligehausen 2012, s. 275). Tässä työssä ei tutkita betonin eri murtotapoja, vaan betonin murtotapojen kapasiteetit oletetaan täyslujuiksi. Pultin siis otaksutaan saavuttavan valmistajan tai Eurokoodin mukaiset pultin kapasiteetit.

Pulttien sijaintia määritettäessä on otettava huomioon niitä koskevat määräykset. Standardin EN 1992-4 (2018) liite E velvoittaa valuun asennettavilta tyssäkantaisilta kiinnikkeiltä minimi reunaetäisyydet, kiinnikevälin sekä betonirakenneosan paksuuden teknisissä tuote-eritelmissä. Mikäli pulttivalmistajalla ei ole erillistä vaatimusta pulttien reuna- ja keskiöetäisyyksistä sekä keskiöväleistä, käytetään standardin EN 1993-1-8 mukaisia arvoja.

	Pultti	Minimi keskiöetäisyys [mm]
HPM	16	80
HPM	20	100
HPM	24	100
HPM	30	130
HPM	39	150
PPM	30	130
PPM	36	160
PPM	39	180
PPM	45	200
PPM	52	280
PPM	60	280

**Kuva 2.4** Peikon pulteille asetetut minimiarvot keskiöetäisyyksistä (muokattu lähteessä HPM-harjateräspultit ETA, tekninen käyttöohje 2019, PPM-ankkurointipultit, tekninen käyttöohje 2019).



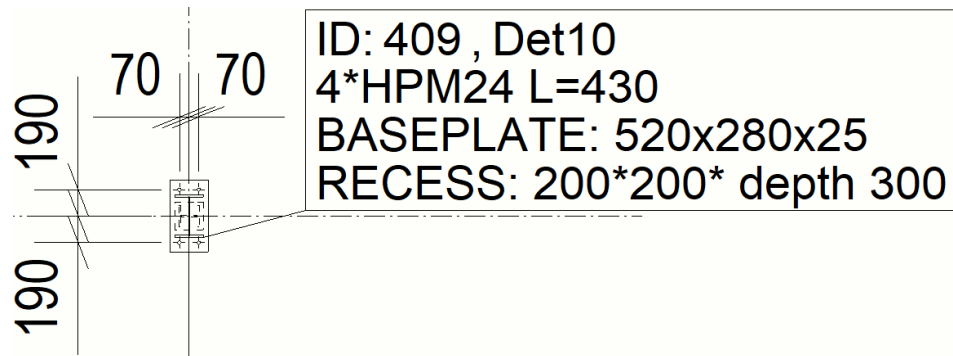
**Kuva 2.5** Kiinnittimien pääty- ja reunaetäisyyden sekä keskiövälin merkinnät (muokattu lähteessä EN 1993-1-8 2005 s. 25).

Kuvan 2.5 arvot pätevät tapauksissa, joissa reiät ovat pyöreät. Pidennetyissä rei'issä reuna ja keskiövälit tulee tarkastaa erikseen. Kuvan 2.5 arvo  $d_0$  on reiän halkaisija, joka koostuu pultin halkaisijasta sekä reikätoleranssista.

### 2.3.4 Esisuunnitteluvaiheen peruspulttisuunnittelu

Esisuunnitteluvaiheen laajuus ja niiden suunnittelussa vaaditut asiat voivat vaihdella projektikohtaisesti, mutta suunnittelun pääpiirteet pysyvät samanlaisina. Yksi lähetettävistä asiakirjoista on peruspulttipiirustus, jossa esitetään peruspulttien sijainti mitoitetuna modulilinjastoon, peruspulttien koko ja pituus, korkotiedot sekä levyjen reikätoleranssit

(Elementtisuunnittelu, 2020). Näiden lisäksi muut piirustuksissa esitettävät tiedot voivat vaihdella suunnittelukohteen tai suunnittelutoimiston mukaisesti. Perustusten yksilöimiseen voidaan käyttää esimerkiksi pilarin attribuutteihin syötettävää ID-lukua, josta käytetään tässä työssä nimitystä perustus-ID. Perustus-ID on Teklassa pilarin user-defined attribute (UDA) kenttään syötetty pilarikohtainen numero, jonka avulla voidaan kohdentaa tietoa kyseiselle pilarille. Tässä työssä perustus-ID:tä käytetään pohjalevyn mallinussijainnin määrittämiseen, sekä laskentatietojen yhdistämiseen oikealle liitoskohdalle. Liitoksen ID:n ja valmiille lopputuotokselle määritetyn detaljnumeron avulla liitoksen tiedot ovat myös helposti yhdistettävissä asiakirjoihin, joissa kyseinen liitoskohta esiintyy.



**Kuva 2.6** Esimerkki peruspulttipiirustuksessa esitetyistä tiedoista.

Pohjalevyn dimensioiden sekä peruspulttien koon ja määrän avulla voidaan määrittää suuntaa antavat kustannustiedot kohteen perustuksista. Esisuunnitteluvaiheen peruspulttiliitoksien suunnittelun myötä pystytään tarvittaessa myös varautumaan suurempiin levypaksuuksiin, jotka eivät ole alun perin projektin suunnittelukriteerien mukaisia.

Perustusliitoksien esisuunnitteluvaiheen suunnittelussa tulee ottaa huomioon kuormatietojen epätarkkuus. Rakennuksen toteutussuunnitteluvaiheessa kuormatiedot tarkentuvat, jonka seurauksena toteutussuunnittelussa käytetyt kuormat voivat olla suurempia kuin esisuunnittelussa käytetyt kuormat. Mikäli esisuunnittelussa rakenteet ja liitokset on mitoitettu hyvin lähelle niiden kestävyyskapasiteettia, voidaan kyseiset kohdat joutua suunnittelemaan uudestaan kapasiteettiylityksen vuoksi. Tästä syystä myös esisuunnitteluvaiheen peruspulttiliitokset tulisi suunnitella siten, että liitoksissa on riittävästi varmuutta kestävään toteutussuunnittelun aikaiset kuormien muutokset. Esisuunnitteluvaiheessa tilaajan antamat kuormatiedot arvioidaan todellista suuremmaksi, minkä takia toteutusvaiheessa vetovoimat saattavat kasvaa.

## 3. PERUSPULTTIEN MITOITUS

Tässä luvussa esitetään peruspulttiliitoksen Eurokoodi 3:n osien 1-1 (2005) ja 1-8 (2005) mukainen peruskomponenttien mitoitus. Mitoituksessa otetaan huomioon Suomen kansallisen liitteen (Ympäristöministeriö 2019) mukaiset kansalliset valinnat. Näistä eurokoodin kohdista poikkeavat tai puuttuvat kohdat ovat sisällytettynä luvun kappaleisiin lähdeviitteiden kera. Soveltavien kappaleosuuksien kohdalla kerrotaan, mikäli eurokoodin mukaisesta menetelmästä poiketaan.

Jäykän liitoksen tapauksessa heikomman suunnan momenttia syntyy, kun rakennus siirtyy pilarin heikomman taivutussuunnan suunnassa. Merkittävää heikomman suunnan momenttia syntyy nurkkapilareihin, joissa tuulikuorma taivuttaa pilaria kahteen suuntaan. Mikäli rakennus on jäykistetty pystysitein ja rakennus on sivusiirtymätön, heikomman suunnan momentti jää yleensä pieneksi. Heikomman suunnan taivutuksen vaikutuksen huomioon ottamiseen ei löydy ohjeistusta Eurokoodista. Työssä heikomman suunnan kestävyuden tarkastelussa sovelletaan vahvan suunnan taivutuksen laskentaperiaatteita. Molempien suuntien taivutuksen ja normaalivoiman yhteisvaikutuksen tarkastamiseksi käytetään lineaarisia yhteisvaikutuskaavoja, joiden antavat varmallalla puolen olevan tuloksen liitoksen kestävydestä. Taivutuskapasiteettien laskennan kohdalla kestävydet lasketaan oletuksella, ettei liitoksessa esiinny normaalivoimaa.

### 3.1 Puristusvoimien välitys

#### 3.1.1 Vahvan suunnan puristuskestävyys

Betonin 3D puristuskestävyys määritellään EN 1993-1-8 (2005) mukaan laskemalla liitoksen perustuksen pintapaineen mitoituslujuus  $f_{jd}$  betonin kestävyuden paikallisen mitoitusarvon  $F_{Rdu}$ , jälkivalun laadun ja paksuuden huomioon ottavan kertoimen  $\beta_j$  ja tehokkaan puristusalan avulla.

$$f_{jd} = \beta_j \frac{F_{Rdu}}{b_{eff} l_{eff}} \quad (1)$$

missä

$\beta_j$  on jälkivalun ominaisuuksia kuvaava kerroin

$F_{Rdu}$  on betonin pistekuormakestävyys EN 1992-1-1 (2004) mukaisesti

$b_{eff}$  on T-osan laipan tehollinen leveys

$l_{eff}$  on T-osan laipan tehollinen pituus.

Standardi EN 1992-1-1 (2004) esittää ohjeistuksen pistekuormakestävyyden määrittämiseen. Kaavassa (2) esitetyn pistekuormakestävyyden  $F_{Rdu}$  määritelmä on voimassa kuorman jakautuessa tasaisesti kuormitusalueelle  $A_{c0}$ .

$$F_{Rdu} = f_{cd} A_{c0} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 f_{cd} A_{c0} \quad (2)$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_C} \quad (3)$$

missä

$A_{c0}$  on kuormitusalue

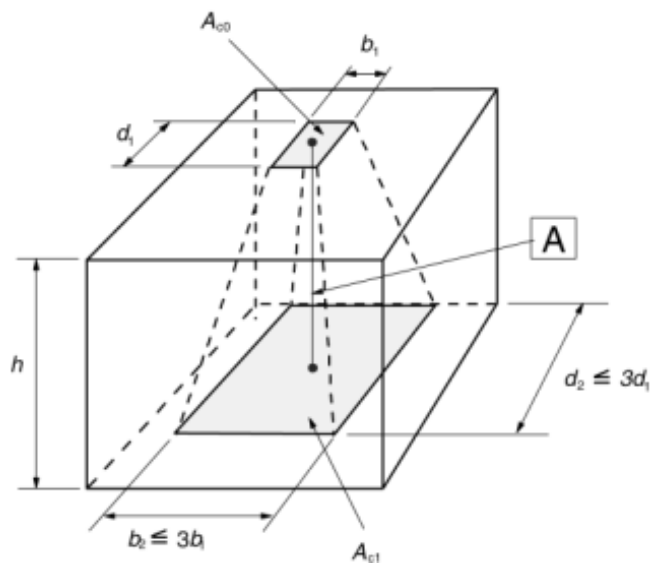
$A_{c1}$  on suurin mitoituksessa käytettävä  $A_{c0}$ :n muotoinen jakautumisalue

$\alpha_{cc}$  on betonin lujuudelle käytettävä kerroin (Suomen kansallinen liite määrittelee käytettäväksi kertoimeksi  $\alpha_{cc} = 0,85$ )

$f_{ck}$  on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä

$\gamma_C$  on betonin osavarmuusluku (Suomen kansallinen liite määrittelee käytettäväksi kertoimeksi normaalisti vallitsevassa ja tilapäisessä mitoitustilanteessa  $\gamma_C = 1,5$ )

Kaava (2) rajoittaa puristuksen jakautumisalueen siten, että jakautumisalue saa maksimissaan arvon  $A_{c1} = 9A_{c0}$ . Tätä on havainnollistettu kuvan 3.1 avulla.



**Kuva 3.1** Paikallisen puristusalueen jakautuminen (EN 1992-1-1, 2004)

Jälkivalun ominaisuuksia kuvaavan kertoimen  $\beta_j$  arvoksi voidaan valita Eurokoodi 3:n mukaan  $2/3$ , mikäli jälkivalun ominaislujuus on vähintään  $0,2f_{ck}$  ja jälkivalun paksuus on vähintään  $0,2$  kertaa pohjalevyn pienin leveys. Jälkivalun paksuuden ollessa yli  $50\text{ mm}$ , jälkivalu tulee tarkastella erillisenä osana pohjalevyn ja betoniperustuksen välissä (Wald 2014a, s. 67). Tällöin jälkivalun ominaislujuudeksi valitaan vähintään betoniperustuksen ominaislujuus.

Jälkivalun heikennyskertoimen  $\beta_j$  arvon määräytyy siis jälkivalun ominaislujuuden ja paksuuden mukaan. Waldin (2014b) mukaan heikennyskertoimen arvon  $\beta_j = 2/3$  käyttö perustuu oletukseen, jossa jälkivalun katsotaan toimivan nesteen tavoin, kun se on kolmiulotteisesti puristettuna ja jälkivalu on ohut. Tällöin pohjalevyn alapinnan jännitykset voidaan olettaa jakautuvan  $45$  asteen kulmassa  $c$ -mitan päästä pilarin ulkoreunasta. Käytännön suunnittelussa jälkivalun ominaislujuus on yleensä suurempi kuin käytettävän betoniperustuksen ominaislujuus, joten kertoimen  $\beta_j$  arvoksi voidaan valita  $1,0$  normin ohjeistuksesta hieman poiketen. Tämä oletus tehdään myös muun muassa European Commission julkaisemassa ohjeistuksessa (Wald 2014, s. 82).

Eurokoodi 3:n mukaan pohjalevyn alapuolella oleva tehollinen puristettu pinta-ala saadaan pintapaineen kantavan pinnan ulottuman avulla. Kun betonin laskentajännitys ja pohjalevyn taivutusvastus ovat tiedossa, voidaan kantavan pinnan ulottuma arvo  $c$  esittää kaavan (4) mukaisella tavalla.

$$c = t_{pl} \sqrt{\frac{f_{yp}}{3f_{jd}\gamma_{M0}}} \quad (4)$$

missä

$t_{pl}$  on pohjalevyn paksuus

$f_{yp}$  on pohjalevyn teräksen myötölujuus

$f_{jd}$  on liitoksen puristuslujuus

$\gamma_{M0}$  on rakenneosan poikkileikkauksen osavarmuusluku.

Kantava pinta muodostuu pilarin profiilin ympärille  $c$  mitan päähän kuvan 3.2 mukaisesti. Tehollista pinta-alaa määritettäessä tulee ottaa huomioon pohjalevyn dimensioiden asettamat rajoitukset puristuspinnan leviämisestä. Tehollinen alue ei siis voi ylittää pohjalevyn pituus- tai leveys suunnassa.

Hitsatut profiilit käsikirjan (Rautaruukki, 2010 s. 404) mukaan normaalivoiman kuormittama liitos aiheuttaa tasaisesti jakautuvan pintapaineen. Pintapaineen aiheuttaman momentin suuruutta rajoitetaan elastisella taivutusmomentilla, jotta pohjalevyyn ei synny liian suuria muodonmuutoksia. Taivutuskestävyyden ja betonin pintapaineen mitoituslujuuden avulla saadaan pohjalevyn minimipaksuus kaavan (5) mukaisesti.

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{6M_{p,Ed}}{l_{eff} f_{yp} \gamma_{M0}}} \quad (5)$$

missä

$M_{p,Ed}$  on betonin pintapaineesta pohjalevyyn kohdistuva taivutus

$l_{eff}$  on pohjalevyn tehollinen pituus

$f_{yp}$  on pohjalevyn nimellinen myötölujuus

$\gamma_{M0}$  on teräksen osavarmuusluku.

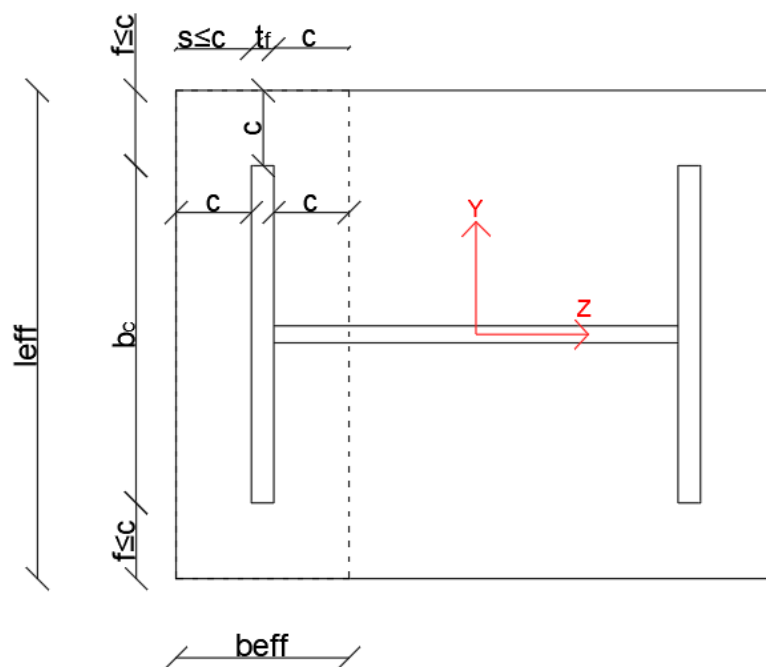
Betonin pintapaineesta pohjalevyyn kohdistuva taivutus saadaan kaavasta

$$M_{p,Ed} = \frac{l_{eff} s^2 f_{jd}}{2} \quad (6)$$

missä

$s$  on pohjalevyn ulokkeellisen osan pituus, kuitenkin niin, että  $s \leq c$

$f_{jd}$  on perustuksen pintapaineen mitoituslujuus.



**Kuva 3.2** Vahvemman suunnan taivutuksen tehollinen puristusalue.

Mitan  $c$  rajaamalla alueella katsotaan vaikuttavan liitoksen suurin sallittu puristuslujuus  $f_{jd}$ . Todellisuudessa jännitys on kuitenkin suurimmillaan suoraan pilariprofiilin alapuolella, ja jännitys pienenee siirryttäessä profiilista kauemmaksi. Kuten kaavasta (8) voidaan nähdä, pohjalevyn paksuuden vaikutuksella on suuri vaikutus jännityksien jakautumisessa betonille.

Kun liitoksen toinen puoli on puristuksella ja toinen puoli vedolla, puristetun puolen T-osan kestävyys valitaan pienemmän peruskomponentin kestävyuden mukaan. Teräksen ja betonin välinen puristuskestävyys saadaan kaavalla

$$F_{c,pl,Rd} = f_{jd} b_{eff} l_{eff} \quad (7)$$

Pilarin laipan ja uuman puristuskestävyys saadaan kaavalla

$$F_{c,fb,Rd} = M_{c,Rd} / (h_c - t_f) \quad (8)$$

missä

$M_{c,Rd}$  on pilarin poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$h_c$  on pilarin poikkileikkauksen korkeus

$t_f$  on pilarin laipan paksuus

T-osan puristuskestävyydeksi saadaan siis

$$F_{c,Rd} = \min (F_{c,pl,Rd}, F_{c,fb,Rd}) \quad (9)$$

T-osan puristuskestävyydessä tulee ottaa huomioon, että tehollinen puristusala on valittu konservatiivisesti siten, että siinä otetaan huomioon ainoastaan laipan alapuolinen tehollinen ala  $A_{eff,fc} = b_{eff} l_{eff}$ . Waldin (2014a, s. 101) mukaan tehollinen alue ylettyy kuitenkin uuman puolelle kasvavissa määrin normaalivoiman kasvaessa suhteessa vaikuttavaan momenttiin.

### 3.1.2 Heikon suunnan puristuskestävyys

Heikomman suunnan puristuskestävyyden määrittämisessä on sovellettu Eurokoodin esittämien vahvan suunnan laskennan periaatteita, jonka mukaan puristuskestävyyden tarkastelu pohjautuu pintapaineen T-osan kantavan pinnan ulottuman määrittämiseen ja sen tehollisen alueen laskemiseen. Jäykistämättömän I-profiilin tapauksessa tehollisen alueen mitta  $b_{eff}$  saadaan molempien laippojen alueelta kaavalla

$$b_{eff} = b_{eff1} + b_{eff2} \quad (10)$$



Kun tehollisen alueen leviämisrajoitukset otetaan huomioon, symmetrisesti asetellun liitoksen teholliseksi leveydeksi saadaan

$$b_{eff} = 2 * (t_f + \min(c, (h_c - t_f)/2)) + \min(c, s) \quad (11)$$

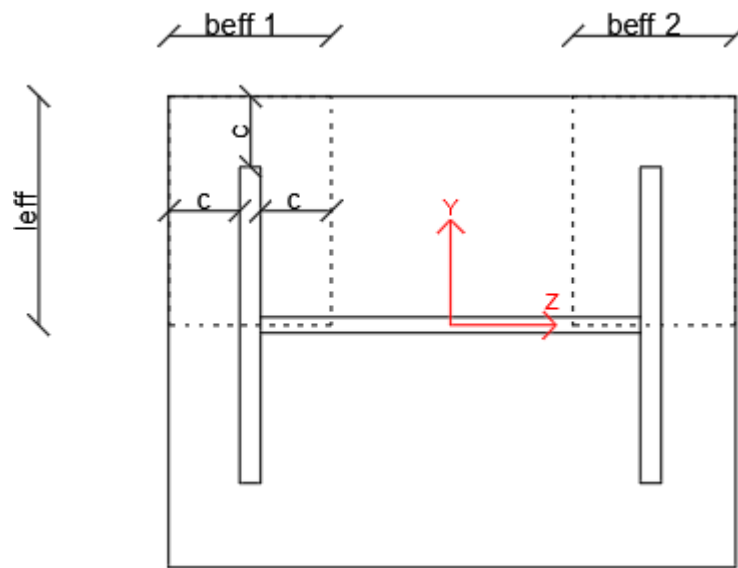
missä

$t_f$  on laipan paksuus

$h_c$  on pilarin korkeus

$c$  on pintapaineen kantavan pinnan ulottuma

$s$  on ulokkeellisen osan pituus (Amaral, 2014).



**Kuva 3.3** Heikomman suunnan taivutuksen tehollinen puristusalue (muokattu lähteestä Amaral, 2014 s.53).

Tehollisen pituuden  $l_{eff}$  määrittämisessä rajataan suurin sallittu pituus siten, ettei tehollinen alue ylitä liitoksen z- akselia, eikä puristusalue ulotu kuin enintään  $c$ -mitan tai laipan ja pohjalevyn ulokkeellisen osan päähän pilarin laipasta

$$l_{eff} = \min\left(\frac{b_c}{2} + c, b_{pl}/2\right) \quad (12)$$

missä

$b_c$  on pilarin leveys

$b_{pl}$  on pohjalevyn leveys (Amaral, 2014 s. 53).

Tarvittavaa tehollista puristusaluetta voidaan tarkastella myös lähtökohdasta, jossa tehollisen pituuden arvo määritetään vastaamaan liitoksen vetokapasiteettia. Kun tehollinen leveys  $b_{eff}$ , liitoksen vetokapasiteetti  $F_{T,Rd}$ , betonin pintapaineen mitoituslujuus  $f_{jd}$

ja liitosta rasittava vetovoima  $N_{Ed}$  tunnetaan, saadaan tarvittava tehollinen pituus yhtälöstä

$$l_{eff.req} = \frac{F_{T,Rd} - N_{Ed}}{f_{jd} b_{eff}} \quad (13)$$

Tehollisen alueen pituudeksi saadaan siis

$$l_{eff} = \min\left(\frac{b_c}{2} + c; \frac{b}{2}; l_{eff.req}\right) \quad (14)$$

Teräksen ja betonin välinen puristuskestävyys saadaan vahvan suunnan puristuskestävyyden tavoin kaavalla (7) käyttämällä tehokkaana puristusalueena heikomman suunnan mukaisia arvoja. (Amaral, 2014)

Heikomman suunnan momenttikestävyyden laskentaa varten puristuskeskiöksi etäisyydeksi neutraaliakselilta valitaan

$$z_{c,weak} = \frac{l_{eff}}{2} \quad (15)$$

Kotelopilareiden, putkiprofiilien ja laipan välistä jäykistettyjen H- ja I-profiilien tapauksissa puristusalan keskiö voidaan olettaa samaan tapaan kuten vahvemman suunnan taiputuksessa. Myös edellä mainituissa tapauksissa tehollinen puristusalue määritetään kantavan pinnan ulottuman avulla. (Amaral, 2014)

### 3.2 Vetovoimien välitys

Pohjalevyn taiputuksen tapauksessa kestävyysmitoitussarvo ja murtumismuoto voidaan määrittää ekvivalentin T-osan laipan kestävyysmitoitussarvon ja murtumismuodon avulla. Laipan T-osan kestävyysmitoitussarvoa varten tulee selvittää ekvivalentin T-osan tehollinen kokonaispituus  $\Sigma l_{eff}$ . Standardin EN 1993-1-8 (2005, s. 72) mukaan ”ekvivalentin T-osan tehollinen pituus on käsitteellinen pituus, joka ei välttämättä kuvaa kuitenkaan kuvaa sitä edustavan liitoksen peruskomponentin fyysikaalista pituutta.” Teholliset pituudet ja kestävyysmitoitukset lasketaan pulttirivikohtaisesti.

Teräsrakenneyhdistyksen Eurocode 3 -oppikirjan mukaan (2009) perustusliitoksissa levyn taipumisen johdosta syntyvien vipuvoimien vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon käytettäessä paksuja pohjalevyjä. Oppikirjan mukaan vipuvaikutukset voidaan jättää ottamatta huomioon myös tapauksissa, joissa peruspultit venyvät huomattavasti.

Kun vipuvoimia ei esiinny, laipan T-osan kestävyysmitoitussarvo saadaan valitsemalla pienin arvo yhdistetyn murtumismallin  $F_{T,1-2,Rd}$  ja pulttien murtumisen  $F_{T,3,Rd}$  väliltä. Työssä pohjalevyn paksuus määritetään siten, ettei yhdistetty murtumismalli muodostu

vetokestävyyden määrääväksi tekijäksi. Yhdistetyn murtumismallin kestävyys saadaan kaavalla

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m_x} \quad (16)$$

missä

$M_{pl,1,Rd}$  on plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$m_x$  on pultin reiän keskiön etäisyys laipan hitsiin.

Plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo saadaan kaavalla

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \Sigma l_{eff,1} t_{pl}^2 f_{yp}}{\gamma_{M0}} \quad (17)$$

missä  $l_{eff,1}$  on pienin vallitsevista T-osan tehollisista kokonaispituuksista.

Pulttirivin kestävyys murtumismallin 3 mukaisesti saadaan pulttirivissä olevien pulttien kestävyyksien summasta.

$$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd} \quad (18)$$

Mikäli liitoksessa esiintyy useita pulttirivejä, tulee jokaista puristuskeskiön ja uloimman vedetyn pulttirivin välistä pulttirivin kestävyyttä rajoittaa elastista jännitys jakaumaa käytettäessä kaavan (19) mukaisesti (P398, 2013).

$$F_{tr,Rd} = F_{tx,Rd} \frac{h_r}{h_x} \quad (19)$$

missä

$F_{tx,Rd}$  on uloimman pulttirivin kestävyys

$h_x$  on kaukaisimman pulttirivin etäisyys puristuskeskiöstä

$h_r$  on tarkasteltavan pulttirivin etäisyys puristuskeskiöstä.

Plastisen ja elastisen jännitys jakauman käytöstä esitetty enemmän aikaisemmassa kapaleessa 2.3.3. Elastisen jännitys jakauma käyttäminen pulttirivien kestävyuden määrittämisessä johtaa konservatiivisiin tuloksiin, joten tarkempaa laskentaa varten tulee tarkastaa, mikäli plastisuusteorian mukaista jännitys jakaumaa voidaan käyttää.

### 3.2.1 Vahvan suunnan vetokestävyys

Määritettäessä T-osan tehollista kokonaispituutta, jokaiselle pulttiriville tulee määrittää myötöviivan tehollinen pituus. Myötöviivan pituuden kasvaessa pohjalevyn kestävyys

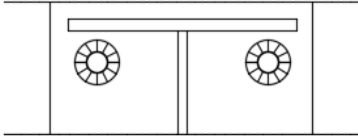
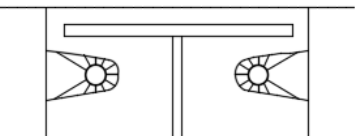
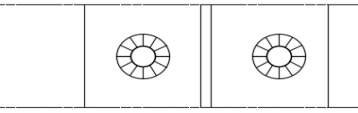
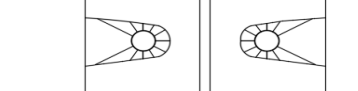
kasvaa, joten pulttirivin tehollinen kokonaispituus  $l_{eff}$  valitaan pienimmän myötöviivakuvion mukaisesti. Jäykistämättömän pohjalevyn tapauksessa tulee tarkastelussa ottaa huomioon myös pulttirivin ryhmämuodot. CSI:n julkaiseman ohjekirjan P398 (2013) mukaan pulttirivien teholliset pituudet saadaan taulukon 3.1 mukaisesti.

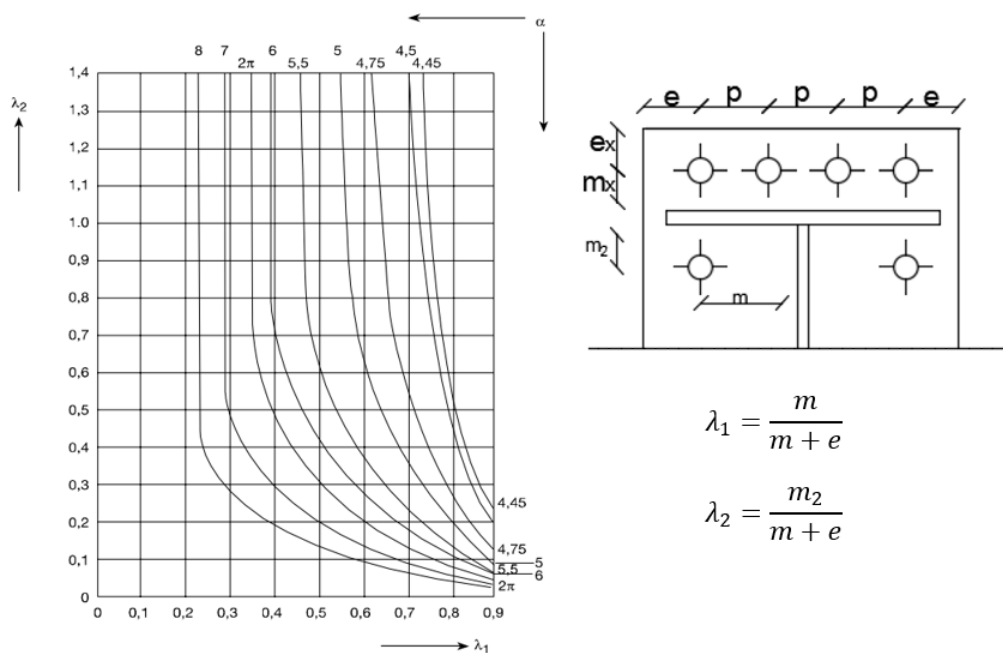
**Taulukko 3.1** T-osan teholliset pituudet (muokattu lähteestä P398, 2013).

Laipan yläpuoliset pultit	
	$l_{eff,cp} = n\pi m_x$
	$l_{eff,cp} = \frac{n}{2}(\pi m_x + 2e)$
	$l_{eff,nc} = \frac{b_p}{2}$
	$l_{eff,nc} = \frac{n}{2}(4m_x + 1,25e_x)$
	$l_{eff,nc} = 2m_x + 0,625e_x + e + (n - 2)(2m_x + 0,625e_x)$
	$l_{eff,nc} = 2m_x + 0,625e_x + \frac{(n - 1)p}{2}$

Mikäli liitoksessa esiintyy laipan tai jäykistelevyn alapuolella oleva pulttirivi, tulee teholliset kokonaispituudet kyseisessä rivissä määrittää taulukon 3.2 mukaisesti. Taulukossa esiintyvä arvo  $\alpha$  voidaan määrittää kuvan 3.4 mukaisesti.

**Taulukko 3.2** Laipan alapuolisten pulttirivien teholliset kokonaispituudet (muokattu lähteestä P398, 2013).

Laipan alapuoliset pultit (laipan lähellä oleva pulttirivi)	
	$l_{eff,cp} = 2\pi m$
	$l_{eff,cp} = \alpha m$
Laipan alapuoliset pultit (muut, ei laipan tai jäykisteen lähetyvillä oleva pulttirivi)	
	$l_{eff,cp} = 2\pi m$
	$l_{eff,nc} = 4m + 1,25e$

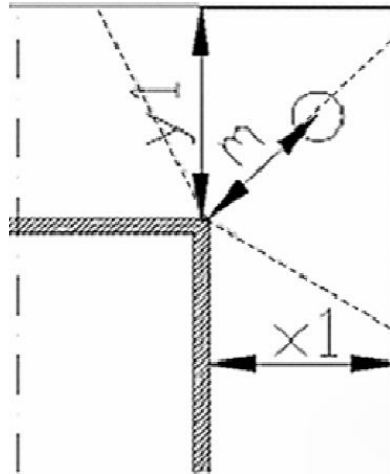


**Kuva 3.4** Alapuolisen pulttirivin  $\alpha$ :n arvot (muokattu lähteestä EN 1993-1-8 2005, s.88).

Pohjalevyliitoksissa esiintyy usein tapauksia, joissa pultti sijaitsee profiililinjan ulkopuolella. Näissä tapauksissa tehollisen pituuden määrittämisessä otetaan EC3:n mukaisten tapauksien lisäksi huomioon Laineen diplomityössä (2007) esitetty laajennettu myötötapaus. Laineen myötöviivan approksimointi perustuu oletukseen, missä pultin keskipisteessä vaikuttava voiman siirto tapahtuu lähimpänä sijaitsevaan tukikohtaan, eli pilarin kulmaan. Kaavan 20 mukaan kulman uuma-/laippalinjan suhteeksi on arvioitu 30 astetta.

$$l_{eff.laine} = \frac{x_1}{\cos 30} + \frac{y_1}{\cos 30} \quad (20)$$

missä parametrit  $x_1$  ja  $y_1$  ovat menetelmän mukaisen myötöviivan approksimointiin käytettävät parametrit.



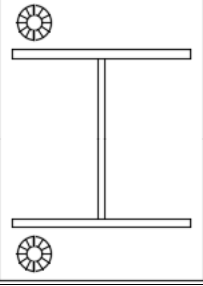
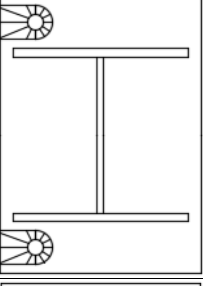
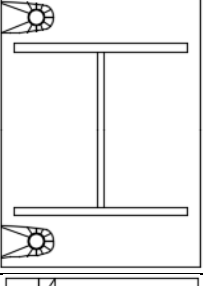
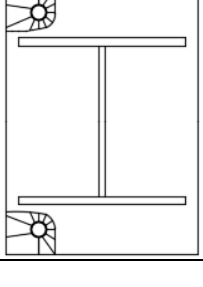
**Kuva 3.5** Myötöviivan approksimoinnissa käytössä olevat parametrit  $x_1$  ja  $y_1$  (Muokattu lähteestä Laine 2007, s. 49).

Lisättäessä Laineen mukainen myötöviivan approksimaatio eurokoodin mukaisiin myötöviivoihin, voidaan saatua tulosta pitää konservatiivisena. Pultin sijaitessa pilarin laippalinjan ulkopuolella, pulttiin kohdistuva voima hakee tukea lähimmästä pilarin kohdasta. Pultin momenttivarsi  $m$  siis kasvaa, mitä kauemmaksi pultti asettuu.

### 3.2.2 Heikon suunnan vetokestävyys

Jäykistämättömien H- ja I-profiilien tapauksissa, sekä pultin sijaitessa laipan yläpuolisella alueella, voidaan T-osan tehollisen kokonaispituuden määrittämisessä ottaa huomioon Amaralin (2014) mukaan tapaukset, joissa myötääminen tapahtuu yksittäisen pultin ympärillä taulukon 3.3 mukaisesti. Menetelmä perustuu vahvan suunnan vetokestävyysmäärittämisessä käytettävien tehollisten pituuksien sovellutukseen.

**Taulukko 3.3** Heikomman suunnan taivutuksen T-osan teholliset pituudet (muokattu lähteestä Amaral, 2014 s.48).

Jäykistämättömän perustusliitoksen T-osan tehollinen pituus heikomman suunnan taivutuksesta	
	$l_{eff,cp} = 2\pi m$
	$l_{eff,cp} = \pi m + 2e$
	$l_{eff,nc} = 4m_x + 1,25e_x$
	$l_{eff,nc} = 2m_x + 0,625e_x + e$

Mikäli liitoksessa vaikuttaa merkittävä heikompaan suuntaan tapahtuva taivutus, tulee laippojen väliin lisätä yksi tai mahdollisesti useampi pultti heikomman suunnan taivutuksen kapasiteetin parantamiseksi. Tällaisissa tilanteissa laippojen väliin voidaan lisätä jäykistelevy, jolloin voidaan varmistua, että koko pultin kapasiteetti saadaan käyttöön. Näillä keinoin saavutetaan tilanne, jossa pohjalevyssä ei tapahdu myötämistä ja taivutuskapasiteetti voidaan määrittää pulttien kapasiteetin avulla. Mikäli T-osan tehollinen pituus halutaan määrittää tällaisessa jäykistetyssä tapauksessa, voidaan tehollisen pituuden laskennassa hyödyntää vahvemman suunnan laskennan periaatteita.

Kotelopilareiden, putkiprofiilien ja laippojen välistä jäykistettyjen H- ja I-profiilien tapauksissa laskennassa voidaan hyödyntää vahvan suunnan laskennan mukaisia periaatteita.

### 3.3 Leikkausvoimien välitys

Leikkausvoimien siirtämiseksi pohjalevyn ja sen alla olevan tuen välillä voidaan käyttää Eurokoodi 3:n mukaan pääsääntöisesti neljää eri menetelmää. Kestävyyden laskenta voi perustua

- 1) Pohjalevyn ja sen alla olevan tuen väliseen kitkaan
- 2) Pulttien leikkautumiseen
- 3) Ympäröivän perustuksen osan leikkautumiseen
- 4) Erillisen leikkauspalan käyttöön.

Näistä yksinkertaisin menetelmä on pelkkään kitkaan perustuva leikkausvoimien siirto, mutta se yksistään harvoin riittää suurien leikkausvoimien kohdalla. Peruspulttien leikkautumisessa esiintyy suunnittelijan näkökulmasta paljon tarkasteltavia näkökulmia. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon muun muassa pohjalevyn reikätoleranssien sekä yhdistettyjen veto- ja leikkausvoimien vaikutus pulttien kestävyyden laskentaan. Varsinkin suurien leikkausvoimien tapauksessa erillisen leikkauspalan käyttö on hyvä menetelmä leikkausvoimien välittämiseksi.

Erillisen leikkauspalan tapauksessa voimasuureiden tarkastelu tehdään leikkauspalan molemman pääkselin suhteen erikseen.

#### 3.3.1 Kitkan vaikutus liitoksessa

Kuten jo edellä mainittiin, yksinkertaisin Eurokoodi 3:n mukainen vaihtoehto leikkausvoiman kestävyyden määrittämiseen on tapaus, jossa leikkausvoima välittyy täysin pohjalevyn ja sen alla olevan tuen välillä. Jotta kitkan vaikutus voidaan ottaa huomioon laskennassa, tulee liitoksen olla puristettu. Kitkan suuruus riippuu puristusvoiman suuruudesta, jolloin kitkaperusteiseksi leikkauskestävyydeksi saadaan

$$F_{f,Rd} = C_{f,d} * N_{c,Ed} \quad (21)$$

missä

$C_{f,d}$  on pohjalevyn ja jälkivalun pinnan välinen kitkakerroin

$N_{c,Ed}$  pilarin puristavan normaalivoiman mitoitusarvo.



Tapauksissa, joissa kitkan vaikutus yksin ei riitä välittämään liitoksessa vallitsevaa leikkausvoimaa, voidaan sen vaikutus ottaa huomioon lisäämällä kitkan leikkauskapasiteetti peruspulttien leikkauskapasiteetin summaan.

### 3.3.2 Peruspulttien leikkautuminen

Käytettäessä peruspultteja leikkausvoiman siirtämiseen, ei voida varmistua leikkausvoiman tasaisesta jakautumisesta pulttien välillä, mikäli pohjalevyn reikätoleranssit ovat suuret. Suuren reikätoleranssin seurauksena osa pulteista voi olla pohjalevyn reunassa kiinni välittäen leikkausvoimia, kun puolestaan osa pulteista ei toimi leikkausta välittävinä ollenkaan. Tällaisissa tapauksissa pulttien aluslevyt tulee hitsata työmaalla pohjalevyyn kiinni, jotta leikkausvoima voi välittyä aluslevyn kautta pohjalevyyn.

Tapauksissa, missä leikkausvoiman siirto toteutetaan pulteilla, esiintyvä leikkausvoima voidaan ajatella pääsuuntien voimaresultanttina. Resultanttivektorin suuruus saadaan kaavalla

$$\sum V_{R,Ed} = \sqrt{V_{y,Ed}^2 + V_{z,Ed}^2} \quad (22)$$

missä

$V_{y,Ed}$  ja  $V_{z,Ed}$  ovat eri akselien suuntaiset leikkausvoimat.

Mikäli pultissa vaikuttaa leikkausvoimien lisäksi samanaikaisesti myös vetovoimia, tulee näiden yhdistettyjen rasituksien toteuttaa Eurokoodi 3:n taulukossa 3.4 esitetty ehto yhdistetystä leikkaus- ja vetovoimasta.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (23)$$

missä

$F_{v,Ed}$  on yhteen pulttiin kohdistuva leikkausvoima

$F_{t,Ed}$  on yhteen pulttiin kohdistuva vetovoima

$F_{v,Rd}$  on yhden pultin leikkauskestävyys (oletuksena, että peruspultin leikkauskestävyys on leikkauskestävyyden määräävä tekijä)

$F_{t,Rd}$  on yhden pultin vetokestävyys.

Mikäli liitoksessa vaikuttaa samanaikaisesti sekä suuri vetävä- että leikkaava voima, on yleensä yksinkertaisempaa suosia eri menetelmää leikkausvoimien siirtämiseksi. Näin

voidaan yksinkertaistaa suunnittelua, eikä voimien yhteisvaikutusta tarvitse ottaa huomioon.

### 3.3.3 Leikkauspala

Suurien leikkausvoimien kohdalla voidaan käyttää erillistä leikkauspala, joka kiinnitetään pohjalevyn alaosaan. Leikkauspala mitoitetaan kantamaan leikkausvoimat joko yhdessä tai molemmissa suunnissa pääakselien suhteen. Käytettäessä leikkauspala peruspultit voidaan mitoittaa vain vedolle ja asennusaikaiselle puristukselle (Ongelin, P. & Valkonen, 2010). Leikkauspalan mitoitus tässä työssä on tehty The Steel Construction Institute (SCI) julkaisun P398 (2013) mukaisesti. Leikkauspalan vaikutusta tarkastellaan, kun leikkauspala toimii I profiili.

Leikkauspala valittaessa tulee valita leikkauspalan profiili ja sen pituus. Leikkausvoima voidaan ajatella jakautuvan kolmiokuormana jälkivalun alapinnasta lähtien koko leikkauspalan pituudelle. Leikkauspalan pituus tulee valita siten, ettei tukivoiman seurauksena leikkauspala ympäröivän betonin puristuskestävyys ylitä. Leikkauspalaan vaikuttavat voimat aiheuttavat myös profiilille paikallista taivutusta, minkä seurauksena profiilin taivutuskestävyys tulee tarkastaa. Tämä paikallinen taivutus otetaan suunnittelussa huomioon myös määräämällä profiilin laipoille kaavan (24) mukainen hoikkuusehto.

$$\frac{b_n}{t_{fn}} \leq 20 \quad (24)$$

missä

$b_n$  on leikkauspalan leveys

$t_{fn}$  on leikkauspalan laipan paksuus.

Leikkausvoiman ja liitoksen tukivoiman välinen epäkeskisyyys aiheuttaa liitokseen sekundäärimomentin  $M_{sec,Ed}$ , jonka seurauksena liitokseen syntyy sekundäärinen veto- ja puristusvoima  $N_{sec,Ed}$ .

$$M_{sec,Ed} = V_{Ed} \left( h_g + \frac{d_{eff,n}}{3} \right) \quad (25)$$

missä

$h_g$  on jälkivalun paksuus

$d_{eff,n}$  on leikkauspalan tehollinen pituus.

Leikkauspalan laipassa vaikuttava sekundäärivoima saadaan konservatiivisesti alla olevalla kaavalla.

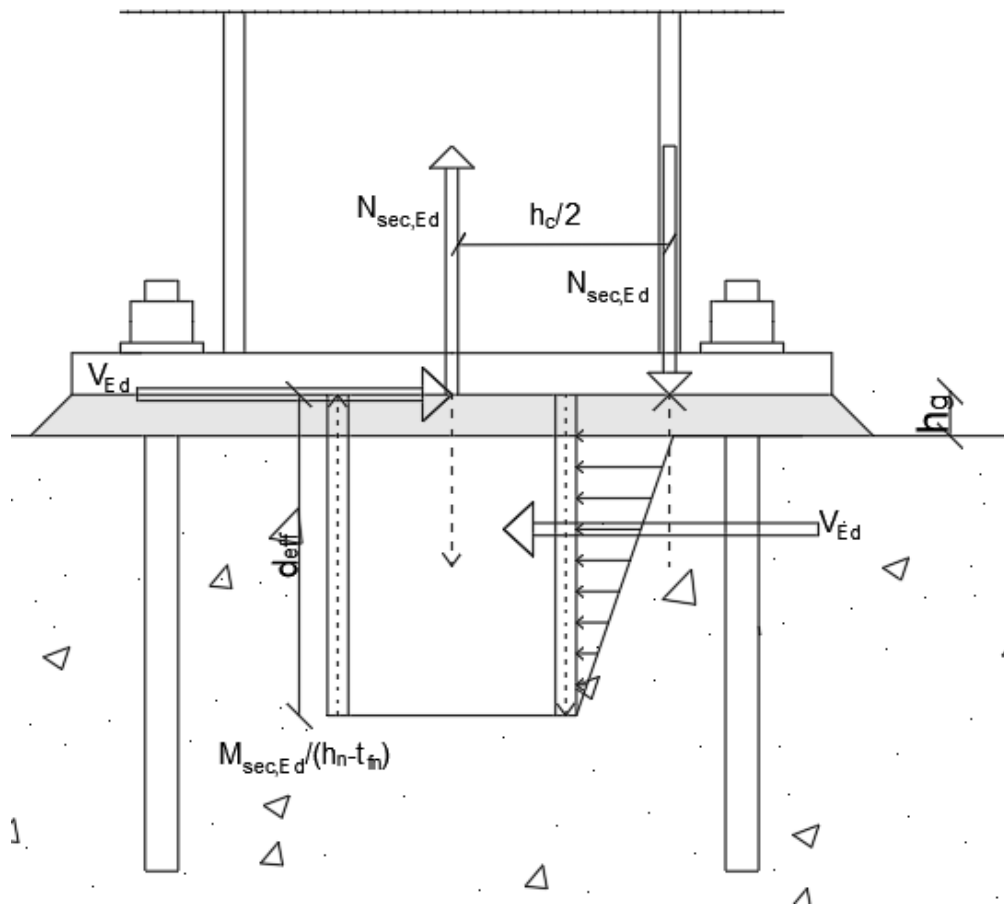
$$N_{sec,Ed} = M_{sec,Ed} / (h_n - t_{fn}) \quad (26)$$

missä

$h_n$  on leikkauspalan korkeus

$t_{fn}$  on leikkauspalan laipan paksuus.

Sekundäärimomentin voimia vastustaa pilarin ja jälkivalun pinnassa voimapari. Puristava voima sijaitsee pilarin laipan alla ja vetävä voima suoraan leikkauspalan keskikohdan päällä.



**Kuva 3.6** Leikkauspalan suunnittelumalli (muokattu lähteestä NCCI: Design of simple column bases with shear nibs, 2013).

Leikkauspalan laipan ja pilarin uuman kestävyys sekundaariselle normaalivoimalle tulee tarkastaa. Leikkauspalan laipan kestävyys voidaan tarkastaa kaavalla

$$N_{sec,Ed} \leq \frac{A_{fn} f_{yn}}{\gamma_{M0}} \quad (27)$$

missä

$A_{fn}$  on leikkauspalan laipan pinta-ala

$f_{yn}$  on leikkauspalan myötölujuus.

Pilarin uuman kestävyys tulee myös tarkistaa sekundäärivoimaa vastaan, kun se vaikuttaa tehollisella alueella

$$b_{eff} = t_{fn} + 2s_w + 5t_{pl} \quad (28)$$

missä

$s_w$  on hitsin pituus.

Leikkauspalan varsinaiseksi leikkauskestävyydeksi valitaan osakestävyyksien pienin arvo. Osatekijöitä leikkauspalan mitoituksessa ovat betonin kestävyys  $V_{Rd.1}$  sekä leikkauspalan leikkauskestävyys  $V_{Rd.2}$ .

$$V_{Rd.1} = b_n d_{eff,n} f_{cd} \quad (29)$$

$$V_{Rd.2} = \frac{A_{vs} f_{ys}}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (30)$$

missä

$A_{vs}$  on leikkauspalan leikkausala

$f_{ys}$  on leikkauspalan myötölujuus.

Osatekijöiden  $V_{Rd.1}$  ja  $V_{Rd.2}$  lisäksi suunnittelijan tulee varmistaa leikkauspalan taivutuskestävyys vaikuttavia voimasuureita vastaan. Mikäli leikkauspalan hitsejä pilarin pohjalevyyn ei toteuteta tasalujina, tulee hitsien tarkastelu ottaa huomioon leikkauskestävyyttä määritettäessä. Pääsääntöisesti hitsaukset leikkauspaloissa toteutetaan tasalujina. Tapauksissa, joissa leikkausrasituksen suhde plastisuusteorian mukaiseen leikkauskestävyyteen on pienempi kuin 50 %, ei leikkausrasituksen ja taivutusmomentin yhteisvaikutusta tarvitse standardin EN 1993-1-1 (2005) kohdan 6.2.10 mukaan tarkastaa. Kun leikkausrasituksen suhde plastisuusteorian mukaiseen leikkauskestävyyteen on yli 50 %, poikkileikkauksen kestävyden mitoitusarvo lasketaan käyttäen pienennettyä myötörajaa kaavan (31) mukaisesti.

$$(1 - \rho) f_y \quad (31)$$

Kaavan termi  $\rho$  lasketaan kaavalla

$$\rho = \left( \frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (32)$$

missä  $V_{pl,Rd}$  on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys. Leikkauspalan taivutuskestävyyttä tarkastellessa molempien pääakselien suhteen, tulee leikkauspalassa vaikuttavat momentit ja taivutuskestävyydet pääakselien suhteen. Momenttivartena voidaan pitää kuvan 3.6 mukaan pohjalevyn alapinnan ja kolmiokuorman voimaresultantin etäisyyttä. Plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys lasketaan kaavalla

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (33)$$

missä  $W_{pl}$  on profiilin taivutuskestävyys.

### 3.4 Voimien yhteisvaikutuksen tarkastelu

Momentin vaikuttaessa kahden pääakselin suhteen perustusliitoksen käyttäytyminen muuttuu merkittävästi. Esimerkiksi eurokoodi 3:n mukainen ajattelumalli puristuspuolelta sijainnista sekä jännityksien jakautumisesta puristusalueelle tulee kyseenalaiseksi, sillä liitoksen neutraaliakselin sijainti ja vaikutussuunta vaihtelevat momenttien aiheuttamien epäkeskisyyksien mukaisesti. Liitoksen jäykkyydestä riippuen, paikallisten jännityshuipujen kohdat voivat vaihdella hyvinkin suuresti.

Yksi ratkaisuehdotus eri suunnan momenttien yhteisvaikutuksen huomioon ottamiseen on Gonzalon (2010) mukaan ratkaista ongelma muodostamalla epälineaarit yhtälöt liitoksessa vaikuttavien voimasuureiden laskemiseksi. Pohjalevy oletettaisiin käyttäytyvän jäykästi ja jännitykset puristus- ja vetopuolella noudattaisivat lineaarisesta jännitys-kaumaa. Menetelmässä vaikuttavien momenttien suhteista ja esitietovaatimuksien perusteella voitaisiin määrittää neutraaliakselin suunta ja sijainti, joiden avulla liitoksen komponenteissa vaikuttavat voimasuureet voitaisiin selvittää. Tämän kyseisen menetelmän käyttö tässä suunnittelutyökalussa rajattiin aika nopeaa pois, sillä menetelmä on hyvin monimutkainen ja laskennallisesti hidas.

Tässä diplomityössä heikompaan suuntaan tapahtuvan taivutuksen laskenta on suoritettu pääsääntöisesti samoilla laskentaperiaatteilla, kuin mitä käytetään liitoksen vahvan suunnan laskennassa. Eurokoodin mukaisia, vahvaan suuntaan tapahtuvan taivutuksen periaatteita on sovellettu heikon suunnan taivutuskapasiteettien laskemiseksi. Kahteen suuntaan tapahtuva taivutus voidaan ottaa konservatiivisesti huomioon olettamalla  $M_y$  ja  $M_z$  momenttien käyttäytyvän lineaarisen vuorovaikutuskäyrän mukaisesti. Mikäli momenttien yhteisvaikutusta halutaan tarkastella tarkemmin ilman turvautumista FEM-ohjelmistoihin, tulee eri menetelmien toimivuutta tutkia tarkemmin.

Lineaarisia yhteisvaikutuskaavoja voidaan käyttää tapauksissa, joissa halutaan ottaa kantaa samanaikaisesti vallitsevan normaalivoiman, kahden pääsuunnan taivutuksen ja leikkauksen vaikutus. Yhteisvaikutuskaavojen käyttöä varten liitosta koskevat kapasiteettitiedot tulee olla selvillä niin puristus- kuin vetopuolellakin. Pohjalevyn oletetaan olevan niin paksu, että liitos voidaan ajatella toimivan jäykän pohjalevyn tavoin.

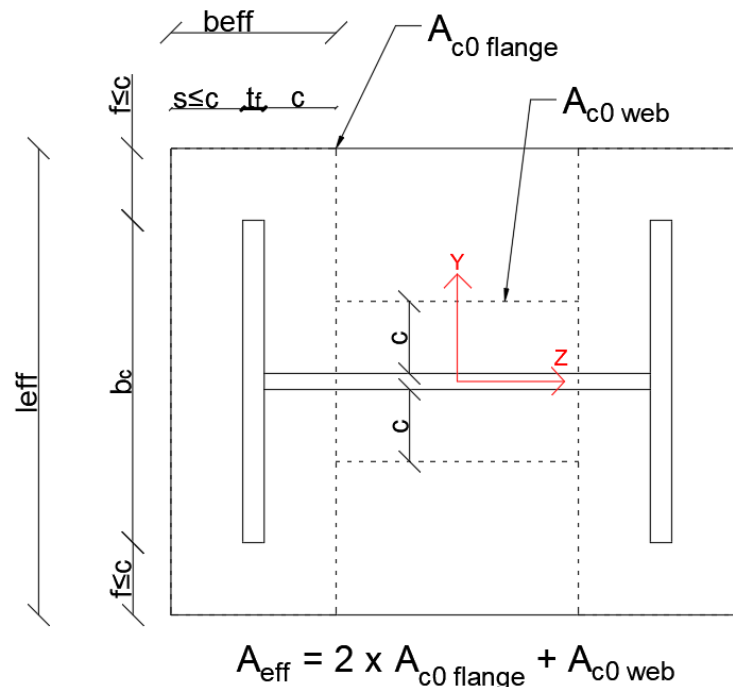
Liitoksen kestävyys puristavia- sekä vetäviä voimia vastaan voidaan todeta, kun alla olevien kaavojen ehdot toteutuvat.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{C.Rd}} + \left| \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.C.Rd}} \right| + \left| \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.C.Rd}} \right| \leq 1 \quad (34)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{T.Rd}} + \left| \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.T.Rd}} \right| + \left| \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.T.Rd}} \right| \leq 1 \quad (35)$$

Yhteisvaikutuskaavoissa normaalivoimakapasiteetit määritetään tapauksille, joissa voiman ajatellaan jakautuvan koko liitokselle puhtaasti puristuksena tai vetona. Tarkastellessa puristuskestävyyttä, teräksen ja betonin välisessä puristuskapasiteetissa tehollisena puristusalueena käytetään koko jakautumisaluetta kuvan 3.7 mukaisesti. Tällöin normaalivoiman puristuskestävyydeksi saadaan

$$N_{C.Rd} = f_{jd} A_{eff} \quad (36)$$



**Kuva 3.7** Täysin puristetun liitoksen tehollinen puristusalue.

Normaalivoiman vetokestävyydessä puolestaan ajatellaan koko normaalivoiman jakautuvan tasaisesti jokaiselle pultille. Normaalivoiman vetokestävyydeksi saadaan

$$N_{T,Rd} = n F_{t,Rd} \quad (37)$$

missä

$n$  on käytettävien pulttien määrä

$F_{t,Rd}$  on yhden pultin vetokestävyys.

Mikäli normaalivoima liitoksen vetokestävyyttä laskettaessa on puristusta, niin se alentaa liitoksen käyttöastetta. Suuren puristuksen tapauksissa tämä voi tarkoittaa jopa sitä, että liitoksen käyttöaste vetoa vastaan saa negatiivisen arvon, sillä puristuksen määrä on niin paljon suurempi kuin taivutuksesta aiheutuvat käyttöasteet. Tällöin liitos voidaan olettaa kokonaan puristetuksi.

Momenttikapasiteetti puristuspuolella sekä vahvassa että heikossa suunnassa saadaan kertomalla puristuskestävyys liitoksen momenttivarrella  $z$ . Liitoksen ollessa puristettuna, momenttivarrella toimii pilarin laippojen keskikohtien välinen etäisyys. Tällä momenttivarrella saatu kestävyys on konservatiivinen tilanteessa, missä vain liitoksen toinen puoli on puristettu, ja toinen on vedolla.

$$M_{y.C.Rd} = F_{c,Rd} z_y \quad (38)$$

$$M_{z.C.Rd} = F_{c,Rd} z_z \quad (39)$$

Myös liitoksen momenttikapasiteetit vetoa vastaan saadaan vastaavasti kertomalla vahvemman- ja heikomman suunnan T-osan vetokapasiteetti liitoksen momenttivarrella. Kun liitoksessa esiintyy vetoa, liitoksen momenttivarrella toimii etäisyys vedetyn pulttiryhmän keskiöstä vastapuolen pilarin laipan keskiosaan.

$$M_{y.T.Rd} = F_{T,Rd} z_y \quad (40)$$

$$M_{z.T.Rd} = F_{T,Rd} z_z \quad (41)$$

Mikäli liitoksessa esiintyvät leikkausvoimat välitetään kitkan ja pulttien avulla, voidaan leikkausvoimien eri suuntien komponentit yhdistää resultanttivoimaksi kaavan (22) avulla. Näin leikkausvoimakestävyys saadaan kitkakestävyyden ja pulttien leikkauskestävyyden summana. Tällöin leikkausvoiman tulee toteuttaa alla olevan kaavan mukainen ehto.

$$V_{R,Ed} \leq F_{f,Rd} + n F_{v,Rd} \quad (42)$$

missä

$n$  on käytettävien pulttien määrä

$F_{f,Rd}$  on kitkaan perustuva leikkauskestävyyden mitoitusarvo

$F_{v,Rd}$  on yhden pultin leikkauskestävyys.

Leikkauspalaa käytettäessä leikkausvoimat tarkastetaan pääakselien suhteen erikseen, jolloin leikkausvoimien tulee toteuttaa kaavan (43) mukainen ehto. Kaavassa pääakselien leikkauskapasiteetin määrittämisessä on otettu huomioon betonin puristuslujuus sekä leikkauspalana toimivan profiilin leikkauskestävyys.

$$\left| \frac{V_{y,Ed}}{V_{y,Rd}} \right| + \left| \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} \right| \leq 1 \quad (43)$$

Kaavan (43) kimmoteorian mukainen leikkauksen kestävyystarkastelu johtaa todella konservatiivisiin tuloksiin. Myös leikkauspalan taivutuskestävyyden taivutuskestävyys voidaan todeta kimmoteorian mukaan kaavalla

$$\left| \frac{M_{jy,Ed}}{M_{y,Rd}} \right| + \left| \frac{M_{jz,Ed}}{M_{z,Rd}} \right| \leq 1 \quad (44)$$

missä

$M_{jy,Ed}$  on y-suuntaisen leikkausvoiman aiheuttama momentti

$M_{jz,Ed}$  on z-suuntaisen leikkausvoiman aiheuttama momentti

$M_{y,Rd}$  on taivutuskestävyys y-suunnassa

$M_{z,Rd}$  on taivutuskestävyys z-suunnassa.

Tarkempien leikkauskestävyyksien ja taivutuskapasiteettien saamiseksi voidaan käyttää plastisuusteorian mukaista kestävyystarkastelua.



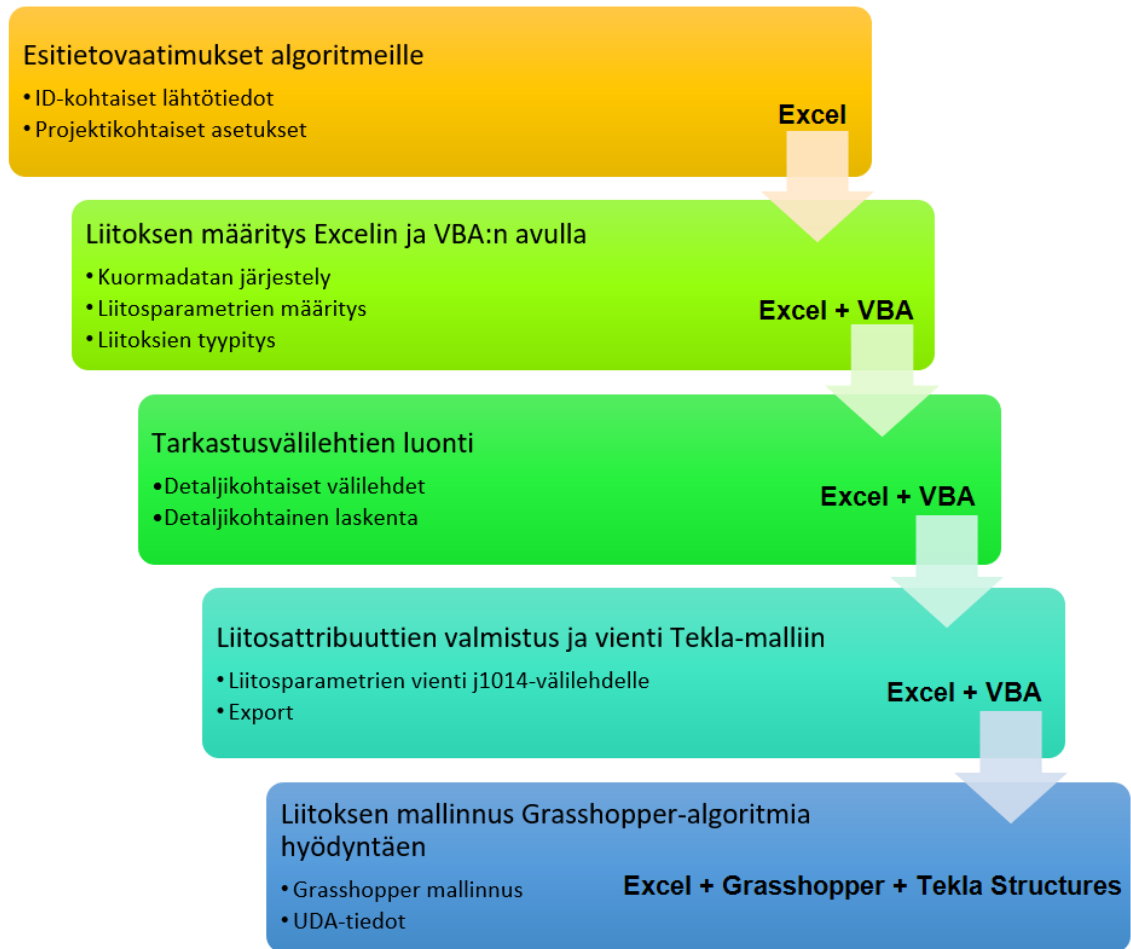
## 4. SUUNNITTELUTYÖKALUN TOIMINTA

Tässä työssä työkalulla tarkoitetaan toiminnallisuuden kokonaisuutta, joka on muodostettu halutun tehtävän suorittamiseksi. Tämän diplomityön aikana muodostettu työkalu on Excel-työkirjaan ja Grasshopper-tiedostoon muodostettu kokonaisuus, joihin sisällytettyjen toiminnallisuuksien avulla voidaan liitoksien esitietovaatimusten perusteella luoda Tekla Structures-tietomalliin peruspulttiliitokset. Esitietovaatimusten saamiseksi käytetään Swecon toista sisäistä suunnittelutyökalua. Tässä luvussa esitellään näiden esitietovaatimusten tuominen tämän diplomityön aikana luodulle työkalulle, ja luodun työkalun toimintavaiheita tarkastellaan yksityiskohtaisemmin. Luodun työkalun toiminta koostuu yksinkertaisuudessaan seuraavista vaiheista:

- 1) Esitietovaatimusten tuominen laskentatyökalulle Exceliin
- 2) Liitoksen määrittäminen algoritmiavusteisesti hyödyntäen Microsoftin Virtual Basics Application (VBA) ohjelmointikieltä.
- 3) Määritettyjen liitosdetaljien tarkastusvälilehtien luonti Exceliin
- 4) Liitosattribuuttitiedostojen valmistus sekä tuonti Teklaan
- 5) Liitoksen mallinnus Tekla Structures tietomalliin Grasshopper-algoritmia hyödyntämällä.

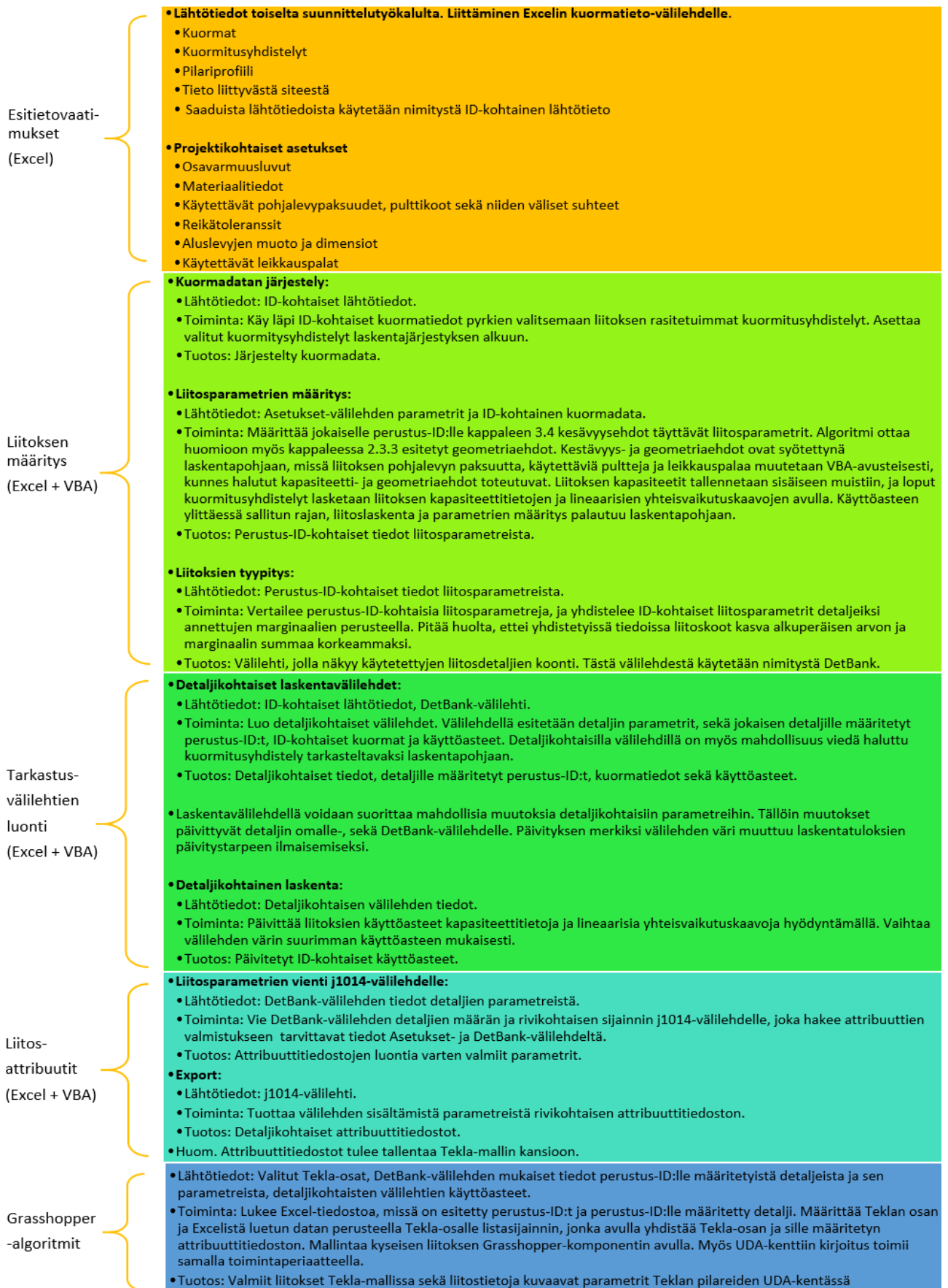
### 4.1 Algoritmien muodostama kokonaisuus

Suunnittelutyökalun algoritmiavusteinen kokonaisuus on sarja useita eri algoritmimoduuleja, joiden peräkkäisten suoritusten avulla päästään esitietovaatimuksista Tekla-malliin mallinnettuihin liitoksiin. Myös algoritmimoduuleissa prosessi on jaettu pienempiin ja yksinkertaisempiin alialgoritmeihin. Alialgoritmeja jaetaan pienempiin osiin, jotta yksittäisen alialgoritmin ongelman on helpommin ratkaistavissa. Algoritmin jäsentely pienempiin alialgoritmeihin myös selkeyttää algoritmin muodostamista ja helpottaa kokonaisuuden ymmärtämistä. Algoritmimoduulit ja niiden tarkastelu on jaettu tässä työssä luvun 4 alussa esitettyjen vaiheiden mukaisesti. Algoritmimoduulit ovat esitettynä kuvan 4.1 prosessikaaviossa.

**PROSESSIKAAVIO**

**Kuva 4.1** Työkalun algoritmimoduulien prosessikaavio.

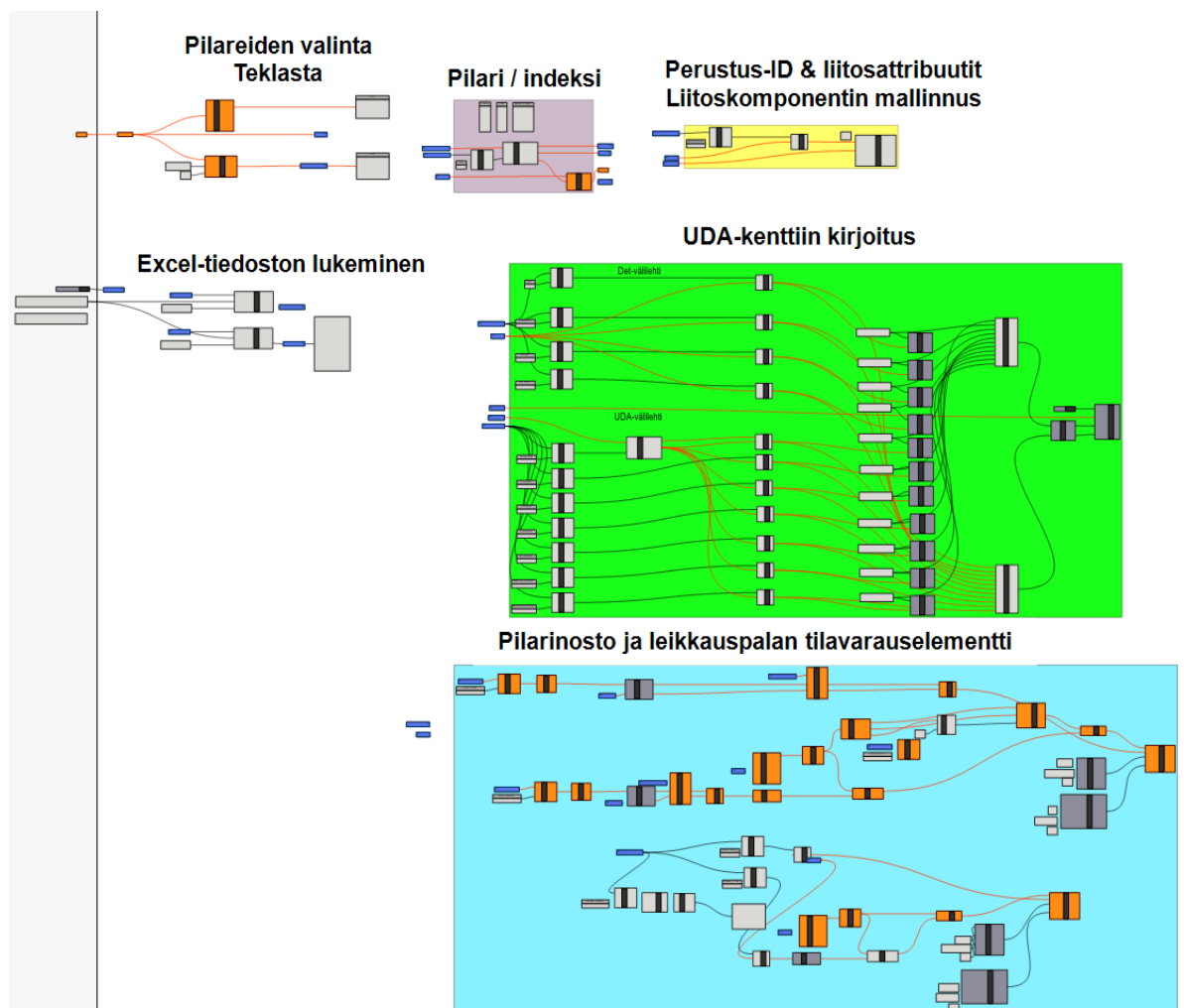
Prosessikaaviossa esiintyvät moduulit tulee suorittaa kyseisessä järjestyksessä, sillä seuraava moduuli käyttää edellisen moduulin tuloksia lähtötietoina. Esitietovaatimuk-  
 sena esitetyt projektikohtaiset asetukset on ainoa käyttäjän manuaalista syöttöä vaativa  
 kohta. Tämä kohta on kuitenkin esitetty prosessikaaviossa sen tärkeyden takia, sillä se  
 on suoraan vaikutuksessa muiden algoritmimoduulien muodostamiin tuloksiin. Algoritmi-  
 moduulien tarkastelu lähtötietojen, toiminnan ja niiden tuotoksen osalta on esitetty pää-  
 piirteineen kuvassa 4.2.



**Kuva 4.2** Algoritmimoduulien lähtötiedot, toiminta sekä lopputuotos.

Grasshopper-algoritmin suoritus on jaettu kuuteen eri vaiheeseen:

- 1) Osien valitseminen Teklasta Structures -ohjelmasta
- 2) Excel-tiedoston ja sen välilehtien lukeminen
- 3) Tekla Structures -ohjelman osan ja Excel-tiedostosta löytyvän datan yhdistäminen oikean detaljin löytämiseksi
- 4) Liitoskomponentin mallinnus
- 5) Mahdollisen pilarinoston ja leikkauspalan tilaelementin mallinnus
- 6) Tekla Structures -ohjelman osien UDA-kenttiin kirjoitus.



**Kuva 4.3** Grasshopper-algoritmin suoritusvaiheet.

Algoritmien toteutuksen ja tuloksien yksityiskohtaisempaa suoritusta ei tässä työssä ole esitetty, sillä ne eivät ole julkisia. Algoritmien toimintaa on pyritty esittelemään yleisellä tasolla kertomalla niiden toteutuksesta sanallisesti sekä havainnollistavia kuvia hyödyntäen. Myös luvun 5 tapaustutkimuksessa esiteltävän kohteen tiedot ovat määritelty siten, ettei projektikohtaisia tietoja kerrota liian yksityiskohtaisesti.

## 4.2 Työkalun esitetietovaatimukset

Työkalun lähtötietoina toimii tiedot liitospaikasta, pilariprofiilista, sekä kuormitusyhdistelyjen mukaisista kuormituksista. Lisäksi leikkauspalan suuntaa määritettäessä on olennaista tietää, mikäli liitoskohtaan kiinnittyy yksi tai useampi vinoside. Nämä eri liitoskohtia kuvaavat tiedot saadaan noudettua toisella Swecon sisäisellä työkalulla, joka yhdistää liitostiedot Tekla Structures (Tekla) sekä Robot Structural Analysis (Robot) ohjelman välillä. Liitoskohdan tunnistaminen perustuu menetelmään, jossa Teklan User Defined Attributes (UDA) kenttään syötetty perustus-ID toimii liitoksen tunnuksena. Tämän tunnuksen ja liitoksen sijaintitietojen avulla voidaan yhdistää eri ohjelmien rajapintojen välillä liitokseen toteutuksen kannalta tarvittavia tietoja. Perustus-ID:tä käytetään myös myöhemmin liitoksen mallinnusvaiheessa, kun perustus-ID:lle määritetään liitostyyppi Grasshopper avusteisesti

Liitoskohtaisen datan hakeminen tapahtuu valitsemalla Tekla- ja Robot-mallin liitoskohtien osat ja Robotissa esiintyvät kuormitusyhdistelyt. Tämän jälkeen Swecon toisen sisäisen työkalun suoritus toteutetaan, jonka jälkeen liitospaikan lähtötiedot kopioituvat leikepöydälle, josta ne liitetään tämän diplomityön aikana luodun työkalun Excel-työkirjan kuormatieto-välilehdelle soluun A1. Näin päästään tilanteeseen, jossa lähtötiedot ovat työkirjan soluissa VBA-algoritmien ymmärtämässä muodossa.

TS base ID	Robot node	Profile	Gamma	LC number	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	Brace?
[-]	[-]	[-]	[deg]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]
113	113	WI400-12-15X300	0	100	599	-0,5	0,2	0	-3,5	-2	NO
113	113	WI400-12-15X300	0	101	599	-0,5	0,4	0	-5,4	-2	NO
113	113	WI400-12-15X300	0	102	599	-0,5	-0,1	0	-1,6	-2	NO
113	113	WI400-12-15X300	0	103	599	-0,7	0,2	0	-3,6	-2,4	NO
113	113	WI400-12-15X300	0	104	599	-0,4	0,1	0	-3,4	-1,6	NO
113	113	WI400-12-15X300	0	111	591	0,5	45,5	0	-160,4	-0,6	NO
113	113	WI400-12-15X300	0	112	591	-1,4	-46	0	137,3	-2,7	NO
113	113	WI400-12-15X300	0	113	591	-2,7	-59,8	0	132,1	-12,7	NO

**Kuva 4.4** Havainnekuva perustus-ID-kohtaisista lähtötiedoista.

Perustus-ID-kohtaisien lähtötietojen tuonnin jälkeen Excel-työkirjaan asetetaan asetukset-välilehdelle projektikohtaiset valinnat, kuten esimerkiksi:

- 1) Maakohtaiset osavarmuusluvut
- 2) Käytettävät pultit ja pohjalevyt, sekä niiden väliset suhteet

- 3) Käytettävät materiaalitiedot (betonin- ja jälkivalun lujuusominaisuudet sekä käytettävä teräslaatu)
- 4) Käytössä olevat levypaksuudet
- 5) Reikätoleranssit
- 6) Aluslevyjen muoto ja dimensiot
- 7) Päätös ankkurointilevyjen käytöstä.

Asetuksissa voidaan myös syöttää työkalulle tieto leikkausvoimien välitystavasta: Halu-  
tuille liitoskohdille voidaan pakottaa leikkauspalan käyttö. Leikkausvoiman siirto pulteilla  
voidaan estää myös kokonaan jokaisessa liitoskohdassa. Käytettävien leikkauspalojen  
tiedot tulee tarkastaa projektikohtaisesti, sillä esimerkiksi käytettävän betonin vahvuus  
vaikuttaa leikkauspalojen pituuksiin.

Laskennallisen mitoituksen lisäksi työkalun algoritmeihin on sisällytetty ehtoja, joiden  
avulla otetaan huomioon liitoksen visuaalisen tarkastelun luomia tarpeita. Nämä ehdot  
tulee syöttää algoritmin lukemaan taulukkoon, sillä ne sisältävät oleellisen datan algorit-  
min käyttämistä levypaksuuksista sekä käytettävistä pulteista. Näin luodaan verrannolli-  
suus levypaksuuden ja käytettävien pulttien välille, jonka avulla saadaan yhtäläisyyttä eri  
liitostyyppien välille. Taulukon 4.1 ensimmäinen datarivi toimii myös suunnitteluprojek-  
tissa käytettävien liitoksien vähimmäisarvojen perustana.

**Taulukko 4.1** Levypaksuuden ja peruspultin keskinäinen vuorovaikutus.

Käytettävät levypaksuudet t_pl [mm]	Pultti / halkaisija	
t_pl range	Tyyppi	d
25	HPM	24
30	HPM	30
40	HPM	39
50	PPM	39
60	PPM	45
80	PPM	52
100	PPM	60

Valittaessa pohjalevyn paksuuden ja käytettävän pulttityypin riippuvuutta, tulee liitoksen  
peruskomponenttien asettamat rajoitukset liitoksen kestävyydelle ottaa huomioon. Pak-  
sujen pohjalevyjen, hauraiden ja heikkojen pulttien kohdalla pohjalevyn myötäämiseen  
tarvittavat voimat ovat suurempia kuin pulttien asettamat kestävyudet, joten pultin kestä-  
vyys muodostuu usein liitoksen rajoittavaksi tekijäksi. Käytettäessä erittäin vahvoja pult-  
teja, pohjalevyä voidaan tarvittaessa jäykistää jäykistelevyjen avulla.

### 4.3 Kuormadatan järjestely

Laskennan tehostamiseksi algoritmi käy läpi annetut kuormatiedot valikoiden jokaisesta liitoskohdasta voimaperusteisesti kuusi kuormitusyhdistelmää. Kuormadatan järjestely tapahtuu kuormadatan järjestely -algoritmimoduulilla. Valinta kohdistuu tapauksiin, joissa esiintyy:

- 1) Suurin puristava normaalivoima  $\max(N)$
- 2) Suurin vetävä normaalivoima tai pienin puristava normaalivoima  $\min(N)$
- 3) Suurin liitoksen vahvassa suunnassa vaikuttava leikkausvoima  $\max(|Qy|)$
- 4) Suurin liitoksen heikossa suunnassa vaikuttava leikkausvoima  $\max(|Qz|)$
- 5) Suurin liitoksen vahvassa suunnassa vaikuttava momentti  $\max(|My|)$
- 6) Suurin liitoksen heikossa suunnassa vaikuttava momentti  $\max(|Mz|)$

Suurimmissa osissa tapauksia nämä kyseiset kuormitusyhdistelyt toimivat liitoksen määrävinä kuormitustapauksina. Kuormadatan järjestelyn ideana on keventää algoritmin käsittelemää kuormadataa liitoksen esimääritysvaiheessa.

### 4.4 Liitosparametrien määrittäminen

Liitoksen parametrien valinta ja muodostuneen liitoksen soveltuvuuden tarkastelu toteutetaan Excel-työkirjaan muodostuneen laskentapohjan sekä VBA ohjelmoinnin yhteistyönä. Laskentapohja on Excel-välilehdelle muodostettu kokonaisuus, johon on syötetty työn lukujen 2 ja 3 mukaiset geometriaehdot ja laskentakaavat.

Liitosparametrien määrittäminen -algoritmi hyödyntää kuormadatan järjestely -algoritmin valitsemia kuutta eri kuormitusyhdistelyä syöttämällä kuormituskohtaiset tiedot laskentapohjalle. Laskentapohjassa algoritmi määrittää perustus-ID:lle liitosparametrit, jotka täyttävät laskentapohjassa määritetyt kestävyys- ja geometriaehdot. Tämän jälkeen liitoskapasiteetit tallennetaan VBA:n sisäiseen muistiin, jossa ne lasketaan lineaarisia yhteisvaikutuskaavoja hyödyntäen. Mikäli yhteisvaikutuskaavoissa kuormitusyhdistelyyn käyttöaste ylittyy, algoritmi muuttaa laskentapohjaa hyödyntäen liitosparametreja, kunnes laskentapohjan ehdot täyttyvät. Tämän jälkeen uudet kapasiteettitiedot tallennetaan, ja loput kuormitusyhdistelyt tarkastetaan yllä esitettyä menetelmää hyödyntäen.

Excel-työkirjan arvojen muuttaminen ohjelmoinnin avulla on hidasta. Arvojen muuttaminen olisi paljon tehokkaampaa, mikäli kaikki data tallennettaisiin sisäiseen muistiin oikeantyyppiselle datatyyppille, ja arvojen päivittäminen hoidettaisiin sisäisen muistin kautta.

ja vasta lopputulos tulostettaisiin näkyviin työkirjalle. Mahdollisten ongelmakohtien kohdalla kyseinen menettelytapa osoittautuu kuitenkin haasteelliseksi, koska algoritmin suorituksen tahattomassa keskeytyksessä tähän mennessä suoritettut laskentatiedot menetetään. Tästä syystä tulosten kirjaaminen työkirjaan on mahdollista työkalun kehitysvaiheessa jokaisen lasketun ID:n kohdalla, mikäli käyttäjä näin haluaa varmistua algoritmin toiminnasta.

Vaikka liitoksen määrittäminen ohjelmoimalla pelkän sisäisen muistin avulla olisi paljon nopeampaa, niin laskentavaiheiden tarkastaminen ja mahdollinen muokkaaminen olisi paljon vaikeampaa. Lisäksi taulukkokirjassa esitetty laskentapohja luo myös visuaalisen kuvauksen liitokselle, ja on myös hyödyllinen käyttäjille, jotka haluavat käyttää kyseistä laskentapohjaa ilman algoritmista apua. Työn kannalta paras tulos olisi saatu, mikäli kyseinen laskentapohja olisi muodostettu sekä muistin sisäisesti, että myös taulukkokirjassa. Tämä menettelytapa olisi kuitenkin aiheuttanut kohtuuttoman suuren ohjelmointityön käytössä olevaan aikaan nähden.

Luvun 4.4 alaluvuissa esitetään liitosparametrien määrittämisalgoritmiin vaikuttavia osatekijöitä. Alaluvuissa esitetään myös liitosparametrien määrittämisessä tehtyjä valintoja, sekä työkalun rajoitteita.

#### 4.4.1 Liitoksen lähtötiedot

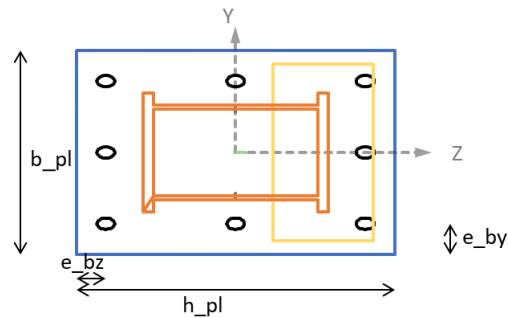
Liitosta määritettäessä algoritmin ensimmäinen tehtävä on tuoda laskentapohjalle tiedot tarkasteltavan liitoskohdan profiilista, sekä kuormitusyhdistelyn voimasuureista. Pilariprofiilin seinämävahvuuksien sekä lähtöparametrien minimiarvon perusteella algoritmi asettaa pohjalevyille levypaksuuden, joka toimii laskennan aloituskohtana. Lähtötiedoissa myös tarkastellaan, mikäli pilarille on asetettu vaatimukset käytettävistä pulttimääristä. Esimerkkinä kyseisestä esitiedosta toimii iso hitsattu kotelopilari, jolle on annettu visuaalisesta tarkastelusta johtuen minimivaatimus, jonka mukaan laipan päällisiä pultteja on minimissään 3 kappaletta, ja myös uumien kohdalta löytyy pultit. Lähtötietojen tuontia laskentapohjalle on havainnollistettu alla olevissa kuvissa.

Pilarin profiilin geometria ja poikkileikkaussuureet			
Tyyppi	Hitsattu		Slider
Profiili	Kotelo		Slider
h	400	400	mm
b	450	450	mm
t <sub>r</sub>	32	32	mm
t <sub>w</sub>	32	32	mm
c <sub>profiili</sub>	25	25	mm

**Kuva 4.5** Pilarin geometrian tuonti laskentapohjaan.



## POHJALEVYN GEOMETRIA



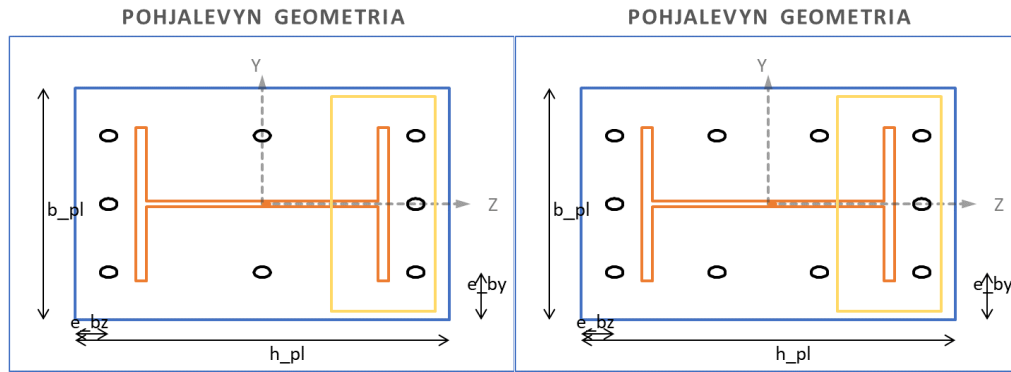
**Kuva 4.6** Pilarin geometriatietojen tuonti laskentapohjaan. Kuvassa keltainen alue kuvaa laipasta c-mitan päässä olevaa puristusalaa.

Laskentapohjissa vapaasti kirjoitettavat- ja tietoa sisältävät solut on eritelty eri värien avulla. Tietoja pitävät solut myös lukitaan, ettei niiden sisältämiin kaavoihin tehdä vahingossa muutoksia.

#### 4.4.2 Pultit ja geometriaehdot

Geometriatietojen ja voimasuureiden avulla laskentapohja laskee rasitukset liitoksen eri peruskomponenteille Eurokoodi 3:n mukaisesti. Laskentapohja yhdessä VBA ohjelmoinnin kanssa etsii liitokselle ratkaisun, joka täyttää Eurokoodin laskentamenetelmien mukaiset vaatimukset. Algoritmi säätelee levypaksuutta, pohjalevyn dimensioita, leikkauspalan profiilia ja käytettäviä pultteja tarpeen mukaan, kunnes liitosvoimat kestävä loppu-tulos saavutetaan.

Liitoksen pulttimäärää määrittäessä ohjelma ottaa huomioon käyttäjän määrittämän arvon suurimmasta pulttimäärästä. Pulttimäärien maksimiarvot annetaan erikseen laipan ylä- ja alapuolisille pulteille. Pulttien määrää on kuitenkin rajoitettu siten, että laipan yläpuolelle tulevia pultteja voi olla enintään 5 kappaletta, ja laippojen väliin jääviä pultteja 3 kappaletta. Mallinnusvaiheessa käytettävä komponentti aiheuttaa rajoituksia laipan väliin jääville pulteille, sillä pulttien etäisyys toisistaan tulee Teklan komponentin mukaan olla vakio. Suunnittelussa tämä tarkoittaa sitä, että laipan alapuolisen rivin sijaintia ei voida tarkemmin määrittää, eikä pulttiriviltä näin ollen saada maksimaalista laskenta-hyötyä.



**Kuva 4.7** Pulttien sijaintirajoitus havainnollistettuna pulttimäärän kasvaessa.

Pulttien lisäyksen yhteydessä myös pulttien reunaetäisyyksiä koskevat tiedot päivitetään. Pultin reikien pääty ja reunaetäisyyksien arvoksi on valittu  $1,2d_0$  ja reikien keskiövälien etäisyydeksi  $2,4d_0$ . Halutessaan näitä arvoja pääsee vaihtamaan laskentapohjasta aukaisemalla lukitut solut ja muuttamalla solun lauseketta.

Eurokoodin mukaisesti pulttien tulee sijaita laippalinjan sisäpuolella. Mikäli pulttien välinen etäisyys toisistaan on pienin määritetty arvo ja pultit sijaitsevat laippalinjan ulkopuolella, liitokseen lisätään laipan jatkoksi jäykistelevy.

Määritettäessä pultin etäisyyttä pilariprofiilin laippaan, käyttäjä voi määrittää pulttikoosta riippuvan parametrin asetukset-välilehdelle. Käytettäessä ylisuuria reikiä ja suuria aluslevyjä, aluslevyn ja pilariprofiilin laipan välinen vaatima etäisyys voi kasvaa hyvinkin suureksi. Mikäli pulttien etäisyyksiä laipasta ei erikseen ole määritetty, ohjelma määrittää pultin sijainnin lähelle laippaa siten, ettei aluslevy törmää laipan hitseihin. Näin pultin sijaintia saadaan optimoitua siten, pultti saadaan mahdollisimman lähelle laippaa.

### 4.4.3 Jäykisteet

Jäykisteiden valinnassa tulee ottaa huomioon esimerkiksi tarvittavan puristusalueen tehollinen määrä, kuten myös heikomman suunnan taivutuksen aiheuttama veto pulteille. Kuten työn edellä luvun 3 alussa on mainittu, ei Eurokoodi ota varsinaisesti kantaa heikomman suunnan taivutukseen. Pultin täyden vetokapasiteetin varmistamiseksi liitoksessa työkalu asettaa jäykisteet myös laippojen väliin, mikäli heikomman suunnan taivutuksesta aiheutuu pultin lisäys laippojen väliin.

Sekä pitkittäis- että poikittaisjäykisteiden paksuudeksi valitaan konservatiivisesti varmallalla puolella oleva arvo  $b/10$ , missä  $b$  on jäykistelevyn leveys. Tällä arvolla varmistetaan, että jäykiste ei menetä stabiiliuttaan vääntönurjahtamalla. Jäykisteen korkeudeksi

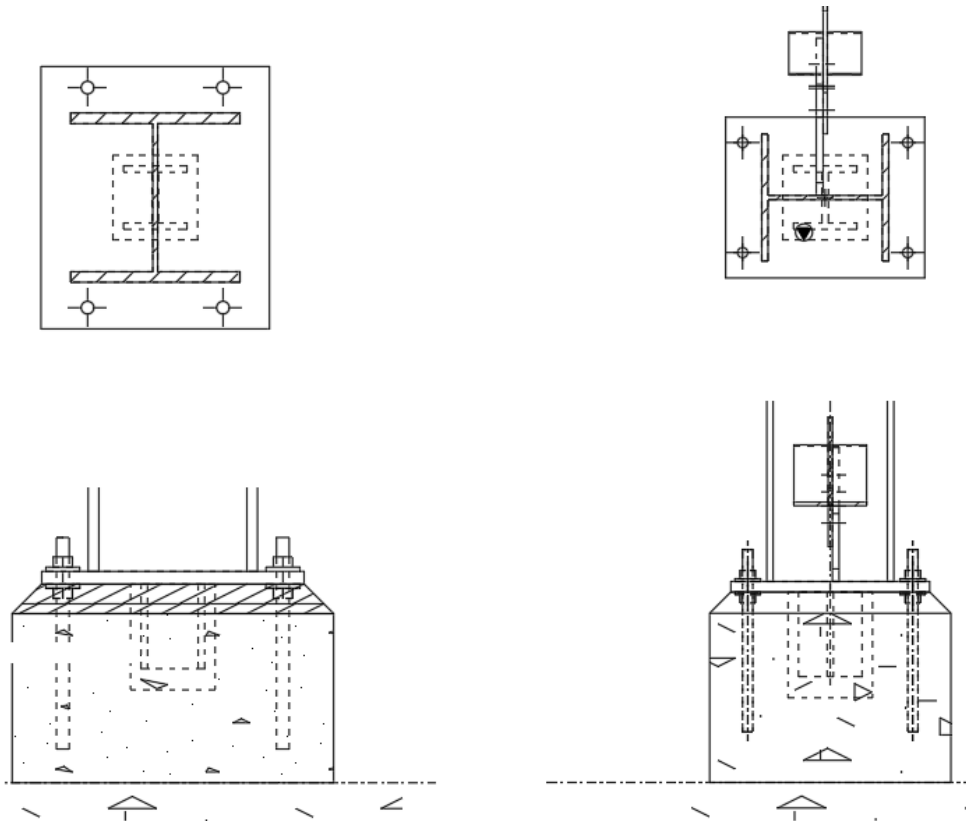
valitaan puolestaan yksinkertaistetusti arvo *2b*. Kyseiset yksinkertaistukset ovat voimassa lattateräsjäykisteille, joiden teräslaadun myötölujuus on enintään 355 MPa. (Ongelin & Valkonen 2010, Kuva 2.48) Lujempia teräslaatuja käytettäessä jäykistelevyjen dimensiot tulee määrittää tarkemmin laskennallisesti.

Mikäli liitoksen pohjalevyn taivutuskestävyys tulee rajoittavaksi tekijäksi, tulee pohjalevyn paksuutta kasvattaa tai liitoksen taivutuskestävyyttä parantaa jäykistämällä liitos vahvasti. Jäykistetyssä liitoksessa käyttäjän tulee erikseen tarkastella, mitkä myötökuviot ovat mitoituksen kannalta valideja. Mikäli edellä mainittujen toimien kautta ei päästä tyydyttävään tulokseen, tulee pohjalevyn tarkempi mitoitus suorittaa erikseen esimerkiksi myötöviivateoriaa tai FEM-ohjelmaa hyödyntäen.

#### **4.4.4 Leikkauspala**

Leikkauspalan valintaa on yksinkertaistettu käyttämällä hitsattuja I-profiileja, joissa käytetyt levypaksuudet pysyvät vakiona koko poikkileikkauksessa. Myös laippojen leveys sekä profiilin korkeus on valittu siten, että pituudet ovat molempiin suuntiin samat. Leikkauspalan pituus on valittu siten, että betonin kestävyys (kaava 28) ja leikkauspalan profiilin leikkauskestävyys ovat mahdollisimman lähellä toisiaan.

Leikkauspalan asennussuunta määräytyy oletusarvoisesti liittyvän siteen mukaisesti. Mikäli liitoksessa ei esiinny sidettä tai vaihtoehtoisesti liitokseen liittyy kaksi sidettä eri suunnista, leikkauspalan suunta määräytyy suurimman leikkausvoiman arvon mukaisesti. Kuvan 4.4 avulla on koitettu havainnollistaa leikkauspalan suunnan valitsemista.



**Kuva 4.8** Leikkauspalan suunnat. Vasemmanpuoleisessa tapauksessa leikkauspalan suunta määräytyy suurimman leikkausvoiman mukaisesti. Oikeanpuoleisessa tapauksessa leikkauspalan suunta määräytyy liittyvän siteen mukaisesti.

Leikkauspalaa valittaessa tulee ottaa huomioon myös leikkauspalan tilantarve asennustilanteessa. Tätä varten leikkauspalan ympärillä on kolo kuvan 4.8 mukaisesti. Asennusväljyyttä sivusuunnassa on molemmille puolille 25 mm, sekä pystysuunnassa 50 mm.

Leikkauspalasta aiheutuva momentti on yleensä niin pieni, että se voidaan jättää ottamatta huomioon. Suurien leikkausvoimien tapauksessa aiheutuva momentti voi olla kuitenkin merkittävä. Mikäli leikkauspalan sekundäärimomentti halutaan ottaa huomioon, työkaluun on sisällytetty parametri, jonka totuusarvoa vaihtamalla leikkauspalasta aiheutuva momentti voidaan ottaa huomioon laskennassa lisäämällä se kuormitustapauksen voimasuureisiin.

## 4.5 Detaljien tyypitys

Kun jokainen liitos mitoitetaan yksitellen, erilaisten liitosdetaljien määrä tulee kasvamaan erittäin suureksi. Tätä varten työkaluun on sisällytetty liitoksien tyypitys -algoritmi, joka vertailee eri liitosdetaljeja toisiinsa, ja yhdistää eri perustus-ID:llä olevia detaljeja samaksi, mikäli niiden yhtäläisyys on käyttäjän syöttämien marginaalien sisällä. Marginaalit voidaan syöttää muun muassa pohjalevyn dimensioille, sekä valituille pulttimäärille. Muut liitoskohdan yhtäläisyyttä tarkastavat parametrikohdat tarkastetaan periaatteella,

jossa annettu yhtäläisyys joko toteutuu, tai ei toteudu. Liitoksien tyypitys -algoritmi hyödyntää liitosparametrien määrittelys -algoritmin muodostamia perustus-ID-kohtaisia liitosparametritietoja. Algoritmin toimintaa on pyritty havainnollistamaan kuvan 4.9 avulla, missä kuvan vasemmalla puolella olevista liitosparametritiedoista muodostetaan detaljit, joissa saman detaljin alle valikoituu useampi perustus-ID.

Otetaan esimerkin mukaisesti tarkasteluun pohjalevyn leveys, jonka marginaaliksi käyttäjä asettaa 50 mm. Mikäli lasketuista tuloksista löytyy kaksi eri detaljia, joiden pohjalevyn leveydet ovat 350 mm ja 400 mm, nämä detaljit yhdistyvät yhdeksi samaksi detaljiksi, jos muut annetut ehdot ovat annettujen marginaalien sisällä. Vastaavasti puolestaan 340 mm ja 400 mm leveät detaljit pysyvät erillisinä detaljeina, sillä leveydet eivät toteuta annettuja ehtoja. Jotta vertailukohteina olevien levyjen dimensiot eivät kasva jatkuvasti suurempaan, on detaljin dimensioiden kasvua rajoitettu siten, että dimensio ei voi kasvaa suuremmaksi kuin mitä alkuperäisarvon ja marginaalin summa.

CALCULATION RESULTS											
TSBaseId	Base plate						Column	Anchor	Shearkey		
Number	t_pl	h_pl	b_pl	e_by	e_bz	nb1	nbw	Profile	Type	d	Profile
430	40	620	470	100	60	2	0	w1350-12-19X350	HPM	39	
498	40	620	470	100	60	2	0	w1350-12-19X350	HPM	39	
433	30	580	510	110	55	2	0	w1350-12-19X350	HPM	30	
439	30	580	510	110	55	2	0	w1350-12-19X350	HPM	30	
440	30	580	510	110	55	2	0	w1350-12-19X350	HPM	30	
478	25	540	430	65	50	2	0	w1350-12-19X350	HPM	24	
540	25	540	430	65	50	2	0	w1350-12-19X350	HPM	24	
401	40	630	560	110	50	2	0	w1400-12-20X400	HPM	30	
420	30	630	560	110	55	3	0	w1400-12-20X400	HPM	30	
473	30	680	600	135	55	3	0	w1400-12-20X400	HPM	30	
506	30	630	560	110	55	2	0	w1400-12-20X400	HPM	30	w1150-15-15w150

Detail	TSBaseId
Name	Number
Det1	430 498
Det2	433 439 440
Det3	478 540
Det4	401
Det5	420 473
Det6	506

**Kuva 4.9** Esimerkkikuva detaljitietojen tyypityksestä.

Ohjelman marginaalien lisäksi työkalun suoritusasetuksista voidaan tehdä detaljointiin liittyviä valintoja: Halutaanko käyttää hyväksi jo olemassa olevia detaljeja, vai luodaanko laskentavaiheessa olevista detaljeista kokonaan uudet detaljit. Tämä valinta tulee hyödylliseksi esimerkiksi tapauksissa, joissa saman projektin sisällä laskenta suoritetaan eri vaiheissa, mutta projektin sisällä käytettäviä detaljeja halutaan yhtenäistää.

## 4.6 Tarkastusraportti

Oikeaoppisen suunnittelun lisäksi laskennan tulokset tulee esittää helposti ymmärrettävällä tavalla. Tuloksien esittelyä varten jokaiselle käytettävälle detaljille luodaan erillinen taulukkovälilehti detaljikohtaiset laskentavälilehdet -algoritmia hyödyntäen. Välilehdillä esitetään käytettävän liitosdetaljin tiedot, näillä liitosparametreilla saavutetut kestä-

vyyskapasiteetit, kuormitusyhdistelyt voimasuureineen sekä kuormitusyhdistelyjen käyttöasteet.

Base plate													Anchor			Shearkey		Stiffeners		Show selected row		Calculate all	
t_pl	h_pl	b_pl	e_by	e_bz	nbf	nbw	Profile	Type	d	profile	L_sl	-y	-z										
25	470	340	95	85	2	0	HEA 200	HPM	24	W1150-1200		FALSE	FALSE										
9	Base ID	Profile	Gamma	LC	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	Brace?	C	T	V	VT	Capacity values							
10	191	HEA 200	0	131	208	0	-79	0	0	0	Z	0,11	0	0,18	0	Nc_Rd	1867,3	kN					
11	191	HEA 200	0	102	428,2	0	-165	0	0,1	0	Z	0,23	0	0,37	0	Nt_Rd	556,0	kN					
12	191	HEA 200	0	103	424,8	-1,4	-163	0	0	-2,6	Z	0,25	0	0,37	0	Fy_Rd	478,1	kN					
13	191	HEA 200	0	100	425,4	0	-163	0	0	0	Z	0,23	0	0,37	0	Fz_Rd	442,7	kN					
14	191	HEA 200	0	101	424,6	0	-162	0	-0,1	0	Z	0,23	0	0,37	0	Mycomp_Rd	155,7	kNm					
15	191	HEA 200	0	104	427,9	1,4	-163	0	0	2,5	Z	0,25	0	0,37	0	Mzcomp_Rd	137,5	kNm					
16	191	HEA 200	0	111	389,7	0	-148	0	-0,1	0	Z	0,21	0	0,34	0	Mytens_Rd	69,8	kNm					
17	191	HEA 200	0	112	393,3	0	-151	0	0,1	0	Z	0,21	0	0,34	0	Mztens_Rd	42,0	kNm					
18	191	HEA 200	0	113	389,9	-1,4	-150	0	0	-2,6	Z	0,23	0	0,34	0	Anchor_N_Rd	139,0	kN					
19	191	HEA 200	0	114	393,1	1,4	-150	0	0	2,5	Z	0,23	0	0,34	0	Anchor_V_Rd	45,0	kN					
20	191	HEA 200	0	115	389,7	0	-148	0	-0,1	0	Z	0,21	0	0,34	0								
21	191	HEA 200	0	116	393,3	0	-151	0	0,1	0	Z	0,21	0	0,34	0								
22	191	HEA 200	0	117	389,9	-1,4	-150	0	0	-2,6	Z	0,23	0	0,34	0	ID	C	T	V	VT			
23	191	HEA 200	0	118	393,1	1,4	-150	0	0	2,5	Z	0,23	0	0,34	0	191	0,25	0	0,37	0			
24	191	HEA 200	0	121	389,7	0	-148	0	-0,1	0	Z	0,21	0	0,34	0	192	0,25	0	0,37	0			
25	191	HEA 200	0	122	393,3	0	-151	0	0,1	0	Z	0,21	0	0,34	0	193	0,25	0	0,37	0			
26	191	HEA 200	0	123	389,9	-1,4	-150	0	0	-2,6	Z	0,23	0	0,34	0	194	0,25	0	0,37	0			
27	191	HEA 200	0	124	393,1	1,4	-150	0	0	2,5	Z	0,23	0	0,34	0								

Kuva 4.10 Liitosdetaljikohtainen laskentavälilehti.

Yksittäisen detaljin tai kuormitustapauksen erikoistarkastelua varten tiedot voidaan siirtää helposti laskentapohjaan syöttämällä valitun laskentarivin numero hakukenttään. Valintanapin painalluksen jälkeen alialgoritmi vie liitostiedot laskentapohjalle, missä kuormitusyhdistelylle voidaan tehdä yksityiskohtaisempaa tarkastelua.

Base plate							Anchor properties			
t_pl	h_pl	b_pl	e_by	e_bz	nbf	nbw	Profiili	tyyppi2	d	
25	540	410	75	55	2	0	HEA 360	HPM	24	

29	TS base Profile	LC number	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
30	103 HEA 360	101	7,6	0	-170	0	0,1	0
31	103 HEA 360	102	6,5	0	-160,7	0	0,1	0
32	103 HEA 360	103	6,5	0	-160,7	0	0,2	0

Välilehti: Det

Show selected row Row

POHJALEVYN GEOMETRIA

Välilehti: Laskentapohja

N <sub>crd</sub> [kN]	...
Moment capacity M <sub>y,comp,rd</sub> [kNm]	...
Moment capacity M <sub>z,comp,rd</sub> [kNm]	...
N <sub>trd</sub> [kN]	...
Moment capacity M <sub>y,tens,rd</sub> [kNm]	...
Moment capacity M <sub>z,tens,rd</sub> [kNm]	...
Shear capacity Q <sub>y,rd</sub> [kN]	...
Shear capacity Q <sub>z,rd</sub> [kN]	...

Base ID	LC number	N [kN]	Qy [kN]	Qz [kN]	MY [kNm]	Mz [kNm]
103	101	-7,6	0	-170	0,1	0

Kuva 4.11 Liitoksen yksityiskohtaisempi tarkastelu.

Liitoksen geometrian tarkastelun helpottamiseksi, liitoksesta muodostetaan kuva laskentapohjan puolelle. Mikäli käyttäjä haluaa tehdä manuaalisesti muutoksia algoritmin tuottamaan liitokseen, onnistuu se suoraan myös laskentapohjan kautta. Kun tehdyt muutokset ovat valmiita, ne saadaan päivitysnapia painamalla muutettua detaljin välilehdelle. Liitosparametrien päivytyksen jälkeen detaljin laskenta pitää suorittaa uudelleen kapasiteettien ja käyttöasteiden päivittämiseksi. Laskennan päivittäminen detaljivälilehdellä tapahtuu detaljikohtaisen laskenta-algoritmin avulla. Algoritmi hakee detaljikohtaiset kapasiteettitiedot laskentapohjalta, ja suorittaa käyttöasteiden päivytyksen sisäisessä muistissa ja lineaarisien yhteisvaikutuskaavojen avulla.

## 4.7 Liitoksen mallinnus

### 4.7.1 Tiedostoattribuutit

Liitoksen mallinnus Tekla Structures -ohjelmaan tapahtuu komponentin attribuuttitiedostojen avulla. Liitoksen attribuuttitiedosto sisältää tietokenttiä liitoksessa käytettävistä parametreista. Jokaiselle liitosdetaljille luodaan siis oma attribuuttitiedosto, jonka avulla liitoksen metatieto syötetään Teklan mallinnuskomponentille.

	t	b	h	Pos_No	Material	Name	Class
Rod profile	<input checked="" type="checkbox"/> D24			<input checked="" type="checkbox"/> 1RO 1	<input checked="" type="checkbox"/> B500B	<input checked="" type="checkbox"/> HPM24 L	<input checked="" type="checkbox"/> 99
Nut profile	<input checked="" type="checkbox"/> NUT_M24			<input checked="" type="checkbox"/> 1NU 1	<input checked="" type="checkbox"/> S355J2	<input checked="" type="checkbox"/> NUT	<input checked="" type="checkbox"/>
Washer profile	<input checked="" type="checkbox"/> D56			<input checked="" type="checkbox"/> 1L 1	<input checked="" type="checkbox"/> S355J2	<input checked="" type="checkbox"/> WASHER	<input checked="" type="checkbox"/>
Plate washer	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 1
Cast plate	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/> CAS 14	<input checked="" type="checkbox"/> S355J2	<input checked="" type="checkbox"/> CAST_PLATE	<input checked="" type="checkbox"/> 99

Grout:  50.00  
 Below

Base plate with Component:  Anchor rods

Up direction:  Auto  
 Rotation:  Default  
 Rotation value:

Mirror:  Defa

Dimensions: 20.00, 6.00, 430.00, 55.00, 0.00

Parameters: a: , b: , c: , d: , e:

Cast plate holes tolerance:  0.00  
 Create hole in washer:  Default  
 Create assembly from all anchors:  Default

Create:  Yes,  No  
 Anchor rod assembly:  Default

**Kuva 4.12** Havainnollistava kuva attribuuttitiedostojen sisältämistä parametreista.

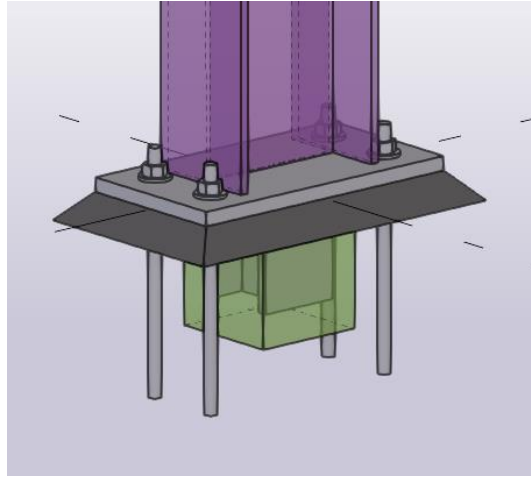
Liitoksien määrittämisen ja tyypityksen jälkeen työkalun tehtävänä on luoda kyseisistä detaljeista Teklan mallinnuskomponentin mukaiset attribuuttitiedostot. Attribuuttitiedostojen luonti aloitetaan detaljien liitosparametrien viemisellä erilliselle Excel-välilehdelle erillisellä algoritmilla. Attribuuttien teossa hyödynnetyllä välilehdellä liitosparametrit syötetään detaljeittain siten, että yhden detaljin parametrit ovat yhdellä rivillä. Rivin soluihin parametrien syöttöjärjestys on määritetty vastaamaan Tekla-komponentin attribuuttitiedostossa esiintyvien parametrien järjestystä. Varsinaisten attribuuttitiedostojen luonti onnistuu export-algoritmilla, joka luo rivikohtaisesta datasta attribuuttitiedoston. Luonnin jälkeen kyseiset attribuuttitiedostot vietään Tekla-mallin polun mukaiseen attribuuttikansioon, missä ne ovat Grasshopper-algoritmin käytettävissä.

#### **4.7.2 Liitoksen mallinnus Grasshopper-algoritmia hyödyntämällä**

Mallinnus Tekla Structures ohjelmiston tietomalliin tapahtuu Rhinoceros alustalla toimivalla Grasshopper -ohjelmalla. Työkalussa on Grasshopper-ohjelmaan muodostettu kuvan 4.3 mukainen algoritmi, jossa algoritmin suoritus on jaettu pienempiin osakokonaisuuksiin osakokonaisuuksien tehtävän perusteella. Tekla-mallin ja Grasshopper-algoritmin ollessa päällä, ohjelmat voivat siirtää informaatiota rajapintojen välillä hyödyntämällä Grasshopper-Tekla live linkkiä. Työkalun aikaisemman vaiheen Excel-tiedosto ei tarvitse olla suorituksen aikana avattuna, sillä Grasshopper-algoritmi lukee Excel-tiedostoa Excel-tiedostopolun avulla.

Samaan tapaan esitetietovaatimuksien kanssa, myös mallinnuksessa käytetään Teklan UDA -kenttään syötettyä perustus-ID:tä oikean liitostyyppin määrittämiseen oikeaan liitokohtaan. Grasshopper-algoritmin suoritus alkaa valitsemalla Tekla-mallista pilarit, joiden alapäähän liitoksen mallinnus suoritetaan. Grasshopper-algoritmi lukee työkalun Excel-tiedostosta perustus-ID:tä vastaavan detaljin ja yhdistää saadun tiedon Teklan kautta tulevaan signaaliin. Tämän jälkeen Grasshopper etsii ja yhdistää perustus-ID:lle määritetyn attribuuttitiedoston, ja mallintaa liitoksen liitoskomponenttia ja Tekla Live Linkkiä hyödyntäen.





**Kuva 4.13** Valmis liitos tietomallissa.

Liitoskomponentin attribuuttiperusteisessa mallinnuksessa esiintyy rajoituksia. Yksi suurimmista rajoituksista esiintyy jäykistelevyjen mallinnuksessa. Mikäli liitoksen laippojen väliin on määritetty jäykistelevy, sen sijaintia ei voida Teklan komponentin rajoituksen takia määrittää tarkemmin. Tämä voi johtaa tilanteisiin, jossa pultti ja jäykistelevy törmäävät. Rajoituksien kiertämiseksi jäykistelevy voitaisiin mallintaa haluttuun kohtaan erillistä Grasshopper-algoritmia hyödyntämällä. Erillistä jäykistelevyjen mallinnusta hoitavaa algoritmia ei tämän diplomityön aikana ole muodostettu.

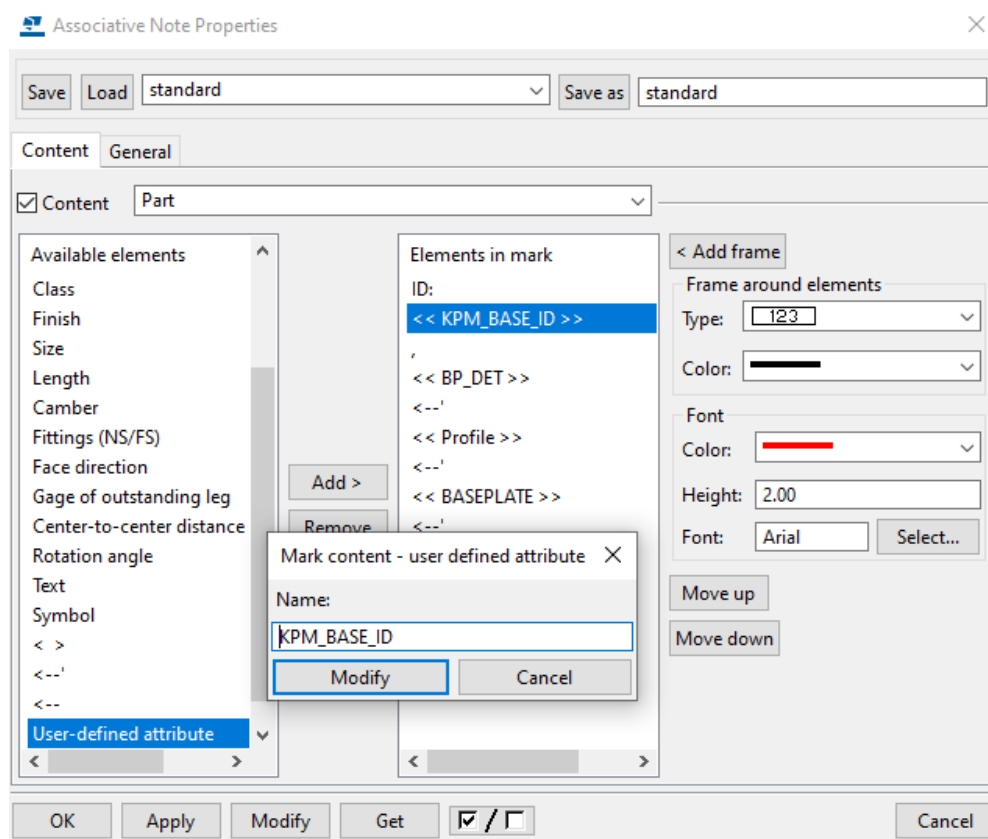
Liitosdetaljin mallinnuksen lisäksi Teklan UDA kenttään kirjoitetaan Grasshopper avusteisesti tieto liitoksen käyttöasteesta, määräävästä kuormitusyhdistelystä sekä käytettävästä liitosdetaljista ja sen parametreista. Teklan osan UDA-kenttään kirjoitus tapahtuu samaa toimintamenetelmiä hyödyntäen, kuin mitä on käytetty liitoskomponentin mallinnuksessa. Eroavaisuutena näiden kahden alialgoritmin välillä on, että UDA-kenttiin kirjoitettaessa kirjoitettavien arvojen syöttö kohdistuu tarkemmin osan tiedoista löytyvälle INP-tiedoston muuttujalle, eikä suoraan osan mallinnuspisteeseen.

UDA-kenttiin syötettyjen parametrien avulla liitostietojen tarkastelu onnistuu helposti suoraan Tekla-mallista. Suuri hyöty näistä Tekla-mallin osien UDA-kenttiin syötetyistä tiedoista saadaan peruspulttipiirustuksessa: Piirustuksessa voidaan suoraan näyttää pilarin perustus-ID, sekä sille määritetyt detaljitiedot. Näin manuaalisen työn sekä mahdollisten virheiden määrä piirustusta tehdessä pienenee.

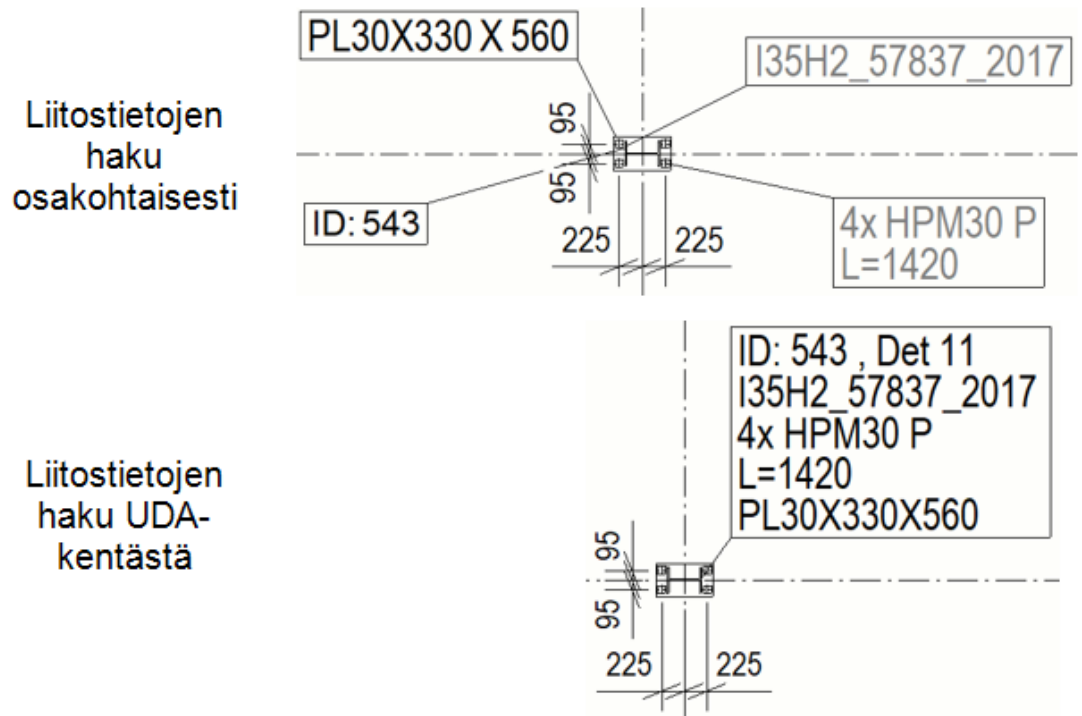
## 4.8 Peruspulttipiirustus

Kuten aiemmin kohdassa 2.3.4 esitettiin, yksi esisuunnitteluvaiheessa lähetettävistä dokumenteista on peruspulttipiirustus. Piirustuksessa esitettäviä tietoja on paljon, eikä nii-

den luomiseen ole luotu erityistä piirustus pohjaa, jonka avulla halutut tiedot olisivat helposti saatavilla. Näiden tietojen hakeminen tapahtuu Teklan piirustuspuolella osakohtaisesti, mikä on manuaalisesti tehtynä työlästä. Lisäksi peruspulttipiirustus voi olla sekava useiden eri suuntaan osoittavien Teklan luomien osatunnuksien, sekä useiden toisiaan lähekkäin sijaitsevien liitoskohtien takia. Piirustuksen tekemisen helpottamiseksi liitoksen tiedot voidaan tuoda Excelistä ja siirtää Grasshopperin avulla Teklan pilarin UDA-tietoihin, mistä ne saadaan yhdellä valintaikkunalla esille piirustusnäkömään. Liitoksen tiedon siirtäminen Tekla-malliin tapahtuu luvussa 4.7.2 esitetyllä menetelmällä. Näin piirustusvaiheessa vältetään useiden eri tietojen etsimisestä sekä useiden eri tekstilaatikoiden siirtelyltä piirustusta järjestellessä.



**Kuva 4.14** Liitostietojen hakeminen Tekla-mallin piirustuspuolella.



**Kuva 4.15** Liitostietojen esitys peruspulttipiirustuksessa.

Kyseisessä menetelmässä satunnaiset mallin puolelle tehdyt muutokset eivät kuitenkaan päivity UDA-kenttiin. Tästä syystä Grasshopper-algoritmi tulisikin kehittää siten, että sen avulla voidaan lukea tietomallista liitoskohtaiset parametrit, ja niiden perusteella päivittää UDA-kentät tarvittaessa. Tämä säästäisi aikaa piirustusten luonnissa, sekä vähentäisi mahdollisuutta, jossa UDA:an syötetyt kentät ja tietomallin liitostiedot ovat ristiriidassa käyttäjän mahdollisen virheen tai unohduksen seurauksena.

## 5. TAPAUSTUTKIMUS: KATTILALAITOKSEN PERUSPULTTILIITOS

Tehdyn mitoitus- ja mallinnustyökalun toimivuutta testattiin esisuunnitteluvaiheessa olevaan kattilalaitokseen. Laitos ja sitä ympäröivä alue suunnitellaan kahdessa eri vaiheessa, joten algoritmin kehittäminen eri vaiheiden välillä haluttuun suuntaan on mahdollista. Tavoitteena oli luoda perustusliitokset, jotka täyttävät liitoksen laskennalliset sekä visuaalisen tarkastuksen kriteerit. Suunnitteluun oli varattu reilusti aikaa, jotta työkalun kehittäminen on mahdollista ongelmatilanteissa. Pilareiden koot ja niissä vaikuttavat voimasuureet vaihtelevat paljon laitoksen ympärillä, joten mitoituksen kannalta algoritmin toimintaa tulee testattua laajasti.

### 5.1 Suunnittelukohteen esittely

Kohteena toimi tavanomainen kattilarakennus ympäröivine rakennuksineen. Perustusliitosten suunnittelu toteutettiin alueittain kahdessa eri vaiheessa:

**Vaihe 1:** Voima-, soodakattila ja kaasutinrakennus

**Vaihe 2:** Sähkösuodatinrakennus

Ensimmäisenä toteutettavaan alueeseen kuului voima- ja soodakattilan rakenteet, joissa perustusliitosta vaativia kohtia on yhteensä 80. Voimakattilan rakenteet kohoavat yli 80 metrin korkeuteen, joten pilareilla olevat kuormat ovat odotetusti suuret. Suurimmat käytettävissä olevat pilariprofiilit ovat hitsattuja kotelopilareita, joiden dimensiot ovat suuruusluokkaa WB1000-40-40X1000-20. Näille pilareille puristavaa normaalivoimaa tulee noin 30 MN. Eri kuormitustilanteet sekä liitoskohtien määrät huomioon ottaen algoritmille tulee yli 3000 eri riviä luettavaksi, jotka pitävät sisällään liitoskohtien kuormitustietoja.

Kaasutinrakennus on suunnittelukohteen rakennuksista pienin, pitäen sisällään ainoastaan 16 pilaria. Tämän takia myös käytettävien pilariprofiilien määrä ja näin ollen eri pohjalevydetaljien määrä tulisi pysyä alhaisena. Alueen pienestä koosta johtuen kaasutinkennuksen suunnitteluajankohta on samanaikaisesti voima- ja soodakattilarakennuksen kanssa.

Viimeisenä toteutettavaan alueeseen kuului sähkösuodatinrakennuksen perustusliitokset. Alueeseen kuului 174 pilaria. Eri kuormitusyhdistelyt huomioon ottaen tarkasteltavista kuormitustapauksista syntyy yhteensä 5742 riviä kuormitusdataa algoritmin luettavaksi. Vaikka yksittäisiä pilareita on valtava määrä, pilarien koissa ja kuormitustasoissa

on paljon toistuvuutta. Tämä mahdollistaa saman detaljin soveltamisen useisiin pilareihin. Tässä kohtaa suunnittelua oletettiin, että työkalun toimintaan liittyvät suurimmat ohjelmointivirheet on löydetty ja korjattu. Näin suunnitteluprosessiin käytettyä aikaa voitaisiin tarkkailla työkalun hyödyllisyyden ja tehokkuuden määrittämiseksi.

Projektissa valittiin käytettäväksi Peikon HPM -harjateräspultteja sekä PPM ankkurointipultteja (HPM-harjateräspultit, tekninen käyttöohje, 2019; PPM-ankkurointipultit, tekninen käyttöohje, 2019). Suunnittelussa toivottiin suosivan HPM pultteja, sillä niiden tilavaatimukset perustuksissa ovat pienemmät. Alussa suunnittelu toteutettiin lyhyemmällä HPM P pulteilla, jotka myöhemmässä vaiheessa vaihdettiin esisuunnittelustatuksen ja sen vaatiman varmuuden vuoksi pidempiin HPM L pultteihin.

## **5.2 Suunnittelun eteneminen**

Ensimmäisen vaiheen aikana aikaa oli varattuna reilusti, jolloin työkalun algoritmeja pystyttiin päivittämään heti ongelmatilanteiden esiintyessä. Ensimmäisen vaiheen ongelmien ja tuloksien perusteella työkalua kyettiin päivittämään haluttuun suuntaan ennen siirtymistä toiseen vaiheeseen. Toisen vaiheen kohdalla työkalun tuloksia ja ajankäyttöä seurattiin tarkemmin vertailutuloksien saamiseksi.

### **5.2.1 Vaihe 1: Työkalun testaus**

Peruspulttiliitoksien suunnittelu alkoi esitietovaatimusten keräämisellä ja niiden syöttämisellä algoritmin esitietoihin. Kohteeseen määritettiin maakohtaiset osavarmuusluvut, selvitettiin käytettävien pulttien maakohtaisten sertifikaattien voimassaolo, käytettävät levypaksuudet sekä käytettävät materiaalitiedot.

Peruspulttien suunnittelua varten oli käytettävissä Robot Structural Analysis -ohjelmaan rakennettu FEM-malli, joka oli koordinaatistoltaan yhtenäinen Tekla-mallin kanssa. Tekla-mallin pilareille on syötetty UDA kenttään perustus-ID, joka mahdollistaa liitoksen tietojen yhdistämisen Tekla- ja Robot-mallien välillä. Yhdenmukainen FEM- ja BIM-malli sekä liitoksen perustus-ID ovat edellytyksiä liitostietojen yhdistämiselle ja näin ollen edellytys myös työkalun toimimiselle. Kuormatietojen sekä perustus-ID:n lisäksi yrityksen sisäiset työkalut tuovat tiedon muun muassa liitoskohdan pilarista, kuormitusyhdistelmästä sekä mahdollisista liitosalueelle sijoittuvista sidejärjestelmistä ja siteiden liittymissuunnasta.

Esitietovaatimusten syötön jälkeen projektissa nousi esille tarve leikkauspalojen pakottamisesta erityisesti liitoksille, jotka sijaitsivat rakennuksen reunoilla. Reunapilarit aiheut-

tavat hyvin suurella todennäköisyydellä peruspulteille suuria vetovoimia, joten täysi vetokapasiteetti pulteilla on eduksi, eikä veto- ja leikkausvaikutuksen yhteisvaikutusta tule tarkastaa erikseen. Varsinkin esisuunnitteluvaiheessa olevalle kohteelle leikkauspalojen käyttö leikkausvoimien siirtämiseksi on suotavaa: Näin varmistutaan leikkausvoiman siirtymisestä myös kohdissa, missä kitkaperusteinen leikkausvoimien siirto ei ole mahdollista. Myöhemmässä suunnitteluvaiheessa leikkauspalasta on helppo luopua ja siirtyä tilanteeseen, joissa leikkausvoima viedään pultin hitsattujen aluslevyjen avulla pulteille. Tällaisia tilanteita voi esiintyä, mikäli leikkausvoimat ovat odotettua pienempiä, tai leikkauspalaa ei ole mahdollista asentaa tilanpuutteen takia. Edellä olevin perustein työkaluun sisällytettiin mahdollisuus leikkauspalan pakottamiselle valituille liitoskohdille.

Leikkauspalan lisäys -päivityksen jälkeen algoritmin suoritus käynnistettiin, ja näytölle esiintyi heti ensimmäinen virheilmoitus algoritmin suorituksesta. Virheilmoitus syntyi, koska käytettävä profiili ei ollut asetetun standardikirjaston mukainen. Työkalun esiasetettu profiilikirjasto ei tukenut vientikohteessa käytettäviä pilariprofiileja, joten virheilmoituksen kiertämiseksi pilariprofiilien tyypit muutettiin hitsatuiksi profiileiksi oikeiden dimensioiden mukaisesti.

Päivityksen jälkeen liitoslaskenta ja detaljien määrittäminen liitoskohdille sujui ilman ongelmia. Tarkastuksesta kuitenkin ilmeni käyttöasteen ylitys muutamilla suurimmilla kattilapilareilla. Tämä johtui yksinkertaisesti siitä, että mikään valituista pohjalevypaksuuksista ei ollut riittävän paksu täyttääkseen annettuja suunnittelukriteerejä. Tehokasta puristusaluetta voitaisiin suurentaa hyödyntämällä jäykisteiden tuomaa puristuspinna-ala tai suurentamalla levypaksuutta.

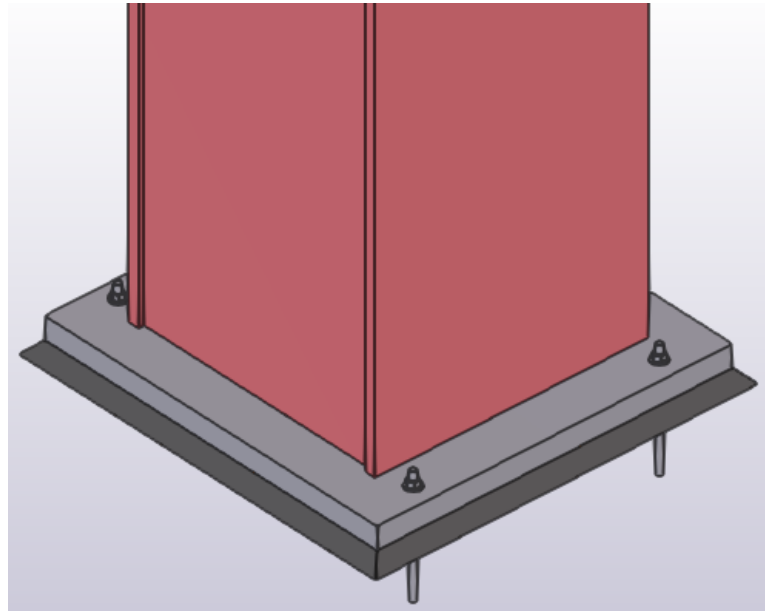
Työkaluun päädyttiin lisäämällä paksumpi pohjalevy, sen sijaan että liitos olisi jäykistetty vahvasti tehollisen puristusalan parantamiseksi. Paksumman erikoispohjalevyn käyttöön päädyttiin sillä perusteella, että myöhemmässä suunnitteluvaiheessa kuormatietojen päivityessä kuormat voivat olla suurempia, ja myös tällöin on kuitenkin mahdollisuus parantaa puristuskestävyyttä jäykistein. Levypaksuus -virheen seurauksena algoritmin toimintaan lisättiin automaattinen ilmoitus, mikäli suurin valittu levypaksuus ei toteuta annettuja puristuskestävyyden vaatimuksia.

Laskennan ja detaljien määrittäminen onnistuessa saadut tulokset mallinettiin onnistuneesti Grasshopper-algoritmillä tietomalliin.

## 5.2.2 Vaihe 1: Ongelmakohdat ja korjaukset

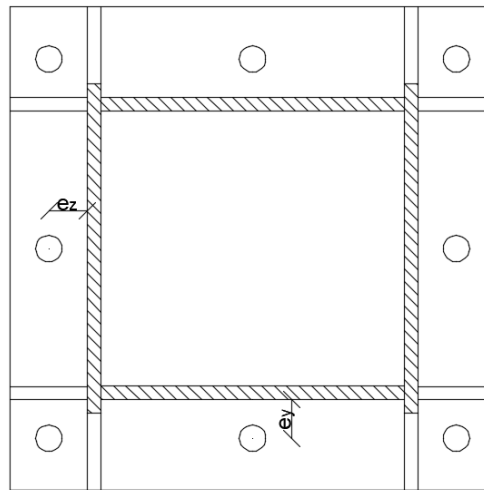
Ensimmäisen vaiheen suunnittelun edetessä algoritmin toiminnassa nousi esille epäkohdita, joita ei ollut otettu huomioon algoritmia ohjelmoitaessa. Vaikka epäkohdat ovat pieniä, on niiden korjaaminen jälkikäteen usein hidasta sekä paljon vaivalloisempaa kuin algoritmia muodostaessa. Varsinaisten voimaliitosten laskennassa ei havaittu merkittäviä puutteita, vaan ongelmat liittyivät enimmäkseen geometriseen ja visuaaliseen kelpoisuuteen.

Ensimmäisenä tuloksista nousi esiin täysin puristettujen liitoksien pulttikoot. Puristavien voimien myötä pohjalevyjen paksuudet nousivat suuriksi, pulttikokojen pysyen kuitenkin hyvin minimaalisena. Tämän myötä algoritmiin sisällytettiin taulukon 4.1 mukaan esitetyt vaatimukset pulttikoon ja levyepaksuuden suhteesta. Näin pystyttiin varmistamaan, että algoritmin tuottamat liitokset ovat geometrisesti ja visuaalisesti kelpoisia.



**Kuva 5.1** Täysin puristetun pilarin ongelma algoritmin kehitysvaiheessa. Pulttikoko voimaperusteisen laskennan myötä pieni, koska vetäviä voimia ei esiintynyt.

Lisäksi suurille hitsatuille kotelopilareille määritetään automaattisesti 3x3 pulttiryhmä ja jäykistelevyt lisätään laipan ja uuman suuntaisesti. Suurien pulttiryhmiä ja vahvasti jäykistettyjen liitoksien kohdalla pulttien sijaintia päivitettiin siten, että molemmissa suunnissa pultin etäisyys profiiliin tai jäykisteeseen pysyy vakiona.



$$e_y = e_z$$

**Kuva 5.2** Kotelopilarille geometrisen ja visuaalisen tarkastelun mukaiset vaatimukset.

Työkalun valintaparametreihin lisättiin myös kohta, jonka perusteella lisättiin mahdollisuus valita pyöreä tai neliön muotoinen aluslevy. Valintaparametreihin lisättiin myös mahdollisuus syöttää maksimikoko pienahitsinä toteutettavalle hitsille. Raja-arvoa suuremmat hitsit toteutetaan puoli V-hitsillä viistettyyn pilariprofiiliin. Mikäli pohjalevyn hitsaus pilariprofiiliin toteutetaan viistettynä, voidaan pultteja tuoda tarvittaessa lähemmäksi pilariprofiilia.

Tarkasteltavien pilareiden ja kuormitustapauksien määrän kasvaessa myös ohjelman suoritus alkoi käydä hitaaksi. Lisäksi VBA-makron suoritus itsessään hidastui tuntemattomasta syystä. Ohjelman suorituksen aikana varsinainen suorituskoodi pysyi samana, ainoastaan rivin mukainen kuormitus luettiin kuormatiedoista uudestaan. Ongelma kierrettiin tässä kohtaa projektia pysäyttämällä laskenta tietyin väliajoin, tallentamalla ja avaamalla tiedosto uudestaan. Muistivuotoja ohjelmakoodin puolella ei esiintynyt, ja jokainen muuttuja ohjelmistokoodissa on määriteltä. Lisäksi jokaista käytössä olevaa makroa koitettiin yksinkertaistaa ja nopeuttaa tekijän tietotaidon sallimissa rajoissa. Projektin ensimmäisen vaiheen jälkeen algoritmin koko pääfunktio luotiin uudelleen eri lähestymisnäkökulmaa hyödyntäen. Tämän päivityksen seurauksena algoritmin suoritusnopeus parani huomattavasti.

### 5.2.3 Vaihe 2: Tehokkuus ja tulokset

Viimeisen rakenteen kohdalla algoritmiavusteista suunnittelua ja sen avulla suoritettua suunnittelun suoritusaikaa tarkkailtiin. Algoritmin varsinainen suoritus aika jokaisen liitoskohdan laskennalle ja detaljien luomiselle oli noin puoli tuntia, kun pilareita oli 174 ja



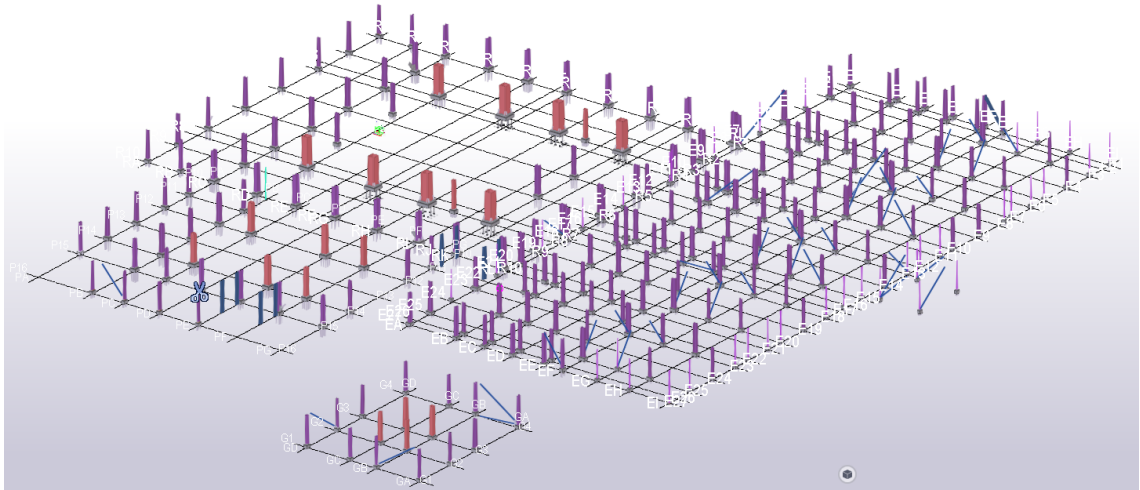
kuormitusyhdistelmiä 33. Laskennan jälkeiset tulokset näyttävät tiivistetysti kuvan 5.3 mukaisilta.

TS Base Id	Det	Base plate						Profiili	Anchor		Shearkey profiks
		t_pl	h_pl	b_pl	c_by	s_bz	nbf		nbw	tyyppi2	
482 424 436 453 465 497 513 526 538	Det1	25	340	340	50	50	2	0	SQUA 150x150x5	HPM	24
495 436 416 428 447 475 519 537 546	Det2	25	430	330	65	50	2	0	W/B250-8-8X250-15	HPM	24
571 407 435 442 434 553 560 561	Det3	25	390	280	65	50	2	0	W1200-8-12X200	HPM	24
476 570 483	Det4	25	390	280	65	50	2	0	W1200-8-12X200	HPM	24
464	Det5	25	440	330	65	50	3	0	W1250-3-14X250	HPM	24
488	Det6	25	440	330	65	50	3	0	W1250-3-14X250	HPM	24
413 422 427 434 445 446 451 456 457 470 480 486 487 517 518 531 535 536 552	Det7	25	490	380	65	50	2	0	W1300-10-15X300	HPM	24
463 512	Det8	25	490	380	65	50	2	0	W1300-10-15X300	HPM	24
474 507 508	Det9	30	520	380	70	55	3	0	W1300-10-15X300	HPM	30
408 409 418 458 503 525 532 548	Det10	25	490	280	65	50	2	0	W1300-3-15X201	HPM	24
417 423 452 481 542 547 514 543	Det11	30	560	330	70	55	2	0	W1340-3-14X250	HPM	30
430 498	Det12	40	620	470	100	60	2	0	W1350-12-13X350	HPM	39
433 439 440 492 493 501	Det13	30	580	510	110	55	2	0	W1350-12-13X350	HPM	30
478 540	Det14	25	540	430	65	50	2	0	W1350-12-13X350	HPM	24
406 558	Det15	50	660	370	100	60	2	0	W1400-12-14X250	PPM	39
520 489 553	Det16	30	630	440	100	55	3	0	W1400-12-16X300	HPM	30
524 412 419 421 431 432 438 441 448 450 460 461 462 468 469 477 479 502 521 522 523 528 52	Det17	30	630	510	135	55	2	0	W1400-12-16X300	HPM	30
437 459 527	Det18	30	620	430	70	55	3	0	W1400-12-16X350	HPM	30
401	Det19	40	630	560	110	50	2	0	W1400-12-20X400	HPM	30
420 473	Det20	30	630	560	110	55	3	0	W1400-12-20X400	HPM	30
506	Det21	30	630	560	110	55	2	0	W1400-12-20X400	HPM	30
544 414 516 426 444 534 455 484 504 415 545 485 505	Det22	30	740	560	135	55	2	0	W1500-14-16X350	HPM	30
499 515	Det23	40	770	620	150	60	2	0	W1500-14-20X400	HPM	39
490	Det24	40	770	570	150	60	2	0	W1500-14-25X350	HPM	39
425 471 500 491 533	Det25	40	770	670	175	60	2	0	W1500-14-25X400	HPM	39
454 472	Det26	40	770	670	150	60	2	0	W1500-14-25X450	HPM	39
443	Det27	40	770	720	150	60	2	0	W1500-14-25X500	HPM	39
546 416	Det28	25	430	330	65	50	2	0	W/B250-8-8X250-15	HPM	24
415 426 444 455 485 505 516 534 545	Det29	30	740	560	135	55	2	0	W1500-14-16X350	HPM	30

**Kuva 5.3** Tyypitetyt detaljit liitosdetaljien koontivälillehdellä.

Kuten tuloksista huomataan, detaljien lukumäärä on vielä suhteellisen suuri. Tämä johtuu osittain pilariprofiilien suuresta määrästä ja osittain leikkauspalojen tarpeen variaatiosta. Ohjelma erittelee liitoksen kahdeksi eri liitostyyppiä, mikäli leikkauspalkan tarve vaihtelee detaljien välillä muiden liitosparametrien pysyessä samana. Täällaisesta kohdasta esimerkkinä kuvan 5.3 mukaan detaljit Det5 ja Det6. Tässä vaiheessa käyttäjä voi vielä halutessaan tehdä manuaalisesti muutoksia detaljijäärän karsimiseksi. Esimerkiksi kohdat Det5 ja Det6 voidaan yksinkertaistuksen vuoksi yhdistää yhdeksi detaljiksi suuremman kapasiteetin mukaisesti, sillä molempia detaileja esiintyy vain yksi kappale laskettavassa alueessa, eikä yhden ylimääräisen leikkauspalkan lisäämisessä ole juuri-kaan vaikutusta projektin kokonaiskustannuksiin.

Varsinainen mallinnus sujuu hyvin nopeasti. Kuvassa 5.4 on esitetty lopputuotos, kun liitokset on mallinnettu Grasshopper-algoritmilla. Mallinnuksen jälkeen liitoksia on helppo tarkastella, ja esiin nousikin vielä muutamia muokkausta vaativia kohtia. Tämän jälkeen luotiin uudet attribuuttitiedot, joiden avulla kyseiset kohdat päivitettiin myös tietomallin puolelle.



**Kuva 5.4** Koko alueen valmiit liitokset Teklassa. Kuvan oikeanpuoleisessa gridilinjastossa on vaiheen 2 sähkösuodatinrakennus. Liitokohtien suurta määrää havainnollistava kuva.

Kokonaisuudessaan alueen peruspulttien suunnitteluun kului yhteensä 26 tuntia. Tämä aikamäärä pitää sisällään työn esitietovaatimusten keräämisestä aina peruspulttikuvien valmistumiseen asti. Tähän aikaan on myös sisällytetty työkalun toimintaa parantavia muutoksia. Kun kokonaisajasta vähennetään piirustuksien tekoon kulunut aika, saadaan tämän työkaluavusteisen peruspulttisuunnittelun työmääräksi 14 tuntia. Tavanomaisesti ilman algoritmiavusteista suunnittelua suurten kattilalaitoksien peruspulttien suunnitteluun on kulunut haastattelujen mukaan kokonaisuudessaan noin 1–2 viikkoa. Ottaen huomioon pilareiden suuren määrän ja allekirjoittaneen vähäisen työkokemuksen perustuliitosten parista, työkalun avulla saavutettua tulosta voidaan pitää hyvänä.

Lisäksi työkalun toiminnasta on huomioitava, että sen avulla suunnitellut liitokset voivat toimia myös lopullisina myöhemmän suunnitteluvaiheen liitoksina. Esisuunnitteluvaiheessa peruspulttiliitoksista tarvitaan tiedot käytettyjen pulttimäärien, pulttikokojen ja pohjalevyn dimensioiden osalta. Työkalun avulla liitos suunnitellaan vastaamaan lopullista liitosta, missä esiintyy muun muassa leikkauspalat ja mahdolliset jäykistelevyt. määritettyjen liitoksien lujuuslaskenta päivitetään rakenteen lopullisilla kuormilla. Muutoksia voi aiheutua, mikäli liitoksen käyttöaste ylittyy kuormatietojen tarkentuessa.

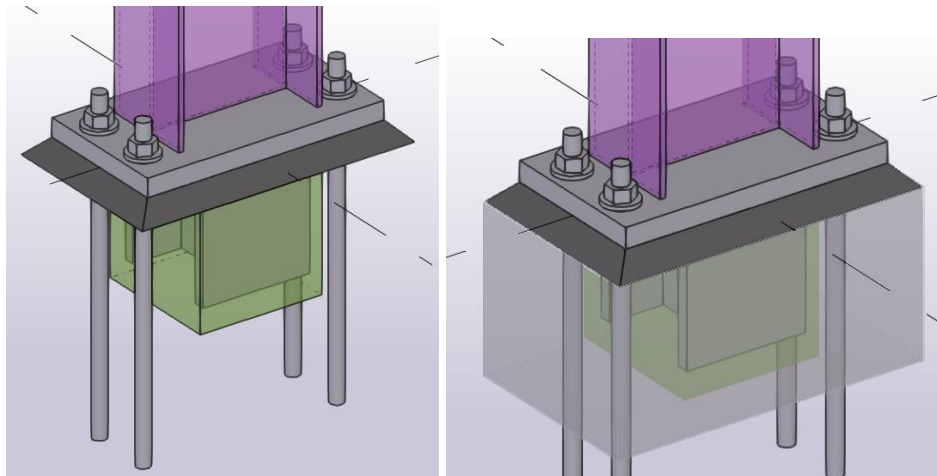
### 5.3 Projektin jälkeinen jatkokehitys

Työn alussa algoritmin suurimmat käytettävissä olevat pulttimäärät olivat määritetty vakioiksi. Sallittujen pulttimäärien ollessa suuret, tarvittava kapasiteetti voidaan saavuttaa käyttämällä useampaa pienempää pulttia. Vaikka tarvittava kapasiteetti olisi saavutettu, kustannuksien kannalta voi kuitenkin olla tehokkaampaa käyttää isompaa pulttikokoa, jolloin tarvittavien pulttien määrä pienenee. Tämän takia algoritmia päivitettiin siten, että

suurin sallittu pulttimäärä on säädettävissä niin laipan päällisten pulttien, kuten myös laipan sisäisten pulttien osalta.

Projektin edetessä esille nousi myös tarve helpottaa eri alueiden voimatietojen tuomista laskentapohjaan. Projekteissa eri alueet voivat valmistua eri aikoihin, mutta kuormitus-tietojen lisääminen samaan tiedostoon on kuitenkin suotavaa. Mikäli työkalua halutaan päivittää saman projektin eri ajankohtina, tulee muutokset tehdä myös jokaiseen muuhun tiedostoon, mikäli projektin eri alueet ovat toteutettuna eri tiedostoon. Näistä syistä algoritmia päivitettiin tavalla, joka mahdollistaa eri alueiden laskennan eriaikaisesti samalla hyödyntäen aikaisemmin luotuja detaljeja.

Tietomallin varsinaiset liitokset mallintuivat hyvin, mutta manuaalista työtä projektissa aiheuttivat pilarinostot sekä leikkauspalan tilatarvetta kuvaava tilavarausobjekti. Näiden takia liitokset mallintavaan Grasshopper-algoritmiin lisättiin toiminto mallintamaan tarvittaessa pilarinosto ja leikkauspalan tilavarausobjekti.



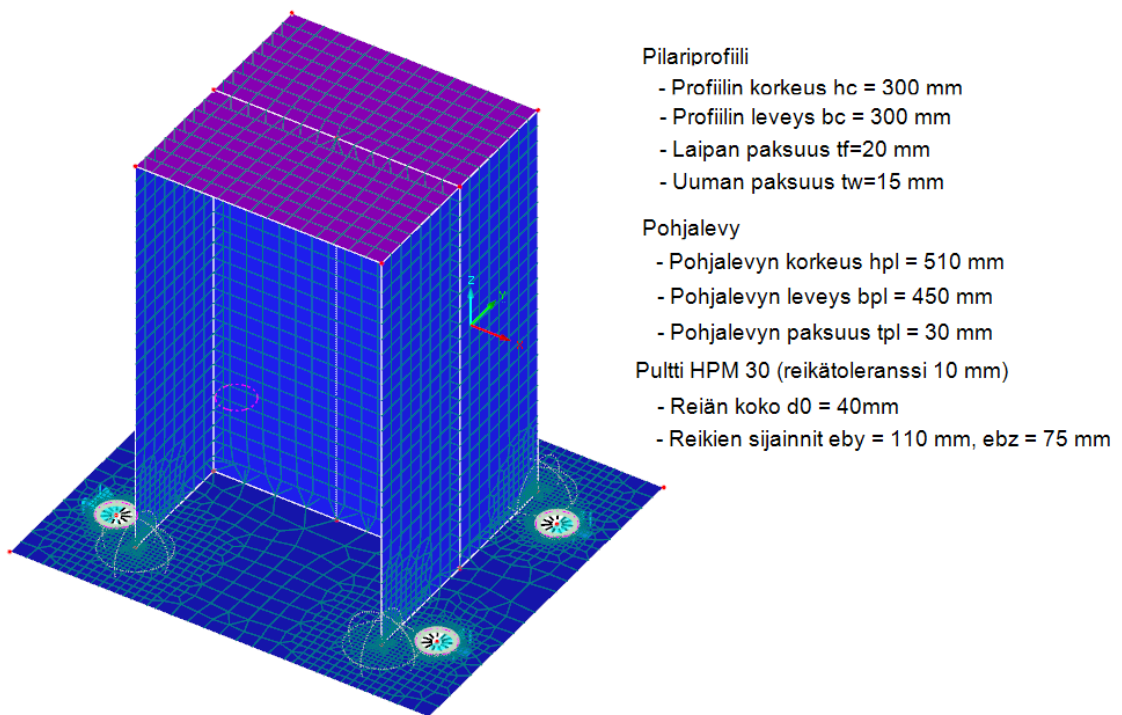
**Kuva 5.5** Leikkauspalan tilavarausobjekti (vihreä) sekä pilarinosto (harmaa). Tilavarausobjekti kuvaa perustuksessa leikkauspalan asentamista varten vaadittua varauskoloa pilarinoston valussa.

Työkalun pääasiallisena tarkoituksena oli peruspulttiliitosten automaattinen mitoitus ja mallinnus. Oleellinen osa peruspulttien suunnittelutehtävää on myös niihin liittyvät piirustukset. Peruspulttipiirustuksen luominen voi olla raskasta, joten työkalua koitettiin hyödyntää entisestään tuomalla dataa Teklan UDA kenttiin kohdan 4.8 mukaisesti. Piirustuspuolen hyödyntämisen lisäksi luotiin algoritmi, jonka avulla saadaan käytössä olevat pulttikoot ja -määrät alueittain. Näitä pulttien määrä- ja kokotietoja voidaan hyödyntää tarvittaessa niin piirustuksessa kuin muissa toimitettavissa dokumenteissa.

## 6. VERTAILULASKELMAT

Työkalussa käytettyjen yhteisvaikutuskaavojen kelpoisuutta tarkastellaan vertailemalla laskentapohjan tuloksia RFEM-ohjelmaan luodun kuorimallin tuloksiin. Tutkinta kohdistuu pohjalevyn taivutuskapasiteetin tarkasteluun, kun laskentapohjassa käytetään luvun 3.2 mukaisia myötökuvioita. Tutkinnan tavoitteena on muodostaa käsitys työkalun käytössä olevien yhteisvaikutuskaavojen konservatiivisuudesta. Vertailulaskelmassa käytetty RFEM-laskentaohjelma ei ole käytössä muodostetun työkalun toiminnassa.

Peruspulttiliitos mallinnetaan RFEM-ohjelmaan siten, että se vastaa mahdollisimman realistisesti todellisen liitoksen käyttäytymistä. Pohjalevylle asetetaan haluttu paksuus ja materiaali, ja liitoksen todellinen jäykkyys otetaan huomioon voimien jakautumisessa. Mikäli pohjalevy mallinnetaan toimimaan liian jäykästi, ei muodonmuutoksia pääse syntymään ja pulttien vetovoimat jäävät todellisuutta pienemmiksi.



**Kuva 6.1** Pohjalevyltöstä muodostettu kuorimalli RFEM-ohjelmassa.

Teräslevyn ja betonin välinen tukipinta on määritelty epälineaarisesti seuraavasti:

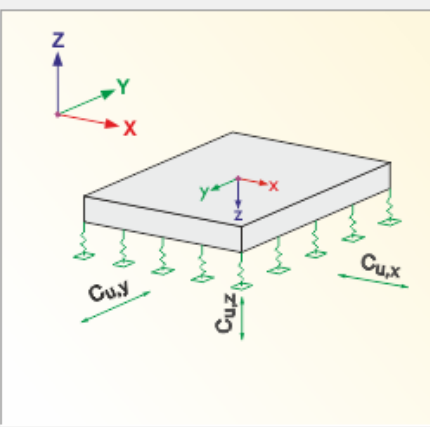
- Pinta ei ota vastaan vetojännitystä
- Puristuksella bilineaarinen vaste, pinta joustaa vakioalustaluvulla betonin puristuskestävyyteen saakka ja tämän jälkeen joustaa ideaaliplastisesti. Alustalukuna on käytetty arvoa  $0.150$  kN/mm<sup>3</sup>

Edit Surface Support

Support No.  On Surfaces No.

Calculation of Spring Constants

Automatically with add-on module RF-SOILIN (soil-structure interaction analysis)



Support Conditions

Support	Spring constant	Nonlinearity
<input type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u,x}$ : <input type="text" value="0.000"/> [kN/mm <sup>3</sup> ]	Failure if negative contact stress in z
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u,y}$ : <input type="text" value="0.000"/> [kN/mm <sup>3</sup> ]	
<input type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u,z}$ : <input type="text" value="0.150"/> [kN/mm <sup>3</sup> ]	
Shear		
<input type="checkbox"/> $v_{xz}$	$C_{v,xz}$ : <input type="text" value="0.000"/> [kN/mm]	
<input type="checkbox"/> $v_{yz}$	$C_{v,yz}$ : <input type="text" value="0.000"/> [kN/mm]	

Comment

OK Cancel

Edit Surface Support

Definition Type

Basic unidirectional action

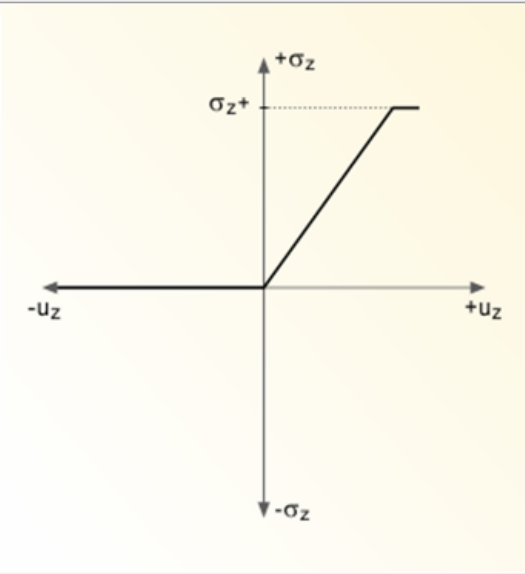
Yielding from contact stress  $\sigma_{z+}$

Friction in plane xy

Parameters

Contact stress  $\sigma_{z+}$ :  [kN/m<sup>2</sup>]

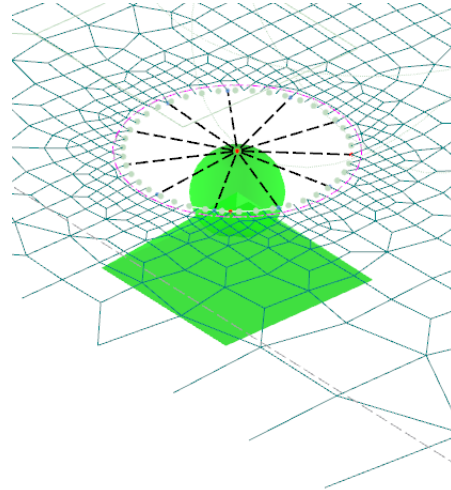
Friction coefficient  $\mu_z$ :



OK Cancel

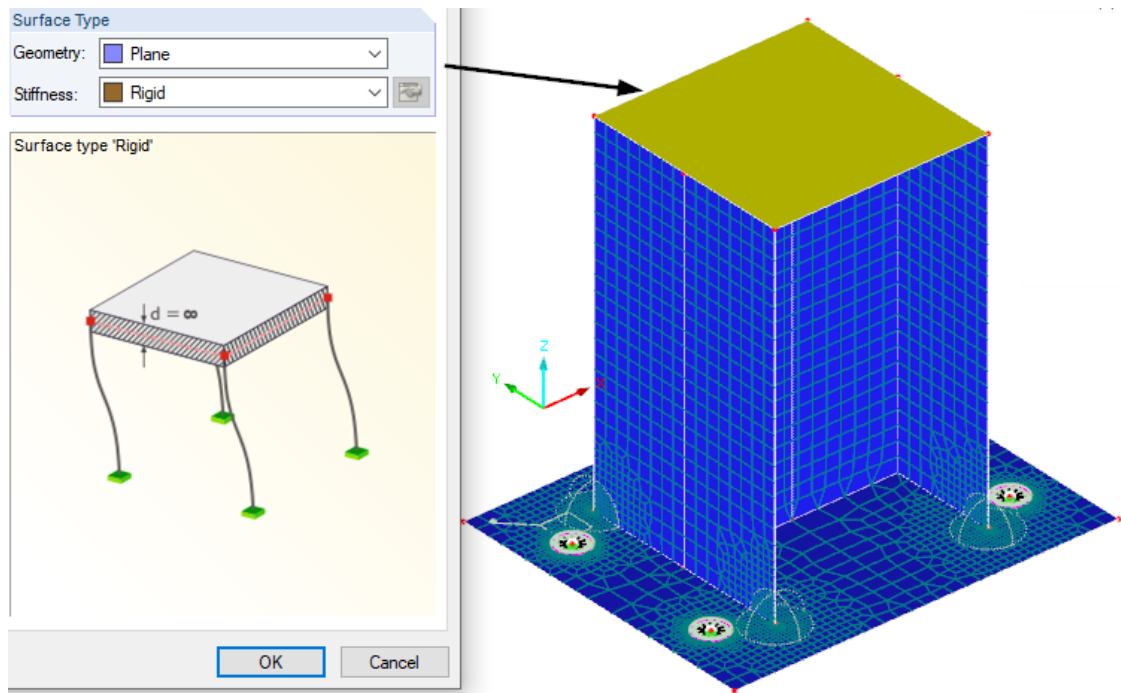
Kuva 6.2 Betonin ja teräslevyn välisen tukipinnan parametrit RFEM-ohjelmistossa.

Pulttien reiät on mallinnettu siten, että reiän keskellä on pistetuki, joka ei ota vastaan puristavia voimia. Tämä valinta on tehty, jotta pultti ei välitä puristusta, vaan ainoastaan vektorasituksia. Pistetuelle on työn myöhemmässä vaiheessa asetettu jousivakio kuvan 6.6 mukaisesti, jotta sen toiminta kuvaisi pultin toimintaa. Reiän ympärille on asetettu useita solmupisteitä, joista on mallinnettu jäykkänä toimiva rakenneosaa reiän keskelle, jotta voimat reiän ympäriltä saadaan välitettyä pistetuelle.



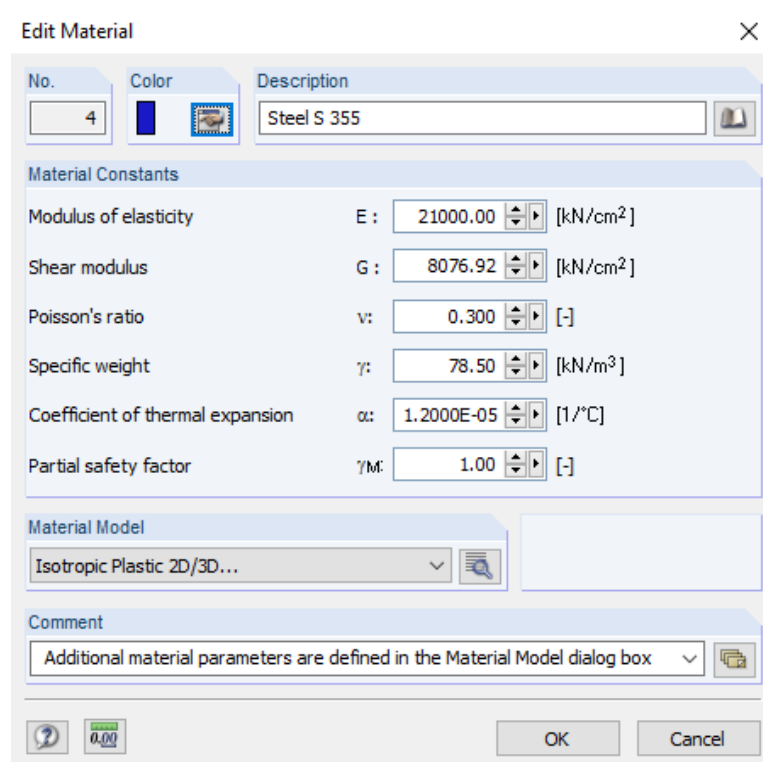
**Kuva 6.3** Pohjalevyn reiän tukiehdot.

Pilari on mallinnettu 0,5 metriä korkeana, ja sen yläosan solmujen välille on mallinnettu jäykkänä toimiva taso. Tason keskikohdassa sijaitsevaan solmupisteeseen on asetettu tarkastelussa olevien tapauksien kuormat. Nämä kuormat jakautuvat pilarille ja liitokselle yläpinnan jäykän tason kautta. Elementtijaon oletusarvo on pilarissa sekä pohjalevyssä 40 mm. Konvergoinnin helpottamiseksi verkotusta on tihennetty pilarin nurkkien sekä pohjalevyn reikien kohdalla. Tiheämmällä elementtiverkotuksella on pyritty vähentämään suurien pistemäisien jännitystilojen muodostumista.



**Kuva 6.4** Pilarin yläosan jäykkä taso.

Laskennassa käytetty materiaali on isotrooppinen, bilineaarinen ja ideaalplastinen. Käytetyt materiaalikohtaiset arvot ovat esitettyinä kuvassa 6.5.



**Kuva 6.5** Mallissa käytetyn materiaalin ominaisuudet.

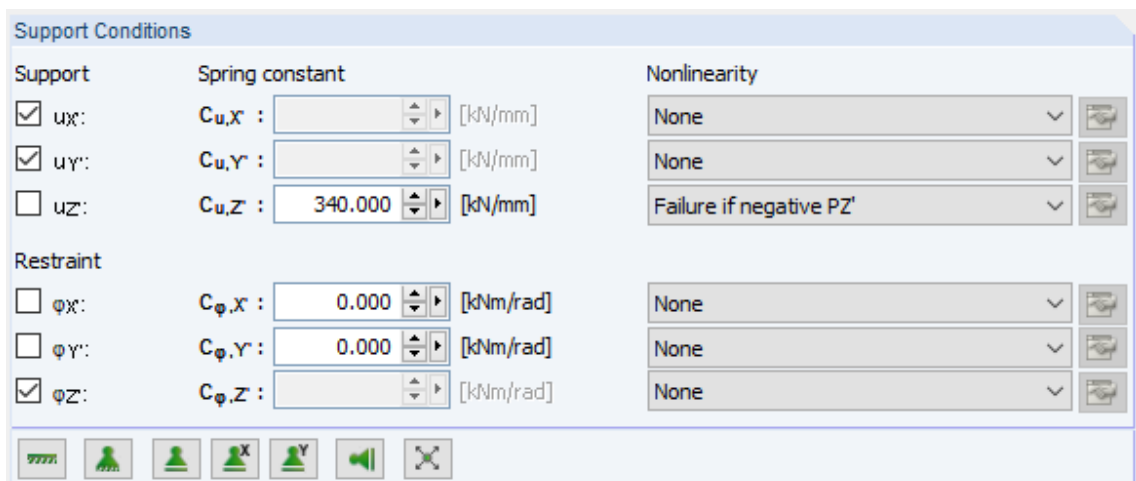


FEM-laskennalla ja laskentapohjan tuottamien tulosten vertailemiseksi FEM-laskennasta on saatava liitoksen käyttöaste. FEM-mallin plastinen rajakuorma ratkaistaan kasvattamalla FEM-mallin kuormitusta inkrementaalisesti, kunnes murtokriteeri saavutetaan. Standardin EN 1993-1-5 (2006) liitteen C mukaan rajakuorma katsotaan saavutetuksi, kun suurin mallista mitattu plastinen venymä ylittää 5 % arvon.

Tarkastelu suoritetaan kolmessa eri tapauksessa:

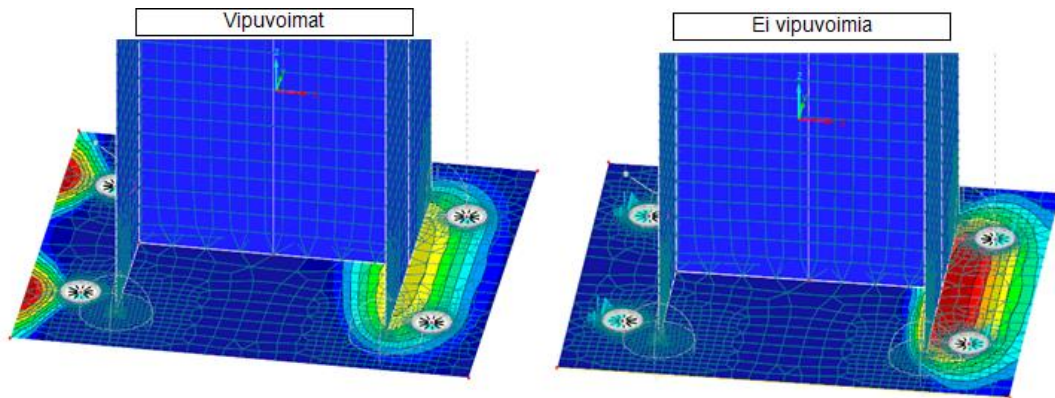
- 1) Vahvan akselin suhteen tapahtuva taivutus  $M_{y.Ed} = 120\text{kNm}$ ,  $M_{z.Ed} = 0\text{kNm}$
- 2) Heikon akselin suhteen tapahtuva taivutus  $M_{y.Ed} = 0\text{kNm}$ ,  $M_{z.Ed} = 120\text{kNm}$
- 3) Kahden akselin suhteen tapahtuva taivutus  $M_{y.Ed} = 85\text{kNm}$ ,  $M_{z.Ed} = 85\text{kNm}$ .

Aluksi FEM-laskennan tulokset antoivat suurempia pulttivoimia, kuin laskentapohjan tulokset. Pinnan puristusjäännityksiä tutkiessa huomattiin vetopuolelle syntyvän vipuvoimia, koska pistetuki on mallinnettu z-suunnassa siirtymättömäksi. Vipuvoimien pienentämiseksi pistetuille asetettiin kuvan 6.6 mukainen jousivakio, jotta pistetuki vastaisi pultin käyttäytymistä. Jousivakion arvo on saatu kaavalla  $\frac{EA}{L}$ , missä kimmomoduuli  $E = 200\text{ GPa}$  ja pultin poikkileikkausala  $A = 561\text{ mm}^2$ . Pultin venymäpituudeksi on valittu EN 1993-1-8 (2005) taulukon 6.11 mukaisesti seuraavien tekijöiden summa: 8 kertaa ruuvin nimellishalkaisija, jälkivalu, levyn paksuus, aluslaatta ja puolet mutterin korkeudesta. Nämä tekijät on valittu Peikon teknisen käyttöohjeen (HPM-harjateräspultit ETA, tekninen käyttöohje (2019) mukaisesti, joten venyväksi pituudeksi saadaan  $L = 8 * 30\text{ mm} + 50\text{ mm} + 30\text{ mm} + 8\text{ mm} + 24\text{ mm}/2 = 340\text{ mm}$ .



**Kuva 6.6** Jousivakion asettaminen pistetuille.





**Kuva 6.7** Vipuvoimien aiheuttama puristusjännitys vetopuolella, kun pulttia kuvaava tuki on z-suunnassa siirtymätön (vas.). Vipuvoimat poistuneet, kun pultille asetettu jousijäykkyys EA/L (oik.).

Eurokoodin mukainen 5 % plastisen venymän arvon ja sen voimakertoimen löytämiseksi pohjalevyn venymiä on tarkasteltu eri voimakertoimilla. Voimakertoimeksi valitaan pienin voimakertoimen arvo, mikä alittaa 5 % plastisen venymän raja-arvon. Voimakertoimien kasvatusvälinä on käytetty arvoa 0.050.

Tarkastelun kolmelle eri tapaukselle lasketaan käyttöasteet FEM-laskennan ja laskentapohjan avulla. Laskentapohjan mukainen laskenta on esitetty liitteessä A. Laskentapohjassa pohjalevyn määrääväksi myötökuvioksi vahvan suunnan taivutuksessa muodostuu tapaus, missä myötöviiva muodostuu laipan yläpuolelle koko pohjalevyn leveydeltä. Taulukoissa 6.1 ja 6.2 esitetään saadut tulokset.

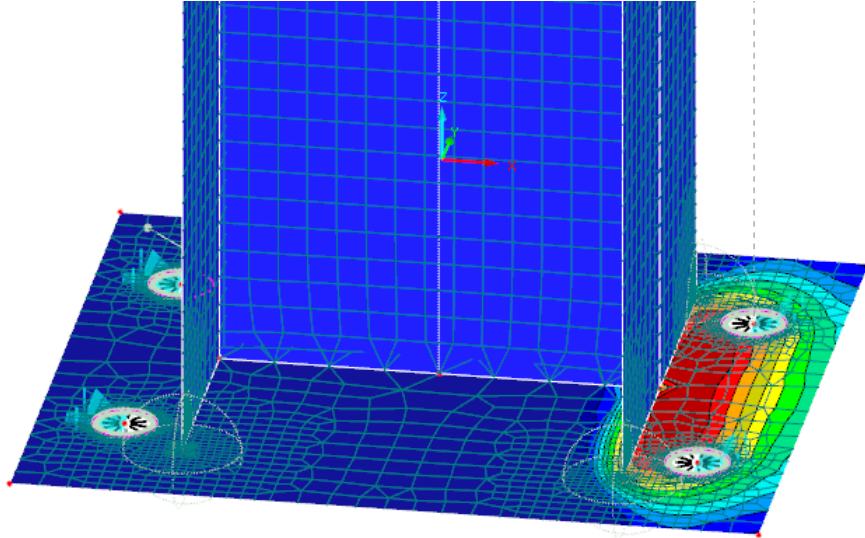
**Taulukko 6.1.** FEM-ohjelmalla saadut tulokset.

Tapaus	FEM			
	Voimakerroin pohjalevyn saavuttaessa 5%:n plastisen venymän	Pultille tuleva voima voimakertoimella 1 [kN]	Käyttöaste	
			Pohjalevy	Pultti
Tapaus 1: $M_{y,Ed} = 120 \text{ kNm}$ , $M_{z,Ed} = 0 \text{ kNm}$	2,8	160,54	$1/2,8 \approx 0,36$	0,73
Tapaus 2: $M_{y,Ed} = 0 \text{ kNm}$ , $M_{z,Ed} = 120 \text{ kNm}$	2,5	216,91	$1/2,5 \approx 0,40$	0,99
Tapaus 3: $M_{y,Ed} = 85 \text{ kNm}$ , $M_{z,Ed} = 85 \text{ kNm}$	2,1	246,67	$1/2,1 \approx 0,48$	1,12

**Taulukko 6.2.** Laskentapohjalla ja lineaarisia yhteisvaikutuskaavoja käyttäen saadut tulokset.

Tapaus	Pultille tuleva voima [kN]	Käyttöaste	
		Pohjalevy	Pultti
Tapaus 1: $M_{y,Ed} = 120 \text{ kNm}$ , $M_{z,Ed} = 0 \text{ kNm}$	179,10	0,43	0,81
Tapaus 2: $M_{y,Ed} = 0 \text{ kNm}$ , $M_{z,Ed} = 120 \text{ kNm}$	269,66	0,64	1,23
Tapaus 3: $M_{y,Ed} = 85 \text{ kNm}$ , $M_{z,Ed} = 85 \text{ kNm}$	311,20	0,75	1,41

Yksi pulttivoimien suuruuteen vaikuttava syy on puristuspinnan sijainti. Eurokoodi 3:n mukaan puristuspinnan keskiö sijoittuu laipan keskikohdan alle, kun taas FEM-laskennassa puristuspinnan sijainti jää kuvan 6.8 mukaisesti laipan ulkopuolelle, jolloin liitoksen momenttivarsi kasvaa. AISC:n (2006) julkaisemassa pohjalevyn ja ankkuripulttien suunnitteluohjeessa puristuspinnan katsotaan puolestaan alkavan levyn reunasta.



**Kuva 6.8** Puristuspinnan sijainti FEM-laskennassa.

Laskentapohjalla saatavat kestävyudet taivutusta vastaan ovat konservatiivisia verrattuna FEM-laskennan tuloksiin. Näin ollen laskentapohjan, siinä käytetyn yhteisvaikutusmenetelmän sekä EC:n laskentaoletusten käyttö on turvallista. Varmuus vetopuolen voiman laskennassa johtuu pääasiassa siitä, että puristuspinnan ja vetopuolen pulttien välinen momenttivarsi on laskentapohjan ja EC:n oletusta suurempi. Ilmiö korostuu I-pilarin heikomman suunnan taivutuksessa enemmän kuin vahvan suunnan taivutuksessa.

## 7. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli luoda algoritmiavusteinen työkalu pohjalevyliitoksien suunnittelun nopeuttamiseksi. Työkalun tuli määrittää liitoskohdalle liitosdetalji, joka täyttää lujuus- ja mallinnustekniset vaatimukset. Työkalun lähtötietoina toimivat liitoskohdan voimasuureet, ja lopputuloksena on valmiit liitokset Tekla Structures -tietomallissa. Työkalun toimivuutta testattiin tapaustutkimuksen avulla, missä kohteena toimi esisuunnitteluvaiheessa oleva kattilalaitos.

Työssä käytetyt laskentamenetelmät pohjautuvat standardissa EN 1993-1-8 esitettyihin menetelmiin, missä liitoksen kapasiteetit määritellään sen osakomponenttien avulla. Standardin asettamien rajoitusten takia liitoskestävyydet varmennetaan lineaarisia yhteisvaikutuskaavoja hyödyntäen. Kahden pääakselin suhteen tapahtuvan taivutuksen tapauksessa pohjalevyn kestävyyttä on tarkasteltu vertailemalla laskentapohjan tuloksia RFEM-ohjelmaan mallinnetun kuorimallin tuloksiin. Tuloksien tarkastelun perusteella työkalussa käytetty laskentamenetelmä osoittautui antavan varmallalla puolen olevia laskentatuloksia.

Luodun työkalun käyttäminen on parhaimmillaan hyvinkin vaivatonta, eikä vaadi käyttäjältä ohjelmoinnin osaamista. Suunnitteluprojektin sisällä aikahyötyjä saadaan laskentaprosessin- sekä mallinnuksen aikana: Tavanomaista työn jaottelua laskennan suorittajan ja mallintajan välillä ei tarvita, sillä nämä molemmat työvaiheet onnistuvat helposti yhdeltä käyttäjältä. Algoritmin avulla liitoskohdassa kestävyys voidaan todentaa jokaisen eri kuormitusyhdistelyn voimia vastaan ilman, että joudutaan tekemään yksinkertaistuksia tarkasteltavien kuormatietojen vähentämiseksi.

Työkalun toiminnallisuudesta suuri osa on rakennettu yleisesti tunnetun Excel-taulukko-laskentaohjelman ympäristöön, joka tekee siitä helposti lähestyttävän. Laskentamenetelmät ovat esitettynä erillisessä laskentapohjassa, ja saatuja detaljeja ja siihen vaikuttavia voimasuureita on helppo tarkastella laskentavälilehdellä. Työkalun eri vaiheissa voidaan hyödyntää myös käyttäjän manuaalisesti syöttöä, eikä ohjelman suoritus ole täysin riippuvainen luodusta algoritmista. Tarvittaessa tämä mahdollistaa liitostietojen helpon muokkaamisen haluttuun suuntaan. Työkalun Excel-toiminnallisuuden muodostamia tuloksia hyödynnetään työkalun Grasshopper-algoritmin suorituksessa, jonka avulla Excelissä määritetyt liitokset voidaan mallintaa Tekla Structures -tietomalliin.

Teknisesti työkalun suurin hyöty on saavutettavissa tapauksissa, joissa perustusliitosta vaativia kohtia on paljon: Työkalun avulla voidaan hoitaa liitoksen lujuuslaskenta, detaljien tyypitys, sekä liitoksien mallinnus Tekla Structures -tietomalliin. Työkalua testatessa tapauskohteen toisessa vaiheessa, 163 pilarin kohdalla pohjalevyn laskentaan ja detaljien tyypitykseen kului aikaa noin puoli tuntia. Liitosattribuuttien luonti ja mallinnusskriptin suoritukseen mitattava aika on liitoskohtien määrästä riippuen muutamia sekunteja, joten säästetty aika on huomattava verrattuna menetelmään, missä liitokset mallinnetaan manuaalisesti.

Tapauksetkimuksen aikana syntyi työkalun kehitykseen ideoita, joiden avulla suunnitella voidaan helpottaa ja nopeuttaa myös peruspulttipiirustuksien tuottamista Tämä tapahtuu viemällä liitostietoja Grasshopper-avusteisesti tietomallin pilarin UDA-kenttiin, joista ne ovat helposti poimittavissa piirustusta tehdessä. Pilarin UDA-kenttiin voidaan sisällyttää liitosdetaljia kuvaavien parametrien lisäksi myös esimerkiksi tieto liitoksen käyttöasteesta ja määräävästä kuormitusyhdistelystä.

Työkalun myötä peruspulttien suunnittelutyökuva muuttuu manuaalisesta työskentelystä suuremman datakokonaisuuden hallinnaksi, sekä laskentatulosten ja mallinnuksen kriittiseksi tarkasteluksi. Työkalua voidaan pitää onnistuneena, sillä sen avulla voidaan säästää huomattavia aikasäästöjä. Säästetty aika riippuu suunniteltavan alueen koosta, ja säästetyn ajan arvio vaihtelee näin muutamasta päivästä muutama viikkoon. Työkalun avulla peruspulttiliitosten suunnitteluprosessi laskennasta mallinukseen hoituu suurissakin malleissa muutamassa tunnissa. Epäsymmetriset liitokset lukeutuvat tois-  
taiseksi työkalun ulkopuolelle, mutta ovat mahdollinen jatkokehityskohde.

# LÄHTEET

Amaral, P. M. (2014). Steel column bases under biaxial loading conditions. University of Porto. 116 s.

Advanced Base Plate Technical Background (2019). Hilti. 49 s. [verkkoaineisto] Saatavissa: [https://www.hilti.hu/content/dam/documents/pdf/ee/hu/fe/ABP\\_Technical%20background%20\(Europe\)%20\(002\).pdf](https://www.hilti.hu/content/dam/documents/pdf/ee/hu/fe/ABP_Technical%20background%20(Europe)%20(002).pdf)

American Institute of Steel Construction (2006), Steel Design Guide: Base Plate and Anchor Rod Design, Second edition. 62 s.

Birnbaum, D. (2005). Microsoft Excel VBA Programming for the absolute beginner, Second edition.

Eligehausen, R. & Mällée, R. & Silva, J. (2012). Anchorage in Concrete Construction, Ernst und Sohn. ISBN: 978-343301143-0. DOI:10.1002/9783433601358.

Elementtisuunnittelu (2020). [verkkoaineisto]. Saatavissa (viitattu 19.12.2021): <https://www.elementtisuunnittelu.fi/liitokset/liitosten-toiminta/liitostyyppit>

EN 1993-1-1 (2005). Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu – Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 99 s.

EN 1993-1-8 (2005). Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu – Osa 1-8: Liitosten mitoitus, Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 148 s.

EN 1992-1-1 (2004). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu – Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto, 218 s.

EN 1992-4 (2018). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu – Osa 4: Betonirakenteissa käytettävien kiinnikkeiden suunnittelu, Suomen standardisoimisliitto, 126 s.

Gonzalo, O. (2010). Biaxial Analysis of General Shaped Base Plates. Saatavissa (viitattu 29.12.2021): [https://communities.bentley.com/cfs-file/\\_\\_key/telligent-evolution-components-attachments/01-275894-00-00-00-14-32-79/Biaxial-Analysis-of-General-Shaped-Base-Plates.pdf](https://communities.bentley.com/cfs-file/__key/telligent-evolution-components-attachments/01-275894-00-00-00-14-32-79/Biaxial-Analysis-of-General-Shaped-Base-Plates.pdf)

Heckstall, V. (2013). [verkkoaineisto]. Saatavissa (viitattu 29.12.2021): <https://www.business2community.com/strategy/four-major-stages-algorithm-analysis-design-0679491>

HPM-harjateräspultit ETA, tekninen käyttöohje (2019). Peikko. Saatavissa: [https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/qsnQaQ/XEJ7\\_tCEbcT-K2oT2w6j3g/HPM-ankkurointipultitFI002TMAWeb.pdf](https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/qsnQaQ/XEJ7_tCEbcT-K2oT2w6j3g/HPM-ankkurointipultitFI002TMAWeb.pdf)

Höyhty, R. (2021). Teräksisen sekundääripalkiston algoritmiavusteinen suunnittelu. Oulun yliopisto. 46 s.

Koivuniemi, J. (2021). Algorithm-aided pre-design of boiler buildings. Tampereen yliopisto. 46 s.

Laine, V. (2007). Teräsrungon liitosten jouston huomioon ottaminen integroidussa suunnittelujärjestelmässä. Tampereen teknillinen yliopisto. 104 s.

NCCI: Design of simple column bases with shear nibs (2013). Steel access made easy. 14 s.

Ongelin, P. & Valkonen, I. (2010). Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja, uudistettu 3. painos, Rautaruukki Oyj. 609 s.

PPM-ankkurointipultit, tekninen käyttöohje (2019). Peikko. Saatavissa: <https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/RoqFpQ/tLOPL7uOYfcEqL-FAf8w42Q/PPMFI002TMAWeb.pdf>

Sagmon, M. (2020). [verkkoaineisto] Saatavissa (viitattu 29.12.2021): <https://morsagmon.com/blog/excel-vba-is-slow-here-are-6-tips-to-improve-excel-vba-performance/>

P398 (2013). Joints in Steel Construction – Moment-Resisting Joints to Eurocode 3. Steel Construction Institute, The British Constructional Steelwork Association. 163 s.

Tedeschi, A (2014). ADD\_Algorithms-Aided design. United Kingdom: Le Penseur. 496 s.

Teräsrakenneyhdistys (2009). Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus EN-standardien mukaan. Luku 4. 152 s.

Thinkautomation, 2021.[verkkoaineisto]. Saatavissa: (viitattu 29.12.2021) <https://www.thinkautomation.com/eli5/what-is-an-algorithm-an-in-a-nutshell-explanation/>

Trimble Solutions Corporation, Grasshopper-Tekla Live Link. Saatavissa (viitattu 29.12.2021): [https://www.teklastructures.support.tekla.com/not-version-specific/en/ext\\_grasshopperteklalink](https://www.teklastructures.support.tekla.com/not-version-specific/en/ext_grasshopperteklalink)

Wald, F. (2014a). Column bases. Saatavissa (viitattu 3.4.2021): [http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/CESTRUCO/Texts\\_of\\_lessons/07-GB\\_Column\\_Bases.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/CESTRUCO/Texts_of_lessons/07-GB_Column_Bases.pdf)

Wald, F. (2014b) Design of steel buildings with worked examples. Saatavissa (viitattu 3.4.2021): [https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2014\\_07\\_WS\\_Steel/presentations/06\\_Eurocodes\\_Steel\\_Workshop\\_WALD.pdf](https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2014_07_WS_Steel/presentations/06_Eurocodes_Steel_Workshop_WALD.pdf)

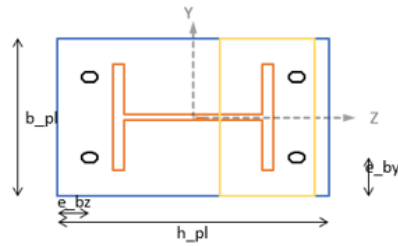
Woodbury, R. (2010). Elements of Parametric Design. London, New York, NY: Routledge. 300 s.

# LIITE A: ESIMERKKILASKELMA

## General data

Bolts 4 x HPM30  
 Baseplate 510 x 450 x 30 (S355)  
 Column WI300-15-20X300

Connection has been designed so that tension capacity of anchor bolts will be the weakest link of connection.  
 The resistance of other parts (baseplates and vertical stiffeners) is greater than the resistance of bolts.  
 Conservative simplifications can be considered when calculating capacities



N	0,00	kN
My	120,00	kNm
Mz	0,00	kNm

Thickness of baseplate	$t_{pl}$	30	mm
Baseplate dimension	$h_{pl}$	510	mm
Baseplate dimension	$b_{pl}$	450	mm
Distances from edge of base plate to centroid of bolt in row (in z-direction)	$e_z$	60	mm
Distances from edge of base plate to centroid of bolt in row (in y-direction)	$e_y$	110	mm

Non-circular patterns		
Yield line	Single curvature $l_{eff,nc} = \frac{b_p}{2}$	$l_{eff,nc1}$ 225,0 mm
	Individual end yielding $l_{eff,nc} = \frac{n}{2}(4m_x + 1.25e_x)$	$l_{eff,nc2}$ 255,0 mm
	Corner yielding of outer bolts, individual yielding between $l_{eff} = 2m_x + 0.625e_x + e + (n - 2)(2m_x + 0.625e_x)$	$l_{eff,nc3}$ 237,5 mm
	Group end yielding $l_{eff} = 2m_x + 0.625e_x + \frac{(n-1)p}{2}$	$l_{eff,nc4}$ 242,5 mm
Circular patterns		
	Individual circular yielding $l_{eff,cp} = \pi m_x$	$l_{eff,cp1}$ 282,7 mm
	Individual end yielding $l_{eff,cp} = \frac{n}{2}(\pi m_x + 2e)$	$l_{eff,cp2}$ 361,4 mm
		$l_{eff} (min)$ 225,0 mm

Effective length of equivalent T-stub	$l_{eff}$	225,0	mm
Bolt hole center distance to flange weld (bevel V-weld)	$m_x$	45	mm
Steel safety factor	$\gamma_{MO}$	1	
Plastic bending resistance	$M_{pl,Rd,Stub} = l_{eff} * (t_p^2 * f_y) / (4 * \gamma_{MO})$	18,0	kNm
Tensile resistance of the T-stub	$F_{T,1-2,Rd} = 2M_{pl,Rd,Stub} / m_x$	799	kN
$F_{T,3,Rd}$ Anchor bolt design resistance [kN]	$F_{T,3,Rd}$	440	kN

### Tension capacity of bolts 4 x M30

Number of bolts above column flange (total = 4 pcs.)	$n_{bolts}$	2	pcs.
Anchor bolt diameter	$d_{bolt}$	30	mm
Anchor hole tolerance	$d_{d,tol}$	10	mm
Tension capacity of single bolt	$N_{bolt,Rd}$	220	kN
Total tension capacity of bolts	$N_{t,Rd} = 2 * n_{bolts} * N_{bolt,Rd}$	880	kN
Lever arm for bolt row $M_y$	$z_y = h_{pl}/2 - e_{bz} + h_c/2 - t_f/2$	335	mm
Tension moment capacity of bolts ( $M_y$ )	$M_{y,t,Rd} = n_{bolts} * N_{bolt,Rd} * z_y$	147	kNm
Tension utilization rate	$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,t,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,t,Rd}} \leq 1$	0,81	