

Eres Berki

Liittopilarin pohjalevyn mitoitus ja toiminta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinööriytyö

29.4.2018

Tekijä Otsikko	Eres Berki Liittopilarin pohjalevyn mitoitus ja toiminta
Sivumäärä Aika	78 sivua + 1 liite 29.4.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennesuunnittelu
Ohjaajat	Suunnittelupäällikkö Juhani Syrjä Osastopäällikkö Fia Inkala
<p>Tässä insinööriyössä perehdyttiin yksityiskohtiin, joita liittopilarien pohjalevyjen mitoituksessa pitää huomioida. Pohjalevyjen mitoitus rajattiin liittopilareihin, joidenka profiilit olivat pyöreitä tai suorakaiteita. Mitoituksessa haluttiin selvittää, millaisia kuormia pohjalevyyn kohdistuu, ja miten pohjalevyn paksuuden säätelyllä vaikutetaan sen kestävyys ja liitoksen toimintaan.</p> <p>Insinööriyö tehtiin Ramboll Oy:n Espoon teräsuunnitteluyksikölle. Ramboll on vuonna 1945 perustettu suunnittelutoimisto, joka oli erikoistunut radiomastojen suunnitteluun. Vuonna 2003 yrityksestä tuli kansainvälinen suunnittelu- ja konsultointialan yritys, jonka pääkonttori sijaitsee Tanskan pääkaupungissa Kööpenhaminassa.</p> <p>Aihevalinta perustui siihen, ettei liittopilarien pohjalevyjen mitoituksesta ole paljon aikaisempaa materiaalia, joka käsittelisi sen eroavuuksia yksikomponenttisista teräspilareista tai IPE/HEA-pilareista. Eurokoodeissa tehdyt pohjalevyn mitoitusmenetelmät perustuvat tietyn tyyppisten pilareiden pohjalevyjen mitoitukseen. Insinööriyössä perehdytään eurokoodeissa esitettyyn puristuneen T-osan mitoitukseen, sekä sen soveltavuuteen suorakaidepilareihin. Lisäksi Insinööriyössä perehdytään liittopilarin ominaisuuksiin ja voimien jakautumiseen. Lopuksi työssä pyritään selvittämään, miten mitoitusmenetelmät soveltuvat pyöreiden liittopilareiden pohjalevyihin.</p> <p>Työssä perehdyttiin eurokoodeissa esitettyihin kaavoihin ja aikaisemmin tunnettuihin materiaaleihin. Lisäksi työssä vertailtiin laskentatuloksia Excel-laskentapohjan sekä RFEM:n mallin väliltä. Tavoitteena oli ymmärtää, millaisia voimia perustuksiin kohdistuu, ja miten ne voidaan mitoittaa siten, että perustuksen kestävyys olisi varmalla puolella.</p>	
Avainsanat	Liittopilari, pohjalevy, pintapaine, taivutuskestävyys, c-mitta

Author Title	Eres Berki Calculation methods for base plates of composite columns
Number of Pages Date	78 pages + 1 appendices 29.4.2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building design
Professional Major	Civil Engineering
Instructors	Juhani Syrjä, Team Leader Fia Inkala, Team Manager
<p>The thesis introduces the details that must be taken into account in the dimensioning of the baseplates of composite columns. The dimensioning of the baseplates was limited to the cases of circular and rectangular profiles. The design sought to find out what kind of loads the baseplate is exposed to and how the regulation of the thickness of the baseplate will affect its durability and the behavior of the connection. The study was conducted for the Ramboll Oy's Espoo Steel Design unit.</p> <p>There is little previous material for the dimensioning of composite columns dealing with the differences between single-component steel columns or IPE / HEA columns. The baseplate design methods used in Eurocodes are based on the design of the baseplates of certain types of columns. The thesis deals with the dimensioning of the compressed T-section shown in Eurocodes and its suitability for rectangular columns. In addition, the study focuses on the characteristics of the composite column and the division of powers. Finally, the aim was to find out how design methods apply to the baseplates of circular composite columns.</p> <p>The study presents the formulas and the previously known materials in the Eurocodes. Additionally, the study compares the computation results between the Excel spreadsheet and the RFEM model. The goal was to understand what kind of forces the foundations face and how they can be dimensioned so that the endurance of the foundation is on the secure side.</p>	
Keywords	composite column, base plate, surface pressure, bending resistance, c-dimension

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Liittopilarit	2
2.1	Liittopilarien käyttötarkoitus	2
2.2	Liittopilarityypit	4
2.3	Liittopilarin raudoitus ja betonointi	6
2.3.1	Raudoituksen asennus	7
2.3.2	Raudoituksen asennuskulma	8
2.4	Liittopilarin perustustyypit	8
2.5	Liitoksen kiertymisjäykkyys	11
3	Kuormat	12
3.1	Liittopilarin sijainnin vaikutus	12
3.2	Voimakuviot	14
4	Pohjalevyliitosten mitoitus	17
4.1	Pohjalevyn mitoitus Eurokoodin mukaan	17
4.2	Puristetun pinnan mitoitus	18
4.3	Pohjalevyn kestävyys	20
4.3.1	Pohjalevyn taivutuskestävyys	20
4.3.2	Plastisen taivutusvastuksen vertailu elastiseen taivutusvastukseen	24
5	Pyöreän pilarin pohjalevyn mitoitus	26
5.1	Pyöreän pilarin pohjalevyn mitoituksen haasteet	26
5.2	Perustukseen kohdistuvat voimat	30
5.2.1	Normaalivoima elementtimenetelmällä	30
5.2.2	Kimmomoduulisuhde liittopilarissa	32
5.3	Puristuskestävyys tunnettujen jännitysten avulla	33
5.4	Sektorimenetelmä	36
5.4.1	Vaipan jakaminen fraktiileihin	37
5.4.2	Sektorien määrän vaikutus	39
5.5	Pohjalevyn mitoitus liitoksen vetopuolen mukaan	42

6	FEM-analyysi	43
6.1	Puristusvoimien jakautuminen teräksessä	43
6.2	2D-mallin tulokset	44
6.3	Betonin voimien hovaantuminen	47
7	Anturan ominaisuudet	49
7.1.1	Jälkivalubetonin lujuuden merkitys laskennassa	49
7.1.2	Voimien jakautuminen perustuksiin	50
8	Pulttien mitoitus	53
8.1	Pulttien sijoittelu	53
8.2	Peruspulttien ankkurointitavat	54
8.3	Momenttivarsi ja myötötavat	56
8.4	Pultteihin kohdistuvat voimat	59
8.5	Kitkan huomioiminen mitoituksessa	60
9	Hitsauksen mitoitus	62
10	Erikoistapaukset	64
10.1	Pohjalevyn jäykisteet	64
10.2	Epäsymmetriset perustukset	65
10.3	Lamellin repeäminen	65
11	Palo- ja korroosiosuoja	66
11.1	Palomitoitus	66
11.2	Perustuksen lämpeneminen	68
11.3	Korroosiosuojat	69
12	Laskentapohjien suunnittelu	71
12.1	Excel-taulukko	71
12.2	Vaihtoehtoiset laskentataulukot	72
13	Yhteenveto	72
	Lähteet	76
	Liitteet	
	Liite 1. Pilarin pohjalevyn kiinnitykset	

Lyhenteet ja käsitteet

FEM	Finite element modelling/method. Elementtimenetelmään perustuva mitoitusohjelma.
RFEM	Dlubalin RFEM-ohjelma, jolla mitoitetaan 2D tai 3D rakenteiden reaktioita matriisilaskentaan perustuvilla menetelmillä.
CAD	Computer-aided design, eli tietokone avusteinen piirto tai laskentaohjelma.
WQ-palkki	Suorakaiteen muotoinen teräspalkki, jonka laippa toimii onteloiden kannattimena.
DELTA	Peikon patentoima vaihtoehtoinen palkkiratkaisu WQ-palkkien tilalle.
IPE	Korkea I-profiilin muotoinen kuumavalssattu palkki
HEA	Leveälaippainen H-profiilin muotoinen kuumavalssattu palkki tai pilari
M_{Ed}	Ulkoinen taivutusmomentti
$M_{p,Ed}$	Pohjalevyyn kohdistuva taivutusmomentti
$M_{el,Rd}$	Kimboteoreettinen taivutusmomenttikestävyys
N_{Ed}	Ulkoinen aksiaalinen voima
N_c	Tarkasteltavaan vaippaan kohdistuva puristava voima joka jaetaan kahdella, tukireaktion resultantti pilarin reunan ulkopuolella
N_s	Tarkasteltavaan vetopulttiriviin kohdistuva vetovoima
$N_{1,Ed}$	Pulttiliitokseen kohdistuva voima
A_{rqd}	Pienin vaadittu pinta-ala
f_{cd}	Betonin mitoituslujuus

f_{jd}	Betonin pintapaineen kestävyys, joka määräytyy kertomalla betonin mitoituslujuus 2/3:lla sekä anturan muodon huomioivalla k_j kertoimella
q	Pintapaine jaettuna tehollisella leveys, tasainen kuorma
l_{eff}	tehollinen leveys, laipan leveyssuuntaan mitattu puristuksen alueen leveys
$Q_{pl,Rd}$	Plastinen leikkauskestävyys
σ_c	Puristusjännitys betonissa
σ_s	Puristusjännitys teräksessä
\emptyset	Raudoitusteräksen halkaisija

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä perehdytään pohjalevyjen mitoitukseen. Työssä halutaan ymmärtää, mihin pohjalevyjen mitoitus perustuu, ja millaisiin tapauksiin sitä voidaan soveltaa. Lähtökohtaisesti perehdytään, millaisiin tapauksiin Eurokoodeissa esitetyn pohjalevyjen mitoitus rajoittuu. Toiseksi halutaan vertailla, voiko kyseistä menetelmää soveltaa liittopilarin perustuksiin. Insinööriyössä tutkitaan, miten liittopilarit eroavat tavanomaisista teräspilareista voimien jakautumisen sekä toiminnan suhteen. Pohjalevyn mitoituksen kaavoja pyritään purkamaan siten, että ymmärretään, mistä ne on johdettu ja miten niitä voidaan soveltaa, kun käytetään liittopilaria. Staattisesta mallista pyritään johdattelemaan, millaisia voimia pohjalevyyn todellisuudessa kohdistuu, sekä millaisia jännityksiä ne aiheuttavat perustuksiin.

Insinööriyö tehdään Ramboll Finland Oy:n Espoon toimistolle. Ramboll on kansainvälisesti toimiva suunnittelu ja konsultointialan yritys, jonka pääkonttori sijaitsee Tanskassa Kööpenhaminassa. Suomessa Rambollilla oli vuonna 2018 2300 asiantuntijaa, jotka toimivat infrastruktuurin, ympäristön ja rakennusten suunnittelun, rakennuttamisen, rakentamisen ja ylläpidon sekä johdon konsultointiin liittyvissä tehtävissä.

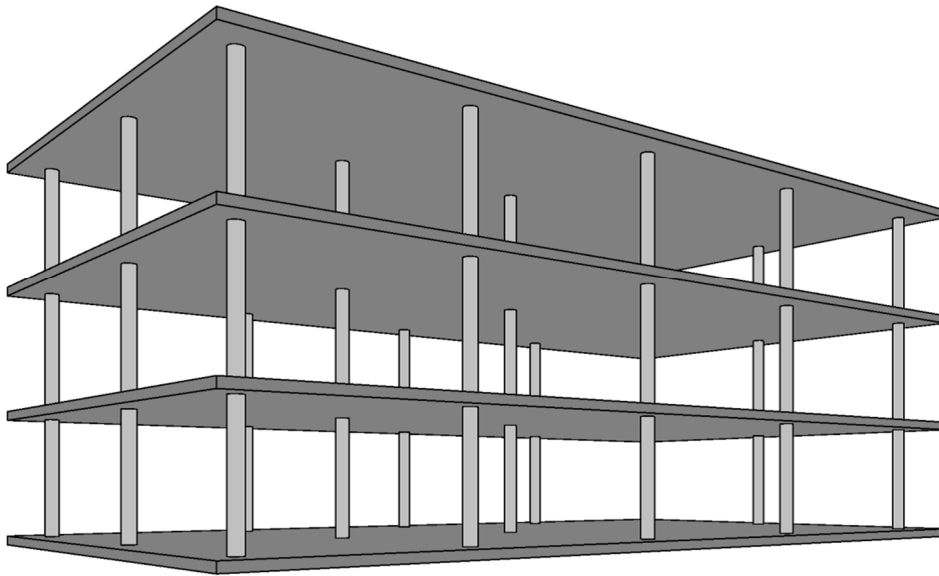
Työ rajataan liittopilarien pohjalevyjen mitoitukseen, josta halutaan tehdä laskentapohja Excelille. Vaikka liittopilareita on käytetty vuosikymmenten ajan, putkimaisten liittopilarien käyttö on yleisempää pohjoismaissa, kuin muualla Euroopassa. Eurokoodeissa käsitellyt mitoitukset perustuvat I-profiilien mitoitukseen, mikä aiheuttaa tiettyjä rajoitteita pohjalevyn mitoituksessa.

Insinööriyössä tehdään kaksi laskentataulukkoa, sillä pyöreiden pilareiden tapauksissa puristuspinna pohjalevyn alla on vaikeammin määritettävissä, johtuen sen kaarevasta muodosta. Tuloksia vertaillaan lisäksi RFEM:llä tehtyjen 2D-mallien kanssa, joissa pyritään havainnoimaan, miten pohjalevyssä vallitsevat jännitykset todellisuudessa jakaantuvat laipoille.

2 Liittopilarit

2.1 Liittopilarien käyttötarkoitus

Suomessa yksi yleisimpiä pilarityyppejä ovat liittopilarit. Liittopilareilla saadaan rakennettua kehärakenteita. Liittopilarin edut yleisiin pilarityyppeihin nähden ovat niiden hoikkuus ja keveys verrattuna betonipilareihin, sekä sen palonaikainen toiminta verrattuna pelkkiin teräspilareihin.



Kuva 1. Havainnekuva kehärakenteesta, jossa kantavina rakenteina toimivat liittopilarit.

Liittopilareilla pyritään rakentamaan rakenteita, joissa tilojen muokattavuus halutaan pitää mahdollisimman helppona ja tiloista saadaan mahdollisimman suuria. Tämä saavutetaan pitkälti siten, että teräsrakenteilla saadaan rakennettua tavanomaista kevyempiä ja hoikempia rakenteita ilman kantavia väliseiniä. Teräs- sekä liittopilarirakenteilla on esteettinen etu siinä, että pilareihin kiinnitettävät palkit eivät jää pykältämään laatastons alle, jolloin välipohjista saadaan tehtyä tasaisempia.



Kuva 2. Laatasto kannatetaan joko wq- tai delttapalkkien varassa, joka tekee laatastosta suhteellisen tasaisen [26].

Tässä työssä käsiteltävät liittopilarit koostuvat joko suorakaideputkista tai pyöreistä putkista, raudoituksesta sekä betonista. Betoni pumpataan liittopilarin sisään valuuaukon kautta työmaalla asennuksen jälkeen. Betoni saadaan kiinnitettyä teräsvaippaan mekaanisesti raudoituksen avulla. Betonitäytteen yhteisvaikutuksesta teräsvaipan kanssa seuraa se, että betoni ja rauditus ottavat osan laatastosta tulevasta puristuksesta vastaan. Betonitäytöllä saadaan rakenteelle suurempi jäykkyys, kuin eri osilla olisi yksin. Yhteistoiminnalla pilareille saadaan parempi kestävyys. [1, s.13.]

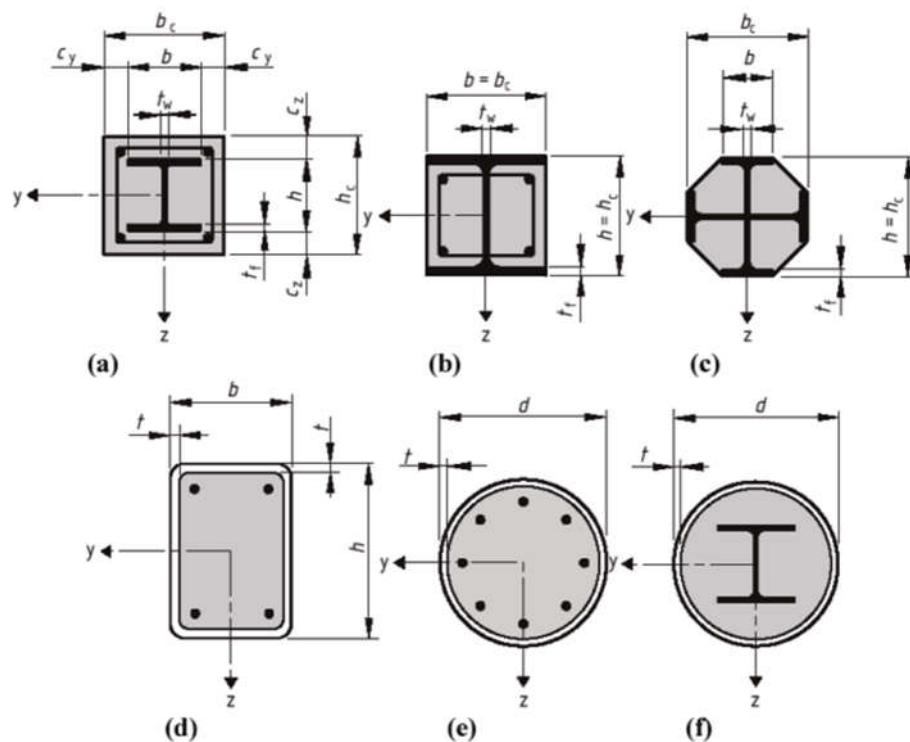
Itse pilarien pääasiallinen tehtävä on ottaa puristusta vastaan ja saattaa se hallitusti alas perustuksiin. Jos rakenteeseen kohdistuu suuria sivuttaisia kuormia tai kuormituksesta johtuvaa taivutusta, pitää pilaria jäykistää muilla rakenteilla, kuten ristituilla tai jäykistävillä seinillä.

Liittopilareiksi kutsutaan myös pilareita, joissa teräsprofiili on valettu betonipilarin sisään. Tällöin palonkesto aika perustuu betonipeitteeseen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää putkiprofiileja, jolloin palonaikainen toiminta perustuukin sisällä olevaan betonipilariin.

Liittopilareilla yleisesti on todennetusti luontainen palonkestävyys. Putkiprofiilisten liittopilarien palonaikainen toiminta perustuu rakenteen sisällä olevan betonipilariin, jolla on kyky toimia kantavana rakenteena myös palotilanteen aikana [1, s. 270]. Tyypillisten teräspilarien palonkesto-aika on suhteellisen lyhyt, johtuen teräksen lujuuden menetyksestä lämpötilan kohotessa. Palotilanteessa kuormien oletetaan siirtyvän pelkän betonin ja sen raudoituksen varassa, sillä vaipan oletetaan menettävän kantokykynsä saavutettuaan kriittinen lämpötila. [1, s. 270.]

2.2 Liittopilarityypit

Suomessa käytettyjä liittopilareita ovat pyöreät-, neliö- ja suorakaidepilareit. Etenkin pyöreitä liittopilareita nähdään usein. Liittopilarit valmistetaan tyypillisesti vakio kokoisista putkiprofiileista, jotka tuodaan työmaalle valmiiksi raudoitettuna. Pileri täytetään betonilla vasta työmaalla painevalulla [25].

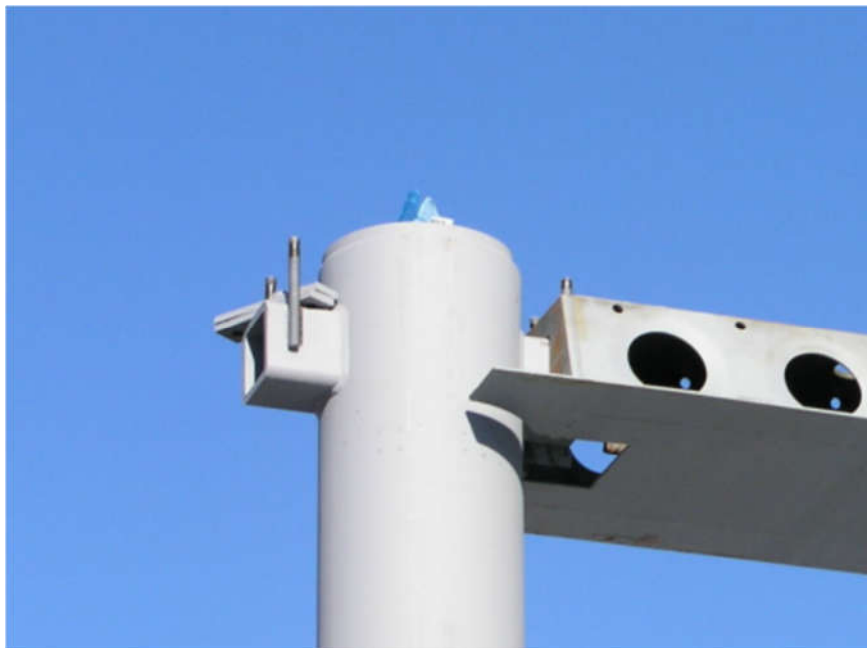


Kuva 3. Tyypillisiä liittopilarityyppejä. Pilarit d) ja e) kuvaavat tavanomaisia liittopilareita, joissa rauditus on putken sisällä. Tässä insinöörityössä käsitellään d) ja e) tyypillisiä pilareita. Kuva [13, s.53].

Liitostyypit määräytyvät sen mukaan, millaisia liitoksia pilarissa on. Liitostyypit ovat konsoliliitokset, pulttiliitokset pilarien päissä, pulttiliitokset pilarien sivulla tai hitsausliitokset [26]. Liittopilareihin kiinnitetään tavallisimmin joko WQ- tai Delta-palkkeja. Mutta niihin on mahdollista tukea myös seiniä konsolien avulla.



Kuva 4. Pulttiliitos pilarin reunoilla [27, s.1].



Kuva 5. Konsoliliitos [26].



Kuva 6. Pulttiliitos pilarin päällä [26].

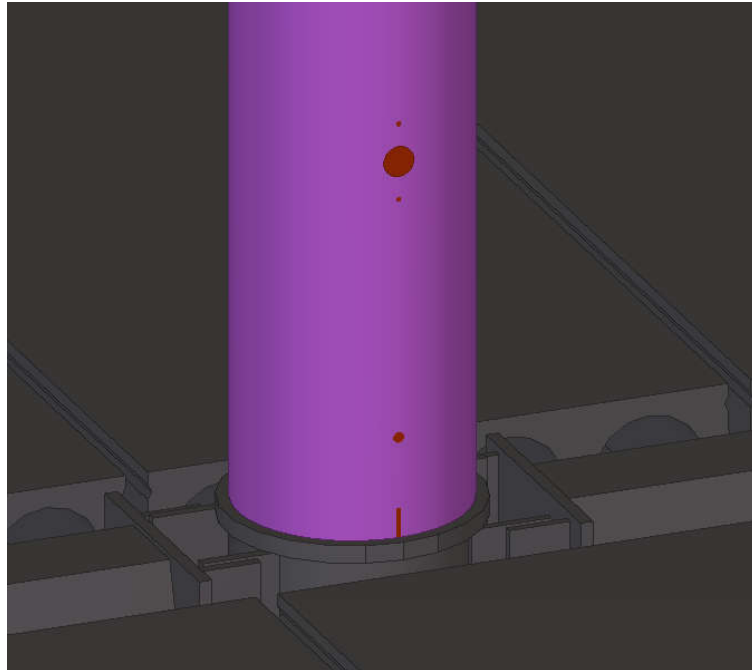
2.3 Liittopilarin raudoitus ja betonointi

Liittopilarien sisään asennetaan tehtaalla raudoitushäkki, joka on hitsattu kiinni putkeen [28]. Raudoitus voidaan hitsata kiinni jopa pohjalevyyn, jonka jälkeen pohjalevy hitsataan kiinni putkeen. Pyöreiden pilareiden tapauksessa raudoitus voidaan tarpeen mukaan asentaa kiinni tietyssä ennalta määrättyssä kulmassa, jolloin raudoitukselle laskettu jäykkyys toimii suunnitellulla tavalla.



Kuva 7. Raudoitus liittopilarin sisällä [27].

Betonitäytön pääasiallinen tarkoitus on saada rakenne toimimaan yhtenäisenä elementtinä ja antaa pilarille palonaikainen kestävyys. Tulipalon sattuessa liittopilarin vaipan oletetaan menettävän kantokykynsä saavutettuaan kriittinen lämpötila. Palotilanteessa kuormien oletetaan siirtyvän kokonaan betonin ja raudoituksen varassa. Betonivalu pumpataan liittopilariin työmaalla valuaukkojen kautta, jotka sijaitsevat pilarin alapään kyljessä. Betoni pumpataan siis pilaria pitkin ylöspäin, jolloin liittopilarin yläpäästä nähdään, milloin pilari on täytynyt tiiviisti ylös asti [1, s.229].



Kuva 8. BIM-mallista otettu kuva liittopilarin valuaukosta, jonka kautta betoni pumpataan.

2.3.1 Raudoituksen asennus

Raudoitus asennetaan hitsattuna elementtinä putken sisään. Raudoituksen ollessa oikeassa kulmassa, kiinnitetään se tyyppillisesti hitsaamalla putkeen kiinni. Tällöin työmaalla pilari kiinnitetään oikeaan asentoon ja valetaan täyteen betonia.

Pohjalevy voidaan hitsata ensin kiinni raudoitukseen ja sitten putkeen, jolloin rakenteelle saadaan momenttijäykkyyttä myös palotilanteessa. Joissakin tapauksissa raudoituksen annetaan tulla pilarin toisesta päädyt ulos tartuntaominaisuuksien vuoksi.

By58:n mukaan betonia saa olla raudoituksen ja pohjalevyn välillä enintään 30 mm [By 58, s 228].

2.3.2 Raudoituksen asennuskulma

Raudoitus voidaan asentaa tietyssä kulmassa, sillä se vaikuttaa neliömomenttiin ja sen myötä taivutusjäykkyyteen. Yksittäisen harjateräksen jäyhyysmomentti on:

$$I_0 = \frac{\pi \phi^4}{64} \quad (1)$$

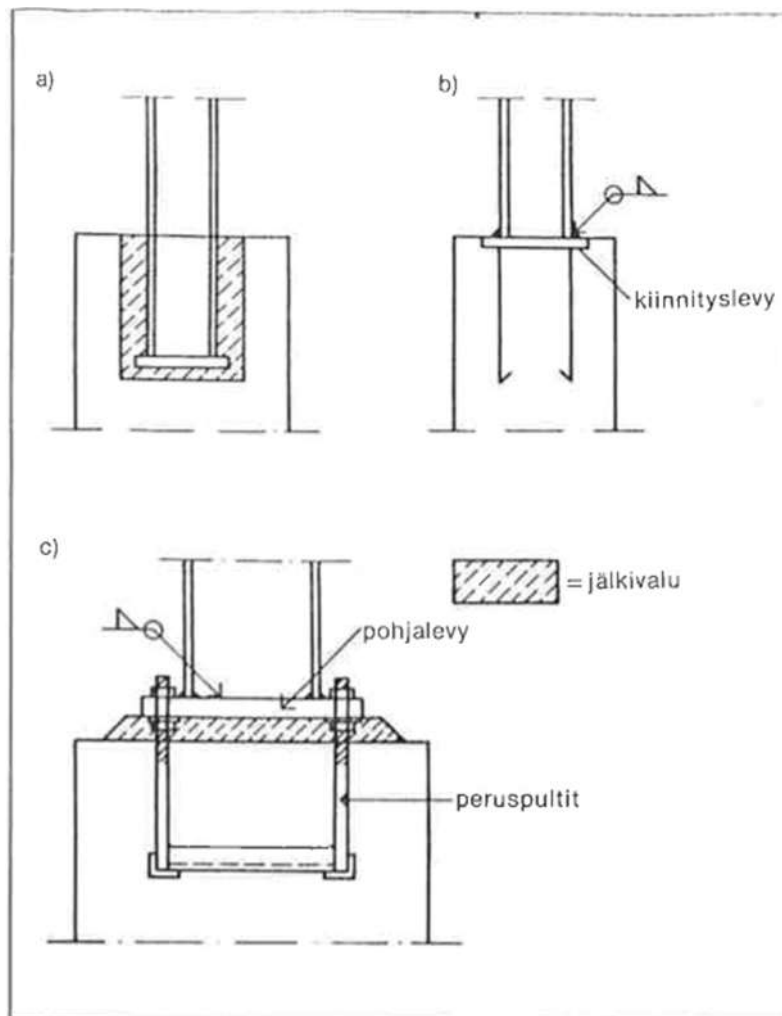
Raudoitusryhmän jäyhyysmomentti lasketaan kunkin raudan keskiön etäisyydestä raudoitusryhmän painopisteakselista, jonka suhteen taivutuksen oletetaan tapahtuvan. Jos raudoituksia kierretään ympäri, e mitta muuttuu jokaiselle raudalle:

$$I_\phi = nI_0 + \sum_{i=1}^n e_i^2 A_i \quad (2)$$

Kerroin n on pääterästen lukumäärä, A_i on kunkin teräksen pinta-ala, joka on tyypillisesti sama kaikilla pilarin pääteräksillä. Saatua suuretta käytetään luvussa 5.2.1 raudoitusryhmän jäyhyysmomenttina, jolla ratkaistaan raudoituksessa vallitseva jännitys.

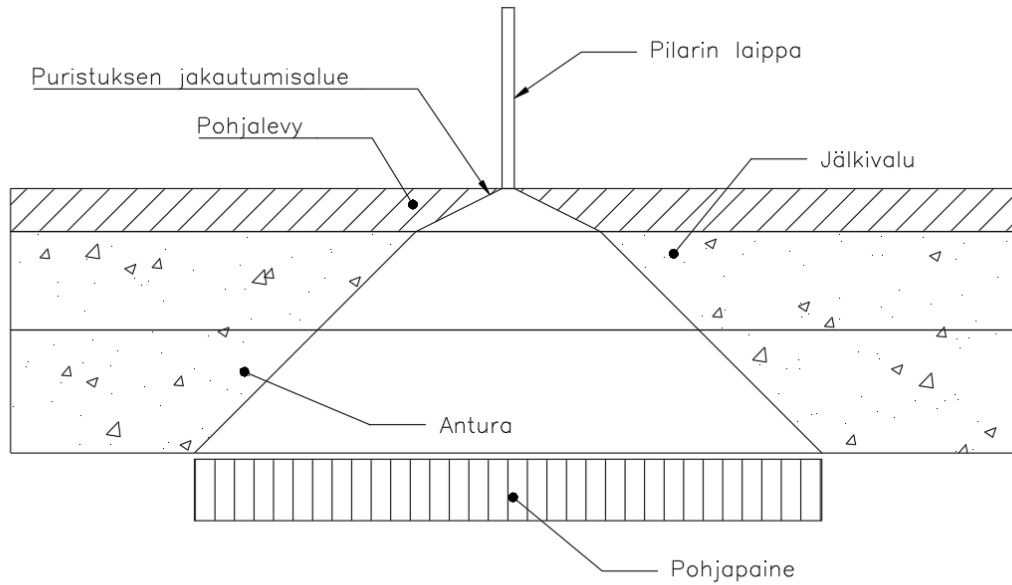
2.4 Liittopilarin perustustyyppit

Liittopilarit voidaan olettaa joko jäykästi kiinnitetyksi tai nivelellisiksi. Mastojäykistetyt liittopilarit voivat ottaa momenttia vastaan perustuksissa. Perustustapoja ovat joko holkkiliitokset, jossa pilari valetaan perustuksen sisään. Kiinnityslevykiinnitykset, joissa kiinnityslevy on valettu kiinni perustukseen ja pilari kiinnitetään levyyn hitsaamalla. Yleisin tapa kiinnittää liittopilari jäykästi perustukseen tapahtuu pohjalevyn avulla, joka on hitsattu kiinni pilariin [20, s.124]. Pohjalevy kiinnitetään pulteilla perustukseen, jonka jälkeen liitos valetaan itsetiivistävällä betonilla tiiviiksi. Jälkivalun tarkoitus on muodostaa tiivis kontaktipinta pohjalevyn alle ja jakaa pohjalevyltä tule kuorma anturalle. Lisäksi valamalla perustus betonin sisään, saadaan liitokselle palonaikainen suojakerros.



Kuva 9. Perustustavat a) holkiliitos b) kiinnityslevyliitos c) peruspulttiliitos [20, s.124].

Kuten aikaisemmin mainittiin, liittopilari kiinnitetään perustukseen joko holkiliitoksella, kiinnityslevyllä tai peruspulteilla [20, s.124]. Tässä opinnäytetyössä perehdytään vain peruspulttien varaan kiinnitettyihin pohjalevyihin. Tyypillisesti suurempien pilareiden ollessa kyseessä, tai vaadittaessa parempaa asennustarkkuutta, on suotavaa käyttää peruspulttivaihtoehtoa [20, s.124].



Kuva 10. Poikkileikkaus jälkivalusta laipan kohdalta, korkealujuisella jälkivalulla voidaan jakaa anturalle muuten liian suuria kuormia, jolloin pintapaine saadaan pienemmäksi

Kun liittopilari on pohjalevyn avulla asennettu paikoilleen, tehdään jälkivalu itsetiivistyvällä betonilla. Syynä tähän on se, että betonin kutistuminen ei saa aiheuttaa pohjalevyn taipumista. Riippuen rakenteen kuormista, jälkivaluna voidaan käyttää myös normaalilujuista betonia. Jälkivalubetonina käytetään usein C60/75 lujuuksista itsetiivistyvää betonia. Jälkivalun suuri lujuus auttaa tapauksissa, joissa anturan lujuus ei kestä pohjalevyltä tulevaa kuormaa suoraan, tällöin jälkivalu jakaa kuormia vielä entuudestaan lisää. Jälkivalun suunnittelua käydään tarkemmin luvussa 7.1.1.

Yleisimmissä tapauksissa pohjalevy ja pultit valetaan lattiavalun alle suojaan, jolloin perustus on suojattuna palotilanteelta, korroosiolta ja lisäksi liitos saadaan mahdollisen palon aikana pysymään jäykempänä.

Tapauksissa joissa peruslevy ei jää lattiavalun alle piiloon, valetaan valumuotilla levyn päälle suojavaalu, jonka sisään pultit jäävät piiloon. Tällöin perustus on suojattu paremmin ulkoisilta rasituksilta. Pahimmillaan pohjalevy pulitteineen jätetään täysin paljaksi, jolloin suunnittelussa on huomioitava rakenteen palonaikainen suojaus muilla menetelmillä. Palosuojausta käydään tarkemmin läpi luvussa 11.1.

2.5 Liitoksen kiertymisjäykkyys

EN 1993-1-8:ssa esitetään menetelmiä, joilla voidaan määrittää liitoksen kiertymisjäykkyys. Kiertymisjäykkyys määrittelee, miten paljon liitoksen oletetaan ottavan momenttia vastaan. Tällöin rakenteelle saadaan määritettyä tarkemmin millaiset jännitykset sinne muodostuvat.

Liittopilarin perustuksen oletetaan käytännössä ottavan osan momentista vastaan, sillä liitoksen ei todellisuudessa oleteta toimivan täysin jäykkänä, tällöin liitos on jotakin niveltuen ja jäykäntuen väliltä. Kiertymisjäykkyys S_j määritetään jäykkyystekijän k_i , momenttivarren z sekä jäykkyyssuhteen μ avulla [12, s.100]. jäykkyystekijän sekä jäykkyyssuhteen määrittäminen tapahtuu liitteen 1 taulukoiden mukaan.

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum \frac{1}{k_i}} \quad (3)$$

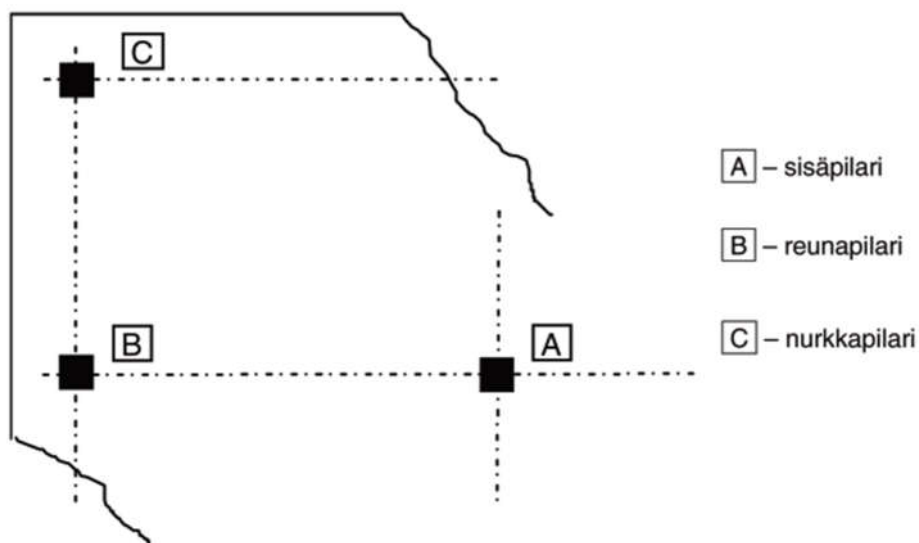
Mitoittaessa pohjalevyn taivutuskestävyyttä, oletetaan perustuksen käyttäytyvän kuitenkin jäykkänä tukena, ja lisäksi taivutuskestävyys mitoitetaan kimmoteorian mukaisella taivutuskestävyydellä. Tällöin laskenta tapahtuu varmalla puolella.

Eulerin nurjahduspituuden määrittäminen L_{cr} määräytyy sen mukaan, miten pilari on tuettu. Jäykästi tuettu pilari joka on yläpäästään tuettu nivelellisesti saa nurjahduspituudeksi $0,7 * L$, jossa L on pilarin pituus. Tapauksissa joissa pilari on tuettu nivelellisesti päittäin, nurjahduspituus kasvaa pituuteen $1 * L$. Tällöin stabiiliteetin menetys saavutetaan aikaisemmin. Etenkin palotilanteessa on huomioitava, kestäkö pilari palonaikaisia kuormia tapauksissa, joissa perustus muuttuu jäykästä tuesta niveltueksi.

3 Kuormat

3.1 Liittopilarin sijainnin vaikutus

Käsiteltäessä yläpään momentin muodostumista, kiinnitetään huomiota pilarin sijaintiin. Pilarit voidaan jaotella kolmeen ryhmään, jotka määräytyvät pilarin sijainnin mukaan. Pilarin ollessa keskikentässä, kuormat tasapainottavat toisiaan jonkin verran, tällöin pilariin kohdistuu pääasiassa aksiaalista puristusta. Pilarin sijaitessa laataston reunassa, aiheutuu kuormista taivutusta laataston keskikentän suuntaan. Pilarin sijaitessa laataston kulmassa, kuormat eivät jakaannu kumpaankaan suuntaan tasaisesti, vaan pilariin kohdistuu biakksiaalista taivutusta. Jos palkit liittyvät pilareihin nivelellisinä, pilarin pään momentit muodostuvat palkin tukireaktion etäisyydestä pilarin keskiakselista. Jopa sisäpilareissa esiintyy momenteja, johtuen pilarin eripuolilta tulevien kuormien eroista. Reunapilareilla kuormat taivuttavat pilaria kiinnityskohtien suuntaisesti. Nurkkapilariin voi muodostua kaksi toisiinsa nähden kohtisuorasti vaikuttavaa momenttia, jolloin pilari pitää mitoittaa vinolle taivutukselle [10, s.73].



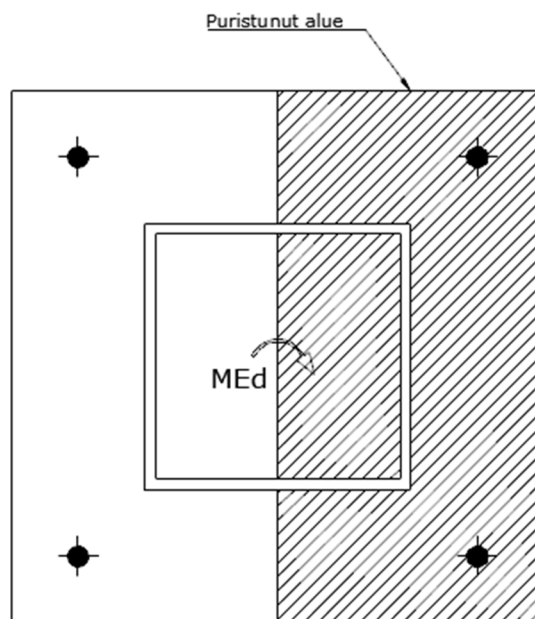
Kuva 11. Pilarien jaottelu sijaintien mukaan [10, s.102].

Palkkien pulttiliitosten keskipisteen etäisyys pilarin keskiöstä aiheuttaa vipuvarren palkin kuorman resultantille. Lisäksi rakenteen vinoudesta johtuva epäkeskisyys sekä rakenteen alkuvinous aiheuttavat lisämomentin pilarin perustukseen.

Eurocodes 1994-1-1:ssä ohjeistetaan huomioimaan toisen kertaluvun vaikutukset, mukaan lukien jäännösjännitykset ja mittaepätarkkuudet, jotka johtuvat poikkeamista pystysuunnissa, käyryyksistä, sovitusrvirheistä ja tahattomista pienistä epäkeskisyyksistä [14, s.54]. Epäkeskisyys edistää taivutusta pilarissa, joka vuorostaan aiheuttaa epätasaisen kuormien jakautumisen pohjalevyssä.

Mitoittaessa pohjalevyä, voidaan taivutuksen olettaa muodostuvan pahimpaan mahdolliseen suuntaan, jolloin taivutusvastus lasketaan sen mukaan. Pyöreiden pilarien taivutusvastus riippuu myös raudoituksen asetelmasta. Taivutusvastus muuttuu siis raudoitusr ryhmän muodostamasta jäyhyysmomentista.

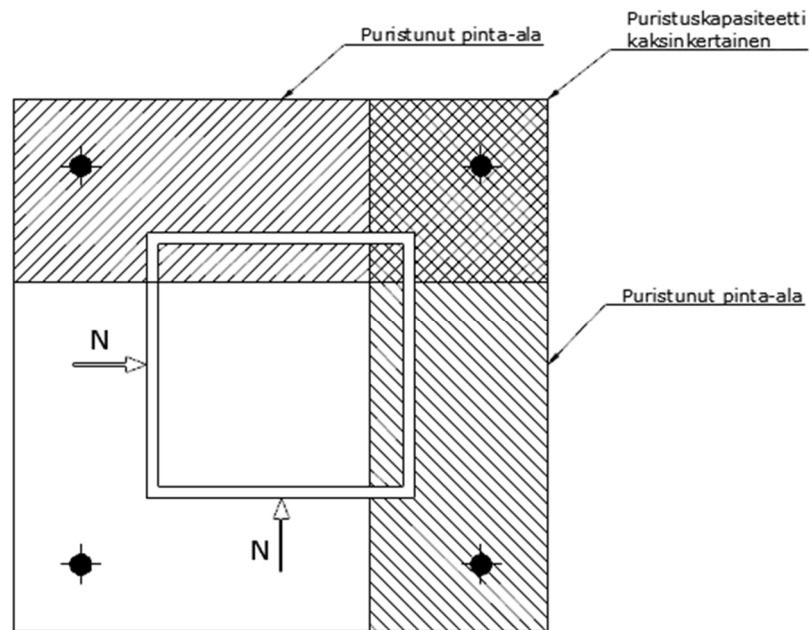
Pelkän momentin rasittaessa pohjalevyä, syntyy neutraaliakselin yhdelle puolelle puristusta ja toiselle vetoa kuvan 12. tapaan:



Kuva 12. Kuvassa pilariin kohdistuu vain momentti, esimerkiksi maston ottaessa vastaan vaakasuuntaista tuulikuormaa, perustuksiin muodostuu taivutusmomentti. Puristunut alue on esitetty viivoitettuna.

Taivutusmomentteja ollessa kaksi, syntyy niiden yhteisvaikutuksesta pilariin vino neutraaliakseli. Yksinkertaisuuden vuoksi, rakenne voidaan mitoittaa kumpaankin taivutussuuntaan erikseen, jolloin huomioidaan biaksisiaalisesta taivutuksesta muodostuvan päällekkäinen puristusalue. Kohtisuorassa keskenään olevat momentit

rasittavat osittain samaa aluetta pohjalevyn alla, jota ei voida hyödyntää täydellä kapasiteetilla kahteen kertaan, vaan se voidaan jakaa puoliksi kummallekin tarkastelulle.

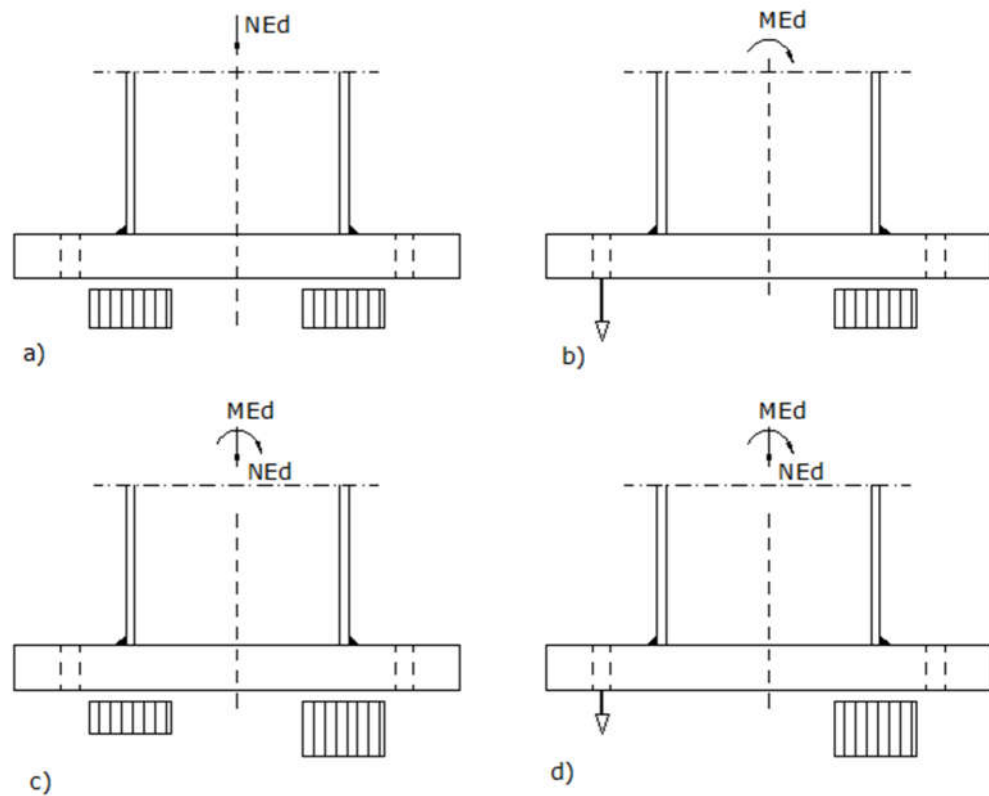


Kuva 13. Pilarin yläpäähän kohdistuvat vaakakuormat N aiheuttavat perustukseen momentin kahteen suuntaan. Yhteen kulmaan kohdistuu päällekkäinen puristus, joka pitää huomioida mitoittaessa puristusjännitystä pohjalevyllä.

Suorakaidepilareilla on hyvä taivutusvastus, jolla varsinkin kohtisuorat momentit voidaan helposti mitoittaa ja hallita. Pyöreiden pilareiden tapauksissa momenteista muodostuu yksittäinen resultantti, joka taivuttaa rakennetta yhteen suuntaan. Tällöin suurin jännitys rakenteessa on pilarin etäisimmällä reunalla neutraaliakselista mitattuna.

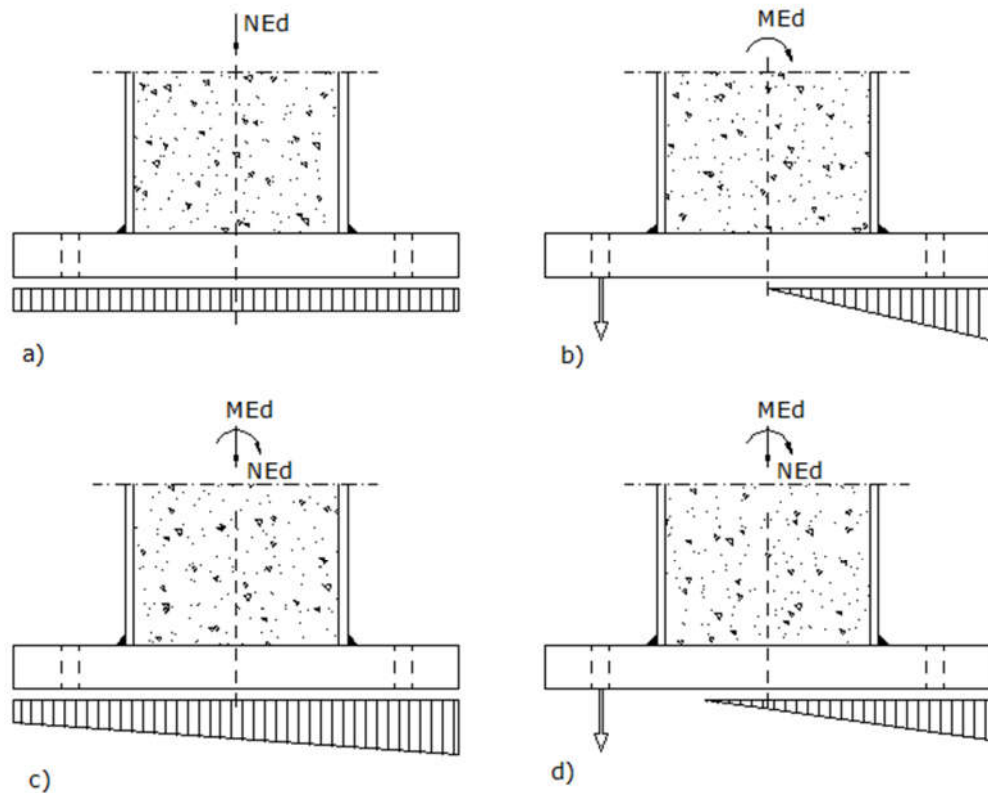
3.2 Voimakuviot

Pohjalevyllä muodostuu puristusta normaalivoimasta sekä taivutuksesta aiheutuvasta puristuksesta. Kuormat määräytyvät rakennusvaiheen mukaan. Asennusvaiheessa pääasiallinen kuorma muodostuu tuulen vaikutuksesta sekä rakennuksen omasta painosta. Ennen pilarin täyttämistä betonilla, kuormat kulkeutuvat pelkän vaipan välityksellä, jolloin kuorman jakautunut alue on paljon kapeampi ja perustukseen voi muodostua suurempia jännityksiä.



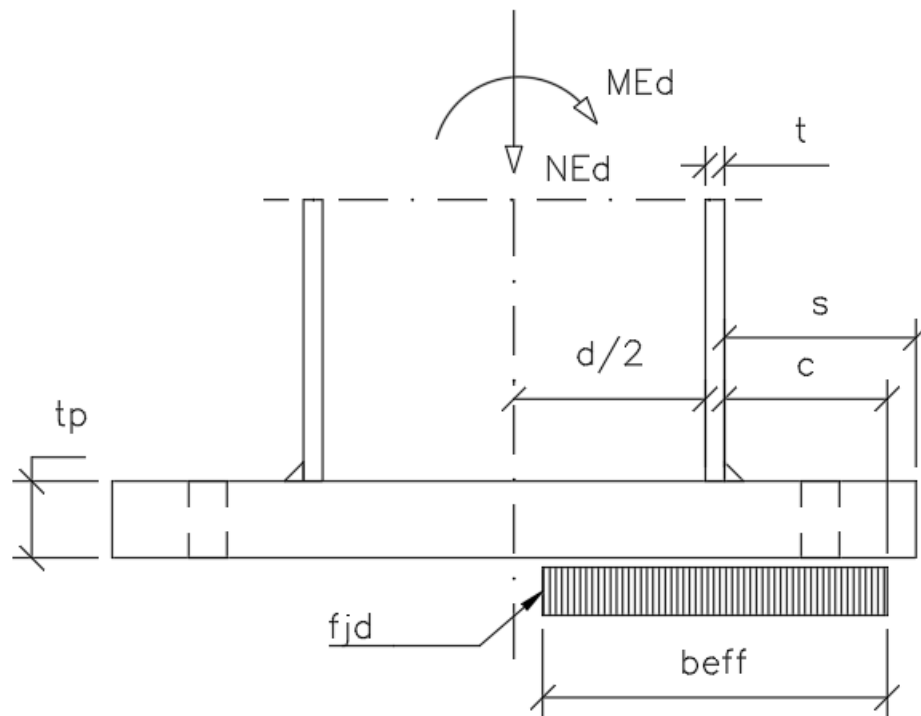
Kuva 14. Pilarin ollessa tyhjä, pohjalevyn ja anturan väliin muodostuu puristusalue, joka sijaitsee symmetrisesti uumien kohdalla. Tapauksessa a) pilariin kohdistuu vain puristusta, tapauksessa b) momentti aiheuttaa vetoa toisen puolen pultteihin. Yhdistelemällä puristus ja momentti, pulttiin kohdistuu joko vetoa kuten tapauksessa d), tai puristusta muodostuu pilarin kummallekin puolelle kuten tapauksessa c).

Liittopilarien pohjalevyjen mitoituksen kannalta puristusjännitys voidaan kuvitella tasaiseksi siltä alueelta, jossa puristusta ilmenee. Yksinkertaistuksena liittopilarin voidaan olettaa siirtävän kuormat pelkän vaipan välityksellä. Tällöin puristunut alue määritetään c-mitan avulla, joka kuvastaa kuorman jakautumispiuutta sivusuunnassa. Pohjalevyn paksuudella säädellään c-mitan pituutta siten, että pilarin alla oleva betoni kestää siihen kohdistuvan paineen. Anturalle liian suuri pinta-paine johtuu siitä, että teräksen kimmokerroin on moninkertainen betoniin nähden, jolloin betonille vaaditaan huomattavasti suurempi pinta-ala, joka pystyy käsittelemään siihen kohdistuvan kuorman.



Kuva 15. Kuvassa esitetään erilaisia kuormitustapauksia riippuen siitä, miten merkittävä normaalivoiman osuus on taivutusmomenttiin nähden. Jännitys muodostuu perustuksen ja pohjalevyn välille. Tapauksessa a) pilariin ei kohdistu kuin puristusta, kuvassa b) mastoon ei vaikuta kuin taivutusmomentti, jolloin neutraaliakseli on rakenteen keskellä. Puristuksen ollessa merkittävä kuten kuvassa c) on pohjalevy kokonaan puristuksessa. Vaihtoehdossa d) momentti aiheuttaa rakenteen toiseen pätyyn osittaisesti vetoa.

Kuvan 15. tapauksesta d) havaitaan tilanne, jossa pohjalevyyn kohdistuu taivutusta, joka pyrkii kiertämään pohjalevyä pilarin reunan kohdalta. Puristuneen alueen leveyttä mitoitetaan samalla tavalla kuten Eurokoodien puristuneen T-osan mitoituksessa. Kyseinen alue määritetään c -mitalla, ja tämä on tärkeä suure pohjalevyn taivutusmomentin laskennassa. Taivutusmomentti muodostuu siis pilarin reunan ulkopuolelle ulottuvan puristusalueen aiheuttamasta kuormasta. Kyseinen alue rajoittuu kuitenkin kahteen ehtoon. Laskettu c -mitta ei voi olla pidempi kuin puolet pilarin sisähalkaisijasta $d/2$, eikä se voi ulottua pohjalevyn ulkopuolelle. Tehollinen alue b_{eff} on siis pienin arvoista $d/2$, c tai s . Jossa s -mitta kuvaa pohjalevyn reunan etäisyyttä pilarin reunasta mitattuna. Oletetaan c -mitan alkavan uuman reunasta, sillä uuman alla oleva puristus ei lisää taivutusta pohjalevyyn [17, s.255].



Kuva 16. Tehollinen leveys b_{eff} määräytyy mittojen c , s tai $d/2$ mukaan. Taivutusvoima on suurimmillaan betonin pintapaine f_{jd}

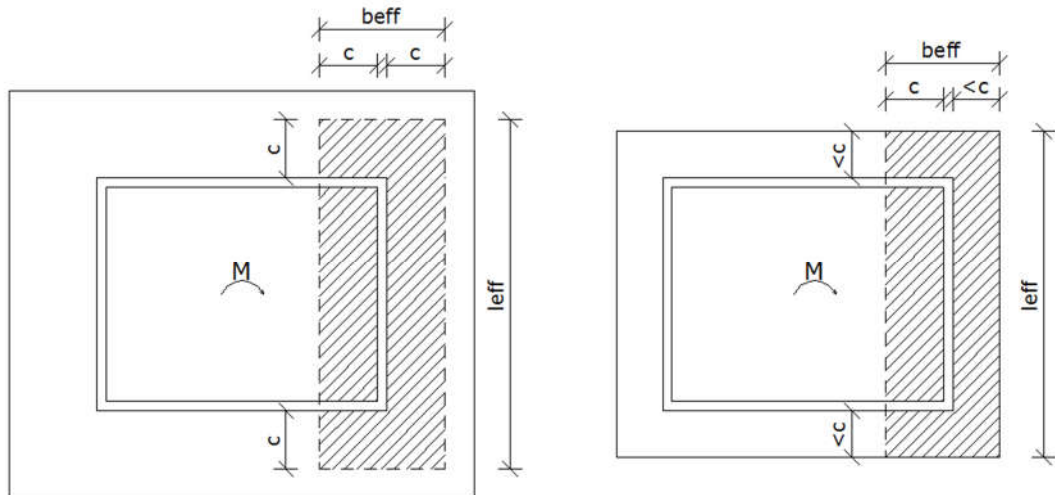
4 Pohjalevyliitosten mitoitus

4.1 Pohjalevyn mitoitus Eurokoodin mukaan

Eurocodes 1993-1-8:ssa käsitellään puristetun ekvivalentin T-osan mitoitusta, jota sovelletaan suorakaidepilarin pohjalevyn mitoituksessa. Pohjalevyn kestävydessä määritetään teräksisen pohjalevyn taivutuskestävyys, kun siihen kohdistuu perustuksen ja teräslevyn välisen paineen aiheuttama taivutus [16, s.103]. Toiseksi voidaan päätellä, että jälkivaluun kohdistuva puristus ei saa ylittää jälkivalubetonin pintapainekestävyyttä. Puristunut alue määritetään c -mitan avulla, joka kuvastaa puristusvoiman jakautumislevyyttä. Jakautumisalueeseen vaikuttavat levyn paksuus t_p , teräksen lujuus f_{yp} sekä betonin pintapaine f_{jd} [12, s.76]. Kaavan (4) johdattelu käydään tarkemmin läpi luvussa 4.3.1.

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_{yp}}{3 * f_{jd}}} \quad (4)$$

Kuten luvussa 3.2 todettiin, c-mitta rajoittuu maksimissaan pohjalevyn reunaan. Muussa tapauksessa c-mitan ulkopuolelle jäävää aluetta ei huomioida mitoituksessa. Leveiden pohjalevyjen tapauksissa ylimenevää aluetta pidetään tehottomana [12, s.76].



Kuva 17. l_{eff} kuvastaa puristuneen alueen pituutta ja b_{eff} puristuneen alueen leveyttä.

Pohjalevyn paksuudella säädellään kahta asiaa. Ensimmäisenä sitä, että pilarin alla oleva betoni kykenee ottamaan laipalta tulevan puristuksen vastaan. Toiseksi paksuudella saavutetaan riittävä pohjalevyn taivutusvastus, joka kestää pintapaineesta aiheutuvan taivutusmomentin.

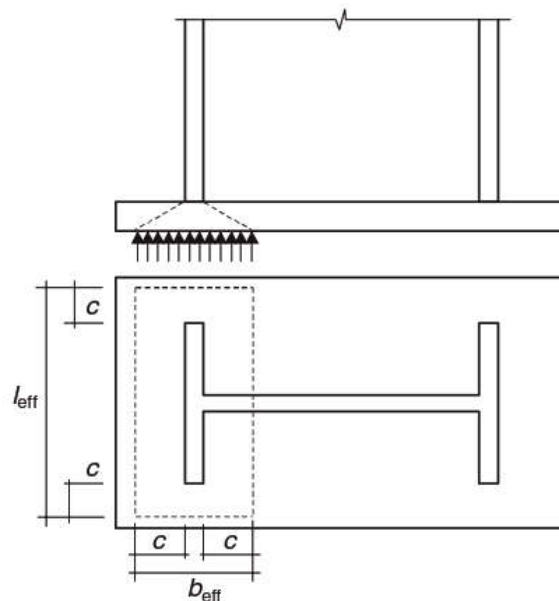
4.2 Puristetun pinnan mitoitus

Tehollisen alueen leveys saadaan mitoitettua, kun tunnetaan c-mitta. Pelkän puristuksen vallitessa, on tehollinen alue koko profiilin ympärillä c-mitan leveydellä.

Asennusvaiheessa, jolloin liittopilari toimii pelkkänä teräspilarina, c-mitta lasketaan samalla tavalla kuin IPE tai HEA -pilareilla. Tällöin c-mitta voi olla suurimmillaan joko $b/2$ tai s , jos jompikumpi reuna tulee mitoituksessa vastaan.

Momentin vaikutuksesta rakenteelle muodostuu neutraaliakseli, jonka toisella puolella on vetoa puristuksen sijaa, silloin c -mittaa käytetään vain puristetun puolen tehollisen alueen määrittämisessä.

I-profiilien tai H-profiilien tapauksissa keskiuumaa ei tyypillisesti huomioida, vaan aksiaalinen voima jaetaan tasan kummallekin uumalle. Vastaavasti momentista aiheutuva puristus siirretään kokonaisuudessaan päädyssä olevalle laipalle. Tällöin betoniin kohdistuva puristus on varmalla puolella.



Kuva 18. EN 1993-1-8:ssa esitetty pohjalevyn mitoitus tapa I-profiilille.

Samaa menetelmää voidaan soveltaa suorakaide pilareille, jossa kuormat tuodaan päätyihin ja sen mukaan määritetään teholliset leveydet. Mitoitus perustuu siis staattiseen malliin, jossa pohjalevy toimii ulokepalkkina, josta saadaan laskettua levyn kohdistuva momentti.

Eurokoodeissa esitettyssä menetelmässä c -mitta selviää kokeilemalla erilaisia levyn paksuuksia. Tällöin saadaan selville, millainen jännitys teholliselle alueelle muodostuu. Tehollisen alueen ollessa riittävän iso, ei puristusjännitys ylitä. Vaihtoehtoisesti voidaan verrata kuormituksen aiheuttamaa momenttia ja verrata sitä levyn momenttikestävyyteen $M_{el,Rd}$. Tästä johdettuna saadaan suoraan levyn paksuus, kun tehollinen alue tunnetaan. Mitoituksen johdatus esitetään luvussa 4.3.1.

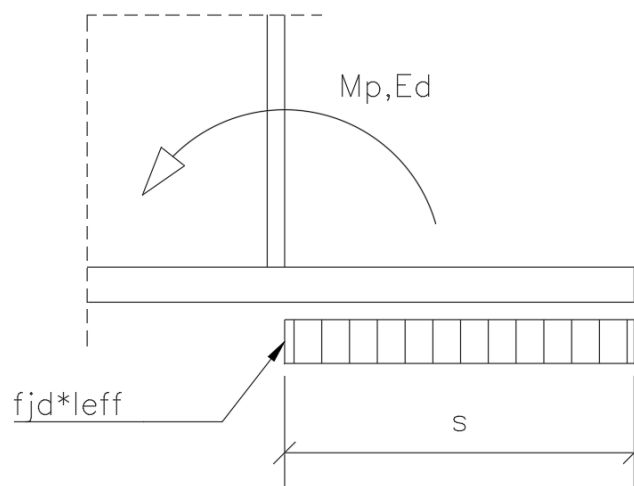
4.3 Pohjalevyn kestävyys

Pohjalevy voidaan mitoittaa kolmelle eri kuormitukselle, joista määrääviä ovat joko pelkkä puristusvoima, momentin aiheuttama puristus tai kummankin edellisen yhteisvaikutuksesta syntyvä puristus.

Puristusta mitoittaessa huomioidaan jälkivalun kestävyys betonin pintapaineena. Pintapaineen kestävyteen vaikuttaa suuresti anturan muoto ja koko suhteessa puristusalueeseen. Anturan muodon vaikutus tulee betoninormien EN 1992-1-1 mukaan, joka esitetään luvussa 7.

4.3.1 Pohjalevyn taivutuskestävyys

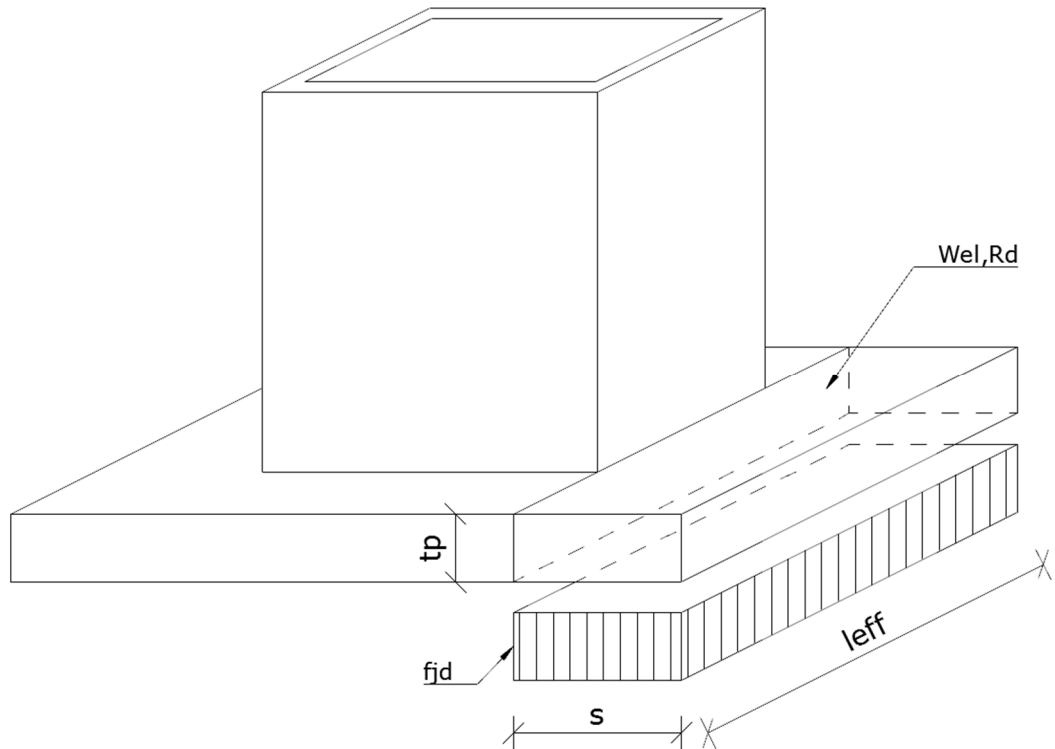
Oletetaan, että koko pohjalevy toimii tehollisena, tällöin c -mitta rajoittuu leveyteen s . Pohjalevyn kohdistuvaksi suurimmaksi mahdolliseksi kokonaisvoimaksi saadaan $f_{jd} * l_{eff} * s$ joka pohjalevyn profiilin taivutusvastuksen tulee kyetä kestäämään. Mitta s kuvastaa tässä pohjalevyn reunaa. f_{jd} on betonin pintapaineen kestävyys, tarkempi johdattelu käydään luvussa 7. Pohjalevyn kohdistuva momentti saadaan staattisesta mallista laskettua seuraavaan tapaan:



Kuva 19. Staattinen malli, jossa pilarin ulkopuolelle jäävä osa mitoitetaan jäykästi tuettuna ulokkeena. Vallitseva momentti saadaan laskettua kaavan (5) mukaan.

$$M_{p,Ed} = \frac{f_{jd} * l_{eff} * s^2}{2} \quad (5)$$

Pohjalevyn taivutusvastus W_{el} lasketaan pilarin reunalla kuten kuvassa 20 on esitetty:



Kuva 20. Pohjalevyn taivutusvastuksen määräävä profiili lasketaan pinta-alasta $l_{eff} * t_p$

Pohjalevyn pienin vaadittu paksuus saadaan johdettua teräksen myötölujuuden ja taivutusmomentin mukaan seuraavasti:

$$W_{el} = \frac{l_{eff} * t_p^2}{6} \quad (6)$$

$$f_{yp} = \frac{M_{p,Ed}}{W_{el}} = \frac{6 * M_{p,Ed}}{t_p^2 * l_{eff}} \quad (7)$$

$$t_{p,min} \geq \sqrt{\frac{6 * M_{p,Ed}}{f_{yp} * l_{eff}}} \quad (8)$$

Aikeisemmin esitetty c-mitan laskentakaava (4), on johdettu yhtälöstä (7), jossa pohjalevyn kohdistuva taivutusmomentti $M_{p,Ed}$ on purettu auki ja s:n tilalle sijoitetaan c-mitta.

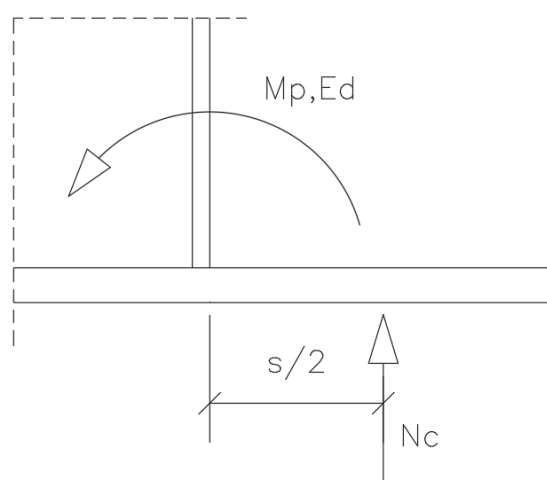
$$f_{yp} = \frac{6 \cdot l_{eff} \cdot c^2 \cdot f_{jd}}{2 \cdot l_{eff} \cdot t_p^2} \quad (9)$$

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot l_{eff} \cdot f_{yp} \cdot t_p^2}{6 \cdot l_{eff} \cdot f_{jd}}} \quad (10)$$

Tasapainoyhtälöstä saadaan selvitettyä pohjalevyn vähimmäispaksuus. Vaihtoehtoisesti voidaan päätellä, että puristuksen aiheuttama jännitys pohjalevyn ja jälkivalun välillä ei saa ylittää pintapaineen kestävyyttä. Tällöin voidaan laskea vaadittu tehollinen puristuspinta, jonka mukaan voidaan suoraan määritellä pienin mahdollinen c-mitta. Laskuprosessi voidaan aloittaa selvittämällä perustuksen suurin sallima paine f_{jd} ja selvittää miten suuri pinta-ala tarvitaan laipalta tulevalle kuorman puolikkaalle N_c .

$$f_{jd} \geq \sigma_{Ed} \quad (11)$$

$$f_{jd} \geq \frac{N_c}{A_{req}} \quad (12)$$



Kuva 21. Laippaa taivuttavan voiman resultantin N_c sijainti

Mitoittavan puristusvoima N_c on puolet laipalla olevasta kuormasta, sillä kuorma jakaantuu laipalta kumpaankin suuntaan. Vain laipan ulkopuolelle muodostuva puristunut alue taivuttaa pohjalevyä, jonka resultantiksi saadaan N_c . Tällöin vaadittu tehollinen alue saadaan voiman ja pintapaineen välisestä suhteesta:

$$A_{req} \geq \frac{N_c}{f_{jd}} \quad (13)$$

$$A_{eff} = c * l_{eff} = c(a + 2c) \quad (14)$$

Kun tunnetaan laipan leveys a sekä vaadittu puristunut pinta-ala, ratkaistaan yhtälöstä c -mitta. Yhtälöstä (14) ratkaistaan c -mitta toisen asteen yhtälöllä, sillä c -mitta esiintyy niin pituus kuin leveyssuunnassa, kuten kuvasta 18 nähdään:

$$c = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 8(-A_{req})}}{4} \quad (15)$$

Vaadittu c -mitta saatiin määriteltä suoraan, ilman kokeilua, kuten kaavassa (4) joudutaan tekemään, jossa levyn paksuutta joudutaan arvaamaan. Sijoittamalla saatu c -mitta kaavaan (8), saadaan mitoittava taivutusmomentti ja lopulta vaadittu pohjalevyn paksuus.

$$t_{p,min} \geq \sqrt{\frac{6 * M_{p,Ed}}{f_{yp} * l_{eff}}} \quad (8)$$

Momenttikestävyyden käyttöaste saadaan selville jakamalla taivutusmomentti elastisella momenttikestävyydellä. Suhdeluvun tulee olla alle 1, joka tarkoittaa että taivutusmomentti ei ylitä taivutuskestävyyttä.

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} * f_{yp}}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

$$M_{p,Ed} / M_{el,Rd} \leq 1 \quad (17)$$

4.3.2 Plastisen taivutusvastuksen vertailu elastiseen taivutusvastukseen

Pohjalevyyn kohdistuvan leikkausvoiman vaikutus oletetaan sen verta vähäiseksi, että se jätetään Eurocodes 3:ssa huomioimatta. Puolalaisen professori Frantisek Waldin tutkimuksessa vertailtiin plastisen taivutusvastuksen eroa elastiseen taivutusvastukseen. Työssä huomioitiin leikkauskestävyys plastisella puolella. Leveyssuuntainen kuorma q saadaan kertomalla kaava (18) puolittain tehollisella leveydellä l_{eff} ja taivutusmomentin tilalle laittamalla pohjalevyyn momenttikestävyys, saadaan johdateltua c -mitta seuraavasti [20, s.58]:

$$f_{jd} = \frac{2 * M_{p,Ed}}{c^2 * l_{eff}} \quad (18)$$

$$q = M_{p,Ed} \frac{2}{c^2} \quad (19)$$

$$q = W_{pl} * f_{yp} \frac{2}{c^2} \quad (20)$$

$$c = \sqrt{\frac{2 * W_{pl} * f_{yp}}{q}} \quad (21)$$

Plastisuusteorian mukainen taivutusvastus eroaa elastisesta taivutuskestävyydestä kertoimen mukaan, joka on suuruudeltaan $1/4$. Plastisen momenttikestävyyden ero määräytyy termin (23) mukaan, lisäksi tutkimuksessa annettiin leikkauksen yhtälöksi (24) [20, s. 58]:

$$W_{el} < W_{pl} \quad (22)$$

$$\frac{1}{6} t_p^2 < \frac{1}{4} t_p^2 \quad (23)$$

$$Q_{pl,Rd} = t_p \frac{f_{yp}}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

Plastisen kestävyuden yhteisvaikutuksen tulee olla alle 1 [20, s.59], joka tarkastetaan muodossa:

$$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Pl,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{Q_{Ed}}{Q_{Pl,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (25)$$

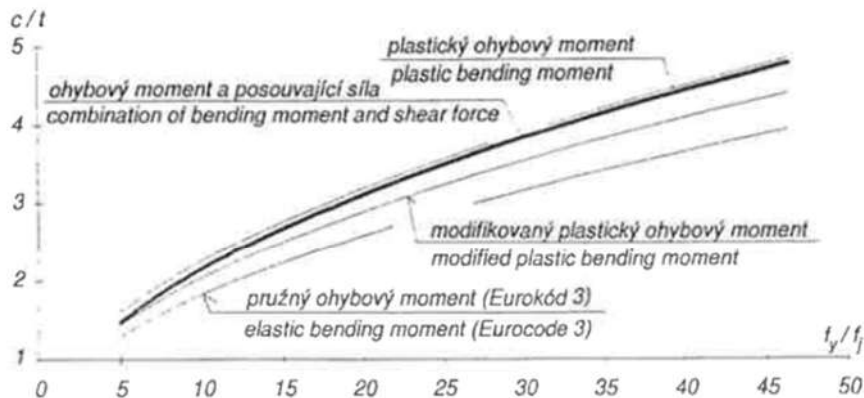
Plastisen lujuuden pohjalta saadaan c-mitta seuraavaan muotoon [20, s.59]:

$$c = t_p \sqrt{\frac{\sqrt{9 - 16\left(\frac{f_{yp}}{f_{jd}}\right)^2} - 3}{8}} \quad (26)$$

Kuvassa 24. on vertailun vuoksi tarkasteltu myös taivutusvastusta plastisen ja elastisen kestävyden väliltä kertoimella $1/4,8 t_p^2$, josta saadaan johdettua kaava (27) ja elastisen taivutusvastuksen lujuutta $1/6 t_p^2$ kuten eurokoodeissa on käytetty [20, s.59]:

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_{yp}}{2,4 f_{jd}}} \quad (27)$$

Edullisin tilanne saavutetaan silloin, kun levyn paksuus on mahdollisimman ohut siten, että c/t suhde on mahdollisimman suuri. Kyseisessä kuvassa 22 $t = t_p$ c-mitta riippuu suoraan tällöin teräksen lujuuden ja betonin pintapaineen välisestä suhteesta f_{yp}/f_{jd} , jota kuvataan kuvassa 22 vaaka-akselilla [20, s.60].



Obr. 2.2.9 Vliv smyku na náhradní šířku

Fig. 2.2.9 Influence of shear on the bearing width

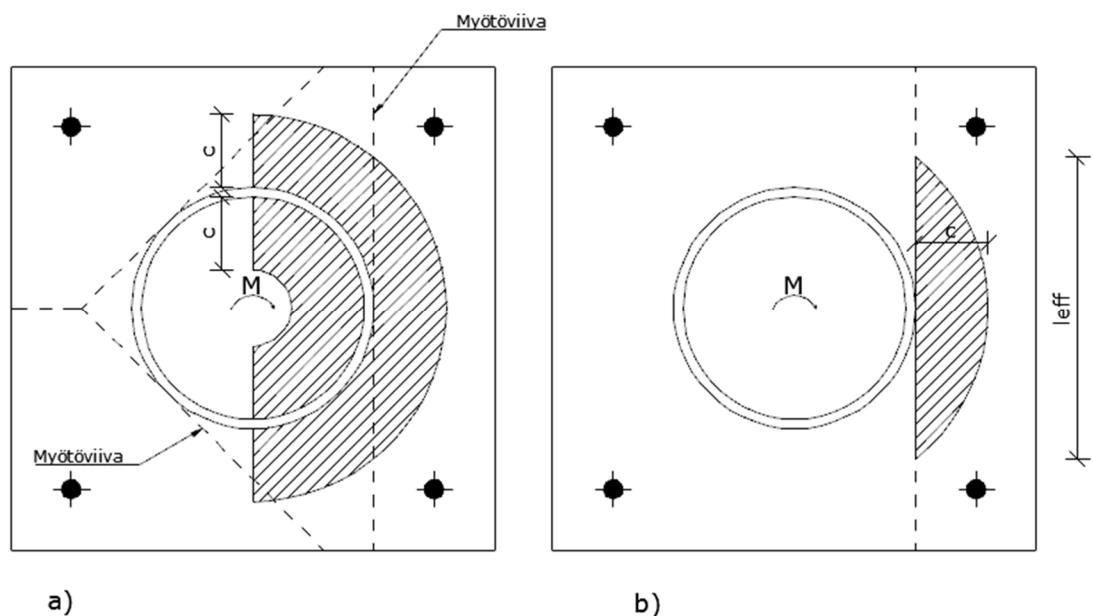
Kuva 22. Paksu viiva kuvastaa momentti ja leikkauskestävyyden yhteisvaikutusta plastisella alueella. Alin viiva kuvaa momentikestävyyttä elastisella alueella.

Kuvassa 22. tavoitellaan tilannetta, jossa c -mitta olisi mahdollisimman suuri levyn paksuuteen nähden. Esimerkiksi kimmoisella alueella f_y/f_j suhteen ollessa 20, saadaan c/t kertoimeksi noin 2,5. Vastaavasti plastisella alueella kertoimeksi saadaan noin 3 joka on mitoituksen kannalta edullisempi.

5 Pyöreän pilarin pohjalevyn mitoitus

5.1 Pyöreän pilarin pohjalevyn mitoituksen haasteet

Mitoittaessa suorakaidepilareita, suunnittelija voi tehdä yksinkertaistuksen, jossa puristuneen T-osan mitoitusta sovelletaan suorakaidepilarin mitoituksessa. Pyöreän pilarin tapauksessa c -mitan voidaan kuvitella kiertävän rakennetta, jolloin puristunut alue olisi kuvan 23 a) mukainen:



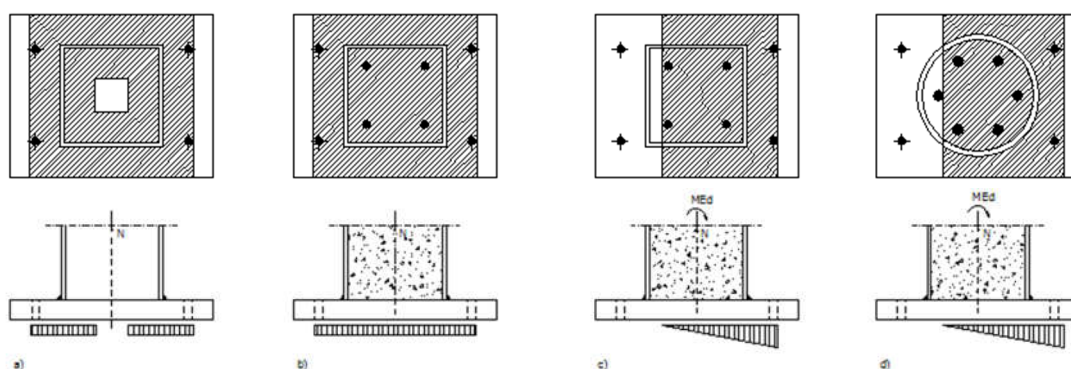
Kuva 23. Kuvassa myötöviivan yli jakaantuva kuorma taivuttaa levyä, kuten suorakaidepilarin tapauksessa, mutta tehollinen alue ei ole kuitenkaan $l_{eff} * c$.

Ongelmaksi muodostuu kuormien määrittäminen tapauksissa, joissa puristukseen vaikuttaa taivutusmomentti. Koska pyöreissä pilareissa ei ole tasaista laippaa, johon kuormat voidaan jakaa tasaisesti, ensinnäkin kuormien suuruus on vaikeammin määritettävissä.

Kuorman suuruus muuttuu pilarin jokaisessa pisteessä, johtuen tarkastelupisteen etäisyydestä neutraaliakselilta.

Toiseksi ongelmaksi määräytyy vallitsevat jännitykset. Lujusopin mukainen suurin jännitys pyöreän profiilin tapauksissa sijaitsee neutraaliakselista mitattuna putken etäisimmässä pisteessä [29, s.125].

Puristuneen T-osan mitoitusmenetelmää ei voida soveltaa suoraan pyöreiden pilareiden tapauksissa myöskään siksi, koska tehollista leveyttä on vaikea määrittellä. Toisin kuin suorakaidepilarin tapauksessa, jossa teholliseksi leveydeksi saadaan $a * 2c$, pyöreän pilarin tapauksessa ei ole luontevaa käyttää pilarin paksuutena halkaisijaa.



Kuva 24. Tapauksissa a), b) ja c) kuvaavat kuormituksen muuttumista suorakaidepilarilla. Tapauksessa d) poikkileikkaus näyttää samalta kuin tapauksessa c).

Kuvassa a) havainnoidaan teräsputkipilaria, jossa kuormat ovat jakautuneet c-mitan levyiselle alueelle. Kuvassa b) tarkasteluun lisätään betonin siirtämä kuormitus rakenteen keskelle. Kuvassa c) mitoituksessa tarkastellaan momentin vaikutusta kuormitukseen. Kuvassa d) pilarina käytetään pyöreätä pilaria, jolloin poikkileikkaus keskellä näyttää samalla kuin tapauksessa c), mutta kuorman jännitys muuttuu pysty akselilla, toisin kuin tapauksessa c).

Koska pyöreän pilarin l_{eff} pituus on lyhyempi kuin suorakaidepilarissa, perustukseen syntyy suuremmat jännitykset. Lisäksi pyöreässä pilarissa jännitysten muuttuessa, myös c-mitan leveys muuttuu jokaisessa pilarin tarkastelupisteessä. Todellinen puristusalue ei ole tällöin lineaarinen.

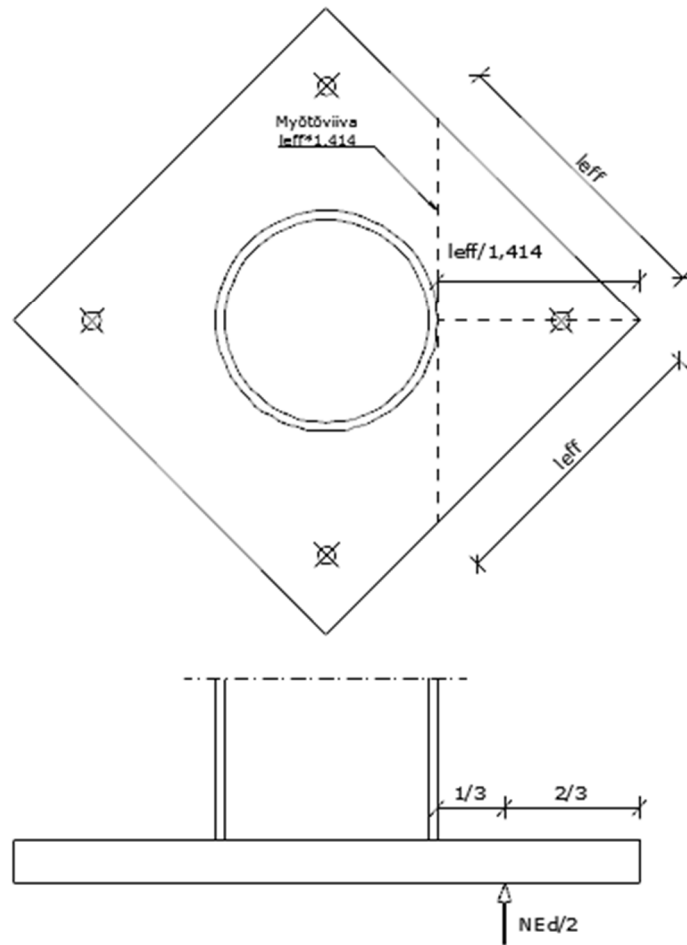
Viimeiseksi myötöviivan määrittely on vaikeampi kuin suorakaidetapauksille, joissa myötöviiva muodostuu pilarin reunan suuntaisesti. Pyöreässä pilarissa myötöviiva voi muodostua missä kulmassa tahansa, joko puristus- tai vetopuolelle. Myötöviivojen muodostumista käsitellään tarkemmin luvussa 8.3.

Jos rakenteeseen lisätään vielä pilarin sisällä oleva betoni ja rauditus, muuttuvat kuormien ja jännitysten laskenta vielä entuudestaan. Verrattaessa T-osan mitoitusta pyöreisiin liittopilareihin, on mitoituksessa tärkeätä huomioida myös pilarissa olevan betonin aiheuttama puristus pohjalevyille. Käytännössä betonilta tuleva puristus jakautuu myöskin pohjalevyn paksuuden mukaan leveämmälle, jolloin pohjalevyn ylimenevään osuuteen kohdistuu niin vaipan kuin pilarin betonin puristus.

Vaikka betonin vaikutuksesta vaippaan jää pienempi kuorma, perustukseen kohdistuu kahden eri elementin osittainen päällekkäinen puristus. Jännitysten jakautumista käsitellään tarkemmin luvussa 5.3.

Hyvin karkeassa yksinkertaistuksessa normaalivoima voidaan jakaa kahtia, ja olettaa sen taivuttavan pohjalevyä. Tällöin vaadittu pinta-ala määräytyy normaalivoiman ja pintapaineen välisestä suhteesta.

Kyseisessä tapauksessa mitoituksessa tarkistetaan lähinnä pohjalevyn taivutuskestävyys sen heikoimmassa suunnassa. Myötöviivan oletetaan muodostuvan kulmassa, jossa se on lyhyin mahdollinen:



Kuva 25. Kolmion muotoinen alue oletetaan teholliseksi, jolloin voimaresultantin sijainti sijaitsee kolmasosa kohdassa. Myötöviivan pituus on pienimmillään $l_{eff} * \sqrt{2}$.

Kertauksena yksinkertaisimpaan tapaukseen verrattuna, T-osan puristusta sovelletaan suorakaidepilareihin, jota taas sovelletaan liittopilareihin. Kun perustuksen oletetaan ottavan taivutusmomenttia vastaan, on mahdollista, että siihen muodostuu vedetty alue. Korvaamalla suorakaidepilarin tilalle vielä pyöreä pilari, ymmärretään että useat yksinkertaistukset eivät ole enää käytettävissä.

5.2 Perustukseen kohdistuvat voimat

Pohjalevyn yläpinnalle oletetaan muodostuvan epätasainen puristusjäännitys, joka pitää saada tasoitettua perustukseen. Epätasainen puristus syntyy siitä, että teräksen kimmokerroin on moninkertainen betoniin nähden. Ero puristuskapasiteetissa ja jäännityksissä, voi aiheuttaa perustuksen myötäämisen, jolloin levy alkaa kiertymään, joka johtaa pilarin nurjahduspituuden muuttumiseen. Kiertyminen oletetaan tapahtuvan, jos perustus ei kestä siihen kohdistuvia paikallisia puristuksia.

Koska liittopilari on heterogeeninen ja koostuu kolmesta elementistä, jotka toimivat eri tavalla riippuen rakennusvaiheesta tai ympäristöolosuhteista, erotellaan ensin pilariin kohdistuvat normaalivoimat.

Liittopilarin ollessa täytettynä betonilla, oletetaan rakenteen toimivan yhtenäisenä elementtinä, kun teräsosan kestävyysosuus on väliltä 0,2...0,9. Teräsosan kestävyysosuuden ollessa alle 0,2 tulkitaan rakenne betonipilariksi ja teräsosan kestävyysosuuden ollessa yli 0,9 tulkitaan rakenne teräspilariksi. [1, s.191.] Lisäksi raudoituksen osuus poikkileikkauksen pinta-alasta tulee olla väliltä 1...6 % [10]. Betonitäytteessä pääraudoitus voidaan ottaa huomioon pilarin kestävyyttä laskettaessa silloinkin, kun raudoitus ei ole kosketuksissa pohjalevyyn. Raudoituksen pään sallitaan olevan enintään 30 mm irti pohjalevystä [13, s.63].

5.2.1 Normaalivoima elementtimenetelmällä

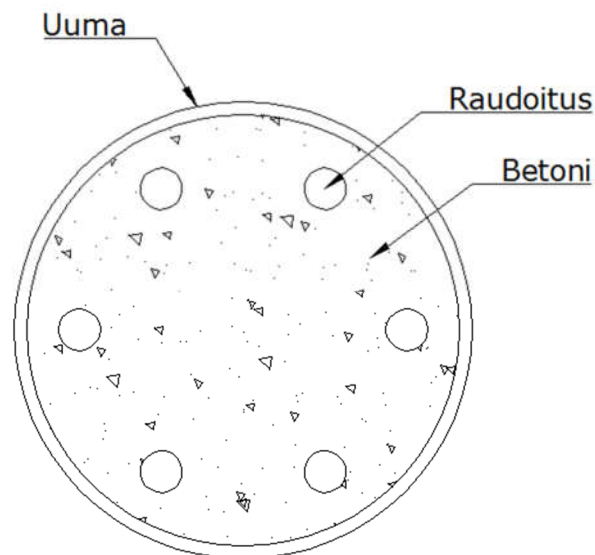
Rakenteiden jäykkyyksiä mitoittaessa, tulee ensin määrittellä, minkä tyyppinen elementti on kyseessä. Elementit voivat tyypillisesti olla joko sauvoja tai palkkeja. Palkeille mitoitetaan taivutuskestävyys ja sauvoille vain puristuskestävyys. Pilarin pääasiallinen kuorma on puristusta, sillä pilarin käyttötarkoitus on toimia puristussauvana. Täten jäykkyys lasketaan sauvaelementin jäykkyytenä [21].

Normaalivoiman oletetaan aiheuttavan aksiaalista puristusta pilariin, joka jakautuu jäykkyyden mukaan raudoituksen, betonin ja vaipan välillä. Asennusvaiheessa puristus jakaantuu tasaisesti vaipan pinta-alalle. Betonivalun jälkeen osa kuormasta menee betonille, jolloin suurin jäännitys siirtyy pois vaipalta ja reunoille kohdistuva puristus pienenee. Palotilanteessa vaipan oletetaan myötäävän, jolloin puristus välittyy pelkän betonin ja raudoituksen välityksellä.

Elementin puristusjäykkyys muodostuu siis, vaipan, raudoituksen sekä betonin jäykkyydestä. k_i on yksittäisen elementin jäykkyys, kaikkien elementtien jäykkyyksien summa on liittopilarin kokonaisjäykkyys k [21]. Kokonaisjäykkyys k lasketaan kaavan (28) mukaan, jossa L_i on Liittopilarin pituus. Tällöin jokaisen elementin osuus puristusvoimasta on kaavan (29) mukainen:

$$k = \frac{\sum E_i A_i}{L_i} \quad (28)$$

$$N_i = \frac{N_{Ed} k_i}{k} \quad (29)$$



Kuva 26. Rakenteen jokaisen elementin pinta-ala lasketaan erikseen. Betonin pinta-ala lasketaan jäljelle jäävänä pinta-alana, kun uuman ja raudoitusten pinta-alat tunnetaan. Elementtien jäykkyyksien summa on pilarin jäykkyysskerroin k .

Voimien summan on oltava rakenteeseen kohdistuva kokonaiskuorma N_{Ed} . Tästä voidaan selvittää jokaisen elementin kantama kuorman suhteellinen osuus N_i/N_{Ed} .

Betonissa vallitseva jännitys on kuitenkin paljon pienempi kuin teräksessä vallitseva jännitys, johtuen siitä, että teräkseen pitää kohdistua pinta-alaan nähden suurempi voima, jotta teräksen pää siirtyisi saman verran kuin betoni, jolloin betoni ottaa vastaan huomattavasti pienemmän kuorman pinta-alaan nähden.

5.2.2 Kimmomoduulisuhde liittopilarissa

Jotta ymmärrettäisiin paremmin, millaisia jännityksiä pyöreään pilariin kohdistuu, lasketaan jokaisessa komponentissa vallitsevat jännitykset. Tällöin päästään paremmin selville voimista, jotka pyritään tasaamaan pohjalevyn avulla perustuksiin. Pohjalevyn paksuus määräytyy sen mukaan, miten suurelle pinta-alalle pilarin reunaan kohdistuva normaalivoima pitää jakaa, jotta perustuksen kestävä jännitys ei ylitä. Usean materiaalin jännityksen laskenta selviää helpoiten kimmomoduulisuhteen avulla [29, s.119]:

$$n = \frac{E_2}{E_1} \quad (30)$$

$$A_r = A_1 + nA_2 \quad (31)$$

$$\sigma_1 = \frac{N}{A_r}, \sigma_2 = n \frac{N}{A_r} \quad (32)$$

$$I_r = \sum I_1 + nI_2 \quad (33)$$

$$\sigma_1 = \frac{N}{A_r} + \frac{M}{I_r}, \sigma_2 = n\sigma_1 \quad (34)$$

Kaavassa (30) lasketaan kimmomoduulisuhde teräksen ja betonin välille. Kaavasta (32) saadaan laskettua puristuksen aiheuttamat jännitykset niin teräkselle kuin betonillekin. Kaavassa (34) huomioidaan lisäksi momentin aiheuttama lisäjännitys. [29, s.125.]

Tästä voidaan päätellä, että pohjalevyn pitää kyetä jakamaan kyseinen maksimijännitys perustukselle siten, että pohjalevyn ja jälkivalubetonin välinen puristus on korkeintaan pintapaineen suuruinen. Toisin sanoen vaipassa vallitseva jännitys pitää jakaa $\frac{\sigma_1}{f_{jd}}$ kertaa suuremmalle pinta-alalle, kuin pilarin uumassa olevalle pinta-alalle.

Pyöreiden liittopilarien tapauksissa on kuitenkin hyvä ymmärtää, että maksimijännitys kuvastaa suurinta jännitystä mm^2 kokoisella alueella. Todellisuudessa keskimääräinen jännitys pilarin reunassa on pienempi, sillä teräs kykenee myötäämään ja saamaan kimmoista lujutusta sieltä, missä sitä on tarjolla.

5.3 Puristuskestävyys tunnettujen jännitysten avulla

Pyöreiden pilarien tapauksessa perustuksen puristuskestävyys voidaan laskea yksinkertaisimmillaan selvittämällä jälkivalun vaatima tehollinen pinta-ala. Käyttämällä aikaisemmin käsiteltyä c -mittaa, voidaan määrittellä pohjalevyn paksuus. Yksinkertaistuksessa huomioidaan vain normaalivoima, ja pintapaine oletetaan tasaiseksi. Tarkastelussa perustukseen kohdistuva jännitys tulee olla pienempi kuin pinta-paine. Tällöin vaadittu pinta-ala saadaan jakamalla kuorma pintapaineella (35). Kun pilarin halkaisija tunnetaan, saadaan c -mitta laskettua kaavalla (39).

$$A_{req} = \frac{N_c}{f_{jd}} \quad (35)$$

$$A_{req} = \pi \frac{D_{req}^2}{4} \quad (36)$$

$$D_{req} = \sqrt{\frac{A_{req} \cdot 4}{\pi}} \quad (37)$$

$$D_{req} = (D_{pilari} + 2c_{min}) \quad (38)$$

$$c_{min} = \sqrt{\frac{A_{req} \cdot 4}{\pi}} - \frac{D_{pilari}}{2} \quad (39)$$

Näin saadaan kaavasta (4) johdateltua pohjalevyn minimipaksuus:

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_{yp}}{3 \cdot f_{jd}}} \quad (4)$$

$$t_{p,min} = c_{min} \sqrt{\frac{3 \cdot f_{jd}}{f_{yp}}} \quad (40)$$

Vaikka käytännössä liittopilareissa betoni ja rauditus ottavat osan puristuksesta vastaan, toisin kuin pelkillä teräspilareilla, puristus on pohjalevyn pinnalla paljon tasaisempi. Tarkemmassa mitoituksessa vaipasta syntyy viivakuorma pohjalevylle.

Teräksessä vallitseva puristusjännitys saatiin laskettua luvun 5.2.1 mukaan. Momentin ja puristuksen yhteisvaikutuksesta syntyvä puristusjännitys saatiin laskettua luvun 5.2.2 mukaan.

Jos jännitysten epähomogeenisuus halutaan huomioida, etenkin pyöreiden liittopilarien tapauksessa. Jännitysten jakautumiseksi voidaan tehdä mitoitus varten oletus, jossa pilarin betonin jännityksen oletetaan siirtyvän kohtisuoraan alas jälkivaluun. Tällöin teräksissä vallitsevan jännitys tulee jakaa siten, että pintapaineesta vähennetään pilarin betonissa vallitseva jännitys kuvan 27. mukaan.

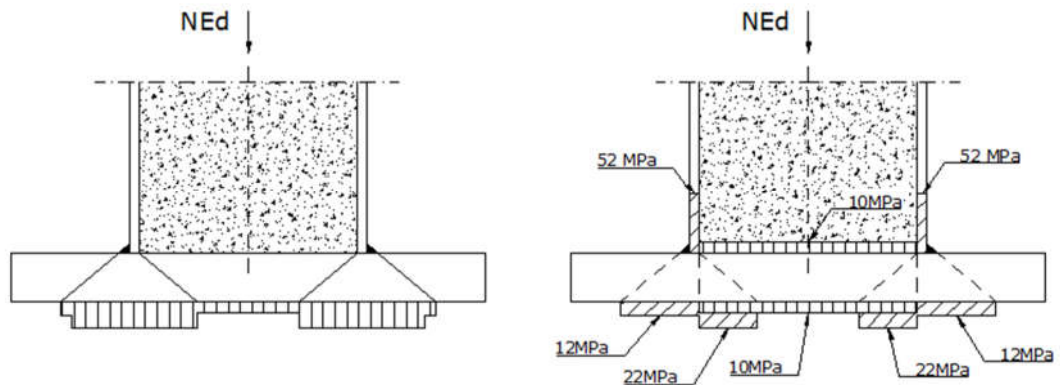
Koska rakenteen jälkivalun pintapaine määrää levyn paksuuden, voidaan selvittää vaadittu pinta-ala elementtien jännitysten summana. Alaindeksi c kuvastaa pilarin betonia ja alaindeksi s liittopilarin raudoitusta ja teräsvaippaa:

$$f_{jd}A_{req} = \sigma_c A_c + \sigma_s A_s \quad (41)$$

$$A_{req} = \frac{\sigma_c A_c + \sigma_s A_s}{f_{jd}} \quad (42)$$

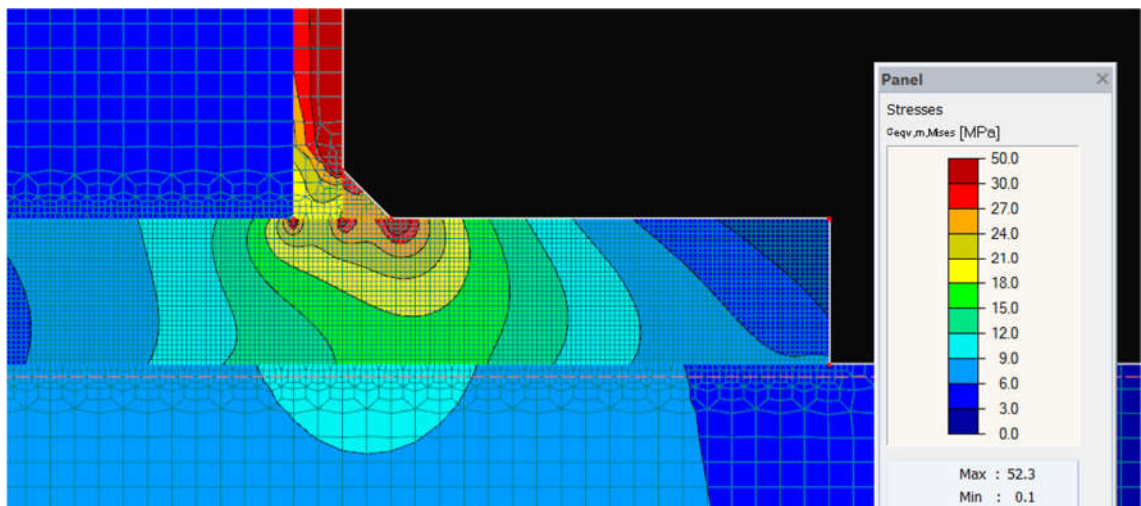
Vaaditusta puristus-pinta-alasta saadaan selville alueen halkaisija. Vähentämällä pilarin halkaisija puristusalueen halkaisijasta, saadaan vaadittu c -mitta kaksinkertaisena. Aikaisemmin esitetyistä laskentamenetelmistä on johdettu pohjalevyn taivutuskestävyys, joka riippuu levyn paksuudesta, kun c -mitta tunnetaan.

Laskentamallissa on oletettu, että jännitykset jakaantuvat tasaisesti, jolloin mitoituksessa ei huomioida suuria jännityksiä pilarin reunoilla. Koska pilarin vaipan oletetaan toimivan yhtenäisesti betonin kanssa, ovat jännitykset uumassa moninkertaiset, johtuen epätasaiseen puristukseen pohjalevyn pinnalla.



Kuva 27. Vasemmassa kuvassa betonilta tulevan puristuksen oletetaan jakaantuvan perustuksiin samassa kulmassa kuin vaipankin kuormien. Oikeanpuoleisessa kuvassa betonin jännitysten oletetaan siirtyvän kohtisuoraan alas yksinkertaistuksen vuoksi.

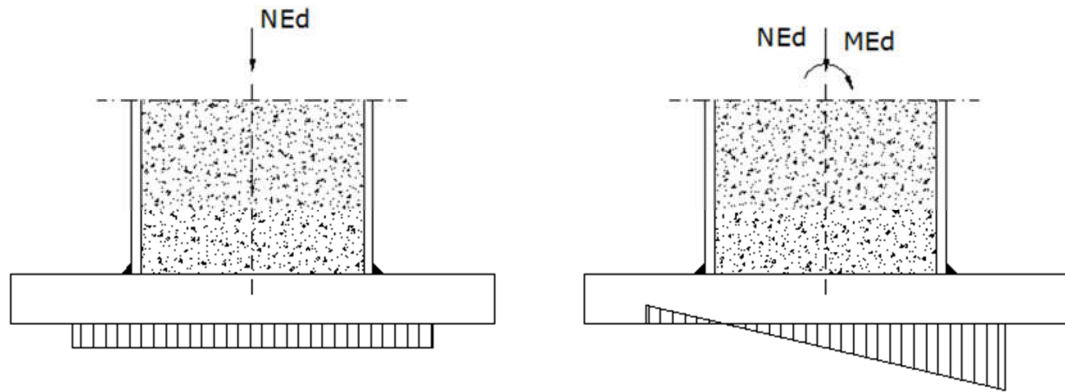
Todellisuudessa betonista tuleva jännitys tasaantuu isommalle alueelle, jolloin suurin jännitys muodostuu hitsin alle. Mitoituksen kannalta yksinkertaistuksessa perustuksen kestävydestä voidaan vähentää suoraan pilarissa olevan betonin jännitys, jolloin vaipan jännitys kuuluu jakaa jäljelle jääneelle kestävyydelle.



Kuva 28. RFEM:illä analysoitu jännitysten jakautuminen perustuksessa. Jännityksen jakautumisen havaitaan olevan jälkivalussa suurimmillaan hitsin kohdalla

Voimien jakautuminen todellisuudessa keskittyy siis pilarin reunoihin, ja betonin vaikutuksesta kuormat jakautuvat pohjalevyn reunoja kohti. Pohjalevyn korkeuden

kuuluu siis saavuttaa tila, jossa kriittinen jännitys ei saavuta jälkivalubetonia. Kuvassa 28 huomataan, että jälkivalussa vallitseva suurin jännitys on alle 12 MPa. Tällöin C33/40 betoni jonka pintapaineeksi saadaan laskettua 12,467 MPa, kestää siihen kohdistuvan puristuksen.



Kuva 29. Kuvalla pyritään osoittamaan miten momentti aiheuttaa terävän jännityksen levyn reunaan.

2D-tarkastelussa momentti aiheuttaa pohjalevyn reunaan suurimman puristuksen, tällöin laskennassa käytettäväksi mitoittaviksi voimaksi saadaan huomattavan suuri kuorma. Olisi syytä pohtia, millaisia pyöristyksiä on mahdollista käyttää, sillä todellinen jännitys ei pääse muodostumaan niin huippumaiseksi, kun huomioidaan miten kuorma vähenee kaaren muissa pisteissä.

Pyöreiden pilarien tapauksissa laipoilla vallitseva jännitys muuttuu tarkastelupisteen mukaan, koska rakenteella ei ole suoria laippoja, jotka ottaisivat puristuksen vastaan tasaisesti. Jos tarkastelussa huomioidaan taivutuksen aiheuttama rasitus, saadaan pahin mahdollinen jännitys pilarin reunalle. Todellisuudessa rakenne plastisoituu reunalta siten, että momentin huippuarvot pyöristyvät pienempiin suureisiin. Suurinta jännitystä ei ole välttämättä hyvä käyttää mitoittavana suureena, sillä kyseessä on hyvin pieni osuus pohjalevystä.

5.4 Sektori menetelmä

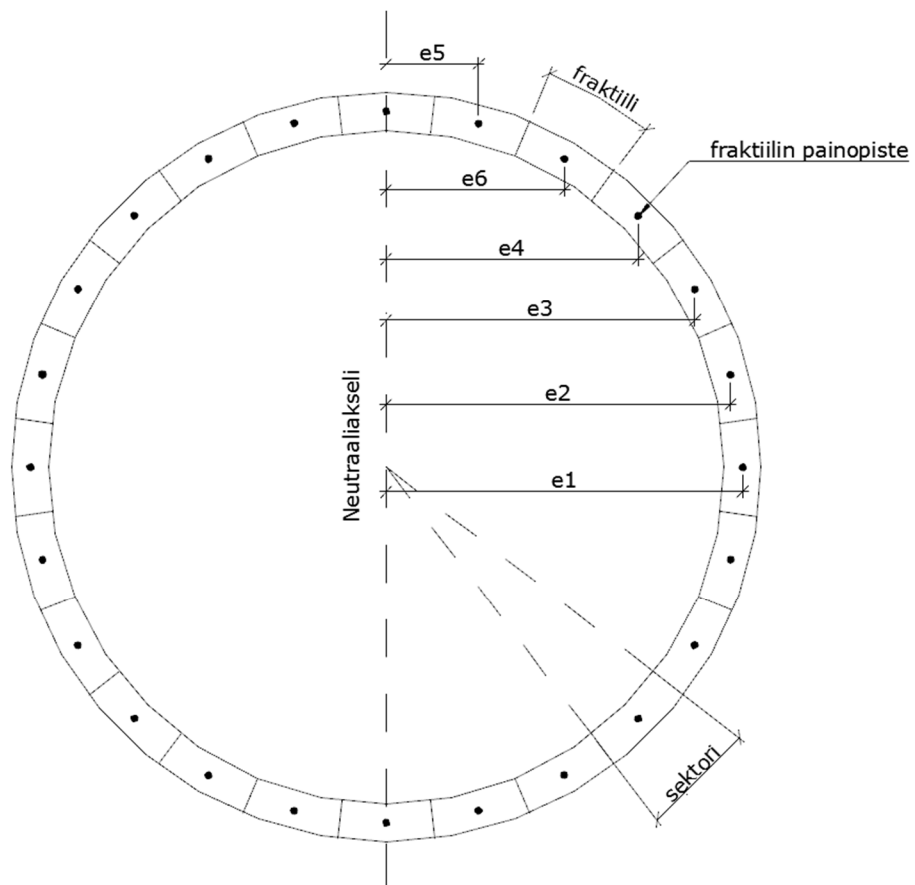
Koska edellisessä luvussa havaittiin ongelma tapauksissa, joissa geometriasta johtuen pyöreään pilariin kohdistuu pistemäinen suuri jännitys. Pyritään hahmottamaan voimien

jakautuminen sektoreittain. Tällöin pilarin vaippa jaetaan sektorien määrän mukaisiin fraktiileihin, jotka muistuttavat segmentin pinta-alaa.

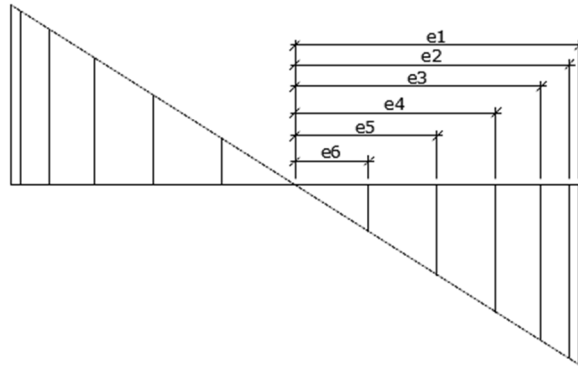
5.4.1 Vaipan jakaminen fraktiileihin

Selvittämällä geometrialla kunkin fraktiilin painopisteen etäisyys e_i neutraaliakselilta, saadaan kullekin pisteelle määriteltyä segmentissä vallitseva voima. Tällöin seuraava tasapainoehto on voimassa:

$$M_{Ed} = \sum_{i=1}^n N_i * e_i \quad (43)$$



Kuva 30. Pilarin vaippa jaettuna 24 osa fraktiileihin, joka vastaa 15 asteen kulmaa jokaiselle sektorille. Rakenteen momenttivarsi on siis $2e_i$, momentti muodostuu niin puristetun kuin vedetyn fraktiilin summasta



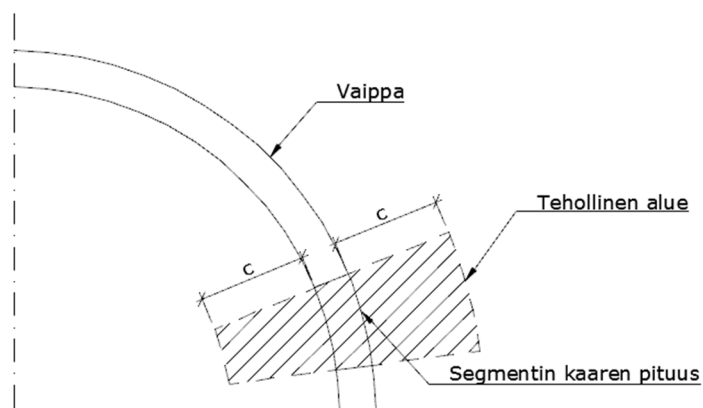
Kuva 31. Voima momenttivarren kummallakin puolella on symmetrinen, jolloin sisäinen momenttivarsi on $2 * e_i$.

Kukin voima N_i lasketaan yhtälöryhmästä, jossa uloin voima N_1 ratkaistaan tasapainoehdolla:

$$N_1 = \left(\frac{M_{Ed} * e_1}{2 * \sum e_i^2} \right) \quad (44)$$

$$N_i = \frac{e_i * N_1}{e_1} \quad (45)$$

Taivutusvastus lasketaan segmentin kaaren pituudelle, jolloin tilanne vastaa suorakaidepilarin mitoitusta, jossa tehollinen alue tarkastellaan vain tietyn sektorin alueelta.



Kuva 32. Yhden fraktiilin tehollinen alue sekä segmentin kaaren pituus

5.4.2 Sektorien määrän vaikutus

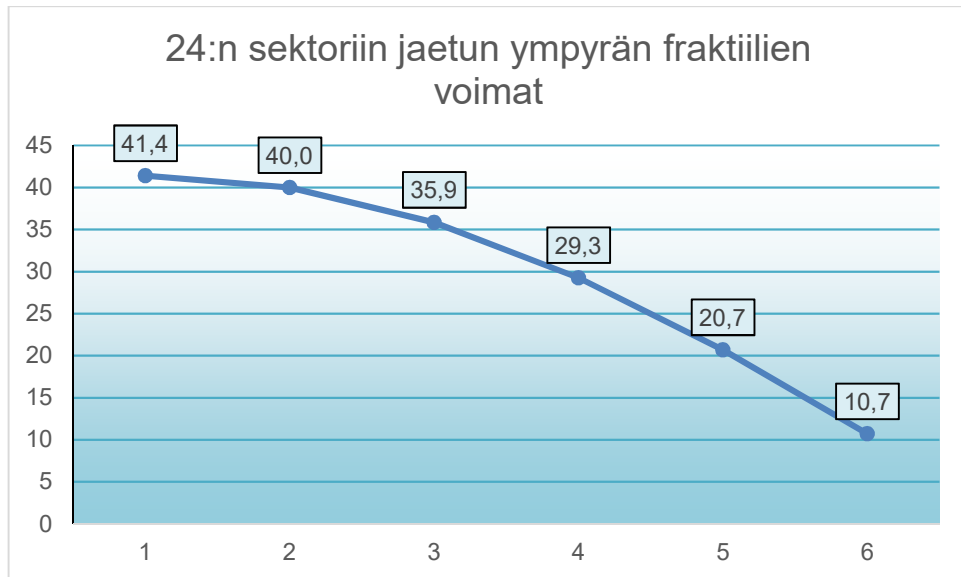
Kuten kuvasta 31 havaittiin, että painopisteiden etäisyyden muutos ei ole lineaarinen, vaan vastaa sinikäyrän ensimmäistä neljänestä. Tästä voidaan päätellä, että kuorman muutos pilarin reunalla ei ole suuri. Mikäli fraktiliin kokoa kasvatettiin kaksinkertaiseksi, voima ei kasva samassa suhteessa. Vertaillaan voimia 24 osa sektorilla ja 48 osa sektorilla:

Esimerkki pilari:

- Normaalivoima 1500 kN
- Taivutusmomentti 50 kN
- Pilarin halkaisija 355 mm
- Vaipan paksuus 10 mm

Taulukko 1. 24 sektoriin jaettu pilari, segmentin kaaren pituus on 46,5 mm ja Aksiaalisen puristuksen osuus on 62,5 kN/fraktiili.

Vipuvarret	Momentin aiheuttamat voimat	Puristavat voimat yhteensä	Momenttien summa
0,173 m	41,408 kN	103,908 kN	14,286 kNm
0,167 m	19,998 kN	82,498 kN	13,329 kNm
0,149 m	17,930 kN	80,430 kN	10,714 kNm
0,122 m	14,640 kN	77,140 kN	7,143 kNm
0,086 m	10,352 kN	72,852 kN	3,571 kNm
0,045 m	5,359 kN	67,859 kN	0,957 kNm
			50,000 kNm

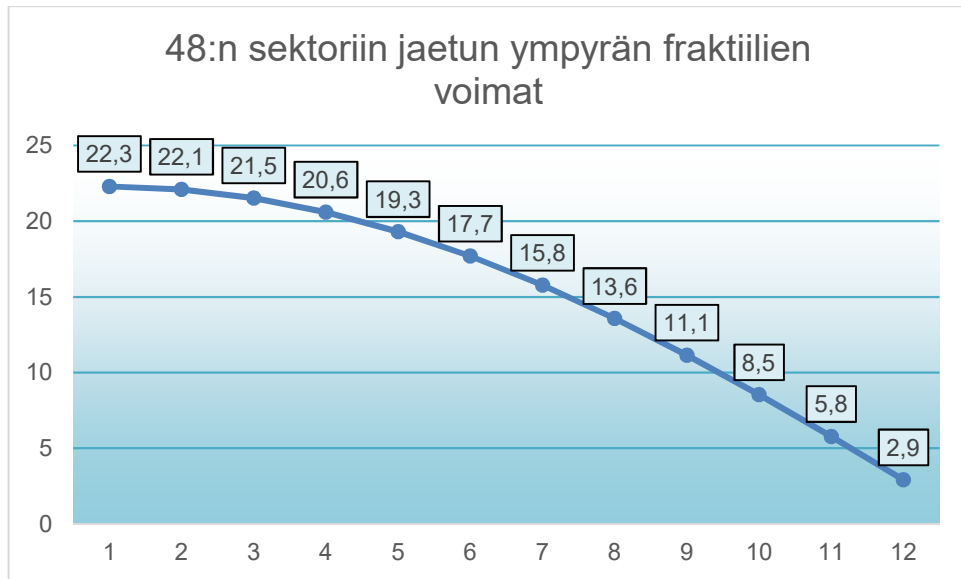


Kuva 33. Lukuunottamatta ensimmäistä fraktiilia, muiden pisteiden voima koostuu kahdesta fraktiilista, sillä voimat jakautuvat pilarin kummallekin puolelle, vertaa kuvaa 30.

Huomataan, että jokaisesta fraktiilista koostuva sisäisten momenttien summa on sama kuin ulkoinen taivutusmomentti. Sisäinen momentti lasketaan kertomalla ulkoisen momentin aiheuttama voiman itseisarvo vipuvarrella. Puristavan voiman kokonaisarvo puristuspuolella on normaalivoiman ja momenttivoiman summa.

Taulukko 2. 48 sektoriin jaettu pilari, segmentin kaaren pituus on 23,2 mm ja aksiaalisen puristuksen osuus on 31,25 kN/fraktiili.

Vipuvarret	Momentin aiheuttamat voimat	Puristavat voimat yhteensä	Momenttien summa
0,173 m	22,297 kN	53,547 kN	7,692 kNm
0,171 m	11,053 kN	42,303 kN	7,561 kNm
0,167 m	10,768 kN	42,018 kN	7,177 kNm
0,159 m	10,300 kN	41,550 kN	6,566 kNm
0,149 m	9,655 kN	40,905 kN	5,769 kNm
0,137 m	8,845 kN	40,095 kN	4,842 kNm
0,122 m	7,883 kN	39,133 kN	3,846 kNm
0,105 m	6,787 kN	38,037 kN	2,851 kNm
0,086 m	5,574 kN	36,824 kN	1,923 kNm
0,066 m	4,266 kN	35,516 kN	1,127 kNm
0,045 m	2,885 kN	34,135 kN	0,515 kNm
0,023 m	1,455 kN	32,705 kN	0,131 kNm



Kuva 34. 48 sektorin tapauksessa huomataan, että fraktiileissa vallitsevat voimat ovat jakautuneet saman muotoiselle käyrälle.

$$f_{jd} = \frac{N_{c,max}}{l_{eff} * 2c} \quad (46)$$

$$c = \frac{N_{c,max}}{2 * l_{eff} * f_{jd}} \quad (47)$$

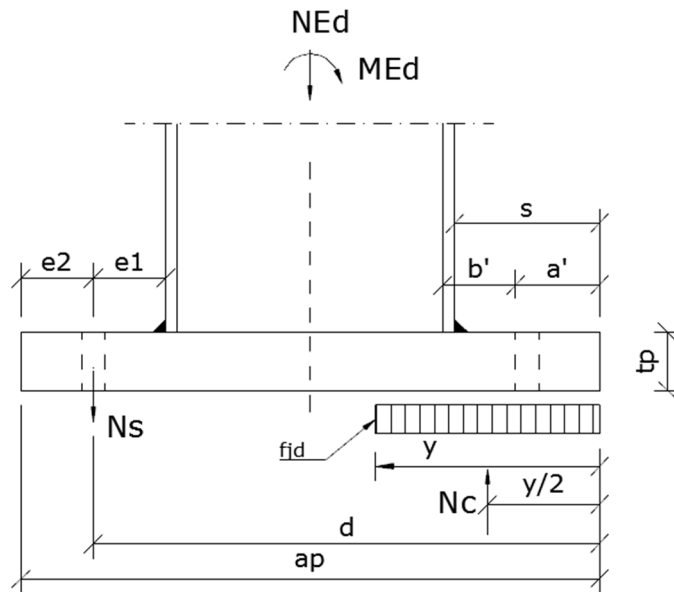
$$t_p \geq \sqrt{\frac{6 * M_{p,Ed}}{l_{eff} * f_{yp}}} \quad (48)$$

$$M_{p,Ed} = \frac{l_{eff} * c^2 * f_{jd}}{2} \quad (5)$$

Laskemalla pohjalevylle vähimmäisvaatimus siten, että pilari jaetaan 24:n sektoriin, saadaan vähimmäispaksuudeksi 24 mm. Kun käytetään 48 sektoria, saadaan pohjalevyn paksuudeksi 25 mm, joka on noin 4 % suurempi, sillä kuorma pinta-alaan nähden on vain hieman suurempi.

5.5 Pohjalevyn mitoitus liitoksen vetopuolen mukaan

Ruukin käsikirjassa esitettiin laskentamalli vetopuolen kestävyysmitoitukselle, jossa pohjalevyn kiinnitystä tulkittiin laippaliitoksena. Laskettaessa taivutusmomenteista perusruuveille aiheutuvia vetovoimia, momenttivartta ei saa olettaa suuremmaksi kuin puristetun puolen kantopinnan painopisteen ja vedetyn puolen ruuviryhmän painopisteen välistä etäisyyttä $d - y/2$ [17, s.256].



Kuva 35. Taivutetun ja puristetun pilarin rakennemalli

Käyttämällä rakennemallia, jossa taivutuksesta johtuva puristettu pinta muodostuu pohjalevyn reunalle, saadaan laskettua puristetun pinnan korkeus [17, s.255]. Tällöin voimatasapainosta saadaan seuraavia yhtälöitä:

$$N_{Ed} = N_c - N_s = l_{eff} y f_{jd} - A_s f_{yb} \quad (49)$$

$$M_{Ed} + N_{Ed} [0,5a_p - (a_p - d)] = N_c (d - 0,5y) \quad (50)$$

$$M_{Ed} + N_{Ed} (d - 0,5a_p) = l_{eff} y f_{jd} (d - 0,5y) \quad (51)$$

$$y = \frac{l_{eff} f_{jd} d \pm \sqrt{(-l_{eff} f_{jd} d)^2 - 2 l_{eff} f_{jd} [M_{Ed} + N_{Ed} (d - 0,5a_p)]}}{l_{eff} f_{jd}} \quad (52)$$

Puristuspinnan korkeuden avulla voidaan selvittää pultteihin kohdistuva vipuvoima ja sen kautta tarkistaa liitoksen kestävyys sekä ruuvien vetokestävyys. Liitoksen vetokestävyys saadaan laskettua apusuureen K avulla [17, s.216]:

$$N_{1,Rd} = \frac{t_p^2 n}{K} \quad (53)$$

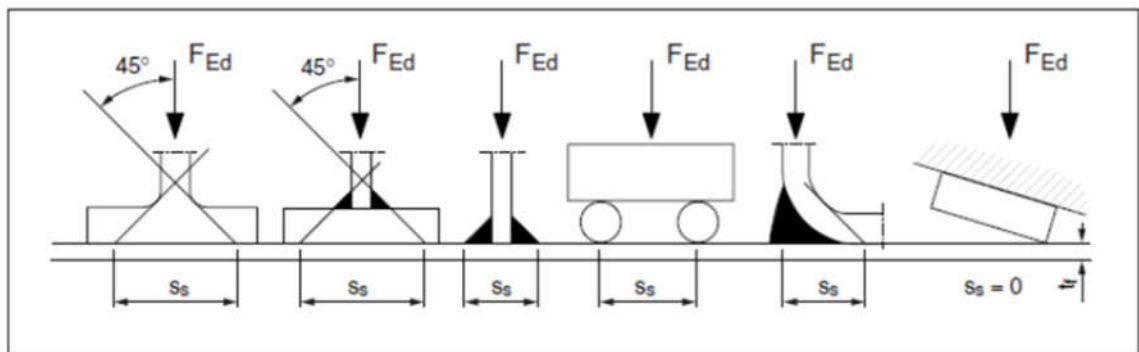
$$K = \frac{4b'}{0,9(f_{yp})p_2} \quad (54)$$

Kerroin n on vedettyjen ruuvien lukumäärä, b' on vaipan sisäpinnan etäisyys reiän reunaan ja p_2 on pulttien keskipisteiden välinen etäisyys. Liitoksen vetokestävyttä verrataan vetovoimaan $N_{1,Ed}$ [17, s.257].

6 FEM-analyysi

6.1 Puristusvoimien jakautuminen teräksessä

EN 1993-1-8:ssa mainitaan pistekuorman jakautumiskuormasta palkin laipalla erilaisilla kuormitustapauksilla.

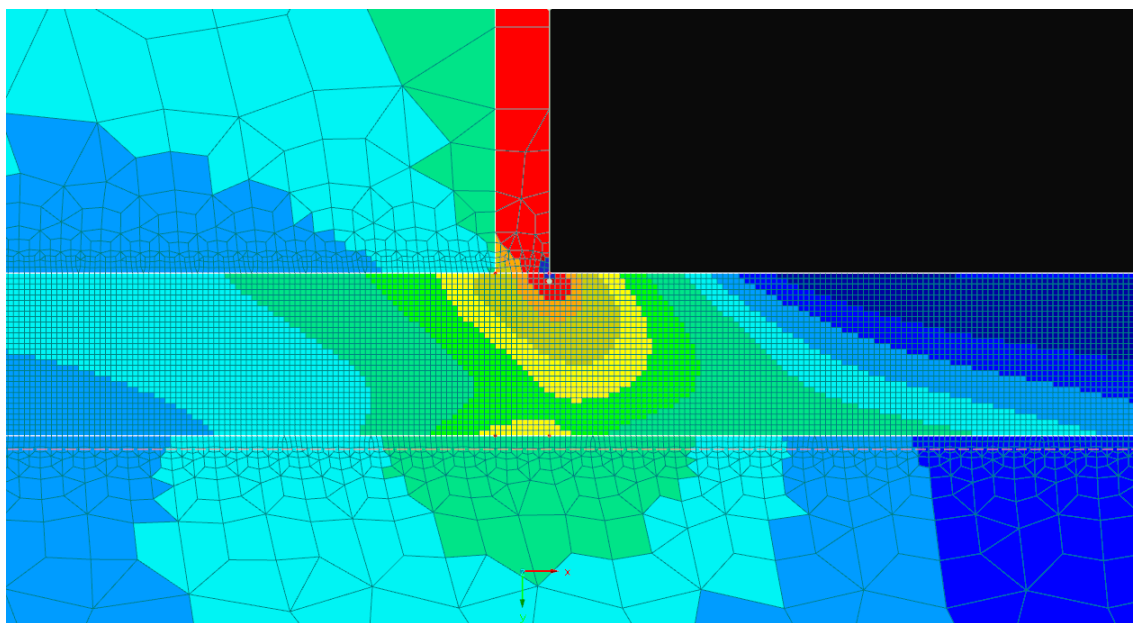


Kuva 36. Pohjalevyn vaikutusta voidaan verrata vasemmalta katsottuna toiseen tapaukseen. Kuorma jakautuu 45° kulmassa.

Myöskin raudoituksen voidaan olettaa aiheuttavan pistekuormia pohjalevyyn. Tällöin levyn paksuudella pienennetään puristusjäännitystä kulmassa 1:1. On kuitenkin huomioitava perustavaa laatua oleva ero, sillä eurokoodit viittaavat palkin laipalle

muodostuvaan pistemäiseen kuormaan. Pohjalevy makaa kuitenkin betoniperustusta vasten, jolloin siihen muodostuvat puristuksen jakautumisalueet ovat erilaiset.

Pilarin sisällä olevan betonin puristusjännityksen oletetaan jakautuvan sinne, missä puristuskapasiteettia on jäljellä, eli puristus ei pääse muodostumaan kohtisuoraan alaspäin, vain ikään kuin työntyy pilarista poispäin, kuten on havaittu kuvassa 37.



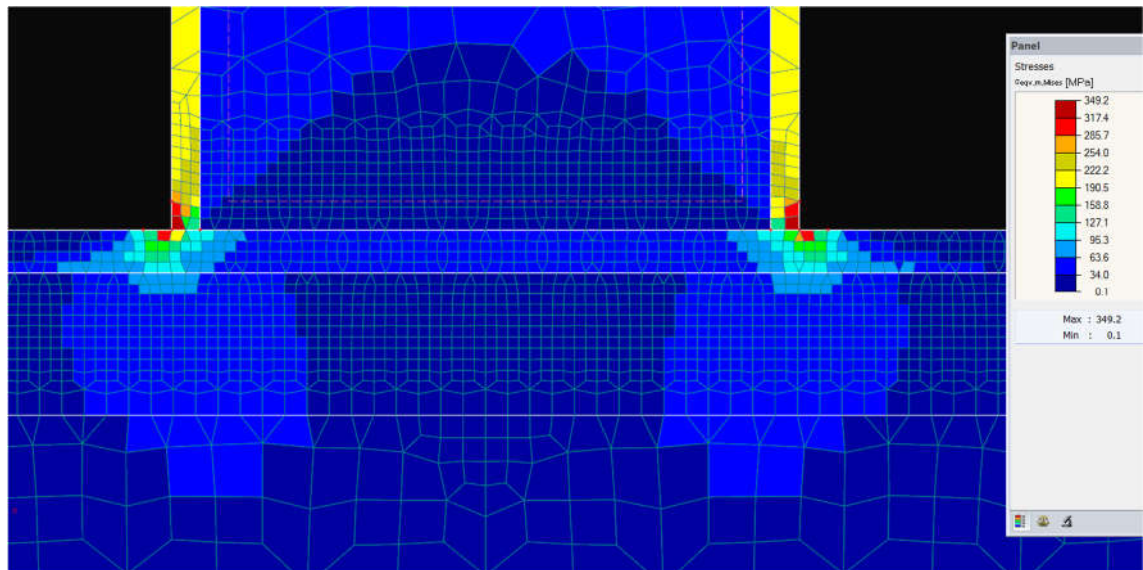
Kuva 37. Betonin ja teräkseltä tulevien kuormien jakautuminen pohjalevyn avulla. Punainen pinta kuvastaa pilarin vaippaa ja se nojaa pohjalevyn pintaan. Pohjalevyn alla on korkealujista betonia.

6.2 2D-mallin tulokset

RFEM:llä tehtiin 2D-tarkastelu, jossa tarkoituksena oli havaita pilarissa olevan betonin kuormituksen vaikutus pohjalevyyn. FEM-analyysissä huomattiin, että puristusalue jakaantui pilarin ulkopuolelle. Jakautumisalueen todettiin olevan suurempi kuin 1:1, joka tuki mitoitettuja suureita.

Luvussa 5.3 hypoteesina oli suurimman jännityksen muodostuminen vaipan ympärille. FEM-analyysissä huomattiin, että suurimmat jännitykset sijaitsivat vaipan alapuolella, joka tuki hypoteesia.

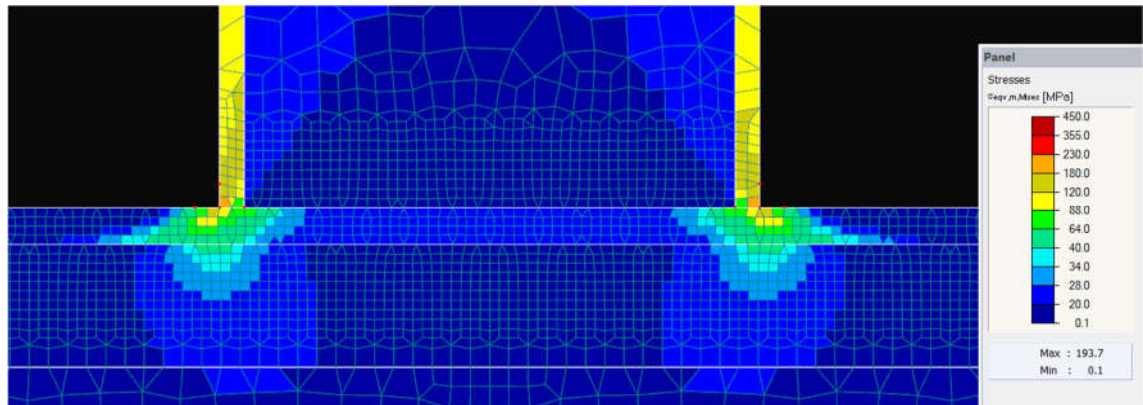
FEM-analysissä mallinnettiin pilari, jonka halkaisija oli 220 mm ja vaipan paksuudeksi valittiin 10 mm. Kuormitukset laitettiin elementtimenetelmällä saatujen suureiden mukaan siten, että teräkseen kohdistui noin kuusinkertainen kuorma betoniin nähden, täten teräksessä vallitseva jännitys saatiin vastaamaan elementtimenetelmän suureita. Pilarin betonin lujuudeksi valittiin C50/60 ja jälkivalun lujuudeksi C60/75. Jälkivalun korkeudeksi valittiin 50 mm. Anturan lujuudeksi valittiin C30/37 ja korkeudeksi puoli metriä.



Kuva 38. Havaitaan, että kuormat pilarissa holvautuivat reunoja kohti. Pohjalevyssä jännitykset jakoutuivat pohjalevyn reunoja kohti. Jälkivaluun muodostuu pallomaiset jännittyneet alueet.

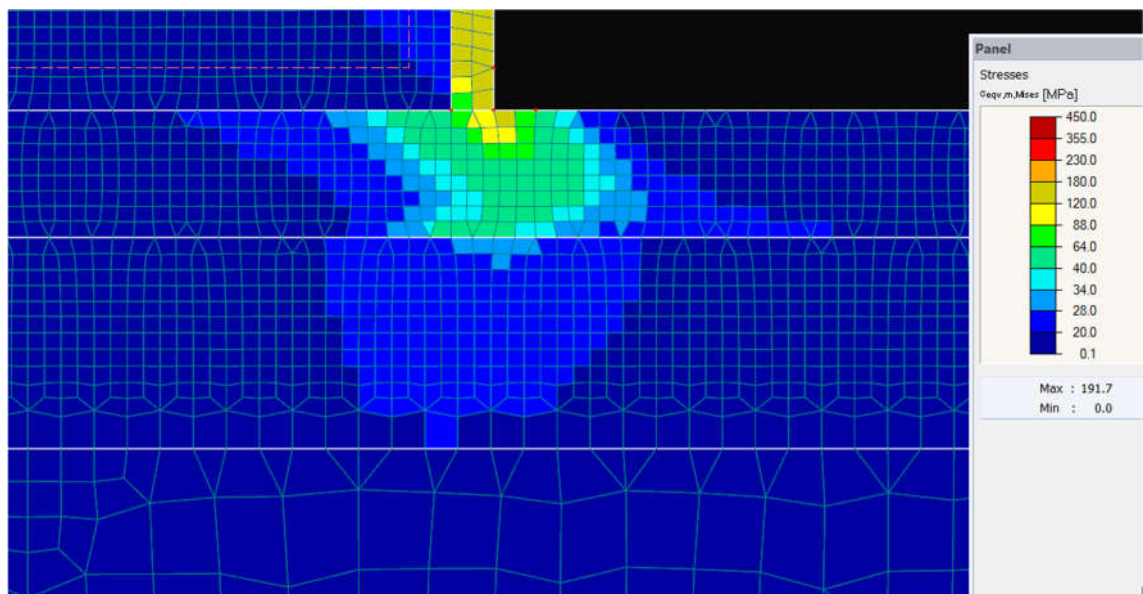
Kuvista havaitaan selkeästi, että pohjalevyn paksuuden merkitys on estää suurten jännitysten siirtymisen betoniperustuksiin. Jos pohjalevyn paksuutta kavennetaan, kriittiset jännitykset koskettavat betonipintaa, jolloin jälkivalubetoni murtuu. Pohjalevyn paksuutta kasvattamalla, suuret jännitykset jäävät levyn sisälle pallomaiseen muotoon.

Ensimmäisessä tarkastelumallissa kokeiltiin 15 mm paksuista pohjalevyä. Pilarin betonin mitoituslujuudeksi saadaan 28 MPa. Jälkivalulle saadaan pintapaineeksi 34 MPa kun k_j kertoimeksi valittiin 1,5.



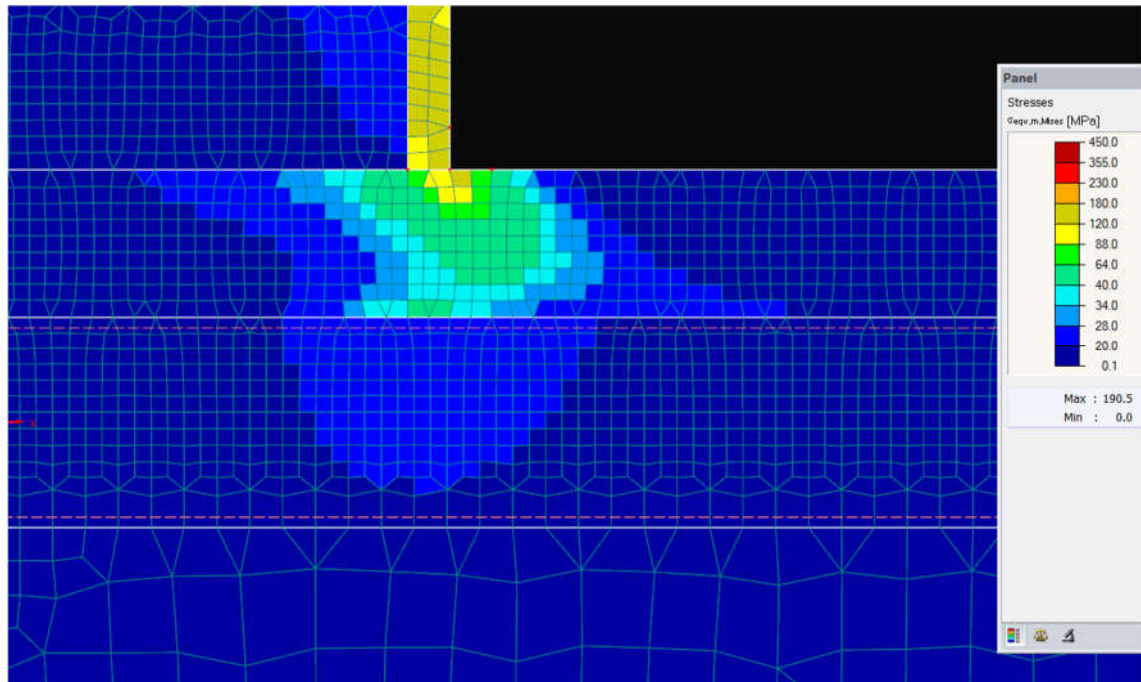
Kuva 39. 15 mm paksuisella pohjalevyllä havaitaan, että jälkivaluun muodostuu yli 34 MPa:n jännitys, jolloin jälkivalu murtuu.

Kun pohjalevyn paksuus kasvatetaan 30 mm:n, huomataan miten pohjalevyn alapinnassa vallitsevan jännityksen osuessa jälkivaluun, perustukseen kohdistuu kosketuspintaan yli 34 MPa:n jännitys. Pintapaineen yläraja oli 34 MPa, joka ylittyy pienellä alueella kuten havaitaan kuvasta 40:



Kuva 40. Pohjalevyssä vallitseva yli 40 MPa:n jännitys siivuaa betonipintaa sen verran, että jälkivaluun muodostuu pienelle alueelle yli 34 MPa:n jännitys.

Kun levyn paksuus kasvatettiin 35 mm:n paksuuteen, huomataan että yli 40 MPa jännitys teräksessä irtoaa kosketuspinnasta, eikä jälkivaluun muodostu rikkovia jännityksiä:



Kuva 41. Jälkivalussa vallitsee korkeimmillaan 28-34 MPa:n jännitys.

Mitoituksessa käytettävät kaavat tekevät yksinkertaistuksia, jossa suurin jännitys joka muodostuu pohjalevyn ja perustuksen välille on pintapaine. Pintapaineen tehollinen alue määräytyy c-mitan mukaan, joka vuorostaan määrittää pohjalevyn paksuuden.

Vastaavaa tilannetta sovellettaessa 220*220*10 liittopilariin, laskentataulukolla saatiin sallituksi pohjalevyn paksuudeksi 30 mm ja c-mitaksi 56 mm. FEM-analyysissä 30 mm pohjalevyn paksuus ei riittänyt täydellisesti estämään kriittisen jännityksen siirtymistä jälkivaluun, mutta raja-arvot ovat lähellä toisiaan.

6.3 Betonin voimien holvaantuminen

FEM-analyysissä betonin oletettiin toimivan yhdessä vaipan kanssa ja materiaalien välillä ei tapahtunut liukumaa. Betonin oletettiin toimivan lisäksi halkeilemattomana, jolloin betonissa vallitsevien voimien havaittiin holvaantuvan lähellä pohjalevyä. Näiden oletuksien pohjalta liittopilarin pohjalevy voidaan mitoittaa samaan tapaan kuin teräspilari.

Vaikka teräsvaipan huomattiin elementtimenetelmällä ottavan tyypillisesti noin 30-60 % kuormasta, pohjalevyn kohdalla kuorman oletetaan kasvavan niin suureksi, että betonin

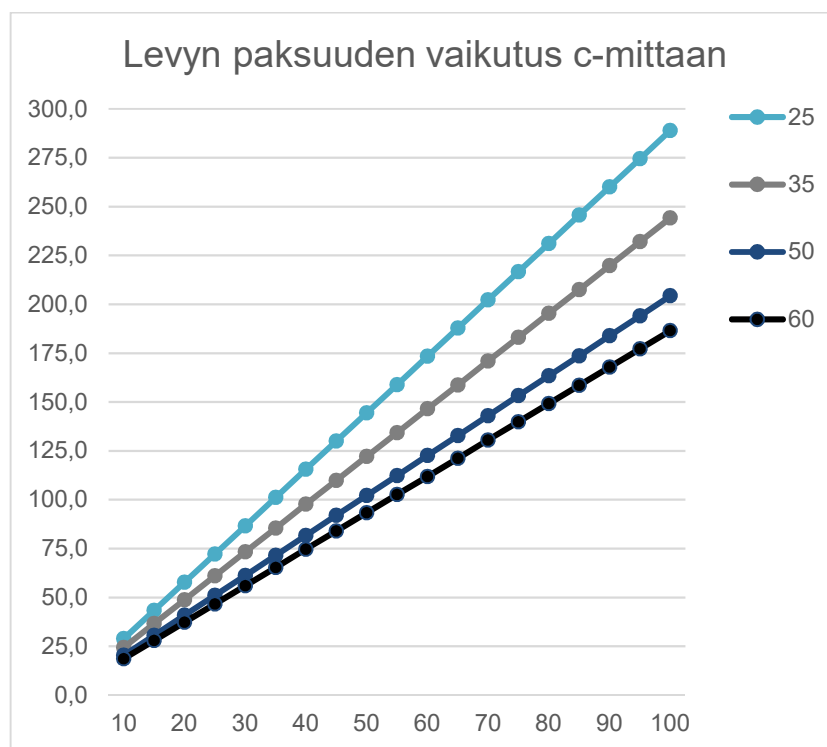
osuuden voidaan olettaa siirtävän kuormansa vaipan kautta perustukselle. Sektorimenetelmällä mitoitettuna pilarin koko kuorma voidaan laskea vaipalle ja betoni jätetään huomioimatta. Mitoituksen kannalta laskennat tapahtuvat varmalla puolella. Koska taulukkomitoituksessa vaipalle laskettu osuus oletettiin vakioksi pohjalevyllä asti, eikä holvaantumisen vaikutusta tullut huomioitua, saattoi se aiheuttaa poikkeaman mitoituksessa, jossa FEM-analyysin pohjalta 30 mm levy ei riittänyt, kun laskentataulukko oletti sen riittävän.

Vaikka liittopilarit eroavatkin kuormitussuhteiden mukaan teräspilareista, FEM-analyysin pohjalta voitaisiin todeta, että liittopilareiden mitoitus kannattaa tehdä kuten teräspilarina, jolloin betonin ottamaa osuutta ei tarvitse huomioida. Mitoitus tapahtuisi varmalla puolella, eikä kyseessä olisi merkittävä ylimitoitus.

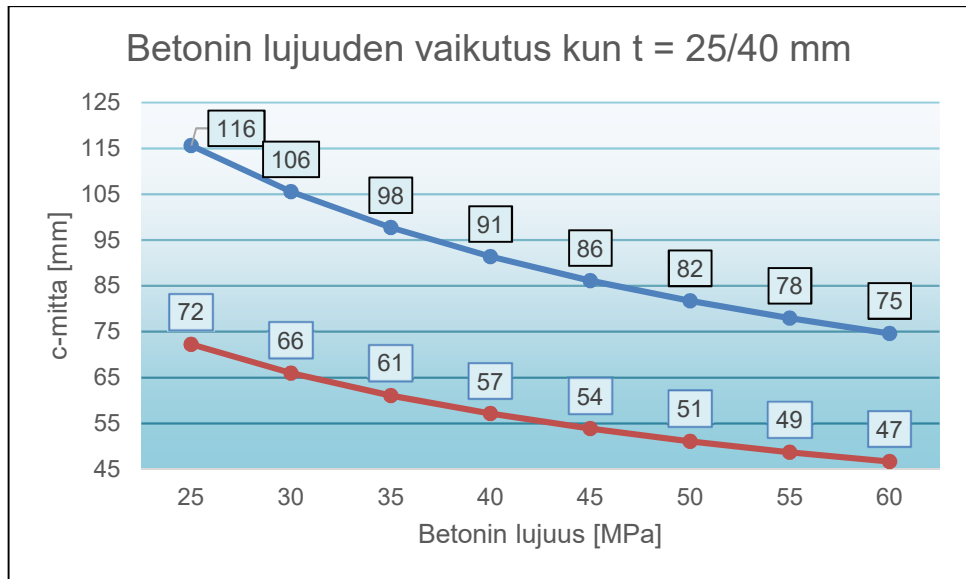
7 Anturan ominaisuudet

7.1.1 Jälkivalubetonin lujuuden merkitys laskennassa

Jälkivalubetoni vaikuttaa siihen, miten suuri tehollinen pinta-ala tarvitaan, jotta pilarilta tuleva kuorma ei riko perustusta. Mitoituksessa käytetään betonin puristuslujuuden sijaan betonin pintapaineen lujuutta, eurokoodien määräysten mukaan. Jälkivalun lujuutta kasvattamalla tarvitaan pienempi tehollinen alue. Laskettu c-mitta lyhenee lujuuden kasvatessa, kuten on esitetty kuvassa 42.



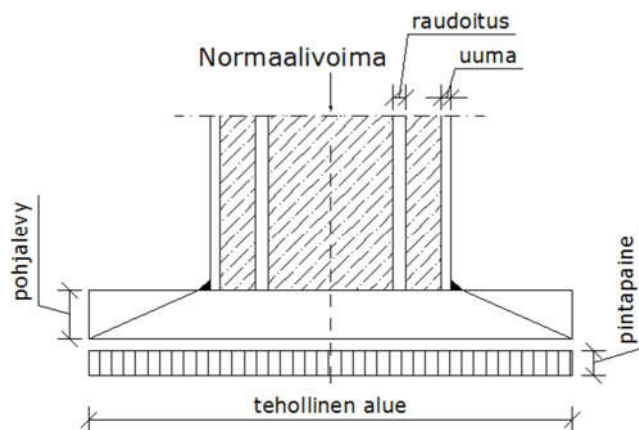
Kuva 42. Pystysuunnassa on esitetty c-mitta ja vaakasuunnassa levyn paksuus millimetreissä. Kasvattamalla levyn paksuutta, c-mitta kasvaa lineaarisesti. Viivat kuvastavat tilannetta, jossa mitoitus on tehty eri lujiselle jälkivalulle. Ylimmässä viivassa käytetty 25 MPa lujista betonia, alimmassa 60 MPa lujista betonia.



Kuva 43. Kuvaajasta nähdään, miten betonin lujuutta kasvattamalla voidaan pienentää tehollisen alueen pituutta c . Ylemmässä viivassa on kuvattuna levyä, jonka paksuus on 40 mm, alemman viivan paksuutena käytettiin 25 mm levyä. Lujuuden kasvun vaikutus pienentää c -mitan pituutta $x^{-1/2}$ kuvaajana, jossa $x = f_{jd}$.

7.1.2 Voimien jakautuminen perustuksiin

Perustusten huomioiminen on erittäin tärkeää, jotta rakenne kestäisi kokonaisuutena. Anturan koko vaikuttaa betonin pintapaineen nimellislujuuteen.



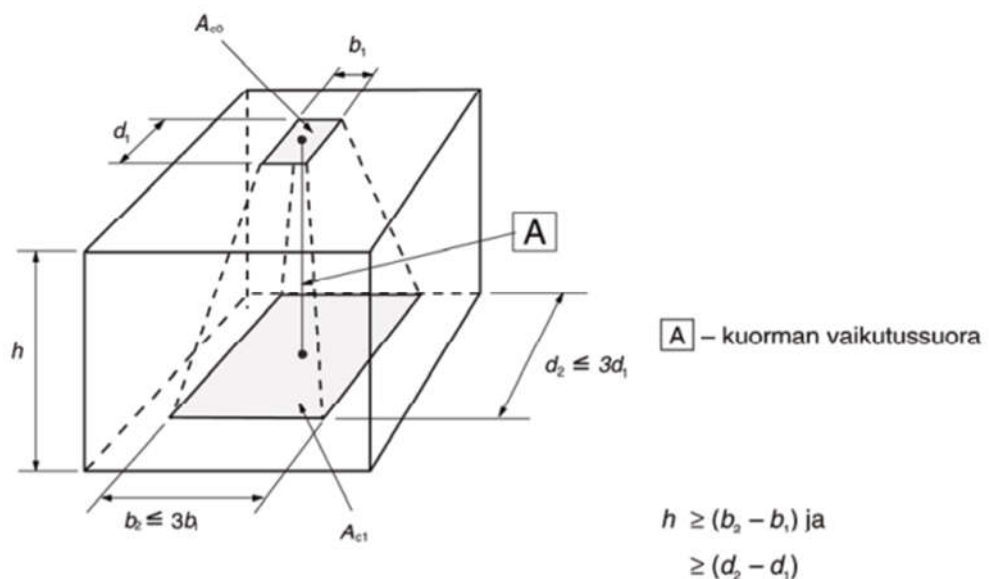
Kuva 44. Yksinkertaistus, jossa puristus jakautuu tasaisesti perustukseen.

Jälkivalun pintapaineen yläraja f_{jd} saadaan laskettua kaavalla:

$$f_{jd} = \beta_j * k_j \frac{\alpha_{cc} f_{yk}}{\gamma_c} \quad (55)$$

$$k_j = \sqrt{\frac{A_1}{A_0}} \quad (56)$$

Anturaan muodostuvan yhdenmuotoisen pinta-alan ollessa $3/2$ suurempi kuin $l_{eff} * b_{eff}$ saadaan pintapaineeksi betonin mitoituslujuus f_{cd} . Anturan ollessa riittävän suuri, saadaan pintapaineen ylärajaksi $2f_{cd}$. Jos perustuksen lujuuden korotusta ei haluta huomioida, voidaan olettaa kertoimen olevan vähintään $k_j = 1$. Puristuneen pinta-alan muodon kuuluu säilyä saman muotoisena anturassa, jolloin anturan reunojen tullessa vastaan, määräytyy sallittu puristuksen korotuskerroin samassa suhteessa [10, s.110].

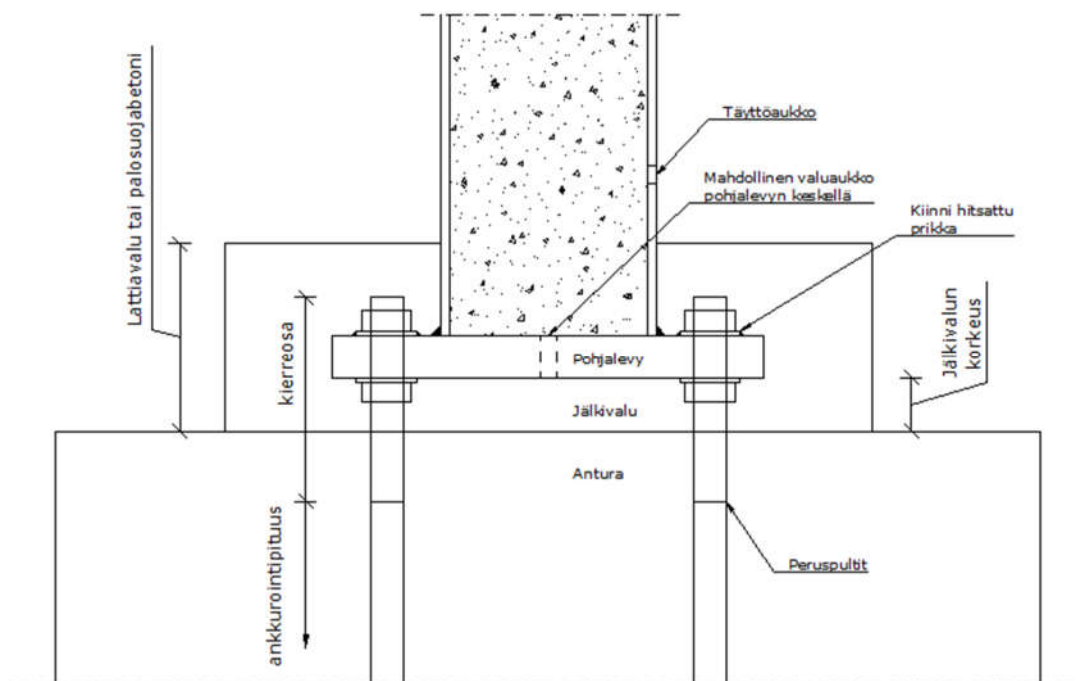


Kuva 45. Pinta-alaan A_{c0} kohdistuu pintapaine, joka jakautuu anturan koon mukaan isommalle pinta-alalle A_{c1} , joka saa olla suurimmillaan 9-kertainen A_{c0} nähden. Pinta-alojen välisestä suhteesta saadaan määritettyä kerroin k_j . Kerroin voi olla väliltä $1 \dots 3$, jossa kerroin 1 on mitoittaessa varmallalla puolella [10, s.110].

$$\beta_j = 2/3 \quad (57)$$

β_j kerroin edellyttää, että jälkivalun ominaislujuus on vähintään 0,2 kertaa betoniperustuksen ominaislujuus ja jälkivalun paksuus on enintään 0,2 kertaa teräksisen pohjalevyn pienin leveys [12, s.77].

Toisaalta, jos jälkivalun paksuus on suurempi kuin 50 mm, jälkivalun ominaislujuus valitaan vähintään yhtä suureksi kuin betoniperustuksen ominaislujuus [12, s.77]. Koska liittopilareiden jälkivalu on harvoin alle 50 mm, käytetään tyypillisesti suurempaa betonilujuutta. Jälkivalun korkeuden ollessa alle 50 mm, tulisi pohjalevyn leveyden olla alle 250 mm. Jälkivalun korkeuteen voi vaikuttaa myös peruspulttivalmistajan vaatimukset, joissa jälkivalun vähimmäiskorkeus riippuu pulttien halkaisijasta tai kierreosan pituudesta.



Kuva 46. Liittopilarin perustus, jossa levy ja pultit on suojattu betonikakulla.

8 Pulttien mitoitus

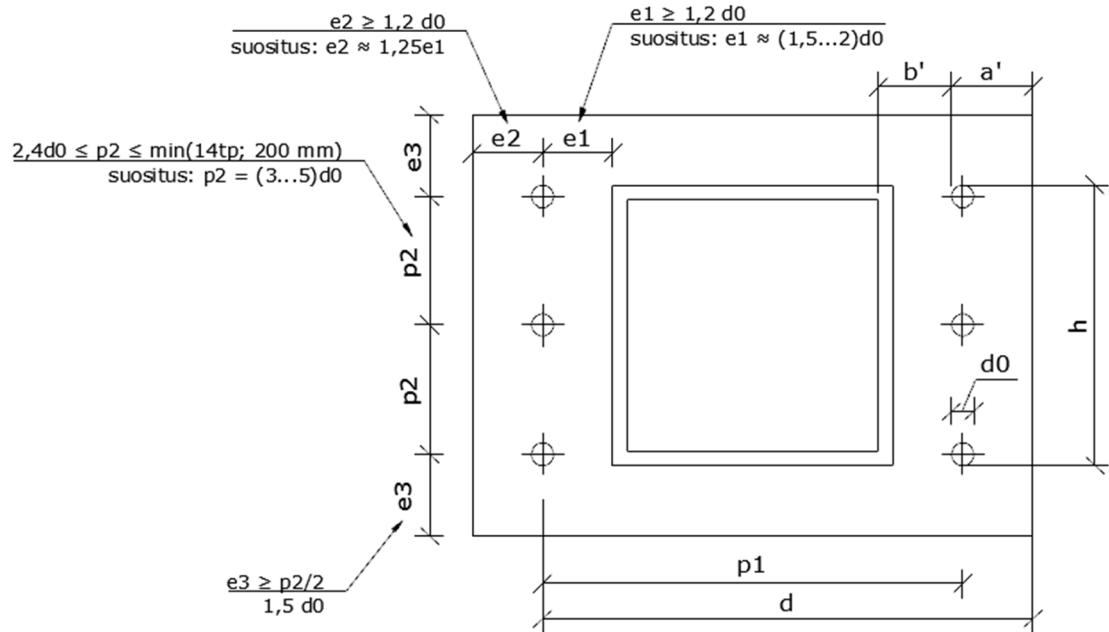
8.1 Pulttien sijoittelu

Pultit tulee sijoittaa siten, että ne eivät ole liian lähellä pohjalevyn reunaa, eikä liian lähellä pilaria, jotta pulttien kiristys sekä aluslaattojen asennus olisi mahdollista. Lisäksi pultit tulee olla pilarin leveyden välisellä alueella.

Pilarin asennustoleranssit ja mittapoikkeamat johtuvat pitkälti siitä, että peruspulttien sijainti saattaa vaihdella useita millimetrejä. Toiseksi pohjalevyn pulttiaukot ovat ylisuuria, jotta pohjalevy saadaan asennettua paikoilleen. Muttereiden kiinnityksessä käytetään tyypillisesti aluslevyjä, joilla pohjalevy saadaan kiristettyä kiinni. Pultit esijännitetään, jotta aluslevyn sivuttaista liukumista ei pääse tapahtumaan. Aluslevy voidaan myöskin hitsata kiinni pohjalevyyn, jolloin sivuttainen siirtymä tulee estettyä ilman esijännitettyä pulttia.

Reiän koko on aina isompi kuin peruspultin nimellinen halkaisija. Tämä johtuu siitä, että pultteja on vaikea saada osumaan pohjalevyn reikiin millilleen oikein. Ruuvien reikien toleranssien suuruudeksi voidaan valita +2...10 mm tai tarvittaessa jopa enemmän [20, s125]. Jos liitoksen halutaan ottavan vaakavoimia vastaan, tulee käyttää neliskanttisia priikkoja, joidenka reunat hitsataan kiinni pohjalevyyn. Priikkojen reikien toleranssi saa olla +1 mm [20, s125].

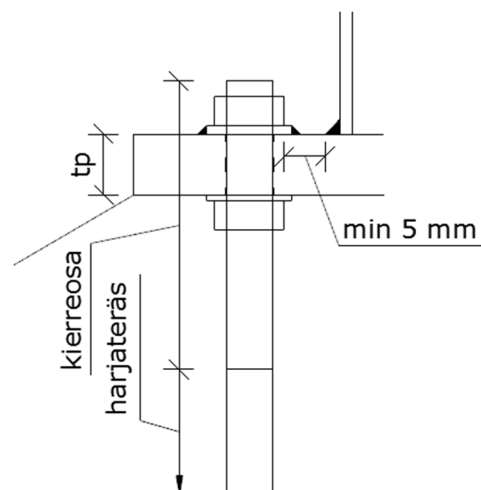
Arvioidessa tarvittavaa etäisyyttä peruspultin sekä pilarin reunan välille, kuuluu huomioida hitsin kannan leveys, prikan koko, mutterin avainväli ja kiristystyökalun vaatima tila. Eurokoodeissa annettu vähimmäissuositus on 1,5...2 kertaa reiän halkaisija [17, s.215].



Kuva 47. Pulttien sijoittelu EN 1999-1-8 taulukon 3.3 suositusten mukaan.

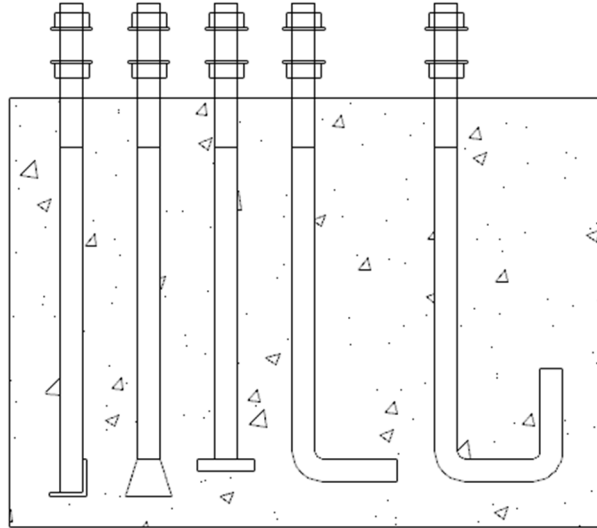
Vetopulttien välinen etäisyys rajoittuu lisäksi siihen, ettei anturaan saa kohdistua liian suurta vetoa, jotta kartiomurtumista ei pääsisi tapahtumaan. Kartiomurtumisessa betonin vetokestävyys ylittyy, jolloin pultit lohkeavat irti perustuksesta.

8.2 Peruspulttien ankkurointitavat



Kuva 48. Peruspultti muodostuu tyypillisesti kahdesta osasta, jossa pinnalle jäävä osa on kierteinen ja ankkuroituva osa on tyypillisesti harjaterästä.

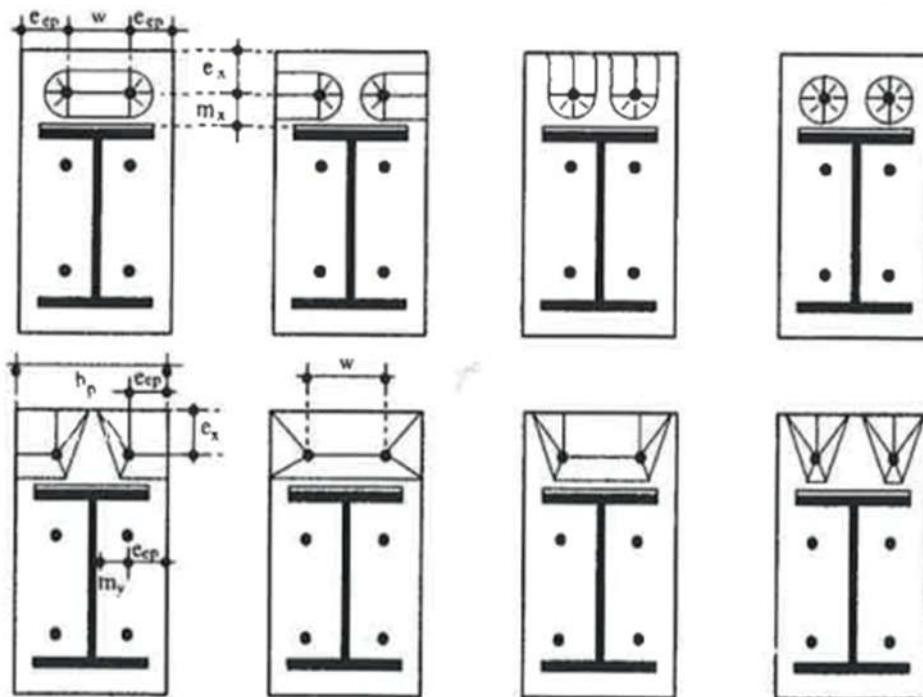
Pulttien ankkurointitapoja on useita. Peruspultissa harjateräsosa voidaan taittaa anturan sisään. Vaihtoehtoisesti niissä on hitsattuja tankoja tai tappeja. Peruspultteihin voidaan hitsata myös harjatankoja, joilla parannetaan tartuntaa [16, s.112].



Kuva 49. Erilaisia ankkurointitapoja. Ankkurointi voidaan parantaa myös kiinnihitsatuilla harjateräsryhmillä.

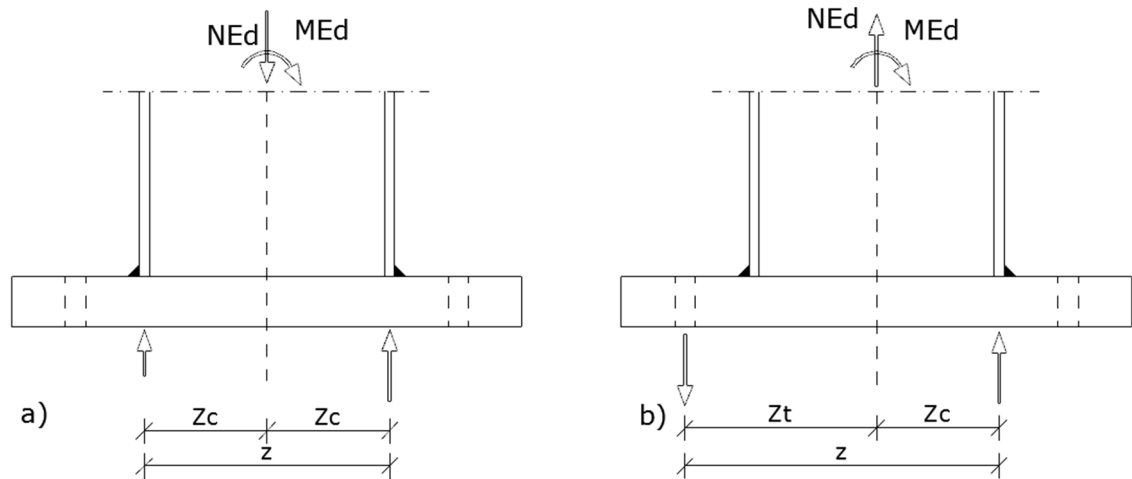
8.3 Momenttivarsi ja myötötavat

Eurokoodien mitoitusmenetelmät rajoittuvat tapauksiin, joissa vetopultit sijaitsevat pilarin laippojen leveyden sisälle. Tällöin vetopuolelle muodostuvat myötöviivat muodostuvat hallitummin.



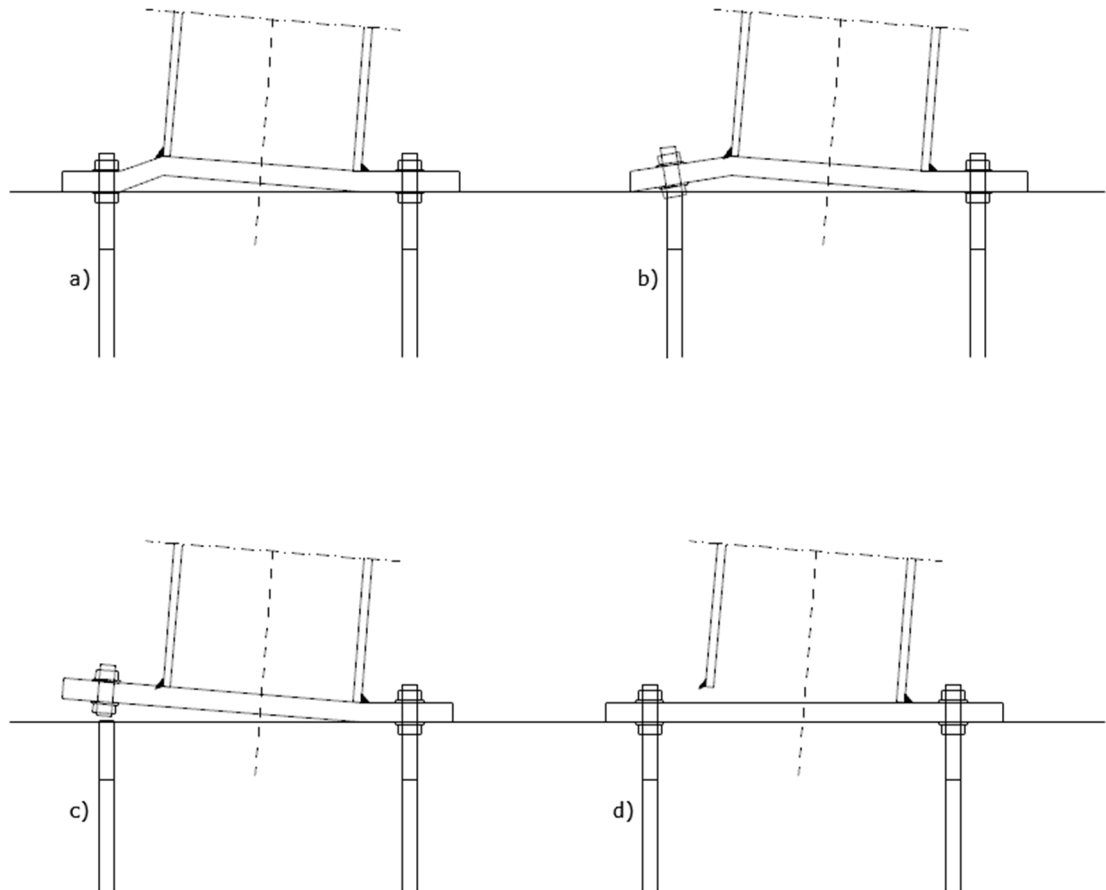
Kuva 50. Ulkopuolisten ruuvien myötömekanismit, kun pultit sijaitsevat laipan leveyden sisäpuolella. [16, s.108].

Eurokoodeissa ei käsitellä erikseen y-mitan korkeutta perustuksissa. Sen sijaan eurokoodeissa oletetaan puristuspinnan painopisteen muodostuvan keskelle pilarin laippaa. Liittopilarien kohdalla painopiste sijaitsee keskeemmällä rakennetta, johtuen pilarin betonin aiheuttamasta puristuksesta keskellä pohjalevyä. Liittopilarissa puristuspinnan painokeskiö sijaitsee lähempänä pilarin keskikohtaa, jolloin siitä mitattu etäisyys vetopultteihin olisi lyhyempi. Lyhyempi momenttivarsi aiheuttaa vetopultteihin suuremman vetovoiman kuin pitkä momenttivarsi. Toisaalta voimien suuruudet pienenevät pilarin laipoilla, jolloin voimien tasapainoehto Yksinkertaistuksen vuoksi tarkistellaan tilannetta, jossa käytetään tyhjää teräspilaria:



Kuva 51. Tapauksessa a) peruspultteihin ei kohdistu vetoa, jolloin momenttivarsi rajoittuu laippojen keskelle. Tapauksessa b) vetopuolen pultteihin kohdistuu vetoa.

Taivutuksen ollessa merkittävä, yhden päädyn pultteihin kohdistuu puristusta ja toiseen päätyyn vetoa. Taivutusvoima syntyy jälkivalubetonin tukireaktiosta ja vetopuolen pultin tai levyn myötäämisestä. Tällöin pohjalevyyn voi muodostua myötöviivoja riippuen osien jäykkyyksistä. Levy voi alkaa myötäämään vetopultin kohdalla, jos pultti on niin jäykkä, ettei se myötää samassa suhteessa kuin pohjalevy. Vetopultin myöntäessä liikaa myötöviiva muodostuu vain puristuspuolelle. [12, s.98.]



Kuva 52. a) Täysin plastisoitunut pohjalevy, b) Tasainen myötääminen pohjalevyn ja pultin välillä, c) Vetomurtuminen perusruuuissa, d) Murtuminen vaipan myötäämisessä tai hitsin repeämisessä.

Peruspulttien on sijaittava pilarin leveyden sisäpuolella, eikä ulkopuolella. Vetopulttien sijaitessa ulkopuolella, myötöviiva voi muodostua usealla eri tavalla, joka on hankalampi määrittää ilman kokeita. Eurokoodeja varten tehdyt koestukset rajoitettiin I-profiilien pohjalevyihin [16, s.115].

8.4 Pultteihin kohdistuvat voimat

Taulukko 3. Ruuvikiinnitysluokkia on eurokoodeissa määritetty viidelle eri tapaukselle [16, s.31].

Ruuvikiinnitysluokat		
	Luokka	tyyppi
A	Reunapuristustyyppinen kiinnitys	Leikkausvoiman rasittamat kiinnitykset
B	Käyttörajatilassa liukumisen kestävä kiinnitys	Leikkausvoiman rasittamat kiinnitykset
C	Murtorajatilassa liukumisen estävä kiinnitys	Leikkausvoiman rasittamat kiinnitykset
D	Esijännittämätön ruuvi	Vetovoiman rasittamat kiinnitykset
E	Esijännitetty ruuvi	Vetovoiman rasittamat kiinnitykset

Perustuksissa voidaan käyttää myös esijännitettyjä ruuveja, jolloin esijännityksestä seuraa, että vetopuolen ruuveissa vallitsee ensin puristus, joka vaatii suuremman momentin, jotta pohjalevyyn muodostuisi vedetty alue. Toisaalta, puristuspuolen jännitykset kasvavat, jolloin tulee tarkistaa jälkivalun pintapaineen kestävyys.

Jotta ruuvien murtuminen tapahtuisi sitkeästi, eli ruuvi myötää ennen poikki menemistä kierteitetyltä osalta, tulee seuraavan ehdon olla voimassa [16, s.31]:

$$\frac{A_s}{A} \geq \frac{f_y}{f_u} \quad (58)$$

Ruuvien pinta-ala A ja ruuvien jännityspoikkipinta-ala A_s saadaan valmistajan antamista tiedoista. Pultin myötölujuuksien suhde saadaan lujuusluokan jälkimmäisestä arvosta, esimerkiksi $8.8 = 0,8$.

Pultteihin kohdistuva vetovoima mitoitetaan vetokestävyydelle, jossa k_2 kertoimena käytetään arvoa 0,9, koska peruspultit eivät ole uppokantaruuveja:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9f_{ub}A_s}{\gamma_{M2}} \quad (59)$$

Pohjalevyn paksuudesta johtuen lävistymiskestävyys ei pääse muodostumaan määrääväksi [17, s.217]. Tällöin tarkistettavaksi jää leikkauskestävyys tapauksille, joissa perustukseen saattaa kohdistua vaakasuuntaisia voimia, esimerkiksi törmäyskuormasta, jolloin tarkistetaan leikkeen reunapuristuskestävyys [16, s.36].

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_b f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (60)$$

$$\alpha_b = 0,44 - 0,0003 f_{yb} \quad (61)$$

Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima ei saa ylittää seuraavaa ehtoa:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (62)$$

Ruukin rakenneputket käsikirjassa esitettiin menetelmä, jossa laskettiin laippalevyn kestävyys plastiselle momentille apusuurella K [17, s216]:

$$K = \frac{4b'}{0,9(f_{yp}/\gamma_{M0})p_2} \quad (63)$$

$$b' = e_1 - 0,5d + t_w \quad (64)$$

Jossa t_w on putken seinämän paksuus ja p_2 on reikien keskiöetäisyys kuvan 47 mukaisesti. n_t on vedettyjen pulttien lukumäärä. Liitoksen kestävyys tulee kestää siihen kohdistuva normaalivoima $N_{l,Ed}$ [17, s.257]:

$$N_{l,Rd} = \frac{t_p^2 n_t}{K} \geq N_{l,Ed} \quad (65)$$

8.5 Kitkan huomioiminen mitoituksessa

Leikkausvoima mitoitetaan lähinnä vain peruspulteille. Leikkausvoimaa voi muodostua pääasiassa asennusvaiheessa, jolloin pilariin voi kohdistua suuri tuulikuorma. Lisäksi pulttien leikkausmahdollisuus mitoitetaan onnettomuustilanteessa, sillä liitoksen tulee kestää törmäyisestä aiheutuva vaakavoima. Törmäystilanteen kohdalla leikkausvoiman

hallinnassa voidaan huomioida pohjalevyn ja betonin välinen kitka sekä pulttien leikkauskestävyys.

Leikkausvoiman siirtämiseen voidaan hyödyntää kitkaa. Jos perusruuviin reiät eivät ole ylisuuria, voidaan käyttää perusruuveja leikkausvoiman siirtämiseen. Prikkojen käyttäminen varmistaa sen, että pultit kykenevät hoitamaan leikkausvoiman [16, s.95].

Pohjalevyn ja jälkivalun välisen kitkaan perustuva leikkauskestävyys $F_{f,Rd}$ mitoitetaan seuraavalla kaavalla:

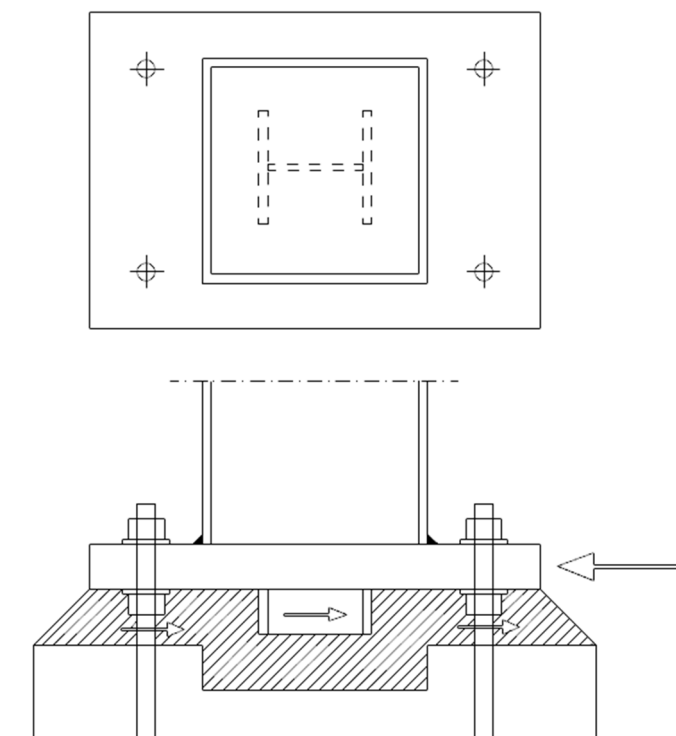
$$F_{f,Rd} = C_{f,d} N_{c,Ed} \quad (66)$$

Jossa $C_{f,d}$ on pohjalevyn ja jälkivalun pinnan välinen kitkakerroin. Muissa tapauksissa kitkakerroin määritetään kokeellisesti standardin SFS-EN 1990 liitteen D mukaan. Normaalivoiman mitoitussarvo on $N_{c,Ed}$, jos rakenteeseen kohdistuu vetoa, $F_{f,Rd} = 0$ [16, s.95].

Kitkan ja perusruuviin yhteisvaikutus voidaan laskea suoraan yhteen. Pilarin pohjalevyn perusruuviin leikkauskestävyyden mitoitussarvo $F_{vb,Rd}$ kerrotaan pulttien lukumäärällä n . Tällöin liitoksen kokonaiskestävyys on seuraava [16, s.95]:

$$F_{v,Rd} = F_{f,Rd} + nF_{vb,Rd} \quad (67)$$

Saman tapaiseen ratkaisuun, jossa leikkausvoimaa pitää saada muualtakin kuin pulteista, voidaan parantaa hitsatulla H profiililla, joka hitsataan pohjalevyyn kiinni:



Kuva 53. Pohjalevyn alle hitsattu H-profiili ottaa vaakasuuntaisen kuorman vastaan. Perustukseen pitää tehdä holkki, johon profiili saadaan mahtumaan.

9 Hitsauksen mitoitus

Hitsaus materiaali on tyypillisesti lujuudeltaan S440...S770. Mitoituksessa kiinnitetään lähinnä huomiota heikomman kiinnitettävän materiaalin lujuuteen, mikäli materiaalien lujuudet ovat erisuuria. Pohjalevyn tapauksessa sekä pilarin vaipan että pohjalevyn lujuudet ovat tyypillisesti väliltä S235...S460. Mitoitus suoritetaan heikoimman materiaalin mukaan [16, s.69].

Komponenttimenetelmää käytettäessä, pienahitsin kestävyysmitoitusehto on, että kiinnitettävät osat ovat keskenään joko väliltä S235...S460 tai S500...S700, mutta näitä ryhmiä ei saa sekoittaa keskenään. Tapauksissa joissa halutaan hitsata liittopilarin raudoitukset pohjalevyyn, huomataan että mitoitusehdot eivät ole voimassa, ellei pohjalevyn lujuus ole S500 luokkaa. Tällöin joudutaan käyttämään muita laskentamenetelmiä. Yksinkertaistetussa menetelmässä mitoitus menee kuitenkin sen verran varmalle puolelle, että materiaalien lujuuksilla ei ole väliä.

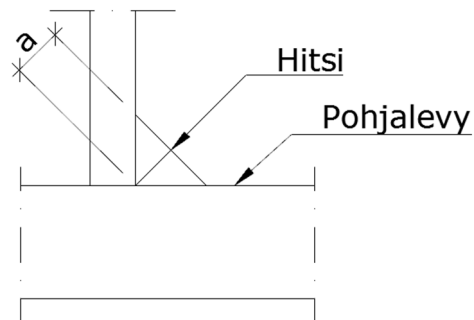
Yksinkertaistetussa menetelmässä pienahitsin kestävyyttä verrataan rasiusten resultanttiin F_{Ed} . Pienahitsin kestävyys määräytyy heikomman materiaalin lujuuden f_u mukaan. β_w on korrelaatiokerroin, joka saadaan suoraan taulukosta. Pienahitsin suuruus määritetään a-mitan mukaan, joka on tässä hitsin korkeus kapeimmassa suunnassa [16, s.69].

$$F_{Ed} \leq f_{vw,d} a \quad (68)$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}} \quad (69)$$

Taulukko 4. Korrelaatiokertoimen määrittäminen

f_u	β_w
S235	0,8
S275	0,85
S355	0,9
S420	1
S460	1



Kuva 54. Hitsin a-mitta

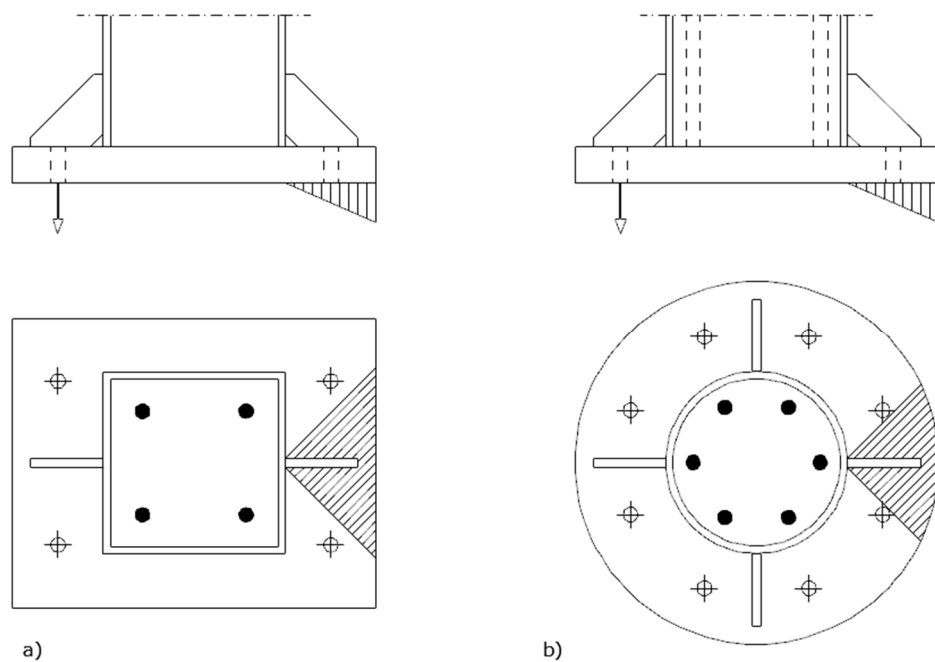
10 Erikoistapaukset

10.1 Pohjalevyn jäykisteet

Jäykistämättömän levyn paksuuden kasvaessa liian paksuksi, hyödynnetään jäykistelevyjä taivutusvastuksen parantamiseksi. Jäykkyykslevyjien avulla pohjalevy jaetaan kenttiin, jolloin taivutusmomentit jäävät pienemmiksi [20, s.127].

Jäykisteet tehdään kolmionmuotoisina siten, että terävät kulmat viistetään. Laskelmissa otetaan kuitenkin toimivaksi vain viisteen osa [20, s.127].

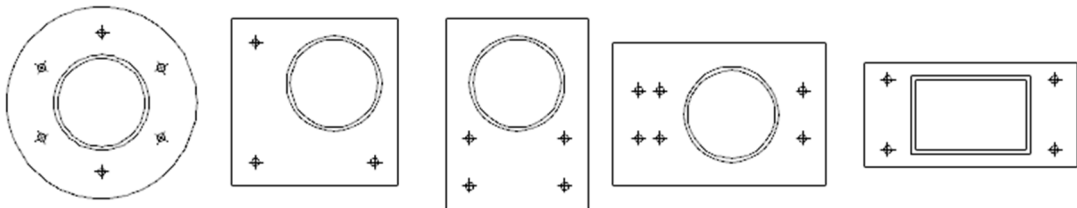
Jäykisteet toimivat yhdessä pilarin kanssa pohjalevyn tukina. Betoniperustuksen ja pohjalevyn välinen puristus jakautuu tuille samalla tavalla kuin laattojen kuormat, kuvan 55 mukaisesti [20, s.127].



Kuva 55. a) Jäykistelevyt kummallakin puolella pilaria. b) Maston tai pylvään jäykistelevyt.

10.2 Epäsymmetriset perustukset

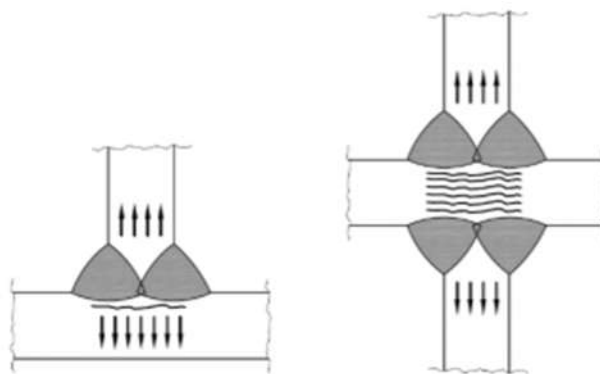
Liittopilareissa tavataan myös epäsymmetrisiä rakenteita, joissa pohjalevyn sijainti ei ole symmetrinen pilariin nähden, tai pulttien määrä ei ole parillinen. Esimerkkitapauksia on kuvattuna alla:



Kuva 56. Pohjalevy voi olla muodoltaan suorakaide, pyöreä tai neliö. Pilarin sijainti voi olla epäkeskeinen, tai pulttien määrä vaihdella puolittain.

10.3 Lamellin repeäminen

Teräksen muuten isotrooppisista ominaisuuksista huolimatta, sitä rasittaa valssausta vastaan kohtisuorassa suunnassa sitkeyden puute. Tämä aiheutuu teräsaihion sisältämien sulfidisulkeumien litistymisestä pinnan suuntaisiksi lamelleiksi, joista aiheutuu ns. lamellirepeämisen vaara vedettäessä terästä valssausta vastaan kohtisuorassa suunnassa. [30, s.32.]



Kuva 57. Lamellirepeäminen eurokoodien 1993-1-10 mukaan.

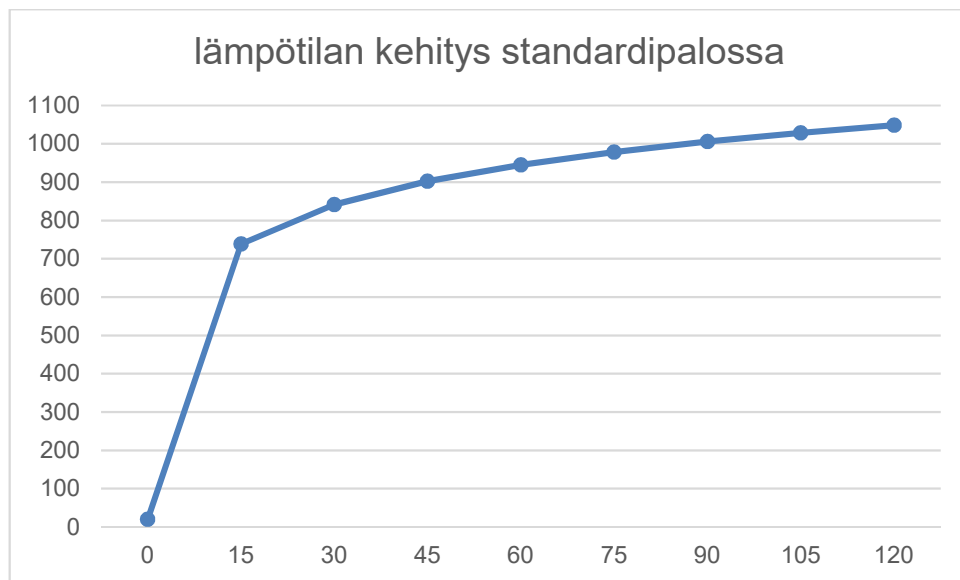
Paksuijen pohjalevyjen kohdalla on syytä tarkistaa lamellien repeämisvaara. Lamellirepeäminen on riskinä rakenteissa, joissa osassa rakennetta vallitsee suuri

vetojännitys. Pohjalevyn ja pilarin tai jäyksitelevyn välinen hitsi pitää osat kiinni toisissaan, joka aiheuttaa vetopuolelle vetojännityksen. Pintaan kohdistuva vetovoima saattaa repiä pohjalevyn lamellikerrokset irti toisistaan [30, s.32].

11 Palo- ja korroosiosuoja

11.1 Palomitoitus

Palotilanteen lämpötilan kasvua kuvataan standardipalolla, jossa olotilat luodaan siten, että tila jossa palo tapahtuu ei häiriinny muista tekijöistä kuten palavan tavarain loppumisesta tai ilman vaihdosta. Suomessa tyypillisesti käytetään standardipaloa palomitoituksessa.



Kuva 58. Kuvaajassa havaitaan, miten standardipalossa lämpötilan kohoaminen tapahtuu nopeasti ensimmäisen 15 min aikana.

Teräsrakenteiden palosuojaus hoidetaan tyypillisesti suojabetonipeitteellä, joka toimii suojana raudoitukselle. Betoni kestää lämpenemistä paremmin kuin teräs, teräsbetonirakenteiden kestävyys riippuukin pääasiassa siitä, miten nopeasti elementissä olevat raudoitukset saavuttavat kriittisen lämpötilan.

Suomessa käytetään kolmea eri palomitoitusmenettelyä [22, s.102]:

- taulukkomitoitus
- yksinkertaiset laskentamallit
- kehittyneet laskentamallit.

Taulukkomitoituksessa vähimmäisbetonipeitteen paksuus saadaan taulukosta, kun laatan paksuus sekä raudoituksen keskiöetäisyys betonipeitteen pinnasta tunnetaan [24, s.117]. Vaikka pohjalevy ja peruspultit eivät sijaitsisi laatan sisällä vaan alapohjassa, voidaan taulukkomitoitusta soveltaa vastaamaan pohjalevyn betonipeitteen paksuutta.

Taulukko 5. RIL 202-2011:ssa esitetty taulukkomitoitus laatoille.

	Laatan paksuus [mm.]	Keskiöetäisyys a [mm.]
REI 30	60	10
REI 60	80	20
REI 90	100	30
REI 120	120	40
REI 180	150	55
REI 240	175	65

Toinen palosuojausmenetelmä on levytys. Jossa levyt koteloidaan pilarien ympärille. Levyinä voidaan käyttää mineraalivillalevyjä, vermikuitulevyjä, kalsiumsilikaattilevyjä sekä kipsilevyjä [22, s.29].

Teräspilareita voidaan suojata myös palosuojamaaleilla.

Palosuojamaalit soveltuvat varsinkin teräspintojen palonsuojaukseen kuivissa sisätiloissa. Palosuojamaalin etuna on sen pieni suojapaksuus tavallisesti vain 0,2 - 3 mm ja rakenteen ulkonäkö on samankaltainen kuin tavanomaisessa korroosionestomaalauksessa, jolloin säilytetään edelleen pilarin arkkitehtoninen ilme teräsrakenteena. Vasta teräsrakenteen lämpötilan noustaessa 200...300 °C:n lämpötilaan alkaa maalin vaahdonmuodostusreaktio, jossa teräsrakenteen pintaan muodostuu paksu vaahdomainen kerros, joka hiiltyy palon aikana ja toimii rakenteen palosuojauksena. [22, s.32.]

Liittopilareissa palosuojamaalin tarpeellisuus ei ole pakollista, sillä betonipilarin oletetaan itsessään kestävän palotilanteessa. Toisaalta palosuojamaalilla voidaan varmentaa, että vaippa ei vaurioidu, jos palotilanne oletetaan lyhyeksi.

11.2 Perustuksen lämpeneminen

Normaaleista lämpötilanmuutoksista aiheutuva laajeneminen tai kutistuminen aiheuttaa pilariin momenttia ja rakenteen jännitykset voivat kasvaa entuudestaan, tai pilariin kohdistuu kutistumisesta enemmän vetoa.

Koska pohjalevyn oletetaan ottavan taivutusta vastaan, nousee kysymys rakenteen toiminnan muuttumisesta lämmön kohotessa kriittiseen lämpötilaan. Koska pilari on kiinni pohjalevyssä hitsin kautta, vaipan menettäessä kantokykynsä, saattaa rakenne todellisuudessa olla irti pohjalevystä. Tällöin liitos toimii täysin nivelellisenä tukena joka heikentää pilarin kantokykyä, mikäli nurjahdus pääsee tapahtumaan palonaikaisella kuormalla.

Lisäksi teräksen lämmönjohtuminen saattaa lämmittää peruslevyä betonipeitteestä huolimatta. Pohjalevyn lämmitessä myötääminen saattaa tapahtua ennenaikaisesti. Pohjalevyn lämpeneminen johtumisen kautta palotilanteessa vaatisi lisätutkimuksia, joihin tässä työssä ei paneuduttu. Pohjalevyn toiminnasta heräsi kuitenkin seuraavia kysymyksiä:

Muuttuuko perustuksen toimintamalli palotilanteessa jäykästä liitoksesta niveltueksi? Kestääkö perustus pilarilta tulevia kuormia, jos pohjalevy alkaa myötäämään ja voidaanko pohjalevyn paksuudella vaikuttaa asiaan?

Palotilanteessa vaipan saavutettua kriittinen lämpötila, teräs alkaa myötäämään. Teräksen johtaessa lämpöä myös perustuksiin asti, saattaa rakenteen toimintamalli muuttua. Perustuksen voidaan olettaa toimivan jäykkänä rakenteena, sillä pilari on hitsattu kiinni pohjalevyyn. Jos palotilanteessa vaippa lakkaa toimimasta ja lisäksi johtaa lämpöä pohjalevyyn siten, että pohjalevy menettää momenttikestävyys, muuttuu rakenne teoriassa niveltueksi.

Toiseksi kuormien jakautuminen perustuksille ei tapahdu suunnitellussa kulmassa, jolloin perustukset saattavat haljeta leikkausvoimien seurauksesta, sillä anturan puristuskapasiteetti voi ylittyä.

11.3 Korroosiosuojat

Pohjalevy ja peruspultit tulee suojata korroosiolta samaan tapaan kuin liittopilari yleisesti. Tavallisesti suojabetonipeite antaa hyvän korroosiosuojan, johtuen betonin korkeasta emäksisyydestä. Suunnittelijan on kuitenkin hyvä huomioida ympäristön vaikutukset, jotka saattavat edistää korroosion etenemistä pohjalevyssä. Etenkin tapauksissa, joissa pohjalevy ei ole suojattu betonipeitteellä.

Betonipeite mitoitetaan eurokoodin 1992-1-1 mukaan siten, että betonipeitteellä taataan teräksen suoja korroosiota vastaan, sekä riittävä palonkestävyys. Vaadittava betonipeitteen vähimmäisarvo saadaan selvittämällä rasitusluokka, johon pohjalevyn oletetaan kuuluvan. Rasitusluokka selvitetään EN 1992-1-1 taulukosta 4.1, jossa huomioidaan rasitustyyppit. [10, s.48.]

Kun rasitusluokka tunnetaan, päätetään mitä vaatimusluokkaa käytetään EN 1992-1-1 taulukon 4.3N mukaan. Isompi vaatimusluokka vaatii paksumman betonipeitteen. Lähtökohtaisesti vaatimusluokka on S4, ellei perustuksen suunniteltu käyttöikä ole 100 vuotta, jolloin vaatimusluokaksi valitaan S6 [10, s.51].

Vaadittava betonipeitteen vähimmäisarvo saadaan EN 1992-1-1 taulukosta 4.4N, jossa taulukko antaa vähimmäisbetonipeitteen paksuuden rasitusluokan sekä vaatimusluokan mukaan. Nimellinen betonipeitteen paksuus saadaan lisäämällä vähimmäisarvoon mittapoikkeama Δc_{dev} [10, s.49]:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (70)$$

Sulfaattipitoisessa ympäristössä käytetään lisäksi sulfaatin kestävää betonia, jotta välttyttäisiin kemiallisilta reaktioilta, jotka aiheuttavat betonin halkeilua.

Terästä voidaan suojata galvaanisella suojalla, joista yksi tapa on kuumasinkitys. Kuumasinkityksessä esikäsitelty teräslevy upotetaan sulaan sinkkialtaaseen, jossa ajan kuluessa teräksen pinnalle muodostuu kemiallinen sidos. Teräksen ja sinkin välille muodostuu faaseja, jotka riippuvat teräksen pii-pitoisuudesta sekä ajasta, jossa teräs oli sinkkialtaassa. Faasit ovat kerroksia kemiallisia seoksia, joilla kullakin on tietty teräs-sinkki pitoisuus. Koska kyseessä on kemiallinen sidos, sinkki ei ole maalin kaltaisena kerroksena teräksen pinnalla, vaan sen vaikutus vaikuttaa syvemmälle kuin vain

teräksen pinnalle. Sinkki toimii uhrimetallina ja suojaa terästä, vaikka pintaa naarmuuntuisi mekaanisista rasituksista [33].

Peruspultit voidaan kuumasinkityksen sijaan suojata sähkösinkityksellä, jolloin suojakerros on paljon ohuempi. Sähkösinkityksen haittana on pieni suojakerros etenkin tapauksille joissa ulkoiset rasitukset ovat suuria.

Kuumasinkityksen rajoittaa teräsosien käsittelyä tapauksissa, joissa metalliosia halutaan hitsata kiinni toisiinsa kuumasinkityksen jälkeen. Sinkitys on suotavinta tehdä vaadittujen hitsausten jälkeen, sillä ennen hitsausta sinkkikerros tulee hioa pois hitsattavalta alueelta. Koska pohjalevyjen asennuksessa prikkujen kiinnihitsaaminen tehdään vasta työmaalla, kuumasinkityksestä voi koitua paljon lisätyötä [33].

Terästä voidaan suojata kuumasinkityksen lisäksi usealla erilaisella korroosiosuojamaalilla. Korroosiosuojamaalit eroavat suuresti keskenään ja niitä voidaan jaotella useaan eri ryhmään. Korroosiomaalit koostuvat tyypillisesti sideaineesta, liuotteesta sekä täyteaineista [23].

Liuottimia voidaan jakaa syttyvyyden mukaan neljään luokkaan:

- Erittäin helposti syttyvä, leimahduspiste on alle 0°C
- Helposti syttyvä, leimahduspiste 0 - 21°C
- Syttyvä, leimahduspiste 21- 55°C
- Ei palava neste, leimahduspiste on yli 55°C.

Korroosiomaaleilla pyritään saavuttamaan suoja roiskeiden hylkimiseen, parantamaan teräksen säänkestävyyttä, suojata rakenne vedeltä, toiminta mekaanisena suojana tai suojana haitallisilta liottimilta, hapoilta, rasvoilta, suolaliuksilta sekä alkaaleilta. Yleisimpiä korroosionestomaaleja ovat [23]:

- kloorikautsumaalit CR
- akryylimaalit AY
- vinyylimaalit PVC
- alkydimaalit AK
- vesiohenteiset dispersiomaalit

- kaksikomponenttiset epoksimaalit EP
- kaksikomponenttiset polyuretaanimaalit PUR
- oksiraaniesterimaalit OX
- sinkkisilikaattimaalit ESI.

12 Laskentapohjien suunnittelu

12.1 Excel-taulukko

Insinööriyöhön liittyi laskentapohjan tekeminen. Laskentapohjaksi tehtiin Excel-taulukko sen helppokäyttöisyyden vuoksi. Excel-taulukon solut lukittiin siten, että suunnittelija pystyi syöttämään vain lähtötiedot, jotka olivat ruskeaksi väritettyjä ruutuja.

Laskenta-arvot sekä lopputulokset tulevat erivärisille ruuduille, joita ei voi manuaalisesti muuttaa. Laskentataulukko ilmoittaa mitoitusehtoien toimivuudesta värjäytymällä punaiseksi, jos liitos ei kestä, sekä vihreäksi jos liitos kestää.

Taulukko 6. Excel-taulukon solujen värikoodit, kun käyttöaste ei ylitä.

Levyn paksuuden valitseminen

t_p	35	mm	
$M_{el,Rd}$	29,4	kNm	
Käyttöaste	0,84	<1	Levy kestää

Taulukko 7. Excel-taulukon värikoodit, kun käyttöaste ylittyy.

Levyn paksuuden valitseminen

t_p	25	mm	
$M_{el,Rd}$	15,6	kNm	
Käyttöaste	1,42	<1	Levy ei kestä

Taulukoita tehtiin kaksi, sillä suorakaidepilarin mitoitus poikkesi suuresti pyöreän pilarin mitoituksesta. Pyöreän pilarin mitoituksessa laskettiin sektorimenetelmällä uumassa vallitsevat voimat, jonka avulla selvitettiin pohjalevyn paksuus.

Taulukko 8. Pintapaineen kestävyys

Levyn paksuuden valitseminen		
t_p	30	mm
c	97	mm
l_{eff}	424	mm
σ_c	11,045	N/mm ²
f_{jd}	11,333	N/mm ²
$\sigma_c \leq f_{jd}$	Betoni kestää	

Laskentataulukko oli kummassakin tapauksessa jaettu välilehtiin, jossa eri välilehdille oltiin jaettu eri laskennan vaiheet, kuten pulttien tai hitsien kestävyudet. Excel-taulukon yksi eduista on listojen tekeminen. Listojen tekeminen perustuu datan taulukointiin, jolloin valitsemalla lähtötieto solu, avautuu lista standardilujuuksista tai mitoista.

Laskentataulukot oltiin tehty siihen malliin, että tulostetta painamalla, sivut tulostuvat kokonaisina yksi aihealue selkeästi kuvattuna.

12.2 Vaihtoehtoiset laskentataulukot

Laskentapohjan olisi voinut vaihtoehtoisesti tehdä myös MathCAD-pohjalle. Etuna olisi ollut kaavojen käytön helppous. MathCAD-pohjissa suunnittelija näkee selkeämmin, miten saadut laskentatulokset on laskettu. Tällöin MathCAD:n käyttöönotto on helpompaa sellaiselle, jolle laskentapohja ei ole tuttu.

Excel-pohjan käytössä ohjeet pitää tehdä sen verran selkeäksi, että uusi käyttäjä ymmärtää mitä missäkin solussa lasketaan. Yksi tapa helpottaa käyttöönottoa, on selitysten kirjoittaminen solujen viereen ja mieluiten kaavan ja kuvan esittäminen solujen rinnalla.

13 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä perehdyttiin liittopilarien pohjalevyjen mitoitukseen. Pohjalevyjen mitoitusta lähdettiin tutkimaan eurokoodeissa esitettyjen menetelmien kautta, jossa mitoitus perustui I-profiilisten pilareiden mitoitukseen. Eurokoodeissa mitoitus tapahtui

vain puristuspuolen tarkastelussa, jossa kiinitettiin huomiota perustuksen pintapaineen kestävyteen sekä pohjalevyn taivutuskestävyyteen.

Eurokoodeissa käytettyjä kaavoja saatiin purettua siten, että niistä voitiin johtaa mitoituksen periaatteet. Laskentaprosessin kannalta laskenta aloitettiin selvittämällä vaadittu pinta-ala, jonka perustuksen betoni vaatii, jotta se kestäisi teräsvaipalta tulevan kuorman. Tästä näkökulmasta käsin saatiin laskettua suoraan pienin vaadittu pohjalevyn paksuus siten, että niin pinta-paine kuin taivutuskestävyyskin tulivat samanaikaisesti mitoitettua.

Pohjalevyn mitoituksessa käytännössä tarkistetaan kolme asiaa. Ensimmäisenä tarkistetaan millaisia puristusvoimia perustus kestää, ja millaisia jännityksiä pilarissa vallitsee. Jännitysten jakautuminen hoidettiin säätelemällä pohjalevyn paksuutta, tai kasvattamalla jälkivalun lujuutta. Toiseksi tarkasteltiin pohjalevyn taivutusvastus kimmoteoreettisella alueella. Jotta perustus toimisi jäykkänä tukena, tulee pohjalevyn kestää siihen kohdistuva momentti. Kolmantena tarkisteltiin vetopuolen pulttien vetokestävyys ja reunapuristuskestävyys.

Insinööriyössä selvitettiin lisäksi keinoja, joilla mitoitusta voitiin soveltaa pyöreille pilareille, sillä aiheesta ei löytynyt aikaisempia laskuesimerkkejä. Pyöreiden pilareiden pohjalevyn mitoituksessa on aikaisemmin tehty yksinkertaistuksia, joissa mitoitus vastasi suorakaide pilaria. Tässä insinööriyössä pyrittiin huomioimaan vaippaan kohdistuvia todellisia voimia, sekä arvioimaan taivutuskestävyys kaarevalle pinnalle. Menetelmäksi kehitettiin sektorimenetelmä, jossa kunkin sektoriin kohdistuva puristus laskettiin momenttivarren avulla. Hyväksi sektroin kulmaksi todettiin 15 asteen kulma, sillä pohjalevyn paksuus ei poikennut merkittävästi 7,5 asteen sektorista laskettaessa.

Liittopilarin mitoitus rajattiin siten, että pilarissa olevan betonin oletettiin toimivan halkeilemattomana ja pilarin vaipan ja betonin välillä ei tapahtunut liukumaa. Tällöin Pilarin toiminta toimi yhtenäisenä, ja materiaalien yhteisvaikutuksesta betonin kuormat holvaantuivat vaipalle lähellä pohjalevyä.

Itse liittopilarin poikkeavuutta teräspilariin nähden tutkittiin tekemällä 2D FEM -malli, jossa tarkasteltiin jännitysten muuttumista niin pilarissa, pohjalevyssä kuin jälkivalussakin. FEM-malleissa huomattiin pilarin betonissa vallitsevan jännityksen holvaantuminen vaipalle, jolloin tilanne vastasi suuremmin teräspilarin mitoitusta.

FEM-mallin tulokset vastasivat pääosin kaavojen pohjalta tehtyjä hypoteeseja pohjalevyn toiminnasta. FEM-malleista nähdään, miten jännitykset pienenevät pohjalevyssä, jolloin pohjalevyn paksuudella saatiin säädettyä rakenne tilanteeseen, jossa betonia rikkova jännitys jäi pohjalevyn sisälle. Toiseksi mallista huomattiin, miten puristus jakaantui pohjalevyn reunaa kohti, eikä 1:1 kulmassa. FEM-tuloksista hyödyttiin siten, että saatiin varmuutta siitä, miten jännitykset todellisuudessa jakautuivat.

Vaikka liittopilarien toiminta poikkeaaakin teräspilarista jäykkyyden sekä palonaikaisen toiminnan suhteen, pohjalevyn toiminta oli saman kaltainen, eikä betonin ottamaa kuormaa tarvitse vähentää vaipan kuormista.

Insinööriyössä tehdyt vertailut jäivät vähäisiksi opintojen aiheuttaman kiireen vuoksi. Isoimpana haasteena oli tietotaidon puute, sillä insinööriyön tekemisen aikana suoritin rakenteiden mekaniikan erikoisjaksoa, jossa opetettiin käyttämään elementtimenetelmää, jota sovellettiin tässäkin opinnäytetyössä. Lisäksi jäykkyyksimitoituksen kurssi sekä teräsmitoituksen jatkokurssi sijoittuivat viimeiselle syksylle, joista olisi ollut opinnäytetyön tekemisessä paljon apua. Toiseksi opinnäytetyössä käytetyn RFEM-ohjelman käytön harjoittelu vaati oman aikansa, joka hidasti tutkimuksen etenemistä entuudestaan.

Liittopilareiden pohjalevyjen mitoitus tehtiin Excelillä, jolla saatiin tehtyä helppokäyttöisiä laskentapohjia. Laskentapohjia tehtiin kaksi, sillä pyöreiden pohjalevyjen mitoitus tehdään tarkastelemalla pienempää aluetta liitoksesta sektorimenetelmällä. Exceleissä ei kuitenkaan mitoitettu lamellirepeämistä tai hyödynnetty esijännitettyjä pultteja, vaan ne jäivät suunnittelialle tarkistettavaksi erikseen.

Insinööriyössä ei ehditty perehtymään myötöviivojen muodostumiseen tapauksissa, jossa vetopultit sijaitsivat liittopilarin leveyden ulkopuolella. Toiseksi palotilanteen mitoitus ja toiminta jätettiin työstä pois, sillä aihe vaati lähtökohtaisesti enemmän ymmärrystä liittopilarin toiminnasta. Tulevaisuutta varten olisi mielenkiintoista selvittää, millaisia vaikutuksia palotilanteella voi olla pohjalevyille. Tässä työssä liitoksen oletettiin toimivan jäykkänä, mutta palotilanteessa saattaa liitos muuttua nivelelliseksi. Mahdollinen perustuksen kiertyminen palotilanteessa saattaisi johtua pohjalevyn lämpenemisestä, jolloin sen ei oleteta kestävänsä taivutusta. Toinen syy saattaa olla sen mahdollinen heikentynyt kyky jakaa voimia perustuksille, jolloin perustus ei kestä siihen

kohdistuvia leikkausvoimia. Kolmas syy saattaisi olla vaipan irtoaminen pohjalevystä, jolloin betonipilari seisoo pohjalevyn päällä ilman jäykkää kiinnitystä.

Neljäntenä olisi mielenkiintoista mallintaa palotilanne analyysi, jossa huomioidaan lämmön johtuminen vaipan välityksellä pohjalevylle silloinkin, kun pohjalevy on betonipeitteen alla suojassa suoralta lämpösäteilyltä. Lisäksi liittopilarin toimintaa voitaisiin tutkia tapauksissa, joissa betonin ja vaipan välinen liukuma on mahdollinen ja liittopilarissa oleva betoni toimisi halkeilleena.

Lähteet

- 1 Liittorakenteiden Suunnittelu ja Mitoitus, Eurocode 4- Oppikirja, by 58, 2012, Betoniyhdistys / Teräsrakenneyhdistys ry, ISBN: 978-952-9683-52-9
- 2 Suomen betoniyhdistys r.y. By 26 Liittorakenteet suunnitteluohjeet, 1988, Suomen betoniyhdistys r.y. ISBN 951-9365-34-6
- 3 Suomen betoniyhdistys r.y. By 36 Liittorakenteiden sovellusohjeet, 1991
- 4 Böhling Harry. 2014. Helsinki. Rakenteiden mekaniikka: kaavakokoelma. Ammattikorkeakoulun opetusmateriaali
- 5 RIL 201-1-2008. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, 2008, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, ISBN-13: 9789517585163
- 6 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2009 SFS-EN 1991-1-1 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat
- 7 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2009 EN 1991-1-3 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat
- 8 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2005, EN 1991-1-4 + AC +A1, Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat
- 9 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2005, SFS-EN 1991-1-6 +AC, Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-6: Yleiset kuormat. Toteuttamisen aikaiset kuormat
- 10 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2010, SFS-EN 1992-1-1/AC, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
- 11 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2006, SFS-EN 1993-1-5+AC:2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet
- 12 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2005, SFS-EN 1993-1-8, Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu
- 13 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2009, EN 1994-1-1 +AC, Eurokoodi 4: Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt

- 14 Suomen standardoimisliitto SFS r.y. 2014, EN 1994-1-2 +AC +A1, Eurokoodi 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus
- 15 Joints in steel construction: Moment-resisting joint to Eurocode 3, 2013, UK Connections group, ISBN 978-1-85-942209-0
- 16 Kouhi Jouko, Eurocode 3 Teräsrakenteiden suunnittelu EN1993-1-8 Liitokset, Teräsrakenneyhdistys ry. 2015
- 17 Ongelin Petri & Valkonen Ilkka, ssab domex tube rakenneputket EN 1993-käsikirja, 2016, SSAB Europe Oy, ISBN 978-952-93-7447-2
- 18 Leskelä Matti, By 210 betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus, 2008, Suomen Betoniyhdistys r.y. ISBN: 978-952-5075-96-0
- 19 Frantisek Wald, Áatky sloupu Column Bases Frantisek Wald Ceske vysoke uceni technicke, 1995
- 20 Teräsrakenteiden suunnittelu, rakentajan kustannus oy, 1989
- 21 Salmi Tapani, Kuula Kai, Rakenteiden mekaniikka, 2012, Pressus Oy, ISBN-13: 9789529835836
- 22 Juvonen Jouni, 2013, Teräsbetoni- ja liittopilarin palomitoitus R180 luokkaan eurokoodin mukaisesti, diplomityö
- 23 Teräsrakenneyhdistyksen kotisivut, http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/155/aeca931/try_korroosionestom_aalit.pdf, luettu 9.4.2018.
- 24 RIL 202-2011/By Betonirakenteiden suunnitteluohje, 2011, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, tuotekoodi 978-951-758-536-1
- 25 Peikon nettisivut, <http://www.peikko.fi/tuotteet/deltabeam/yleista/>, luettu 12.3.2018
- 26 Salo Joonas, 2016 WQ palkin ja pilarin välisen liitoksen mitoitusohjelma, insinöörityö.
- 27 Ruukin nettisivut, <https://www.ruukki.com/fin/b2b/tuotteet/rungot/monikerroksisten-rakennusten-rungot>, luettu 12.3.2018
- 28 Mäkitalo Mikael, 2005, Teräsrakenteiden liitokset, tutkintotyö

- 29 Rak-54.1200 Rakenteiden lujuusoppi, osa 2, luentokalvot
- 30 Jokela Ville, 2016, Teräslitosten mitoitus ja kustannusvertailu, diplomityö
- 31 Järvinen Jarkko, 2015, Prosessilaitteen teräsrakenteen optimointi, Diplomityö
- 32 Anstarin kotisivut, <http://www.anstar.fi/tuotteet/pultit-ja-kengat/>, luettu 9.4.2018
- 33 Helonkuumasinkityksen kotisivut, <http://helonkuumasinkitys.fi/suunnittelu/>, luettu 9.4.2018

Liitokset, joissa käytetään ruuveilla kiinnitettyjä päätylevyjä ja pilarin pohjalevyn kiinnitykset

Palkki-pilariliitokset, joissa käytetään ruuveilla kiinnitettyjä päätylevyjä	Vedettyjen ruuvirivien lukumäärä	Huomioon otettavat jäykkyystekijät k_i
Yksipuoliset liitokset	Yksi	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Vähintään kaksi	$k_1; k_2; k_{eq}$
Kaksipuoliset liitokset – Momentit ovat yhtä suuret ja vastakkaismerkkiset	Yksi	$k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Vähintään kaksi	$k_2; k_{eq}$
Kaksipuoliset liitokset – Momentit ovat eri suuria	Yksi	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Vähintään kaksi	$k_1; k_2; k_{eq}$
Palkkien jatkos, jossa käytetään ruuveilla kiinnitettyjä päätylevyjä	Vedettyjen ruuvirivien lukumäärä	Huomioon otettavat jäykkyystekijät k_i
Kaksipuoliset liitokset – Momentit ovat yhtä suuret ja vastakkaismerkkiset	Yksi	k_5 [vasen puoli]; k_5 [oikea puoli]; k_{10}
	Vähintään kaksi	k_{eq}
Pilarin pohjalevyjen kiinnitykset	Vedettyjen ruuvirivien lukumäärä	Huomioon otettavat jäykkyystekijät k_i
Pilarin pohjalevyjen kiinnitykset	Yksi	$k_{13}; k_{15}; k_{16}$
	Vähintään kaksi	$k_{13}; k_{15}$ ja k_{16} kullekin ruuviriville

Jäykkyysuhde μ lasketaan seuraavista kaavoista:

- kun $M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd}$:
 $\mu = 1$
- kun $2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$:
 $\mu = (1,5 M_{j,Ed} / M_{j,Rd})^\psi$

missä tekijä ψ määritetään taulukosta 6.8.

Taulukko 6.8

Kiinnitystapa	ψ
Hitsauskiinnitykset	2,7
Liitokset, joissa päätylevy kiinnitetään ruuveilla	2,7
Liitokset, joissa käytetään ruuveilla kiinnitettyjä kulmateräksiä	3,1
Pilarin pohjalevyn liitos	2,7