

Tuomo Kähönen

PILARILAATAN MITOITUS

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Tuomo Kähönen
Työn nimi	Pilarilaatan mitoitus
Toimeksiantaja	AFRY Finland Oy
Vuosi	2022
Sivut	40 sivua
Työn ohjaaja(t)	Juha Karvonen, Jani Pitkänen, Juha Nieminen

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli mitoitusmenetelmien sekä niiden tulosten ja käytettävyyden vertailu perinteisen kirjallisuuteen perustuvan käsinlaskennan sekä FEM-laskennan välillä. Työssä tutkittiin pienporapaalujen varaan valettua teräsbetonista massiivilaattaa, jonka tutkimisesta koottu raportti sisältää teoria- ja tutkimusosuuden. Teoriaosuuden lähdeaineistona käytettiin betonirakenteiden suunnittelun oppikirja- sekä ohjemateriaaleja. Tutkimusosuuden menetelmät painottuvat voimasuureiden laskentaan, raudoitteiden mitoitukseen ja laatan lävistystarkasteluun.

Tutkimukseen liittyvässä käsinlaskennassa perehdyttiin voimasuureiden laskentaan sekä betonirakenteiden mitoitukseen standardilla SFS-EN 1992 ja siihen perustuvan kirjallisuuden avulla. Vertailtavana laskentamenetelmänä käytettiin Autodeskin Robot Structural Analysis Professional -nimistä FEM-mallinusoehjelmaa.

Tarkastelussa vertailukohteeksi valittu laatta on geometrialtaan haastava, eikä kirjallisuuden esimerkeistä poiketen laatan kuormituksena ole pelkästään tasainen kuorma, kuten esimerkiksi laatan omapaino. Tarkasteltavan laatan muut kuormat ovat viivamaisia tai pistemäisiä jakautuneena epätasaisesti ympäri laattaa. Tämä tuotti suuria vaikeuksia käsinlaskentaan ja voimasuureiden tarkasteluun tutkimuksen alkuvaiheessa.

Opinnäytetyössä saatujen tulosten perusteella eri menetelmillä lasketut vertailutulokset ovat samankaltaiset tämän kokoisella rakenteella eikä merkittäviä eroja ole, vaikka laatan kuormitus on suuri ja osittain painottuu pitkälle ulokkeelle. Laatan mitoituksessa sen paksuuteen ja raudoittemääriin vaikuttava suurin yksittäinen tekijä on lävistyminen.

Opinnäytetyön tuloksena toimeksiantaja saa tutkimusmateriaalin laaduntarkkailua varten ja näkemyksen nykyaikaisen mitoituksen sekä yhä enemmän historiaan jäävän käsinlaskennan välille. Lopuksi voidaan vielä todeta, että käsinlaskennan taito ja siihen liittyvä teoreettinen osaaminen katsotaan tämän tutkimuksen perusteella olevan tärkeää vaativien kohteiden rakennesuunnittelijalle.

Asiasanat: betonirakenteet, pilarilaatasto, FEM-laskenta, kaistamenetelmä

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Tuomo Kähönen
Thesis title	Design and dimensioning of flat slab
Commissioned by	AFRY Finland Oy
Time	2022
Pages	40 pages
Supervisor	Juha Karvonen, Jani Pitkänen, Juha Nieminen

ABSTRACT

The aim of the thesis was to compare dimensioning methods, their results and usability between traditional literature-based calculations and FEM calculations. In the work, a reinforced concrete slab supported with drilled micropiles, was investigated. The report from the investigation includes a theory and research part. Textbook and instructional materials for the design of concrete structures were used as source material for the theory part. The methods of the research part focus on the calculation of force quantities, dimensioning of rebars and inspection of slab punching.

In the literature-based calculation of the research, calculation of force quantities and the dimensioning of concrete structures using the standard SFS-EN 1992, and the literature based on it became familiar. Autodesk's Robot Structural Analysis Professional FEM modeling program was used as a comparative calculation method.

The slab chosen as a comparison object in the research is challenging in terms of geometry and unlike the examples in the literature, the load on the slab is not simply a uniform load, for example the self-weight of the slab.

Based on the results in the thesis, the comparison results calculated with different methods are similar for a structure of this size and there are no significant differences even, though the load on the slab is high and partly the emphasis is on the long overhang. During dimensioning a slab, the biggest single factor affecting its thickness and the amount of reinforcement is punching.

As a result of the thesis, employer gets research material for quality control and an insight between modern dimensioning and manual calculation, which is increasingly a thing of the past. Finally, it can be stated that, based on this research, the skill of manual calculation and the related theoretical knowledge are considered to be important for the structural engineer of demanding projects.

Keywords: concrete structures, flat slab, FEM-analysis, strip method

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	PILARILAATTA.....	7
2.1	Hillerborgin kaistamenetelmä.....	8
2.1.1	Tukimomentit	8
2.1.2	Leikkausvoiman nollakohdat ja kenttämomentti.....	9
2.1.3	Laatan raudoitus	9
2.2	Myötöviivateoria.....	11
2.3	Laatan lävistyminen	12
2.3.1	Lävistysmitoitus	12
2.3.2	Laatan vahvistaminen	13
3	VERTAILUKOHDE	15
3.1	Rakenteen kuvaus	15
3.2	Kuormat	16
4	PILARILAATASTON RAKENNETARKASTELU	18
4.1	Mitoittavat voimasuureet.....	18
4.1.1	Tukimomentit	19
4.1.2	Leikkausvoimakuvio.....	19
4.2	Laatan raudoitus	20
4.2.1	Kaistojen raudoitus	20
4.2.2	Raudoituksen limituspituudet	20
4.2.3	Laatan reunojen raudoitus	22
4.3	Laatan lävistyminen	23
4.3.1	Lävistyskapasiteetti, Betoninormit.....	23
4.3.2	Lävistyskapasiteetti, Eurokoodi.....	25
5	FEM-LASKENTA	26
5.1	Rakenteen mallinnus	27
5.2	Laatan raudoitus	29

6	VERTAILU	31
6.1	Tulokset	32
6.2	Yhteenveto	34
	LÄHTEET	38

KUVALUETTELO

1 JOHDANTO

Lujuuslaskenta ja rakenteiden mitoitukseen liittyvät tehtävät ovat monille rakennesuunnittelijoille rutiinia, ja on tärkeätä pystyä tarkastamaan laskelmien tarkkuus ja luotettavuus, jonka avuksi rakennesuunnittelijoille tulee jatkuvasti lisää uusia mitoitusohjelmia. Tavanomaisilla laskentamenetelmillä rakenteiden laskenta on kuitenkin monissa tilanteissa haastavaa, eikä rinnakkaisten ohjelmienkaan käyttö aina varmenna tuloksia.

Työssä vertaillaan pilarilaataston mitoitusmenetelmien eroja taivutusmomentin, raudoitusten ja lävistyskapasiteetin osalta tavanomaisemmalla menetelmällä käsinlaskentana ja tietokoneavusteisesti Robot Structural Analysis Professional -ohjelmalla. Tuloksien vertailun lisäksi työn tarkoituksena on vertailla laskentamenetelmien käytettävyyttä, ristiin tarkastelun mahdollisuuksia ja menetelmien ongelmakohtia yleisesti.

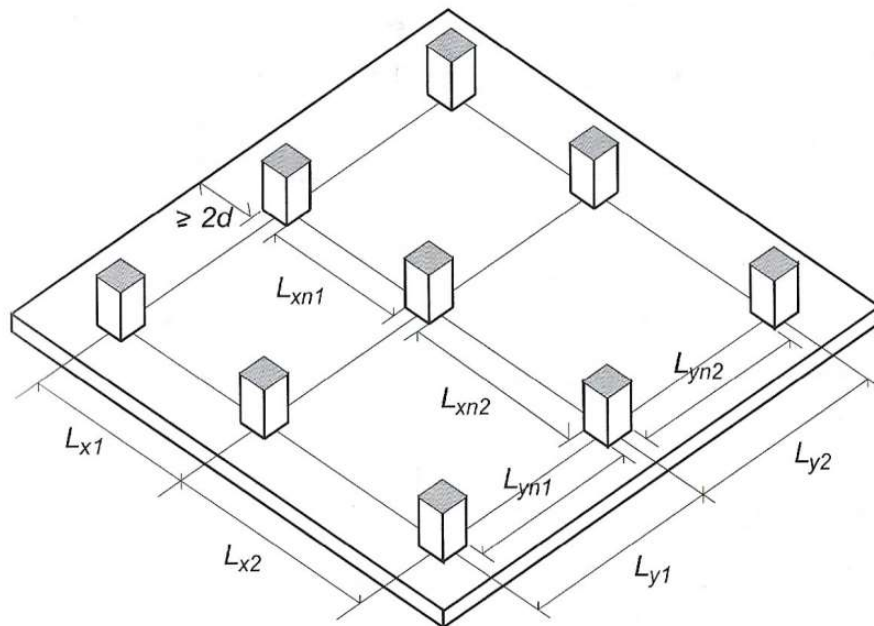
Opinnäytetyön toimeksiantaja on AFRY Finland Oy:n Kotkan toimipiste. AFRY on Pohjoismaiden suurin suunnittelu- ja konsulttipalveluja tarjoava yritys 17 000 työntekijällä maailmanlaajuisesti, Suomessa työskentelee 30 paikkakunnalla noin 2800 työntekijää. AFRY sai alkunsa, kun Ruotsissa perustettu ÅF osti Suomessa perustetun Pöyryn helmikuussa 2019. Yritys tarjoaa laajaa osaamista kuudessa eri divisioonassa, joista prosessiteollisuuteen keskittynyt Kotkan toimipiste tarjoaa mm. putkisto-, automaatio-, hvac-, ja rakennesuunnittelualan osaamista sekä muita palveluja.

Tarkastelun kohteena oleva rakenne on kahden muuntajan perustuksena toimiva laatta, joka on perustettu kuuden pienpaalun varaan. Työssä keskitytään vain laatan tarkasteluun massiivilaattana eikä huomioida paalujen ja muiden ympäröivien rakenteiden mitoitusta tai tarkastelua. Muut rakenteet huomioidaan ainoastaan kuormittavina tekijöinä. Laitteiden ja rakenteiden omapainon lisäksi rakenteeseen ei oleteta vaikuttavan liikkuvaa kuormaa, koska tila on suljettu, eikä muuntajien ympärille mahdu liikennettä merkittävässä määrin. Teoriaosuus käsittelee pilarilaattarakennetta yleisellä tasolla tasaisesti kuormittettuina laattoina.

2 PILARILAATTA

Pilarilaatta on rakenne, jossa umpi- tai arinalaatta tuetaan pilareiden varaan. Laatan pilarijako on edullisempi toteuttaa säännöllisenä, vaikka tämä ei ole runkojärjestelmälle välttämätöntä. Rakenteen sivusiirtymiä estetään leikkausseinien ja vinositeiden avulla, kun pilareiden vaikutus ei yksin riitä. (Leskelä 2005 148, 405.)

Laatan taipumat muodostuvat herkästi rajoittaviksi, ja laatan paksuus tulisi valita riittävän suureksi, jotta taipumarajatila ei tulisi mitoituksessa määrääväksi. Tosin tällä keinolla ei päästä usein edullisimpaan mahdolliseen rakenteeseen. (Leskelä 2005, 149, 405.)



Kuva 1. Pilarilaatan jännevälit ja pilarin suositeltava etäisyys vapaasta reunasta (Leskelä 2005, 149).

Pilarijaon edullisin muoto on neliö. Suorakaiteen mukaisessa pilarijaossa sivusuhteiden tulisi täyttää ehto $0,7 < L_y/L_x \leq 1,5$, missä L_y ja L_x ovat pilareiden välinen etäisyys kuvan 1 mukaisesti. Siinä on kuvattu myös suositeltava vähimmäisetäisyys laatan vapaasta reunasta pilarin reunaan. Suositeltava etäisyys $2d$ perustuu pilareille tuleviin momentteihin. (Leskelä 2005, 149.)

2.1 Hillerborgin kaistamenetelmä

Muiden laskentamenetelmien tapaan laatta jaetaan pilareiden kautta kulkeviin pilarikaistoihin, jotka toimivat jatkuvien palkkien tapaan. Pilarikaistat ovat laatan tukikaistoja ja kantavat suurimman osan kuormasta. Näiden alueiden sisäpuolelle jäävät alueet ovat keskikaistoja. (Leskelä 2005, 149.)

2.1.1 Tukimomentit

Tukimomenttien suositeltavat suuruudet voidaan määrittää kaavoista 1–3. Kaava 1 huomioi vastakkaisen tuen olevan vapaasti tuettu, kaava 2 jäykästi kiinnitetty ja kaavaa 3 käytetään, kun laatta jatkuu vastakkaisen tuen yli. (Leskelä 2005, 150, 151.) Kaavaa 4 voidaan käyttää ulokkeelliselle reunatuella, koska leikkausvoiman pinta-ala on yhtä suuri muuttuvan tukimomentin kanssa.

$$M_T = -\frac{p_d * L_n^2}{10} \quad (1)$$

$$M_T = -\frac{p_d * L_n^2}{16} \quad (2)$$

$$M_T = -\frac{p_d * L_n^2}{14} \quad (3)$$

$$M_T = -\frac{p_d * L_u^2}{2} \quad (4)$$

joissa	M_T	Tukimomentti	[Nm/m]
	p_d	Tasainen kuorma	[N/m ²]
	L_n	Tukien vapaa väli	[m]
	L_u	Ulokkeen pituus	[m]

2.1.2 Leikkausvoiman nollakohdat ja kenttämomentti

Leikkausvoiman nollakohta kentässä voidaan määrittää kaavalla 5 laatassa, joka on tasaisesti kuormitettu ja tukimomentit ovat luvun 2.1.1 mukaiset (Leskelä 2005, 151).

$$x_0 = \frac{L_{xn}}{2} - \frac{m_{1x.Ed} - m_{2x.Ed}}{p_d L_{xn}} \quad (5)$$

jossa	x_0	Leikkausvoiman 0-kohta	[m]
	L_{xn}	Pilareiden vapaa väli	[m]
	$m_{1x.Ed}$	Tukimomentti	[Nm/m]
	$m_{2x.Ed}$	Vastakkaisen tuen tukimomentti	[Nm/m]
	L_{xn}	Pilareiden vapaa väli	[m]
	R	Tukireaktio	[N]

Leikkausvoiman nollakohdissa vaikuttaa taivutusmomentin maksimiarvo pilareiden välillä ja tämä voidaan laskea kaavalla 6 (Leskelä 2005, 151).

$$m_{span.x.Ed} = \frac{1}{2} p_d x_0 \quad (6)$$

jossa	x_0	Leikkausvoiman 0-kohta	[m]
	L_{xn}	Pilareiden vapaa väli	[m]
	R	Tukireaktio	[N]
	$m_{1x.Ed}$	Tukimomentti	[Nm]
	$m_{2x.Ed}$	Vastakkaisen tuen tukimomentti	[Nm]

2.1.3 Laatan raudoitus

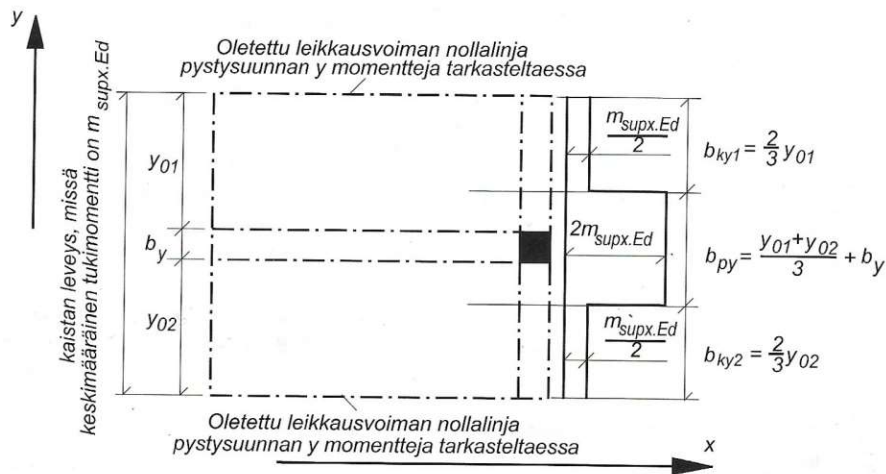
Laattoja koskevat samat vähimmäis- ja enimmäisraudoitussuhteiden ehdot kuin muita raudoitettuja rakenteita. Myös ankkurointi ja raudoitteiden katkaisu voidaan toteuttaa palkkien ohjeiden mukaisesti, kun kuitenkin vähintään puolet raudoitteista viedään tuelle. Eurokoodi 2 mukainen minimi raudoitus lasketaan kaavalla 7 ja tarvittava raudoitus kaavalla 8. (Söderlund ym. 2011, 35, 71, 76).

$$A_{s.min} = 0.026bd \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \quad (7)$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{0.9d * f_{yd}} \quad (8)$$

jossa	$A_{s.min}$	Minimiraudoitus	[m ²]
	b	Poikkileikkauksen leveys	[m]
	f_{ctm}	Betonin keskimääräinen vetolujuus	[Pa]
	f_{yk}	Betoniteräksen ominaismyötölujuus	[Pa]
	M_{Ed}	Taivutusmomentin mitoitusarvo	[Pa]
	f_{yd}	Betoniteräksen myötölujuuden mitoitussarvo	[Pa]

Rauditus jaetaan pilari- ja keskikaistoihin oletettujen leikkausvoiman nollassa kohtien välillä. Laatan yläpinnassa pilarikaistojen pinta-ala on n. 1/3 ja keskikaistojen n. 2/3, kun alapinnassa pinta-alat jakaantuvat likimain puoliksi molemmille kaistoille. (Leskelä 2005, 152.)



Kuva 2. Taivutusmomenttien kokonaisvaikutuskertoimet ja kaistojen jakautuminen laatan yläpinnassa (Leskelä 2005, 152).

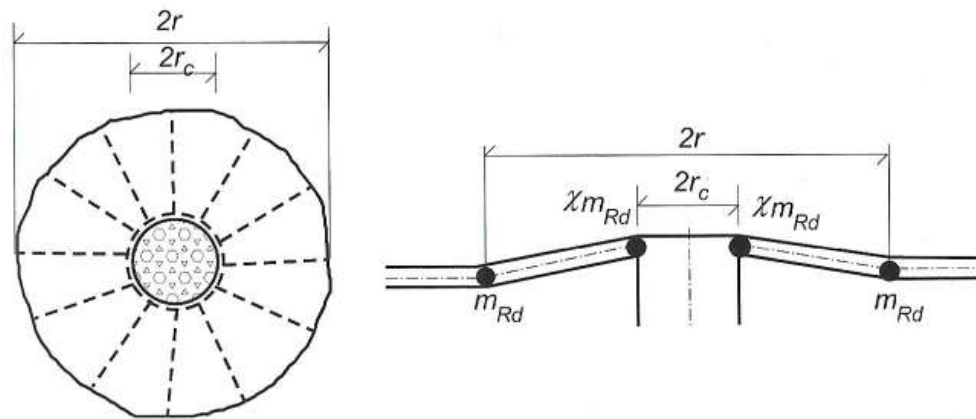
Tukimomentit jaetaan laatan yläpintaan kokonaisarvoksi pilarikaistalle kertoimella 2 ja keskikaistalle kertoimella 1/2, kuten kuvassa 2 on esitetty. Vastavasti kenttämomentit jaetaan kokonaisarvoksi pilarikaistalle kertoimella 4/3 ja keskikaistalle 2/3. (Leskelä 2005, 152, 153.)

2.2 Myötöviivateoria

Pilarilaattojen laskentaan voidaan käyttää myötöviivateoriaa, kuten muidenkin laattojen mitoitukseen. Ilman reunapalkkeja ja laatan ollessa tasaisesti kuormitettu on tutkittava kaksi mekanismia, jotka ovat laskosmekanismi sekä kartiomekanismi. (Leskelä 2005, 155–156.)

Myötöviivateorian oletuksena laatta jakautuu osiin ja osat kiertyvät toistensa suhteen muodostaen mekanismin. Laatoilla on useita mekanismeja, ja määräävä mekanismi muodostuu pienimmällä kuormalla, eli niin sanotulla rajakuormalla. Rajakuorma voidaan laskea asettamalla ulkoisen kuorman tekemä työ ja myötöviivojen momenttien tekemä sisäinen työ yhtä suuriksi (Nykyri 2014, 33.)

Laskosmekanismissa myötöviivat muodostuvat pilarilinjojen suuntaisesti ja suorakaiteen muotoisilla laattakentillä x- ja y-suuntien rajakuormat eivät ole yhtä suuret (Leskelä 2005, 155–156).

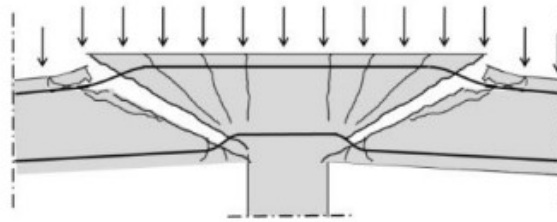


Kuva 3. Pyöreällä pilarilla muodostunut kartiomekanismi (Leskelä 2005, 157)

Viuhkamekanismin kaltainen kartiomekanismi muodostuu pilarin tai pistekuorman kohdilla. Ympyrän muotoisilla pilareilla myötöviiva syntyy etäisyydelle r pilarin keskilinjasta ja muodostaa siten ympyrän muotoisen mekanismin, kuten kuvassa 3 on esitetty. Mekanismin halkaisija on $2r$ (Leskelä 2005, 156–157).

2.3 Laatan lävistyminen

Laatan lävistyminen eli lävistysmurto on paikallinen laatan leikkautuminen, joka on tyypillinen murtotapa laatoilla pilarin juuressa ja suurien pistekuormien läheisyydessä. Lävistysmurtoon vaikuttavat leikkaus- ja taivutusraudoitusmäärät, tuen poikkileikkaus, sekä laatan hoikkuus, joka on laatan paksuuden ja jännemitan suhde.

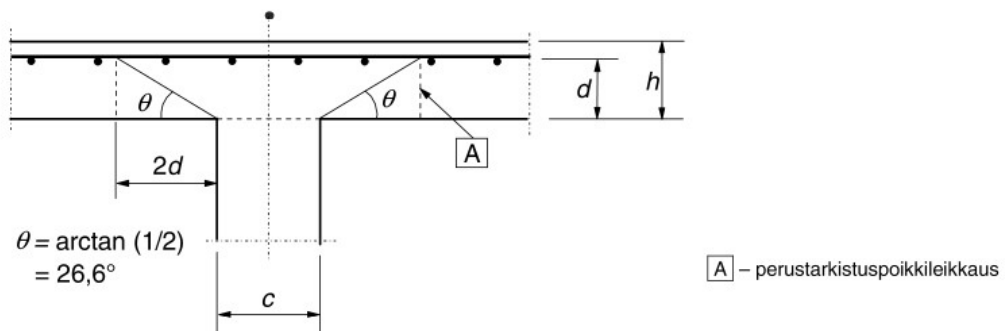


Kuva 4. Lävistysmurtuminen ja taivutushalkeilu (Nykyri. 2014, 65)

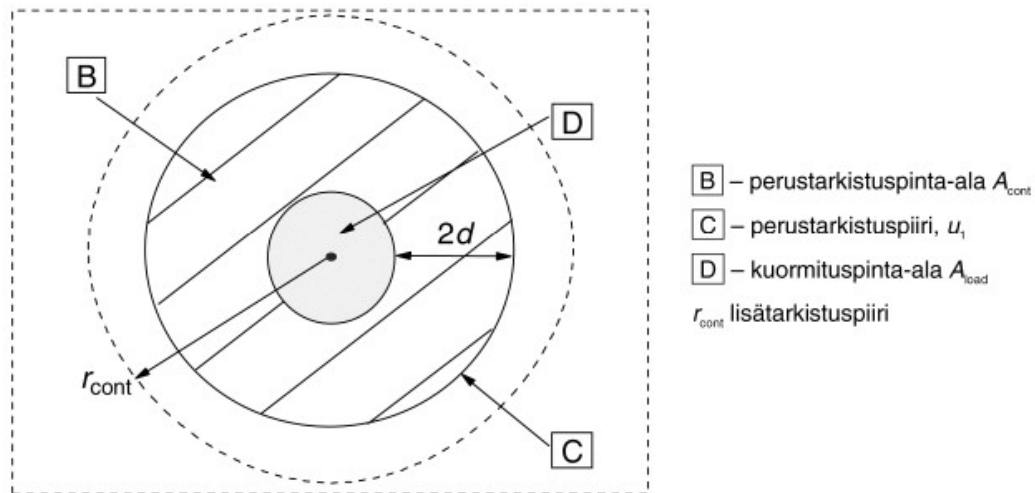
Taivutusraudoituksen vaikutus on pieni, koska raudoitus repeää irti laatasta betoninpeitteen lohkeilun seurauksena. (Nykyri 2014, 64) Murrossa betonin puristettu osa pienenee halkeilun vaikutuksesta (Leskelä 2005, 288). Kuvassa 4 on esitetty lävistysmurtoon yhdistetty taivutushalkeilu.

2.3.1 Lävistysmitoitus

Eurokoodi 2:ssa esitetään laskentamalli leikkausraudoittamattomien ja -raudoitettujen laattojen lävistysmitoitukseen, jota on täydennetty Suomen rakentamismääräyskokoelman betonirakenteiden suunnittelua koskevalla kansallisella liitteellä.



Kuva 5. Perustarkistus poikkileikkaus, pystyleikkaus (SFS-EN 1992-1-1. 2015, 96)



Kuva 6. Lävistyskestävyyden tarkastelumalli ja tarkastuspiirit murtorajatilassa, vaakaleikkaus (SFS-EN 1992-1-1 2015, 96)

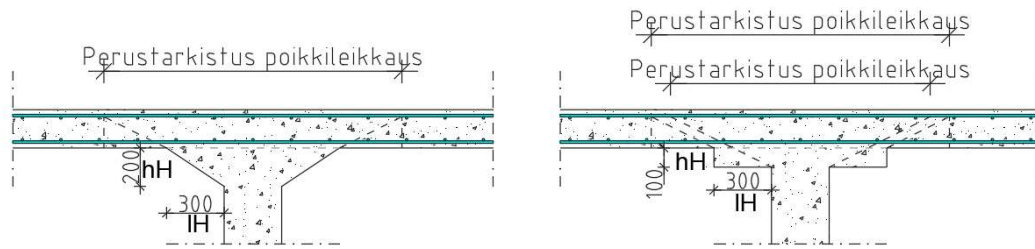
Perustarkistuspiiri sijaitsee $2d$ etäisyydellä pilarin ulkoreunasta ja etäisyytenä d käytetään tehollisten korkeuksien keskiarvoa d_{eff} . Piiri valitaan kiertämään pilari mahdollisimman lyhyenä ja reunojen läheisyydessä sijaitsevat vapaat reunat vähennetään piirin pituudesta. (SFS-EN 1992-1-1 2015, 96). Kuten kuvissa 5 ja 6 on esitetty.

Perustarkistuspiiriin u_1 avulla lasketaan leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskapasiteetti $V_{Rd,c}$, jota verrataan leikkausvoimaan V_{Ed} . Näiden tulee täyttää ehto $V_{Rd,c} \geq V_{Ed}$. (Nykyri 2014, 66.)

Perustarkistuspiiriin mitoituksen lisäksi on tarkistettava, ettei kuormituspiiriin tai pilarin juuren piiriin lävistyslujuuden maksimiarvo ylitä ja täyttää ehdon $V_{Rd,max} \geq V_{Ed}$. (SFS-EN 1992-1-1 2015, 99).

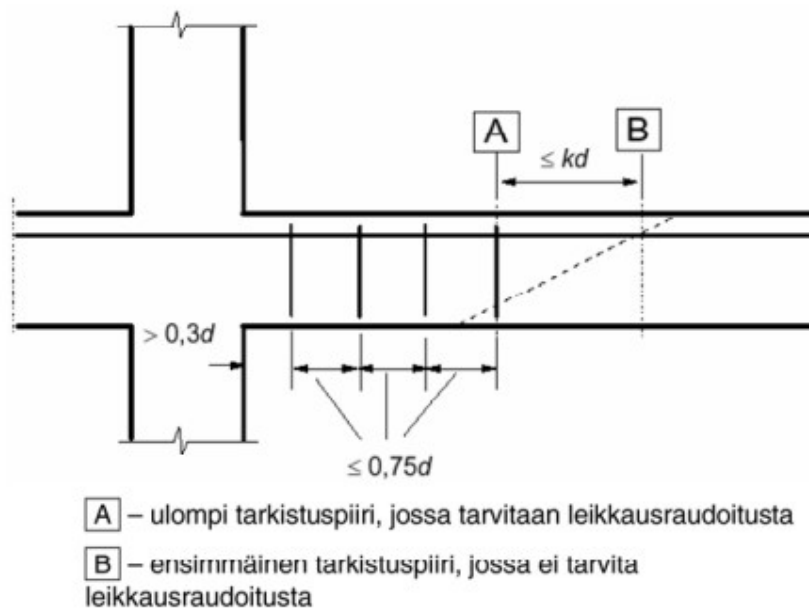
2.3.2 Laatan vahvistaminen

Laatan paksunnoksilla voidaan siirtää ja laajentaa perustarkistuspiiriä kokoa. Kuvan 7 oikeanpuoleinen perustarkistuspiiri tarkistetaan myös pilarin juuressa, koska paksunnoksen leveys-korkeussuhde on $l_h > 2 h_H$, jolloin tehollisena korkeutena voidaan käyttää arvoa d_h pilarin juuren perustarkistuspiirillä. Jos sieni-paksunnoksen kaltevuus on $> 26,6^\circ$, jolloin $l_h < 2 h_H$, lävistymisen tarkastetaan vain vahvistuslaatan ulkopuolisessa piirissä. (SFS-EN 1992-1-1 2015, 98, 99.)



Kuva 7. Vahvistuspaksunnos ja perustarkistuspiirit

Pilarilaatat pyritään suunnittelemaan leikkausraudoittamattomina, mutta tarvittaessa leikkausraudoituksella voidaan lisätä kapasiteettia ja siirtää murtokartiota kauemmas pilarin reunasta. (Nykyri 2014, 65).

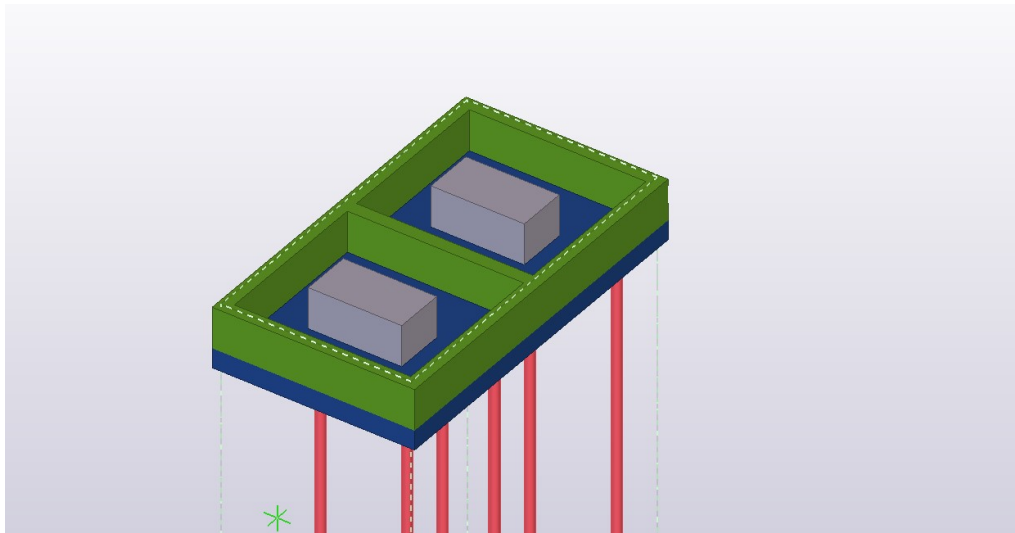


Kuva 8. Lävistysraudoituksen hakajako (SFS-EN 1992-1-1 2015, 159)

Laatoissa lävistyskapasiteettia voidaan korottaa palkkien tapaan leikkausraudoituksella. Leikkausraudoituksena voidaan käyttää kuvassa 8 esitettyjä hakasia, tai vähintään 30° kulmaan ylös taivutettuja teräksiä. Näiden lisäksi on teollisesti valmistettuja tuotteita, joilla voidaan laajentaa tarkistuspiiriä ja lisätä lävistyskestävyyttä. (Leskelä 2005, 302).

3 VERTAILUKOHDE

Vertailtavaksi rakenteeksi on valittu paalulaatta, joka toimii laiteperustuksena kahdelle muuntajalle. Perustuksen mallinnus on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Tekla Structures -ohjelmalla mallinnettu paalulaatta ja laiteperustukset

Vertailukohde on opinnäytetyön tilaajan toteuttama suunnittelutoimeksianto.

3.1 Rakenteen kuvaus

Vertailtava paalulaatta on osa suurempaa laatastoa, jonka vuoksi paalut on sijoitettu suuremman laataston geometrian mukaisesti. Laatasto on tuettu RD220-porapaalujen varaan, joiden paaluhattujen koko on $300 \times 300 \text{ mm}^2$. Paalujen yläpäähän liitoksia tarkastellaan nivelellisinä, koska jäykkäliitos edellyttäisi paalun olevan laatan sisällä vähintään 2 kertaa halkaisijan verran (SSAB 2016, 27).

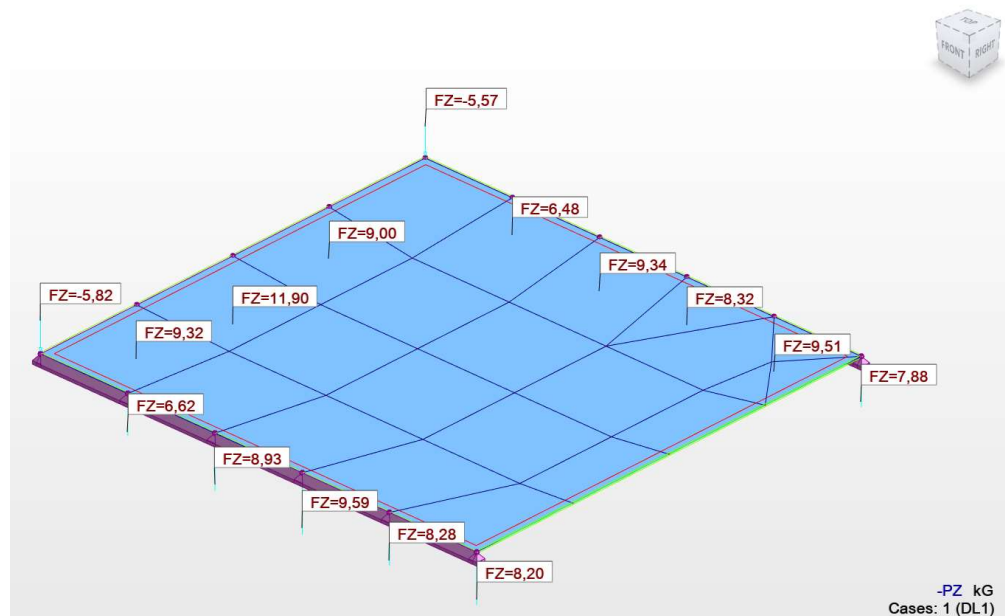
Paalulaatan korkeus on 450 mm ja sen reunoilla on betoniset laiteperustuksiksi suunnitellut seinämäiset tuet, joiden leveys on 300 mm ja korkeus 950 mm. Seinien sisäpuolella on kaksi betonista $2150 \times 1150 \times 950 \text{ mm}^3$ kokoista laiteperustusta.

Paalulaatasta opinnäytetyössä suoritettaviin tarkasteluihin saadut suunnitteluaineistot ovat puutteelliset, joten osa tiedoista on arvioitava vaikutukseltaan

varmemmalle puolelle. Betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo tässä laskelmassa on 500 MPa. Rasitusluokkana on päätetty käytettävän teollisuudessa tyypillistä XD2-luokkaa ja tämän seurauksena ympäristöolosuhteista johtuvan betonipeitteen vähimmäisarvo vaatimus $c_{min,dur} = 35$ mm. Betonin lujuusluokkavaatimus tässä luokassa olisi C35/40, mutta lujuutena käytetään 25 MPa tarkemman tiedon puuttuessa.

3.2 Kuormat

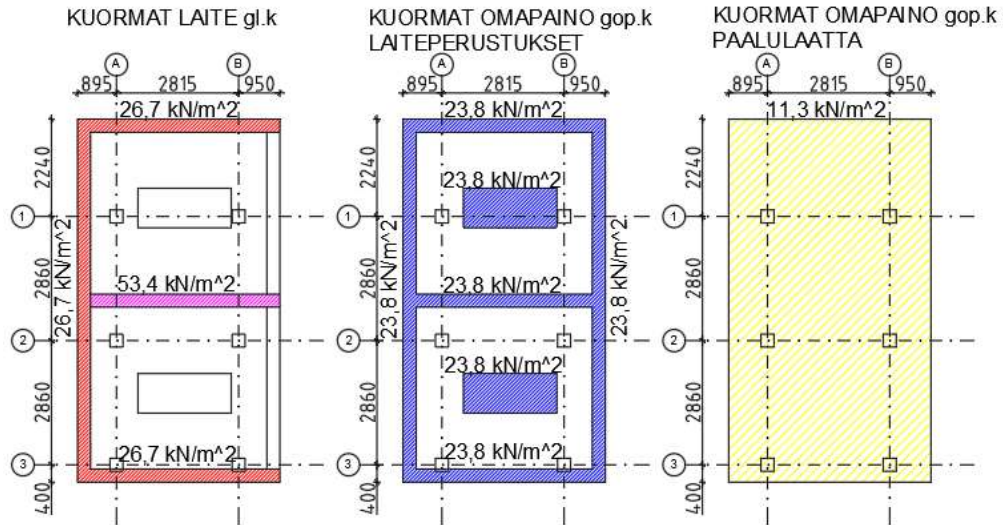
Laatastoa kuormittaa oman painon lisäksi kaksi muuntajaa, joiden käyttöpaino on noin 10 000 kg. Laitteet ovat erillisiä ja laitteiden kuormitus perustuksille siirretään yksiaukkoisen rakenteen ehdoin. Laitteen kuormat jakautuisivat FEM-ohjelmalla laskettuna trapetsimaisesti, kuten kuvassa 10 on esitetty, mutta käsinlaskentaa ja vertailua varten kuormitusta on yksinkertaistettava.



Kuva 10. Muuntajan kuormien jakautuminen trapetsimaisesti solmupisteille metrin välein

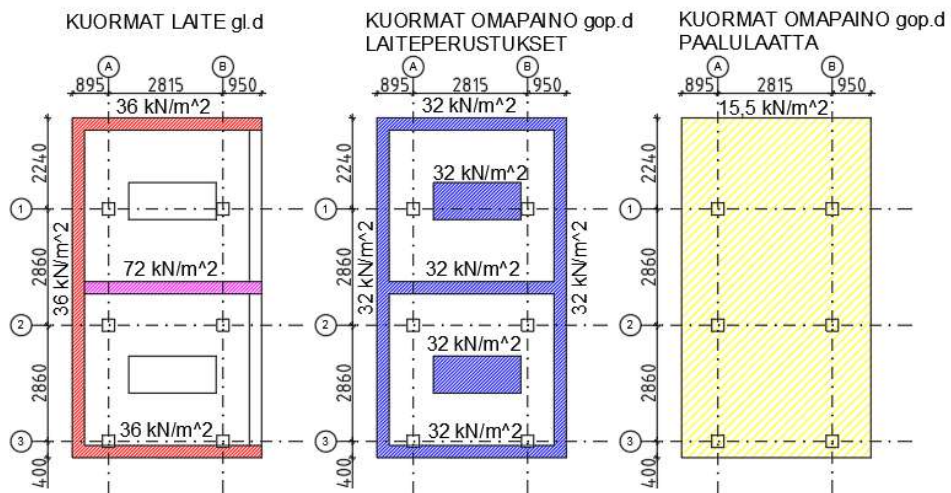
Kaksi 100 kN kuormaa jakautuvat kuvan 11 punaisella värjätuille seinille viivakuormana 8 kN/m ja purppuran väriselle tuelle viivakuormana 16 kN/m. Ra-

kenne on helpompi tarkastella neliökuormana, joten kuormitus jaetaan tuen leveydellä. Kuvan 11 sinisellä rasteroitujen alueiden kuormat ovat laiteperustuksista johtuvia ja keltaisella rasteroitu, paalulaatan oman painon kuorma.



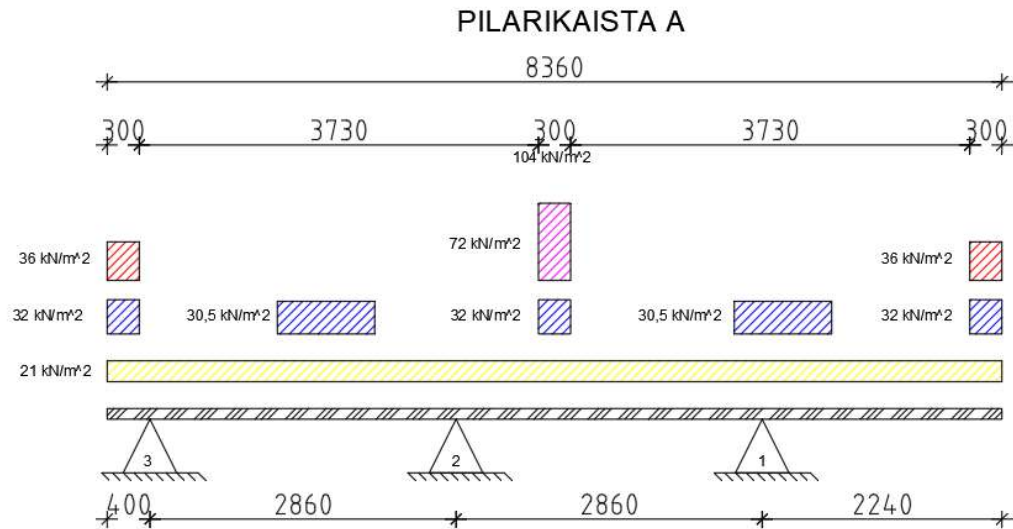
Kuva 11. Kuormien jakautuminen käyttörajatilassa.

Muuntajat täyttävät laatasta kuormittavan pinta-alan täysin ja ainut laataston hyötykuorma voi aiheutua seinistä koostuvan valuma-altaan pohjalta. Valumallas on peitetty teräsritilöillä ja tilan korkeudeksi jää noin 900 mm, jolloin hyötykuorman tarkastelu ei ole tarpeellinen. Kaikki kuormat ovat pysyviä kuormia ja tästä johtuen kuormien osavarmuusluku on 1,35.



Kuva 12. Kuormien jakautuminen murtorajatilassa

Paalulaatta on jaettu paalujaon mukaisiin moduulilinjoin, joissa vaakalinja on numeroitu ja pystylinjat on esitetty aakkosjärjestyksessä.



Kuva 13. Kuormat pilarikaistalla A

Pilarikaistan A kuormitus ja tuenta esitetty kuvassa 13. Kuvien 11 ja 12 mukaisesti keltainen kuvaa laatan omapainoa ja sininen alue muuta omapainoa. Punainen ja purppura kuvaavat laitteilta tulevia kuormia.

4 PILARILAATASTON RAKENNETARKASTELU

Laataston voimasuureiden laskenta on toteutettu momenttimenetelmällä ja muu rakennetarkastelu standardin SFS-EN 1992 mukaisesti sekä betoniyhdistyksen eurokoodiin pohjautuvilla ohjeilla.

4.1 Mitoittavat voimasuureet

Momenttien yksikkö on Nm/m, koska laskennan tavoite on tasaisesti vaikuttavat momentit metrin levyiselle kaistalle ja vasta raudoitemäärien laskennassa huomioidaan momenttihuiput kertoimien avulla. Yksiköt eivät siis kumoa toisiaan matemaattisesti, vaan ne selkeyttävät ajatusta momenttien vaikutuksista.

4.1.1 Tukimomentit

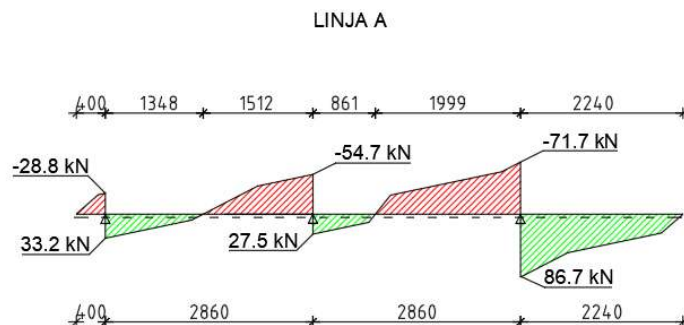
Työssä paalujen vapaan jännevälin sijasta on käytetty paalujen keskikohtien etäisyyttä toisistaan, koska rakenne poikkeaa tavanomaisesta pilarilaatasta ja laatan tehollisen korkeuden kasvattaminen tuen kohdalla on kyseenalaista. Laskelmat poikkeavat kaistamenetelmästä näiltä osin ja momentit on laskettu tuen keskelle, kun taas tavanomaisessa pilarilaatassa tukimomentin arvoksi riittäisi momentti tuen reunalla. Kaavalla 9 voidaan ratkaista tukireaktio keskimmaisella tuella. Reunimmaisten tukien momentit saadaan helpoiten staattisesti määrättyjen rakenteiden peruskaavoilla, koska tuen ulkopuoleisen leikkausvoimakuvion pinta-ala on yhtä suuri tukimomentin kanssa.

$$M_{T2} = \frac{M_{T1} \cdot \beta_{12} + M_{T3} \cdot \beta_{23} - \alpha_{21} + \alpha_{23}}{\alpha_{21} + \alpha_{23}} \quad (9)$$

jossa	$M_{T.i}$	Tukimomentti	[Nm/m]
	$\beta_{i.i}$	Jännevälistä ja jäykkyystä	[-]
		Johtuva kerroin	
	$\alpha_{i.i}$	Kuormitusermi tuen reunoilla	[Nm/m]
	$\alpha_{i.i}^{\circ}$	Jännevälistä ja jäykkyystä	[-]
		Johtuva kerroin	

4.1.2 Leikkausvoimakuvio

Tarkasteltavassa laatussa kuormitus ei ole tasainen koko alalla, joten laskenta aloitetaan ratkaisemalla tukireaktiot reunimmaisilla tuilla hyperstaattisena palkkina, jossa huomioidaan ratkaistu tukimomentti keskituella.



Kuva 14. Leikkausvoimakuvio pilarikaistalla A.

Kuvion ratkaiseminen onnistuu tämän jälkeen graafisesti ja keskituen tukireaktio tiedetään olevan kokonaiskuorman ja reunimmaisten tukireaktioiden erotus. Kenttämomentit voi laskea leikkausvoimakuvion pinta-alojen ja tukimomenttien avulla.

4.2 Laatan raudoitus

Tasapaksuilla pilarilaatoilla kannattaa ratkaista ensin minimiraudoitus ja sen taivutusmomenttikapasiteetti, jota on nopeampi verrata laskennan mitoittaviin momentteihin. Vertailukohteessa vaadittavat raudoite pinta-ala on esitetty luvussa 6.1.

4.2.1 Kaistojen raudoitus

Raudoituksen mitoittava momentti määritetään tasaisesti alueella vaikuttavilla tukimomenteilla laatan yläpinnassa kertoimella 2 pilarikaistalla ja 1/2 keskikaistoilla. Vastaavasti laatan alapinnassa käytetään alueilla tasaisesti vaikuttaville kenttämomenteille kertoimia 4/3 pilarikaistoilla ja 2/3 keskikaistoilla.

Rankasta kuormituksesta huolimatta vertailukohteen jännevälit ovat lyhyet ja laatan korkeus suuri, joten lähes koko laatan alueella määrääväksi raudoitukseksi tulee minimiraudoitus $\sim 524 \text{ mm}^2/\text{m}$. Käytännössä helpoin tapa toteuttaa pääraudoitus tämän kokoisella laatalta on hitsattu harjateräsverkko #T12-200 laatan molemmissa pinnoissa ja paikoittain lisättynä esimerkiksi A-T12-harjaterästangoilla.

4.2.2 Raudoituksen limityspituudet

Limityspituus teräsverkolle on 2 silmäväliä, koska kuvan 15 vähimmäisarvo 350 mm ei voi tulla määrääväksi T12-200 verkolla. Irtotangoille T12-ankkuroinnilta vaadittava perusarvo lasketaan kaavoista 10 ja 11 sekä ankkuroinnin vähimmäisarvo kaavasta 12 (SFS-EN 1992-1-1 2015, 132). Vaihtoehtoisesti mitoituksen perusarvo saadaan yhdistetystä kaavasta 13, kun tangon mitoitusjännityksenä käytetään $\sigma_{sd} = f_{yd}$.

Jakolankojen halkaisija (mm)	Limityspituus
$\phi \leq 6$	≥ 150 mm; vähintään 1 verkon silmäväli limityspituudella
$6 < \phi \leq 8,5$	≥ 250 mm; vähintään 2 verkon silmäväliä
$8,5 < \phi \leq 12$	≥ 350 mm; vähintään 2 verkon silmäväliä

Kuva 15. Teräsverkkojen limityspituudet (SFS-EN 1992-1-1 2015, s.141)

$$l_{b.rqd} = \frac{\phi}{4} * \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \quad (10)$$

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd} \quad (11)$$

$$l_{b.min} = \max(100\text{mm}, 0,3l_{b.rqd}, 10\phi) \quad (12)$$

$$l_{b.rqd} = \frac{\phi * f_{yd}}{4 * 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd}} \quad (13)$$

$$l_{bd} = \max(l_{b.min}, l_{b.rqd}) \quad (14)$$

jossa	$l_{b.rqd}$	ankkuroinnilta vaadittava perusarvo	[m]
	ϕ	harjaterästangon halkaisija	[m]
	σ_{sd}	harjaterästangon mitoitusjännitys	[Pa]
		ankkurointipituuden mittauskohdassa	
	$f_{b.d}$	harjaterästangon tartuntalujuuden mitoitussarvo	[Pa]
	η_1	tartuntaolosuhteista riippuva kerroin	[-]
	η_2	tangon halkaisijasta riippuva kerroin	[-]
	f_{ctd}	betonin vetolujuuden mitoitussarvo	[Pa]
	$l_{b.min}$	ankkurointipituuden vähimmäisarvo	[m]
	f_{yd}	betoniteräksen myötölujuuden mitoitussarvo	[Pa]
	l_{bd}	ankkurointipituuden mitoitussarvo	[m]

Kaava 14 on esitetty yksinkertaistetussa muodossa raudoituksen määrästä johtuen. Ankkurointipituudelle voidaan antaa pienennyskerroimia SFS-EN

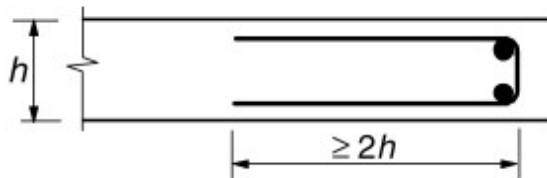
1992-1-1:n taulukosta 8.2. Pienennyskertoimet voidaan lisätä vain, jos kaavan 12 ankkuroinnilta vaadittava vähimmäispituus ei ole määräävä.

Limijatkosten sijoittelu kannattaa tehdä alueelle, jossa ei ole suuria momentteja (Söderlund ym. 2011, 67). Tarkasteltavassa laatassa ankkurointipituus alkaa linjoilla A ja B keskikaistan keskeltä, koska taivutusmomentilla ei ole nollakohtaa tukien 1 ja 2 välillä, kuten kuvasta 23 voidaan havaita. Lisäksi kerroin η_2 on 0,7 laatan yläpinnan raudoitteille olosuhteista johtuen (SFS-EN 1992-1-1 2015, 133).

4.2.3 Laatan reunojen raudoitus

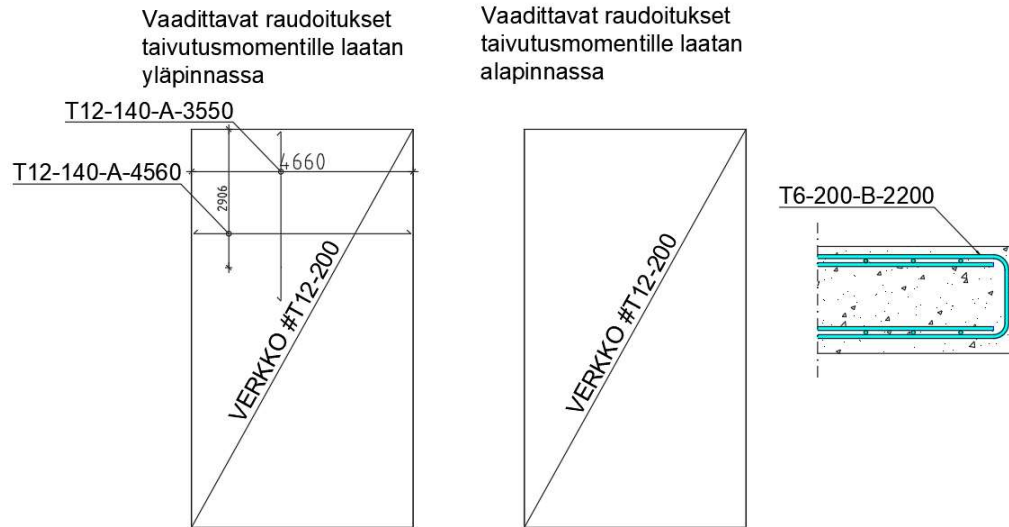
Eurokoodissa 2 kohdassa 9.3.1.3 on määritetty laatan vapaille tukemattomille reunoille pitkittäis- ja poikittaisraudoitus, kuten kuvassa 16 on esitetty.

Laatan reunahakasten teräsmäärä tulee olla 0,25 kertainen alueella vallitsevasta kaistarauoituksesta, kun laatan reunaan kohdistuu kiinnitys. Reunahakasen tulee täyttää ehdot 0,2 kertaa ulokkeen pituus ja $\geq 2h$. (SFS-EN 1992-1-1 2015, 157.)



Kuva 16. Laatan reunaraudoitus (SFS-EN 1992-1-1. 2015, 157)

Tarkasteltavassa laatassa tämän ohjeen käyttö voidaan perustella laatan reunan päällä sijaitsevilla seinämäisillä tuilla, josta aiheutuu ohjeen edellyttämä kiinnitys ja kolmelle sivulle tulee myös laitteen kuorma. Seinämät reunoilla estävät laatan nurkkien nousun ja nurkkiin tarvitaan myös kahdelle sivulle ulottuva nurkkarauoituks. Laatan reunaraudoitus vaaditaan myös alueille, jossa paalutuen reuna on laatan reunasta alle $2d$ etäisyydellä (SFS-EN 1992-1-1 2015, 98, 157.)



Kuva 17. Esimerkki laatussa vaadittavista teräksistä

Edellä mainitun ehdon mukainen raudoitus laatan reunoilla on T6-200-B-2200 ja pilarilinjan 1 reunoilla B-T6-2200-k100. Reunan pituussuuntaisia teräksiä ei tarvita, jos pääraudoitus toteutetaan aikaisemmin mainitulla hitsatulla verkolla, koska reunaraudoituksena hyödynnetään verkon teräksiä.

4.3 Laatan lävistyminen

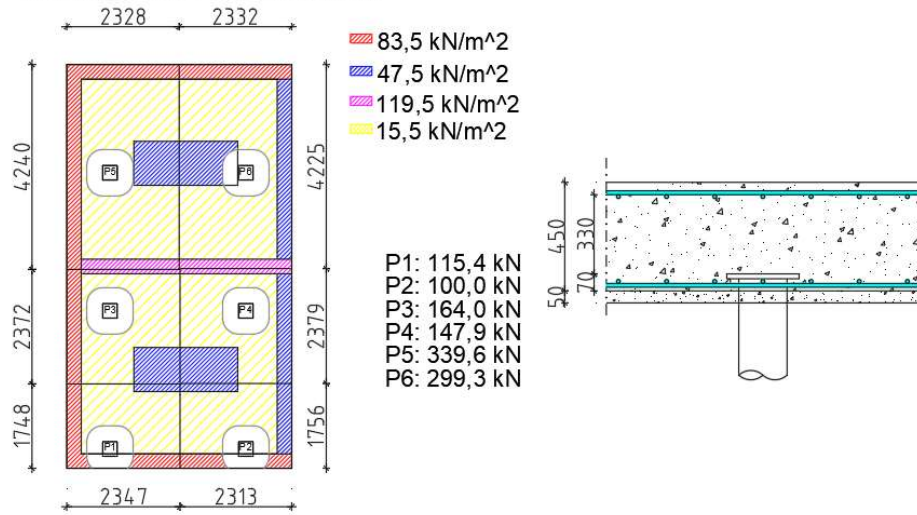
4.3.1 Lävistyskapasiteetti, Betoninormit

Kuten luvussa 4.1 on mainittu, paalujen liitokset laattaan tarkastellaan nivelellisinä, jolloin kaavojen 16 ja 17 parametriksi saadaan $\beta = 0,4$. Laatta jaetaan graafisesti leikkausvoiman 0-kohtien mukaan, ja kuormat lasketaan paaluille näiden alueiden rajaamana. Lävistyskapasiteetti saadaan kaavasta 16, jossa A_u ja u vaikuttavat $0,5d$:n etäisyyden päässä pilarin reunasta. Tuen reunasta d etäisyyden rajaamalta alueelta olevia kuormia ei tarvitse huomioida. (Söderlund ym. 2011, 43,44.) Lävistystarkastelun tulee täyttää ehto kaavan 15 ehto.

$$V_{R,d} \geq V_{E,d} \quad (15)$$

jossa	$V_{R,d}$	Lävistyskapasiteetti	[N]
	$V_{E,d}$	Lävistävä voima	[N]

LEIKKAUSVOIMIEN 0-KOHTIEN RAJAAMAT ALUEET & PAALUILLE TULEVAT KUORMAT



Kuva 18. Paalujen kuormat, leikkausvoiman rajaamalta alueelta 1d etäisyydellä tuesta.

$$V_{Rd} = k \beta (1 + 50\rho) u d f_{ctd} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{0,4}{\frac{(1+1,5e)}{\sqrt{A_u}}} \quad (17)$$

joissa	k	Tehollisesta korkeudesta johtuva kerroin ≥ 1 , kun $\rho_c \geq 2400$	[m]
	d	Tehollinen korkeus	[m]
	ρ_c	Kuivan betonin tiheys	[kg/m ³]
	β	Voiman epäkeskisyydestä johtuva kerroin	[-]
	ρ	Yläpinnan raudoituksen suhde	[-]
	e	lävistysvoiman epäkeskisyyttä leikkautuvan alueen keskipisteestä	
	u	Leikkauksen rajoittama piiri	[m]
	A_u	Leikkauksen rajoittama pinta-ala	[m ²]
	f_{ctd}	Betonin vetolujuuden mitoitusarvo	[Pa]

Betonin vetolujuuden mitoitusarvo $f_{c.t.d} := \frac{0.21 \left(\frac{f_{c.k}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} \cdot \text{MPa} = 1.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

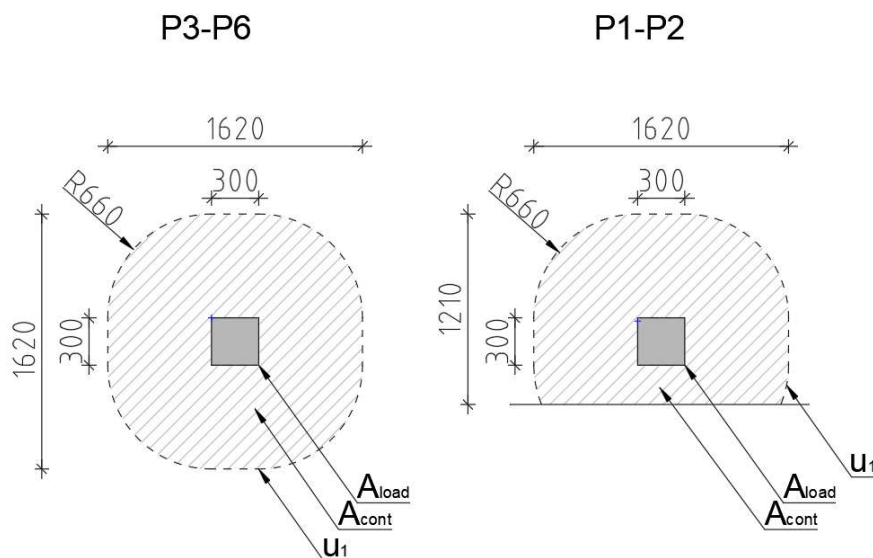
$$\rho := \left(\sqrt{\frac{1005}{1000 \cdot 324} \cdot \frac{1005}{1000 \cdot 336}} \right) = 0.003$$

Lävistyskapasiteetti $V_{Rd,BN} := k \cdot \beta \cdot (1 + 50 \rho) \cdot u \cdot d_{eff} \cdot f_{c.t.d} = 582.68 \text{ kN}$

Yläpuolella on esitetty betoninormien mukainen lävistyskapasiteetin tarkastelu. Kaava $V_{Rd,BN}$ on laatan lävistyskapasiteetti kaikkien tukien kohdalla.

4.3.2 Lävistyskapasiteetti, Eurokoodi

Betoninormien lävistyskuormasta poiketen eurokoodin mukaisessa lävistystarkastelussa kuormaa voidaan pienentää ainoastaan, kun tarkastuspiirin sisäpuolinen kuorma kasvattaa lävistyskapasiteettia, kuten pilarianturoissa tarkastuspiirin sisäpuolinen pohjapaine (SFS-EN 1992-1-1 2015, 96.)



Kuva 19. Eurokoodin mukaiset tarkastuspiirit ja pinta-alat.

Mitoituksessa voidaan käyttää yksinkertaistettuja β :n arvoja, koska rakenteen poikittainen stabiiliteetti ei ole riippuvainen laatan ja paalujen kehävaikutuksesta (Leskelä 2005, 297). Yksinkertaistettujen sääntöjen mukaan seuraavan sivun laskentatuloksissa on käytetty arvoja $\beta_1=1,5$ ja $\beta_2=1,4$.

$u_1 := 3.19 \text{ m}$	Paalut P1 & P2	$V_{Rd,EC2} := \tau_{Rd,c} \cdot \frac{u_1 \cdot d_{eff}}{\beta_1} = 241.01 \text{ kN}$ $V_{Ed,p1} := 144.7 \text{ kN}$ $V_{Ed,p2} := 175.4 \text{ kN}$
$u_1 := 5.35 \text{ m}$	Paalut P3 & P4	$V_{Rd,EC2} := \tau_{Rd,c} \cdot \frac{u_1 \cdot d_{eff}}{\beta_2} = 433.08 \text{ kN}$ $V_{Ed,p3} := 175.4 \text{ kN}$ $V_{Ed,p4} := 159.3 \text{ kN}$
$u_1 := 5.35 \text{ m}$	Paalut P5 & P6	$V_{Rd,EC2} := \tau_{Rd,c} \cdot \frac{u_1 \cdot d_{eff}}{\beta_1} = 404.2 \text{ kN}$ $V_{Ed,p5} := 357.6 \text{ kN}$ $V_{Ed,p6} := 317.3 \text{ kN}$

Yläpuolella esitetyn laskennan mukaisella mitoituksella lävistyskestävyys on riittävä, eikä leikkausraudoitusta tarvita, joten lisäksi joudutaan tarkastamaan vain lävistysten leikkausjännitys paalun juuressa suhteessa lävistyslujuuden maksimiarvoon. Leikkausjännitys tarkastettu laskennassa alapuolella.

$$v := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0.54 \quad \tau_{Ed} := \frac{V_{Ed,p5}}{1200 \text{ mm} \cdot d_{eff}} = 0.9 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Rd,max} := 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} = 3.83 \text{ MPa} \quad \tau_{Ed,max} := \beta_1 \cdot \tau_{Ed} = 1.35 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{Ed,max}}{\tau_{Rd,max}} = 0.35$$

5 FEM-LASKENTA

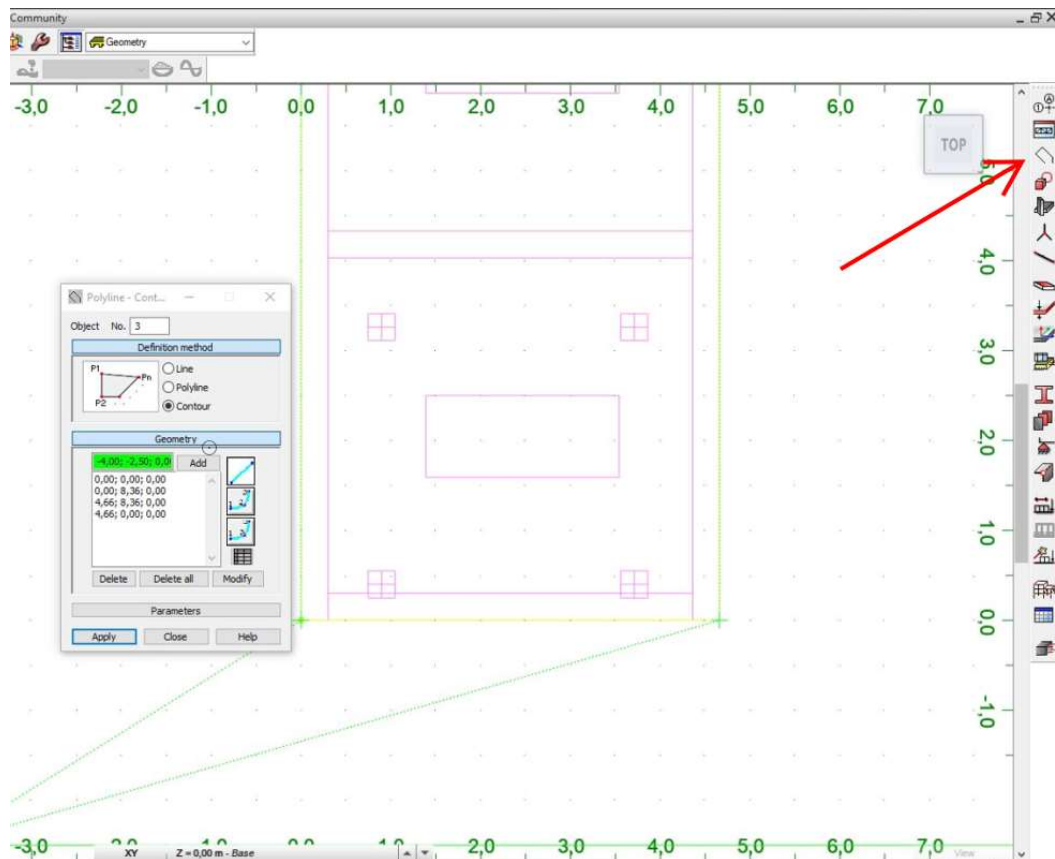
Fem-laskenta on suoritettu Robot Structural Analysis Professional 2021 ohjelmalla ja siitä saaduilla leikkausvoimilla on tarkasteltu laatan lävistymistä Peikko Designer ohjelman avulla. Pilarilaatassa voimien ja raudoitusten redusointi voidaan tehdä tukien päällä, mutta tässä laskennassa redusointia ei huomioida.

5.1 Rakenteen mallinnus

Vertailukohteen FEM-malli on luotu pelkkänä laattana. Seinien ja laitteen vaikutus laattaan on asetettu tasomaisena kuormituksena.

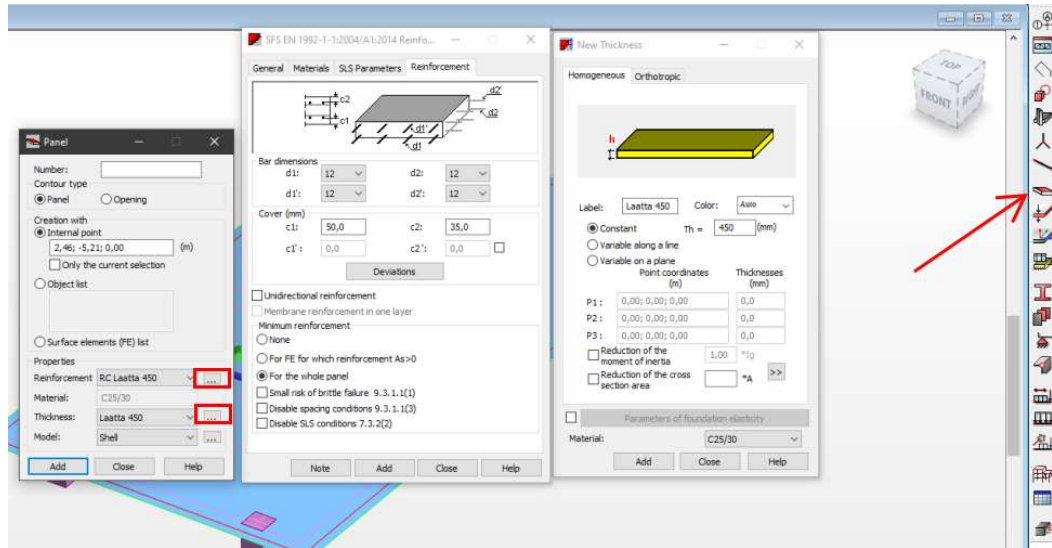
Fem- ohjelmien piirto-ominaisuudet eivät usein ole yhtä hyviä ja helppokäyttöisiä, kuin piirtämiseen tarkoitetuilla ohjelmilla. Geometrian asettaminen voi olla toisinaan matemaattisesti haastavaa ja aikaa vievää, joten mallinnuksen pohjaksi voi tuoda dwg-tiedoston, joka on laadittu esimerkiksi 2D piirto-ohjelmalla. Laatan piirto dwg-pohjalle esitetty kuvassa 20.

Laatan ääriviivojen piirron jälkeen syötetään solmupisteet tarvittaviin kohtiin, kuten tukien ja kiinnitettävien sauvarakenteiden kohdalle. Tukien sijoittaminen tämän jälkeen on tärkeää, jotta laatan verkon määrittelyssä voidaan huomioida tukien päällinen verkotus ilman erillistä vaihetta.



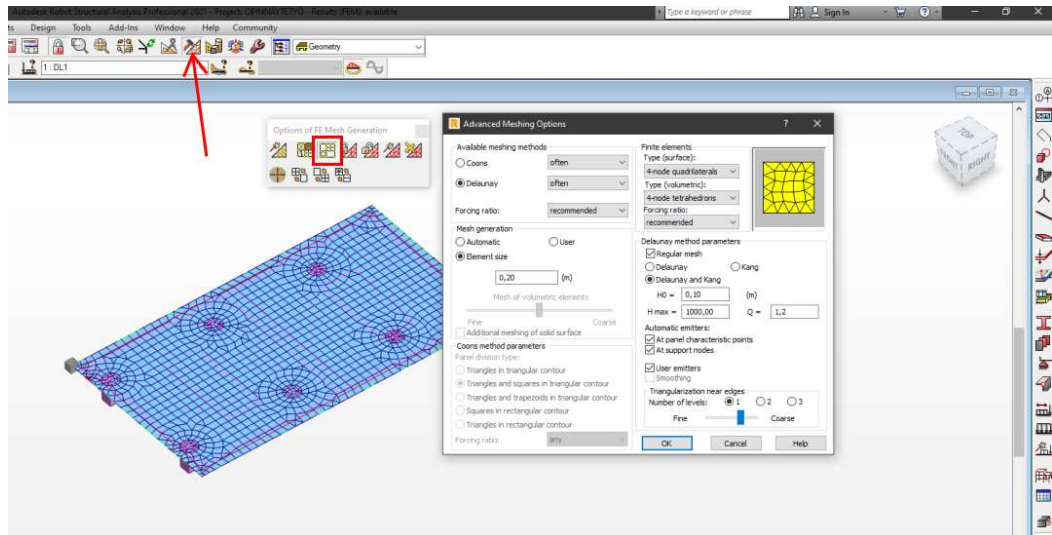
Kuva 20. Laatan ääriviivojen piirto tuodulle dwg-tiedosto pohjalle.

Laatta mallinnetaan paneelina, jolle asetetaan mallinnuksen alussa tietoja, kuten rasisluokat, arvioidut raudoitteet, sallitut taipumat, -halkeilut ja laatan paksuus, kuten kuvassa 21 on esitetty.



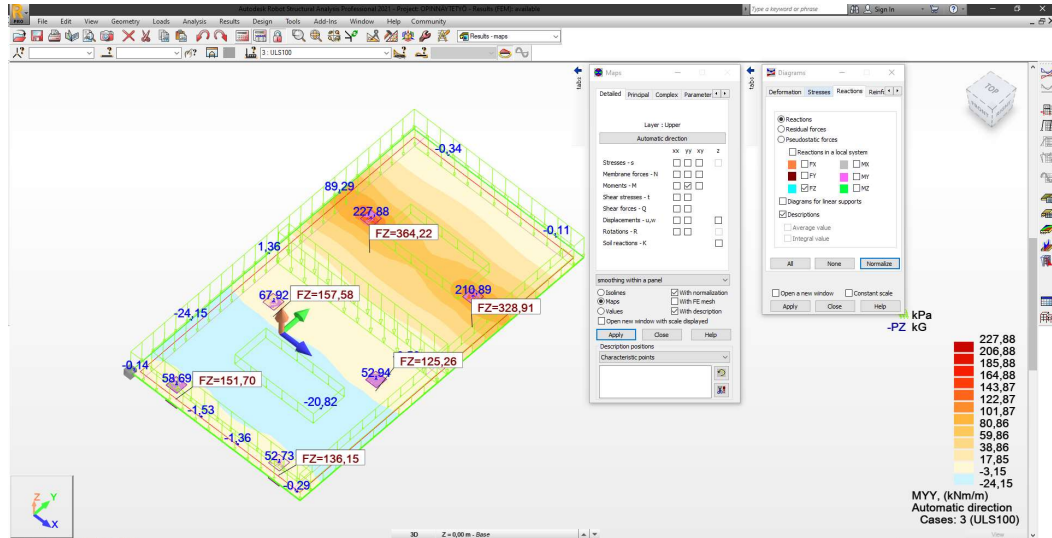
Kuva 21. Laatan tietojen luonti.

Raudoitustietojen arviointi vaikuttaa laatan minimiraudoitukseen ja tämän takia kannattaa rauditus arvioida kokoa pienemmäksi, jotta minimirauditus ei kasvaisi tarpeettoman suureksi, kun taas liian pieni arvio ei vaikuta minimiraudoitukseen. Rauditus määritetään lopullisesti raudituksen suunnitteluvaiheessa.



Kuva 22. Verkon asetukset laatalle.

Kuvan 22 mukainen laatan verkotus asetetaan vastaamaan haluttua tarkkuutta, jonka liioittelu voi tehdä laskennasta todella pitkän tai kaataa ohjelman suuressa mallissa. Tiheä solmupisteverkko vaatii tietokoneelta todella paljon.



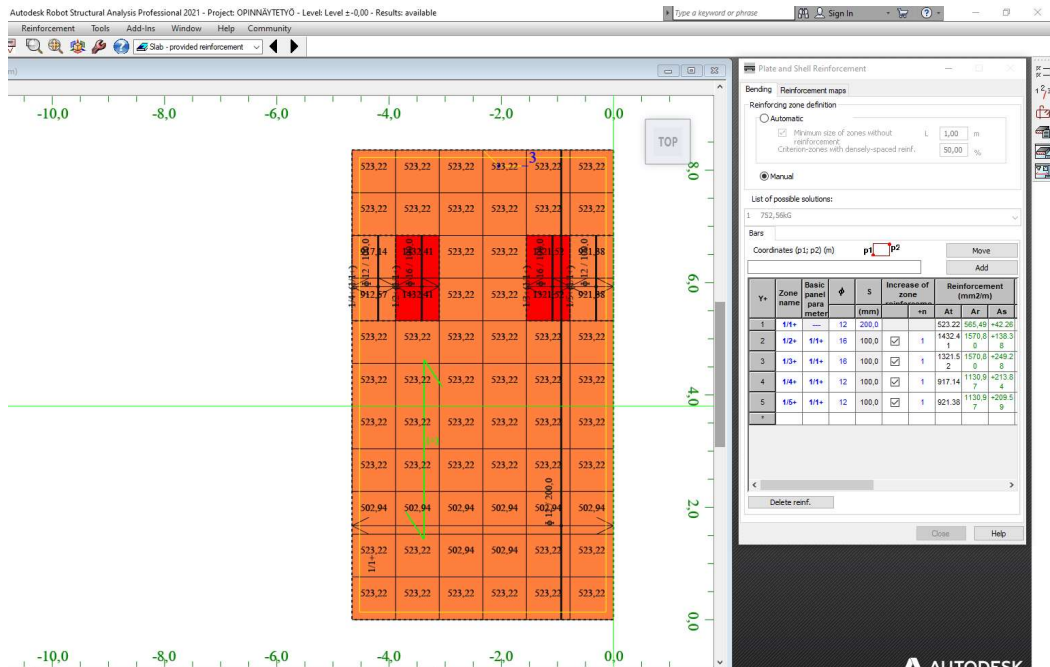
Kuva 23. Taivutusmomentit lokaalin X-akselin suhteen ja tukireaktiot globaalin Z-akselin suunnassa.

Laskennan kannalta on tärkeää ymmärtää laatan voimasuureiden ja koordinaatistojen toiminta. Robotin oletusasetuksilla voimasuureet esitetään laatan lokaalin koordinaatin mukaan. Kuvassa 23 maps-valikon y-y suunnan momentit on esitetty pitkän sivun suunnassa eli lyhyemmän sivun suhteen. Tukireaktiot diagrams valikossa on esitetty globaalin koordinaatiston mukaisesti ilman erillistä valintaa.

5.2 Laatan rauditus

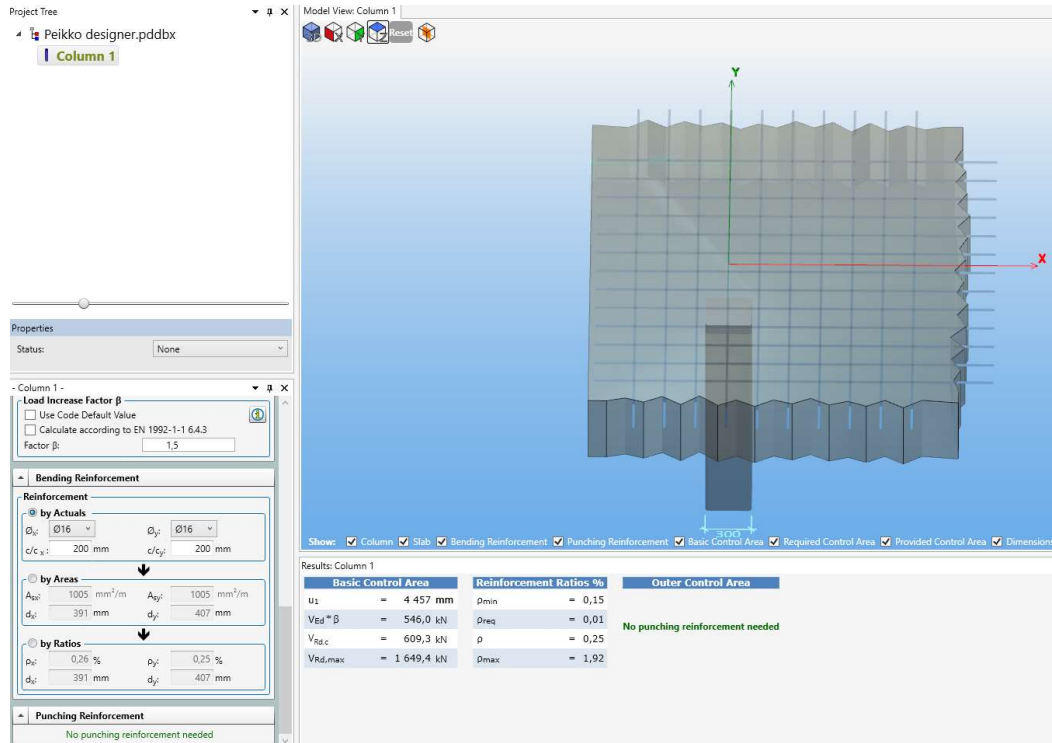
Voimasuureiden perusteella lasketaan tarvittavat raudoitemäärät halutun kokoiselle ruudukolle. Laatan suurimmat teräsmäärät ovat pitkää uloketta kannattavien paalujen kohdalla yläpinnassa, jotka on merkitty kuvassa 24 punaisella. Näillä alueilla tarvitaan lisätankoja kuvan laatan molemmissa suunnissa ja muille alueille riittää laskennan mukaan minirauditus suuruudeltaan $524 \text{ mm}^2/\text{m}$.

Paalulaatassa riittävän raudoituksen voi toteuttaa esimerkiksi kuvan 24 mukaisesti T12-k200 hitsatulla harjateräsverkolla, jonka teräsmäärä on $565 \text{ mm}^2/\text{m}$ ja paikoittain lisättynä T12 tai T16 harjaterästangoilla.



Kuva 24. Alueittain vaadittavat teräkset ja suunnitellut teräkset laatan yläpinnassa pituussuunnassa.

Lävistysmitoituksessa on käytetty kuvan 23 suurinta tukireaktioita ja mitoitus on tehty Peikko Designer ohjelman avulla. Ohjelmassa lävistystarkastelun mallinnus on yksityiskohtaisemmin toteutettavissa, kuin Robotilla.



Kuva 25. Laatan lävistystarkastelu Peikko Designer ohjelmalla.

Kuvan 25 mukainen lävistysmitoitus täyttää ehdon $V_{Ed} \cdot \beta \leq V_{RD,c}$, joten lävistyskapasiteetti on riittävä Peikko designerilla tarkasteltuna eikä lisäraudoitteille ole tarvetta.

6 VERTAILU

Opinnäytetyössä suoritetuissa tarkasteluissa pääasiallinen vertailu on kohdistunut taivutusmomentteihin, raudoite määriin ja lävistysmitoitukseen, joita on vertailtu käsinlaskentana ja FEM-mallinnuksen avulla.

Laatan käsinlaskenta on tarkasteltu palkkimaisina kaistoina Hillerborgin kais-tamenetelmällä. Käsinlaskennassa on käytetty mahdollisuuksien mukaan mekaniikan peruskaavoja sekä momenttimenetelmää taivutusmomenttien ja tuki-reaktioiden laskennassa. Teräsmäärien ja laatan lävistymisen mitoituksessa on käytetty SFS-standardeja ja niihin perustuvaa kirjallisuutta. Lisäksi lävistyskapasiteetti on mitoitettu betoninormien avulla, johon vielä moni kirjallisuuden

ohje viittaa, ennen nykyisten kansallisten liitteiden julkaisua. Laskennan voimasuureiden tulokset on tarkistettu palkkeina FEM-ohjelmalla.

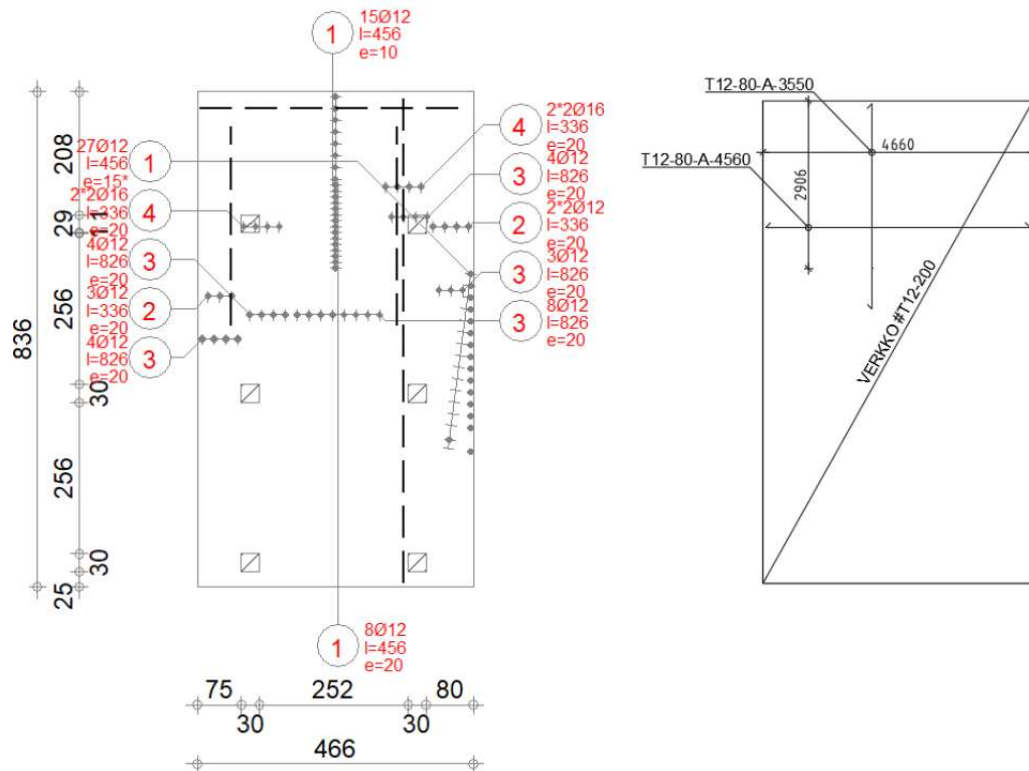
Tietokonelaskenta on suoritettu Robot Structural Analysis Professional 2021 nimisellä FEM-ohjelmalla voimasuureiden ja raudoitusmäärien osalta. Lävistysmitoituksessa on käytetty Peikko Designer laskentaohjelmaa, koska Robot Structural ohjelman soveltuminen paalulaatan lävistyksen ei ole varmuudella tiedossa tapauksissa, joissa paaluhattu ulottuu laatan sisään noin 70 mm verran.

Robot Structural FEM-ohjelman laskennan tulosten luotettavuus on varmennettu toisen laskijan toimesta Dlubal:in RFEM nimisellä FEM-mallinnusohjelmalla ja sen perusteella tulokset vastaavat hyvin työssä esitettyjä arvoja.

6.1 Tulokset

Voimasuureiden tulokset poikkeavat jossain määrin eri laskentamenetelmillä. Käsinlaskennassa laatan toisessa päädyssä sijaitsevan noin 2,1 metrin pituisen ulokkeen kuormat aiheuttavat laatan keskimmäisen tuen tukimomentin lähes nollautumisen ja näiden tukien välinen kenttämomenttikan ei saa positiivisia arvoja vaan yläpinta pysyy vedettynä. Tietokonelaskennassa kenttämomentin arvot täsmäävät käsinlaskentaan, mutta keskimmäisen tuen tukimomentti on suurempi, vaikka momenttimenetelmällä laskettua tukimomentti korotetaan kaistamenetelmässä kertoimella 2.

Taivutusmomenttien eroista huolimatta raudoitemäärät ja sijoittelu täsmäävät hyvin vertailussa. Käsinlaskennalla saatu teräsmäärä on 744 kg ja tietokonelaskennalla 772 kg. Molemmissa laskennoissa laatasta vaadittava teräsmäärä täsmää T12-200 verkon raudoitemäärään suurimmalla osalla laatasta. Tämän lisäksi laatan pitkän ulokkeen läheisyydessä tuella tarvitaan lisäteräksiä laatan yläpinnassa, jotka käsintarkastelussa jakautuisivat tasaisesti laatan leveydelle kuvan 26 mukaisesti. FEM-mallissa teräkset ovat keskittyneet tukien kohdalle ja kentissä raudoitus on vähäisempi. Molemmat vaihtoehdot ovat toimivia.



Kuva 26. Riittävät raudoitteet laatan yläpinnassa eri menetelmillä. Vasemmalla FEM-ohjelman luoma ehdotus ja oikealla käsintarkastelusta piirretty esimerkki.

Lävistyskapasiteettien erot näyttävät aluksi suurilta, jotka johtuvat β -kertoimen sijoituksesta. SFS-standardien ohjeilla kerroin on sijoitettu kapasiteetin jakajaksi ja Peikko designerissa β :n vaikutus on huomioitu kuormitusta lisäävänä.



Paalut P5 & P6

$$V_{Rd,EC2} := \tau_{Rd,c} \cdot \frac{u_1 \cdot d_{eff}}{\beta_1} = 404.2 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,p5} := 357.6 \text{ kN}$$

Kuva 27. Lävistyskapasiteettien erot.

Luvussa 4.3.2 esitetyillä tuilla β :n suuruus on 1,5 molemmissa menetelmissä. Ilman kertoimen vaikutusta kapasiteetit ovat käsinlaskettuna 606,3 kN ja ohjelmalla 609,3 kN. Betoninormeilla laskettu tulos on 582,7 kN, jonka tulos on lähellä SFS-standardeilla laskettua, jos pilari tai paalu sijaitsee laatan keskellä. SFS-standardien mukaisessa mitoituksessa reunassa ja nurkissa sijaitsevilla tuilla käytetään β -kertoimen likiarvoa tai tarkasti laskettua arvoa ja tarkastetussa laatussa kerrointa on käytettävä jokaisella tuella.

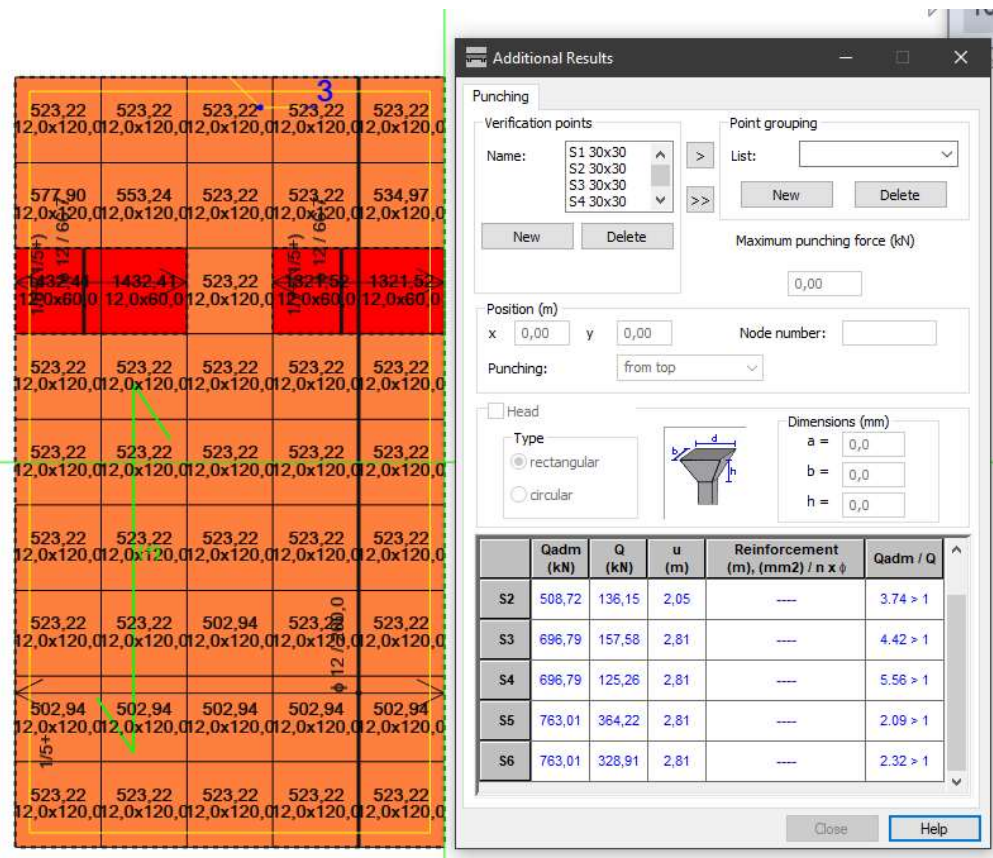
6.2 Yhteenveto

Molemmilla menetelmillä lasketut tulokset vastaavat hyvin toisiaan ja ovat vertailukelpoiset momenttihuippujen sekä raudoittemäärien osalta. Tuloksia eniten jakava tekijä on raudoitteiden sijoittaminen, joka FEM-laskennassa on tarkempaa. Suuremmilla laatoilla erot voivat olla huomattavasti suuremmat ja tietokone mitoitus myös paremmin optimoitavissa.

FEM-laskenta on huomattavasti nopeampaa ja vaatii laskijalta vähemmän teoreettista osaamista, kuin perinteinen käsinlaskenta. Tästä huolimatta mallien

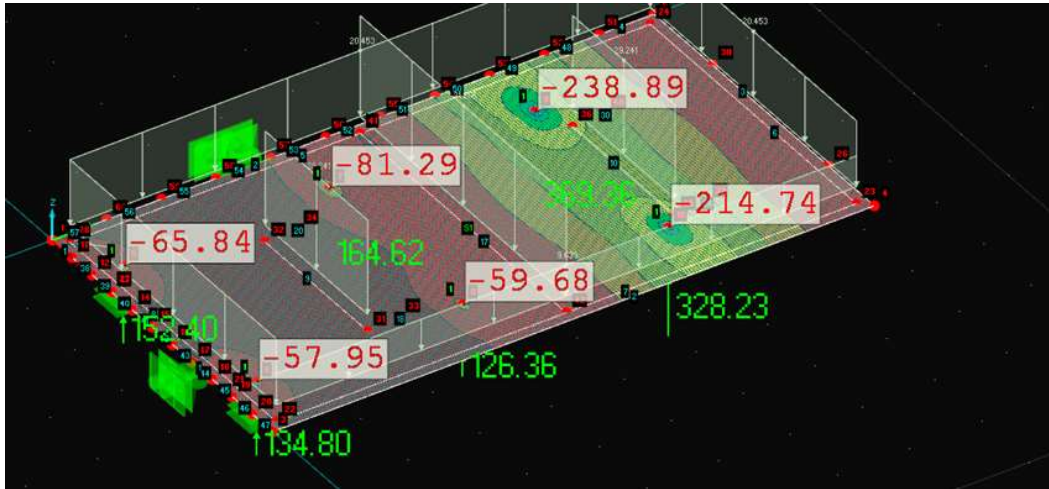
tarkastaminen sekä virheiden löytäminen on todella työlästä ja usein haastavaa, joka voi johtaa työn aloittamiseen alusta. Sen sijaan, jos käsinlaskenta hallitaan, on sen tarkastaminen usein huomattavasti helpompaa ja virheet korjattavissa. Opinnäytetyön laatta on mallinnettu useaan kertaan samalla ohjelmalla ja kertaalleen laskennan tulos on varmistettu Dlubal:n RFEM ohjelmalla, jotta tulokset ovat varmasti luotettavia.

Opinnäytetyössä tarkastettu laatta eroaa tavanomaisista ja siten laskenta poikkeaa kirjallisuuden ohjeista, eikä käsinlaskenta ole ajallisesti tai taloudellisesti järkevä ratkaisu. Kuitenkin FEM-laskenta tarvitsee rinnalleen varmennuskeinoja ja pistotarkastelua, sekä on hyvä ymmärtää rakenteen toimintaa esimerkiksi mekaniikan keinoin. FEM-mallinnuksen työkaluja ei tule ajatella virheetöminä, sillä vaikka laskenta on varmasti kunnossa voi mallissa olla virheitä.



Kuva 28. Esimerkki Fem-laskennan väristä tuloksista. S5 & S6 vastaavat paaluja P5 & P6.

Kuvassa 28 on esimerkkinä esitetty lävistyskapasiteetin tarkastelu, jossa arvot poikkeavat kaikista aikaisemmin esitetyistä menetelmistä todella paljon. Esimerkin mukaiset poikkeamat johtuvat tehollisen korkeuden ja tarkastuspiirin vääristä arvoista, kun ohjelmalla ei ole huomioitu paaluhatun upotusta laattaan 70 mm verran. Varmuus esimerkissä on pienimmillään 2,09, kun se on muilla menetelmillä pienimmillään noin 1,1.



Kuva 29. RFEM-ohjelmalla laaditut varmistustulokset. Momentit laatan lyhyemmän sivun suhteen ja tukireaktiot.

Opinnäytetyössä tarkasteltu laatta on ristiin kantavana kokonaisuudessaan haastava ja etenkin mitoitus käsinlaskentana oli geometrian takia vaikea. Momenttimenetelmän avulla laatasta saatiin luotettavia laskentatuloksia, joilla voitiin huomioida keskituen kulmanmuutos.

Työssä lävistyskapasiteetin laskenta osoittautui epävarmaksi tietyissä tapauksissa ja työtä voisi jatkaa tutkimalla lävistyskapasiteettia eri ohjelmilla ja menetelmillä. Vaikuttaa että Peikko designer huomioi rakentamismääräyskokoelman Suomen kansallisen liitteen vaatimuksen laskelmissaan, ainakin ilman leikkausraudoitusta. Robot FEM-laskenta perustuu SFS-standardien mukaiseen mitoitukseen eikä tässä työssä olla syvennytty lävistysmitoitukseen riittävästi, jotta Robotin lävistyslaskentaa voitaisiin arvioida. Kuvan 28 perustarkistuspiirin mitta muistuttaa enemmän betoninormien tarkastuspiiriin pituutta, vaikka laskenta tähän tuskin kuitenkaan perustuu. Myös Autodeskin foorumeilla monet vastaukset viittaavat ongelmiin laskennalla, eikä työn jatkoa tarvitse rajata laattoihin, vaan se soveltuu myös pilarianturoihin.

Opinnäytetyössä käytetyt mitoitusmenetelmät ovat hyvin opittavissa kirjallisuuden ja ohjeiden avulla vaativiinkin suunnittelukohteisiin. Alalla käytössä olevat ohjelmat ovat luotettavia, mutta niiden käyttöön tulisi panostaa yleisesti enemmän esimerkiksi koulutuksilla. Ohjelmien toimintaperiaatteiden ymmärtäminen on tärkeää arkipäiväisessä käytössä ja tämän ymmärtämistä tulisi korostaa.

LÄHTEET

Nykyri, P. 2014. by 211. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2 2014. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Leskelä, M. 2005. by 210. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2005. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Tikkanen, J., Johansson, K., Kihula, J., Mantila, A., Punkki, J., Paukku, E. & Ruuth, J. 2021. by 65. Betoninormit 2021. Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry.

Söderlund, K., Aaltonen, J., Toivonen, M. & Salminen, M. 2011. RIL 202-2011 Betonirakenteiden suunnitteluohje. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

SFS-EN 1990. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet

SFS-EN 1991-1-1. 2011. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–1 Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat.

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

Ympäristöministeriö. 2019. Suomen Rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Betonirakenteet. Saatavissa: <https://ym.fi/rakentamismaaraykset> [viitattu 27.10.2022]

Autodesk. Robot Structural Analysis Professional, Support and learning. Saatavissa: <https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-professional> [viitattu 27.10.2022]

Autodesk. 2014. Robot Structural Analysis Professional, Verification manual for eurocodes. Saatavissa: [https://download.autodesk.com/us/support/files/robot_structural_analysis_pro_2015_verification_manuals/Verification Manual Eurocodes.pdf](https://download.autodesk.com/us/support/files/robot_structural_analysis_pro_2015_verification_manuals/Verification_Manual_Eurocodes.pdf) [viitattu 27.10.2022]

SSAB. 2016. RR- ja RD- paalut, suunnittelu ja asennusohjeet. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ssab.com/fi-fi/tuotteet/terasluokat/infrastruktuuuri/tuotteet/steel-piles-micropiles> [viitattu 1.10.2022]

KUALUETTELO

Kuva 1. Pilarilaatan jännevälit ja pilarin suositeltava etäisyys vapaasta reunasta (Leskelä 2005, 149).....	7
Kuva 2. Taivutusmomenttien kokonaisvaikutuskertoimet ja kaistojen jakautuminen laatan yläpinnassa (Leskelä 2005, 152).....	10
Kuva 3. Pyöreällä pilarilla muodostunut kartiomekanismi (Leskelä 2005, 157)	11
Kuva 4. Lävistysmurtuminen ja taivutushalkeilu (Nykyri. 2014, 65).....	12
Kuva 5. Perustarkistus poikkileikkaus, pystyleikkaus (SFS-EN 1992-1-1. 2015, 96).....	12
Kuva 6. Lävistyskestävyyden tarkastelumalli ja tarkastuspiirit murtorajatilassa, vaakaleikkaus (SFS-EN 1992-1-1 2015, 96).....	13
Kuva 7. Vahvistuspaksunnos ja perustarkistuspiirit.....	14
Kuva 8. Lävistysraudoituksen hakajako (SFS-EN 1992-1-1 2015, 159).....	14
Kuva 9. Tekla Structures -ohjelmalla mallinnettu paalulaatta ja laiteperustukset	15
Kuva 10. Muuntajan kuormien jakautuminen trapetsimaisesti solmupisteille metrin välein	16
Kuva 11. Kuormien jakautuminen käyttörajatilassa.	17
Kuva 12. Kuormien jakautuminen murtorajatilassa	17
Kuva 13. Kuormat pilarikaistalla A.....	18
Kuva 14. Leikkausvoimakuvio pilarikaistalla A.	19
Kuva 15. Teräsverkkojen limityspituudet (SFS-EN 1992-1-1 2015, s.141).....	21
Kuva 16. Laatan reunaraudoitus (SFS-EN 1992-1-1. 2015, 157).....	22
Kuva 17. Esimerkki laatassa vaadittavista teräksistä	23
Kuva 18. Paalujen kuormat, leikkausvoiman rajaamalla alueelta 1d etäisyydellä tuesta.....	24
Kuva 19. Eurokoodin mukaiset tarkastuspiirit ja pinta-alat.	25
Kuva 20. Laatan ääriiviojen piirto tuodulle dwg-tiedosto pohjalle.....	27
Kuva 21. Laatan tietojen luonti.	28
Kuva 22. Verkon asetukset laatalle.	28
Kuva 23. Taivutusmomentit lokaalin X-akselin suhteen ja tukireaktiot globaalin Z-akselin suunnassa.	29
Kuva 24. Alueittain vaadittavat teräksiset ja suunnitellut teräksiset laatan yläpinnassa pituussuunnassa.....	30

Kuva 25. Laatan lävistystarkastelu Peikko Designer ohjelmalla.	31
Kuva 26. Riittävät raudoitteet laatan yläpinnassa eri menetelmillä. Vasemmalla FEM-ohjelman luoma ehdotus ja oikealla käsintarkastelusta piirretty esimerkki.	33
Kuva 27. Lävistyskapasiteettien erot.	34
Kuva 28. Esimerkki Fem-laskennan vääristä tuloksista. S5 & S6 vastaavat paaluja P5 & P6.	35
Kuva 29. RFEM-ohjelmalla laaditut varmistustulokset. Momentit laatan lyhyemmän sivun suhteen ja tukireaktiot.	36