



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Lauri Alhoke

Paaluperustusrakenteiden suunnittelun kehittäminen

Opinnäytetyö

Kevät 2023

Insinööri (ylempi AMK), Rakentaminen



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (ylempi AMK), Rakentaminen

Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu

Tekijä: Lauri Alhoke

Työn nimi: Paaluperustusrakenteiden suunnittelun kehittäminen

Ohjaaja: Martti Perälä

Vuosi: 2023

Sivumäärä: 83

Liitteiden lukumäärä:0

Tässä opinnäytetyössä pyrittiin tutkimaan ja kehittämään paaluperustusrakenteita, rakennesuunnittelun näkökulmasta. Työn lopputuloksena pyrittiin saamaan rakenteiden suunnittelusta mutkattomampaa ja ajankäytöllisesti tehokkaampaa. Lisäksi tavoitteena oli saada aikaan lopputuloksena yksinkertaisempia perustusrakenteita sekä sitä kautta rakentamisesta mahdollisesti suoraviivaisempaa ja nopeampaa.

Tarkoituksena oli tutkia laajasti käytettyä paaluanturaperustustapaa (PA1...PA6 jaettuna kuormien kohdalle) ja paalulaatta-alapohjaa, jossa hyödynnettiin paksun laatan ominaisuuksia ja paaluja, jotka jaettiin tietyllä jaolla koko rakennuksen alle verkkomaisesti. Opinnäytetyössä tähän viitataan verkkopaalutuksena. Lisäksi sivutuotteena opinnäytetyön toimeksiantajan suunnitteluohjelmien hyödyntäminen mitoitus- ja laskentamenetelminä kehittyivät ja suunnitteluprosessista saatiin siten tehokkaampaa vastaten nykypäivän tarpeita paremmin. Tehokkaampi suunnitteluohjelmistojen hyödyntäminen, yhdistettynä rakenteiden optimointiin, auttaa mahdollisesti vähentämään materiaalimenekkiä ja/tai aikaa ja sitä kautta mahdollistaa edullisemman hinnan kaikille osapuolille. Tie opinnäytetyön tavoitteiden saavuttamiseen kulki perustusrakenteiden yksinkertaistamisen, teräspaaluanturan mitoituksen ja FEM-ohjelmistosta saatavan tiedon hyödyntämisen kautta.

¹ Asiasanat: Perustukset, paaluantura, kantava-alapohja

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Master's Degree Programme in Construction

Specialisation: Structural design

Author: Lauri Alhoke

Title of thesis: Development of structural design of a pile foundation

Supervisor: Martti Perälä

Year: 2023

Number of pages: 83

Number of appendices: 0

In the thesis, the aim was to research and develop foundation structures, so that the construction and the design of the pile structures would be easier, more straightforward and more efficient, in terms of time, material and quality of construction. The target was to study and compare if an ordinary pile slab foundation, with ordinary combined pile groups ("Pile footing 1...pile footing 6" targeted directly under the load) could be replaced with a pile slab where piles were placed evenly in selected measure under the thick slab structure. In addition, as a by-product, the thesis would hopefully result in better structures and design for the client. The purpose was to develop the company's design and calculation methods in such a way that the design process would be more efficient, and better meet today's needs. A more efficient use of design software combined with the optimization of structures would potentially help to reduce material consumption and, -time, and thereby result in a more favourable price for all parties. The by-product of the thesis would be a uniform dimensioning and planning practice for foundation structures for the company. The way to reach this goal was by the simplification of the foundation structures, the design of the steel pile sensor and the effective use and development of FEM-calculation software. Competence in the use of FEM-Design software has developed as well.

¹ Keywords: *Pile foundations, foundations, load-bearing sub-base*

SISÄLLYSLUETTELO

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
Kuvio- ja taulukkoluetelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet	9
1 JOHDANTO	10
1.1 Työn tausta	10
1.2 Tutkimuskysymykset	11
1.3 Työn rakenne	11
1.4 Toimeksiantajan esittely	12
1.5 Tutkimusmenetelmät	12
1.6 Tutkimuskohteet	13
1.7 Tutkittavat asiat tutkimuskohteissa ja kehityskohteet	15
2 TEOREETTINEN VIITEKEHYS	16
2.1 Suunnittelumenetelmät	16
2.2 Eurokoodi	16
2.3 Perustuskuormat	19
2.4 Perustukset yleisesti	22
2.5 Paaluanturaperustus	23
2.6 Paalulaattaperustus	36
2.7 Verkkopaalulaattaperustus	43
3 VERKKOPAALUTETUN LAATAN ALUSTAVA MITOITUS	44
3.1 Paalulaatan paaluvälit	44
3.2 Laattapaksuus	50
3.3 Paalun tukireaktio	55
3.4 Laatan lävistysmitoitus	55

3.5	Laatan taivutusmitoitus.....	61
4	VERKKOPAALUTETUN LAATAN TARKEMPI MITOITUS.....	63
4.1	FEM-laskentamalli ja kuormat.....	63
4.2	Verkkopaalutus tukireaktiot.....	66
4.3	Verkkopaalutetun laatan lävistyskestävyys.....	69
4.4	Verkkopaalutetun laatan taivutusmitoitus.....	72
4.5	Verkkopaalutetun laatan taipuma.....	76
5	TYÖN TULOKSET.....	79
6	JATKOKEHITYSAJATUKSIA.....	82
	LÄHTEET.....	83

Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Tutkimuskohde 1.....	14
Kuvio 2. Tutkimuskohde 2.....	15
Kuvio 3 Tyypilliset ristikkomallin B- ja D- alueet teräsbetonikehärakenteessa (Wallingford Solutions).....	24
Kuvio 4. Paaluanturan ristikkomalli, mitoitus.....	25
Kuvio 5. PA4 alkuperäinen tilanne.....	28
Kuvio 6. Neljän paalun antura lähtötilanne, ei paalusiirtymää.....	30
Kuvio 7. Anturan leikkauskapasiteetti on tarkastettava esimerkiksi paalusiirtymien vuoksi.....	32
Kuvio 8. Paalu siirtynyt 300mm:ä suunnitellusta sijainnistaan.....	33
Kuvio 9. PA4 Huomioitu 300 mm:ä paalusiirtymä ja anturan korotus.....	34
Kuvio 10. Pistekuorman jakaantumisleveys bm.....	36
Kuvio 11. Ristiinkantavan teräsbetonilaatan kuormitusalat.....	39
Kuvio 12. Laattatyyppejä.....	40
Kuvio 13. Pilarilaatta.....	42
Kuvio 14. Koelaskelma 1, tulokset numeerinen.....	51
Kuvio 15. Koelaskelma 1, tulokset graafinen.....	52
Kuvio 16. Koelaskelma 2, tulokset numeerinen.....	53
Kuvio 17 Koelaskelma 2, tulokset graafinen.....	54
Kuvio 18. SKOL B15 laatan lävistys.....	56

Kuvio 19. SKOL B15 laatan lävistys, 150mm:ä laattavahvistus lisätty	58
Kuvio 20. SKOL B15 laatan lävistys, 150mm:ä laattavahvistus lisätty, Vrd,cs.....	60
Kuvio 21. Alapohjalaatan alustava mitoitus momenttikapasiteetti.....	62
Kuvio 22. Tutkimuskohde 2 alapohjan verkkopaalutus	65
Kuvio 23. Tutkimuskohde 1 alapohjan verkkopaalutus.....	66
Kuvio 24. Tutkimuskohde 1, paalulaatta verkkopaalutus, tukireaktiot.....	67
Kuvio 25. Tutkimuskohde 2, paalulaatta verkkopaalutus, tukireaktiot.....	67
Kuvio 26, Tutkimuskohde 1:n tukireaktiot murtorajatilassa	70
Kuvio 27. Laatan lävistyskapasiteetti	71
Kuvio 28. Taivutusmomentti X-suunta tutkimuskohde 2.	72
Kuvio 29. Taivutusmomentti Y-suunta tutkimuskohde 2.	73
Kuvio 30, Taivutusmomentti X-suunta tutkimuskohde 1	74
Kuvio 31. Taivutusmomentti Y-suunta tutkimuskohde 1	75
Kuvio 32. Tutkimuskohde 2 laatan siirtymät.....	77
Kuvio 33. Tutkimuskohde 1 laatan siirtymät.....	78
Taulukko 1. Suuriläpimittaiset teräspalkkipaalut ja kaivinpaalut rakentamistoleranssit RIL254-2-2016 s.183 mukailten.	31
Taulukko 2 RIL PO-2016 taulukko 4.1 mukailten, paalujenväliset etäisyydet.	35
Taulukko 3 by210 s. 150 mukailten kertoimet k_p ja β	76

Kuva 1. Loft-asunto.....20

Käytetyt termit ja lyhenteet

SKOL:ry	Suunnittelu- ja konsulttialan yritysten toimialajärjestö
S_p	Paalujen keskiöväli, paalujen etäisyys keskeltä keskelle mitattuna
a-mitta	a-mitalla tarkoitetaan mitta paalun keskeltä kuormittavan seinän tai pilarin reunaan
NA	NA on kansallinen liite (=National Annex)
NDP	Nationally determined parameter eli kansallisesti käytettävät arvot, joita tulee käyttää suunnittelustandardin mukaisessa mitoituksessa
SLS	Serviceability limit states, käyttörajatila
ULS	Ultimate limit state, murtorajatila
VSS	Väestönsuojatila
SFS ry	Standardisoinnin keskusjärjestö suomessa
SFS	Kansallistunnus (Standardi joka on vahvistettu Suomessa)
EN	Standardien eurooppalainen tunnus
ISO	Merkintä tarkoittaa, että kyseessä on maailmanlaajuisesti vahvistettu standardi.
1992-1-1:2020	Standardin numero ja vuosiluku
Rd/A arvo	Kantokestävyyden mitoitusarvo [kN/m ² :ä]
PupaX5	Insinööritoimisto Pauli Närhen tuottama ja markkinoima 1–9 aukkoisen palkin mitoitusohjelma.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Paaluperusrakenteet ja niiden suunnittelu ovat ajansaatossa pysyneet melko samankaltaisina, mutta muutoksia ja kehitystäkin on tapahtunut. Edellinen suuri muutos paaluperusrakenteiden suunnitteluun tapahtui siirryttäessä ylikansallisen eurokoodin suunnitteluohjeistukseen. Eurokoodien mukaiseen mitoittamiseen siirryttiin virallisesti syksyllä 2007. Nykyisessä mitoitusmenetelmässä ei riitä tavanomainen taivutukseen ja leikkausvoimaan sekä betonin puristustarkasteluun perustuva mitoitus, vaan on tutkittava muun muassa lisäksi paalun päälle muodostuva solmuvoimatasapaino. Paalun päälle muodostuvassa solmussa esiintyvä jännitystila voi muodostua määrääväksi tekijäksi paaluanturan mitoituksessa ja vaikuttaa merkittävästi anturan kokoon ja käytettävään terästytykseen sekä betonin lujuuteen. Solmuvoima tulee määrääväksi ainakin, mikäli käytetään kapasiteetiltaan suuria teräs- tai betonipaaluja. Esimerkkinä voidaan mainita tässäkin opinnäytetyössä mainittu 1550 kN:a kantava teräspaalu, jonka päälle muodostuu huomattavia jännityksiä johtuen pinta-aloista, jotka siirtävät kuormituksia.

Perusrakenteiden suunnittelussa aiemmin laajasti ja jopa ainoana menetelmänä käytetty, kuormien käsinlaskenta on jäänyt taka-alalle suunnitteluohjelmien kehittyessä ja tietokoneiden laskentatehon kasvaessa sekä tarpeiden kehittyessä. Nykypäivänä laskentaohjelmista saatavaa tietoa voidaan hyödyntää suoraan perusrakenteiden ja muiden rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa. Paaluanturan mitoitus tapahtuu edelleen yleisesti Excel-laskentapohjia, kuten suunnittelu- ja konsultointialan yritysten toimialajärjestö SKOLin kehittämien paaluantura-laskentapohjia, hyväksi käyttäen tai harvinaisemmin käsin laskentana.

Nykypäivän vaatimukset aikataulujen suhteen ovat kiristyneet ja suunnittelu-aikaa on vähän, jos ollenkaan. Rakentamisprosessissa ensimmäisenä vaiheena on aina pohjarakenteet ja rakennuksen perustaminen, joten perustussuunnitelmat on valmistettava mahdollisimman pian, kun rakentamispäätös on tehty ja rakentaminen alkaa. Monesti toimitaan niin, että rakentaminen aloitetaan jo valmistelevilla töillä, ennen kun rakennuslupaa on myönnetty. Valmistelevat työt sisältävät kaivu-, täyttö-, salaojitus- ja myös paalutustöitä. Tässä opinnäytetyössä pyritään selvittämään, voitaisiinko perustukset toteuttaa pelkästään paksulla

verkkomaisesti paalutetulla laattaperustuksella. Arvion mukaan tämä voisi olla ratkaisu moneenkin asiaan, joita opinnäytetyössä tullaan sivuamaan. Aiheeseen pureudutaan rakennesuunnittelijan näkökulmasta. Kustannuspuolta sivutaan ainoastaan sellaisella laajuudella, joka antaa esimerkiksi määrällisesti peruskuvaa rakentamisvaiheen kustannuksista ja sitä kautta työmäärästä. Perusolettamus voisi olla, että mitä enemmän materiaalia kuluu, sitä enemmän kuluu myös työtunteja toteutusvaiheessa. Näin asiaa pystytään hieman haarukoimaan kustannusvaikutuksia pohdittaessa.

1.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimussuunnitelmassa esitettiin aiheesta seuraavanlaisia tutkimuskysymyksiä. Ensimmäinen kysymys: voidaanko paaluperustukset toteuttaa paksulla paalulaatalla, jossa kuormat voivat sijaita mielivaltaisessa kohdassa paalun sijaintiin nähden? Toinen kysymys: mitkä menetelmät johtavat tilaajan ja suunnittelijan kannalta kaikki vaatimukset täyttävään lopputulokseen vaativalla aikataululla (paaluanturaperustus vs. paalulaatta)? Kolmas kysymys: voidaanko perustusrakenteita optimoida tarkemmin? Neljäs kysymys: mitä perustus suunnittelussa voitaisiin automatisoida (laskentapohjat ja menetelmät)? Edellä esitettyihin kysymyksiin pyritään saamaan vastaus tässä opinnäytetyössä.

1.3 Työn rakenne

Opinnäytetyön aluksi avataan työn taustaa. Työllä on toimeksiantaja, jonka esittely tulee taustoituksen jälkeen. Toimeksiantajan esittelyn jälkeen katsastus tutkimusmenetelmään ja tutkimuksessa käytettäviin kohteisiin. Tämän jälkeen syvennetään asioita detaljitasolle ja käydään läpi tutkimuksessa tutkittavia asioita ja kehityskohteita. Työssä esitellään ja käydään läpi seuraavana laskentakohteiden teoriaa ja periaatteita. Kun laskentateoriaa on käyty läpi tarvittavilta osin, siirrytään tutkimukseen ja lopulta esitellään kiteytetysti tutkimuksen johtopäätökset ja jatkokehityskohteet.

1.4 Toimeksiantajan esittely

Tutkimus- ja kehittämistyö tehdään Contria Oy -nimiselle yritykselle. Contria Oy:n päätoimiala on rakennesuunnittelu. Referenssejä on kertynyt sairaala- ja koulurakennuksista aina moninaisiin korkeamman tason kerrostaloprojekteihin, joita tämän opinnäytetyn tekijä on muun muassa ollut suunnittelemassa yhteensä noin 14 vuotta kaiken kaikkiaan. Kohteita on ollut esimerkiksi Turun Telakkarannassa ja Naantalin merenrantakaava-alueilla sekä viimeisimmät kohteet Tampereen Ranta-Tampellassa (Contria). Contria Oy:n juuret johtavat 50 vuoden taakse silloiseen Timo Teppo Oy:hyn. Nykyisin yritys tunnetaan nimellä Contria Oy. Yritys kuuluu tekniseen konsultointiin ja suunnitteluun erikoistuneiden yritysten muodostamaan Solwers-konserniin. Konserniin kuuluu myös Finnmap Oy ja Solwers Groupiin kuuluu noin 23 yhtiötä, joissa on noin 600 työntekijää (Solwers, i.a.). Contria Oy:ssä on noin 25 työntekijää ja henkilöstön jäsentä (Contria, i.a.). Contria Oy oli aikanaan suuntautunut enemmän teräsrakenteiden osaamisalueelle, mutta sittemmin sukupolvien vaihtuessa ja alan kehittyessä on siirrytty moninaisempiin projekteihin. Mallinnus ja 3D-mitointiohjelmistoja on alettu hyödyntämään aikaan kuuluvalla tavalla kerrostalojen ja muiden rakennusten mitoitustyössä.

1.5 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelminä käytetään vertailevaa analyysiä. Vertailevassa analyysissä verrataan rakenteeseen kohdistuvia kuormituksia rakenteen kapasiteetteihin. Lisäksi tutkitaan mitoitushjelman tuloksia, josta voidaan mahdollisesti tehdä tarvittava johtopäätös selvittävään asiaan.

Materiaalimäärävertailussa tarkkaillaan laskentakohteiden paalukappalemääriä, tarvittavia teräsmääriä tai paalulaatan paksuutta, joista voidaan päätellä rakennuksen perustamiseen kuluva betonimassan määrää ja teräsmääriä.

Tutkimuksessa hyödynnetään SKOLn Excel -käsineläskentämitoituspohjia SKOL B20 neljän paalun laskentapohja v1.5.2 (SKOL B20, 2016) ja Strusoft 2022 v.22.00.001 FEM-Design 3D-mitointiohjelmistoa (FEM-Design, 2021) ja muita mahdollisia ohjelmistoja tarpeen mukaan. Excel-pohjilla tutkitaan paaluanturan kokoja ja teräsmäärää, josta voidaan tehdä vertailevia havaintoja.

Strusoft FEM-laskentaohjelmalla tutkitaan tyypillisimpiä asioita suunnittelun näkökulmasta. Tutkittavia asioita ovat esimerkiksi paalulaatan momentit, leikkausvoimat ja tukireaktiot sekä muut tarvittavat asiat. Tukireaktioiden tutkiminen on tärkeää siksi, että paalulaatan paksuudelle ja verkkomaisesti toteutetulle paaluperustukselle saadaan tutkimustietoa. Analysoimalla laskentamallin antamia tietoja, saadaan mahdollisesti selvyys rakenteen toimivuudesta ja hyödynnettävyydestä.

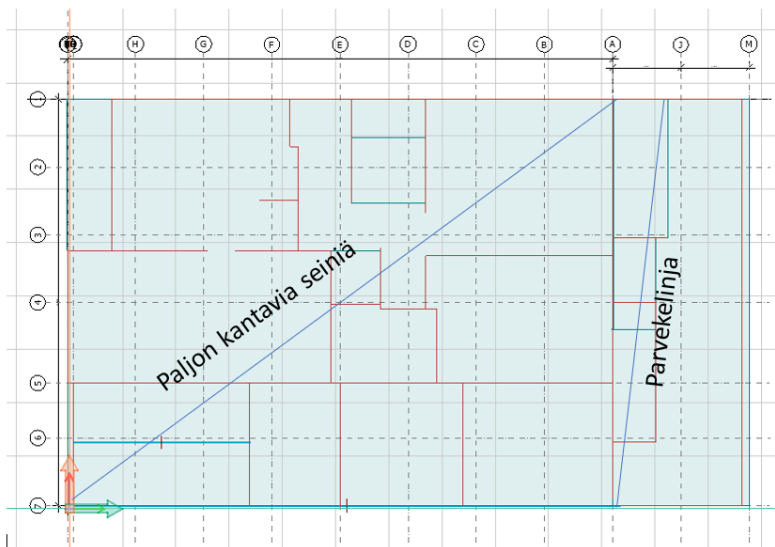
1.6 Tutkimuskohteet

Tutkimuskohteita on kaksi kappaletta, jotka esitellään myöhemmin. Asioiden havainnoimiseksi valittiin hieman erityyppiset ja muotoiset rakennukset, jotta saatiin varmuus tutkimustulosten oikeellisuudesta. Lisäksi voidaan sivuta myös muunlaisia kohteita, kuten laajarakkoisia rakennuksia, mikäli se nähdään tarpeelliseksi asioiden valottamiseksi. Kohderakennuksista ei ole lisätty kuvia tai tarkkoja suunnitelmia opinnäytetyöhön yksityisyyden vuoksi. Kohteet mukailevat todellisia kohteita pienin muutoksin. Tarkkojen suunnitelmien ja kuvien esittäminen opinnäytetyössä on kokonaisuuden ja tutkimustulosten kannalta epäoleellista. Kohteista annetaan sanallisesti ja numeraalisesti kuvaus, josta voidaan päätellä kohteiden mukailevan todellisten rakennusten mittasuhteita ja antavan hyvän pohjan tutkimukselle. Alapohjan muodosta ja annetuista mittatiedoista voidaan päätellä alapohjalaatan päällä olevien rakennusten olevan varsin erimalliset ja -kokoiset. Oleellista on tutkimuksen kannalta, miten ja mihin kuormat kertyvät alapohjalaatan tasossa. Tilanteet vaihtuvat joka tapauksessa suunnittelukohteittain, ja äärimmäisen monipuolista sekä kaiken kattavaa tutkielmaa olisi miltei mahdotonta tehdä opinnäytetyötasolla siihen käytettävän ajan ja resurssien puitteissa.

Tutkimuskohde 1

Tutkimuskohde 1 on yhdeksänkerroksinen asuinkerrostalo, jonka alapohjalaatan mitat ovat 20,5 m x 15,26 m. Rakennuksen pohjakerros sisältää kiinteistön pesu-, varasto- ja huoltotiloja. Kellarissa on kantavia seiniä melko tiheästi verrattuna tutkimuskohteen 2 pysäköintihallitilojen avaramaisuuteen. Tutkimuskohteen 1 kantavat seinät ja pilasterit lähtevät alapohjalaatan yläpinnasta ja tukeutuvat laatan ja laattavahvistuksien kautta paaluihin. Kuviossa 1 esitellään tutkimuskohde 1:n pohjapiirustus. Kuviossa ruskeat viivat ovat kantavia

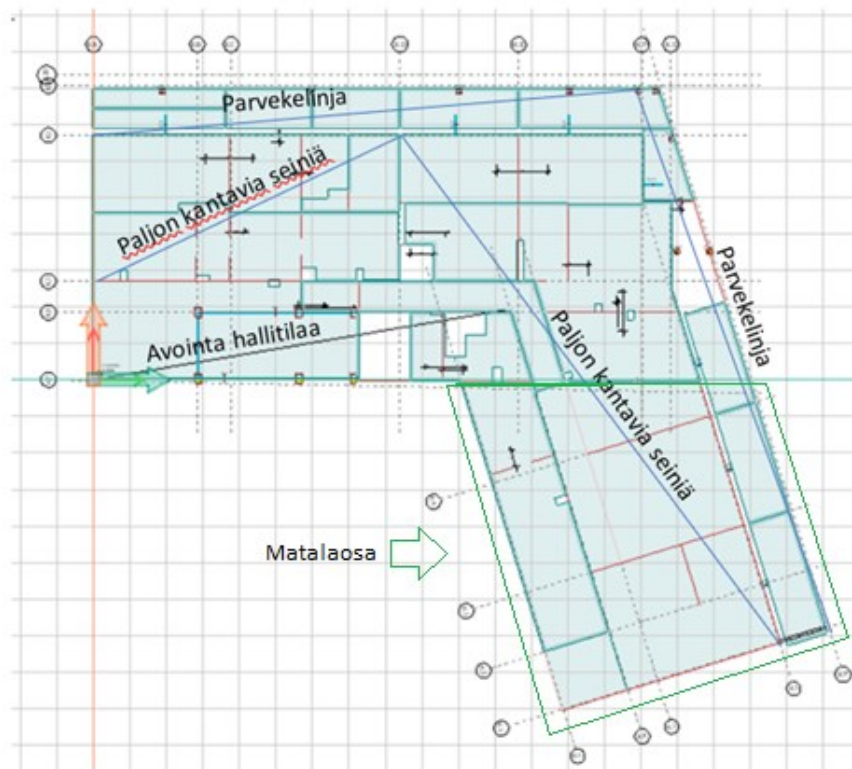
seiniä. Kohteet voitaisiin toteuttaa paaluantuoin ja kantavien seinien kohdalle asennettavin paalurivistöin, mutta kuten edellä on kerrottu, tarkoitus on sijoittaa paalut verkkomaisesti, saman jaksoisesti koko alapohjalaatan alle.



Kuvio 1. Tutkimuskohde 1.

Tutkimuskohde 2

Kohde 2 on yhdeksänkerroksinen asuinkerrostalo, jonka alapohjalaatan mitat ovat 40,28 m:ä x 34,01 m:ä. Rakennus ei ole suorakaiteen mallinen, vaan L-kirjaimen mallinen, ja sen toinen sakara on avattu 17° astetta auki. Pohjakerroksessa on toisessa siivessä puolittain pysäköintihallipaikkoja pilareineen ja toisessa on varastotiloja. Toisessa siivessä on VSS-tilat ja tekniikkatiloja. Pohjakerroksen pinta-alasta neljäsosa on pilareiden varassa pysäköintihallin kohdalla. Pilarien kuormat ovat melko suuria, mutta ovat kuitenkin vain kahden kerroksen massan kannattelevia. Loppuosa rakennuksesta tukeutuu kantavien seinälinjojen varaan lukuun ottamatta parvekelinjoja, joista ei kerry suuria kuormia, mutta ovat kuitenkin tutkimuksessa mukana. Kantavat seinät ovat sijoittuneet kellarissa melko tiheästi verrattuna pysäköintihallin avaramaisuuteen. Kantavat seinät ja pilarit lähtevät alapohjalaatan yläpinnan tasosta tukeutuen laatan ja laattavahvistuksien kautta paaluihin samoin kun tutkimuskohteessa 1. Tutkimuskohteessa 2 kantavat seinät on kuviossa 2 esitetty sinisellä ja ruskealla.



Kuvio 2. Tutkimuskohde 2.

1.7 Tutkittavat asiat tutkimuskohteissa ja kehityskohteet

Tutkimuskohteet toimivat opinnäytetyössä vertailukohteina. Kaikkia yksityiskohtia ei tutkita opinnäytetyössä kummastakin kohteesta, vaan kohteista pyritään nostamaan esille tulevia asioita ja ongelmia tai mahdollisuuksia. Pyrkimyksenä on tutkia perustuksiin liittyviä asioita yleisesti, ja tarkoituksena on löytää jotakin, mitä voidaan jatkojalostaa eteenpäin. Laskelmien kautta voidaan tutkia ja havainnoida eri mitoitusilanteita. Esimerkiksi laatta- ja anturarakenteiden yksityiskohtia aiotaan laskelmallisesti käydä lävitse ja nostaa esille asioita, joita voitaisiin kenties kehittää. Jää kuitenkin lukijan itsensä arvioitavaksi, ovatko esille nostetut asiat kehittämiskelpoisia. Valmiita ratkaisuja ei ehkä tulla näkemään.

2 TEOREETTINEN VIITEKEHYS

2.1 Suunnittelumenetelmät

Tässä opinnäytetyössä ei käydä eurokoodin mitoitus teoriaa kaikilta osin läpi. Opinnäytetyössä keskitytään oleellisiin asioihin ja rajataan aihetta massiivilaatan ja paaluanturan mitoituksessa tarvittaviin kaavoihin ja teoriaan tarvittavilta osin. Kaavat ja teoriaa pyritään avaamaan, että voidaan ymmärtää, miten paaluanturalaatan ja paalulaatan mitoitus eroavat toisistaan ja mitkä seikat puoltavat ja mitkä asiat eivät ole eduksi eri perustamistapojen näkökulmasta hyödynnettäessä verkkopaalutusmenetelmää.

2.2 Eurokoodi

Betonirakenteiden suunnittelussa on sovellettu eurokoodistandardeja vuodesta 2013 lähtien. Eurokoodia käytetään kansallisessa liitteissä (NA) esitettyjen suunnitteluparametrejä käyttäen (NPD) (Nykyri ym., 2013, s. 8). Eurokoodin mukaisessa betonirakenteiden mitoitusmenetelmässä sovelletaan niin sanottua osavarmuusmenettelyä (eri tekijöiden osavarmuudet) rakennetta mitoittaessa. Rajatilamitoitus sisältää omat erilaiset osavarmuudet riippuen materiaalista ja kuormasta (Leskelä, 2008, s.16-17).

Mitoitusehto osavarmuusmenettelyssä on aina kaavojen (1), (2) ja (3) mukainen (Leskelä, 2008, s.17).

$$R_d \geq S_{Ed} \tag{1}$$

$$R_d \geq f * (f_{ck}/\gamma_c, f_{sk}/\gamma_s) \tag{2}$$

$$S_{Ed} \geq F * (\gamma_g * g_k, \gamma_q * q_k) \tag{3}$$

missä

R_d on kestävyysmitoitussarvo (funktio f)

S_{Ed}	on mitoituskuormista laskettu vastaava mitoitusvoimasuure (funktio F)
f_{ck}	on betonin lieriölujuuden ominaisarvo
γ_c	on betonin osavarmuusluku
f_{sk}	on raudoituksen ominaislujuus
γ_s	on raudoituksen osavarmuusluku
g_k	on rakenteen oman painon ja pysyvän kuorman ominaisarvo
γ_g	on oman painon osavarmuusluku
q_k	on hyötykuorman ominaisarvo
γ_q	on hyötykuorman osavarmuusluku

Rakenteita pyritään tutkimaan erilaisissa rajatiloissa tilanteen ja tarpeen mukaan. Perustuksia suunniteltaessa tutkitaan murtorajatilan (ULS) ja käyttörajatilan (SLS) tapauksia. Muita rajatiloja ovat palomitoituksen rajatila ja onnettomuusrajatila. Perustuksien suunnittelu murtorajatilassa pyrkii osoittamaan, että rakenne on kykeneväinen olemaan riittävän stabiili tiettyyn pisteeseen saakka ja saavuttaa tietyn varmuuden mitoitusehdon täyttämässä ja ylittämässä (Leskelä, 2008, s.17).

Käyttörajatilassa perustuksien osalta mitoitusehdot pyrkivät antamaan varmuutta käyttöikään (halkeilun) ja esimerkiksi rakenteen ulkonäköön (taipuma) liittyvässä tarkastelussa. Rakenteen tai sen osan siirtymätila ei saa olla sen kaltainen, että siirtymä aiheuttaisi haittaa rakenteen toiminnalle tai ulkonäölle (SFS-EN 1992-1-1. s.126). Paaluantura- tai tutkimuskohteena oleva verkkopaalulaatta ei saa taipua tai siirtyä koko käyttöikänsä aikana niin, että se haittaisi rakenteiden toimintaa, ulkonäköä tai lyhentäisi käyttöikää. Liian suuri siirtymä perustamistasolla saattaisi näkyä elementtisaumojen aukeamisena kuormituksen aiheuttamasta siirtymästä.

Standardissa SFS-EN 1992-1-1 esitetään taipumarajaksi jännemitta jaettuna 250:llä, jolla pyritään pitämään rakenne ulkonäöllisistä ja käyttökelpoisuussyistä kelvollisina. Lisäksi taipumarajaksi voidaan ottaa jännemitta jaettuna 500:lla, mikäli liittyvät rakenteet ovat vaurioherkkiä tai voivat vioittua valmistumisen jälkeen pysyvistä kuormista aiheutuvien taipumien seurauksena. Seuraavassa tutkitaan, paljonko verkkopaalutettu laatta saisi edellisen mukaan taipua. Otaksutaan, että paalutus tehtäisiin esimerkiksi 2,5 m:n paalujaolla. Taipuman arvoa voidaan haarukoida kaavalla (4).

$$\delta = \frac{l}{250} \quad (4)$$

jossa:

σ on taipuman suuruus tai siirtymä horisontaalisessa suunnassa (mm)

l on jänneväli, tuelta tuelle. (mm)

250 on eurokoodin antama jakaja arvo. (SFS-EN 1992-1-1. s.126).

Sovelletaan edellä esitettyä kaavaa (4) ja tarkastetaan taipuma.

$$\delta = \frac{2500mm}{250} = 10mm$$

Edellisestä päätellen taipuma saisi olla 10 mm:ä käyttörajatilassa. Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista sanotaan että, rakenne on suunniteltava niin, että rakenteella on riittävä luotettavuus sen käyttötarkoitukseen ja sijaintiin nähden haitallisten muodonmuutosten, halkeamien, värähtelyjen, painumien ja muiden haitallisten vaikutusten syntymistä vastaan (Ympäristöministeriön asetus, 447/2014, 2 §). Työssä arvioidaan, miten paksun laatan taipuma tai siirtymä horisontaalisessa suunnassa vaikuttaa kantavan alapohjalaatan päällä oleviin rakenteisiin.

2.3 Perustuskuormat

Perustuskuormien laskeminen tapahtuu nykypäivänä useinmiten mitoitusohjelmistolla. Vanha käsinlaskentamenetelmä laskea perustuskuormat saattaa johtaa nykyarkkitehtuuri huomioiden helposti epätarkkaan lopputulokseen. Nykyiset 3D-suunnitteluohjelmat ja tietomallinnus ovat antaneet kenties enemmän vapauksia suunnitella monimutkaisempia rakennuksia. Monimutkaisuus johtaa siihen, että rakennuksissa kuormat eivät siirry samalla tavalla, kun rakenteet olivat yksinkertaisempia, jolloin kuormat siirtyivät päällekin olevien seinien kautta suoraan ylhäältä alas perustuksille ulottuvia kantavia väliseiniä pitkin. Näissä tapauksissa välissä saattaa olla tiloja, joissa kantavat seinät katkeavat ja kuormia siirretään sivusuunnassa palkeilla ja jäykillä laattarakenteilla eri moduulilinjoille. Nykyarkkitehtuurin mukaisissa rakennuksissa saattaa olla ulokkeita, kerrosten välisiä arkkitehtonisia pohjaratkaisueroja ja muotopoikkeamia, jossa kuormat välittyvät alas perustuksille epäsuorasti ja välillisesti. Esimerkiksi loft-asunnoissa, joita saattaa olla välikerroksissa, voi olla avaria tiloja, joissa kuormat siirtyvät kauimmaisille seinille tai pilari/palkkirungolla alas perustuksille. Kuvassa 1 nähdään esimerkkinä rakennus, jossa on loft-asuntoja. Kyseisessä rakennuksessa nähdään, kuinka monimuotoinen betonirunko voi olla.



Kuva 1. Loft-asunto (BO, i.a.).

Kuormien laskeminen tämän kaltaisissa tapauksissa voidaan suorittaa varmemmin tietokoneella mallintamalla. Käsineläskentämenetelmissä saatetaan tehdä varmalla puolella olevia laskenta- ja mallinnusyksinkertaistuksia ja oletuksia, joita ei välttämättä tarvitse tehdä tietokonepohjaisiin 3D-läskentämalleihin. Käsineläskentällä voidaan kuitenkin tarkastaa suuruusluokka ja varmistaa laskentamallin tuloksen suuruusluokka. Aina tietokoneohjelmat ja mallintaja eivät toimi yhdessä täydellisenä parina ilman virheitä, joten käsineläskentätarkastus on hyvä suorittaa esimerkiksi alustavana työvaiheena.

Usein nykyarkkitehtuurissa ja kaavoituksen sanelemissa lähtökohdissa rakennukset ovat monimuotoisempia. Monesti esimerkiksi asuinkiinteistökartteihin on sovitettava asuintilojen lisäksi tietty määrä pysäköintitiloja asuinhuoneistoa kohden. Tämän lisäksi kaupunkiasuinkiinteistökartteihin on nykyisin usein sovitettava myös puistomaisia ulkoilu- ja sisäpihatiloja, joten pysäköintitilojen sijaitessa asuinkerrosten alla maanpinnan tason alapuolella päälle rakennetaan puistomaisia pihvoja, johon arkkitehtuurin ja rakennesuunnittelun sekä muiden suunnittelualojen on taivuttava. Nämä vaatimukset ovat voimakkaasti rakentamiseen ja suunnitteluun vaikuttavia lähtöarvoja, jotka monimutkaistavat rakennusten runkorakenteita ja saattavat aiheuttaa haastavia tilanteita rakennuksen runkorakenteiden sijoittelussa ja kuormien alaskuljettamisessa perustuksille. Tällä on ollut vaikutusta siihen, että suunnittelutyö on kenties monimutkaistunut ja kuormien siirtyminen suoraan ylhäältä alas paaluanturoille ei ole yksiselitteinen tai suoraviivainen nykyaikaisessa kerrostalokohteessa. Tässä sivutaankin hieman opinnäytetyön tutkimuskysymyksiä ”voidaanko perustusrakenteita yksinkertaistaa ja optimoida tarkemmin”, ja ”olisiko perustusrakenteiden suunnittelussa kehitettävää rakennusten monimutkaistuessa ja suunnitteluvaatimusten kasvaessa”.

Paaluperustuksen kuormituksia voidaan mahdollisesti optimoida käyttämällä suunnitteluohjelmia ja mallinnuksia, jotta aikaansaadaan tarkempia kuormatietoja perustamistasolle. Tällä voidaan mahdollisesti saavuttaa optimaalisempia tuloksia. Tässä opinnäytetyössä pyritään venyttämään suunnittelun ajatusmaailmaa ja suunnitteluratkaisuja sellaiseksi, miten suunnittelua ei normaalisti toteuteta. Työssä pyritään tutkimaan ja saavuttamaan uusia tai ainakin vähemmän käytettyjä suunnitteluratkaisuja perustustasolla, jotta työt kokonaisvaltaisesti sujuisivat jouhevammin niin suunnittelu- kuin toteutustyössä.

Kun paaluperustuskuormat lasketaan FEM-laskentaohjelman avulla, saadaan haarukoitua heti suurimmat kuormituspisteet ja seinälinjoille kertyvät viivakuormat. Tästä taas saadaan käsitys tarvittavista paaluista ja niiden lukumäärästä. Voidaan ajatella, että kohteessa halutaan käyttää seinien alla kahden paalun anturoita ja kuormia vastaavia paaluja. Tällöin voidaan valita eniten kuormitettu ja käyttöasteeltaan suurin paaluantura ja raudoittaa kohteen kaikki paaluanturat samalla terästyksellä. Näin nopeutetaan suunnittelua ja toteutusta. Valmiit anturaraudoitukset voidaan hitsata häkeiksi tehtaalla ja kuljettaa

työmaalle valmiina häkkeinä. Työmaalla on helppo työ asettaa valmis raudoite valumuotteihin, jotka nekin on jo esivalmistettu sisällä tuotantotiloissa.

Tämä olisi ideaalitilanne, mikäli kuormat saataisiinkin vietyä perustussuunnittelussa suunniteltuihin pisteisiin. Jäljempänä pyritään avaamaan, miksi tilanne voi muuttua ja miksi suunnitelmat, raudoitukset ja kaikki esivalmistetut tuotteet eivät tulekaan kelpaamaan suunniteltuihin perustuksiin. Opinnäytetyössä ei esitellä uutta ratkaisua kuormien laskentaan, vain kehoitus käyttää laskentaohjelmaa monimutkaisten rakennusten kuormien laskentaan. FEM-laskentaohjelmien etuna kuormien laskennassa on niiden muuntojoustavuus ja synergiaedut. Samalla mallilla voidaan laskea kuormia ja mitoittaa rakenteita syötetyillä kuormilla. Edellä mainittu tietenkin riippuen ohjelmistosta, joka on käytössä. Tämän opinnäytetyön tekemiseen on hyödynnetty yhtenä työkaluna kuormienlaskentaan Strusoft FEM-Design 2022 -ohjelmistoa. Strusoft FEM-Design 2022 -ohjelma on edistynyt ja intuitiivinen rakenteiden analysointiohjelma. Se tukee suunnittelua kaikilla rakennesuunnittelun aspekteilla 3D-mallinnuksen ja FEM-analyysin avulla sisältäen betoni-, teräs-, puu-, komposiitti sekä muurattujen rakenteiden ja perustusrakenteiden suunnittelun eurokoodin mukaisesti (Strusoft i.a.).

2.4 Perustukset yleisesti

Perustuksien tehtävä yleisesti on siirtää rakennuksen kuormat; pysty- ja vaakakuormat maapohjalle. Vaakavoimien merkitys pystykuormien siirtoon nähden on kuitenkin murto-osa, mutta se on usein huomioitava, mikäli sen katsotaan olevan tarpeellista kokonaisuuden kannalta. Perustusten suunnittelu jaetaan kahteen osaan; geotekninen suunnittelu ja rakennetekninen suunnittelu (Nykyri ym., 2013, s.179).

Paaluperustuksissa paalut toimivat rakenteen ja kovan maapohjan välisinä puristus-sauvoina, joskus myös vetosauvoina, joiden tehtävänä on siirtää kuormat kovaan maapohjaan. Paalun mitoituksessa voidaan huomioida vaakavoimien siirto, mutta useimmiten vaakavoimat siirtyvät paalun vaipan kautta riittävällä tasolla paalua ympäröivään maaperään sitä erikseen mitoittamatta (Leskelä, 2005, s.454). Esimerkiksi 10 kN/teräspaalu voidaan katsoa sopivaksi vaakakuormaksi, mutta silti geo-suunnittelija määrittelee käytettävän arvon aina ennen suunnittelun aloittamista erikseen jokaisessa kohteessa lähtötietoihin.

Anturaperustuksissa vaakavoimat voivat vaikuttaa perustusten kokoon, mikäli paalujen ottama vaakavoimakapasiteetti ei riitä, mutta tämä tutkitaan aina tapauskohtaisesti.

Paalun ottamaa vaakavoimakapasiteettia verrataan rakennusvaippaan kohdistuvan tuulen aiheuttaman x- ja y- suuntaisen vaakavoimakertymään. Asiaa ei tässä käsitellä tarkemmin, mutta esimerkiksi SKOLn laskentapohjista löytyy tuulikuormien laskentaan sopiva laskentapohja SKOL M10 (SKOL M10, 2011).

Perustusrakenteiden dimensiot määrittävät osan rakennuskustannuksista. Perustuksien ja maarakennustöiden osuus kokonaisrakennuskustannuksista on suuruusluokaltaan noin 10 % riippuen hyvin paljon siitä, millaisia reunaehtoja on vaikuttamassa rakentamiseen ja suunnitteluun. Tässä opinnäytetyössä pyritään selvittämään tehokkaan suunnittelun lähtökohtia perustusrakenteen suunnittelijan näkökulmasta. Kun rakennesuunnittelija saa lähtötiedot arkkitehdilta, alkaa miltei heti luonnossuunnitteluvaihe, muu rakennesuunnittelu tietenkin huomioiden. Muulla rakennesuunnittelulla tarkoitetaan kantavia rakenteita ja ylipäätään alapohjalaatan yläpuolelle sijoituvia rakenteita ja hyötykuormia. Perustuksien yläpuolelle sijoituviiin rakenteisiin ei tässä opinnäytetyössä oteta sen tarkemmin kantaa, vaan keskitytään perustusrakenteiden suunnitteluun ja kehittämiseen. Luonnosvaiheessa on haarukoitava nopeasti perustamistapa ja paalujen sijoittelu, laattapaksuudet ja anturakoot. Kuormat lasketaan joko käsin tai FEM-laskentaohjelmalla. Kuormien laskemista on käsitelty jäljempänä. Lähtötietoina pitää olla geologin pohjatutkimus ja lausunto. Lausunnossa täytyy olla ehdotetut paalukoot ja niiden R_d/A arvot, jotta päästään arvioimaan paalumääriä.

2.5 Paaluanturaperustus

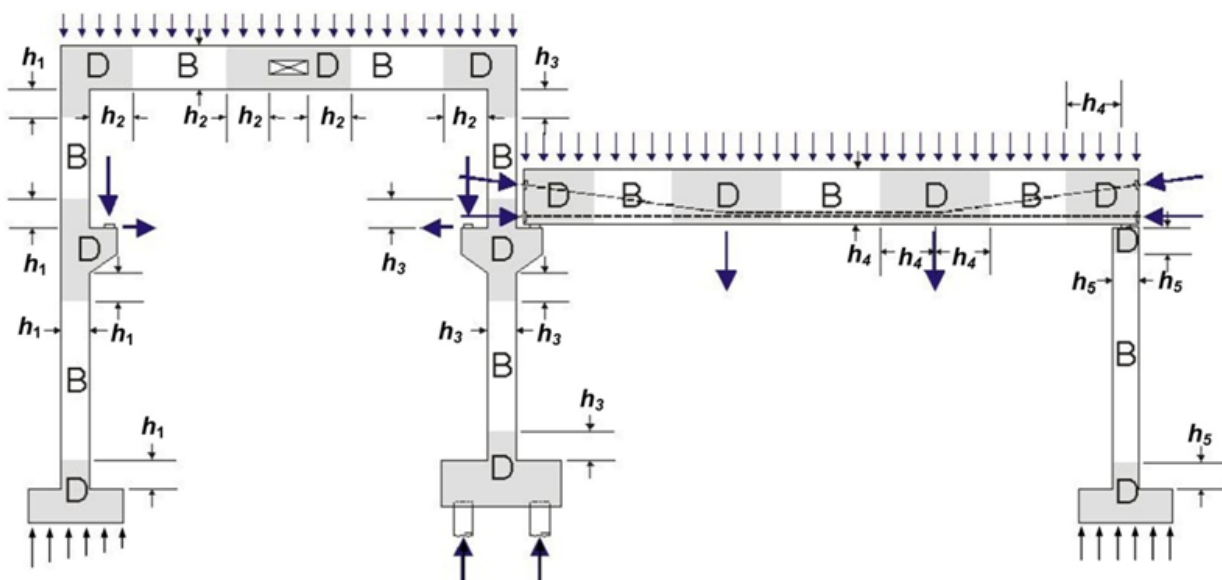
Paaluanturan koot ovat kasvaneet ajan myötä suuremmiksi arviolta johtuen siirtymisestä yhteiseurooppalaiseen suunnittelustandardiin eurokoodiin. Anturaperustukset ovat kasvaneet todennäköisesti muuttuneen ja tarkentuneen laskentamenetelmän johdosta.

Eurokoodi-standardin SFS mukaan paaluantura on mitoitettava niin sanotun ristikkomenetelmän tai taivutusteorian mukaan (SFS, 2015, s.160). Tämä käytännössä viittaa siihen, että paaluantura on mitoitettava D- tai C-alueen teorioita mukaillen. Kun a/d ylittää ykkösen, kuormat eivät etene paaluanturassa ristikkomenetelmässä kuvatulla D-alueen

epäjatkuvuusalueen tavalla, vaan C-alueen mukaan, jossa sovelletaan teknisen taivutus-teorian periaatteita (Leskelä, 2008, s.431).

Paaluanturan mitoitus tapahtuu nykypäivänä yleensä niin, että paalujen keskiöväli S_p on yhtä suuri tai pienempi kuin paaluanturan korkeus. Tällöin paaluantura toimii edellä havainnollistetulla D-alueen tavalla.

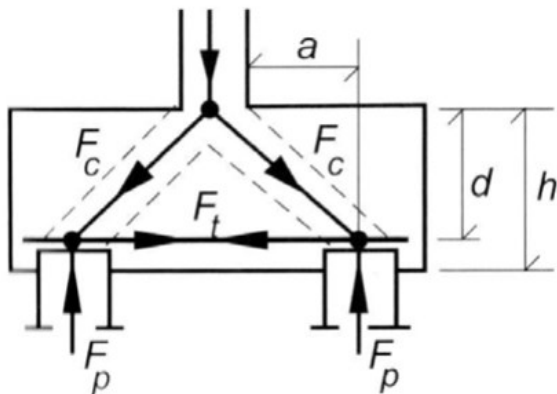
Voimasuureiden laskentaan voidaan hyödyntää ristikkomalleja ja anturaan muodostuu tällä periaatteella edellä mainittu D-alue (Leskelä, 2008, s.454). Kuviossa 3 on esitetty yleisesti D- ja C- alueiden muodostumispaikat kehärakenteessa, antura mukaan lukien.



Kuvio 3 Tyypilliset ristikkomallin B- ja D- alueet teräsbetonikehärakenteessa (Wallingford Solutions).

Oleellisin ja usein ratkaisevin asia paaluanturan mitoituksessa on solmuvoimien tarkastaminen ja tasapainottaminen. Usein laskelmissa törmää siihen, että solmuvoima(t) kasvaa liian suureksi. Tällöin tilannetta voidaan korjata esimerkiksi valitsemalla puristuslujuudeltaan lujuempaa betonia anturavaluun tai kasvattamalla anturan korkeutta. Solmuvoima on riippuvainen siitä, että anturan sisään muodostuvan ristikkomallin puristussauvan kulma muodostuu liian loivaksi. Tämä taas johtaa siihen, että paalun päälle muodostuvaan solmupisteeseen

kohdistuvan kuorman erisuuntaiset komponentit kasvavat ja jännitys pisteessä kasvaa ylisuureksi. Solmupisteessä tutkitaan betonin puristusjännitystilaa, ja solmupisteen kuormia vastaanottavia pinta-alojen ottamia voimia verrataan puristuskapasiteettiin. Standardin SFS-EN-ISO 1992-1-1 (SFS, 2015, s.108) mukaan on tarkastettava, että solmuvoimat ovat tasapainossa. Paaluanturan tapauksessa solmulla tarkoitetaan siis paalun päälle muodostuvaa pistettä, joka sijaitsee vetoteräksen tai terästen keskipisteessä. Mikäli on kyseessä kahteen suuntaan toimiva paaluanturan terästys, niin solmupiste sijaitsee ylemmän ja alemman teräksen välissä. Kuviossa 4 nähdään, millä tavalla Leskelä esittää paaluanturan ristikkomallin ja laskelmissa käytettävän mitoituksen.



Kuvio 4. Paaluanturan ristikkomalli, mitoitus. (Leskelä, 2008, s.455).

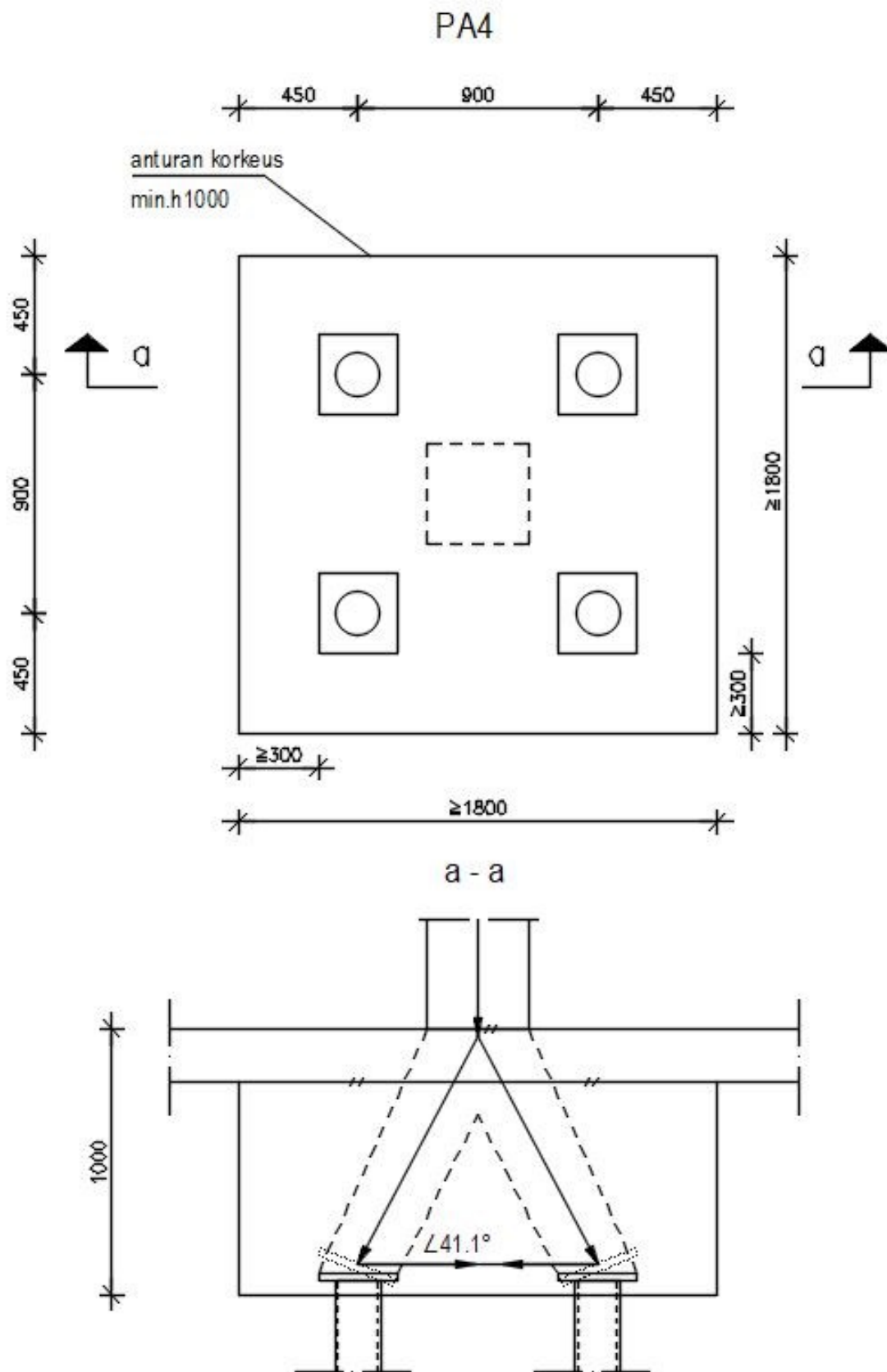
F_c	Diagonaalivoima (aiheuttaa halkaisuvoiman F_t)
F_t	Raudoituksessa vaikuttava vetovoima
F_p	Rakenteen lävitse paaluille välitettävä pystykuorma
a	Mitta paalun keskeltä kuormittavan seinän tai pilarin reunaan
d	Mitta vetoterästen keskeltä anturan yläreunaan
H	Anturavalun korkeus

Vanhassa rakennusmääräyskokoelman B4 -ohjeosassa ei ole mainintaa solmuvoimien tarkastamistarpeesta tai ristikkomenetelmästä. Ainoa suoranainen ohjeistus paaluanturan mitoitukseen on maininta, että paksut anturat tai lyhyet ulokkeet voitaisiin mitoittaa käyttäen kuormittavan voiman, betonin puristusjännitysresultantin ja raudoituksen vetovoiman vektorisummaa (Suomen rakennusmääräyskokoelma, 2005, s.16). Ennen eurokoodin käyttöönottoa paaluanturat mitoitettiin monesti täyden paalukuorman momenttia vastaan toisin kuin nykypäivänä. Nykypäivänä mitoitus tapahtuu perustustasolle saadun kuormituksen perusteella, ei niinkään paalujen ottaman kokokapasiteetin mukaan. Tässä nähdään mielestäni kehitystä ja optimointiedistystä, vaikka varmasti on suunnittelijoiden välisiä toimintatapajeroja.

Suomessa ennen eurokoodiaikaa, laajasti käytetty paaluanturan mitoitusmenetelmä, jossa paaluanturat mitoitettiin paalujen täydellä kapasiteetilla, johti todennäköisesti ylisuuriin anturan raudoitukseen. Myös anturadimensiot saattoivat olla hieman ylisuuria, koska täydellä paalukapasiteetilla mitoitettut pääraudat täytyi ankkuroida täydelle vetovoimalle paalun etureunasta alkaen toimiakseen täysin. Betoniyhdistyksen mukaan paaluanturassa syntyvän merkittävän kaari- ja holvivaikutuksen johdosta paaluanturan pääteräkset on ankkuroitava täydelle vetovoimalle (Sainio ym., 1995, s.204). Tämä vaatii riittävän suuren anturan, jotta suorat tai ylöstaivutetut teräkset saadaan ankkuroitua. Isona erona B4:n ja eurokoodin välisessä paaluanturan mitoituksessa nykyaikana on solmuvoiman tarkastaminen ja mitoitus ristikkomallin mukaan.

Paaluanturaperustuksen huonoihin puoliin kuuluu sen yksityiskohtainen suunnittelu tilanteessa, jossa perustamisolosuhteet ovat hankalat ja paalusiirtymät ovat suuria. Suomen betoniyhdistys kirjoittaakin, että mittapoikkeamat paalutuksessa saattavat vaikuttaa paaluanturan taivutus- ja leikkausvoimiin merkittäväällä tavalla ja paaluanturat tulisikin suunnitella vasta paalutustyön tarkemittausten valmistuttua (Sainio ym., 1995, s.203). Paalusiirtymien johdosta paaluanturan raudoitus on aina tarkastettava ja suunniteltava uudelleen ja jokaisessa paaluanturassa erikseen paalutustyön mittauspöytäkirjan mukaisesti. Paalusiirtymät johtavat poikkeuksetta paaluanturan yksityiskohtaiseen tarkastusprosessiin ja mahdollisesti tyyppianturan uudelleensuunnitteluun, mikäli paalutustyössä poiketaan alustavassa paaluanturan mitoituksessa paalun sallitun mittapoikkeaman ulkopuolelle.

Seuraavaksi esitetään kuviteltu esimerkkitalanne neljän paalun anturasta, jonka eräs paalu on siirtynyt 300mm:ä x:n ja y:n suuntaan alkuperäisestä. Tämä voisi johtua esimerkiksi paalun tielle tulleesta kovasta esineestä tai kallion pinnan epämääräisyydestä. Kuviossa 5 nähdään alkuperäinen tilanne. Tyypianturassa kuormat siirtyvät paaluille ristikkomenetelmän mukaan niin, ettei leikkaustarkastelua tarvitse välttämättä tarkastaa, koska ristikkokulma on yli 45° . Paaluantura on mitoitettu kestäämään sille asetetut kuormitukset normaalin laskenta-prosessin mukaisesti.



Kuvio 5. PA4 alkuperäinen tilanne.

Erityishuomiona voidaan mainita, että kuviossa 5 näkyy paalun päällä olevan paaluhattun katkoviivat. Katkoviivoitettu paaluhattu on käännetty kuorman suuntaiseksi, jolloin paaluhattun pinta-ala olisi kohtisuora ja suurimmillaan voimaa vastaan. Tällainen ratkaisu auttaisi solmuvoimatasapainon saavuttamisessa tilanteessa, jossa solmuvoimakapasiteetti tulee vastaan ja kuormaa tulisi jollain tavalla pienentää tai betonin puristuskapasiteettia suurentaa. Toinen vaihtoehto olisi suurentaa paaluhattua, jolloin paikallinen puristus pienenesi. Tässä opinnäytetyössä paaluhattut ovat kuitenkin perinteiseen tapaan vaakasuorassa, mutta tätä asiaa voisi kenties jatkokehittää tulevaisuudessa. Anturan kapasiteetti on tyyppianturan laskelmassa hyvällä tasolla, mikä voidaan päätellä kuvioista 6, lukuun ottamatta korkealla käyttöastetasolla olevaa solmuvoimajännitystä.

CONTRIA		Rakennelaskelma, lähtötiedot	
		Tekijä: Ial	
Päiväys: 13.12.2020			
Rakennuskohde:	Työ nro:	Sisältö:	Sijainti:
PA4 EI PAALUSIIRTYMÄÄ		PA4	
SKOL Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjananikkeessa 2008-2011			
Paaluantura, 4 paalua		Versio 1.52	
Materiaalit:		Paaluantura:	
Betoni =	C35/45	$s_{0x} =$	900 mm
Rasitusluokka =	XC2	$s_{0y} =$	900 mm
Betoniteräs $f_{ck} =$	500 MPa	$l =$	2100 mm
Pääteräs $T_s =$	32 mm	$h =$	1000 mm
Lukumäärä $n_{0x} =$	5 kpl	$h_c =$	380 mm
Lukumäärä $n_{0y} =$	5 kpl	$c =$	80 mm
Teräspaalu	170 mm	$b_c =$	380 mm
		$c_1 =$	35 mm
		Suora teräs	
Paalut:		Ankkurointiolosuhteet	Hyvät
Paalujen koko $h_p =$	300 mm	$l_1 =$	450 mm
Paalujen pituus =	25 m -	$e_{2k} =$	3 mm
Paalutyypit =	Tuki- tai kitkapaalu	Paalut, sijaintitoleranssi $e_s =$	mm
Ristikkokulmat ($^\circ$)	$\theta_2 =$ 54,3	Pilarin sijaintitoleranssi $e_1 =$	mm
Raudituksen jakoalue $b_{0x} =$	500	$\theta_3 =$	54,5
		$b_{0y} =$	500
Tarkistukset ja tulokset		Rasitus	Kestävyys
Vetorausitus:	$F_{x,Ed,t} =$ 545	$F_{x,Rd} =$ 1748	31 % OK!
	$F_{y,Ed,t} =$ 549	$F_{y,Rd} =$ 1748	31 % OK!
	$A_{s,x,vaad} =$ 1253	$A_{s,x} =$ 4021	31 % OK!
		$A_{s,x,min} =$ 1556	OK!
	$A_{s,y,vaad} =$ 1283	$A_{s,y} =$ 4021	31 % OK!
		$A_{s,y,min} =$ 1556	OK!
Puristusjännitys:	$\sigma_{0d,t} =$ 12,4	$f_{0d}^*k_1^*V_1 =$ 12,8	97 % OK!
Mahd. taivutustelan halkaisija	224	Pääraud. ankkurointi:	$l_{0d,x} =$ 331
		Pääraud. ankkurointi:	$l_{0d,y} =$ 331
		Suurin tankokoko:	$\Phi^*s =$ 32
		Suurin tankoväli:	$d/c \max =$ 300 mm
A [mm ²]; F [kN]; V [kN]; L [mm]			OK!
Paaluanturan kuormat		Johtopäätös:	
Ominaiskuorma (KRT)	$N_{Ek} =$ 3900 kN	Laskenta täyttää vaatimukset	
Mitoituskuorma (MRT)	$N_{Ed} =$ 4300 kN		
Ominaismomentti (KRT)	$M_{Ek} =$ 10 kNm		
Mitoitusmomentti (KRT)	$M_{Ed} =$ 15 kNm		

Kuvio 6. Neljän paalun antura lähtötilanne, ei paalusiirtymää (SKOL B20, 2011).

Tilanne muuttuu kuviossa 8 merkittävästi, kun paaluanturassa huomioidaan paalusiirtymä. Paalu on siirtynyt pois niiltä sijoiltaan, johon se oli alkuperäisessä suunnitelmassa sijoitettu. Kuvioista 5 poiketen, sijaintipoikkeama on x:n suunnassa -300 mm:ä ja siirtymä y:n suunnassa 300 mm:ä. Esimerkiksi lyötäviä betonipaaluja voidaan joutua siirtämään

sivusuunnassa suunnittelusijainnistaan, mikäli paalu on osunut esimerkiksi isoon kivenlohkareeseen ja jää selvästi ylemmäs pohjatutkimuksen osoittamasta syvyydestä. On myös mahdollista, että paalu vinoutuu merkittävästi tai katkeaa lyönti vaiheessa, jolloin paalu joudutaan hylkäämään ja uusi paalu on sijoitettava riittävän etäälle vioittuneesta paalusta. Porapaalut ovat paremmin kohdalleen osuvia, mutta käytäntö on osoittanut, etteivät nekaan absoluuttisen tarkasti aina pysy suunnittelusijainnissa. Poikkeamia syntyy kyseisellä paalutyypillä myöskin ja niihin on syytä varautua jo tyyppianturan mitoitusvaiheessa. Esimerkiksi 50mm:ä paalusiirtymä paalua kohden on riittävä mitta porapaalutukselle ja 75mm:ä lyöntipaalutukselle. Lähteessä RIL 254-2-2016 esitetään taulukon 1 mukaiset asennustoleranssit suuriläpimittaisille teräsputkipaaluille ja kaivinpaaluille.

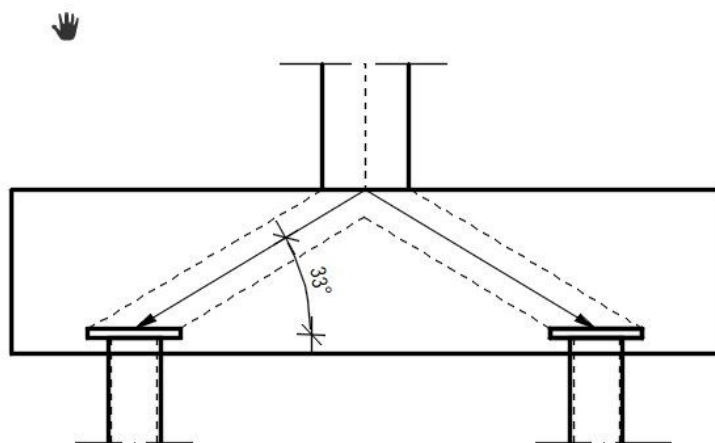
Taulukko 1. Suuriläpimittaiset teräsputkipaalut ja kaivinpaalut rakentamistoleranssit (Riihimäki, 2016, s.183 mukaillen).

Pysty- ja vinopaalut: sijainti vaakatasossa mitattuna työskentelytasolta:	
Paalun poikkeama	Paalun d-mitta
$e \leq e_{\max} = 0,1\text{m}$	$d \leq 1,0\text{m}$
$e \leq e_{\max} = 0,1\text{m} \times d$	$1,0\text{m} < d \leq 1,5\text{m}$
$e \leq e_{\max} = 0,15\text{m}$	$d > 1,5\text{m}$

Samassa yhteydessä esitetään myös paalujen kaltevuuspoikkeamavaatimustoleranssit, mutta niitä ei tässä esitetä, koska ne eivät vaikuta suoranaisesti anturan mitoitukseen. Lisäksi lähteessä RIL 254-2-2016 esitetään porapaaluille vähintään samat geometriset rakentamistoleranssit, mutta korostetaan sitä, että olisi suositeltavaa käyttää kuitenkin tarkempia mittatoleransseja ($e \leq e_{\max} = 0,025\text{m}$) (Riihimäki, 2016, s.183). Tarkempia mittatoleransseja tulisi käyttää, mikäli se on tarkoituksenmukaista rakenteen ja kuormituksen kannalta. Tämäkin riippuu voimakkaasti siitä, millaiseen maaperään ollaan tunkeutumassa.

Vanhassa B4:n mukaisessa laskentamenetelmässä leikkausvoimaa ei tarvinnut tarkastaa, kunhan noudatettiin samaa periaatetta kuin edellä mainittu, eli $a:n$ ja $d:n$ suhde piti olla pienempi kuin yksi, ja kuten tiedetään, sama periaate pätee nykypäivänäkin.

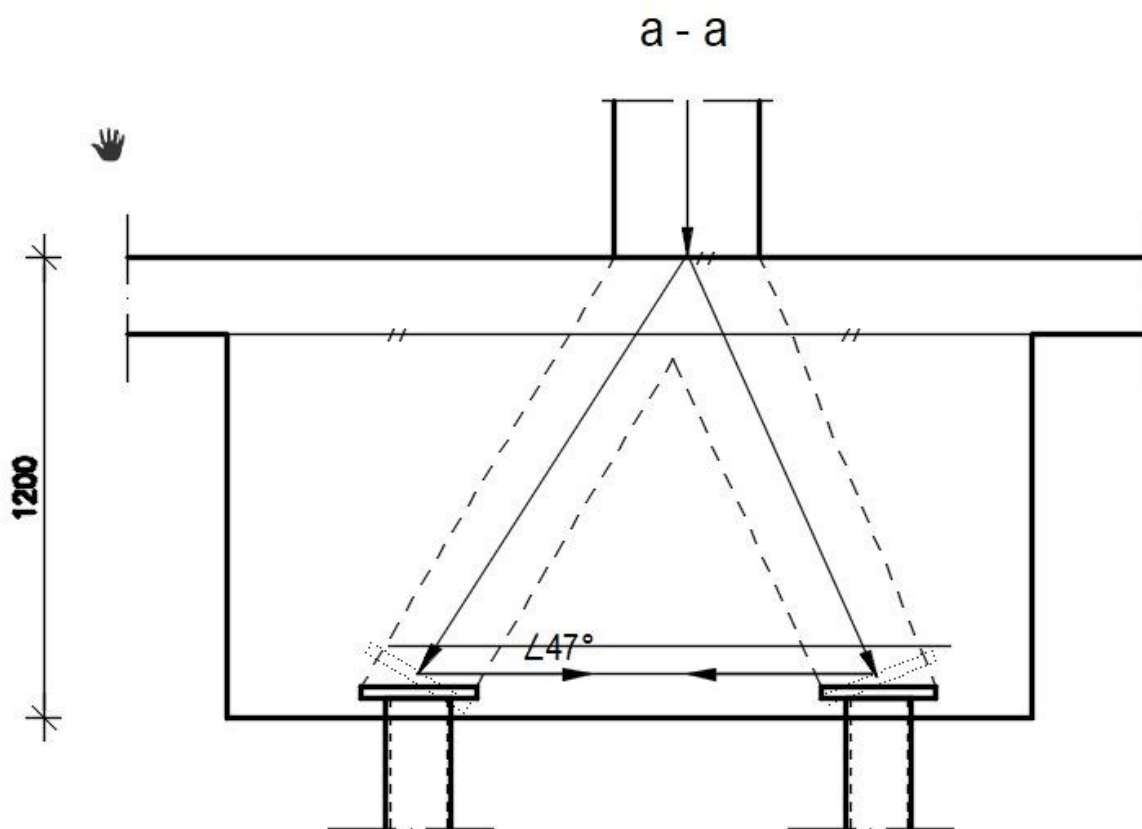
Tämän vuoksi esimerkkilaskelmassa paaluanturan korkeutta täytyi lisätä 1000mm:stä 1200mm:iin, jotta ristikkokulma ei ylittyisi. Muutoin tulisi tarkastaa anturan leikkauskapasiteetti ja lisätä mahdollinen leikkausraudoitus. Tätä tilannetta pyritään yleisesti välttämään. Standardin mukaan poikkileikkauksen leikkauskapasiteetin riittävyttä ei ole tarvetta tarkastaa, kunhan painopisteakselin ja tukipisteen reunasta 45° kulmaan piirretyt suorat leikkaavat keskenään (SFS, 2015, s.85). Kuviossa 7 on havainnollistettu tilannetta, jolloin anturan poikkileikkauksen leikkauskapasiteetti on tarkastettava.



Kuvio 7. Anturan leikkauskapasiteetti on tarkastettava esimerkiksi paalusiirtymien vuoksi.

Kuvio 8 on esimerkki, jossa ristikkokulma on riittävä ja leikkaustarkastelua ei tarvitse suorittaa, koska puristuskulma on yli 45° . Paaluanturan korkeutta on kasvatettu kuten edellä mainittiin, 1000 mm:stä 1200mm:n, jolloin puristuskulma kasvaa. Suuremman puristuskulman johdosta materiaali menekki hieman kasvaa, mutta toisaalta voisi olla niinkin, että anturan kestävyys jouduttaisiin jättämään leikkausterästen varaan koko anturan käyttöikänsä ajaksi. Tämä voidaan välttää lisäämällä anturaan korkeutta, jolloin kuorma siirtyy anturan sisään

muodostuvan betonipuristuspaarten kautta paalulle, ja tilanne on näin oletettavasti stabiilimpi käyttöikää ajatellen.



Kuvio 8. Paalu siirtynyt 300mm:ä suunnitellusta sijainnistaan.

Kuviossa 9 on paaluanturan tarkastuslaskelma, jossa on huomioitu 300 mm:ä paalusiirtymä. Laskelmassa anturan korkeutta on kasvatettu sen verran, että ristikkokulma ei koituisi mahdolliseksi ongelmaksi. Anturankorkeuden kasvattamista voidaan pitää turvallisena ratkaisuna, mikäli paalusiirtymä on maltillinen ja anturan päällä on tilaa. Anturan korkeuden kasvattamisella vältetään anturan leikkaustarkastelu ja mahdollinen leikkausraudoituksen tarve. Paaluja voidaan myös katkaista alemmalla tasolla, mikäli anturan päällä ei ole tilaa. Kuviossa 9 on esitetty myös korotetun paaluanturan raudoitus ja sisäiset voimasuhteet sekä kestävyudet.

SKOL Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011									
Paaluantura, 4 paalua					Versio 1.52				
Materiaalit:				Paaluantura:					
Betoni =	C35/45	▼		$s_{px} =$	1200	$s_{py} =$	1200	mm	
Rasitusluokka =	XC2			$l =$	2100	$b =$	2100	mm	
Betoniteräs $f_{ck} =$	500	MPa		$h =$	1200	mm			170
Pääteräs $I_s =$	32	mm		$h_c =$	380	$b_c =$	380		
Lukumäärä $n_{sx} =$	5	kpl		$c =$	120	$c_1 =$	35	mm	
Lukumäärä $n_{sy} =$	5	kpl				Suora teräs			
Teräspaalu	170	mm		Ankkurointiolosuhteet		Hyvät			
Paalut:				$l_1 =$	300	$l_{1y} =$	300		
Paalujen koko $h_p =$	300	mm		$e_{2k} =$	3	$e_{2d} =$	173		
Paalujen pituus =	25 m -			Paalut, sijaintitoleranssi $e_s =$				mm	
Paalutyyppi =	Tuki- tai kitkapaalu			Pilarin sijaintitoleranssi $e_1 =$		170		mm	
Ristikkukulmat ($^\circ$)	$\theta_2 =$	47,0		$\theta_3 =$	54,9				
Raudituksen jakoalue $b_{rx} =$	500			$b_{ry} =$	500				
Tarkistukset ja tulokset:		Rasitus		Kestävyys					
Vetorausoituis:	$F_{x,Ed,1} =$	564		$F_{x,Rd} =$	1748				32 % OK!
	$F_{y,Ed,1} =$	793		$F_{y,Rd} =$	1748				45 % OK!
	$A_{s,x,vaad} =$	1297		$A_{s,x} =$	4021				32 % OK!
				$A_{s,x,min} =$	1837				OK!
	$A_{s,y,vaad} =$	1825		$A_{s,y} =$	4021				45 % OK!
				$A_{s,y,min} =$	1837				OK!
Puristusjännitys:	$\sigma_{cd,j} =$	12,9		$f_{cd} \cdot k_i \cdot v_i =$	12,8				101 % NEG!
Mahd. taivutustelan halkaisija	282			Pääraud. ankkurointi:	$l_{bd,x} =$	478			85 % OK!
				Pääraud. ankkurointi:	$l_{bd,y} =$	478			85 % OK!
				Suurin tankokoko:	$\Phi \cdot s =$	32			OK!
A [mm ²]; F [kN]; V [kN]; L [mm]				Suurin tankoväli:	c/c max	250	mm		OK!
Paaluanturan kuormat:				Johtopäätös:					
Ominaiskuorma (KRT)	$N_{Ek} =$	3900	kN						
Mitoituskuorma (MRT)	$N_{Ed} =$	4300	kN						
Ominaismomenti (KRT)	$M_{Ek} =$	10	kNm						Laskenta ei täytä vaatimuksia!
Mitoitusmomenti (KRT)	$M_{Ed} =$	15	kNm						Katso laskenta välilehti!

Kuvio 9. PA4 Huomioitu 300 mm:ä paalusiirtymä ja anturan korotus (SKOL, 2023).

Kuviosta 9 on havaittavissa, että solmupisteen puristuskapasiteetin hyväksikäyttöaste on kohonnut 101 prosenttiin siitä huolimatta, että anturan korkeutta kasvatettiin 300 mm:ä paalusiirtymän huomioimisen johdosta.

Ristikkokulmaan ja myös edellä käsiteltyyn leikkaustarkasteluun voidaan vaikuttaa paalujen sijoittelulla. Paalut kannattaa sijoittaa lähtökohtaisesti mahdollisimman lähelle toisiaan, kuitenkin huomioiden tarvittavat etäisyyden toisiinsa ja muihin rakenteisiin. Kullekin paalutyypille on määritelty suositusarvot sallituista paaluetäisyyksistä (Riihimäki, 2016, s.179), jotka on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2 paalujenväliset etäisyydet (Riihimäki, 2016, s.179 mukailten).

Paalun pituus (m)	Tuki- ja kitkapaalu		Koheesiopaalu	
	2,7d	Neliömäinen	Pyöreä	Neliömäinen
10	2	3d	4d	4,5d
10-20	Väliarvot interpoloidaan		5d	5,6d
25	3,5d	4d	6d	6,8d

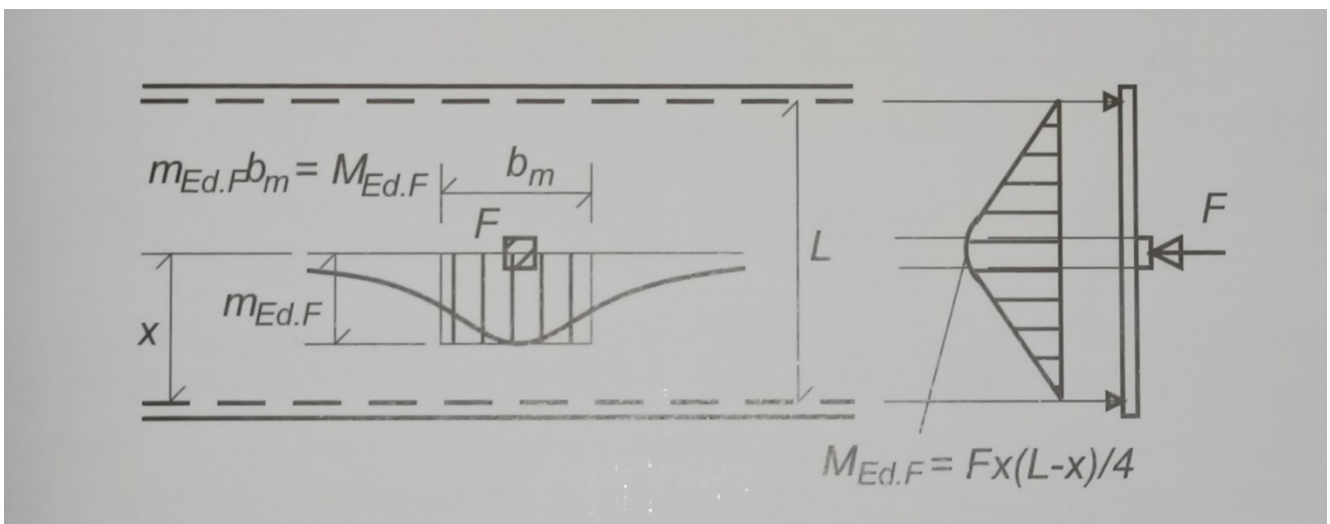
Kaikesta edellisestä päätellen paaluanturan hiilijalanjälkeä eli materiaalin menekkiä voitaisiin pienentää sillä, että ristikkokulma painetaan mahdollisimman alas huomioiden tietenkin ristikkokulma, oletettu paalusiirtymä ja paalujenväliset suositusetäisyydet. Tässä toimenpiteessä on huomioitava, että solmuvoimat kasvavat ja voivat paalusiirtymien jälkeen päätyä lähelle käyttöasteensa ylärajaa, kuten edellä esitettyssä esimerkissä kävi ilmi.

Paaluetäisyyksiä arvioitaessa on siis huomioitava, että paalujen sijaintipoikkeamat voivat muodostua joskus melko suuriksi, joten paaluja ei kannata sijoittaa lähtökohtaisesti liian lähelle toisiaan. Vakiopaaluanturat ovat hyvä lähtökohta luonnossuunnittelulle, mutta eivät välttämättä toimi enää paalujen asentamisen ja paalutarkemittauksen jälkeen. Edellä kuvattu paalusiirtymien huomioimisen esimerkkitapaus onkin silta asialle, jota opinnäytetyössä pyritään selvittämään ja kenties löytämään ratkaisu aikaa vievään suunnitteluvaiheeseen. Voidaanko yksityiskohtainen paaluanturasuunnitteluprosessi väistää sillä, että anturan

sijasta kuormat siirtyisivätkin paksunlaatan kautta paaluille? Tällöin esimerkiksi työläs ja joskus hidaskin paalusiirtymien huomioiminen jo kertaalleen suunnitelluissa rakenteissa voitaisiin huomioida suurempina kokonaisuuksina kenties verkkopaalutetun laatan raudoituk-
sissa. Tätä pyritään selvittämään seuraavissa luvuissa.

2.6 Paalulaattaperustus

Standardin mukaan laattarakenteen määritellään niin, että laatta on rakenne, jonka sivumitta on viisi kertaa rakenteen kokonaispaksuus (SFS, 2015, s.57). Tällä jaotellaan palkit ja laatat keskenään. Laatta- ja palkkirakenteet on syytä erottaa toisistaan, sillä leveään palkkiin syntyy poikittaisia rasituksia, taivutusmomenttia ja vetojännitystä, mikäli kuormitus sijaitsee vain osassa poikkileikkausta. Myös yhteen suuntaan kantavaan laattaan voi muodostua poikittaista vetoa pistekuorman kohdalle kuvion 10 mukaan.



Kuvio 10. Pistekuorman jakaantumisleveys b_m (Lekelä, 2008, s.391).

Yhteen suuntaan kantava laatan osa raudoitetaan niin, että se kykenee vastaanottamaan mahdolliset poikittaiset vetojännitykset. Pistekuorman vaatima raudoitus on 60 prosenttia momentin $M_{Ed.F}$ edellyttämästä jänteensuuntaisesta raudoituksesta. Raudoitus lasketaan kaavasta (5). Kuvioista 10 nähdään, miten pistemäisen kuormituksen kohdalle, yksiaukkoi-
seen rakenteeseen muodostuu poikittaista vetoa.

$$M_{Ed,F} = F * x * (L - x) / 4 \quad (5)$$

jossa

F on pistekuorma (tai viivakuorma)

x on etäisyys tuen reunasta kuorman keskelle

L on jänneväli tuen reunasta, tuen reunaan.

Rauditus jaetaan pistekuorman suhteen keskeisesti, leveydelle b_m , kaavan (6) mukaan (Leskelä, 2008, s.391).

$$\max \{ b_m / 2, b_f \} \quad (6)$$

jossa

b_m on momentin $M_{Ed,F}$ tehollinen jakautumisleveys

$M_{Ed,F}$ on yksittäiskuorman F (viiva- ja tai pistekuorman) aiheuttama taivutusmomentti

b_f on kuormitusalan jakaantumisleveys, joka lasketaan kaavasta 7.

$$b_f = b_0 + 2 * s + h \quad (7)$$

jossa

b_0 on välitön kuormitusleveys

s on tasakerroksen paksuus

h on laatan paksuus

jakoraudituksen pituus lasketaan kaavalla (8).

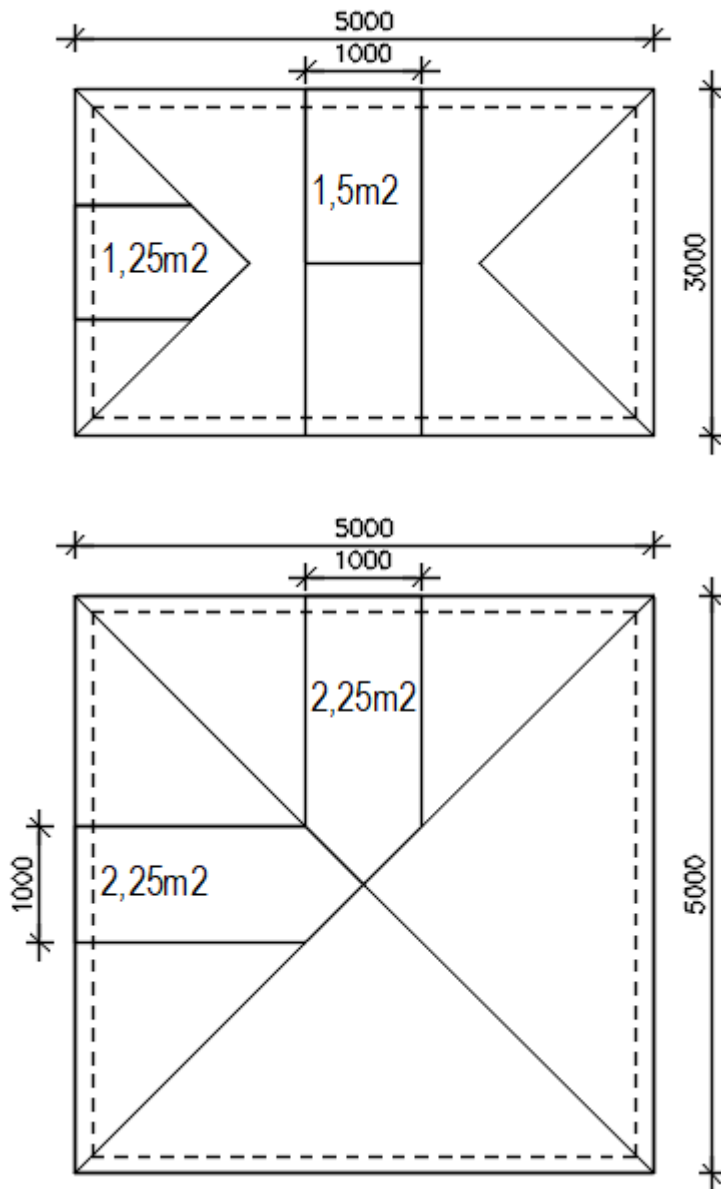
$$b_m + 2 * l_{bd} \quad (8)$$

jossa

l_{bd} on ankkurointipituuden mitoitusarvo

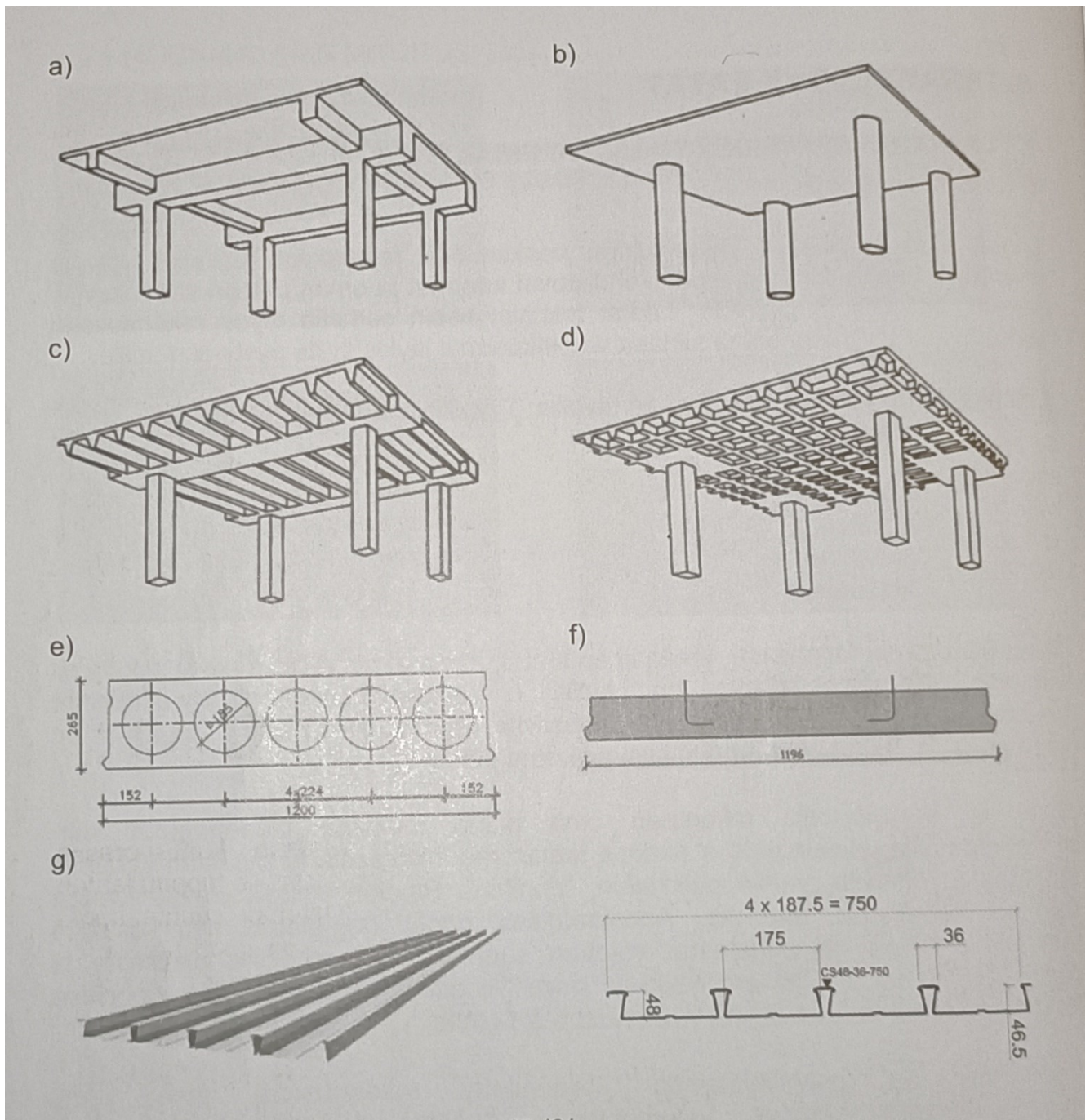
Palkit voivat olla ulokepalkkeja, kaksitukisia palkkeja, jatkuvia palkkeja tai näitten yhdistelmiä. (Nykyri ym., 2013, s.9). Laatat taas voivat olla kaksitukisia laattoja, ulokelaattoja, jatkuvia laattoja tai näitten yhdistelmiä. Suurena erona laatoilla ja palkeilla on, että laatat voivat olla kaikilta reunoiltaan tuettuja eli ristiinkantavia. (Nykyri ym., 2013, s.83).

Ristiinkantava laatta toimii kahteen eri suuntaan eli risteävinä kohtisuorassa suunnassa toisiaan vasten. Kummankin eri suunnan momentit ovat riippuvaisia jäykkyyden ja jännemitan suhteesta. Lyhyemmän jännemitan suunta kerää enemmän momenttia, koska kertymispinta-alat ovat suurempia lyhyemmässä suunnassa. Kuviossa 11 nähdään kuvitteellinen tilanne, jossa on ristiinkantava teräsbetonilaatta eli kaikilta reunoiltaan tuettu.



Kuvio 11. Ristiinkantavan teräsbetonilaatan kuormitusalat.

Kuviossa 12 esitellään erilaisia laattatyyppejä, josta a, b, c ja d kohtien tyyppiset laatat voisivat olla sovellettavissa verkkopaalulaattaperustuksiin. Kohdan b tyyppinen laatta on opinnäytetyön selvityskohteena. Kuvassa näkyvä pilarirakenne kuvaa opinnäytetyössä sovellettavaa paalurakennetta.

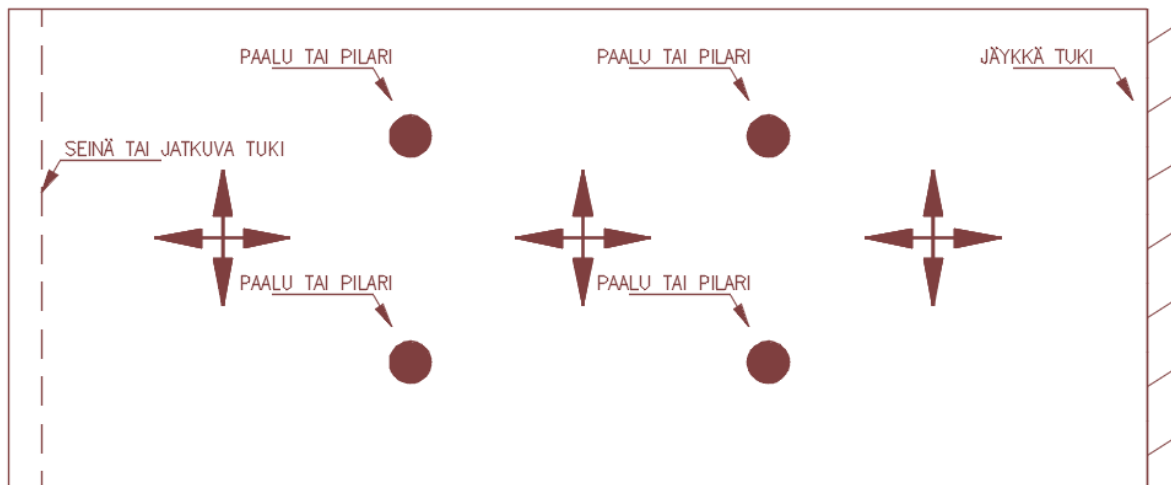


Kuvio 12. Laattatyyppejä (Nykyri ym., 2015, s.8.).

Yleisimmin paalulaattaperustuksissa on käytetty kuviossa 12 esiintyvän kohdan b tyyppistä alapohjaa sillä erotuksella, että paalun kohdalla on monesti tarve laattavahvistukselle. Laattaa on tarve vahvistaa tuen kohdalla sen vuoksi, että laatan lävistyskapasiteetti ei aina riitä lävistysraudoitettunakaan (Nykyri ym., 2015, s.9.).

Paalulaatan voidaan siis kuvitella toimivan kuten pilarilaatan. Paalun yläpinta tukee teräs-betonilaattaa samalla tavoin kuin pilarin yläpinta tukee teräsbetonilaattaa sivu- ja pystysuunnassa. Pilarilaatassa, kuten ei myöskään paalulaatassa, pilarit ja tässä tapauksessa paalut eivät aina riitä jäykistämään rakennetta sivuttaiskuormituksia vastaan. Rakenne on jäykistettävä muulla tavoin. Pilarilaatan jäykistys voidaan toteuttaa vaihtoehtoisesti vinotuilla tai poikittaisseinillä. Paalulaatan tapauksessa vaakavoimat siirtyvät maaperään riittävästi paalun vaipan kautta ja maanpaineen johdosta (Leskelä, 2008, s.454). Joissakin tapauksissa voidaan joutua käyttämään paaluanturoiden ja jatkuvien anturoitten sivupintoja vaakavoimien siirtämisessä ympärillä olevaan maaperään. Maaperä ja täytöt toimivat lisätukena, mikäli paalujen ottama vaakavoimakapasiteetti ei riitä siirtämään kuormituksia yksin rakennusrungolta paalujen kautta maaperään.

Pilarilaatoissa, kuten myös paalulaatoissa, pilarikaistat toimivat yhteen suuntaan kantavina kaistoina. Kuviossa 13 voidaan nähdä myös, että pilarikaistojen väleihin muodostuu ristiinkantavat alueet. Luvun alussa esitettiin yhteen suuntaan kantavan laatan toimintaperiaatetta. Samaa periaatetta voidaan soveltaa paalulaatan paalujen muodostamiin kantaviin kaistoihin. Samalla periaatteella yhteen suuntaan kantavien kaistojen väliin jääviin kenttiin voidaan soveltaa ristiinkantavien kenttien periaatetta.



Kuvio 13. Pilarilaatta (Nykyri ym., 2015, s.10 mukailten).

Laatan kustannukset määräytyvät laattapaksuuden mukaan, joka taas määräytyy yleensä taipumien mukaan (Rakennustieto, 2014, s.11.). Paalulaatta-alapohja on syytä optimoida niin, etteivät laatan taipumarajat ylity. Laattapaksuus pyritään kuitenkin pitämään kohtuullisena, jotta kustannukset eivät kohoa liiallisesti. Betonirakenteen viruma on myös merkittävä vaikuttava tekijä laatan lopulliseen taipumaan. Tämä pyritään ottamaan huomioon laskelmissa.

Normaalissa, laajasti käytetyssä paalulaatta-alapohjassa paalut pyritään sijoittamaan aina suurimpien kuormien kohdalle. Asuinkerrostaloissa paalut sijoitetaan suunnitelmissa aina kantavien seinälinjojen ja pilarien kohdalle. Tällainen perustamistapa on perinteinen tapa perustaa monikerroksisia rakennuksia. Tässä opinnäytetyössä pyritään kuitenkin tutkimaan, voidaanko alapohjalaatta saada kantamaan ja kestämään kuormat niin, ettei paalut olisi-kaan kohdistettu tarkalleen kuormien alle, kuten tämä on edellä pyritty esittämään.

Paalulaatan lävistyskapasiteetti on usein mitoittava tekijä raskaasti kuormitetussa pilarilaatta. Tätä käsitellään seuraavissa luvuissa.

2.7 Verkkopaalulaattaperustus

Verkkopaalutetun laatan tehtävänä on kantaa kaikki laatan päällä olevat kuormat, rakennuksen oma painon ja hyötykuormat. Tutkimustapauksessa paalulaatan täytyy kestää kaikki kuormat riippumatta siitä, missä kohdassa tukiasetelmaa kuorma sijaitsee. Paalulaatan täytyy myös kestää sille syntyvät momentit, leikkausvoimat ja lävistyskuormitukset, näin muutamattamainittakoon. Verkkopaalutettu laatta täytyy olla riittävän vahva, jotta se kestäisi kaikki mitoitustilanteet. Seuraavassa luvussa tutkitaan verkkopaalutetun laatan kestävyyttä ja kapasiteetteja mallilaskelmien muodossa ja pyritään selvittämään verkkopaalutetun laatan käyttökelpoisuutta rakentamisessa.

Verkkopaalutetussa laatussa, optimoinnista huolimatta, laattapaksuus saattaa kasvaa melko suureksi, sillä laattaa kuormitetaan raskaasti rakennuksen omalla painolla sekä hyötykuormilla koko sen käyttöiän ajan. Mahdolliset kuormituksista johtuvat taipumat eivät saa vaikuttaa rakenteen toimintaan, joten taipumaa on rajoitettava.

3 VERKKOPAALUTETUN LAATAN ALUSTAVA MITOITUS

3.1 Paalulaatan paaluvälit

Kuten jo opinnäytetyön alustuksessa kerrottiin, opinnäytetyössä pyritään hakemaan tapaa, jolla kyettäisiin saamaan perustussuunnitelmat valmiiksi nopeasti ja kustannustehokkaasti. Tämä aikaistaa kustannus- ja massalaskentavaiheita, jolloin työmaalla on mahdollista päästä aloittamaan perustustöitä aiempaa nopeammin. FEM-laskentaohjelma on mahdollisesti avainasemassa siinä, miten tehokkaasti suunnitelmat saadaan toteutusmuotoon ajatustasolta.

Opinnäytetyössä hyödynnetään FEM-laskentaohjelman muuntojoustavuutta verkkopaalulaatan koelaskelmissa. Laskentamallissa tukina toimii teräsporapaalua vastaava parametri, jonka R_d -arvona pidettiin 1550 kN/paalu ($R_{Ds220/12,5}$, S460MH). R_{Ds} -paalut ovat poraamalla asennettavia teräspaaluja. 12,5 tarkoittaa seinämän vahvuutta (mm:ä) ja S460MH tarkoittaa paalun teräslajia (SSAB). Laskelmissa käytettyä paalua ei tutkita sen tarkemmin kuin mitä on tarpeen laatan rakennesuunnittelussa ja tutkimuksessa toteuttaa. Paalu itsessään toimii apusuurena laskelmia tuottaessa ja on osatekijä verkkopaaluperustuksen toteutettavuusselvityksessä. Paalua käsitellään sen kantavuuden suhteen, mitä sille on annettu numeerisena arvona. Paaluhattuna toimii vaakaatasoon paalun päälle asennettava standardi RR-paaluhattu 350x350x35 (mm:ä). Paaluhattujen levyt ovat terästä lujuudeltaan S355J2 (SSAB). Paalu ja paaluhattu valittiin SSAB:n RR- ja RD-paalut suunnittelu- ja asennusohjeesta. Koelaskelmissa pyrittiin testaamaan, millaisia kuormituksia paalulle aiheutuu, kun paalut jaetaan verkkomaisesti tasan koko rakennuksen massan alle.

Verkkopaalutuksen paalujakoa, myöhemmin silmäkokoa, voidaan haarukoida mallintamalla Strusoft 3D structures FEM-laskentaohjelmaan, myöhemmin FEM-laskentaohjelma, jousivakiolla varustetut tuet tai mallintamalla ko. materiaalin mukainen tuki. Tässä opinnäytetyössä käytettyyn FEM-laskentaohjelmaan mallinnettiin kiinteä jäykkä tuki, sivuuttaen maaparametrien aiheuttamat mahdolliset muodonmuutokset tutkimuksesta pois. Paalulaatan mitat muodostuvat suunniteltavan rakennuksen ulkomittojen mukaan, huomioituna mahdolliset tonttirajat, jotka kaupunkialueella ovat monesti myös rakennuksen ulkoseinien rajat.

Alustava paalumäärä arvioitiin ensin kuitenkin kokemusperusteella lähtötiedoksi, jota sovelletaan PupaX5 -laskelmassa. Kyseinen laskelma antaa lähtötiedon laattaan kohdistuvasta leikkausvoimasta ja momentista, sekä paalun tukireaktiosta. Lopullista paalujakoa voidaan korjata laskentamalliin ja tihentää, mikäli paalujako ei tuota laskelmissa toivottua tulosta. Toivottu tulos olisi se, että ainakaan paalukuormat eivät ylittyisi, muitten asioiden lomassa.

Opinnäytetyön kohteet ovat oikeita kohteita, vaikkakin hieman muunneltuna. Kohteet valikoituivat sillä perusteella, että ne kuvaavat nykypäivän arkkitehtuurin mittamaailmaa asuinrakentamisessa. Tutkimuskohteiden mitoitus on oleellisessa asemassa siinä, että tutkimustulokset ovat käyttökelpoisia jatkokehitystä ajatellen.

Alla alustavasti haarukoitu käsinlaskentana paaluilla tuettavan alueen paalujakoa x- ja y-suunnassa. Lopullinen käyttökelpoinen paalujako voidaan varmistaa laskentaohjelman tuloksia analysoimalla. Paalujako tarvitaan, jotta ohjelmaan saadaan syötettyä jokin alustava, mutta perusteltu paalujako laskelmia varten.

Tutkimuskohde 2

Tuettavan alueen mitat B*L

40,28 m x 34,01 m

missä

B on paalutettavan alueen leveys

L on paalutettavan alueen pituus

Pinta-alalle täytyy ensimmäisenä laskea alustava paalujako, kappaleen alustus huomioiden.

Paalujakoa voidaan haarukoida kaavalla 9.

$$S = B/J \quad (\text{m}) \quad (9)$$

missä

S on paalutettavan alueen leveys

J on arvioitu alustava paalurivien lukumäärä

Lasketaan alustava paalujakoarvio y-suuntaan kaavalla (9).

$$S = 40 \text{ m} / 15 = 2,68 \text{ m, pyöristys alaspäin} = 2,5 \text{ m}$$

paalujaoksi valitaan $S_y = 2,5 \text{ m}$.

Lasketaan alustava paalujakoarvio y-suuntaan kaavalla (9).

$$= 34,01 \text{ m} / 14 \text{ paaluriviä} = 2,43 \text{ m, pyöristys ylöspäin} = 2,5 \text{ m}$$

paalujaoksi valitaan $S_x = 2,5 \text{ m}$.

Paaluverkon silmäkooksi tässä vaiheessa valitaan tietoisesti $R = 2,5 * 2,5 \text{ (m)}$

Jotta paalumääriä voidaan mahdollisesti vertailla myöhemmässä vaiheessa, täytyy selvittää tuettavan alueen paalumäärä. Todellisessa kohteessa urakoitsijat usein pyytävät arvioimaan ja toimittamaan kappalemääriä, jotta voidaan pyytää tarjous ja tilata paaluja ennakoon.

Tuettavan alueen pinta-ala lasketaan kaavalla (10).

$$A = B \times L \quad (\text{m}^2) \tag{10}$$

missä

A on paalutettava/tuettavan alueen pinta-ala.

Lasketaan paalutettavan alueen pinta-ala A kaavalla (10).

$$A = 40,28\text{m} \cdot 34,01\text{m} = 1369,99\text{m}^2$$

Paalutettavan alueen pinta-alaan perustuva paalumäärä voidaan laskea kaavalla (11).

$$PA_{\text{kok}} = A/R \quad (\text{kpl}) \quad (11)$$

jossa

R on verkkopaalutuksen silmäkoko tai niiden muodostama pinta-ala.

Lasketaan paalutettavan alueen pinta-alaan perustuva paalumäärä kaavalla (11).

$$PA_{\text{kok}} = 218 \text{ kpl noin.}$$

Tästä saadaan laskettua paalujen toteuttama yhteenlaskettu tukireaktio. Tukireaktiota voidaan myöhemmin verrata FEM-laskentaohjelmasta saatavaan kokonaiskuormaan ja sitä kautta arvioida verkkopaalutetun laatan kustannustehokkuutta esimerkiksi käyttöasteen kautta. Asia ei tietenkään ole niin yksinkertainen, mutta teoriassa tutkimustiedon karttuessa, voidaan tehdä tarkempia ja kattavampia johtopäätöksiä perustamistavasta.

Paalujen kokonaiskapasiteetti voidaan laskea kaavalla (13).

$$R_{\text{dkok}} = PA_{\text{kok}} \cdot R_d \text{ (kN)} \quad (13)$$

Lasketaan kokonaiskapasiteetti tutkimuskohteelle 1 kaavalla (13).

$$= 218 \text{ kpl} \cdot 1550 \text{ kN} = 337900 \text{ kN.}$$

Kokonaiskapasiteettia voidaan verrata tarvittavaan, FEM-laskentaohjelmalla laskettuun kokonaiskuormaan, kaavalla (13) laskettuun arvoon. Tästä voidaan jo päätellä kustannusvaihtelu, kun tiedetään paaluanturoin tehtävän kohteen tarvittavat paalumäärät. Tässä opinäytetyössä edellä mainittua vaihtelua ei tehdä aiherajauksen vuoksi. Kustannus vertailu jää lukijan arvioitavaksi.

Tutkimuskohde 1

Tuettavan alueen mitat $B * L$

$$20,51 \text{ m:ä} * 15,26 \text{ m:ä}$$

Lasketaan alustava paalujakoarvio y-suuntaan kaavalla (9).

$$S = 15,26/6 = 2,54\text{m}, \text{ pyöristys alaspäin } = 2,5 \text{ m}$$

Paalujaoksi valitaan alustavasti $S_y = 2,5 \text{ m}$.

Lasketaan alustava paalujakoarvio x-suuntaan kaavalla (9)

$$Y\text{-suuntainen paalujako } 20,51/8 = 2,562, \text{ pyöristys alaspäin } = 2,5 \text{ m}$$

joten

$$R = 2,5 \text{ m} * 2,5 \text{ m}.$$

Lasketaan paalutettavan alueen pinta-ala A tutkimuskohteelle 2, kaavalla (10).

$$A = 322,98 \text{ m}^2$$

Lasketaan paalutettavan alueen pinta-alaan perustuva paalumäärä, kaavalla (11).

$$R_{\text{kok}} = 52 \text{ kpl noin.}$$

Lasketaan paalujen kokonaiskapasiteetti kaavalla (13).

$$= 52 \text{ kpl} * 1550 \text{ kN} = 80600 \text{ kN.}$$

Paalut muodostavat neliönmallisia alueita paalulaattaan, ja opinnäytetyössä niitä kutsutaan verkonsilmiksi. Verkon silmää kuvaa tunnus R , kuten edellä mainittiin. Tämä verkonsilmä-alue muodostaa ristiinkantavan laattakentän. Saman alueen reuna-alueille muodostuu

tukikaistat. Nämä tukikaistat toimivat yhteen suuntaan kantavina kaistoina, jotka raudoitetaan edellä kuvatun mukaisesti.

Voidaan kuvitella, että tälle R-alueelle saattaa kohdistua suuriakin kuormia, jotka kertyvät rakennusrungolta aiheuttaen laatasta mittavia rasituksia. Nämä eteen tulevat rasitukset tulee kyetä hoitamaan paaluanturan kohdalle tehtävin laattavahvistuksin ja laatan raudoituksin.

FEM-laskentaohjelmaan tehdään edellä laskettujen paaluvälien mukainen verkko. Verkon muodostamiin risteyskohtiin kohdistetaan tukipisteet kuvaamaan paaluja. Silmäkooksi verkko-paalutukselle laskettiin karkealla tasolla alustavasti 2,5 m:ä * 2,5 m:ä, kummassakin tutkimuskohteessa.

Tutkimuksen alkuvaiheessa jouduttiin täydentämään tutkimuskysymyksiin kysymys, joka koski paaluväliä. Miten määritellään projektin alkuvaiheessa oikean kokoinen, tyyppinen ja oikeaa materiaalia oleva paalu? Tässä tapauksessa tutkimuskohteeseen arvioitiin soveltuvan teräksinen porapaalu, jonka kantavuudeksi asetetaan 1550kN:a. Paalun ilmoitettu geotekninen kantavuuden maksimiarvo on, SSAB:n mukaa 1770kN:a, korroosiovara huomioiden (SSAB, i,a, s.26). Paalu arvioitiin suureksi, koska jo paksu alapohjalaatta tarvitsee omapainonsa puolesta merkittävästi paalukapasiteettia, ja kuormitustilanteiden arvioitiin rasittavan laattaa merkittävästi.

Arvioidaan alustavasti laattapaksuudeksi tässä vaiheessa 450mm:ä, jonka omapaino on 11,25 kN/m²:ä. Seuraavissa kappaleissa pyritään selvittämään, onko tämä laatan paksuus riittävä.

Selvitetään alapohjalaatan omapaino tuella käyttörajatilassa kaavalla (14).

$$P_{k\text{glaatta}} = h \cdot R \cdot g_{\text{klaatta}} \quad (\text{kN}) \quad (14)$$

joten

$$P_{k\text{glaatta}} = 0,45 \text{ m} \cdot 2,5^2 \text{ m}^2 \cdot 25 \text{ kN/m}^2 = 70,31 \text{ kN}$$

Pelkästään arvioidulla laattapaksuudella ($h=450$ mm:ä) omapaino vie 4,53% paalun kapasiteetista.

3.2 Laattapaksuus

Seuraavaksi tuleekin tarkastella sitä, miten laatta, jonka paksuudeksi arvioitiin 450 mm:ä, kestää ylhäältä alas runkoa pitkin johtuvat kuormat. Selvitetään pahimmassa tapauksessa laatalle aiheutuva leikkausvoima, momentti ja lävistyskestävyys. Tutkimuksessa muodostettiin yhdeksänkerroksisen kerrostalon keskimmäisten seinien kohdalle tilanne, jossa paksuun alapohjalaattaan kohdistetaan täysi kuorma murtorajatilassa niin, että paalut ovat keskellä jänneväliä. Kuormitustilanne on muodostettava keskelle rakennusrunkoa, sillä keskimmäisten seinien kohdalle kertyy eniten kuormaa.

Ensimmäinen tutkielma laattaan ja tukiin kohdistuvista kuormituksista tehtiin PupaX5 -ohjelmalla kokeellisella tasolla. Kuormaksi arvioitiin ja asetettiin 500 kN/m:ä, joka otakuttiin melko suureksi kuormaksi asuinkerrostalon väliseinälle alapohjalaatan tasossa. Arvioidun kuorman tuli olla riittävän suuri, jotta päästiin käsitykseen, millaisista kuormituksista laatasta ja tuen kohdalla ollaan tekemisissä. Lisäksi saatiin pohjaa ja tutkimustietoa kokeelliseen toimintaan ja sen toimivuuteen mahdollista oikeaa kohdetta suunniteltaessa. Kokeen tarkoitus oli selvittää alustavasti ja todella karkeasti, voitaisiinko mahdollisesti edetä valitulla laattapaksuudella loppuun saakka vai tuleeko heti ylitsepääsemättömiä ongelmia. Alustavan mitoituksen tarkoitus on heti nostaa mahdolliset vastaan tulevat ongelmatilanteet. Kuormat ovat PupaX5 -ohjelman testimallissa, jossa ei huomioida laatan ristiinkantavuutta, vaan annetaan arvojen mennä reilusti varmalle puolelle johtuen menetelmän karkeudesta ja ohjelman yksinkertaisuudesta. Laskentaohjelman rajoitteet tulee tietenkin huomioida arvioitaessa tilannetta. PupaX5 -ohjelman koelaskelmat voitaneen jatkossa jättää kokonaan tekemättä ja asettaa FEM-laskentaohjelmaan suoraan riittävät laattapaksuudet ja paalutustiheys, perustuen tähän ja mahdollisiin muihin kokemuksiin.

Koelaskelmia tehtiin kaksi kappaletta. Ensimmäisessä PupaX5 -ohjelman laskelmassa rungolta tuleva kuormitus osuu tukien keskelle. Toisessa laskenta-asetelmassa kuorma

osuu kolmasosapisteeseen tukien väliin. Tällä päästään arvioimaan verkkopaalutetun laatan ja tukien kestävyyttä erittäin alustavalla ja alkeellisella tavalla.

PupaX5 -ohjelmaan syötettiin koekuormiksi seuraavat arvot

Pysyvät kuormat rungolta $V_{kq,runko} = 350 \text{ kN/m}$

Muuttuvat kuormat rungolta $V_{kq,runko} = 150 \text{ kN/m}$

Pysyväkuorma, verkkopaalutetun laatan omapaino $V_{kq,laatta} = 11,25 \text{ kN/m}^2$

Muuttuvakuorma, alapohjalaatalla $V_{kq,laatta} = 2,5 \text{ kN/m}^2$

Suhde on näin ollen 70% pysyviä kuormia ja 30%muuttuvia kuormia, arvioidusta kuormasta.

Laskentatulokset esitetty kuvioissa 14–17.

Palkin tunnus: Palkin tunnus: Koelaskelma 1
 PupaX5 v.1.30 Ins tsto Pauli Närhi Laskennan suoritti:LAI
 Ohjelman käyttöoikeuden omistaja: Contria Oy
 Pys kuorman osavarm kerr= 1,27 Muutt kuorman osav kerr= 1,65
 Jatkuvat kuormat (ominaiskuormia)
 Piste pysyvä(g) muuttuva qk1 muuttuva qk2 kiinteä osa qk2:sta %
 0 11,25 2,5 0 0

Pistekuormat (ominaiskuormia)
 Piste pysyvä(G) muuttuva Qk1 muuttuva Qk2 kiinteä osa Qk2:sta %
 3750 350 150 0 0

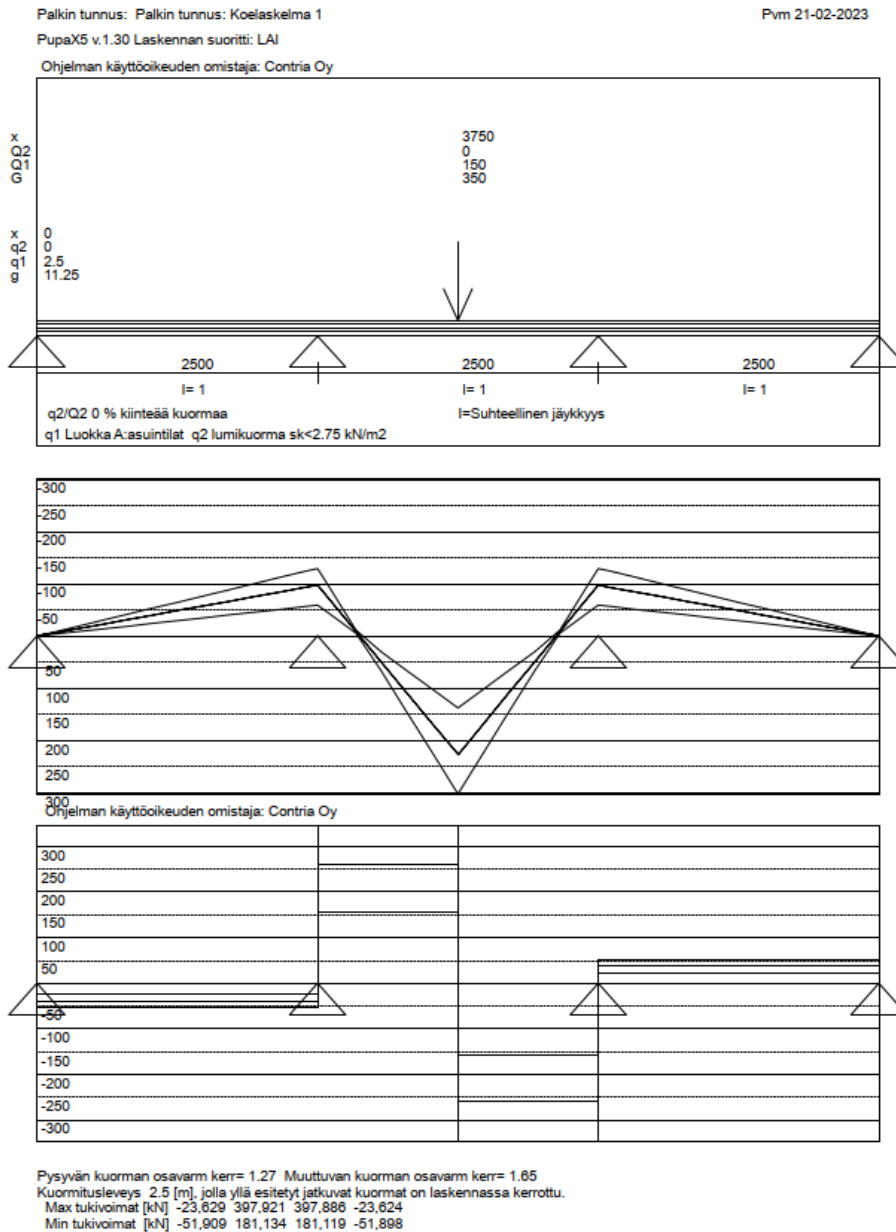
Palkin päiden kiinnitykset 0 / 0
 Kenttien pituudet
 1 2500 2 2500 3 2500

Palkin kenttien suhteelliset jäykkyydet (EI)
 1 1 1

Palkin kokonaispituus= 7500 Kuormituslev= 2500

Ohjelman käyttöoikeuden omistaja: Contria Oy
 Tukir max Tukir min Mt max Mt min Mk max
 -23,63 -51,91 0,00 0,00
 397,92 181,13 -59,07 -129,76 -2,69
 397,89 181,12 -59,02 -129,66 302,74
 -23,62 -51,90 0,00 0,00 -0,01

Kuvio 14. Koelaskelma 1, tulokset numeerinen (PupaX5, 2020).



Kuvio 15. Koelaskelma 1, tulokset graafinen (PupaX5, 2020).

Palkin tunnus: Palkin tunnus: Koelaskelma 2

PupaX5 v.1.30 Ins tsto Pauli Närhi Laskennan suoritti: Palkin mitoittaja: LAI

Ohjelman käyttöoikeuden omistaja: Contria Oy

Pys kuorman osavarm kerr= 1,27 Muutt kuorman osav kerr= 1,65

Jatkuvat kuormat (ominaiskuormia)

Piste	pysyvä(g)	muuttuva	qk1	muuttuva qk2	kiinteä	osa qk2:sta %
0	11,25		2,5	0	0	
7500	11,25		2,5	0	0	

Pistekuormat (ominaiskuormia)

Piste	pysyvä(G)	muuttuva	Qk1	muuttuva Qk2	kiinteä	osa Qk2:sta %
3125	350		150	0	0	

Palkin päiden kiinnitykset 0 / 0

Kenttien pituudet

1 2500 2 2500 3 2500

Palkin kenttien suhteelliset jäykkyydet (EI)

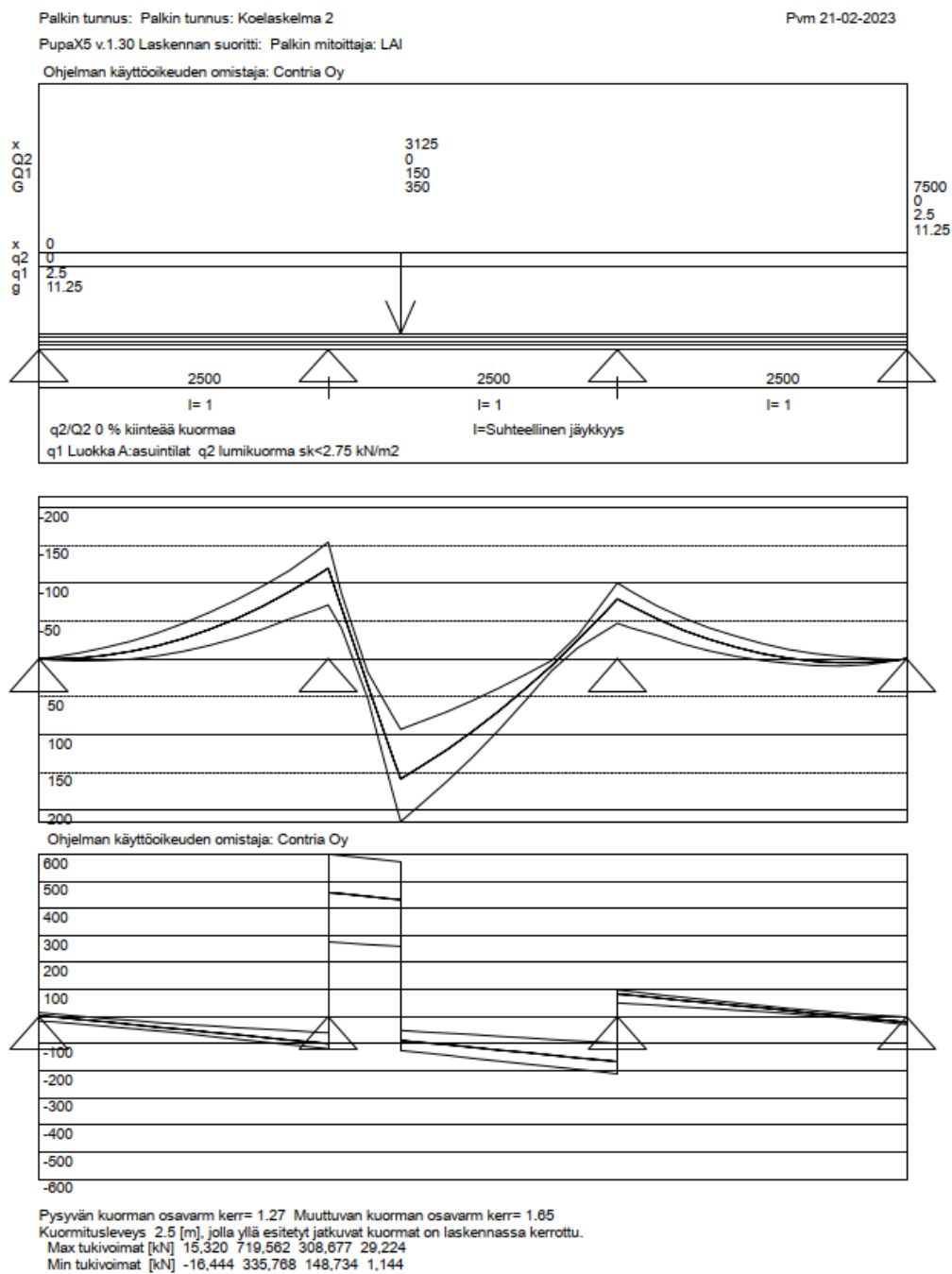
1 1 1

Palkin kokonaispituus= 7500 Kuormituslev= 2500

Ohjelman käyttöoikeuden omistaja: Contria Oy

Tukir max	Tukir min	Mt max	Mt min	Mk max
15,32	-16,44	0,00	0,00	
719,56	335,77	-71,39	-154,28	6,66
308,68	148,73	-46,77	-100,18	214,87
29,22	1,14	0,00	0,00	10,72

Kuvio 16. Koelaskelma 2, tulokset numeerinen (PupaX5, 2020).



Kuvio 17 Koelaskelma 2, tulokset graafinen (PupaX5, 2020).

Jälempänä poimittu maksimiarvot edellä olevista koelaskentatuloksista. Seuraavissa kohdissa tutkitaan alustavasti alla mainittujen lähtötietojen näkökulmasta verkkopaalutetun laatan kapasiteettejä ja sen kestävyyttä mitoituksellisesta näkökulmasta.

Tukireaktio = $P_{Ed}=719,56$ kN.

Laatan taivutusmomentti kentässä $m_{Ed,kenttä}=302,74$ kNm

Laatan taivutusmomentti tuella $m_{Ed,tuki}=154,28$ kNm

Tuloksia avattu seuraavissa kohdissa.

3.3 Paalun tukireaktio

Tukireaktiota tutkittaessa on täyttyvä seuraava ehto kaavasta (15).

$$R_{c;d} \geq P_d, \quad (15)$$

jossa

$R_{c;d}$ on paalun puristuskestävyyden mitoitusarvo (1550 kN/paalu).

Tarkistetaan edellä esitetty ehto kaavalla (15).

$$1550\text{kN} \geq 719,56\text{kN}$$

näin ollen ollaan 46% käyttöasteessa paalun kuormituksessa ja voidaan tässä kohdassa siirtyä tarkempaan mitoitukseen tukireaktion osalta.

3.4 Laatan lävistysmitoitus

Tarkastetaan laatan lävistyskapasiteetti. Lävistysmurrolla tarkoitetaan pistemäisen tuen tai kuorman ympärillä tapahtuvaa paikallista laatan murtumista (by 211 s.64). Tarkastetaan ehto paalun kohdalla raudoittamattomalle laatan lävistykselle kaavalla (16).

$$V_{Rd,c} \geq V_{Ed,0} \quad (16)$$

jossa,

$V_{Rd,c}$ on leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys

$V_{Ed,0}$ on laatan lävistyspiirille aiheutuva leikkausjännitys

Tarkistetaan yllä oleva ehto SKOL B15 -laskentapohjalla, kuviossa 18.

CONTRIA		Rakennelaskelma, tulos					
Rakennuskohde:		Tekijä: Lal	Sivu 1 (1)				
Opinnäytetyö		Päiväys: 5.3.2023					
Työ no:		Sisältö: Verkkoapaalutettu laatta testi laskelma	Sijainti:				
B15 Teräsbetonilaatan lävistyskestävyys			Versio 1.5				
SKOL Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011							
Mitoitustilanne:		Mitat:					
Tyypit: Suorakaidesisäpilari a (Ei käytetä)		Pilari b = 350 mm h = 350 mm D = - mm x _y = - mm x _z = - mm					
Materiaali:		Pilari t _s = 450 mm d _y = 384 mm d _z = 368 mm A _{s,y} = 786 mm ² /m A _{s,z} = 786 mm ² /m e _{y,0} = - mm e _{z,0} = - mm u _{shannys} = 0 mm					
Betoni Lujuus: C30/37 Luokka: 2							
Raudoitus ρ _c = 2400 kg/m ³ f _{yd} = 300 MPa							
Kuormat:							
V _{Ed} = 719 kN							
M _{Ed,y} = 214,87 kNm/m							
M _{Ed,z} = 215 kNm/m							
p _{uLS} = 0 kN/m ²							
Tulokset:							
Tehollinen leikkausvoima määrävässä piirissä V _{Ed,eff} = 719 kN							
Betoniin lävistysleikkauskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,c} = 426 kN		VRd,c < VEd,eff - Tarvitaan leikkausraudoitusta					
Käyttöaste ilman leikkausraudoitusta $\frac{V_{Ed,eff}}{V_{Rd,c}} = 1,69$							
Maksimileikkauskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,max} = 426 kN							
Tarvittavan lävistysraudoituksen pituudet ja määrä							
Käytettävä raudoitustyyppi: taivutetut tangot							
Valitse taivutettujen terästen pituudet alla olevasta taulukosta, kun V _{Rd,c} < V _{Ed,eff} .							
Etäisyys pilarin reunasta (mm)	L _{b,y} (mm)	L _{b,z} (mm)	u' (mm)	V _{Rd,0} (kN)	V _{Ed,eff} (kN)	A _{sv,væd} (mm ²)	Halk (mm)
0,5d	188	657	2904	426	719	722	10 kpl **
1,25d	470	-	5160	757	719	-	kpl
2d	752	-	-	-	-	-	kpl
2,75d	1034	-	-	-	-	-	kpl
3,5d	1316	-	-	-	-	-	kpl
* A _{sv,væd} = Vaadittava teräsala kaikilla sivuilla erikseen. ** kpl = Kullekin sivulle erikseen tarvittavien tankojen lukumäärä. Huom: Tarkista teräsjakovaatimukset EN1992-1-1: 8.2(2).							
Raudoitetun poikkileikkauksen kokonaiskestävyys							
Kokonaisraudoitusmäärä A _{s,tot} = 3142 kN							
Raudoituksen lävistyskapasiteetti V _{Rd,s} = 666 kN							
Lävistysleikkauskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,cs} = 773 kN							
V _{Rd,max} = 852 kN							
Käyttöaste raudoitettuna $\frac{V_{Ed,eff}}{V_{Rd,cs}} = 0,93$ Laatan lävistyskestävyys OK							

Kuvio 18. laatan lävistys (SKOL B15, 2011).

Kuviosta 18 voidaan nähdä tutkittavan ehdon arvot, jotka todetaan kaavalla (16):

$$719,56 \text{ kN} \geq 426 \text{ kN},$$

josta voidaan päätellä tässä vaiheessa, että laatta ei kestä ilman leikkausraudoitusta. Kuviossa 18 lisättiin samalla leikkausraudoitus ja tarkastetaan kaavan (17) ehdon täyttyminen.

$$V_{Rd,cs} \geq V_{Ed,1} \tag{17}$$

jossa:



$V_{Rd,cs}$ on leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys

$V_{Ed,1}$ on laatan lävistyspiirille aiheutuva mitoitusleikkausjännitys.

Tarkastetaan kaavan (17) ehdon täyttyminen.

$$773 \text{ kN} \geq 719,56 \text{ kN},$$

josta voidaan päätellä, että laatta täytyy alustavien laskelmien mukaan raudoittaa lävistystä vastaan. Tuloksen varjolla todetaan, että paalun kohtaan on syytä lisätä laattaan laattavahvistus. Tämä siksi, jotta lävistys saadaan hallintaan mahdollisessa ongelmatilanteessa. Ongelmatilanne muodostuu, mikäli paalu päättyy lähelle 100 prosentin käyttöastetta. Tässä alustavassa laskelmassa pyritään hakemaan suunta rakennepaksumuksille ja betonilujuuksille. Betonin puristuslujuuden kasvattaminen parantaa myös paikallisen läpileikkaantumisen kapasiteettia. Kuviossa 19, tarkastetaan laattavahvistuksen johdosta syntyvä kapasiteetin lisäys (SKOL B15, 2011), kun paalun kohdalle tehdään pieni 150mm:ä paksuinen laattavahvistus. Kuviossa 19 nähdään, että lävistyskapasiteetti kasvaa merkittävästi toimenpiteen johdosta.



		Rakennelaskelma, tulos						
		Tekijä: Lal	Sivu 1 (1)					
Päiväys: 5.3.2023								
Rakennuskohde: Opinnäytetyö	Työ no:	Sisältö: Verkkopaalutettu laatta testi laskelma	Sijainti:					
B15 Teräsbetonilaatan lävistyskestävyys			Versio 1.5					
 Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011								
Mitoitustilanne:		Mitat:						
Tyypit: Suorakaidesisäpilari a (Ei käytä)		Piloni b = 350 mm h = 350 mm D = - mm x _y = - mm x _z = - mm						
Materiaali:		Piloni t _c = 600 mm d _y = 557 mm d _z = 541 mm A _{c,y} = 786 mm ² /m A _{c,z} = 786 mm ² /m e _{y,0} = - mm e _{z,0} = - mm u _{alohennys} = 0 mm						
Betoni Lujuus: C30/37 Luokka: 2 ρ _c = 2400 kg/m ³ Rauditus f _{yd} = 300 MPa								
Kuomat:								
V _{Ed} = 719,56 kN M _{Ed,y} = 214,87 kN m/m M _{Ed,z} = 215 kN m/m p _{uLS} = 0 kN/m ²								
Tulokset:								
Tehollinen leikkauvoima määrävässä piirissä V _{Ed,eff} =		720	kN					
Betonin lävistysleikkaukskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,c} =		705	kN					
Käyttöaste ilman leikkauusraudoitusta $\frac{V_{Ed,eff}}{V_{Rd,c}} =$		1,02						
Maksimileikkaukskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,max} =		705	kN					
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $V_{Rd,c} < V_{Ed,eff}$ - Tarvitaan leikkauusraudoitusta </div>								
Tarvittavan lävistysraudoituksen pituudet ja määrä								
Käytettävä raudoitustyyppi: <input type="text" value="taivutetut tangot"/>								
Valitse taivutettujen terästen pituudet alla olevasta taulukosta, kun V _{Rd,c} < V _{Ed,eff} .								
Etäisyys pilarin reunasta (mm)	L _{b,y} (mm)	L _{b,z} (mm)	u' (mm)	V _{Rd,0} (kN)	V _{Ed,eff} (kN)	A _{c,v,vaad} (mm ²)	Halk (mm)	
0,5d	275	796	783	3596	705	720	640	9 kpl **
1,25d	686	-	-	6890	1351	720	-	- kpl
2d	1098	-	-	10184	1997	720	-	- kpl
2,75d	1510	-	-	-	-	-	-	- kpl
3,5d	1922	-	-	-	-	-	-	- kpl
* A _{c,v,vaad} = Vaadittava teräsala kaikilla sivuilla erikseen. ** kpl = Kullekin sivulle erikseen tarvittavien tankojen lukumäärä. Huom: Tarkista teräsjakovaatimukset EN1992-1-1: 8.2(2).								
Raudoitettun poikkileikkauksen kokonaiskestävyys								
Kokonaisraudoitusmäärä A _{s,tot} =		2827	kN					
Raudituksen lävistyskapasiteetti V _{Rd,s} =		600	kN					
Lävistysleikkaukskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,cs} =		776	kN					
VRd,max =		1410	kN					
Käyttöaste raudoitettuna $\frac{V_{Ed,eff}}{V_{Rd,cs}} =$				0,93	Laatan lävistyskestävyys OK			

Kuvio 19. Laatan lävistys, 150mm:ä laattavahvistus lisätty (SKOL B15, 2011).

Seuraavaksi ehtotarkastus, kaavaa (17) mukailen, kun laattaan on lisätty laattavahvistus.

719,56 kN \geq 705 kN.

Ehdon tarkastus kertoo, että lävistyskapasiteetti kasvaa jo lähelle rajaa, jossa raudoitusta ei tarvitsisi lisätä laisinkaan. Tässä tapauksessa raudoitus on kuitenkin lisättävä. Kuviosta 20 voidaan päätellä, että laattavahvistuksen lisäyksellä saavutetaan paalun maksimi tukireaktiota lähenevä lävistysvoimakapasiteetti kaavan (17) mukaan. Tämä tietenkin edellyttää, että laattaan lisätään lävistyksen vastaanottava raudoitus.

		Rakennelaskelma, tulos					
		Tekijä: Lal	Sivu: 1 (1)				
Rakennuskohde: Opinnäytetyö		Työ no:	Sisältö: Verkkopaalutettu laatta testi laskelma				
Päiväys: 5.3.2023		Sijainti:					
B15 Teräsbetonilaatan lävistyskestävyys Versio 1.5							
 Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankeessa 2008-2011							
Mitoitustilanne:		Mitat:					
Tyyppi: <input type="text" value="Suorakaidesisäpilari"/> <input type="text" value="a"/> (Ei käytetä)		Pileri b = 350 mm h = 350 mm D = - mm x _y = - mm x _z = - mm					
Materiaali:		Pileri t _s = 600 mm d _y = 557 mm d _z = 541 mm A _{c,y} = 786 mm ² /m A _{c,z} = 786 mm ² /m e _{y,0} = - mm e _{z,0} = - mm u _{shennys} = 0 mm					
Betoni Lujuus: C30/37 Luokka: 2 ρ _c = 2400 kg/m ³ Rauditus f _{yd} = 300 MPa							
Kuormat:							
V _{Ed} = 1550 kN M _{Ed,y} = 214,87 kNm/m M _{Ed,z} = 215 kNm/m p _{uls} = 0 kN/m ²							
Tulokset:							
Tehollinen leikkausvoima määrävässä piinssä V _{Ed,eff} =		1550	kN				
Betonin lävistysleikkauskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,c} =		906	kN				
Käyttöaste ilman leikkausraudoitusta $\frac{V_{Ed,eff}}{V_{Rd,c}}$ =		1,71					
M aksimileikkauskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,max} =		906	kN				
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $V_{Rd,c} < V_{Ed,eff}$ - Tarvitaan leikkausraudoitusta </div>							
Tarvittavan lävistysraudoituksen pituudet ja määrä							
Käytettävä raudoitustyyppi: <input type="text" value="taivutetut tangot"/>							
Valitse taivutettujen terästen pituudet alla olevasta taulukosta, kun V _{Rd,c} < V _{Ed,eff} .							
Etäisyys pilarin reunasta (mm)	L _{s,y} (mm)	L _{s,z} (mm)	u' (mm)	V _{Rd,0} (kN)	V _{Ed,eff} (kN)	A _{c,v,vaad} (mm ²)	Halk (mm)
0,5d	275	796	783	3596	906	1560	20 kpl **
1,25d	686	-	-	6890	1735	-	- kpl
2d	1098	-	-	10184	2565	-	- kpl
2,75d	1510	-	-	-	-	-	- kpl
3,5d	1922	-	-	-	-	-	- kpl
* A _{c,v,vaad} = Vaadittava teräsala kaikilla sivuilla erikseen. ** kpl = Kullekin sivulle erikseen tarvittavien tankojen lukumäärä. Huom: Tarkista teräsjakovaatimukset EN1992-1-1: 8.2(2).							
Raudoitettun poikkileikkauksen kokonaiskestävyys							
Kokonaisraudoitusmäärä A _{s,tot} =		6283	kN				
Raudituksen lävistyskapasiteetti V _{Rd,s} =		1333	kN				
Lävistysleikkauskestävyys määrävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,cs} =		1559	kN				
VRd,max =		1812	kN				
Käyttöaste raudoitettuna							
$\frac{V_{Ed,eff}}{V_{Rd,cs}}$ =		0,99	Laatan lävistyskestävyys OK				

Kuvio 20. Laatan lävistys, 150mm:ä laattavahvistus lisätty, Vrd,cs. (SKOL B15, 2011).

Seuraavaksi ehdon tarkastus kaavan (17) mukaan, jossa käytetty kuormana paalun suurinta sallittua geoteknistä kapasiteettia.

$$1550\text{kN} \leq 1559\text{kN}.$$

Kaikesta edellisestä päätellen voidaan todeta, että alustavan mitoituksen näkökulmasta laatta on riittävän paksu, läpileikkausta silmällä pitäen. Laatta voidaan tarvittaessa mitoittaa ja raudoittaa niin, että se kestää paalukapasiteetin suuruisen läpileikkausjännityksen. Edellisen perusteella ollaan tilanteessa, jossa voidaan siirtyä tarkempaan mitoitukseen.

3.5 Laatan taivutusmitoitus

Alustavassa mitoituksessa taivutusmomentti tuella oli suuruudeltaan $m_{Ed,tuki}=154,28\text{kNm}$:ä ja laatan taivutusmomentti kentässä oli suuruudeltaan $m_{Ed,kenttä}=302,74\text{kNm}$:ä. Koska kenttämomentti on suurempi kuin tukimomentti, riittää, että tarkastellaan kenttämomenttia. Mikäli suurempi momenttikuormituksista on hallittavissa laatan kapasiteettien puolesta, voidaan toisenkin, tässä tapauksessa tukimomentin, katsoa olevan hoidettavissa. Ehto tarkastellaan alla. Eurokoodin mukaisessa taivutustarkastelussa täytyy todeta, että laatta kykenee vastaanottamaan kyseisen taivutusmomentin. Alla on esitetty kaavassa (18) kyseinen tarkastus.

$$m_{Rd} \geq m_{Ed} \quad (18)$$

jossa

m_{Rd} on myötömomentti

m_{Ed} on mitoitusmomentti

Alapohjalaatan taivutusmomenttikapasiteetin tutkinta suoritettiin mitoituspohjalla, jonka tulos esitetään kuviossa 21. Taivutusmomenttikapasiteettiä tutkittiin 450 mm:n laattapaksuudella.

Contra/Lal		Rakennelaskema												
		Tekijä: Lal						Sivu: 1						
		Päiväys: 14.6.2021												
Rakennuskohde	Työ nro.	Sisältö:						Sijainti:						
Alustava mitoitus		Alapohjalaatta h.450												
Teräsbetonilaatta, raudoitus														
Lähtöedot														
Korkeus	h =	450	mm	f_{ctd} =	30	N/mm ²	D-mitan laskenta							
Leveys	b =	1000	mm	f_{ctm} =	38	N/mm ²	As _{mit} %	h =	450					
Tehollinen korkeus, arvio	d =	412	mm	f_{td} =	17,00	N/mm ²	mm ²	Ter. Alap.	16					
Mitoituslajanne	Luokka =	2		f_{td} =	2,03	N/mm ²	585	Ter. Yläp.	16					
Teräs		B500B		f_{td} =	1,35	N/mm ²	0,536	Sb Ap	20					
Betoni		C30/37		f_{td} =	500,00	N/mm ²	0,621	Sb Yp	20					
Mitoitusmomentti	M ₀ =	302,74	kNm	f_{td} =	434,78	N/mm ²		Sall. poik.	10					
Osavarmuusluku betoni	$\gamma_{c,2}$ =	1,5		As _{mit} =	620,54	mm ²	0,536	D alap.	412	38	mm			
Osavarmuusluku teräs	$\gamma_{s,2}$ =	1,15		As _{mit} =	16480	mm ²	0,621	D ylempi. alap.	396	54	mm			
				λ =	0,8		2250,00	D yläp.	412	38	mm			
				η =	1		1200,00	D yläpinta. alem.	396	54	mm			
			0,6506859	V _{ed,2} =	225	kN/m								
Momenttikapasiteetti														
ALAPINTA														
Momentti	Mom. jäij.	d-mitta	Tarv. As.	Teräs φ	k-jako	A _s	As. yht.	Mom. kap.	As _{mit}	As _{mit}	Mom. MAX	kg/m ²		
303	303	404	1829	16	100	2011	2011	331	Ok!	Ok!	993	16		
0	-28	404	-158	16	300	670	2681	431	Ok!	Ok!	993	21		
0	-431	404	-2288	6	10000	3	2684	431	Ok!	Ok!	993	21		
0	0	404	2	6	10000	3	2686	432	Ok!	Ok!	993	21		
4436														
YLÄPINTA														
Momentti	Mom. jäij.	d-mitta	Tarv. As.	Teräs φ	k-jako	A _s	As. yht.	Mom. kap.	As _{mit}	As _{mit}	Mom. MAX	kg/m ²		
154	154,28	404	904,21	16	150	1340,41	1340	225,46	Ok!	Ok!	993	10,46		
0	379,74	404	2334,35	16	300	670,21	2011	330,69	Ok!	Ok!	993	15,68		
0	710,43	404	4762,44	6	300	94	2105	345,09	Ok!	Ok!	993	16,42		
0	1055,52	404	8071,11	6	300	94	2199	359,39	Ok!	Ok!	993	17,15		

Kuvio 21. Alapohjalaatan alustavan mitoituksen momenttikapasiteetti.

Tarkastellaan kaavan (18) ehdon täyttymistä, alustavan mitoituksen kannalta.

$$302,74 \text{ kNm} \geq 331 \text{ kNm}$$

Alustavan mitoituksen mukaan laatta kestää epäkeskeisen kuorman aiheuttaman momentin. Laatan taivutusmomentin maksimikapasiteetti on 993 kNm:ä. Seuraavaksi edetään tarkempaan mitoitukseen.

4 VERKKOPAALUTETUN LAATAN TARKEMPI MITOITUS

4.1 FEM-laskentamalli ja kuormat

Laskentamalliin mallinnettiin asuinkerrostalon kantavat rakenteet ja muut oleelliset kuormat kuten tuulikuormat, lumikuormat ja hyötykuormat ja tietenkin kaikki rakenteet. Alla lueteltuna kaikki kuormitustiedot tarkemmin.

Tutkimuskohteiden 1 ja 2 kuormitukset olivat:

Pysyvät kuormat:

Alapohja: Paikallavalulaatta 450 mm $g_{k0} = 11,25 \text{ kN/m}^2$

Välipohja: Paikallavalulaatta 270 mm $g_{k1} = 6,75 \text{ kN/m}^2$

Yläpohja g_{k3} : Paikallavalulaatta 270 mm = $6,75 \text{ kN/m}^2$

Välipohja IV-konehuone: Paikallavalulaatta 270 mm: $g_{k4} = 6,275 \text{ kN/m}^2$

Yläpohja: Kantava laatta 270 mm + kevytsoraeriste + kevytsoralaatta = $6,75 \text{ kN/m}^2 + 2,0 \text{ kN/m}^2 + 0,5 \text{ kN/m}^2 = 9,25 \text{ kN/m}^2$

Kevytsoraeriste = $2,0 \text{ kN/m}^2$

Kevytsoralaatta = $0,5 \text{ kN/m}^2$

Pintarakenne $g_{k6} = 1,0 \text{ kN/m}^2$

Yläpohja IV-konehuone: kermi + kovavilla 30mm + eriste Finnfoam 200 mm + kovauritettu-villa 50mm + OSB-levy + kantava poimulevy = $1,2 \text{ kN/m}^2 + 2,0 \text{ kN/m}^2 = 3,5 \text{ kN/m}^2$

Hyötykuormat:

Yleensä lattia: $q_{k1} = 2,0 \text{ kN/m}^2 + 0,5$ kevyet väliseinät, pistekuorma $Q_{k1} = 2,0 \text{ kN}$ (Luokka A)

Lumikuorma: $s_k = 2,50 \text{ kN/m}^2$ (lumi maassa)

Tuulikuorma: maastoluokka I

Tuulen todennäköisyyskerroin suunnittelukäyttöikä 50 vuotta

Korkeudella $z = 26,6 \text{ m}$ $q_k = 0,932 \text{ kN/m}^2$, seinät yleensä

Iv-konehuone lattia: $q_{k2} = 5 \text{ kN/m}^2$, pistekuorma $Q_{k2} = 7,0 \text{ kN}$ (Luokka E)

Parvekkeet: $q_{k4} = 2,5 \text{ kN/m}^2$, pistekuorma $Q_{k4} = 2,0 \text{ kN}$ (Luokka A)

Kuormat asetettiin tasoille ja rakennusvaippaan tavanomaiseen tapaan, pintakuormina.

Kuormitusyhdistelmiin asetettiin tapaukset niin, että jokainen tuulensuunta huomioitiin erikseen, eri tapauksina.

Murtorajatilan kuormitusyhdistelmä yleinen muoto (kaava 6.10bS RIL 201-1-2017 Osa 0 s.45)

$$1,15 * \left. \begin{matrix} K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum * G_{k,j} + \gamma_P + P + 1,5 * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (19)$$

samassa yhteydessä esitetty vähimmäisarvon kaava (20)

$$1,15 * \left. \begin{matrix} K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} * G_{k,j} \quad (20)$$

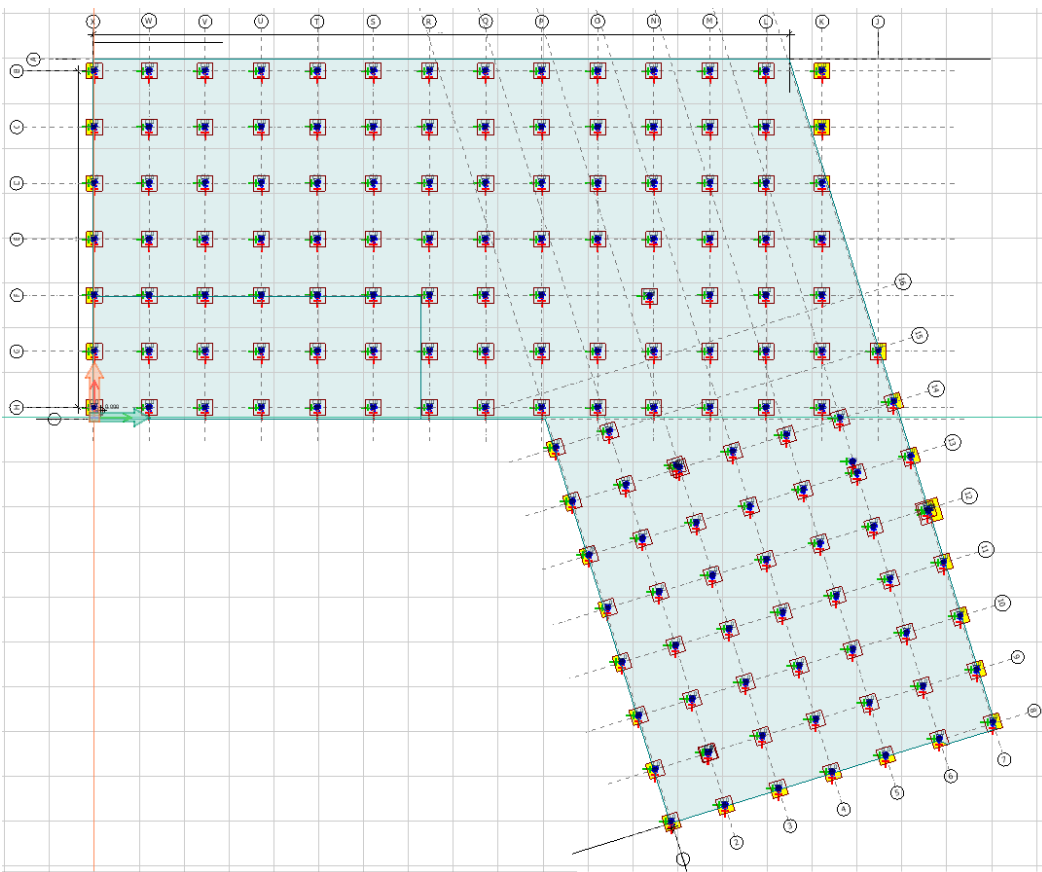
Murtorajatilian kuormitusyhdistelmä kaavan (20) mukaan:

$$=1,1*1,15*Rakenteet + 1,1*1,15*Pysyvät + 1,1*1,5*Hyöty A + 1,1*1,5*Hyöty E + 1,1*1,5*Hyöty F + 0,7*1,1*1,5*Lumi + 1,1*1,5*Tuuli Y ja (-/+) ja Tuuli X (-/+)$$

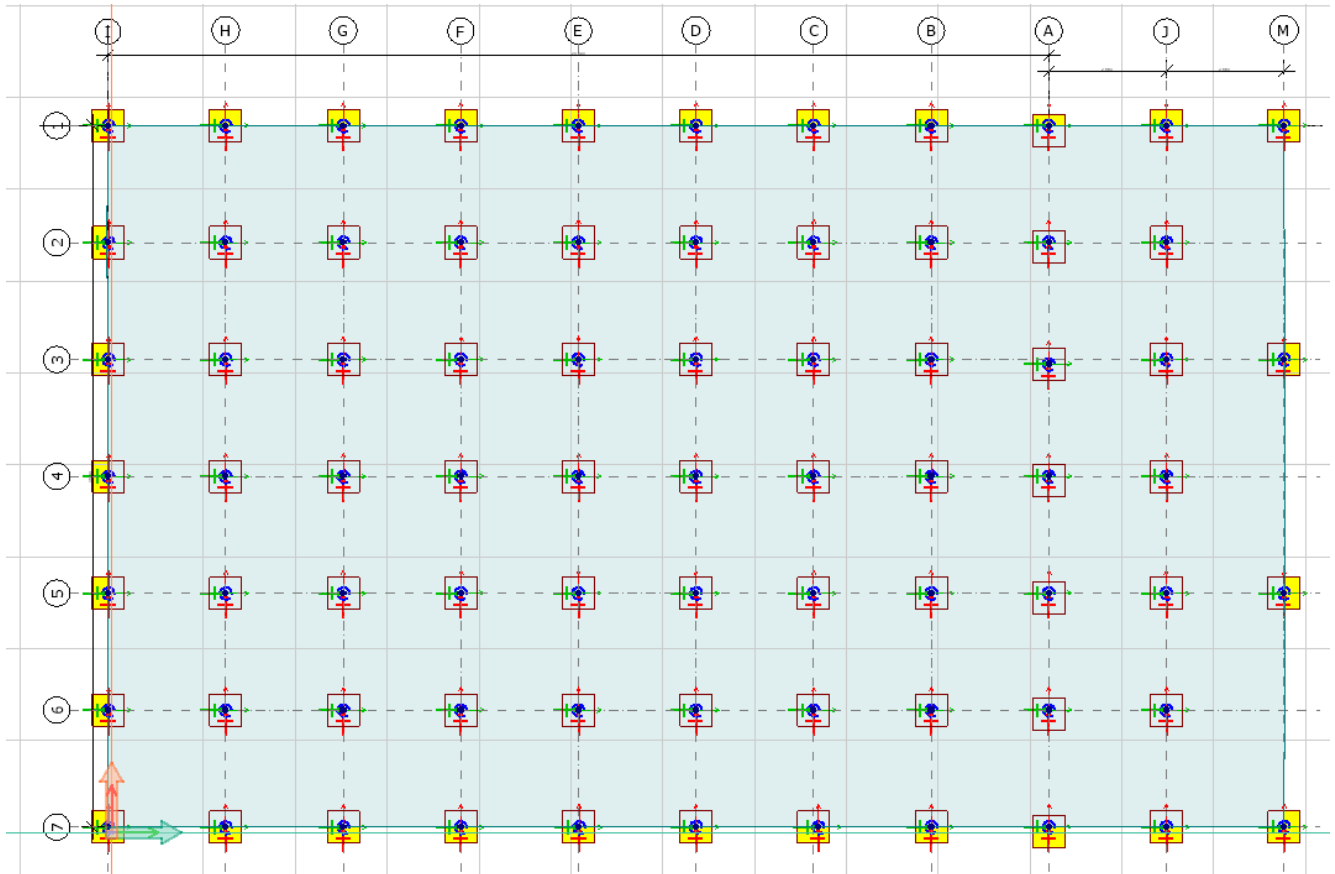
Kuormitusyhdistelmän vähimmäisarvo laskentakaavan 20 mukaan:

$$=1,1*1,35*Rakenteet + 1,1*1,35*Pysyvät.$$

Edellä esitetyt kaavat on syötetty FEM-laskentaohjelmaan, joista on muodostettu eri tapauksia, joissa eri tuulensuunnat huomioituna. Jäljempänä kerrottu hieman lisää laskentamallista. Kuvioissa 22 ja 23 esitetään tukiasetelma, jossa paalut jaettu luvussa 3 mainitun alustavan mitoituksen mukaan, 2,5 m rytmillä x- ja y-suuntaan koko alapohjalaatan alalle.



Kuvio 22. Tutkimuskohde 2:n alapohjan verkkopaalutus (FEM-desing, 2021).

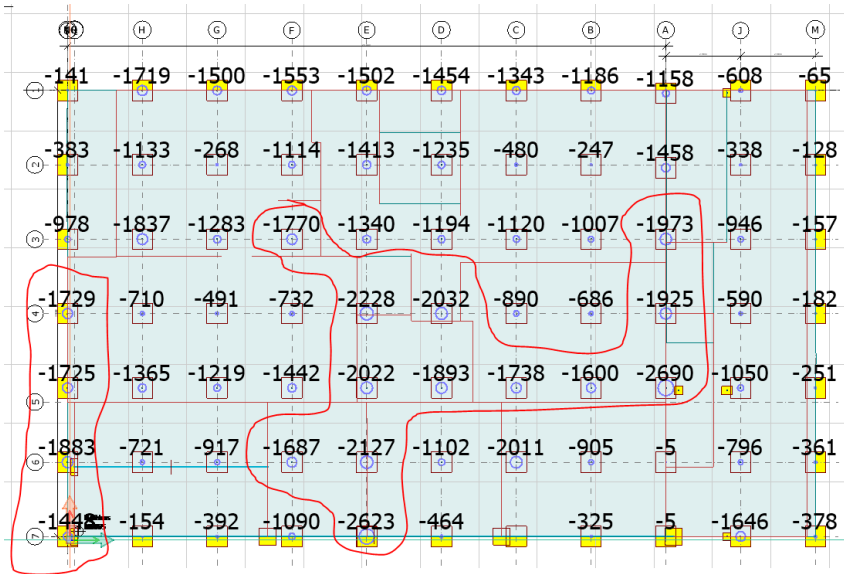


Kuvio 23. Tutkimuskohte 1:n alapohjan verkkopaalutus (FEM-desing, 2021).

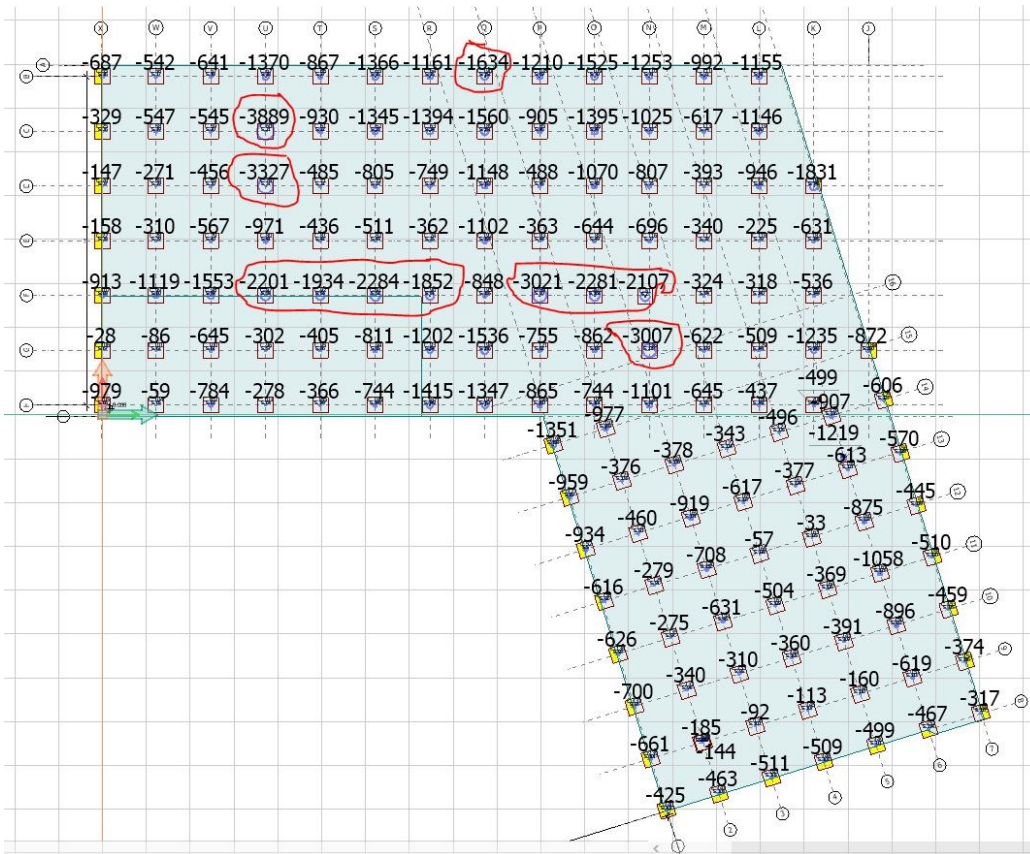
Paalujen kohdalle mallinnettiin myös alustavissa tutkimuksissa esille tullut tarve asettaa paalujen kohdalle laattavahvistus. Laattavahvistuksen korkeus on 350 mm:ä ja leveydeltään 700 mm:ä * 700 mm:ä. Laattavahvistus on osa laattavalua ja sen korkeutta. Laattavahvistukseen asetetaan asianmukainen rauditus laskelmien mukaan ennen valua. Laattavahvistus on yksinkertainen rakenteeltaan ja kasvattaa nopeasti lävistyskestävyyttä edellä kerrotun mukaisesti. Seuraavassa luvussa tutkitaan paalukapasiteettejä.

4.2 Verkkopaalutuksen tukireaktiot

Kuvioista 24 ja 25 nähdään tutkimuskohteiden paalujen tukireaktiot (kN).



Kuvio 24. Tutkimuskohde 1, paalulaatta verkkopaalutus, tukireaktiot (FEM-desing, 2021).



Kuvio 25. Tutkimuskohde 2, paalulaatta verkkopaalutus, tukireaktiot (FEM-desing, 2021).

Tukireaktiot vaihtuvat tietyillä laatan osilla merkittävästi, mikä johtuu siitä, että rakennuksen väliseinät ovat eri mittaisia ja huoneet eri kokoisia. Seinät keräävät kuormia eri tavalla eri

kohdissa. Luvussa 2.1 pyrittiin avaamaan nykyarkkitehtuurin monimuotoisuutta ja siitä joh-
tuvaa kuormien kerääntymistä moninaisella ja usein käsinlaskennalla hankalasti todettavalla
tavalla. Tällaista tutkielmaa olisi miltei mahdotonta suorittaa käsinlaskentana.

Tukireaktioiden suuruudesta voidaan päätellä, että suunnittelija joutuu väistämättä optimoin-
titehtävään paalujen sijoittelun suhteen. Optimointitehtävässä on haettava sopiva paalutus-
verkon silmäkoko sillä perusteella, ettei paalujen tukireaktiot ylittäisi paalulle annettua R_d -
arvoa. Tukireaktioita on tutkittava koko paalutettavalla alueella ja katsottava kuormitukset
niin, että vain muutamia lisäpaaluja olisi lisättävä karttaan.

Paalujen sallittu sijaintipoikkeama on huomioitava lopullisessa mitoituksessa. Mikäli paalu
siirtyy etäämmälle viereisistä paaluista, vaikutus on tukireaktion kasvu jonkin viereisen paa-
lun kohdalla vastaavasti. Opinnäytetyön laskelmissa asiaa ei ole otettu huomioon muuten
kuin mainintana. Alla tarkastettu tarvittava ehto paalukapasiteetin riittävydestä, suurimman
kuorman kohdalla kaavan 15 mukaan.

3889kN > 1550kN

Edellisestä voimme päätellä, että paalukapasiteetti ylittyy ja toimenpiteitä on tehtävä. Paalun
 R_d -arvo ylittyy monikertaisesti, ylitys on $1550\text{kN}/3889\text{kN} = 2,51\text{kr}$.

Paalukuorma ylittyy siis 2,51 kertaisesti. Toimenpiteinä kuvioissa 24 ja 25 punaisella ympy-
röidyillä alueilla voidaan tehdä seuraavia korjaustoimenpiteitä. Paaluväliä on kavennettava
tai vaihdettava suurempi paalu kyseiselle kohdalle. Paalun vaihtaminen ei kuitenkaan mo-
nessakaan tapauksessa ole järkevää jo senkin takia, että se altistaa työvirheille. Toisaalta
erilaisten paalujen asentaminen on paalutusurakoitsijoille arkipäivää, joten mitään uutta ti-
lanteessa ei varsinaisesti ole työmaan kannalta. Mikäli myös lähdetäisiin tekemään paalu-
karttaa, jossa paaluja olisi montaa eri kantavuutta, voitaisiin saavuttaa kustannussäästöjä
materiaalin osalta, ja näin pienennettäisiin rakentamisen hiilijalanjälkeä. Työmaalta saatujen
palautteiden perusteella monenlaisien paalujen sekoittaminen perustuksiin voi hieman hi-
dastaa työtä. Lisäksi materiaalihankinta hieman monimutkaistuu, koska materiaalista on
moninaisempi.

Paalukapasiteetiltaan kantavamman paalun vaihtamisessa on myöskin huomioitava laatan lävistyskapasiteetin tarkastus.

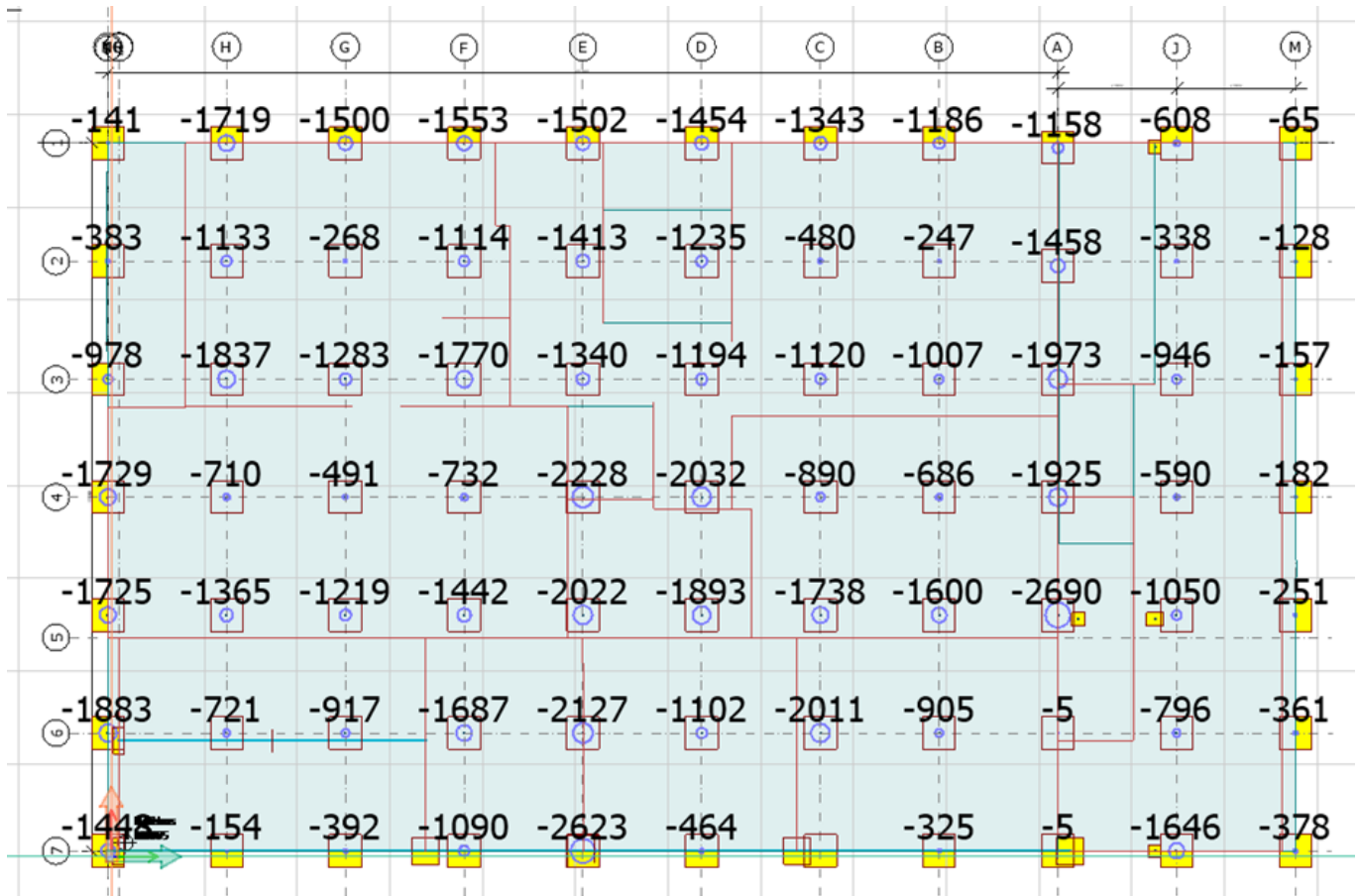
Ylikuormitustilannetta voidaan muuttaa parempaan suuntaan asettamalla suurien kuormien kohdalla lisäpaaluja, jolloin ei tarvitsisi muuttaa koko paalutusverkon tahtia tiheämmäksi. Mikäli koko paalutusverkkoa tihennettäisiin, saattaisi se pienentää turhaan jo entisestään vähän kuormitettujen paalujen kuormitusta, jolloin paalutuksen hyötysuhde heikkenee ja hiilijalanjälki kasvaa. Alimitoitus ei ole milloinkaan järkevää.

Tässä opinnäytetyössä aika oli rajallinen ja optimointitehtävää ei voitu suorittaa loppuun. Jäljempänä on kuitenkin esitetty loppuarvio käsitellystä aiheesta.

4.3 Verkkopaalutetun laatan lävistyskestävyys

Opinnäytetyössä tutkitaan paalutettua laattaa siitä näkökulmasta, että laatan kuormat voisivat sijaita missä tahansa laatan kohdassa ja missä tahansa muodossa, pistemäisenä tai viivamaisena. Kuormat voivat olla siis keskittyneitä tai tasan jakaantuneita. Leskelä kirjoittaa, että leikkauskestävyys ei ole kriittinen tekijä, mikäli kuormat jakaantuvat laatalle tasaisesti (Leskelä, 2008, s.397). Tällä tarkoitetaan sitä, että laattaa on tarkoitus kuormittaa pintakuormana niin, että kuormat jakaantuvat pääosin laaja-alaisesti koko laatan alalle levittyen. Miltei poikkeuksetta esimerkiksi kellareiden paalutetuille alapohjalaatoille annetaan muuttuvan kuorman arvo, joka on $q_k=2\text{kN/m}^2$:ä hyötykuormalle ja $0,5\text{ kN/m}^2$:ä kevyille väliseinille, eli yhteensä $2,5\text{ kN/m}^2$:ä. Tai jos kellarissa on varasto, voidaan sille osalle antaa pintakuormaksi varastokuorman arvo 4 kN/m^2 :ä. Nämä molemmat ovat tavanomaisia pinta-kuormia esimerkiksi asuinkerrostalon alapohjalaatalla. Lisäksi joissakin tapauksissa halutaan jakaa tiloja kevyiden muurattujen väliseinien avulla. Tällöin laatalle muodostuu 3m:n korkuisella muurauksella viivakuorman arvoksi noin 7 kN/m^2 :ä. Kuten edellisestä voidaan päätellä, normaalisti paaluilla kannatetuilla alapohjalaatalla kuormat ovat varsin pieniä. Tutkimuskohteissa lähtökohdat ovat juuri päinvastaiset, miten paalutettua alapohjalaattaa kuormitetaan normaaliolosuhteissa ja mitä Leskeläkin oli luultavasti tarkoittanut. Kuvioista 26

voidaan päätellä, että laskentamallikohteen alapohjalaatan tukireaktiot ovat erittäin poikkeukselliset.



Kuvio 26, Tutkimuskohte 1:n tukireaktiot murtorajatilassa (FEM-desing, 2021).

Tilanne ei ole silti muuttunut lävistysmitoituksen osalta alustaviin laskelmiin verrattuna. Laatatapaksuus on edelleen sama ja laatan lävistyskapasiteetti on raudoitettuna noin 1812 kN:ä. Mikäli paaluja lisättäisiin, tukireaktiotkin pienenisivät ja lävistysmitoitus saataisiin suoritettua. Mikäli tiettyihin paaluväleihin lisättäisiin paalu, paalukuormat voisivat karkeasti puolittua ympärillä olevilla paaluilla, ja kapasiteetit eivät olisi lävistysmitoituksessa enää ongelma ja asia olisi hoidettavissa.

Kuviossa 27 nähdään laatan maksimileikkauskapasiteetti tilanteessa, jossa laattaan on li-
sätty paalun kohdalle laattavahvistus.

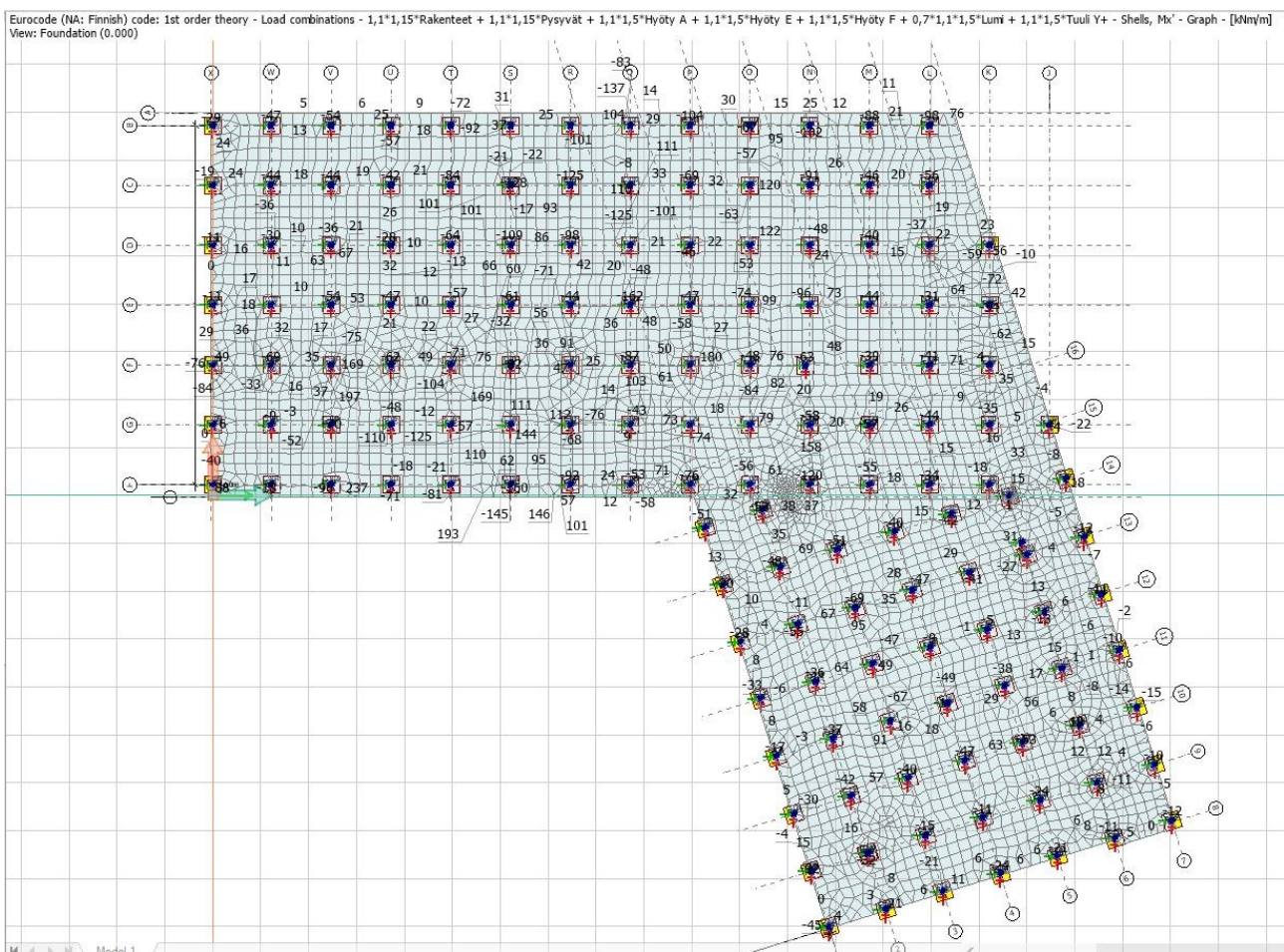
CONTRIA		Rakennelaskelma, tulos						
Rakennuskohde: Opinnäytetyö		Työ no:	Sijainti:					
B15 Teräsbetoni-laatan lävistyskestävyys		Versio 1.5						
SKOL Toteutettu SKOL Eurocode-laskentapohjahankkeessa 2008-2011								
Mitoitustilanne:		Mitat:						
Tyyppi: <input type="text" value="Suorakaidesisäpilari"/> <input type="text" value="a"/> (Ei käytetä)		Piloni b = 350 mm h = 350 mm D = - mm x _y = - mm x _z = - mm						
Materiaali:		Piloni t _s = 600 mm d _y = 557 mm d _z = 541 mm A _{c,y} = 786 mm ² /m A _{c,z} = 786 mm ² /m e _{y,0} = - mm e _{z,0} = - mm u _{vahvistus} = 0 mm						
Betoni Lujuus: C30/37 Luokka: 2 ρ _c = 2400 kg/m ³ Rauditus f _{yd} = 300 MPa								
Kuomat:								
V _{Ed} = 1550 kN M _{Ed,y} = 214,87 kNm/m M _{Ed,z} = 215 kNm/m p _{ULS} = 0 kN/m ²								
Tulokset:								
Tehollinen leikkausvoima määräävässä piirissä V _{Ed,eff} = 1550 kN Betonin lävistysleikkauskestävyys määräävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,c} = 906 kN Käyttöaste ilman leikkausraudoitusta $\frac{V_{Ed,eff}}{V_{Rd,c}} = 1,71$ Maksimileikkauskestävyys määräävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,max} = 906 kN								
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $V_{Rd,c} < V_{Ed,eff}$ - Tarvitaan leikkausraudoitusta </div>								
Tarvittavan lävistysraudoituksen pituudet ja määrä Käytettävä raudoitustyyppi: <input type="text" value="taivutetut tangot"/> Valitse taivutettujen terästen pituudet alla olevasta taulukosta, kun V _{Rd,c} < V _{Ed,eff} .								
Etäisyys pilarin reunasta (mm)	L _{b,y} (mm)	L _{b,z} (mm)	u' (mm)	V _{Rd,0} (kN)	V _{Ed,eff} (kN)	A _{sv,vaad} (mm ²)	Halk (mm)	
0,5d	275	796	783	3596	906	1550	1560	20
1,25d	686	-	-	6890	1735	1550	-	-
2d	1098	-	-	10184	2565	1550	-	-
2,75d	1510	-	-	-	-	-	-	-
3,5d	1922	-	-	-	-	-	-	-
* A _{sv,vaad} = Vaadittava teräsala kaikilla sivuilla erikseen. ** kpl = Kullekin sivulle erikseen tarvittavien tankojen lukumäärä. Huom: Tarkista teräsjakovaatimukset EN1992-1-1: 8.2(2).								
Raudoitettun poikkileikkauksen kokonaiskestävyys Kokonaisraudoitusmäärä A _{s,tot} = 6283 kN Raudoituksen lävistyskapasiteetti V _{Rd,s} = 1333 kN Lävistysleikkauskestävyys määräävässä poikkileikkauksessa V _{Rd,cs} = 1559 kN V _{Rd,max} = 1812 kN								
Käyttöaste raudoitettuna $\frac{V_{Ed,eff}}{V_{Rd,cs}} = 0,99$ Laatan lävistyskestävyys OK								

Kuvio 27. Laatan lävistyskapasiteetti (SKOL B15, 2011).

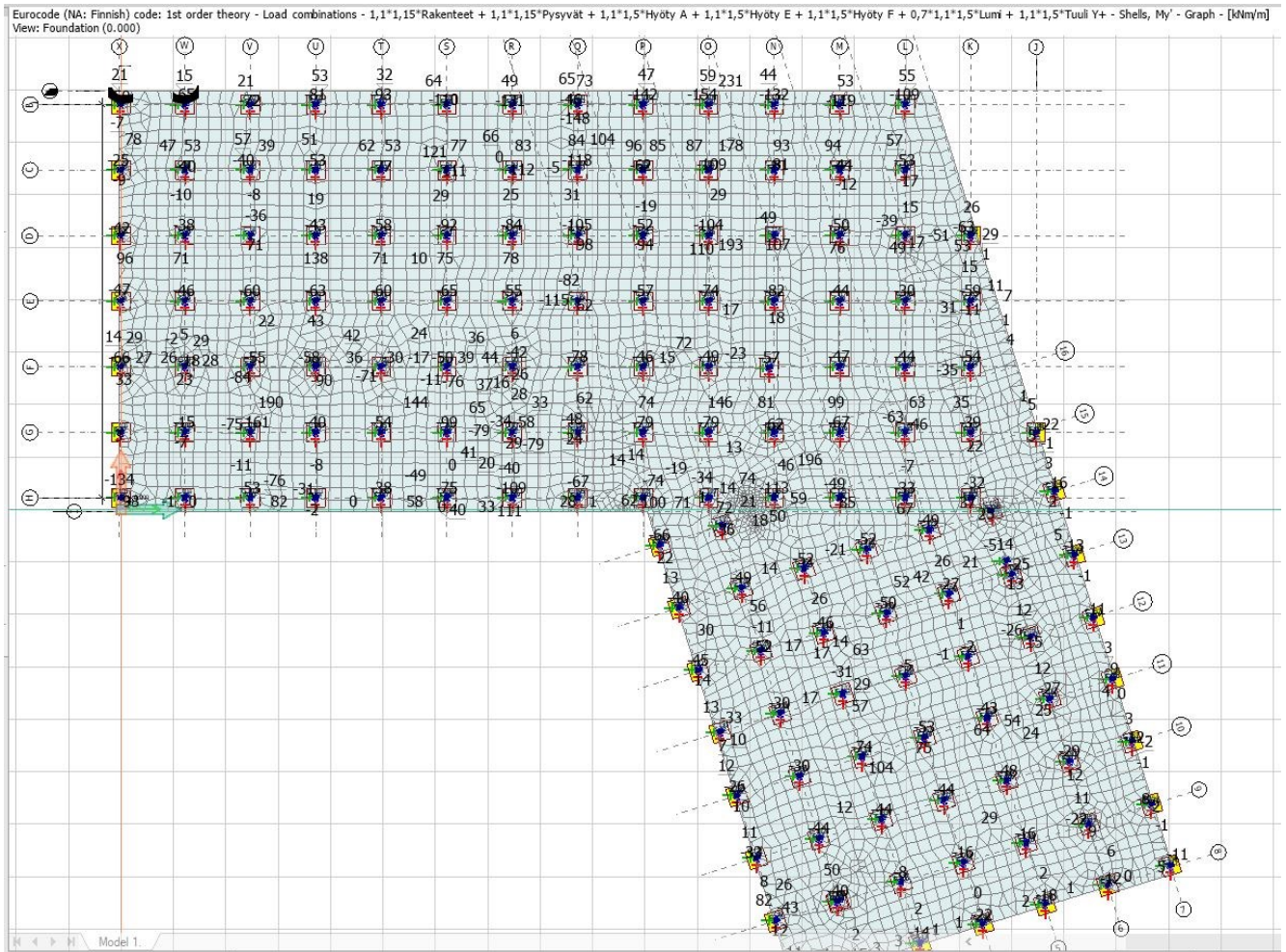
Kuten kuviosta 27 voidaan huomata, lävistystarkastelua ei voida saada kyseisellä paalujaolla hallintaan. Paalujakoa tulisi muuttaa. Seuraavaksi käsitellään taivutusmitoitusta.

4.4 Verkkopaalutetun laatan taivutusmitoitus

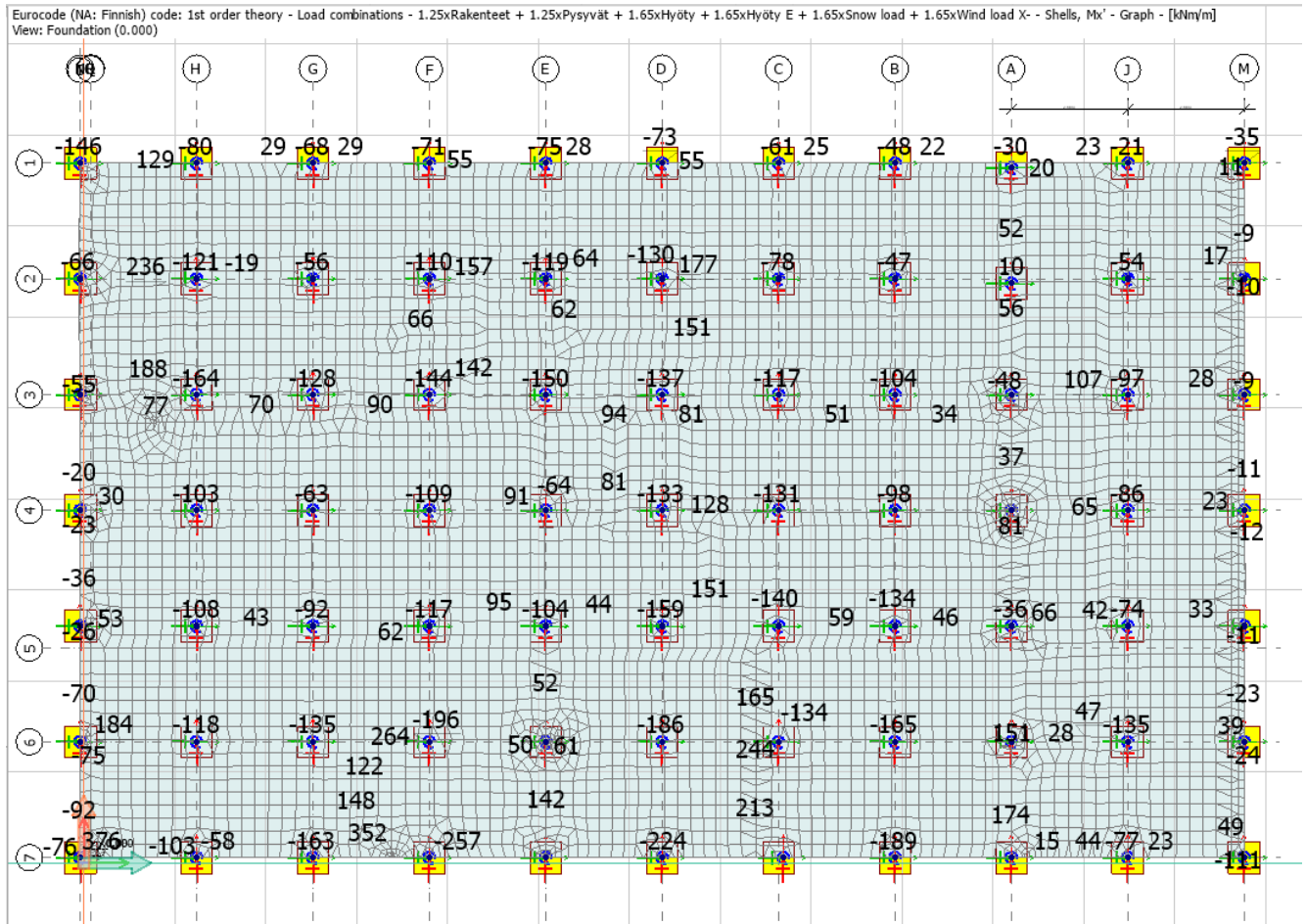
Laatta on mitoitettava niin, että se kestää suurimmatkin taivutusmomentit. Taivutusmomentit eivät ole määräävä tekijä laatan mitoituksessa, mutta asia on syytä tutkia ja mitoittaa niin, että rakenne kestää sille asetetut kuormat. Kuvioissa 28 – 31 nähdään laatan maksimimomentit x- ja y- suunnassa.



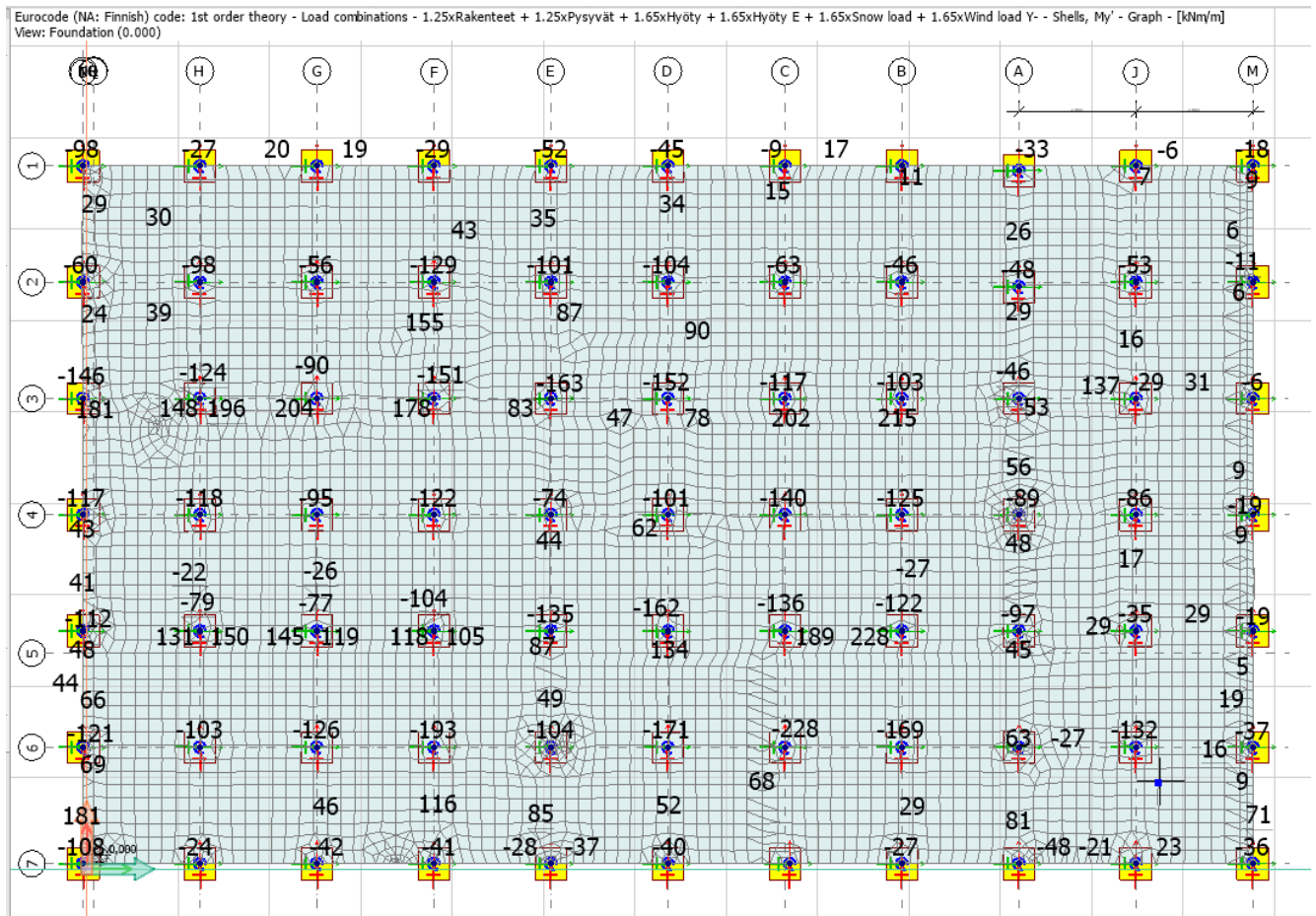
Kuvio 28. Taivutusmomentit X-suunta tutkimuskohde 2 (FEM-desing, 2021).



Kuvio 29. Taivutusmomentit Y-suunta tutkimuskohde 2 (FEM-desing, 2021).



Kuvio 30, Taivutusmomentit X-suunta tutkimuskohde 1 (FEM-desing, 2021).



Kuvio 31. Taivutusmomentit Y-suunta tutkimuskohde 1 (FEM-desing, 2021).

Kuvioista 30–31 nähdään, että taivutusmomentit eivät ole merkittäviä, sillä laatan maksimi taivutusmomenttikapasiteetti ei ole vaarassa ylittyä millään laatan sektorilla. Alustavissa laskelmissa taivutusmomenttikapasiteetiksi saatiin 993 kNm:ä, joka on ehdoton yläraja. Tätä rajaa ei olla lähenemässä, vaikka momentit otettaisiin suoraan tuen kohdalta. FEM-desing tasaa momentit tietyllä metodilla, joten ylliraidoittamista ei tarvitsisi näkyvillä arvoilla miettiä.

Seuraavana tutkitaan taipumia, jotka ovat yleensä määrääviä laatan mitoituksen kannalta. Varsinkin nyt kun kuormat ovat sijoittuneet mielivaltaisiin kohtiin laatan tukisysteemissä.

4.5 Verkkopaalutetun laatan taipuma

Leskelä esittää betoninormeissakin esitetyn kaavan (21), jonka tuloksena saadaan halutulle laatalle hyötykorkeusraja (Leskelä, 2008, s.149). Kaavan (21) antama hyötykorkeus on niin suuri, ettei taipumaa tarvitse tarkastaa.

$$d \geq \frac{k_m * k_\rho}{\delta_{adm} * \beta} * \frac{f_{sk}}{E_s} * L^2; k_m = \frac{1,3 * M_{Ek}}{\gamma_s} \quad (21)$$

jossa

L on jännemitta tai ulokkeen pituus

M_{Ek} on suurin kenttämomentti käyttörajatilassa

M_{Ed} on suurin kenttämomentti murtorajatilassa

δ_{adm} on sallittukokonaistaipuma

γ_s on raudoituksen kokonaisvarmuusluku

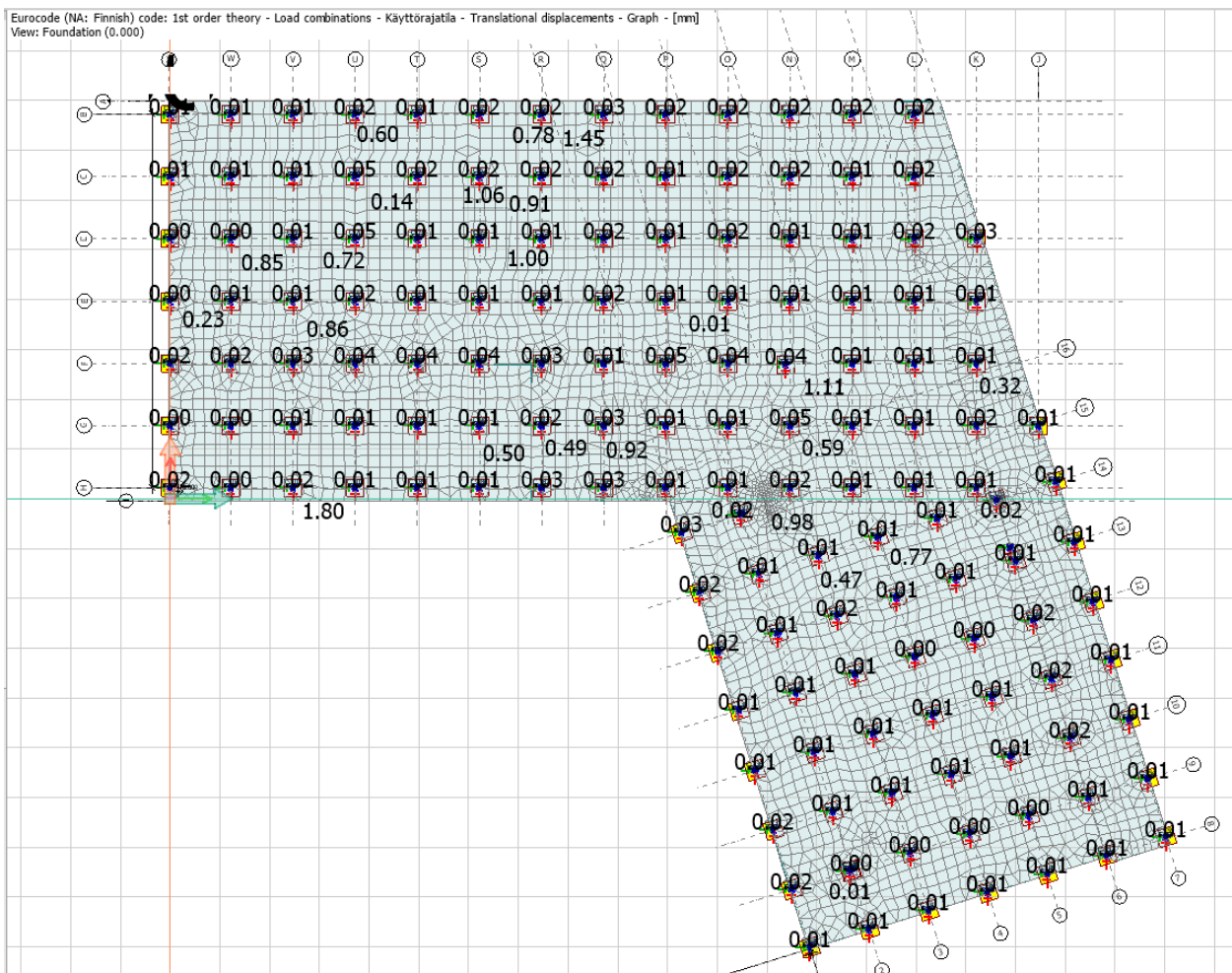
k_ρ valitaan taulukosta 3

β valitaan taulukosta 3

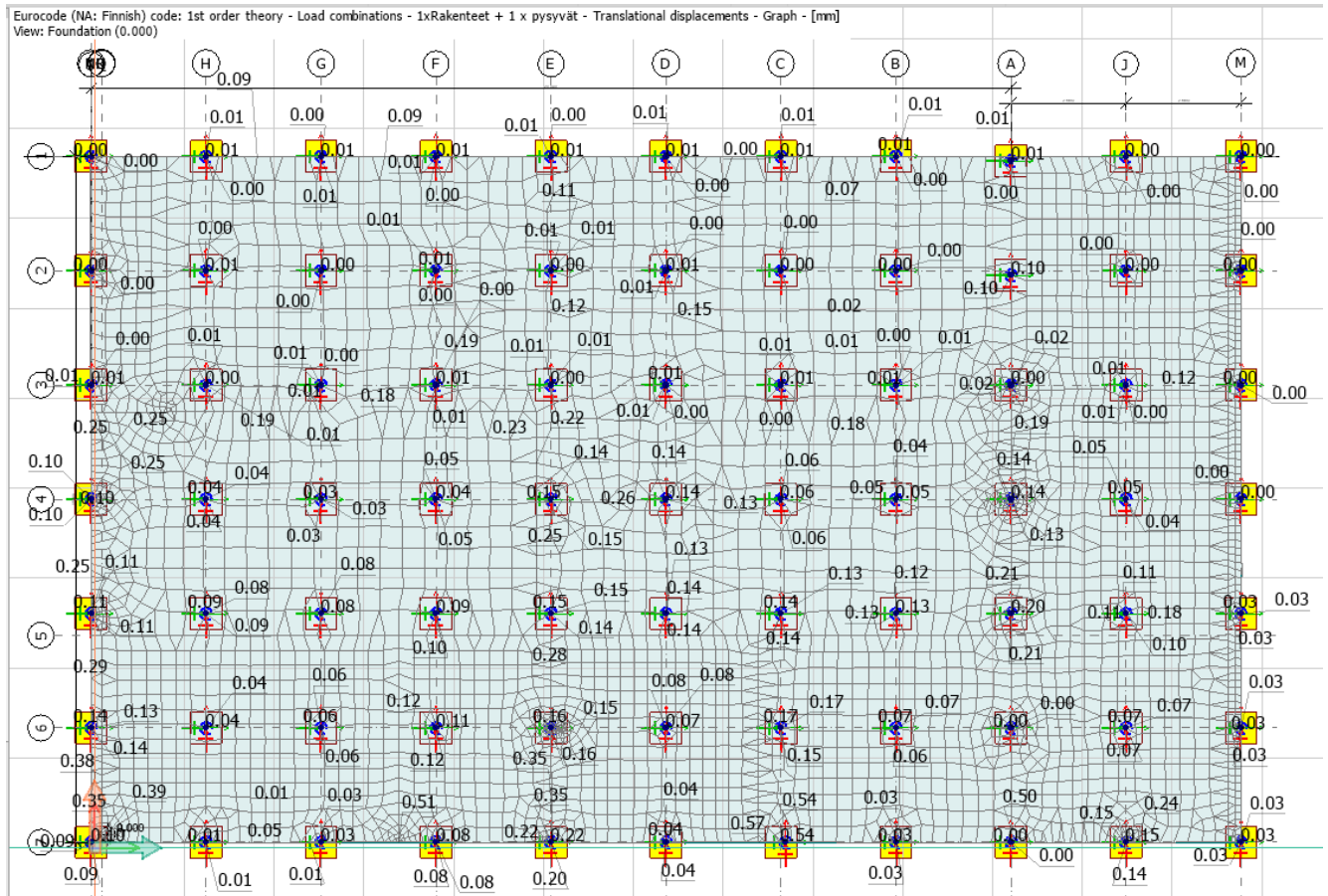
Taulukko 3 kertoimet k_ρ ja β (Leskelä, 2008, s.150 mukaillen).

$\rho = \frac{A_s}{b * d} [\%]$	k_ρ		Rakennetyyppi	β
	C20/25	\geq C30/37		
0,2	1,2	1,0	Uloke	8
0,3	2,1	1,2	Vapaasti tuettu	20
0,5	2,9	2,4	Jatkuvarakenteinen	
1,0	3,7	3,7	-reunakenttä	24
2,0	5,3	4,5	-keskikenttä	28

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan laatan taipumaa eri kuormitusilanteissa ja niiden johdosta. Taipuman tai siirtymien laskentaan hyödynnetään FEM-laskentaohjelmaa ja epälineaarista laskentatapaa. Epälineaarinen laskentatapa huomioi dynaamisen kuormituksen ja dynaamisesti muuttuvan betonin muodonmuutoksen ja halkeilun. Kuvioissa 32 ja 33 nähdään laatan maksimitaipumat.



Kuvio 32. Tutkimuskohde 2 laatan siirtymät (FEM-desing, 2021).



Kuvio 33. Tutkimuskohte 1 laatan siirtymät (FEM-desing, 2021).

Kuten kuvioista 32 ja 33 voidaan päätellä, keskelle kenttään muodostuvat suurimmat taipumat. Kuten alustavan mitoituksen luvussa 2.2 todettiin, taipuma saisi olla 10 mm, ei tutkimuksen mukaan mennä lähellekään vastaavaa taipuma/siirtymärajaa. Suurin taipumasta aiheutuva siirtymä oli tutkimuskohteelle 1 noin 1mm ja tutkimuskohteella 2 noin 2 mm. Voitanee sanoa, että rakenne on taipumarajojen suhteen riittävän jäykkä. Seuraavana on vedetty työn tulokset lyhyesti yhteen.

5 TYÖN TULOKSET

Opinnäytetyössä pyrittiin tekemään perustusrakenteiden suunnittelusta suoraviivaisempaa ja tehokkaampaa ajankäytöllisesti. Työntekovaiheessa kävi ilmi, että laskentamallin tekeminen on kaiken keskiössä, kun ajatellaan suunnitteluajan lyhentämistä ajallisesti. Laskentamallin tekemiseen voi kulua hyvinkin paljon aikaa, joten käytettävän laskentaohjelman käyttökoulutus ja harjoittelu ovat merkittävässä osassa työn sujuvuutta ajatellen.

Paalulaattaperustustapa saattaisi nopeuttaa rakennesuunnittelua, mutta asiasta ei saatu tehtyä tarkkaa vertailevaa analyysiä muihin perustustapoihin nähden aikavertailutiedon puuttuessa. Opinnäytetyön laskentamallia tehtäessä FEM-laskentaohjelmaan huomattiin, että esimerkiksi paalujen sijoittaminen tarkasti paaluanturan oikeisiin paikkoihin on työläämpää, kuin verkkopaalutetun laatan paalujen sijoittaminen aina moduuliverkon risteyskohtiin. Tässä siis verkkopaalutetun laatan suunnittelu oli selkeästi jouhevampaa.

Opinnäytetyön tutkimuksissa havaittiin, että paksun laatan alle verkkomaisesti asennettavat paalut soveltuvat perustusrakenteen toteuttamistavaksi kerrostalorakentamiseen melko hyvin rakennesuunnittelun näkökulmasta. Työssä huomattiin kuitenkin, että rakennusta kantavat raskaasti kuormitetut pilarit aiheuttavat paksulle laatalle paikallisesti kuormituksen, joka vaatii erityistoimenpiteitä, kuten ylimääräisiä paaluja. Tukireaktiot muodostuivat valikoidun paalun R_d -arvoa huomattavasti suuremmaksi, osassa laatan pinta-alaa. Paalukuormaa lisäsi 450 mm:ä paksu paalulaatta, jonka tehtävä oli kantaa kaikki kuormat, jota rakennuksen rungolta aiheutuu. Kertyvän kuorman ero verrattuna normaaliin 200 mm:ä paksuun laattaan on $6,25 \text{ kN/m}^2$:ä, joka taas kertyvänä lisäkuormana paalulle on 16 kN:a. Havaittiin siis, että lisäkuorma paalua kohden ei ollut merkittävä, kun verrataan kuormaa paalukapasiteettiin, joka on 1550 kN:a. On myös syytä todeta, että tarvittavaan 450 mm:ä paksuun laattaan kuluu 225 prosenttia enemmän materiaalia kuin tavalliseen 200 mm:ä paksuun paalulaatta-antura alapohjaan. Materiaalimenekin lisäys ja vertailu muihin perustamistapoihin jää jatkoselvityskohteeksi. Toisaalta monimutkaisessa paaluantura-alapohjassa työmäärä saattaa olla suurempi, joka taas tasaa tilannetta paaluantura-alapohjaa ja verkkopaalutettua alapohjaa vertailtaessa. Verkkopaalurakenne tarjoaa paljon optimointimahdollisuuksia, opinnäytetyössä ei kuitenkaan rajallisen ajan puitteissa ollut mahdollista tutkia asiaa tarkemmin. Kuten todettiin aiemmin, suunnittelija joutuu optimointitehtävään, jossa verkkopaalutetun laatan

paaluväliksi haetaan mahdollisimman sopiva paaluväli ja laattapaksaus. Verkkopaalutettua laattaa voitaisiin soveltaa käytännössä ja varmasti näin on tehtykin, ei tosin ehkä kovin laajasti.

Verkkopaalutettua laattaa tutkittaessa selvisi myös, että on huomioitava tekniikan sijoittaminen laattaan tai laatan alle tapauksesta riippuen. Viemärit, kaukolämpö ja muu laattarakennetta mahdollisesti heikentävä ja ohentava tekniikka olisi sijoitettava niin, ettei se heikennä oleellisesti mahdollisesti raskaasti kuormitettua laattaa. On selvää, että paaluanturaperusteisessa rakenteessa tämä ei ole suurikaan este, sillä talotekniikan sijoittaminen laattaan ei vaikuta rakenteiden kantokykyyn samalla tavalla. Tämä johtuu siitä, että kantavat paaluanturarakenteet ovat usein pieniä ulkomitoiltaan, verrattuna koko alapohjan kattavaan kantavaan laattaan, joka mitoitetaan toimimaan isona kokonaisuutena. Kuormat sijaitsevat paaluanturoiden kohdalla, jolloin talotekniikalla on mahdollisuus väistää rakenteita. Verkkopaalutetussa rakenteessa laattaa kuormitetaan raskaasti missä tahansa laatan kohdassa, johon on voitu joutua sijoittamaan talotekniikkaa. Verkkopaalutetussa rakenteessa tekniikan sijoittaminen osaksi laattaa voi koitua haasteeksi rakenteiden kestävyuden osalta. Esimerkiksi iso kanava tai putki laatan osana heikentää laattarakennetta ja sen kapasiteetteja. Työssä ymmärrettiin, että tekniikka tulisi siis sijoittaa laatan alle tai esimerkiksi rakennuksen alakattorakenteiden yläpuolelle ja tekniikkatiloihin pois laattarakenteesta. Verkkopaalutettua laattaa voidaan kuitenkin pitää varteenotettavana vaihtoehtona joissakin tapauksissa perustamistapana.

Eräs esitetty tutkimuskysymys oli mitä perustussuunnittelussa voitaisiin automatisoida. Tutkimuksen aikana ei tullut eteen mitään uutta sellaista, mitä voitaisiin helposti insinöörin asiantuntijatyön ohessa kehittää automatisoinnin saralla. Vain havainto, että erilaisten suunnitteluohjelmien käyttökoulutus voisi monipuolistaa ja nopeuttaa tehtävän työn läpimenoaikoja. Kouluttaminen ja kouluttautuminen lisää työn mielekkyyttä sekä työhyvinvointia. Työhyvinvointia voi lisätä se, että tekijällä on tunne työn hallinnasta, ja se, että on työtehtäviin nähden oikea osaaminen (Pakka ja Rätty, 2010, s.25 ja s.31). Tämän vuoksi olisi asiallista, että yrityksessä olisi jokin perusrakenne, jossa johdonmukaisesti otettaisiin uusia ohjelmia käyttöön, ja annettaisiin myöskin koulutusta näiden käyttöön. Opinnäytetyön teon yhteydessä opittiin käyttämään FEM-laskentaohjelmaa paremmin ja saatiin varmuutta ja ymmärrystä

ohjelman jatkokäyttöä ajatellen. Lisäksi ymmärrys paaluanturan ja perustusten toiminnasta syventyi osaltaan.

Eräs tutkimuskysymys kuului, voidaanko perustusrakenteita optimoida tarkemmin. Opinnäytetyössä ilmeni eräitä seikkoja, josta voidaan sanoa, että optimointimahdollisuuksia on olemassa perustussuunnittelussa. Esimerkiksi paaluhatun kääntäminen kohtisuoraan puristavaa voimaa vasten, suurentaisi pinta-alaa teräpaalun solmuvoimatarkastelussa. Asiaa ei sen tarkemmin kyetty opinnäytetyön rajallisen ajan puitteissa tutkimaan, mutta se on asia, jota varmasti tullaan jatkossa tutkimaan.

6 JATKOKEHITYSAJATUKSIA

Opinnäytetyön tutkimuskysymyksissä esitettiin pohdinto, että samalla kun kehitetään paalu-perustusrakenteiden suunnittelua, kehitettäisiin yrityksen laskentamenetelmiä ja perustusrakenteiden laskentaprosessia nopeammin ja tehokkaammin toimiviksi. Työssä kävi hyvin nopeasti selväksi, että itse suunnitteluprosessin kehittäminen ja aukikirjoittaminen olisi niin laaja tehtävä, että se olisi voinut hyvinkin olla oma opinnäytetyöaiheensa ja se vastaisi mahdollisesti koulutusjärjestelmän kehittämistä yritykselle. Suunnitteluprosessin kehittämistä ei olisi voinut tehdä varmastikaan tarpeeksi suurella laajuudella ja ajatustasolla, jotta se olisi ollut yrityksen käyttötasoa ajatellen tarpeeksi laaja tai vaativalla tasolla, joten se aihepiiri päätettiin jättää opinnäytetyöstä pois. Opinnäytetyö antoi kuitenkin paljon eväitä työn tekijälle jatkokehittämistä ajatellen, oli kyse sitten perustussuunnittelun kehittämisestä tai suunnitteluprosessin kehittämisestä. Suunnitteluprosessit kehittyvät jokaisella insinöörillä kuin itsestään ja hioutuvat ajansaatossa omannäköisekseen. Lopulta kaikki on kiinni osaamisesta, kiinnostuksesta aiheeseen ja kiinnostuksesta suunnitteluohjelmien hyödyntämisen kehittämisestä. Kehitystasolla ajatuksia jää yrityksen sisäisen koulutuksen ja tiedonjakamisen kulttuurin kehittämistarpeeseen. Tiedonjakamisen kulttuurin kehittyminen johtaisi lopulta kenties suunnitteluprosessien nopeutumiseen. Yritykselle voitaisiin kehittää jonkinlainen suunnitteluprosessikaavio, joka sisältäisi listan esimerkiksi lähtötiedoista kussakin kohdassa prosessia.

Lopuksi haluaisin kiittää erityisesti vaimoani ja perhettäni siitä, että he ovat olleet mukana tukemassa opiskeluani nämä kolme vuotta ja lähes vuoden mittaiseksi venyneen opinnäytetyöprosessin ajan. Haluan kiittää myös työnantajaani siitä, että sain mahdollisuuden työn ohella suorittaa jatko-opintojani ja tehdä opinnäytetyön lähes omaehtoisesti omaa oppimisprosessia ajatellen. Kiitos myös ohjaajalle ja SEAMK:lle. Tästä on hyvä jatkaa eteenpäin.

LÄHTEET

- Böhling, H. (28.01.2011). *M10 Tuulen nopeuspaine*. [tietokoneohjelma]. SKOL.
- Chantelot, G., & Mathern, A. (2010). *Strut-and-tie modelling of reinforced concrete pile caps* [Master's thesis, Chalmers University of Technology]. Chalmers ODR.
<https://hdl.handle.net/20.500.12380/132140>
- Contria (i.a.). <https://www.contria.fi/>
- Leskelä, M. (2008). *Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008 (by210)*. Suomen Betonitieto.
- Nykyri, P., Jauhiainen, J., Tikanoja, T., Mattila, J., & Valjus, J. (2015). *Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2 (by211)*. BY -Koulutus
- Nykyri, P., Jauhiainen, J., Tikanoja, T., Mattila, J., & Valjus, J. (2013). *Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1 (by211)*. BY -Koulutus.
- Pakka, J., & Rätty, T. (2010). *Työstä hyvinvointia*. Työturvallisuuskeskus.
- Insinööritoimisto Pauli Närhi. (2020). PupaX5. (versio 1.30) [tietokoneohjelma].
- Rakennustieto. (2004). Paikallavaletut betonirunkorakenteet (RT 82-10814).
- Ramboll Finland, Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto. (2011). SKOL B15: Teräsbetoni-
laatan lävistyskestävyys: (versio 1.5.0.0) [tietokoneohjelma].
- Riihimäki, T. (2016). *Paalutusohje 2016: PO-2016 (RIL 254-2016)*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL.
- Sainio, S., Honkavuori, R., Kellberg, E., & Lampinen, L. (1995). *Betonirakenteiden oppikirja (by203)*. Suomen Betonitieto Oy
- Solwers. (i.a.) <https://solwers.com/fi/yhtio/>
- SSAB, (i.a.) RR- ja RD-paalut: Suunnittelu- ja asennusohjeet. <https://www.ssab.com/fi-fi/brandit-ja-tuotteet/terasluokat/teraspaalut-ja-paineputket/ladattavat-tiedostot>

- Strusoft. (2010). *User manual FEM-Design*. <http://download.strusoft.com/FEM-Design/inst110x/manual.pdf>
- Strusoft. (2021). *FEM-Design* (versio 21.00.006) [tietokoneohjelma].
- Suomen rakennusmääräyskokoelma. (2004). *Pohjarakenteet. Määräykset ja ohjeet* <https://www.finlex.fi/data/normit/17075-B3s.pdf>
- Suomen rakennusmääräyskokoelma. (2005). *Betonirakenteet: B4*. <https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/b4.pdf>
- Suomen Standardoimisliitto (SFS). (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu: Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC)
- Wallingford Solutions. (10.01.2018). *Where to Apply Strut-and-Tie Modelling* <https://wallingford.com.my/index.php/2018/01/10/where-to-apply-strut-tie-modelling/>
- WSP Finland, Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto. (2016). SKOL B20: Paaluantura, 4-paalua (versio 1.5.2.0) [tietokoneohjelma].
- Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista 447/2014. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140477>
- Böhling. H., Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto. (2011). SKOL M10: Tuulen nopeuspaine. (versio 1.6.0.0) [tietokoneohjelma].