



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELUOHJE

TEKIJÄ:

Milla Valtonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Milla Valtonen			
Työn nimi Paaluperustuksen suunnitteluohje			
Päiväys	19.5.2021	Sivumäärä/Liitteet	51/6
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Sweco Rakennetekniikka Oy			
Tiivistelmä Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda yhtenäinen ja selkeä Eurokoodin mukainen ohje paaluperustusten suunnitteluun. Työhön haluttiin koota kaikki ne asiat, jotka rakennesuunnittelijan täytyy ymmärtää ennen suunnitteluprosessiin ryhtymistä. Tavoitteena oli, että työn pohjalta kokemattomatkin suunnittelijat saisivat hyvän kokonaiskuvan paaluperustusten suunnittelusta. Opinnäytetyössä perehdyttiin paaluperustuksen suunnittelun vaiheisiin, tarvittaviin lähtötietoihin sekä paaluperustuksen rakenteelliseen mitoitukseen. Työ tehtiin pääasiassa rakennesuunnittelun näkökulmasta. Suunnitteluvaiheita tarkasteltiin keräämällä tietoa kirjallisuudesta sekä asiantuntijahaastatteluin. Perustuksen mitoitus toteutettiin vertailemalla eri mitoitusmenetelmiä. Työssä vertailtiin sekä voimassa olevia Vakiopaaluanturat-ohjeita, että tilaajayrityksen sisäisessä käytössä olevaa laskentapohjaa. Työn tuloksena tilaajalle tuotettua yksityistä ohjekorttia tullaan hyödyntämään tilaajayrityksessä yhtenäistämään suunnitteluprosessia. Lisäksi ohje toimii aiheen perehdytyksenä uusille suunnittelijoille sekä muistilistana harvemmin paaluperustuksia suunnitteleville kokeneemmille suunnittelijoille.			
Avainsanat Paaluperustus, paaluantura, paalu, pohjarakentaminen			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Civil Engineering	
Author Milla Valtonen	
Title of Thesis Design Manual for Pile Foundation	
Date 19 May 2021	Pages/Appendices 51/6
Client Organization /Partners Sweco Rakennetekniikka Oy	
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final project was to create a clear and consistent design manual for a pile foundation in accordance with Eurocodes. The purpose was to gather all the main information that structural designer needs to know about the subject. The aim was that even unexperienced designers could get a good overall picture of the subject by reading this thesis.</p> <p>The focus in this thesis was to introduce the steps of designing, structural analysis and all the initial data of designing pile foundations. The topic was discussed from a structural engineer's point of view. These steps were explored and compiled based on literature analysis and interviews of the specialists in the field. The structural analysis was made by comparing the commonly used and current Vakiopaaluanturat -instructions and the internal software of the client organization.</p> <p>As the result of this thesis there was an instruction card for the client organization. This instruction card will be used to standardize the process of designing pile foundations. The instruction card will also be a good orientation for new designers. It will also work as a checklist for experienced designers who rarely work with pile foundations.</p>	
Keywords pile foundation, pile, foundation engineering	

ESIPUHE

Haluan kiittää Sweco Rakennetekniikkaa mielenkiintoisesta aiheesta. Erityinen kiitos Kuopion alueyksikön osastopäällikölle Jari Korhoselle rohkaisusta lähteä tekemään työtä aiheesta, josta aiempi kokemukseni oli hyvin vähäistä. Lisäksi haluan kiittää Oulun yksikössä toimivaa Aleksi Lehtosta, jonka aiheen asiantuntijuudesta, kokemuksesta ja avuliaisuudesta on ollut suuri apu työn tekemisessä ja aiheen kokonaisvaltaisessa henkilökohtaisessa sisäistämisessä.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	8
2	PAALUUN VAIKUTTAVAT VOIMAT.....	9
2.1	Pystykuormat.....	9
2.2	Vaaka- ja momenttikuormat	10
2.3	Sivukuormitus ja sivuvastus	11
2.4	Negatiivinen vaippahankaus	11
2.5	Vetorasitus	11
3	PAALUTYYPIT	12
3.1	Toimintatavan mukaan.....	12
3.1.1	Tukipaalu	12
3.1.2	Kitkapaalu	13
3.1.3	Koheesiopaalu	13
3.2	Asennustavan mukaan	13
3.3	Materiaalin mukaan.....	13
3.4	Paalutyyppin valinta	14
3.5	Lyhyet paalut.....	14
4	PAALUTARVIKKEET	16
4.1	Jatkokset.....	16
4.2	Paalun kärjet	16
4.3	Paaluhatut.....	17
5	PERUSTUSTYYPIT	18
5.1	Pilariantura	18
5.2	Nauha-antura	19
6	PAALUTUKSEN LÄHTÖTIEDOT JA SUUNNITTELIJOIDEN TYÖNJAKO	20
6.1	Pohjatutkimusraportti.....	20
6.2	Paalutyyppi ja kapasiteetti	20
6.2.1	Paalutustyöluokat.....	20
6.3	Sallitut sijaintipoikkeamat	21
6.4	Paalun pituus ja keskiöetäisyydet.....	21
6.5	Paalujen kaltevuus	22
6.6	Paaluanturan reunan etäisyys paaluista	22

6.7	Paalun kiinnitys paaluanturaan.....	22
7	SUUNNITTELUN KULKU.....	24
7.1	Mitoituksen yleiset periaatteet	24
7.1.1	Paalumäärän määrittäminen ja paaluvoimat	24
7.1.2	Anturan koon määrittäminen	25
7.1.3	Ristikkomalli ja sen optimointi	25
7.1.4	Anturan mitoitus	26
7.1.5	Raudituksen suunnittelu	26
7.1.6	Halkeilun tarkastelu.....	27
7.1.7	Mitoitus tarkkeille	27
7.1.8	Piirustukset ja muut tuotokset.....	27
7.1.9	Erikoistapaukset.....	27
7.2	Mitoitus Vakiopaaluanturat-ohjeilla.....	27
7.2.1	Suunnitteluperusteiden tarkastus	28
7.2.2	Paaluanturan valinta.....	28
7.2.3	Rauditus	29
8	MITOITUSMENETELMIEN TARKASTELU	31
8.1	Suunnitteluperusteet.....	31
8.2	Paaluvoimien vertailu	32
8.3	Sauvavoimien tarkastelu.....	32
8.4	Solmujen jännitysten tarkastelu	33
8.5	Raudituksen vertailu.....	34
8.5.1	Vetoraudoitus	34
8.5.2	Ankkurointi	35
8.6	Yhteenveto	35
9	ESIMERKKI CASE: NELJÄ- JA 16-KERROKSIINEN TOIMISTO JA ASUINRAKENNUS	37
9.1	A-osan lähtötiedot.....	37
9.2	B-osan lähtötiedot.....	37
9.3	Paaluanturan mitoitus	38
9.3.1	Paalumäärän määrittäminen	39
9.3.2	Anturan koon määrittäminen	40
9.4	Mitoituksen tulokset	40

9.5	Anturoiden mitoitus Vakiopaaluanturat -ohjeilla	41
9.5.1	Vakiopaaluanturan valinta.....	41
9.6	Mitoitustulosten vertailu	41
9.6.1	Paaluvoimien vertailu	42
9.6.2	TB-paalun paaluanturan vertailu	43
9.6.3	RRs-paalun paaluanturan vertailu.....	43
10	POHDINTA	45
	LÄHTEET	46
	LIITE 1 : VAKIOPAALUANTURAN MITOITUS LASKENTAPOHJALLA.....	47
	LIITE 2 : MITOITETTUJEN ANTUROIDEN RAUDOITUSKUVAT	49

KUVALUETTELO

Kuva 1	Paaluun vaikuttavat voimat (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje 2005, 46)	9
Kuva 2	Vaakakuormien siirtyminen paaluille (Virtanen, Sweco 2019, 3)	10
Kuva 3	Paalujen jaottelu toimintatavan mukaan (Kinnunen, Liikennevirasto 2015, 13.).....	12
Kuva 4	Esimerkki RD-paalun kierreholkki-jatkoksesta (SSAB 2020, 10)	16
Kuva 5	Esimerkkejä teräspaalujen kallio- ja maakärjistä (SSAB 2020, 8)	17
Kuva 6	Esimerkki neljän paalun pilarianturasta	18
Kuva 7	Esimerkki paalutetun nauha-anturan paalujen sijoittelusta (Valtonen 2021, CC BY)	19
Kuva 8	Vakiopaaluanturoiden käyttö seinärakenteen alla. (Betoniteollisuus ry 2020, 8).....	19
Kuva 9	Paalutustyöluokan määräytyminen (RIL 245-2016. Paalutusohje 2016, 102.).....	21
Kuva 10	Ristikkomallin ohjeelliset kulmasuosituksset (Lehtonen 2018, 39)	25
Kuva 11	Esimerkki optimoidusta ristikkomallista (Lehtonen 2018, 71).....	26
Kuva 12	Vakiopaalun RTB250-3 anturoiden valintakuvaaja (85% paalun puristuskapasiteetista) (Betoniteollisuus Ry 2020, 11)	29
Kuva 13	Esimerkki vakiopaaluanturoiden raudoituksesta (Betoniteollisuus Ry 2020, 23.)	30
Kuva 14	Esimerkki vakiopaaluanturan pääraudoitteesta (Betoniteollisuus Ry 2020, 46.).....	30
Kuva 15	Taulukko paaluvoimien vertailusta (Valtonen 2021, CC BY).....	32
Kuva 16	Anturoiden hahmotuskuvat sekä vaakavoimien suunnat	38
Kuva 17	Vinopaalun vaaka- ja pystykapasiteetit	39
Kuva 18	TB-paalun Vakiopaaluanturan paaluvoimien tarkastelu (Valtonen 2021, CC BY).....	43
Kuva 19	RRs-paalun Vakiopaaluanturan paaluvoimien tarkastelu (Valtonen 2021, CC BY).....	43

1 JOHDANTO

Kun parhaat rakennuspaikat on jo käytetty, valikoituu rakennuspaikoiksi yhä useammin myös alueita, joiden pohjaolosuhteet ovat haastavat. Tällöin eivät perinteiset antura- ja laattaperustukset pysty takaamaan rakennukselle tukevaa pohjaa ilman kustannuksiltaan turhan suuria massanvaihtoja. Tällöin valitaan perustamistavaksi paaluperustus, jossa rakenteet tukeutuvat yleensä kantavaan kerrokseen asti asennettujen teräs tai teräsbetonipaalujen päälle valettavaan anturaan. Rakenteiden aiheuttamat ja niihin kohdistuvat kuormitukset siirtyvät paaluanturalle, joka jakaa kuormitukset paaluille, jotka taas siirtävät kuormat kantavalle pohjamaalle.

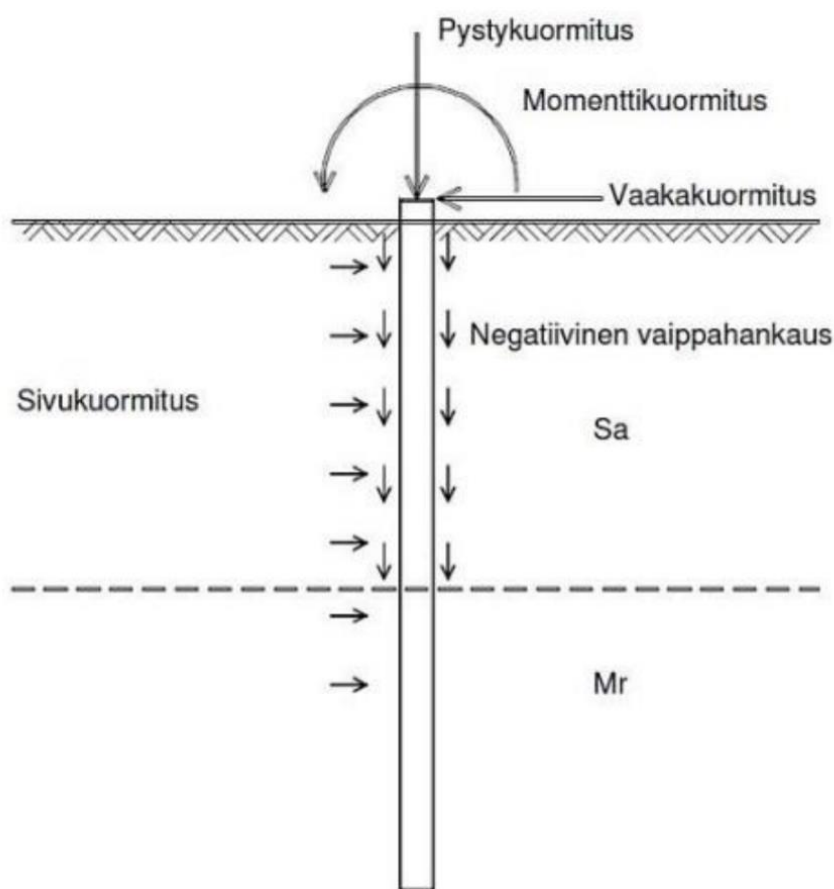
Työn tarkoituksena on selkeyttää ja helpottaa paaluperustusten suunnittelua luomalla yhtenäiset ohjeet paaluperustuksen suunnittelusta, sekä luomalla tilaajan yksityiseen käyttöön ohjekortti. Työn tilaajana toimii Sweco Rakennetekniikka Oy, jonka aiemmin teettämään Aleksi Lehtosen diplomityöhön (Eurokoodin mukaisen laskentamenetelmän kehittäminen paaluanturan mitoitukseen) tämä työ vahvasti pohjautuu.

Työhön kootaan suunnittelun teoria- ja lähtötiedot, mitoituksen periaatteet, eri mitoitusmenetelmät sekä niiden vertailu esimerkitapauksen muodossa. Työn on tarkoitus olla tiivis kokonaisuus, jonka pohjalta kokematonkin suunnittelija saa käsityksen kyseisestä suunnittelutehtävästä.

2 PAALUUN VAIKUTTAVAT VOIMAT

Paalukuormat muodostuvat paaluille eri suunnista tulevista ulkoisista kuormista. Paaluanturan tehtävänä on johtaa rakenteen yläpuoleiset pysty-, vaaka- ja momenttikuormat paaluille. Lisäksi paaluun vaikuttaa erilaiset maasta paaluun kohdistuvat voimat. Kuvassa 1 on esitetty paaluun vaikuttavat voimat.

Paalut ja paaluryhmät suunnitellaan siten, että paalujen taivutusrasitukset pyritään pitämään mahdollisimman pieninä. Toisin sanoen paalut tuleekin ensisijaisesti suunnitella ottamaan vastaan paalunsuuntaisia kuormituksia. (Kujala, Liikennevirasto 2005, 81.)



Kuva 1 Paaluun vaikuttavat voimat (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje 2005, 46)

2.1 Pystykuormat

Paaluille tuleva pystykuormitus muodostuu pääasiassa paaluanturan paalulle johtamista pysyvistä ja muuttuvista kuormista. Pääasiallisia pysyviä kuormia ovat rakenteiden omapainot. Muuttuvia kuormia taas ovat erilaiset hyötykuormat kuten ihmisten, lumen tai erilaisten koneiden aiheuttamat kuormitukset. (RIL 201-1-2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat 2017, 63.)

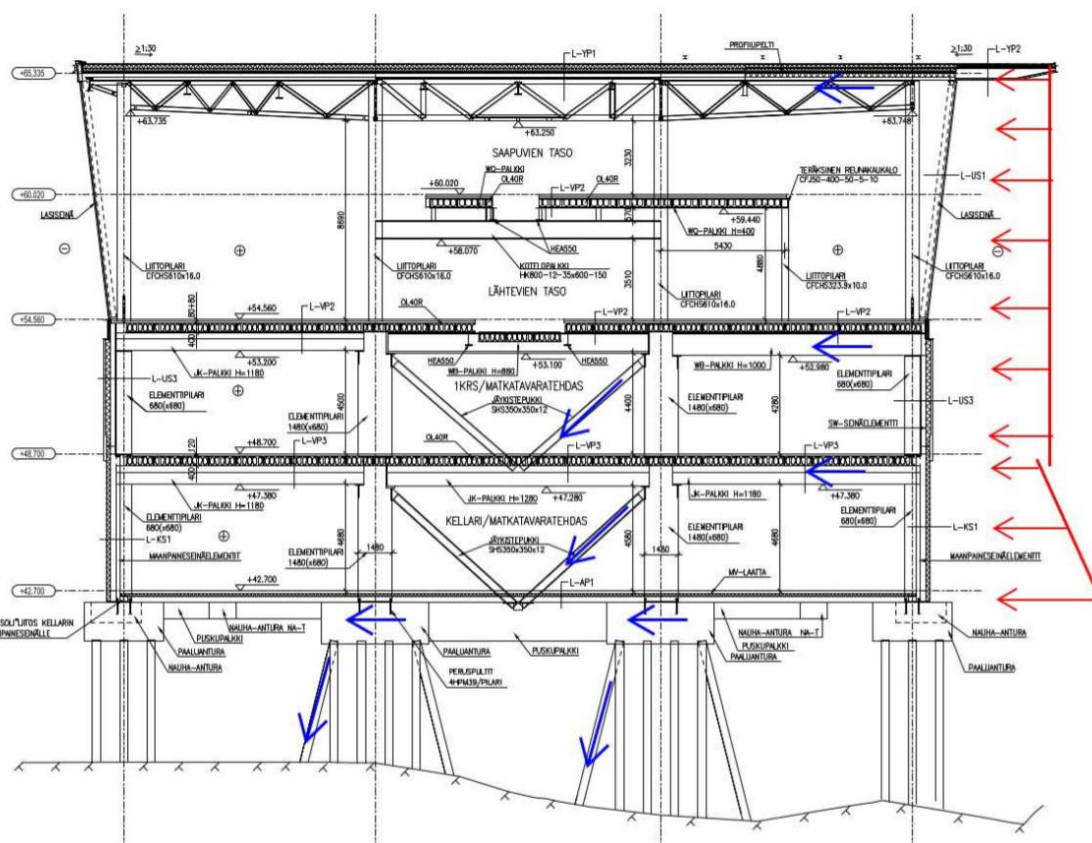
Pysyvää pystykuormitusta voidaan siirtää vain karkearakeisiin maakerroksiin, moreenikerroksiin tai kalliolle. Hetkellisiä pystykuormia voidaan sen sijaan siirtää myös muille maakerroksille. Toisin sanoen savi-, turve- tai liejupehmeiköille perustettavat paalurakenteet, jotka aiheuttavat pysyviä kuormia, tulee perustaa tukipaaluille. Kuitenkin jos pehmeiden kerrosten välissä on riittävästi sopivan

raekoon ja tiiviyn omaavaa maakerros, niin voidaan käyttää myös kitkapaaluja. (Kujala, Liikennevirasto 2005, 81.)

2.2 Vaaka- ja momenttikuormat

Momenttikuormaa voi kohistua paaluihin, jos ne ovat jäykästi kiinni yläpuoleisessa epäkeskeisesti kuormitetussa anturassa. Yksittäisen paalun momenttirasitusta voi aiheuttaa myös paalun yläpäähän vaakakuormat, paalun käyryys sekä maan sivukuormitus. (Kujala, Liikennevirasto 2005, 81.)

Vaaka- ja momenttikuormituksia voidaan siirtää paaluilla vain vähäisessä määrin, koska ne jakautuessaan maakerrokseen aiheuttavat paaluille taivutusrasitusta (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005, 47). Vaakakuormia otetaan vastaan vinopaaluilla tai hyödyntämällä pystysuorien paalujen sivuvastusta. Mahdollisia vaakakuormien aiheuttajia ovat esim. tuuli, maanpaine, rakenteiden vinous sekä törmäykset. (Virtanen, Sweco 2019, 3.) Kuvassa 2 on esitetty vaakakuormien siirtyminen rungolta paaluille.



Kuva 2 Vaakakuormien siirtyminen paaluille (Virtanen, Sweco 2019, 3)

Suunniteltaessa vaakakuormia vastaanottavia vinopaaluja, tulee huomioida, että paalujen kapasiteetti pystykuormille on pienempi kuin pystysuorilla paaluilla ja niihin kohdistuu maakerrosten muodonmuutosten aiheuttamia rasituksia. Vinopaaluilla vastaanotettavat vaakakuormitukset aiheuttavat paaluperustukselle myös siirtymää sekä kokonaisstabiilitietin ja momenttirasituksen muutoksia, jotka tulee huomioida suunnittelussa. Vinopaalut tuleekin suunnitella näistä syistä anturaan symmetrisesti.

Lisäksi törmäykset muiden maanalaisten rakenteiden kanssa tulee tarkastella. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 181; Virtanen, Sweco 2019, 2-5.)

2.3 Sivukuormitus ja sivuvastus

Paalun sivukuormitus tai sivuvastus aiheutuu maan ja paalun liikkeestä suhteessa toisiinsa. Sivukuormituksella tarkoitetaan tilannetta, jossa maa kuormittaa paalua, kun taas sivuvastuksella tarkoitetaan sitä, kun maa vastustaa paalun sivusiirtymää. Sivuvastusta hyödynnetään sivukapasiteetin laskennassa. (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje 2005, 58.)

Sivukuormitusta syntyy maan liikkeessä paalua kohti, tai kun hyödynnetään paalun tai paaluryhmän sivukapasiteettia tai momenttikapasiteettia. Sivukuormitus aiheuttaa paalulle taivutusrasitusta, joka tulee ottaa huomioon paalun rakenteellisessa mitoituksessa. Taivutusrasitusta voi aiheuttaa esimerkiksi huono alueellinen tai paalutusalueen vakavuus, paalutuksen aiheuttama maan siirtyminen, kaivu paalutusalueella, paalun suuntaisen kuorman epäkeskisyys tai paalun käyryys. Lisäksi vinopäällylle on huomioitava myös maan painumisen aiheuttama taivutus. (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005, 47-48.)

2.4 Negatiivinen vaippahankaus

Negatiivisen vaippahankauksen aiheuttama lisäkuorma syntyy, kun hienorakeiset tai eloperäiset maalajit paalun ympärillä painuvat enemmän kuin itse paalu. Painuma saattaa aiheutua täytemaan painosta, pohjaveden alenemisesta tai itse paalutustyöstä. Negatiivista vaippahankausta katsotaan esiintyvän niillä alueilla, joissa paalua ympäröivät maakerrokset painuvat yli 5 mm enemmän kuin paalu. (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005, 48.)

Yksittäisiä paaluja kuormittaa todennäköisesti suurin mahdollinen negatiivisesta vaippahankauksesta aiheutuva lisäkuorma. Paaluryhmissä paaluun kohdistuvan lisäkuorman suuruus riippuu paalujen keskiöetäisyydestä ja paalujen lukumäärästä. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 48.)

2.5 Vetorasitus

Joissakin tapauksissa paaluun voi kohdistua vetorasitusta, jolloin puhutaan vetopaalusta. Vetopaaluna voi toimia joko kallioon injektoitu tukipaalu, kitkapaalu tai lyhytaikaiseen vetorasitukseen myös koheesiopaalu. (Liikennevirasto 2017, 59.) Yleensä paalut kuitenkin suunnitellaan niin, että niille ei sallita vetoa enempää kuin niiden tehollisen painon verran. Jos vetoa kohdistuu tätä enemmän, voidaan vedetty paalu välttää ottamalla vetorasitus vastaan esimerkiksi kallioankkurilla, joka sijoitetaan teräsputkipaalun sisään, jolloin paalun rakennemalli pysyy selkeämpänä. (Korhonen, 2021.)

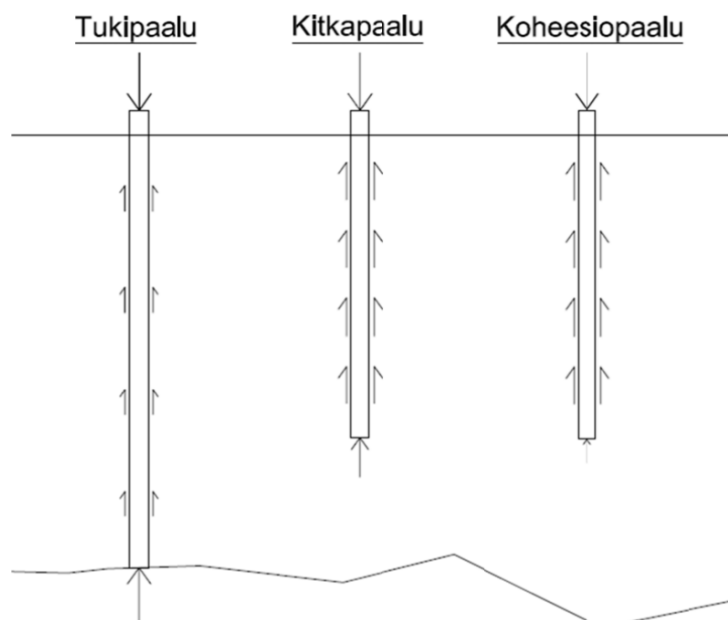
Kallioon injektoidun paalun geotekniseen vetokestävyys huomioidaan tartunnan osuus sekä paalun omapaino. Sen sijaan kitka- ja koheesiopaalun vetokestävyys muodostuu paalun painon ja vetorasituksessa vaikuttavan vaippavastuksen summasta. Vedetyn paalun vaippavastus on pienempi kuin puristetun paalun. Vetorasitusta tarkasteltaessa tulee tarkastella sekä paalujen ulosvedon maamassasta, sekä paalujen ja paalut sisältävän maamassan muodostaman blokin nousun aiheuttamaa murtumismekanismia. (RIL 121-2004. Pohjarakennusohjeet 2004, 86; Liikennevirasto 2017, 59; RIL 207-2017. Geotekninen suunnittelu 2017, 136.)

3 PAALUTYYPIT

Paalulla tarkoitetaan hoikkaa maassa olevaa kuormaa siirtävää rakenneosaa. Paalutyyppejä voidaan ryhmitellä erilaisilla tavoilla kuten toimintatavan, materiaalin tai valmistustavan mukaan. (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 43; RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 15.) Tässä käydään läpi jaottelut eri periaatteiden mukaisesti.

3.1 Toimintatavan mukaan

Toimintatavan mukaan paalut jaetaan tukipaaluihin, koheesiopaaluihin ja kitkapaaluihin. Todellisuudessa kaikki paalut toimivat kuitenkin osittain näiden tyyppien yhdistelmänä. Joissakin lähteissä näitä kutsutaan välimuotopaaluiksi. (Kinnunen, Liikennevirasto 2017, 15.) Paalun toimintatavasta riippuu kuinka sen geotekninen kantavuus määritellään. Tulee kuitenkin muistaa, että geotekninen kantavuus ei ole välttämättä mitoittava, vaan aina tulee tarkastella myös paalun rakenteellinen kantavuus. Kuvassa 3 on esitetty paalujen jaottelu toimintatavan mukaan.



Kuva 3 Paalujen jaottelu toimintatavan mukaan (Kinnunen, Liikennevirasto 2015, 13.)

3.1.1 Tukipaalu

Tukipaalun toiminta perustuu siihen, että se tukeutuu joko kallioon tai tiivisrakenteiseen pohjamaahan, jonne se siirtää lähes kaikki paalukuormansa paalun kärjen kautta. Sen geotekninen kantavuus perustuu siihen, että kärkivastus vastaa varmuudella laskennassa käytettyä kantavuutta. Kärkivastus tarkastetaan loppulyönnissä syntyvän painuman perusteella, eikä se saa ylittää paalutusluokasta ja paalumateriaalista riippuvaa enimmäispainumaa. Geoteknisissä luokissa 1 ja 2 ei kuitenkaan painuman tarkastelu ole yleensä tarpeellista. (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 43-59; RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 56.)

3.1.2 Kitkapaalu

Kitkapaalussa kärkituen vaikutus on huomattavasti pienempi kuin tukipaalussa. Siinä sen sijaan voimat siirtyvät ympäröivään maahan suurimmaksi osaksi paalun vaippapinnan ja maan välisen hankauksen avulla. Kitkapaalun geotekninen kantavuus lasketaan kärkivastuksen ja vaippakitkan summana. Kantavuutta arvioidaan erilaisilla laskentakaavoilla, koekuormituksilla, dynaamisilla kantavuusmittauksilla sekä kokemusperäisesti kairausvastukseen perustuen. (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 43-59.)

3.1.3 Koheesiopaalu

Koheesiopaalun toiminta perustuu pääasiassa siihen, että paalu siirtää paalukuormat maahan paalun vaippapinnan ja ympäröivän maan tartuntajännityksen avulla. Kärkivastuksen osuus paalun kantavuudesta katsotaan koheesiopaaluilla niin merkityksettömäksi, ettei sitä oteta laskennassa huomioon. Koheesiopaaluja käytettäessä tulee huomioida, että tiheänä paaluryhmänä saattaa paalujen kantokyky pienentyä, sillä yksittäisten paalujen sijasta ne toimivatkin yhtenä suurena paaluna. Yhdensuuntaisten paaluryhmien kantavuus tuleekin tutkia aina erikseen, jolloin siihen huomioidaan myös kärkivastus. (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 43-59.)

3.2 Asennustavan mukaan

Eurooppalaisen toteutusstandardin mukaan paalut jaetaan kahteen pääryhmään eli maata syrjäyttäviiin (SFS-EN 12699) ja maata syrjäyttämättömiin paaluihin (SFS-EN 14199). Nämä pääryhmät muodostuvat siis perustuen jaotteluun asennustavan mukaan.

Maata syrjäyttävät paalut asennetaan niin, ettei maata kaiveta tai poisteta asennuksen yhteydessä. Kuitenkin maan nousua ja tärinää voidaan rajoittaa, vaikeasti läpäistäviä esteitä voidaan poistaa tai tunkeutumista helpottaa. Paalut asennetaan joko lyömällä, täryttämällä, puristamalla tai ruuvamalla. Useita asennustapoja voidaan myös yhdistellä. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 15-16.)

Maata syrjäyttämättömiä paaluja ovat useimmat porapaalut, avoimet teräsputkipaalut sekä kaivinpaalut. Kaivinpaalulla tarkoitetaan paalua, joka asennetaan suojaputken avulla tai ilman sitä kaivamalla tai poraamalla maahan paalukaivanto, joka täytetään raudoitetulla tai raudoittamattomalla betonilla. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 16; RIL 121-2004. Pohjarakennusohjeet 2004, 84.)

3.3 Materiaalin mukaan

Materiaalin mukaan paalut voidaan jakaa karkeasti puu-, betoni- ja teräspaaluihin. Eri materiaaleilla on erilaisia ominaisuuksia, mutta jokaisen tulee kestää sen käyttötarkoitukseen nähden riittävästi kuormaa, kemialliset rasitukset, asennus sekä kuljetus. (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 45.)

Puupaaluja voidaan käyttää ainoastaan, jos paalu asennetaan kokonaan pohjavesipinnan alapuolelle, tai se on koheesiomaassa, jossa se pysyy koko ajan märkänä ja ilmatiiviissä tilassa. Materiaalina käytetään joko mäntyä tai kuusta, jonka suoruuspoikkeama ei saa olla suurempi kuin 1% paalun pituudesta. Puupaalujen käyttöä suositellaan ensisijaisesti vain toisarvoisiin rakenteisiin. (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 45; RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 158.)

Teräspaaluina käytetään muototeräksestä koottuja putkimaisia teräsprofiiileja, valssattuja profiiileja, kuten leveälaippaisia I-profiileja, ristin muotoisia profiiileja tai poikkileikkaukseltaan neliön tai ympyrän muotoisia massiivisia profiiileja (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 48). Yleisesti käytettyjä teräspaaluja ovat esimerkiksi SSAB:n RR- ja RD-paalut. RR-paalut ovat lyömällä ja RD-paalut poraamalla asennettavia putkiprofiilipaaluja. (SSAB 2020, 4.)

Betonipaalut ovat yleensä esivalmistettuja elementtejä, mutta ne voivat myös olla paikan päällä kaivantoon valettuja. Yleensä betonipaalu on poikkileikkaukseltaan neliö, jonka sivunpituus on 250 mm, 300 mm tai 350 mm. Esivalmistettuja paaluelementtejä valmistetaan 3-15 m pituisina. Tätä pidemmät paalut toteutetaan osapaaluista jatkamalla. (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 45; Rakennusteollisuus 2018, 3-6.) Esivalmistetun betonipaalun betonin nimellislujuus on oltava vähintään C35/45. Paikalla valettujen paalujen suunniteltu lujuusluokka taas vaihtelee välillä C20/25 ja C45/55, riippuen kohteen vaatimuksista. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 155-156.)

3.4 Paalutyyppien valinta

Paalutyyppien valintaan vaikuttaa ensisijaisesti maaperän geoteknisten tutkimusten tulokset. Suomessa selkeästi yleisimmin käytetty paalutyyppi on tukipaalu, sillä yleensä kallio tai tiivis pohjamaa sijaitsee kohtuullisessa syvyydessä. Tukipaalun käytön mahdollisuus tulee tarkastella ensisijaisesti myös siitä syystä, että sen toimintatapa on helpoiten ymmärrettävissä ja toimintakelpoisuus helpoiten todettavissa (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje 2005, 42-43).

Kitkapaalujen käytön edellytyksenä on, että perustettavien rakenteiden kuormitusjakauma on kyseessä oleville paaluille sopiva ja että painumat ja painumaerot pysyvät rakenteen sallimissa rajoissa. Tämä siis käytännössä toteutuu yleensä, kun kallion tai tiivisrakenteisen pohjakerroksen päällä oleva karkearakainen maakerros tai moreenikerros on löyhä ja paksu. (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje 2005, 43.)

Koheesiopaaluilla perustettu rakenne painuu tavallisesti, sillä se kuormittaa kokoonpuristuvia maakerroksia. Rakenteelle sallittavat painumat ja syntyvien painumien tasaisuus määräävät ratkaisun käyttökelpoisuuden. Yleensä kuitenkin painumat ovat sen verran suuria, ettei koheesiopaalujen varaan voida perustaa pysyviä rakenteista, vaan ne soveltuvat vain työnaikaisiin tai lyhytaikaisiin perustusrakenteisiin. (RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje 2005, 43.)

Materiaalin puolesta yleisimmin käytettyjä paaluja ovat esivalmistetut teräsbetonipaalut, jotka ovat yleensä edullisimpia ratkaisuja. Niitä käytetäänkin lähes aina kun paaluanturaan kohdistuvat kuormat ovat kohtuullisia ja lyömällä voidaan päästä tarpeeksi pieniin sijaintipoiikkeamiin. Myös teräspaalut ovat yleisiä, mutta betonipaaluja kalliimpia vaihtoehtoja. Niiden käyttö on yleisintä, jos kuormitukset ovat suuria, halutaan käyttää porattavia paaluja tai muutoin betonipaalujen käyttö ei ole järkevää.

3.5 Lyhyet paalut

Lyhyillä paaluilla tarkoitetaan alle 5 m pitkiä paaluja. Lyhyin sallittu paalupituus lyöntipaalulla on 1,5 m. Lyhyin sallittu pituus on riippuvainen paalun halkaisijasta. Käytettäessä lyhyitä paaluja suunnitel-

laan liitos yläpuoliseen rakenteeseen yleensä jäykäksi, jolloin tulee tarkastella paalun yläpään momenttikestävyys. Yleensä on hyödyllistä, että vaakakuormat suunnitellaan otettavaksi vastaan muilla rakenteilla, sillä lyhyillä paaluilla rakenteen momenttikapasiteetti ei ole suuri. Jos kuitenkin momenttikapasiteettia tarvitsee lisätä, voidaan se tehdä joko lisäämällä paalumäärää tai jäykistämällä paaluja. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 96.)

Erityisesti asennettaessa lyhyitä lyöntipaaluja pehmeään pohjamaahan tulee huomioida ja varmistaa paalun pysyminen paikallaan sekä paalun kärjen ja kiinteän pohjan välinen kosketus. Lisäksi lyhyillä paaluilla tulee huomioida routivissa olosuhteissa routanousun vaikutus. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 96.)

4 PAALUTARVIKKEET

Jotta esivalmistetun paalun toiminta ja asennus tapahtuu suunnitelmien mukaan, tarvitaan yleensä itse paaluelementtien lisäksi erilaisia paalutarvikkeita. Tällaisia tarvikkeita ovat osapaalujen jatkoskappaleet, paalun kärkikappaleet sekä paaluhatut.

4.1 Jatkokset

Esivalmistetun paalun jatkoksen tulee pystyä pitämään paaluelementit halutussa linjassa ja paikoillaan asentamisen aikana. Sen tulee myös kestää riittävällä varmuudella käsittelyn, asentamisen sekä rakenteen ja ympäröivän maan vaikutuksista johtuvat jännitykset. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 160.)

Betonipaalujen jatkoskappaleet asennetaan osapaaluun valun yhteydessä. Paalujatkosten tulee olla samankeskisiä osapaalujen kanssa ja niiden tulee muodostaa samankeskinen liitos osapaalujen väliin. Jatkoskappaleet ovat valmiita osia, joiden ominaisuuksista ja vaatimusten täyttymisestä vastaa paalun valmistaja. Betonipaalun jatkoksen tulee olla standardin SFS-EN 12794 mukaisia. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 161.)

Jos paalu katkaistaan työmaalla liian syvältä, tehdään siihen työmaalla jatkos. Periaatteessa betonipaalun jatkaminen työmaalla tehdään umpeen valettavalla teräksisellä paalun jatkosputkella, joka limitetään katkaistun paalun kanssa vähintään 1000 mm. Jatkoksesta laaditaan rakennedetalji, jonka mukaan jatkos toteutetaan. (Lehtonen 2021.)

Teräspaalun jatkokset voivat olla joko mekaanisia tai hitsattuja. Lyöntipaalujen mekaaniset jatkokset ovat yleensä joko ulkopuolisia holkki-jatkoksia tai sisäpuoleisia jatkoksia, joiden kiinnitys perustuu kartiomuodoista johtuvaan kitkaan. Porapaalujen liitokset taas ovat yleensä erilaisia kierre-jatkoksia (kuva 4) tai mekaanisesti hitsattuja. Hitsatut jatkokset toteutetaan aina valmistajan ohjeiden mukaisesti. (SSAB 2020, 5-10.)

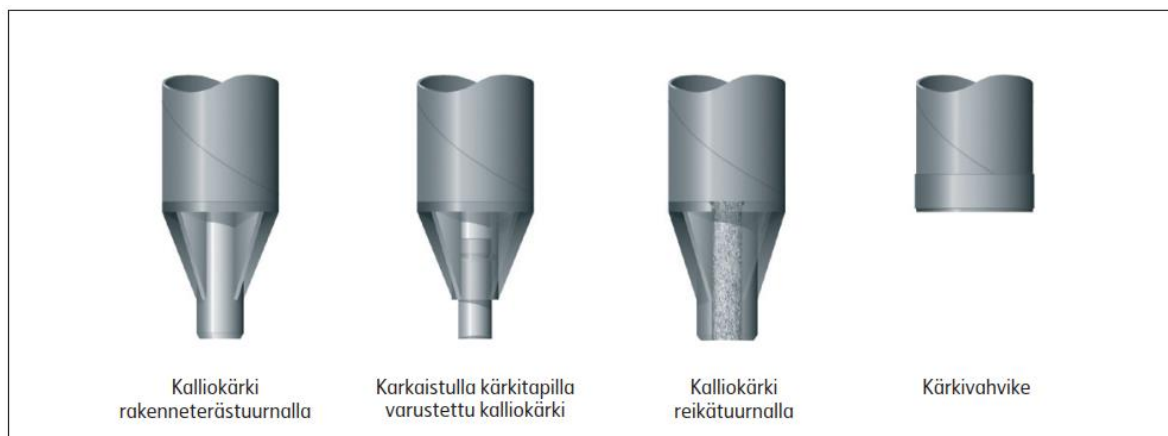


Kuva 4 Esimerkki RD-paalun kierreholkki-jatkoksesta (SSAB 2020, 10)

4.2 Paalun kärjet

Helppoissa maaperäolosuhteissa lyötävän paalun kärki voidaan vahvistaa maakärjellä tai teräsputki-paalun pää voidaan jättää avoimeksi ja vahvistaa kärkivahvikkeella. Kuitenkin yleisimmin Suomen olosuhteissa paalun kärki suojataan kalliokärjellä.

Kalliokärkiä käytetään suojaamaan paalun alapäästä asentamisen aikaisia rasituksia vastaan, keskittämään paalun kärkeen kohdistuvat rasitukset mahdollisimman tasaisesti paaluputken tai paalun poikkileikkaukselle sekä estämään paalun kärjen liukumista sivusuunnassa. Kalliokärkiä on erilaisia riippuen maaperän ominaisuuksista, kallion pinnan tasaisuudesta ja paalun halutuista ominaisuuksista. Kalliokärki voi olla varustettu reikätuurnalla, jolloin paalu voidaan injektoida kallioon kärjen läpi poraamalla, tai paalun sisään voidaan asentaa kallioankkuri ottamaan vastaan vetoa. (SSAB 2020, 8.) Kuvassa 5 on esitetty erityyppisiä teräspaalujen kallio- ja maakärkiä.



Kuva 5 Esimerkkejä teräspaalujen kallio- ja maakärjistä (SSAB 2020, 8)

Porattavien paalujen kärkeen jää yleensä maakenkä tai käytetty porakruunu. Se kumpaa vaihtoehtoa käytetään, riippuu käytettävästä porauskalustosta, joka taas riippuu maaperän lujuudesta sekä tavoitellusta sijaintitarkkuudesta. (Ahomies, Liikennevirasto 2016, 22.)

4.3 Paaluhattu

Paaluhattu on teräspaalun päähän katkaisun jälkeen asennettava teräksinen osa jonka, tarkoitus on liittää paalu perustukseen ja siirtää kuormat paalulle. Paaluhattuja on olemassa vakiokokoisina, mutta niitä voidaan valmistaa myös kohteen suunnitelmien mukaan. Paaluhatun kestävyys tarkastellaan sekä paaluhatun teräsrakenteen taivutuskestävyyden että yläpuolisen betonin puristuskestävyyden ja lävistyskapasiteetin mukaan. Paaluhatun suunnittelussa on lisäksi huomioitava anturan kestävyys paaluhatun kohdalla. Vaikka valmistajilla on vakiopaaluhattuja, on paaluhattu syytä mitoittaa kohdekohtaisesti, jolloin voidaan varmistaa, että paaluhattu kestää sille tulevat rasitukset. (SSAB 2020, 12; Lehtonen 2018, 26.)

5 PERUSTUSTYYPIT

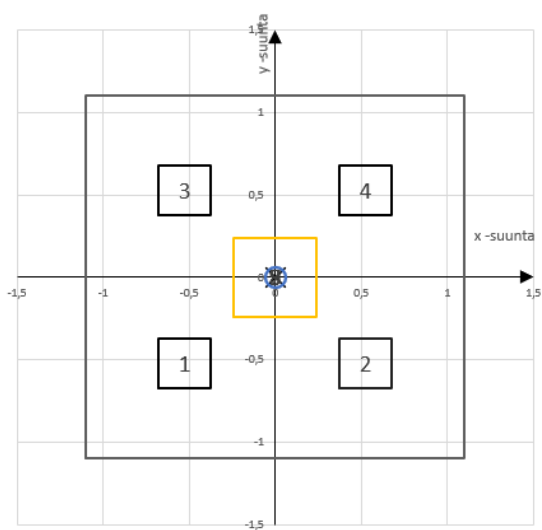
Paaluperustus on perustamistapa, jossa kantavaan kerrokseen asti asennettujen paalujen päälle valetaan paaluantura ja sen päältä jatketaan rakentamista samalla tavalla, kuin maanvaraista anturaperustusta käytettäessä. (Betoniteollisuus ry julkaisuaika tuntematon). Paaluperustus on käyttökel-poinen rakenteiden perustamistapa silloin, kun kantava pohja on niin syvällä, että perustaminen pe-rusmuurein, anturoin tai pilarein tiivistysrakenteisten pohjakerrosten varaan olisi kalliimpaa ja han-kalampaa tai pintakerrosten pehmeiden vuoksi laattaperustustakaan ei voida käyttää (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 43).

Talonrakennuksessa anturoiden pääasialliset tyypit ovat pilariantura sekä nauha-antura, joista mo-lemmat voidaan toteuttaa myös paaluanturoina. Lisäksi paalujen varaan voidaan tehdä myös paalu-laattaperustuksia, joiden käyttö on yleisempää maanrakennuspuolella. Paalulaatan suunnittelu eroaa paaluanturoiden suunnittelusta, joten tässä työssä keskitytään pelkästään paaluanturoihin.

Paalut sidotaan anturalla paaluryhmäksi, joka mitoitetaan rakenteellisesti jäykkänä pilarilaattana. Paaluantura on mitoitettava rakenteellisesti siten, että se kestää vaaditulla varmuudella paalujen sallitun sijaintipoikkeamien vaikutuksen paalujen kuormiin ja paaluanturan rasituksiin. Antura tulee myös routasuojata tai muulla tavoin huolehtia, ettei routanousu pääse vaikuttamaan anturaan. (RIL 121-2004. Pohjarakennusohjeet 2004, 91.)

5.1 Pilariantura

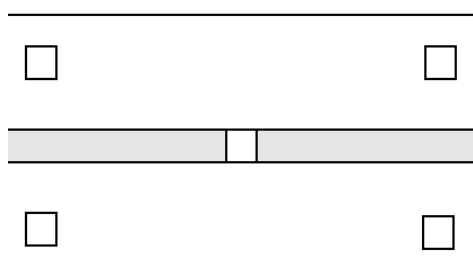
Pilarianturaa käytetään, kun rakenteelle tuleva yläpuolinen kuormitus muodostuu pistekuormaksi, tai yläpuoleinen rakenne toimii päistään tuettuna, eli kuormat johtuvat yläpuolisen rakenteen päiden kautta. Yleensä paalutettavilla alueilla rakenteet suunnitellaan lähtökohtaisesti niin, että voidaan käyttää pilarianturoita, jolloin mitoitus on selkeää ja onnistuu suoraan kehitellyillä mitoitusmenetel-millä. Lisäksi tällaisilla rakenneratkaisuilla päästään betonimäärässä tehokkaampiin ratkaisuihin kuin nauha-anturoilla. Paaluanturaan voi lähtökohtaisesti liittyä kahdesta yhdeksään paalua, tästä suu-remmat anturat mitoitetaan osissa. Kuvassa 6 on esitetty esimerkki tavanomaisesta neljän paalun paaluanturasta.



Kuva 6 Esimerkki neljän paalun pilarianturasta (Valtonen 2021, CC BY)

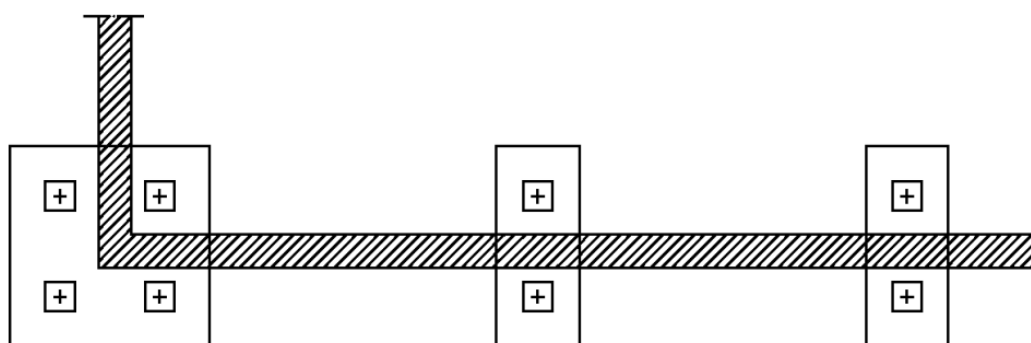
5.2 Nauha-antura

Nauha-anturoilla otetaan vastaan metrikuormituksia. Paalutetuissa nauha-anturoissa paalut voidaan sijoittaa joko suoraan yläpuoleisen rakenteen alle, kahden paalun ryhmiin yläpuoleisen rakenteen molemmin puolin tai sitten näitä tapoja voidaan yhdistellä. Sijoittaessa paaluja vain suoraan yläpuoleisen rakenteen alle, aiheutuvat sijaintipoikkeamat helposti ongelmallisiksi. Jos asennuksessa tapahtuu kriittinen sijaintipoikkeama, joudutaan asentamaan kuormituksesta katsottuna vastakkaiselle puolelle lisäpaalu. Tällä vältetään rakenteeseen aiheutuva vääntö. Joissain lähteissä kerrotaan sijoittelusta sik-sak asetelmaan, mutta myös tässä tapauksessa rakenteeseen aiheutuu vääntöä, eikä tästä syystä tätä ratkaisua suositella. Kuvassa 7 on esitetty tavanomainen nauha-anturan paalujen sijoittelutapa.



Kuva 7 Esimerkki paalutetun nauha-anturan paalujen sijoittelusta (Valtonen 2021, CC BY)

Paalutettu nauha-antura valitaan käytettäväksi yleensä tapauksissa, joissa on syytä siirtää vaakakuormia anturan tasolla. Tällaisia tilanteita voivat olla esimerkiksi tapaukset, joissa rakennukselle aiheutuu maanpaineesta merkittävää vaakakuormaa. Myös esimerkiksi paikallavalettujen seinien rakennemalli muodostuu ja kuormat jakautuvat niin, että nauha-antura on paalutettava. Tilanteet, joissa yläpuolinen rakenne voi toimia päästään tuettuna, on järkevämpää käyttää paalutettuja pilarianturoita. Tällöin päästään kustannustehokkaampaan ratkaisuun. Esimerkki tällaisesta tilanteesta on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8 Vakiopaaluanturoiden käyttö seinärakenteen alla. (Betoniteollisuus ry 2020, 8)

Käytettäessä paalutettavia nauha-anturoita, suoritetaan anturan mitoitus yleensä miettimällä antura osissa. Tällainen osissa laskeminen voidaan tehdä esimerkiksi miettimällä antura kahden tai kolmen paalun osissa.

6 PAALUTUKSEN LÄHTÖTIEDOT JA SUUNNITTELIJOIDEN TYÖNJAKO

Paaluperustusten suunnittelu on monialainen tehtävä, jossa eri alojen suunnittelijoiden tulee tehdä yhteistyötä ja vaihtaa tietoja keskenään, jotta päästään mahdollisimman toimivaan ja kustannustehokkaaseen ratkaisuun. Paalutuksen suunnittelu ja toteutus tulee tehdä aina uusimman paalutusohjeen (RIL 254-2016) ohjeiden mukaan. (Lehtonen 2020, 4.)

6.1 Pohjatutkimusraportti

Ennen paaluperustuksen suunnittelun aloitusta tulee aina suorittaa riittävän yksityiskohtaiset pohjatutkimukset, joiden pohjalta pohjarakennesuunnittelija laatii pohjatutkimusraportin suunnittelun lähtötiedoksi. Paaluperustuksia varten tehtävissä pohjatutkimuksissa on käytettävä sellaisia tutkimusmenetelmiä, että paalujen ja paaluryhmien toimintatavat ja mitoitusarvot voidaan pohjatutkimusten perusteella luotettavasti selvittää.

Kitka ja koheesiopaaluilla kairausten on ulotuttava paalujen kärkien tason alapuolelle, jotta paalujen kantavuutta ja mahdollisia painumia voidaan arvioida. Tukipaaluilla kairaukset tulee tehdä kallioon tai kantavaan pohjamaahan asti. (Rantamäki ja Tammirinne 1979, 75.)

6.2 Paalutyyppi ja kapasiteetti

Pohjatutkimusten perusteella pohjarakennesuunnittelija määrittää käytettävän paalutyyppin, joka on yleisimmin Suomen olosuhteissa lyömällä asennettava tukipaalu. Myös materiaali voi olla määrätty tai sitten sille voi olla vaihtoehtoja, joista rakennesuunnittelija voi valita suunnitelmiin sopivimman. Yleisin ja edullisin materiaali on betoni, mutta etenkin suuresti kuormitetuissa kohteissa myös teräsmaalut ovat yleisiä. Rakennesuunnittelija määrittää lopulliset paalumäärät. (Lehtonen 2021.)

Valitulle paalulle määritellään paalun geotekninen kantavuus $R_{d,geo}$ sekä rakenteellinen kestävyys $R_{d,str}$. Näistä pienemmäksi eli määrääväksi paalun kantokykyä määrittäessä muodostuu yleensä geotekninen kestävyys. Kuitenkin pohjarakennesuunnittelija määrittää tämän aina tapauskohtaisesti. Paalujen kapasiteetit määräytyvät paalujen valmistajan tuotelehtien tai pohjarakennesuunnittelijan antamien arvojen mukaan. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 121; Lehtonen 2020, 4.)

Geoteknisen kantavuuden arvoa kannattaa tarkastella tapauskohtaisesti, sillä hienojakoisilla maa-alueilla sekä pitkillä paalupituuksilla ei loppulyönnissä päästä yleensä täyteen kantavuuden arvoon. Laskennassa voidaan epävarmoissa tilanteissa kertoa geoteknisen kantavuuden arvo esimerkiksi 0,8:lla, jolloin päästään mitoituksessa varmalle puolelle. Näistä tilanteista sopivat yhdessä rakennus- ja geosuunnittelija.

6.2.1 Paalutustyöluokat

Paalutustyöluokka määräytyy kohteen geoteknisen luokan ja seuraamusluokan mukaan. Rakennesuunnittelussa luokka vaikuttaa käytettävän paalun geoteknisen kestävyuden mitoitusarvoon. Paalutustyöluokka on myös toteutuksen huomioiva luokitus, ja se määrää vaatimuksia myös paalutustyön toteutusta koskien. Muun muassa paalutuskaluston valinta, paalutustyön tekijän pätevyysvaatimukset sekä tarkastusten määrä riippuvat paalutustyöluokasta. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 101-102; Lehtonen 2021.)

Yleisimmin paalutustyö kuuluu luokkaan PTL2 tai PTL3. Geoteknisen luokan GL1 kohteet eivät ole yleensä paalutusta vaativia. On myös muistettava, että PTL3 lyötävien paalujen geotekninen kantavuus tulee aina varmistaa joko dynaamisella tai staattisella koekuormituksella. Kuvan 9 taulukko osoittaa kuinka paalutustyöluokka määräytyy. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 102; Lehtonen 2020, 4.)

Geotekninen luokka	Seuraamusluokka		
	CC1	CC2	CC3
GL1	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)
GL2	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3
GL3	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3

Kuva 9 Paalutustyöluokan määräytyminen (RIL 245-2016. Paalutusohje 2016, 102)

6.3 Sallitut sijaintipoikkeamat

Pohjarakennesuunnittelija määrittää paalun sallitut sijaintipoikkeamat yksittäiselle paalulle ja paaluryhmälle, huomioiden yleiset vaatimukset, käytetyn paalutyypin sekä kohteen maaperän. Porausmenetelmällä asennettavilla paaluilla sijaintipoikkeamat ovat vähäisiä verrattuna esimerkiksi kiviseen maahan lyömällä asennettaviin paaluihin. Tarkat määritykset sijaintipoikkeaman vaatimuksista on esitetty teoksessa RIL 254-2016, Paalutusohje 2016 sivuilla 183 ja 184. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 180-182.)

Sijaintipoikkeamaa voidaan neuvotella pienemmäksi, jolloin paalujen asennuksessa voi olla haasteellisempaa päästä vaadittuihin arvoihin, mutta vältetään turhan suurilta anturoilta. Yleiset sallitut sijaintipoikkeamat yksittäiselle paalulle ovat joko 100 mm tai 150 mm ja paaluryhmälle 50 mm. (Lehtonen 2021.)

6.4 Paalun pituus ja keskiöetäisyydet

Rakennesuunnittelija määrittää paalun pituuden pohjatutkimuksissa määritetyn kantavan maa-aineksen tai kalliopinnan syvyyden perusteella. Jos tarvitaan tarkempia paalun pituuksia, määrittää ne pohjarakennesuunnittelija. Paalun pituus vaikuttaa suoraan pienimpään sallittuun keskiöetäisyyteen. Keskiöetäisyys valitaan niin, ettei vierekkäiset paalut vaikuta vähentävästi toistensa kantavuuteen tai vahingoita toisiaan asennettaessa. Taulukossa 2 on esitetty paalujen keskiöetäisyyksien vähimmäisarvot.

Paalutusohjeessa (2016) huomioidaan myös, että seuraavia vähimmäisarvoja ei kuitenkaan tulisi alittaa:

-Tuki- ja kitkapaalut	0,8 m
-Koheesiopaalut	1,0 m
-Maakerroksiin tukeutuvat vetopaalut	1,5 m

Taulukko 1 Paalujen keskiöetäisyyksien vähimmäisarvot (RIL 254-2016, Paalutusohje 2016, 179.)

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

Jos paaluryhmä suunnitellaan alaspäin hajaantuvaksi, voidaan paalujen yläpään keskiöetäisyydet määrittää myös taulukon arvoja pienemmiksi. Rakennesuunnittelijan tulee huomioida, että keskiöetäisyydet täyttyvät vaikka suurimmat sallitut sijaintipoikkeamat toteutuisivat. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 179.) Jos suunnitelmissa käytetään suoraan Paalutusohjeen mukaista arvoa ilman sijaintipoikkeamien huomiointia, ja sijaintipoikkeamien takia tämä arvo alittuu, tulee ensin asennetut paalut tarkastaa vaurioitumisriskin vuoksi.

6.5 Paalujen kaltevuus

Pohjarakennesuunnittelija määrää myös vinopaalujen kaltevuuden sekä sille sallitut poikkeamat. Kaltevuus määritellään huomioiden käytettävissä oleva kalusto sekä maakerrosten rakenne perustusten kohdalla. Vinopaalujen tarve arvioidaan mahdollisten rakennukselle aiheutuvien vaakakuormien mukaan. Yleisiä käytettyjä paalun kaltevuuksia ovat 1:4 ja 1:5, riippuen kuinka suurina vaakakuormat ovat. Lopulliset vinopaalujen määrät ja sijainnit määrittää rakennesuunnittelija. (Lehtonen 2021.)

6.6 Paaluanturan reunan etäisyys paaluista

Rakennesuunnittelija huomioi suunnitelmissaan, että paalun etäisyys paaluanturan reunaan on riittävä, jotta vältetään anturan reunan lohkeaminen. Betonipaaluilla tulee paalun keskipisteen etäisyys reunasta olla vähintään paalun sivumitan suuruinen. Putkipaaluilla ja muilla ympyrän muotoisilla poikkileikkauksilla tulee etäisyys paalun ulkopinnasta tai paaluhatun reunasta olla vähintään puolet paalun halkaisijasta tai paaluhatun sivumitasta. Reunaetäisyyttä määriteltäessä tulee huomioida tilanne, jossa toteutuu suurin sallittu sijaintipoikkeama. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 180; Lehtonen 2020, 4.)

6.7 Paalun kiinnitys paaluanturaan

Paalut katkaistaan niin, että ne ulottuvat vähintään 50 mm paaluanturaan, ellei rakenteen suunnittelu tai paalujen kiinnittyminen paaluanturaan muuta edellytä. Jos halutaan liittää teräsbetonipaalu jäykästi anturaan, tulee paalu katkaista terästen tartuntapituuden verran yli normaalin katkaisutasoon. Tällöin paalun teräkset piikataan tartuntapituuden mitalta esiin ja paalu liittyy jäykästi kiinni paaluanturan valuun. (RIL 254-2016. Paalutusohje 2016, 176.) Teräspaalun jäykkä liitos anturaan tehdään upottamalla paalu kaksi kertaa paalun halkaisijan verran anturaan, tai valamalla anturan alapuolelle paalun kohdalle korotusvalu, joka on halkaisijaltaan metrin ja jonka korkeus on kaksi kertaa paalun halkaisija (Korhonen 2021).

Tällainen jäykkä liitos voidaan haluta tehdä silloin kun anturaan kohdistuu paljon momenttia, ja halutaan paalujen paino mukaan ottamaan sitä vastaan, eli halutaan rakenteelle lisää vääntöjäykkyyttä. Jos näin ei tehdä, tulee kahden paalun anturoiden vierustäytöt tehdä varoen, ettei antura pääse kaatumaan paalujen päältä vierustäyttöjä tehtäessä. Rakennesuunnittelija määrittää paalu-
luettelossa ne paalut, joiden teräkset tulee piikata esiin. (Lehtonen 2021.)

7 SUUNNITTELUN KULKU

Paaluanturan suunnittelu lähtee aina siitä, että käytettävissä on tarvittavat lähtötiedot, joiden pohjalta suunnittelua käydään toteuttamaan. Tässä työssä käydään läpi laskennan peruseriaatteet, sekä mitoituksen vaiheet käyttäen apuna Vakiopaaluanturat-ohjeita.

7.1 Mitoituksen yleiset periaatteet

Paaluanturan mitoitus aloitetaan määrittelemällä anturan ja paalun lähtötiedot. Riippuen paalutyypistä määritetään paalun tiedot kuten mitat, paalujen lukumäärä, sallitut sijaintipoikkeamat sekä paalun kestävyden mitoitusarvo R_d eli joko geotekninen tai rakenteellinen kestävyys, riippuen kumpi näistä on määräävä. Jos kyseessä on teräspaalu, tulee paaluhatus kestävyys tarkastella.

7.1.1 Paalumäärän määrittäminen ja paaluvoimat

Jos käytetään vain pystysuoria paaluja, voidaan niiden koko kapasiteetti hyödyntää ottamaan vastaan pystykuormaa. Tällöin paalumäärän voi laskea suoraan seuraavalla kaavalla (kaava 1), jossa anturaan kohdistuvat pystykuormat jaetaan paalukohteisella mitoittavalla kestävyydellä.

$$n \geq \frac{F}{R_d} \quad (1)$$

Jos kuitenkin anturoihin kohdistuu vaakavoimia, jotka otetaan vastaan vinopaaluilla, tulee vinopaalujen vaaka- ja pystykapasiteetin riittävyys tarkastaa. Vinopaalujen kaltevuus määrätään lähtökohtaisesti mahdollisimman pieneksi, jotta niille jää mahdollisimman paljon pystykapasiteettia ja jotta taiputusrasitukset pysyvät mahdollisimman pieninä. Kuitenkin ensisijaisesti täytyy huomioida, että vinopaalujen vaakavoimakapasiteetti riittää ottamaan vastaan vaakavoimat. Lisäksi tulee huomioida, että vinopaalut suunnitellaan anturaan symmetrisesti.

Vinopaalujen määrä määritetään tarkastelemalla paalun vaakakapasiteettia valitussa kaltevuudessa trigonometrian avulla. Samansuuntaisten paalujen vaakakapasiteettien summan tulee olla vähintään yhtä suuri kuin anturaan sen suuntaisesti kohdistuvien vaakavoimien summan.

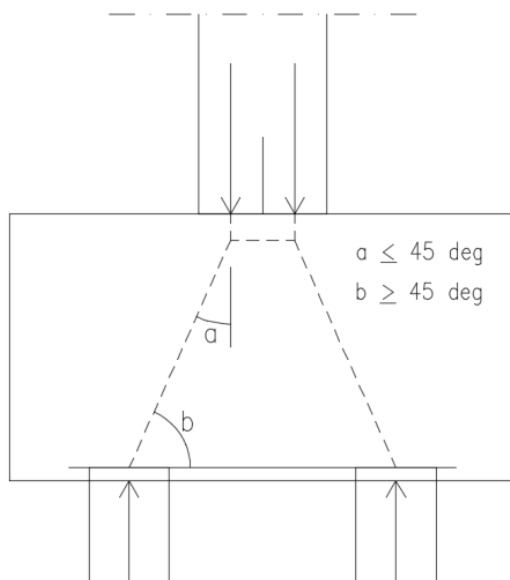
Kun vinopaalujen määrät on valittu, voidaan alustavasti arvioida pystysuorien paalujen määrä vähentämällä vinopaalujen pystykapasiteetti anturaan kohdistuvasta murtorajatilan pystykuormasta ja jakamalla tulos pystysuoran paalun kapasiteetilla.

Paalumäärää määrittäessä tulee tarkastella myös paalukohtaiset paaluvoimat. Jos antura on täysin symmetrinen ja paalut sijaitsevat täysin suunnitelluilla sijainneillaan, jakautuvat kuormitukset tasaisesti kaikille paaluille. Kuitenkin jos antura on esimerkiksi suorakaiteen muotoinen tai sijaintipoikkeamia tapahtuu, jakautuvat kuormitukset paaluille epätasaisesti. Sijaintipoikkeamat voidaan huomioida joko huomioimalla ja laskemalla kaikki mahdolliset paalujen sijainnit, tai vähentämällä paalun mitoituskestävyyttä kertoimella, joka on yleensä suuruusluokkaa 0,8-0,85. Kuitenkin paalun mitoittavan kestävyden tulee aina olla suurempi kuin paalulle tuleva kuorma, jolloin paaluvoimat pysyvät sallittuina ja paalu kestää kuormituksen.

7.1.2 Anturan koon määrittäminen

Anturan koon määrittäminen kannattaa lähteä siitä, että tarkastetaan vaaditut keskiö- ja reunaetäisyydet RIL 254-2016 mukaisiksi ja lisätään näihin mittoihin suurimpien sallittujen sijaintipoikkeamien toteutuminen. Anturan sivumitat siis määritetään lähtökohtaisesti keskiöetäisyyksien ja reunaetäisyyksien summana.

Anturan korkeus määräytyy anturan sisään muodostuvan ristikkomallin korkeuden mukaan. Ristikkomallin korkeus vaikuttaa diagonaalisten puristussauvojen nousukulmaan, ja tätä kautta paalun yläpuoleisten solmujen jännityksiin. Jotta solmujen jännitykset eivät kasva liian suuriksi, tulee anturan korkeus määrittellä riittävän suureksi. Lisäksi kun puristus- ja vetosauvojen välinen kulma on riittävän suuri, voidaan todeta lävistysmitoitus riittäväksi ilman erillistä tarkastelua. (Lehtonen 2018, 39.) Kuvassa 10 on esitetty ristikon ohjeelliset kulmasuositukset, joita mukailemalla pysyvät sauvojen voimat ja solmujen jännitykset kohtuullisina. Ristikkomallista on kerrottu lisää kohdassa 7.1.3.



Kuva 10 Ristikkomallin ohjeelliset kulmasuositukset (Lehtonen 2018, 39)

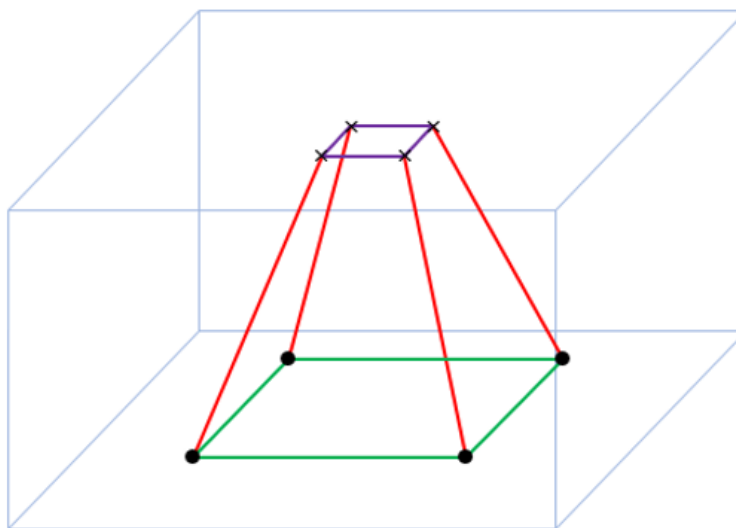
Anturan korkeuden määrittelyyn vaikuttaa myös raudoituksen sekä halkeilun mitoitus. Jos esimerkiksi raudoituksella ei saada otettua vastaan vetorasitusta, tulee anturan korkeutta kasvattaa, jolloin vetorasitus pienenee. Samoin jos halkeamaleveys ylittyy, voidaan tämä korjata kasvattamalla anturan korkeutta.

7.1.3 Ristikkomalli ja sen optimointi

Ristikkomenetelmällä mitoitetaan rakenteen epäjatkuvusalueita eli D-alueita. Näillä alueilla yleinen palkkien taivutusteoria ei ole voimassa ja rakenteessa on monimutkaisia vaihteluja rakenteen jännityskentissä. Paaluanturan paksuus on yleensä paalujen keskiöväleihin nähden niin suuri, että koko antura toimii epäjatkuvusalueena eli ristikkomallina. (Lehtonen, 2018.)

Jotta ristikkomallia voidaan hyödyntää laskennassa, tulee se optimoida. Optimoinnissa tunnistetaan ja poistetaan rakenteen osat, jotka välittävät voimia huomattavasti vähemmän kuin toiset. Tällöin voidaan muodostaa optimaalinen ristikkomalli.

Optimoitu ristikkomalli koostuu puristus- ja vetosauvoista, sekä niiden väliin muodostuvista solmuista. Kuvassa 11 on esimerkki optimoidun ristikkomallin muodostumisesta neljän paalun anturaan. Kuvassa violetit viivat esittävät yläpään solmujen välille syntyviä puristussauvoja, punaiset diagonaalisia kuormituksen ja paalun välisiä puristussauvoja ja vihreät paalujen välille muodostuvia vetosauvoja. (Lehtonen 2018, 71.)



Kuva 11 Esimerkki optimoidusta ristikkomallista (Lehtonen 2018, 71)

7.1.4 Anturan mitoitus

Anturan mitoituksessa tulee huomioida, että antura tulee mitoittaa täydelle paalujen kapasiteetille. Tällöin voidaan varmistua siitä, että antura kestää samansuuruisen kuormituksen kuin paaluryhmä.

Antura mitoitetaan tarkastelemalla erikseen jokaisen sauvan sauvavoimat sekä solmujen jännitykset. Solmujen puristusjännitystä voidaan Eurokoodin mukaisesti kasvattaa 10% jos solmuun liittyy kolme tai useampi sauva. Eli käytännössä tämä lisäys huomioidaan kaikilla paitsi kahden paalun anturoilla.

7.1.5 Raudoituksen suunnittelu

Raudoitus mitoitetaan ristikkomallin paalujen väliin muodostuvien vetosauvojen suurimpien vetovoimien mukaan. Raudoitus tulee jakaa vetosauvan vaikutusalueelle. Todellisuudessa vetosauvan vaikutusalue on pullon muotoinen, eli raudoitukset voidaan jakaa myös tarvittaessa paalun ulkopuolelle. Kuitenkin rajatessa jakoalue vain paalun alueelle voidaan paalusta syntyvä puristava poikittaispaine hyödyntää kokonaisuudessaan ankkuroinnin mitoituksessa.

Raudoituksen ankkurointi mitoitetaan huomioimalla ensin paalun matkalle ankkuroituva vetovoima, jonka jälkeen jäljelle jäänyt vetovoima ankkuroidaan paalun jälkeen. Ankkurointi toteutetaan yleensä taivutetulla tangolla, jolloin tulee huomioida taivutuksen kaaren vaatima tila. Tässä tulee huomioida myös mahdollisten sijaintipoikkeamien syntyminen, sillä ankkuroinnin taivutettu alue ei saa jäädä paalun päälle. Ankkurointi voidaan tehdä myös suoralla tai poikittain hitsatulla tangolla.

7.1.6 Halkeilun tarkastelu

Halkeilu tarkastellaan aina käyttörajatilassa pitkäaikaisella yhdistelyllä. Koska paalujen kapasiteetit ilmoitetaan murtorajatilassa, tulee ne muuttaa käyttörajatilaan käyttäen kuormakertoimia. Ensin tutkitaan ominaisyhdistelmällä, halkeaako rakenne. Jos todetaan että se halkeaa, lasketaan halkeamaleveys ja sen käyttöaste. Jos halkeamaleveys todetaan liian suureksi, voidaan sitä pienentää joko kasvattamalla anturan korkeutta tai lisäämällä raudoitusta.

7.1.7 Mitoitus tarkkeille

Kun antura on suunniteltu ja paalutus toteutettu suunnitelmien mukaan, tulee aina paalujen toteutuneet sijainnit tarkastaa. Jos tapahtuneet sijaintipoikkeamat ovat suurempia kuin sallitut sijaintipoikkeamat, tulee tarkistaa, kestäkö suunniteltu antura, vai joudutaanko anturan suunnittelemaan uudesta. Joissain tilanteissa voidaan joutua asentamaan myös lisäpaaluja tarkkeille mitoituksen jälkeen.

Jos paalujen suunniteltu keskiöetäisyys on alittunut, on syytä tarkastaa asennusjärjestyksessä ensimmäiset paalut. Tällöin pystytään havaitsemaan, jos paalut ovat vaurioituneet asennettaessa myöhempiä paaluja.

7.1.8 Piirustukset ja muut tuotokset

Paaluanturan mitoituksen pohjalta luodaan anturoista raudoituskuvat. Jokaisesta anturasta tehdään omat kuvansa ja niissä esitetään mitoitetut raudoitteet sekä niiden sijainnit, keskiöetäisyydet sekä suojabetonin paksuus. Lisäksi anturoista tehdään tasokuva, jossa näkyy anturoiden ääriiviivat, nimet ja moduuliviivat. Paaluista tuotetaan myös paaluluettelo, johon myös tuodaan tarkkeet, eli paalujen toteutuneet sijainnit.

7.1.9 Erikoistapaukset

Rakennuksen perustuksiin voi helposti muodostua paikkoja, joissa tavalliset laskentamenetelmät eivät suoraan päde tai niitä täytyy soveltaa. Yleisimpiä tällaisia paikkoja ovat seinien nurkkien kohdille tulevat anturat sekä seinän T-liitoksen alle tulevat anturat.

Tällaisissa monimutkaisissa paikoissa tulee suunnittelijan ymmärtää laskennan taustaa ja osata soveltaa laskentamenetelmiä. Avuksi voi olla se, että anturan laskee kahdessa osassa ns. kahtena erillisenä anturana. Soveltaessa mitoitusta tulee muistaa, että laskettaessa paaluvoimia ei kuormitus-alalla ole muuten vaikutusta, mutta kuormakeskiön tulee olla oikealla sijainnilla. Anturan mitoituksessa ja ristikkomallin muodostamisessa taas kuormitusalueen muodon tulee olla oikeanlainen.

7.2 Mitoitus Vakiopaaluanturat-ohjeilla

Vakiopaaluanturat ovat paalujen käytön tehostamiseen ja paaluanturoiden käytön helpottamiseen ohjattuja julkaisuja. Niitä tuotetaan sekä betonisille että teräksisille paaluille. Vakiopaaluanturoiden käyttö edellyttää tilannetta, jossa vaaditut suunnitteluperusteet täyttyvät.

7.2.1 Suunnitteluperusteiden tarkastus

Suunnittelun alkuvaiheessa verrataan kohdetta vakiopaaluanturoiden suunnitteluperusteisiin. Erityisesti vakiopaaluanturoissa käytettyjen paalujen kestävyuden mitoitusarvot tulee tarkastaa kohteeseen soveltuviksi. Vakiopaaluanturoiden käytön soveltuvuuteen voi vaikuttaa myös rakenneosien mitat, kuormat, seuraamusluokat tai muut poikkeavat lähtöarvot.

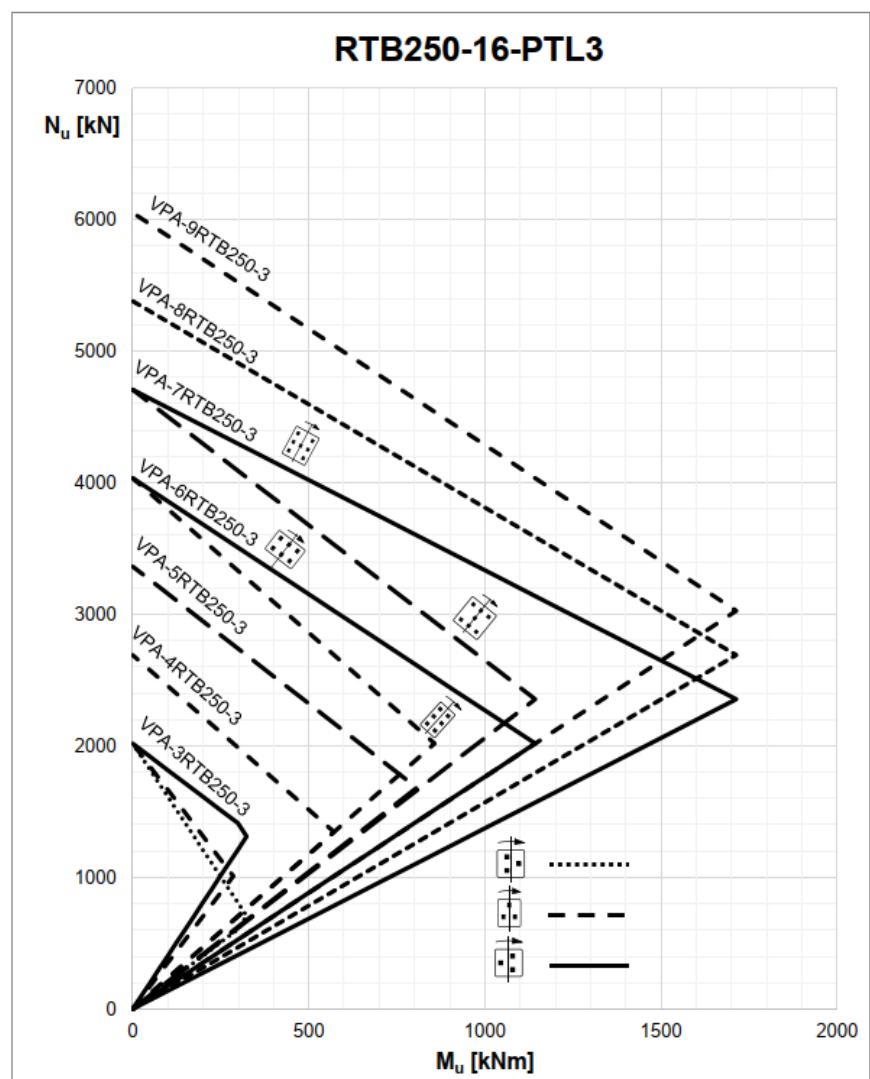
Vakiopaaluanturoiden soveltuvuuden lähtökohtina ovat seuraavat suunnitteluperusteet:

- Paalut ovat pystysuoria
- Ulkoisen kuormitus ei aiheuta anturaan merkittäviä vaakakuormia
- Paaluille ei sallita vetoa
- Pilari- ja seinäkuormat ovat anturaan nähden keskeisesti
- Pilarit ja seinät sijaitsevat anturan paaluryhmään nähden keskeisesti

7.2.2 Paaluanturan valinta

Kun suunnitteluperusteet todetaan soveltuviksi, määritetään kohteen perustuskuormat ja rakenne-malli. Paaluanturalle tulevat voimasuureet lasketaan murtorajatilassa Eurokoodin mukaisesti kuormitusyhdistelmittäin osavarmuuslukuja käyttäen. Kapasiteettikäyrien avulla määritellään kohteeseen soveltuvat vakiopaaluanturat, eli ne, joiden käyrästön sisäpuolelle määräävää kuormitustapausta kuvaava piste jää. Käytettävää anturaa valitessa tulee myös huomioida paalujen minimi keskiötäisyksien täyttyminen.

Kuvassa 12 on esitetty PTL3 RTB-250-16 paalun kapasiteettikäyrät eri paalumäärillä. Sallittu alue on siis vasemmalle suorien rajaamalle alueelle jäävä osuus. Jos kuormitustapauksen piste jää kapasiteettikäyrän yläpuolelle niin tarkoittaa se, että puristuskestävyys ylittyy eli kapasiteetti ei riitä. Jos taas piste jää käyrän alapuolelle tarkoittaa se, että paaluun kohdistuu vetoa.



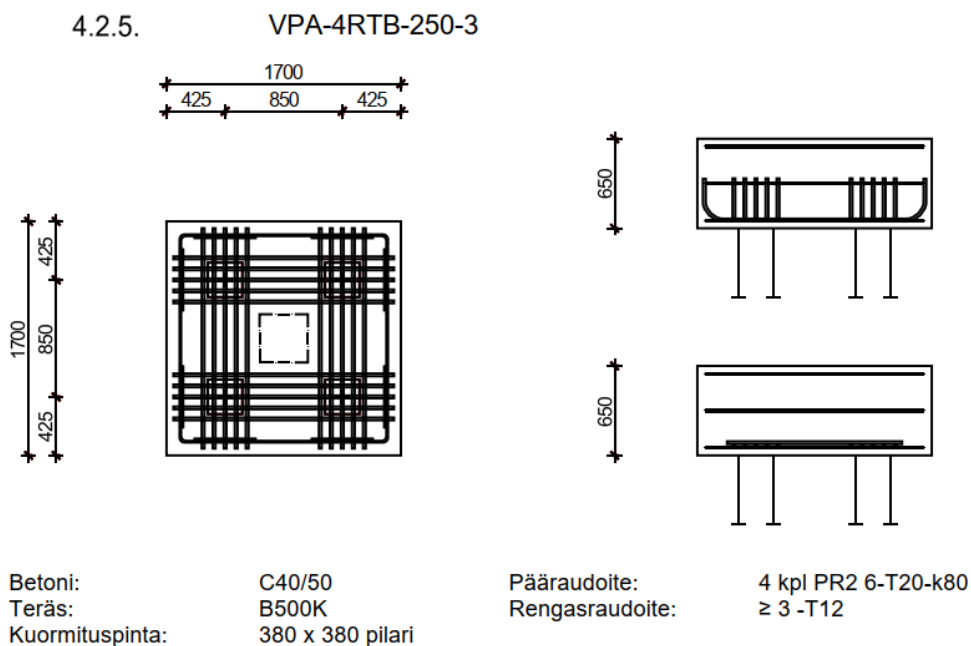
Kuva 12 Vakiopaalun RTB250-3 anturoiden valintakuvaaja (85% paalun puristuskapasiteetista) (Betonteollisuus Ry 2020, 11)

Paalujen sijaintipoikkeamat aiheuttavat paaluvoimien kasvua, joten tulee mahdolliset sijaintipoikkeamat huomioida kyseisen vakiopaaluanturan ohjeiden mukaisesti. Tämä tehdään joko käyttäen paalulle tulevan kuorman mitoitusarvona maksimissaan 80% paalun kestävyden mitoitusarvosta, tai sitten vähennys on huomioitu valmiiksi mitoituskäyrästä määriteltäessä. Kuitenkin on suositeltavaa, että ei käytetä anturaa, jonka käyrästä rajalle kuormitustapauksen piste jää, jos epäillään että merkittäviä sijaintipoikkeamia syntyy.

7.2.3 Rauditus

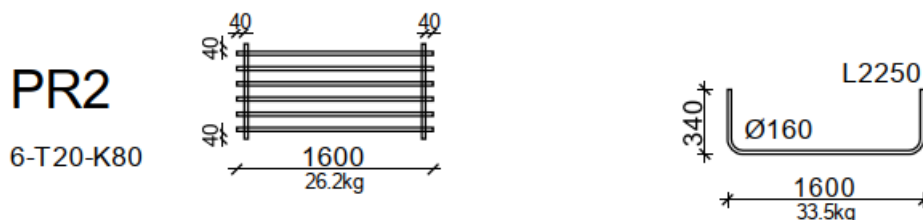
Vakiopaaluanturoille on määritelty vakioraudoitukset ja ankkuroinnit, joihin voidaan viitata raudoitusta määriteltäessä. Kuitenkin jokaisesta anturasta tulee tehdä raudoituskuvat vaikkakin käytetään

vakioraudoitusta. Kuvassa 13 on esitetty paalutustyöluokan PLT3 neljän RTB-250 paalun vakiopilari-
anturan esimerkkiraudoitukset. Vakiopaaluanturoiden mukana julkaistaan yleensä myös dwg-muo-
dossa anturoiden blokit, joita voidaan hyödyntää suunnittelussa.



Kuva 13 Esimerkki vakiopaaluanturoiden raudoituksesta (Betoniteollisuus Ry 2020, 23.)

Pääraudoitteista on lisäksi erilliset mittakuvat, joissa on esitetty raudoitteen tarkemmat mitat ja ankuroinnin tarkemmat tiedot sekä hitsatulla että taivutetulla tangolla. Kuvassa 14 on esitetty kuvan 13 mukaisen raudoituksen pääraudoite sekä hitsatulla että taivutetulla tangolla.



Kuva 14 Esimerkki vakiopaaluanturan pääraudoitteesta (Betoniteollisuus Ry 2020, 46.)

8 MITOITUSMENETELMIEN TARKASTELU

Vertaileva tarkastelu suoritetaan käyttäen TB-paalujen Vakiopaaluanturat -ohjeen versiota 5.8.2020 sekä Swecon Paaluantura -laskentapohjaa. Tarkoituksena on tutkia TB-paalun vakiopaaluanturan kestävyyttä laskentapohjan avulla. Mitoituksessa huomioidaan sijaintipoikkeamien vaikutus tuloksii. Liitteessä 1 on esitetty ote laskentapohjasta, jossa on mitoitettuna kyseinen vakiopaaluantura, ja jonka laskennassa on huomioitu sijaintipoikkeamat.

Vertailua Swecon laskentapohjan sekä RD- ja RR-paalujen Vakiopaaluanturoiden välillä on tehty aiemmin Aleksi Lehtosen diplomityössä (Eurokoodin mukaisen laskentamenetelmän kehittäminen paaluanturan mitoitukseen). Työssä on tehty vertailua myös TB-paalujen Vakiopaaluanturoihin, mutta käytössä on ollut ohjeen vanha versio, joten kyseinen vertailu ei ole enää ajantasainen. Tästä syystä tässä työssä vertaillaan vain uusien TB-paalujen Vakiopaaluanturoita ja tutkitaan niiden kestävyyttä.

Aiemmassa vertailussa TB-paalujen Vakiopaaluanturoissa havaittiin puutteita anturan korkeudessa. Tämä aiheutti epäedullisia ristikkomallin nousukulmia, ja sitä myöten suuria jännityksiä solmuihin ja suuria sauvavoimia. Tarkastellaan erityisesti, onko kyseinen ongelma saatu korjattua uusissa TB-paalujen Vakiopaaluanturat -ohjeissa.

8.1 Suunnitteluperusteet

Vertailumitoituksessa käytetyt mitoitusoletukset ovat seuraavat:

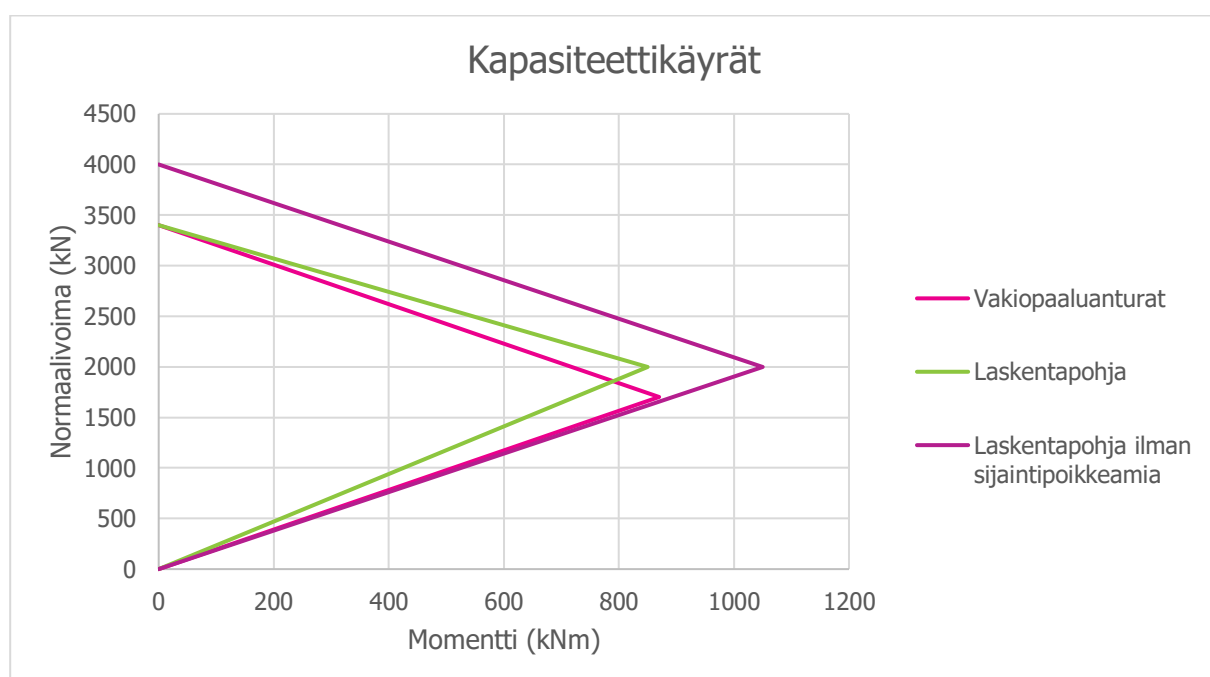
- Käytettävä paalutyyppi on RTB-300-16
- Paalumäärä on 4
- Paalujen mitoituskestävyys on 1001 kN
- Paalut ovat pystysuoria
- Paaluväli on 1050 mm
- Yksittäisen paalun sallittu sijaintipoikkeama on 100 mm ja paaluryhmän 50 mm
- Paalujen upotussyvyys on 50 mm
- Paaluantura toimii paaluvoimia laskettaessa äärettömän jäykkänä kappaleena
- Anturaan ei kohdistu ulkoisesta kuormituksesta merkittäviä vaakavoimia
- Anturan kokonaiskuormitus katsotaan koostuvan 60% muuttuvista ja 40% pysyvistä kuormituksista
- Rakenteen seuraamusluokka on CC2 ja luotettavuusluokka on RC2
- Halkeilun mitoituksessa pitkäaikaisen kuorman yhdistelykertoimena on käytetty arvoa 0,8
- Halkeamaleveyden sallittu arvo on 0,3 mm
- Paaluille ei sallita vetoa
- Ympäristörasitusluokka on XC2
- Paalutustyöluokka on PTL2
- Anturan betonilaatu on C35/45
- Anturan mitat ovat 2200 mm x 2200 mm x 800 mm
- Betonin osavarmuusluku on 1,5 ja raudoituksen 1,15

- Kuormituspinnan minimileveys on 480 mm

Laskennassa eri menetelmillä on tiettyjä eroavaisuuksia. Laskentapohjassa kuormituksen alapuolisten solmujen korkeus määritetään ristikkomallin optimoinnissa tapauskohtaisesti, kun taas Vakiopaaluanturoissa solmujen korkeus on määritetty vakioksi 50 mm anturan yläpinnasta alaspäin. Lisäksi paalujen yläpuoliset solmualueet on määriteltä eri tavoilla. Laskentapohjassa solmualue sijaitsee raudoituksen ja paalun yläpään välillä, kun taas Vakiopaaluanturoissa se sijaitsee raudoitteiden yläpinnan tasolla.

8.2 Paaluvoimien vertailu

Paaluvoimia vertaillaan luomalla laskentapohjalla Vakiopaaluanturoiden kaltainen kapasiteettikäyrä. Käyrät luotiin sekä huomioimalla sijaintipoikkeamat sekä ilman sijaintipoikkeamia.



Kuva 15 Taulukko paaluvoimien vertailusta (Valtonen 2021, CC BY)

Voidaan todeta, että Vakiopaaluanturoissa käytetty 85% paalujen kapasiteetti pienentää anturan kapasiteettia melko samalla tavalla kuin sijaintipoikkeamien tarkempi huomiointi laskennassa. Käytetty kapasiteetti todetaan todenmukaiseksi, sillä kyseinen kapasiteettikäyrä mukailee laskentapohjan täydellä kapasiteetilla ja sijaintipoikkeamat huomioiden luomaa käyrää. Kuitenkin on suositeltavaa, ettei kuormitustapauksen pistettä mitoiteta jäämään aivan käytetyn anturan käyrästä rajalle.

8.3 Sauvavoimien tarkastelu

Koska Vakiopaaluanturoiden mukana ei julkaistu vertailulaskelmia, tarkastellaan anturan kestävyys vain laskentapohjalla. Vertailuksi on esitetty myös tulokset laskentapohjalla ilman sijaintipoikkeamien huomiointia. Näin voidaan huomata, kuinka paljon eroa kriittisimmällä sallitulla sijaintipoikkeamalla on tuloksiin, joissa sijaintipoikkeamaa ei huomioida ollenkaan.

Taulukko 2 Sauvavoimien tarkastelu

	Laskentapohja	Laskentapohja ilman sijainti- poikkeamia
Diagonaalisten puristussauvojen nousukulma	44,13°	49,75°
Diagonaalisten puristussauvojen sauvavoima	1437,66 kN	1311,58 kN
Horisontaalisten puristussauvojen sauvavoimat	729,68 kN	599,27 kN
Vetosauvojen sauvavoimat	820,55 kN	599,27 kN

Tuloksista huomataan, että sijaintipoikkeamien vaikutus oli etenkin vetosauvojen sauvavoimiin suuri. Nämä sauvavoimat vaikuttavat suoraan raudituksen mitoitukseen, eli ilman sijaintipoikkeamien huomiointia voitaisi anturan rauditus helposti alimitoitaa.

8.4 Solmujen jännitysten tarkastelu

Taulukko 3 Solmujen jännitysten vertailu

	Laskentapohja			Laskentapohja ilman sijaintipoikkeamia		
	Sallittu jännitys	Jännitys	Käyttöaste	Sallittu jännitys	Jännitys	Käyttöaste
Paalujen yläpuoleiset solmut	14,07 MPa	11,12 MPa	79,04 %	14,07 MPa	11,12 MPa	79,04 %
Diagonaalisten puristussauvojen alapäät	14,07 MPa	14,46 MPa	102,77 %	14,07 MPa	12,67 MPa	90,02 %
Kuormituksen alapuoleiset solmut	56,29 MPa	17,38 MPa	30,87 %	56,29 MPa	17,38 MPa	30,87 %
Diagonaalisten puristussauvojen yläpäät	56,29 MPa	19,59 MPa	34,80 %	56,29 MPa	17,89 MPa	31,78 %

Havaitaan, että diagonaalisten puristussauvojen alapäiden solmujen jännitykset muodostuvat liian suuriksi. Kapasiteetin ylitys on niin pieni, että se voi johtua erosta solmualueen määrittämisessä.

Vakiopaaluanturoiden solmualue on määritelty tavalla, jolla solmun sallittu jännitys muodostuu suuremmaksi kuin laskentapohjalla. Jotta päästään varmalle puolelle laskentapohjan tavalla määrittää solmualue, tulee anturan korkeutta kasvattaa.

Yleisesti kyseisen vakiopaaluanturan jännitykset pysyvät suunnitteluohjeiden määrittämässä rajoissa. Sijaintipoikkeamien huomioinnilla nähdään lisäksi olevan vaikutusta vain osaan solmujen jännityksistä. Suurin vaikutus sijaintipoikkeamilla tässäkin tarkastelussa on heti paalujen yläpuolella.

8.5 Raudoituksen vertailu

Tarkasteltavan vakiopaaluanturan pääraudoitteeksi on määritelty 5-T25-k100 ja teräslajiksi B500K. Vakiopaaluanturoissa käytetyllä k100 jaolla raudoituksen jakoalue muodostuu paalun ulkopuolelle. Kuitenkin tarkastellaan tässä kyseisen raudoituksen toimivuus, kun käytetään laskentapohjassa määriteltyä paalun päälle rajoittuvaa jakoaluetta ja terästen k80 jakoa.

8.5.1 Vetorausdoitus

Taulukko 4 Vetorausdoituksen tarkastelu

	Laskentapohja	Laskentapohja ilman sijaintipoikkeamia
Keskiöväli	80 mm	80 mm
Jakoalue	325 mm	325 mm
Käyttöaste	76,89 %	56,16 %

Huomataan, että vetorausdoituksen käyttöaste jää melko pieneksi. Kokeillaan riittääkö raudoitus, jos tankomäärää vähennetään ja käytetään raudoitusta 4-T25-k100.

Taulukko 5 Vetorausdoituksen tarkastelu tankomäärän muutoksen jälkeen

	Laskentapohja	Laskentapohja ilman sijaintipoikkeamia
Keskiöväli	100 mm	100 mm
Jakoalue	325 mm	100 mm
Käyttöaste	96,12 %	70,20 %

Voidaan todeta, että tämän anturatyypin esimerkkiraudoitus on hieman ylimitoitettu, ja tankomäärän vähennyksen jälkeenkin käyttöaste jää sallituksi.

8.5.2 Ankkurointi

Ankkurointi vertaillaan sekä taivutetulla, että hitsatulla tangolla. Taivutetulla tangolla käytetään taivutustelan halkaisijana 200 mm ja taivutuksen pituutena 400 mm. Hitsatulla tangolla käytetään poikittaisena tankona samaa terästä kuin pääraudoitteessa.

Taulukko 6 Ankkurointi taivutetulla tangolla

	Laskentapohja	Laskentapohja ilman sijaintipoikkeamia
Ankkurointipituuden mitoitusarvo	168,90 mm	-1,85 mm
Ankkuroinnin käyttöaste	26,06 %	-0,25 %

Koska jakoalueena käytettiin paalun aluetta, vaikutti se ankkuroitaviin voimiin vähentävästi. Kuitenkin voidaan todeta, että ankkurointi on mitoitettu turhan suureksi ankkuroitaviin vetovoimiin nähden. Jos sijaintipoikkeamia ei huomioida, tapahtuu tarpeellinen raudoituksen ankkurointi jo paalun alueella, eli erillistä ankkurointia ei vaadittaisi.

Taulukko 7 Ankkurointi hitsatulla tangolla

	Laskentapohja	Laskentapohja ilman sijaintipoikkeamia
Ankkurointipituuden mitoitusarvo	94,75 mm	-22,98 mm
Ankkuroinnin käyttöaste	34,46 %	-6,13 %

Myös hitsatulla tangolla voidaan todeta määritetyn ankkuroinnin olevan ylimitoitettu.

8.6 Yhteenveto

Tilanteet, joissa anturan käyttöaste ylittyi, johtuivat solmualueiden erilaisesta määrittelystä sekä Eurokoodin erilaisesta soveltamisesta. Kaiken kaikkiaan voidaan kuitenkin todeta anturan kestävän sille tulevat kuormitukset riittävällä varmuudella. Aiemmissa TB-paalujen Vakiopaaluanturoissa havaitut ongelmat korkeudessa voidaan todeta korjatuiksi, sillä solmujen jännitykset sekä sauvavoimat pysyivät sallituissa rajoissa.

Anturan raudoituksen tarkastelussa havaittiin, että tämän anturan kohdalla määritelty raudoitus ja ankkurointi olivat ylimitoitettuja. Kustannustehokkaampaan lopputuloksen tässä tapauksessa päästään laskemalla anturan raudoite erikseen.

Tarkasteltavan anturan kohdalla havaittiin, että anturan reunaetäisyys on määritetty suhteellisen suureksi. Reunaetäisyyden minimiarvo on tässä tilanteessa 300 mm ja kyseiseen anturaan määritelty

arvo on 575 mm. Huomioiden ankkuroinnin taivutuksen mahdollisesti vaatima tila, voitaisiin anturan mittoja pienentää 300 mm ilman ongelmia.

Käytetty keskiöetäisyys 1050 mm voidaan katsoa tässä tapauksessa riittäväksi noin 17 m paalupituuteen asti, jos keskiöväliin ei huomioida sijaintipoikkeamia. Kuitenkin tätä pidempiä paaluja käytettäessä ei kyseinen mitta täytä Paalutusohjeen minimiarvoja. Käytettäessä mitoitusmenetelmänä taukkomitoitusta on toki tämä ongelma aina olemassa. Kuitenkin rakennesuunnittelijan on hyvä huomioida tämä asia paaluanturaa suunniteltaessa.

Pienempi keskiöetäisyys ei vaikuta paaluanturan kestävyYTEEN välttämättä heikentävästi, mutta käytettäessä pienempää keskiöväliä, voivat paalut vahingoittaa toisiaan asennettaessa. Paalupituuden kasvaessa kasvaa myös vaurioitumisen vaara. Kun valitaan käytettäväksi vakiopaaluantura, jonka keskiöväli on Paalutusohjeen suositusta pienempi, sekä epäillään vaurioitumista, tulee asennusjärjestyksessä ensin asennetut paalut tarkastaa.

9 ESIMERKKI CASE: NELJÄ- JA 16-KERROKSIINEN TOIMISTO JA ASUINRAKENNUS

Kohde on kompleksi, josta osa on 16 kerrosta korkea tornitaloa ja osa matalampaa 4 kerroksista toimisto-osaa. Jaetaan kohde A- ja B-osiin, joista A-osan anturat sijoittuvat matalan osan alle ja B-osan anturat tornitalon alle. Molemmista osista mitoitetaan kaksi anturaa, joista Antura 1 ja Antura 2 ovat A-osalla ja Antura 3 ja Antura 4 ovat B-osalla. Käytettävissä lähtötietoina on pohjatutkimusraportti sekä rakennesuunnittelijan määrittämät kuormatiedot.

9.1 A-osan lähtötiedot

Anturakohtaiset lähtötiedot esitetty taulukossa 3. Yhteiset mitoitusolettamukset ovat seuraavat:

- Käytettävä paalutyyppi on lyömällä asennettava RTB-300-16
- Paalujen mitoituskestävyys on 1001 kN
- Yksittäisen paalun sallittu sijaintipoikkeama on 100 mm ja paaluryhmän 50 mm
- Paalujen upotussyvyys on 50 mm
- Paaluantura toimii paaluvoimia laskettaessa jäykkänä kappaleena
- Anturan kokonaiskuormitus katsotaan koostuvan 60% muuttuvista ja 40% pysyvistä kuormituksista
- Rakenteen seuraamusluokka on CC2 ja luotettavuusluokka on RC2
- Halkeilun mitoituksessa pitkäaikaisen kuorman yhdistelykertoimena on käytetty arvoa 0,8
- Halkeamaleveyden sallittu arvo on 0,3 mm
- Paaluille ei sallita vetoa
- Ympäristörasitusluokka on XC2
- Paalutustyöluokka on PTL2
- Anturan betonilaatu on C35/45
- Betonin osavarmuusluku on 1,5 ja raudoituksen 1,15
- Vinopaalujen kaltevuus on joko 1:5 tai 1:8

Jotta Vakiopaaluanturoiden suunnitteluperusteet täyttyvät, on anturalla 2 voimassa myös seuraavat oletukset:

- Paalut ovat pystysuoria
- Anturaan ei kohdistu ulkoisesta kuormituksesta merkittäviä vaakavoimia

9.2 B-osan lähtötiedot

Anturakohtaiset lähtötiedot esitetty taulukossa 3. Yhteiset mitoitusolettamukset ovat seuraavat:

- Käytettävä paalutyyppi on RR170/10
- Paalujen mitoituskestävyys on 1480kN
- Yksittäisen paalun ja paaluryhmän sallittu sijaintipoikkeama on 50 mm
- Paalujen upotussyvyys on 50 mm
- Paaluantura toimii paaluvoimia laskettaessa äärettömän jäykkänä kappaleena
- Anturan kokonaiskuormitus katsotaan koostuvan 60% muuttuvista ja 40% pysyvistä kuormituksista

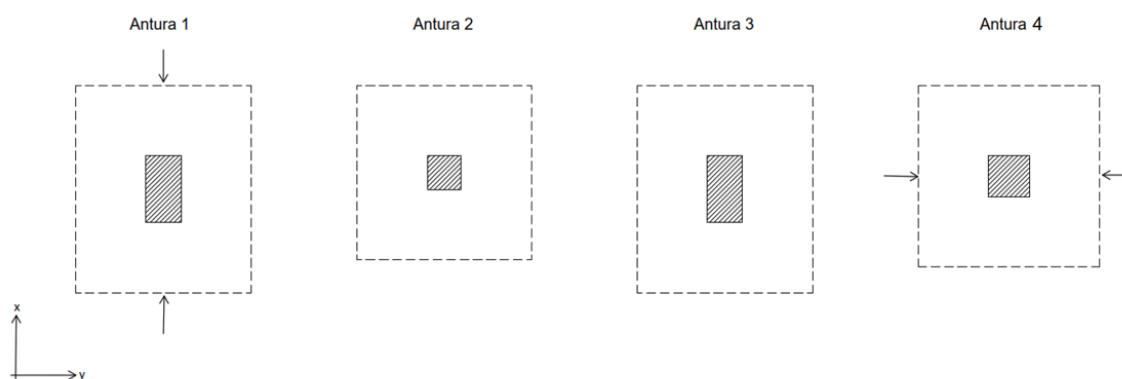
- Rakenteen seuraamusluokka on CC3 ja luotettavuusluokka on RC3
- Halkeilun mitoituksessa pitkäaikaisen kuorman yhdistelykertoimenä on käytetty arvoa 0,8
- Halkeamaleveyden sallittu arvo on 0,3 mm
- Paaluille ei sallita vetoa
- Ympäristörasitusluokka on XC2
- Paalutustyöluokka on PTL3
- Anturan betonilaatu on C35/45-2
- Betonin osavarmuusluku on 1,5 ja raudoituksen 1,15
- Vinopaalujen kaltevuus on 1:5
- Paalun kärjet varustetaan kalliokärjillä

Jotta Vakiopaaluanturoiden suunnitteluperusteet täyttyvät, on anturalla 3 voimassa myös seuraavat olettamukset:

- Paalut ovat pystysuoria
- Anturaan ei kohdistu ulkoisesta kuormituksesta merkittäviä vaakavoimia

Taulukko 8 Anturoiden lähtötiedot

Antura	Pystykuorma F (MRT)	Vaakavoima (suunta, kts. kuva 16)	Kuormitusala (mm)	Paalujen arvioitu pituus
1	3466 kN	100 kN (x)	950x500	20 m
2	4110 kN	-	480x480	20 m
3	6012 kN	-	950x500	25 m
4	9994 kN	200 kN (y)	580x580	22 m



Kuva 16 Anturoiden hahmotuskuvat sekä vaakavoimien suunnat (Valtonen 2021, CC BY)

9.3 Paaluanturan mitoitus

Paaluanturat mitoitetaan pääasiassa käyttäen Swecon laskentapohjaa. Lisäksi on tehty vertailumitoitus anturoille 2 ja 3 Vakiopaaluanturat ohjeilla. Näissä tapauksissa on myös vertailtu eri menetelmillä

saatuja tuloksia. Tarkoituksena on mitoittaa anturat mahdollisimman tarkasti, jolloin lopputulos on mahdollisimman kustannustehokas.

9.3.1 Paalumäärän määrittäminen

Lähtötiedoissa on määrätty käytettävän A-osalla joko kaltevuutta 1:8 tai 1:5 ja B-osalla kaltevuutta 1:5. Lähtökohtaisesti pyritään käyttämään A-osalla kaltevuutta 1:8, jos tällä saadaan vaakavoimat otettua vastaan kohtuullisella paalumäärällä. Kuvassa 17 on esitetty esimerkki 1:5 vinon RRs170/10 paalun voimasuureiden laskenta trigonometrian avulla. Vinon paalun R_d on jaettu pysty- ja vaakakomponentteihin, jotka vastaavat paalun vastaanottamia vaakaa- ja pystykuormia.

RRs170/10



Kuva 17 Vinopaalun vaakaa- ja pystykapasiteetit

Taulukossa 10 on esitetty käsin laskettu paalumäärän arvio, joka on tarkastettu laskentapohjalla. Tästä huomataan, että koska laskentapohja ottaa huomioon mahdolliset sijaintipoikkeamat, ei paalumäärää voida suoraan päättää määrittämättä paaluvoimia, sillä paalumäärän arvio jäi useassa tapauksessa liian pieneksi.

Taulukko 9 Anturoiden valitut paalumäärät

Antura	Paalumäärän arvio		Lopulliset paalumäärät	
	Vinopaalut (kaltevuus)	Pystysuorat paalut	Vinopaalut (kaltevuus)	Pystysuorat paalut
Antura 1	4 (1:8)	0	4 (1:8)	1
Antura 2	0	5	0	5
Antura 3	0	5	0	6
Antura 4	4 (1:5)	4	4 (1:5)	5

9.3.2 Anturan koon määrittäminen

Paalujen keskiöetäisyydet ja reunaetäisyydet tulee tarkastaa ja määrittää Paalutusohjeen 2016 mukaiseksi. Keskiö- ja reunaetäisyyksiä määriteltäessä tulee huomioida tilanteet, joissa tapahtuu epäedullisimmat sallitut sijaintipikkeamat. Näillä arvoilla sekä paalumäärillä voidaan määrittellä anturalle alustavat mitat. Alla olevassa taulukossa on esitetty anturakohtaisesti keskiö- ja reunaetäisyyksien minimiarvot sekä laskentapohjalla laskennassa käytetyt arvot, joissa on huomioitu sijaintipikkeamat.

Taulukko 10 Anturoiden keskiö- ja reunaetäisyydet

Antura	Minimi keskiöetäisyys	Valittu keskiöetäisyys	Minimi reunaetäisyys	Valittu reunaetäisyys
Antura 1	1100 mm	1300 mm	300 mm	400 mm
Antura 2	1100 mm	1300 mm	300 mm	400 mm
Antura 3	800 mm	900 mm	350 mm	400 mm
Antura 4	800 mm	900 mm	350 mm	400 mm

Anturan lopulliseen kokoon voi vaikuttaa kuitenkin vielä esimerkiksi raudituksen ankkuroinnin vaatima tila, josta syystä anturan lopulliset mitat voivat olla edellä mainittujen valittujen arvojen summaa suuremmat.

Anturan korkeus määritellään niin, että anturaan muodostuvan ristikkomallin solmujen ja sauvojen käyttöasteet pysyvät sallituissa rajoissa. Lisäksi valittavaan korkeuteen vaikuttaa anturan halkeamaleveys, jonka käyttöasteen tulee niin ikään olla sallituissa rajoissa.

9.4 Mitoituksen tulokset

Mitoituksen tuloksena saatiin tulokseksi taulukon 6 mukaiset anturat, jotka kestävät niille tulevat kuormitukset. Kuvat anturoista on esitetty anturakohtaisissa raudituskuviissa (Liite 2).

Taulukko 11 Mitoitettujen anturoiden tiedot

	Anturan koko (x, y, z)	Paalumäärä	Paaluhatun koko	Pääteräs (x suunta)	Pääteräs (y suunta)
Antura 1	2,72 m x 2,72 m x 1,1 m	5	-	4 x 25 mm	5 x 25 mm
Antura 2	2,72 m x 2,72 m x 1,25 m	5	-	5 x 25 mm	5 x 25 mm

Antura 3	1,95 m x 2,95 m x 1,2 m	6	350 mm x 45 mm	5 x 25 mm	7 x 25 mm
Antura 4	2,65 m x 2,65 m x 1,2 m	9	350 mm x 45 mm	7 x 25 mm	7 x 25 mm

9.5 Anturoiden mitoitus Vakiopaaluanturat -ohjeilla

Tarkasteltavaksi Vakiopaaluanturoilla otettiin anturat 2 ja 4, sillä niiden kohdalla täyttyvät Vakiopaaluanturoiden suunnitteluperusteet. Aiemmin esitetyt suunnitteluolettamukset ovat voimassa myös tässä mitoituksessa. Anturan 2 mitoitus tehtiin TB-paalujen Vakiopaaluanturat ohjeella ja anturan 4 mitoitus RR- ja RD- paalujen Vakiopaaluanturat ohjeella.

9.5.1 Vakiopaaluanturan valinta

Käytettävät anturat valitaan tarkastelemalla käytettävän paalutyyppin mitoituskäyrästä sekä taulukoita. Taulukossa 13 on esitetty valitut vakiopaaluanturat.

Taulukko 12 Valitut vakiopaaluanturat

	Valittu vakiopaaluantura
Antura 2	VPA-5RTB300-2
Antura 3	FPS-5RRs170/10

9.6 Mitoitustulosten vertailu

Vertaillaan eri mitoitusmenetelmillä saatuja anturan kokoja sekä teräsmääriä. Vakiopaaluanturoissa esitetty reunapaalujen välinen keskiöväli on muutettu keskimmäisen ja nurkkapaalun väliseksi etäisyydeksi, jotta arvoja voidaan vertailla laskentapohjassa käytettyihin arvoihin.

Taulukko 13 Vakiopaaluanturoiden ja laskentapohjalla mitoitettujen anturoiden vertailu

	Antura 2		Antura 3	
	Vakiopaaluanturat	Laskentapohja	Vakiopaaluanturat	Laskentapohja
Anturan koko (mm)	2300 x 2300 x 1100	2720 x 2720 x 1250	1800 x 1800 x 1000	1700 x 2700 x 1100
Keskiöväli (mm)	1047	1301	806	900
Kuormituspinnan koko (mm)	480 x 480	480 x 480	450 x 450	500 x 950

Pääraudoite	6-T25-k100	5-T25-k80	6-T25-k80	4-T25-k120 (x) 6-T25-k70 (y)
Paaluhatus koko (mm)	-	-	300 x 300 x 30	350 x 350 x 45

Tuloksista voidaan päätellä, että erityisesti erityyppinen keskiöetäisyyksien huomiointi vaikuttaa anturan kokoon. Voidaan myös todeta, että käytettäessä Vakiopaaluanturoita ei Paalutusohjeen mukainen vähimmäiskeskiöetäisyys täyty näin suurilla paalupituuksilla. Lisäksi laskentapohjassa on huomioitu keskiöetäisyyteen suurimpien sallittujen sijaintipoikkeamien huomiointi, joka kasvattaa anturan kokoa, mutta vähentää suunnitelmien muutostarvetta ja helpottaa kustannusten ennakoitavuutta.

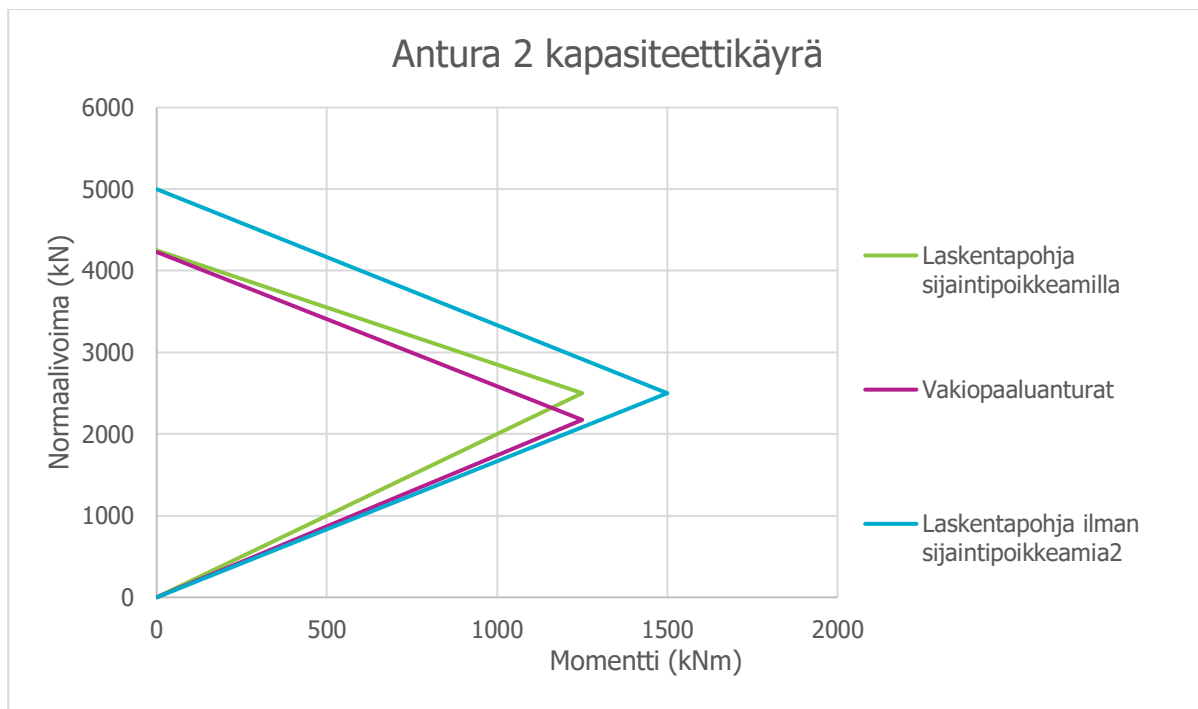
Myös paalumäärissä havaittiin eroja eri menetelmillä. Ero katsotaan johtuvan laskentapohjan kyvystä huomioida kriittiset sijaintipoikkeamat, jolloin paalumäärään vaikuttavat maksimipaaluvoimat voidaan laskea tarkemmin.

Paaluhatus koossa voidaan huomata selvä ero etenkin paaluhatus paksuudessa. Tarkasteltaessa Vakiopaaluanturoiden käytetylle paalulle määriteltyä vakiopaaluhattua, voidaan todeta, että se on liian ohut kestämään sille tulevat kuormitukset. Laskettaessa kyseisen paaluhatus kestävyys, muodostui käyttöasteeksi 180 %.

9.6.1 Paaluvoimien vertailu

Jotta voidaan tarkastella Vakiopaaluanturoilla saatuja tuloksia, luodaan niillä valituista anturoista laskentapohjalla kapasiteettikäyrät. Näin Vakiopaaluanturoiden kapasiteettikäyrien todenmukaisuutta voidaan arvioida.

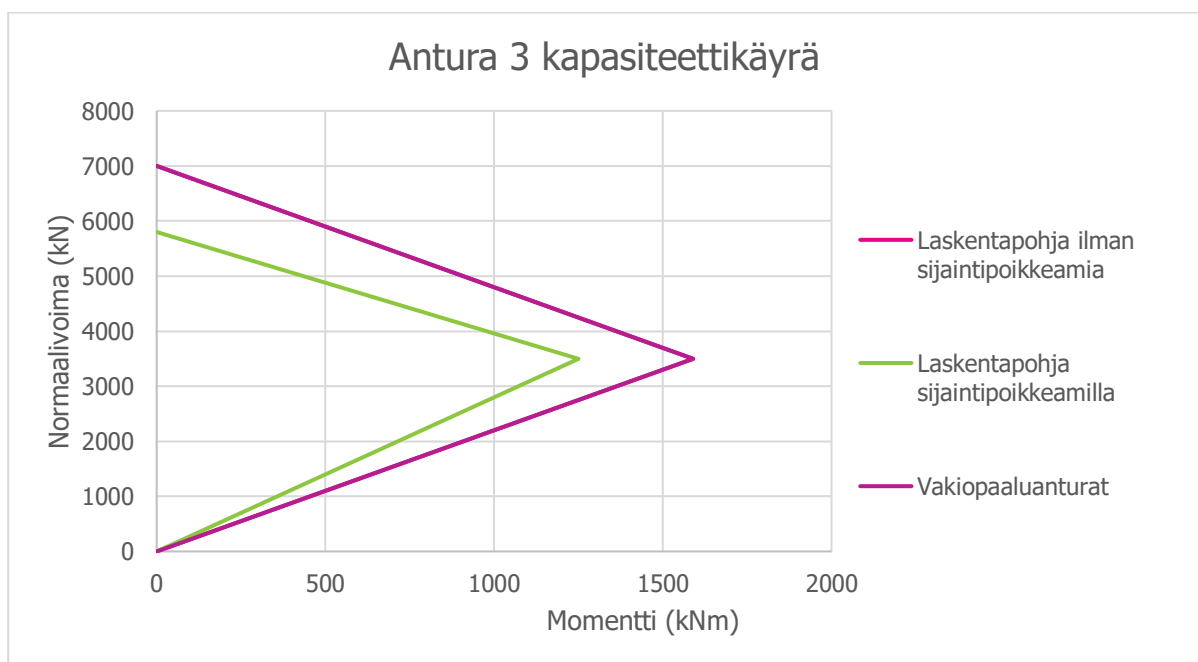
9.6.2 TB-paalun paaluanturan vertailu



Kuva 18 TB-paalun Vakiopaaluanturan paaluvoimien tarkastelu (Valtonen 2021, CC BY)

Tarkastelemalla käyriä voidaan todeta, että valittu vakiopaaluantura kestää kyseiset kuormitukset. TB-paalujen Vakiopaaluanturoiden kapasiteettikäyrän muodostus 85% kapasiteetilla voidaan tässäkin tapauksessa todeta todenmukaiseksi, kunhan ei valita anturaa jonka aivan käyrästön rajalle määräävä piste jää.

9.6.3 RRs-paalun paaluanturan vertailu



Kuva 19 RRs-paalun Vakiopaaluanturan paaluvoimien tarkastelu (Valtonen 2021, CC BY)

Eroavaisuus laskentapohjan ja Vakiopaaluanturoiden käyrissä johtuu laskentapohjan kyvystä huomioida sijaintipoikkeamien muodostuminen ja niiden vaikutus laskennassa. Vakiopaaluanturoiden kapasiteetikäyrässä ei ole huomioitu sijaintipoikkeamia, vaan suositus on olla valitsematta anturaa, jonka käyrästäön rajalle kuormitusta vastaava piste jää. (SSAB 2017, 6.) Tästä syystä Vakiopaaluanturoiden kapasiteetti vastaa täysin ilman sijaintipoikkeamien huomiointia muodostettua käyrää.

Kun sijoitetaan anturan 3 kuormitustapausta vastaava piste käyrästään, voidaan todeta, että kyseinen vakiopaaluantura ei ole riittävä ottamaan vastaan kyseisiä kuormituksia. Jotta kyseinen antura saataisiin mitoitettua Vakiopaaluanturoilla, tulisi paalutyyppejä muuttaa.

10 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli helpottaa paaluperustusten suunnittelua kokoamalla yhteen paaluperustusten suunnitteluun liittyvät asiat. Työn laajuus pyrittiin rajaamaan vai tärkeimpiin asioihin, joiden ymmärtäminen suunnitteluprosessissa on välttämätöntä. Asiat pyrittiin käsittelemään niin, että sisältö on helposti ymmärrettävissä myös suunnittelijoille, joilla ei ole paljon kokemusta paaluperuksista.

Työn yhteydessä luotiin tilaajan yksityiseen käyttöön ohjekortti. Luotu suunnitteluohje mahdollistaa kaiken paaluperustusten suunnittelussa tarpeellisen tiedon löytymisen samasta paikasta, kun aiemmin tiedot ovat olleet hajallaan. Ohjekortin suurin eroavaisuus julkiseen versioon on se, että siinä on kerrottu tarkemmin laskentapohjan käytöstä sekä kerätty ohjeita laskentapohjan laskennan ymmärtämiseksi. Etenkin nämä ohjeet tulevat helpottamaan käytännön suunnittelua tilaajayrityksessä.

Työn avulla paaluperustusten suunnittelusta tulee helpompaa ja yhtenäisempää, etenkin tilaajan puolella laskentapohjaa käytettäessä. Työstä on hyötyä myös erityisesti Vakiopaaluanturoiden käyttöön. Työssä käytyjen pohjatietojen sekä vertailujen pohjalta suunnittelija saa käsityksen suunnittelun vaaranpaikoista ja osaa soveltaa suunnitelmia kohteeseen soveltuviksi, mikä vähentää riskiä anturan yli- tai alimitoitukseen. Lisäksi etenkin kokemattomien suunnittelijoiden suunnitteluprosessin kokonaisvaltainen ymmärtäminen on työn pohjalta helpompaa, sillä etenkin suunnittelun kulku ja suunnittelijoiden työnjako voivat olla usein vaikeita hahmottaa ilman kokemusta paaluperustusten suunnittelusta.

Jatkotutkimuksena aiheesta voitaisi ongelmallisten ja soveltamista vaativien alueiden, kuten kulmien ja T-liitosten alapuolisten anturoiden suunnitteluun kehitellä yhtenäinen suunnittelumenetelmä.

LÄHTEET

Ahomies, Liikennevirasto 2016. Kallioon injektoitu ja ankkuroitu porapaalu. Pdf-tiedosto. Julkaistu 5/2016. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/opin_2016-05_kallioon_injektoitu_web.pdf. Viitattu 14.4.2021.

Betoniteollisuus Ry, Rakennusteollisuus 2020. Vakiopaaluanturat suunnittelijan ohje. Pdf-tiedosto. Julkaistu 5.8.2020. https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/01/Vakiopaaluanturat_27012021.zip. Viitattu 26.2.2021.

Betoniteollisuus ry julkaisuaika tuntematon. Paaluperustukset. Verkkojulkaisu. <https://betoni.com/koti-betonista/rakennustapavaihtoehdot/perustukset/paaluperustukset/> Viitattu 7.1.2021

Kinnunen, Liikennevirasto 2015. Ajan vaikutus kitkapaalujen geotekniseen kestävyys. Pdf-tiedosto. Julkaistu 2015. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2015-49_ajan_vaikutus_web.pdf. Viitattu 13.1.2021.

Korhonen, Jari 2021. Osastopäällikkö. Sweco Rakennetekniikka Oy. Haastattelu 22.4.2021.

Kujala, Liikennevirasto 2005. Paalulaattarakenteiden suunnittelu. Pdf-tiedosto. Julkaistu 2005. <https://julkaisut.vayla.fi/pdf/3200937-vpaalulaattarakesuunn.pdf>. Viitattu 13.1.2021.

Lehtonen, Aleks 2018. Eurokoodin mukaisen laskentamenetelmän kehittäminen paaluanturan mitoitukseen. Diplomityö. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan maisteriohjelma, rakennesuunnittelu ja rakentamisteknologia. Oulun yliopisto, teknillinen tiedekunta. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201805091627> Viitattu 25.2.2021.

Lehtonen, Aleks 2020. Betonirakenteiden viikkoluento, Paaluanturat. Opetusmateriaali. Sweco Rakennetekniikka Oy.

Lehtonen, Aleks 2021. Diplomi-insinööri. Sweco Rakennetekniikka Oy. Haastattelu 11.2.2021.

Rakennusteollisuus Ry 2018. Tuotelehti PO-2016 mukaiseen paalutuksen suunnitteluun ja paalutus-työhön RT betonipaaluilla. Pdf-tiedosto. Julkaistu 15.9.2018. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2018/09/RT-Betonipaalu-Tuotelehti-PO-2016.pdf>. Viitattu 15.4.2021.

Rantamäki, Martti & Tammirinne, Markku 1979. Pohjarakennus. 13. muuttumaton painos. Helsinki: Oy Yliopistokustannus University Press Finland.

RIL 121-2004. Pohjarakennusohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL 207-2017. Geotekninen suunnittelu. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL 254-2016. Paalutusohje 2016 PO-2016. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

SSAB 2020. RR- ja RD-paalujen asennus- ja suunnitteluohje. Pdf-tiedosto. Julkaistu 2020. <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/infra/rr-and-rd-piles---design-and-installation-manual.pdf?la=fi-fi&m=20200603052629&hash=1978749FB47DA9E608578EDDC10B296460C3BC7C>. Viitattu 12.1.2021.

SSAB 2017. Perustukset, Teräsbetoniset vakiopaaluanturat RR- ja RD- paaluille (FPS). Pdf-tiedosto. Julkaistu 2017. https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/fi/infra/ssab_perustukset_terasbetoniset_vakiopaaluanturat_rr_ja_rd_paaluille.pdf?m=20210211123907. Viitattu 20.3.2021.

Virtanen, Sweco 2019. Miksi vinopaaluja käytetään? Pdf-tiedosto. Julkaistu 4.12.2019. <https://sgy.fi/wp-content/uploads/2019/11/vinopaalut-virtanen.pdf>. Viitattu 11.1.2021.

LIITE 1 : VAKIOPAALUANTURAN MITOITUS LASKENTAPOHJALLA

		Rakennelaskelma, lähtötiedot Tekijä: _____ Siv: 1 (1) Päiväys: _____ Rakennuskohde: _____ Työ nro: _____ Sisältö: _____ Sijainti: _____																																																																																									
Paaluantura Versio: 1.4.0																																																																																											
Antura Anturan leveys: 2,2 m Anturan pituus: 2,2 m Anturan korkeus: 0,8 m		Betoni Betoni osavermuusluku: C35/45 1,5																																																																																									
Paalutus Anvioto-paalujen-pituus: EI KÄYTTÖSSÄ! Paalutyypit: Betoni-paalu Paalun sivumitta: 300 mm Paalun/paaluhetun sivumitta: 300 mm Paalun kestävyysmitoitussarvo: 1001 kN RR- ja RD- paalulla: Paalun halkaisija: 23 mm Paaluhetun sivumitta: 300 mm Paaluhetun paksuus: 40 mm Paaluhetun ominaislujuus: 300 Mpa Käyttöaste: %		Paalujen lukumäärä: 4 kpl Paaluryhmän sijaintitoleranssi: 50 mm Yksittäisen paalun sijaintitoleranssi: 100 mm Paalujen upotussyvyys: 50 mm																																																																																									
Paalujen suunnitellut sijainnit <table border="1"> <thead> <tr> <th>Paalu</th> <th>Sijainti</th> <th>Suuntakulma, x-akselin suhteen</th> <th>Kaltevuus 1/X</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>x [m] y [m]</td> <td>pos. suunta vastapäivään [deg]</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>-0,525 -0,525</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,525 -0,525</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>-0,525 0,525</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0,525 0,525</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Paalu	Sijainti	Suuntakulma, x-akselin suhteen	Kaltevuus 1/X	1	x [m] y [m]	pos. suunta vastapäivään [deg]		1	-0,525 -0,525			2	0,525 -0,525			3	-0,525 0,525			4	0,525 0,525			5				6				7				8				9				Paalujen mitatut poikkeamat <table border="1"> <thead> <tr> <th>Paalu</th> <th>Mitatut poikkeamat</th> <th>Mitattu suunta kulma</th> <th>Mitattu kaltevuus 1/X</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>x [mm] y [mm]</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Paalu	Mitatut poikkeamat	Mitattu suunta kulma	Mitattu kaltevuus 1/X	1	x [mm] y [mm]			1				2				3				4				5				6				7				8				9			
Paalu	Sijainti	Suuntakulma, x-akselin suhteen	Kaltevuus 1/X																																																																																								
1	x [m] y [m]	pos. suunta vastapäivään [deg]																																																																																									
1	-0,525 -0,525																																																																																										
2	0,525 -0,525																																																																																										
3	-0,525 0,525																																																																																										
4	0,525 0,525																																																																																										
5																																																																																											
6																																																																																											
7																																																																																											
8																																																																																											
9																																																																																											
Paalu	Mitatut poikkeamat	Mitattu suunta kulma	Mitattu kaltevuus 1/X																																																																																								
1	x [mm] y [mm]																																																																																										
1																																																																																											
2																																																																																											
3																																																																																											
4																																																																																											
5																																																																																											
6																																																																																											
7																																																																																											
8																																																																																											
9																																																																																											
Syötettyjen paalujen painopisteasettelun sijainti x-suunta: 0,000 m y-suunta: 0,000 m		HUOM!! Syötettyjen paalujen sijainti noudatettava annettua paalukarttaa!																																																																																									
Vinopaaluista aiheutuvat vaakavoimat ja momentit anturan keskellä <table border="1"> <thead> <tr> <th>Paalu</th> <th>x-suunta kN</th> <th>y-suunta kN</th> <th>1</th> <th>0,00 kNm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>2</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>3</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>4</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>5</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>6</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>7</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>8</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>9</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Paalu	x-suunta kN	y-suunta kN	1	0,00 kNm	1	0,00	0,00	2	0,00 kNm	2	0,00	0,00	3	0,00 kNm	3	0,00	0,00	4	0,00 kNm	4	0,00	0,00	5	0,00 kNm	5	0,00	0,00	6	0,00 kNm	6	0,00	0,00	7	0,00 kNm	7	0,00	0,00	8	0,00 kNm	8	0,00	0,00	9	0,00 kNm	9	0,00	0,00			Paalukartta 																																							
Paalu	x-suunta kN	y-suunta kN	1	0,00 kNm																																																																																							
1	0,00	0,00	2	0,00 kNm																																																																																							
2	0,00	0,00	3	0,00 kNm																																																																																							
3	0,00	0,00	4	0,00 kNm																																																																																							
4	0,00	0,00	5	0,00 kNm																																																																																							
5	0,00	0,00	6	0,00 kNm																																																																																							
6	0,00	0,00	7	0,00 kNm																																																																																							
7	0,00	0,00	8	0,00 kNm																																																																																							
8	0,00	0,00	9	0,00 kNm																																																																																							
9	0,00	0,00																																																																																									
Huom!! Vinopaaluista aiheutuvien momenttien suunta määritettävä käyttäjän toimesta!		Tarkistus syötetyille paalujen keskiöetäisyyksille sekä reunaetäisyyksille. Pienin reunaetäisyys paalun keskeltä: 475 mm Pienin sallittu reunaetäisyys: 300 mm Reunaetäisyyden tarkistus: OK! Pienin paalujen keskiöetäisyys: 1050 mm Pienin sallittu keskiöetäisyys tarkistettava julkaisun RIL 254-2016 s.179 ohjeiden mukaisesti.																																																																																									
Kuormitus Muorajättilen kuormien määritys: Kuormien syöttö käsin Mitoituskuorma (MRT): 4004 kN Mitoitusmomentti (MRT): x-ympäri: 0 kNm, y-ympäri: 0 kNm Kuormakeskiön sijainti: x-suunta: 0 m, y-suunta: 0 m Kuormakeskiön sijaintitoleranssi: 20 mm Käyttöajattilan kuormien määritys: Käytteen kuormitusyhdistelmien kertoimia Ominaiskuorma (KRT): 1300 kN Ominaismomentti (KRT): x-suunta: 130 kNm, y-suunta: 0 kNm		Kuormituksen muoto: Suoraide Suoraiteen muotoisessa kuormituksessa: Kuormituksen leveys: 480 mm, Kuormituksen pituus: 480 mm Pyöreän muotoisessa kuormituksessa: Kuormituksen halkaisija: 480 mm Kuormitusyhdistelmien kertoimet: Seurausluokka: CC2, Pysyvien kuormien kerroin: 1,15, Pysyvien kuormien osuus kokonaiskuormasta: 80%, Muuttuvien kuormien kerroin: 1,5, Muuttuvien kuormien yhdistelykerroin: 0,5, Muuttuvien kuormien osuus kokonaiskuormasta: 40%																																																																																									
Paaluvoimat <table border="1"> <thead> <tr> <th>Paalu</th> <th>Paaluvoimat [kN]</th> <th>Paalun mitoituskestävyys [kN]</th> <th>Käyttöaste [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1189,75</td> <td>812,25</td> <td>1001,00</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1189,75</td> <td>812,25</td> <td>1001,00</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1189,75</td> <td>812,25</td> <td>1001,00</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1189,75</td> <td>812,25</td> <td>1001,00</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Paalu	Paaluvoimat [kN]	Paalun mitoituskestävyys [kN]	Käyttöaste [%]	1	1189,75	812,25	1001,00	2	1189,75	812,25	1001,00	3	1189,75	812,25	1001,00	4	1189,75	812,25	1001,00	5				6				7				8				9				Paaluryhmän kapasiteetikäyrä 																																																	
Paalu	Paaluvoimat [kN]	Paalun mitoituskestävyys [kN]	Käyttöaste [%]																																																																																								
1	1189,75	812,25	1001,00																																																																																								
2	1189,75	812,25	1001,00																																																																																								
3	1189,75	812,25	1001,00																																																																																								
4	1189,75	812,25	1001,00																																																																																								
5																																																																																											
6																																																																																											
7																																																																																											
8																																																																																											
9																																																																																											
Huom!! Paaluvoimissa ei huomioitu anturan omaa painoa!		Anturan ristikkomallin optimointi Yläpään solmun korkeuden alkuarvio: 20 mm Yläpään solmun korkeus optimoinnin jälkeen: 130 mm Mitoitustarkkuus: Mitoitus 4:llä paalun kriittisillä sijainneilla																																																																																									
Anturan mitoitus Paalujen ja kuormituksen välin syntyvät puristussuavat (kuivassa punainen) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Paalu</th> <th>Puristussuava nousukulma [deg]</th> <th>Puristussuava voima [kN]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>44,13</td> <td>1437,66</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>44,13</td> <td>1437,66</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>44,13</td> <td>1437,66</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>44,13</td> <td>1437,66</td> </tr> </tbody> </table>		Paalu	Puristussuava nousukulma [deg]	Puristussuava voima [kN]	1	44,13	1437,66	2	44,13	1437,66	3	44,13	1437,66	4	44,13	1437,66	Huomioidaanko SFS-EN 1992-1-1 6.5.4 (5) mukainen 10% solmujen puristusjännitysten mitoitusarvojen suurennettu? Kyllä Anturan yläpinnan solmujen väliset horisontaaliset puristussuavat (kuivassa violettia)																																																																										
Paalu	Puristussuava nousukulma [deg]	Puristussuava voima [kN]																																																																																									
1	44,13	1437,66																																																																																									
2	44,13	1437,66																																																																																									
3	44,13	1437,66																																																																																									
4	44,13	1437,66																																																																																									
Ristikkomalli ESIMERKKI RISTIKOISSA ESIINTYVISTÄ SAUVOISTA 																																																																																											

5	
6	
7	
8	
9	

x-suunta 729,68 kN
y-suunta 729,68 kN

Pealujen väliset vetosuavat (kuvasssa vihreä)

x-suunta 820,55 kN
y-suunta 820,55 kN

Solmujen kestävyyyteen vaikuttavat kertoimet

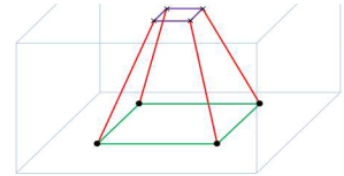
k1 3
k2 0,75
v' 0,86

Betonin ominaisuudet

Tunnus	γ_c	f_{td} / MPa	f_{td} / MPa
C35/45	1,5	35	19,8333333

Solmujen ja sauvojen jännitykset ja käyttöasteet

Kuormituksen alapuoliset solmut	Paalun yläpuoliset solmut	Jännitys [MPa]		Käyttöaste [%]
		17,38	56,29	30,87
Ylipään horisontaaliset puristusosuudet		x-suunta 22,36	21,82	102,47
		y-suunta 22,36	21,82	102,47
Puristus-sauvojen yläpäät		19,59	56,29	34,80
Puristus-sauvojen alapäät		14,46	14,07	102,77



Rauditus

Raudoitusterästen ominaislujuus 500 MPa
Pesteris halkaisija x-suunta 25 mm, y-suunta 25 mm
Terästen lukumäärä x-suunta 5, y-suunta 5

Betonipitteen vähimmäisarvo 50 mm
Kiväläisen suurin reulekoko 32 mm
Teräs osavermuusluku 1,15

Vaadittu raudituksen pinta-ala

x-suunta 1887,25 mm²
y-suunta 1887,25 mm²

Vaadittu raudoitusterästen lukumäärä

x-suunta 4 kpl
y-suunta 4 kpl

Raudituksen jakoaie

x-suunta 325 mm
y-suunta 325 mm

Tankojen keskiäisyydet

x-suunta 80 mm
y-suunta 80 mm

Vetorausituksen käyttöaste

x-suunta 76,89 %
y-suunta 76,89 %

Ankkurointitapa

Taiivutettu tanko

Tarvintaolosuhteet

Hyvä

Taiivutetun tangon tapauksessa

Taiivutustelan minimihalkaisija x-suunta 225 mm, y-suunta 225 mm

Valittu taiivutustelan halkaisija x-suunta 200 mm, y-suunta 200 mm
Ylöstaiivutuksen pituus 400 mm

Hitaatun tangon tapauksessa

Poikkittaisen tangon halkaisija x-suunta 25 mm, y-suunta 25 mm

Tarkistetaan tarvittava tile taiivutukselle x-suunta OK!, y-suunta OK!

Ankkurointipituuden mitoitusarvo pealun jälkeen

x-suunta 168,90 mm
y-suunta 168,90 mm

Ankkuroinnin käyttöaste pealun jälkeen

x-suunta 26,06 %
y-suunta 26,06 %

Halkeilu

Rakitusluokka XC2

Vetorausituksen liittyvän tehollisen betonialan korkeus

x-suunta 156,25 mm
y-suunta 156,25 mm

Vetorausituksen liittyvän tehollisen betonialan leveys

x-suunta 637,5 mm
y-suunta 637,5 mm

Halkeamaleveys

w_i x-suunta 0,24 mm
y-suunta 0,24 mm

Halkeamaleveyden suositusarvo

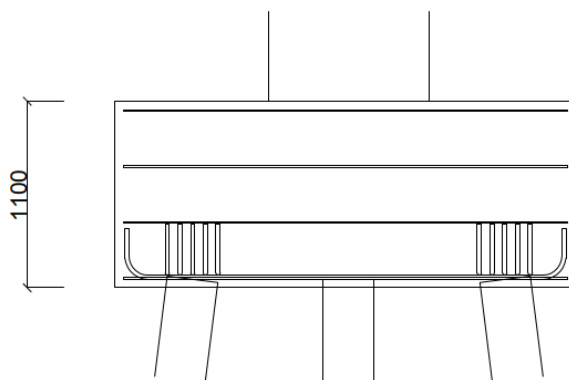
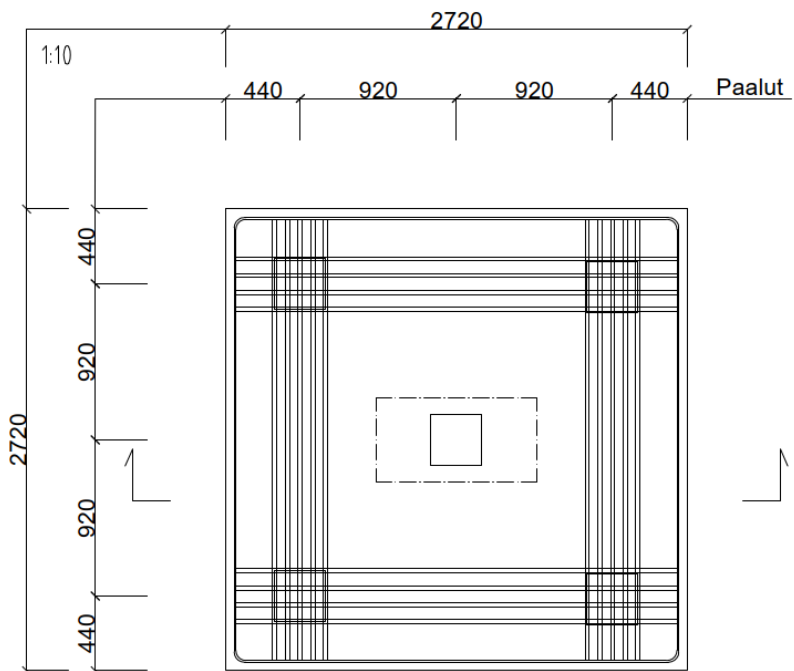
w_{max} 0,3 mm

Käyttöaste

x-suunta 80,07 %
y-suunta 80,07 %

LIITE 2 : MITOITETTUJEN ANTUROIDEN RAUDOITUSKUVAT

	TYÖN NRO		TUNNUS
	PÄIVÄYS	TEKIJÄ	
RAKENNUSKOHTTEEN NIMI JA OSOITE	PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ		
Esimerkkikohde	Antura 1 rauditus		



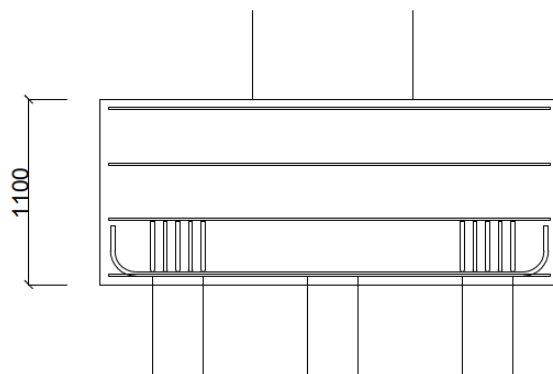
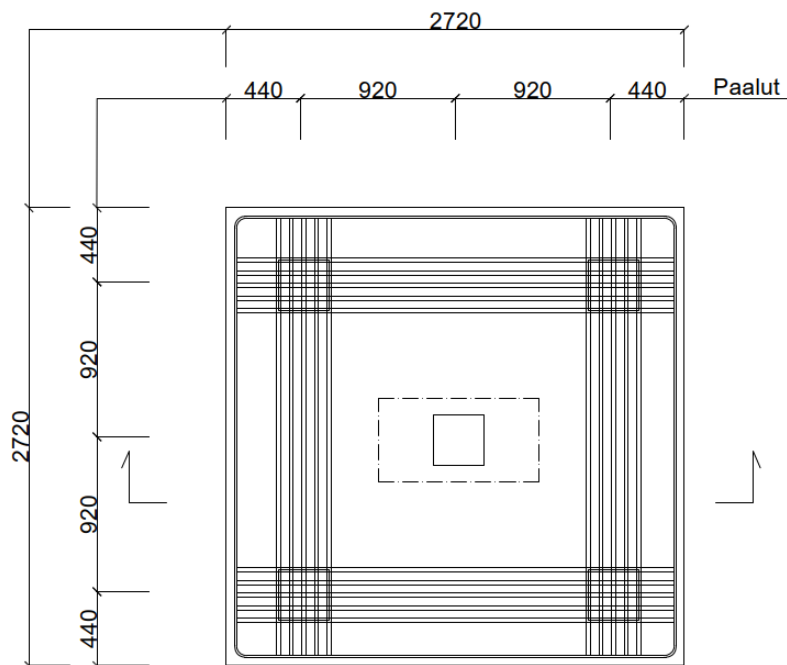
Pääraudoite x-suuntaan 4T25 k100
y-suuntaan 5T25 k80

Raudituksen jakoalue 325 mm

Rengasraudoite 4T12



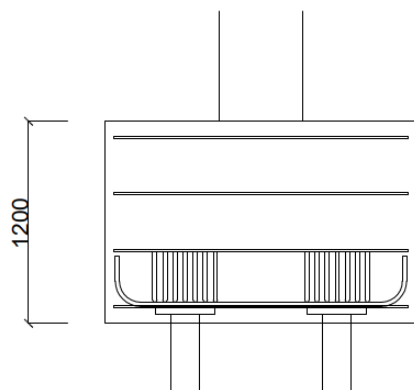
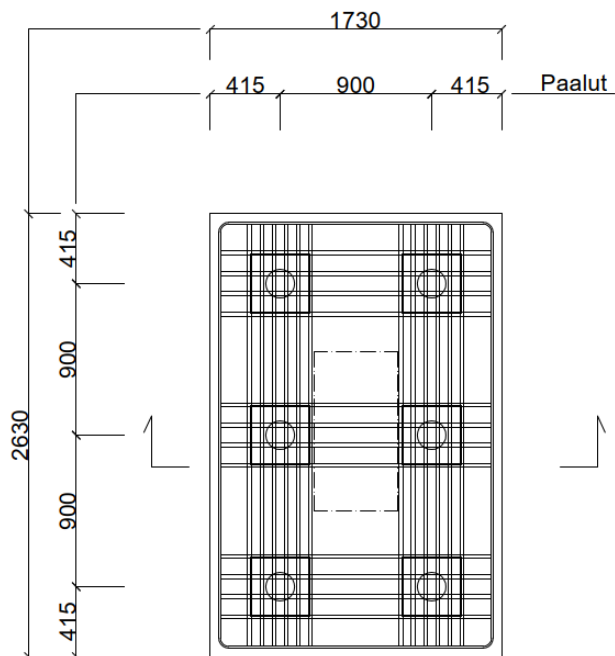
	TYÖN NRO		TUNNUS
	PÄIVÄYS	TEKIJA	
RAKENNUSKOHTTEEN NIMI JA OSOITE	PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ		
Esimerkkikohde	Antura 2 rauditus		



Pääraudoite 5T25 k80
 Raudituksen jakoalue 325 mm
 Rengasraudoite 4T12



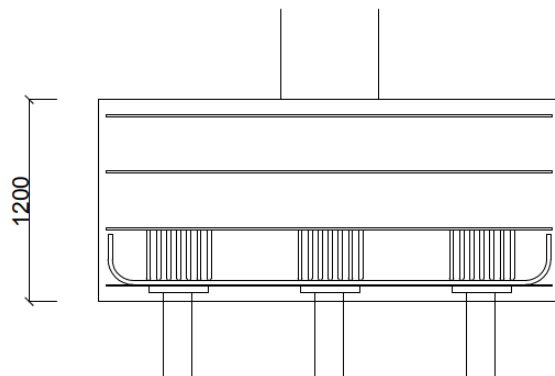
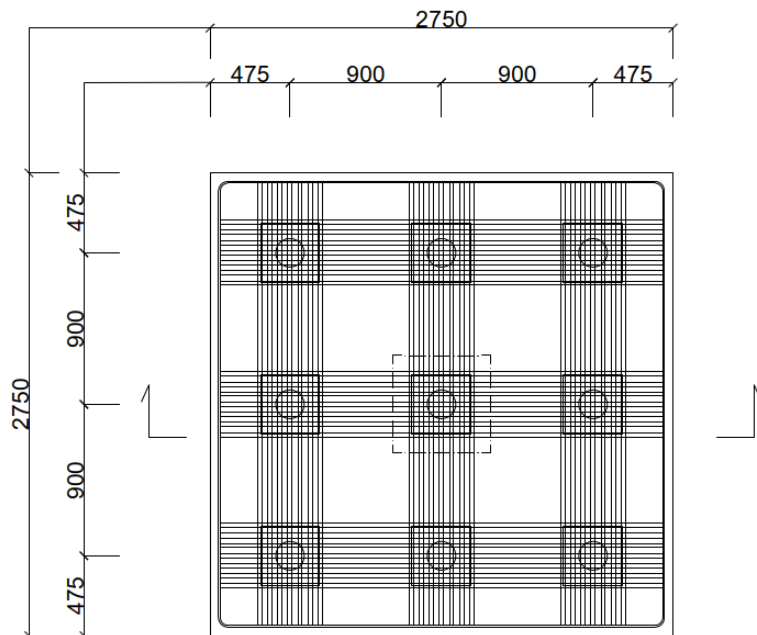
	TYÖN NRO		TUNNUS
	PAIVÄYS	TEKIJA	
RAKENNUSKOHTEEN NIMI JA OSOITE	PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ		
Esimerkkikohde	Antura 3 raudoitus		



Pääraudoite x-suuntaan 4T25 k80
 y-suuntaan 6T25 k60
 Raudoituksen jakoalue 375 mm
 Rengasraudoite 4T12



	TYÖN NRO		TUNNUS
	PAIVÄYS	TEKIJA	
RAKENNUSKOHTTEEN NIMI JA OSOITE	PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ		
Esimerkkikohde	Antura 4 raudoitus		



Pääraudoite x-suuntaan 7T25 k60
 y-suuntaan 7T25 k60
 Raudoituksen jakoalue 375 mm
 Rengasraudoite 4T12

