

# Paalun kapasiteetti ja paaluanturan mitoitus

Vesa Ilén

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2018  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Insinööri (AMK), rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Ilén, Vesa	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2018
	Sivumäärä 53	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Paalun kapasiteetti ja paaluanturan mitoitus		
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Hannu Haapamaa ja Pekka Lähdesmäki		
Toimeksiantaja(t) Ramboll Finland Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Kaupungistumisen myötä halutaan rakentaa mahdollisimman lähelle kaupunkien keskuksia maaperän kelpoisuudesta välittämättä. Kantavan kerroksen ollessa syvällä maanpinnan alla, on paalutus mahdollinen perustamistapa. Tukipaalu tukeutuu kantavaan maakerrokseen tai kallioon ja estää rakennusta vajoamasta. Jos rakennus on iso, tarvitaan sen kantamiseen monta paalua, jotka sidotaan yhteen yläpäästään paaluanturalla.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli kerätä yksiin kansiin työkalut paalun kapasiteetin laskemiseen ja paaluanturan mitoittamiseen. Opinnäytetyön avulla voidaan myöhemmin luoda laskentapohja, mikä yhdenmukaistaa ja yksinkertaistaa mitoitusprosessin kulun yrityksen Suomen yksiköissä.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin aiheeseen liittyvään luotettavaan rakennusalan kirjallisuuteen ja julkaisuihin perehtymällä. Näistä kasattiin tiedot ja kaavat, joilla voidaan selvittää alustavat paalun kantavuuden kapasiteetit ja paaluanturan dimensiot riittävällä varmuudella.</p> <p>Lopullinen paalun kapasiteetti saadaan selville loppulyönneistä, joilla tarkistetaan paalun olevan tuettuna alapuoliseen ja ympäröivään maahan riittävällä varmuudella. Paaluanturan lopullinen kestävyys mitoitetaan, kun paalut on asennettu ja niiden toteutuneita kohtia vertaillaan suunniteltuihin. Mikäli paalut ovat liian kaukana suunnitelluista sijainneistaan, voidaan tarvita lisää paaluja tai raudoitusta. Paaluantura voi myös tarvita lisää kokoa, mikäli yksikin paalu on liian lähellä suunnitellun anturan reunaa.</p> <p>Opinnäytetyön loppuun tehtiin liitteiksi käytännön esimerkkilaskelmat teräsbetonisen- ja teräksisen paalun kapasiteetin laskennasta sekä viiden teräsbetonipaalun paaluanturan kestävyyslaskennasta.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> )		
Paalu, paaluantura, tukipaalu		
Muut tiedot ( <a href="#">salassa pidettävät liitteet</a> )		
-		

Author(s) Ilén, Vesa	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2018
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 53	Permission for web publication: x
Title of publication Pile capacity and pile foot design		
Degree programme Civil Engineering		
Supervisor(s) Haapamaa, Hannu & Lähdesmäki, Pekka		
Assigned by Ramboll Finland Oy		
<p>Abstract</p> <p>With urbanization, people want to build as close to urban centers as possible, irrespective of the soil's requirements. When the bearing soil is deep beneath the ground, a possible formation method is piling. End-bearing pile is supported on a load-bearing ground layer or rock and prevents the building from subsiding. If the building is large, it is necessary to carry it several piles that are tied together with pile foot.</p> <p>The aim of the thesis was to collect together tools to calculate the capacity of the pile and to design pile foot. The thesis can later be used to create an application, which harmonizes and simplifies the design in the Finnish units of the company.</p> <p>The thesis was carried out by studying the topic of reliable and relevant construction literature and publications. From these, data and formulas were collected to find out the initial pile load capacity and pile foot dimensions with sufficient certainty.</p> <p>The final pile capacity can be found out from the final impacts where the pile is checked to be supported with the underlying and surrounding ground with sufficient certainty. The final durability of pile foot is designed after the piles are installed and their actual points are compared to the planned ones. If the piles are too far from planned, further piles or reinforcements may be needed. The pile foot may also need more size if one of the piles is too near pile foot edge.</p> <p>The appendices to the end of the thesis were practical example calculations of the load capacity of a reinforced concrete and a steel pile, and the calculation of the pile foot with five reinforced concrete pile.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) Pile, pile foot, end-bearing pile		
Miscellaneous ( <a href="#">Confidential information</a> )		

## Sisältö

1	Opinnäytetyön tausta, tavoitteet ja rajaukset.....	5
2	Paalu.....	5
2.1	Paalujen etäisyys muihin rakenteisiin.....	7
2.2	Paaluryhmä.....	7
3	Paaluantura .....	7
3.1	Kantavuus.....	8
3.2	Paalujen etäisyys anturan reunasta.....	9
3.3	Paalujen keskiöetäisyydet .....	9
3.4	Sallitut sijaintipoikkeamat .....	10
4	Suunnitteluperusteet.....	13
4.1	Eurokoodit .....	13
4.1	Geotekniset luokat.....	17
4.2	Paalutustyöluokka.....	19
4.3	Mitoitustavat .....	20
4.4	Kestävyyden mitoitusarvot.....	21
5	Paalun kapasiteetti .....	22
5.1	Paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilamitoituksessa .....	22
5.2	Murtorajatilanteen vetokestävyys .....	28
5.3	Paaluperustuksen pystysuuntainen eläminen .....	30
5.4	Poikittaiskuormitetun paalun geotekninen kestävyys pohjatutkimusten ja paalun lujuusparametrien perusteella .....	30
5.5	Lyönninkestävyys.....	32
6	Paaluanturan mitoitus .....	34
6.1	Raudoituksen laskenta ristikkomallilla.....	35

6.2	Betonin kestävyys .....	38
7	Pohdinta .....	43
	Lähteet .....	45
	Liitteet .....	47
	Liite 1. Teräspaalun kapasiteetti .....	47
	Liite 2. Teräsbetonipaalun kapasiteetti .....	48
	Liite 3. Paaluanturan mitoitus .....	50

## Kuviot

Kuvio 1. Paalutyypit (Jääskeläinen 2009 Kuva 4.1., 53) .....	6
Kuvio 2. EN 1997-1:n suunnitteluprosessi. Numerot suluissa viittaavat RIL 207-2017 lukuun. (RIL 207-2017 kuva 2.1S., 33.) .....	14
Kuvio 3. Eurokoodin EN 1990 mukaiset murtorajatilat EQU, GEO ja STR.....	15
Kuvio 4. Geoteknisen luokan valintaperusteet (RIL 254-1-2016 Kuva 2.1., 30.) .....	19
Kuvio 5. Kantavuuskerroin $N_q$ maan sisäisen leikkauskestävyyskulman funktiona (RIL 254-1-2016 Kuva 4.3., 66.) .....	25
Kuvio 6. Paalun vaippakestävyyskerroin $K_{st}\tan\phi_a$ maan sisäisen leikkauskestävyyskulman funktiona. (RIL 254-1-2016 Kuva 4.4., 66.) .....	27
Kuvio 7. Jäykkyysuhteen vaikutus paalun murtomekanismiin, L on paalun upotussyvyys. (RIL 254-1-2016 Kuva 4.11., 91.) .....	32
Kuvio 8. Paaluanturan ristikkomallit. (Leskelä 2008 Kuva 10/6.6, 455.).....	36
Kuvio 9. Kerroin k anturan raudoituksen vetovoiman laskemista varten. (Leskelä 2008 Taulukko 1/6.6, 456.) .....	37
Kuvio 10. Ripustusraudoituksen sijoittaminen ja vetoraudoituksen ankkurointipituuden $l_b$ määrittely, kun paaluväli on huomattava. (Leskelä 2008 Kuva 11/6.6, 457.) .....	38
Kuvio 11. Solmupistetyyppi a (SFS-EN 1992-1-1 Kuva 6.26, 108.).....	41
Kuvio 12. Solmupistetyyppi b (SFS-EN 1992-1-1 Kuva 6.27, 108.) .....	41
Kuvio 13. Solmupistetyyppi c (SFS-EN 1992-1-1 Kuva 6.28, 109.).....	42
Kuvio 14. Paikallisen puristuksen mitoitusalueiden jakautuminen (SFS-EN 1992-1-1 Kuva 6.29, 111.) .....	43

## Taulukot

Taulukko 1. Pien- ja teräsbetonitukipaalujen keskiöetäisyyden vähimmäisarvot. (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.1., 179.) .....	10
Taulukko 2. Kuormien ja kuorman vaikutusten osavarmuusluvut (STR/GEO). (Eurokoodi 7, kansallinen liite 2007 Taulukko 6, 35.) .....	16
Taulukko 3. Seuraamusluokkien määrittely (SFS-EN 1990 Taulukko B1., 136.) .....	17
Taulukko 4. Paalutustyöluokat (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.18., 102.) .....	19
Taulukko 5. Maaparametrien osavarmuusluvut (STR/GEO). (Eurokoodi 7, kansallinen liite 2007 Taulukko 7, 38) .....	21
Taulukko 6. Kestävyyden osavarmuusluvut ( $\gamma_R$ ) syrjäyttävälle, kaivetuille ja CFA-paaluille (STR/GEO). (Eurokoodi 7, kansallinen liite 2007 Taulukot 9, 10 ja 11, 38.) ..	21
Taulukko 7. Korrelaatiokertoimet $\xi$ ominaisarvon johtamiseksi pohjatutkimustuloksista ( $n$ = tutkimusprofiilien* lukumäärä). (Eurokoodi 7, kansallinen liite 2007 Taulukko 13, 39.) .....	23
Taulukko 8. Maalajien mekaanisten ominaisuuksien likimääräisarviointi kairauksen perusteella, taulukko perustuu TIEH 2100053-v-07 julkaisuun. (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.6., 64.) .....	25
Taulukko 9. Vaippakestävyyskerroin $K_{st} \tan \phi_a$ injektoiduille paaluille karkearakeisissa maalajeissa. (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.7., 67.) .....	27
Taulukko 10. Kuormien osavarmuusluvut ( $\gamma_F$ ) (nosterajatila UPL) (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.13., 80.) .....	28
Taulukko 11. Osavarmuusluvut maaparametreille ja kestävyyksille (nosterajatila UPL) (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.14., 80.) .....	29

# 1 Opinnäytetyön tausta, tavoitteet ja rajaukset

Toimeksiantajallani Ramboll Finland Oy:llä on tarve yhtenäistää paaluanturoiden mitoittamisen tapa. Paras tapa tavoitteen saavuttamiseksi on luoda helppokäyttöinen laskentapohja, mikä lähtöarvot syöttämällä kertoo sopivan anturan koon ja kuinka monta paalua se tarvitsee kantamaan yläpuoliselta rakenteelta tulevat kuormat.

Laskentapohjan teoriaosuutena toimii tämä opinnäytetyö, johon on kerätty kaikki tarvittava tieto ja kaavat laskentapohjan tekemistä varten yksiin kansiin. Työn loppuun tulee laskentaesimerkit, jotka tehdään Excelillä. Tästä Excel-tiedostosta voi myöhemmin tehdä toimivan laskentapohjan.

Opinnäytetyössä käsitellään vain yksiaineisia neliskulmaisia betoni- ja teräsbetonianturoita, neliöprofiilisia betonipaaluja ja ympyräprofiilisia teräspalkkipaaluja. Muuten opinnäytetyöstä tulisi turhan laaja, eikä näille erikoisimmille tapauksille olisi käyttöä kuin erittäin harvoin.

Tietolähteinä toimii alan kirjallisuus (Eurokoodit, Rakennusinsinööriunionin julkaisut, betoniyhdistyksen julkaisut ja muut luotettavien tahojen julkaisut). Näistä lähteistä haen tietoa paaluista, paaluanturoista, pohjarakentamisesta, teräsbetonirakenteiden suunnittelusta ja toteutuksesta sekä paalujen kantokyvystä. Varmistan, että käyttämäni materiaali on uusimpien tietojen mukaista ja menetelmät yleisesti hyväksyttyjä.

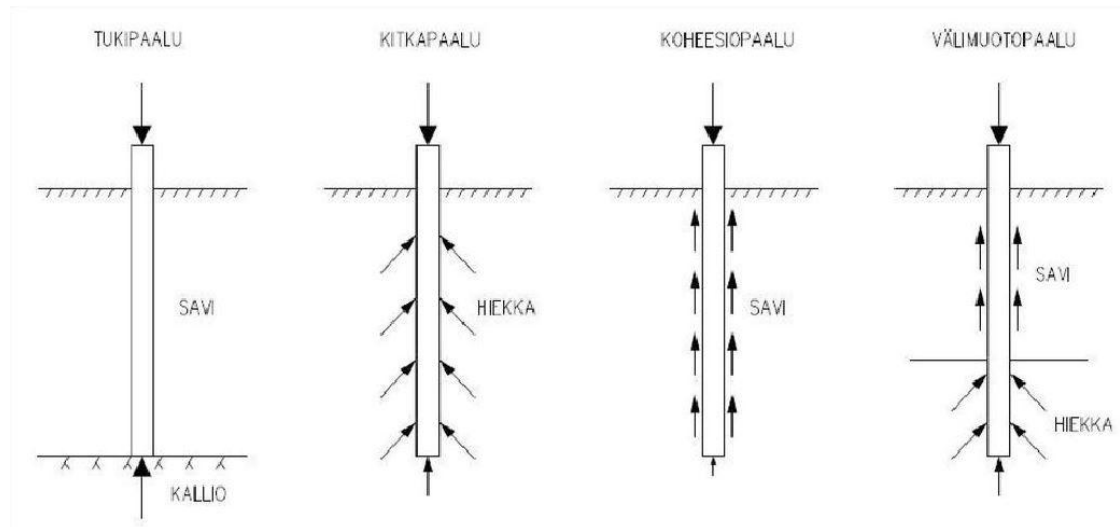
## 2 Paalu

Yleisesti paaluja käytetään rakennetta kantavana osana perustusten alla, kun kantava maapohja on syvällä, ja tämän takia muiden perustamistapojen käyttö olisi kalliimpaa tai hankalampaa. Paalujen käyttäminen Suomessa on todella yleistä, varsinkin etelä- ja lounaisosissa, missä suuri osa maaperästä on savista. Enemmän kantavia maita löytyisi varmasti, mutta kaupungistumisen myötä halutaan rakentaa mahdollisimman lähelle kaupunkien keskuksia.

Paalut voidaan ryhmitellä monella eri tavalla, joista yksi on jaotella ne toimintatavan perusteella tuki-, kitka- ja koheesiopaaluihin. On myös olemassa välimuotopaalu, jossa kantavuus tulee eri tekijöistä (Kuvio 1.) Kitkapaaluissa paalun kuorma välittyy paalun vaipan ja maan hankauksen ansiosta ympäröivään kitkamaahan. Myös paalun



kärki ottaa pienen osan kuormasta. Koheesiopaalu toimii kitkapaalun tavoin koheesiomaassa kärjen vaikutuksen ollessa lähes olematon. (Rantamäki & Tammirinne 2002, 43.)



Kuvio 1. Paalutyypit (Jääskeläinen 2009 Kuva 4.1., 53)

Tukipaalun maanalainen pää tukeutuu kallioon tai riittävän tiiviiseen maakerrokseen. Usein paalut ovat kuitenkin näitä kaikkia tai kahta toimintatapaa käyttäviä välimuotopaaluja. (Pålkommissionen 2007, 11.)

### Vinopaalut

Vinopaaluilla voidaan lisätä perustuksen vakavuutta. Käytettäessä vinopaaluja tulee maakerrosten muodonmuutoksista aiheutuvat kuormitukset ottaa huomioon. Perustuksen viereen mahdollisesti tulevan täytön kuormitukset aiheuttaa maakerrokseen muodonmuutoksia, minkä takia kuormittavan alueen alle suuntautuvia paaluja ei tulisi käyttää. Maakerrosten muodonmuutosten haitat voi olla mahdollista poistaa erityisillä perustamistoimenpiteillä tai työjärjestyksillä. Mikäli haittojen poisto ei ole mahdollista, tulee paalun rakenteen mitoituksessa huomioida lisäkuormitus taivutusrasitustarkastelussa. (RIL 254-1-2016, 181.)

Paalujen rajakaltevuuteen vaikuttaa:

- Paalujen massa ja pituus
- Työskentelytilan koko ja asennusjärjestys
- Paalutusalustan kantavuus

(RIL 254-1-2016, 181.)

## 2.1 Paalujen etäisyys muihin rakenteisiin

Paalujen minimietäisyydet muihin rakennuksiin suunnitellaan jokaisessa tapauksessa erikseen ottamalla huomioon paalutuksen, pohjaolosuhteiden ja ympäröivien rakenteiden aiheuttamat erityisvaatimukset. Paalutyypillä, paalun poikkileikkausalalla ja paalutuksen tärinällä on myös vaikutusta etäisyyksien suunnitteluun. (RIL 254-1-2016, 181.)

Mikäli uudet paalut ulotetaan aikaisempien rakenteiden perustamistasojen alapuolelle, on arvioitava paalutuksesta aiheutuvat painumat ja siirtymät sekä niiden vaikutus läheisiin rakenteisiin. (RIL 254-1-2016, 181.)

## 2.2 Paaluryhmä

Toisiinsa sidottua tiheää joukkoa paaluja sanotaan paaluryhmäksi. Kitka- tai koheesiopaaluryhmän kantokyky ei ole yhtä suuri kuin samalla määrällä yksittäisiä paaluja. Koheesiopaaluryhmä toimii käytännössä uloimpien paalujen rajaamana ”jättipaalu” ja näin ollen ei käytä kaikkien paalujen koko vaippa-alaa. (Rantamäki & Tamminne 2002, 58.)

Kitkapaaluryhmän murtokuormitus lasketaan yleensä yksittäisten paalujen murto-kuormituksen summana. Laskennassa ei oteta huomioon ryhmävaikutuksen alentavaa eikä lyömisen aikana tapahtuvan maaperän tiivistymisen lisäävää kantavuutta. (RIL 166–1986, 204.)

Alapuolinen maa puristuu kokoon kitka- ja erityisesti koheesiopaaluryhmien kuormituksen vaikutuksesta ja paaluryhmä vajoaa ajan myötä. Painuma määritetään rakenteiden konsolidaatiopainuman laskemiseen käytetyillä menetelmillä. (Rantamäki & Tamminne 2002, 65.)

## 3 Paaluantura

Paaluantura sitoo paalut rakenteellisesti yhdessä toimivaksi paaluryhmäksi. Paaluanturaa tarkastellaan rakenteellisesti mitoitettaessa jäykkänä pilarilaattana. Paalut lasketaan jäykästi kiinnitetyiksi, mikäli niiden teräkset on upotettu  $20 \cdot \varnothing_{\text{teräs}}$  syvyydelle anturan sisään. Muissa tapauksissa liitosta pidetään nivelenä. Paalut katkaistaan niin,

että ne ulottuvat vähintään 50 mm paaluanturan sisään. Vetopaaluja käytettäessä täytyy lisätä ankkurointipituutta ja taivuttaa terästen päät sivuille. (RIL 166–1986, 210; RIL 121–2004, 91; RIL 254-1-2016, 176.)

Paaluanturan alapinnan tasoa mitoittaessa on otettava huomioon roudan syvyys ja pohjaveden pinnan korkeus. Paaluantura ei saa liikkua roudan vaikutuksesta ja veden syövyttävä vaikutus täytyy ottaa huomioon. Mikäli paaluantura sijoitetaan routarajan yläpuolelle, on suoritettava massan vaihto routimattomaan maa-ainekseen tai asennettava routasuojaus. (Rantamäki & Tammirinne 2002, 77.)

### 3.1 Kantavuus

Paaluanturan laskennallinen kantavuus tulee yksinomaan paaluista. Anturan tehtävänä on vain sitoa paalut yhteen, olla tarpeeksi suuri kaikille paaluille ja kestää paalujen aiheuttamat kuormat.

Suurimmassa osassa Suomea kallio tai muu kantava maakerros ei ole kovin syvällä, joten pääasiassa käytetään tukipaaluja. Suomessa tukipaalun kestävyys mitoitus määräytyy yleensä paalun rakenteellisesta kantavuudesta, eikä paalun kärjen kantavuudesta. (Rantamäki & Tammirinne 2002, 53)

Tukipaaluilta edellytetään, että ne ulottuvat kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen. Paalun painuma ei saa ylittää lyöntipaalutusohjeen mukaista enimmäispainumaa. Kärkivastuksen on vastattava laskettua kantavuutta, joka käytännössä arvioidaan paalujen asennuksen loppulyönnissä syntyvän painuman perusteella. (Rantamäki & Tammirinne 2002, 50.)

Tukipaalun geotekninen kantavuus määriteltiin ennen puristusjännitykseen perustuvasta kaavasta:

$$P_s = \sigma_s * A_p \quad (1)$$

Missä

$P_s$  on sallittu paalun kuorma

$\sigma_s$  on sallittu puristusjännitys

$A_p$  on paalun pienin poikkileikkausala

(Rantamäki & Tamminne 2002, 50.)

### 3.2 Paalujen etäisyys anturan reunasta

Paaluanturan on kestävä paaluvoimien aiheuttamat jännitykset. Myöskään reunan lohkeamisen vaaraa ei saa olla. Minimietäisyyksiksi anturan reunasta paalun keskelle voidaan pitää:

- Teräsbetonipaaluilla vähintään paalun sivumitta.
- Ympyränmuotoisilla poikkileikkauksilla ilman paaluhattua vähintään puolet paalun halkaisijasta.
- Paaluhattuisilla ympyrän muotoisilla poikkileikkauksilla vähintään paaluhatun sivumitta.

(RIL 254-1-2016, 180.)

Otettaessa paalujen kaltevuus huomioon, voidaan minimireunaetäisyyksinä käyttää pienempiä arvoja, mikäli paaluvoima aiheuttaa anturaan sen tason suuntaisia puristusjännityksiä. Anturan raudoitusten tartuntapituuksien täytyy kuitenkin olla riittävät. (RIL 254-1-2016, 180.)

### 3.3 Paalujen keskiöetäisyydet

Paalut sijoitetaan niin kauaksi toisistaan, etteivät ne aiheuta toisille paaluille asennettaessa vahinkoja eivätkä vaikuta toisten paalujen kantavuuteen. Mikäli paalu joudutaan korvaamaan, suositellaan korvaava paalu asennettavaksi vähintään 2d keskiöetäisyydelle korvattavasta paalusta. Keskiöetäisyyksien arvoja tutkittaessa d on neliömäisen paalun tai paaluhatun sivumitta tai pyöreän paalun halkaisija. Paalujen minimietäisyyttä toisiinsa suunniteltaessa on paalujen sallitut sijaintipoikkeamat otettava huomioon sekä yhdensuuntaisilla että risteävillä paaluilla. (RIL 254-1-2016, 179-180.)

Taulukko 1. Pien- ja teräsbetonitukipaalujen keskiöetäisyyden vähimmäisarvot. (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.1., 179.)

Paalun pituus (m)	Pyöreä	Neliömäinen
10	2,7d	3d
10-25	Väliarvot interpoloidaan	Väliarvot interpoloidaan
25	3,5d	4d

Kuitenkin vähintään 0,8 m. (RIL 254-1-2016, 179.)

Suurpaaluilla minimietäisyys toiseen on yhdensuuntaisten vaippapintojen välillä:

$$e_i = 300 + 0,7d \text{ (mm)} \quad (2)$$

(RIL 254-1-2016, 179.)

Mikäli paaluryhmä suunnitellaan niin, että paalut hajaantuvat alaspäin, voidaan paalujen yläpää sijoittaa lähemmäksi toisiaan. (RIL 254-1-2016, 179.)

Risteävien tukipaalujen minimietäisyydet riippuvat maakerroksen rakeisuudesta ja syvyydestä missä paalun risteävät niin, että hienorakeisessa maassa ja lähellä maanpintaa minimietäisyytenä voidaan pitää paalun halkaisijaa, kun taas karkearakeisessa maassa syvällä täytyy etäisyyden olla paljon suurempi. Risteämiskohdat pyritäänkin sijoittamaan mahdollisimman lähelle maanpintaa. (RIL 254-1-2016, 179-180.)

Suurpaaluilla risteävien paalujen minimietäisyys toisistaan riippuu vain risteämisyvyydestä eikä ollenkaan maan rakeisuudesta. Minimietäisyys (mm) lasketaan yhtä-  
löstä:

$$e_r = 50 l_r \geq e_i \quad (3)$$

Missä

$e_r$  on risteävien paalujen minimietäisyys toisistaan (mm)

$l_r$  on risteyskohdan syvyys (m)

### 3.4 Sallitut sijaintipoikkeamat

Paalut pyritään asentamaan juuri oikeaan kohtaan, mutta asentaessa syntyy poikkeamia sekä sijaintiin että kaltevuuteen. Paalun vääntäminen suunniteltuun sijaintiin

paalutuksen aikana tai jälkeen ei ole sallittua. Paalutyyppi vaikuttaa suuresti sijainti-poikkeamien suuruuteen. Porapaalujen poikkeamat ovat selvästi pienempiä kuin kivi-seen maahan asennettujen lyöntipaalujen. (RIL 254-1-2016, 181-182.)

Paalujen sijaintien mittauksessa käytetään tarkkuutta 0,01 m, elleivät suunnitelmat edellytä toisin. Rakentamistoleransseja kirjattaessa paalun keskipisteenä pidetään pituusraudoituksen keskikohtaa, raudoittamattoman paalun keskipisteenä pidetään sen suurimman ympyrän keskipistettä. (254-1-2016, 182.)

Paalutuksessa toteutuneet paalujen paikat merkitään ja tarkistetaan, ovatko poikkeamat suunnitelman sallimissa rajoissa. Jos sijainti-, kaltevuus- ja suuntaustoleranssit ylitetään, tulee jokaisen rakenteen osan mahdollinen ylikuormitus tarkistaa. (254-1-2016, 183.)

#### Suuriläpimittaiset lyötävät teräsputkipaalut

Suuriläpimittaiset lyötävät teräspaalut on asennettava seuraavien geometrysten rakentamistoleranssien mukaan, ellei suunnitelmissa ole toisin määritelty:

- Pysty- ja vinopaalut: sijainti vaakatasossa mitattuna työskentelytasolta:
  - $e \leq e_{\max} = 0,10 \text{ m}$  paaluille, joiden  $d \leq 1,0 \text{ m}$
  - $e \leq e_{\max} = 0,1 * d$  paaluille, joiden  $1,0 \text{ m} < d \leq 1,5 \text{ m}$
  - $e \leq e_{\max} = 0,15 \text{ m}$  paaluille, joiden  $d > 1,5 \text{ m}$
- Pystypaalut tai vinopaalut, joiden kaltevuus  $n \geq 15$  ( $\Theta \geq 86^\circ$ ):
  - kaltevuuden poikkeama  $i \leq i_{\max} = 0,02$  (0,02 m/m)
- Vinopaalut, joiden kaltevuus  $4 \leq n < 15$  ( $76^\circ \leq \Theta < 86^\circ$ ):
  - kaltevuuden poikkeama  $i \leq i_{\max} = 0,04$  (0,04 m/m)
- Laajennusten keskipisteiden poikkeama vaakasuunnassa verrattuna paalun akseliin  $e \leq e_{\max} = 0,1 * d$ .

(RIL 254-1-2016, 183.)

#### Lyötävät teräsbetoni- ja pienpaalut

Lyötävät teräsbetoni- ja pienpaalut on asennettava seuraavien geometrysten rakentamistoleranssien mukaan, ellei suunnitelmissa ole toisin määritelty:

-Yksittäinen pysty- ja vinopaalu, paalulaatta tai paaluhatturakenne mitattuna katkaisutasosta:

$$e \leq e_{\max} = 0,10 \text{ m}$$

- Paaluryhmän (2-8 paalua) yksittäinen paalu  $e \leq e_{\max} = 0,15 \text{ m}$ , tätä suuremman paaluryhmän yksittäinen paalu  $e \leq e_{\max} = 0,2 \text{ m}$ , kaikilla paaluryhmillä koko ryhmän painopisteen  $e \leq e_{\max} = 0,05 \text{ m}$
- Paalurivin yksittäisen paalun  $e \leq e_{\max} = 0,15 \text{ m}$ , kuitenkin koko rivin painopisteen  $e \leq e_{\max} = 0,05 \text{ m}$  riviin nähden kohtisuorassa suunnassa (paaluriviksi käsitetään pitkänomaisen anturan alla olevat paalut, kun paaluja on vai yksi kappalepoikkileikkauksessa).
- Yksittäiset pystypaalut tai vinopaalut  $i \leq i_{\max} = 0,04$  (0,04 m/m) samansuuntaisten paalujen ryhmässä  $i \leq i_{\max} = 0,02$  (0,02 m/m)
- Kaltevien paalujen horisontaalisuunta (projektio vaakatasossa) saa poiketa korkeintaan  $2^\circ$  ( $i = 0,035 \text{ m/m}$ ) suunnitelmassa esitetystä suunnasta.

(RIL 254-1-2016, 183-184.)

Kohteissa, joissa vahvistetaan vanhaa perustusta, joudutaan tästä arvosta usein eriyden takia poikkeamaan merkittävästi. Tällöin uuden sijainnin vaikutus otetaan huomioon suunnitelmissa. (RIL 254-1-2016, 184.)

### Porapaalut

Porapaauluilla on käytettävä vähintään lyötävien suuriläpimittaistenteräspalkkipaalujen sekä teräsbetoni- ja pienpaalujen geometrisiä toleransseja, ellei suunnitelmissa ole toisin määritelty. Nämä toleranssit ovat kuitenkin yleensä todella helposti saavutettavissa ja on suositeltavaa käyttää tiukempia toleransseja. Tiukempien toleranssien saavuttaminen vaatii erityistä huolellisuutta sekä työn suoritukselta että mitaukselta. (RIL 254-1-2016, 184.)

Paalutustyön suorituksen kannalta ei kuitenkaan ole syytä käyttää ilman perusteluita tiukempia toleransseja kuin:

- Pysty- ja vinopaalut: sijainti vaakatasossa mitattuna katkaisutasolta:
  - $e \leq e_{\max} = 0,025 \text{ m}$
- Pystypaalut tai vinopaalut, joiden kaltevuus  $n \geq 15$  ( $\Theta \geq 86^\circ$ ) kaltevuuden poikkeama  $i \leq i_{\max} = 0,015$  (0,015 m/m)
- Vinopaalut, joiden kaltevuus  $4 \leq n < 15$  ( $76^\circ \leq \Theta < 86^\circ$ ) kaltevuuden poikkeama:  $i \leq i_{\max} = 0,025$  (0,025 m/m)

- Kaltevien paalujen horisontaalisuunta (projektio vaakatasossa) saa poiketa korkeintaan  $1^\circ$  ( $i = 0,0175 \text{ m/m}$ ) suunnitelmassa esitetystä suunnasta.

(RIL 254-1-2016, 184.)

## 4 Suunnitteluperusteet

### 4.1 Eurokoodit

Geoteknisessä mitoituksessa käytetään Eurokoodien mukaan osavarmuuslukumenetelmää, jonka käyttö on esitetty standardissa "SFS-EN 1990 Eurokoodi – Rakenteiden suunnitteluperusteet". (RIL 254-1-2016, 32.)

Opinnäytetyössä käytetään vain teräs- ja betonipaaluja, joten mitoitus tehdään standardien SFS-EN 1993 (teräs), SFS-EN 1992 (betoni) ja SFS-EN 1994 (liittorakenteet) mukaisesti. (RIL 254-1-2016, 32.)

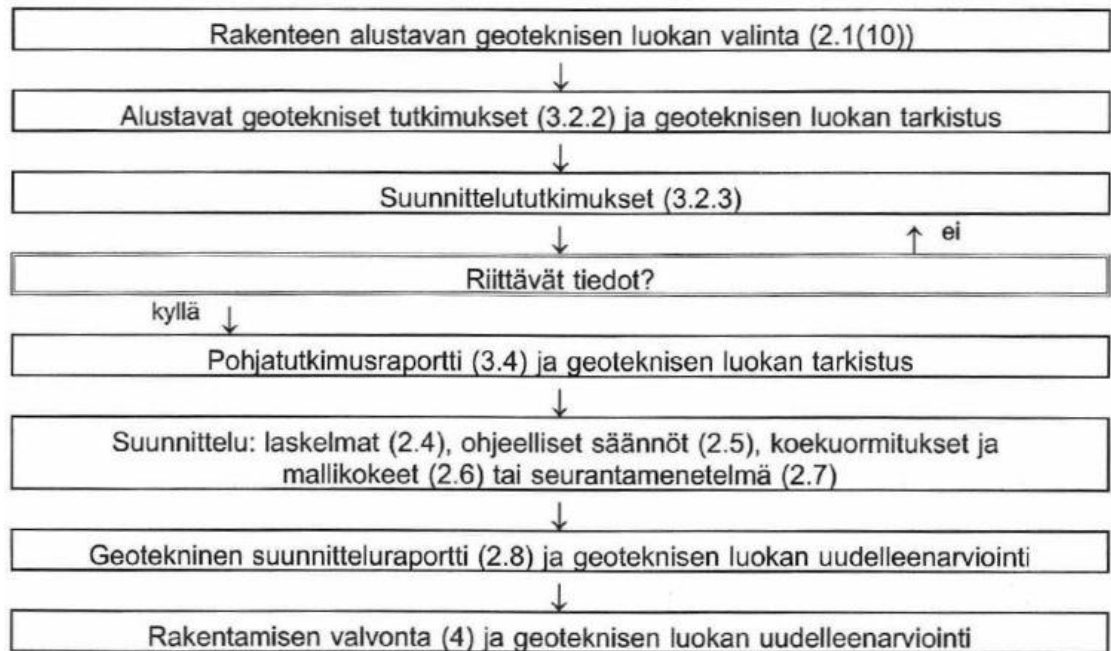
Kuormitukset määritellään standardien SFS-EN 1990, SFS-EN 1991 ja SFS-EN 1997 (geotekniset kuormitukset) mukaan. (RIL 254-1-2016, 32.)

Paalujen geotekninen mitoitus toteutetaan SFS-EN 1997-1 mukaan. (RIL 254-1-2016, 32.)

Suunnitteluprosessin eteneminen

Yleensä rakenteen geotekninen luokka valitaan ennen geoteknisiä tutkimuksia, mutta se voi vaihtua suunnittelun ja rakentamisen eri vaiheissa. (RIL 207–2017, 32.)





Kuvio 2. EN 1997-1:n suunnitteluprosessi. Numerot suluissa viittaavat RIL 207-2017 lukuun. (RIL 207-2017 kuva 2.1S., 33.)

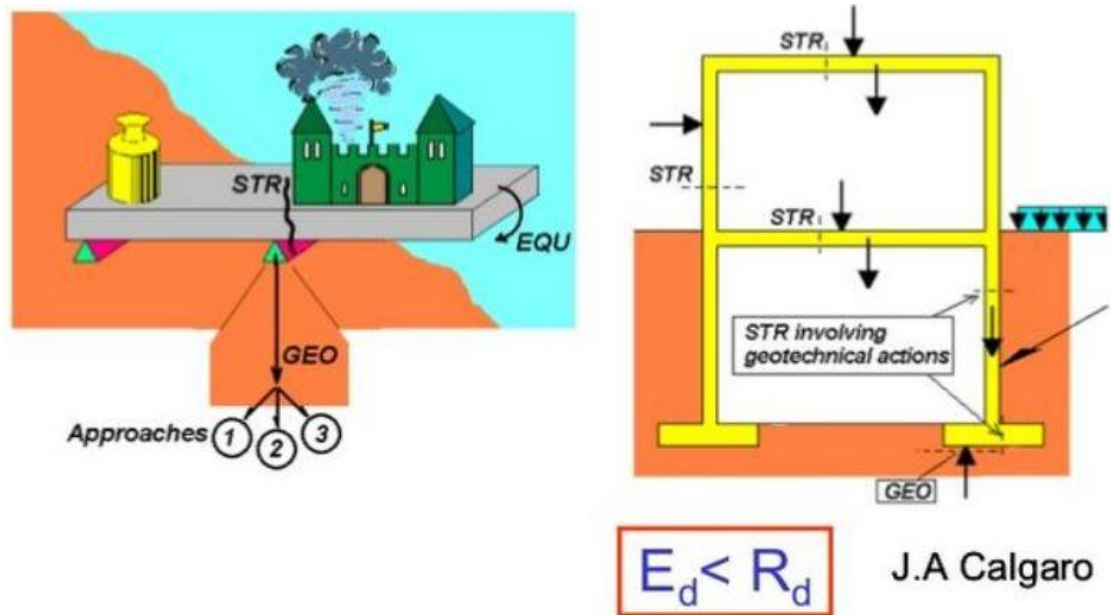
### Murtorajatila (MRT)

Murtorajatila on rajatila, jossa rakennetta tarkastellaan murtumisen tai sortumisen perusteella. Suunnittelun tavoitteena on etsiä riittävän pieni todennäköisyys murtumiselle osavarmuuslukuja käyttämällä.

Rakennetta mitoittaessa murtorajatilassa täytyy osoittaa, että seuraavien rajatilojen ylittyminen on tarpeeksi epätodennäköistä:

- EQU on rakenteen tai sen osan kaatumisen rajatila, sitä tarkasteltaessa jäykkänä kapaleena, jossa rakennusmateriaalien lujuudet ovat kestävyyskannalta merkityksellisiä. (RIL 201-1-2017, 37)
- STR on rakenteen tai rakennosien sisäisen murtumisen tai liiallisen muodonmuutoksen rajatila, materiaalin lujuuden ollessa merkittävä kestävyyskannalta.
- GEO on rajatila, jossa rakennuspohja murtuu tai tapahtuu liian suuri muodonmuutos, jolloin maan tai kallion lujuus on merkittävässä osassa kestävyyskannalta.
- UPL on rakenteen rajatila, jossa rakenne tai maapohja menettää tasapainotilansa, joko vedenpaineen aiheuttamasta nosteesta tai muista pystysuuntaisista kuormista.
- HYD on rajatila, jossa syntyy hydraulinen murtuma (maapohjan nousu tai eroosio) veden virtauksien johdosta maakerroksissa.

(SFS-EN 1990 2006, 76–78.)



Kuvio 3. Eurokoodin EN 1990 mukaiset murtorajatilat EQU, GEO ja STR.

### Käyttörajatila (KRT)

Käyttörajatila on rajatila, jossa rakennetta tai rakenteen osaa tarkastellaan ihmisten normaalikäytön perusteella. Tämä pitää sisällään värähtelyt, siirtymät ja rakenteen ulkonäköön ja säilyvyyteen liittyvät vauriot. Mikäli rajatila ylittyy, ei se aiheuta välitöntä riskiä turvallisuudelle. (RIL 201-1-2017, 30.)

Käyttörajatilassa maapohjassa, rakenteellisessa poikkileikkauksessa, kantavassa rakennusosassa tai liitoksessa tulee varmuuden osoittamiseksi osoittaa, että kuormien vaikutuksen mitoitusarvo ( $E_d$ ) on enintään yhtä suuri kuin rajoittava mitoitusarvo kuorman vaikutukselle ( $C_d$ ).

Ominaisarvoja on muutettava, mikäli rakenteen eliniän aikana voi tapahtua maapohjan ominaisuuksien muutoksia, kuten pohjaveden korkeuden muutokset tai kuivuminen. (RIL 207–2017, 58.)

### Kuormien vaikutukset

Kuormien osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin ( $F_{rep}$ ) tai niiden vaikutuksiin ( $E$ ).

Osavarmuuslukujen käyttö maankautta kulkevilla kuormilla voi antaa kohtuuttoman

suuria arvoja. Näissä tilanteissa kannattaa osavarmuuslukuja käyttää suoraan kuormien vaikutuksiin, jotka johdetaan kuormien arvoista. (RIL 207-2017, 50.)

$$E_d = E (\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d) \quad (4)$$

Tai

$$E_d = \gamma_E E (F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d) \quad (5)$$

Missä

$F_{rep} = \psi * F_k$ . Kertoimen  $\psi$  arvot tulevat standardin EN 1990 kansallisesta liitteestä.

Kuormien ( $\gamma_F$ ) ja niiden vaikutusten ( $\gamma_E$ ) osavarmuusluvut (STR- ja GEO-rajatiloissa) esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Kuormien ja kuorman vaikutusten osavarmuusluvut (STR/GEO). (Eurokoodi 7, kansallinen liite 2007 Taulukko 6, 35.)

Kuorma	Merkintä	Sarja	
		A1	A2
Pysyvä:			
Epäedullinen			
(Yht.6.10a)		1,35 $K_{FI}$	
(Yht.6.10b)	$\gamma_{Gk,sup}$	1,15 $K_{FI}$	
(Yht.6.10)			1,0 $K_{FI}$
Edullinen			
(Yht.6.10a)		0,9	
(Yht.6.10b)	$\gamma_{Gk,inf}$	0,9	
(Yht.6.10)			1,0
Muuttuva			
Epäedullinen			
(Yht.6.10b)	$\gamma_Q$	1,5 $K_{FI}$	
(Yht.6.10)			1,3 $K_{FI}$
edullinen		0	0

Sarjan A1 osavarmuuslukuja käytetään mitoitusmenetelmissä DA 2 ja DA 2\*. Kuormien yhdistelmänä käytetään epäedullisempaa seuraavista kaavoista 6 ja 7.

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (6)$$

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} \quad (7)$$

Sarjan A2 osavarmuuslukuja käytetään mitoitusmenetelmässä DA 3. Kuormien yhdistelmänä käytetään kaavaa 8.

$$1,0 * G_{kj,sup} + 1,0 * G_{kj,inf} + 1,3 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,3 * \sum_{i>1} \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (8)$$

Yhdistelykertoimen  $\psi_{0,i}$  arvot saadaan Eurokoodi SFS-EN 1990 taulukosta A1.1.

$K_{FI}$  kerroin riippuu standardin SFS-EN 1990 liitteen B taulukon B3 mukaisesta luotettavuusluokasta.

- RC1 ->  $K_{FI} = 0,9$
- RC2 ->  $K_{FI} = 1,0$
- RC3 ->  $K_{FI} = 1,1$

#### Seuraamusluokat

Seuraamusluokka valitaan taulukon 1 mukaan (CC1...CC3). Seuraamusluokan valintaan vaikuttaa rakenteen vaurioitumisesta aiheutuvat seuraamukset. (SFS-EN 1990, 136.)

Taulukko 3. Seuraamusluokkien määrittely (SFS-EN 1990 Taulukko B1., 136.)

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevia esimerkkejä
CC3	<b>Suuret</b> seuraamukset hengenmenetysten <i>tai hyvin suurten</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Pääkatsomot; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat suuret (esim. konserttitalo)
CC2	<b>Keskisuuret</b> seuraamukset hengenmenetysten <i>tai merkittävien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Asuin- ja liikerakennukset; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat keskisuuret (esim. toimistorakennus)
CC1	<b>Vähäiset</b> seuraamukset hengenmenetysten <i>tai pienten tai merkityksettömien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Maa- ja metsätalousrakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä (esim. varastorakennukset), kasvihuoneet

#### 4.1 Geotekniset luokat

Geotekniset suunnitteluvaatimukset on jaettu vaativuutensa mukaan kolmeen luokkaan GL1, GL2 ja GL3. Nämä luokat auttavat määrittämään paalutustyöluokan, pohjatutkimusten laajuuden ja paaluille asetettavat vaatimukset. (RIL 254-1-2016, 36.)

GL1 (Helpot kohteet)

Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan 1, jos kaikki seuraavat kohdat toteutuvat:

- yksinkertainen rakenne
- maapohja kalliota tai kitkamaata
- ei vakavuuden menettämisen riskiä
- ei siirtymien tai painumien aiheuttamia riskejä

(Liikennevirasto 2017, 20.)

#### GL2 (Vaativat kohteet)

Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan 2, jos se on tavanomainen eikä alapuoliseen maahan liity tavallisesta poikkeavia riskejä. (Liikennevirasto 2017, 20.)

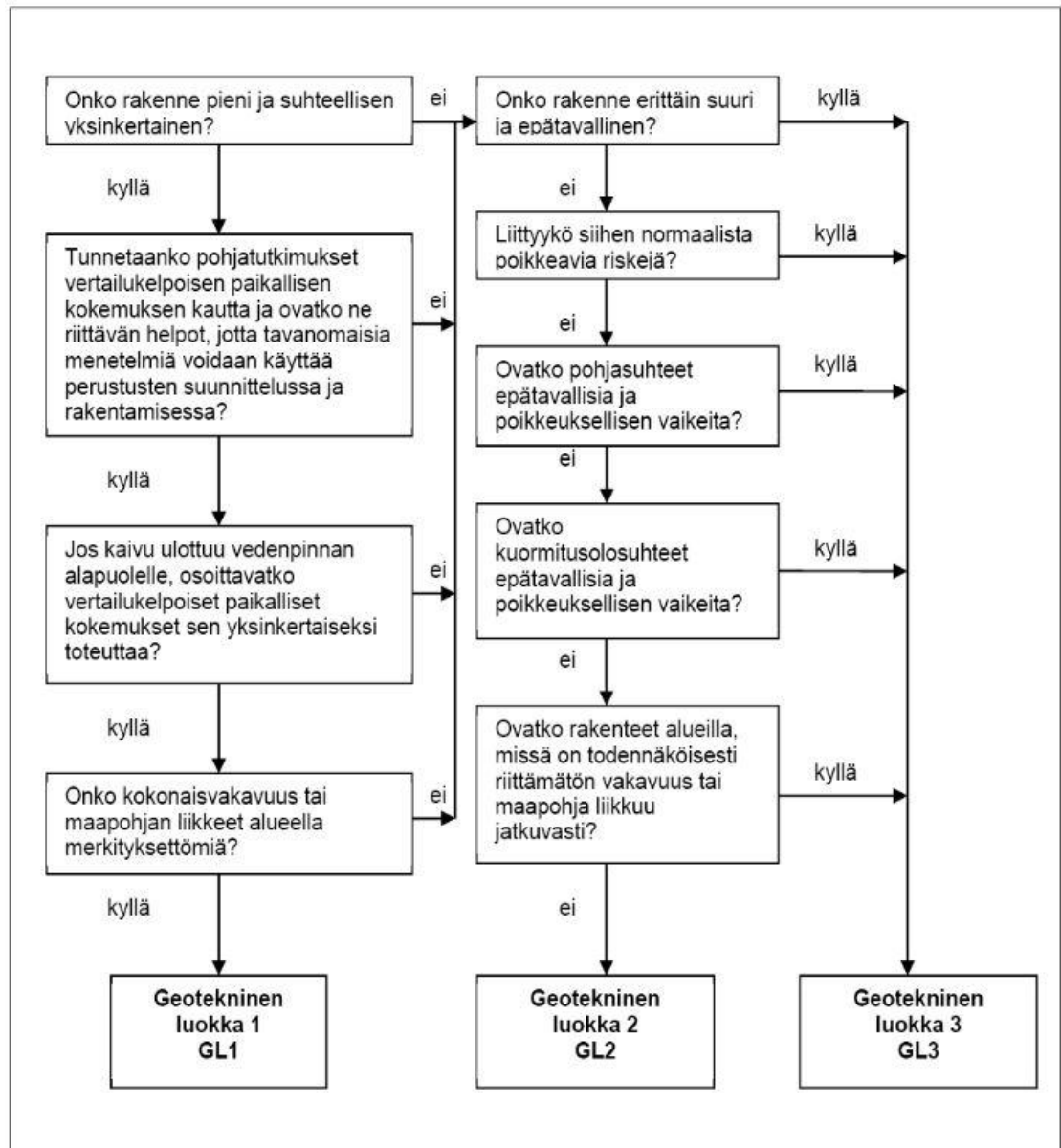
Paalutuskohde kuuluu aina vähintään geotekniseen luokkaan 2, mikäli siinä on pysyviä asumiseen tai työskentelyyn tarkoitettuja tiloja tai jos rakennus on vaativa. (RIL 254–2017, 29.)

#### GL3 (Erittäin vaativat kohteet)

Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan 3, jos se ylittää luokan 1 ja 2 ehdot. Yleisimpiä esimerkkejä ovat: suuret ja epätavalliset rakenteet, vaikeat pohja- ja kuormitusolosuhteet ja merkittävät ympäristövaikutukset. (Liikennevirasto 2017, 20-21.)

#### Geoteknisen luokan valinta

Geoteknisen luokan valinnassa auttaa lohkokaavio (Kuvio 4).



Kuvio 4. Geoteknisen luokan valintaperusteet (RIL 254–1-2016 Kuva 2.1., 30.)

## 4.2 Paalutustyöluokka

Paalutustyöluokat määritellään kohteen geoteknisen luokan ja seuraamusluokan avulla taulukon 4 mukaisesti valiten alhaisin mahdollinen. Paalutustyöluokka määrittää materiaalien ja paalutustyön vaatimuksia. (RIL 254-1-2016, 102.)

Taulukko 4. Paalutustyöluokat (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.18., 102.)

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

### 4.3 Mitoitustavat

Eurokoodissa EN 1997-1 on kolme mitoitustapaa (DA1, DA2 ja DA3). Jokainen eurokoodistandardia käyttävä valtio esittää omassa kansallisessa liitteessään, mitä mitoitusapoja käytetään. Suomessa käytetään mitoitustapaa DA2 maavaraisten perustusten, paaluperustusten, ankkureiden ja tukirakenteiden mitoituksessa ja mitoitustapaa DA3 penkereiden ja luiskien vakavuuden sekä kokonaisvakavuuden mitoituksessa. DA1 mitoitustapaa ei Suomessa käytetä. (RIL 207–2017, 54–55.)

Tässä opinnäytetyössä ei tarvita mitoitustapaa DA3, joten sen tarkempi tarkastelu jätetään pois.

#### Mitoitustapa DA2 ja DA2\*

Mitoitustavalla tulee osoittaa, että osavarmuuslukujen yhdistelmällä ( $A1 "+" M1 "+" R2$ ) ei ylitetä murtorajatilaa tai liiallisia muodonmuutoksia ei pääse syntymään. (Wrana 2015, 85.)

Osavarmuusluvut on ryhmitelty käyttäen merkintää A (kuormille ja kuormien vaikutuksille), M (maaparametreille) ja R (kestävyydelle).

Mitoitustavasta DA2 on kaksi versiota DA2 ja DA2\*. Yleensä käytetään mitoitustapaa DA2\*, jossa koko laskenta suoritetaan ominaisarvoilla ja osavarmuusluvut otetaan käyttöön vasta lopussa murtorajatilaehto tarkistaessa. Mitoitustavassa DA2 osavarmuuslukujen vaikutus otetaan huomioon heti mitoituslaskelman alussa ja näin koko mitoituslaskelma tehdään näillä arvoilla. (RIL 207–2017, 55.)

Paaluperustoilla, joilla vaakakuormat otetaan vastaan paalujen aksiaalisilla voimilla, antavat mitoitustavat DA2 ja DA2\* samat tulokset. (RIL 207–2017, 55.)

Taulukko 5. Maaparametrien osavarmuusluvut (STR/GEO). (Eurokoodi 7, kansallinen liite 2007 Taulukko7, 38)

Maaparametri	Merkintä	Sarja	
		M1	M2
Leikkauskestävyyskulma <sup>a</sup> ("Kitkakulma")	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Suljettu leikkauslujuus	$\gamma_{cu}$	1,0	1,5
Yksiaksiaalinen puristuskoe	$\gamma_{qu}$	1,0	1,5
Tilavuuspaino	$\gamma_{\gamma}$	1,0	1,0
<sup>a</sup> Tällä varmuusluvulla jaetaan $\tan \phi'$			

#### 4.4 Kestävyyden mitoitusarvot

Osavarmuusluvut kohdistetaan joko maan ominaisuuksiin (X) tai kestävyteen (R) tai molempiin seuraavilla kaavoilla:

$$R_d = R (\gamma_F * F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d) \quad (9)$$

Tai

$$R_d = R (\gamma_F * F_{rep}; X_k; a_d) / \gamma_R \quad (10)$$

Kestävyyden osavarmuusluvut valitaan taulukon 6 sarjasta R2 käytettävän mitoitus-tavan DA2 perusteella.

Taulukko 6. Kestävyyden osavarmuusluvut ( $\gamma_R$ ) syrjäyttävälle, kaivetuille ja CFA-paaluille (STR/GEO). (Eurokoodi 7, kansallinen liite 2007 Taulukot 9, 10 ja 11, 38.)

Kestävyys	Merkintä	Sarja R2
Kärki	$\gamma_b$	1,2
Vaippa (puristus)	$\gamma_s$	1,2
Kokonais-/yhdistetty (puristus)	$\gamma_t$	1,2
Vedetty vaippa:		
- lyhytaikainen kuormitus	$\gamma_{s,t}$	1,35
- pitkäaikainen kuormitus	$\gamma_{s,t}$	1,5



## 5 Paalun kapasiteetti

### 5.1 Paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilamitoituksessa

Paaluryhmillä tulee huomioida kaksi murtumismekanismia, joista pienempi valitaan kestävyysmitoitussarvoksi. Nämä mekanismit ovat:

- Yksittäisen paalun puristumurtuminen
- Paalujen ja niiden välisen maablokin puristumurtuminen. (RIL 254-1-2016, 58.)

Jos perusrakenteeseen kuuluu 9 paalua tai enemmän ja mitoitettu niin, että paalujen asentamisesta johtuvat tavanomaiset sijaintipoikkeamat eivät vaikuta merkittävästi paaluvoimiin, voidaan yksittäisen paalun geoteknisen kestävyysmitoitussarvoa nostaa 10 %. (RIL 254-1-2016, 59.)

Geotekninen puristuskestävyys pohjatutkimusten perusteella

Paalun geoteknisen puristuskestävyyden määrittämiseen pohjatutkimusten perusteella voidaan käyttää kahta vaihtoehtoista menetelmää, jotka ovat mallipaalumenetelmä ja vaihtoehtoinen menetelmä. Saatujen tulosten on oltava riittävällä tasolla tunnettuja ja suunnittelijalla on oltava käytettävästä menetelmästä riittävästi kokemusta, jotta paalun geoteknistä kantavuutta voidaan arvioida. (RIL 254-1-2016, 61.)

Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitussarvo  $R_{c;d}$  lasketaan kaavalla:

$$R_{c;d} = R_{b;d} + R_{s;d} \quad (11)$$

Jokaiselle paalulle on johdettava  $R_{b;d}$  ja  $R_{s;d}$  osavarmuuslukujen mukaan kaavalla:

$$R_{b;d} = R_{b;k} / \gamma_b \text{ ja } R_{s;d} = R_{s;k} / \gamma_s \quad (12)$$

Osavarmuuslukujen arvot otetaan taulukosta 6.

Ominaisarvot  $R_{b;k}$  ja  $R_{s;k}$  määritetään kaavalla:

$$R_{c;k} = (R_{b;k} + R_{s;k}) = (R_{b;cal} + R_{s;cal}) / \xi = R_{c;cal} / \xi = \text{Min}((R_{c;cal})_{\text{mean}} / \xi_3; (R_{c;cal})_{\text{min}} / \xi_4) \quad (13)$$

Missä

$\xi_3$  ja  $\xi_4$  ovat korrelaatiokertoimia, jotka riippuvat tutkimusprofiilien (n) lukumäärästä, jotka kohdistetaan seuraavasti, mainitussa järjestyksessä:

- keskiarvoihin  $(R_{c;cal})_{mean} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{mean} = (R_{b;cal})_{mean} + (R_{s;cal})_{mean}$  ja
- minimiarvoihin  $(R_{c;cal})_{min} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{min}$ .

Joissa

$R_{s;cal}$  on vaippakitka laskettuna maaparametrien koetuloksista murtorajatilassa

$R_{b;cal}$  on paalun kärkikestävyys laskettuna pohjatutkimustuloksista murtorajatilassa

$R_c$  on paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilassa

$R_{c;cal}$  on  $R_c$ :n laskettu arvo

$R_{c;d}$  on  $R_c$ :n mitoitusarvo

$R_{c;k}$  on  $R_c$ :n ominaisarvo.

Taulukko 7. Korrelaatiokertoimet  $\xi$  ominaisarvon johtamiseksi pohjatutkimustuloksista (n = tutkimusprofiilien\* lukumäärä). (Eurokoodi 7, kansallinen liite 2007 Taulukko 13, 39.)

n	1	2	3	4	5	7	$\geq 10$
$\xi_3$	1,85	1,77	1,73	1,69	1,65	1,62	1,60
$\xi_4$	1,85	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40

\*Tutkimusprofiilien lukumäärän on oltava vähintään yhtä suuri kuin tarkasteltavien paalujen lukumäärä.

Rakenteen korrelaatiokertoimien arvot voidaan jakaa luvulla 1,1, jos rakenteilla on riittävät jäykkyydet ja lujuudet siirtää kuormia "heikoilta" paaluilta "vahvoille". (RIL 254-1-2016, 62–63.)

Vaihtoehtoisessa menetelmässä ominaisarvot saadaan kaavoilla:

$$R_{b;k} = A_b q_{b;k} \quad (14)$$

Ja

$$R_{s;k} = \sum_i A_{s;i} * q_{s;i;k} \quad (15)$$

Missä

$q_{b;k}$  ja  $q_{s;i;k}$  ovat maaparametrien arvoilla saadut kärkikestävyiden ja vaippakitkan ominaisarvot maan eri kerroksissa. (RIL 254-1-2016, 63.)

$A_b$  on paalun kärjen pinta-ala

$A_{s;j}$  on paalun vaipan pinta-ala metrin matkalta

Pohjatutkimuksiin perustuva mitoitus on Suomen olosuhteissa yleensä alustava tapa, joka tarkistetaan luotettavaksi paalutuskaavalla tai dynaamisella koekuormituksella. (RIL 254-1-2016, 63.)

Maakerrokseen tukeutuvan paalun geotekninen kestävyys

Paalun kärkivyyhykkeeksi katsotaan maakerrosta, joka ulottuu  $5d$  paalun kärjen yläpuolelta  $3d$  kärjen alapuolelle (molemmissa kuitenkin minimissään  $1\text{ m}$ ), jossa  $d$  on paalun läpimitta. (RIL 254-1-2016, 64.)

Leikkauskestävyyskulmaa voidaan arvioida taulukon 8 mukaan. Taulukon arvoissa on riittävästi varmuutta, joten se soveltuu hyvin alustavaan suunnitteluun, mutta arvot on varmennettava hankekohtaisesti.

Kärkikestävyys isorakeisessa maakerroksessa saadaan kaavalla:

$$q_b = \sigma'_{v;b} * N_q \quad (16)$$

Missä

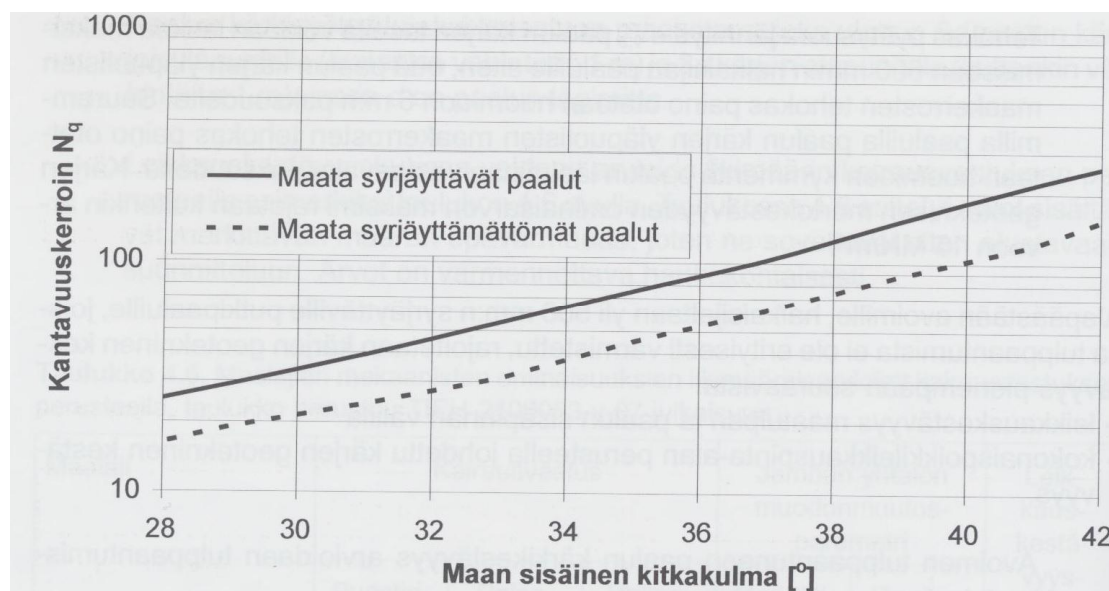
$N_q$  on paalun kärjen kantavuuskerroin (Kuvio 5)

$\sigma'_{v;b}$  on tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasossa.

(RIL 254-1-2016, 64.)

Taulukko 8. Maalajien mekaanisten ominaisuuksien likimääräisarviointi kairauksen perusteella, taulukko perustuu TIEH 2100053-v-07 julkaisuun. (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.6., 64.)

Maalaji		Kairausvastus			Jambun yhtälön muodonmuutos-parametri		Leikkauskestävyyskulma
		Puristin-kairaus $q_c$ (MPa)	Paino-kairaus $P_k/0,2$ m	Heijari-kairaus $L/0,2$ m	Moduuliluku $m$	Jännityksen eksponentti $\beta$	
Karkea siltti	Löyhä	< 7	< 40	< 8	30–100	0,3	28
	Keskitiivis	7–15	40–100	8–25	70–150	0,3	30
	Tiivis	> 15	> 100	> 25	100–300	0,3	32
Hieno-hiekka $d_{10}<0,06$	Löyhä	< 10	20–50	5–15	50–150	0,5	30
	Keskitiivis	10–20	50–100	15–30	100–200	0,5	33
	Tiivis	> 20	> 100	> 30	150–300	0,5	36
Hiekka $d_{10}>0,06$	Löyhä	< 6	10–30	5–12	150–300	0,5	32
	Keskitiivis	6–14	30–60	12–25	200–400	0,5	35
	Tiivis	> 14	> 60	> 25	300–600	0,5	38
Sora	Löyhä	< 5,5	10–25	5–10	300–600	0,5	34
	Keskitiivis	5,5–12	25–50	10–20	400–800	0,5	37
	Tiivis	> 12	> 50	> 20	600–1200	0,5	40
Moreeni	Hyvin löyhä	< 10	< 40	< 20	15–600	0,5	...34
	Löyhä	> 10	40–100	20–60	600...	0,5	...36
	Keskitiivis		> 100	60–140	800...	0,5	...38
	Tiivis		Lyömällä	> 140	1200...	0,5	...40



Kuvio 5. Kantavuuskerroin  $N_q$  maan sisäisen leikkauskestävyyskulman funktiona (RIL 254-1-2016 Kuva 4.3., 66.)

$\sigma'_{v,b}$  määritetään paalun kärjen yläpuolisten maakerrosten tehollisen painon mukaan  $10 \cdot d$  korkeudelta (vähintään 6m). Maksimiarvo on  $15 \text{ MN/m}^2$ . (RIL 254-1-2016, 65.)

Alapäästään avoimille yli 500 mm:n syrjäyttävälle putkipaaluille rajoitetaan kärjen geoteknistä kestävyyttä pienempään seuraavista:

- Leikkauskestävyys maatulpan ja paalun sisäpinnan välillä
- Kokonaispoikkileikkauspinta-alan perusteella johdettu kärjen geotekninen kestävyys. (RIL 254-1-2016, 65.)

Avoimen tulppaantuneen paalun kärkikestävyys arvioidaan kertoimen  $\psi_t$  avulla:

$\psi_t = 0,8$ ; kun  $D/d \geq 10$  (moreenissa)

$\psi_t = 0,8$ ; kun  $D/d \geq 15$  (hielessä ja sorassa)

Missä

$D$  on paalun upotussyvyys tulppaavaan maakerrokseen

$d$  on paalun halkaisija

Jos  $D/d$  ei ylitä arvoa (10 tai 15), kerrointa  $\psi_t$  pienennetään lineaarisesti. (RIL 254-1-2016, 65.)

Tulppaantuneen paalun kärkikestävyys saadaan kaavalla:

$$q_{b,tp} = \psi_t q_b \quad (17)$$

Missä

$q_b$  on halkaisijaltaan tulppaantunutta paalua vastaavan suljetun paalun kärkikestävyys

(RIL 254-1-2016, 65.)

Paalun vaippakestävyys karkearakeisessa maakerroksessa saadaan kaavalla:

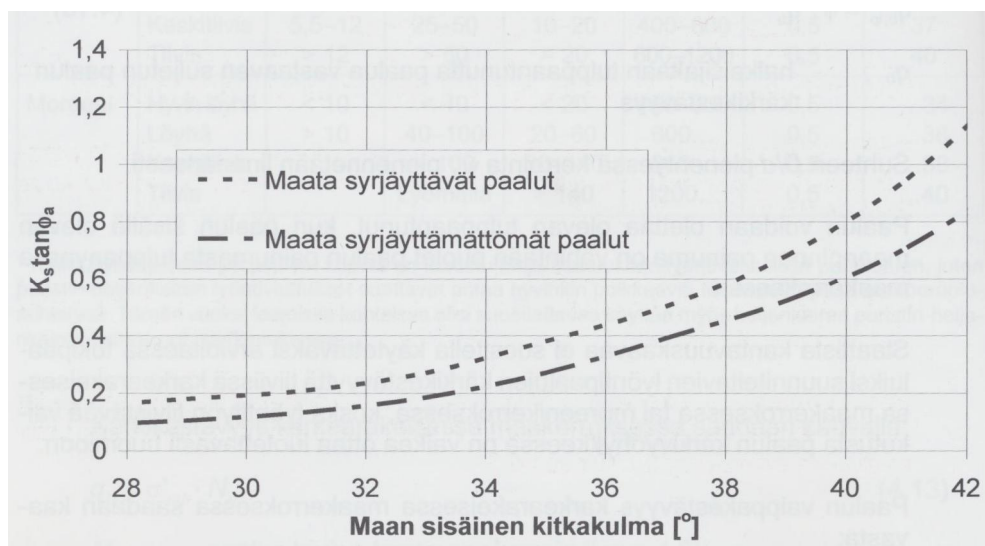
$$q_{s,i} = \sigma'_{v,i} * K_s \tan \varphi_a \quad (18)$$

Missä

$\sigma'_{v,i}$  on tehokas pystysuora jännitys paalun vaippaa ympäröivässä maakerroksessa

$K_s \tan \varphi_a$  on paalutyypistä ja maan sisäisestä kitkakulmasta riippuva vaippakestävyyskerroin, kuvio 6 taulukko 9.

(RIL 254-1-2016, 66.)



Kuvio 6. Paalun vaippakestävyysskerroin  $K_s \tan \phi_a$  maan sisäisen leikkauskestävyysskuman funktiona. (RIL 254-1-2016 Kuva 4.4., 66.)

Taulukko 9. Vaippakestävyysskerroin  $K_s \tan \phi_a$  injektoiduille paaluille karkearakeisissa maalajeissa. (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.7., 67.)

	Maan sisäinen kitkakulma (°)							
	28	30	32	34	36	38	40	42
$K_s \tan \phi_a$	1,2	1,3	1,5	1,7	2,1	2,5	2,9	3,4

### Kallioon tukeutuvat paalut

Suomalaiseen ehjään kallioon tukeutuvilla paaluilla mitoittava tekijä ei ole yleensä kärkekestävyys vaan paalun rakenteellinen kestävyys. Kun sekä poraus- tai lyöntihavainnot ja pohjatutkimukset tukevat tulkintaa samanaikaisesti voidaan paalun kärki olettaa kallioon tukeutuvaksi. (RIL 254-1-2016, 70.)

Pienpaalun kallioon tukeutuvan kärjen geoteknisen kestävyden ominaisarvoksi voidaan olettaa:

$$q_{b,k} = 7 \cdot \sigma_{cyl} / d^{0,2} \text{ (MPa)} \quad (19)$$

Missä

$\sigma_{cyl}$  on suomalaisten syväkivilajienyksiakiaalinen puristuslujuus 150–300 MPa

$d$  on porapaaluilla paalun halkaisija ja lyöntipaaluilla kärkitapin halkaisija (cm)

(RIL 254-1-2016, 70.)

Porapaalun geotekninen puristuskestävyys varmistetaan poraamalla paalu ehjään kallioon  $3 \cdot D$  syvyyteen, kuitenkin vähintään 0,5 m. Mikäli kallio on todettu hyvin kaltevaksi ( $>30^\circ$ ), täytyy paalua porata ehjään kallioon  $4 \cdot D$  syvyyteen asti. (RIL 254-1-2016, 70.)

## 5.2 Murtorajatilanteen vetokestävyys

Jotta perustus kantaa mitoituskuorman riittävällä varmuudella vetomurtuman suhteen, on seuraavan epäyhtälön ehdon toteuduttava kaikilla kuormitusyhdistelmillä:

$$F_{t;d} \leq R_{t;d} \quad (20)$$

(RIL 254-1-2016, 79.)

Paaluryhmän paikallaanpysymiseksi on seuraavan yhtälön toteuduttava:

$$V_{dst;d} \leq G_{stb;d} + R_d \quad (21)$$

Missä

$$V_{dst;d} = G_{dst;d} + Q_{dst;d} \quad (22)$$

$V_{dst;d}$  on kaatavien pysyvien ja muuttuvien pystysuorien kuormien yhdistelmän arvo

$G_{stb;d}$  on vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo

$R_d$  on muun lisäkestävyyden mitoitusarvo

$G_{dst;d}$  on kaatavien pysyvien pystykuormien mitoitusarvo

$Q_{dst;d}$  on kaatavien muuttuvien pystykuormien mitoitusarvo

(RIL 254-1-2016, 79.)

Kaavassa 22 tulee käyttää taulukoiden 10 ja 11 osavarmuuslukuja.

Taulukko 10. Kuormien osavarmuusluvut ( $\gamma_F$ ) (nosterajatila UPL) (RIL 254-1-2016 Taulukko 4.13., 80.)

Kuorma	Merkintä	Arvo
Pysyvä:		
Epäedullinen <sup>a</sup>	$\gamma_{G;dst}$	1,1 $K_{FI}$
Edullinen <sup>b</sup>	$\gamma_{G;stb}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen <sup>a</sup>	$\gamma_{Q;dst}$	1,5 $K_{FI}$

<sup>a</sup> Kaatava kuorma, <sup>b</sup> Vakauttava kuorma

SFS-EN 1990:n liitteen B taulukosta B2 luotettavuusluokan mukaan seuraavalla tavalla määräytyvä kerroin  $K_{FI}$ :

-luotettavuusluokassa RC3  $K_{FI} = 1,1$

-luotettavuusluokassa RC2  $K_{FI} = 1,0$

-luotettavuusluokassa RC1  $K_{FI} = 0,9$

(RIL 254-1-2016, 80.)

Taulukko 11. Osavarmuusluvut maaparametreille ja kestävyyksille (nosterajatila UPL)  
(RIL 254-1-2016 Taulukko 4.14., 80.)

Maaparametri	Merkintä	Arvo
Leikkauskestävyysskulma <sup>a</sup>	$\varphi'$	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_c'$	1,25
Suljettu leikkauslujuus	$\gamma_{cu}$	1,5
Vedetyn paalun kestävyys	$\gamma_{s,t}$	1,5
Ankkurin kestävyys	$\gamma_a$	1,5

<sup>a</sup> Tällä varmuusluvulla jaetaan  $\tan \varphi'$

Mikäli paaluun kohdistuu sellaisia vetorasituksia, ettei paalun vaippakestävyys pysty siirtämään niitä ympäröivään maahan, voidaan paalu ankkuroida kallioon. Tällöin koko paaluun vaikuttava vetovoima otetaan kiinni ankkureilla. (RIL 254-1-2016, 81.)

Geotekninen vetokestävyys pohjatutkimusten perusteella

Paalun vetokestävyysmitoitussarvo lasketaan kaavasta:

$$R_{t,d} = R_{t,k} / \gamma_{s,t} \quad (23)$$

Missä

$$R_{t,k} = R_{s,k} \quad (24)$$

$\gamma_{s,t} = 1,5$  (Taulukko 11)

$R_{t,k}$  määritetään joko kaavalla 25 tai 26

$$R_{t,k} = \text{Min} ( (R_{s,cal})_{\text{mean}} / \xi_3 ; (R_{s,cal})_{\text{min}} / \xi_4 ) \quad (25)$$

Missä

$\xi_3$  ja  $\xi_4$  ks. Taulukko 7



$$R_{t;k} = \sum_i A_{s;i} * q_{s;i;k} \quad (26)$$

Missä

$q_{s;i;k}$  on maapohjan ominaisuuksien avulla saatu vaippakitkan ominaisarvo maan eri kerroksissa

(RIL 254-1-2016, 84-85.)

Ankkurointi pituus rakoillussa kalliossa kartiomenetelmällä lasketaan kaavasta:

$$L_{\min} = (3 * F_{t;d} / \gamma * \pi * \tan^2 \varphi)^{1/3} \quad (27)$$

Missä

$F_{t;d}$  on vetokuorman mitoitusarvo

$\gamma$  on kallion tilavuuspaino tai pohjavedenpinnan alapuolella tehokas tilavuuspaino

$\varphi$  on 45° homogeenisessä kalliossa tai 30° rikkonaisessa kalliossa

Jos kallion rakoiluominaisuuksia ei ole riittävän luotettavasti määritetty, valitaan ankurin tartuntaosan pituudeksi vähintään 3 m. (RIL 254-1-2016, 86.)

### 5.3 Paaluperustuksen pystysuuntainen eläminen

Hyvin kantavaan maapohjaan kuten kallioon tai tiiviiseen moreeniin tukeutuvien tukipaalujen painumien tarkastelun voi yleensä jättää tekemättä, jos paalujen murtorajatilata tarkastelut on tehty. Tukipaalujen painumatarkastelu on yleensä tarpeetonta geoteknisissä luokissa 1 ja 2. Tilanteissa, joissa paalujen kimmoinen kokoonpuristuminen voi tulla mitoittavaksi, on paalut hyvä esikuormittaa. Esimerkiksi pitkillä paaluilla toteutettu perustusten vahvistus voi olla tämän kaltainen tilanne. (RIL 254-1-2016, 56 ja 86.)

### 5.4 Poikittaiskuormitetun paalun geotekninen kestävyys pohjatutkimusten ja paalun lujuusparametrien perusteella

Yleensä poikittaiset kuormat otetaan vastaan vinoilla paaluilla, mutta jos näitä ei haluta tai pystytä käyttämään, tulee paalut mitoittaa myös poikittaiskuormitettuina.

Poikkitaiskuormitetun paalun tai paaluryhmän geotekninen kestävyys lasketaan kuormien, maan vastuksen ja siirtymien vaikutusten perusteella ja sen analysoinnissa on otettava huomioon paalun maassa olevan osan rakenteen murtumisen mahdollisuus. (RIL 254-1-2016, 90.)

Poikkitaiskuormitetun paalun liikkuminen ja muodonmuutokset riippuvat ympäröivän maan ja paalun suhteellisesta jäykkyydestä sekä paalun kiinnityksestä rakenteeseen. Liikkeet voidaan alustavasti arvioida kaavoilla:

$$R = (EI / E_s)^{1/4} \quad (\text{hienorakeisessa maassa}) \quad (28)$$

$$T = (EI / n_h)^{1/5} \quad (\text{karkearakeisessa maassa}) \quad (29)$$

Missä

$EI$  on paalun taivutusjäykkyys

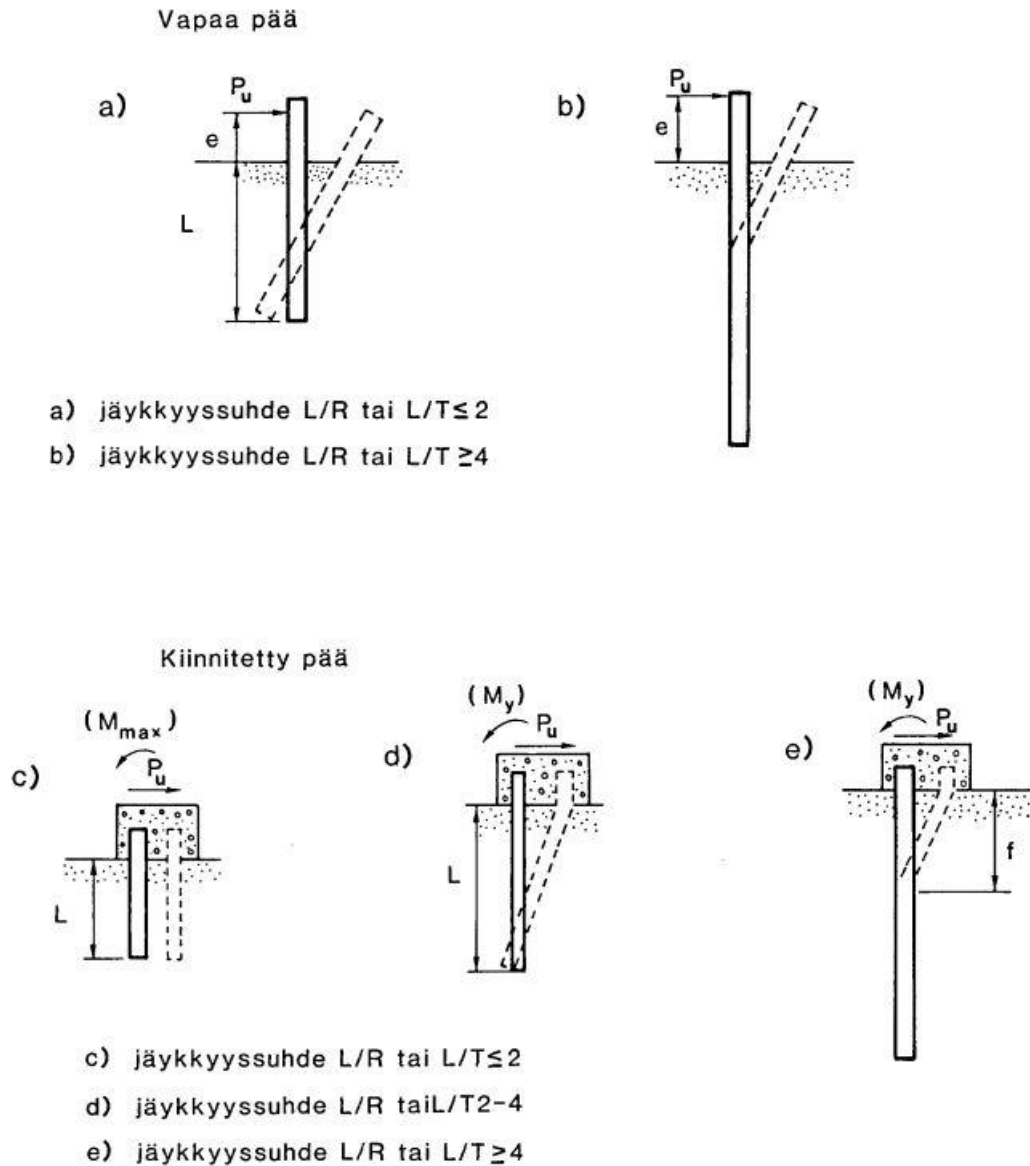
$E_s$  on koheesiomaan vaakasuuntainen kimmomoduuli

$n_h$  on vaakasuuntainen alustalukukerroin karkearakeisessa maassa

(RIL 254-1-2016, 90.)

Paalun upotussyvyyden ja parametrin suhteen ollessa enintään kaksi, käsitellään paalua jäykkänä maassa kiertyvänä kappaleena. Kiertokeskuksen paikan voidaan olettaa olevan homogeenisessä maassa likimain 70 % syvyydellä paalun asennussyvyydestä. Tällöin maan murtuminen tapahtuu ennen paalun murtumista. Kiertokeskuksen tarkan paikan voi laskea momenttitasapainoehdon perusteella. (RIL 254-1-2016, 90.)

Jäykkyyssuhteen arvoa neljä voidaan pitää sivuvastuksen suhteen paalun toiminnallisen pituuden ääriarvona. Tällöin paalu murtuu ennen maata. Jäykkyyssuhteen ollessa välillä 2-4, voidaan väliarvot interpoloida. (RIL 254-1-2016, 91.)



Kuvio 7. Jäykkyyssuhteen vaikutus paalun murtomekanismiin,  $L$  on paalun upotussyvyys. (RIL 254-1-2016 Kuva 4.11., 91.)

## 5.5 Lyönninkestävyys

Lyömällä asennettaviin paaluihin kohdistuu asennuksen aikana suuria lyöntijännityksiä, jotka paalun on kestävä vaurioitumatta. Tämän takia paaluun kohdistuvaa lyöntivoimaa on rajoitettava. Paalun valmistaja tai maahantuoja nimeää paalulle tietyn taatun rakenteellisen lyönninkestävyyden arvon  $R_{c;max}$ , sekä ylimmän paalutus-työluokan, jossa paalua voidaan käyttää. (RIL 254-1-2016, 102.)

## Teräsbetonipaalu

Asennuksen aikana paalun puristusjännitys voi olla enintään 80 % materiaalin puristuskestävyyden ominaisarvosta  $f_{ck}$ . Mikäli jännityksiä mitataan lyöntien aikana, voidaan tämä jännitysraja ylittää enintään 10 %. (RIL 223–2005, 85.)

Lyöntien aikana paaluun kohdistuu keskimääräisen jännityksen ylittäviä reunajännityksiä lyöntilaitteen ja paalun yläpään välisen kontaktin epäkeskisyyden johdosta. Tämän vuoksi eri paalutusluokissa on otettava huomioon lyönnin epäkeskisyyden asennuskestävyyden suurinta sallittua arvoa laskettaessa. Epäkeskisyydestä johtuvan reunajännityksen oletetaan olevan enimmillään paalutustyyoluokassa PTL 3 50 %, PTL 2 70 % ja PTL 1 90 % suurempi kuin keskimääräinen jännitys. Teräsbetonipaalun puristuskestävyyden mitoittamisessa voidaan ottaa huomioon rakenteen pääteräksiset. (RIL 254-1-2016, 103.)

Näin ollen paalun puristuskestävyyden maksimiarvoksi  $R_{c,max}$  saadaan:

$$\text{PTL 3:} \quad R_{c,max} = 0,8/1,5 f_{ck} (A_c + E_s A_s / E_{cm}) \quad (30)$$

$$\text{PTL 2:} \quad R_{c,max} = 0,8/1,7 f_{ck} (A_c + E_s A_s / E_{cm}) \quad (31)$$

$$\text{PTL 1:} \quad R_{c,max} = 0,8/1,9 f_{ck} (A_c + E_s A_s / E_{cm}) \quad (32)$$

Missä

$E_{cm}$  on betonin kimmokerroin

$E_s$  on teräksen kimmokerroin

Asennuksen aikana paaluun kohdistuva vetovoima saa olla enintään:

$$F_t = 0,9 f_{yk} A_s \quad (33)$$

(RIL 254-1-2016, 103.)

Valmistajan ilmoittamat maksimiarvot voivat erota näistä arvoista, mikäli paalun hoikkuus tai muut seikat rajoittavat paalun puristuskestävyyttä. (RIL 254-1-2016, 104.)

## Teräspaalu

Teräspaalun keskimääräinen puristusjännitys asennuksen aikana saa olla enintään 90 % materiaalin puristuskestävyyden ominaisarvosta  $f_{yk}$ . Paalutustyöluokissa voidaan paalun lyönninkestävyyden määäämästä ylärajasta hyödyntää:

PTL 3: 100 %

PTL 2: 80 %

PTL 1: 60 %

(RIL 254-1-2016, 104.)

Teräspaalun lyönnin epäkeskisyydestä aiheutuvan paalun vaurioituminen on epätoennäköisempää kuin teräsbetonipaalulla, sillä teräs kestää vetoa ja puristusta yhtä hyvin. Tämän vuoksi lyönnistä aiheutuvaa epäkeskisyyttä ei tarvitse tarkastella. Paalun rakenteen puristuskestävyyden suurimmat sallitut arvot eri paalutustyöluokissa saadaan:

$$\text{PTL 3:} \quad R_{c;\max} = 0,9 f_{yk} A_s \quad (34)$$

$$\text{PTL 2:} \quad R_{c;\max} = 0,8 * 0,9 f_{yk} A_s \quad (35)$$

$$\text{PTL 1:} \quad R_{c;\max} = 0,6 * 0,9 f_{yk} A_s \quad (36)$$

Asennuksen aikana paaluun kohdistuva vetovoima saa olla enintään kaavan 34 suuruinen. (RIL 254-1-2016, 104.)

## 6 Paaluanturan mitoitus

Anturalle tuleva pystykuorma ja paalujen kapasiteetti määrittävät paalujen lukumäärän kaavalla:

$$n_p \geq N_{Ed} / R_s \quad (37)$$

Missä

$N_{Ed}$  on anturalle tuleva kuorma pilarista

$R_s$  on paalun kapasiteetti

## 6.1 Raudoituksen laskenta ristikkomallilla

Pääraudoituksen vetokestävyys määritetään ristikkomallin mukaan olettaen vetorasi-  
tuksen olevan koko vetosauvan matkalla vakio. Raudoituksen laskennassa tulee ottaa  
huomioon anturan dimensiot ja solmupisteiden etäisyydet. (Leskelä 2008, 454.)

Teräsmäärän laskemiseen käy seuraava kaava:

$$A_{s,tot} = F_t / f_{yd} \quad (38)$$

Missä

$A_s$  on raudoituksen poikkileikkausala

$F_t$  on vetosauvassa vallitseva voima

$f_{yd}$  on betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo.

Teräksen myötölujuuden mitoitusarvo  $f_{yd}$  saadaan seuraavalla kaavalla:

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s \quad (39)$$

Missä

$f_{yk}$  on betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo

$\gamma_s$  on betoniteräksen osavarmuusluku ( $\gamma_s = 1,15$  toleranssiluokassa 2)

Raudoituksen vetovoimat lasketaan yksinkertaisimmassa tapauksessa (Kuvio 8) eh-  
don  $a/h \leq 1$  toteutuessa kaavoilla:

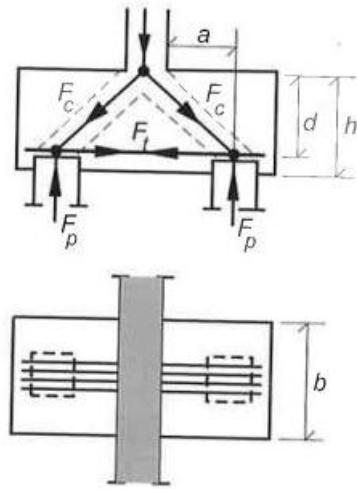
$$F_c \leq 0,15 \cdot f_{yd} \cdot b \cdot d \quad (40)$$

$$F_t = F_p \cdot a / z \quad (41)$$

$$z = 0,8 \cdot d \quad (42)$$

Missä

$f_{yd}$  on raudoitteen puristuslujuuden mitoitusarvo



Kuvio 8. Paaluanturan ristikkomallit. (Leskelä 2008 Kuva 10/6.6, 455.)

Mikäli paaluanturassa on enemmän paaluja, raudoituksen vetovoima lasketaan kaavalla:

$$F_t = k s_p / d (1 - h_c / (2 s_p)) N_{Ed} \quad (43)$$

Missä

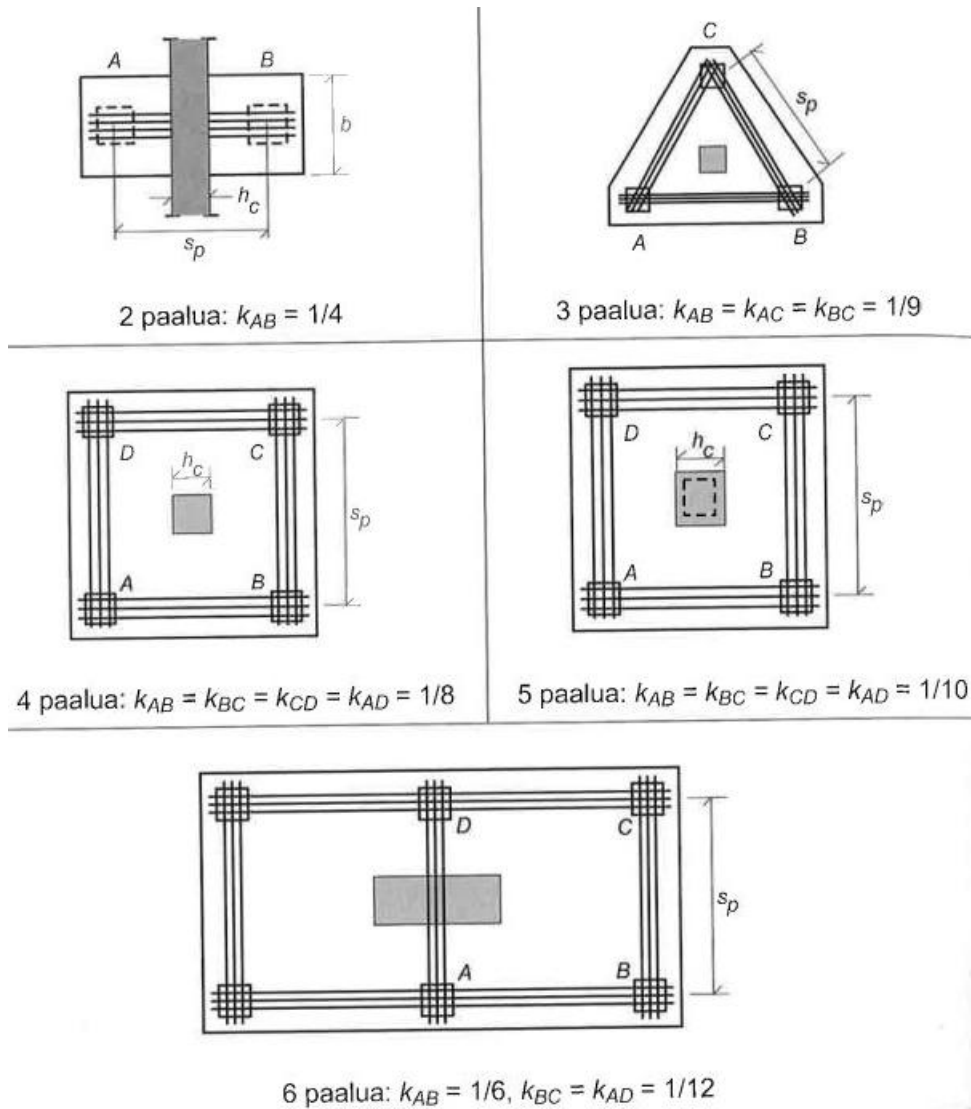
$N_{Ed}$  on paaluanturan mitoituskuorma

$s_p$  on paalujen keskiöväli raudoituksen suunnassa. Tähän arvoon tulee lisätä sallitut sijaintipoikkeamat  $\Delta s_p$

$h_c$  on kuormitusalueen leveys raudoituksen suunnassa

$k$  on paalujen sijoituksesta riippuva kerroin, jonka arvoja on esitetty kuviossa 9.

(Leskelä 2008, 455.)



Kuvio 9. Kerroin  $k$  anturan raudoituksen vetovoiman laskemista varten. (Leskelä 2008 Taulukko 1/6.6, 456.)

Tarvittava terästen kappalemäärä saadaan kaavasta:

$$n_t \geq A_{s,tot} / A_{st} \quad (44)$$

Missä

$A_{st}$  on valitun teräksen poikkipinta-ala (Taulukko 12.)

$A_{s,tot}$  ks. kaava (38)

Vetorausdoitustangot sijoitetaan paalujen päiden yläpuolella kulkeville kaistoille. Paalujen vapaan välin ollessa suurempi kuin kolme kertaa paalujen sivumitta, on osa raudoituksesta sijoitettava paalujen väliin jäävälle alueelle. Pilarikuorman  $N_{Ed}$  siirtymien paaluille varmistetaan lisäämällä ripustusraudoitusta, joka mitoitetetaan leikkausvoimalle kaavalla:



$$V_{sv.Ed} = N_{Ed} / (1,5 * n) \quad (45)$$

Missä

$n$  on paalujen lukumäärä

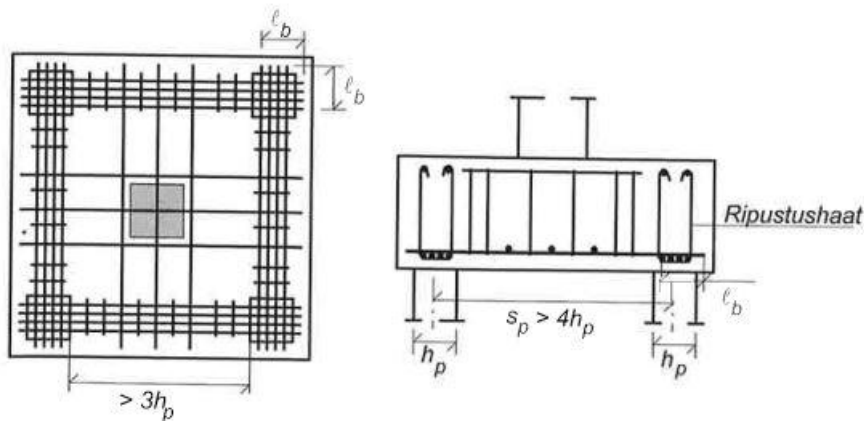
Tarvittava ripustusteräsmäärä saadaan näin kaavalla:

$$A_{sv} = V_{sv.Ed} / f_{sd} \quad (46)$$

Missä

$f_{sd}$  on raudoituksen mitoituslujuus

Tarvittava teräsmäärä jaetaan kuvion 10 mukaan paalujen vapaalle välille. (Leskelä 2008, 456.)



Kuvio 10. Ripustusraudoituksen sijoittaminen ja vetoraidoituksen ankkurointipituisen  $l_b$  määrittely, kun paaluväli on huomattava. (Leskelä 2008 Kuva 11/6.6, 457.)

## 6.2 Betonin kestävyys

### Puristussauvat

Solmupisteiden välille anturan sisällä voidaan ajatella puristetut sauvat, jonka täytyy kestää kuormitukset yläpuolelta rakenteista ja alapuolelta paalusta. (Barney 2007, 1.) Solmupisteiden välisten puristuskaistojen mitoituslujuus lasketaan kaavalla (47). Eurokoodeissa esitetään myös toinen kaava, mikä ei huomioi poikittaista vetoa, eikä näin ollen ole määräävä.

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6 * v' * f_{cd} \quad (47)$$

Missä

$\sigma_{Rd,max}$  on puristusvyöhykkeen maksimijännitys

$v' = 1 - f_{ck} / 250$  ( $f_{ck}$  on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vrk:n ikäisenä), joka huomioi poikittaisen vedon aiheuttaman halkeilun.

$f_{cd}$  on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c \quad (48)$$

$\gamma_c$  on betonin osavarmuusluku murtorajatilassa; normaalitilanteessa 1,5.

$\alpha_{cc}$  on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät. Suomessa 0,85.

## Solmupisteiden kestävyys

Eurokoodin mukaan täytyy tarkistaa myös solmupisteiden kestävyys. Betonin puristuskestävyys solmuissa määräytyy kertoimen  $k_i$  sekä betonin puristuslujuuden mukaan. Eurokoodissa esitetään kolme erilaista solmupistetyyppiä, joilla on eri  $k_i$  kertoimet:

- a) puristussolmupiste, johon ei ankkuroidu vetosauvoja
- b) solmupiste, johon liittyy puristussauvoja ja ankkuroituu vetosauvoja vain yhdestä suunnasta
- c) solmupiste, johon liittyy puristussauvoja ja ankkuroituu vetosauvoja useammasta kuin yhdestä suunnasta.

Neljänteen solmupistetyyppiin liittyy vain vetosauvoja. Varsinkin betonirakenteissa tämänlaisen solmupisteen esiintyminen on täysin teoreettista. (Bergmeister ym. 1993, 124.)

Täysin vedetyn solmupisteen tarkastelu jätetään pois opinnäytetyöstä.

Solmupistejännitykset lasketaan kaavalla:

$$\sigma_{Rd,max} = k_i * v' * f_{cd} \quad (50)$$

Missä

$\sigma_{Rd,max}$  on solmupisteen reunoilla vaikuttava maksimijännitys

$k_i$  on 1,0 solmupistetyypissä a

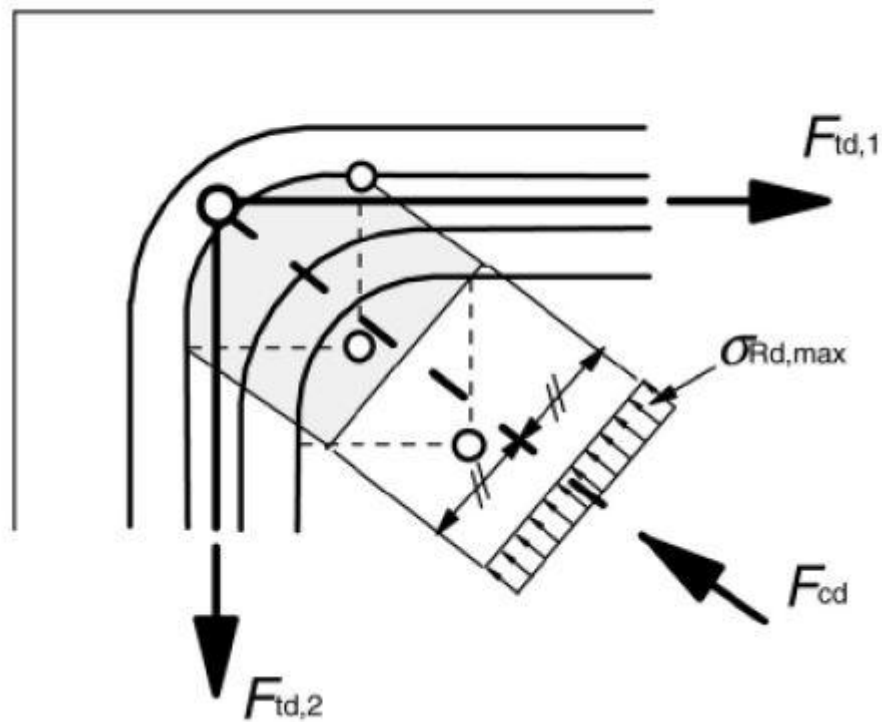
$k_i$  on 0,85 solmupistetyypissä b

$k_i$  on 0,75 solmupistetyypissä c

$k_i$  on 3,0 kun puristussauvat jakaantuvat vähintään kolmeen suuntaan

(SFS-EN 1992-1-1, 107-109.)





Kuvio 13. Solmupistetyyppi c (SFS-EN 1992-1-1 Kuva 6.28, 109.)

Paikallinen puristus

Tasaisesti jakautuneella kuormalla alueelle  $A_{c0}$  pistekuormakestävyys määritetään kaavalla:

$$F_{Rdu} = A_{c0} * f_{cd} * (A_{c1} / A_{c0})^{1/2} \quad (51)$$

Missä

$A_{c0}$  on kuormitusalue

$A_{c1}$  on suurin mitoituksessa käytettävä jakautumisalue, joka on samanmuotoinen kuin  $A_{c0}$ .

Jakautumisalueen  $A_{c1}$  tulee täyttää ehdot:

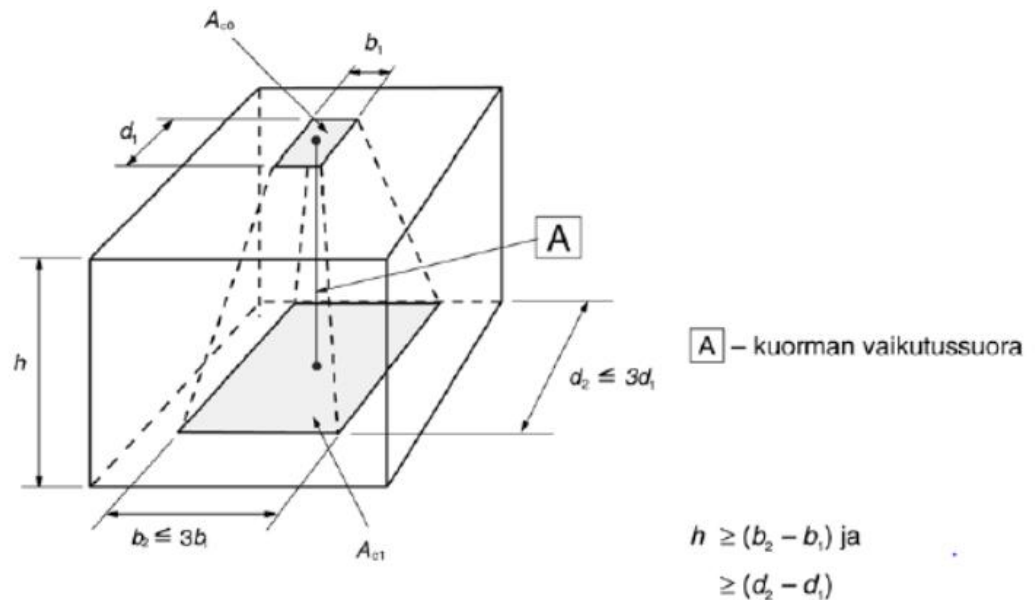
- Kuorman jakautumiskartion korkeus kuorman suunnassa tulee täyttää kuvion 16 ehdot
- Jakautumisalueen  $A_{c1}$  keskipisteen tulee olla kuorman vaikutussuoralla, joka kulkee kuormitusalueen  $A_{c0}$  keskipisteen kautta
- Useamman puristuskauoman jakautumisalueet eivät saa limittyä keskenään.

Betonin puristuskestävyys ei kuitenkaan saa ylittää arvoa:

$$F_{rd,u} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} \quad (52)$$

Rauditus mitoitetaan syntyvää halkaisuvoimaa vastaavaksi.

(SFS-EN 1992-1-1, 110-111.)



Kuvio 14. Paikallisen puristuksen mitoitusalueiden jakautuminen (SFS-EN 1992-1-1 Kuva 6.29, 111.)

## 7 Pohdinta

Paalun kapasiteetin laskenta on aina alustava tapa arvioida menekkiä. Kapasiteetin laskennassa käytetään isoja osavarmuuksia, jotta päästään varmasti turvalliselle puolelle rakenteiden kestävyys suhteen. Lopullinen paalujen kantavuuden kapasiteetti saadaan selville loppulyönneillä. Paaluperustuksia suunnitellessa on suositeltavaa käyttää vakiopaaluja ja valmistajien antamia kestävyys arvoja. Valmistajat myös neuvovat sopivien paalujen valinnassa.

Paaluanturan mitoituksen suurimmat ongelmat syntyvät, kun paalutus on suoritettu ja paalut eivät ole suunnitelluissa kohdissaan. Varsinkin lyömällä asennetut paalut ovat usein kaukana suunnitellusta pisteestä. Sijaintipoikkeaman ollessa sallittujen arvojen sisällä, on lisäksi varmistettava, että vetorausitus on paalujen päällä tarpeeksi

leveällä alueella. Tämä saattaa vaikuttaa myös teräsmäärän lisäämiseen ja tankojen erisuuntaiseen asentamiseen.

Jos taas sijaintipoikkeamat ylittyvät, vaatii se tarkempaa tarkastelua kaikilla mitoituksen osa-alueilla ja mahdollisesti on asennettava lisäpaaluja. Paaluanturaa voidaan myös joutua kasvattamaan.

Tätä työtä hyväksikäyttämällä voin tulevaisuudessa luoda toimivan laskentapohjan paaluanturoiden mitoittamiseen. Laskentapohjaan syötettäisiin vain tarvittavat tiedot, joiden perusteella se laskisi, minkä kokoinen paaluantura kyseiseen kohtaan kelpaisi.

## Lähteet

- Barney, T. M. 2007. Verification and Implementation of Strut-and-Tie Model in LRFD Bridge Design Specifications. Viitattu 29.1.2018.  
[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/NotesDocs/20-07\(217\)\\_FR.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/NotesDocs/20-07(217)_FR.pdf)
- Bergmeister, K & Breen, J.E. & Jirsa, J.O. & Kreger M.E. 1993. Detailing in structural concrete. The University of Texas at Austin. Viitattu 25.11.2017.  
<https://fsel.engr.utexas.edu/pdfs/1127-3F.pdf>
- Jääskeläinen, R. 2009. Pohjarakennuksen perusteet. 2. p. Tampere: Tammertekniikka.
- Leskelä, M. V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. 2. korj. p. Helsinki: Suomen betoniyhdistys.
- Liikennevirasto. 2017. Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7, siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki: Liikennevirasto.
- Pätkommissionen. 2007. Rapport 103. Viitattu 8.1.2018.  
<http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=71>
- Rantamäki, M. & Tamminen, M. 2002. Pohjarakennus. 12. muuttumatonp. Helsinki: Yliopistokustannus/Otatieto.
- RIL 121-2004. 2004. Pohjarakennusohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL
- RIL 166. 1986. Pohjarakenteet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin liitto RIL.
- RIL 201-1-2017. 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL.
- RIL 207-2017. 2017. Geotekninen suunnittelu. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL.
- RIL 223-2005. 2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005: Teräsbetoni- Ja Puupaalut. Helsinki : Suomen rakennusinsinöörin liitto/Suomen geoteknillinen yhdistys.
- RIL 254-1-2016. 2017. Paalutusohje 2016 : PO-2016. Helsinki : Suomen geoteknillinen yhdistys/Suomen rakennusinsinöörin liitto.
- SFS-EN 1990 + A1 + AC. 2006. Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 26.6.2006. Viitattu 7.11.2017.  
<https://janet.finna.fi>, SFS Online
- SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. 2. p. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 19.1.2015. Viitattu 12.1.2018. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.
- WRANA B. 2015. Pile load capacity – calculation methods. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Viitattu 30.1.2018.  
[https://www.researchgate.net/publication/295181689\\_Pile\\_Load\\_Capacity\\_-\\_Calculation\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/295181689_Pile_Load_Capacity_-_Calculation_Methods)



Ympäristöministeriö. 2007. Eurokoodi 7, Geotekninen suunnittelu, Kansallinen liite.  
Helsinki: Ympäristöministeriö.

## Liitteet

### Liite 1. Teräspaalun kapasiteetti

Lähtötiedot:

Paalu: RRs115/8 S550J2H

CC2, GL1, PTL2

Geotekninen kantavuus:

Paalun kantavuus:

$$P_s = \sigma_s * A_p \quad (1)$$

$$P_s = 550 \text{ N/mm}^2 * 2672 \text{ mm}^2 = 1469600 \text{ N} = 1470 \text{ kN}$$

Kärjen kantavuus:

$$q_{b;k} = 7 * \sigma_{cyl} / d^{0,2} \text{ (MPa)} \quad (19)$$

$$q_{b;k} = 7 * 150 / 11,43^{0,2} \text{ (MPa)} = 645 \text{ N/mm}^2$$

$$A_b = (114,3 \text{ mm}/2)^2 * \pi = 10261 \text{ mm}^2$$

$$R_{b;k} = A * q_{b;k} \quad (14)$$

$$R_{b;k} = 10261 \text{ mm}^2 * 645 \text{ N/mm}^2 = 6618 \text{ kN}$$

Paalun kantavuus mitoittava 1470 kN

Vetokestävyys:

Paaluun ei kohdistu vetorasituksia.

Puristuskestävyys:

$$R_{b;d} = R_{b;k} / \gamma_b \quad (12)$$

$$R_{b;d} = 6619 \text{ kN} / 1,2 = 5515 \text{ kN}$$

Lyönninketävyys:

$$R_{c;\max} = 0,8 * 0,9 * f_{yk} * A_s \quad (35)$$

$$R_{c;\max} = 0,8 * 0,9 * 550 \text{ N/mm}^2 * 2673 \text{ mm}^2 = 1059 \text{ kN}$$

## Liite 2. Teräsbetonipaalun kapasiteetti

Lähtötiedot:

Teräsbetonipaalu 300x300, C35/45

Pääteräkset 4xT32

CC2, GL1, PTL2

Geotekninen kantavuus:

Paalun kantavuus:

$$P_s = \sigma_s * A_p \quad (1)$$

$$P_s = 35 \text{ N/mm}^2 * 90000 \text{ mm}^2 = 3150000 \text{ N} = 3150 \text{ kN}$$

Kärjen kantavuus:

$$q_{b;k} = 7 * \sigma_{cyl} / d^{0,2} \text{ (MPa)} \quad (19)$$

$$q_{b;k} = 7 * 150 / 5,95^{0,2} \text{ (MPa)} = 735 \text{ N/mm}^2$$

$$A_b = (59,5\text{mm}/2)^2 * \pi = 2780,5 \text{ mm}^2$$

$$R_{b;k} = A_b * q_{b;k} \quad (14)$$

$$R_{b;k} = 2780,5 \text{ mm}^2 * 735 \text{ N/mm}^2 = 2044 \text{ kN}$$

Kärjen kantavuus mitoittava 2044 kN

Vetokestävyys:

Paaluun ei kohdistu vetorasituksia.

Puristuskestävyys:

$$R_{b;d} = R_{b;k} / \gamma_b \quad (12)$$

$$R_{b;d} = 2044 \text{ kN} / 1,2 = 1703 \text{ kN}$$

Lyönninketävyys:

$$R_{c;\max} = 0,8/1,7 f_{ck} (A_c + E_s A_s / E_{cm}) \quad (31)$$

$$\begin{aligned} R_{c;\max} &= 0,8/1,7 \cdot 35 \text{ N/mm}^2 (90000 \text{ mm}^2 + 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 4 \cdot 804 \text{ mm}^2 / 34077 \text{ N/mm}^2) \\ &= 1808\,778 \text{ N} = 1809 \text{ kN} \end{aligned}$$

### Liite 3. Paaluanturan mitoitus

Lähtötiedot:

Rakenneluokka 2

Toleranssiluokka 1

Pilari 580x580 C30/37

Paalu 300x300 C35/45

Paalun annettu kapasiteetti  $R_s = 1457 \text{ kN}$

Pystykuorma pilarin alapinnassa  $N_{Ed} = 6300 \text{ kN}$

C30/37

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c \quad (49)$$

$$f_{cd} = 0,85 * 30 / 1,5 = 17 \text{ N/mm}^2$$

Raudoitus B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

Paalujen määrä

$$n_p \geq N_{Ed} / R_s \quad (37)$$

$$n_p \geq 6300 \text{ kN} / 1457 \text{ kN} = 4,324$$

Valitaan  $n_p = 5$  paalua

KA 86 %

Anturan alustava koko

Paalun keskikohdan etäisyys anturan reunasta = 300 mm (kohta 3.2)

Paalujen keskiöetäisyys  $= 3 * d = 900 \text{ mm}$  (Taulukko 1.)

Sijaintipoikkeamat  $= 2 * s_p = 2 * 150 \text{ mm} = 300 \text{ mm}$

Anturan sivu = 150 mm + 300 mm + 900 mm + 300 mm + 150 mm = 1800 mm

Päätetään anturan alustavaksi kooksi 1800x1800x1000

Tehollinen korkeus  $d = 1000\text{ mm} - 50\text{ mm (paalun tunkeutuma)} - 32\text{ mm (teräs)} - 32/2\text{ mm (teräksen keskikohta)} = 902\text{ mm}$

Raudoituksen vetovoima

$$F_t = k s_p / d (1 - h_c / (2 * s_p)) N_{Ed} \quad (43)$$

$$s_p = 900\text{ mm} + 2 * \Delta s_p = 900\text{ mm} + 2 * 150\text{ mm} = 1200\text{ mm}$$

$$F_t = 0,1 * 1200\text{ mm} / 902\text{ mm} (1 - 580\text{ mm} / (2 * 1200\text{ mm})) 6300\text{ 000 N}$$

$$= 636\text{ kN}$$

Pääraudoitus

$$A_{s,tot} = F_t / f_{yd} \quad (38)$$

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s \quad (39)$$

$$f_{yd} = 500\text{ N/mm}^2 / 1,15 = 434,8\text{ N/mm}^2$$

$$A_{s,tot} = 636\text{ 000 N} / 434,8\text{ N/mm}^2 = 1463\text{ mm}^2$$

Valitaan T 32

$$n_t \geq A_{s,tot} / A_s \quad (44)$$

$$n_t \geq 1463\text{ mm}^2 / 804\text{ mm}^2 = 1,82$$

Valitaan 4 T 32

KA 45 %

Ripusturaudoitus

Paalujen vapaan välin ollessa suurempi kuin 3 kertaa paalun sivumitta, on lisättävä ripustusraudoitus. Tässä tapauksessa vapaaväli on 600mm eli kaksinkertainen paalun sivumitta.

Ripustusraudoitusta ei tarvita.

Puristussauvat

### Diagonaalisauva

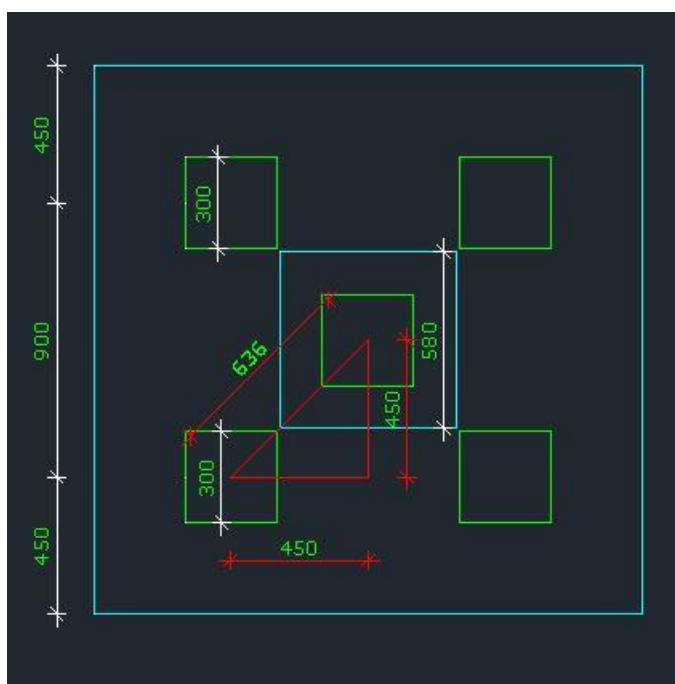
Sauvan pituus kulmapaalulta pilarille avaruusgeometrialla.

$$a = 636 \text{ mm}$$

$$b = 902 \text{ mm (tehollinen korkeus)}$$

$$c = (a^2 + b^2)^{1/2} = 1104 \text{ mm}$$

$$\text{kulma } \alpha = \tan^{-1}(902/636) = 54,8^\circ$$



Sauvan suuntainen voima  $F_{c2} = \text{Pilarinkuorma} / \text{paalujen määrä} / \sin \alpha = 6300 \text{ kN} / 5 / \sin(54,8^\circ) = 1542 \text{ kN}$

Sauvan solmuun vaikuttavan pinta-alan osa  $A_2 = ((\text{Paalun sivumitta} + 4 \times \text{teräs}) * \sin \alpha)^2$

$$A_2 = ((300 \text{ mm} + 4 \times 32 \text{ mm}) * \sin(54,8^\circ))^2 = 122316,7 \text{ mm}^2$$

Solmussa vaikuttava puristava jännitys  $\sigma_{c2} = 1542 \text{ 000 N} / 12316,7 \text{ mm}^2 = 12,6 \text{ N/mm}^2$

$$\text{Puristuskestävyys } \sigma_{Rd,max} = k_i * v' * f_{cd} \quad (50)$$

$$k_i = 0,85 \text{ (solmutyyppi b)}$$

$$v' = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 30/250 = 0,88$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 * 0,88 * 17 = 12,7 \text{ N/mm}^2$$

$$KA: 12,6/12,7 = 99\%$$

### Pystysauva

Paalun ja raudoituksen vaikutus pinta-ala solmussa  $A_1 = (\text{Paalun sivumitta} + 4x \text{ teräs})^2$

$$F_{c1} = \text{Pilarin kuorma} / \text{paalujen määrä} = 6300 \text{ kN} / 5 = 1260 \text{ kN}$$

$$A_1 = (300 \text{ mm} + 4 \times 32 \text{ mm})^2 = 183184 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{c2} = 1260 \text{ 000 N} / 183184 \text{ mm}^2 = 6,88 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Rd,max} = k_i * v' * f_{cd} \quad (50)$$

$$k_i = 0,75 \text{ (solmutyyppi c)}$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,75 * 0,88 * 17 = 11,2 \text{ N/mm}^2$$

$$KA: 6,88 / 11,2 = 61 \%$$

### Pistekuormakestävyys

$$F_{Rdu} = A_{c0} * f_{cd} * (A_{c1} / A_{c0})^{1/2} \quad (51)$$

$$A_{c0} = 580 \text{ mm} * 580 \text{ mm} = 336400 \text{ mm}^2$$

$$A_{c1} = 1800 \text{ mm} * 1800 \text{ mm} = 3240000 \text{ mm}^2$$

$$F_{Rdu} = 336400 \text{ mm}^2 * 17 \text{ N/mm}^2 * (3240000 / 336400)^{1/2} = 15578800 \text{ N}$$

$$F_{Rdu} \leq 3,0 * f_{cd} * A_{c0} \quad (52)$$

$$F_{Rdu} \leq 3,0 * 17 \text{ N/mm}^2 * 336400 \text{ mm}^2 = 17156400 \text{ N}$$

$$15578800 \text{ N} \leq 17156400 \text{ N}$$

Antura kestää paikallisen puristuksen ilman lisäraudoitusta.

$$KA = 6300000 \text{ N} / 15578800 \text{ N} = 40 \%$$