

Aleksei Motin

Eurokoodin soveltaminen teräsbetonisen lyöntipaaluperustuksen suunnittelussa ja mitoittamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennetekniikka

Insinööryö

26.11.2015

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Aleksei Motin Eurokoodin soveltaminen teräsbetonisen lyöntipaaluperustuksen suunnittelussa ja mitoittamisessa 48 sivua + 3 liitettä 26.11.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Ryhmäpäällikkö Aleks Pöyhönen Ryhmäpäällikkö Esko Jussila Laboratorioinsinööri Matti Leppä
<p>Tämä insinööriyö tehtiin Pöyry Finland Oy:lle lyöntipaalutusohjeisiin liittyen. Paalutettujen perustusten suunnittelussa on siirrytty eurokoodin käyttöön. Tuttu ja paljon käytetty ”Lyöntipaalutusohje LPO-2005” on korvattu käsikirjalla ”RIL 254-2011 Paalutusohje 2011”. Nämä eroavat esitystavaltaan ja periaatteiltaan toisistaan selvästi ja uuden normin soveltaminen käytäntöön ei välttämättä ole yksiselitteistä ja selkeää.</p> <p>Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää kirjallisuustutkimuksena eurokoodin mukaisen lyöntipaalutetun perustuksen suunnitteluprosessin eri vaihtoehdot ja valinnat käytännön kannalta ja luoda tältä pohjalta suunnitteluohje tavanomaisen kohteen suunnittelun apuvälineeksi ja menettelytavaksi.</p> <p>Insinööriyön tutkimusaineistona käytettiin eurokoodin normeja, lyöntipaalutusohjeita, suunnitteluohjeita ja pohjarakennusalan oppikirjallisuutta.</p> <p>Insinööriyön lopputuloksena saatiin opas lyöntipaaluperustuksen suunnittelussa ja mitoittamisessa huomioon otettavista asioista ja niiden vaikutuksista.</p>	
Avainsanat	Eurokoodi, lyöntipaalutus, teräsbetonipaalu, tukipaalu

Author(s) Title Number of Pages Date	Aleksei Motin Application of Eurocode in the Design and Dimensioning of Reinforced Concrete Piled Foundations 48 pages + 3 appendices 26 November 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Aleksei Pöyhönen, Section Manager Esko Jussila, Section Manager Matti Leppä, Laboratory Engineer
<p>This Bachelor's thesis was commissioned by Pöyry Finland Oy. The objective was to examine the application of Eurocodes in the design and dimensioning of reinforced concrete piled foundations. Recently Eurocodes have been taken into use in the design of piled foundations. The well-known and widely used "Pile driving manual LPO-2005" has been replaced with "RIL 254-2011 Pile driving manual 2011". These manuals differ from each other in the manner of presentation and in their principles, and therefore the implementation of this new standard in practice is not necessarily straightforward and clear.</p> <p>The purpose of this thesis was to discover by means of literature different options and choices for practical purposes in the design process of piled foundations in accordance with Eurocodes, and to create a design instruction as a tool and procedure for the conventional design.</p> <p>The following topic-related literature has been used as research material. Eurocode standards, pile-driving instructions, design instructions and study books in foundation engineering.</p> <p>As the result of this thesis, a manual has been created for the driven pile foundation design as well as for the issues and their implications to be taken into consideration during dimensioning.</p>	
Keywords	Eurocode, impact pile driving, reinforced concrete pile, bearing pile

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Eurokoodeihin siirtyminen	2
2	Suunnittelujärjestelmä	3
2.1	Eurokoodi	3
2.2	Geotekniset luokat	3
2.2.1	Geotekninen luokka GL1 (helpot kohteet)	4
2.2.2	Geotekninen luokka GL2 (vaativat kohteet)	5
2.2.3	Geotekninen luokka GL3 (erittäin vaativat kohteet)	7
2.2.4	Geoteknisen luokan valinta	8
2.3	Seuraamusluokat	9
2.4	Paalutustyöluokka	9
2.5	Suunnitteluprosessin kulku	10
2.6	Murto- ja käyttörajatilat	10
2.6.1	Murtorajatilat	10
2.6.2	Käyttörajatilat	11
2.7	Kuormat ja kuormien vaikutukset	12
2.8	Mitoitustavat	15
2.8.1	Mitoitustapa DA2 ja DA2*	15
2.8.2	Kestävyyden mitoitusarvot	17
3	Paalun geotekninen mitoitus Eurokoodi 7:n mukaan	18
3.1	Yleistä paalusta	18
3.2	Yleistä paalun kantavuudesta	19
3.2.1	Tukipaalun kantavuus	20
3.2.2	Paalun nurjahdus	21
3.3	Paalun geotekninen kantavuuden mitoitusmenettelyt	22
3.3.1	Paalun geotekninen kantavuus staattisten koekuormitusten perusteella	23
3.3.2	Paalun geotekninen kantavuus pohjatutkimustulosten perusteella	25
3.3.3	Paalun geotekninen kantavuus paalutuskaavojen perusteella	27
3.3.4	Paalun geotekninen kantavuus dynaamisten koekuormitusten perusteella	29
3.4	Mitoitusmenettelyn valinta	30

4	Lyöntipaalun rakenteellinen mitoitus	31
5	Paalujen sijoitus	34
5.1	Lyöntipaalujen sallitut sijaintipoikkeamat	34
5.1.1	Paalujen väliset etäisyydet	35
5.2	Paalutuksen toteutumapiirustus	36
6	Esimerkkitapaus	36
6.1	Geoteknisen kantavuuden laskenta	37
7	LPO-2005 ja PO-2011 vertailu	43
8	Yhteenveto	46
	Lähteet	48

Liitteet

Liite 1. Mitoitusprosessin luku mitoitusmenetelmillä DA2 ja DA2*.

Liite 2. Laskentakaavio: Paalun puristuskestävyys pohjatutkimustulosten perusteella.

Liite 3. Dynaamisen koekuormituksen kulku.

Lyhenteet

EN Eurooppalaisen standardisointijärjestön laatima standardi.

1 Johdanto

Tämä insinööriö tehdään Pöyry Finland Oy:lle. Työn tarkoituksena on selvittää eurokoodin mukaisen lyöntipaalutetun perustuksen suunnitteluprosessin eri vaihtoehdot. Paalutettujen perustusten suunnittelussa on siirrytty eurokoodin käyttöön. Aiemmin käytetty ”Lyöntipaalutusohje LPO-2005” on korvattu käsikirjalla ”RIL 254-2011 Paalutusohje 2011”. Nämä eroavat esitystavaltaan ja periaatteiltaan toisistaan selvästi ja uuden normin soveltaminen käytäntöön ei välttämättä ole yksiselitteistä ja selkeää.

Insinööriön tarkoituksena on tehdä laaja-alainen ja kattava kartoitus lyöntipaaluperustuksen suunnittelussa huomioon otettavista asioista ja niiden vaikutuksista ratkaisuihin.

Tässä insinööriössä keskitytään vain teräsbetonisen tukipaalun geoteknisen kantavuuden mitoittamiseen. Työssä selvitetään, mitkä asiat on otettava huomioon tukipaalun mitoittamisessa.

Insinööriössä koottua eurokoodin normistoon perustuvaa teoriaa syvennetään esimerkkilaskelmilla, jotka helpottavat asian ymmärtämistä. Työssä vertaillaan, mitkä asiat ovat muuttuneet ”LPO-2005” ja ”RIL 254-2011 Paalutusohje 2011” välillä.

1.1 Eurokoodeihin siirtyminen

Kirjan "Lyöntipaalutusohje LPO-2005" geotekninen mitoitus perustui Suomen rakennusmääräyskokoelman osan B3 Pohjarakenteet määräyksiin (kokonaisvarmuuslukumenetelmään). Kirjan "RIL 254-2011 Paalutusohje 2011" eurokoodien mukainen mitoitus perustuu osavarmuuslukumenetelmään.

Paalutusohjeen 2011 periaatteelliset asiat ovat

- Eri paalutyypin geotekniset ja rakenteelliset mitoitusperiaatteet ovat samat paalumateriaalista riippumatta
- Paalun geotekninen ja rakenteellinen mitoitus tehdään eurooppalaisten standardien mukaisesti.

Lyöntipaalutusohjeen "LPO-2005" mukaisesti oli mahdollista suunnitella 1.7.2013 asti. Paalutusohjeen 2011 mukaisia suunniteltuja normaalipaaluja on aloitettu valmistaa vuoden 2012 alusta.

2 Suunnittelujärjestelmä

2.1 Eurokoodi

Eurokoodi koostuu standardeista, jotka sisältävät paalujen rakenteellisen ja geoteknisen mitoituksen. Teoria perustuu paalun murto- ja käyttörajatilaan mitoitukseen. Mitoituksessa käytetään osavarmuuslukumenetelmää. Suunnittelun menetelmän periaatteet on esitetty standardissa ”SFS-EN 1990 – Rakenteiden suunnitteluperusteet”. [1 s.31.]

Eurokoodi sisältää viittauksen A-liitteeseen. Liitteessä A on esitetty osavarmuusluvut ja korrelaatiokertoimet. Liitteen luvut ja kertoimet ovat luonteeltaan velvoittavia. Kunkin eurokoodivaltion ympäristöministeriö tai liikenne- ja viestintäministeriö laati kansallisen liitteen, jossa luvut ja kertoimet ottavat huomioon kansallisen toimintatavan. Kansallisliitteen luvut ja kertoimet ovat luonteeltaan suosituksia. [1 s. 31.]

Eurokoodin standardit ”SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet” ja ”SFS-EN 1991 Rakenteiden kuormat” määrittävät paaluille aiheutuvat kuormitukset, kuormitusyhdistelyt ja kuormien osavarmuusluvut. Standardissa ”SFS-EN 1997-1 Geotekninen suunnittelu” määritetään geotekniset kuormat paaluille. [1 s. 31.]

Paalun geotekninen mitoitus perustuu osavarmuuslukumenetelmään, jossa mitoitus tehdään sekä murto- että käyttörajatilassa [1 s. 32].

2.2 Geotekniset luokat

Geotekninen suunnitteluvaatimukset on jaettu kolmeen geoteknisen luokkaan. GL1 (helpot kohteet), GL2 (vaativat kohteet) ja GL3 (erittäin vaativat kohteet). Geoteknisen luokan määrittelyyn vaikuttavat rakenteen vaativuus, maapohjan ominaisuudet, rakenteen kuormitus ja rakenteen riskitaso. [5 s. 30.]

Geoteknistä luokkaa käytetään hyväksi määritettäessä pohjatutkimusten laajuutta, paalutustyöluokkaa ja paalulle asetettavia vaatimuksia. [1 s. 36.]

Geotekninen luokka on tarkistettava kaikissa suunnittelun ja rakentamisen vaiheissa. Yksikertaiset rakenteet kuuluvat geotekniseen luokkaan GL1. Suurin osa rakenteista

kuuluu geoteknisen luokkaan GL2. Erittäin epätavalliset ja suuret rakenteet kuuluvat geotekniseen luokkaan GL3. [1 s. 36.]

2.2.1 Geotekninen luokka GL1 (helpot kohteet)

Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan GL1 jos kaikki seuraavat asiat toteutuvat kohteessa:

- Rakennuskohte on yksinkertainen.
- Maapohjan olosuhteet ovat kitkamaa tai kallio.
- Riskiä vakavuuden menettämiseen ei ole.
- Rakenteelle ei synny siirtymiä eikä painumia.
- Rakennuskohteen kaivut eivät ulotu vedenpinnan alapuolelle. [7 s. 16.]

Geoteknisessä suunnitelmaraportissa esitetään selvitys rakennuspaikan pohjasuhteista. Geoteknisessä luokassa GL1 suoritetaan asiantuntijan maastokatselmus, josta selviää rakennuskohteen pohjasuhteet. Ennakoon suoritettua maastokatselmusta voidaan pitää riittävänä, kun syy on perusteltu. [1 s. 36.]

Geoteknisen luokan GL1 maastokatselmus on varmistettava ainakin paino- tai porakonekairauksella. Kairausmenetelmäksi geoteknisessä luokassa GL1 suositellaan heijarikairausta. Heijarikairausmenetelmällä voidaan määrittää luotettavammin paalun pituus kuin painokairausmenetelmällä. [1 s. 36.]

Helppoissa rakennuskohteissa tietyissä tapauksissa voidaan lyöntipaalutusta pitää heijarikairausta vastaavana pohjantutkimusmenetelmänä. Tällöin lyöntipaalun asennus on dokumentoitava asianmukaisesti. Menetelmää käytettäessä paalun geotekninen kantavuus mitoitetaan paalutuskaavaan perustuvan menetelmän mukaisesti ja varmistetaan loppulyöntiehdolla. [1 s. 36.]

Geoteknistä luokkaa GL1 voidaan käyttää vain silloin kun riskit maanpohjan kokonaisvakavuuden tai maapohjan liikkeiden suhteen ovat merkityksettömiä. Rakennuskohteen pohjaolosuhteet ovat kokemuksen perusteella riittävän yksikertaisia ja pohjaolosuhteet voidaan verrata muiden vastaavanlaisten kohteiden pohjaolosuhteisiin. [1 s. 37.]

Käytettäessä geoteknisen luokan GL1 menetelmiä rakennuskohteen kaivu on oltava vedenpinnan yläpuolella. Kaivanto voidaan ulottaa vedenpinnan alapuolelle silloin, kun kaivu on yksikertainen ja paikalliset kokemukset osoittavat kaivannon yksikertaisuuden. [1 s. 37.]

Rakennuskohteissa on arvioitava pohjaveden pinnan korkeusasema ja virtaussuunnat. Arvioitaessa pohjaveden pintaa on tutkittava pohjatutkimuksia, sekä läheisten vesistöjen tai ojien pinnanmuotoja. [1 s. 37.]

2.2.2 Geotekninen luokka GL2 (vaativat kohteet)

Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan GL2, mikäli rakennekohde on tavanomainen eikä pohjamaahan liity tavallisessa tilanteessa poikkeavia riskejä. [7 s. 16.]

Tyypilliset rakennuskohteet ovat:

- maanvaraiset anturaperustukset
- paaluperustukset
- seinät ja muut maata tai vettä pidättävät rakenteet
- maanleikkaukset
- penkereet ja maarakennustyöt
- tavanomaiset siltojen väli- ja maatuet sekä ankkurit. [7 s. 16.]

Jotta geoteknisessä luokassa GL2 suunnittelu ja pohjarakentaminen voidaan suorittaa luotettavasti ja turvallisesti, on tehtävä riittävän laajat yksityiskohtaiset pohjatutkimukset. [1 s. 37.]

Suunniteltaessa rakennuskohdetta geoteknisessä luokassa GL2 suunnittelija voi käyttää rutiinimenetelmiä. Pohjatutkimus on tehtävä sopivalla pohjatutkimusmenetelmällä, jolla otetaan huomioon rakennuskohteen vaativuus. Rakennuskohteen vastaavan pohjarakennesuunnittelijan on tarkistettava suunnitelmista pohjatutkimuspisteiden riittävyys. [1 s. 37.]

Pohjatutkimuspisteiden määrä katsotaan riittäväksi silloin kun tutkimuspisteitä on rakennuksen tai rakenteen jokaisessa nurkassa. Silloin kun pohjasuhteet vaihtelevat jyrkästi on pohjatutkimuspisteitä sijoittava 5-15 m:n välein. [1 s. 37.]

Geoteknisessä luokassa GL2 on käytettävä vähintään kahta eri kairausmenetelmää. Kairausmenetelmiä ovat heijari-, puristin-, puristinheijari- ja porakonekairaus. Menetelmät on valittava siten, että tutkimuksissa päästään tutkimaan paalun oletetulle tukeutumistasolle. [1 s. 37.]

Kun mitoitetaan lyöntipaalua, heijarikairausmenetelmä voidaan vaihtaa painokairausmenetelmään. Painokairausmenetelmää käytettäessä lyöntipaalu on lyötävä tukipaalu- na ja paalun on tukeuduttava tiiviiseen karkearakeiseen maa- tai moreenikerrokseen. Tutkimuksessa on varmistettava, että maan tai moreenikerroksen alapuolella ei ole pehmeitä maakerroksia. [1 s. 37.]

Geoteknisessä luokassa GL2 kairaustutkimus on ulotettava vähintään 1-2 m paalun oletetun tukeutumistason alapuolelle. Porakonekairausmenetelmää käytettäessä tutkimus on ulotettava vähintään 2 m paalun oletetun tukeutumistasoon alapuolelle ja 3 m kallioon. [1 s. 37.]

Pohjaveden korkeusasema ja virtaussuunta on tutkittava geoteknisessä luokassa GL2 vähintään yhdellä pohjaveden havaintoputkella. Pohjaveden havaintoputki on sijoitettava rakennuspaikalle tai sen välittömään etäisyyteen rakennuspaikasta. Kun pohjavesi esiintyy paineellisena, silloin on mitattava paineellisen pohjavedenpinnan painetaso. [1 s. 37.]

2.2.3 Geotekninen luokka GL3 (erittäin vaativat kohteet)

Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan GL3, mikäli se ei kuulu geotekniseen luokkaan GL1 tai GL2.

Tyypillisiä rakenne-esimerkkejä ovat:

- erittäin suuret tai epätavalliset rakenteet
- rakenteet, joihin liittyy normaalista poikkeavia riskejä
- rakenteet, joissa on epätavallisen vaikeat pohja- tai kuormitusolosuhteet ja rakenteet, jotka suunnitellaan alueelle, jonka maamassat ovat lähtötilanteessa liikkeessä. [7 s. 16.]

Geoteknistä luokkaa GL3 käytetään kun ympäristövaikutukset ovat merkittäviä, esimerkiksi pohjaveden pysyvä aleneminen. [7 s. 16.]

Erittäin vaativissa kohteissa pohjatutkimus tehdään jokaisen perustuksen kohdalta sekä suurten perustusten, esimerkiksi siltojen, paaluanturoiden jokaiselta nurkalta. [1 s. 38.]

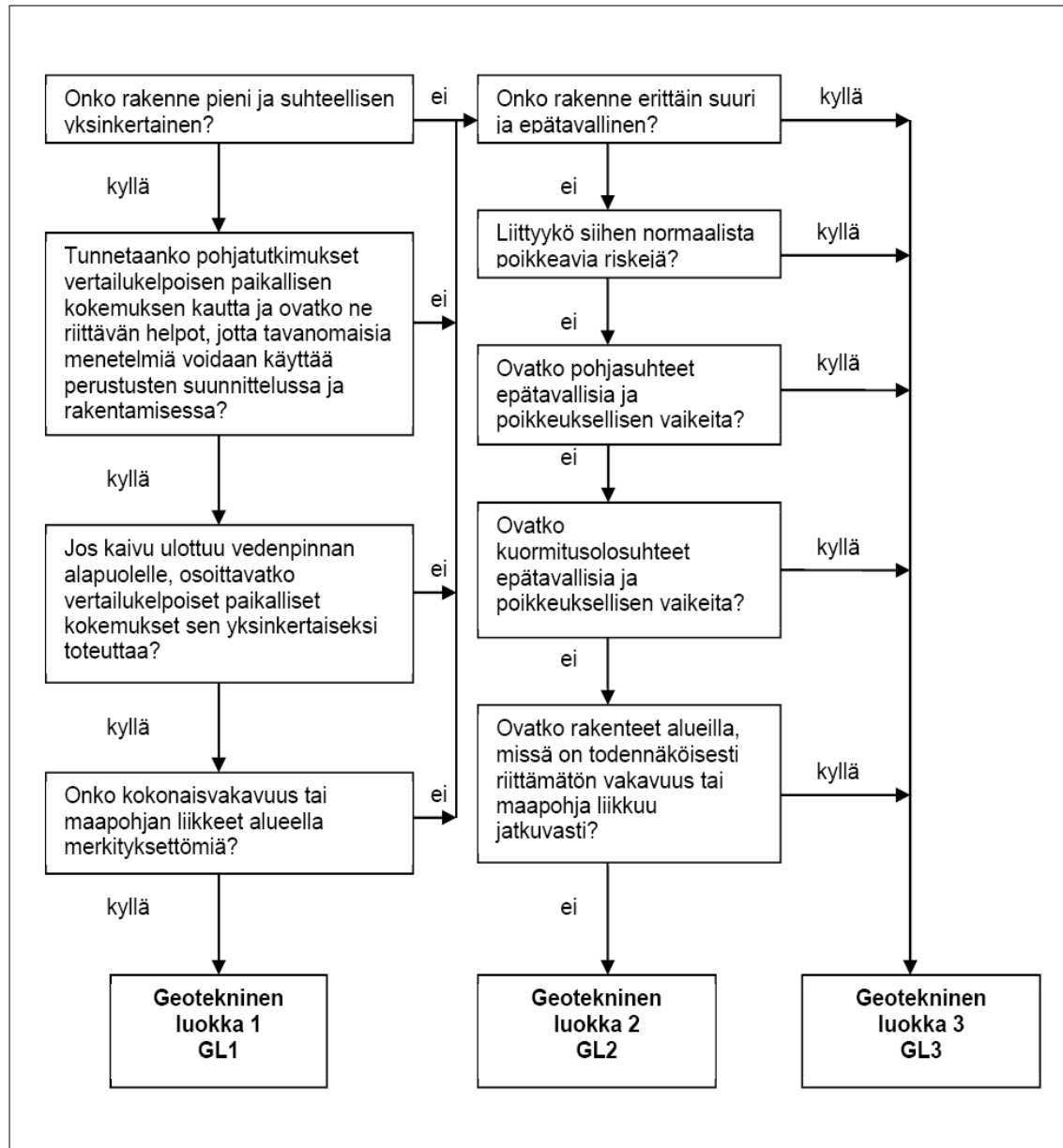
Mikäli rakennuspaikalla arvioidaan olevan paineellista pohjavettä, on pohjavedenpinnan painetaso mitattava. [1 s. 38.]

Kallion päällä olevien maakerrosten ominaisuudet selvitetään. Maalajit ja niiden kerrosrajat määritetään ottamalla riittävästi maanäytteitä. [1 s. 39.]

Erityistä tarkkuutta vaaditaan suunniteltaessa lyöntipaaluja, kun kallion pinnalla ei ole riittävän sivuvastuksen muodostavaa kerrosta, joka estäisi paalun kärjen luistamisen. [1 s. 39.]

2.2.4 Geoteknisen luokan valinta

Kuvassa 1 on esitetty lohkokaavio, joka auttaa tunnistamaan geoteknisen luokan valintaa.



Kuva 1. Geoteknisen luokituksen lohkokaavio [9 s. 8.].

2.3 Seuraamusluokat

Luotettavuuden tasoluokitusta varten määritetään taulukon 1 mukainen seuraamusluokka (CC1...CC3) tarkastelemalla rakenteen vaurion tai vian aiheuttamia seuraamuksia [3 s. 136.].

Taulukko 1. Seuraamusluokkien määrittely [3 s. 136 Taulukko B1.].

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

2.4 Paalutustyöluokka

Paalutustyöluokat ovat PTL1, PTL2 ja PTL3. Paalutustyöluokka huomioi rakenteen kuormitus- ja rasitustilat. Paalutyöluokalla luokitetaan paalutustyön toteutuksen tapa. Seuraamusluokka CC1-CC3 ja geotekninen luokka GL1-GL3 kuvaavat rakennuskohteen ominaisuuksia. Paalutustyöluokan avulla huomioidaan paalun rakenteellisessa mitoituksessa paalutustyötapahtuman rasitukset. Yleensä paaluvalmistajat ilmoittavat paalun rakenteelle täyttyvän paalutustyöluokan. [1 s. 99.]

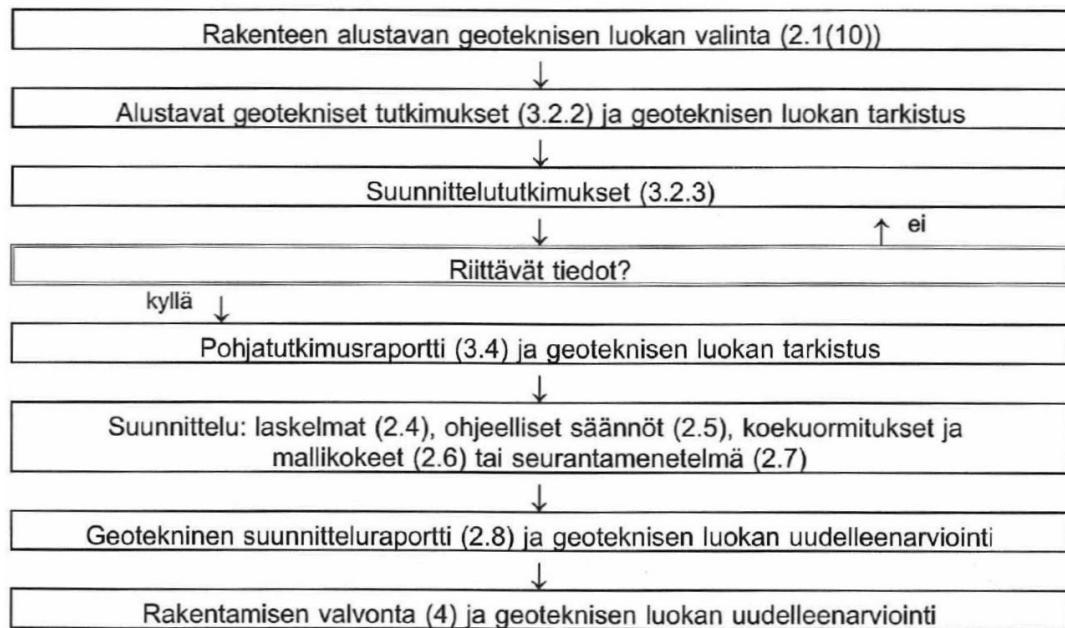
Paalutustyöluokka määräytyy kohteen seuraamusluokan CC1-CC3 ja geoteknisen luokan GL1-GL3 perusteella taulukossa 2 esitetyllä tavalla.

Taulukko 2. Paalutustyöluokat [1 s. 100 Taulukko 4.18.]

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

2.5 Suunnitteluprosessin kulku

Tavallisesti alustava rakenteen geoteknisen luokan valinta tehdään ennen geoteknisiä tutkimuksia. Geotekninen luokka tarkistetaan ja tarvittaessa vaihdetaan jokaisessa suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa. [5 s. 30.]



Kuva 2. Eurokoodi 7 suunnitteluprosessi. (Numerot suluissa viittaavat RIL 207-2009 lukuun.) [5 s. 30.]

2.6 Murto- ja käyttörajatilat

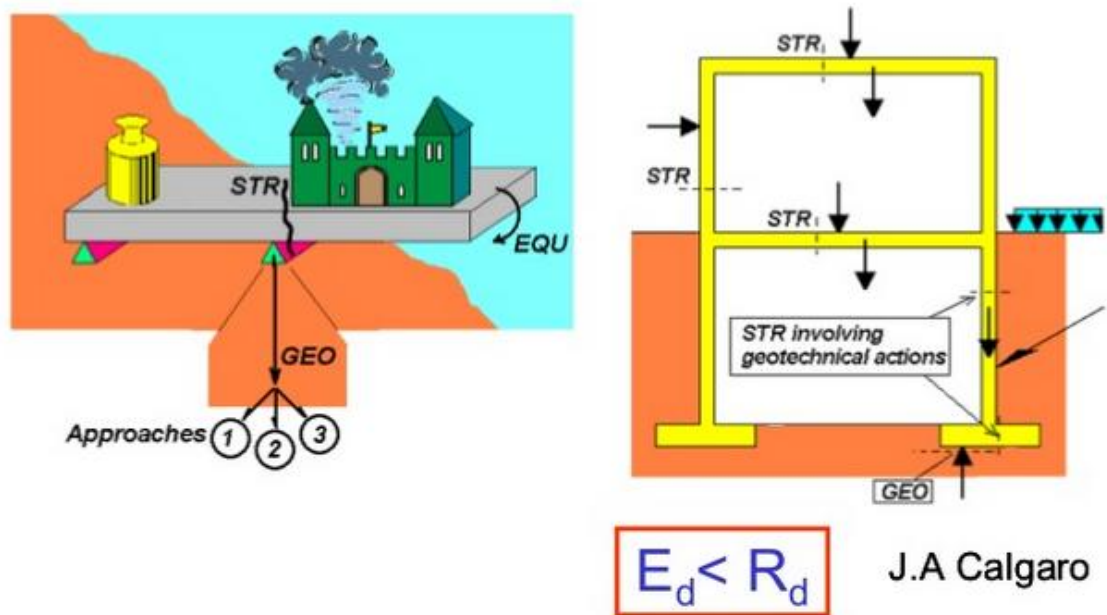
2.6.1 Murtorajatilat

Mitoituksessa tulee osoittaa, että seuraavien murtorajatilojen ylittyminen on riittävän epätodennäköistä.

- EQU on kaatumisen rajatila, jossa tapahtuu rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen, kun rakennetta tarkastellaan jäykkänä kappaletena, jossa rakennemateriaalien ja maapohjan lujuudet eivät ole merkittäviä rakenteen kestävyysajan aikaansaamisessa.
- STR on kantokestävyysrajatila, jossa tapahtuu rakenteen tai rakenteellisten osien sisäinen murtuminen tai liiallinen muodonmuutos. Esimerkkira-

kenteita ovat perustukset, paalut tai kellarinseinät, joissa rakennemateriaalien lujuus on merkittävä kestävyden aikaansaamisessa.

- GEO on geotekninen rajatila, jossa tapahtuu rakennuspohjan murtuminen tai liiallinen muodonmuutos. Tässä rajatilassa maan tai kallion lujuus on merkittävä kestävyden aikaansaamisessa.
- UPL on rakenteen nosterajatila, jossa tapahtuu vedenpaineen aiheuttamasta nosteesta tai muista pystysuuntaisista kuormista johtuva rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen.
- HYD on hydraulinen rajatila, jossa veden virtauksesta maakerroksissa aiheutuu hydraulinen murtuma eli maapohjan nousu tai eroosio. [5 s. 45–46.]



Kuva 3. Eurokoodin EN 1990 mukaiset murtorajatilat kaatuminen EQU, geotekninen GEO ja kantokestävyys STR.

2.6.2 Käyttörajatilat

Käyttörajatilassa varmuuden osoittamiseksi maapohjassa, rakenteellisessa poikkileikkauksessa, kantavassa rakennusosassa tai liitoksessa tulee osoittaa että:

$$E_d \leq C_d \quad (2.1)$$

missä

E_d on kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

C_d on rajoittava mitoitusarvo kuorman vaikutukselle.

Muodonmuutoksien pysyminen vaadittujen käyttökelpoisuusrajojen sisällä vaatii tarkistusta, kuinka pieni osuus maan lujuudesta on mobilisoitunut. Tätä menetelmää voidaan käyttää, jos menettely rajoittuu mitoitusilanteisiin, jossa:

- muodonmuutoksen arvoa ei tarvita käyttörajatilan tarkistamiseen
- vertailukelpoista kokemusta on olemassa samanlaisesta maapohjasta, rakenteesta ja käytetystä menetelmästä. [5 s. 55–56.]

Ominaisarvoja muutetaan asianmukaisesti, jos rakenteen eliniän aikana voi tapahtua muutoksia maapohjan ominaisuuksissa, esimerkiksi pohjaveden alenemista tai kuivumista. [5 s. 56.]

Tietyn muodonmuutoksen raja-arvo on arvo, jossa käyttörajatilan, kuten ei-hyväksyttävän halkeilun tai ovien juuttumisen, oletetaan tapahtuvan käytössä olevassa rakenteessa. Tämä raja-arvo tulee sopia tuettavan rakenteen suunnittelun aikana. [5 s. 56.]

2.7 Kuormat ja kuormien vaikutukset

Kun tarkastellaan kantokestävyysrajatilaa STR ja maapohjan murtumisen rajatilaa GEO, täytyy osoittaa seuraavan yhtälön toteutuvan:

$$E_d \leq R_d \quad (2.2)$$

missä

E_d on kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

R_d on kestävyuden mitoitusarvo. [5 s. 48.]

Mitoitustilanteessa kuormien osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin (F_{rep}) tai kuormien vaikutuksiin (E). Osavarmuuslukujen kohdistamalla rakennuspohjan kautta välittyviin kuormiin voi johtaa kohtuuttomiin tai jopa fyysikaalisesti mahdottomiin mitoitusarvoihin. Tässä tapauksessa osavarmuuslukuja käytetään suoraan kuormien vaikutuksiin, jotka johdetaan kuormien edustavista arvoista. [5 s. 50.]

$$E_d = E\{\gamma_F F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d\} \quad (2.3a)$$

tai

$$E_d = \gamma_F E\{F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d\} \quad (2.3b)$$

Kuormien tai kuorman vaikutusten osavarmuusluvut (STR-rajatilan ja GEO-rajatilan) on esitetty taulukossa 3. Sarja A1 tai A2 valitaan käytettävän mitoitustavan perusteella.

Taulukko 3. Kuormien ja kuorman vaikutusten osavarmuusluvut. [4 Taulukko A.3(FI).]

Kuorma	Merkintä	Sarja	
		A1	A2
Pysyvä:			
Epäedullinen	$\gamma_{Gkj,sup}$	1,35 K_{FI} 1,15 K_{FI}	1,0 K_{FI}
Yhtälö 2.4a			
Yhtälö 2.4b			
Edullinen	$\gamma_{Gkj,inf}$	0,9 0,9	1,0
Yhtälö 2.4a			
Yhtälö 2.4b			
Muuttuva:			
Epäedullinen	γ_Q	1,5 K_{FI}	1,3 K_{FI}
Yhtälö 2.4b			
Edullinen		0	0

Taulukosta 3 saadaan muodostettua kuormien yhdistely-yhtälöt (2.4, 2.4a ja 2.4b) seuraavasti:

$$1,0 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 1,0 * G_{kj,sup} + 1,3 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,3 * K_{FI} * \sum_{i>1} \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (2.4)$$

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} \quad (2.4a)$$

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (2.4b)$$

missä

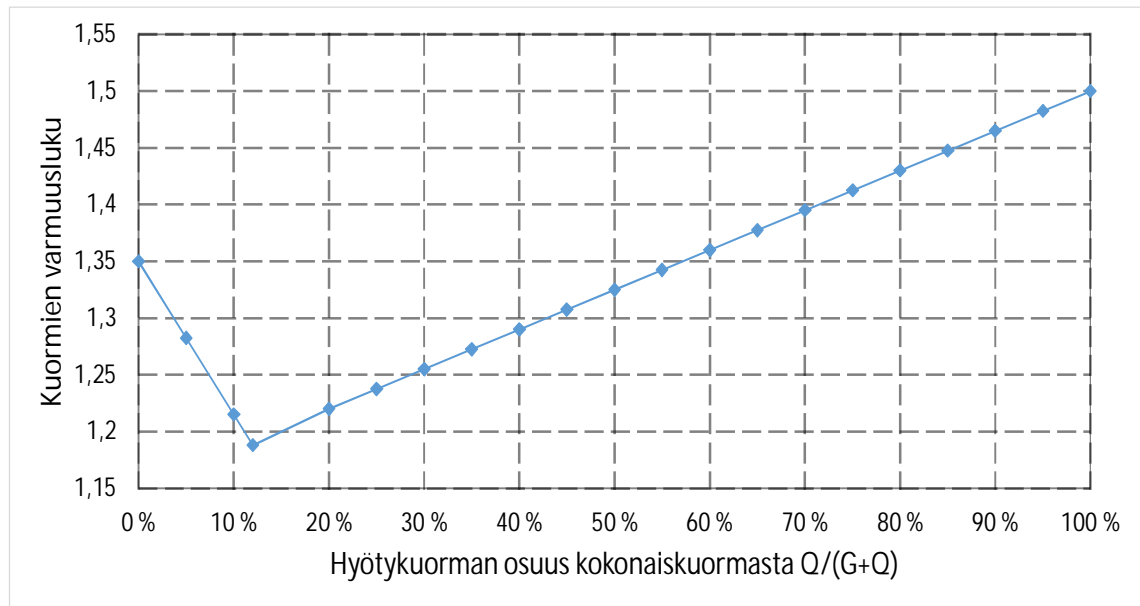
K_{FI} on arvo, joka riippuu luotettavuusluokasta RC1, RC2 tai RC3:

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

Luotettavuusluokat on esitetty Eurokoodin ”SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet” normissa liitteessä B taulukossa B2. Yhtälöä (2.4) ei käytetä Suomessa käytössä olevasta mitoitusstavasta johtuen. [4.]

Osavarmuuslukua $\gamma_{G,sup}$ käytetään tapauksissa silloin, kun kuormitus on samasta syystä aiheutuva ja kuorman kokonaisvaikutus on epäedullinen. Pysyvän kuorman ominaisarvo kerrotaan osavarmuusluvulla $\gamma_{G,sup}$. Tapauksissa, jolloin kuorman kokonaisvaikutus on edullinen, kuorman ominaisarvo kerrotaan $\gamma_{G,inf}$ osavarmuusluvulla. Samasta syystä aiheutuvat kuormat ovat rakenteiden omasta painosta aiheutuvat kuormat silloinkin, kun rakenteet ovat erilaisista materiaaleista. [5 s. 49–50.]

Anturaperustuksissa kuormien yhdistely yhtälön 2.4b arvo on suurempi kuin kuorman yhdistely yhtälön 2.4a, kun epäedullisten kuormien tapauksessa hyötykuormien osuus kokonaiskuormasta on suurempi kuin 12%. Kuvassa 4 on esitetty yhtälöiden arvojen vertailua. [5 s. 50.]



Kuva 4. Yhtälöiden 2.4a ja 2.4b merkityksen vertailu ($K_{FI} = 1,0$). [5 s. 50.]

2.8 Mitoitustavat

Eurokoodi-mitoitusjärjestelmässä on käytössä kolme eri mitoitus tapaa (DA1, DA2 ja DA3) varmuuden osoittamiseksi mitoitusrajatilassa. Jokaisessa eurokoodistandardia käyttävän valtion kansallisessa liitteessä on esitetty valtiossa käytössä olevat mitoitus tavat. Suomessa on käytössä kaksi mitoitus tapaa: DA2 ja DA3. Suomalaisen kansalli- sen liitteen mukaan mitoitus tapaa DA1 ei käytetä Suomessa. [5 s. 53.]

Mitoitus tapaa DA2 käytetään maanvaraisten perustusten, paaluperustusten, tukimuuri- en ja tukiseinien rakenteiden mitoituksessa. Mitoitus tapaa DA3 käytetään rakenteiden kokonaisvakavuuden ja luiskien vakavuuden mitoituksessa. [5 s. 53.]

2.8.1 Mitoitus tapaa DA2 ja DA2*

Mitoitus tapaa DA2 sovelletaan kahdella tavalla. Tavat erotetaan toisistaan merkinnöillä DA2 ja DA2*. Silloin kun rakennuskohteessa ei aiheudu merkittävää taloudellista hait- taa voidaan käyttää mitoitus tapaa DA2. Merkittävää taloudellista haittaa ei aiheudu, kun rakenteeseen vaikuttavien vaakakuormien osuus pystykuormista on maksimissaan 20 % ja rakenteen korkeus on pienempi kuin 10 metriä. Tämän tapauksen rakenteet ovat esimerkiksi sillan välitukien peruslaattoja. Tässä tapauksessa mitoittaessa mitoi-

tustavalla DA2 mitoitus on varmalla puolella ja mitoituslaskelmat ovat yksikertaisemmat kuin mitoitustavassa DA2*. [7 s. 21.]

Suomessa suositellaan käytettäväksi infrarakenteiden antura- ja laattaperustusten, ankkureiden ja tukirakenteiden mitoituksessa mitoitusapaa DA2*. Paaluperustuksissa, joissa myös vaakakuormat vastaanotetaan paalujen aksiaalisilla voimilla, mitoitustavat DA2 ja DA2* johtavat samaan lopputulokseen. [4 s. 3.]

Mitoitustavassa DA2* kuormapuolen varmuus sijoitetaan kuormien vaikutuksiin, esimerkiksi osavarmuusluvulla kerrotaan ulkoisten kuormien sijasta anturan pohjapaine. Kestävyysspuolella varmuus sijoitetaan kestävyYTEEN, esimerkiksi osavarmuusluvulla jaetaan lujuusparametrien ominaisarvojen perusteella laskettu kestävyYDEN ominaisarvo. Joten laskelmissa käytettävä ominaisuuden mitoitusarvo on yhtä suuri kuin sen ominaisarvo. Liitteessä 1 on esitetty mitoitusprosessin kulku mitoitusmenetelmillä DA2 ja DA2*. [4 s. 3.]

Mitoitustapa DA2 eroaa mitoitustavasta DA2* siten, että kuormapuolen varmuus sijoitetaan kuormien vaikutusten sijasta suoraan kuormien edustaviin arvoihin.

Koska mitoitustavassa DA2* kuormapuolen varmuus sijoitetaan kuormien vaikutuksiin ja eri kuormilla on erilaiset osavarmuusluvut, pitää laskelma suorittaa seuraavasti:

- Rakennetta kuormitetaan murtorajatilan yhdistelmällä, jossa kuormat on kerrottu yhdistelykertoimilla, mutta ei osavarmuusluvuilla. Kuorman osavarmuusluvulla kerrotaan vasta laskettu kuorman vaikutus.
- Kaikki ne kuormat, joilla on eri osavarmuusluku, tulee laskea erikseen, jos rakenne tai materiaali käyttäytyy epälineaarisesti tai käytetään epälineaarista laskentamallia. Geoteknisessä mitoituksessa laskenta on lähes aina joltain osin epälineaarinen.
- Laskenta etenee epälineaarisesti toimivien rakenteiden suhteen siten, että ensin rakennetta kuormitetaan pysyvillä kuormilla ja lasketaan pysyvien kuormien vaikutukset. Sen jälkeen rakennetta kuormitetaan pysyvillä ja määräävällä muuttuvalla kuormalla, jolloin saadaan vaikutusten muutoksina määräävän muuttuvan kuorman vaikutukset. Sen jälkeen kuormitetaan rakennetta pysyvillä ja kaikilla muuttuvilla kuormilla, jolloin saadaan muutoksina muiden muuttuvien kuormien vaikutukset. Tämän jälkeen kaikki vaikutukset kerrotaan niiden osavarmuusluvuilla ja summataan yhteen. Näin saadaan vaikutusten mitoitusarvot. [7 s. 22.]

Mitoitustavassa DA ja DA2* tulee osoittaa, että murtorajatilaa tai liiallista muodonmuutosta ei esiinny seuraavalla osavarmuuslukujen yhdistelmällä:

"A1" + "M1" + "R2"

Tässä menettelyssä osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin tai kuormien vaikutuksiin ja maan kestävyys.

Taulukosta 4 valitaan maaparametrien osavarmuusluvut sarjan M1 tai M2 käytettävän mitoitusavan perusteella.

Taulukko 4. Maaparametrien osavarmuusluvut (STR/GEO) [4 Taulukko A.4(FI).]

Maaparametri	Merkintä	Sarja	
		M1	M2
Leikkauskestävyysskulma	γ_ϕ	1,0	1,25
Tehokas koheesio	γ_c	1,0	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,0	1,5
Yksiaksiaalinen puristuskoe	γ_{qu}	1,0	1,5
Tilavuuspaino	γ_γ	1,0	1,0

2.8.2 Kestävyyden mitoitusarvot

Osavarmuusluvut voidaan kohdistaa joko maan ominaisuuksiin (X) tai kestävyys (R) tai molempiin.

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d\} \quad (2.5a)$$

tai

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k; a_d\} / \gamma_R \quad (2.5b)$$

tai

$$R_d = R \left\{ \gamma_F F_{rep}; \frac{x_k}{\gamma_M}; a_d \right\} / \gamma_R \quad (2.5c)$$

Yhtälö 2.5c ei ole käytössä Suomessa käytettävissä mitoitusavoissa DA2 ja DA3. [5 s. 51.]

Kestävyyden osavarmuusluvut valitaan sarjasta R2 käytettävän mitoitusavon DA2 perusteella.

Taulukko 5. Syrjäyttävien paalujen, kaivettujen paalujen ja CFA-paalujen kestävyyden osavarmuusluvut (STR/GEO). [4 Taulukot A.6(FI), A.7(FI) ja A.8(FI).]

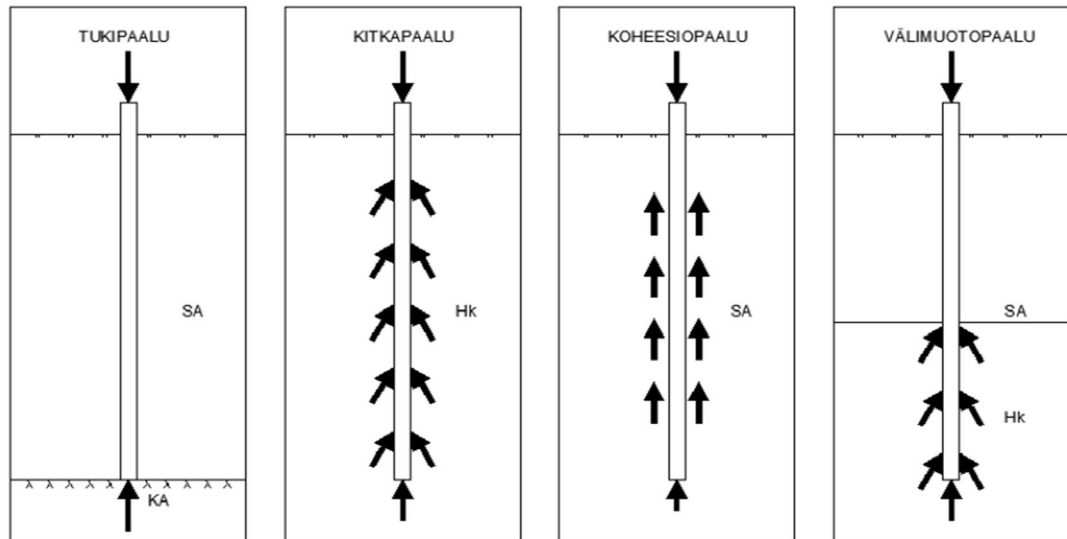
Kestävyys	Merkintä	Sarja R2
Kärki	γ_b	1,2
Vaippa (puristus)	γ_s	1,2
Kokonais-/yhdistetty (puristus)	γ_t	1,2
Vedetty vaippa:		
lyhytaikainen kuormitus	$\gamma_{s,t}$	1,35
pitkäaikainen kuormitus	$\gamma_{s,t}$	1,5

3 Paalun geotekninen mitoitus Eurokoodi 7:n mukaan

3.1 Yleistä paalusta

Maapohjarakentamisessa on käytössä erilaisia paaluja. Yleisimmät paalut ovat tukipaaluja, kitkapaaluja, koheesiopaaluja ja välimuotopaaluja. Eri paalutyypit ovat erilaisia toimintatavan, paalun materiaalin ja paalun valmistustavan puolesta. Kuvassa 5 on esitetty tukipaalun, kitkapaalun, koheesiopaalun ja välimuotopaalun toiminta maaperässä ja kuormien välityksen eri paaluissa. [6 s. 53.]

Tukipaalu tukeutuu kiinteään maapohjaan tai kallioon ja välittää kuorman kärjen kautta kiinteään maapohjaan tai kallioon. Kitkapaalu välittää kuormansa maanpohjaan ympäröivään maahan paalun pinnan ja maan välisen hankauksen avulla. Koheesiopaalu-kuorma välittyy paalun pinnan ja ympäröivän maanpohjan maan koheesion avulla. Välimuotopaalun toiminta on yhdistelmä tuki-, kitka- ja koheesiopaalun toiminnasta. [8 s. 43.]



Kuva 5. Paalujen ryhmittely toimintatavan mukaan. [6 s. 53.]

Paalutustyössä käytetään kahta eri betonipaalutyyppeä. Betonista valmistettujen paalut jaetaan tehtaissa valmistettuihin lyöntipaaluihin ja työmaalla paikalla rakennettuihin erikoispaaluihin. Erikoispaalujen koko, rakenne, muoto ja rakentamistapa vaihtelevat paljon, koska paalut rakennetaan suoraan maapohjaan. Lyöntipaalut asennetaan lyömällä maanpohjaan erilaisilla paalutuskalustoilla. [8 s. 43-44.]

3.2 Yleistä paalun kantavuudesta

Paalutusohjeessa on ohjeistettu ottamaan huomioon paalun kantavuutta määritettäessä, että paalun valmistusmateriaalien lujuudet ja maaperän ominaisuudet. Materiaalilujuuden ja materiaalin ominaisuuksien on oltava riittävällä varmuudella, jotta paalun painuma ja sivusiirtymä pysyvät sallituissa rajoissa. [8 s. 49.]

Paalun kantavuutta määritettäessä on otettava huomioon paalumateriaalien lujuudet ja maapohjan ominaisuudet, niin että paalut kantavat niille muodostuneet kuormitukset riittävällä varmuudella painumien ja sivusiirtymien pysyessä sallituissa rajoissa. . [8 s. 49.]

Paalujen kantavuus koostuu kahdesta kantavuudesta: rakenteellisesta sekä geoteknisestä kantavuudesta. Paalun rakenteellinen kantavuus on mitoitusarvo, joka saadaan

huomioimalla varmuus sekä paalun rakenteellista murtumista vastaan että paalun sallitut muodonmuutokset. Geotekninen kantavuus huomioi varmuuden maapohjan murtumista vastaan ja paalun sallitut painumat. [6 s. 53.]

Paalun rakenteellinen kantavuus riippuu paalun rakenteellisesta kestävydestä. Mitoittaessa paalun rakenteellista kantavuutta huomioon on otettava paalun taivutus. Paalun taipuma johtuu paalun vakaakuormista, kuormituksen epäkeskisyydestä ja kiinnitysmomentista, joka syntyy paalun ja anturan kiinnityksestä. Tarvittaessa paalun mitoituksessa on tarkistettava myös nurjahdus. [8 s. 49.]

Paalun geotekninen kantavuus saadaan maaperäominaisuuksille ja paalutukselle asetettuihin vaatimusten perusteella. Geotekninen kantavuus osoitetaan paalulle sallitulla puristusjännityksen arvolla. Paalun geotekninen kantavuus on riippuvainen paalun toimintatavasta eli onko paalun tyyppi tukipaalu, kitkapaalu tai koheesiopaalu. Yleensä paalun kantavuuden määrittää geotekninen kantavuus. Ehjään kallioon tukeutuvan tukipaalun kantavuuden sallitun arvon määrittää paalun rakenteellinen mitoitus. [8 s. 49.]

Paalun geotekninen kantavuus voidaan määritellä paalun koekuormituksella. Koe voidaan suorittaa staattisella tai dynaamisella koekuormituksella. Vaativassa paalutustyöluokassa paalun geoteknisen kantavuus voidaan määrittää ainoastaan koekuormituksen perusteella. [8 s. 49.]

Lyöntipaaluperustuksen suunnittelussa geotekninen kantavuus osoitetaan yleensä dynaamisella koekuormituksella. Paalun geoteknistä kantavuuden ominaisarvoa määritettäessä otetaan huomioon pohjatutkimusten määrä ja tapa, kairaukset tai koekuormitukset. Huomioon otetaan myös perustuksen kyky jakaa kuormia paaluille ja koekuormitusta käytettäessä tulosten hajonta. [7 s. 51.]

3.2.1 Tukipaalun kantavuus

Tukipaalun kantavuus on yleensä paalun pituusakselin suuntainen kestävyys. Määrävä kantavuus on pienin arvo rakenteellisesta tai geoteknisestä kantavuudesta. [1 s. 59-60.]

Tukipaalu siirtää pääosan kuormasta kärjen välityksellä kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen.

Tukipaalun geotekninen kantavuus määräytyy paalun kärjen kantokestävyyden perusteella. Suomalaiseen ehjään kallioon tukeutuvan tukipaalun kärjen kantavuus ei ole yleensä mitoittava, vaan kestävyys määräytyy yleisesti paalun rakenteellisen kantavuuden perusteella. [6 s. 53.]

Jotta paalut voidaan mitoittaa tukipaaluina, edellytetään että paalut ulottuvat kallioon tai tiiviisiin maakerroksiin. Kärkivastuksen on vastattava varmuudella kaavan mukaan laskettua kantavuutta. Käytännössä tämä kärkivastus arvioidaan paalujen asennuksen loppulyönnissä syntyvän painuman perusteella. Paalun painuma ei saa ylittää lyöntipaalutusohjeiden mukaan enimmäispainumaa. [8 s. 50.]

Tukipaalun geotekninen kantavuus määritetään yleensä sallittuun keskeiseen puristusjännitykseen perustuvasta kaavasta (3.1).

$$P_s = \sigma_s * A_p \quad (3.1)$$

missä

P_s on sallittu paalun kuorma

σ_s on sallittu puristusjännitys

A_p on paalun pienin poikkileikkausala [8 s. 50.]

3.2.2 Paalun nurjahdus

Kun teräsbetonipaalua ympäröivät riittävästi tukevat maakerrokset, ei tarvita nurjahdustarkastelua. [8 s. 50.]

Paalulle on tehtävä nurjahdustarkastelu silloin, kun paalulla ei ole riittävästi tukea ympäröivistä maakerroksista. Riittämättömäksi tuetuiksi paalu tulkitaan silloin kun se on osittain tai kokonaan ilmassa, vedessä tai maakerroksessa, jonka siipikairausmenetelmällä määritetty suljettu leikkauslujuus on pienempi kuin 20 kN/m². Kun paalua ympäröivä

röivän maakerroksen leikkauslujuus on pienempi kuin 5 kN/m^2 , ei maankerroksen sivu-
tuentaa voida käyttää hyväksi tarkastelussa. [1 s. 106-107.]

3.3 Paalun geotekninen kantavuuden mitoitusmenettelyt

Eurokoodin mukaan paalun geoteknisen mitoituksen tulee perustua johonkin seuraavista menettelyistä:

- staattisten koekuormitusten tuloksiin, joiden on laskelmin tai muulla tavoin osoitettu vastaavan muita kyseeseen tulevia kokemuksia
- kokemukseräisiin tai analyttisiin laskentamenetelmiin, joiden paikkansapitävyys on osoitettu staattisilla koekuormituksilla vastaavissa olosuhteissa (= loppulyöntiehdot)
- dynaamisten koekuormitusten tuloksiin, joiden paikkansapitävyys on osoitettu staattisilla koekuormituksilla vastaavissa olosuhteissa (= PDA-mittaukset)
- vastaavanlaisen paaluperustuksen havaittuun käyttäytymiseen edellyttäen, että pohjatutkimusten ja muiden kokeiden tulokset tukevat tätä menettelyä.

Eurokoodin mukainen paalun geoteknisen kestävyuden määrittäminen perustuu keski-eurooppalaiseen geologiaan, jossa pohjoismaissa useimmiten käytetty tukipaalu harvoin tulee käyttöön. Tämän vuoksi eurokoodi korostaa staattista koekuormitusta referenssimenettelyä. [9 s. 10.]

Suomessa käytetyt paalut ovat suurimmaksi osaksi tukipaaluja, jolloin referenssimenettelyä voidaan käyttää riittävän luotettavasti dynaamisia koekuormituksia ilman staattisten lisäkoekuormitusten tekemistä rakennusalueella. [9 s. 10.]

Laskentaperiaate on kaavan (3.2) mukaan, eli mitoituskuormituksen $F_{c;d}$ tulee olla enintään mitoituskestävyyden $R_{c;d}$ suuruinen. [1 s. 59.]

$$F_{c;d} \leq R_{c;d} \quad (3.2)$$

3.3.1 Paalun geotekninen kantavuus staattisten koekuormitusten perusteella

Staattisen koekuormitusmenetelmän tulee olla Eurokoodin 7 kohdan ”staattiset koekuormitukset” kuvauksen mukainen. Geoteknisessä suunnitteluraportissa eritellään käytetty koekuormitusmenetelmä. [1 s. 61.]

Johdettaessa geoteknisen puristuskestävyyden $R_{c;k}$ ominaisarvoa murtorajatilassa yhdestä tai useammasta koekuormituksesta mitatusta $R_{c;m}$:n arvosta tulee ottaa huomioon pohjaolosuhteiden vaihtelevuus ja paalutuksen vaikutuksen vaihtelut. [1 s. 61.]

Rakenteilla, joilla ei ole kykyä siirtää kuormia ”heikoilta” paaluilta ”vahvoille” paaluille, seuraavan kaavan (3.3) ehdon tulee täytyä. Puristuskestävyyden ominaisarvo $R_{c;k}$ määritetään mitatuista arvoista:

$$R_{c;k} = \text{Min} \left(\frac{R_{c;m;mean}}{\xi_1}; \frac{R_{c;m;min}}{\xi_2} \right) \quad (3.3)$$

missä

$R_{c;k}$ on paalun puristuskestävyyden ominaisarvo

$R_{c;m}$ on paalun koekuormituksen mitattu geotekninen puristuskestävyys murtorajatilassa; joko koekuormitustulosten keskiarvo $(R_{c;m})_{mean}$ tai koekuormitustulosten minimiarvo $(R_{c;m})_{min}$

ξ on korrelaatiokerroin ξ_1 joka kohdistetaan keskiarvoon $(R_{c;m})_{mean}$ ja kerroin ξ_2 kohdistetaan minimiarvoon $(R_{c;m})_{min}$.

Korrelaatiokerroimen arvo riippuu staattisten koekuormitusten käytettäessä koestettujen paalujen lukumäärästä n tai prosentuaalisesta osuudesta. Taulukossa 6 on esitetty staattisen koekuormitusmenetelmän korrelaatiokerroimet.

Taulukko 6. Korrelaatiokerroimet ξ ominaisarvojen johtamiseksi [4 Taulukko A.9(FI) Kansallinen liite.]

ξ kun $n =$	1 / 2 %	2 / 10 %	3 / 50 %	4 / 75 %	5 / 100 %
ξ_1	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
ξ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

Korrelaatiokertoimien arvot ξ_1 ja ξ_2 voidaan jakaa luvulla 1,1, edellyttäen että korrelaatiokertoimet ξ_1 ja ξ_2 ovat aina vähintään 1,0. Tässä tilanteessa rakenteen on oltava riittävä jäykkä ja lujaa kuormien siirtämiseksi ”heikoilta” paaluilta ”vahvoille” paaluille. [1 s. 62.]

Staattisten koekuormitusten korrelaatiokertoimet soveltuvat käytettäväksi hitaalle koekuormitusmenettelylle. Nopeissa koekuormituksissa korrelaatiokertoimet kerrotaan luvulla 1,2.

Maan geoteknisen puristuskestävyyden ominaisarvo $R_{c;k}$, voidaan myös määrittää kärkikestävyyden $R_{b;k}$ ja vaippakestävyyden $R_{s;k}$ ominaisarvoista avulla seuraavasti:

$$R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k} \quad (3.4)$$

Nämä osatekijät voidaan johtaa suoraan staattisista koekuormitustuloksista.

Paalun geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo $R_{c;d}$ määritetään staattisten koekuormitusten perusteella seuraavista kaavoista (3.5 ja 3.6):

$$R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_t \quad (3.5)$$

tai

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad (3.6)$$

missä

γ_b on paalun kärjen kantavuuden osavarmuusluku

γ_s on paalun vaipan kantavuuden osavarmuusluku

Osavarmuusluku γ_b ja γ_s on luvun 2.8.2 taulukon 5 mukaan sama paalun kärjelle, vaipalle ja yhdistetylle kantavuudelle paalutyypistä riippumatta ja on suuruudeltaan 1,2.

3.3.2 Paalun geotekninen kantavuus pohjatutkimustulosten perusteella

Mitoitettaessa geoteknistä kantavuutta pohjatutkimusten perusteella maanpohjan vaihtelut otetaan huomioon kahdella vaihtoehtoisella menetelmällä. Paalun geoteknistä kantavuutta mitoitetaan mallipaalumenetelmällä tai vaihtoehtoisella menetelmällä. Valitulla menetelmällä paalun geoteknisen kantavuuden arvioimiseen pohjatutkimustulosten perusteella on tulosten oltava riittävällä tasolla tunnettuja ja suunnittelijalla on oltava menetelmästä riittävällä tasolla kokemusta. [1 s. 63-64.]

Suunniteltaessa paalun geoteknistä kantavuutta mallipaalumenetelmällä puristus-kantavuus mitoitetaan jokaisessa tutkimuspisteessä. Geoteknisen kantavuuden ominaisarvot saadaan korrelaatiokertoimien ξ avulla, korrelaatiokertoimet riippuvat tutkimuspisteiden määrästä. [1 s. 64.]

Vaihtoehtoisessa menetelmässä pohjatutkimukset käsitellään yhtenä kokonaisuutena, josta arvioidaan kärkikestävyuden ja vaippakitkan ominaisarvot. Menetelmässä ei käytetä korrelaatiokertoimia. Vaihtoehtoisessa menetelmässä käytetään osavarmuuslukuja korjaavan mallikertoimen arvoa, joka on kitkapaaluilla vähintään 1,60, koheesiopaaluilla $\geq 1,95$ pitkäaikaisessa kuormituksessa ja $\geq 1,40$ lyhytaikaisessa kuormituksessa. [1 s. 65.]

Paalun geotekninen kantavuus voidaan arvioida maan lujuuteen perustuen staattisilla kantavuuskaavoilla. Maan kitkakulma voidaan tällöin määrittää joko laboratoriossa tai kairausvastuksen perusteella. [1 s. 65.]

Staattista kantavuuskaavaa ei suositella tukipaaluina toimiville lyöntipaaluille, koska lyöntityön tiivistävää vaikutusta kärkivyöhykkeessä on vaikea ottaa luotettavasti huomioon. [1 s. 68.]

Paalun geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo $R_{c,d}$ määritetään mallipaalumenetelmän perusteella seuraavasta kaavasta 3.7:

$$R_{c,d} = R_{b,d} + R_{s,d} \quad (3.7)$$

missä

$R_{b;d}$ on paalun kärkikantavuuden mitoitusarvo

$R_{s;d}$ on paalun vaippakantavuuden mitoitusarvo

Kullekin paalulle tulee johtaa kärkikantavuus ja vaippakantavuus kaavalla 3.8:

$$R_{b;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} \text{ ja } R_{s;d} = \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad (3.8)$$

missä

γ_b on paalun kärjen kantavuuden osavarmuusluku

γ_s on paalun vaipan kantavuuden osavarmuusluku

Osavarmuusluku γ_b ja γ_s on luvun 2.8.2 taulukon 5 mukaan sama paalun kärjelle, vaipalle ja yhdistetylle kantavuudelle paalutyypistä riippumatta ja on suuruudeltaan 1,2.

Paalun kärkikantavuuden ja vaippakantavuuden ominaisarvot lasketaan kaavalla 3.9:

$$R_{c;k} = (R_{b;k} + R_{s;k}) = \frac{R_{b;cal} + R_{s;cal}}{\xi} = \frac{R_{c;cal}}{\xi} = \text{Min} \left(\frac{R_{c;cal;mean}}{\xi_3}, \frac{R_{c;cal;min}}{\xi_4} \right) \quad (3.9)$$

missä

$R_{s;cal}$ on vaippakitka laskettuna maaparametrin koetuloksista murtorajatilassa ja $R_{b;cal}$ on paalun kärkikantavuus laskettuna pohjatutkimustuloksista murtorajatilassa.

R_c on paalun geotekninen puristuskantavuus 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.

ξ on korrelaatiokerroin ξ_3 joka kohdistetaan keskiarvoon $(R_{c;cal})_{mean}$ ja kerroin ξ_4 kohdistetaan minimiarvoon $(R_{c;cal})_{min}$.

Korrelaatiokerroin on riippuvainen pohjatutkimusprofiilien lukumäärästä. Pohjatutkimusprofiilien määrän tulee olla vähintään yhtä suuri kuin tarkasteltavien paalujen lukumäärä. [1 s. 64.]

Taulukko 7. Korrelaatiokertoimet ξ ominaisarvojen johtamiseksi [4 Taulukko A.10(FI) Kansallinen liite.]

ξ kun n =	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3	1,85	1,77	1,73	1,69	1,65	1,62	1,60
ξ_4	1,85	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40

Rakenteilla, joilla on riittävä jäykkyys ja lujuus siirtämään kuormia ”heikoilta” paaluilta ”vahvoille” paaluille, korrelaatiokertoimet ξ_3 ja ξ_4 voidaan jakaa luvulla 1,1, edellyttäen että ξ_3 on aina vähintään 1,0.

Vaihtoehtoisessa menetelmässä paalun kärkikantavuuden $R_{b;k}$ ja vaippakantavuuden $R_{s;k}$ ominaisarvot lasketaan kaavalla 3.10.

$$R_{b;k} = A_b * q_{b;k} \text{ ja } R_{s;k} = \sum A_{s;i} * q_{s;i;k} \quad (3.10)$$

missä

$q_{b;k}$ ja $q_{s;i;k}$ ovat maaparametrien arvoilla saadut kärkikantavuuden ja vaippakitkan ominaisarvot eri kerroksissa.

Vaihtoehtoisessa menetelmässä osavarmuuslukuja korjaavan mallikertoimen arvo on vähintään 1,60 kitkapaaluilla. Koheesiopaaluilla mallikertoimen arvon on $> 1,95$ pitkäaikaisessa kuormituksessa ja $> 1,40$ lyhytaikaisessa kuormituksessa. [1 s. 65.]

3.3.3 Paalun geotekninen kantavuus paalutuskaavojen perusteella

Paalutuskaavoja tulee käyttää vain siinä tapauksessa, että maakerrosrajat on määritetty ja paalujen arvioitu tunkeutumistaso on tiedossa kohtuullisella tarkkuudella. Kun paalutuskaavoja käytetään perustuksen yksittäisten paalujen geoteknisen puristuskantavuuden arvioimiseen, kaavojen paikkansapitävyyden tulee olla perusteltu aikaisempiin kokeellisiin osoituksiin hyvästä toimivuudesta dynaamisissa koekuormituksissa samantyyppisillä, samanpituisilla ja vastaavan poikkileikkausalan omaavilla paaluilla samantyyppisissä pohjaolosuhteissa. [1 s. 76.]

Kitkamaahan lyödyillä tukipaaluilla puristuskantavuuden mitoitusarvo $R_{c;d}$ tulee arvioida samalla menetelmällä kuin dynaamisten koekuormitusten perusteella.

$$R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_t \quad (3.11)$$

missä

$$R_{c;k} = \text{Min} \left(\frac{R_{c;m;mean}}{\xi_5}; \frac{R_{c;m;min}}{\xi_6} \right) \quad (3.12)$$

Osavarmuusluku γ_t on luvun 2.8.2 taulukon 5 mukaan sama paalun kärjen, vaipan ja yhdistetylle kestävyydelle paalutyypistä riippumatta ja on suuruudeltaan 1,2.

ξ on korrelaatiokerroin ξ_5 joka kohdistetaan keskiarvoon $(R_{c;m})_{mean}$ ja kerroin ξ_6 kohdistetaan minimiarvoon $(R_{c;m})_{min}$.

Taulukko 8. Korrelaatiokertoimet ξ ominaisarvojen johtamiseksi [4 Taulukko A.11(FI) Kansallinen liite.]

ξ kun n =	2-4 / 1-5%	5-9 / 5-39%	10-14 / 40-64	15-19 / 65-89%	≥ 20 / 90-100%
ξ_5	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_6	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

Lukumäärällä n tarkoitetaan koestettujen paalujen lukumäärä.

ξ korrelaatiokertoimet kerrotaan mallikertoimella 1,1 silloin, kun käytetään paalutuskaavaa ja lyönnin aikana mitataan paalun pään jousto.

ξ korrelaatiokertoimet kerrotaan mallikertoimella 1,2 silloin, kun käytetään paalutuskaavaa eikä lyönnin aikana mitata paalun pään joustoa.

Rakenteilla, joilla on riittävä jäykkyys ja lujuus siirtämään kuormia "heikoilta" paaluilta "vahvoille" paaluille, korrelaatiokertoimet ξ_5 ja ξ_6 voidaan jakaa luvulla 1,1.

Kun paalutuskaavoja käytetään paalun puristuskestävyyden varmistamiseen, paalun lyöntikoe tehdään vähintään 5 paalulla, jotka sijaitsevat riittävän välimatkan päässä toisistaan paalutusalueella, jotta voidaan varmistaa sopiva tunkeuma loppulyöntisarjoja varten. [1 s. 76.]

3.3.4 Paalun geotekninen kantavuus dynaamisten koekuormitusten perusteella

Lyöntipaalun geotekninen kantavuus osoitetaan yleensä dynaamisella koekuormituksella. Paalun geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo $R_{c;d}$ määritetään dynaamisten koekuormitusten perusteella seuraavasta kaavasta 3.13:

$$R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_t \quad (3.13)$$

missä

$$R_{c;k} = \text{Min} \left(\frac{R_{c;m;mean}}{\xi_5}, \frac{R_{c;m;min}}{\xi_6} \right) \quad (3.14)$$

missä

$R_{c;k}$ on paalun geoteknisen kantavuuden ominaisarvo

$R_{c;m}$ on dynaamisten koekuormitustulosten keskiarvo $(R_{c;m})_{mean}$ tai minimiarvo $(R_{c;m})_{min}$

γ_t on paalun kantavuuden osavarmuusluku

ξ on korrelaatiokerroin ξ_5 joka kohdistetaan keskiarvoon $(R_{c;m})_{mean}$ ja kerroin ξ_6 kohdistetaan minimiarvoon $(R_{c;m})_{min}$.

Paalun geoteknisen kantavuuden ominaisarvo $R_{c;k}$ on keskiarvon $(R_{c;m})_{mean}$ ja minimiarvon $(R_{c;m})_{min}$ perusteella lasketuista $R_{c;k}$ -arvoista pienempi.

Osavarmuusluku γ_t on luvun 2.8.2 taulukon 5 mukaan sama paalun kärjelle, vaipalle ja yhdistetylle kestävyydelle paalutyypistä riippumatta ja on suuruudeltaan 1,2.

Taulukko 9. Korrelaatiokertoimet ξ ominaisarvojen johtamiseksi [4 Taulukko A.11(FI) Kansallinen liite.]

ξ kun n =	2-4 / 1-5%	5-9 / 5-39%	10-14 / 40-64	15-19 / 65-89%	≥ 20 / 90-100%
ξ_5	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_6	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

Lukumäärällä n tarkoitetaan geoteknisen kantavuuden kannalta samanlaisissa olosuhteissa tehtyjen samanlaisten paalujen mittausten lukumäärää tai prosenttiosuutta paalujen kokonaismäärästä. Kappalemäärän tai prosenttiosuuden mukaan valitaan se, jonka perusteella saadaan pienempi korrelaatiokerroin. [1 s. 75.]

Jos perustus on perustettu vain yhden paalun varaan, käytetään korrelaatiokerrointa ξ_5 ja sille arvoa 1,60. [1 s. 75.]

Korrelaatiokerroimen arvo kerrotaan mallikertoimella 1,05, kun paalujen pituudet vaihtelevat voimakkaasti tai vastaavanlainen dynaamisista koekuormituksista kokemus on vähäinen. [1 s. 75.]

Korrelaatiokerroimen arvo voidaan kertoa mallikertoimella 0,9, kun käytetään signaalisovitusta (signal matching). Arvo voidaan myös kertoa ilman signaalisovitusta silloin, kun paalut tukeutuvat luotettavasti varmistettuun kallioon ja paalun geotekninen kantavuus riippuu lähinnä paalun rakenteellisesta kantavuudesta. [1 s. 75.]

Liitteessä 2 on esitetty dynaamisen koekuormituksen suoritus ja siitä saatu tulos.

3.4 Mitoitusmenettelyn valinta

Suomessa käytetyistä paaluista suurin osa on toiminnallisesti tukipaaluja. Eurokoodi 7 normisto korostaa staattista koekuormitusta mitoituksessa. Staattinen koekuormitus on täysin sekundaarinen mitoitusmenettely Suomessa. Geologiasta johtuen tukipaaluilla ei ole kuin 2 mahdollista mitoitusmenetelmää: dynaamisten koekuormitusten tuloksiin ja kokemusperäisiin tai analyttisiin laskentamenetelmiin perustuen. Siltarakenteessa ja vaativissa kohteissa käytetään aina dynaamisiin koekuormituksiin perustuvaa mitoitusmenetelmää.

Keski-eurooppalainen mitoituskäytäntö soveltuu Suomessa vain paksuihin kitkamaakerrokseen, harjumuodostelmiin ja paksuihin hiekkakerrostumiin, joita Suomen pinta-alasta on vain muutamia prosentteja.

4 Lyöntipaalun rakenteellinen mitoitus

Lyömällä tai iskumaisella rasituksella asennetun paalun rakenteen ja paaluvasteiden tulee taulukon 2 paalutustyöluokissa kestää taulukossa 10 esitetyt vaatimukset. Keskimääräinen paalun kärkeen välittyvä jännitys määrä geoteknisen kantavuuden ylärajan $R_{k,geo,max}$. [1 s. 100.]

Paalun rakenteen lyönninkestävyyden ylärajat ja vastaavat geoteknisen kestävyys ylärajat paalumateriaaleittain on esitetty taulukossa 10. [1 s. 101.]

Taulukko 10. Geoteknisen kestävyys ominaisarvon maksimiarvo lyömällä asennettavilla paaluilla ja suurin keskeinen lyöntivoima. [1 s. 101.]

Paalun materiaali	Suurin sallittu puristusrasituksen aikaansaava keskeinen lyöntivoima asennettaessa $F_{c,lyönti}$	Suurin kestävyys ominaisarvo $R_{k,geo,max}$
Teräspaalu	$\leq 0,9 * f_{yk} * A_s$	PTL3: $R_{k,geo,max} \leq F_{c,lyönti}$ PTL2: $R_{k,geo,max} \leq 0,8 * F_{c,lyönti}$ PTL1: $R_{k,geo,max} \leq 0,6 * F_{c,lyönti}$
Teräsbetonipaalu	$\leq 0,8 * f_{ck} * A_c$	PTL3: $R_{k,geo,max} \leq F_{c,lyönti}$ PTL3: $R_{k,geo,max} \leq 0,8 * F_{c,lyönti}$ PTL3: $R_{k,geo,max} \leq 0,6 * F_{c,lyönti}$
Puupaalu	$\leq 0,8 * f_{c,0,k} * A_{min}$	PTL3: Ei käytetä PTL3: $R_{k,geo,max} \leq 0,8 * F_{c,lyönti}$ PTL3: $R_{k,geo,max} \leq 0,6 * F_{c,lyönti}$

Paalutustyöluokassa PTL 3 paalun lyönninkestävyyden määräämstä ylärajasta voidaan hyödyntää enintään 100 % ($R_{k,geo,max}$). Paalutustyöluokassa PTL 2 tästä enimmäisarvosta voidaan hyödyntää maksimissaan 80 % ja paalutustyöluokassa PTL 1 60 %.

Jatkamattomaan paaluun saa asennuslyönnin aikana kohdistua enintään taulukossa 11 esitetty vetovoima.

Taulukko 11.

Jatkamattoman paalun suurin asennuslyönnin aikainen vetovoima.

Paalun materiaali	Suurin lyöntivoima asennettaessa, vetorasitus $F_{t,lyönti}$
PTL1–3 Teräspaalu PTL1–3 Teräsbetonipaalu	$F_{t,lyönti} \leq 0,9 * f_{yk} * A_s$ $F_{t,lyönti} \leq 0,9 * f_{yk} * A_s$

Taulukkoa 10 sovelletaan paaluille, joiden geotekninen kestävyys määritetään asennuksen jälkeen lyömällä tai iskumaisella rasituksella. Vaatimukset osoitetaan laskennallisesti sekä todennetaan vähintään kolmella asennuksen edellyttämän rasituksen jälkeisellä testauksella. Laskennallisen tarkastelun sijaan kelpoisuus voidaan osoittaa kokeellisella mitoituksella. Kokeellisessa mitoituksessa kokeiden lukumäärän on oltava vähintään kuusi.

Paalut luokitellaan paalun valmistajan tai maahantuojan toimesta nimeämällä paalulle tietty, taattu rakenteellinen lyönninkestävyys sekä ylin paalutustyöluokka, johon paalua voidaan käyttää. Paalun valmistaja tai maahantuoja nimeää samalla suurimman geoteknisen kestävyden ominaisarvon $R_{k,geo,max}$, mihin paalutuotteella voidaan asennettaessa pyrkiä.

Paalukoko ja tyyppikohtaisesti tavoiteltava, valmistajan tai maahantuojan määrittämä geoteknisen kestävyden ominaisarvo $R_{k,geo,max}$, voi olla pienempi kuin taulukossa 10 esitetty geoteknisen kestävyden ominaisarvo $R_{k,geo,max}$.

Paalun asentaja vastaa siitä, ettei valmistajan tai maahantuojan tuotteelleen asettamia suurimpia sallittuja rasituksia paalua lyötäessä ylitetä. Paalun akselin suhteen vinon tai epäkeskeisen lyönnin aikaansaamat reunajännityksen eivät paalutustyöluokassa PTL3 saa ylittää keskimääräistä jännitystä enemmän kuin 15%, paalutustyöluokassa PTL2 vastaavasti 25% ja paalutustyöluokassa PTL1 35%.

Paalun lyönnin aikainen puristuskestävyys on vain yksi paalun käyttötilan kestävyyttä rajoittava arvo. Paalun nurjahdusriski ja alkukäyryys voivat pienentää geoteknisen kestävyden arvoa. Samoin rakenteen lyönninkestävyyttä saattaa rajoittaa paalun ja sen varusteiden vetojännityksen kestävyys.

Lyömällä asennettujen paalujen rakenteen momenttikestävyys perusvaatimus laskeaan kaavasta 4.1. Vaadittava rakenteellinen momenttikestävyys M_k määritetään suh-

teessa kestävyuden ominaisarvon maksimiin siten, että paalun ja paalujatkosten on rakenteellisesti kestävä momentti M_k .

$$M_k \geq R_{k,geo} * i_{red} \quad (4.1)$$

missä

M_k on rakenteellinen momenttikestävyys

$R_{k,geo}$ on geoteknisen kantavuuden ominaisarvo

i_{red} on redusoitu pintahitaussäde [m.].

Teräsbetonipaaluille redusoitu pintahitaussäde lasketaan kaavalla 4.2.

$$i_{red} = k_{red} * \left(\frac{I}{6 * A} \right)^{0,5} \quad (4.2)$$

missä

I on pintahitausmomentti, asennusaikaiset ominaisuudet [m⁴.]

A on pinta-ala [m².]

k_{red} on empiiris-analyttisesti kaavalla 4.3 määritetty kerroin.

$$k_{red} = 0,57 * \left(\frac{f_{yk}}{500} \right) * \rho + 0,57 \quad (4.3)$$

missä

f_{yk} on paalun pääterästen myötörajan ominaisarvo [MPa.]

ρ on suhteellinen pääterästen määrä prosentteina paalun pinta-alasta

Teräsbetonipaalun pääterästen yhteenlaskettu poikkileikkausala ei saa alittaa arvoa 0,5% paalun poikkileikkauksen pinta-alasta.

Teräsbetonipaalun momenttikestävyysvaatimus eri paalutustyöluokissa on pienin seuraavista:

- PTL 3: $M_k \geq 0,9 * F_{c;lyönti} * i_{red}$
- PTL 2: $M_k \geq 1,0 * 0,8 * F_{c;lyönti} * i_{red}$
- PTL 1: $M_k \geq 1,1 * 0,6 * F_{c;lyönti} * i_{red}$

tai jos paalun valmistajan määrittelemä geoteknisen kantavuuden ominaisarvo $R_{k,geo}$ on pienempi kuin taulukossa 10 esitetty geoteknisen kantavuuden maksimiarvo $R_{k,geo,max}$:

- PTL 3: $M_k \geq 0,9 * R_{k,geo} * i_{red}$
- PTL 2: $M_k \geq 1,0 * R_{k,geo} * i_{red}$
- PTL 1: $M_k \geq 1,1 * R_{k,geo} * i_{red}$

Momentinkestävyysvaatimusten kertoimet 0,9, 1,0 ja 1,1 huomioivat tavanomaisen lyönnin aikaansaamat epäkeskeisyydet. Reunajännityksen oletetaan olevan 25% keskimääräistä jännitystä suurempi paalutusluokassa PTL2. Paalutuskuokan PTL2 arvoa pidetään esitetystä kaavoissa vaatimuksena perusarvona kerrointa 1,0. Paalutustyöluokassa PTL3 reunajännitys tulee rajoittaa 15% keskimääräisestä ja paalutustyöluokassa PTL1 35%. Kertoimet ovat vastaavasti 0,9 ja 1,1.

Pintahitausmomenttia I ja pinta-alaa laskettaessa betoni- ja liittorakennepaalun betoni oletetaan vetoa kestäväksi.

$R_{k,geo}$ on suurin mahdollinen tuottajan tuotteelleen ilmoittama geoteknisen kantavuuden arvo. Jos tämä arvo rajataan pienemmäksi kuin edellä ilmoitettu, momenttikestävyysvaatimusta voidaan vastaavasti pienentää.

5 Paalujen sijoitus

5.1 Lyöntipaalujen sallitut sijaintipoikkeamat

Lyötävät teräsbetonipaalut on asennettava seuraavien geometristen rakentamistoleranssien puitteissa, ellei suunnitelmissa toisin määrätty:

- yksittäinen pysty- ja vinopaalu, paalulaatta tai paaluhatturakenne: $e \leq e_{\max} = 100 \text{ mm}$
- pienen paaluryhmän 4-8 paalua, yksittäinen paalu $e \leq e_{\max} = 150 \text{ mm}$, tätä suuremman paaluryhmän yksittäinen paalu $e \leq e_{\max} = 200 \text{ mm}$, kuitenkin koko ryhmän painopisteen $e \leq e_{\max} = 50 \text{ mm}$
- talorakentamisen paaluperustuksissa $e \leq e_{\max} = 150 \text{ mm}$, erityisen vaikeissa olosuhteissa, kuten esilävistettävien täyttöjen, kevennyskairauksen tms. alueilla $e \leq e_{\max} = 200 \text{ mm}$
- paalurivin yksittäisen paalun $e \leq e_{\max} = 150 \text{ mm}$, kuitenkin koko rivin painopisteen $e \leq e_{\max} = 50 \text{ mm}$ riviin nähden kohtisuorassa suunnassa. [1 s. 175.]

5.1.1 Paalujen väliset etäisyydet

Paalujen väliset etäisyydet on määrättävä suunnitelma-asiakirjoissa.

Paalujen väliset etäisyydet valitaan siten, että vierekkäiset paalut eivät vaikuta vähentävästi toistensa kantavuuteen eivätkä asennettaessa vahingoita toisiansa.

Yhteen suuntaan kuormitettujen teräsbetonipaalujen vähimmäisarvot keskiöetäisyyksille suunnittelua varten on esitetty taulukossa 12. Seuraavia vähimmäisarvoja ei kuitenkaan tule alittaa:

- tuki- ja kitkapaalut 800 mm
- koheesiopaalut 1000 mm
- maakerroksiin tukeutuvat vetopaalut 1500 mm. [1 s. 171.]

Taulukko 12. Paalujen keskiöetäisyyksien vähimmäisarvot. [1 s. 171.]

Paalun pituus [m.]	Tuki- ja kitkapaalu		Koheesiopaalu	
	Pyöreä	Neliömäinen	Pyöreä	Neliömäinen
10	2,7*d	3*d	4*d	4,5*d
10-25	Väliarvot interpoloidaan		5*d	5,6*d
25	3,5*d	4*d	6*d	6,8*d

5.2 Paalutuksen toteutumapiirustus

Paalutuksen toteutumapiirustuksen laatii urakoitsija tai suunnittelija ja piirustuksesta vastaa rakennuttaja. Toteutumapiirustus laaditaan paalutuskartalle ja tarvittaessa täydennetään rakenne- tai maaperäleikkauksin ja -taulukoin.

Toteutumapiirustuksessa esitetään seuraavat tiedot:

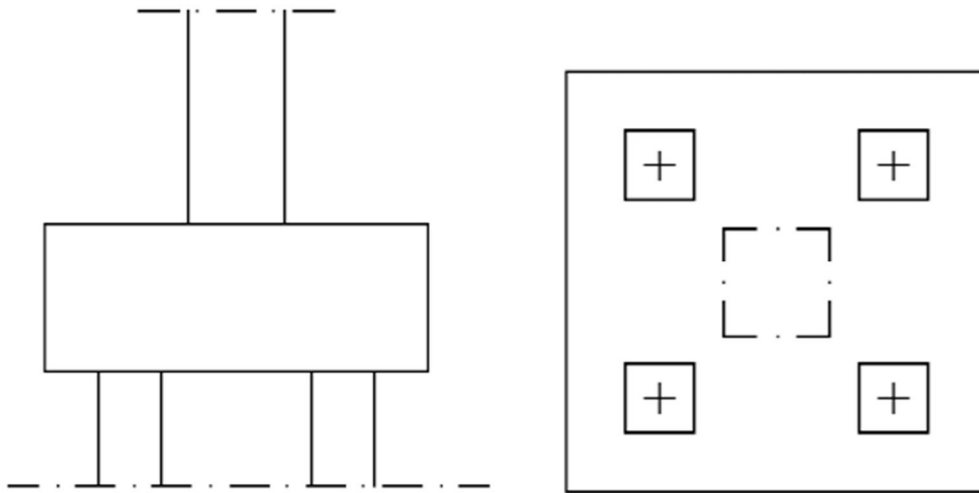
- Paalujen tunnuks
- Paalujen yläpään ja kärjen taso sekä toteutunut pituus
- Vaurioituneet paalut, jotka eivät toimi rakenteessa
- Korvaavat paalut ja lisäpaalut tunnuksineen
- Anturoihin ja laattoihin tehdyt levennykset ja sidontapalkit

Toteutuneet sijainnit merkitään seuraavasti:

- sijainti- ja kaltevuustoleranssien sisällä olevat paalut suunnitellulla paikallaan
- toleranssit ylittäneet paalut toteutuneella paikallaan. [10.]

6 Esimerkkitapaus

Esimerkkikohde on teollisuushalli, jossa on paaluantura neljällä paalulla. Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan GL2 ja seuraamusluokkaan CC2. Geoteknisen luokan GL2 ja seuraamusluokan CC2 perusteella määräytyy rakenteelle paalutustyöluokka PTL2. Esimerkkitapauksessa käytetään TB300b 300x300mm 8 metriä pitkiä paaluja. Paalut tukeutuvat kallioon tai erittäin kovaan maakerrokseen ja toimivat tukipaaluina. Kuvassa 6 on esitetty esimerkkitapauksen paaluantura.



Kuva 6. Paaluantura.

6.1 Geoteknisen kantavuuden laskenta

Tukipaalun geotekninen kantavuus määräytyy paalun rakenteellisen kantavuuden perustella seuraavasti:

Betonin puristuskestävyys: $f_{ck} = 35 \text{ Mpa}$

Paalun poikkileikkauksen pinta-ala: $A_c = 300\text{mm} \cdot 300\text{mm} = 90000\text{mm}^2$

Raudoitusterästen myötölujuus : $f_{yk} = 500 \text{ Mpa}$

Raudoitusterästen pinta-ala (4T16): $A_s = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot \pi \cdot 8^2 \text{ mm}^2 = 804\text{mm}^2$

Suurin sallittu puristusrasituksen aikaansaava keskeinen lyöntivoiva asennettaessa:

$$F_{c,lyönti} = 0,8 \cdot f_{ck} \cdot A_c = 0,8 \cdot 35 \text{ MPa} \cdot 90000 \text{ mm}^2 = 2520 \text{ kN} \quad (\text{Taulukko 10})$$

Suurin kestävyden ominaisarvo paalutustyöluokassa PTL2:

$$R_{k,geo,max} \leq 0,8 \cdot F_{c,lyönti} \Rightarrow R_{k,geo,max} = 0,8 \cdot 2520 \text{ kN} = 2016 \text{ kN} \quad (\text{Taulukko 10})$$

Suurin mahdollinen vetolyöntivoima asennettaessa $F_{t,lyönti}$:

$$F_{t,lyönti} = 0,9 * f_{yk} * A_s = 0,9 * 500 \text{ MPa} * 804 \text{ mm}^2 = 361 \text{ kN} \quad (\text{Taulukko 11})$$

Paalun varren momenttikestävyys:

$$M_k \geq 1,0 * 0,8 * F_{t,lyönti} * i_{red} \quad (4.1)$$

Redusoitu pintahitaussäde:

$$i_{red} = k_{red} * (I/6 * A)^{0,5} \quad (4.2)$$

kerroin k_{red}

$$k_{red} = 0,57 * (f_{yk}/500 \text{ MPa}) * \rho + 0,57 \quad (4.3)$$

suhteellinen teräsmäärä

$$\rho = A_s/A_c = 804 \text{ mm}^2/90000 \text{ mm}^2 = 0,89 \%$$

kerroin

$$k_{red} = 0,57 * (500 \text{ MPa}/500 \text{ MPa}) * 0,89\% + 0,57 = 1,077 \quad (4.3)$$

pintahitausmomentti I

$$I = bh^3/12 = 300 * 300^3/12 = 0,000675 \text{ m}^4 \quad (4.1)$$

paalun poikkileikkauksen pinta-ala: $A = 300 \text{ mm} * 300 \text{ mm} = 90000 \text{ mm}^2$

Redusoitu pintahitaussäde:

$$i_{red} = k_{red} * (I/6 * A)^{0,5} = 1,077 * (0,000675/6 * 0,09)^{0,5} = 0,038 \text{ m}$$

Paalun varren momenttikestävyys:

$$M_k = 1,0 * 0,8 * F_{c;lyönti} * i_{red} = 1,0 * 0,8 * 2520 \text{ kN} * 0,038 \text{ m} = 76,6 \text{ kNm} \quad (\text{Kappale 4})$$

Rakenteen on kestettävä momentti taivutuskokeessa. Laskennalla simuloidaan koetta, mistä syystä laskennassa käytetään lujuuksien ominaisarvoja. Tarkistetaan paalun poikkileikkauksen momentinkestävyys.

$$\alpha_{cc} = 1 \quad \gamma_c = 1 \quad \gamma_s = 1$$

Lasketaan paalun TB300b varren momenttikestävyys M_k :

Paalun leveys: $b = 300 \text{ mm}$, paalun korkeus: $h = 300 \text{ mm}$.

Puristuserästen etäisyys paalun puristuspinnasta:

$$t_{sc} = 30 \text{ mm} + 16\text{mm}/2 + 5 \text{ mm} = 43 \text{ mm}$$

Vetoterästen etäisyys paalun alapinnasta:

$$t_{st} = 30 \text{ mm} + 16\text{mm}/2 + 5 \text{ mm} = 43 \text{ mm}$$

Tehollinen korkeus:

$$d = h - t_{st} = 300 \text{ mm} - 43 \text{ mm} = 257 \text{ mm}$$

Puristuserästen pinta-ala 2T16: $A_{sc} = 2 * \pi * r^2 = 2 * \pi * 8^2 \text{ mm}^2 = 402 \text{ mm}^2$

Vetoterästen pinta-ala 2T16: $A_{st} = 2 * \pi * r^2 = 2 * \pi * 8^2 \text{ mm}^2 = 402 \text{ mm}^2$

Raudoituksen myötölujuus: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

Betonin puristuslujuus: $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$

Betonin murtopuristuma: $\varepsilon_{cu} = 0,0035$

Raudoituksen kimmokerroin: $E_s = 200\,000 \text{ MPa}$

Terästen myötöraajavenymä:

$$\varepsilon_{yk} = \frac{f_{yk}}{E_s} = \frac{500 \text{ MPa}}{200000 \text{ MPa}} = 0,0025$$

Neutraaliakselin paikka x , kun $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$

Tasapainoehto

$$N_c = N_s + N_{sc}$$

ratkaistaan tasapainoehdosta yhtälöiden avulla neutraaliakselin paikka x :

$$x = \frac{-(N_s - E_s A_{sc} \varepsilon_{yk}) \pm \sqrt{(N_s - E_s A_{sc} \varepsilon_{yk})^2 - 4 \cdot 0,8 \cdot b \cdot f_{ck} \cdot E_s A_{sc} \varepsilon_{yk} \cdot t_{st}}}{2 \cdot 0,8 \cdot b \cdot f_{ck}}$$

$$x = \frac{-0 \pm \sqrt{(0)^2 - 4 \cdot 0,8 \cdot 300 \text{ mm} \cdot 35 \text{ MPa} \cdot 200000 \text{ MPa} \cdot 402 \text{ mm}^2 \cdot 0,0025 \cdot 43 \text{ mm}}}{2 \cdot 0,8 \cdot 300 \text{ mm} \cdot 35 \text{ MPa}} = 32,08 \text{ mm}$$

Ratkaistaan x :n avulla puristuspinnan tehollinen korkeus, puristusterästen venymä, betonin puristuskapasiteetti ja puristusterästen kapasiteetti.

Puristuspinnan tehollinen korkeus:

$$y = 0,8 \cdot x = 0,8 \cdot 32,08 \text{ mm} = 25,66 \text{ mm}$$

Puristusterästen venymä

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{yk} \cdot (t_{st} - x) / x = 0,0025 \cdot (43 \text{ mm} - 32,08 \text{ mm}) / 32,08 \text{ mm} = 0,00085$$

Betonin puristuskapasiteetti:

$$N_c = b \cdot y \cdot f_{ck} = 300 \text{ mm} \cdot 25,66 \text{ mm} \cdot 35 \text{ MPa} = 269 \text{ kN}$$

Vetoterästen vetovoimakapasiteetti:

$$N_s = A_{st} \cdot f_{yk} = 402 \text{ mm}^2 \cdot 500 \text{ MPa} = 201 \text{ kN}$$

Puristuserästen kapasiteetti:

$$N_{sc} = E_s * \varepsilon_{sc} * A_{sc} = 200000 \text{ MPa} * 0,00085 * 402 \text{ mm}^2 = 68 \text{ kN}$$

Tarkistetaan tasapainoehto

$$N_c = N_s + N_{sc} = 201 \text{ kN} + 68 \text{ kN} = 269 \text{ kN} \rightarrow OK$$

Sisäinen momenttivarsi:

$$z = d - \frac{y}{2} = 257 \text{ mm} - \frac{25,66 \text{ mm}}{2} = 244,17 \text{ mm}$$

Momenttikapasiteetti:

$$M_{k,L} = N_s * z + N_{sc} * \left(t_{sc} - \frac{y}{2} \right)$$

$$M_{k,L} = 201 \text{ kN} * 244,17 \text{ mm} + 68 \text{ kN} * \left(43 \text{ mm} - \frac{25,66 \text{ mm}}{2} \right) = 51,1 \text{ kNm}$$

$$M_{k,L} \leq M_k = 51,1 \text{ kNm} \leq 76,6 \text{ kNm}$$

Paalua ei voida lyödä paalutustyöluokan PTL2 geotekniseen kestävyYTEEN $R_{k,geo,max} = 2016 \text{ kN}$, joten redusoidaan geotekninen kestävyys vastaamaan momenttikestävyyttä $M_{k,L}$.

$$R_{k,geo,max} = 0,8 * F_{c,lyönti} * \frac{M_{k,L}}{M_k} = 0,8 * 2520 \text{ kN} * \frac{51,1 \text{ kNm}}{76,6 \text{ kNm}} = 1344 \text{ kN}$$

Geoteknisen kestävyYDEN maksimiarvo vastaa keskeistä jännitystä:

$$\sigma = \frac{R_{k,geo,max}}{A} = \frac{1433 \text{ kN}}{0,09 \text{ m}^2} = 14,9 \text{ MPa}$$

Tarkistetaan, että lyönninaikaiset vetorasitukset eivät ole liian suuret.

Vetovoima ei ylitä arvoa: $F_{t,lyönti} = 361 \text{ kN}$

$$f_{t;lyönti} = \frac{F_{t;lyönti}}{A} = \frac{361 \text{ kN}}{0,09 \text{ m}^2} = 4 \text{ MPa}$$

Keskeinen puristusvoima ei ylitä arvoa: $F_{c;lyönti} = 2520 \text{ kN}$

$$f_{c;lyönti} = \frac{F_{c;lyönti}}{A} = \frac{2520 \text{ kN}}{0,09 \text{ m}^2} = 28 \text{ MPa}$$

Jaetaan laskettu $R_{k,geo,max}$ määritystavasta riippuvalla korrelaatiokerroimella ξ , niin saadaan paalun geoteknisen kestävyden ominaisarvo. Esimerkkilaskussa paalujen geotekninen kestävyys on koestettu viiden paalun dynaamisella koekuormituksella, joka edustaa 5-40 % koestusotosta. Tällöin korrelaatiokerroin $\xi_5 = 1,50$ (taulukko 9). Geoteknisen kestävyden ominaisarvoksi saadaan:

$$R_{c;k} \leq \frac{R_{k,geo,max}}{\xi_5} = \frac{1344 \text{ kN}}{1,50} = 896 \text{ kN}$$

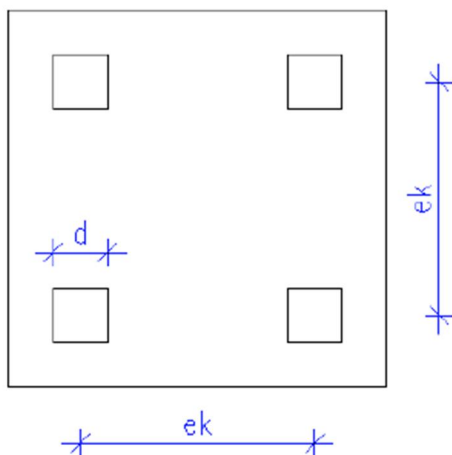
Jaetaan geoteknisen kestävyden ominaisarvo kokonaiskestävyyden osavarmuusluvulla $\gamma_t = 1,2$. Lyömällä asennetun paalun TB300b geoteknisen kestävyden mitoitusarvo paalutustyöluokassa PTL2 saa olla enintään:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} = \frac{896 \text{ kN}}{1,2} = 746 \text{ kN}$$

Esimerkkitapauksen paalujen keskiöetäisyyden e_k vähimmäisarvo on suurempi arvoista 800 mm tai $3 \cdot d = 3 \cdot 300 \text{ mm} = 900 \text{ mm}$.

Paaluanturan reunan minimietäisyys paalusta on puolet paalun sivumitasta lisättynä paalun sallitulla sijaintipoikkeamalla $(d/2)+150 \text{ mm} = (300 \text{ mm} / 2) + 150 \text{ mm} = 300 \text{ mm}$.

Kuvassa 7 on esitetty esimerkkitapauksen paaluantura.



Kuva 7. Esimerkin tapauksen paaluantura.

7 LPO-2005 ja PO-2011 vertailu

Merkittävät muutokset eurokoodin mukaiseen mitoitukseen on terminologiamuutos ja mitoitusmenetelmän muutos. Eurokoodin mitoitusmenetelmä perustuu osavarmuuslukumenetelmään kun taas lyöntipaalutusohje-2005 perustuu kokonaisvarmuuslukumenetelmään. Eurokoodi 7:llä on käytössä poikkeavia nimikkeitä. Merkittävin nimikemuutos on kantavuuskäsitteen korvaaminen kestävyydellä. Esimerkiksi uudet nimikkeet ovat kantokestävyys, liukumiskestävyys jne. rakennesuunnittelustandardien mukaan. Maan kitkakulman sijasta eurokoodissa käytetään termiä leikkausvastuskulma.

Aikaisemman osavarmuuslukumenetelmän laskenta-arvo on korvattu mitoitusarvolla. Suomessa on ollut mahdollista käyttää osavarmuuslukumenetelmää geoteknisessä suunnittelussa jo 1980-luvulla lähtien. Menetelmän käyttö on ollut hyvin vähäistä. Mitoitus on tehty pääasiassa kokonaisvarmuuslukumenetelmällä.

Eurokoodissa on muuttunut myös paalutustyöluokan määrittäminen. Aikaisemmin LPO-2005 mukaan korkein paalutusluokka 1 on muuttunut vaativimmaksi paalutustyöluokaksi PLT3.

Muutoksia on myös suunnitelmissa. LPO-2005 mukaan oli ainoastaan annettava paalukuorma ja kokonaisvarmuuskertoimilla saatiin vaadittu kantavuus paaluille. Eurokoodissa varmuus kohdistetaan sekä kuorma- että kestävyyspuolelle, jolloin eurokoodissa on useampia kertoimia.

Eurokoodin järjestelmä on tuonut uutta ensisijaisesti paaluvalmistajille ja suunnittelijoille. Paaluttajan kannalta eurokoodijärjestelmä ei ole tuonut merkittävästi uutta.

Taulukossa 13 on esitetty ”Lyöntipaalutusohje LPO-2005” ja ”Paalutusohje 2011” vertailua.

Taulukko 13. Vertailutaulukko [1.][2.]

LPO-2005 ja PO-2011 vertailua		
	Vertailtavat ohjeet	
	LPO-2005	PO-2011
Suunnittelujärjestelmä	RAKMK, kokonaisvarmuusluku menetelmä	Eurokoodi, osavarmuusluku menetelmä
Pohjatutkimus	B3 ja EN 1997-1	SFS-EN 1997-1 ja SFS-EN 1997-2
Paalutusluokat	Vaativuusluokat A ja AA Paalutusluokat PL3, PL2, PL1	Seuraamusluokitus CC3-CC1 Geotekninen luokitus GL1-GL3 Paalutustyöluokat PTL1-PTL3
Paalumerkintä	Valmistaja, valupäivä, paalun tyyppi, pituus, paino, tarkastetun valmistuksen toimitusmerkki	CE-merkintä
Betoni	K45 (C35/45), K50 (C40/50)	C35/45, C40/50
Betoniteräs	A500HW, A700HW, B500K, B700K	A500HW, A700HW, B500K, B700K
Paalunvarusteet	Kalliokärjet, maalevyt, mekaaniset jatkoskappaleet	Kalliokärjet, maalevyt, mekaaniset jatkoskappaleet
Paalun geotekninen mitoitus	Geotekninen kantavuus: keskeinen puristusjäännitys, paalutuskaavat R_m	Geotekninen kestävyys: suositus dynaaminen koekuormitus ja laskenta korrelaatiokerroimien avulla, $R_{c,d}$. Voidaan myös käyttää paalutuskaavoja. Dynaamista koekuormitusta käyttämällä saadaan samalle paalulle parempi ja luotettavampi geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo $R_{c,d}$. (3.3.4)
Paalun rakenteellinen mitoitus	Puristus, lyönti, nurjahdus, veto, taivutus, leikkaus	Puristus, lyönti, nurjahdus, veto, taivutus, leikkaus

Rakennesuunnitelma	Paalujen sijaintipiirustus, katkaisutapa ja tarkkuus, paaluperustuspiirustus, rakennelaskelmat	Paalujen sijaintipiirustus, katkaisutapa ja tarkkuus, paaluperustuspiirustus, rakennelaskelmat
Paalun katkaisu	50 mm anturan alapintaa ylempää	50 mm anturan alapintaa ylempää
Keskiöetäisyydet	Kappale 5.	Kappale 5.
Paalun reunaetäisyys anturasta	Kappale 5.	Kappale 5.
Paalutustyönjohtaja	RakMk osa A1, maakäyttö- ja rakennuslaki, teknillinen- tai korkeakoulututkinto ja useamman vuoden työkokemus paalutuksesta.	RakMk osa A1, maakäyttö- ja rakennuslaki, teknillinen- tai korkeakoulututkinto ja useamman vuoden työkokemus paalutuksesta.
Paalutuskalusto	Junttan PM 20 LC. SFS-EN 996	Junttan PM 20 LC. SFS-EN 791 ja SFS-EN 996
Paalun asennus	Painuma 100-150 mm/lyönti	Painuma 100-150 mm/lyönti
Ympäristön huomiointi	Tärinä, melu, pohjavesi, maan huokosveden nousu, muut paalut, johdot, kaivannot, vesistöalueet, ympäröivät rakennukset.	Tärinä, melu, pohjavesi, maan huokosveden nousu, muut paalut, johdot, kaivannot, vesistöalueet, ympäröivät rakennukset.
Laadunvarmistus	Paalutusluokassa II tukipaalujen loppulyöntiehdot tarkistetaan paalutuskaavojen avulla, painopisteiden ja sijaintien tarkastaminen. Paalujen ja ympäristön mittapisteiden siirtymien seuranta. RakMk A1 määrittelee työnjohdon paalutukselle.	Tukipaaluille suositellaan dynaamista koekuormitusta, loppulyöntiehtojen määrittämiseksi, töitä valvotaan standardin EN 1997-1 mukaisesti. Materiaalien laadunvalvonta standardin SFS-EN 206-1 mukaisesti. Paalujen lopullisen sijainnin mittaus ja painopisteiden laskeminen.
Työturvallisuus	Paalutuskaluston täytyy täyttää standardin SFS-EN-996 vaatimukset.	Paalutuskaluston täytyy täyttää standardin SFS-EN-996 ja SFS-EN-791 vaatimukset.
Dokumentointi	Rakennustyön asiakirja, paalutustyön tarkastusasiakirja.	Rakennustyön asiakirja, paalutuspyytäkirja kaksiosainen: yleinen osa ja paalukohtainen osa. Dokumentointi standardin SFS-EN 1997-1 mukaisesti.
Suunnittelija	Suunnitellut paalut lyödään ja lisätään tarvittaessa. Geoteknisen kantavuuden määrittäminen paalutuskaavoilla.	Koepaalutus → dynaamiset koekuormitukset → geoteknisen kestävyuden määrittäminen → paalujen lisääminen tai vähentäminen. Nämä vaiheet huomioitava suunnitteluvaiheissa.

8 Yhteenveto

Tässä insinöörityössä oli tarkoituksena tehdä kirjallisuustutkimus nykyisen paalutusohje 2011:n soveltamiseksi teräsbetonisen lyöntipaaluperustuksen suunnittelussa ja mitoittamisessa. Työssä selvitettiin eri suunnitteluprosessin vaihtoehtoja. Työssä tehtiin myös vertailua nykyisen paalutusohjeen ”PO-2011” ja edellisen lyöntipaalutusohjeen ”LPO-2005” keskeisistä asioista. Vertailun tarkoituksena oli selvittää, mitkä asiat ovat muuttuneet eurokoodin tulon mukana.

Haastavin asia eurokoodin suunnitteluprosessissa on geoteknisen luokan määrittäminen ja sen vaikutus geotekniseen kestävyYTEEN. Myös suunnitteluvaiheessa on tehtävä rakennuspaikan alueen jakaminen yhdenmukaisiin alueisiin. Tämän asian osalta valitaan mittauksen määrä, josta saadaan vastaavasti ξ - korrelaatiokertoimet. Kaiken kaikkiaan aikoinaan ennalta ehdottomiksi määritetyt paalutusluokkakohtaiset sallitut paalukuormat ovat muuttuneet riippuvaiseksi monista tekijöistä suunnittelussa ja urakoinnissa.

Yksi keskeisistä asioista oli selvittää mikä on yksi oikea menettely paalun geoteknisen kantavuuden määrittämiseksi. Eurokoodi korostaa staattista koekuormitusmenetelmää. Tämä johtuu eurokoodin laatijoiden kokemustaustoista. Tukipaalu, jonka geoteknien kestävyys osoitetaan lyöntityön vastuksen avulla, oli suhteellisen vieras Eurokoodin laatijoille. Eurokoodia laadittaessa ei ole huomioitu pohjoismaita, jolloin pohjoismaiden käytännöt jäivät kirjautumatta. Järkevin ja luotettavin menetelmä määrittellä tukipaaluille geotekninen kantavuus on dynaaminen koekuormitus. Siltarakenteissa ja vaativissa kohteissa näin toimitaan aina. Jos kohteessa on helpot olosuhteet ja pienet paalukuormat, niin voidaan käyttää loppulyöntiehtomenetelmää.

Työssä selvisi, että ehjään kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen tukeutuvan tukipaalun geotekninen kantavuus on paalun rakenteellinen kestävyys. Työssä on käyty esimerkiksi esittämällä läpi paalun rakenteellisen kantavuuden mitoitusprosessi.

Paalutusohjeiden vertailussa todettiin, että merkittävästi uutta ei ole tullut paaluttajan kannalta. Muutokset ohjeiden välillä koskevat ensisijaisesti paaluvalmistajia ja suunnittelijoita. Luokkamäärittelyt ovat menneet uusiksi. Uudet suunnitelmat ovat erilaisia verrattuna vanhoihin, jossa oli ainoastaan annettu paalukuorma ja kokonaisvarmuusker-

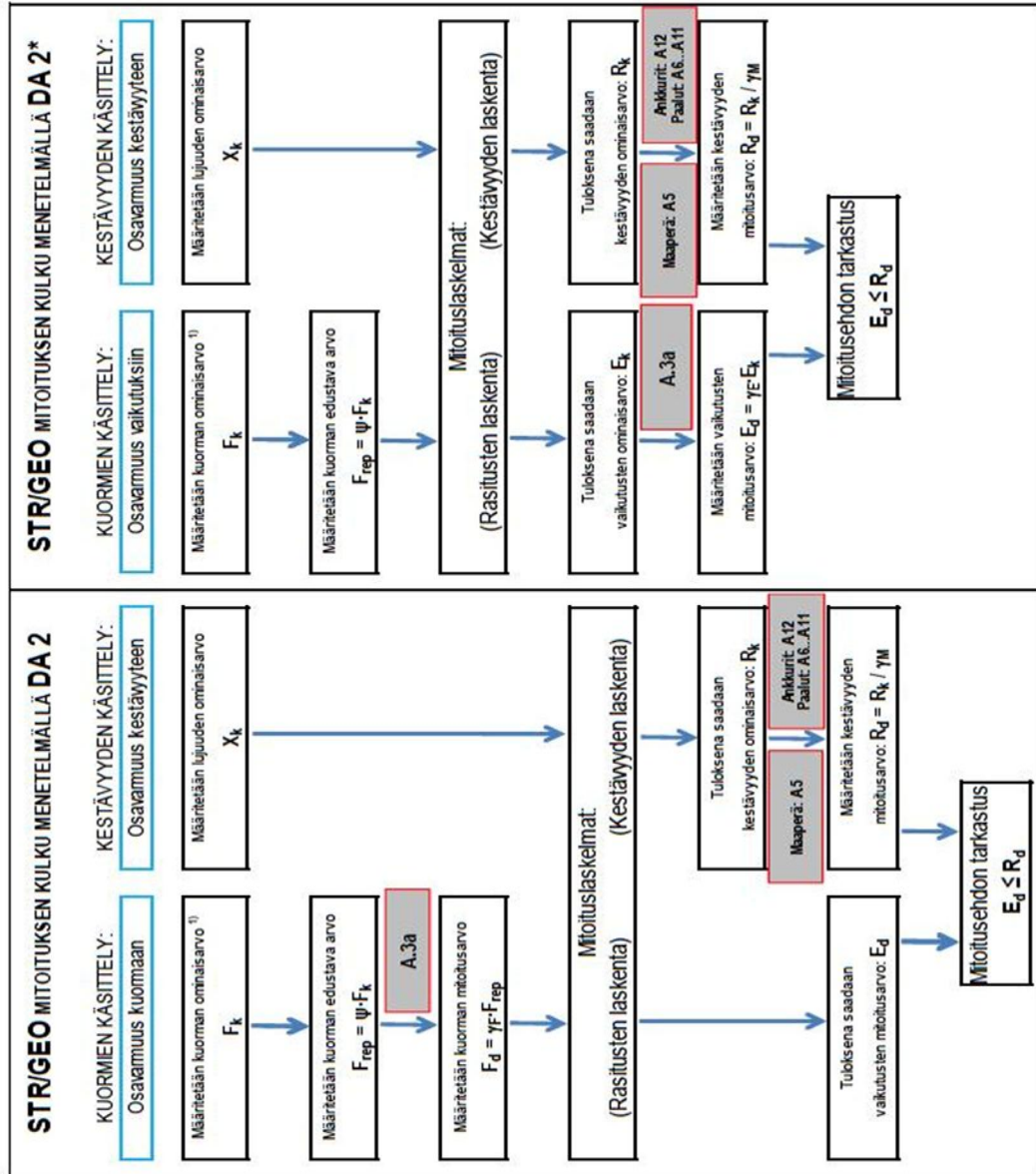
toimilla saatiin vaadittu kantavuus paaluille. Eurokoodissa varmuus kohdistetaan sekä kuorma- että kestävyyspuolelle, jolloin eurokoodissa on useampia kertoimia.

Erokoodien useat kertoimet ja uusi terminologia saattavat vaikuttaa suunnittelijoista epäselviltä. Tämä saattaa johtaa siihen, että suunnitelmissa viitataan väärin ohjeisiin tai että suunnitelmat ovat puutteellisia. Suunnitelmissa termit saattavat sekoittaa, ja paaluille asetettavat vaatimukset (esimerkiksi paalun murtokestävyys dynaamisessa kuormituksessa) saattavat jäädä epäselviksi.

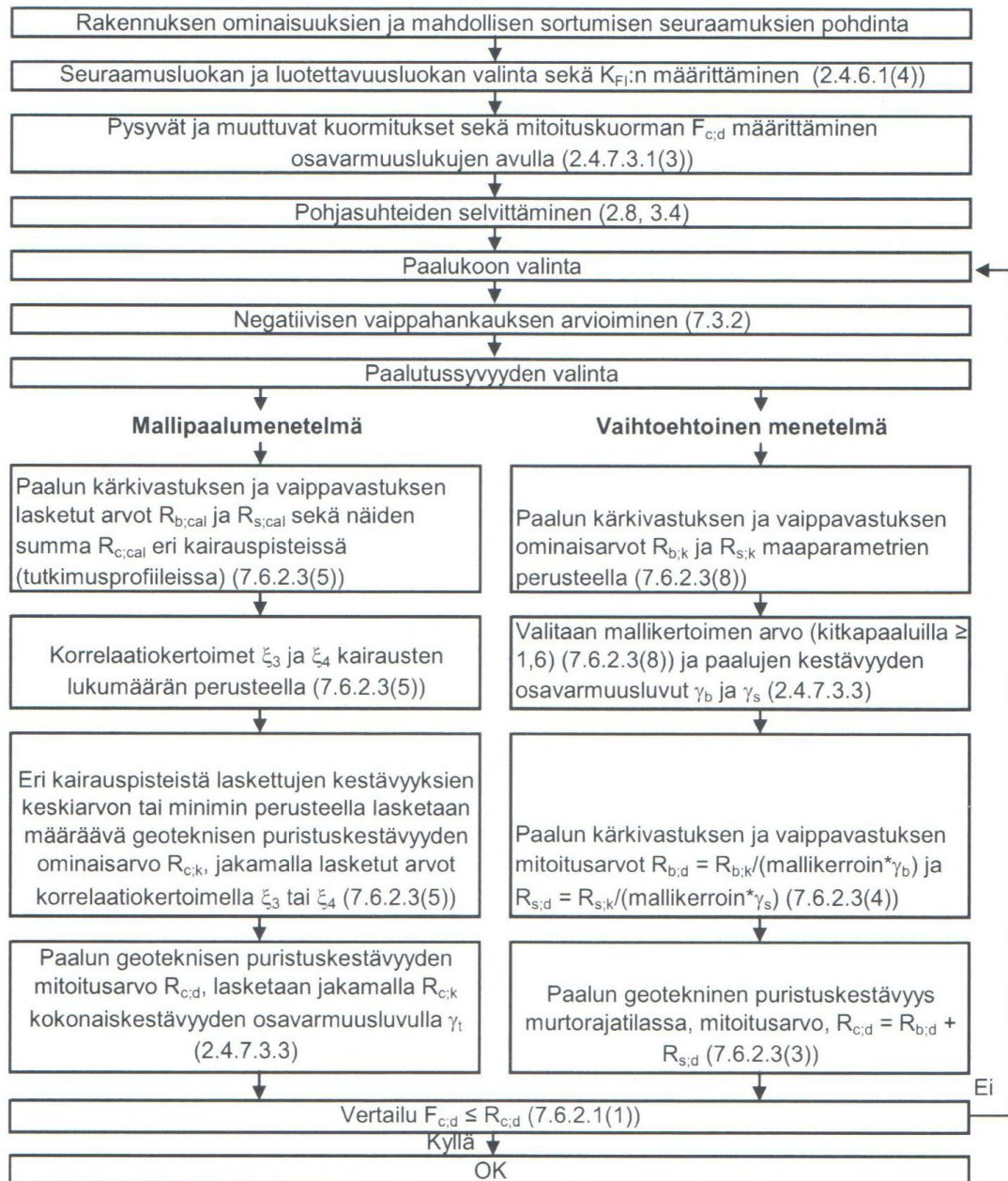
Lähteet

- 1 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2011. RIL 254-2011 Paalutusohje 2011. Saarijärven Offset Oy.
- 2 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2005. RIL 223-2005, Lyöntipaalu- tusohje LPO-2005. Hakapaino Oy.
- 3 Suomen standardisoimisliitto SFS. 2006. SFS-EN 1990 Eurokoodi, Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 4 Ympäristöministeriö. 2007. Eurokoodi 7, Geotekninen suunnittelu, Kansallinen liite. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 5 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2009. RIL 207-2009, Geotekninen suunnittelu eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Hansaprint Oy.
- 6 Jääskeläinen, Raimo. 2009. Pohjarakennuksen perusteet. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- 7 Liikennevirasto. 2013. Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7, siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki: Liikennevirasto.
- 8 Rantamäki, Martti. Tammirinne, Markku. 2000. Pohjarakennus 465. Helsinki: Ota- tieto.
- 9 Törnqvist, Jouko. 2011. Betoniteollisuuden paaluseminaari 2011. VTT.
- 10 Honkala, Anssi. 2013. PO-2011 valvojan näkökulmasta. Tampere: Viakon Infra Oy.

Mitoitusprosessin luku mitoitusmenetelmillä DA2 ja DA2*. [7 s. 20.]



Laskentakaavio: Paalun puristuskestävyys pohjatutkimustulosten perusteella. [5. S. 143.]



Numerot suluissa viittaavat RIL 207-2009 lukuun.

Dynaamisen koekuormituksen kulku. [1 s. 74.]

