

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennustekniikka

Talonrakennustekniikka

2016

Tuomas Koivula

# TARVITTAVAN PAALUMÄÄRÄN LASKENTA

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka | Talonrakennustekniikka

Kevät 2016 | 69 + 5

Ohjaajat: Vesa Virtanen, Elmeri Kryssi

Tuomas Koivula

## TARVITTAVAN PAALUMÄÄRÄN LASKENTA

Tarvittavan paalumäärän arviointi ja paaluperustuksen kestävyys varmistaminen riippuvat oleellisesti yksittäiseen paaluun kohdistuvan kuormituksen ja paalun kestävyys välisestä suhteesta.

Tässä opinnäytetyössä on tarkasteltu pystysuorasti kuormitetun, pystysuoran lyömällä asennetun tukipaalun puristuskestävyyden määrittämisen perusteita ja käytäntöjä Paalutusohjeen 2011 sekä eräiden paaluvalmistajien mitoitustaulukoiden perusteella. Paalun puristuskestävyyden tarkastelun näkökulmat liittyvät asennuksen aikaisten paalun rasitusten huomioimiseen, kantavan maapohjan kestävyys varmistamiseen sekä käytön aikaisen paalun nurjahduskestävyyden määrittämiseen.

Tarkastelun kohteena ovat myös Eurokoodiin perustuvan suunnittelujärjestelmän mukaiset paaluun käytön aikana kohdistuvien kuormien kuormitusyhdistelyt. Tavanomaisessa monikerrosrakentamisen kohteessa paaluun yläpuolisista rakenteista kohdistuvien pystysuorien kuormien lisäksi kuormitusyhdistelyjen tarkasteluissa on huomioitu paaluun maan kokoonpuristumisesta aiheutuva lisäkuorma, negatiivinen vaippahankaus.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää Eurokoodin ja Paalutusohjeen 2011 mukaisten kuormitusyhdistelyjen sekä paalun kestävyys määrittämisen perusteita ja käytäntöjä. Tarvittavan paalumäärän arviointia ja paaluperustuksen kestävyys varmistamista koskeviin määräyksiin ja ohjeisiin painottuvan kirjallisuustutkimuksen lisäksi on laadittu kehitysprojektina Optiplan Oy:lle Excel-laskentapohja, joka määrittää syötettyjen kuormitus-, paalu- ja maaperätietojen perusteella vaadittavan paalumäärän.

ASIASANAT:

Paaluperustukset, suunnittelu, kestävyys, kuormitus, taulukkolaskenta

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering | Structural Engineering

Spring 2016 | 69 pages, appendices 5 pages

Instructors: Vesa Virtanen, Elmeri Kryssi

Tuomas Koivula

# AN ANALYSIS OF THE REQUIRED NUMBER OF PILES

The assessment of the required number of piles and the durability of pile foundations essentially relates to the ratio between pile loads and the durability of a pile.

In this thesis the basics of determining the compressive strength of a driven pile are studied according to Paalutusohje 2011. In addition, practices of utilizing pile capacity tables provided by certain pile manufacturers are examined. The methods of combining pile loads according to Eurocodes are also studied. More closely, the perspective of this analysis is related to vertical end-bearing piles under vertical loads.

The objective of this thesis is to discuss the basics and practices relating to the assessment of the required number of piles and the durability of pile foundations. In addition to a literary research relating to relevant design guides and regulations, an Excel based calculation table was developed for Optiplan Oy to determine the required number of piles based on the input data about pile, soil and pile loads.

## KEYWORDS:

Foundations, piles, load, compressive strength, spreadsheet

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTIA</b>	<b>14</b>
2.1 Pohjatutkimukset	14
2.2 Paaluja yhdistävät rakenteet	21
<b>3 KÄYTÖN AIKAISET AKSIAALISET PAALUKUORMAT</b>	<b>24</b>
3.1 Kuormien laskenta perustuksille	24
3.2 Kuormitusyhdistelmät	26
3.3 Aksiaalisten kuormien jakautuminen paaluille	33
<b>4 TUKIPAALUN PURISTUSKESTÄVYYS</b>	<b>35</b>
4.1 Kestävyyden määrittämisen suunnitteluperusteet	36
4.1.1 Paalun geotekninen puristuskestävyys	38
4.1.2 Asennuksen aikainen paalun lyönnin- ja momentinkestävyys	44
4.1.3 Paalun nurjahdusmurtokestävyys	47
4.2 Kestävyyden määrittäminen paaluvalmistajien mitoitustaulukoiden perusteella	58
<b>5 TARVITTAVAN PAALUMÄÄRÄN LASKENTA</b>	<b>61</b>
<b>6 YHTEENVETO JA POHDINTA</b>	<b>64</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>67</b>

## LIITTEET

- Liite 1. Vaadittavan paalumäärän laskentapohjan perusnäkökulma
- Liite 2. Vaadittavan paalumäärän laskentapohjan yhteenvetönäkökulma
- Liite 3. Paalun RR75 vertailulaskelma Ruukin RrPileCalc-mitoitusohjelmalla
- Liite 4. Teräsbetonipaalujen taulukoidut puristuskestävyyksien mitoitussarvot
- Liite 5. Teräspaalujen taulukoidut puristuskestävyyksien mitoitussarvot

## KAAVAT

Kaava 1. Paaluperustuksen puristuskestävyyden mitoitusehto.	23
Kaava 2. Rakenteen tai rakenneosien kestävyden (STR, sarja B) mitoituskava.	27
Kaava 3. Rakenteen tai rakenneosien kestävyden (STR, sarja B) mitoituskava.	27
Kaava 4. Kerrosvähennyksen määrittely.	30
Kaava 5. Negatiivisen vaippahankauksen tarkasteluehto.	31
Kaava 6. Negatiivisen vaippahankauksen tarkasteluehto.	31
Kaava 7. Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo.	40
Kaava 8. Paalun geoteknisen puristuskestävyyden ominaisarvo.	40
Kaava 9. Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo.	43
Kaava 10. Maan alustaluku.	51
Kaava 11. Maan alustaluku.	51
Kaava 12. Sivuvastuksen ääriarvo.	52
Kaava 13. Sivuvastuksen ääriarvo.	52
Kaava 14. Pitkäaikaisyhdistelmä.	53
Kaava 15. Vaadittava paalumäärä.	62
Kaava 16. Vaadittava paalumäärä.	62

## KUVAT

Kuva 1. Teräsbetonipaaluihin ja teräspaaluihin liittyviä käsitteitä.	8
Kuva 2. Paalujen ryhmittely toimintatavan mukaan.	9
Kuva 3. Paaluun käyttöiän aikana kohdistuvia kuormitustilanteita.	10
Kuva 4. Paaluun kohdistuvat ulkoiset kuormitukset.	11
Kuva 5. Geoteknisen luokan valintaperusteet.	16
Kuva 6. Paaluanturan ristikkomallin yksinkertainen tapaus ja taivutusteorian periaate anturan mitoituksessa.	21
Kuva 7. Kuormien ominaisarvojen määrittelyä perustuksille.	24
Kuva 8. Paaluryhmän epäkeskeinen kuormitus.	33
Kuva 9. Paalutusohjeen 2011 mukaiset suurimmat sallitut asennuksen aikaiset reunajännitykset paalutustyöluokittain.	46
Kuva 10. Winklerin alusta.	48
Kuva 11. Paalun sivupaine-siirtymäyhteys hienorakeisessa maassa.	50
Kuva 12. Paalun nurjahduskestävyyden laskentamalli hienorakeisessa maakerroksessa.	56
Kuva 13. Teräspaalun RR75 nurjahduskestävyys.	60
Kuva 14. Pystysuorien paalukuormien lähtötietojen syöttö laskentapohjan perusnäkyvässä.	63

## TAULUKOT

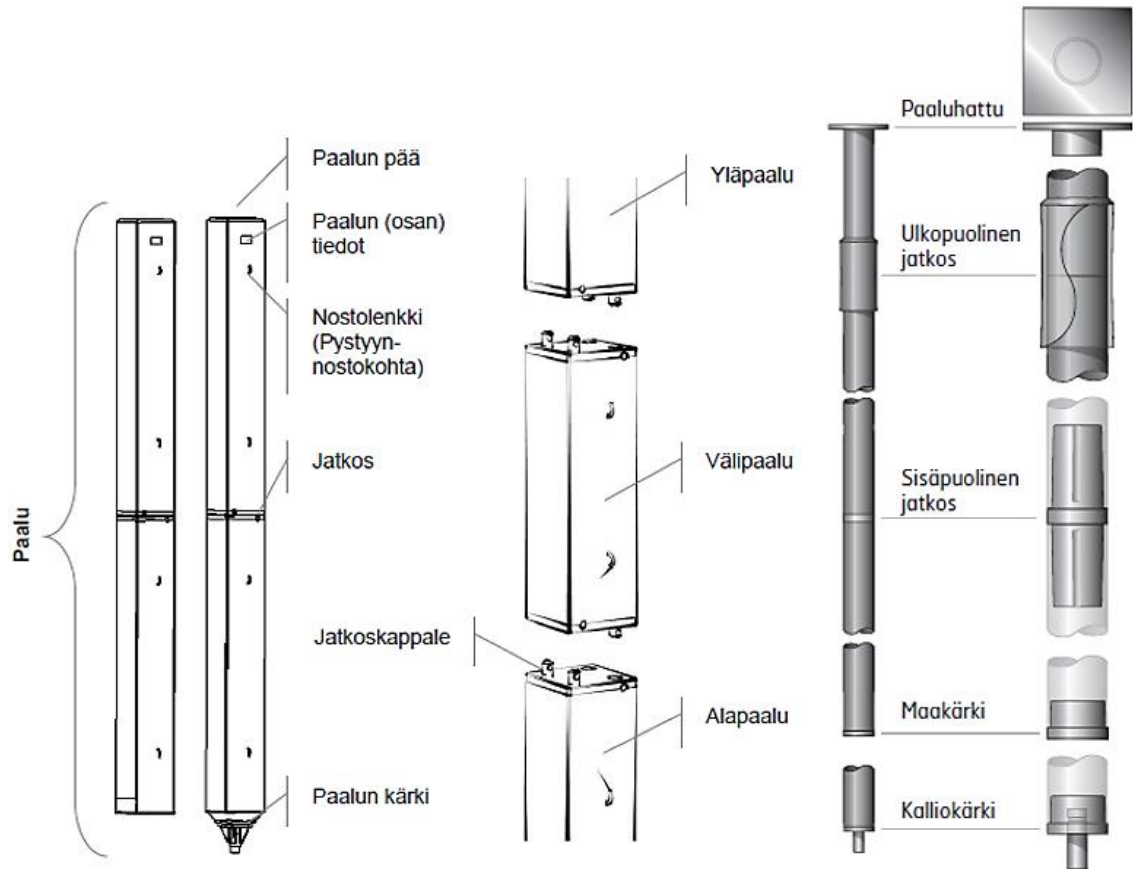
Taulukko 1. Seuraamusluokan ja kuormakertoimen arvon välinen riippuvuus.	27
Taulukko 2. Muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet.	28
Taulukko 3. Kuormien tai kuormien vaikutusten osavarmuusluvut (STR/GEO).	32
Taulukko 4. Syrjäyttävien paalujen kestävyysluvut osavarmuusluvut.	36
Taulukko 5. Maaparametrien osavarmuusluvut (STR/GEO).	36
Taulukko 6. Tukirakenteiden kestävyysluvut osavarmuusluvut.	37
Taulukko 7. Korrelaatiokertoimet ominaisarvojen johtamiseksi dynaamisista koekuormituksista.	37
Taulukko 8. Paalutustyöluokat tavanomaisessa rakentamisessa.	45
Taulukko 9. Geoteknisen kestävyysluvun ominaisarvon maksimiarvo ja suurin keskeinen lyöntivoima.	45
Taulukko 10. Jatkamattoman paalun suurin asennuksen aikainen vetovoima.	46
Taulukko 11. Paalun geometrinen alkutaipuma nurjahdustarkastelussa.	57

# 1 JOHDANTO

Perustaminen paalujen varaan voi tulla kyseeseen, kun rakennuksen maanvarainen perustaminen ei ole tarkoituksenmukaista perustettavan rakenteen käyttökelpoisuuden, taloudellisten tai työtekniisten seikkojen tai esimerkiksi ympäröivien rakenteiden asettamien rajoitusten vuoksi (Rantamäki & Tammirinne 1979, 43; Jääskeläinen 2009, 52). Selkeä ja luja kalliopinta on Suomen ja muiden pohjoismaiden geologisissa olosuhteissa tyypillisesti helpommin saavutettavissa taloudellisilla paalupituuksilla esimerkiksi keski-eurooppalaisiin olosuhteisiin verrattuna. Siksi paalutettavissa kohteissa Suomessa tulevat useimmiten sovellettavaksi tukipaaluratkaisut, joita käytetäänkin lähes yksinomaan talonrakentamisessa. (Jääskeläinen 2009, 54; RIL 254-2011, 57, 58.)

Paalulla tarkoitetaan kuormia siirtävää maassa olevaa hoikkaa rakenneosaa (RIL 254-2011, 19). Paaluja voidaan ryhmitellä niiden toimintatavan, asennustavan, valmistustavan ja niissä käytettävän materiaalin mukaan sekä jakamalla paalut eurooppalaisten toteutusstandardien mukaisesti joko maata syrjäyttäviin tai kaivettaviin paaluihin (Rantamäki & Tammirinne 1979, 43; RIL 254-2011, 15). Tämän opinnäytetyön tarkastelun kohteena ovat maata syrjäyttävät, lyömällä asennettavat tukipaalut, jotka on valmistettu tehdasolosuhteissa joko teräksestä tai teräsbetonista.

Kuvassa 1 on havainnollistettu tehdasvalmisteisia teräsbetoni- ja teräspaaluja sekä esitelly kyseisiin paaluelementteihin liittyviä tyypillisiä käsitteitä.

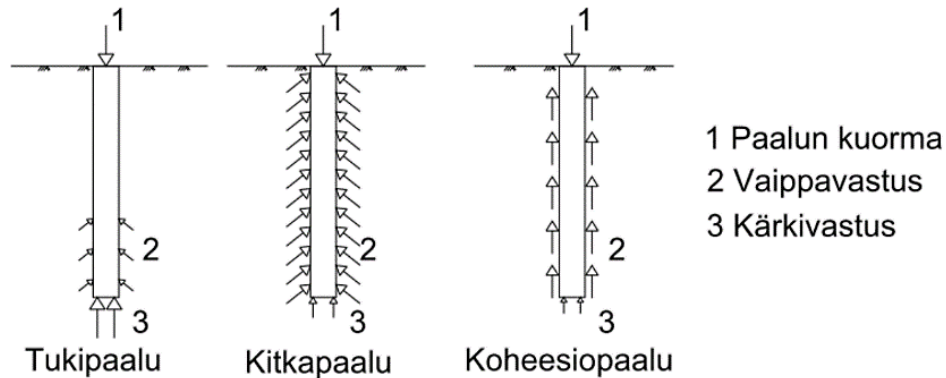


Kuva 1. Teräsbetonipaaluihin (vasemmalla) ja teräspaaluihin liittyviä käsitteitä (Rakennusteollisuus RT 2013, 5; SSAB 2015, 5).

Kuvan mukaiset pieniläpimittaiset teräsputkipaalut ovat halkaisijaltaan 75–220 mm ja seinämävahvuudeltaan 6,3–12,5 mm, teräsbetonipaalut ovat sivumitaltaan 250, 300 tai 350 mm. Talonrakentamisen kohteissa kyseiset paalutuotteet soveltuvat paaluille tulevien kuormien perusteella tyypillisesti pientalojen lisäksi monikerrosrakentamisen kohteisiin kerrosluvun ollessa noin 3–8. (Rakennusteollisuus RT 2013, 3, 4; SSAB 2015, 5, 14.) Tämän opinnäytetyön yhteydessä on käytännöllisistä syistä johtuen rajoitettu tarkastelemaan vain yhden teräspaaluvalmistajan paalutuotteilleen esittämää suunniteluohjetta (SSAB 2015, 1). Teräsbetonipaalujen osalta useiden paaluvalmistajien tuotteita koskevat tiedot on puolestaan koottu yhteiseen ohjeeseen (Rakennusteollisuus RT 2013, 2). Opinnäytetyön tarkoituksena ei kuitenkaan ole määrättyjen paaluvalmistajien paalutuotteiden esittely tai suosiminen, eikä yleensäkin eri paalumateriaalien tai paalutyypin välinen vertailu.



Tukipaalun kärki tukeutuu kallioon tai kiinteän maapohjaan (Rantamäki & Tamminne 1979, 43). Sen geoteknistä toimintatapaa on havainnollistettu kuvan 2 vasemmassa laidassa esitetyn periaatekuvan avulla.



Kuva 2. Paalujen ryhmittely toimintatavan mukaan (Rasi-Koskinen 2015, 13).

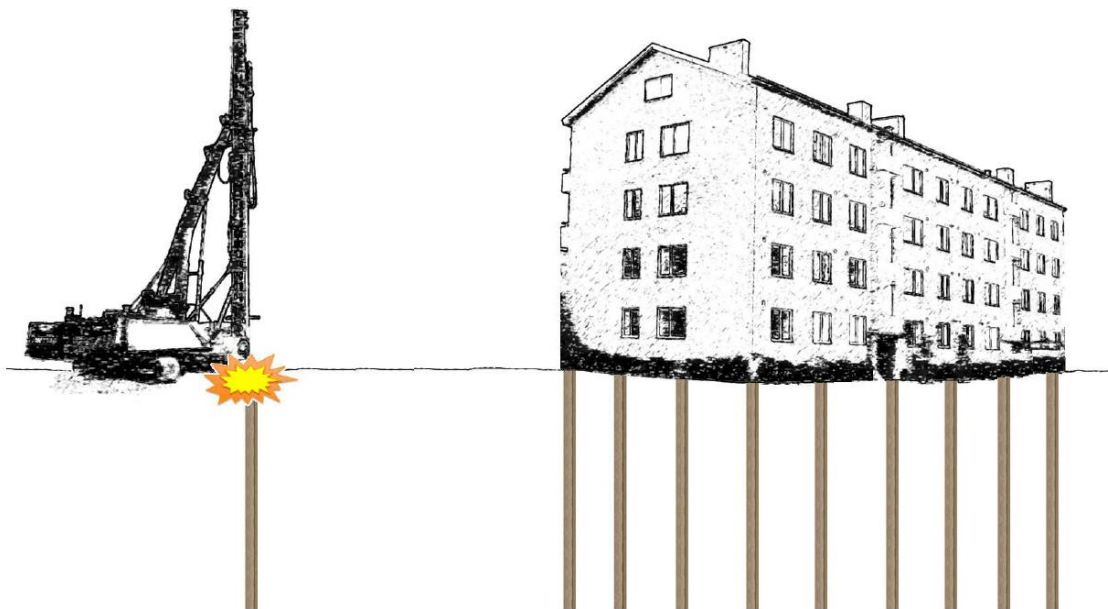
Esitetyn kuvan periaatteiden mukaisesti tukipaalu siirtää paalukuormia kallioon tai tiivisrakenteiseen maakerrokseen pääasiassa paalun kärkeen kohdistuvan puristuksen välityksellä, kun taas vaippavastuksen välityksellä paalua ympäröivään maakerrokseen mahdollisesti siirtyvän kuorman osuus on yleensä merkityksetön (Jääskeläinen 2009, 53; RIL 254-2011, 20; Rasi-Koskinen 2015, 12). Vertailun vuoksi kitka- ja koheesiopaa-luja käytettäessä kärkivastuksen merkitys on vähäisempi, sillä ne siirtävät pääosan kuormasta maaperään paalun vaippapinnan ja viereisen maan välisen adheesio-avulla (koheesiopaalu) tai vaippapinnalla syntyvän kitkan ja adheesio-avulla (kitkapaalu) (RIL 254-2011, 18).

Maata syrjäyttävillä paaluilla viitataan paaluihin, joita ei asenneta maahan kaivamalla ja joita asennettaessa ei poisteta maata joitakin poikkeustapauksia lukuun ottamatta. Lyömällä asentamisen sijaan maata syrjäyttävän paalun asennus voisi tapahtua vaihtoehtoisesti myös täryttämällä, puristamalla, ruuvaamalla tai mainittuja menetelmiä yhdistämällä. (RIL 254-2011, 15.)

Lyömällä asennettavan paalun asennus suoritetaan tavallisissa paalutuksissa tyypillisesti hydraulijärkälettä käyttävän paalutuskoneen avulla (Jääskeläinen 2009, 79). Tässä opinnäytetyössä paalun asennusta on tarkasteltu lähinnä paalun asennuksen aikaisen rakenteellisen kestävyuden määrittämisen sekä paalua ympäröivän maa- ja kallioperän kuormankantokyvyn (Paalutusohjeen 2011 käsittein ilmaistuna *paalun geoteknisen kes-*

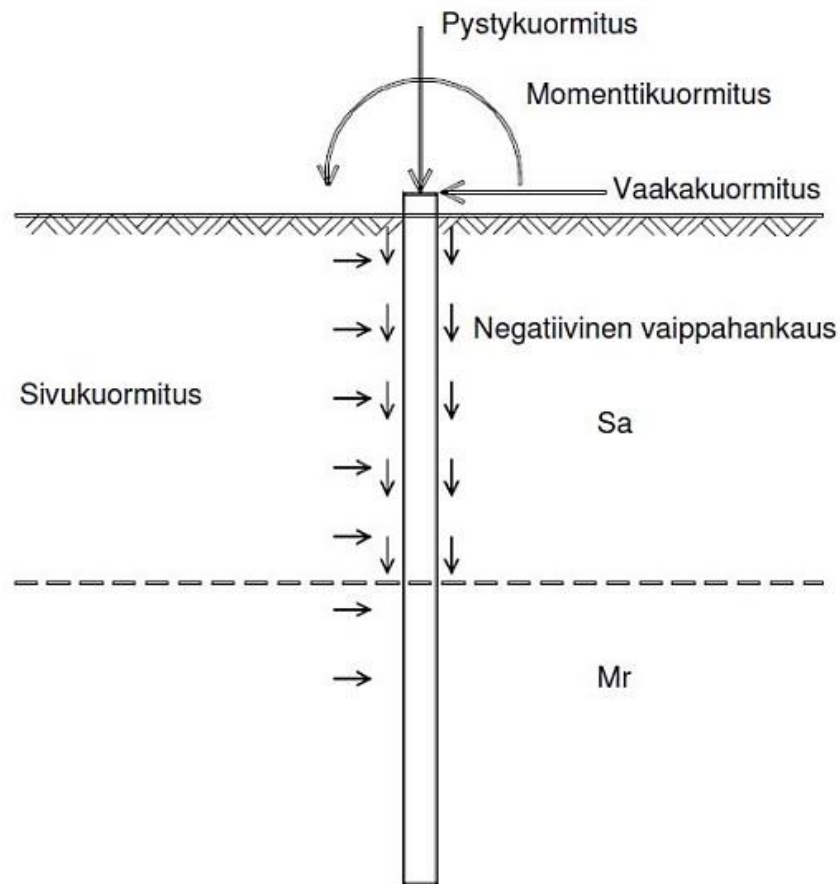
*tävyvyyden*) varmistamisen näkökulmiin liittyen. Paalun geoteknisen kestävyuden varmistamista on tarkasteltu ensisijaisesti asennuksen loppuvaiheessa suoritettavien loppulyöntien kannalta, sillä paaluvalmistajien paalutuotteilla esittämät taulukoidut kestävyudet perustuvat paaluille määritettyihin loppulyöntiohjeisiin (Rakennusteollisuus RT 2013, 9; SSAB 2015, 15).

Paalun on kestävä kaikki siihen olennaisesti kohdistuvat rasitukset käyttökänsä aikana: sekä asennuksen aikaiset että käytön aikaisista kuormista aiheutuvat rasitukset (RIL 254-2011, 98).



Kuva 3. Paaluun käyttöänsä aikana kohdistuvia kuormitustilanteita (Haavisto 2015, 11).

Edellisessä kuvassa havainnollistetuissa tilanteissa paaluun kohdistuvat kuormitukset vaihtelevat luonteeltaan asennuslyöntien millisekuntien kestoista dynaamisista kuormituksista käytön aikaisiin kymmeniä vuosia kestäviin staattisiin kuormituksiin (Haavisto 2015, 11). Käsitteiden tasolla kuorman dynaamisuus ja staattisuus liittyvät kuorman aiheuttamaan rakenteen kiihtyvyyteen (SFS-EN 1990, 32, 34). Paaluun kohdistuu rasituksia edellä mainittujen tilanteiden lisäksi myös esimerkiksi valmistuksen, kuljetuksen ja käsittelyn aikana (RIL 254-2011, 98). Paaluun käytön aikana ylärakenteista kohdistuvista kuormista on tarkasteltu ensisijaisesti aksiaalisia kuormituksia sekä paaluun maan kokoonpuristumisesta aiheutuvaa kuormaa, niin sanottua negatiivista vaippahankausta, jotka on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Paaluun kohdistuvat ulkoiset kuormitukset (RIL 223-2005, 46).

Aksiaalinen paalukuorma (kuvassa esitetty pystysuoraan paaluun kohdistuva pystykuormitus) ja negatiivinen vaippahankaus ovat paaluun kohdistuvia ulkoisia kuormia. Muita ulkoisia kuormituksia ovat paalun yläpään kohdistuvat momentti- ja vaakakuormitukset sekä esimerkiksi maan liikkeistä aiheutuvat sivukuormitukset (RIL 254-2011, 98). Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 107) mukaan paalu on lähtökohtaisesti mitoitettava kaikille ulkoisista kuormituksista siihen mahdollisesti kohdistuville yhdistetyille rasituksille, eli puristus-, leikkaus-, taivutus- ja vääntörasituksille. Vedettyjen paalujen mitoitukseen on omat ohjeistuksensa (RIL 254-2011, 79).

Kun rakennuksen rungolta tulevia vaakavoimia ei tarvitse huomioida, tarvittava paalumäärä voidaan Leskelän (2008, 454) mukaan laskea yksinkertaisesti perustuksen normaalivoiman ja epäkeskisyysmomentin avulla huomioimalla yhden paalun kantavuus (Paalutusohjeen 2011 käsitteillä ilmaistuna paalun *kestävyys*). Paalumäärän arvioinnin suunnitteluprosessiin vaikuttavat oleellisesti paalutustyön yhteydessä syntyvät paalujen sijaintipikkeamat: esisuunnittelun mukaisen paalumäärän riittävyys on tarkistettava

paalujen todellisen sijainnin selvittyä (Leskelä 2008, 457). Tämä paaluperustuksen suunnittelun vaiheittain etenevä luonne asettaa omat haasteensa tarvittavan paalumäärän arviointiin esimerkiksi paalujen sijaintipoikkeamien ja kuorman epäkeskisyyshmomentin vaikutusten osilta.

Tässä opinnäytetyössä on tarkasteltu paalumäärän arviointiin vaikuttavia paalukuormia ja paalujen kestävyksiä Eurokoodien ja Suomen Rakennusinsinöörien liiton (RIL) Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011) mukaisesti. Paalutusohje 2011 on ilmestyessään vuonna 2011 korvannut aiemmat paalutusohjeet SPO-2001 (RIL 212), LPO-2005 (RIL 223) ja PPO-2007 (RIL 230) eurokoodijärjestelmän mukaan suunniteltavien kohteiden suunnittelussa (RIL 254-2011, 3, 4). Teoksessa on esitetty suunnittelun perusteiden lisäksi myös paalutuksen toteutuksen laatuvaatimukset sekä paalutyypikohtaiset suunnittelun ohjeet. Paalutusohje 2011 perustuu eurokoodijärjestelmään. (RIL 254-2011, 3, 27.) Eurokoodeilla tarkoitetaan kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2014, 1). Standardeissa on esitetty rakenteiden ja rakenneosien suunnittelua varten yhteiset rakennesuunnittelukäytännöt, jotka perustuvat rajatilamenetelmään ja sen yhteydessä käytettävään osavarmuuslukumenetelyyn (SFS-EN 1990, 14, 16).

Eurokoodi-suunnittelujärjestelmän rajatiloilla tarkoitetaan yleisesti tiloja, joiden ylittämisen jälkeen rakenne ei kykene täyttämään asianomaista mitoituskriteeriä; murtorajatilat liittyvät ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen, käyttörajatilat liittyvät tyypillisesti ihmisten mukavuuteen tai rakennuskohteen ulkonäköön (SFS-EN 1990, 28, 52, 54). Paaluperustuksen suunnittelussa tarkastettavat rajatilat on kokonaisuudessaan esitetty Paalutusohjeen 2011 osan 1 kohdassa 4.1 (RIL 254-2011, 47) ja aksiaalisen paalukuormituksen osalta kohdassa 4.5.1.1. (RIL 254-2011, 58). Kyseeseen tulevat rajatilat tulee aina huomioida soveltuvin osin suunniteltavan kohteen ominaisuuksien perusteella (SSAB 2015, 15). Tässä opinnäytetyössä on rajoitettu aksiaalisesti kuormitetun paalun ja paaluperustuksen puristuskestävyyden murtorajatilan tarkasteluun.

Eurokoodijärjestelmän osavarmuuslukumenetelmää käytettäessä osoitetaan, ettei mitään rajatilaa ylitetä missään kyseeseen tulevassa mitoituslanteessa (SFS-EN 1990, 70). Mitoituslanteet edustavat todellisia olosuhteita tietyllä aikavälillä, ja ne luokitellaan normaalisti vallitseviin, tilapäisiin, onnettomuus- ja maanjäristysmitoitustilanteisiin (SFS-EN 1990, 26, 52). Osavarmuuslukumenetelmän mukaisissa mitoituslaskelmissa käytettävät paaluun ylärakenteista kohdistuvien kuormien, geoteknisten kuormien, tarkastelta-

vien paalumateriaalien, paalun ja maan kestävyuden sekä maan parametrien osavarmuusluvut on määritetty asianomaisissa standardeissa SFS-EN 1990...1997. Sekä paalun rakenteen mitoitus että geotekninen mitoitus perustuvat kyseiseen osavarmuuslukumenetelmään (RIL 254-2011, 31).

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää tarvittavan paalumäärän laskennassa kyseeseen tulevien kuormitusyhdistelmien sekä paalun kestävyuden määrittämisen perusteita ja käytäntöjä nykyisessä Eurokoodin ja Paalutusohjeen 2011 mukaisessa paaluperustuksen suunnittelussa. Standardeissa ja suunnitteluohjeissa ei ole yleisesti esitetty taustatietoja tai selityksiä, jotka auttaisivat ymmärtämään niissä esitettyjä ohjeita tai sääntöjä (Leskelä 2008, 3). Aiheen yleistajuisen käsittelyn mahdollistamiseksi opinnäytetyössä esiteltyjen suunnitteluperusteiden ohessa onkin koettu tarpeelliseksi etsiä asiaan liittyvää taustatietoa alan vanhemmista oppi- ja käsikirjoista.

Paalutusohje 2011 on parhaillaan päivitystyön alla, ja päivityksestä on vastuussa Suomen Geoteknillisen yhdistyksen paalutustoimikunta (Betoniteollisuus ry 2016). Nykyiset ohjeet ovat niiden käyttöönoton jälkeen aiheuttaneet erilaisia rakenteiden suunnittelun tulkintoihin liittyviä epäselvyyksiä esimerkiksi teräsbetonipaalujen rakenteelliseen mitoitukseen liittyen. Mitoitusohjeiden selkeyttämiseksi Betoniteollisuuden käynnistämän tutkimuksen esiselvitysvaihe on valmis, ja sen yhteydessä on saatu myös muuta paalutusohjeuudistukseen liittyvää lisätietoa. (Haavisto & Laaksonen 2015.) Tämän opinnäytetyön asianmukaisissa kohdissa on ajankohtaisena lisätietona lyhyesti sivuttu joitain kyseisen tutkimuksen esiselvitysvaiheen tuloksia.

## 2 PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTIA

Paaluperustus ja sen varaan tulevat rakenteet suunnitellaan aina yhdessä. Paaluperustuksen rakennesuunnittelussa tulee yleisesti huomioida ja määrittää paaluanturoiden korkeusasema, paalujen sijainti- ja kaltevuustoleranssit, paalujen keskiöetäisyydet ja paaluanturan reunan etäisyys paalusta. Huomioitavia asioita ovat lisäksi paalujen ja yläpuolisten rakenteiden väliset liitokset, paalujen etäisyydet lähirakenteista, paalujen kaltevuudet ja muut tarkasteltavat rakenteelliset seikat. (SSAB 2015, 16.) Paalujen sijoitukseen liittyvät ohjeet on esitetty Paalutusohjeen 2011 osan 2 kohdassa 4.3 (RIL 254-2011, 172–175) ja sallitut sijaintipoikkeamat kohdassa 4.4 (RIL 254-2011, 175–178).

Paalujen kannattamat rakenteet asettavat vaatimuksia paaluperustuksen suunnitteluun. Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 59) mukaan paalujen kannattaman rakenteen murtorajatila saattaa esimerkiksi tulla määrääväksi ennen paalujen täyden murtokestävyyden saavuttamista, jos paalujen kimmainen kokoonpuristuma on suuri. Paalujen pituuden ja kuormituksen vaihteluista aiheutuva epätasainen kokoonpuristuminen tulee huomioida mitoitettaessa seinänturan päällä olevaa perusmuuria seinämäisenä palkkina (Leskelä 2008, 454).

Paaluperustuksen suunnittelussa huomioitavista lukuisista asioista tämän opinnäytetyön aiheen ja rajausten puitteissa seuraavaksi lähemmin tarkasteltavat asiat liittyvät paaluanturan jäykkyyden ja rakennuskohteen pohjaolosuhteiden vaikutuksiin. Paaluja yhdistävien rakenteiden jäykkyydellä on merkitystä paaluperustuksen puristuskestävyyden mitoitustarkasteluissa. Pohjatutkimusraportissa esitettävillä suunnittelun lähtötiedoilla on merkitystä määritettäessä paalukuormia sekä paalun kestävyyttä. Pohjarakennesuunnittelun suunnittelutehtäviin liittyvien vastuiden jakautuminen geoteknisen suunnittelijan ja rakennesuunnittelijan kesken tulee ottaa huomioon.

### 2.1 Pohjatutkimukset

Pohjatutkimusten avulla selvitetään kohteen geoteknistä suunnittelua varten rakennuspaikan maa- ja kallioperän rakennetta ja ominaisuuksia, kuten esimerkiksi maaperän kerrosjärjestyksiä, kerrospaksuuksia, kerrosominaisuuksia sekä kalliopinnan asemaa ja

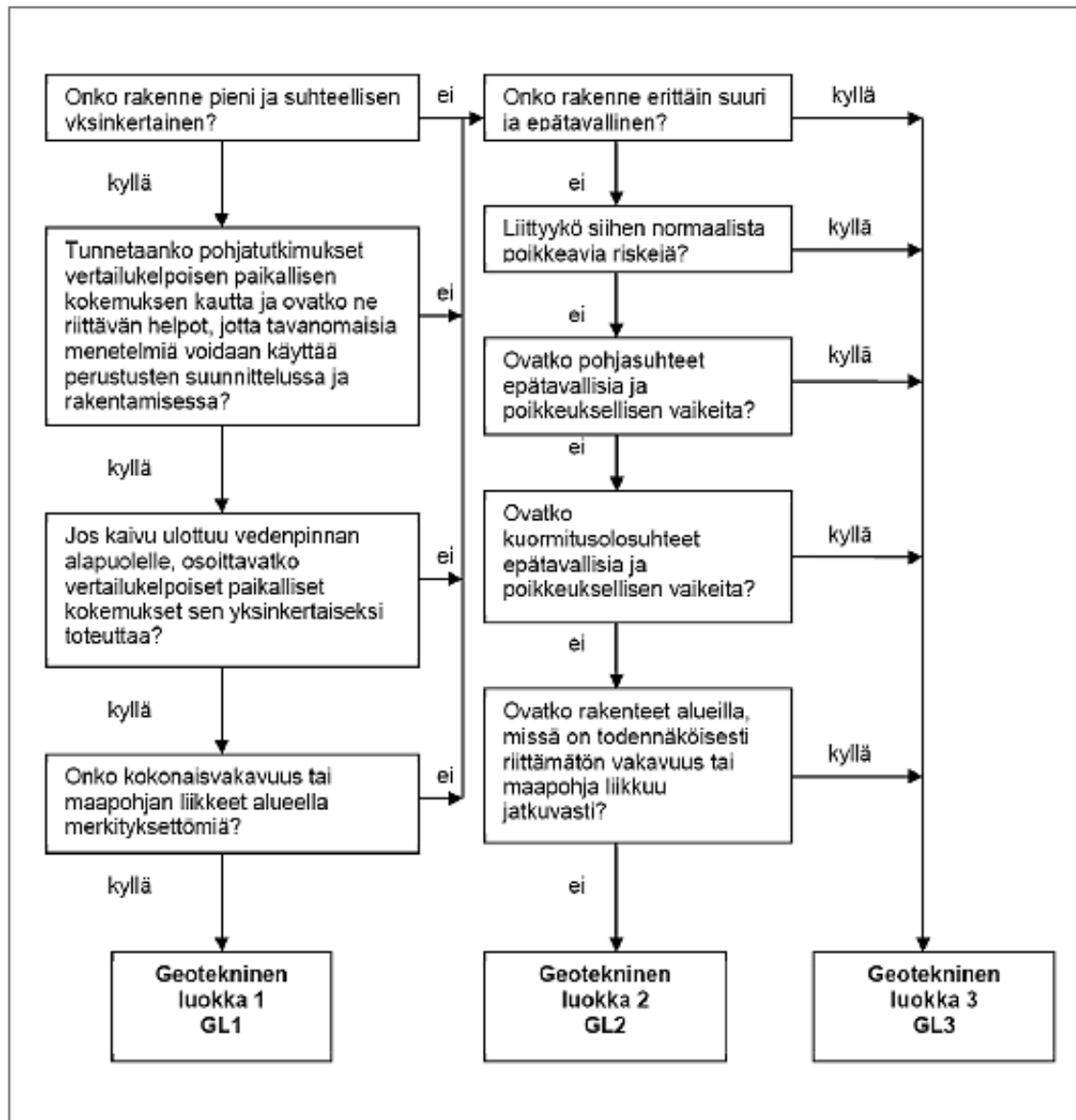
pohjavesisuhteita. Käytettäviä tutkimusmenetelmiä ovat esimerkiksi kairaukset, koe-kuopan kaivu, näytteenotto ja pohjavesitutkimukset sekä ennen varsinaisia pohjatutkimuksia suoritettavat alustavat silmämääräiset maastokatselmukset. (Rantamäki ym. 1979, 257–282.) Tietämys pohjaolosuhteista on riippuvainen kohteessa tehtyjen pohjatutkimusten laajuudesta ja laadusta (SFS-EN 1997-1, 24).

Tehtävien tutkimusten laajuus riippuu periaatteessa rakennuspohjan laadusta, tulevista kuormituksista ja toteutettavista rakenteista (Rantamäki ym. 1979, 257). Käytännössä vastaava pohjarakennesuunnittelija huolehtii tutkimusmenetelmien valinnasta, tutkimusten määrän ohjelmoinnista ja pohjarakennesuunnitelman laatimisesta. Vastaava pohjarakennesuunnittelija on joko geotekninen suunnittelija tai kantavien rakenteiden rakennesuunnittelija; valinta tehdään suunnittelijan pätevyyden ja työn vaativuuden perusteella. Pohjarakennesuunnitteluun liittyvät suunnittelutehtävät on yleensä jaettu geoteknisen suunnittelijan ja rakennesuunnittelijan kesken. (RIL 254-2011, 21, 35.)

Paalutusohjeessa 2011 on annettu ohjeita ja suosituksia pohjatutkimuksille, ja niistä on esitetty yleiset laatuvaatimukset (RIL 254-2011, 35; Rakennusteollisuus RT 2013, 3). Paalutusohjeessa 2011 on esimerkiksi esitetty, mitä perustuskohtaisia erityispiirteitä missäkin niin sanotussa geoteknisessä luokassa tulee pohjatutkimusten osalta huomioida (RIL 254-2011, 36–40).

Geoteknisiä luokkia GL1, GL2 ja GL3 (vaativin) käytetään rakenteen geoteknisten suunnitteluvaatimusten määrittämiseen (RIL 254-2011, 28). Geoteknisellä luokalla GL1 viitataan helppoihin, luokalla GL2 vaativiin ja luokalla GL3 erittäin vaativiin kohteisiin (RIL 254-2011, 36–38).

Paaluperustukset kuuluvat tyypillisiin geoteknisen luokan 2 esimerkkirakenteisiin (SFS-EN 1997-1, 21). Paalutuskohde kuuluu Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 28) mukaan geotekniseen luokkaan 2, kun perustettavassa rakennuksessa on pysyvään asumiseen tai työskentelyyn tarkoitettuja tiloja, tai kun perustettavat rakenteet ovat vaativia. Geoteknisessä luokassa GL2 geotekninen suunnittelija antaa lähtötiedot, joiden avulla rakennesuunnittelija suunnittelee perustukset (Betoniteollisuus ry 2011, 2). Geoteknisen luokan yleisiä valintaperusteita on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Geoteknisen luokan valintaperusteet (RIL 254-2011, 29).

Esitetyn kuvan perusteella geotekniseen luokkaan GL2 kuuluvat siis esimerkiksi paalu- perustukset, joiden koko ei ole erityisen suuri ja joihin ei liity epätavallisia pohja- tai kuormitusolosuhteita tai muita normaalista poikkeavia riskejä.

Tavallisesti geotekninen luokka valitaan alustavasti ennen geoteknisten tutkimusten suorittamista, tarkistetaan jokaisessa suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa sekä vaihdetaan tarvittaessa (SFS-EN 1997-1, 21). Vastaava pohjarakennesuunnittelija harkitsee, mitä geoteknistä luokkaa kulloinkin sovelletaan (RIL 254-2011 28).



Geoteknisellä tietämyksellä ja ammattitaidolla on suuri merkitys, itse asiassa jopa suurempi kuin varsinaisissa mitoituslaskelmissa käytettyjen laskentamallien ja osavarmuuslukujen tarkkuudella (SFS-EN 1997-1, 24). Pohjatutkimusten avulla onkin voitava luotettavasti arvioida mitoituslaskelmissa käytettävien maaparametrien ominaisarvot (RIL 254-2011, 35). Ominaisarvojen tulee olla varovaisia arvioita suhteessa tarkasteltavan rajatilan esiintymiseen vaikuttavaan arvoon. Kenttä- ja laboratoriokokeista saatuja tuloksia ja niistä johdettavia maaparametrien ominaisarvoja tulee myös täydentää vertailukelpoisella kokemuksella. (SFS-EN 1997-1, 27.)

### **Pohjatutkimusraportissa esitettäviä suunnittelun lähtötietoja**

Pohjatutkimusraportissa tulee esittää kohteen geotekniset tiedot ja niiden arviointi (RIL 254-2011, 42–45). Pohjatutkimusraportista tulisi selvittää kohteessa käytettävä lyötävän paalun kärkityyppi sekä arvio paalutustyöhön mahdollisesti vaikuttavista maaperän ominaisuuksista, esimerkiksi kalliopinnan kaltevuuden ja pohjamaan sisältämien tiiviiden tai kivisten välikerroksien osalta. Lisäksi pohjatutkimusraportista tulisi selvittää mitoituksessa käytettävä maan suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo, arvio negatiivisen vaippahanauksen esiintymisestä ja suuruudesta, teräspaalun mitoituksessa käytettävä korrosiovara sekä arvio paalupituudesta. (SSAB 2015, 16.)

### **Maan suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo**

Suljettu leikkauslujuus on maan parametri, jolla on yleisesti ottaen erittäin suuri merkitys maan kantavuudelle ja maarakenteiden vakavuudelle (Rantamäki ym. 1979, 123, 124). Tässä opinnäytetyössä on tarkasteltu leikkauslujuuden merkitystä aksiaalisesti kuormitetun tukipaalun asennuksen jälkeisen stabiliteetin tarkastelussa, sillä leikkauslujuudella on suuri vaikutus paalun puristuskestävyyden määrittämisessä huomioon otettavan paalun nurjahduskestävyyden suuruuteen.

Maan leikkauslujuus muodostuu kahdesta päätekijästä: sisäisestä kitkasta ja/tai koheesiosta. Sisäinen kitka aiheutuu ”normaalin” kitkan tavoin maarakenteiden välisestä hankauksesta. Koheesio puolestaan aiheutuu kiinnevoimista, jotka vaikuttavat maahiukkasten välillä, sekä sähköstaattisista voimista, jotka vaikuttavat mineraalihiukkasten ja niitä ympäröivien vesivaippojen välillä. Leikkauslujuuden suuruuteen vaikuttavat lisäksi maaker-

rokseen kohdistuvan kuormituksen nopeus sekä maan vesipitoisuus ja vedenläpäisevyys. (Rantamäki ym. 1979, 123, 124.) Tässä opinnäytetyössä käsiteltävien paalujen osalta paalun stabiiliteettitarkastelut tulevat käytännössä kyseeseen, kun paalu on hienorakeisen maakerroksen ympäröimä. Hienorakeisilla maalajeilla tarkoitetaan nykyisen, maalajien geotekniseen syntytapaan perustuvan, geoteknisen maaluokituksen päämaalajien tasolla savea ja silttiä (Rantamäki ym. 1979, 56, 59). Savi kuuluu leikkauslujuuden muodostumistavan perusteella jaoteltuna koheesiomaalajeihin, jolloin sen leikkauslujuuden määrää koheesio. Siltti puolestaan kuuluu välimuotomaalajeihin, jolloin sen leikkauslujuus muodostuu periaatteessa koheesion lisäksi sisäisestä kitkasta. (Rantamäki ym. 1979, 124.)

Paalun nurjahduskestävyyden laskennassa tarvittava hienorakeisen maakerroksen suljettu leikkauslujuus määritetään yleensä geoteknisessä luokassa GL2 siipikairauksella, ellei painokairauksen perusteella voida luotettavasti varmistua siitä, ettei nurjahduskestävyys ole mitoittava (RIL 254-2011, 38). Siipikairaus on yleisesti käytetty kairausmenetelmä, jossa tutkittavaan maakerrokseen upotetaan kairatankojen ja niitä ympäröivän putken avulla siiveke. Siipeä kiertämällä saadaan suurimman mitatun vääntömomentin perusteella määritettyä häiriintymättömän maan leikkauslujuus. Tämän jälkeen siipeä edelleen kiertämällä saadaan määritettyä myös maan leikkauslujuus häiritynä. (Rantamäki ym. 1979, 141, 270.) Siipikairauksen mittaustulosten mukaisia lujuuksia on tarpeen redusoida vastaamaan paremmin luonnossa vallitsevia olosuhteita (Kärki 2010, 15). Mitoituslaskelmissa käytetään häiriintymättömän maan redusoitua suljetun leikkauslujuuden ominaisarvoa. Pohjatutkimusraportissa ilmoitettava mitoituslaskelmissa käytettävä arvo tulisi tarvittaessa olla eritelty maakerroksittain ja rakennuskohde jaoteltu eri alueisiin (SSAB 2015, 16).

### **Negatiivisen vaippahankauksen mitoitusarvo**

Negatiivinen vaippahankaus tarkoittaa paalun vaipan ja sitä ympäröivän maan välisestä hankauksesta syntyvää alaspäin vaikuttavaa paalukuormaa olosuhteissa, joissa maa paalun ympärillä painuu enemmän kuin paalu. Sitä esiintyy pääasiassa savimaassa, kun savi painuessaan tarttuu kiinni paalun vaippaan eikä näin ollen pääsekään painumaan vapaasti. Paalun varassa riippuva savi aiheuttaa paaluun lisäkuormaa, jonka suuruuden yläraja-arvo on paalun tai paaluryhmän vaippakestävyys. (Rantamäki & Tammirinne 1979, 62; Jääskeläinen 2009, 73; RIL 254-2011, 49.)

Negatiivisen vaippahankauksen mitoitusravon määrittämiseksi Paalutusohjeessa 2011 on esitetty laskentakaavoja suurten ja tiheiden paaluryhmien kokonaisläkuorman määrittämiseksi täytön aiheuttaman pintakuorman perusteella tai vaihtoehtoisesti yksittäisen paalun kokonaisläkuorman yläraja-arvon määrittämiseksi paalun vaippakestävyyden perusteella. Negatiivisen vaippahankauksen määrittämisessä on otettava mahdollisen täytemaan painon lisäksi huomioon esimerkiksi pohjaveden alenemisesta, konsolidatiosta tai paalun lyönnistä aiheutuvat pohjaveden paineen muutokset. Paalujen asennuksen aiheuttamasta maamassojen syrjäytymisestä voi myös aiheutua maanpinnan nousua ja sen jälkeen painumaa. (RIL 254-2011, 49–51.)

Negatiivisesta vaippahankauksesta aiheutuvan läkuorman huomioimista kuormitusyhdistelyissä on käsitelty myöhempanä. Pohjatutkimusraportin mukainen mitoituskalkelmissa käytettävä arvo tulisi tarvittaessa olla määritelty eri paaludimensioille ja rakennuskohteen eri alueille (SSAB 2015, 16).

### **Teräspaalun korroosiovaran määrittäminen**

Teräspaalut tulee suojata korroosiolta Paalutusohjeen 2011 osan 1 kohtien 4.7.6. ja 4.7.6.1 (RIL 254-2011, 113–116) mukaisesti, jolloin korroosiosuojaus voidaan toteuttaa esimerkiksi uhrattavan teräskerroksen paksuuden ylittämisen avulla (RIL 254-2011, 113). Paalun seinämäpaksuuden ylittämisen on yleensä suositeltava menetelmä (SSAB 2015, 22). Tällöin paalulle määritetään niin sanottu korroosiovara, jonka keskimääräiseksi suuruudeksi tavanomaisissa olosuhteissa maan sisällä otaksutaan vähintään 1,2 mm sadassa vuodessa (RIL 254-2011, 114). Korroosiovara tarkoittaa teräspaalun poikkileikkauksen ruostuvaksi oletettavaa osaa, joka poistetaan mitoituskalkelmissa paalun kantavasta teräspoikkipinta-alasta paalun ulkopuolista syöpyvää pintaa kohti (Jääskeläinen 2009, 107). Alapäästään suljettujen teräspuutkipaalujen sisäpinnoilla korroosio voidaan jättää huomioimatta (RIL 254-2011, 114). Tässä opinnäytetyössä tarkasteltaville lyömällä asennettaville teräspaaluille pohjatutkimusraportissa ilmoitettavalla mitoituskalkelmissa käytettävällä korroosiovaralla on merkitystä paalun asennuksen jälkeisen nurjahduskestävyyden määrittämisessä; korroosiovara huomioidaan paalun käytön aikaisen kestävyyden määrittämisessä käyttämällä mitoituskalkelmissa paalun tehokkaita mittoja.

## Paalujen arvioitu tunkeutumistaso

Paalupituuksien arviointi on erityisesti tukipaaluja käytettäessä melko vaikeaa, eikä hyvienkään pohjatutkimusten perusteella pystytä aina päättämään tarkasti paalujen uppoamista kohteen pohjaolosuhteissa (Rantamäki & Tamminen 1979, 76; Jääskeläinen 2009, 71). Paalun uppoumaa voidaan arvioida esimerkiksi heijarikairaustuloksiin pohjautuvilla alan käsikirjoissa esitellyillä arviointimenettelyillä (Jääskeläinen 2009, 89). Heijarikairauksella tarkoitetaan dynaamista kairausmenetelmää, jossa kaira tunkeutuu maahan heijarin lyömänä. Menetelmä soveltuu tukipaalujen pituuksien arviointiin parhaiten kivettömissä maakerroksissa. (Rantamäki ym. 1979, 262, 263.) Vaikeissa pohjaolosuhteissa, esimerkiksi paksuun lohkareiseen pohjamoreenikerrokseen ulottuvien paalujen suunnittelussa, on kuitenkin syytä varautua kohtuullisiin paalujen ylipituuksiin (Rantamäki & Tamminen 1979, 76). Heijarikairaus on luotettavampi tapa paalujen uppoumasyvyyksien määrittelyyn kuin painokairaus, jolla puolestaan saadaan heijarikairaukselta luotettavammin selvitettyä esimerkiksi maakerrosten rajat ja kerrospaksuudet (Rantamäki ym. 1979, 261, 264; Jääskeläinen 2009, 89). Painokairauksella tarkoitetaan kairausmenetelmää, jossa kairaa tungetaan maahan painamalla ja tarvittaessa lisäksi kiertämällä (Rantamäki ym. 1979, 259, 260). Pohjatutkimusraportissa tulisi paalupituuden arvioinnin lisäksi esittää, mihin arvio perustuu (SSAB 2015, 16).

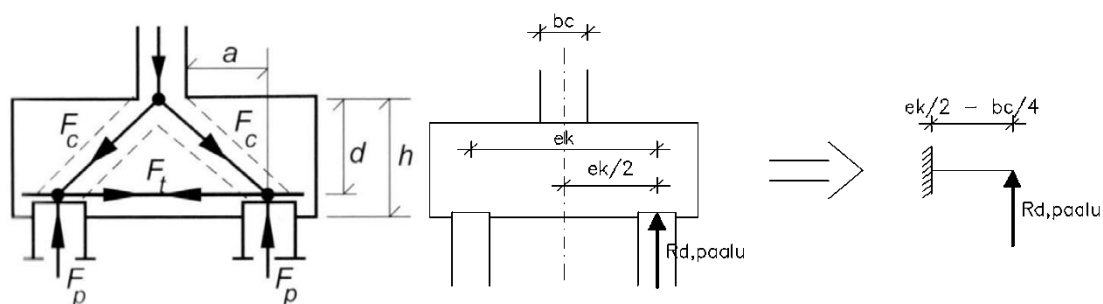
Paalupituuksien arviointi vaikuttaa paaluperustuksen suunnitteluun. Lyhyet tukipaalut ovat herkempiä rikkoutumaan kovaan pohjaan lyötäessä kuin pitkät paalut, ja lisäksi esimerkiksi maaperän paalulle antama sivutuki muodostuu lyhyelle paalulle pienemmäksi kuin pitkälle paalulle vaarantaen paaluperustuksen vakavuuden (Rantamäki & Tamminen 1979, 50; Jääskeläinen 2009, 74). Toisaalta erityisesti pitkille paaluille saattaa esimerkiksi muodostua merkittäviä asennuksen aikaisia vetorasiuksia kärjen tukeutuessa kantavaan maakerrokseen (RIL 254-2011, 127). Paalutusohjeessa 2011 on esitetty lyömällä asennettavien paalujen pienimmät hyväksyttävät paalun maassa olevan osan pituudet (RIL 254-2011, 94).

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan paalujen pituuden merkitystä pääasiassa paalujatkosten tarpeen osalta, sillä jatkosten käyttö saattaa pienentää aksiaalisesti kuormitetun tukipaalun käytön aikaista nurjahduskestävyyttä. Paalujatkoksilla ei ole tyypillisesti vaikutusta paalun asennuksen aikaiseen kestävyYTEEN, sillä niiden kestävyys on varmistettu SFS-EN 12794 (teräsbetonipaalut) ja SFS-EN 1993-5 (teräspaalut) mukaisilla kuormituskokeilla (RIL 254-2011, 104, 158–160; Rakennusteollisuus RT 2013, 6; SSAB 2015,

6). Jatkosten vaikutusta nurjahduskestävyyden määrittämiseen on käsitelty myöhemmänä. Paalujatkoksia tarvitaan, kun yhden paaluelementin pituus ei ole riittävä. Paaluelementtien valmistuspituudet on esitetty taulukoituna paaluvalmistajien ohjeissa. Teräsbetonipaalujen suurimmat valmistuspituudet ovat paalun tyypistä riippuen 12–15 metriä (Rakennusteollisuus RT 2013, 5). Teräspaalujen varastomitat ovat paalutyypistä riippuen joko 6 tai 12 metriä (SSAB 2015, 5).

## 2.2 Paaluja yhdistävät rakenteet

Paaluanturat voidaan suunnitella esimerkiksi ristikkomenetelmällä tai taivutusteorian mukaisella mallilla (Betoniteollisuus ry 2011, 7; Laitakari 2011, 4). Ristikkomenetelmä on esitetty eurokoodin EN 1992-1-1 kohdissa 5.6.4 ja 6.5 (Betoniteollisuus ry 2011, 7). Ristikkomenetelmän mukaiseen malliin kuuluu puristussauvoja, vetosauvoja ja näitä yhdistäviä solmuja; mallin puristussauvat edustavat betonisia puristusjännityskaistoja, vetosauvat edustavat raudoitusta (SFS-EN 1992-1-1, 63, 105). Paaluanturan paksuus tulisi mitoittaa suoraan niin, ettei läpileikkaantuminen tule määrääväksi (Leskelä 2008, 454). Ristikkomallin puristus- ja vetosauvojen välinen kulma tulisi mahdollisuuksien mukaan olla vähintään  $45^\circ$  vaakasuuntaan nähden (Leskelä 2008, 432). Jos paaluantura mitoitetaan taivutusteorian mukaisesti, anturan kestävyys on tarkastettava myös leikkauksen ja lävistyksen suhteen (Betoniteollisuus ry 2011, 7). Kuvassa 6 on havainnollistettu ristikkomenetelmään ja taivutukseen perustuvaan menetelmään liittyviä mitoitusmalleja.



Kuva 6. Paaluanturan ristikkomallin yksinkertaisin tapaus (vasemmalla) ja taivutusteorian periaate anturan mitoituksessa (Leskelä 2008, 455; Laitakari 2011, 4).

Edellisessä kuvassa esitettyihin merkintöihin tai yleensäkin paaluanturan mitoituksen perusteisiin ei perehdytä yksityiskohtaisemmin. Perustusten suunnittelun helpottamiseksi ja tehostamiseksi tämän opinnäytetyön rajausten mukaisia paalutuotteita voidaan käyttää niitä varten valmiiksi mitoitettujen vakiopaaluanturoiden kanssa (Rautaruukki Oyj 2012, 1).

Vakiopaaluanturoiden dimensiot, paaluvälit ja anturan minimikuormituspinnat on esitetty paaluvalmistajien suunnitteluohjeiden taulukoissa (Betoniteollisuus ry 2011, 4–5; Rautaruukki Oyj 2012, 8–12). Vakiopaaluanturoiden raudoitteina käytetään tyypiraudoitteita, niin sanottuja kaistaraudoitteita, jotka toimivat anturan vetorasitukset vastaanottavana pääraudoituksena.

Vakiopaaluanturoille on määritelty paaluvalmistajien suunnitteluohjeissa alkuoletukset, jotka on otettava huomioon arvioitaessa vakiopaaluanturoiden käytön soveltuvuutta suunniteltavaan rakennuskohteeseen (Betoniteollisuus ry 2012a, 5-9; Rautaruukki Oyj 2012, 5). Jos vakiopaaluanturoille määritettyjen suunnitteluperusteiden ja suunniteltavan kohteen suunnitteluperusteiden välillä on merkittäviä eroja, paaluanturan rakenteen mitoitus tulee tarkistaa erikseen (Rautaruukki Oyj 2012, 6, 43). Vakiopaaluanturoiden mitoituksen lähtöoletuksina oletetaan esimerkiksi anturan toimivan paaluvoimia laskettaessa äärettömän jäykkänä kappaleena sekä anturalle tulevan pysyvän kuorman ja muuttuvan kuorman välisen suhteen olevan 3:2 (Betoniteollisuus ry 2012a, 5–6; Rautaruukki Oyj 2012, 5).

Kuten esisuunnittelun mukaisen paalumäärän riittävyys, myös paaluanturoiden lopullinen mitoitus tulee tarkistaa paalutustyön suorituksen jälkeen (Leskelä 2008, 457). Valmiiksi mitoitettujen vakiopaaluanturoiden mitoituksessa lähtökohtaisesti huomioon otettuja paaluvalmistajien suunnitteluohjeissa esittämiä paalujen sijaintitoleransseja tulee tapauskohtaisesti verrata toteutuneisiin paalujen sijaintipoikkeamiin. Rakennesuunnittelijan on valittava anturan koko sekä sallitut paalupoikkeamatärkevin perustein ottamalla huomioon paalutusolosuhteiden vaikutukset (Betoniteollisuus ry 2012a, 3). Perustuksen muoto, mitat ja jäykkyys tulee yleisesti suunnitella koko rakenteen kannalta edullisimmaksi (SSAB 2015, 16). Perustuksen jäykkyydellä on merkitystä tämän opinnäytetyön rajausten mukaisissa paalun kestävyden mitoitusarkasteluissa.

## Paaluanturan jäykkyyden vaikutukset paalun kestävyden mitoitustarkasteluissa

Perustuksen jäykkyyden merkitys kestävyden mitoitustarkasteluissa perustuu paaluja yhdistävän rakenteen kykyyn jakaa kuormia ”heikoilta” paaluilta ”vahvoille” paaluille (RIL 254-2011, 60, 75).

Paaluperustuksen tulee kantaa mitoituskuorma riittävällä varmuudella puristusmurtuman suhteen, jolloin paaluperustuksen kestävyydelle ( $R_{c;d}$ ) ja paaluperustuksen mitoituskuormalle ( $F_{c;d}$ ) tulee Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 59) mukaan olla voimassa seuraava mitoitusehto kaikilla murtorajatilan kuormilla ja kuormitusyhdistelmillä:

$$F_{c;d} \leq R_{c;d}$$

Kaava 1. Paaluperustuksen puristuskestävyyden mitoitusehto (RIL 254-2011, 59).

Perustuksen jäykkyys vaikuttaa kyseisen paaluperustuksen puristuskestävyyden mitoitusehdon tarkasteluun seuraavasti: Jos paalut kannattavat jäykkää rakennetta, mitoitusehdon mukainen rajatila saavutetaan ainoastaan tapauksessa, jossa merkittävä osa paaluista murtuu yhdessä. Jos taas paalut kannattavat joustavaa rakennetta, mitoitusehdon mukaisen rajatilan toteutumisen määrää heikoimman paalun puristuskestävyys. Kyseiset Paalutusohjeessa 2011 (RIL 254-2011, 60) esitetyt ohjeet ovat standardissa SFS-EN 1997-1 kohdassa 7.6.2.1 (SFS-EN 1997-1, 74) esitettyjen soveltamissääntöjen mukaisia (soveltamissäännöt 6 ja 7). Kyseisessä standardin kohdassa esitetyn soveltamissäännön 6 mukaisesti paalujen kannattaman rakenteen ollessa jäykkä ”murtumistausta, jossa vain yksi paalu murtuu, ei tarvitse tarkastella”. Paalutusohjeessa 2011 on kuitenkin todettu hieman varovaisemmin, ettei kyseistä yhden paalun murtumistausta tarvitse ”yleensä” tarkastella; lisäksi tarkastelun tarpeellisuutta on edelleen ohjeistettu yksityiskohtaisemmin paalumäärään, jatkuvan sortuman vaaraan sekä rakennuksen tai sen osan kaatumavarmuuteen liittyen (RIL 254-2011, 60).

Perustuksen jäykkyys vaikuttaa esitetyn paaluperustuksen puristuskestävyyden mitoitusehdon (kaava 1) tarkastelun lisäksi myös mitoituslaskelmissa käytettävän yksittäisen paalun geoteknisen puristuskestävyyden suuruuteen korrelaatiokertoimen kautta. Paalun geoteknisen kestävyden määrittämistä ja korrelaatiokertoimen käyttöä ja määrittästä jäykälle rakenteelle on käsitelty myöhempanä.

### 3 KÄYTÖN AIKAISET AKSIAALISET PAALUKUORMAT

Paaluperustuksen rakennesuunnittelun tehtäviin kuuluu perustuksille yläpuolisista rakenteista kohdistuvan kuormituksen suuruuden määrittäminen. Mitoituslaskelmia varten on myös määritettävä paalun kestävyiden kannalta kriittisin kuormitustapaus, jonka mukaista kuorman suunnitteluarvoa verrataan paalun kestävyiden suunnitteluarvoon. Kuormitustapauksia määritettäessä on otettava huomioon mahdolliset geotekniset kuormat. Paaluille yläpuolisista rakenteista aiheutuvat kuormitukset, kuormitusyhdistelyt sekä kuormien osavarmuusluvut tulee määrittellä standardien SFS-EN 1990 ja SFS-EN 1991 mukaisesti (RIL 254-2011, 31). Pohjatutkimusraportin mukaiset mitoituslaskelmissa huomioitavat paaluille tulevat geotekniset kuormat, kuten negatiivinen vaippahankeus, tulee olla määritetty standardin SFS-EN 1997 mukaisesti (RIL 254-2011, 31; SSAB 2015, 16).

#### 3.1 Kuormien laskenta perustuksille

Perustuksille yläpuolisista rakenteista kohdistuva kuormitus määritetään laskemalla kerroksittain kaikki kullekin perustuksen osalle välittyvät taso- ja pystyrakenteiden aiheuttamat kuormat vesikatolta anturan alapinnan tasoon asti. Laskennassa voidaan käyttää apuna esimerkiksi kuvan 7 periaatteiden mukaista laskentapohjaa.

LÄHTÖARVOT											
KUORMALINJA		KUORMAT						OMINAISARVOT			
A/1...2		PYSYVÄT			MUUTTUVAT			ONNETT.	Kuormat		
kerros	taso	$g_k$	$g_{k,lisä}$	$q_{k,lumi}$	$q_{k,hyöty}$	$q_{k,lisä}$	$A_d$	$\Sigma G_k$	$\Sigma Q_{k,hyöty}$	$\Sigma Q_{k,lumi}$	
14.								0,0	0,0	0,0	
13.								0,0	0,0	0,0	
12.								0,0	0,0	0,0	
11.								0,0	0,0	0,0	
10.								0,0	0,0	0,0	
9.								0,0	0,0	0,0	
8.								0,0	0,0	0,0	
7.								0,0	0,0	0,0	
6.								0,0	0,0	0,0	
5.	+21.000	16,4	14,4	4,0				16,4	0,0	4,0	
4.	+18.000	12,0	11,0		4,0			12,0	4,0	0,0	
3.	+15.000	12,0	11,0		4,0			12,0	4,0	0,0	
2.	+12.000	12,0	11,0		4,0			12,0	4,0	0,0	
1.	+9.000	12,0	11,0		4,0		4,0	12,0	4,0	0,0	
Kellari								0,0	0,0	0,0	
Perustus		22,0	11,0		4,0			22,0	4,0	0,0	
<b>YHTEENSÄ</b>		<b>86</b>	<b>69</b>		<b>20</b>	<b>0</b>		<b>86</b>	<b>20</b>	<b>4</b>	

Kuva 7. Kuormien ominaisarvojen määrittystä perustuksille (Närvänen 2011, 44).



Edellisessä kuvassa esitetyt lukuarvot eivät perustu oikean kohteen laskelmiin. Kyseisessä esimerkkilaskelmassa kaikki kuormat on syötetty kerroksittain rakennesuunnittelijan määrittäminä viivakuormina (metrikuormina). Esimerkkilaskelmissa on huomioitu myös onnettomuuskuormat, joita ei kuitenkaan käsitellä tässä opinnäytetyössä. (Närven 2011, 38, 42.) Tämän opinnäytetyön yhteydessä laaditun laskentapohjan vaadittavien lähtötietojen kannalta varsinainen huomio kohdistuu perustuksen tietyille osalle välittyvien kuormien yhteenlaskettujen ominaisarvojen suuruuksiin (kuvan 7 taulukon alimman rivin lukuarvoihin oikealla), eikä niiden määrittämisen prosesseihin tai vaihtoehtoihin tapoihin ole tässä tarkoituksenmukaista perehtyä yksityiskohtaisemmin. Perustuksille välittyvien kuormien ominaisarvojen määrittämisessä tulee ottaa huomioon seuraavat pystysuorille paaluille ulkoista puristavaa normaalivoimaa aiheuttavat pysyvät ja muuttuvat kuormat.

### **Rakennuksen oma paino**

Rakennuksen oma paino luokitellaan aikariippuvuuden ja vaikutuskohdan vaihtelun perusteella pysyväksi kiinteäksi kuormaksi. Rakennuksen omaan painoon sisältyvät kantavat ja ei-kantavat rakennusosat, kiinteät laitteet, kuten hissit ja lvis-laitteet, sekä esimerkiksi vesikatolla olevien maakerrosten paino. Siirrettävien kevyiden väliseinien omaa painoa voidaan pitää liikkuvana kuormana, jolloin sitä käsitellään rakennuksen oman painon sijasta lisähyötykuormana. (SFS-EN 1990, 58; SFS-EN 1991-1-1, 18, 24; RIL 201-1-2011, 63.)

Oma paino voidaan esittää yhdellä ominaisarvolla, jonka suuruus määritetään tilavuuspainojen ominaisarvojen ja piirustuksissa esitettävien nimellismittojen perusteella. Yleisimpien rakennusmateriaalien tilavuuspainot on esitetty julkaisun RIL 201-1-2011 osan 1.1 liitteessä A. Kiinteiden laitteiden ja tehdasvalmisteisten rakennusosien tiedot saadaan valmistajalta. (SFS-EN 1991-1-1, 24; RIL 201-1-2011, 63, 75–77.)

### **Hyötykuorma**

Hyötykuormat johtuvat tilojen käytöstä, ja ne luokitellaan yleensä aikariippuvuuden ja vaikutuskohdan vaihtelun perusteella muuttuviksi liikkuviksi kuormiksi. Hyötykuormat ovat niin sanottuja kvasistaattisia kuormia, eli periaatteessa ne ovat dynaamisia kuormia, mutta käytännössä ne otetaan huomioon staattisina kuormina. Rakennusten tilat jaetaan

käyttötarkoituksen mukaisiin luokkiin. (SFS-EN 1990, 34; SFS-EN 1991-1-1, 18, 28.) Rakennuksen tilan luokan (A...K) perusteella määritettävät Suomessa käytettävät hyötykuormien ominaisarvot on esitetty yhteenvedona julkaisussa RIL 201-1-2011. Siirrettäviä väliseiniä voidaan niiden oman painon suuruudesta riippuen käsitellä tasaisena lisähyötykuormana, kun välipohjarakenne kykenee jakamaan kuormia poikittain. (RIL 201-1-2011, 66–69.)

### **Lumikuorma**

Lumikuorma on muuttuvaa kuormaa, jonka määrittämisessä on huomioitava mahdollinen lisäkuorma lumen kinostumisesta katolla moniin erilaisiin muotoihin. Perustuksille rakennuksen katolta välittyvien lumikuormien ominaisarvot tulee olla määritetty standardin SFS-EN 1991-1-3 sekä kyseisen standardin Suomen kansallisen liitteen mukaisesti. Tavallisesti lumikuorma määritetään maassa olevan lumikuorman ominaisarvon sekä katon muodosta riippuvan kertoimen avulla. (SFS-EN 1990, 58; SFS-EN 1991-1-3, 18; RIL 201-1-2011, 94.)

### 3.2 Kuormitusyhdistelmät

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan murtorajatiloja STR ja GEO. Kirjainyhdistelmällä STR viitataan rakenteen tai rakenneosan sisäiseen vaurioitumiseen tai liian suureen siirtymätilaan rakennusmateriaalien lujuuden ollessa määräävä (SFS-EN 1990, 76). Kirjainyhdistelmällä GEO viitataan rakennuspohjan murtumiseen tai liialliseen muodonmuutokseen maan tai kallion lujuuden ollessa merkittävä kestävyysaikaansaamisessa (SFS-EN 1997-1, 30). Tarkastelun ulkopuolelle on rajattu muut murtorajatilat eli EQU, FAT, UPL ja HYD, jotka liittyvät esimerkiksi perustuksen kaatumiseen, rakenteen väsymismurtumiseen, vedenpaineen aiheuttaman nosteen vaikutuksiin maapohjassa sekä hydrauliseen maapohjan nousuun (RIL 201-1-2011, 35).

Anturalaatan alapinnan tasossa vaikuttavien aksiaalisten paalukuormien osavarmuuslukujen ja kuormien yhdistelyjen määrittäminen normaalisti ja tilapäisesti vallitsevissa olosuhteissa on seuraavaksi tarkasteltu Suomessa käytettävän menettelytavan 2 mukaisesti (SFS-EN 1990 NA, 5). Anturoiden ja paalujen rakenteen kestävyysmitoituksessa

(STR) voidaan ohjeen RIL 201-1-2011 (2011, 37, 38) mukaan käyttää sarjan B kuormitusyhdistelmää seuraavien murtorajatilan mitoituskaavojen (kaavat 2 ja 3) mukaisesti:

$$1,15K_{FI} \left. \vphantom{1,15K_{FI}} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma P + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Kaava 2. Rakenteen tai rakenneosien kestävyden (STR, sarja B) mitoituskaava (RIL 201-1-2011, 38).

Kuitenkin vähintään:

$$1,35K_{FI} \left. \vphantom{1,35K_{FI}} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j}$$

Kaava 3. Rakenteen tai rakenneosien kestävyden (STR, sarja B) mitoituskaava (RIL 201-1-2011, 38).

Esitettyjen kaavojen mukaisesti kuormitusyhdistelyissä huomioidaan pystyvät kuormat ( $G_{k,j}$ ), määräävä muuttuva kuorma ( $Q_{k,1}$ ) ja mahdolliset muut samanaikaiset muuttuvat kuormat ( $Q_{k,i}$ ). Esijännitysvoimia ( $P$ ) osavarmuuskertoiminen ei käsitellä tässä opinnäytetyössä. Pysyvän kuorman vaihtoehtoista osavarmuuskeroainta  $0,9$  käytetään pysyvän kuorman ollessa edullista, mikä ei tule tässä opinnäytetyössä tarkasteltujen rajatilojen tapauksessa kyseeseen. Kuormitusyhdistelmät voidaan määrittää mitoituskaavoilla 2 ja 3 riippumatta siitä, esiintyykö geoteknisiä kuormia (kuten negatiivista vaippahankausta). (RIL 201-1-2011, 37, 38.) Kuormakerroin  $K_{FI}$  riippuu ohjeen RIL 201-1-2011 (2011, 37) mukaan kohteen seuraamusluokasta taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Seuraamusluokan ja kuormakerroimen arvon välinen riippuvuus (RIL 201-1-2011, 37).

Kuormakerroin $K_{FI}$	Seuraamusluokka
1,1	CC3
1,0	CC2
0,9	CC1

Esitetyn taulukon seuraamusluokat CC1, CC2 ja CC3 (vaativin) on määritelty standardin SFS-EN 1990 Suomen kansallisessa liitteessä (SFS-EN 1990 NA, 6,7). Eurokoodien

seuraamusluokkiin ei perehdytä tarkemmin, mutta ne liittyvät rakenteilta vaadittavan luotettavuuden hallintaan ja luotettavuusluokkiin RC1...3, joita on käsitelty esimerkiksi standardin EN 1990 liitteissä B ja C (RIL 201-1-2011, 23–25).

Perustuksille tulevien kuormien tarkastelua varten määritettävissä kuormitustapauksissa tulee yhdistää sellaisten kuormien arvot, joiden katsotaan esiintyvän samanaikaisesti (SFS-EN 1990, 78). Esimerkiksi vesikattojen hyötykuormia ei huomioida samanaikaisesti lumi- tai tuulikuormien kanssa (RIL 201-1-2011, 60). Kaavan 2 mukaisesti muita samanaikaisia muuttuvia kuormia ( $Q_{k,i}$ ) pienennetään kyseeseen tulevan yhdistelykertoimen  $\psi_0$  avulla. Suomessa käytettävät muuttuvan kuorman yhdistelykertoimen  $\psi_0$  arvot on esitetty standardin SFS-EN 1990 kansallisen liitteen (SFS-EN 1990 NA, 2) mukaisesti taulukossa 2.

Taulukko 2. Muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet (SFS-EN 1990 NA, 2).

Kuorma	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) <sup>*)</sup> kun $s_k < 2,75$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma <sup>**)</sup>	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
<sup>*)</sup> Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään $\psi$ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. <sup>**)</sup> Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.			

Esitetyn taulukon kerroin  $\psi_1$  on muuttuvan kuorman tavallinen yhdistelykerroin, ja kerroin  $\psi_2$  on muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin. Yhdistelykertoimia  $\psi_1$  ja  $\psi_2$  käytetään onnettomuuskuormia sisältäviä murtorajajaloja ja palautuvia käyttörajajaloja tarkasteltaessa, joita ei käsitellä tässä opinnäytetyössä. (RIL 201-1-2011, 30.) Muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvo ( $\psi_2 Q_k$ ) on määritelty standardissa siten, että ”kokonaisuika, jona se ylitetään, on suuri osuus tarkastelujaksosta” (SFS-EN 1990, 34). Kyseistä pitkäaikaisarvoa voidaan standardin SFS-EN 1990 mukaisesti käyttää myös pitkäaikaisvaikutusten laskentaan (SFS-EN 1990, 60). Varsin yleinen tulkinta alan suunnittelijoiden keskuudessa lienee, että pitkäaikaisarvon yhdistelykerrointa  $\psi_2$  voidaan soveltaa pitkäaikaiskuorman määrittämisessä myös tämän opinnäytetyön yhteydessä tarkasteltavien negatiivisen vaippahankauksen kuormitusyhdistelyjen ja paaluvalmistajien paalun kestävyysmitoitustaulukoiden nurjahduskestävyyksien määrittämisen tapauksissa. Kyseisiä tarkasteluja on käsitelty myöhempänä.

Hyötykuorman osalta voidaan kuormia yhdistettäessä vaihtoehtoisesti tehdä vähennyksiä käyttämällä niin sanottua kerrosvähennystä (pienennystekijää)  $\alpha_n$ , jota sovelletaan yhdistelykertoimesta poiketen ”kokonaisyhyötykuormaan”, eli myös kaavan 2 määrittämään muuttuvaan kuormaan ( $Q_{k,1}$ ) (RIL 201-1-2011, 66). Käytännössä kyseinen ero kertoimien  $\psi_0$  ja  $\alpha_n$  käytön välillä johtaa siihen, että kerrosvähennys muodostuu lopullisen mitoituksen kannalta usein edullisemmaksi vaihtoehdoksi perustapauksessa, jossa samaan luokkaan kuuluvia hyötykuormia vaikuttaa useassa kerroksessa. Kerrosvähennystä ei sovelleta yhdessä yhdistelykertoimen kanssa (RIL 201-1-2011, 82).

Kerrosvähennyksellä otetaan huomioon epätodennäköisyys sille, että useammassa päällekkäisessä kerroksessa vaikuttaisi samanaikaisesti täysi mitoituskuorma. Kun perustuksille välittyy pilarien tai seinien kautta hyötykuormia useasta kerroksesta, kokonaisyhyötykuormaa voidaan pienentää kuormaluokissa A...D, eli asuin-, toimisto-, koontumis- ja myymälätilojen osalta. (RIL 201-1-2011, 66–68.) Kerrosvähennystä ei siis sovelleta luokkien E...K hyötykuormille. Pienennyskerroin  $\alpha_n$  määritetään ohjeen RIL 201-1-2011 (2011, 66) mukaan seuraavan kaavan avulla:

$$\alpha_n = \frac{2+(n-2)\psi_0}{n}$$

missä

$n$  kuormitettujen kantavien osien yläpuolella olevien kerrosten lukumäärä ( $> 2$ ), joissa hyötykuormat kuuluvat samaan luokkaan.

$\psi_0$  taulukon 2 mukainen muuttuvan kuorman yhdistelykerroin.

Kaava 4. Kerrosvähennyksen määrittäminen (RIL 201-1-2011, 66).

Kuormitustapausten määrittämisen tarkoitus on löytää rakenteen kannalta epäedullisin vaikutus (Betoniteollisuus ry 2009, 3). Määräävän kuormitustapausten löytämiseksi tuleekin ottaa huomioon kuormituksen pitkäaikaisuuden alentava vaikutus paalun nurjahduskapasiteettiin sekä kuorman pitkäaikaisuuden vaikutus negatiivisen vaippahankauksen kuormitusyhdistelyihin. Kyseisiä tarkasteluja on käsitelty myöhempanä.

### **Geotekniset kuormat ja viittaukset standardiin EN 1997**

Geoteknisillä kuormilla tarkoitetaan maaperästä, täyttömaasta tai pohjavedestä rakenteeseen aiheutuvia kuormia (SFS EN-1990, 32). Niitä määritettäessä tulee ottaa huomioon rakenteen ja maapohjan välinen yhteistoiminta sekä kuormituksen keston vaikutus esimerkiksi hienorakeisen maan kokoonpuristuvuusominaisuuksiin (SFS-EN 1997-1, 25).

Paaluun saattaa kohdistua lisäkuormaa negatiivisesta vaippahankauksesta. Arvio negatiivisen vaippahankauksen esiintymisestä ja suuruudesta (mitoitusarvo) tulisi esittää pohjatutkimusraportissa (SSAB 2015, 16). Asiaa on käsitelty tarkemmin edellä. Tämän opin näytetyön rajausten mukaisesti negatiivista vaippahankausta tarkastellaan ainoana standardin SFS-EN-1997-1 mukaisesti määritettävänä geoteknisenä kuormana.

Negatiivista vaippahankausta voidaan käsitellä paalukuormana, jolle käytetään paalun vaipan kestävyysosavarmuuslukua (taulukon 4 mukaisesti) (RIL 254-2011, 49, 50). Paalutusohjeessa 2011 on esitetty tarkasteluehto, jonka mukaisesti negatiivinen vaippa-

hankaus voidaan jättää käytännössä huomioimatta kuormitusyhdistelyissä, mikäli negatiivisen vaippahankauksen mitoitusarvo on pienempi kuin lyhytaikaisen kuorman mitoitusarvo. Seuraavien ehtojen (kaavat 5 ja 6) tulee Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 49, 50) mukaan olla voimassa paalun rakenteelliselle ja geotekniselle puristuskestävyydelle ( $R_{c;d}$ ):

$$F_{pitkäaik;d} + F_{neg;d} \leq R_{c;d} \quad \text{kun } F_{lyhytaik;d} \leq F_{neg;d}$$

Kaava 5. Negatiivisen vaippahankauksen tarkasteluehto (RIL 254-2011, 49).

$$F_{pitkäaik;d} + F_{lyhytaik;d} \leq R_{c;d} \quad \text{kun } F_{lyhytaik;d} > F_{neg;d}$$

missä

$F_{neg;d}$  negatiivisen vaippahankauksen mitoitusarvo

$F_{lyhytaik;d}$  lyhytaikaisen kuorman mitoitusarvo

$F_{pitkäaik;d}$  pitkäaikaisen kuorman mitoitusarvo.

Kaava 6. Negatiivisen vaippahankauksen tarkasteluehto (RIL 254-2011, 49).

Kyseisten, kuormituksen ”lyhytaikaisuudesta” riippuvien kaavojen käsittelyn yhteydessä Paalutusohjeessa 2011 on esitetty lisäksi myös kuormituksen ”tilapäisyyteen” liittyvä ohje, jonka mukaisesti negatiivista vaippahankausta ja tilapäistä kuormitusta ei tavallisesti tarvitse ottaa huomioon samanaikaisesti kuormitusyhdistelyissä (RIL 254-2011, 49). Paalutusohjeessa 2011 ei ole määritelty yksityiskohtaisesti kuormien kestoon liittyviä käsitteitä, jolloin esimerkiksi kyseisten kuormien kestoon liittyvien käsitteiden osalta saattaa syntyä hieman epä johdonmukainen vaikutelma.

Esitettyjen kaavojen (kaavat 5 ja 6) perusteella mitoitus on negatiivisen vaippahankauksen osalta sitä varmemmalla puolella, mitä suuremmaksi pitkäaikainen kuorma arvioidaan. Negatiivinen vaippahankaus muodostuu kuormitusyhdistelyissä sitä todennäköisemmin määrääväksi, mitä pienempi lyhytaikaisen kuorman mitoitusarvo on.

### Standardin SFS-EN 1997-1 mukaiset mitoitusluvut

Standardin SFS-EN 1990 Suomen kansallisessa liitteessä on edellä esitetyn menettelytavan 2 mainitsemisen yhteydessä kehoitettu katsomaan pohjarakenteiden geoteknisen mitoituksen osalta standardia SFS-EN 1997-1 ja sen kansallista liitettä (SFS-EN 1990 NA, 5). Kyseisessä standardissa SFS-EN 1997-1 on esitelty kolme toisistaan poikkeavaa murtorajatilan mitoitusmenettelyä, joiden välisten erojen taustalla ovat geoteknisten suunnittelijoiden erimielisyydet rajatilamitoituksen soveltamisesta geotekniseen suunnitteluun (Betoniteollisuus ry 2011, 2). Kyseisistä kolmesta eri mitoitusmenetelmästä Suomessa käytetään mitoituslupaa 2, eli osavarmuuslukujen yhdistelmää A1 + M1 + R2, jolloin osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin tai kuormien vaikutuksiin ja maan kestävyteen (SFS-EN 1997-1, 32; SFS-EN 1997-1 NA, 3). Standardin SFS-EN 1997-1 Suomen kansallisen liitteen mukaiset sarjan A1 osavarmuusluvut (STR/GEO) on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kuormien tai kuormien vaikutusten osavarmuusluvut (STR/GEO) (SFS-EN 1997-1 NA, 6).

Kuorma	Merkintä	Sarja	
		A1	A2
<b>Pysyvä:</b>			
Epäedullinen			
(Yht. 6.10a)		1,35 K <sub>FT</sub>	
(Yht. 6.10b)	γ <sub>Gk,j, sup</sub>	1,15 K <sub>FT</sub>	
(Yht. 6.10)			1,0 K <sub>FT</sub>
Edullinen			
(Yht. 6.10a)		0,9	
(Yht. 6.10b)	γ <sub>Gk,j, inf</sub>	0,9	
(Yht. 6.10)			1,0
<b>Muuttuva:</b>			
Epäedullinen			
(Yht. 6.10b)	γ <sub>Q</sub>	1,5 K <sub>FT</sub>	
(Yht. 6.10)			1,3 K <sub>FT</sub>
Edullinen		0	0

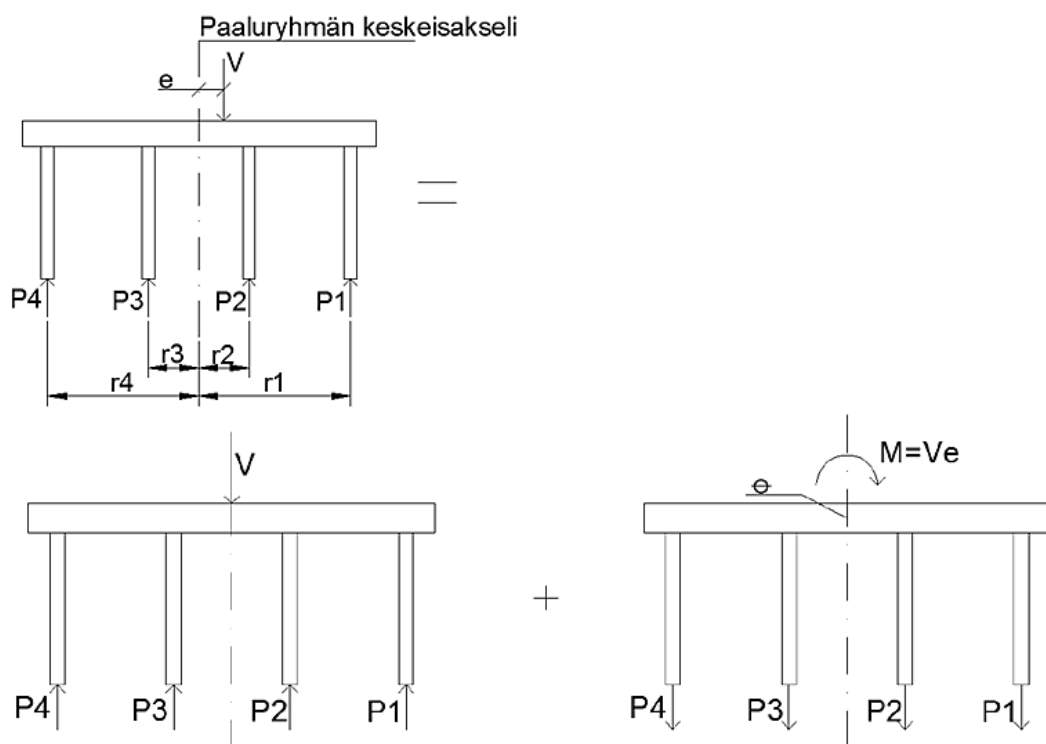
Mitoitusluvun 2 mukaisia sarjan M1 ja R2 osavarmuuslukuja on käsitelty myöhempanä. Taulukossa 3 esitetyt sarjan A1 mukaiset kuormien osavarmuusluvut vastaavat kaavojen 2 ja 3 mukaisia kuormien osavarmuuslukuja. Negatiiviseen vaippahankaukseen liittyen



on Paalutusohjeessa 2011 todettu, että siitä aiheutuvien kuormien mitoitusarvoja laskettaessa käytetään kestävyysosavarmuuslukuja (RIL 254-2011, 49). Asiaa on sivuttu edellä.

### 3.3 Aksiaalisten kuormien jakautuminen paaluille

Perustusten yläpuolisista rakenteista kullekin perustuksen osalle välittyvien kuormitusten ja määräävän kuormitustapauksen määrittämisen lisäksi käytännön suunnittelutyössä tulee huomioida, että paaluryhmän yksittäisten paalujen sama osuus paaluryhmälle määritetystä kokonaiskuormasta saattaa vaihdella. Esimerkiksi paaluryhmän paalujen painopisteakseliin nähden epäkeskeinen kuormitus aiheuttaa statiikan oppien mukaisesti paaluryhmään momenttikuormitusta, josta syntyy yksittäiseen paaluun joko puristus- tai vetorasituksia kuvan 8 periaatteiden mukaisesti (Rantamäki & Tammirinne 1979, 66).



Kuva 8. Paaluryhmän epäkeskeinen kuormitus (Talsi 2012, 22).

Edellisen kuvan merkintöjen mukaisesti kuvassa ylhäällä on esitetty paaluryhmän epäkeskeisen (e) vertikaalikuorman (V) jakautuminen alemman rivin kuvien mukaisesti keskeiseksi vertikaalikuormaksi ja momenttikuormaksi (M) ja edelleen yksittäisten paalujen kuormiksi (P1...P4), joiden suuruus voi kuvan oikeassa alareunassa esitetystä tilanteesta olla negatiivinen riippuen paalun etäisyydestä ( $r_1...r_4$ ) suhteessa paaluryhmän keskiakseliin (Talsi 2012, 22, 23). Yhden paalun paalukuorma on siis kuvassa alhaalla esitettyjen kahden kuormitustilanteen synnyttämien paalukuormien summa (Rantamäki & Tamminne, 1979, 67). Epäkeskeisen paalukuorman aiheuttamien rasitusten määrittämisen laskentakaavoja ja laskentaesimerkkejä on esitetty esimerkiksi oppikirjassa ”Pohjarakennus” (Rantamäki & Tamminne 1979, 66–68), mutta laskentakaavoihin ei perehdytä yksityiskohtaisemmin. Pystysuoraan paaluryhmään kohdistuva pystysuora kuormitusresultantti tulisi lähtökohtaisesti saada vaikuttamaan paaluryhmään nähden keskeisesti, jolloin samanlaisia paaluja käytettäessä paaluihin muodostuva kimmainen kokoonpuristuma olisi yhtä suuri ja kuormitusresultantti jakautuisi tasan kaikille paaluryhmän paaluille (Rantamäki & Tamminne 1979, 66). Paalujen sijaitessa anturaan nähden symmetrisesti perustukseen ei synny vääntöä (Leskelä 2008, 454).

## 4 TUKIPAALUN PURISTUSKESTÄVYYS

Eurokoodin mukaisia rajatilatarkasteluja varten tarvitaan kuormien mitoitusarvojen lisäksi mitoitusarvoja kestävyyksille. Tarkasteltavat rajatilat voivat esiintyä maapohjassa, rakenteessa tai yhdistettynä murtumana rakenteessa ja maapohjassa, joten kestävyyttä on tarkasteltava kolmella eri merkitystasolla (SFS-EN 1997-1, 20). Kestävyydellä tarkoitetaan yleisesti rakenteen minkä tahansa osan tai sen poikkileikkauksen kykyä vastustaa kuormien vaikutusta vaurioitumatta mekaanisesti (SFS-EN 1990, 30). Sama *kestävyyden* käsite liitetään myös maan kestävyuteen (SFS-EN 1997-1, 12). Tässä opinnäytetyössä on tarkasteltu aksiaalisesti kuormitetun tukipaalun murtorajatilan puristuskestävyyden määrittämisen perusteita ja käytäntöjä Paalutusohjeessa 2011 esitettyjen periaatteiden mukaisesti ottaen huomioon maan kestävyuden vaikutukset. Tarkastelun ulkopuolelle on kuitenkin rajattu mahdollinen paaluryhmän rakenteen ja maapohjan yhdistetty murtumismekanismi, jossa paalujen ja niiden välisen maan muodostaman blokin puristuskestävyyttä tarkastellaan käsittelemällä blokkia yksittäisenä suuriläpimittaisena paaluna (RIL 254-2011, 59).

Aksiaalisesti kuormitetun tukipaalun murtorajatilan lopullinen puristuskestävyys määräytyy joko paalun geoteknisen puristuskestävyyden tai paalun rakenteellisen kestävyuden perusteella. Geoteknisen puristuskestävyyden määrittämisessä otetaan huomioon paalun kärkeä tukevan kallion tai tiivisrakenteisen maakerroksen kestävyys, toisin sanoen niiden kyky ottaa vastaan paaluilta tulevat kuormat (Haavisto 2015, 10). Rakenteellisen puristuskestävyyden määrittämisessä otetaan huomioon paalun asennuksen aikaiset lyöntirasitukset ja käytön aikainen nurjahduskestävyys. Nurjahduskestävyys voi muodostua määrääväksi, kun paalun kestävyyttä rajoittaa löyhän maaperän riittämätön sivuntuenta. Löyhässä maaperässä myös käytön aikaisen paaluun kohdistuvan kuormituksen keston vaikutukset voivat muodostua määrääväksi.

Paalun geoteknisen ja rakenteellisen kestävyuden määrittämisen perusteisiin ja käytäntöihin on perehdytty yksityiskohtaisemmin myöhempanä. Paalun kestävyuden määrittämisen suunnitteluperusteiden lisäksi on tarkasteltu paaluvalmistajien esittämien mitoitustaulukoiden käyttöä käytännön suunnittelutyössä.

#### 4.1 Kestävyyden määrittämisen suunnitteluperusteet

##### Osavarmuusluvut

Paalun kestävyys määrittämisessä käytettäviä osavarmuuslukuja on käsitelty periaate-  
tasolla ja paalukuormien osalta edellä. Suomessa käytettävän mitoitetun 2 mukai-  
sesti paalun kestävyydelle käytetään sarjan R2 mukaisia kestävyys osavarmuuslu-  
kuja, jotka on tässä opinnäytetyössä käsiteltyjen maata syrjäyttävien puristusrasitettujen  
paalujen osalta esitetty taulukossa 4 (SFS-EN 1997-1 NA, 3; SFS-EN 1997-1, 32).

Taulukko 4. Syrjäyttävien paalujen kestävyys osavarmuusluvut (SFS-EN 1997-1 NA,  
7).

<b>Kestävyys</b>	<b>Merkintä</b>	<b>Sarja R2</b>
Kärki	$\gamma_b$	1,20
Vaippa (puristus)	$\gamma_s$	1,20
Kokonais-/yhdistetty (puristus)	$\gamma_t$	1,20

Tämän opinnäytetyön yhteydessä nurjahdusmitoituksessa tarkasteltavalle maan para-  
metrille, maan suljetulle leikkauslujuudelle, käytetään sarjan M1 mukaista osavarmuutta  
1,0 taulukon 5 mukaisesti (SFS-EN 1997-1, 32).

Taulukko 5. Maaparametrien osavarmuusluvut (STR/GEO) (SFS-EN 1997-1 NA, 7).

<b>Maaparametri</b>	<b>Merkintä</b>	<b>Sarja</b>	
		<b><i>M1</i></b>	<b><i>M2</i></b>
Leikkauskestävyysskulma <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  $\tan \phi'$

Nurjahdusmitoituksessa varmuus kohdistetaan maan kestävyteen, jolle käytetään sar-  
jan R2 mukaista osavarmuutta 1,5 taulukon 6 perusteella (SFS-EN 1997-1, 32).

Taulukko 6. Tukirakenteiden kestävyysluvut (SFS-EN 1997-1 NA, 9).

<u>Kestävyys</u>	<u>Merkintä</u>	<u>Sarja R2</u>
Kantokestävyys	$\gamma_{R,v}$	1,55
Liukumiskestävyys	$\gamma_{R,h}$	1,1
Maan kestävyys	$\gamma_{R,e}$	1,5

Edellä on esitetty osavarmuuslukujen käytön periaate Suomessa käytettävän SFS-EN 1997-1 mitoitustavan 2 mukaisesti maata syrjäyttävän puristusrasitetun tukipaalun kestävyyttä tarkasteltaessa. Käynnissä olevan Paalutusohjeen 2011 uudistustyöhön liittyvän Betoniteollisuuden paalujaoksen käynnistämän tutkimuksen esiselitysvaiheen perusteella on kuitenkin todettu tarve etenkin maan osavarmuusluvun käytön selkeyttämiselle nurjahdusmitoituksessa (Haavisto & Laaksonen 2015).

### Korrelaatiokertoimet

Paalun kestävyys määrittämisessä tarvitaan osavarmuuslukujen lisäksi niin sanottuja korrelaatiokertoimia. Korrelaatiokerroin  $\xi$  alaindekseineen on koestettujen paalujen tai koeprofiilien (tutkimusprofiilien) lukumäärästä riippuva kerroin, joka liittyy kolmeen eri paalun kestävyys määrittämisen tapaan: staattisiin koekuormituksiin ( $\xi_1$  ja  $\xi_2$ ), dynaamisiin koekuormituksiin ( $\xi_5$  ja  $\xi_6$ ) ja pohjatutkimustuloksiin perustuvaan kestävyys määrittämiseen ilman koekuormituksia ( $\xi_3$  ja  $\xi_4$ ) (SFS-EN 1997-1, 18). Tässä opinnäytetyössä ei perehdytä yksityiskohtaisesti paalun kestävyys määrittämiseen pohjatutkimustulosten tai staattisten koekuormitusten perusteella, joten taulukossa 7 on esitetty ainoastaan Suomessa käytettävät dynaamisten koekuormitusten korrelaatiokertoimet  $\xi_5$  ja  $\xi_6$ , joita voidaan soveltaa myös iskuaaltoanalyysin perusteella määritettyjä loppulyöntiehtoja käytettäessä (RIL 254-2011, 73, 78).

Taulukko 7. Korrelaatiokertoimet ominaisarvojen johtamiseksi dynaamisista koekuormituksista (RIL 254-2011, 75).

$n^*$	2–4/1–4 %	5–9/5–39 %	10–14/40–64 %	15–19/65–89 %	$\geq 20/90–100$ %
$\xi_5$	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
$\xi_6$	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

Esitettyssä taulukossa lukumäärä  $n$  tarkoittaa joko paalujen mittausten todellista lukumäärää (kpl) tai mitattavien paalujen prosentuaalista osuutta paalujen kokonaismäärästä (%) sen perusteella, kumpi johtaa pienempään korrelaatiokertoimen arvoon. Lukumäärässä  $n$  huomioidaan ainoastaan geoteknisen kestävyuden kannalta samanlaisissa pohjasuhteissa olevat keskenään samanlaiset paalut (RIL 254-2011, 75).

Taulukon 7 korrelaatiokertoimien lukuarvot vastaavat standardin SFS-EN 1997-1 Suomen kansallisen liitteen taulukon A.11(FI) korrelaatiokertoimien arvoja, mutta taulukoiden esitystavat poikkeavat hieman muuttujan  $n$  lukumäärien ja prosenttiosuuksien osalta (SFS-EN 1997-1 NA, 8).

Taulukon 7 mukaisesti korrelaatiokertoimet  $\xi_5$  ja  $\xi_6$  ovat keskenään erisuuria, ja ne eroavat käytön osalta toisistaan siten, että edellinen kohdistetaan paalun kestävyyksien mittaviin keskiarvoihin ja jälkimmäinen kestävyyksien mitattavaan minimiarvoon kaavassa 8 esitetyllä tavalla. Korrelaatiokerrointa käytetään periaatteessa paalun geoteknisen kestävyuden ominaisarvon ( $R_{c,k}$ ) määrittämiseen ("johtamiseen"), jonka perusteella määritetään edelleen geoteknisen kestävyuden mitoitusarvo ( $R_{c,d}$ ) ottamalla huomioon tapauskohtainen asianmukainen osavarmuus. Korrelaatiokertoimen suuruus on kääntäen verrannollinen kestävyuden ominaisarvon (ja mitoitusarvon) suuruuteen. Taulukon 7 perusteella huomataankin, että mitä useampia paaluja koestetaan, sitä pienempi on korrelaatiokerroin, jolloin paalun kestävyuden mitoitusarvo ( $R_{c,d}$ ) muodostuu vastaavasti suuremmaksi. Paalun kestävyuden mitoitusarvoa voidaan edelleen kasvattaa, mikäli paalun kannattama rakenne on niin sanotusti jäykkä rakenne. Tällöin rakenne kykenee siirtämään kuormia "heikoilta" paaluilta "vahvoille", mikä huomioidaan korrelaatiokertoimen avulla jakamalla kertoimet  $\xi_5$  ja  $\xi_6$  luvulla 1,1. (RIL 254-2011, 74, 75.) Paalutusohjeessa 2011 on esitetty lisää taulukon mukaisten korrelaatiokertoimien käytössä huomioitavia asioita esimerkiksi paalupituuksien vaihdellessa huomattavasti tai käytettäessä ns. signaalinsovitusta (RIL 254-2011, 73–75).

#### 4.1.1 Paalun geotekninen puristuskestävyys

Paalun geotekninen puristuskestävyys voidaan yleisesti määrittää staattisten tai dynaamisten koekuormitusten perusteella, pohjatutkimustulosten perusteella ilman koekuormituksia, paalutuskaavojen perusteella tai iskuaaltoanalyysiin perustuvien loppulyöntiehtojen avulla.

Kyseisiä paalun kestävyuden määrittämisen menetelmiä on tarkasteltu seuraavaksi huomioiden, että tämän opinnäytetyön rajausten mukaisesti dynaamisten koekuormitusten ja iskuaaltoanalyysin perusteella laadittavien loppulyöntiehtojen tarkasteluun on keskitytty muita menetelmiä yksityiskohtaisemmin. Kyseisten menetelmien käyttökelpoisuus perustuu muun muassa iskuaaltoteorian hyödyntämiseen. Iskuaaltoteorian avulla kyetään tarkastelemaan paalun asennusta matemaattisesti ottamalla huomioon, että pitkä ohut sauva ei puristu kauttaaltaan tasaisesti kun sitä lyödään järkäleellä nopeasti yläpäästä, vaan sauvassa lähtee syöksymään äänennopeudella puristumavyöhyke eli iskuaalto. Iskuaaltoteorian avulla voidaan huomioida paalun lyönnin aiheuttamia todellisia hetkellisiä jännityksiä, joiden merkitystä paalun rakenteen näkökulmasta on käsitelty tarkemmin myöhempanä. (Jääskeläinen 2009, 64.)

### **Kestävyuden määrittäminen koekuormitusten perusteella**

Paalun kestävyuden määrittämisen menetelmistä tarkimpia ja luotettavimpia ovat paaluille tehtävät koekuormitukset, jotka voidaan toteuttaa joko staattisina tai dynaamisina koekuormituksina (Rantamäki & Tammirinne 1979, 60). Koekuormitettava paalu voi olla erikseen koetarkoituksessa asennettu, mutta se voi myös muodostaa osan lopullista perustusta (RIL 254-2011, 53). Koekuormituksia tulee tehdä esimerkiksi tilanteessa, jossa paalun asennuksen aikana havaittu paalun käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi ja epäedullisesti pohjatutkimusten perusteella oletetusta paalun käyttäytymisestä. Lisäksi esimerkiksi vaativimmassa paalutustyöluokassa 3 lyötävien paalujen geotekninen kestävyys on aina varmistettava joko dynaamisilla tai staattisilla koekuormituksilla. (RIL 254-2011, 54, 55.) Paalutusohjeessa 2011 osan 1 kohdassa 4.4.1 (RIL 254-2011, 54, 55) on esitetty yksityiskohtaisemmin, missä tilanteissa koekuormituksia tulee tehdä tai missä tilanteissa niitä voidaan mahdollisesti käyttää hyödyksi.

Staattisilla koekuormituksilla tarkoitetaan paalun kestävyuden määrittämisen menetelmää, jossa koestettavaa paalua painetaan tavallisimmin hydraulisella puristimella vastapainojen avulla, joko vakionopeudella tai paalun kuormaa portaittain lisäämällä. Vastapainoina käytetään joko lavarakennelmaa, joka on sijoitettu koekuormitettavan paalun päälle keskeisesti, tai vaihtoehtoisesti vetopaaluja, jotka on lyöty koekuormitettavan paalun sivuille ja yhdistetty toisiinsa tukevien teräspalkkien avulla. Menetelmä soveltuu geo-

logisten olosuhteiden osalta paremmin keskieuropalaisiin kuin suomalaisiin olosuhteisiin, eikä tule tyypillisesti kyseeseen tämän opinnäytetyön rajausten mukaisissa paalun kestävyys tarkasteluissa. (Rantamäki & Tammirinne 1979, 60, 61; RIL 254-2011, 57.)

Suomen geologisissa olosuhteissa voidaan staattisten koekuormitusten sijaan käyttää paalun kestävyys määrittämiseen dynaamisia koekuormituksia, jotka perustuvat sähköisten mittalaitteiden ja paalun yläpään asennettujen anturien avulla suoritettuihin iskuaaltomittauksiin. Paalun yläpäässä vaikuttavan lyöntivoiman, partikkelinopeuden ja heijastusaallon mittausten avulla voidaan laskennallisesti iskuaaltoteorian perusteella määrittää paalun alapäässä vaikuttava murtovoima. Menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi paalujen ehjyyden osoittamiseen, sillä paalun alapään mahdollinen murskautuminen havaitaan heijastusaalossa. Ehjyysmittauksilla on tosin mahdollista havaita vain suuret vauriot. (Jääskeläinen 2009, 69; RIL 254-2011, 57, 248.) Mikäli kohteessa tehdyt pohjatutkimukset ovat riittävän perusteelliset, dynaamisia koekuormituksia voidaan käyttää myös suoraan paalun kestävyys arvioimiseen (RIL 254-2011, 56). Tällöin geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo  $R_{c,d}$  lasketaan periaatteessa joko koekuormituksessa mitattujen puristuskestävyyksien keskiarvojen  $(R_{c,m})_{mean}$  tai minimiarvojen  $(R_{c,m})_{min}$  perusteella seuraavien Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 74) mukaisten kaavojen avulla:

$$R_{c,d} = R_{c,k} / \gamma_t$$

Kaava 7. Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo (RIL 254-2011, 74).

$$R_{c,k} = \text{Min} \{ ((R_{c,m})_{mean} / \xi_5) ; ((R_{c,m})_{min} / \xi_6) \}$$

Kaava 8. Paalun geoteknisen puristuskestävyyden ominaisarvo (RIL 254-2011, 74).

Käytännön suunnittelutyössä on aluksi määritettävä koekuormitettavien (mitattavien) paalujen määrä sekä tavoiteltavan geoteknisen kestävyys ( $R_{c,d}$ ) suuruus. Tavoiteltava geoteknisen kestävyys arvo voi perustua esimerkiksi valmiisiin taulukoituihin paalukestävyys (ks. liite 4 ja 5) tai ennakoivaan arvioon kohteen pohjaolosuhteissa luotettavasti saavutettavasta kestävydestä. Seuraavaksi tämän tavoiteltavan geoteknisen kestävyys mitoitusarvon ( $R_{c,d}$ ) pohjalta määritetään esitettyjen kaavojen (kaavat 7 ja 8) perusteella laskennalliset tavoitearvot mitattaville kestävyys keskiarvoille ja mini-



miarvoille. Tavoitearvot riippuvat korrelaatiokertoimista  $\xi_5$  ja  $\xi_6$ , jotka määräytyvät taulukon 7 mukaan koekuormitettavien paalujen määrän perusteella. Lopuksi verrataan laskennallisesti määritettyjä tavoitearvoja suoritettujen koekuormitusten mitattuihin arvoihin, jolloin tavoitearvojen toteutuessa alkuperäinen tavoiteltava geoteknisen kestävyysden mitoitusarvo ( $R_{c,d}$ ) on saavutettu. (SSAB 2015, 17; RrPileCalc 2015.)

### **Kestävyyden määrittäminen pohjatutkimusten perusteella ilman koekuormituksia**

Paalun kestävyys määrittämistä pohjatutkimustulosten perusteella ilman koekuormituksia voidaan käyttää esimerkiksi paalun kärjen kalliokontaktin osoittamiseen. Menetelmä on itse asiassa ensisijainen porapaalujen kestävyys määrittämisessä käytettävä menetelmä, sillä kallion pinta on kyettävä luotettavasti toteamaan poraushavaintojen lisäksi samanaikaisesti myös pohjatutkimusten perusteella (RIL 254-2011, 70; SSAB 2015, 17). Porapaalujen käyttöön ei kuitenkaan perehdytä yksityiskohtaisemmin tässä opinnäytetyössä. Pohjatutkimustuloksia voidaan periaatteessa tarvita myös lyöntipaalun kärjen kalliokontaktin varmistamiseen. Tapauksessa, jossa paalun kärki voidaan Paalutusohjeessa 2011 esitettyjen periaatteiden mukaisesti olettaa ehjään suomalaiseen kallioon tukeutuvaksi, paalun kärjen geotekninen kestävyys voidaan määrittää laskukaavan avulla kallion puristuslujuuden ja lyöntipaalun kärkitapin halkaisijan perusteella (RIL 254-2011, 70, 71). Paalun rakenteellinen kestävyys muodostuu tyypillisesti kuitenkin näin määritettyä geoteknistä kestävyyttä mitoittavammaksi (RIL 254-2011, 70).

Paalutusohjeessa 2011 (RIL 254-2011, 64–79) on esitetty pohjatutkimustuloksiin perustuvia vaihtoehtoisia laskentamenetelmiä, joita voidaan käyttää kitkapaalun vaippa- ja kärkekestävyyden määrittämiseen. Menetelmät eivät tule kyseeseen tämän opinnäytetyön rajausten mukaisissa tukipaalujen kestävyys määrittämisen tarkasteluissa. Ohjeessa esitettyjä paalun kärjen kantavuuskaavoja ei esimerkiksi suositella käytettäväksi tukipaalun kärjen geoteknisen kestävyys arvioimiseen tiiviissä karkearakeisessa maakerroksessa tai moreenikerroksessa, koska kyseisten kantavuuskaavojen avulla ei voida ottaa luotettavasti huomioon paalun lyöntityön maapohjaa tiivistävää vaikutusta paalun kärkivyyhykkeessä (RIL 254-2011, 68).

### **Kestävyyden määrittäminen paalutuskaavojen perusteella**

Paalutuskaavoilla voidaan periaatteessa arvioida paalun geoteknistä kestävyyttä huomioiden, että maakerrosrajat ja paalujen arvioitu tunkeutumistaso on aina oltava tiedossa riittävällä tarkkuudella (RIL 254-2011, 76, 77). Paalutuskaavojen käyttöön ei kuitenkaan perehdytä tämän opinnäytetyön yhteydessä paalun kestävyyden määrittämisen tarkasteluissa; paalutuskaavoja käytetään ensisijaisesti täydentämään muita suunnittelutoimenpiteitä, sillä paalutuskaavojen käyttökelpoisuutta rajoittavat niiden alkuoletukset, jotka yksinkertaistavat todellisuutta. Lyönnissä syntyvän voiman oletetaan esimerkiksi vaikuttavan samanaikaisesti koko paalun pituudelle jakautuneena, paalua oletetaan yksinkertaistetusti lyötävän löyhän maakerroksen läpi tiukkaa pohjaa vasten, dynaamisia ilmiöitä ei saada erilleen staattisista eikä mahdollista löyhän maakerroksen sisältämän tiiviin välikerroksen vaikutusta kyetä riittävästi huomioimaan. Paalun todellisia hetkellisiä jännityksiä ei täten kyetä paalutuskaavojen avulla tarkastelemaan. (Jääskeläinen 2009, 59, 63, 64.) Paalutuskaavoja voidaan kuitenkin käyttää tietyin edellytyksin esimerkiksi tilanteissa, jossa paalun lyöntiin käytettävä lyöntilaite ei pysty mobilisoimaan loppulyöntitulukon mukaan riittävää geoteknistä murtokuormaa (SSAB 2015, 17, 18).

### **Kestävyyden määrittäminen iskuaaltoanalyysiin perustuvien loppulyöntiehtojen avulla**

Paalun geotekninen kestävyys voidaan määrittää iskuaaltoanalyysiin perustuvien loppulyöntiehtojen avulla. Menetelmä perustuu iskuaaltoteoriaan, jonka pohjalta voidaan vetää yhteys paalujen loppulyöntivaiheeseen: kun paalun painuma lyötäessä pienenee, maapohjasta heijastuva puristusaalto kasvaa ja jännitys paalun alapäässä nousee (Jääskeläinen 2009, 68). Menetelmällä kyetään siis ottamaan huomioon paalun asennuksen aikaiset paikalliset jännitykset, kuten dynaamisia koekuormituksia käytettäessä, mutta periaatteellisenä erona on, ettei paikan päällä tehtäviä mittauksia tarvita (paitsi vaativimmassa paalutustyöluokassa 3, jossa kestävyys on varmistettava dynaamisilla koekuormituksilla).

Tarkemmin iskuaaltoanalyysillä tarkoitetaan Paalutusohjeen 2011 mukaisesti matemaattista mallia, jonka avulla simuloidaan numeerisesti paalun ja maapohjan vuorovaikutusta ottaen huomioon asennuksessa käytettävän järkäleen ja iskutyynyn ominaisu-

det. Muodostettavan matemaattisen mallin avulla kyetään tavallisesti määrittämään lyöntivastuksen yhteys paalun geotekniseen puristuskestävyyteen, joten iskuaaltoanalyysiä voidaan käyttää tukipaalujen loppulyöntiehtojen määrittämiseen. (RIL 254-2011, 78.)

Matemaattisen mallin luomiseen loppulyöntiehtoja varten tarvittavat tiedot käytettävästä paalusta, lyöntilaitteesta, iskutyynystä ja iskusuojasta sekä ohjeet maamallin luomiseen ja käytettäviin maaparametreihin on esitetty yksityiskohtaisesti Paalutusohjeessa 2011 (RIL 254-2011, 123–129).

Paalun kestävyden määrittäminen suoritetaan käytännössä seuraavasti: edellä mainittujen Paalutusohjeessa 2011 esitettyjen ohjeiden periaatteiden mukaisesti paaluvalmistaja määrittää paalutuotteensa rakenteellisista ominaisuuksista riippuvan suurimman osoitettavissa olevan geoteknisen kestävyden ominaisarvon ( $R_{k,geo}$ ) perusteella loppulyöntiehdot, joiden täytyessä paalu on käytännössä saavuttanut kyseinen geotekninen kestävyden. Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 78) mukaan geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo  $R_{c;d}$  voidaan määrittää iskuaaltoanalyysin avulla samojen periaatteiden mukaisesti kuin dynaamisten koekuormitusten avulla. Loppulyöntiehtojen täytyttyä paalun saavuttaman geoteknisen puristuskestävyyden ominaisarvon perusteella voidaan määrittää paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo ( $R_{c;d}$ ) seuraavan kaavan avulla:

$$R_{c;d} = R_{k,geo} / (\xi_5 \times \gamma_t)$$

Kaava 9. Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo (SSAB 2015, 17; RrPileCalc 2015).

Esitettyssä kaavassa korrelaatiokerroin  $\xi_5$  määritetään taulukon 7 mukaisesti. Käytännössä korrelaatiokerroin  $\xi_5$  voidaan valita taulukon 7 ”oikeasta” reunasta, koska oletettavasti loppulyöntiehdot tarkistetaan kaikille paaluille, jolloin taulukon  $n = 100$  %. Kun paalun geotekninen puristuskestävyys määritetään iskuaaltoanalyysin perustuvia loppulyöntiehtojen avulla, korrelaatiokerroin on vielä kerrottava ns. mallikertoimella 1,05, jolloin  $\xi_5 = 1,40 \times 1,05 = 1,47$  (RIL 254-2011, 78). Muuten korrelaatiokerrointa koskevat samat lisähuomiot kuin dynaamisten koekuormitusten tapauksessa, esimerkiksi paalujen kannattaman rakenteen jäykkyyteen liittyen. Asiaa on käsitelty edellä.

#### 4.1.2 Asennuksen aikainen paalun lyönnin- ja momentinkestävyys

Lyömällä asennettavan tukipaalun lopullista puristuskestävyyttä tarkasteltaessa on otettava huomioon rasitukset, joita paalun rakenteeseen kohdistuu lyönnin aikana. Periaatteessa rakenteen on kestävä sitä enemmän lyönninaikaisia rasituksia, mitä suurempaa geoteknistä kestävyyttä paalurakenteella tavoitellaan (Törnqvist 2011, 25).

Edellä on käsitelty paalun geoteknisen kestävyuden osoittamista paalun lyöntiin perustuvilla menetelmillä (dynaamiset koekuormitukset ja iskuaaltoanalyysin perusteella määritettävät loppulyöntiehdot), jolloin asennuksen aikaisia paalun todellisia hetkellisiä jännityksiä on mahdollista tarkastella iskuaaltoteorian perusteella (Jääskeläinen 2009, 64). Iskuaaltoanalyysin perusteella määritettäviä loppulyöntiehtoja noudattamalla asennuksen loppuvaiheen aikaiset paalun lyöntijännitykset pysyvät sallituissa rajoissa (SSAB 2015, 15). Lisäksi esimerkiksi pitkiä paaluja käytettäessä mahdolliset merkittävät veto-rasitukset paalun tunkeutuessa kantavaan maakerrokseen on otettu loppulyöntiohjeissa huomioon (RIL 254-2011, 127). Loppulyöntien aikaisten rasitusten lisäksi paaluun kohdistuu rasituksia kuitenkin myös upotusvaiheessa. Paaluun syntyy esimerkiksi iskusuojan kuluneisuudesta riippuen suuria vetojännityksiä pehmeän maakerroksen (saven) läpi lyötäessä, erityisesti kun pehmeää maakerrosta edeltää täyttökerros jonka läpi asennus suoritetaan (RIL 254-2011, 127). Paalutusohjeessa 2011 on esitetty yksityiskohtaiset ohjeet, joiden mukaisesti kyseiset rasitukset tulee huomioida paaluvalmistajan paalutuotteilleen esittämässä asennusohjeissa (RIL 254-2011, 123–129).

Seuraavaksi on käsitelty tarkemmin paalun lyönnin- ja momentinkestävyuden määrittästä Paalutusohjeessa 2011 esitettyjen periaatteiden mukaisesti, jolloin kestävyys määräytyy käytännössä paalun ominaisuuksien ja paalutustyöluokan mukaan.

Paalutustyöluokilla PTL1, PTL2 ja PTL3 (vaativin) otetaan paalun lyönnin- ja momentinkestävyyttä määritettäessä huomioon paalutustyön toteutus, esimerkiksi asennuksessa käytettävän kaluston asianmukaisuuden ja paalutustyön suorittajan pätevyyden vaatimusten kautta (RIL 254-2011, 99, 194–197). Tavanomaisessa rakentamisessa kohteelle vaadittava alhaisin mahdollinen paalutustyöluokka määräytyy seuraamusluokan ja geoteknisen luokan perusteella taulukon 8 mukaisesti (RIL 254-2011, 99).

Taulukko 8. Paalutustyöluokat tavanomaisessa rakentamisessa (RIL 254-2011, 100).

Geotekninen luokka, ks. kohta 2.3	Seuraamusluokka, ks. SFS-EN 1990		
	CC1	CC2	CC3
GL1*	PTL1...PTL3	PTL2...PTL3	PTL2...PTL3
GL2	PTL1...PTL3	PTL2...PTL3	PTL3
GL3	PTL2...PTL3	PTL2...PTL3	PTL3

\*ei ole yleensä paaluttamista edellyttävä kohde

Esitetyn taulukon perusteella voidaan todeta esimerkiksi, että paalutettava kohde, joka kuuluu seuraamusluokkaan CC2 ja geotekniseen luokkaan GL2, voi kuulua joko paalutustyöluokkaan PTL2 tai PTL3, mutta ei paalutustyöluokkaan PTL1.

Paalun suurin puristuslyöntivoima asennettaessa ( $F_{c;lyönti}$ ) määräytyy paalumateriaalin, paalun materiaaliominaisuuksien ja dimensioiden perusteella taulukon 9 mukaisesti. Samassa taulukossa on esitetty myös paalutuotteen suurin tavoiteltava geoteknisen kestävyden ominaisarvo ( $R_{k;geo;max}$ ), joka määräytyy paalumateriaalin, suurimman puristuslyöntivoiman ( $F_{c;lyönti}$ ) ja paalutustyöluokan perusteella.

Taulukko 9. Geoteknisen kestävyden ominaisarvon maksimiarvo ja suurin keskeinen lyöntivoima (RIL 254-2011, 101).

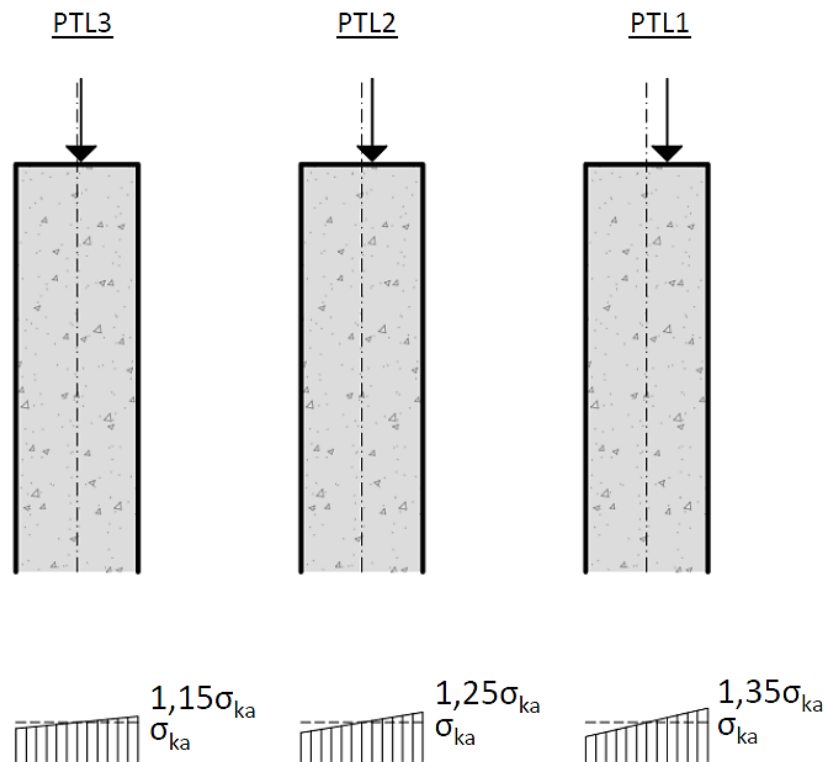
Paalun materiaali	Suurin sallittu puristusrasituksen aikaansaava keskeinen lyöntivoima asennettaessa $F_{c;lyönti}$	Suurin kestävyden ominaisarvo $R_{k;geo;max}$
Teräspaalu	$\leq 0,9 \cdot f_{yk} \cdot A_s$	PTL3: $R_{k;geo;max} \leq F_{c;lyönti}$ PTL2: $R_{k;geo;max} \leq 0,8 \cdot F_{c;lyönti}$ PTL1: $R_{k;geo;max} \leq 0,6 \cdot F_{c;lyönti}$
Teräsbetonipaalu	$\leq 0,8 \cdot f_{ck} \cdot A_c^a$	PTL3: $R_{k;geo;max} \leq F_{c;lyönti}$ PTL2: $R_{k;geo;max} \leq 0,8 \cdot F_{c;lyönti}$ PTL1: $R_{k;geo;max} \leq 0,6 \cdot F_{c;lyönti}$

Edellisessä taulukossa esiintyvät merkinnät tarkoittavat teräksen ( $f_{yk}$ ) ja betonin ( $f_{ck}$ ) materiaalin puristuskestävyyden ominaisarvoja sekä teräspaalun ( $A_s$ ) ja teräsbetonipaalun ( $A_c$ ) poikkileikkauksen pinta-aloja (RIL 254-2011, 100). Paalun suurin vetolyöntivoima asennettaessa ( $F_{t;lyönti}$ ) määräytyy taulukon 10 mukaisesti.

Taulukko 10. Jatkamattoman paalun suurin asennuksen aikainen vetovoima (RIL 254-2011, 101).

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

Geoteknisen kestävyys yläraja ( $R_{k,geo,max}$ ) määräytyy paalun kärkeen välittyvän keskimääräisen jännityksen perusteella. Käytännössä kuitenkin paalua asennettaessa lyöntilaitteen ja paalun yläpään välisen kontaktin epäkeskisyydestä ja paalun akselin suhteen vinoista lyönneistä aiheutuu reunajännityksiä, jotka ylittävät keskimääräisen jännityksen. Keskimääräisten jännitysten ylittämiseksi on määritetty paalutustyöluokittain seuraavat toleranssit: paalutustyöluokassa PTL3 keskimääräistä jännitystä ei tule ylittää enempää kuin 15 %, paalutustyöluokassa PTL2 vastaavasti 25 % ja paalutustyöluokassa PTL1 35 %. (RIL 254-2011, 100, 102.) Kuvassa 9 on havainnollistettu kyseisiä epäkeskeisistä asennuslyönneistä aiheutuvia suurimpia sallittuja keskimääräisen reunajännityksen ( $\sigma_{ka}$ ) ylityksiä.



Kuva 9. Paalutusohjeen 2011 mukaiset suurimmat sallitut asennuksen aikaiset reunajännitykset paalutustyöluokittain (Haavisto 2015, 16).

Puristus- ja vetokestävyyden lisäksi paalulta vaaditaan momentinkestävyyttä (Törnqvist 2011, 25). Taulukossa 9 esitetty  $R_{k,geo,max}$  on geoteknisen kestävyuden yläraja, jota ei käytännössä saavuteta, mikäli paalun rakenteen momentinkestävyydelle asetetut Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 103, 104) mukaiset vaatimukset eivät täyty. Kyseisiin momentinkestävyyksivaatimuksiin ei perehdytä tarkemmin, mutta Paalutusohjeessa 2011 esitetyn laskuesimerkin perusteella voidaan todeta, että paalun todellisen momentinkestävyuden ja momentinkestävyuden vaatimuksen suhteen avulla tulee tarvittaessa redusoida (pienentää) tavoiteltavaa geoteknisen kestävyuden ominaisarvoa  $R_{k,geo,max}$  (RIL 254-2011, 119–121).

Paalun lyönninaikaiset rasitukset sekä edellä esitetyt lyönnin- ja momentinkestävyuden vaatimukset huomioidaan paalun puristuskestävyyttä määritettäessä käytännössä seuraavalla tavalla: Paaluvalmistaja määrittää (ja takaa) paalutuotteelleen rakenteellisen lyönninkestävyuden ( $F_{c,lyönti}$  ja  $F_{t,lyönti}$ ) sekä suurimman mahdollisen tavoiteltavan geoteknisen kestävyuden ominaisarvon ( $R_{k,geo}$ ). Paalun asentaja vastaa puolestaan siitä, että paalun valmistajan esittämien kestävyksien perusteella määritettyjä edellä mainittuja upotus- ja loppulyöntiohjeita noudatetaan. Lisäksi paalun asentaja vastaa siitä, ettei mahdollisten paalun akselin suhteen vinojen tai epäkeskeisten lyöntien myötä ylitetä keskimääräisiä reunajännityksiä edellä esiteltyjä toleransseja enempää. (RIL 254-2011, 102.)

Käynnissä olevan Paalutusohjeen 2011 uudistustyöhön liittyvän Betoniteollisuuden paalujaoksen käynnistämän tutkimuksen esiselvitysvaiheen perusteella on todettu, ettei nykyisen ohjeistuksen mukaisille paalun asennuksen aikaisille taivutusmomenttikestävyuden vaatimuksille vaikuta olevan selkeitä perusteita. Paalun taivutuskestävyyttä ei saavuteta lyönnin aikana, joten reunajännityksien rajoittaminen olisi perustellumpi tapa paalun asennuksen aikaisen kestävyuden määrittämiseksi. (Haavisto & Laaksonen 2015.)

#### 4.1.3 Paalun nurjahdusmurtokestävyys

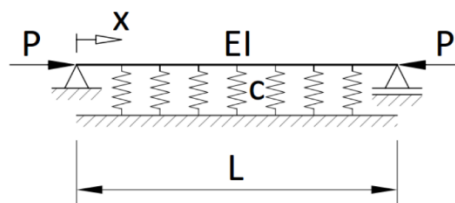
Edellä on tarkasteltu paalun kestävyuden määrittämistä paalun rakenteeseen kohdistuvien lyönninaikaisten rasitusten ja geoteknisen kestävyuden varmistamisen näkökulmista. Paalun lopullista puristuskestävyyttä saattaa kuitenkin rajoittaa asennustapahtuman jälkeinen, maan riittämättömän sivutuennan aiheuttama paalun stabiileetin menetykset eli nurjahtaminen. (Haavisto 2015, 10.) Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 109)

mukaan paalun nurjahduskestävyys määräytyy joko paalun murtuessa tai maan murtuessa.

### Alkukäyryden vaikutukset aksiaalisesti kuormitetun paalun rasituksiin

Paalua ei käytännössä saada koskaan asennettua aivan suoraan (RIL 223-2005, 47). Paalun varteen muodostuu lähtökohtaisesti asennuksen jälkeistä käyryyttä ennen varsinaista käytön aikaista kuormitusta. Käyristyneisyyden suuruuteen vaikuttavat Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 107) mukaan paalun ja jatkosten mittapoikkeamat, paalu- ja jatkosten määrä, paalun mitat, paalun asennustapa sekä maaperän pohjasuhteet. Kun alkukäyrää paalua kuormitetaan ulkoisella puristavalla normaalivoimalla ( $N$ ), se taipuu, jolloin paaluun muodostuu taivutusmomenttia ( $M$ ) (RIL 254-2011, 109; Haavisto 2015, 22). Esimerkiksi teräsbetonipaalujen kestävyudet yhdistettyjä rasituksia ( $N$  ja  $M$ ) kohtaan on esitetty paaluvalmistajan toimesta paalun poikkileikkauksen  $N$ – $M$ -kapasiteettia kuvaavien yhteisvaikutuskäyrästäjien avulla, joiden perusteella voidaan määrittää paaluun kohdistuvan normaalivoiman suuruutta vastaava momentinkestävyys paalutustyöluokan perusteella (Rakennusteollisuus RT 2013, 9–15).

Paalua ympäröivän maan leikkauslujuudesta riippuen paalu voidaan tulkita maan sivutukemaksi pilariksi, jolloin maan sivutuki saattaa pienentää alkukäyrän paalun aksiaalisesta kuormituksesta aiheutuvaa taivutusmomenttia (RIL 254-2011, 106, 107; Haavisto 2015, 21, 22). Paaluun kohdistuvia käytön aikaisia yhdistettyjä rasituksia voidaan tällöin tarkastella ajattelemalla paalu kimmoisella alustalla päistään kuormitetuksi palkiksi kuvan 10 periaatteiden mukaisesti (Haavisto 2015, 20).



Kuva 10. Winklerin alusta (Haavisto 2015, 20).

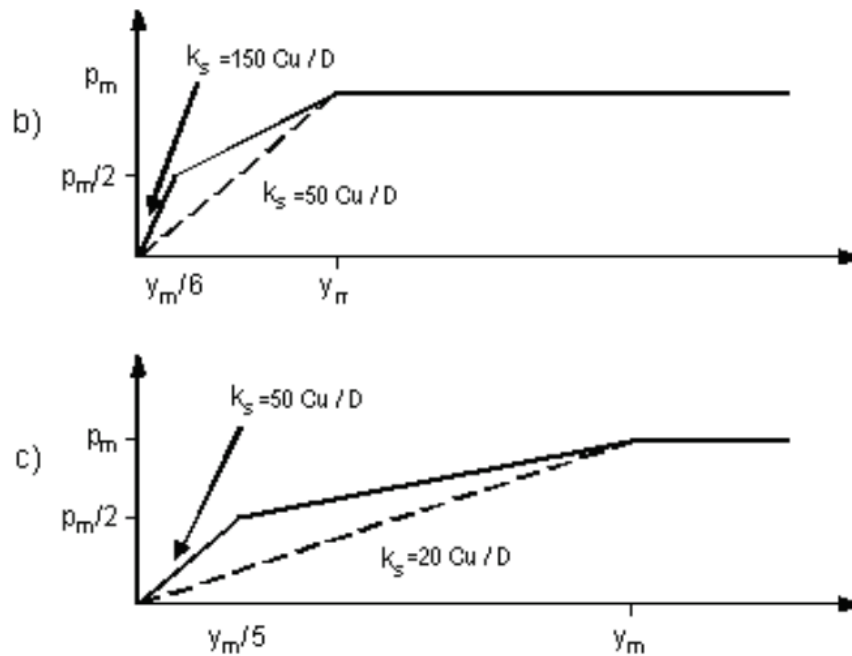


Esitetyn kuvan mukaiseen teoriaan (Winklerin alusta) ei perehdytä tässä tarkemmin, mutta Paalutusohjeessa 2011 (RIL 254-2011, 89) esitetyn periaatteen mukaisesti paalua tukevaa deformatuvaa väliainetta voidaan mallintaa maan vaakasuuntaisen alustaluvun avulla. Asiaa on käsitelty tarkemmin seuraavaksi.

### **Vaakasuuntaisten siirtymien mallintaminen alustalukujen avulla**

Maan muodostaman tukireaktion suuruus voidaan paalun nurjahdustarkastelun yhteydessä määrittää jousina maan alustalukujen avulla (RIL 254-2011, 109). Alustaluvut ( $k_s$ ) ovat niin sanottuja muodonmuutosominaisuuksia, joiden suuruuteen vaikuttavat maan ominaisuuksien lisäksi myös paalun mitat (RIL 254-2011, 95, 96). Alustalukujen avulla kuvataan paaluun kohdistuvan paineen ja vastaavien siirtymien välistä riippuvuutta eli niin sanottua sivupaine-siirtymäyhteyttä (RIL 254-2011, 94; Liikennevirasto 2012, 30).

Kun alkukäyrää paalua kuormitetaan ulkoisella normaalivoimalla, se taipuu, jolloin paalun poikkileikkaus käytännössä siirtyy vaakasuunnassa ( $y$ ). Tällöin paalua tukevan maan sivuvastuksesta aiheutuu paaluun kyseistä poikkileikkauksen siirtymää vastaava paine ( $p$ ) kuvan 12 periaatteen mukaisesti. Paalun siirtymää vastaava paine voi suurimmillaan olla maan sivuvastuksen ääriarvon,  $p_m$ , suuruinen (RIL 254-2011, 94). Maan tukireaktiota kuvaava jousi on kimmoinen, kunnes paalun sivuvastuksen ääriarvo ( $p_m$ ) saavutetaan. Sivuvastuksen ääriarvon saavuttamisen jälkeen jousi on plastinen, eli jousivoima pysyy vakiona paalun siirtymästä riippumatta. (Liikennevirasto 2012, 33.) Kimmoisen jousen jäykkyys liittyy alustaluvun avulla kuvatun sivupaine-siirtymäyhteykskuvaajan kulmaker-toimeen, joka voidaan nurjahdustarkastelun yhteydessä määrittää tietyissä tapauksissa esimerkiksi kuvassa 11 esitettyjen kuvaajien perusteella (RIL 254-2011, 97, 108; RRPi-leCalc 2015).



Kuva 11. Paalun sivupaine-siirtymäyhteys hienorakeisessa maassa (RIL 254-2011, 95).

Esitetyt kuvaajat perustuvat Paalutusohjeen 2011 mukaisiin suositeltuihin alustaluvun sivupaine-siirtymäyhteyksiin (RIL 254-2011, 94). Kuvassa esitettyjen kuvaajien yhtenäisen viiva kuvaa maan "todellista" käyttäytymistä, kun taas katkoviiva ainoastaan määrittää pisteen  $(p_m, y_m)$  (Liikennevirasto 2012, 31). Esimerkiksi alemman kuvaajan (c) yhtenäisen viivan kulmakertoimien suuruudesta vaihteluista huomataan kimmoisen jousen "todellisen" käyttäytymisen periaate: kimmoisen jousen jäykkyys pysyy vakiona määrättyyn paalun sivuttaissiirtymän arvoon asti ( $y_m/5$ ), jota suuremmilla siirtymän arvoilla jousen jäykkyys (kulmakerroin) pienenee, kunnes lopulta sivuvastuksen murtoarvoa ( $p_m$ ) vastaavan siirtymän ( $y_m$ ) myötä jousi menettää jäykkyytensä. Periaatteessa Paalutusohjeen 2011 mukainen nurjahduskestävyyden käsinlaskentamenetelmä ei siis kuvaa maan todellista käyttäytymistä, sillä kimmoisen jousen jäykkyys on kuvassa 12 esitetyn käsinlaskentamenetelmän periaatteen mukaisesti vakio siirtymän arvoon  $y_m$  asti. Käytännössä maan todellista käyttäytymistä on mahdollista mallintaa tietokoneohjelmien avulla, jolloin sivupaine-siirtymäyhteys voidaan jousen kimmoisella alueella jakaa kahteen osaan edellisen kuvan periaatteiden mukaisesti (Liikennevirasto 2012, 33; Isokangas 2015, 13). Alustalukujen määrittämistä ja vaikutusta sivupaine-siirtymäyhteyteen on käsitelty tarkemmin seuraavan kuormituksen keston vaikutuksiin liittyvän tarkastelun yhteydessä.

## Aksiaalisten paalukuormien pitkäaikaisuuden vaikutus

Paaluun käytön aikana kohdistuvan ulkoisen aksiaalisen kuormituksen kesto vaikuttaa paalun siirtymien ja sivupaineiden mallintamiseen alustalukujen avulla; kuormituksen pitkäaikaisuudella on alustalukujen ja maan sivuvastuksen kautta yhteys paalulle määrítettävään nurjahduskestävyyteen tapauksessa, jossa maa murtuu.

Maan alustaluku ( $k_s$ ) voidaan nurjahdustarkastelun yhteydessä määrittää vaativissa pohjarakennuskohteissa (geoteknisessä luokassa GL2) hienorakeisessa maassa maan suljetun leikkauslujuuden ( $c_u$ ) ja paalun halkaisijan ( $d$ ) suhteen perusteella kuormituksen kestosta riippuvan kertoimen avulla seuraavien kaavojen mukaisesti (RIL 254-2011, 97, 108):

$$k_s = 20 \dots 50 \times (c_u / d) \quad \text{pitkäaikaisessa kuormituksessa}$$

Kaava 10. Maan alustaluku (RIL 254-2011, 97).

$$k_s = 50 \dots 150 \times (c_u / d) \quad \text{lyhytaikaisessa kuormituksessa}$$

Kaava 11. Maan alustaluku (RIL 254-2011, 97).

Alustaluvun kaavojen kertoimet liittyvät kuvassa 11 esitettyjen kuvaajien kulmakertoimiin siten, että ylempi kuvaaja (b) esittää sivupaine-siirtymäyhteyttä lyhytaikaisessa kuormitustilanteessa (kaava 11) ja alempi kuvaaja (c) pitkäaikaisessa kuormitustilanteessa (kaava 10). Esimerkiksi pitkäaikaisessa kuormitustilanteessa nurjahdustarkastelun käsinlaskentamenetelmällä voidaan siis käyttää alustaluvulle katkoviivan mukaista alustaluvun kaavan kerrointa 20, kun taas tietokoneohjelman avulla laskettaessa voidaan siirtymään  $y_m/5$  asti käyttää alustaluvulle ”jyrkemmän” yhtenäisen viivan mukaista alustaluvun kerrointa 50. Asiaan ei perehdytä yksityiskohtaisemmin, mutta edellä esitetystä poiketen erittäin vaativissa pohjarakennuskohteissa (GL3) alustaluku suositellaan määrittäväksi hienorakeisessa maassa kuormituksen kestosta riippuen joko ödometrikokeella määritetyn kokoonpuristuvuusmoduulin kautta (pitkäaikaisessa kuormituksessa) tai kolmiakksiaalikoikeella määritetyn suljetun tilan kimmomodulin kautta (lyhytaikaisessa kuormituksessa) (RIL 254-2011, 97, 108).

Maan sivuvastuksen ääriarvo ( $p_m$ ) hienorakeisessa maassa maan murtuessa voidaan nurjahdustarkastelun yhteydessä määrittää maan suljetun leikkauslujuuden ( $c_u$ ) perusteella kuormituksen kestosta riippuen seuraavien kaavojen mukaisesti (RIL 254-2011, 91, 109):

$$p_m = 6 \times c_u \quad \text{pysyville kuormille}$$

Kaava 12. Sivuvastuksen ääriarvo (RIL 254-2011, 91).

$$p_m = 9 \times c_u \quad \text{lyhytaikaisille kuormille}$$

Kaava 13. Sivuvastuksen ääriarvo (RIL 254-2011, 91).

Sivuvastuksen ääriarvo ( $p_m$ ) on maanpaineteoriaan perustuva murtorajatilan ominaisarvo (RIL 254-2011, 91).

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltavien lyömällä asennettavien tukipaalujen nurjahdustarkastelu tulee käytännössä kyseeseen, kun paalu on hienorakeisen maakerroksen ympäröimä. Tämän vuoksi maan alustaluvun ja sivuvastuksen ääriarvon määrittämistä on edellä tarkastelu vain hienorakeisessa maassa. Alustaluvun ja sivuvastuksen ääriarvon määrittäminen poikkeaisi edellä esitetystä tapauksessa, jossa paalun on karkearakeisen maakerroksen ympäröimä (RIL 254-2011, 91, 95). Esimerkiksi kuormituksen kestolla ei olisi tällöin vaikutusta alustaluvun tai sivuvastuksen ääriarvon suuruuteen. Nurjahduskestävyyden tarkastelu karkearakeisessa maassa tulee periaatteessa kyseeseen esimerkiksi kallioon luotettavasti tukeutuvien porapaalujen tapauksessa, mihin ei kuitenkaan ole tässä opinnäytetyössä perehdytty yksityiskohtaisemmin.

Paaluun käytön aikana kohdistuvan ulkoisen aksiaalisen kuormituksen kestolla voi olla paalumateriaalista riippuen vaikutusta paalun taivutusjäykkyyden ( $EI$ ) määrittämiseen, mikä myös osaltaan vaikuttaa paalulle määritettävän nurjahduskestävyyden suuruuteen tapauksessa, jossa maa murtuu. Teräsbetonipaalulla Paalutusohjeessa 2011 (RIL 254-2011, 109) esitetty taivutusjäykkyyden laskentakaava sisältää kertoimen  $K_c$ , joka on halkailun, virumisen ym. vaikutusten kerroin. Kyseinen kerroin  $K_c$  on Paalutusohjeessa 2011 (RIL 254-2011, 109) esitetty määritettäväksi standardin SFS-EN 1992-1 kohdan 5.8.7.2 mukaisesti: kuormien keston vaikutus otetaan tällöin yksinkertaistetulla tavalla huomioon virumisasteen ( $\phi_{ef}$ ) avulla (SFS EN-1992-1-1, 67, 69). Lähemmin tarkasteltuna kuormituksen keston vaikutus tulee huomioiduksi virumisasteen määrittämisen laskukaavassa

osamäärän  $M_{0Eqp} / M_{0Ed}$  avulla, jossa  $M_{0Eqp}$  on lineaarisen laskennan mukainen taivutusmomentti käyttörajatilassa kuormien pitkäaikaisyhdistelmän vaikuttaessa ja  $M_{0Ed}$  on lineaarisen laskennan mukainen taivutusmomentti murtorajatilassa kuormien mitoitusarvojen vaikuttaessa yhdistelmänä (SFS-EN 1992-1-1, 67). Mainittua virumisasteen laskukaavaa ei kokonaisuudessaan esitellä eikä käsitellä tarkemmin. Kaavassa esiintyvien taivutusmomenttien määrittämisen perusteista voidaan kuitenkin todeta seuraavaa: Taivutusmomentin  $M_{0Ed}$  murtorajatilassa mitoituskuorman yhdistelyjen määrittäminen perustuu edellä esitettyihin kaavoihin (kaavat 2 ja 3). Taivutusmomentin  $M_{0Eqp}$  käyttörajatilassa kuormien pitkäaikaisyhdistelmän määrittäminen perustuu seuraavaan ohjeeseen RIL 201-1-2011 (2011, 42) mukaiseen pitkäaikaisyhdistelmän kaavaan:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Kaava 14. Pitkäaikaisyhdistelmä (RIL 201-1-2011, 42).

Kaavassa esiintyvien symbolien merkitystä on käsitelty edellä kaavojen 2 ja 3 yhteydessä.

Virumalla tarkoitetaan ajasta riippuvaa betonin puristuman kasvua puristusjännityksen pysyessä vakiona, ja yleensä sen vaikutukset otetaan huomioon vain käyttörajatiloja tarkasteltaessa. Virumisen vaikutukset huomioidaan murtorajatilassa vain vaikutusten ollessa merkittäviä, esimerkiksi tarkasteltavan rakenteen ollessa herkkä toisen kertaluvun vaikutuksille. Toisen kertaluvun vaikutuksilla tarkoitetaan rakenteen siirtymätilasta aiheutuvia voimasuureiden lisäyksiä. (Betoniteollisuus ry 2012b, 3; SFS-EN 1992-1-1, 24, 64.)

Teräspaaluun taivutusjäykkyyden ( $E$ ) määrittämisessä kuormien pitkäaikaisuuden suuruudella ei ole merkitystä nurjahdustarkastelun yhteydessä tapauksessa, jossa maa murtuu. Jos teräspaalu kuitenkin mitoitettaisiin liittorakenteena, kuormituksen kestolla olisi vaikutusta liittorakennemitoituksessa käytettävään teholliseen taivutusjäykkyyteen ( $E$ )<sub>eff</sub>. Paalutusohjeessa 2011 (RIL 254-2011, 109) esitetyn kaavan mukaisesti. Tällöin kuormien pitkäaikaisuuden vaikutusmekanismi perustuisi kyseisessä taivutusjäykkyyden laskentakaavassa esiintyvään liittorakenteen juotoslaastin tai betonin teholliseen kimmokertoimeen  $E_{c,eff}$ , joka on esitetty määritettäväksi standardin SFS-EN 1994-1 kohdan 6.7.3.3 mukaisesti: kuormien pitkäaikaisvaikutusten osuus otettaisiin tällöin huomioon tehollisen kimmokertoimen määrittämisen laskukaavassa osamäärän  $N_{Ed} / N_{G,Ed}$  avulla,

jossa  $N_{Ed}$  on pilarin normaalivoiman mitoitusarvo ja  $N_{G,Ed}$  on tämän normaalivoiman pysyvä osuus (SFS-EN 1994-1-1, 57). Mainittua tehollisen kimmokertoimen laskukaavaa ei kokonaisuudessaan esitellä eikä käsitellä tarkemmin. Liittorakennemitoitusta ei myöskään käsitellä tässä opinnäytetyössä muuten kuin esitetyn kuormituksen keston vaikutusmekanismin toteamisen osalta.

Edellä on esitelty periaatteet, joiden mukaisesti kuormituksen kesto vaikuttaa paalun nurjahduskestävyyden määrittämiseen tapauksessa, jossa maa murtuu. Paalutusohjeen 2011 mukaisesti nurjahduskestävyydessä tulee huomioida myös mitoituspaus, jossa paalu murtuu.

Tapauksessa, jossa teräspaalun poikkileikkauksen rakenteen taivutusmurtokestävyys ylittyy, kuormien keston vaikutusmekanismien voidaan todeta olevan edellä esitetyn kaltainen alustaluvun ( $k_s$ ) määrittämisen osalta. Sivuvastuksen ääriarvo ( $p_m$ ) ei puolestaan Paalutusohjeen 2011 (RIL 254-2011, 110) mukaista nurjahduskestävyyden käsinlaskentamenetelmää käytettäessä vaikuta teräspaalun nurjahduskestävyyden suuruuteen tapauksessa, jossa paalu murtuu.

Kuormituksen keston vaikutusta mitoitus tapaukseen, jossa teräsbetonipaalun poikkileikkauksen rakenteen taivutusmurtokestävyys ylittyy, ei tässä opinnäytetyössä käsitellä seuraavasta syystä: Teräsbetonipaalun taivutusmurtokestävyyden määrittämisen ohjeistuksessa Paalutusohjeessa 2011 on viitattu betonirakenteiden eurokoodiin EC 1992-1 (RIL 254-2011, 113). Viittauksen on kuitenkin todettu käytännön suunnittelutyössä aiheuttavan tulkintaeroja esimerkiksi maapohjan paalua tukevan vaikutuksen huomioimisen osalta, sillä kyseisessä eurokoodissa ei ole erikseen paalujen mitoitusta käsittelevää osiota (Koivunen 2015). Asiaan liittyvän tarkemman ohjeistuksen tarve on todettu meillä olevan Paalutusohjeen 2011 uudistustyöhön liittyvän Betoniteollisuuden käynnistämän tutkimuksen esiselvitysvaiheen yhteydessä (Haavisto & Laaksonen 2015).

### **Maan sivutuennan riittävyden arviointi**

Maan sivutuennan riittävyys riippuu maan redusoidusta, siipikairauksella määritetystä suljetusta leikkauslujuudesta, jonka määrittämisen perusteita on käsitelty yksityiskohtaisemmin edellä. Paalun katsotaan olevan riittämättömästi nurjahdusta vastaan tuettu, kun suljettu leikkauslujuus on pienempi kuin  $20 \text{ kN/m}^2$ . Sivutuenta tulkitaan riittämättömäksi myös tapauksessa, jossa paalu on osittain tai kokonaan joko ilmassa tai vedessä. Maan

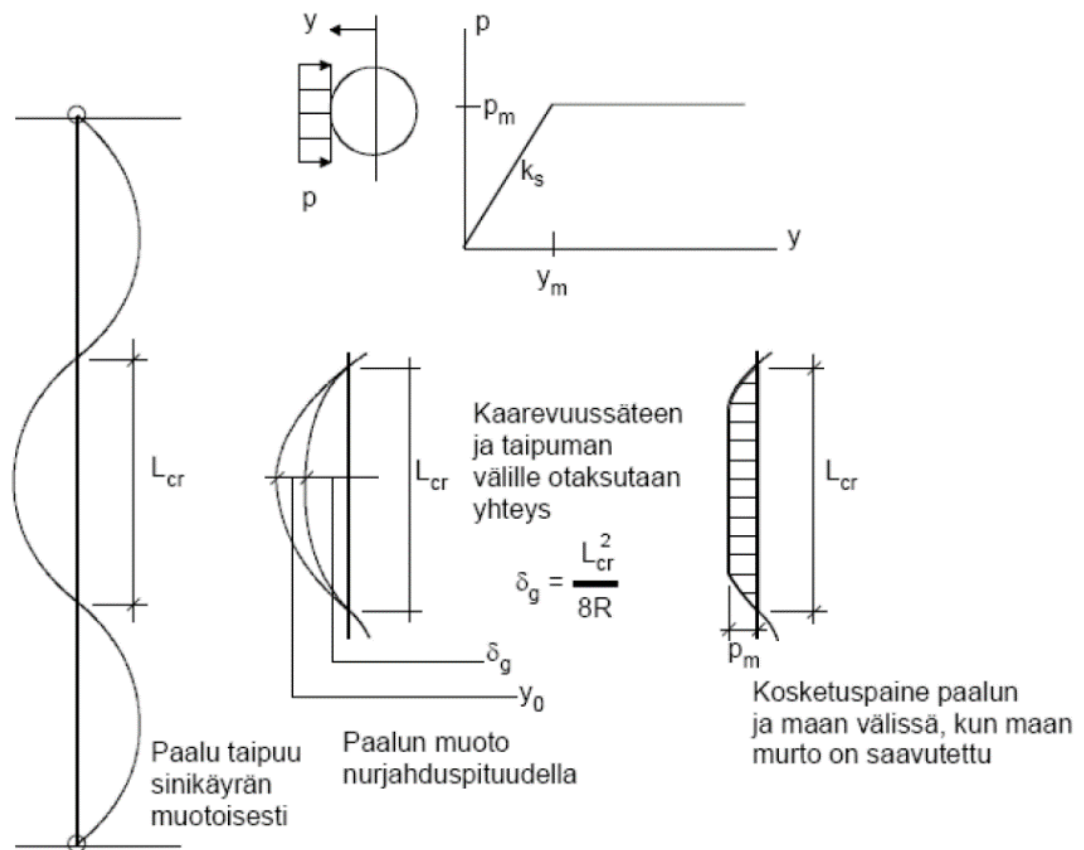
sivutuenta ei yleensä käytetä hyväksi eloperäisen maakerroksen leikkauslujuuden ollessa pienempi kuin  $5 \text{ kN/m}^2$ . (RIL 254-2011, 106, 107.) Eloperäisillä maalajeilla viitataan geoteknisen maaluokituksen päämaalajien tasolla esimerkiksi liejuun, jonka leikkauslujuuden määrää maan koheesio (Rantamäki ym. 1979, 59, 124).

Jos maan sivutuenta ei käytetä hyväksi, paalu tulee mitoittaa rakenteellisesti nurjahdusta vastaan raudoitettuna betonirakenteena tai teräsrakenteena asianmukaisten standardien mukaisesti. Jos maan sivutuenta käytetään hyväksi mutta se on riittämätön, paalun kestävyuden määrittämisessä huomioidaan paalun nurjahdusmurtokestävyys, jonka määrittämiselle esitettyä suositeltavaa käsinlaskentamenetelmää on käsitelty seuraavaksi. (RIL 254-2011, 106, 107.)

### **Nurjahdusmurtokestävyuden suositeltava käsinlaskentamenetelmä**

Paalun nurjahduskestävyyden määrittämiselle on esitetty Paalutusohjeessa 2011 suositeltava käsinlaskentamenetelmä, jolloin nurjahduskestävyys määritetään ohjeessa esitettyjen laskentakaavojen avulla erikseen sekä paalun murtuessa (paalun poikkileikkauksen rakenteen taivutusmurtokestävyuden ylittyessä), että maan murtuessa (paalun taipumasta aiheutuvan sivupaineen ylittäessä maan sivuvastuksen ääriarvon) (RIL 254-2011, 107–113).

Paalun nurjahdusmurtokestävyuden määrittämisen käsinlaskentamenetelmä perustuu malliin, jossa paalu on koko nurjahduspituudeltaan hienorakeisen maakerroksen ympäröimä kuvan 12 mukaisesti.



Kuva 12. Paalun nurjahduskestävyyden laskentamalli hienorakeisessa maakerroksessa (RIL 254-2011, 108).

Esitetyssä periaatekuvassa esiintyvät symbolit kuvaavat paalun kaarevuussädettä ( $R$ ), paalun kriittistä nurjahduspituutta ( $L_{cr}$ ), paalun geometristä alkutaipumaa ( $\delta_g$ ), maan alustalukua ( $k_s$ ), maan sivuvastuksen ääriarvoa ( $p_m$ ) ja sitä vastaavaa paalun sivusiirtymää ( $y_m$ ). (RIL 254-2011, 108, 109.)

Esitetyn kuvan mukaisesti paalun oletetaan taipuvan sinikäyrän muotoisesti. Myös alkutaipuma oletetaan samavaiheiseksi sinikäyräksi (Haavisto 2015, 20). Kriittisen nurjahduspituuden ( $L_{cr}$ ) määrittämiselle on esitetty laskentakaava, jota ei tarkemmin esitellä tässä. Lyömällä asennetun paalun asennuksen jälkeisen geometrisen alkutaipuman,  $\delta_g$ , suuruutena voidaan nurjahdustarkastelussa käyttää suunnitteluvaiheessa taulukon 11 mukaisia arvoja.



Taulukko 11. Paalun geometrinen alkutaipuma nurjahdustarkastelussa (RIL 254-2011, 107).

	Jatkamaton paalu	Jatkettu paalu
Alkutaipuma $\delta_g$ [m] (taipuma tarkastettavissa, esim. avoin profiili)	$L_{cr}/300 - L_{cr}/600$	$L_{cr}/200 - L_{cr}/400$
Alkutaipuma $\delta_g$ [m] (taipumaa ei voida tarkastaa, esim. umpiprofiilit)	$L_{cr}/300$	$L_{cr}/150$

Esitetyn taulukon perusteella määritetty alkutaipuman arvo riippuu paalun kriittisestä nurjahduspituudesta ( $L_{cr}$ ), paalujatkosten käytöstä ja siitä, onko taipuma tarkistettavissa.

Taipuman ollessa tarkastettavissa on taulukossa esitetty alkutaipuman lausekkeelle vaihteluväli, jonka mukaisesti arvo valitaan suunnitteluvaiheessa etukäteen arvioitavan asennusolosuhteiden haastavuuden perusteella (SSAB 2015, 20).

Taulukossa esitettyjen lausekkeiden perusteella huomataan, että alkutaipuma muodostuu tyypillisesti suuremmaksi paalujatkosten tarpeen myötä tai käytettäessä esimerkiksi umpiprofiilia, jolloin taipumaa ei voida tarkistaa työmaalla.

Mitä suurempaa alkutaipuman arvoa käsinlaskennassa käytetään, sitä pienemmäksi Paalutusohjeessa esitetyn nurjahduskestävyyden laskentakaavan (kaava 4.52, ks. RIL 254-2011, 109) avulla määritetty paalun nurjahdusmurtokestävyys muodostuu mitoitus-tapauksessa, jossa maa murtuu. Vastaava periaate on voimassa myös paalun rakenteen murtumisen mitoitus-tavan tarkastelussa teräspaalun poikkileikkauksen rakenteen taivutusmurtokestävyyden osalta. Teräspaalun alkutaipuman määrittämisessä on tällöin kuitenkin huomioitava geometrisen alkutaipuman ( $\delta_g$ ) lisäksi niin sanottu fiktiivinen alkutaipuma ( $\delta_f$ ), jonka avulla otetaan huomioon teräksen valmistuksesta johtuvat jäännösjännitykset ja alkukäyryys Paalutusohjeessa 2011 esitetyn tavan mukaisesti (RIL 254-2011, 110). Jos paalun suoruus mitataan työmaalla, voidaan taulukon 11 mukaisista arvoista poiketen käyttää todellista mitattua kaarevuussädettä, jolloin alkutaipuma voidaan määrittää kuvassa 12 esitetyn kaarevuussäteen ( $R$ ) ja taipuman välille otaksutun yhteyden perusteella (RIL 254-2011, 108).

Varsinaisia nurjahduskestävyyden määrittämisen laskentakaavoja ei tarkemmin esitellä. Edellä on pyritty kuvaamaan perusteita, joiden mukaisesti kyseisten kaavojen avulla paaluvalmistajien paalutuotteillaan esittämät kestävyysarvot on määritetty.

#### 4.2 Kestävyyden määrittäminen paaluvalmistajien mitoitusaulukoiden perusteella

Paalun kestävyys voidaan määrittää paaluvalmistajien paalutuotteilleen esittämien valmiiden mitoitusaulukoiden mukaisesti. Mitoitusaulukot tässä opinnäytetyössä tarkasteltaville teräs- ja teräsbetonipaaluille on esitetty kokonaisuudessaan liitteenä. Teräsbetonipaalujen puristuskestävyydet (Rakennusteollisuus RT 2013, 8) on esitetty liitteessä 4 ja teräspaalujen puristuskestävyydet (SSAB 2015, 24) liitteessä 5.

Taulukoidut kestävydet perustuvat paalukohtaisesti määritettyihin loppulyöntiohjeisiin (Rakennusteollisuus RT 2013, 9; SSAB 2015, 15). Vaativimmassa paalutustyöluokassa PTL3 taulukoituja arvoja voidaan käyttää lähtöarvoina suunnittelussa, mutta geotekninen kestävyys on varmennettava dynaamisilla (tai staattisilla) koekuormituksilla (RIL 254-2011, 55; SSAB 2015, 17). Taulukoissa on esitetty sekä paalun geotekninen puristuskestävyys kohteen paalutustyöluokan perusteella että käytön aikainen nurjahduskestävyys.

Taulukoitu paalun geotekninen puristuskestävyys on teräsbetonipaaluja käytettäessä suurin mahdollinen ”lyömällä osoitettavissa oleva murtorajatilän puristuskestävyys” (Rakennusteollisuus RT 2013, 9). Teräspaaluja käytettäessä tulee huomioida, että eräillä paaluilla taulukoidut geotekniset puristuskestävyydet eivät ole suurimpia mahdollisia kestävyden arvoja, vaan ”tavanomaisissa kohteissa suunnittelussa suositeltavia arvoja” (SSAB 2015, 24). Taulukoidut geotekniset kestävydet on määritetty edellä esitetyn kaavan 9 mukaisesti käyttäen korrelaatiokertoimen arvoa 1,47 (Rakennusteollisuus RT 2013, 9; SSAB 2015, 17). Kyseinen korrelaatiokertoimen arvo tarkoittaa, että rakenteen oletetaan olevan joustava, toisin sanoen ei-jäykkä rakenne. Taulukoidun geoteknisen puristuskestävyyden määrittämisessä käytetty korrelaatiokerroin on siis kerrottu vaadittavalla mallikertoimella 1,05, mutta sitä (korrelaatiokerrointa) ei ole jäykälle rakenteelle ominaisesti jaettu luvulla 1,1 (RIL 254-2011, 75, 78). Mikäli rakenne on jäykkä, suunnittelija voi täten korottaa taulukoituja geoteknisen kestävyden arvoja kertoimella 1,1.

Taulukoidut arvot paalun käytön aikaiselle nurjahduskestävyydelle on määritetty erikseen vastaamaan taulukoissa esitettyjä maan suljetun leikkauslujuuden arvoja. Nurjahduskestävyydet on lisäksi määritetty erikseen eri alkutaipumien arvoille paalujatkosten käytön perusteella (Rakennusteollisuus RT 2013, 9; SSAB 2015, 20, 24).

Teräsbetonipaaluja käytettäessä nurjahduskestävyyden arvot on eritelty (maan leikkauslujuuden ja paalujatkosten käytön lisäksi) kolmelle erilaiselle pitkä- ja lyhytaikaisen kuorman suhteelle (Rakennusteollisuus RT 2013, 8). Taulukoitujen kestävyyksien perusteella voidaan todeta, että mitoitus on sitä varmemmalla puolella, mitä suuremmaksi pitkäaikaisen kuorman osuus on määritetty. Kuormitustapauksessa, jossa kuormia yhdistellään kaavan 2 avulla, taulukon varmalla puolella oleva nurjahduskestävyys saavutetaan käytännössä esimerkiksi suunnittelijan määrittellessä erikseen pitkä- ja lyhytaikaisen kuorman suhteelliset osuudet yhdistelykerrointa  $\Psi_2$  soveltamalla sekä ilman kuormien osavarmuuskertoimia kaavalla 14. Tällöin kaavan 2 mukainen muuttuvan kuorman suurempi osavarmuusluku 1,5 (vrt. kaavan 2 pysyvän kuorman osavarmuuslukuun 1,15) ei vaikuta lyhytaikaisen kuorman suhteellista osuutta kasvattavasti, jolloin mitoitus olisi epävarmemmalla puolella. Kuormitustapauksessa, jossa kuormia yhdistellään kaavan 3 avulla, taulukon nurjahduskestävyys on varmalla puolella; tarkasteltavana ovat tällöin ainoastaan rakenteen omasta painosta aiheutuvat kuormitukset, jolloin pitkäaikaisen kuorman osuus on 100 %.

Teräspaaluja käytettäessä nurjahduskestävyyden määrittämisessä on huomioitu Paalutusohjeen 2011 mukaisesti sekä paalun että maan murtuminen (RIL 254-2011, 109; SSAB 2015, 20). Teräsbetonipaaluja käytettäessä on syytä huomioida, että taulukon mukaisessa kestävyudessa on huomioitu ainoastaan ”paalun nurjahdusmurtokestävyys paalua ympäröivän maakerroksen murtuessa” (Rakennusteollisuus RT 2013, 9). Edellä on todettu Paalutusohjeen 2011 teräsbetonipaalun taivutusmurtokestävyuden määrittämiseen liittyvän ohjeistuksen aiheuttavan tulkintaeroja käytännön suunnittelutyössä. Paalun rakenteen murtumisen huomioiminen teräsbetonipaalun taulukoitujen nurjahduskestävyyksien osalta jää tämän opinnäytetyön tarkastelujen puitteissa epäselväksi.

Teräspaaluja käytettäessä on syytä huomioida, että taulukoidut nurjahduskestävyyden arvot on määritetty ainoastaan käyttämällä alustaluvulle kerrointa 50 ja sivuvastuksen ääriarvolle kerrointa 9 (SSAB 2015, 23). Kyseiset nurjahduskestävyydet on määritetty Paalutusohjeen 2011 mukaisella suositeltavalla käsinlaskentamenetelmällä (SSAB 2015, 20). Näin ollen alustaluvun kertoimen lukuarvo 50 viittaa kuvassa 11 esitetyn ylemmän kuvaajan (b) katkoviivan mukaisen jousimallin käyttöön. Kuten edellä on esitetty, kyseinen jousimalli vastaa lyhytaikaista kuormitustilannetta. Myös sivuvastuksen ääriarvon kerroin 9 vastaa kaavan 13 mukaisesti lyhytaikaista kuormitustilannetta. Teräspaalujen suunnitteluohjeen (SSAB 2015, 23) mukaan paalun kestävyys voidaan taulukon arvoista poiketen määrittää erikseen eri lähtöarvoilla käyttämällä RrPileCalc-ohjelmaa.

Esimerkiksi maan leikkauslujuuden ollessa 5 kPa, alkutaipuman ollessa  $L_{cr} / 400$  ja korroosiovaran ollessa 1,2 mm teräspaalin RR75 nurjahduskestävyys on mitoitusaulukon laadinnassa käytettyjen alustalukujen ja sivuvastuksen ääriarvojen mukaisesti määritettyä 210 kN kuvan 13 mukaisesti.

Korroosiovara 1,2 mm								
Paalu	Teräslaji	Alkutaipuma	Rakenteen puristuskestävyyden mitoitusarvo $R_d$ [kN] suljettu leikkauslujuus $c_{uk}$ [kPa]					
			$\delta_g$	5	7	10	15	20
RR75	S440J2H	$L_{cr}/400$	210	257	318	347	364	383
		$L_{cr}/600$	245	298	337	365	381	399

Kuva 13. Teräspaalin RR75 nurjahduskestävyys (SSAB 2015, 23, muokattu).

Muuten samoilla lähtöarvoilla, mutta käyttämällä pitkäaikaista kuormitustilannetta vastaavaa alustaluvun kerrointa 20 (kaavan 10 mukaisesti) ja sivuvastuksen ääriarvon kerrointa 6 (kaavan 12 mukaisesti), kyseisen paalin RR75 nurjahduskestävyydeksi saadaan 148 kN. Laskennan yhteenveto on esitetty liitteessä 3. RrPileCalc-ohjelmalla määritetty paalin pitkäaikaista kuormitusta vastaava nurjahduskestävyys (148 kN) on siis merkittävästi pienempi kuin lyhytaikaista kuormitusta vastaava taulukoitu nurjahduskestävyys (210 kN). Tämän opinnäytetyön puitteissa asiaa ei tarkastella yksityiskohtaisemmin, mutta kyseisen paalulle RR75 suoritetun tarkastelun perusteella voitaneen todeta, että teräspaalujen valmiita mitoitusaulukoita käytettäessä suunnittelijan on syytä olla erityisen tietoinen taulukoiden laadinnassa käytettyjen lähtöarvojen vaikutuksesta paalujen ilmoitettuihin nurjahduskestävyyksiin. Lisäksi tämän opinnäytetyön yhteydessä laadittavan laskentapohjan mahdollisen jatkokehityksen näkökulmasta teräspaalujen nurjahduskestävyyksien yksityiskohtaisemman määrittämisen tutkiminen kuormituksen pitkäaikaisuudesta riippuen saattaisi olla tarkoituksenmukaista.

## 5 TARVITTAVAN PAALUMÄÄRÄN LASKENTA

Kun otetaan huomioon yksittäisen paalun geotekninen ja rakenteellinen kestävyys, tarkasteltavan perustuksen osan anturalaatan alapinnan tasossa vaikuttavat puristavaa normaalivoimaa aiheuttavat paaluihin yläpuolisista rakenteista kohdistuvat kuormat sekä yksittäiseen paaluun negatiivisen vaippahankauksen aiheuttama lisäkuorma, voidaan määrittää pienin laskennallinen paalumäärä, jolla mitoituskuorma ei ylitä paalujen yhteenlaskettujen puristuskestävyyksien mitoitusarvoa.

Kuormien jakautuminen tasaisesti keskenään yhtä vahvojen paalujen kesken on toiminut lähtöoletuksena tämän opinnäytetyön yhteydessä laaditun vaadittavan paalumäärän laskentapohjan kehittämisessä. Rakennesuunnittelijan on kulloinkin tapauskohtaisesti erikseen arvioitava ja tarkistettava kuormien jakautuminen paaluryhmän paalujen kesken, esimerkiksi kuorman epäkeskisyyshmomentin ja paalujen sijaintipoikkeamien vaikutusten perusteella. Suunnittelijan on lisäksi erikseen tarkasteltava perustuksen jäykkyuden vaikutukset paaluperustuksen puristuskestävyyden mitoitusarvon (kaava 1) toteutumisen ja yksittäisen paalun geoteknisen kestävyuden mahdollisen korottamisen (korrelaatiokertoimen pienentämisen) osilta. Yleisemminkin paalujen sijoitteluun ja lopulliseen paalumäärään mahdollisesti tässä tarkastelujen paalukuormien ja paalujen kestävyysien lisäksi vaikuttavien eri tekijöiden merkitys tulee suunnittelutyössä huomioida kokonaisuudessaan tapauskohtaisesti. Laskentapohjan toimintaperiaate on pyritty pitämään mahdollisimman yksinkertaisena.

Paalujen yläpuolisista rakenteista välittyvien kuormien yhdistely suoritetaan kaavojen 2 sekä 3 avulla. Paalujen yläpuolisten rakenteiden muodostaman kokonaiskuorman murtorajatilan mitoitusarvot (merkitään esimerkiksi  $P_d$ ) määritetään kuormitustapauksittain. Kyseisiä kuormitustapauksittain määritettyjä kokonaiskuormia vastaavat pitkäaikaiskuormien mitoitusarvot (merkitään esimerkiksi  $P_{pitkäaik;d}$ ) määritetään yhdistelykertoimen  $\psi_2$  avulla. Vastaavat lyhytaikaiskuormien mitoitusarvot (merkitään esimerkiksi  $P_{lyhytaik;d}$ ) saadaan kokonaiskuormien ja pitkäaikaiskuormien erotuksina. Seuraavaksi perustusten tarkasteltavalle osalle kuormitustapauksittain määritettyjen kuormien mitoitusarvojen avulla voidaan määrittää laskennallinen vaadittava paalumäärä (merkitään esimerkiksi  $n$ ) kaavojen 15 ja 16 avulla, kun huomioidaan yhteen paaluun kohdistuva negatiivinen vaippahankaus ( $F_{neg;d}$ ) sekä yhden paalun kestävyys. Yksittäisen paalun määräävä kestävyys

(merkitään esimerkiksi  $R_d$ ) määritetään kuormitustapauksittain paaluvalmistajien esittämien mitoitusaulukoiden perusteella.

Kaavan 5 perusteella voidaan edellä esitettyjä merkintöjä käyttäen muodostaa epäyhtälö

$$P_{pitkäaik;d} + n \times F_{neg;d} \leq n \times R_d,$$

josta saadaan matemaattisesti epäyhtälön ratkaisun keinoin ratkaistua seuraavan kaavan mukainen vaadittava paalumäärä:

$$n \geq P_{pitkäaik;d} / (R_d - F_{neg;d}).$$

Kaava 15. Vaadittava paalumäärä.

Vastaavasti kaavan 6 perusteella voidaan muodostaa epäyhtälö

$$P_{pitkäaik;d} + P_{lyhytaik;d} \leq n \times R_d,$$

josta saadaan ratkaistua seuraavan kaavan mukainen vaadittava paalumäärä:

$$n \geq (P_{pitkäaik;d} + P_{lyhytaik;d}) / R_d.$$

Kaava 16. Vaadittava paalumäärä.

Lopullinen määräävä kuormitustapaus löydetään tarkastelemalla kaavojen 15 ja 16 mukaiset vaadittavat paalumäärät kuormitustapauksittain. Vaadittavan paalumäärän yksikkö määräytyy sen mukaan, välittyvätkö kuormat perustuksille tasaisesti jakautuneena viivakuormana vai pistemäisenä kuormana.

Laskentapohjan kehittämisen yhteydessä on arvioitu aiheen teoreettisten rajausten lisäksi laskentapohjan käytettävyyteen liittyviä näkökulmia. Laskentapohjasta on pyritty saamaan ulkoasultaan ja toiminnoiltaan mahdollisimman helposti ymmärrettävä ja helpokäyttöinen.

Lähtötiedot annetaan seuraavan kuvan mukaisesti laskentapohjan keltaisiin soluihin tapauskohtaisesti joko syöttämällä numeerinen arvo tai valitsemalla alavetovalikosta valittava lähtötieto. Laskentapohja antaa käyttäjälle lisäohjeistusta keltaisen solun aktivoi-

misen myötä. Negatiivisen vaippahankauksen ja nurjahdustarkastelun lähtötietojen merkitystä on lisäksi tapauskohtaisesti ohjeistettu suoritettun valinnan perusteella yksityiskohtaisemmin, minkä avulla on pyritty varmistamaan käyttäjän ymmärtämys suoritettun valinnan seurauksista. Käyttäjä voi tapauskohtaisesti halutessaan rajata eräiden suoritettavien tarkastelujen laajuutta, jolloin laskentapohja huomioi valinnat tarkoituksenmukaisesti lukitsemalla ja muotoilemalla tarkastelun ulkopuolelle rajattaviin toimintoihin liittyviä soluja. Laskentapohjan yhteyteen on ohjelmoitu tehtyjen valintojen perusteella tapauskohtaisesti ilmestymään erilaisia huomio-, varoitus- ja ohjelauseita. Laskentapohjaa käytetään ensisijaisesti yksinkertaistetussa perusnäkyssä, jossa syötetään tarvittavat lähtötiedot ja luetaan laskennan lopputulos. Pystysuorien paalukuormien lähtötietoihin liittyvä laskentapohjan perusnäky on esitetty kuvassa 14.

Pystysuorat paalukuormat		Negatiivinen vaippahankaus huomioidaan PO-2011 (s.49) mukaisesti, jolloin negatiivista vaippahankausta ja lyhytaikaista kuormitusta ei huomioida samanaikaisesti kuormitusyhdistelyissä. Laskentaohjelma määrittää lyhytaikaisen kuormituksen suuruuden syötettävien kuormitustietojen perusteella.		Kerrostien lukumäärä, jossa hyötykuormat kuuluvat samaan luokkaan
Seuraamusluokka:	CC2			
Kuorman tyyppi:	Viivakuorma			
Paaluun ylärakenteista kohdistuvat aksiaaliset kuormat anturialaatan alapinnan tasossa:	Hyötykuorman rakennuksen tilan luokka			
Lumikuorma		qk,lumi =	15,0 kN/m	
Hyötykuorma 1	Luokka A: asuintilat	qk,hyöty =	55,0 kN/m	n = 4
Hyötykuorma 2	>Ei käytetä>	qk,hyöty =	kN/m	n =
Pysyvä kuorma (rakenteen omapaino)		gk,pysyvä =	250,0 kN/m	
Maan liikkeistä aiheutuvat kuormat:	Esiintyminen			
Negatiivinen vaippahankaus	Esiintyy	F <sub>neg;d</sub> =	20 kN/paalu	

Kuva 14. Pystysuorien paalukuormien lähtötietojen syöttö laskentapohjan perusnäkyssä.

Varsinainen laskenta suoritetaan perusnäkyä ulkopuolella. Laskennan lähtötiedoista, laskennan eräistä välivaiheista ja lopputuloksesta on lisäksi laadittu erillinen yhteenvedonäkymä. Liitteenä on esitetty laskentapohjan perusnäky (liite 1) ja yhteenvedonäkymä (liite 2) kuvitteellisilla lähtötietojen arvoilla.

## 6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä on esitelty tarvittavan paalumäärän laskentaan ja paaluperustuksen kestävyuden varmistamiseen liittyvän tiedon lisäksi Optiplan Oy:lle laaditun Excel-laskentapohjan kehittämisessä huomioituja näkökulmia.

Laskentapohjassa käytetyt paalujen kestävyudet on määritetty paaluvalmistajien esittämien, loppulyöntiohjeisiin perustuvien mitoitusaulukoiden mukaisesti.

Lyömällä asennettavien teräsbetoni- ja teräspaalujen lisäksi laskentapohjaan on päädytty lisäämään mahdollisuus vaadittavan paalumäärän tarkasteluun käyttämällä SSAB:n porapaaluja sekä mitoittamalla teräspaalu liittorakenteena kyseisen paaluvalmistajan suunnitteluohjeen taulukoissa esitettyjen paalujen kestävyyksien mukaisesti. Porapaalujen ja liittorakennemitoituksen teoreettinen tarkastelu on kuitenkin jätetty opinnäytetyön kirjallisen osuuden tarkastelujen ulkopuolelle aiheen käsittelyn rajauksiin liittyvien käytännöllisten syiden vuoksi.

Mitoitusaulukoiden mukaiset paalujen kestävyudet määräytyvät paalun tyyppin, paalutustyöluokan, maan suljetun leikkauslujuuden, kuormituksen lyhyt- ja pitkäaikaisosuuden, paalujatkosten käytön sekä teräspaalun korroosiovaran perusteella. Kun paalua ympäröivän maan sivutuenta on riittävä, nurjahdusta ei tarvitse huomioida mitoituksessa, jolloin paalun kestävyys määräytyy yksinkertaisesti paalun tyyppin ja paalutustyöluokan perusteella. Nurjahduskestävyyden ollessa määräävä mitoitusaulukoiden mukainen paalun kestävyys muodostuu paalun tyyppin, maan suljetun leikkauslujuuden, kuorman pitkä- ja lyhytaikaisosuuksien, paalujatkosten käytön sekä teräspaalun korroosiovaran perusteella.

Paalutusohjeen 2011 mukaisesti paalun nurjahduskestävyyden määrittämisessä huomioidaan erikseen sekä paalun rakenteen että paalua ympäröivän maan murtuminen.

Paalutusohjeessa 2011 esitetyn teräsbetonipaalun nurjahduskestävyyden määrittämisen ohjeistuksen on käytännössä todettu aiheuttavan suunnittelijoiden keskuudessa tulkintaeroja tapauksessa, jossa paalun rakenteen taivutusmurtokestävyys ylittyy. Teräsbetonipaalujen taulukoidut nurjahduskestävyydet perustuvatkin tapaukseen, jossa paalua ympäröivä maa murtuu. Epäselväksi jää, miten teräsbetonipaalun rakenteen murtuminen tulee käytännössä huomioiduksi käytettäessä paaluvalmistajan ilmoittamia taulukoituja nurjahduskestävyyden arvoja.



Määrittäessä nurjahduskestävyyttä lyömällä asennettavalle teräsmaalulle tulee huomioida paaluvalmistajan esittämien kestävyksien määrittämisen lähtöoletukset. Teräsmaalujen taulukoidut nurjahduskestävyydet vastaavat paaluvalmistajan (SSAB) suunniteluohjeessa ilmoitettujen alustalukujen ja maan sivuvastuksen ääriarvojen perusteella lyhytaikaista kuormitustilannetta. Yksittäiselle maalulle tehdyn vertailulaskelman perusteella nurjahduskestävyys muodostuu merkittävästi pienemmäksi käytettäessä pitkäaikaista kuormitusta vastaavia alustaluvun ja maan sivuvastuksen ääriarvon lukuarvoja. Aiheen tarkempi tutkiminen saattaisi olla tarkoituksenmukaista. Nurjahduskestävyyksien määrittäminen yksityiskohtaisemmin kuormituksen pitkä- ja lyhytaikaisuuksien perusteella – esimerkiksi teräsbetonipaalujen mitoitusaulukossa esitettyä tapaa vastaavasti – voisi tarjota mahdollisuuksia laskentapohjan jatkokehityksen näkökulmasta.

Laskentapohjan käyttöä on testattu oikeassa kohteessa, jonka suunnittelussa paalun nurjahdustarkastelun huomioiminen ei geoteknisen suunnittelijan mukaan ollut kohteen pohjaolosuhteiden perusteella tarpeellista. Testaus suoritettiin vertaamalla laskentapohjan ilmoittamia vaadittuja paalumääriä toimeksiantajan suunnittelutoimistossa käytössä olevan laskentapohjan mukaisiin vaadittaviin paalumääriin. Viitteitä merkittävästä virheistä tai puutteista ei havaittu testauksen yhteydessä. Testauksen yhteydessä havaittujen laskentapohjien ilmoittamien tulosten välisten eroavaisuuksien arvioitiin johtuvan esimerkiksi negatiivisen vaippahankauksen arviointiin liittyvistä eroista sekä rakennuksen oman painon osavarmuuskertoimella 1,35 huomioivan mitoitusvedon (katso kaava 3) muodostumisesta helposti määrääväksi rakennuksen ”ei-kantavilla” seinälinjoilla. Kyseisen mitoitusvedon merkitys määräävän kuormitustapauksen löytämisessä vaikuttaisi korostuvan entisestään, mikäli maan sivutuennalle käytettäisiin pienempää leikkauslujuuden arvoa; tällöin mitoituskaavan (kaava 3) mukainen suurempi kuorman pitkäaikaisuus vaikuttaisi paalun nurjahduskestävyyteen alentavasti. Lisäksi mahdollinen negatiivinen vaippahankaus muodostuisi tällöin kaavan 5 mukaisesti aina määrääväksi kyseisen kuormitustapauksen lyhytaikaiskuorman mitoitusarvon ollessa nolla. Tarkistus- ja testaustyötä on tarkoitus jatkaa ennen laskentapohjan käyttöönottoa.

Laskentapohja perustuu paalukuormien tarkastelun osalta eurokoodin mukaisiin kuormitusyhdistelyihin. Anturalaatan alapinnan tasolle yläpuolisista rakenteista kohdistuvien muuttuvien ja pysyvien pystysuorien kuormien ominaisarvojen sekä pohjatutkimusraportin mukaisen negatiivisen vaippahankauksen mitoitusarvon perusteella tarkistetaan kaikki kyseeseen tulevat kuormitustapaukset ottamalla huomioon myös kuormituksen

pitkäaikaisuuden mahdollinen alentava vaikutus paalun nurjahduskestävyyteen. Hyötykuormien osalta laskentapohjaan on sisällytetty mahdollisuus syöttää kahteen eri luokkaan kuuluvia hyötykuormien arvoja, joiden perusteella kuormitusyhdistelyt suoritetaan tarkastamalla hyötykuormien yhdistelyt erikseen yhdistelykertoimia sekä kerrosvähennyistä soveltaen. Laskentapohja huomioi hyötykuorman kerrosvähennykset automaattisesti suunnittelijan syöttämien kerrosten lukumäärätietojen perusteella. Käytännössä laskentapohjasta muodostui paalumäärän arviointityökalun lisäksi varsin yksityiskohtainen eurokoodin mukaisten kuormitusyhdistelyjen ”tutkielma”.

Laskentapohjan etusivulla on esitetty laskennan lähtöoletukset kuormien jakautumiseen paaluryhmän paalujen välillä sekä paalujen kannattaman rakenteen jäykkyyteen liittyen. Paalujen kannattaman rakenteen jäykkyyden osalta eräs laskentapohjan jatkokehitysmahdollisuus voisi liittyä rakenteen jäykkyyden vaikutuksen huomioimiseen pienentämällä automaattisesti paalun geoteknisen kestävyuden korrelaatiokerrointa suunnittelijan syöttämän jäykkyystiedon perusteella.

Opinnäytetyön kirjallisessa osuudessa on käsitelty paalumäärän arvioinnin kannalta oleellista teoretista tietoa liittyen paalun geoteknisen kestävyuden varmistamiseen loppulyöntiehtojen avulla, paalun asennuksen aikaisen kestävyuden huomioimiseen sekä käytön aikaisen nurjahduskestävyyden määrittämiseen. Lisäksi on tarkasteltu paalutustyöluokan, maan suljetun leikkauslujuuden, kuormituksen pitkäaikaisuuden, paalujatkosten tarpeen, teräspaalun korroosiovaran sekä negatiivisen vaippahankauksen arvioimiseen ja määrittämiseen liittyviä näkökulmia. Kyseisten käsittelyjen pohjalta tiivistetyn ohjeen luominen laskentapohjan yhteyteen voisi myös tarjota mahdollisuuksia laskentapohjan mahdollisen jatkokehityksen näkökulmasta. Laskentapohjan käytettävyyteen on tosin jo panostettu esimerkiksi ohjelmoimalla laskennan lähtötietojen syötesoluihin valmiita ohjeistuksia, tehtyjen valintojen perusteella ilmestyviä huomio- ja varoitusilmoituksia sekä solujen ehdollisia muotoiluja ja lukituksia.

Laskentapohjan käyttökelpoisuuden ja mahdollisen jatkokehityksen osalta on syytä erityisesti huomioida käynnissä olevan Paalutusohjeen 2011 päivitystyön lopputulokset ja niiden myötä mahdollisesti paaluvalmistajien suunnitteluohjeisiin ilmaantuvat muutostarpeet.

## LÄHTEET

Betoniteollisuus ry. 2009. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Osa 1: Eurokoodimitoituksen perusteet. Viitattu 24.4.2016 <http://www.eurocodes.fi> > Betonirakenteet > Betonirakenteisiin liittyvä sähköinen materiaali.

Betoniteollisuus ry. 2011. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Osa 6: Perustukset. Viitattu 24.4.2016 <http://www.eurocodes.fi> > Betonirakenteet > Betonirakenteisiin liittyvä sähköinen materiaali.

Betoniteollisuus ry. 2012a. Eurokoodin ja PO-2011 mukaiset vakiopaaluanturat. Viitattu 18.2.2016 <http://www.betoni.com> > Betonirakentaminen > Paalut > Apuvälineitä betonipaaluutuksen suunnittelijoille.

Betoniteollisuus ry. 2012b. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Osa 8: Taipuma. Viitattu 24.4.2016 <http://www.eurocodes.fi> > Betonirakenteet > Betonirakenteisiin liittyvä sähköinen materiaali.

Betoniteollisuus ry. 2016. Apuvälineitä betonipaaluutuksen suunnittelijoille. Viitattu 24.4.2016 <http://www.betoni.com> > Betonirakentaminen > Paalut.

Haavisto, J. 2015. Teräsbetonipaalun rakenteellinen mitoitus. Betoniteollisuus ry:n paalujaoksen paaluseminaari 19.11.2015. Viitattu 2.4.2016 <http://www.betoni.com> > Betonirakentaminen > Paalut > Paaluseminaarit > Paaluseminaari 2015.

Haavisto, J. & Laaksonen, A. 2015. Esiselvitysvaihe valmis – Teräsbetonipaalun rakenteellinen mitoitus. Paaluinfo 2/2015. Viitattu 4.4.2016 <http://www.betoni.com> > Betoni > Betonirakentaminen > Paalut > Paaluinfot.

Isokangas, I. 2015. Kärjellään kantavan paalun nurjahdustarkastelu. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.

Jääskeläinen, R. 2009. Pohjarakennuksen perusteet. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Koivunen, P. 2015. Tietoa PO-2011:n päivitykseen. TTY-tutkimus teräsbetonipaalujen nurjahdusmitoituksesta ja kestävydestä. Paaluinfo 1/2015. Viitattu 4.4.2016 <http://www.betoni.com> > Betoni > Betonirakentaminen > Paalut > Paaluinfot.

Kärki, I. 2010. Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen rataympäristössä. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2010. Viitattu 15.3.2016 <http://www.liikennevirasto.fi> > Aineistot > Julkaisut > Tutkimukset ja selvitykset > Luettelo Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä -sarjan julkaisuista v. 2010–2015.

Laitakari, A. 2011. Vakiopaaluuperustusten laskenta. Betoniteollisuus ry:n paalujaoksen paaluseminaari 1.12.2011. Viitattu 24.4.2016 <http://www.betoni.com> > Betonirakentaminen > Paalut > Paaluseminaarit > Paaluseminaari 2011.

Leskelä, M. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. by 210. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y.

Liikennevirasto 2012. Sillan geotekninen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 11/2012. Viitattu 3.3.2016 <http://www.liikennevirasto.fi> > Aineistot > Julkaisut > Ohjeet > Luettelo kaikista Liikenneviraston ohjeita -sarjan julkaisuista.

Närvänen, J. 2011. Kuormien alastuonnin hallinta monikerroksisessa rakennuksessa. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta: Saimaan ammattikorkeakoulu.

Rakennusteollisuus RT. 2013. Tuotelehti PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön RT-2011. Viitattu 23.4.2016 <http://www.betoni.com> > Betonirakentaminen > Paalut.

Rantamäki, M. & Tamminne, M. 1979. Pohjarakennus. 12., muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto.

Rantamäki, M.; Jääskeläinen, R. & Tamminne, M. 1979. Geotekniikka. 21., muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto.

Rasi-Koskinen, H. 2015. Vaakasuntaiset alustaluvut paaluperusteisissa silloissa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 34/2015. Viitattu 9.4.2016 <http://www.liikennevirasto.fi> > Aineistot > Julkaisut > Tutkimukset ja selvitykset > Vuonna 2015 ilmestyneet tutkimukset ja selvitykset.

Rautaruukki Oyj. 2012. Perustukset. Teräsbetoniset vakiopaaluanturat RR- ja RD-paaluille (FPS). Päivitetty 09/2012. Viitattu 4.1.2016 [http://www1.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Tekninen%20ohje%20-%20Terasbetoniset%20vakiopaaluanturat%20RR-%20ja%20RD-paaluille\\_.pdf](http://www1.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Tekninen%20ohje%20-%20Terasbetoniset%20vakiopaaluanturat%20RR-%20ja%20RD-paaluille_.pdf).

RIL 201-1-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje. LPO-2005. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 254-2011. Paalutusohje 2011. PO-2011. 2. painos. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RrPileCalc. 2015. Ruukki. Mitoitusohjelman ohje.

SFS-EN 1990. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Vahvistettu 26.6.2006. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1991-1-1. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Vahvistettu 21.10.2002. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1991-1-3. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Vahvistettu 26.1.2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat lisäsäännöt. Vahvistettu 19.1.2015. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1994-1-1. Eurokoodi 4: Betoni-teräs-liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Vahvistettu 30.5.2005. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1997-1. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Vahvistettu 27.1.2014. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.


SSAB 2015. SSAB:n teräspaalut. Suunnittelu- ja asennusohjeet. Viitattu 4.1.2016 <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Tekninen%20ohje%20-%20EUROCODE%20-%20SSAB%20ter%C3%A4spaalut%20-%20Suunnittelu-%20ja%20asennusohjeet.pdf>.

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2014. Eurokoodit EN-standardit 2014. Esite eurokoodeista. Viitattu 24.4.2016 <http://www.sfs.fi> > Aihealueet > Eurokoodit.

Talsi, P. 2012. Paalutuksen suunnittelu eurokoodin mukaan. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Törnqvist, J. 2011. Uusi paalutusohje PO 2011. Betoniteollisuus ry:n paalujaoksen paaluseminaari 1.12.2011. Viitattu 24.4.2016 <http://www.betoni.com> > Betonirakentaminen > Paalut > Paaluseminaarit > Paaluseminaari 2011.

# Vaadittavan paalumäärän laskentapohjan perusnäköm

 Vaadittavan paalumäärän laskenta Eurokoodin ja Paalutusohjeen PO-2011 mukaisesti	<b>Rakennuskohde:</b>	<b>Työnumero:</b>
	<b>Opinnäytetyön esittely</b>	1234
	<i>Huomautuksia:</i>	<b>Päivämäärä:</b>
	<i>Opinnäytetyön esittelyä varten</i>	20.4.2016
		<b>Tekijä:</b>
		Tuomas Koivula

Tärkeää: Huomioltava laskentapohjan soveltuvuus ja käytön rajoitukset, jotka on esitetty "Ohjeet" -välilehdellä!

<b>Lähtötiedot paalun nurjahdustarkastelua varten</b>		Häiriintymättömän maan redusoitu suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo	
<b>Nurjahdustarkastelun valinta:</b>	<b>Tarkastellaan</b>	$c_{yk} = 6$	<b>kPa</b>
<p><i>Paalun nurjahduskestävyys huomioidaan mitoituslaskelmissa maan leikkauslujuuden (<math>c_{yk}</math>) perusteella. Teräsbetonipaalun nurjahduskestävyydessä huomioidaan syötettävien kuormitustietojen perusteella kuormituksen pitkäaikaisuuden vaikutus tapauksessa, jossa maa murtuu. HUOM! Teräsbetonipaalun rakenteen taivutusmurtokestävyyden huomioiminen nurjahduskestävyydessä on nykyisten ohjeiden perusteella tulkinnanvaraista. Teräspaalun nurjahduskestävyys vastaa ainoastaan lyhytaikaista kuormitustilannetta, joten se on epävarmalla puolella.</i></p>			
<b>Pystysuorat paalukuormat</b>		Negatiivinen vaippahankaus huomioidaan PO-2011 (s.49) mukaisesti, jolloin negatiivista vaippahankausta ja lyhytaikaista kuormitusta ei huomioida samanaikaisesti kuormitusyhdistelyissä. Laskentaohjelma määrittää lyhytaikaisen kuormituksen suuruuden syötettävien kuormitustietojen perusteella.	
<b>Seuraamusluokka:</b>	<b>CC2</b>	Kerrosten lukumäärä, jossa hyötykuormat kuuluvat samaan luokkaan	
<b>Kuorman tyyppi:</b>	<b>Viivakuorma</b>		
Paaluun ylärakenteista kohdistuvat aksiaaliset kuormat anturalaatan alapinnan tasossa:	Hyötykuorman rakennuksen tilan luokka		
<b>Lumikuorma</b>		$q_k, \text{lumi} = 15,0$	<b>kN/m</b>
<b>Hyötykuorma 1</b>	<b>Luokka A: asuintilat</b>	$q_k, \text{hyöty} = 55,0$	<b>kN/m</b>
<b>Hyötykuorma 2</b>	>Ei käytetä<	$q_k, \text{hyöty} =$	<b>kN/m</b>
<b>Pysyvä kuorma (rakenteen omapaino)</b>		$g_k, \text{pysyvä} = 250,0$	<b>kN/m</b>
Maan liikkeistä aiheutuvat kuormat:	Esiintyminen		
<b>Negatiivinen vaippahankaus</b>	<b>Esiintyy</b>	$F_{\text{neg,d}} = 20$	<b>kN/paalu</b>
<b>Paalutiedot pystysuoralle paalulle</b>		Paalun tyyppi	Paalu-jatkosten käyttö
<b>Paalutustyöluokka:</b>	<b>PTL2</b>		Teräspaalun korroosio-vara
<b>Materiaali - asennustapa (maahantuoja / valmistaja)</b>	<b>Teräsbetoni - lyöntipaalu (RT:n tuotelehti 2011 muk.)</b>	TB300b	kyllä
			paaluanturan (paaluryhmän) valinta
			<b>2:n paalun vakioseinäntura</b>
<b>Laskennan tulokset*</b>		Valitun paaluryhmän vaadittava laskennallinen paaluryhmien painopisteiden välinen etäisyys	
<small>Varmista aina kaikkien syötettyjen tietojen oikeellisuus!</small>		$kk <$	<b>4261,0 mm</b>
<b>Määrittävän kuormitustapauksen mukainen laskennallinen vaadittava paalumäärä:</b>		$n_{\text{vaad}} >$	<b>0,47 kpl/m</b>
<p><small>* HUOM! Suunnittelijan tulee lisäksi erikseen huomioida seuraavat asiat: Paalujen sijaintipoiikkeamien ja aksiaalisen paalukuorman epäkeskisyyssmomentin vaikutukset paalukuormiin. Paaluanturan jäykkyyden vaikutukset perustuksen kestävyyden mitoitusohjeen toteutumiseen. Paalun oman painon huomioimisen vaikutukset paalun geoteknisen kestävyyden suuruuteen. Lisätietoa ohjeissa...</small></p>			

# Vaadittavan paalumäärän laskentapohjan yhteenvetönäkymä

<b>optiplan</b>		Laskennan yhteenveto		Päivämäärä:	20.4.2016
Rakennuskohde:	Opinnäytetyön esittely			Työnumero:	1234
Laskelman tekijä:	Tuomas Koivula	Seuraamusluokka:	CC2	Paalutustyöluokka:	PTL2
		Paalun tyyppi:	TB300b	Paalujatkokset:	kyllä

Lähtötiedot			
<i>Paalun nurjahdus on huomioitu laskelmissa</i>			
Häiriintymättömän maan redusoitu suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo	cuk	6,0	kPa
<i>Syötetyt kuormat ovat perustuksen tietyille osalle välittyvien anturan alapinnan tasossa vaikuttavien pystysuorien kuormien ominaisarvoja</i>			
Lumikuorma	qk,lumi	15,0	kN/m
Hyötykuorma (1)	qk,hyöty	55,0	kN/m
Hyötykuorma (2)	qk,hyöty	0,0	kN/m
Omapaino	gk,pysyvä	250,0	kN/m
<i>Kuormitusyhdistelyissä huomioitu negatiivisen vaippahankauksen mitoitusarvo yhdelle paalulle:</i>			
Negatiivisen vaippahankauksen aiheuttaman lisäkuorman mitoitusarvo yhdelle paalulle	Fneg;d	20,0	kN/paalu

Paalun puristuskestävyyden määrittäminen				
<i>Paalun kestävyyden määrittäminen perustuu RT-tuotelehden taulukkoon 3 (Rakennusteollisuus 2011, 8). Nurjahduskestävyyden määrittämisessä on käytetty kuormien pitkä- ja lyhytaikaisuuksien määrittämiseen käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmän kaavaa (kaava 6.165 ks. RIL 201-1-2011, 42), jonka mukainen teräsbetonipaalun nurjahduskestävyys on taulukon mukaan varmalla puolella. Teräsbetonipaalun nurjahduskestävyys vastaa tapausta, jossa maa murtuu. Teräsbetonipaalun rakenteen taipumusmurtokestävyyden huomioiminen nurjahduskestävyydessä on nykyisten ohjeiden perusteella tulkinnanvaraista</i>				
Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo:	Rd,max	874,0	kN	
<b>Kuormitusyhdistelyjen mukaiset paalun nurjahduskestävyyden murtorajatilan mitoitusarvot:</b>				
Kuormitustapaus KT1	Lumikuorma määräävä muuttuva ja käytetään yhdistelykerrointa	Rd,nurj	kN	
Kuormitustapaus KT1	Lumikuorma määräävä muuttuva ja käytetään kerrosvähennystä			790,9
Kuormitustapaus KT2	Hyötykuorma määräävä muuttuva ja käytetään yhdistelykerrointa			800,8
Kuormitustapaus KT2	Hyötykuorma määräävä muuttuva ja käytetään kerrosvähennystä			805,2
Kuormitustapaus KT3	Omapaino määräävä			795,5
Kuormitustapaus KT3	Omapaino määräävä	743,5		

Paalujen yläpuolisten aksiaalisten kuormien mitoitusarvojen määrittäminen				
<b>Kuormitusyhdistelyjen mukaiset yläpuolisten rakenteiden kokonaiskuorman murtorajatilan mitoitusarvot tarkasteltavalle perustuksen osalle:</b>				
Kuormitustapaus KT1	Lumikuorma määräävä muuttuva ja käytetään yhdistelykerrointa	Pd	[kN/m]	
Kuormitustapaus KT1	Lumikuorma määräävä muuttuva ja käytetään kerrosvähennystä			367,8
Kuormitustapaus KT2	Hyötykuorma määräävä muuttuva ja käytetään yhdistelykerrointa			380,1
Kuormitustapaus KT2	Hyötykuorma määräävä muuttuva ja käytetään kerrosvähennystä			385,8
Kuormitustapaus KT3	Omapaino määräävä			373,4
Kuormitustapaus KT3	Omapaino määräävä	337,5		
<b>Kuormitusyhdistelyjen mukaiset yläpuolisten rakenteiden pitkäaikaiskuormien murtorajatilan mitoitusarvot tarkasteltavalle perustuksen osalle:</b>				
Kuormitustapaus KT1	Lumikuorma määräävä muuttuva ja käytetään yhdistelykerrointa	Ppitkäaik;d	[kN/m]	
Kuormitustapaus KT1	Lumikuorma määräävä muuttuva ja käytetään kerrosvähennystä			316,8
Kuormitustapaus KT2	Hyötykuorma määräävä muuttuva ja käytetään yhdistelykerrointa			316,8
Kuormitustapaus KT2	Hyötykuorma määräävä muuttuva ja käytetään kerrosvähennystä			316,8
Kuormitustapaus KT3	Omapaino määräävä			337,5
<b>Kuormitusyhdistelyjen mukaiset yläpuolisten rakenteiden lyhytaikaiskuormien murtorajatilan mitoitusarvot tarkasteltavalle perustuksen osalle:</b>				
Kuormitustapaus KT1	Lumikuorma määräävä muuttuva ja käytetään yhdistelykerrointa	Plyhytaik;d	[kN/m]	
Kuormitustapaus KT1	Lumikuorma määräävä muuttuva ja käytetään kerrosvähennystä			51,0
Kuormitustapaus KT2	Hyötykuorma määräävä muuttuva ja käytetään yhdistelykerrointa			63,4
Kuormitustapaus KT2	Hyötykuorma määräävä muuttuva ja käytetään kerrosvähennystä			69,0
Kuormitustapaus KT3	Omapaino määräävä			56,6
Kuormitustapaus KT3	Omapaino määräävä	0,0		

Vaadittavan paalumäärän määrittäminen		
Määräävän kuormitustapauksen mukainen laskennallinen vaadittava paalumäärä vähintään:	n,vaad	0,469 kpl/m
<i>Paalumäärä, jolla PO-2011 osan 1 kohdan 4.5.2.1 (RIL 254-2011, 59) mukainen paaluperustuksen mitoitusarvo <math>F_{c;d} \leq R_{c;d}</math>, sekä kohdan 4.2.2.2 (RIL 254-2011, 49) mukaiset negatiivisen vaippahankauksen tarkasteluehdot toteutuvat paalujen puristuskestävyyksien osalta. Laskennan lähtöoletukset: Pystysuora kuormitusresultantti jakautuu tasaisesti kaikille paaluille. Paaluja kuormittaa ainoastaan ulkoinen puristava normaalivoima. Paalujen sijainnit eivät poikkea suunnittelusta. Paalujen puristuskestävyydet vastaavat edellä määritettyjä kestävyyksiä.</i>		

# Paalun RR75 vertailulaskelma Ruukin RrPileCalc- mitoitusohjelmalla

<b>SSAB</b>		<b>R r P i l e C a l c Paalun mitoitus</b>		<b>(Ver 2.6.0.0)</b>	
SSAB Europe Oy				TulostusPVM	18.4.2016
				Klo	13:35:17
<b>Laskennan yleistiedot</b>					
Kohde:	-				
Suunnittelija:	-				
Paalun tunnus:	-				
Päivämäärä:	18.4.2016				
Normi:	Suomen paalutusohje (PO 2011), YM talonrakennus				
Varmuuskertoimet					
- paalumateriaali:	1.00				
- raudotteiden materiaali:	1.15				
- betonimateriaali:	1.50				
- maan kestävyys:	1.50				
<b>Paalutiedot</b>					
- koko:	RR75/6.3				
- teräksen myötölujuus:	S440J2H				
- korroosiovara:	1.2 mm				
<b>Maaperätiedot</b>					
- suljettu leikkauslujuus, ominaisarvo:	5 kPa				
- allustaluvun kerroin A:	20				
- siivuvastuksen ääriarvon kerroin B:	6				
- paalun geometrinen alkutaipuma:	Lcr/400				
<b>Paalun kestävyys</b>					
Paalun puristuskestävyyden mitoitusarvo:	<b>F<sub>d</sub></b>	<b>148 kN</b>			
- nurjahdus, maa murtuu:	F <sub>d;s</sub>	148 kN			
- nurjahdus, paalu murtuu:	F <sub>d;p</sub>	189 kN			
- geotekninen kestävyys:	R <sub>c;d</sub>	186 kN			



## Teräsbetonipaalujuen taulukoidut puristuskestävyyksien mitoitusarvot

Paalun tyyppi	$R_{d,nurj}$ [kN] nurjahduksen mukaan						$R_{d,max}$ [kN]		
	$c_{uk}$ [kPa]	P [%]	L [%]	5	7	10	PTL3	PTL2	PTL1
TB250a	$L_{cr}/ 150$	100	0	443	541	A	605	544	495
		50	50	568	700	A			
		0	100	674	A	A			
	$L_{cr}/ 300$	100	0	552	A	A			
		50	50	762	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB250b	$L_{cr}/ 150$	100	0	463	566	A	682	614	558
		50	50	592	730	A			
		0	100	699	A	A			
	$L_{cr}/ 300$	100	0	580	A	A			
		50	50	798	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB300a	$L_{cr}/ 150$	100	0	643	786	A	870	783	711
		50	50	824	1016	A			
		0	100	977	A	A			
	$L_{cr}/ 300$	100	0	802	A	A			
		50	50	1107	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB300b	$L_{cr}/ 150$	100	0	669	818	A	972	874	795
		50	50	855	1055	A			
		0	100	1010	A	A			
	$L_{cr}/ 300$	100	0	838	A	A			
		50	50	1153	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB300c	$L_{cr}/ 150$	100	0	743	909	A	1124	1012	920
		50	50	941	1164	A			
		0	100	1102	A	A			
	$L_{cr}/ 300$	100	0	939	A	A			
		50	50	1284	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB350a	$L_{cr}/ 150$	100	0	1002	1226	A	1509	1358	1234
		50	50	1270	1571	A			
		0	100	1488	A	A			
	$L_{cr}/ 300$	100	0	1266	A	A			
		50	50	1732	A	A			
		0	100	A	A	A			

## Teräspaaluja taulukoidut puristuskestävyyksien mitoitussarvot

Korroosiovara 1,2 mm											
Paalu	Teräslaji	Alkupauma	Rakenteen puristuskestävyyden mitoitussarvo $R_d$ [kN]					Geoteknisen kestävyyden mitoitussarvot $R_d$ [kN]			
			suljettu leikkauslujuus $c_{\alpha}$ [kPa]					PTL1	PTL2	PTL3	
		$\delta_s$	5	7	10	15	20	30			
RR75	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	210	257	318	347	364	383	186	220*	274*
		L <sub>c</sub> /600	245	298	337	365	381	399			
RR90	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	274	336	394	424	442	463	220	260*	324*
		L <sub>c</sub> /600	320	382	414	445	462	481			
RRs100/6,3	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	345	422	523	594	624	660	318	423	529
		L <sub>c</sub> /600	401	487	571	623	653	687			
RR115/6,3	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	421	507	544	579	599	622	288	345*	423*
		L <sub>c</sub> /600	489	534	571	605	624	645			
RR115/8	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	464	568	673	726	758	794	360	480	600
		L <sub>c</sub> /600	541	652	709	762	792	826			
RRs115/8	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	464	568	703	854	903	961	450	600	749
		L <sub>c</sub> /600	541	657	807	896	946	1002			
RRs125/6,3	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	504	616	729	787	821	859	402	536	670
		L <sub>c</sub> /600	582	704	766	823	856	892			
RR140/8	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	653	799	872	931	966	1007	446	594	743
		L <sub>c</sub> /600	758	853	917	975	1008	1044			
RRs140/8	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	653	799	988	1107	1162	1225	557	743	929
		L <sub>c</sub> /600	758	921	1066	1160	1214	1275			
RR140/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	710	870	1052	1138	1190	1249	549	732	915
		L <sub>c</sub> /600	829	1007	1108	1195	1245	1301			
RRs140/10	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	710	870	1078	1334	1414	1509	686	915	1143
		L <sub>c</sub> /600	829	1007	1237	1401	1482	1577			
RR170/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	975	1194	1341	1436	1493	1558	670	893	1116
		L <sub>c</sub> /600	1134	1307	1410	1504	1558	1618			
RRs170/10	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	975	1194	1477	1700	1789	1893	837	1116	1396
		L <sub>c</sub> /600	1134	1377	1632	1784	1872	1971			
RR170/12,5	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	1057	1295	1603	1739	1821	1917	824	1099	1373
		L <sub>c</sub> /600	1234	1501	1687	1826	1907	1992			
RR220/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	1519	1747	1864	1973	2037	2111	885	1180	1475
		L <sub>c</sub> /600	1706	1838	1955	2060	2119	2187			
RR220/12,5	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	1654	2026	2259	2417	2511	2620	1093	1457	1821
		L <sub>c</sub> /600	1922	2204	2374	2531	2620	2720			
RR270/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	2152	2298	2429	2550	2621	2702	1103	1484	1855
		L <sub>c</sub> /600	2265	2413	2541	2654	2718	2790			
RR270/12,5	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	2391	2782	2971	3149	3253	3373	1378	1837	2296
		L <sub>c</sub> /600	2713	2927	3117	3288	3384	3493			
RR320/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	2665	2826	2969	3099	3176	3264	1328	1771	2214
		L <sub>c</sub> /600	2802	2962	3098	3219	3287	3364			
RR320/12,5	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	3177	3446	3654	3847	3959	4089	1647	2196	2745
		L <sub>c</sub> /600	3386	3621	3826	4008	4110	4226			

Korroosiovara 2,0 mm											
Paalu	Teräslaji	Alkupauma	Rakenteen puristuskestävyyden mitoitussarvo $R_d$ [kN]					Geoteknisen kestävyyden mitoitussarvot $R_d$ [kN]			
			suljettu leikkauslujuus $c_{\alpha}$ [kPa]					PTL1	PTL2	PTL3	
		$\delta_s$	5	7	10	15	20	30			
RR75	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	191	234	276	297	310	325	186	220*	274*
		L <sub>c</sub> /600	223	267	290	312	324	338			
RR90	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	251	308	339	363	376	392	220	260*	324*
		L <sub>c</sub> /600	292	331	357	380	393	407			
RRs100/6,3	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	317	388	472	511	535	561	318	423	529
		L <sub>c</sub> /600	367	446	496	535	558	583			
RR115/6,3	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	388	439	468	494	510	528	288	345*	423*
		L <sub>c</sub> /600	429	462	490	515	530	546			
RR115/8	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	435	532	605	648	673	704	360	480	600
		L <sub>c</sub> /600	506	588	635	678	703	731			
RRs115/8	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	435	532	659	766	807	851	450	600	749
		L <sub>c</sub> /600	506	614	734	803	844	890			
RRs125/6,3	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	464	567	631	676	701	731	402	536	670
		L <sub>c</sub> /600	535	614	662	706	730	757			
RR140/8	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	613	730	781	830	859	892	446	594	743
		L <sub>c</sub> /600	710	768	820	867	894	924			
RRs140/8	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	613	751	915	991	1036	1088	557	743	929
		L <sub>c</sub> /600	711	863	961	1038	1082	1131			
RR140/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	675	827	969	1043	1088	1139	549	732	915
		L <sub>c</sub> /600	787	940	1019	1094	1137	1185			
RRs140/10	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	675	827	1024	1228	1298	1380	686	915	1143
		L <sub>c</sub> /600	787	956	1171	1289	1359	1438			
RR170/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	929	1138	1233	1316	1364	1421	670	893	1116
		L <sub>c</sub> /600	1079	1207	1296	1377	1422	1474			
RRs170/10	S550JZH	L <sub>c</sub> /400	929	1138	1407	1564	1641	1730	837	1116	1396
		L <sub>c</sub> /600	1079	1310	1509	1640	1715	1799			
RR170/12,5	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	1016	1245	1504	1626	1700	1785	824	1099	1373
		L <sub>c</sub> /600	1185	1441	1583	1707	1778	1858			
RR220/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	1451	1611	1712	1806	1861	1925	885	1180	1475
		L <sub>c</sub> /600	1579	1694	1794	1883	1934	1990			
RR220/12,5	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	1594	1952	2118	2260	2343	2440	1093	1457	1821
		L <sub>c</sub> /600	1850	2073	2225	2364	2443	2531			
RR270/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	1988	2115	2229	2333	2393	2464	1103	1484	1855
		L <sub>c</sub> /600	2092	2219	2329	2425	2480	2542			
RR270/12,5	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	2308	2614	2783	2942	3034	3141	1378	1837	2296
		L <sub>c</sub> /600	2556	2749	2918	3069	3154	3250			
RR320/10	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	2459	2599	2721	2834	2899	2976	1328	1771	2214
		L <sub>c</sub> /600	2584	2721	2837	2940	2998	3065			
RR320/12,5	S440JZH	L <sub>c</sub> /400	3028	3235	3421	3592	3692	3808	1647	2196	2745
		L <sub>c</sub> /600	3187	3397	3578	3739	3830	3932			