

Ruuvipaalujen geotekninen mitoittaminen

Selvitys yksi- ja monilaippaisten ruuvipaalujen laskennallisesta mitoittamisesta

Jukka Rantala
14.10.2008

Tilaaja: Paalupiste Oy

Sisällysluettelo

Määritelmät.....	3
Merkinnät.....	4
1 Johdanto.....	6
2 Ruuvipaalujen geotekninen kantokyky.....	7
2.1 Murtotavat.....	7
2.2 Yksittäisten laippojen murto.....	7
2.2.1 Geotekninen kantokyky puristuksessa karkearakeisessa maakerroksessa.....	9
2.2.2 Geotekninen kestokyky vedossa karkearakeisessa maakerroksessa.....	11
2.2.3 Geotekninen kantokyky puristuksessa hienorakeisessa maakerroksessa.....	16
2.2.4 Geotekninen kestokyky vedossa hienorakeisessa maakerroksessa.....	18
2.3 Sylinteripintamurto monilaippaisella ruuvipaalulla.....	19
2.3.1 Geotekninen kantokyky puristuksessa karkearakeisessa maalajissa.....	21
2.3.2 Geotekninen kestokyky vedossa karkearakeisessa maalajissa.....	22
2.3.3 Geotekninen kantokyky puristuksessa hienorakeisessa maakerroksessa.....	23
2.3.4 Geotekninen kestokyky vedossa hienorakeisessa maakerroksessa.....	25
2.4 Välimuotomaalajit.....	26
3 Kantokyvyn toteaminen asennuksen yhteydessä.....	27
3.1 Paalun murtokestävyys vetokuormituksessa karkearakeisessa maalajissa.....	27
3.2 Paalun murtokestävyys vetokuormituksessa hienorakeisessa maalajissa.....	28
4 Ruuvipaalujen sivukuormakestävyys.....	29
4.1 Sivukuormitetun paalun käyttäytymismekanismit.....	29
4.2 Sivuvastuksen ja sivukuormituksen ääriarvot.....	30
4.2.1 Karkearakeinen maalaji.....	30
4.2.2 Hienorakeinen maalaji.....	30
4.3 Sivusuuntaiset siirtymät.....	32
4.3.1 Karkearakeinen maalaji.....	32
4.3.2 Hienorakeinen maalaji.....	33
5 Ruuvipaalujen nurjahdus.....	35
6 Suunnittelujärjestelmät.....	39
6.1 Kansallinen suunnittelujärjestelmä.....	39
6.1.1. Paalun geotekninen mitoitus.....	39
6.2 Eurokoodit.....	41
Lähteet.....	43
Liitteet.....	44

Määritelmät

<i>Geotekninen kantavuus</i>	Puristetun paalun kapasiteetti, jossa on otettu huomioon sekä paalun geotekninen kantokyky, että paalun painumat
<i>Geotekninen kantokyky</i>	puristetun paalun geotekninen murtokestävyys jaettuna kokonaisvarmuuskertoimella
<i>Geotekninen kestävyys</i>	vedetyn paalun geotekninen murtokestävyys jaettuna kokonaisvarmuuskertoimella
<i>Geotekninen murtokestävyys</i>	puristetun tai vedetyn paalun laskennallinen murtokestävyys
<i>Geotekninen vetokestävyys</i>	vedetyn paalun kapasiteetti, jossa on otettu huomioon sekä paalun geotekninen kestävyys, että siirtymät
<i>Hienorakeinen maalaji</i>	maalaji, jonka lujuusominaisuudet määräytyvät maan koheesion (c) avulla, esim. savet
<i>Karkearakeinen maalaji</i>	maalaji, jonka lujuusominaisuudet määräytyvät maan sisäisen kitkakulman (ϕ) avulla, esim. hiekat, sorat, moreenit
<i>Upotussyvyys</i>	paalun kärjen tai muun paalunosan etäisyys maanpinnasta
<i>Välimuotomaalaji</i>	maalaji, jonka lujuusominaisuudet määräytyvät sekä koheesion että maan sisäisen kitkakulman avulla, esim. siltit

Merkinnät

α	adheesiokerroin
β	jännityseksponentti
ϕ'	maan tehokas sisäinen kitkakulma
γ'	maan tehokas tilavuuspaino
σ'_v	maan tehokas pystysuuntainen jännitys
c_u	maakerroksen suljettu leikkauslujuus
d tai d_p	paalun varren halkaisija
k_s	alustaluku
m	moduuliluku, tai
m	laipan geoteknisen kestävyys muodostumiseen liittyvä kerroin
p_m	sivuvastuksen tai sivukuormituksen ääriarvo
s	laipan geoteknisen kestävyys muodostumiseen liittyvä korjauskerroin
y_m	paalun sivusuuntainen siirtymä sivuvastuksen (sivukuormituksen) ääriarvolla
B	ruuvin laipan halkaisija
D	paalun upotussyvyys
F_p	kokonaisvarmuusluku puristetulla paalulla
F_v	kokonaisvarmuusluku vedetyllä paalulla
H	paalun kriittinen upotussyvyys
H_1	ruuvipaalun ylimmän ruuvilaipan upotussyvyys (etäisyys maanpinnasta)
H_3	ruuvipaalun alimman ruuvilaipan upotussyvyys (etäisyys maanpinnasta)
$K_{ru} \tan \phi$	ruuvilaippojen välisen maasynterinin vaippavastuskerroin tai paalun varren vaippavastuskerroin vedettynä
$K_s \tan \phi$	ruuvilaippojen välisen maasynterinin vaippavastuskerroin tai paalun varren vaippavastuskerroin puristettuna
L_p	paalun pituus
M_s	kokoonpuristuvuusmoduuli
N_c	paalun kärjen kantavuuskerroin hienorakeisilla maalajeilla
N_{cu}	paalu ylimmän ruuvilaipan vetokantavuuskerroin hienorakeisilla maalajeilla
N_q	paalun kärjen kantavuuskerroin karkearakeisilla maalajeilla
N_{qu}	paalun ylimmän ruuvilaipan vetokantavuuskerroin karkearakeisilla maalajeilla
R_b	paalun kärjen kapasiteetti puristetulla paalulla
R_{bu}	ruuvipaalun ylimmän ruuvilaipan kapasiteetti vedetyllä paalulla
R_p	paalun geotekninen murtokestävyys puristuskuormituksessa
$R_{p;k}$	paalun geotekninen kantokyky (puristuskuormituksessa)
R_r	ruuvipaalun laippojen välisen maasynterinin kitkavastus puristuskuormituksessa
R_{ru}	ruuvipaalun laippojen välisen maasynterinin kitkavastus vetokuormituksessa

R_s	paalun varren vaippavastus puristuskuormituksessa
R_{su}	paalun varren vaippavastus vetokuormituksessa
R_v	paalun geotekninen murtokestävyys vetokuormituksessa
$R_{v,k}$	paalun geotekninen kestävyys (vetokuormituksessa)
S	ruuvipaalun perättäisten ruuvilaippojen välinen etäisyys

1 Johdanto

Suomen paalujen asennusta käsittelevä ohjeisto kattaa melko hyvin eri paalutyypit ja niiden asennustavat. Suurpaalutusohjeessa (SPO-2001) esitetään suurpaalujen suunnittelun ja toteutuksen yleiset periaatteet. Näiden paalujen kantavuus on noin 1,5 MN ja läpimitta $d \geq 300$ mm. Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) esitetään teräsbetonisia ja puisia paalutuselementtejä sisältävien paalutyypin mitoitus- ja asennusohjeet. Pienpaalutusohje (RIL 230-2007) käsittelee käyttötilan kantavuudeltaan yli ≥ 50 kN teräspaalujen mitoitus- ja asennusohjeita, jotka soveltuvat halkaisijaltaan $d \geq 30$ mm oleville poraamalla asennettaville paaluille ja halkaisijaltaan $d \geq 60$ mm oleville muulla tavalla, kuten lyömällä, täryttämällä, poraamalla tai puristamalla asennettaville paalulle.

Kantavuutensa, kokonsa ja materiaaliensa perusteella ruuvipaalut sijoittuisivat Pienpaalutusohjeen piiriin. Ohjeessa ei kuitenkaan käsitellä lainkaan ruuvaamalla asennettavia paaluja. Ruuvipaaluja koskevan ohjeistuksen puuttuminen onkin osaltaan rajoittanut tämän paalutyypin käyttöä ja yleistymistä Suomalaisessa rakentamisessa.

Tämän suppean tutkimuksen tarkoituksena on selvittää ruuvipaalujen eroja muihin teräksisiin pienpaaluihin verrattuna, keskittyen lähinnä ruuvipaalujen laskennallisen geoteknisen murtokestävyyden määrittämiseen puristus- ja vetokuormituksessa. Tarkoituksena on esittää teoreettinen laskentamenetelmä ruuvipaalun geoteknisen murtokestävyyden määrittämiseen tunnettujen maaperätietojen pohjalta.

Pienpaalutusohjeen (RIL 230-2007) ohjeita on pyritty soveltamaan niin laajasti kuin suinkin mahdollista. Niiden ruuvipaaluihin erityisesti liittyvien ominaispiirteiden osalta, joiden mitoitukseen ohjeita ei Suomessa voimassa olevasta ohjeistosta löydy, on tukeuduttu kansainvälisesti julkaistuihin tutkimuksiin ja artikkeleihin, sekä muissa maissa voimassa oleviin mitoituskäytäntöihin.

2 Ruuvipaalujen geotekninen kantokyky

2.1 Murtotavat

Ruuvipaalujen kantokykyä (puristuskuormituksessa) ja vetokestävyyttä on seuraavassa tarkasteltu staattisten kantavuuskaavojen avulla. Käytettävät kaavat perustuvat Suomen käytössä oleviin virallisiin normeihin ja ohjeisiin pienpaalujen kantokyvyn laskennallisesta määrittämisestä (RIL 230-2007, Eurocode 7). Eryteisesti ruuvipaaluille sovellettuja kansallisia tai Eurooppalaisia ohjeita ei kuitenkaan ole tätä selvitystä tehtäessä vielä olemassa. Tästä syystä selvityksessä on tarvittaessa tukeuduttu kirjallisuudesta löytyviin ruuvipaalujen ja –ankkureiden veto- ja puristuskapasiteettia selvittäviin tutkimuksiin.

Ruuvipaalujen aksiaalinen kapasiteetti voidaan määrittää joko *sylinterimurtona* tai *yksittäisen levyn puristus- ja vetomurtona*. Paalun geometria määrittää käytettävän murtomallin. Yhden ruuvin paaluilla sovelletaan aina levyn puristumurtoa, kun taas useamman ruuvilaipan paaluilla voidaan soveltaa joko lieriömurtoteoriaa tai usean yksittäisen ruuvilaipan murtoteoriaa. Paalun varressa olevien perättäisten ruuvien keskinäisten etäisyyksien (S) suhde ruuvien kierteiden halkaisijaan (B) määrittää sovellettavan murtomallin.

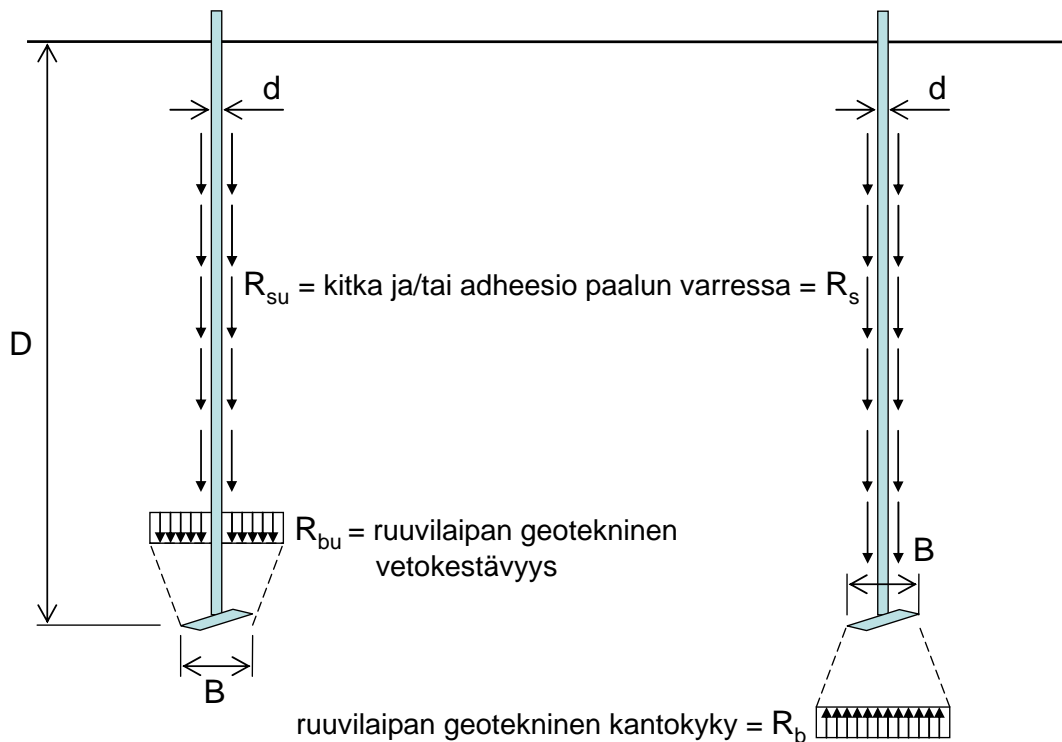
Ruuvipaaluja on käytetty lähinnä kevyiden rakenteiden ja rakennusten perustuksina, joihin kohdistuu huomattavia, lähinnä tuulikuormista johtuvia vetokuormia. Suurin osa kirjallisuudesta ja julkaistuista tutkimuksista käsitteleekin ruuvipaalujen vetokapasiteettia. Lieriömurtopintaa voidaan kuitenkin soveltaa sellaisenaan myös puristetuille ruuvipaaluille. Murtopinta muodostuu kahden ruuvikierteen välille samalla tavoin paalun kuormitustavasta riippumatta, koska lieriömurtopinnan muotoon vaikuttavat lähinnä paalun geometria ja maakerrosten häiriintyminen paalun asennuksen yhteydessä.

2.2 Yksittäisten laippojen murto

Yksittäisten ruuvilaippojen murtoteoriassa ruuvipaalu käsitetään yhdeksi, tai sarjaksi yksittäisiä levyankkureita, joiden upotussyvyys vaihtelee. Veto- tai puristumurto tapahtuu jokaisen yksittäisen levyn ylä- tai alapuolella paalun kantokyvyn ylittyessä. Yksittäisen levyn murtoteorian soveltuvuus monilaippaisen ruuvipaalun kantokyvyn laskentaan riippuu ruuvilevyjen keskinäisestä etäisyydestä. Paalun kokonaiskapasiteetti muodostuu yksittäisten ruuvikierteiden ylä- tai alapuolisen maan kantokyvystä, jotka lasketaan yhteen ja joihin lisätään paalun varren ja maan välinen tartunta paalun tehokkaan toimivan varren pituudelta jokaisen kierteen yläpuolella (Kuva 2.1).

Zhang (1999) mukaan tehokas paalun varren pituus peräkkäisten laippojen välillä, H_{eff} , muodostuu todellisesta laippojen välisestä etäisyydestä, josta on vähennetty kaksinkertainen ruuvikierteen halkaisija. Tämä pituus pätee riippumatta ympäröivästä maalajista tai kuormitustavasta (veto- tai puristus). Tehokkaan varrenosan pituuden vähennys johtuu tartunnan häiriintymisestä maan puristuessa kasaan laippalevyn yläpuolella paalua vedettäessä, ja samanaikaisesta tyhjän 'ontelon' muodostumisesta laipan vastakkaiselle puolelle laipan noustessa ylöspäin. Sama ilmiö toistuu puristuskuormituksessa, tyhjän ontelon muodostuessa painuvien laippojen yläpuolelle, ja tartunnan häiriintyessä puristuspinalla laippojen alapuolella.

Hienorakeisten maakerrosten osalta ei vaippavastusta kuitenkaan voida käyttää hyväksi pitkäaikaisessa vetokuormituksessa (RIL 230 -2007).



Kuva 2.1 Yksilaippaisen ruuvipaalun kestävyys vetokuormituksessa ($R_v = R_{bu} + R_{su}$) ja puristuskuormituksessa ($R_k = R_b + R_s$).
 D = paalun (alimman ruuvilaipan) upotussyvyys
 B = ruuvilaipan halkaisija
 d = paalun varren halkaisija.

Yksittäisten laippojen murtoteoria perustuu levyankkureiden ja matalaperustusten vetokapasiteettia käsitteleviin tutkimuksiin (Adams ja Hayes 1967; Meyerhof ja Adams

1968; Vesic 1971). Sekä yhdestä, että useammasta ruuvilaipasta koostuvien ruuvipaalujen vetokapasiteettia on arvioitu menestyksekkäästi soveltamalla tätä teoriaa yhdessä muunnetun kantavuuskaavan kanssa, jossa empiirisesti määritetty vetokestävyyskerroin sK_u (tai N_{cu}) korvaa perinteisen kantavuuskertoimen N_q (N_c).

2.2.1 Geotekninen kantokyky puristuksessa karkearakeisessa maakerroksessa

Yhdellä laipalla varustetun ruuvipaalun puristuskestävyys mitoitetaan Suomen kansallisen suunnittelujärjestelmän mukaisesti. Paalun geotekninen kantokyky $R_{p;k}$ muodostuu paalun kärjen kantokyvystä R_b ja paalun varren ja maan välisen kitkan kantokyvystä R_s .

$$R_{p;k} = R_b + R_s$$

Paalun kärkivastus (q_b [kN/m²]) karkearakeisessa maakerroksessa saadaan kaavasta:

$$q_b = \sigma'_v \cdot N_q$$

, missä σ'_v on maan tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla ja N_q on paalun kärjen kantavuuskerroin. Kantavuuskertoimena käytetään maata syrjäyttämättömän paalun kertoimia, joiden riippuvuus maakerroksen sisäisestä kitkakulmasta on määritetty kokeellisesti kuvan 2.2 mukaisesti.

Paalun varren vaippavastus ($q_{s;i}$ [kN/m²]) lasketaan kaavasta:

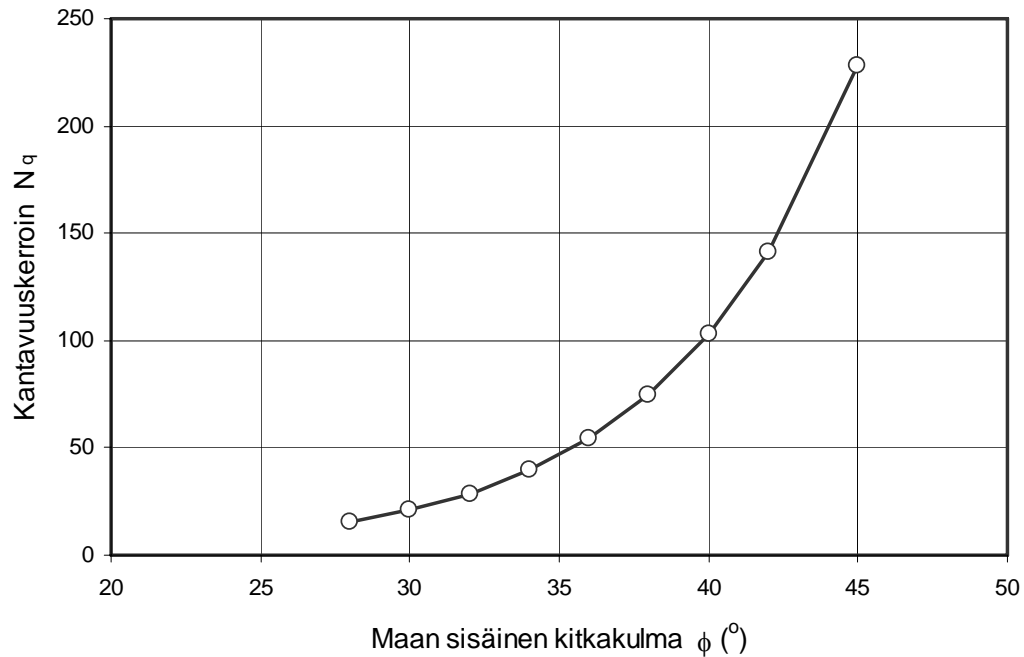
$$q_{s;i} = \sigma'_{v;i} \cdot K_s \tan \phi$$

, missä $\sigma'_{v;i}$ on maan tehokas pystysuora jännitys paalun vaipalla maakerroksessa i ja $K_s \tan \phi$ maan sisäisestä kitkakulmasta riippuva vaippavastuskerroin. Paalun vaippavastuskerroin on määritetty kokeellisesti maata syrjäyttämättömälle paalulle ja sen arvo riippuu maan sisäisestä kitkakulmasta kuvan 2.3 mukaisesti.

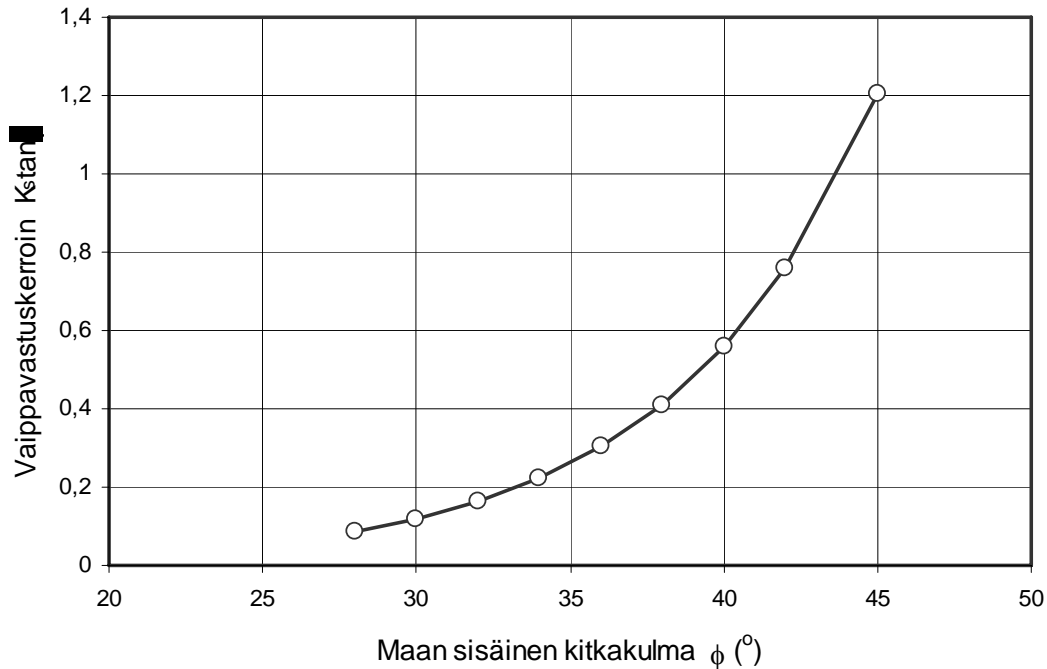
Ruuvipaalun geotekninen murtokestävyys puristuskuormituksessa lasketaan paalun kärjen ja vaipan kestävyyksien summana:

$$R_p = R_b + R_s = A_b \cdot q_b + \sum_{i=1}^n (A_{s;i} \cdot q_{s;i})$$

, missä A_b on paalun laipan pinta-ala, q_b on paalun kärkivastus, $A_{s;i}$ on paalun vaipan pinta-ala maakerroksessa i ja $q_{s;i}$ on vaippavastus maakerroksessa i .



Kuva 2.2 Kantavuuskerroin N_q (RIL 230-2007). (Kertoimen laskennassa on käytetty algoritmia $N_q = 0,1766 \times e^{(0,1592 \times \phi^2)}$)



Kuva 2.3 Vaippavastuskertoimen määrittäminen maan sisäisen kitkakulman funktiona. (RIL 230-2007; (Käytetty algoritmi on muotoa $K_{stan} \phi = 0,0012 \times e^{(0,1536 \times \phi^2)}$)

2.2.2 Geotekninen kestävyys vedossa karkearakeisessa maakerroksessa

Yksittäisten laippojen murtoteoria perustuu levyankkureiden ja matalaperustusten vetokapasiteettia käsitteleviin tutkimuksiin (Adams ja Hayes 1967; Meyerhof ja Adams 1968; Vesic 1971). Vain laipan vetokapasiteetti lasketaan mukaan paalun vetokestävyuteen. Matalilla paaluilla (laipan upotussyvyys $D < H$) paalun laipan geotekninen murtokestävyys lasketaan kaavalla:

$$R_v = R_{bu} + R_{su} = \left(\frac{\pi}{2} \right) \gamma' B D^2 (sK_u) \tan \phi' + \pi d H_{eff} \frac{\gamma'}{2} H_{eff} K_{ru} \tan \phi'$$

, missä

R_{bu} = paalun laipan geotekninen murtokestävyys

R_{su} = paalun varren kitka tehokkaalla varren pituudella

B = laipan halkaisija [m]

D = paalun upotussyvyys [m]

γ' = maan tehokas tilavuuspaino [kN/m^3]

ϕ' = maan tehokas sisäinen kitkakulma [$^\circ$]

sK_u = laipan vetokestävyyskerroin (Meyerhof and Adams 1968).

K_{ru} = vaakasuuntainen jännityskerroin vedossa (Clemence and Pepe 1984)

H_{eff} = tehokas varren pituus ($H_{eff} = D - 2 \cdot B$) (Zhang 1999)

Syvään perustetuilla paaluilla ($D > H$) paalun laipan murtokestävyys muuttuu muotoon (Meyerhof and Adams):

$$R_{bu} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \gamma' B(2D - H)H(sK_u) \tan \phi$$

Vetokantavuuskerroin K_u on määritetty kokeellisesti pitkänomaisille muurianturoille, ja perusarvoa on pyöreän laipan tapauksessa modifioitava kertoimella s . Matalaan perustetuilla paaluilla ($D > H$) kertoimen arvo saadaan lausekkeesta

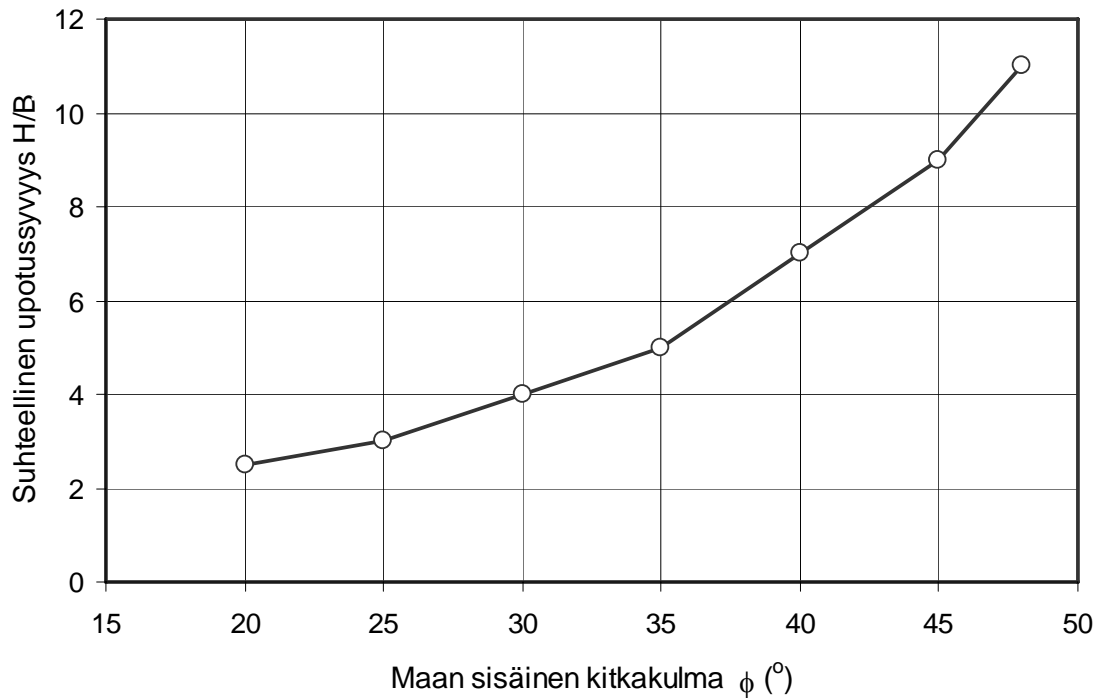
$$s = 1 + mD / B$$

Ja syvään perustetuilla paaluilla lausekkeesta

$$s = 1 + mH / B$$

Meyerhofin kokeiden mukaan vetokestävyyskerroimen perusarvo K_u vaihtelee välillä 0,7 ... 1,0. Käytännössä kertoimen perusarvona voidaan kaikilla maan kitkakulmilla käyttää arvoa $K_u = 0,95$.

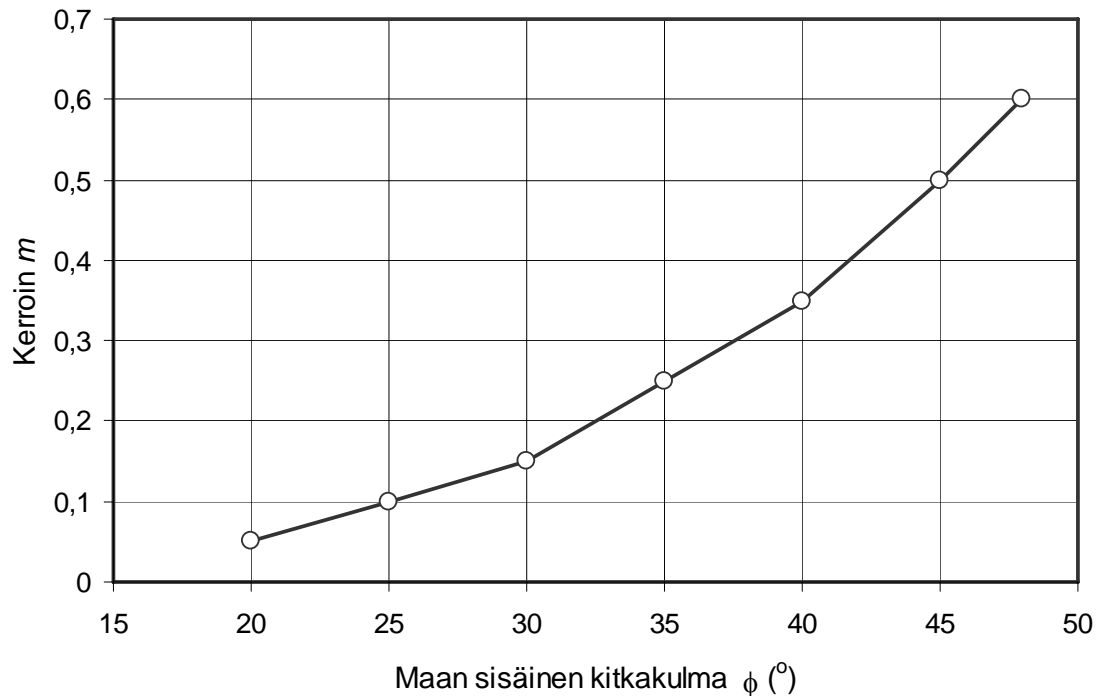
Paalun laipan halkaisijan B ja paalun upotussyvyyden raja-arvon H (matala/syvä perustus) suhde riippuu maan sisäisestä kitkakulmasta Taulukon 2.1 mukaisesti (Kuva 2.4). Samassa taulukossa on annettu kertoimen m arvo, joka sekin määritetään kitkakulman avulla (Kuva 2.5).



Kuva 2.4 Suhteellisen upotussyvyyden H/B riippuvuus maan sisäisestä kitkakulmasta (Meyerhof and Adams).

Taulukko 2.1 Kertoimen m ja suhteellisen syvyyden H/B riippuvuus maan sisäisestä kitkakulmasta, sekä maksimiarvot kertoimelle s (Meyerhof and Adams).

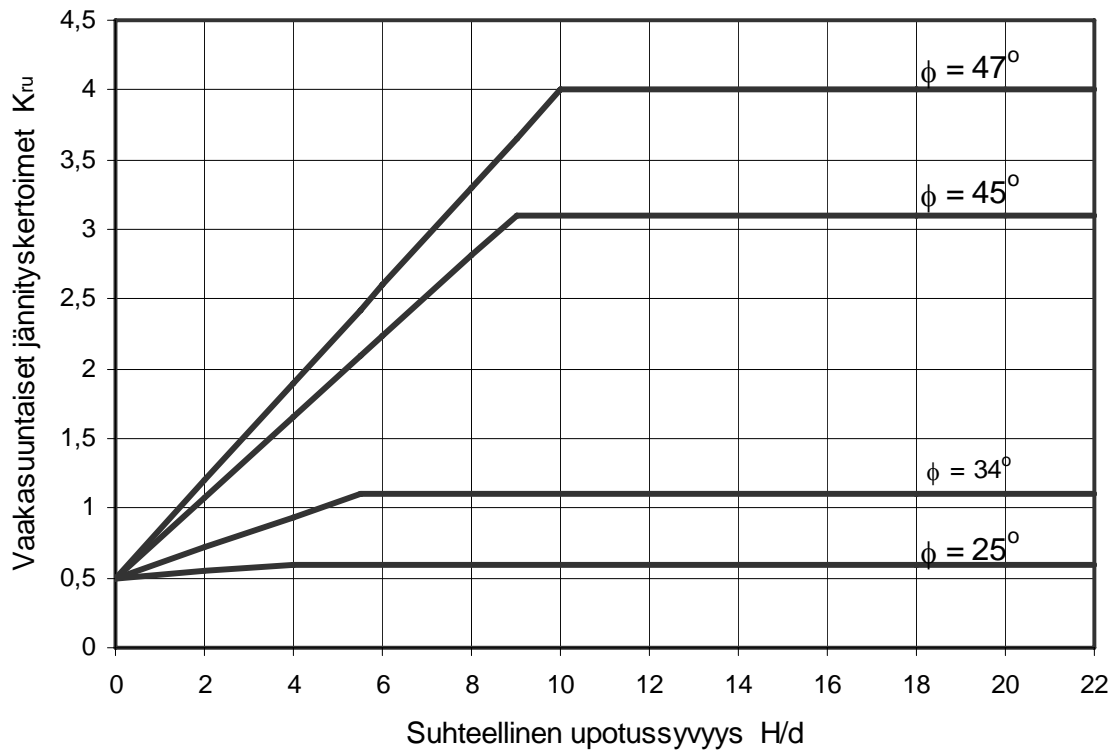
Kitkakulma ϕ	20°	25°	30°	35°	40°	45°	48°
Kerroin m	0,05	0,1	0,15	0,25	0,35	0,5	0,6
H/B	2,5	3	4	5	7	9	11
Max kerroin s	1,12	1,30	1,60	2,25	3,45	5,50	7,00



Kuva 2.5 Kertoimen m määrittäminen maan sisäisen kitkakulman avulla (Meyerhof and Adams 1968).

Paalun varren vaippavastuksen muodostumiseen karkearakeisessa maalajissa vaikuttaa suuresti maan häiriintyminen ruuvipaalun asennuksen yhteydessä, sekä kuormituksen suunta. Vetokuormituksessa paalun varren kitkavastuksen on todettu jäävän alhaisemmaksi kuin puristuskuormituksessa. Tästä syystä Hiekalle kokeellisesti määritetyt kertoimet (Clemence and Pepe 1984) ovat kuvan 2.6 mukaiset maan sisäisen kitkakulman vaihdellessa välillä $25^\circ \dots 45^\circ$ ja paalun suhteellisen upotussyvyyden muuttuessa välillä $0 < H/d < 22$.

Laippojen väliin jäävän maasynterinin pinnan vetovastus määritetään kuvassa 2.6 annetun vaakasuuntaisen jännityskertoimen K_{ru} avulla. Maan kitkakulman mukaiset väliarvot interpoloidaan annettujen käyrien perusteella.



Kuva 2.6 Vetovastuksen vaakasuuntaiset jännityskertoimet K_{ru} vedetyn paalun sylinterien välisen vaipan pinnalla (Clemence and Pepe 1984). H = etäisyys maanpinnasta, d = sylinterin halkaisija.

2.2.3 Geotekninen kantokyky puristuksessa hienorakeisessa maakerroksessa

Paalun geotekninen murtokestävyys hienorakeisessa maakerroksessa määritetään samoin kuin edellä paalun kärki- ja vaippavastusten summana.

$$R_{p;k} = R_b + R_s$$

Paalun kärkivastus hienorakeisessa maakerroksessa määritetään kantavuuskertoimen N_c ja ympäröivän maakerroksen suljetun leikkauslujuuden c_u avulla:

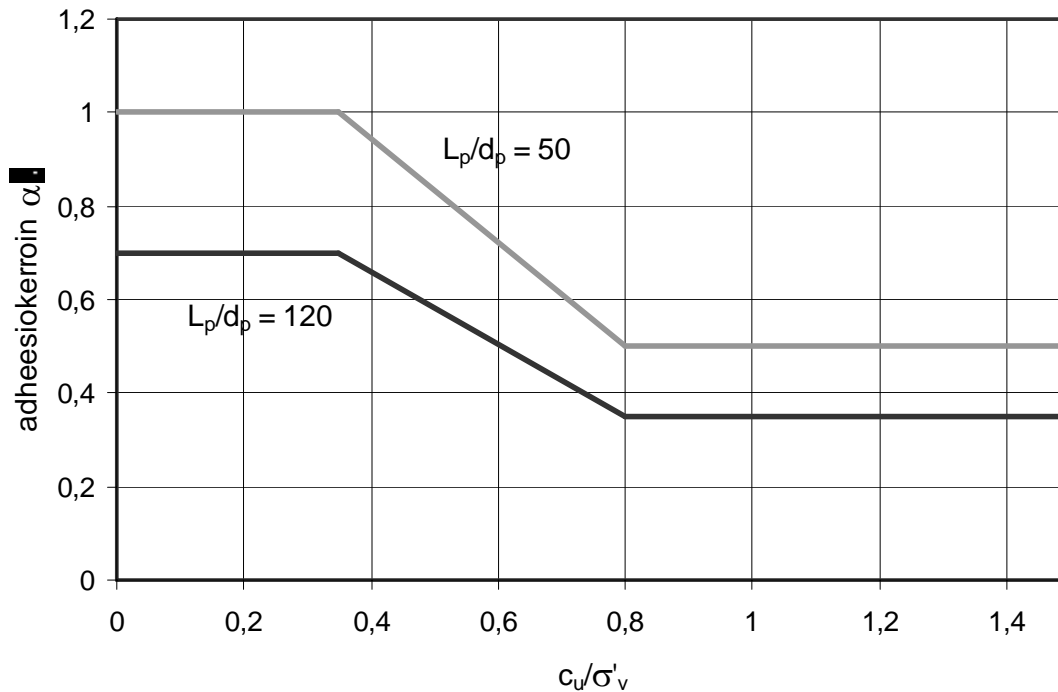
$$q_b = N_c \cdot c_u$$

Kokeellisesti määritetyn kantavuuskertoimen N_c arvona voidaan pitää $N_c = 9$.

Paalun vaippavastus hienorakeisessa maakerroksessa on paalun ja maan välinen adheesio, jota voidaan arvioida maakerroksen suljetun leikkauslujuuden ja adheesiokertoimen α avulla:

$$q_{s;i} = \alpha \cdot c_{u;i}$$

Adheesiokertoimen arvo riippuu paalun suhteellisesta upotussyvyydestä (L_p/d_p , missä L_p on paalun pituus ja d_p paalun halkaisija), ja maakerroksessa vallitsevan tehokkaan pystysuoran jännityksen ja maan suljetun leikkauslujuuden välisestä suhteesta (σ'_v/c_u) kuvan 2.7 mukaisesti (RIL 230-2007).



Kuva 2.7 Paalun ja hienorakeisen maakerroksen välinen adheesiokerroin α .

L_p = paalun upotussyvyys (pituus), d_p = paalun halkaisija, σ'_v = tehokas pystysuora jännitys maakerroksessa ja c_u = maakerroksen suljettu leikkauslujuus.

Ruuvipaalun geotekninen murtokestävyys puristuskuormituksessa lasketaan paalun kärjen ja vaipan kestävyyksien summana, kuten edellä:

$$R_p = R_b + R_s = A_b \cdot q_b + \sum_{i=1}^n (A_{s;i} \cdot q_{s;i})$$

, missä A_b on paalun laipan pinta-ala, q_b on paalun kärkivastus, $A_{s;i}$ on paalun vaipan pinta-ala maakerroksessa i ja $q_{s;i}$ on vaippavastus maakerroksessa i .

2.2.4 Geotekninen kestävyys vedossa hienorakeisessa maakerroksessa

Ruuvipaalun vetokapasiteetti hienorakeisessa maakerroksessa lasketaan samoilla periaatteilla kuin edellä ruuvipaalun vetokapasiteetti karkearakeisten maakerrosten yhteydessä. Yksittäisten laippojen murtoteoria perustuu levyankkureiden ja matalaperustusten vetokapasiteettia käsitteleviin tutkimuksiin (Adams ja Hayes 1967; Meyerhof ja Adams 1968; Vesic 1971). Vain laipan tai laippojen vetokapasiteetti lasketaan mukaan paalun vetokestävyys. RIL 230-2007 mukaan vaippavastusta hienorakeisissa maakerroksissa ei voida käyttää hyväksi pitkäaikaisissa kuormituksissa.

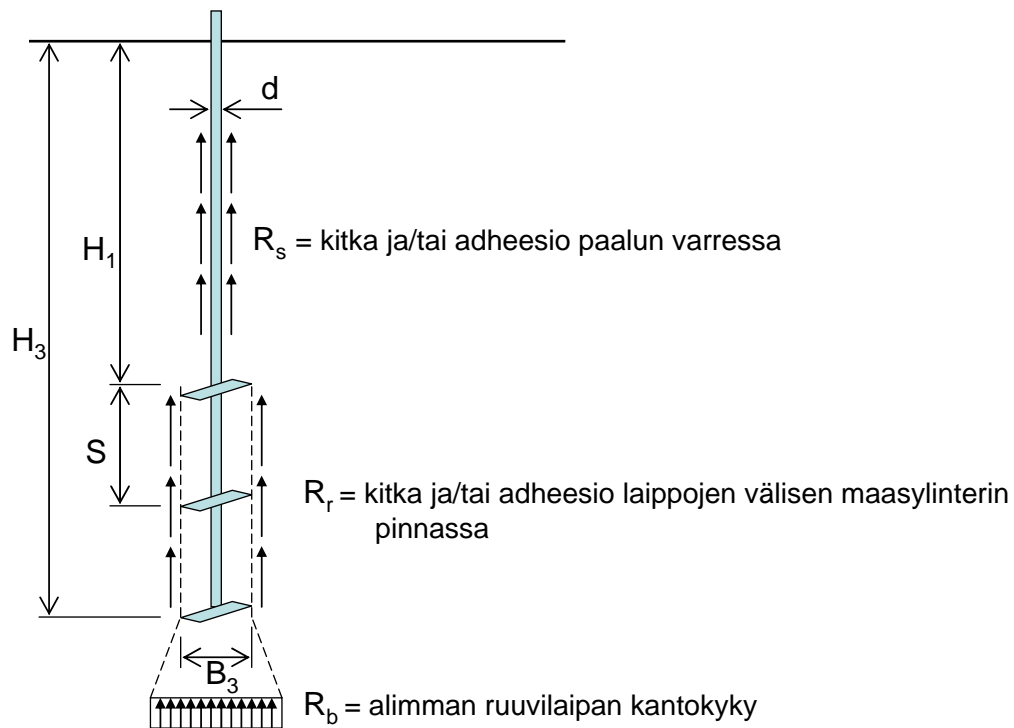
Ruuvipaalun laipan vetokapasiteettia voidaan arvioida kaavalla:

$$R_{bu} = N_{cu} \cdot c_u \cdot A_b,$$

, missä c_u on maakerroksen suljettu leikkauslujuus, N_{cu} kokeellisesti määritetty laipan kestävyyskerroin (Meyerhof and Adams 1968) ja A_b laipan pinta-ala ($A_b = \pi \cdot B^2/4$). Ruuvipaalun vetokapasiteetti riippuu paalun upotussyvyydestä. Syvään upotetuilla paaluilla ($D/B > 4,5$) vetokapasiteetti vastaa täysin laipan puristuskapasiteettia samankaltaisessa maakerroksessa; $N_{cu} = 9$. Matalilla paaluilla ($D/B \leq 4,5$) kerrointa pienennetään huomattavasti, ja sitä voidaan arvioida kaavalla $N_{cu} = 2 \times (D/B)$, missä D on paalun upotussyvyys ja B on paalun laipan halkaisija.

2.3 Sylinteripintamurto monilaippaisella ruuvipaalulla

Moniruuvisen paalun murtotapa poikkeaa jonkin verran yksiruuvisen paalun murtotavasta. Moniruuvisen paalun veto- ja puristuskapasiteetti muodostuu paitsi ylimmän tai alimman ruuvilaipan vastuksesta ja laippojen yläpuolisen paalunosan vaippavastuksesta, myös paalun kaikkien ruuvikierteiden välille muodostuvan maasynterinin leikkausvastuksesta, jota tässä yhteydessä kutsutaan sylinteripintamurroksi (Kuvat 2.8 ja 2.9)



Kuva 2.8 Monilaippaisen ruuvipaalun sylinterimurto puristuskuormituksessa

$$R_k = R_b + R_r + R_s$$

H_1 = ylimmän ruuvilaipan upotussyvyys

H_3 = alimman ruuvilaipan upotussyvyys

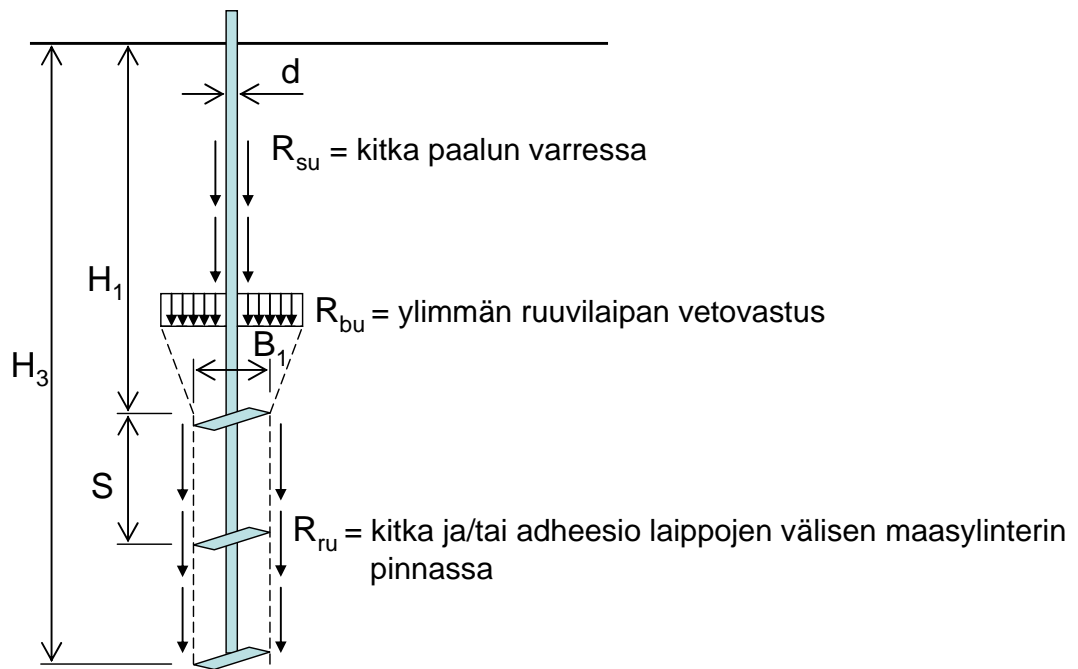
B_1 = ylimmän ruuvilaipan halkaisija

S = perättäisten ruuvilaippojen välinen etäisyys

d = paalun varren halkaisija.

Paalun ruuvikierteiden keskinäisellä etäisyydellä on suuri merkitys paalun murtotavalle. Sylinterimurtopinta vastaa parhaiten paalun todellista murtopintaa, kun ruuvien suhteellinen etäisyys on alle $S/B < 1,5$, S ollessa perättäisten ruuvilaippojen välinen etäisyys ja B laippojen halkaisija (Narasimha Rao et al. 1985). Etäisyyden kasvaessa lieriöpinta ei enää muodostu täydellisenä peräkkäisten ruuvilaippojen välille. Ruuvilaippojen välisen suhteellisen etäisyyden ylittäessä raja-arvon $S/B > 1,5$ käytetään reduktiokertoimia (SF), joilla ehjän teoreettisen lieriöpinnan vaippavastusta vähennetään etäisyyden suhteessa. Mikäli ruuvien suhteellinen etäisyys ylittää $S/B > 2$, voidaan käyttää yksittäisten levyjen kantokyvyn teoriaa (Meyerhof and Adams 1968).

Zhang (1999) mukaan sylinteripintateoria soveltuu koheesiomaalajeilla puristetuille ja vedetyille ruuvipaaluille, joiden kierteiden välinen suhteellinen etäisyys on $S/B \leq 3,0$, ja karkearakeisilla maalajeilla vedetyille paalulle, joilla $S/B \leq 3,0$. Puristetulla ruuvipaaluilla lieriöteoriaa voidaan soveltaa karkearakeilla mailla ruuvivälille $S/B \leq 2,0$. Tätä suuremmilla suhteellisilla ruuviväleillä yksittäisten levyjen teoria antaa tarkemman tuloksen (Meyerhof and Adams 1968).



Kuva 2.9 Monilaippaisen ruuvipaalun sylinterimurto vetokuormituksessa

$$R_v = R_{bu} + R_{ru} + R_{su}$$

H_1 = ylimmän ruuvilaipan upotussyvyys

H_3 = alimman ruuvilaipan upotussyvyys

B_3 = alimman ruuvilaipan halkaisija

S = perättäisten ruuvilaippojen välinen etäisyys

d = paalun varren halkaisija.

Murtokestävyys monilaippaisille paaluille määritetään seuraavassa karkearakeisille maalajeille Mooneyn 1985 esittämällä menetelmällä (Mooney et al. 1985), ja koheesiomaalajeille Narasimha Rao et al (1993) esittämällä menetelmällä.

2.3.1 Geotekninen kantokyky puristuksessa karkearakeisessa maalajissa

Monilaippaisen ruuvipaalun puristuskestävyys voidaan mitoittaa sylinterimurtopinna mukaisesti, mikäli laippojen välinen suhteellinen etäisyys on $S/B \leq 2$. Paalun geotekninen murtokestävyys R_p muodostuu paalun kärjen kantokyvystä R_b paalun ruuvilaippojen väliin jäävän maasylinteri leikkautumisvastuksesta R_r , ja paalun varren ja maan välisen kitkan aiheuttamasta vastuksesta R_s .

$$R_p = R_b + R_r + R_s$$

Paalun kärkivastus (q_b [kN/m²]) karkearakeisessa maakerroksessa saadaan kaavasta:

$$q_b = \sigma'_v \cdot N_q$$

, missä σ'_v on maan tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla ja N_q on paalun kärjen kantavuuskerroin. Kantavuuskerroin määritetään kuten yksittäisen ruuvilaipan tapauksessa.

Paalun varren vaippavastus ($q_{s,i}$ [kN/m²]) lasketaan kaavasta:

$$q_{s,i} = \sigma'_{v,i} \cdot K_s \tan \phi$$

, missä $\sigma'_{v,i}$ on maan tehokas pystysuora jännitys paalun vaipalla maakerroksessa i ja $K_s \tan \phi$ maan sisäisestä kitkakulmasta riippuva vaippavastuskerroin. Paalun vaippavastuskerroin määritetään kuten aiemmin yksittäisen ruuvilaipan tapauksessa.

Edellisten lisäksi lasketaan laippojen väliin jäävän maasylinterin vaippavastus (q_r [kN/m²]) samaan tapaan kuin paalun varren vaippavastus, käyttäen maan sisäisestä kitkakulmasta riippuvaa vastuskerrointa $K_s \tan \phi$ ja maan tehokasta pystysuoraa jännitystä σ'_v :

$$q_r = \sigma'_v \cdot K_s \tan \phi.$$

, missä $K_s \tan \phi$ on määritetty kuvasta 1.3.

Ruuvipaalun geotekninen murtokestävyys on näin ollen muotoa:

$$R_p = R_b + R_r + R_s = A_b \cdot q_b + A_r \cdot q_r + \sum_{i=1}^n (A_{s,i} \cdot q_{s,i})$$

, missä

$$A_b = \text{alimman ruuvilaipan pinta-ala} \left(= \frac{\pi}{4} B_3^2 \right)$$

$A_r =$ laippojen väliin jäävän maasyylinterin vaippa-ala $(= \pi B_a (H_3 - H_1))$, missä B_a on laippojen keskimääräinen halkaisija, H_3 on alimman ja H_1 ylimmän laipan upotussyvyys)

$A_{s,i} =$ paalun varren vaipan pinta-ala maakerroksessa i .

2.3.2 Geotekninen kestävyys vedossa karkearakeisessa maalajissa

Sylinterimurtopintateoriaa voidaan soveltaa ruuvipaaluille, mikäli paalun ruuvilaippojen välinen suhteellinen etäisyys on pienempi kuin $S/B \leq 3$ (Zhang 1999). Useampia ruuvilaippoja sisältävän ruuvipaalun vetovastuksen muodostuminen hiekassa riippuu ruuvien suhteellisesta upotussyvyydestä (H/B_1) ja ympäröivän hiekan suhteellisesta tiivyydestä.

Sylinterimurtoteoriassa paalun kantokykyyn lasketaan mukaan sekä paalun ylimmän laipan vetokapasiteetti R_{bu} , paalun varren kitka R_{su} , että laippojen väliin jäävän maasyylinterin leikkautumisvastus R_{ru} . Matalilla paaluilla (upotussyvyys $D < H$) paalun laipan geotekninen murtokestävyys lasketaan kaavalla:

$$R_v = R_{bu} + R_{ru} + R_{su} = \left(\frac{\pi}{2} \right) \gamma' B D^2 (sK_u) \tan \phi' + \pi B_a \frac{\gamma'}{2} (H_3^2 - H_1^2) K_{ru} \tan \phi' + \pi d \frac{\gamma'}{2} H_{eff}^2 K_{ru} \tan \phi'$$

Syvään perustetuilla paaluilla ($D > H$) ylimmän laipan vetokapasiteetti muuttuu muotoon (Meyerhof and Adams 1968):

$$R_{ru} = \left(\frac{\pi}{2} \right) \gamma' B (2D - H) H (sK_u) \tan \phi'$$

Tarvittavat parametrit ylimmän ruuvilaipan vetovastukselle määritetään kuten yhden laipan paalulla (vetokestävyyskerroin (sK_u) ja upotussyvyyden raja-arvo H).

Ruuvit ja paalun varsi syrjäyttävät maamassoja lähinnä vaakasuunnassa ja, maakerrosten painosta johtuen, vähäisemmässä määrin myös pystysuunnassa. Maa ruuvikierteen piirin ulkopuolella tiivistyy samalla kun se itse ruuvien upotusreiässä löyhtyy. Vaakajännitysten muutokset paalun upotusreiän ympärillä edesauttavat lieriömurtopinnan syntymistä ruuvipaalun kierteiden välille paalua vedettäessä (Mitsch and Celence 1985). Vesic

(1971) mukaan häiriintynyt alue pyöreän maa-ankkurin ympärillä ja yläpuolella on aina ympäristöään heikompi, ja vetokuormituksessa sylinterimäinen leikkauspinta muodostuu väistämättä tämän häiriintyneen sylinterin mukaiseksi. Laippojen välisen sylinteripinnan vetovastuskerroin ($K_{ru} \tan \phi$) on tehtyjen kokeiden perusteella selvästi pienempi kuin Meyerhofin (Meyerhof and Adams 1968) määrittämä vetovastuskerroin levyankkureille ($sK_u \tan \phi$). Hiekalle kokeellisesti määritetyt kertoimet (Clemence and Pepe 1984) ovat kuvan 2.6 mukaiset maan sisäisen kitkakulman vaihdella välillä $25^\circ \dots 45^\circ$ ja paalun suhteellisen upotussyvyyden muuttuessa välillä $0 < H/D < 22$.

Laippojen väliin jäävän maasynterinin pinnan vetovastus, samoin kuin paalun varren vetovastus, määritetään kuvassa 2.6 annetun vaakasuuntaisen jännityskertoimen K_{ru} avulla. Suhteellisena syvyytenä maasynterinin kitkavastusta määritettäessä käytetään suhdetta H/B , jossa B on laipan halkaisija. Paalun varren vastusta laskettaessa käytetään suhdetta H/d , jossa d on paalun varren halkaisija. Maan kitkakulman mukaiset väliarvot interpoloidaan annettujen käyrien perusteella.

2.3.3 Geotekninen kantokyky puristuksessa hienorakeisessa maakerroksessa

Sylinterimurtoteoriaa voidaan soveltaa ruuvipaaluille, mikäli paalun ruuvilaippojen välinen suhteellinen etäisyys on pienempi kuin $S/B \leq 3,0$. Monilaippaisen ruuvipaalun geotekninen murtokestävyys hienorakeisessa maakerroksessa muodostuu paalun kärkivastuksesta R_b ja ylimmän ruuvilaipan yläpuolisen paalunvarren vaippavastuksesta R_s , kuten yksilaippaisellakin paalulla. Tämän lisäksi paalun kapasiteettia lisää paalun laippojen väliin jäävän maasynterinin leikkautuminen ympäröivästä maamassasta. Paalun puristurmurtokestävyys voidaan määrittää kaavalla:

$$R_p = R_b + R_r + R_s$$

, missä

R_b = paalun alimman laipan puristusmurtokestävyys

R_r = paalun ruuvilaippojen väliin jäävän maasynterinin leikkausmurtokestävyys

R_s = ylimmän laipan yläpuolisen paalun varren leikkausmurtokestävyys

Alimman laipan geotekninen murtokestävyys lasketaan kuten yksilaippaisen paalun tapauksessa paalun kärkivastuksen q_b avulla:

$$q_b = N_c \cdot c_u$$

, missä $N_c = 9$, ja c_u maakerroksen suljettu leikkauslujuus.

Ylimmän laipan yläpuolisen paalunvarren kapasiteetti puolestaan saadaan paalun vaippavastuksen $q_{s,i}$ avulla

$$q_{s,i} = \alpha \cdot c_{u,i}$$

, missä α on adheesiokerroin (määritetään kuten edellä, Kuva 2.7) ja $c_{u,i}$ ko. maakerroksen suljettu leikkauslujuus.

Paalun laippojen väliin jäävän maasynterinin leikkautumisvastus saadaan sylinterin vaipan pinta-alan ja maakerroksen suljetun leikkauslujuuden avulla:

$$R_r = \pi B_a c_u (H_3 - H_1)$$

, missä

- B_a = paalun ruuvilaippojen keskihalkaisija
- c_u = on maakerroksen suljettu leikkauslujuus
- H_3 = on paalun alimman ruuvilaipan upotussyvyys
- H_1 = on paalun ylimmän ruuvilaipan upotussyvyys

Monilaippaisen ruuvipaalun geotekninen puristusmurtokestävyys saadaan muotoon:

$$R_b = A_b \cdot q_b + A_r \cdot c_u + \sum_{i=1}^n (A_{s,i} \cdot q_{s,i})$$

, missä

- A_{b3} = paalun alimman ruuvilaipan pohjapinta-ala ($= \frac{\pi}{4} B_3^2$), missä B_3 on alimman laipan halkaisija)
- q_b = paalun kärkivastus
- A_r = paalun laippojen väliin jäävän maasynterini vaipan ala ($= \pi B_a (H_3 - H_1)$), missä B_a on paalun ruuvilaippojen keskihalkaisija, ja H_3 paalun alimman ja H_1 paalun ylimmän laipan upotussyvyudet)
- c_u = maakerroksen suljettu leikkauslujuus
- $A_{s,i}$ = paalun varren vaipan pinta-ala maakerroksessa i ($= \pi(d^2/4)$), missä d on pyöreän paalunvarren halkaisija)
- $q_{s,i}$ = paalun varren vaippavastus maakerroksessa i .

2.3.4 Geotekninen kestävyys vedossa hienorakeisessa maakerroksessa

Sylinterimurtopintateoriaa voidaan soveltaa ruuvipaaluille, mikäli paalun ruuvilaippojen välinen suhteellinen etäisyys on pienempi kuin $S/B \leq 3$. Hienorakeisten maakerrosten osalta ei paalun vaippavastusta ei voida käyttää hyödyksi pitkäaikaisessa vetokuormituksessa (RIL 230-2007). Toisaalta paalun ruuvien väliin jäävän maasynterinin leikkautuminen lisää paalun vetokapasiteettia.

Sylinterimurron mukainen ruuvipaalun vetokapasiteetti koheesiomaalajeissa voidaan laskea seuraavasti (Mooney et al. 1985):

$$R_v = R_{bu} + R_{ru}$$

, missä R_{bu} on paalun ylimmän ruuvikierteen murtokestävyys ja R_{ru} paalun ruuvilaippojen väliin jäävän maasynterinin leikkautumisvastus.

Ruuvipaalun ylimmän laipan vetokapasiteettia voidaan arvioida kaavalla:

$$R_{bu} = N_{cu} \cdot c_u \cdot A_b$$

, missä

$$A_{bl} = \text{ylimmän ruuvilaipan tehokas pinta-ala} = \frac{\pi}{4} (B_l^2 - d^2)$$

(B_l = ylimmän ruuvilaipan halkaisija, d = paalun varren halkaisija)

c_u = suljettu leikkauslujuus laippaa ja/tai paalun vartta ympäröivässä maamassassa

N_{cu} = vetokantavuuskerroin koheesiomaassa, jonka arvo määritetään kuten aiemmin yksilaippaisen palkin tapauksessa

Paalun laippojen väliin jäävän maasynterinin leikkautumisvastus saadaan sylinterin vaipan pinta-alan ja maakerroksen suljetun leikkauslujuuden avulla, kuten puristusmurtotapauksessakin:

$$R_{ru} = \pi B_a c_u (H_3 - H_1)$$

, missä B_a = paalun ruuvilaippojen keskihalkaisija

H_3 = alimman ruuvilaipan upotussyvyys

H_1 = ylimmän ruuvilaipan upotussyvyys

2.4 Välimuotomaalajit

Silteillä ja muilla välimuotomaalajeilla (kuten useat moreenimaalajit, esim. siltimoreeni) paalun murtokestävyyteen vaikuttavat samanaikaisesti sekä maalajin koheesio että sisäinen kitkakulma. Kaikkia edellä esitettyjä laskentatapoja voidaan soveltaa suoraan välimuotomaalajeilla laskemalla molempien vaikuttavien komponenttien vaikutukset yhteen, eli käytännössä yhdistämällä karkearakeisten ja hienorakeisten maalajien kantokyky (tai kestokyky) kaavat toisiinsa. Esimerkiksi siltillä, jolle on määritelty sekä suljetun leikkauslujuuden arvo c_u ja sisäinen kitkakulma ϕ , monilaippaisen paalun puristusmurtokestävyys voidaan lakea yhdistetyllä kaavalla:

$$R_p = (R_{b1} + R_{b2}) + (R_{r1} + R_{r2}) + (R_{s1} + R_{s2})$$

, jossa R_{b1} on paalun alimman laipan geotekninen murtokestävyys määritettynä karkearakeiselle maalajille annetulla kitkakulman arvolla ϕ , R_{b2} alimman laipan geotekninen murtokestävyys määritettynä hienorakeiselle maalajille annetulla suljetun leikkauslujuuden arvolla c_u , R_{r1} paalun laippojen väliin jäävän maasynterileikkausvastus määritettynä karkearakeiselle maalajille annetulla kitkakulman arvolla ϕ , R_{r2} sama kestävyys määritettynä annetulla leikkauslujuuden arvolla c_u hienorakeiselle maalajille, ja niin edelleen.

$$R_v = (R_{bu1} + R_{bu2}) + (R_{ru1} + R_{ru2}) + R_{su1}$$

3 Kantokyvyn toteaminen asennuksen yhteydessä

3.1 Paalun murtokestävyys vetokuormituksessa karkearakeisessa maalajissa

Ruuvipaalun kestokyvyn varmentamista asennuksen yhteydessä on käsitelty melko laajasti kirjallisuudessa. Useiden tutkimusten perusteella (Ghaly and Hanna 1991c; Hoyt and Clemence 1989; Narasimha Rao et al. 1989) yhteys asennuksessa vaaditun vääntömomentin ja paalun murtokestävyuden välillä vetokuormituksessa onkin olemassa. Näissä tutkimuksissa on verrattu paalun asennukseen tarvittua vääntövoimaa suoraan paalun lopulliseen murtokestävyuteen, eivätkä ne ota tarkasti huomioon kohteessa vallitsevia pohjasuhteita. Varsinaista geoteknistä teoreettista pohjaa asennuksessa tarvittun vääntömomentin ja paalun murtokestävyuden välisellä yhteydellä ei siis ole olemassa, ja menetelmän kehittäjät suosittavatkin sitä käytettäväksi vain asennusaikaiseen laadunvarmistukseen.

Ghaly ja Hanna (1991c) ovat esittäneet seuraavan riippuvuussuhteen asennusaikaisen vääntömomentin ja paalun murtokestävyuden välillä vetokuormituksella hiekassa:

$$R_{v,m} = 2(\gamma' AH) \left[\frac{T}{\gamma' AHp} \right]^{1,1}$$

, missä

$R_{v,m}$	= ruuvipaalun murtokestävyys vetokuormituksessa (kN)
γ'	= maan tehokas tilavuuspaino (kN/m ³)
A	= ruuvilaipan pinta-ala (m ²)
H	= upotussyvyys (m)
p	= yhden ruuvilaipan kierteen nousu (m)
T	= asennuksen loppuvaiheessa tarvittu vääntövoima (kNm)

Lauseke pätee sekä yksi-, että monilaippaisille ruuvipaaluille, mikäli ruuvit ovat identtiset.

3.2 Paalun murtokestävyys vetokuormituksessa hienorakeisessa maalajissa

Narasimha Rao et al. (1989) on esittänyt menetelmän paalun kestokyvyn määrittämiseksi savessa asennusaikaisen vääntömomentin perusteella. Kokeiden perusteella kirjoittaja esittää kahta lauseketta, joiden avulla asennuksen loppuvaiheen vääntömomentista voidaan arvioida paalun murtokestävyyttä vetokuormituksessa. Ensimmäisessä vaiheessa ratkaistaan tunnettujen paalun dimensioiden ja tarvittu vääntömomentin avulla maan 'tuntematon' todellinen leikkauslujuus, S_r , lausekkeesta:

$$T = 2\pi r^2 S_r \left(S + \frac{2r}{3} \right)$$

T = mitattu asennuksessa tarvittu vääntömomentti asennuksen lopussa

r = ruuvilaipan säde (= $B/2$)

S_r = tuntematon maan leikkauslujuus

S = perättäisten ruuvilaippojen välinen etäisyys

, joka sijoitetaan edelleen lausekkeeseen:

$$R_{v,m} = S_r A_r + \alpha S_r A_s$$

, missä

$R_{v,m}$ = ruuvipaalun murtokestävyys vetokuormituksessa

A_r = ruuvilaippojen väliin jäävän maasynterinin vaipan pinta-ala
(= $\pi B_a(H_3 - H_1)$)

α = adheesiokerroin (kuva 2.7)

A_s = paalun varren vaipan pinta-ala (= $\pi d H_1$).

4 Ruuvipaalujen sivukuormakestävyys

Paalun kestävyydellä sivukuormituksessa tarkoitetaan paalun sietämää suurinta vaakakuormitusta, kun otetaan huomioon maan kestävyys, paalun sallittu taivutusmomentti ja suurin sallittu siirtymä.

Tutkimusten mukaan (Yenumula and Narasimha Rao 1996) ruuvipaalun sivukuormakestävyys savessa on jonkin verran suurempi kuin vastaavan laipattoman paaluputken, ja kestävyys kasvaa ruuvilaippojen lukumäärän noustessa. Tämä johtuu laippojen lisävastuksesta paalun taipuessa, laipan tai laippojen yläpintojen pyrkiessä nousemaan ylöspäin ja alapintojen vastaavasti painumaan alaspäin paalun taipuessa (kuva 3.1). Em. kokeiden perusteella laipallisten ruuvipaalujen sivukuormituksen ääriarvo p_m , kasvavaa 1,2 ... 1,5 kertaiseksi samankaltaiseen laipattomaan paaluun verrattuna ruuvilaippojen lukumäärään ollessa 2...4.

Koska yleispätevää ja yksinkertaista laskentamenetelmää laippojen lisävastuksen määrittämiseksi ei ole olemassa, seuraavassa esitetään yleispätevä paalun varren aiheuttaman sivuvastuksen laskemistapa (RIL 230-2007).

4.1 Sivukuormitetun paalun käyttäytymismekanismit

Sivukuormitetun paalun käyttäytyminen riippuu maan ja paalun suhteellisesta jäykkyydestä sekä paalun kiinnityksestä yläpuoliseen rakenteeseen.

Sivukuormitetun ruuvipaalun käyttäytymistä voidaan alustavasti arvioida hienorakenteisessa maassa paramerilla R :

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{E_s}}$$

Ja karkearakeisessa maassa parametrilla T :

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}}$$

, missä EI on paalun taivutusjäykkyys, E_s on koheesiomaan vaakasuuntainen kimmomoduuli ja n_h karkearakeisen maan vaakasuuntainen alustalukumoduuli.

Kun paalun upotussyvyyden D ja edelle esitettyjen parametrien jäykkyyssuhde (D/R tai D/T , maalajista riippuen) on enintään kaksi ($D/R \leq 2$), käsitellään paalua maassa kiertyvänä jäykkänä kappaleena, jolloin paalun muodonmuutoksia ei tarvitse ottaa

huomioon. Kiertokeskuksen paikka lasketaan momenttitasapainoehdon perusteella. Homogeenisessa maassa kiertokeskiö sijaitsee likimain syvyydellä, joka on 70 % paalun asennussyvyydestä. Maan murtuminen tapahtuu tällöin ennen paalun murtumista.

Jäykkyysuhteen arvoa 4 ($D/T = 4$) vastaavaa paalupituutta voidaan pitää sivuvastuksen suhteen paalun toiminnallisen pituuden ääriarvona, jonka jälkeen asennussyvyyden lisääminen ei vaikuta paalun toimintaan. Paalun murtuminen tapahtuu tällöin enne maan murtumista.

4.2 Sivuvastuksen ja sivukuormituksen ääriarvot

4.2.1 Karkearakeinen maalaji

Maan aiheuttama sivuvastus syntyy maan vastuksesta paalun painuessa maata vasten. Karkearakeisissa maalajissa ja moreenissa sivuvastuksen murtoarvon oletetaan kasvavan lineaarisesti syvyyden kasvaessa, ja sivuvastuksen ääriarvo (p_m) voidaan määrittää lausekkeella:

$$p_m = 4 \cdot \gamma' \cdot d \cdot K_p$$

, missä

γ'	= maan tehokas pystysuuntainen tilavuuspaino
d	= paalun varren halkaisija
K_p	= passiivinen maanpainekerroin.

Maan siirtyessä paikoillaan pysyvää paalua vasten puhutaan maan aiheuttamasta sivukuormituksesta paalun varressa. Karkearakeisilla mailla se määritetään samalla tavalla kuin maan sivuvastuskin:

$$p_m = 4 \cdot \gamma' \cdot d \cdot K_p$$

4.2.2 Hienorakeinen maalaji

Hienorakeisessa maassa sivuvastuksen ääriarvoa laskettaessa pintakerroksen osuus syvyydelle $1,5 \cdot d$ jätetään ottamatta huomioon. Sivuvastus lasketaan maan suljetun leikkauslujuuden avulla, ja sen arvo on:

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

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

Hienorakeisessa maassa sivukuormitusta laskettaessa pintamaan osuutta ei vähennetä paaluun kohdistuneesta kuormituksesta. Ääriarvot (p_m) sen sijaan lasketaan samaan tapaan kuin edellä.

Laskettaessa maan sivukuormakestävyyttä on suositeltava kokonaisvarmuusluku maan murtokestävyyden suhteen vähintään $F_h = 2,0$.

4.3 Sivusuuntaiset siirtymät

4.3.1 Karkearakeinen maalaji

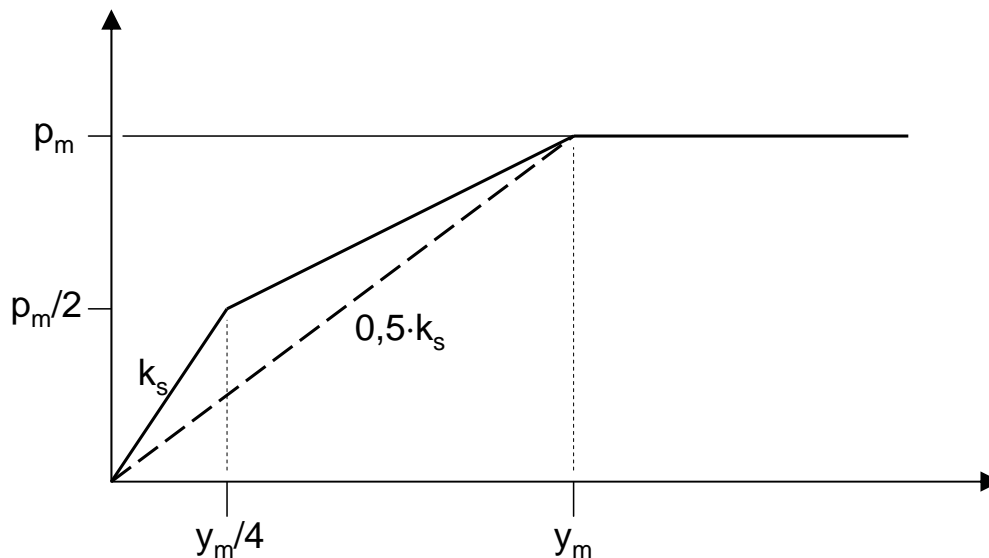
Paalun sivusuuntaiset siirtymät voidaan laskea ns. alustalukumenetelmällä. Paalun sivupaine-siirtymäyhteyksiä karkearakeisessa maassa on esitetty kuvassa 4.1. Vaativissa pohjarakennuskohteissa karkearakeisen maan alustaluku (k_s) voidaan määrittää kokoonpuristuvuusmoduulin M_s avulla:

$$k_s = \beta \cdot \frac{M_s}{d}$$

, missä

β vaihtelee välillä 0,83...0,95 Poissonin luvun vaihdellessa välillä 0,25...0,15

M_s on kokoonpuristuvuusmoduuli
 d on paalun varren halkaisija.



Kuva 4.1 Paalun sivupaine-siirtymäyhteys karkearakeisessa maalajissa. Alustaluvulla k_s tarkoitetaan sivupaineen ja sivusiirtymän välistä kulmakerrointa.

Kokoonpuristuvuusmoduuli voidaan määrittää kairausvastukseen perustuen liitteen 1 taulukon avulla arvioidun moduuliluvun m ja jännitysekspONENTIN β kautta kaavalla:

$$M_s = m \cdot 100 \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{100} \right)^{1-\beta}$$

4.3.2 Hienorakeinen maalaji

Paalun sivusuuntaiset siirtymät voidaan laskea alustalukumenetelmällä myös hienorakeisessa maaljissa. Paalun sivupaine-siirtymäyhteyksiä hienorakeisessa maassa on esitetty kuvassa 4.2. Vaativissa pohjarakennuskohteissa hienorakeisen maan alustaluvun vaihteluväliksi voidaan pitkäaikaisessa kuormituksessa arvioida maan suljetun leikkauslujuuden avulla:

$$k_s = 20 \dots 50 \cdot \frac{c_u}{d}$$

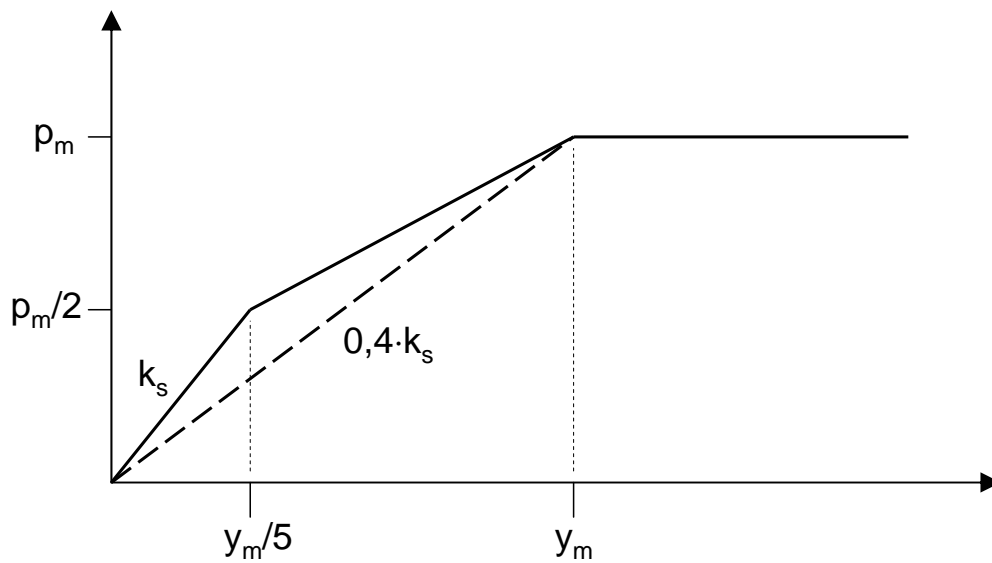
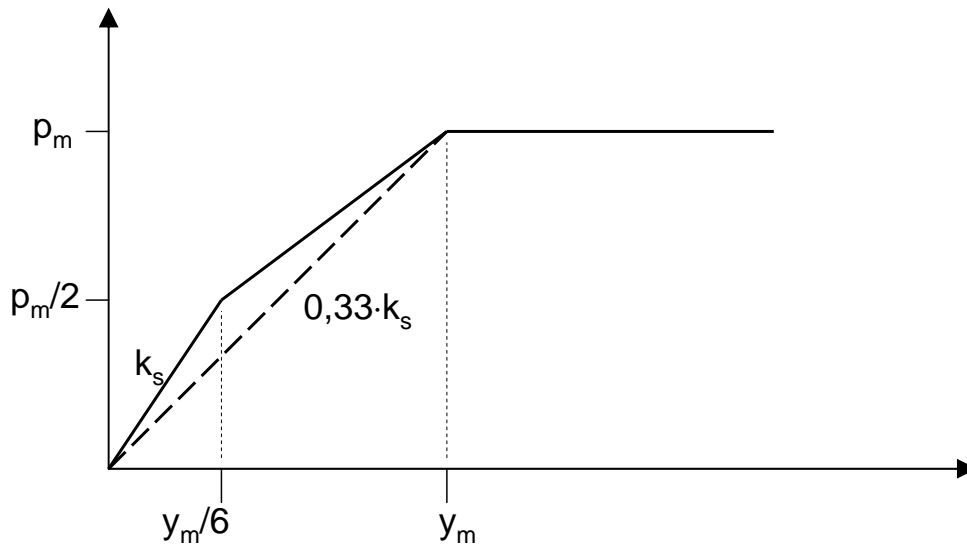
, missä d on paalun varren halkaisija.

Lyhytaikaisessa kuormituksessa alustaluvun vaihteluväli on

$$k_s = 50 \dots 100 \cdot \frac{c_u}{d}$$

Kun on kyseessä paalun mitoittaminen sivukuormaa vastaavalle taivutukselle ja siirtymälle, valitaan vaakasuora alustaluku vaihteluvälin alarajan mukaan (RIL 230-2007).

Kun on kyseessä paalun rakenteen kestävyuden mitoittaminen esimerkiksi kutistuman tai lämpötilan aiheuttamille pakkovoimille, valitaan vaakasuora alustaluku sivuvastuksen laskentaan vaihteluvälin ylärajan mukaan. (RIL 230-2007).



Kuva 4.2 Paalun sivupaine-siirtymäyhteys hienorakeisessa maassa lyhytaikaisessa kuormituksessa (ylempi kuva) ja pitkäaikaisessa kuormituksessa (alempi kuva).

5 Ruuvipaalujen nurjahdus

Suomen normiston mukaan Pienpaalujen puristuskestävyys nurjahduksen suhteen tarkistetaan olosuhteissa, joissa paalut saattavat nurjahtaa riittävän sivutuen puuttuessa. Tällaisia tapauksia ovat **paalut, jotka ovat osittain tai kokonaan ilmassa, vedessä tai maakerroksessa, jonka redusoitu siipikairauksella määritetty leikkauslujuus on pienempi kuin 10 kN/m².**

Maan sivutuenta ei yleensä käytetä hyväksi, kun ympärillä olevan eloperäisen maakerroksen leikkauslujuus on pienempi kuin 5 kN/m².

Tarkastellaan seuraavassa tapausta, jossa aksiaalisesti kuormitettu pienpaalu on koko nurjahduspituudeltaan hienorakeisessa maakerroksessa.

Nurjahduksessa otetaan huomioon asentamisen jälkeinen alkutaipuma ennen kuormitusta (Taulukko 5.1, Kuva 5.1). Kuormittamattoman paalun käyristyneisyys riippuu paalun ja jatkosten mittapoikkeamasta, paalun jatkosten määrästä, paalun mitoista, paalun asennustavasta ja pohjasuhteista. Jos paalun suoruutta ei erikseen mitata, voidaan käyttää seuraavan taulukon (Taulukko 5.1) mukaisia arvioituja alkutaipumia (määritetty lähinnä lyöntipaaluille, porattavat ja ruuvattavat paalut yleensä selvästi lyötäviä paaluja suurempia).

Taulukko 5.1 Paalun alkutaipuman arviointi

	Jatkamaton paalu	Jatkettu paalu
Alkutaipuma δ_g (m)	$L_{cr}/300 - L_{cr}/600$	$L_{cr}/200 - L_{cr}/400$

Kaarevuussäteet pitkillä paaluelementeillä helpoissa pohjaolosuhteissa vaihtelevat yleensä välillä $R = 2000 - 2500 \times d$.

Kaarevuussäteen (R) ja taipuman (δ_g) välisen yhteyden otaksutaan olevan $\delta_g = \frac{L_{cr}^2}{8R}$

Alkutaipuman L_{cr} määrittämisessä tarvittava kriittinen nurjahduspituus saadaan kaavasta:

$$L_{cr} = \pi \sqrt[4]{\frac{EI}{k_s \cdot d_{eff}}}$$

, missä

EI on paalun taivutusjäykkyys

k_s on alustaluku

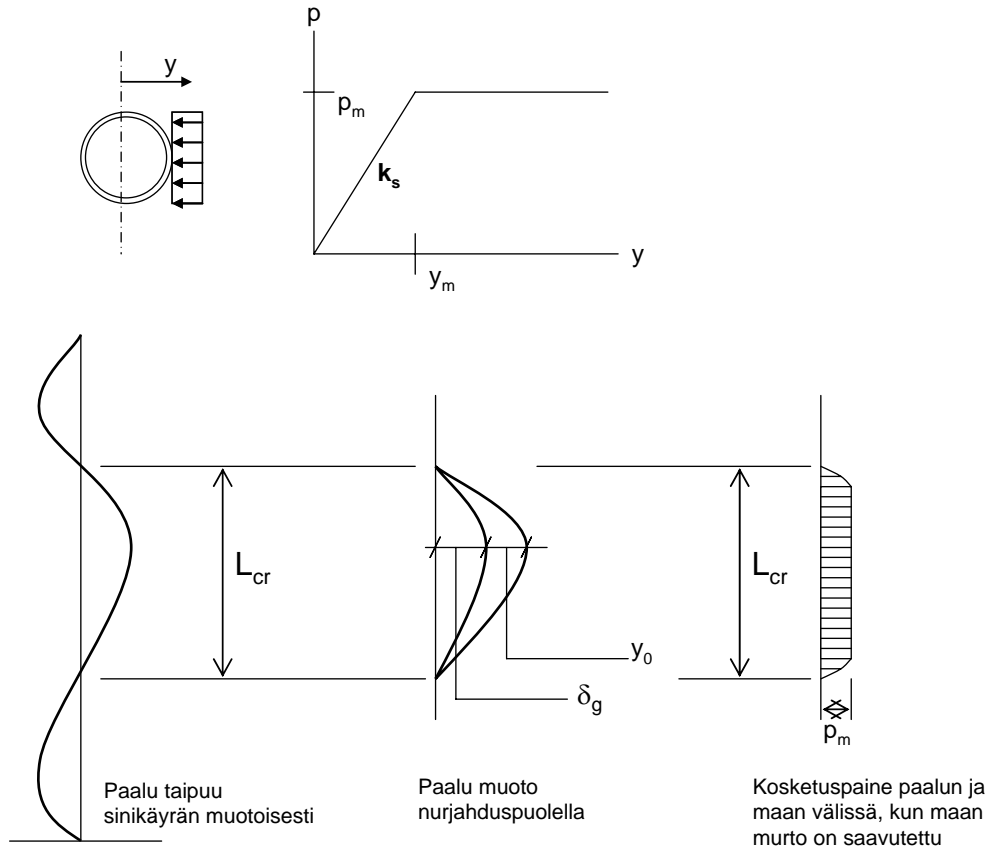
pitkäaikaiskuormituksessa $k_s = 20 \dots 50 c_u/d$

lyhytaikaisessa kuormituksessa $k_s = 50 \dots 150 c_u/d$

d_{eff} on paalun tehokas halkaisija nurjahdusmitoituksessa (paalun halkaisija)

Aksiaalisesti kuormitetun paalun murtokestävyys nurjahduksen suhteen saavutetaan, kun

- paalun taipumasta aiheutuva sivupaine ylittää paalua ympäröivän maan sivuvastuksen murtoarvon p_m
- paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys ylittyy



Kuva 5.1 Teräsputkipaalun nurjahdus, paalun nurjahdusmuoto ja kosketuspaineen muodostuminen.

1. Paalun taipumasta aiheutuva sivupaine ylittää maan sivuvastuksen murtoarvon p_m

Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa saadaan kaavasta:

$$P_{d;s} = \frac{P_{cr}}{1 + \frac{k_s \cdot \delta_g}{P_m}}$$

, missä

$P_{d;s}$ on taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa
 P_{cr} on paalun nurjahdusmurtokestävyys
 δ_g on paalun geometrinen alkutaipuma (kts. Edellä)
 P_m on sivuvastuksen ääriarvo (edellinen kuva)

Suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa saadaan kaavasta

$$P_{cr} = 2 \cdot \sqrt{k_s \cdot d_{eff} \cdot EI}$$

2. Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys ylittyy

Teräksen valmistuksesta aiheutuvat teräspaalun jäännösjännitykset ja alkukäyryys voidaan ottaa huomioon esim. ns. fiktiivisellä alkutaipumalla:

Ryhmä	Fiktiivinen alkutaipuma δ_f
b ^{*)}	$0,0013 \times L_{cr}$

^{*)} tähän ryhmään kuuluvat pituus- ja kierresaumahitsatut teräsputket

Laskennassa käytettävä alkutaipuma on siten geometrisen alkutaipuman ja edellisen taulukon fiktiivisen taipuman summa:

$$\delta_0 = \delta_g + \delta_f$$

Paalun varren mitoitus teräsrakenteena:

Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys saadaan kaavasta:

$$P_{d;p} = \frac{B}{2} - \sqrt{\frac{B^2}{4} - C}$$

Missä aputermit B ja C saadaan kaavoista

$$B = P_{cr} + N_u + 0,5 \cdot P_{cr} \cdot \delta_0 \cdot N_u / M$$

$$C = P_{cr} \cdot N_u$$

P_{cr} on paalun nurjahdusmurtokestävyys (kts. kaava edellä)

N_u On paalun poikkileikkauksen puristuskestävyys murtorajatilassa:

$$N_u = A_s \cdot f_{yd}$$

M_u on paalun poikkileikkauksen taivutuskestävyys murtorajatilassa:

$$M_u = \eta \cdot W_{ei} \cdot f_{yd}$$

f_{yd} on putken lujuuden mitoitusarvo

A_s on putken poikkileikkauspinta-ala

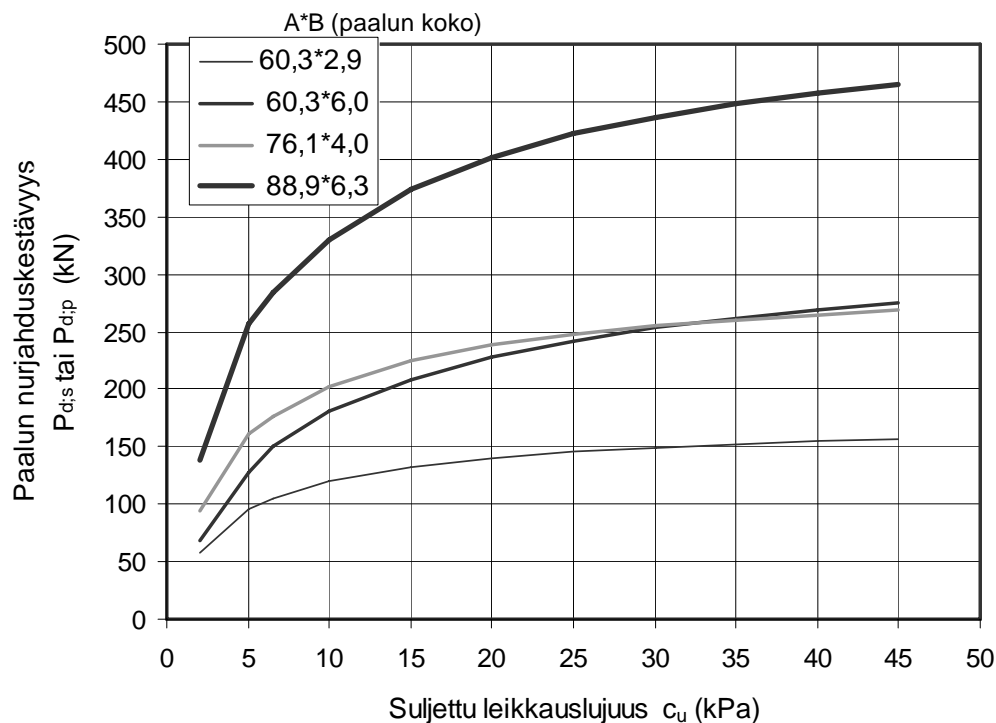
W_{ei} on teräspotken taivutusvastus korroosiovähennys huomioon otettuna

η on poikkileikkausluokasta riippuva muotokerroin: $\eta \leq 1,2$ luokassa 2

Seuraavassa kuvassa 5.2 on tarkasteltu neljän erikokoisen paalun sallittuja kuormituksia paalun nurjahdusta ajatellen (maan suljettu leikkauslujuus vaihtelee välillä $c_u = 2$ kPa ... 45 kPa).

Mitoittavana yleensä paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys $P_{d,p}$, paitsi erittäin löysillä mailla ($c_u \leq 5$ kPa) yleensä maan murtuminen $P_{d,s}$.

Tarkastellut paalutyypit $A \times B = 60,3 \times 2,9$; $60,3 \times 6,0$; $76,1 \times 4,0$; $88,9 \times 6,3$



Kuva 5.2 Neljän erikokoisen paalun sallitut kuormitukset paalun nurjahduksen suhteen.

6 Suunnittelujärjestelmät

6.1 Kansallinen suunnittelujärjestelmä

Kansallisella suunnittelujärjestelmällä tarkoitetaan Suomen rakentamismääräyskokoelman B-osien muodostamaa kokonaisuutta, jota täydentävät RIL:n julkaisemat ohjeet.

6.1.1. Paalun geotekninen mitoitus

Paalujen geotekninen mitoitus perustuu kokonaisvarmuuslukumenetelmään. Rakentamismääräyskokoelman B3 Pohjarakenteet mukaan paalujen geoteknisen kantokyvyn laskennallisessa mitoituksessa kokonaisvarmuus on oltava vähintään $F_p = 2,2$. Sama varmuustaso on saavutettava myös osavarmuuslukumenettelyä sovellettaessa. Pienpaalujen ja samalla ruuvipaalujen osalta varmuustasoa voidaan vielä tarkentaa seuraavasti:

Määrittystapa	Varmuusluku
Kitkapaalun geotekninen kantokyky määritetty staattisen kantavuuskaavan avulla	$F_p = 2,2$
Paalun geotekninen vetokestävyys määritetty laskennallisesti geoteknisen selvityksen perusteella	Lyhytaikainen kuormitus $F_v = 2,5$ Pitkäaikainen kuormitus $F_v = 3,0$
Paalun sivukuormakestävyys maan murtokestävyuden suhteen	$F_h = 2,0$

Paalujen laskennallinen geotekninen kantokyky saadaan geoteknisen murtokestävyuden avulla jakamalla se varmuusluvulla F_p :

$$R_{p;k} = \frac{R_p}{F_p}$$

Samalla tavoin paalujen geotekninen kestävyys vetokuormituksessa saadaan varmuusluvulla F_v :

$$R_{v;k} = \frac{R_v}{F_v}$$

Ja paalun geotekninen sivukuormakestävyys maan murtokestävyyden suhteen:

$$R_{h;k} = \frac{R_h}{F_h} .$$

6.2 Eurokoodit

Euroodit perustuvat sekä paalun rakenteen, että geoteknisen mitoituksen osalta osavarmuuslukumenetelmään.

Laskennallisen geoteknisen mitoituksen osalta (ei koekuormituksia) osavarmuusmenettely kohdistuu sekä maan lujuusparametreihin, että maan kestävyysiin. Eurokoodi esittää 3 vaihtoehtoista mitoitustapaa, joista Suomen kansallisissa ohjeissa veloitetaan käyttämään tapaa 2 paaluperustusten ja ankkureiden mitoituksessa.

Aksiaalisesti kuormitettujen paalujen ja ankkureiden mitoituksessa tulee osoittaa, että murtorajatilaa tai liiallista muodonmuutosta ei esiinny seuraavalla osavarmuuslukujen yhdistelmällä (SFS-EN 1007-1 (2.4.7.3.4.3 (1)):

$$A1 + M1 + R2$$

, jossa *A1* viittaa kuormitusten osavarmuuslukuihin, *M1* maan lujuusparametrien osavarmuuslukuihin ja *R2* maan kestävyYTEEN.

Kuormat jätetään tässä yhteydessä huomiotta, ja maaparametrien käytettävät osavarmuusluvut (γ_M) ovat seuraavat (NA SFS-EN 1997_1 Taulukko A.4):

Taulukko 5.1 Maaparametrien osavarmuusluvut (γ_M) (NA SFS-EN 1997_1 Taulukko A.4)

Maaparametri	Merkintä	M1
Leikkauskestävyysskulma	$\gamma_{\phi'}$	1,0
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1,0
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,0
Tilavuuspaino	γ_{γ}	1,0

Syrjäyttävien paalujen kestävyYDEN osavarmuusluvut (γ_R) ovat seuraavat (NA SFS-EN 1997_1 Taulukko A.6):

Taulukko 5.2 Syrjäyttävien paalujen kestävyYKSIEN osavarmuusluvut (γ_R) (NA SFS-EN 1997_1 Taulukko A.6)

Kestävyys	Merkintä	R2
Kärki	γ_b	1,20
Vaippa (puristus)	γ_s	1,20
Kokonais-/yhdistetty (puristus)	γ_t	1,20
Vedetty vaippa		
- lyhytaikainen kuormitus	$\gamma_{s,t}$	1,35
- pitkäaikainen kuormitus	$\gamma_{s;t}$	1,50

Paalun puristuskestävyyden mitoitusarvo $R_{c;d}$ tulee laskea kaavalla (SFS-EN 1997-1 kaava (7.6)):

$$R_{c;d} = R_{b;d} + R_{s;d}$$

, missä paalun kärki- ja vaippakantavuudelle johdetaan geotekniset puristuskestävyydet kaavoilla (SFS-EN 1997-1 kaava(7.7)):

$$R_{b;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b \times \gamma_m} \quad \text{ja} \quad R_{s;d} = \frac{R_{s;k}}{\gamma_s \times \gamma_m}$$

, missä puolestaan kestävyyksien ominaisarvot voidaan laskea, kuten edellä kappaleessa 2 on esitetty erikseen paalun kärjelle, vaipalle ja laippojen väliselle sylinteripinnalle. Esim kärkikantavuudelle saadaan ominaisarvo $R_{b;k} = A_b q_{b;k}$. Edellisten kestävyyskaavojen kärki ja vaippakestävyyksien korjaavana mallikertoimena käytetään arvoja $\gamma_m = 1,6$ kitkamaalajeilla ja $\gamma_m = 1,95$ koheesiomaalajeilla pitkäaikaisissa kuormituksissa ja $\gamma_m = 1,4$ koheesiomaalajeilla lyhytaikaisissa kuormituksissa (NA SFS-EN 1997-1 Taulukko 1).

Samalla tavoin määritetään paalun vetokestävyuden mitoitusarvo kaavasta (SFS-EN 1997-1 Kaava (7.15)):

$$R_{t;d} = \frac{R_{bu;k}}{\gamma_b \times \gamma_m} + \frac{R_{r;k}}{\gamma_{s;t} \times \gamma_m} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_{s;t} \times \gamma_m}$$

, missä geotekniset vetokestävyyksien ominaisarvot $R_{bu;k}$, $R_{t;k}$ ja $R_{s;k}$ on laskettu kappaleen 2 mukaisesti. Vetokestävyyksien mitoitusarvoa laskettaessa korjaavana mallikertoimena käytetään arvoa $\gamma_m = 1,5$ sekä lyhyt- että pitkäaikaisessa kuormituksessa.

Lähteet

- El Naggar M.H., Youssef M.A. and Ahmed M. Monotonic and cyclic behaviour of helical pile specialized connectors. Elsevier, Engineering Structures, 29(2007): 2635-2640.
- Ghaly A., Hanna A. and Hanna M. (1991a). Uplift Behaviour of Screw Anchors in Sand I: Dry Sand. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering. Vol 117(5): 773-793.
- Ghaly A., Hanna A. and Hanna M. (1991b). Uplift Behaviour of Screw Anchors in Sand II: Hydrostatic and Flow Conditions. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 117(5): 794-808.
- Ghaly, A. and Hanna, A. (1991c). Experimental and theoretical studies on installation torque of screw piles. Canadian geotechnical journal, 28(3):353-364.
- Ghaly A., Hanna A., Ranjan G. and Hanna M. (1991). Helical Anchors in Dry and Submerged Sand Subjected to Surcharge. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 117(10): 1463-1470.
- Goel S., S. Patra and N. R. Patra. Break out resistance of inclined anchors in sand. Springer, Geotechnical and Geological engineering, 24(2006): 1511-1525.
- Hanna A., Ayadat T. and Sabry M. Pullout resistance of single vertical shallow helical and plate anchors in sand. Springer, Geotechnical and Geological Engineering 25(2007): 559-573.
- Hoyt, R.M. and Clemence, S.P. (1989). Uplift capacity of helical anchors in soil. *In* Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, Brazil. Vol. 2, pp. 1019-1022.
- Liu P.E., Zubeck H.K. and Schubert D. H. Finite-Element Analysis of helical piers in Frozen Ground. ASCE, Journal of Cold Region Engineering. Vol. 21(3): 92-106.
- Meyerhof, G.G. and Adams, J.I. (1968). The Ultimate Uplift Capacity of Foundations. Canadian Geotechnical Journal, 5(4):224-244.
- Mitsch, M.P. and Clemence, S.P. (1985). The Uplift capacity of Helix Anchors in Sand. *In* Uplift Capacity of Anchor Foundations in Soil, Proceedings of a session sponsored by the Geotechnical engrg. Div. of the American Society of civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention in Detroit, Michigan. October 1985. pp. 26-47.

- Mooney, J.L., Adamczak, S.Jr., Clemence, S.P. (1985). Uplift Capacity of Helical Anchors in Clay and Silt, in Uplift Behaviour of Anchor Foundations in Soil. *In* Proceedings of a session sponsored by the geotechnical Engrg. Div. of the American society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention in Detroit, Mich., Oct.24, 1985. pp. 48-72.
- Prasad Y.V.S.N. and rap S. N. Lateral Capacity of Helical Piles in Clays. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 122(11): 938-941.
- Rao S. N and Prasad Y.V.S.N. Estimation of uplift Capacity of Helical Anchors in Clay. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 119(2): 352-357.
- RIL 212-1995. (1995). Suurpaalutusohje SPO-95. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- RIL 233-2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- RIL 230-2007. (2007). Pienpaalutusohje PPO-2007. Teräksiset lyönti-, pora- ja puristuspaalut. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- Tappenden K. M. (2007). Predicting the Axial Capacity of Screw Piles Installed in Western Canadian Soils. Master of Sciences thesis. Department of Civil and Environmentla Engineering, Edmonton, University of Alberta. 140 p.
- Vyazmensky A.M. (2005). Numerical Modelling of Time Dependent Pore Pressure Response Induced by Helical Pile Installation. Master of Applied Sciences Thesis. The Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia.
- Weech C. N. (2002). Installation and Load Testing of Helical Piles in a Sensitive Fine-Grained Soil. Master of Applied Science Thesis. Department of civil Engineering, University of British Columbia. 223 p.
- Yenumula Prasad V.S.N. and Narasimha Rao S. (1996). Lateral Capacity of Helical Piles in Clays. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122(11):938-941.

Liitteet

Liite 1 Maalajien mekaanisten ominaisuuksien arviointi kairausvastuksen perusteella 1 sivu

Liite 2 Laskentaesimerkit:
Esimerkki 1: 1 –laippainen ruuvipaalu; puristuskuormitus;vetokuormitus
Esimerkki 2: 2 –laippainen ruuvipaalu; puristuskuormitus; vetokuormitus

5 sivua

Liite 1 Maalajien mekaanisten ominaisuuksien arviointi kairausvastuksen perusteella

Maalaji		Puristin- kairaus q_c [MPa]	Paino- kairaus pk/0,2 m	Heijari- kairaus l/0,2 m	Moduuli- luku m	Jännitys- ekspon- nenti β	Kitka- kulma ϕ
Karkea siltti	Löyhä	< 7	< 40	< 8	30-100	0,3	28
	Keskitiivis	7-15	40-100	8-25	70-150	0,3	30
	Tiivis	> 15	> 100	> 25	100-300	0,3	36
Hieno Hiekka d ₁₀ <0,06	Löyhä	<10	20-50	5-15	50-150	0,5	30
	Keskitiivis	10-20	50-100	15-30	100-200	0,5	33
	Tiivis	> 20	> 100	> 30	150-300	0,5	36
Hiekka d ₁₀ >0,06	Löyhä	< 6	10-30	5-12	150-300	0,5	32
	Keskitiivis	6-14	30-60	12-25	200-400	0,5	35
	Tiivis	> 14	> 60	> 25	300-600	0,5	38
Sora	Löyhä	< 5,5	10-25	5-10	300-600	0,5	34
	Keskitiivis	5,5-12	25-50	10-20	400-800	0,5	38
	Tiivis	>12	> 50	> 20	600-1200	0,5	40
Moreeni	Hyvin löyhä	< 10	< 40	< 20	150-600	0,5	-34
	Löyhä	> 10	40-100	20-60	600-	0,5	-36
	Keskitiivis		> 100	60-140	800-	0,5	-38
	Tiivis		Lyömällä	> 140	1200-	0,5	-40

Esimerkki 1:

Paalu:

$$d \times t = 88,9 \times 6,3 \text{ mm}$$

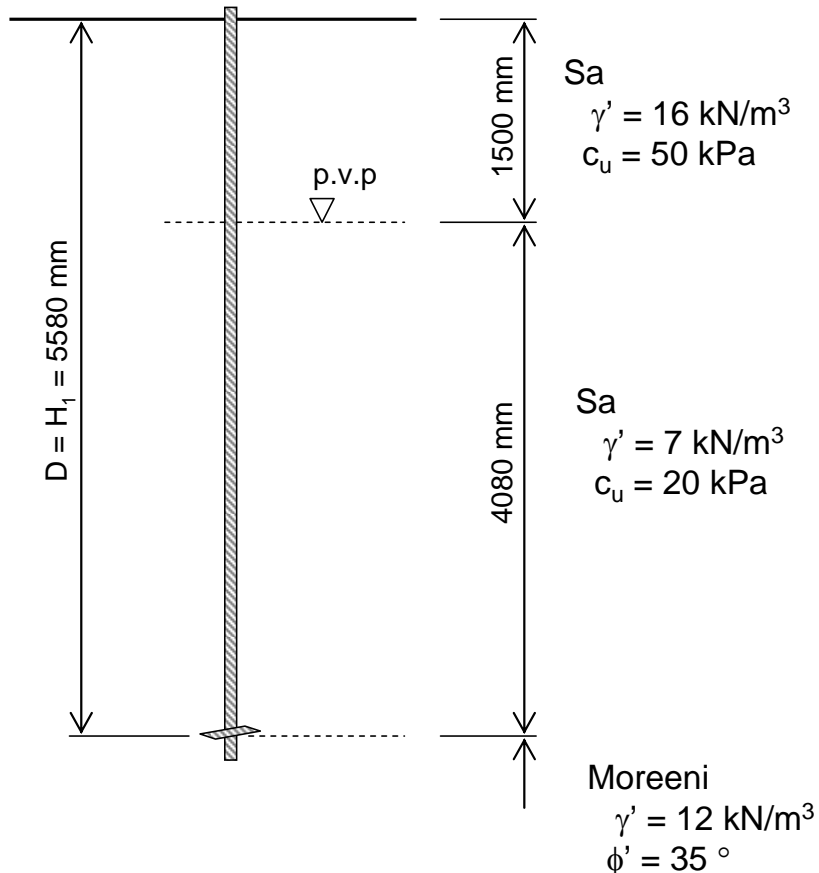
Laippa $1 \times 250 \text{ mm}$

$$B = B_1 = 250 \text{ mm}$$

$$A_b = (\pi B^2)/4 = 0,049 \text{ m}^2$$

$$d = 88,9 \text{ mm}$$

$$A_s = \pi d = 0,279 \text{ m}^2/\text{m}$$



Esimerkki 2:

Paalu:

$$d \times t = 88,9 \times 6,3 \text{ mm}$$

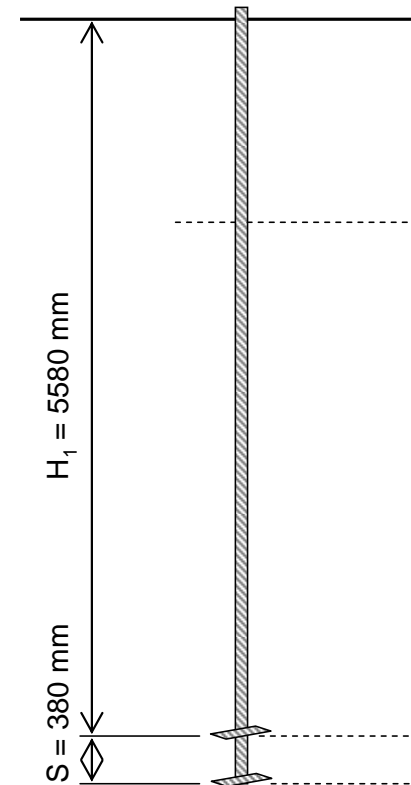
Laippa $2 \times 250 \text{ mm}$

$$B = B_1 = 250 \text{ mm}; S = 380 \text{ mm}$$

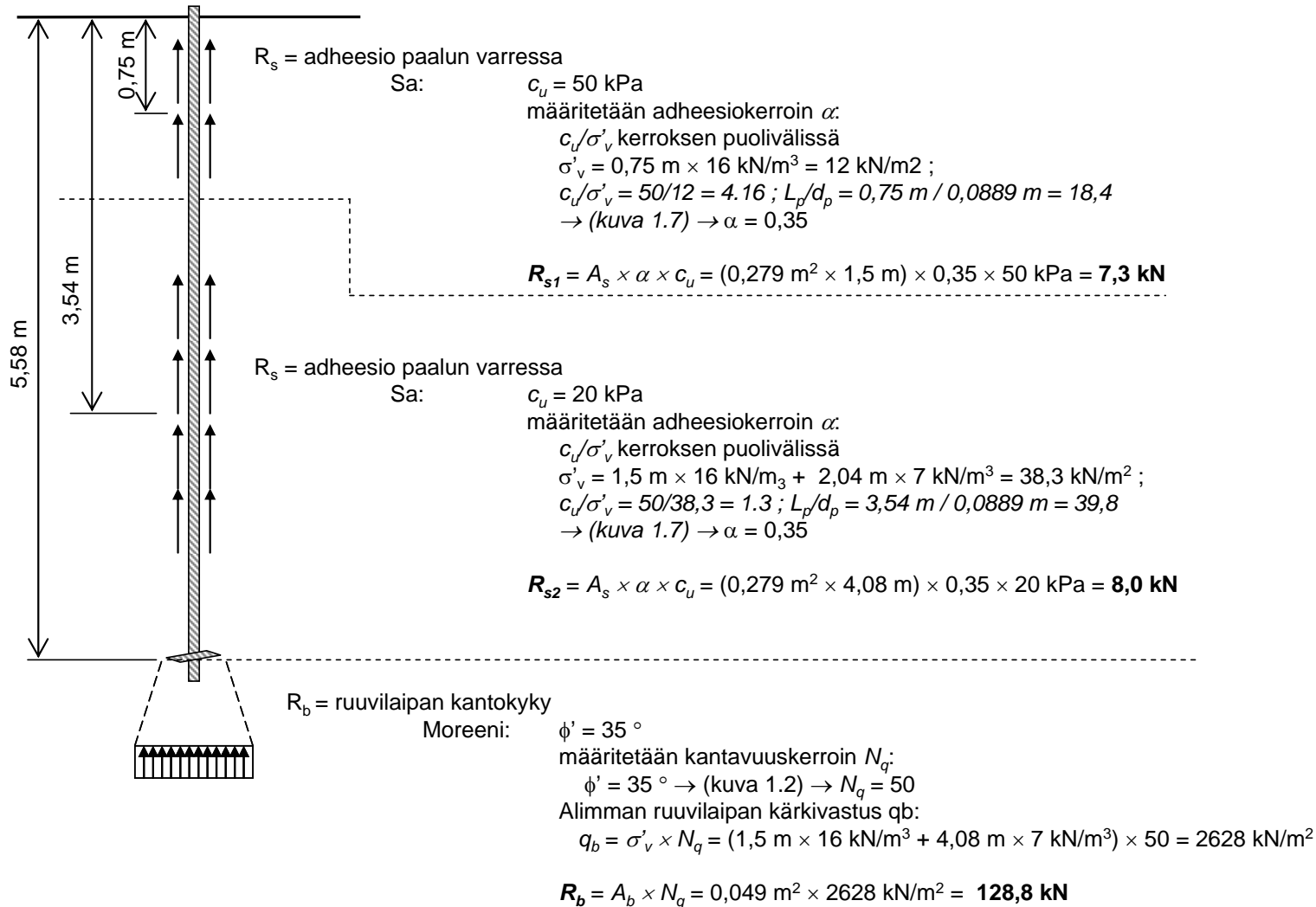
$$A_b = (\pi B^2)/4 = 0,049 \text{ m}^2$$

$$d = 88,9 \text{ mm}$$

$$A_s = \pi d = 0,279 \text{ m}^2/\text{m}$$



Esimerkin 1 paalun geotekninen murtokestävyys ja kantokyky puristuskuormituksessa:

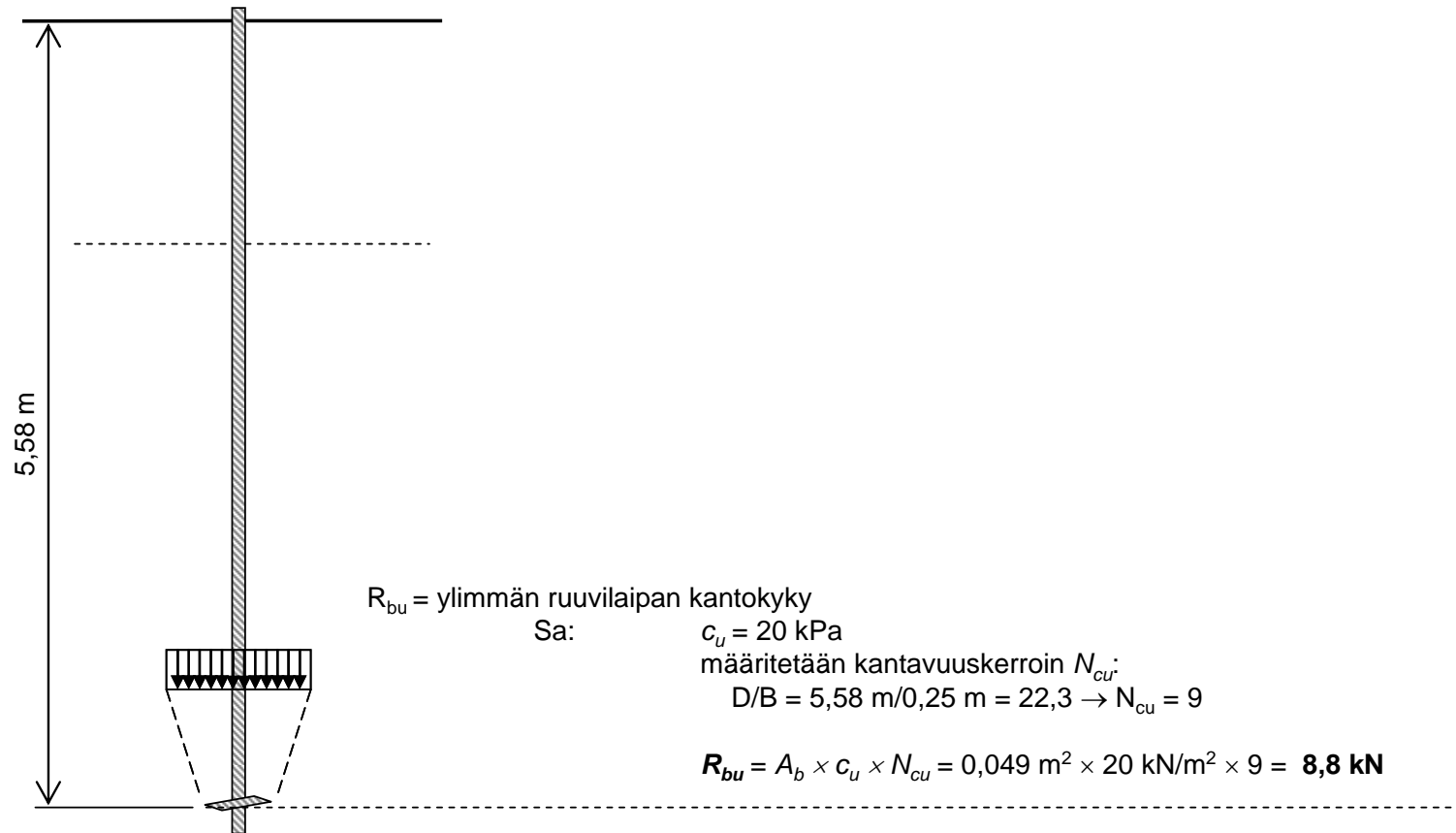


Paalun geotekninen murtokestävyys puristuskuormituksessa: $R_p = R_b + \sum R_s = 128,8 \text{ kN} + 7,3 \text{ kN} + 8,0 \text{ kN} = 144,1 \text{ kN}$

Pääasiassa kärjellä kantava tukipaalu \rightarrow kokonaisvarmuuskerroin $F_p = 2,2$

Paalun geotekninen kantokyky puristuskuormituksessa: $R_{p;k} = R_p/F_p = 144,1 / 2,2 = 65,5 \text{ kN}$

Esimerkin 1 paalun geotekninen murtokestävyys ja kestävyys vetokuormituksessa:

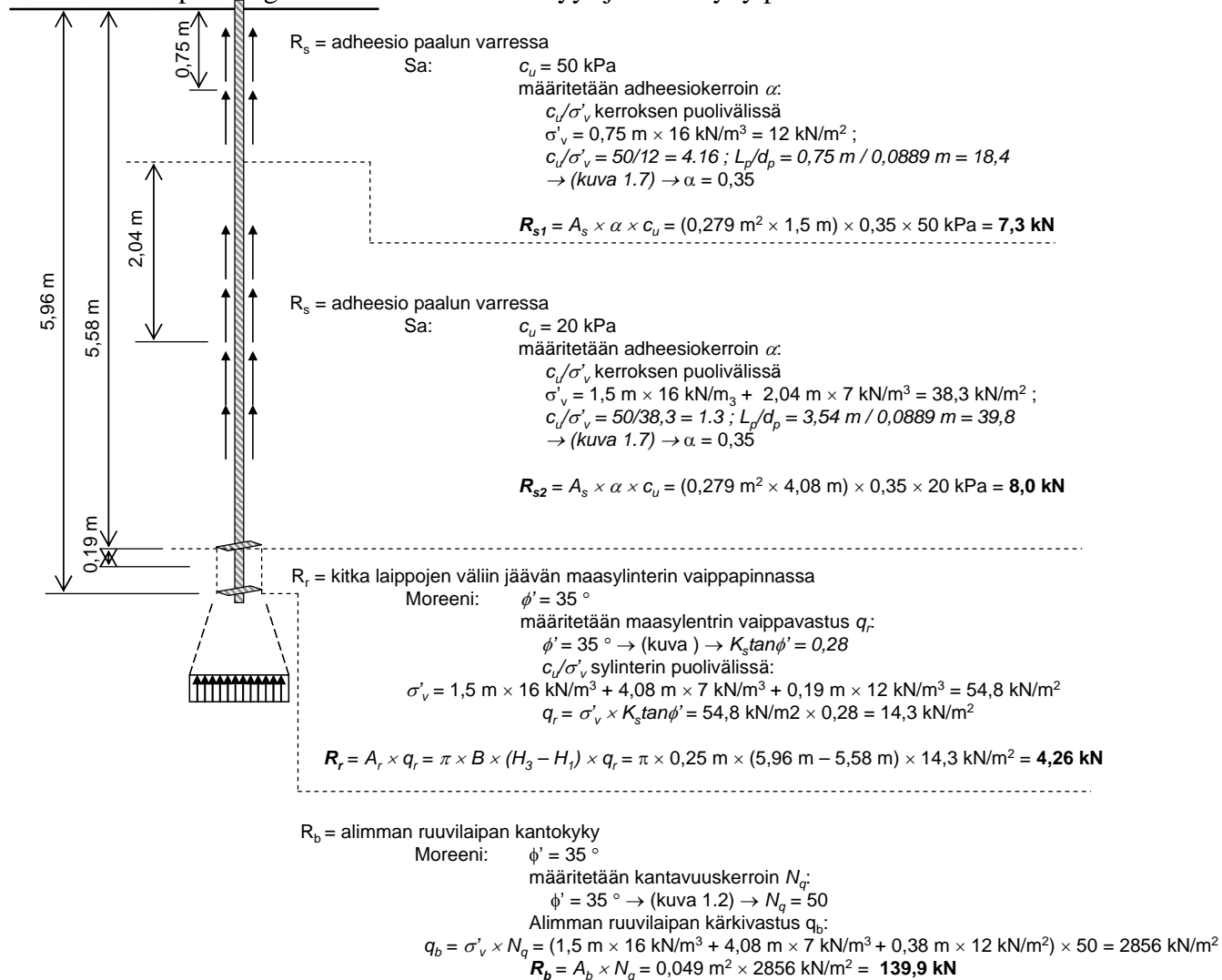


Paalun geotekninen murtokestävyys vetokuormituksessa: $R_v = R_{bu} = \mathbf{8,8 \text{ kN}}$

Vetopaalu \rightarrow kokonaisvarmuuskerroin lyhytaikaisella kuormituksella $F_v = \mathbf{2,5}$

Paalun geotekninen kantokyky puristuskuormituksessa: $R_{v;k} = R_v / F_v = 8,8 / 2,5 = \mathbf{3,5 \text{ kN}}$

Esimerkin 2 paalun geotekninen murtokestävyys ja kantokyky puristuskuormituksessa:

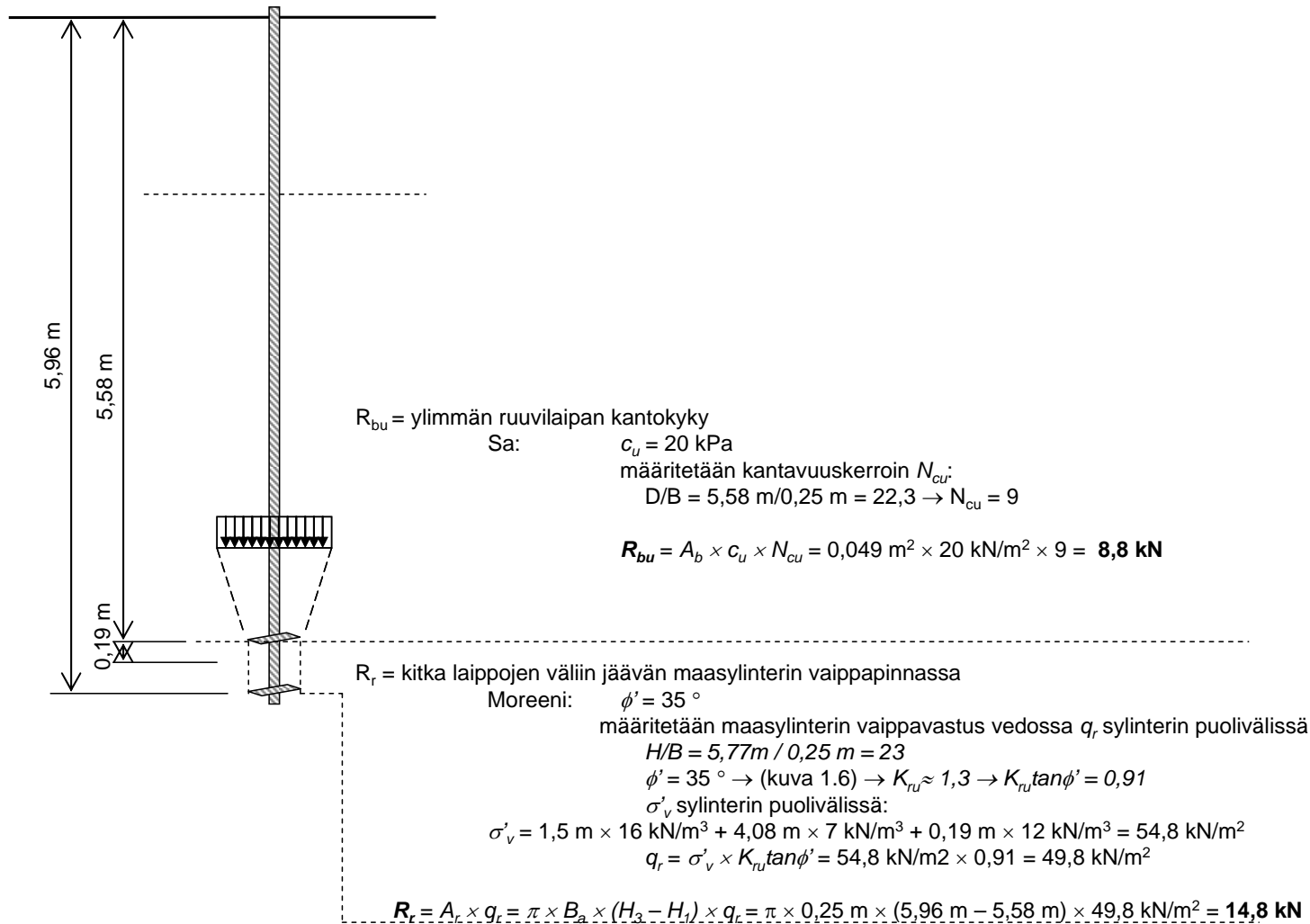


Paalun geotekninen murtokestävyys puristuskuormituksessa: $R_p = R_b + R_r + \sum R_s = 139,9 \text{ kN} + 4,3 \text{ kN} + 7,3 \text{ kN} + 8,0 \text{ kN} = 159,5 \text{ kN}$

Pääasiassa kärjellä kantava tukipaalu \rightarrow kokonaisvarmuuskerroin $F_p = 2,2$

Paalun geotekninen kantokyky puristuskuormituksessa: $R_{p,k} = R_p/F_p = 159,5 / 2,2 = 72,5 \text{ kN}$

Esimerkin 2 paalun geotekninen murtokestävyys ja kestävyys vetokuormituksessa:



Paalun geotekninen murtokestävyys vetokuormituksessa: $R_v = R_{bu} + R_{ru} = 8,8 \text{ kN} + 14,8 \text{ kN} = \mathbf{23,6 \text{ kN}}$

Vetopaalu \rightarrow kokonaisvarmuuskerroin lyhytaikaisella kuormituksella $F_v = \mathbf{2,5}$

Paalun geotekninen kantokyky puristuskuormituksessa: $R_{v,k} = R_v / F_v = 23,6 / 2,5 = \mathbf{9,4 \text{ kN}}$