



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tuomo Saunamäki

KAIVINPAALUN GEOTEKNINEN
KESTÄVYYS
POHJATUTKIMUSTULOSTEN
PERUSTEELLA

Tekniikka ja liikenne
2012

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun rakennustekniikan koulutusohjelman opinnäytetyönä syksyllä 2012. Kiitokset saamastani tuesta ja ohjauksesta Tapani Hahtokarille Vaasan ammattikorkeakoulusta.

Haluan antaa lämpimät kiitokset Citec Engineering Oy Ab:lle mahdollisuudesta tehdä mielenkiintoinen opinnäytetyö. Suurkiitokset työn ohjauksesta opinnäytetyön ohjaajalle Mauri Välimäelle, sekä laskentaohjelman tarkastajalle Martti Sor-kamolle Ramboll Finland Oy:stä.

Tampereella 11.11.2012

Tuomo Saunamäki

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tuomo Saunamäki
Opinnäytetyön nimi	Kaivinpaalun geotekninen kestävyys pohjatutkimustulosten perusteella
Vuosi	2012
Kieli	suomi
Sivumäärä	48
Ohjaaja	Tapani Hahtokari

Tämän opinnäytetyön tilaajana on Citec Engineering Oy Ab. Yritys keskittyy rakennesuunnitteluun, eikä geotekninen suunnittelu kuulu normaalisti päivittäisiin tehtäviin. Tästä syystä tutkielman tarkoituksena oli ottaa selvää geotekninen vaikutus aksiaalisesti kuormitettuihin kaivinpaaluihin pohjatutkimustulosten perusteella. Työn tilaaja tekee rakenne- ja rakennussuunnitelmia suurimmaksi osaksi ulkomaille. Kaivinpaaluja ei Suomessa enää käytetä yhtä paljon kuin muualla maailmassa: osasyys on maa-aineksen laatu.

Päätarkoituksena oli luoda helppokäyttöinen laskentapohja suunnittelijoille, joilla on perustiedot geotekniikasta. Excel-pohjaisella laskentataulukolla voidaan laskea kaivinpaalun geotekninen kestävyys, kun tiedossa on pohjatutkimustulokset. Laskennan piti olla täysin eurokoodien mukainen ja tästä syystä pääaineistoksi valittiin RIL 254-2011 Paalutusohje, suunnittelun perusteet.

Laskennasta saatuja tuloksia voidaan käyttää alustavaan mitoitukseen. Laskentaohjelma toimii myös aputyökaluna paalun rakenteelliseen mitoitukseen. Tämä ohjelma ei kuitenkaan laske paalun rakennetta. Tilaajalta löytyi laskentapohja pilarin mitoittamiseen, joten tästä syystä tutkielma rajattiin geotekniseen tarkasteluun ja nurjahduspituuden selvittämiseen.

ABSTRACT

Author	Tuomo Saunamäki
Title	Geotechnical Resistance of the Bored Pile
Year	2012
Language	English
Pages	48
Supervisor	Tapani Hahtokari

The research project is commissioned by Citec Engineering, Vaasa, Finland. Citec Engineering has no previously accountable experience within this specific geotechnical analysis sector. Therefore, this thesis was designed to discover and account for the geotechnical impact of an axially loaded bored pile following a chain of extensive research results. The client drafted and constructed the plans for structural design abroad, as one of the principal locations. This comes as the bored pile is rarely used within Finland in comparison to the rest of the world. One of the main reasons for this is due to the existing soil quality across different parts of Finland, creating complications for use of the bored pile.

A main objective for the research backing this thesis was to provide an easily accessible foundation of knowledge for designers who do not have or who do not necessarily need to withhold specific geotechnical facts and analysis.

It was found that the Excel-based program-trap has the ability to calculate the bored pile geotechnical resistance data, enabling the understanding of the aforementioned research base and criteria. This entire calculation base was intended to systematically reflect the guidelines of the European coding system, and for this particular reason the key source RIL 254-2011 Paalutusohje, suunnittelun perusteet a template was selected to represent the design criteria.

The calculated results obtained through this thesis research have been shaped specifically enabling these to play a preliminary role within differing design foundations. The calculation program also serves as an auxiliary tool for the structural design of the pile, yet the control program does not reduce the pile structure.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	11
2	YLEISTÄ	12
	2.1 Paalut ja niiden tarkoitus.....	12
	2.2 Maata syrjäyttävät paalut	13
	2.3 Maata syrjäyttämättömät paalut.....	13
	2.4 Geotekninen luokka	13
	2.5 Aggressiivinen maaperä.....	14
3	KAIVINPAALU.....	16
	3.1 Eri paalutyypit.....	16
	3.2 Yleistä kaivinpaalun asennuksesta.....	16
	3.3 Paalun paikallavalu	16
	3.4 Paalun kärjet.....	17
	3.5 Asennuksen suunnittelu	17
	3.6 Paikalla valettavien paalujen raudoittaminen	17
4	SUUNNITTELU	18
	4.1 Maaperästä aiheutuvat kuormat	18
	4.2 Paalun nousu	19
	4.3 Sivukuorma.....	19
	4.4 Paalujen koekuormitukset.....	20
	4.5 Paalun geotekninen puristuskestävyys.....	21
	4.6 Maakerrokseen tukeutuvan paalun geotekninen kestävyys	22
	4.7 Kallioon tukeutuvan paalun geotekninen kestävyys.....	25
	4.8 Geotekninen vetokestävyys pohjatutkimustulosten perusteella.....	26
	4.9 Paalujen pystysuuntaiset siirtymät.....	27
	4.10 Paalun nurjahduskestävyys	29
5	LASKENTAOHJELMA	35
	5.1 Käyttötarkoitus.....	35
	5.2 Lähtötiedot ja tulokset.....	36
	5.3 Ohjelman käyttö.....	38

5.4	Saatujen tulosten analysointi.....	43
5.4.1	Nurjahduspituus	43
5.4.2	Paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa	44
5.4.3	Negatiivinen vaippavastus	45
5.4.4	Geotekninen puristuskestävyys.....	45
5.4.5	Geotekninen vetokestävyys pohjatutkimustulosten perusteella..	45
5.4.6	Pystysuuntaiset siirtymät.....	46
6	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET.....	48
	LIITTEET	

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1.	Paalutusluokat	s. 14
Kuva 2.	Negatiivinen vaippahankaus	s. 19
Kuva 3.	Staattinen koekuormitus	s. 20
Kuva 4.	Kantavuuskertoimen määrittely	s. 23
Kuva 5.	Adheesiokerroin	s. 23
Kuva 6.	Vetokestävyys, tartuntapituus	s. 27
Kuva 7.	Nurjahduspituus	s. 30
Kuva 8.	Virumaluvun loppuarvo	s. 32
Kuva 9.	Sivuvastuksen ääriarvo	s. 34
Kuva 10.	Nurjahdusmuoto	s. 38
Kuva 11.	Laskentapohja, Input	s. 39
Kuva 12.	Laskentapohja, Results 1/2	s. 40
Kuva 13.	Laskentapohja, Results 2/2	s. 42
Kuva 14.	Tulokset, nurjahduspituus	s. 43
Kuva 15.	Tulokset, geometrinen raudoitussuhde A_s/A_c	s. 43
Kuva 16.	Tulokset, normaalivoiman ja hoikkuuden kerroin	s. 44
Kuva 17.	Tulokset, nurjahduskestävyys	s. 44
Kuva 18.	Tulokset, negatiivinen vaippahankaus	s. 45

Kuva 19.	Tulokset, geotekninen puristuskestävyys	s. 45
Kuva 20.	Tulokset, geotekninen vetokestävyys	s. 46
Kuva 21.	Tulokset, pystysuuntaiset	s. 46
Taulukko 1.	Pohjatutkimustulokset, kitkakulma	s. 24
Taulukko 2.	Vaippa- ja kärkikestävyys	s. 24
Taulukko 3.	Ominaistartuntalujuus	s. 26
Taulukko 4.	Alkutaipuma	s. 29

KÄYTETYT MERKINNÄT

A_b	paalun pohjan ala
A_c	betonipoikkileikkauksen bruttoala
A_s	pääraudoituksen poikkileikkausala
$A_{s,i}$	paalun vaipan pinta-ala kerroksessa i
c_u	maan suljettu leikkauslujuus
d	halkaisija
D	syvyys
d_{eff}	paalun tehokas halkaisija
EA	paalun aksiaalijäykkyys
E_{cd}	betonin kimmomoduulin mitoitusarvo
E_{cm}	betonin sekanttimoduuli
EI	paalun taivutusjäykkyys
E_{s2}	raudoituksen kimmomoduulin mitoitusarvo
F_{cr}	suoran paalun nurjahdusmurtokuorma
f_{ctk}	betonin vetolujuuden ominaisarvo
$F_{d,s}$	taipuneen paalun nurjahdusmurtokuorma maan murtuessa
$F_{k,b}$	paalun kärjen kuormitus käyttörajatilassa
$F_{k,s}$	paalun vaipan kuormitus käyttörajatilassa
F_{neg}	negatiivinen vaippavastus
$F_{t,d}$	vetopaaluun kohdistuvan aksiaalisen vetokuorman mitoitusarvo
I_c	betonin poikkileikkauksen jäyhyysmomentti
I_{s2}	teräksen poikkileikkauksen jäyhyysmomentti
k_1	kerroin, joka riippuu betonin lujuusluokasta
k_2	kerroin, joka riippuu normaalivoimasta ja hoikkeudesta
k_b	teräksen pinnan muodosta johtuva tartuntakerroin
K_c	halkeilun, virumisen ym. vaikutuskerroin
k_s	maan alustaluku
K_s	raudoituksen vaikutuskerroin
L_{cr}	nurjahduspituus
L_{min}	paalun ankkurointipituus kallioon

M_{0Ed}	on lineaarisen laskennan mukainen taivutusmomentti murtorajatilassa kuormien mitoitusarvojen vaikuttaessa yhdistelmänä.
M_{0Eqp}	on lineaarisen laskennan mukainen taivutusmomentti käyttörajatilassa kuormien pitkäaikaisyhdistelmän vaikuttaessa
$M_{s;b}$	paalun kärjen alapuolella olevan maan kokoonpuristuvuusmoduuli
n	suhteellinen normaalivoima $N_{ed}/(A_c f_{cd})$
N_q	paalun kärjen kantavuuskerroin
p	paalun ympärysmitta
p_m	maan sivuvastuksen arvo murtorajatilassa
q_b	kärkikestävyys
$q_{b;k}$	kärkikestävyuden ominaisarvo
q_s	vaippakestävyys
$q_{s;i;k}$	vaippakitkan ominaisarvo kerroksessa i
$R_{b;d}$	paalun kärjen geoteknisen kestävyuden mitoitusarvo
$R_{b;k}$	paalun kärjen geoteknisen kestävyuden ominaisarvo
$R_{c;d}$	R_c :n mitoitusarvo
$R_{s;d}$	paalun vaipan geoteknisen kestävyuden mitoitusarvo
$R_{s;k}$	paalun vaipan geoteknisen kestävyuden ominaisarvo
$R_{t;d}$	paalun vetokestävyuden mitoitusarvo
$R_{t;k}$	paalun vetokestävyuden ominaisarvo
s_0	kokonaispainuma
s_b	paalun kärjen alapuolisen maan tai kallion kimmainen kokoonpuristuma
s_p	paalun varren kimmainen kokoonpuristuma
z_i	eri maalajien kerrospaksuudet

Kreikkalaiset kirjaimet

α	adheesiokerroin
α_s	vaippavastus 0,5 tai 0,66
γ	tilavuuspaino
γ'	tehokas tilavuuspaino
γ_b	paalun kärkikestävyuden osavarmuusluku

γ_{ce}	osavarmuusluku (kussakin maassa käytettävä luku, suositusarvo 1,2)
γ_s	paalun vaippakestävyiden osavarmuusluku
$\gamma_{s;t}$	paalun vetokestävyiden osavarmuusluku
δ_g	paalun geometrinen alkutaipuma
ρ	geometrinen raudoitussuhde A_s/A_c
σ'_v	tehokas pystysuorajännitys
$\sigma'_{v;b}$	tehokas pystysuorajännitys paalun kärjen tasolla
$\tau_{s;k}$	betonin ja kallion välinen ominaistartunlujuus
φ	leikkauskestävyyskulma
$\varphi_{(\infty,t0)}$	virumaluvun loppuarvo
φ_{ef}	virumisaste

1 JOHDANTO

Tämä työ sisältää kaivinpaalun laskennassa huomioon otettavat seikat pohjatutkimustulosten perusteella. Suomessa ei niin yleisenä paalutuksena tunnettu kaivinpaalu valittiin tämän työn aiheeksi, koska työn tilaaja tekee rakenne- ja rakennussuunnitelmia ympäri maailman, jossa paalutustapa on hyvinkin yleistä. Koska tätä nykyä Suomessa kaivinpaalu on erittäin vähän käytetty paalutusmuoto, oli vaikeaa löytää tietoa suomalaisesta kirjallisuudesta. Ohjelma on pääsääntöisesti tehty RIL 254–2011 Paalutusohje 2011 -kirjan sekä teräsbetonimitoituksen osalta EC 1992-1 mukaan.

Tavoitteena oli tehdä mahdollisimman yksinkertainen laskupohja Excel-ohjelmalla, niin että kaikki pystyisivät laskemaan kaivinpaalun geoteknisen kestävyuden, kun pohjatutkimustulokset ovat saatavilla. Ohjelman yksinkertaistamiseksi katsottiin parhaimmaksi tavaksi luoda ohjelmaan 5 sivua, jotka muodostuvat Input-, laskenta-, Output-, maaparametri-, ohje- ja datavälilehdestä.

Ohjelma laskee paalun kestävyuden, kun lähtötiedot on saatu. Lähtötietoina ovat muun muassa kuormat, pohjatutkimustulokset, paalun mitat ja materiaaliominaisuuksien valinta. Pohjatutkimustuloksia verrataan ohjelman taulukoihin, jonka perusteella valitaan arvot maaparametreille. Muut lähtötiedot määritellään itse.

2 YLEISTÄ

Tämä luku kertoo perustietoja paalutuksesta ja siihen liittyvistä geoteknisistä seikoista. Nämä asiat ovat perustana ohjelman tarkoituksen ymmärtämisessä.

2.1 Paalut ja niiden tarkoitus

Paalujen avulla siirretään kuormia pehmeillä maa-alueilla kantavaan kerrokseen, joka voi olla kalliota tai moreenia. Paalut voidaan asentaa vinoon tai suoraan. Vaakakuormat yleensä otetaan vastaan vinopaaluilla.

Paalun materiaaleina yleisemmin käytetään puuta, teräsbetonia tai terästä. Puupaalujen on oltava aina pohjaveden alapuolella siten, että ne eivät ole tekemisissä hapen kanssa. Puupaalut ovat joko mänty- tai kuusirunkoja. Teräsbetonipaalut ovat nykyään lähes aina tehdasvalmisteisia. Tavallisesti poikkileikkaus on neliö, jonka sivun mitta voi olla 200 mm, 250 mm tai 300 mm. Valmistukseen käytettävä betoni valitaan paalutusluokan mukaan. Pääteräkset voivat olla joko esijännitetyjä tai jännittämättömiä. Suomessa kuitenkin käytetään enemmän jännittämättömiä paaluja, koska ne sopivat paremmin Suomen maaperään. Paalun kärki suojataan kengällä, joka voi olla varustettu kalliokärjellä. Kalliokärki pureutuu kallioon tai kiveen ja täten estää sivuliukumisen. Teräspaalut voivat olla profiililtaan lähestulkoon minkälaisia vain. Esimerkiksi suorat rataiskot ovat jossain tapauksissa käyttökelpoisia paalutuksessa. Paalut voivat olla myös liittorakenteita, jossa yhdistyy teräsputki ja sisälle valettu betoni.

Paalut jaetaan myös toimintatavan mukaan. Näitä ovat muun muassa tukipaalut, kitkapaalut ja koheesiopaalut. Tukipaalu tukeutuu kallioon tai kantavaan maalajiin pääasiassa paalun kärjen kautta. Laatimassani ohjelmassa lasketaan nimenomaan tukipaalun geoteknistä kestävyyttä. Kitkapaalun kuorma välittyy maahan paalun vaipan ja maan välisen kitkan avulla sekä pienissä määrin myös kärjen kautta. Koheesiopaalu toimii ympäröivän koheesiomaan ja paalun vaippapinnan kautta. Usein paalut ovat yhdistelmä edellä mainituista toimintatavoista ja näitä kutsutaan

välimuotopaaluiksi. Paalut voivat olla myös vetopaaluja, jolloin nämä toimivat lähes aina toimivat lähes aina kitka- tai koheesiomaisesti.

2.2 Maata syrjäyttävät paalut

Paalut, jotka syrjäyttävät maan, asennetaan yleensä lyömällä, puristamalla, ruuvaamalla tai täryttämällä. Joissain tapauksissa ei voida käyttää maata syrjäyttäviä paaluja, koska se aiheuttaa tärinää ja maanpinnan nousua, joka voi aiheuttaa vahinkoa olemassa oleviin rakenteisiin tai paaluryhmiin. Kokemukseni mukaan tämä on Suomessa eniten käytetty paalutusmuoto. /1, sivu 15-16/

2.3 Maata syrjäyttämättömät paalut

Maata syrjäyttämättömät paalut asennetaan kaivamalla suojaputkea käyttäen. Jos maa on hyvin stabiilia, voidaan jättää suojaputki kokonaan pois. Kun paalukaivanto on kaivettu, se täytetään raudoitettulla tai raudoittamattomalla betonilla. Laatimani laskentaohjelma ottaa kantaa ainoastaan maata syrjäyttämättömiin paaluihin. /1, sivu 135/

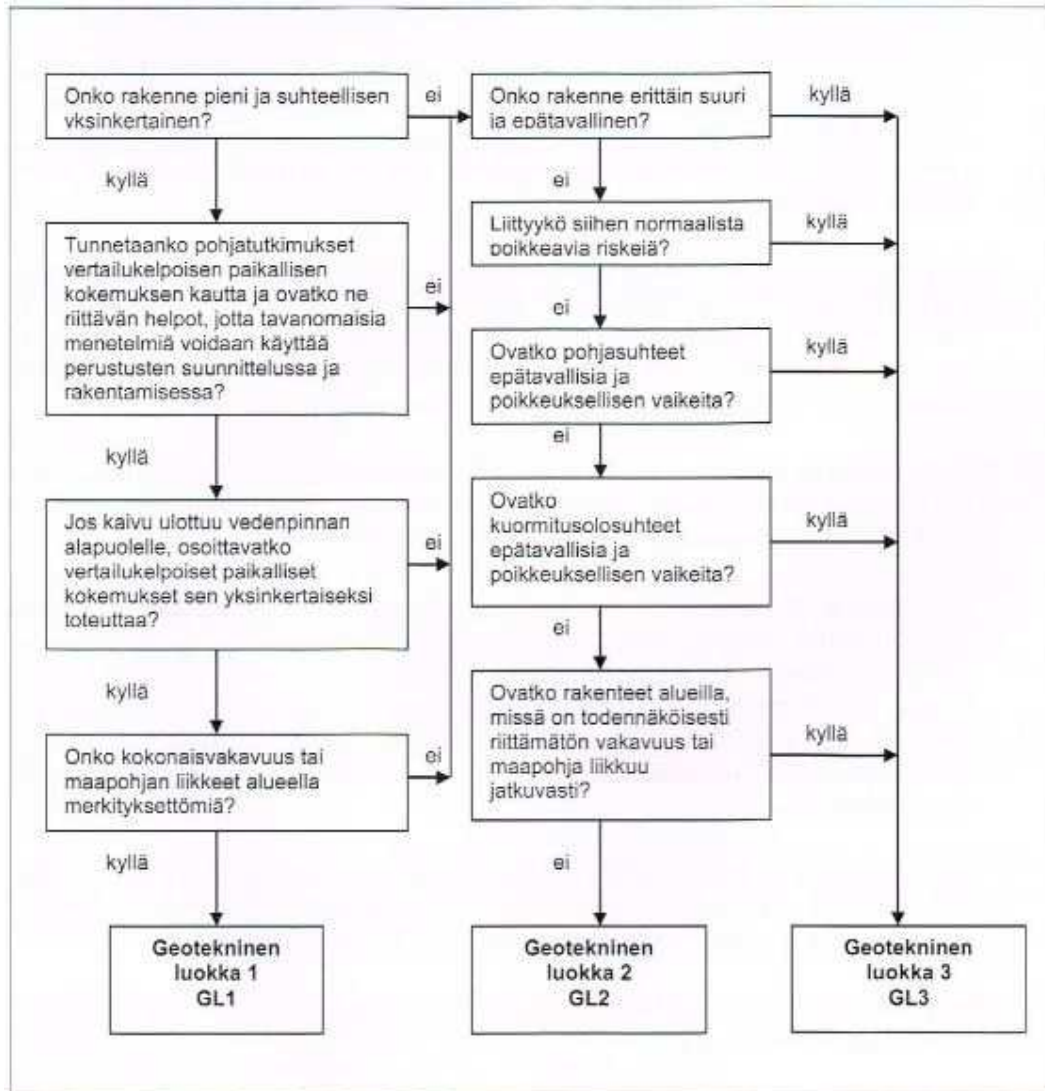
2.4 Geotekninen luokka

Geotekninen luokka määrittää suunnitteluvaatimukseltaan 1, 2 ja 3 luokat. Luokka valitaan kohteen vaativuuden ja perustamisolosuhteiden perusteella.

Geoteknisen luokan 1 eli helppojen kohteiden rakennuspaikka on kallio- ja/tai moreenialueella tai muulla saman kantavuuden omaavalla alueella. Suunnittelussa ei tarvitse käyttää lisätutkimuksia, jos maastokatselmuksella varmistutaan maaperästä. Tämän luokan maa on erittäin kantavaa ja sitä ei yleensä tarvitse paaluttaa.

Geoteknisen luokan 2 kohteissa eli vaativissa kohteissa tarvitaan geoteknisiä tutkimuksia ja analyysejä. Paalutuksen tarvitseva maa-alue on lähtökohtaisesti aina vähintään geotekninen luokka 2.

Geotekninen luokka 3 eli erittäin vaativat kohteet: epätavalliset ja suuret rakenteet vaativat aina perusteelliset pohjatutkimukset. /1, sivu 29-32/



Kuva 1. Paalutusluokat

2.5 Aggressiivinen maaperä

Suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon ympäristöolosuhteiden aggressiivisuus. Näin voidaan antaa varmuuskertoimet materiaaleille jo suunnitteluvaiheessa. Esimerkiksi laskentaohjelmaani käytettäessä täytyy ottaa huomioon betonin syöpyminen ja betoniteräksen korroosiovarmuus.

Tyypillisiä vaurioita betonille aiheuttavat hapot, sulfaattisuolat, happamat jätevedet, suolainen merivesi ja teollisuusjätteet, kuten rikkihappo ja sulfidivetyksi. Tyypillisiä vaurioita betonille aiheuttavat hapot, sulfaattisuolat, happamat jätevedet, suolainen merivesi ja teollisuusjätteet, kuten rikkihappo ja sulfidivetyksi.

Teräsbetonia suunniteltaessa otetaan huomioon suojabetonipeite ja betonin halkeilu, josta johtuu teräkselle pistekorrosiota. Betonin halkeiltua happi pääsee vaikutukseen teräksen kanssa ja näin ollen aiheuttaa pistemäisen korroosion. Ajan saatossa pistemäinen korrosio menee teräksen läpi ja katkaisee sen. Tästä aiheutuu merkittävä rakenteellinen muutos ja pahimmassa tapauksessa paalu murtuu.

Teräkselle vahingoittavia tekijöitä ovat kosketus vapaan veden kanssa ja happi, joista aiheutuu korroosiota. Korrosio otetaan huomioon laskennassa tavallisesti korrosiovarana.

Hapen läsnä ollessa eli pohjaveden yläpuolella puupaalut ovat alttiita sienille ja aerobisille bakteereille. /1, sivu 41/

3 KAIVINPAALU

Tässä luvussa käyn läpi yleiset asiat kaivinpaalujen ominaisuuksista ja niiden huomioon ottamisesta asennuksessa.

3.1 Eri paalutyypit

Suomessa yleisempiä kaivinpaalutyyppejä ovat CFA-paalut sekä pien- ja suurporapaalut. CFA-paalu on yhtämittaisella augerruuvilla tehtävä paalutus, jossa ruuvien onton keskiosan kautta pumpataan betonia samalla, kun ruuvia nostetaan ylös. Porapaalussa käytetään yleensä suojaputkea, joka jossain tapauksissa voidaan myös jättää osaksi paalun rakennetta. Tällöin kyseessä on liittorakenteinen paalu. /1, sivu 135/

Laskentaohjelmaani ei voi käyttää liittorakenteisten paalujen kestävyuden laskemiseen. Kyseessä täytyy olla joko pelkästään teräsbetoni- tai betonirakenteinen paalu.

3.2 Yleistä kaivinpaalun asennuksesta

Kaivinpaaluja tehtäessä täytyy välttää veden virtausta, koska tämä saattaa aiheuttaa maan häiriintymistä. Jos maaperä on huonoa eikä pysy koossa, on käytettävä kaivannon tuentaa. Huonoksi maaperäksi voidaan luokitella esimerkiksi savi tai muuta hienorakeinen maa-aines. Näistä yleisin on suojaputken käyttö. Kaivettu paalukaivanto on betonoitava välittömästi kaivun jälkeen, kun puhdistus ja raudoitus on tehty. /1, sivu 211/

3.3 Paalun paikallavalu

Paaluissa voidaan käyttää vähintään C20/25-lujuista betonia. Suunnittelija voi myös jossain tapauksissa määrittää paaluille korkeamman lujuusluokan betonia, jos maaperä sen vaatii. Betoni täytyy tehdä oikeilla sekoitussuhteilla. Sen on oltava myös tarpeeksi notkeaa niin, että se on helposti työstettävissä. /1, sivu 151-152/

Tekemässäni ohjelmassa on myös mahdollisuus käyttää alemman kuin C20/25-lujuusluokan betonia. Suunniteltaessa paaluja ulkomaille, joissa ei voida olla var-

moja betonin laadusta, on käytettävä alemman lujuusluokan betonia. Alemman lujuusluokan betoni voi olla esimerkiksi C12/16.

3.4 Paalun kärjet

Paaluihin asennetaan joko maa- tai kalliokärkiä olosuhteista riippuen. Lyöntipaaluihin asennetaan aina kärkikappaleet. Kaivinpaaluissa sama asia korvataan riittäväällä porauksella joko kallioon tai kantavaan maaperään. Laskentaohjelmani ei laske poraussyvyyttä muille paalutyypeille kuin vetopaaluille. (Kts. kohta 4.8 tarkemmin vetopaaluista.) /1, sivu 161/

3.5 Asennuksen suunnittelu

Suunnittelussa täytyy ottaa huomioon kantavan maan tai kallion pohjan muoto sekä syvyys, mihin paalun täytyy vähintään ulottua. Kohtia, missä paalu voi osua esteisiin on vältettävä. Jos kuitenkin on vaarana, että paalu osuu esteisiin, suunnitelma on tarkastettava.

Este pyritään aina ensisijaisesti poistamaan. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi meislaaminen tai räjäyttäminen. Jos nämä toimenpiteet eivät ole mahdollisia, on paalu varmistettava lisäpaaluilla. /1, sivu 179/

3.6 Paikalla valettavien paalujen raudoittaminen

Paalujen terästen on oltava SFS-EN 10080-standardin mukaisia. Paikalla valettavien paalujen raudoitus täytyy olla vähintään pehmeän ja/tai löysän maan kohdassa. Vetopaalut raudoitetaan kokonaisuudessaan. Korroosiovara eli betonipeite täytyy aina ottaa huomioon raudoitusta suunniteltaessa.

Pääraudoituksen määrä on vähintään 4 x 12 mm teräksiä, joiden väli täytyy olla riittävän suuri, vähintään 100 mm, mutta ei kuitenkaan enempää kuin 400 mm.

Hakojen, vanteiden tai kierrehakojen täytyy olla halkaisijaltaan vähintään 6 mm (tai neljäsosa päärautojen koosta) ja hitsattu teräsverkko 5 mm. /1, sivu 180/

4 SUUNNITTELU

Tässä luvussa selvitän teoriassa, mitä laskentaohjelmani laskee kohta kohdalta. Laatimani laskentaohjelmaa käytettäessä on tiedettävä tässä luvussa kerrottavat asiat, jotta ohjelmaani voidaan hyödyntää mahdollisimman hyvin.

Laskentaohjelmastani on rajattu pois kohdat 4.2 paalun nousu, 4.3 sivukuorma, 4.4 paalujen koekuormitukset

4.1 Maaperästä aiheutuvat kuormat

Maapohjasta syntyy erilaisia kuormia, jotka aiheutuvat konsolidaatiosta, maan noususta, viereisistä kuormituksista, plastisista muodonmuutoksista sekä maan poikittaisesta liikkeestä.

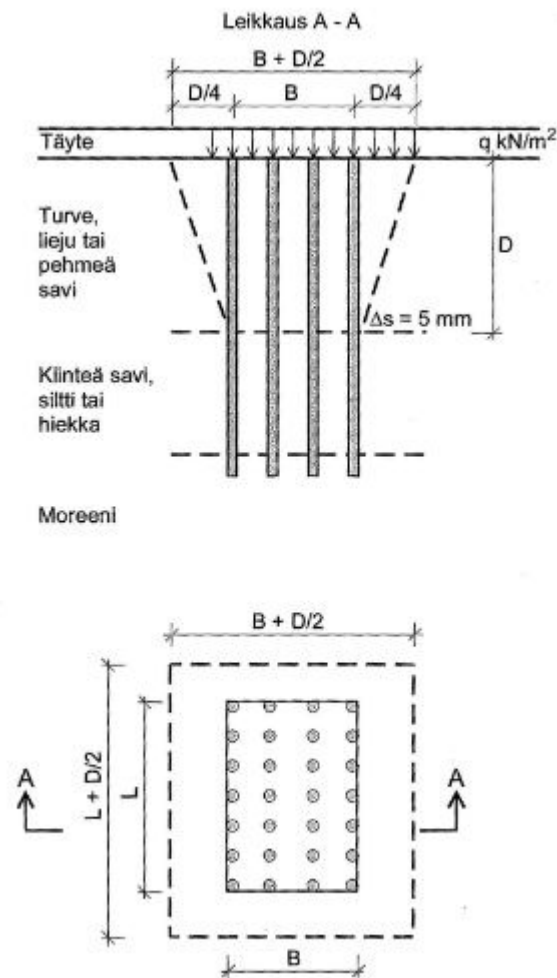
Negatiivinen vaippahankaus tarkoittaa sitä, kun paalun ympärillä oleva maa painuu enemmän kuin paalu ja aiheuttaa täten paalulle lisäkuormaa. Tämä tulee vaikuttavaksi tekijäksi lähestulkoon aina saviperäisessä maassa. Varsinkin, jos alueella on pohjaveden alenemista. Negatiivinen vaippahankaus otetaan huomioon sille syvyydelle, jossa maan painuma on 5 mm suurempi kuin paalun painuma. /1, sivu 50/

Negatiivinen vaippahankaus lasketaan kaavasta:

$$F_{\text{neg}} = p * D * c_u * \gamma_s$$

Missä: p	paalunympärysmitta
D	syvyys, jossa maan painuma on 5mm suurempi kuin paalujen
α	adheesiokerroin
γ_s	paalun vaippakestävyuden osavarmuusluku

Tekemässäni laskentaohjelmassa on huomioitu negatiivisen vaippahankauksen vaikutus. Tämä lisäkuorma on laskettu kokonaiskuormiin.



Kuva 2. Negatiivinen vaippahankaus

4.2 Paalun nousu

Maan tai paalun nousu voi johtua kuormituksen poistamisesta, maan kaivusta, routaantumisesta tai viereisen paalun lyönnistä. Maan pohjan nousua ei saa tapahtua, koska se voi johtaa paalun nousemiseen. /1, sivu 52/

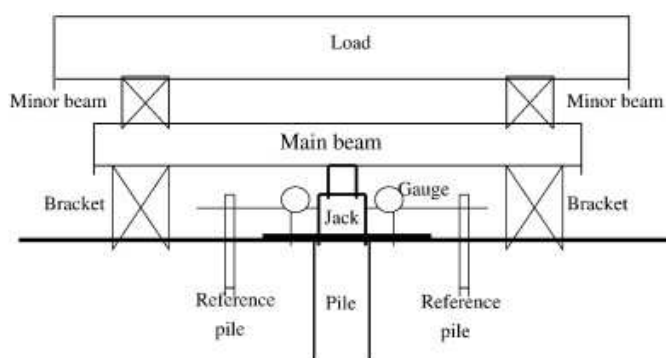
4.3 Sivukuorma

Sivuttaisia kuormituksia ilmaantuu, kun paalu on luiskassa, jossa tapahtuu virumaa. Sivuttaiskuormaa aiheuttaa myös vinopaalu painuvassa maassa tai paalu alttiina ulkopuolisille voimille ja pakkovoimille. Sivukuorma on liian suuri, jos paalu leikkautuu maan läpi tai sen rakenne murtuu. /1, sivu 52/

4.4 Paalujen koekuormitukset

Koekuormitukset voidaan tehdä joko staattisesti tai dynaamisesti. Koekuormituk-
sia voidaan tehdä useita tai ainoastaan yksi, mutta tällöin valittu paikka tulisi olla
epäedullisin. Käytettäessä 2-3 koepaaluja olisi ne sijoitettava, niin että toinen paa-
luista on tulevan rakennuspaikan kohdassa ja toinen epäedullisessa kohdassa.
Asennuksen ja koekuormituksen välillä tulisi olla riittävä aika. Näin voidaan olla
varmoja, että paalumateriaalin vaatima lujuus on saavutettu. Paalutusluokassa 3
lyötävien paalujen geotekninen kestävyys varmistetaan aina dynaamisella tai
staattisella kuormituksella. /1, sivu 54/

Staattinen koekuormitus tulisi tehdä ISSMFE:n kenttä- ja laboratoriokokeiden
alacomitean suositusmenetelmän ”Axial Pile Loading Test, Suggested Method”
mukaan. Staattisen koekuormituksen voi tehdä kahdella pääsääntöisellä menetel-
mällä. Toisessa menetelmässä paaluja painetaan maahan vakionopeudella ja tarvit-
tava kuorma mitataan. Yleisemmin käytetty menetelmä on kuitenkin niin sanottu
portaittaismenetelmä, jossa kuormaa lisätään portaittain ja vakiokuorman aiheut-
tama paalun painuma mitataan. Staattisen menetelmän käytön hyvinä puolina voi-
daan todeta, että menetelmä vastaa hyvin paalun oikeaa kuormitustilannetta ja se
on yksinkertainen ja erittäin luotettava. Huonoina puolina voidaan mainita hitaus,
kalleus ja se, että tunkkeja on vaikea löytää isoille voimille. /1, sivu 55/



Kuva 3. Staattinen koekuormitus

Vaikka tämä työ keskittyy pohjatutkimustulosten perusteella alustavaan mitoittamiseen, on paaluja mahdollisuus myös mitoittaa dynaamisella koekuormituksel-

la eli PDA-mittauksella. Mittaus suoritetaan työmaalla iskuaaltomittauksina venymä- ja kiihtyvyyssantureilla. Iskuaallon paaluun aiheuttaa lyöntilaite. Koska kaivinpaalut lähestulkoon aina ovat suurikokoisia, on varsinkin Suomessa vaikea löytää tarpeeksi painavaa lyöntikalustoa. Juntan painon tulisi olla 1-2 % paalun kantokyvystä. /3, sivu 59-62/

Koekuormitus pyritään aina tekemään staattisella mallilla, koska se on luotettavin. Se on kuitenkin aikaa vievää ja siten kallista, joten yleensä päädytään valitsemaan dynaaminen koekuormitus. Näin ollen isojen kaivinpaalujen mitoittamisessa nojaututaan pääosin pohjatutkimustuloksiin. /4/

4.5 Paalun geotekninen puristuskestävyys

Pohjatutkimustulosten perusteella voidaan laskea paaluja kahdella eri menetelmällä, mallipaalumenetelmällä ja vaihtoehtoisella menetelmällä. Laskentaohjelmani käyttää vaihtoehtoista menetelmää, joka on esitetty myös tässä kohdassa (4.5).

Mallikerrointa käyttämällä, otetaan huomioon seuraavat seikat:

- analyysimenetelmän tulosten epävarmuusalue
- tiedossa olevat analyysimenetelmään liittyvät systemaattiset virheet

Tämä tutkielma kuitenkin pohjautuu vaihtoehtoiseen menetelmään, jota on käytetty myös itse laskentapohjassa.

Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla:

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

Kullekin paalulle tulee johtaa $R_{b;d}$ eli vaippakestävyyden mitoitusarvo ja $R_{s;d}$ eli kärkikestävyyden mitoitusarvo:

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

Vaihtoehtoisen menetelmän ominaisarvot saadaan laskemalla:

$$R_{b;k} = A_b q_{b;k} \text{ ja } R_{s;k} = A_{s;i} q_{s;i;k}$$

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

Pohjatutkimustulosten perusteella laskettu rakenne on suuntaa-antava, eikä siihen voi luottaa täysin sataprosenttisesti. Täten tarvitaan aina varmistus paalun kantavuudelle joko dynaamisella tai staattisella koekuormituksella tai luotettavalla paalukaavalla. Geoteknistä puristuskestävyyttä laskettaessa on tiedettävä maalajin rakeisuus, tiheys, kokoonpuristuvuus, vedenläpäisevyys sekä paalun asennusmenetelmä, pituus, halkaisija, materiaali, vaipan muoto, kärjen muoto ja pohjatutkimusmenetelmät. /1, sivu 65/

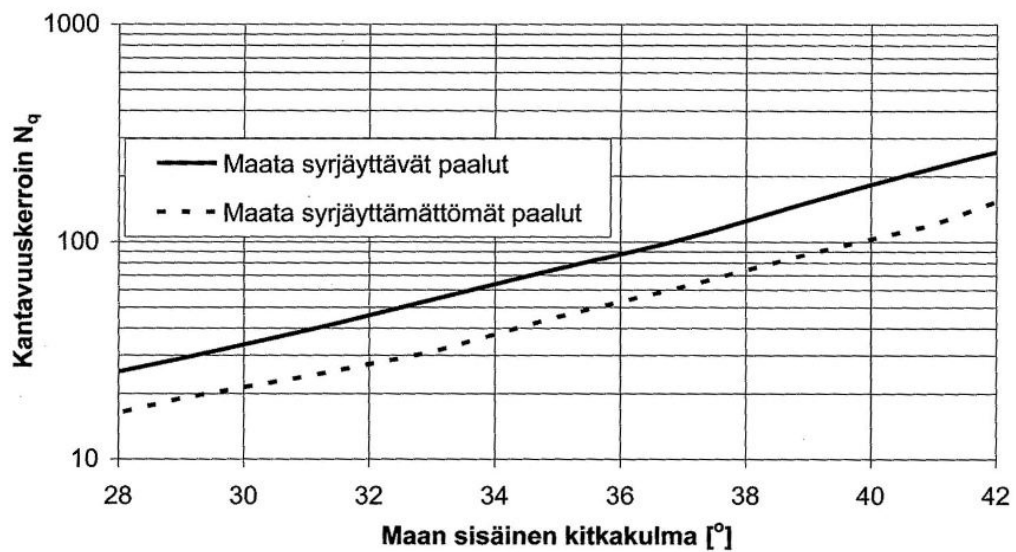
4.6 Maakerrokseen tukeutuvan paalun geotekninen kestävyys

Maakerrokseen tukeutuvan paalun geotekninen kärkikestävyys on laskettava. Paalun kärkivöhyke ulottuu 5d kärjen yläpuolelle ja 3d alapuolelle, kuitenkin vähintään 1 m (d on paalun halkaisija).

Kärkikestävyys lasketaan karkearakeisessa maassa:

$$q_b = \sigma'_{v;b} * N_q$$

Missä N_q on paalun kärjen kantavuuskerroin ja $\sigma'_{v;b}$ on tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla, jotka saadaan taulukoista.

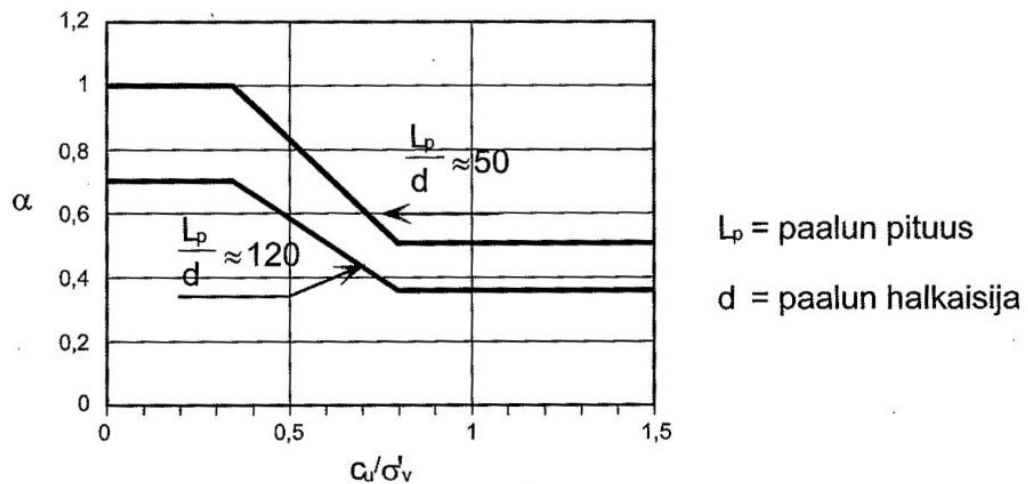


Kuva 4. Kantavuuskerroin

Kärkikestävyys lasketaan hienorakeisessa maassa:

$$q_s = \alpha * c_u$$

Missä α on adheesiokerroin ja c_u maakerroksen suljettu leikkauslujuus. Adheesiokerroin saadaan kuviossa 5.



Kuva 5. Adheesio kerroin

σ'_v on tehokas pystysuora jännitys, joka saadaan pohjatutkimustulosten perusteella.

$$\sigma'_v = \gamma' * z_i$$

Missä γ' on maanpaine ja z_i on paalun pituus.

Pohjatutkimustuloksiin perustuvalla laskentamenetelmällä voidaan suuntaa antavat arvot ottaa suoraan taulukosta erilaisten kairausmenetelmien perusteella.

Taulukko 1. Moduuliluku ja kitkakulma

Maalaji		Puristin- kairaus q_c [MPa]	Paino- kairaus Pk/0,2 m	Heijari- kairaus L/0,2 m	Moduuli- luku m	Jännitys- ekspon- nentti β	Kitka- kulma
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- hiekkä $d_{10}<0,06$	Löyhä	< 10	20–50	5–15	50–150	0,5	30
	Keskitiivis	10–20	50–100	15–30	100–200	0,5	33
	Tiivis	> 20	> 100	> 30	150–300	0,5	36
Hiekka $d_{10}>0,06$	Löyhä	< 6	10–30	5–12	150–300	0,5	32
	Keskitiivis	6–14	30–60	12–25	200–400	0,5	35
	Tiivis	> 14	> 60	> 25	300–600	0,5	38
Sora	Löyhä	< 5,5	10–25	5–10	300–600	0,5	34
	Keskitiivis	5,5–12	25–50	10–20	400–800	0,5	37
	Tiivis	> 12	> 50	> 20	600–1200	0,5	40
Moreeni	Hyvin löyhä	< 10	< 40	< 20	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

Taulukko 2. Kärki- ja vaippakestävyys

Tiiviyys	Kitka- kulma [°]	Paino- kairaus [pk/0,2 m]	Heijari- kairaus N_{20} [l/0,2 m]	CPT q_c [MPa]	Kärkikestävyys q_b [MPa]		Vaippakestävyys q_s [kPa]		
					Lyönti- ja puristus- paalut	Pora- paalut	Injek- toidut paalut	Lyönti- ja puristus- paalut	Pora- paalut
Erittäin löyhä	29–33	< 10	< 5	< 3	< 1,0	< 1,0	< 50	< 15	< 15
Löyhä	33–35	10–20	5–10	3–7	1,0–2,0	1,0–1,5	50–100	15–30	15–25
Keski- tiivis	35–37	20–30	10–15	7–10	2,0–3,0	1,5–2,5	100–150	30–45	25–40
Tiivis	37–39	30–50	15–20	10–14	3,0–4,0	2,5–3,5	150–200	45–60	40–50
Erittäin tiivis	39–42	50–80	20–40	14–20	4,0–8,0	3,5–7,0	200–250	60–90	50–70

4.7 Kallioon tukeutuvan paalun geotekninen kestävyys

Suomessa ei yleensä tarvitse tarkastella paalun kärkikestävyyttä, jos kallio on ehjä. Näin ollen paalun rakenteellinen mitoitus tulee pääasialliseksi.

Kaivinpaalun kontakti kallioon on tarkistettava ennen betonointia. Pohja on puhdistettava huolellisesti huonosta ja rapautuneesta kalliosta. Kallioon tukeutuneena kärkivastus on enintään 16 MPa, kun kalliokontakti on varmistettu ja kairaukset tehty 3 m syvyyteen jokaista paalua kohti. Ilman näitä ehtoja kärkivastus on enintään 11 MPa.

Porapaalun tartunta varmistetaan 3d porauksella, kuitenkin vähintään 0,5 m syvyydelle ja enintään 1,5 m Suomen kallioperällä. Jos kallio on rikkonaista, on syytä varmistaa tartunta syvemmällä porauksella. /1, sivu 71/

Kallioon tukeutuvan paalun kärkikestävyys ominaisarvo saadaan kaavasta:

$$q_{b;k} = \frac{7 * \sigma_{cyl}}{d^{0,2}}$$

[MPa]

Missä σ_{cyl} on Suomen kallioissa 150-300 MPa ja d paalun halkaisija.

Jos oletetaan, että betonin ja kallion välinen tartuntajännitys jakaantuu tasaisesti koko porareian pituudelta, voidaan vaipan geotekninen kestävyys laskea kaavalla:

$$R_{s;k} = \pi * d * D * \tau_{s;k}$$

Missä d on porareian halkaisija, D syvyys ja $\tau_{s;k}$ ominaistartuntalujuus, joka saadaan taulukosta 3 tai lasketaan seuraavasti:

$$\tau_{s;k} = k_b * f_{ctk}$$

Missä k_b sileällä pinnalla on 0,7 ja kierteytetyllä pinnalla 2,0.

Taulukko 3. Vetolujuuden ominaisarvo

Betonin/laastin/ injektointiaineen lujuusluokka	Betonin/laastin/ injektointiaineen vetolujuuden ominaisarvo f_{ctk}	Kovakivilajisen kallion ja betonin, juotoslaastin tai injektointiaineen välisen tartuntalujuuden ominaisarvo $\tau_{s;k}$
C20/25	1,5	0,5–1,0
C25/30	1,8	0,55–1,1
C30/37	2,0	0,6–1,2
C35/45	2,2	0,65–1,3
C40/50	2,5	0,7–1,4
C45/55	2,7	0,75–1,5

4.8 Geotekninen vetokestävyys pohjatutkimustulosten perusteella

Vetokestävyys voidaan määrittellä kahdella tavalla: mallipaalumenetelmällä ja vaihtoehtoismenetelmällä. Mallipaalumenetelmää käytetään silloin, kun paalusta on mittaustulokset joko dynaamisella tai staattisella menetelmällä. Laskentapohjani perustuu vaihtoehtoismenetelmään, jossa kestävyys lasketaan pohjatutkimustuloksien perusteella. Pohjatutkimustuloksilla lasketut kestävyudet on varmistettava koekuormituksella. /1, sivu 83/

Paalun vetokestävyys lasketaan kaavalla:

$$R_{t;d} = R_{t;k} / \gamma_{s;t}$$

missä osavarmuusluku $\gamma_{s;t}$ on 1,2 (vaihtoehtoisessa menetelmässä 1,5) ja vetokestävyyden ominaisarvo $R_{t;k}$ saadaan:

$$R_{t;k} = \sum_i A_{s;i} * q_{s;i;k}$$

$q_{s;i;k}$ on maapohjan eri kerroksien vaippakitkan ominaisarvo.

Tutkimukseni mukaan vaipan geoteknisen kestävyuden ominaisarvo $R_{s;k} = R_{t;k}$

Kallioon ankkuroitavan paalun ankkurointisyvyys lasketaan:

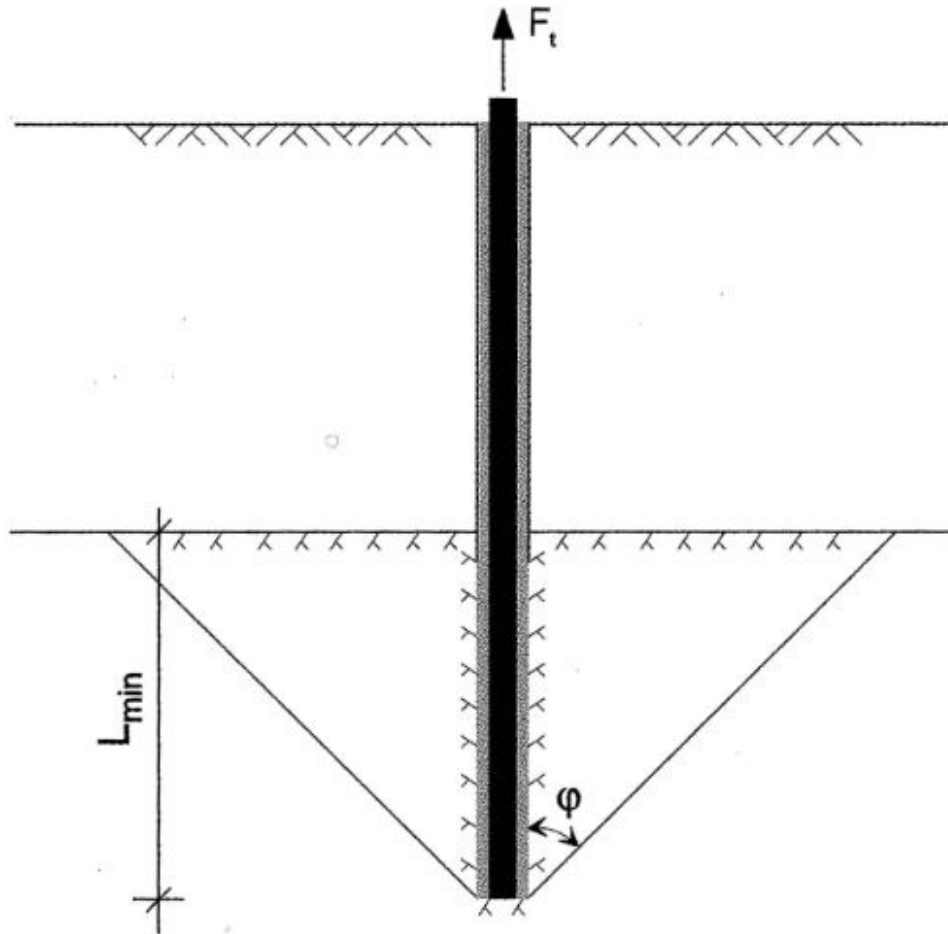
$$L_{\min} = \sqrt[3]{\frac{3 * F_{t;d}}{\gamma * \pi * \tan \varphi}}$$

$F_{t;d}$ = vetokuorman mitoitusarvo

γ = kallion tilavuuspaino (n. 27kN/m^3)

$\varphi = 45^\circ$ homogeenisessa ja 30° rikkonaisessa kalliassa

Tartuntapituus pitää olla vähintään 3 m, ellei rakoiluominaisuuksia ole määritelty.



Kuva 6. Ankkurointisyvyys

4.9 Paalujen pystysuuntaiset siirtymät

Mikäli paalu on tiivistä moreenia tai kalliota vasten, ei pystysuuntaista siirtymää tarvitse tarkastella, koska voidaan olettaa, että siirtymää ei tapahdu. Mitoittavaksi tekijäksi tulee yleensä paalun rakenne ja kimmoinen kokoonpuristuvuus, jos paalu on pitkä. Vedetyt paalut tarkastellaan samoja periaatteita käyttäen.

Painumisen tarkastelu tulee tehdä ensisijaisesti käyttörajatilassa sekä yksittäisestä paalusta että koko paaluryhmästä. Epätasainen painuma on arvioitava myös paaluryhmästä. Kuormissa otetaan huomioon negatiivinen vaippahankaus. /1, sivu 56-87/

Paalun painumisessa otetaan huomioon

- yksittäinen paalu
- paalunryhmän yhteisvaikutus
- epätasaiset painumat paaluryhmässä

Kokonaispainuma saadaan kaavalla:

$$s_0 = s_p + s_b$$

s_p = paalun varren kimmainen kokoonpuristuvuus

s_b = paalun kärjen alapuolisen maan tai kallion kimmainen kokoonpuristuvuus

Paalun varren kimmainen kokoonpuristuvuus lasketaan kaavalla:

$$s_p = F_{k;b} + \alpha_s * F_{k;s}$$

$F_{k;b}$ = paalun kärjen kuormitus käyttörajatilassa

$F_{k;s}$ = paalun vaipan kuormitus käyttörajatilassa (negatiivinen vaippahankaus)

$\alpha_s = 0,5$ tasaisesti jakautuneelle vaippavastukselle

0,66 kolmiomaisesti jakaantuneelle vaippavastukelle

Paalun kärjen alapuolisen maan tai kallion kimmainen kokoonpuristuvuus lasketaan kaavalla:

$$s_b = \frac{D}{E * A} + \frac{4}{\pi} * \frac{F_{k;b}}{M_{s;b} * d}$$

D = paalun kärjen syvyys maanpinnasta

$E \cdot A$ = paalun aksiaalijäykkyys

$M_{s,b}$ = paalun kärjen alapuolella olevan maan kokoonpuristuvuusmoduuli
 hiekka = 1000-2000 MN/m²
 moreeni = 1000-3000 MN/m²

d = paalun halkaisija

4.10 Paalun nurjahduskestävyys

Nurjahduskestävyys tulee mitoittavaksi tekijäksi silloin, kun maan sivuttainen tuki on liian pieni. Näitä tapauksia ovat muun muassa paalut, jotka ovat ilmassa, vedessä tai maakerroksessa, jonka leikkauslujuus on pienempi kuin 20 kN/m². Maan sivuttaistuenta ei käytetä hyväksi, jos leikkauslujuus on pienempi kuin 5kN/m². Aksiaalisesti kuormitetuissa paaluissa otetaan huomioon asennuksen jälkeinen alkutaipuma.

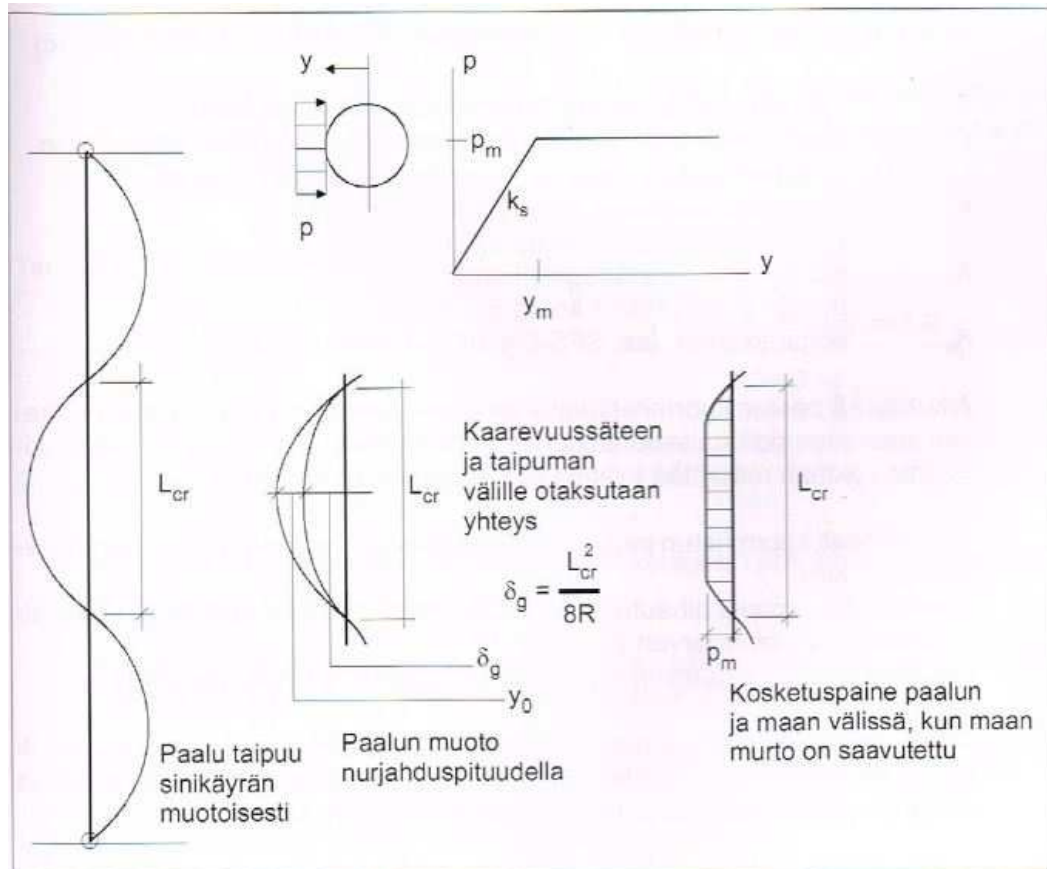
Alkutaipuma [m] lasketaan:

$$\delta_g = \frac{L_{cr}}{300}$$

Taulukko 4. Alkutaipuma

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

Poraamalla ja kaivamalla asennetut paalut ovat yleensä huomattavasti suurempia kuin lyömällä asennetut, koska lyöntipaalut saattavat lähteä ”mutkittelemaan” osuessaan pieniin esteisiin, esimerkiksi kiveen. Tästä syystä alkutaipuma voidaan arvioida kaivin- ja porapaalulla $L_{cr}/500 - L_{cr}/800$. /1, sivu 107/



Kuva 7. Nurjahdus

Alkutaipuman määrittämisessä kriittinen nurjahduspituus [m] saadaan kaavasta:

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

EI = paalun taivutusjäykkyys

$EI = K_c \cdot E_{cd} \cdot I_c + K_s \cdot E_{s2} \cdot I_{s2}$ (teräsbetoni)

k_s = maan alustaluku

$$k_s = 20 \dots 50 \frac{C_u}{d}$$

d_{eff} = paalun halkaisija

$EI = K_c \cdot E_{cd} \cdot I_c + K_s \cdot E_{s2} \cdot I_{s2}$ (teräsbetoni) /5/

E_{cd} = betonin kimmomoduulin mitoitusarvo

E_{s2} = raudituksen kimmomoduulin mitoitusarvo (210 GPa)

I_{s2}, I_c = poikkileikkauksen betonin ja terästen jäyhyysmomentti

K_c = halkeilun, virumisen ym. vaikutusten kerroin (SFS-EN 1992-1, 5.8.7.2)

K_s = raudoituksen vaikutuskerroin /5, 5.8.7.2/

Betonin kimmomoduulin mitoitusarvo lasketaan kaavalla:

$$E_{cd} = E_{cm} * \gamma_{ce}$$

E_{cm} = betonin sekanttimoduuli

γ_{ce} = osavarmuusluku (kussakin maassa käytettävä luku, suositusarvo 1,2)

Betoni poikkileikkauksen jäyhyysmomentti lasketaan kaavasta:

$$I_c = \pi * \frac{d_{pile}^2}{64}$$

Betonin halkeilun ja virumisen vaikutusten kerroin lasketaan kaavasta:

$$K_c = \frac{k_1 * k_2}{1 + \varphi_{ef}}$$

k_1 = kerroin, joka riippuu betonin lujuusluokasta kaavan mukaan:

$$k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20MPa}}$$

k_2 = kerroin, joka riippuu normaalivoimasta ja hoikkeudesta kaavan mukaan

$$k_2 = n * 0,30 \leq 0,20$$

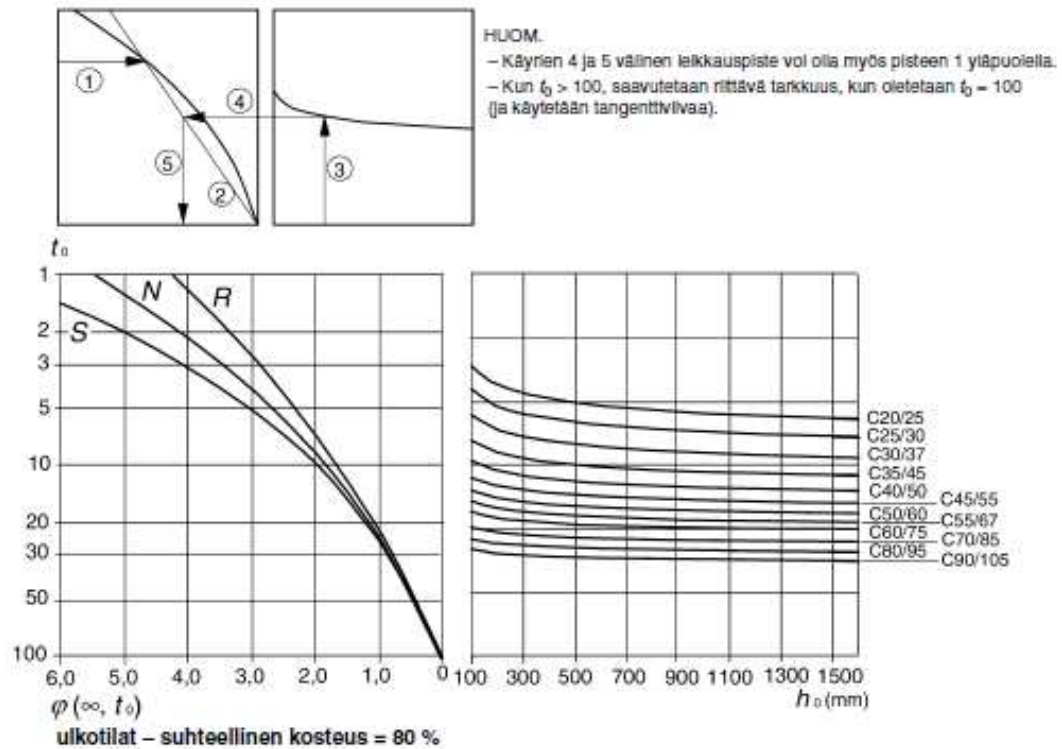
n = suhteellinen normaalivoima $N_{ed} / (A_c f_{cd})$

Virumisaste lasketaan kaavasta:

$$\varphi_{ef} = \varphi_{(\infty, t_0)} * \frac{M_{0Eqp}}{M_{0Ed}}$$

$$M_{0Eqp} = 1,0 * 0,8 * G + 1,0 * 0,2 * \psi^2 * Q$$

$$M_{0Ed} = 1,15 * 0,8 * G + 1,5 * 0,2 * Q$$



Kuva 8. Virumaluvun loppuarvo

Raudoituksen vaikutuskerroin lasketaan kaavasta:

$$\rho = \frac{A_s}{A_c}$$

$$\rho \geq 0,002 \text{ Ks} = 1, \quad \rho < 0,002 \text{ Ks} = 0$$

Teräksien poikkileikkauksen jäyhyysmomentti lasketaan kaavasta:

$$I_{s2} = \pi * \frac{d_{pile}^4}{64}$$

Pystysuuntaisesti kuormitettujen paalujen murtokestävyys nurjahduksen suhteen saadaan, kun paalun taipumasta aiheutuva sivupaine ylittää paalua ympäröivän

maan sivuvastuksen murtoarvon p_m tai paalun poikkileikkauksen rakenteen taivutusmurtokestävyys ylittyy.

Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys [kN] maan murtuessa lasketaan kaavalla:

$$F_{d;s} = \frac{F_{cr}}{1 + \frac{k_s * \delta_g}{p_m}}$$

$F_{d;s}$ = taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa

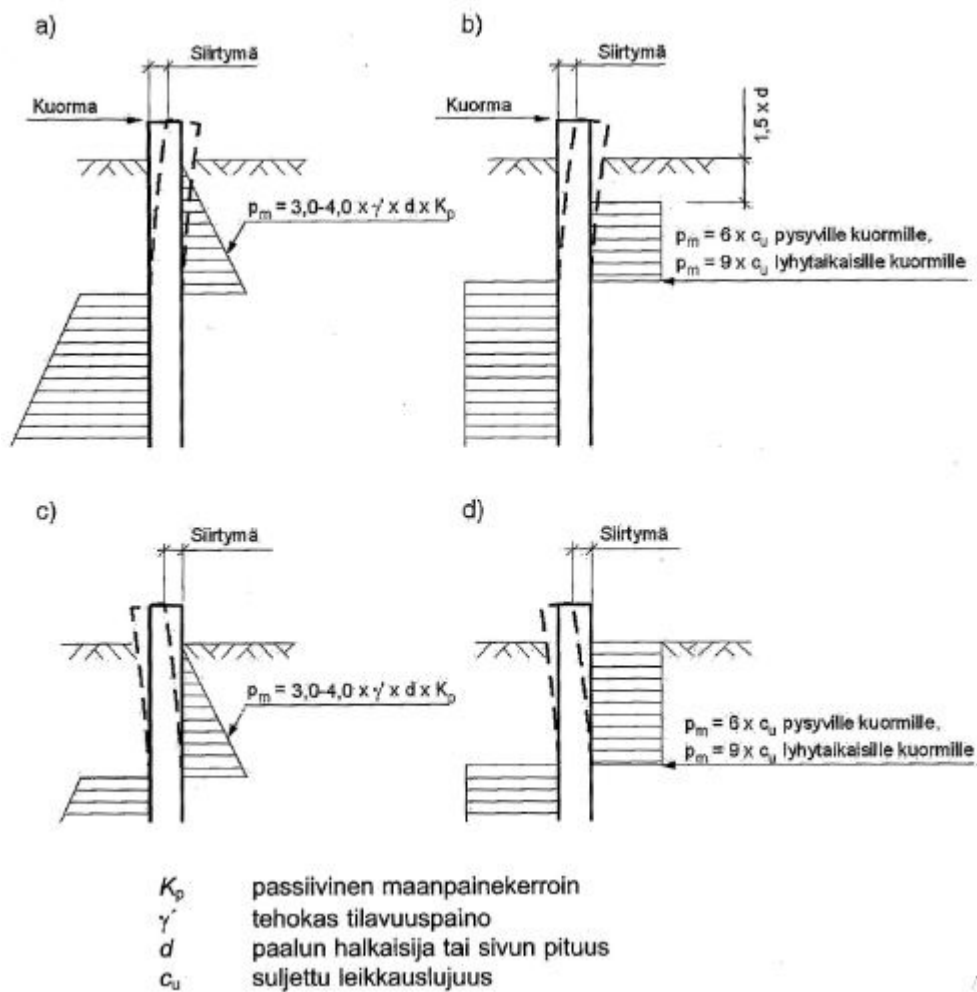
F_{cr} = suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys

δ_g = paalun geometrinen alkutaipuma

p_m = sivuvastuksen ääriarvo

$$p_m = \frac{6 \dots 9 * c_u}{1,5} \quad (\text{hienorakeisessa maassa})$$

$$p_m = 3 \dots 4 * \gamma' * d * K_p \quad (\text{karkearakeisessa maassa})$$



Kuva 9. Sivuvastuksen ääriarvo

Suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa lasketaan kaavalla:

$$F_{cr} = 2 * \sqrt{k_s * d_{eff} * EI}$$

Teräsbetonipaalun mitoitus tehdään EC 1992-1 mukaan.

5 LASKENTAOHJELMA

5.1 Käyttötarkoitus

Ohjelma tehtiin jokaisen teräsbetonisuunnittelijan käyttöön, joilla ei ole aikaisempaa kokemusta tai tuntemusta tukipaaluista. Ohjeet on tehty helpoiksi ymmärtää. Kuitenkin jokaisen käyttäjän on sisäistettävä asia perusteellisesti.

Laskentapohjalla saadaan laskettua ainoastaan raudoitteella vahvistetut kaivettavat paalut. Kaivettaviksi paaluiksi voidaan luokitella kaikki maata syrjäyttämättömät paalut, kuten kaivin-, CFA- ja Kelly bar-paalu.

Paalut voivat olla joko tuki- tai kitkapaaluja. Tukipaalujen täytyy olla hyvin poratuna kantavaan maalajiin, kuten tiiviiseen moreeniin tai kallioon.

Tämä ohjelma tukee olemassa olevaa eurokoodissa esitettyä pilarin mitoitusohjelmaa. Excel-pohjainen ohjelma laskee ainoastaan geoteknisen kestävyuden sekä nurjahduspituuden kaivinpäalulle. Se ei laske esimerkiksi paalun rakennetta. Nurjahduspituutta voidaan käyttää pilarin mitoittamisessa, jolla saadaan paalun rakenteellinen mitoitus. Geoteknisissä laskelmissa tarkastellaan:

- maasta kohdistuvia kuormia, ns. negatiivista vaippavastusta
- tukipinnan läpäisevyyttä eli geoteknistä puristuskestävyyttä
- erityisesti mastorakenteita ja vetokestävyyttä
- aksiaalisia siirtymiä pitkille paaluille

Tarkastelu tehdään pohjatutkimustulosten perusteella, joten yksityiskohtaiset kairaustulokset täytyy olla saatavilla laskentaan. Ohjelmassa olevista taulukoista on saatavilla ohjeelliset arvot, jos tiedetään paino-, heijari- tai puristinkairaustulokset. Pohjatutkimustulokset ovat aina suuntaa antavia eikä niihin voi luottaa sata prosenttisesti. Tästä syystä myös tämän ohjelman laskelmat ovat suuntaa antavia. Referenssipaalut ovat aina koekuormitettava joko staattisella tai dynaamisella koekuormituksella. Näin varmistutaan paalujen kantavuudesta.

5.2 Lähtötiedot ja tulokset

Laskentaan tarvitaan paljon lähtötietoja, jotka tässä laskentapohjassa täytyy sijoittaa välilehdille Input ja soil. Lähtötiedot voidaan jaotella seuraavasti:

- Kuormat
 - muuttuvat kuormat
 - pysyvät kuormat
 - yhdistetyt kuormat
 - vetokuormitus

- Paalun mitat
 - halkaisija
 - pituus

- Käytettävät materiaalit
 - betoni
 - lujuusluokka
 - betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
 - betonin lieriölujuuden ominaisarvo
 - poikkileikkausala
 - osavarmuusluku
 - teräs
 - teräksen määrä
 - kimmomoduuli

- Maaparametrit (esim. savi tai muu pehmeä maa)
 - tilavuuspaino
 - leikkauslujuus
 - sivuvastuksen ääriarvo
 - alustaluvun kerroin
 - maan korkeus, jossa painuma on enemmän kuin 5mm
 - vaipan osavarmuusluku

- adheesiokerroin
- maan kitkakulma

- Kallioparametrit
 - tilavuuspaino
 - leikkauskestävyyskulma ("kitkakulma") tahokkaiden jännitysten perusteella
 - kokoonpuristuvuusmoduuli
 - koheesiomaan vaakasuuntainen kimmomoduli
 - kallion yksiakselialinen puristuslujuus
 - betonin vetolujuuden ominaisarvo

- Paalutettavan maan perustietoja
 - onko paalu hieno- vai karkearakeisessa maassa?
 - onko paalun pää jäykästi vai vapaasti kiinnitetty?

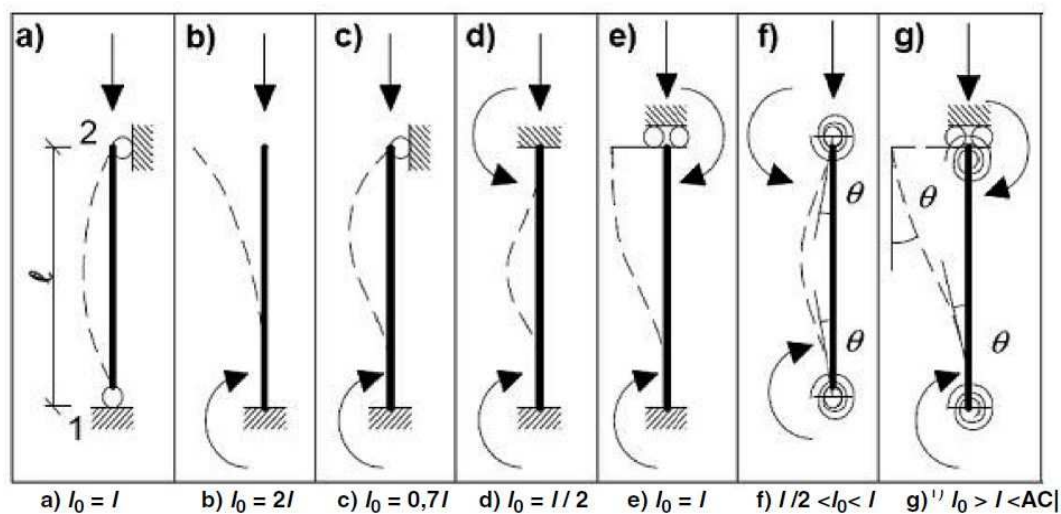
Tarvittavat tiedot pohjatutkimustuloksista:

- Täydelliset heijari-, paino- tai puristinkairaus tulokset
 - kairaustuloksilla saadaan poimittua tarvittavat arvot taulukoista

- Eri maalajien:
 - paksuudet (syvyys)
 - leikkauslujuus
 - tilavuuspaino
 - kitkakulma

Lasketut tulokset vertaillaan kuormien kanssa siten, että ne eivät ylitä paalun kestävyyttä. Yksi pääasiallinen tulos on nurjahduspituus, joka on käytettävissä paalun rakenteelliseen mitoituseseen pilarirakenteena eurokoodin mukaan.

Laskettaessa paalun rakennetta voidaan nurjahdusmuotona pitää kuvassa kohdan a) mukaista tapausta, eli paalun kummatkin päät ovat nivelöitynä.



Kuva 10. Nurjahdusmuoto

5.3 Ohjelman käyttö

Laskentapohja on aputyökalu pilarin mitoittamiseen. Pileri mitoitetaan normaalilla eurokoodin mukaisella menetelmällä. Ennen ohjelman käyttöä on oltava tarkat pohjatutkimustulokset.

Ohjelma koostuu seitsemästä eri välilehdestä, joista laskennan kannalta tärkeimmät ovat Input, Soil ja Output.

Apua tarjoavat välilehdet Instructions ja Flow diagram, joissa on kerrottu koko ohjelman toimintaperiaate ja johdateltu vuokaavio laskelmista.

Ensimmäisenä välilehtenä on Input (lähtötiedot), jonka sisältö on eritelty kappalessa 5.2. Jokaisessa solussa on selitys tarvittavalle lähtötiedolle. Tiedot, joista on jo annettu vaihtoehdot on varustettu alavetolaatikoin.

Geotechnical resistance of the pile based on soil strength parameters		Version 1.0
Pile details		
Soil		
The pile is based on soil		
Fine soil		
The pile is in fine-grained soil		
Exempt		
Head of the pile is exempt		
Forces		
$G_k =$	400	
$Q_k =$	200	
$F_{cd} =$	760 kN	
$F_{td} =$	500 kN	
Dimensions		
$L =$	17000 mm	
$d_{pile} =$	500 mm	
Solid rock parameters		
$\gamma =$	27 kN/m ³	
$\varphi^o =$	30 ^o	
$\alpha_s =$	0,5	
$M_{s,rd} =$	2000 N/mm ²	
$E_s =$	0,8	
$\sigma_{cyl} =$	150 MPa	
$f_{ctk} =$	2,7	
Soft soil layer parameters (clay)		
$\gamma =$	7 kN/m ³	
$c_u =$	10 kPa	
$A_k =$	6 6...9	
$B_k =$	40 20...50	
$D =$	6000 mm	
$\gamma_k =$	1,2	
$\alpha =$	0,8	
$\varphi =$	32 ^o	
Concrete		
C90/105		
$A_c =$	196250 mm ²	
$f_{ck} =$	90 MPa	
$f_{cd} =$	51,0 MPa	
$\alpha_{cc} =$	0,85	
$\gamma_c =$	1,5	
$\gamma_{ca} =$	1,2	
$\varphi(\infty, t_0) =$	2,0	
Steel		
$d_{bar} =$	16 mm	
$n_{bar} =$	6 pc	
$E_{s2} =$	210000 N/mm ²	

Kuva 11. Input

Toinen välilehti on Calculation (laskenta). Tämä välilehti on tulostettavissa suunnitelmadokumentteihin, joissa on esitettävä laskenta. Sivun pitää sisältää seuraavat laskelmat:

- taivutusjäykkyys
- nurjahduspituus
- paalun taipumasta aiheutuva sivupaine ylittää maan sivuvastuksen murtoarvon
- negatiivinen vaippahankaus
- geotekninen puristuskestävyys pohjatutkimustulosten perusteella
- geotekninen vetokestävyys pohjatutkimustulosten perusteella
- paalun pystysuuntaiset siirtymät
- poikittaiskuormitettujen paalujen geotekninen kestävyys pohjatutkimustulosten ja paalun lujuusparametrien perusteella

Kolmannessa välilehdessä Results esitellään tulokset. Lasketut kestävyudet vertaillaan annetuilla kuormilla. Kaikissa vertailuissa, jotka toteutuvat, on perässä merkintä ”OK!”. Niissä vertailuissa, joiden lähtötietoja pitää muuttaa, on perässä ”FALSE”. Kokonaispainuma on annettu millimetreissä ja nurjahduspituus metreissä.

Geotechnical resistance of the pile based on soil strength parameters		Version 1.0
Pile details		Forces
<p><u>The pile will be :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - based on soil - in fine soil <p>and</p> <p>head of the pile is exempt</p>		$G_k = 400$ $Q_k = 200$ $F_{cd} = 760 \text{ kN}$ $F_{td} = 500 \text{ kN}$
		Dimensions
		$L = 17000 \text{ mm}$ $d_{pile} = 500 \text{ mm}$
Solid rock parameters		Soft soil layer parameters (clay)
$\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ $\tan\varphi = 30^\circ$ $\alpha^s = 0,5$ $M_{s,d} = 2000 \text{ N/mm}^2$ $E_s = 0,8$	$\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$ $c_u = 10 \text{ kPa}$ $A_k = 6$ $B_k = 40$ $D = 6000 \text{ mm}$ $\gamma_s = 1,2$ $\alpha = 0,8$	
Steel		
$d_{bar} = 16 \text{ mm}$ $n_{bar} = 6 \text{ pc}$ $E_{s2} = 210000 \text{ N/mm}^2$		
Concrete		
$A_c = 196250 \text{ mm}^2$ $f_{ck} = 90 \text{ MPa}$ $f_{cd} = 51,0 \text{ MPa}$ $\alpha_{cc} = 0,85$ $\gamma_c = 1,5$ $\gamma_{ce} = 1,2 \text{ EN 1992-1-1 s.72}$ $\varphi(\infty, t_0) = 2,0 \text{ EN 1992-1-1 s.36}$		

Kuva 12. Results

Geotechnical resistance of the pile based on soil strength parameters		Version 1.0	
Buckling length			
L_{cr}	=	<input type="text" value="19,9"/> m	
Negative down-drag to pile			
$F_{neg,d}$	=	<input type="text" value="90,5"/> kN	
$F_{ct,d}$	=	<input type="text" value="850,5"/> kN	
The breaking strength of the earths breakpoint			
F_{cr}	=	<input type="text" value="10150,4"/> kN	<i>Straight pile</i>
$F_{d,s}$	=	<input type="text" value="4362,7"/> kN	<i>Deflected pile</i>
$F_{d,s}$	>	$F_{ct,d}$	<i>OK!</i>
<input type="text" value="4362,7"/>	>	<input type="text" value="850,5"/>	
Geotechnical compression capacity (ground investigation)			
$R_{c,d}$	=	<input type="text" value="2120,1"/> kN	
$R_{c,d}$	>	$F_{ct,d}$	<i>OK!</i>
<input type="text" value="2120,1"/>	>	<input type="text" value="850,5"/>	
Geotechnical tensile strength capacity (ground investigation)			
$R_{t,d}$	=	<input type="text" value="911,1"/> kN	
$R_{t,d}$	>	$F_{t,d}$	<i>OK!</i>
<input type="text" value="911,1"/>	>	<input type="text" value="500,0"/>	
The vertical displacement of the pile			
s_0	=	<input type="text" value="2,27"/> mm	

Kuva 13. Results

5.4 Saatujen tulosten analysointi

5.4.1 Nurjahduspituus

Pilarirakenteissa tapahtuu aina nurjahdus, kun sen kuormitus kasvaa isommaksi kuin kantokyky. Maan päällisissä pilareissa voidaan asentaa sivuttaistukia, jotka ottavat nurjahduksen vastaan. Näin saadaan kantokestävyyttä enemmän pilarin fyysistä kokoa kasvattamatta.

Paalu on kuin pilarirakenne ja toimii miltei samalla tavalla. Paalussa maanpaine antaa tukea nurjahdukselle. Tavallisesti paalut ovat pitkiä ja maa ei pysty antamaan tarvittavaa tukea. Tästä syystä joudutaan kasvattamaan paalun rakennetta.

Tämä nurjahdustarkastelu antaa lähtötiedot paalun rakenteelliseen mitoittamiseen. Katso kohta 4.10.

$$L_{cr} = 19,9 \text{ m}$$

Kuva 14. Nurjahduspituus

Nurjahduspituuteen vaikuttaa ainoastaan paalunhalkaisija eli betonin ja teräksen poikkileikkausalat sekä niissä vaikuttavat tekijät ja geotekniset seikat.

Laskentapohjassa tarkasteltavia asioita on ensinnäkin paalun taivutusjäykkyydessä vertailtava arvo k_2 (kerroin, joka riippuu normaalivoimasta ja hoikkuudesta), jonka on oltava pienempi kuin 0,20. Toiseksi vertaillaan arvoa ρ (geometrinen raudoitussuhde A_s/A_c), joka on oltava suurempi kuin 0,002.

$$\rho = A_s/A_c = 0,0384 > 0,002 \quad \text{OK!}$$

Kuva 15. Geometrinen raudoitussuhde

$$k_2 = n * 0,3 < 0,20$$

$$n = N_{ed} / (A_c * f_{cd})$$

$$n = 0,475$$

$$k_2 = 0,142 < 0,20 \quad \text{OK!}$$

Kuva 16. Kerroin, joka riippuu normaalivoimasta ja hoikkeudesta

Mikäli vertailuarvot eivät täyty, on tarkastettava betonin ja raudotteiden suhde sekä niiden poikkileikkausalat ja kasvatettava määriä, mikäli tarkastelussa esiintyy FALSE.

5.4.2 Paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa

Geoteknisesti katsottuna maa antaa paalulle sivuttaistukea niin kuin se todettiin kohdassa 5.4.1. Maa-aineksen ollessa erittäin löysää savea sivuttaistuki jää hyvin vähäiseksi.

Laskettaessa rajatilaa, jossa nurjahdus on jo tapahtunut ja maa murtuu, vertaillaan kuormaa ja kestävyyttä. Kokonaiskuormassa on otettu huomioon negatiivinen vaippavastus, joka antaa lisäkuormaa paalulle. Katso kohta 4.10.

$$F_{cr} = 1624,1 \text{ kN} \quad F_{cr} = 2 * (k_s * d_{pile} * EI)^{1/2}$$

$$F_{d;s} = 698,0 \text{ kN} \quad F_{d;s} = F_{cr} / (1 + (k_s * \delta_g) / p_m)$$

$$F_{c;t;d} < F_{d;s}$$

$$796 > 698 \quad \text{FALSE}$$

Kuva 17. Nurjahduskestävyys

Tapauksessa, jossa paalun geotekninen kestävyys on pienempi ("FALSE") kuin kokonaiskuorma, on paalun poikkileikkausalaa kasvatettava. Merkinnällä "OK!" kuormitustilanne on oikea.

5.4.3 Negatiivinen vaippavastus

Vaippavastus, joka aiheutuu löyhän maan painumisesta, lasketaan mukaan kokonaiskuormiin. Vastuksen aiheuttaa paalun ja maan välinen kitka. Katso kohta 4.1.

$$F_{\text{neg;d}} = 36,2 \text{ kN} \quad F_{\text{neg;d}} = p \cdot D \cdot \alpha \cdot c_u \cdot \gamma_s$$

Kuva 18. Negatiivinen vaippahankaus

5.4.4 Geotekninen puristuskestävyys

Geoteknisessä puristuskestävyydessä otetaan huomioon vaippakitka ja kärkikestävyys, katso kohta 4.5. Kuorman ollessa suurempi kuin puristuskestävyys paalu menee moreeni- tai kalliopohjasta läpi.

Puristuskestävyyden on oltava suurempi kuin kuorma ("OK!")

$$\begin{array}{lcl}
 F_{c;d} < & R_{c;d} & \\
 832 < & 1539 & \text{OK!} \\
 \\
 R_{c;d} & = & 1539,1 \text{ kN} \\
 \\
 F_{c;t;d} & = & 832,38 \text{ kN} \quad F_{c;t;d} = F_{c;d} + F_{\text{neg;d}} \\
 \\
 \text{Soil} \\
 R_{c;d} & = & 1539,1 \text{ kN} \quad R_{c;d} = R_{b;d} + R_{s;d}
 \end{array}$$

Kuva 19. Puristuskestävyys

5.4.5 Geotekninen vetokestävyys pohjatutkimustulosten perusteella

Vetokestävyys tarkastetaan samalla tapaa kuin puristuskestävyys, lukuun ottamatta kärkikestävyyttä. Vaippakitka on sama, on kyseessä sitten aksiaalisesti kohdistunutta puristusta tai vetoa. Katso kohta 4.8.

Vetorasituksen on oltava pienempi kuin vetokestävyys (OK!).

$$R_{t;d} = 728,8 \text{ kN} \quad \textit{Tension strength}$$

Soil

$$F_{t;d} < R_{t;d}$$

$$500 < 728,8 \quad \textit{OK!}$$

Kuva 20. Tulokset, geotekninen vetokestävyys

5.4.6 Pystysuuntaiset siirtymät

Siirtymiä aiheuttaa kuormitetussa paalussa rakenteellinen ja maan kimmainen kokoonpuristuma. Paalun kärjen alapuolinen maa on yleensä niin kovaa, että siirtymää ei tapahdu. Suuremman osan siirtymästä aiheuttaa paalun varren kimmainen kokoonpuristuma.

$$S_0 = 2,47 \text{ mm} \quad S_0 = S_p + S_b$$

Kuva 21. Pystysuuntaiset siirtymät

6 YHTEENVETO

Työn lähtökohtana oli aluksi kaivinpaalun rakenteellinen mitoitus. Työn edetessä kuitenkin todettiin, että paalun rakenteellinen mitoitus tehdään eurokoodin pilarin mitoituksen mukaan. Tilaajalla oli jo olemassa oleva ohjelma pilarirakenteen suunnitteluun ja mitoitukseen. Tästä syystä työn laajuus ja aihepiiri rajattiin uudelleen. Työ päätettiin rajata geotekniselle puolelle, koska tilaajalla ei ollut erityistä osaamista maaparametreista. Tutkielma sai uuden käänteen ja nimi muutettiin ”kaivinpaalun geotekninen kestävyys pohjatutkimustulosten perusteella”.

Aiheen muuttuessa myös itse työ muuttui mielenkiintoiseksi, koska maaparametrien tulkitseminen on erittäin haastavaa. Tästä syystä oli pyydettyä apua ulkopuolisilta asiantuntijoilta, joilla on useamman kymmenen vuoden kokemus geotekniikasta niin käytännössä kuin teoriassakin.

Uudella ohjelmalla saadaan laskettua kaivinpaalun geotekninen kestävyys maaparametreja käyttämällä. Geoteknisten tulosten analysoinneissa on käytettävä geotekniikan asiantuntijoita, jotta voidaan olla varmoja tulosten oikeellisuudesta. Ohjelma antaa aksiaalisesti kuormitetun kaivinpaalun geoteknisen puristus- ja vetokestävyyden, nurjahduspituuden, nurjahduskestävyyden maan murtuessa sekä pystysuuntaisen siirtymän. Laskentaohjelmaan lisättiin myös poikittaiskuormitettujen paalujen geotekninen kestävyys pohjatutkimustulosten ja paalun lujuusparametrien perusteella. Tästä saatua tietoa ei voida kuitenkaan hyödyntää kovin paljon, koska se kertoo ainoastaan paalun jäykkyyden suhteessa maan sivuttaiseen tukeen. Nurjahduspituus voidaan käyttää hyödyksi paalun rakenteelliseen mitoitukseen.

Laskentaohjelmaa ei ehditty vielä testata käytännön työssä, mutta sen sijaan se on tarkastettu ja sillä on suoritettu muutamia harjoituslaskelmia, joissa sen käyttökelppoisuus sekä helppokäyttöisyys on todettu erittäin toimivaksi.

LÄHTEET

- /1/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, RIL 254-1-2011 Paalutusohje, suunnittelun perusteet, Saarijärven Offset Oy 2011.
- /2/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, RIL 207-2009 Geotekninen suunnittelu, Hansaprint Oy 2009.
- /3/ Rantamäki Martti, Pohjarakennus 465, Karisto Oy 1994.
- /4/ Kaivinpaalutus Kelly-menetelmällä. 2009. Teknillinen korkeakoulu.
http://civil.aalto.fi/fi/tutkimus/pohjarakennus/opinnaytteet/d_niko_asikainen.pdf
- /5/ Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, EUROKOODI 2: Betonirakenteiden suunnittelu, 2004.