

Vaakavoimien vastaanottaminen paaluperustuksissa

Riku-Juhani Järvinen

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningen för byggnads- och samhällsteknik

Ekenäs 2022

EXAMENSARBETE

Författare: Riku-Juhani Järvinen
Utbildning och ort: Utbildningen för byggnads- och samhällsteknik, Ingenjör (YH), Raseborg
Handledare: Mats Lindholm, Yrkeshögskolan Novia
Pekka Turunen, Ramboll Finland Oy
Markku Raiskila, Ramboll Finland Oy

Titel: Horisontella krafter i pålfundament

Datum: 1.12.2022 Sidantal: 34 Bilagor: 0

Abstrakt

Detta examensarbete är gjort i samarbete med Ramboll Finland Oy. Arbetet behandlar hur horisontella krafter från byggnader kan överföras till marken med hjälp av pålar.

Lutande pålar kan användas till att överföra horisontella laster till marken. Problemet med lutande pålar kan förekomma när pålarna måste installeras under andra fundament. Annat problem med lutande pålar är att skapa tillräcklig vertikal kraft till pålen. Ett annat sätt att motta horisontella krafter är att utnyttja pålarnas mantelyta. Kapaciteten för pålens mantelyta påverkas stort av markens egenskaper samt pålens dimensioner.

I teoridelen går igenom teorin om lutande pålar och hur man bestämmer mantelytans bärcapacitet. Teorin baserar sig mest på RIL 254–2016 paalutusohje (PO-2016) och RIL 207–2017 Geotekninen suunnittelu böckerna.

En exempelbyggnad används som grund för beräkningarna. Beräkningarna görs för hand, med Excelräknebotten och med Geocalc 5.1 program. Excelräknebottnen gjordes för att påskynda handberäkningarna. Räknebottnen kan räkna krafterna och deras excentricitet. Geocalc 5.1 programmet användes till att räkna mantelytas kapacitet för enskilda pålar. Grupp-effekten av pålgruppen måste ändå räknas skilt.

Som resultat redogörs det hur pålarna skall dimensioneras och hur påldimensionerna samt markens egenskaper påverkar horisontellt belastade pålars beteende. Vid beräkning av mantelytans kapacitet märktes det att en slank påle rör sig mycket mera i sidled jämfört med en tjockare och styvare påle.

Språk: svenska

Nyckelord: pålning, mantelytas kapacitet, horisontal kraft

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Riku-Juhani Järvinen
Koulutus ja paikkakunta: Rakennus ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK), Raasepori
Ohjaajat: Mats Lindholm, Yrkeshögskolan Novia
Pekka Turunen, Ramboll Finland Oy
Markku Raiskila, Ramboll Finland Oy

Nimike: Vaakavoimien vastaanottaminen paaluperustuksissa

Päivämäärä 1.12.2022 Sivumäärä 34 Liitteet 0

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Ramboll Finland Oy:n kanssa. Opinnäytetyössä käydään läpi tapoja, millä rakennukseen vaikuttavat vaakavoimat voidaan siirtää maaperään.

Rakennukseen vaikuttavat vaakakuormat pystytään viemään maaperään paalujen avulla. Vinopaalutus on yleinen tapa siirtää vaakakuormia maaperään. Ongelmia vinopaalutukselle saattaa syntyä, kun paaluja joudutaan asentamaan muiden perustuksien alle. Myös riittävä pystykuorman saavuttaminen vinopaaluille saattaa koitua ongelmalliseksi. Toinen tapa vastaanottaa vaakavoimaa on hyödyntää paalun sivuvastusta. Sivuvastukseen vaikuttaa suuresti maan ominaisuudet sekä paalun jäykkyys.

Teoriaosiossa käydään läpi vinopaalutukseen liittyvä teoria ja sivuvastuksen määrittämiseen tarvittava teoria. Teoria perustuu suurelta osin RIL 254-2016 paalutusohjeeseen (PO-2016) sekä RIL 207-2017 Geotekninen suunnittelu kirjoihin.

Opinnäytetyössä esitetään esimerkkinä rakennus, minkä ympärille laskenta tulee perustumaan. Laskennat suoritettiin käsin, Excel-laskentapohjan sekä Geocalc 5.1 ohjelman avulla. Excel-laskentapohja luotiin yksinkertaistamaan ja nopeuttamaan kuormien käsin laskentaa. Excel-laskentapohjalla pystyy nopeasti laskemaan kuormat ja kuormien epäkeskeisyydet. Geocalc 5.1 -ohjelmaa käytettiin paalujen sivuvastuslaskennan nopeuttamiseen. Ohjelma pystyy laskemaan yksittäisen paalun sivuvastusta, huomioimatta paaluryhmän vaikutusta.

Tämän insinöörityön tuloksena saatiin selville, miten paaluvoimat tulee mitoittaa, ja miten paalutyypit sekä maan ominaisuudet vaikuttavat vaakakuormitettujen paalujen käyttäytymiseen. Sivuvastusta laskiessa huomattiin, että hoikemman paalun sivuttaissuuntainen liike on huomattavasti suurempi verrattuna paksumpaan paaluun.

Kieli: suomi

Avainsanat: paalutus, paalun sivuvastus, vaakavoima

BACHELOR'S THESIS

Author: Riku-Juhani Järvinen
Degree Programme: Construction and civil engineering, Raasepori
Supervisors: Mats Lindholm, Yrkeshögskolan Novia
Pekka Turunen, Ramboll Finland Oy
Markku Raiskila, Ramboll Finland Oy

Title: Horizontal Loads in Pile Foundations

Date 1.12.2022 Number of pages 34 Appendices 0

Abstract

This thesis was written for Ramboll Finland Oy. The goal of this thesis was to find out how to receive horizontal forces with piles.

Horizontal forces affecting a building can be driven into the ground with the help of piles. Inclined piles are a common method of transferring horizontal loads into the soil. Problems with inclined piles may arise when the pile must be installed under other foundations. Achieving a sufficient vertical load on the inclined pile may also be problematic. Another way to receive horizontal loads is to utilize the lateral resistance of the pile. The lateral resistance is greatly influenced by the characteristics of the soil and the stiffness of the pile.

In the theory section, the theory related to inclined piling and the theory of lateral pile resistance was reviewed. The theory was largely based on RIL 254-2016 paalutusohje (PO-2016) and RIL 207-2017 Geotekninen suunnittelu books.

In this thesis, an example building was presented, around which the calculation was based. The calculations were performed by hand, using Excel spreadsheet and the Geocalc 5.1 program. The Excel spreadsheet was created to simplify and speed up manual calculation of loads. With the Excel spreadsheet you can quickly calculate loads and load eccentricities. The Geocalc 5.1 program was used to speed up the calculation of the lateral resistance of the piles. The program can calculate the lateral resistance of a single pile, ignoring the effect of the pile group.

As a result of this thesis, it was found out how pile forces should be dimensioned and how pile type and soil properties affect the behavior of horizontally loaded piles. When calculating the lateral resistance, it was noticed that the lateral movement of a thinner pile is significantly greater compared to a thicker pile.

Language: Finnish

Key words: piling, lateral resistance of piles, horizontal load

Sisältö

1	Johdanto.....	1
2	Kuormat.....	2
2.1	Yleistä.....	2
2.2	Kuormitusyhdistelmät.....	2
2.2.1	Edulliset ja epäedulliset kuormat.....	4
2.3	Vaakakuormat.....	4
2.3.1	Tuulikuormat.....	4
2.3.2	Maanpaine.....	5
3	Paalut.....	6
3.1	Paalujen pääryhmät.....	6
3.1.1	Maata syrjäyttävät paalut.....	6
3.1.2	Maata syrjäyttämättömät paalut.....	6
3.2	Vinopaalut.....	6
3.3	Paaluryhmän mitoitusperiaatteet.....	7
3.3.1	Staattisesti määrätty paalutus.....	7
3.3.2	Paalujen koekuormitukset.....	9
3.3.3	Staattinen ja dynaaminen koekuormitus.....	10
3.3.4	Vastaavanlainen paaluperustus.....	10
3.3.5	Kokemusperäiset tai analyttiset laskentamenetelmät.....	10
3.3.6	Korroosiovara.....	8
3.4	Vaakakuormitetut paalut.....	10
3.5	Kestävyys vaakakuormille.....	11
3.5.1	Sivuvastuksen ääriarvo.....	13
3.5.2	Sivukuormituksen ääriarvo.....	13
3.5.3	Paaluryhmän sivukuormituskestävyys.....	14
3.5.4	Redusointikerroin.....	15
3.5.5	Kitkamaan alustaluku.....	17
3.5.6	Koheesiomaan alustaluku.....	19
3.5.7	Kerroksellisen maan alustaluku.....	20
3.5.8	Sivupaineen ja siirtymän yhteys.....	21
3.5.9	Geocalc 5.1 ohjelma.....	22
4	CASE-Rakennelma.....	24
4.1.1	Vinopaalu.....	25
4.1.2	Paalujen sivuvastus.....	30
4.1.3	Vaakakuorman siirtäminen toisiin perustuksiin.....	32
5	Yhteenveto.....	33

6	Lähteet.....	34
---	--------------	----

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi ei tapoja millä vaakavoimia voidaan paalujen avulla siirtää maaperään. Työn tilaajana on Ramboll Finland Oy. Opinnäytetyön ohjaajina toimivat Yrkeshögskolan Novian osalta Mats Lindholm ja Rambollin osalta Pekka Turunen ja Markku Raiskila. Tahdon kiittää kaikkia ohjaajia hyvästä opastuksesta työn aikana.

Paalujen tehtävänä on siirtää voimia rakennuksesta maaperään. Tehokas tapa vaakavoimien vastaanottamiseen on asentaa vinopaaluja. Vinopaaluilla on ongelmana se, että asennusta saattaa estää muut ympärillä olevat rakennukset. Kaupunkirakentamisella tämä ongelma yleistyy, kun tonttien koot pienenevät ja mahdollisuudet vinopaalutukseen heikentyvät. Toinen tapa siirtää vaakakuormia maaperään on hyödyntää paalujen sivuvastusta. Sivuvastuksen suuruuteen vaikuttavat maaperän koostumus ja paalun jäykkyys. Sivuvastusta hyödyntämällä voidaan vähentää, ellei jopa kokoaan korvata vinopaalut.

Opinnäytetyön tavoite on selvittää, miten vaakavoimia voidaan siirtää maaperään. Vinopaalutuslaskentaan tullaan käyttämään Excel-laskentapohjaa ja käsin laskentaa. Excel-laskentapohja on tehty nopeuttamaan voimien ja niiden epäkeskeisyyksien laskentaa. Sivuvastuslaskennassa käytettiin Geocalc 5.1 ohjelmaa, millä pystyy laskemaan yksittäisen paalun sivuvastuksen. Ohjelma nopeuttaa laskemista huomattavasti, sillä eri paalujen valitseminen käy nopeasti standardimittaisilla paaluilla. Ohjelmalla on mahdollisuus tarkastaa betoni, teräs sekä puu paalujen sivuvastusta.

2 Kuormat

2.1 Yleistä

Kuormat luokitellaan aikariippuvuuden perusteella kolmeen eri kategoriaan. Nämä kolme kategoriaa ovat pysyvät kuormat (G), muuttuvat kuormat (Q) sekä onnettomuuskuormat (A). Pysyvät kuormat ovat esimerkiksi rakenteiden sekä kiinteiden laitteiden omapaino sekä epätasaisten painaumien aiheuttamat välilliset kuormat. Muuttuvat kuormat ovat esimerkiksi rakennukseen kohdistuvat tuuli- sekä lumikuormat. Onnettomuuskuormaksi luokitellaan esimerkiksi räjähdykset ja ajoneuvojen törmäykset.

Näiden kolmen luokan lisäksi tulee kuormat luokitella niiden alkuperän perusteella välittömiksi tai välillisiksi, niiden vaikutuskohdan vaihtelun perusteella kiinteiksi tai liikkuviksi sekä niiden luonteen tai rakenteen vasteen mukaan staattisiksi tai dynaamisiksi. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 58.)

2.2 Kuormitusyhdistelmät

Eurokoodin 1990+A1+AC mukaan tulee jokaisessa määräävässä kuormitustapauksessa yhdistämällä määrittää sellaisten kuormien arvot, joiden katsotaan esiintyvän samanaikaisesti. (SFS-EN 1990 + A1 + AC 78.)

Kuormitusyhdistelyyn käytetään STR- ja GEO-rajatiloissa epäedullisempaa arvoa seuraavista kaavoista:

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} \quad (3.1)$$

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_i > 1 \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (3.2)$$

missä

$G_{kj,sup}$ ovat epäedulliset pysyvät kuormat

$G_{kj,inf}$ ovat edulliset pysyvät kuormat

$Q_{k,1}$ määräävä muuttuva kuorma

$Q_{k,i}$	muut muuttuvat kuormat
ψ	on yhdistelykerroin (taulukko 2)
K_{FI}	on kuormakerroin (taulukko 1)

(RIL 207, 2017 51.)

Kaavan 4.1 ja 4.2 KFI sekä ψ -arvot löytyvät taulukoista 1 & 2. KFI:n arvo määräytyy rakennuksen seuraamusluokasta ja ψ -arvo hyötykuorman luokasta.

Taulukko 1. KFI arvot

Seuraamusluokka	Kfi
CC1	0,9
CC2	1
CC3	1,1

(Rakenteiden lujuus ja vakaus 19.)

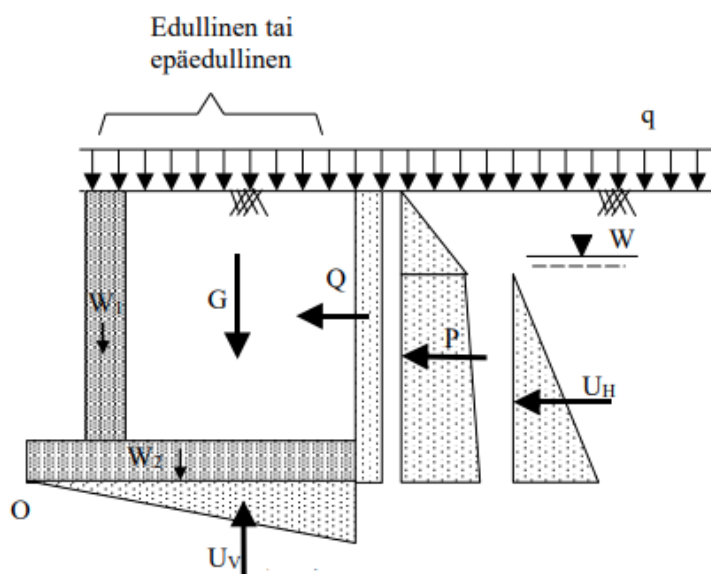
Taulukko 2. ψ - arvo rakennuksissa

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6**)
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3**)
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3)*) kun			
$s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ***)	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
*) Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huomautus: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. **) Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$ ***) Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia			

(Rakenteiden lujuus ja vakaus 18.)

2.2.1 Edulliset ja epäedulliset kuormat

Kuormat, jotka vaikuttavat kellarin seinään (kuva 1) ovat joko edullisia (vakauttavia) tai epäedullisia (kaatavia). Seinän omapaino (W) on maapohjan kantokestävyyden suhteen yleensä epäedullinen, mutta liukumisen kannalta edullinen. Pintakuorma (q) toimii maanpainon (G) tapaan edullisesti anturan päällä, mutta muuttuu epäedulliseksi anturan takana. Vedenpainetta (U_h & U_v) ei oteta huomioon tässä opinnäytetyössä, koska rakenteet sijaitsevat pohjaveden yläpuolella. (NCCI 7 32-33.)



Kuva 1. Tukimuriin vaikuttavat kuormat. (NCCI7, 2017, 33.)

2.3 Vaakakuormat

2.3.1 Tuulikuormat

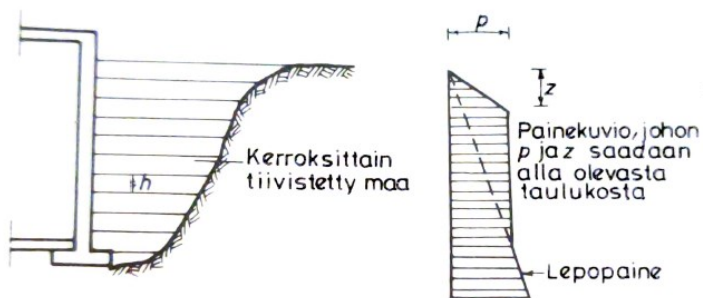
Tuulikuorma on ajan myötä muuttuva voima, joka aiheuttaa suoraan painetta umpinaisten rakenteiden ulkopintoihin ja sisäpintoihin. Tuulikuormat esitetään yksinkertaistettuna paineiden tai voimien joukkona, jonka vaikutukset vastaavat tuulenpuuskan suurinta vaikutusta. Tuulikuormat luokitellaan muuttuviksi kuormiksi, ellei toisin mainita EN 1990 4.1.1 standardissa. (SFS-EN 1991-1-4 + AC+ A1 30.)

Tuulen vaikutus rakenteeseen riippuu rakenteen koosta, muodosta sekä dynaamisista ominaisuuksista.

2.3.2 Maanpaine

Maanpaineeseen lasketaan maan painosta tulevan kuorman lisäksi maan painetta kasvattavat tekijät kuten värinä, tiivistys sekä kuormat, jotka vaikuttavat rakenteeseen maanpaineen välityksellä.

Taustatäytön tiivistyksellä on vaikutusta tukiseinän maanpaineeseen. Tiivistyksestä aiheutuva paine oletetaan kuormittavan tukiseinää vaakasuorasti. Kuvassa 2 esitetään tilanne siirtymättömälle seinälle. (RIL 166 Pohjarakenteet, 1986, 480–481.)



Tiivistyskone	Tiivistyskertojen määrä	Kerros-paksuus h, m	z m	p kPa
Täryjyrä 30 kN	6	0,40	0,5	19
Tärylevy 4 kN	4	0,35	0,5	16
Tärylevy 1 kN	4	0,20	0,3	12

Kuva 2. Tiivistämisen aiheuttama maanpaine siirtymättömälle tukirakenteelle. (RIL 166, 1986, 481.)

3 Paalut

Paalujen tehtävänä on siirtää voimia maahan tai kallioon. Paalut voivat sisältää kuormaa siirtäviä elementtejä, jotka suoraan tai epäsuorasti siirtävät kuormia tai rajoittavat muodonmuutoksia. (RIL 254, 2016, 15.)

3.1 Paalujen pääryhmät

Paalut jaetaan kahteen pääryhmään eurooppalaisten toteutusstandardien mukaan. Nämä kaksi pääryhmää ovat maata syrjäyttävät paalut sekä maata syrjäyttämättömät paalut. (RIL 254, 2016, 15.)

3.1.1 Maata syrjäyttävät paalut

Maata syrjäyttävät paalut asennetaan lyömällä, täräyttämällä, puristamalla tai ruuvaamalla. Maa-ainesta ei poisteta lukuun ottamatta maapinnan nousun tai tärinän rajoittamista, vaikeasti läpäistävien esteiden tai tunkeutumisen helpottamista varten. (RIL 254, 2016, 15.)

3.1.2 Maata syrjäyttämättömät paalut

Maata syrjäyttämätön paalu, toisin sanoen kaivettava paalu asennetaan suojaputken avulla tai ilman kaivamalla tai poraamalla maahan paalukaivanto, joka täytetään raudoitetulla tai raudoittamattomalla betonilla. (RIL 254, 2016, 16.)

3.2 Vinopaalut

Paaluperustuksen vakautta voidaan lisätä vinopaaluilla. Vinopaaluja käytettäessä tulee ottaa huomioon maakerroksissa mahdolliset muodonmuutokset, jotka voivat aiheuttaa rasisitusta vinopaaluille. Perustuksen viereen tulevan täytön paino voi aiheuttaa edellä mainittuja muodonmuutoksia. Täten vinopaalujen suuntaamista vältetään kuormittavan täytteen alle. Poikkeuksellisesti paalut sijoitetaan kuormittavan täytteen alle, jos maan muodonmuutoksista johtuva haitta on erillisin perustamistoimenpitein tai työjärjestyksellä suunniteltu poistettavaksi. Jos edellä mainitut toimenpiteet eivät ole mahdollisia, tulee vinopaalujen mitoituksessa huomioida maan muodonmuutoksista aiheutuvaa taivutusrasitusta. (RIL 254, 2016, 181.)

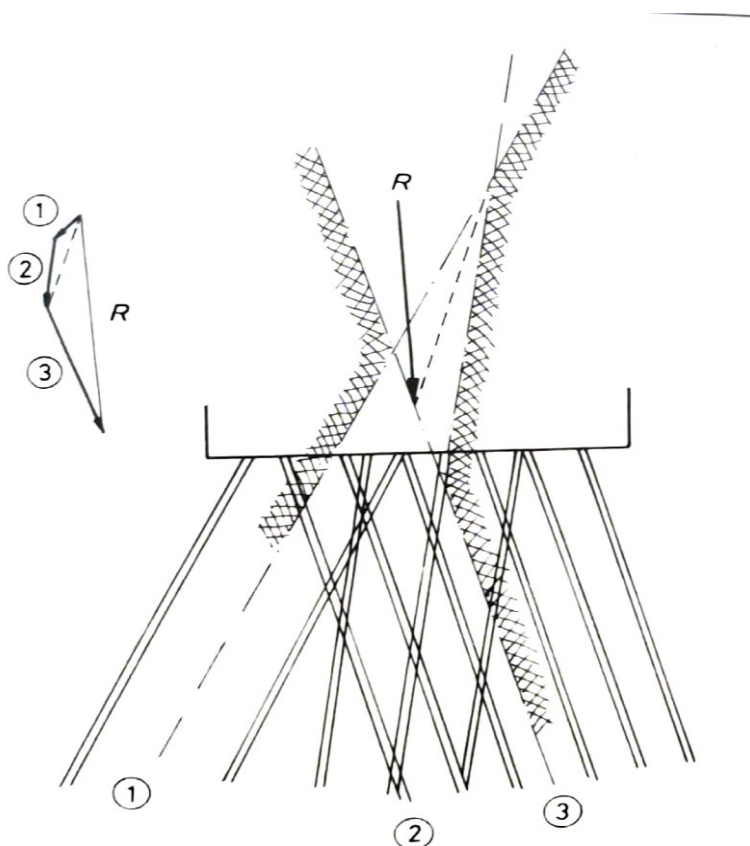
3.3 Paaluryhmän mitoitusperiaatteet

Paaluperustuksessa on pyrittävä jakamaan pysyvää kuormaa tasaisesti eri paaluille. Paalujen kaltevuudet ja sijoitukset riippuvat lyhytaikaisten kuormien suunnan sekä luonteen perusteella. Maan sivuvastuksen hyväksikäyttö mahdollistaa joissain tapauksissa vinopaalujen korvaamisen pystypaaluilla. Vetopaaluja tulee välttää, ellei paaluja ole nimenomaan vetopaaluiksi suunniteltu. (RIL 166, 1986, 194.)

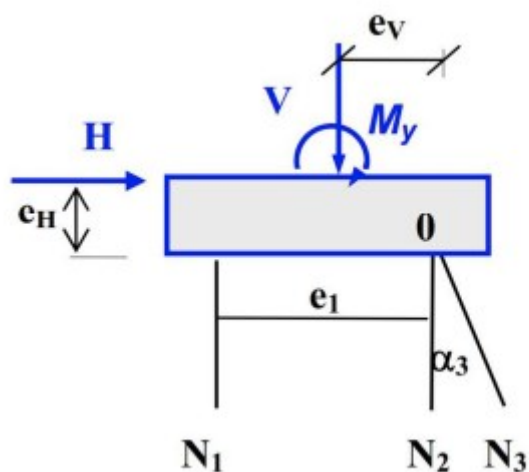
Hyvin suunnitellussa paaluperustuksessa tulee pysyvän kuorman vaikutussuora ja paaluryhmän suurinta jäykkyyttä edustava pääjäykkyyksaksi yhtyä. Tämän lisäksi määräävien kuormitusresultanttien etäisyys perustuksen kiertokeskuksesta tulisi olla mahdollisimman pieni. (RIL 166, 1986, 194.)

3.3.1 Staattisesti määrätty paalutus

Staattisesti määrätty tasopaalutus koostuu kolmesta paalurivistä siten, että paalutuksella on jäykkyyttä kaikkia siihen kohdistuvia kuormituksia vastaan. Paaluvoimat voidaan tällöin ratkaista paaluanturan voima- ja momenttitasapainoyhtälöstä. Tasopaalutuksen muodostuessa yli kolmesta erisuuntaisesta paalurivistä on paalutus staattisesti määräämätön, milloin paaluvoimien laskentaan voidaan käyttää esimerkiksi siirtymämenetelmää. Graafista Cullmanin menetelmää voidaan käyttää, kun tasopaaluryhmässä on kolmensuuntaisia paaluja (kuva 3). Menetelmä on luonteeltaan plastinen mutta sopii kohtuullisen hyvin muillekin, kuin koheesiopaaluille. Mikäli kuormitusresultantti ei leikkaa kuvassa 3 esitettyjä viivoitettuja rajoja ovat kaikki paalut puristettuja. Kuvassa 4 esitetään esimerkki staattisen paalukuorman määrittämiselle. (Yli-Pietilä A. 7-8.) (RIL 166, 1986, 194.)



Kuva 3. Cullmannin graafinen menetelmä (RIL 166, 1986 195.)



Kuva 4. Staattisesti määrätty paalutus (Yli-Pietilä A., 2019, 7.)

3.3.2 Korroosiovara

Paalujen suunnittelussa tulee ottaa huomioon asennuksen jälkeiset suojaustarpeet sekä -toimenpiteet. Teräspaaluilla tulee korroosiosuojauksen koostua esimerkiksi riittävästä uhrattavasta teräskerroksesta, suoja-pinnoitteesta tai erityisistä varotoimenpiteistä.

Suojaamattoman teräsmaalun korroosiomäärä maalun ulkopinnasta on sadan vuoden aikana 1,2–7,5 mm välillä, riippuen asennusympäristöstä. Mikäli teräsmaalu on päästään suljettu tai betonilla täytetty, voidaan korroosio jättää huomioon ottamatta maalun sisäpuolelta. Korroosiolla on suora vaikutus maalun poikkipinta-alaan ja täten maalun taiputusjäykkyyteen. (RIL 254, 2016, 112–115.)

3.3.3 Maalujen koekuormitukset

Maalujen suunnittelussa tulee määrittää maalujen tyyppi ja koko sekä asennustapa, joka soveltuu kyseisiin pohja ja ympäristöolosuhteisiin. Jos aikaisempaa vertailukelpoista maalutustyötä ei ole, tulee yksi tai useampia koe- tai kokeilumaaluja asentaa valittuihin paikkoihin. Koemaalun asennus tarjoaa mahdollisuuden tutkia työmenetelmiä ja laitteita sekä arvioida maalujen asennuksen vaikutusta maaperään ja ympäristöön. Koemaalutukia voidaan käyttää myös asennuskriteerien arviointiin ja antamaan ohjearvoja maalun pituudesta ja geoteknisestä kestävydestä. (RIL 254, 2016, 175.)

Maalujen koekuormituksia voidaan käyttää esim. rakennusmenetelmän sopivuuden arviointiin, edustavan maalun ja ympäröivän maapohjan arviointiin niin painauman, kuin rajakuorman suhteen ja koko maaluperustuksen arvioinnin mahdollistamiseen. (RIL 254, 2016, 53.)

Maalujen koekuormituksia tulee tehdä tapauksissa, missä:

- maalutyypistä tai asennusmenetelmästä ei ole vertailukelpoista kokemusta
- vastaavissa pohja- tai kuormitusolosuhteissa ei ole aikaisemmin koekuormitettu maaluja
- teoria tai kokemus ei anna tarpeellista varmuutta mitoituskeeseen. Koekuormitusmenetelmässä tulee koekuormituksen luonteeltaan vastata ennakoitua kuormitusta
- asennuksen aikana havaitaan maalujen käyttäytymisen poikkeavan huomattavasti ja epäedullisesti oletetusta käyttäytymisestä pohjatutkimusten ja kokemusten perusteella ja mitä lisäpohjatutkimuksetkaan eivät selitä. (RIL 254, 2016, 52–53.)

Kohdissa 3.3.4–3.3.6 käydään läpi paalujen mitoitusmenetelmiä. Mitoituksen täytyy perustua vähintään yhteen näistä menetelmistä.

3.3.4 Staattinen ja dynaaminen koekuormitus

Staattisia ja dynaamisia koekuormituksia täytyy tehdä tapauksissa, joissa paalulle kohdistuu vetokuormaa. Koekuormituksia on tällöin tehtävä vähintään kahdelle paalulle, mutta kuitenkin vähintään 20 % rakenteen paaluista. (Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 58.)

Dynaamisia koekuormituksia voidaan käyttää Suomessa tuki- ja kitkapaaluilla ilman staattisten lisäkuormitusten tekemistä edellyttäen, että riittävät pohjatutkimukset on tehty. (RIL 254, 2016, 51.)

3.3.5 Vastaavanlainen paaluperustus

Mitoitus voi perustua vastaavanlaisen paaluperustuksen havaittuun käyttäytymiseen, jos pohjatutkimusten ja muiden kokeiden tulokset tukevat kyseistä menettelyä. (RIL 254, 51.)

3.3.6 Kokemusperäiset tai analyyttiset laskentamenetelmät

Paalujen mitoitus voi perustua kokemusperäisiin tai analyyttisiin laskentamenetelmiin, jos niiden paikkansapitävyys on selvitetty dynaamisilla tai staattisilla koekuormituksilla vastaavissa olosuhteissa tai yleisesti hyväksytyllä analyyttisellä laskentamenetelmällä ilman koekuormituksia. Tässä opinnäytetyössä keskitytään enemmän analyyttisiin laskentamenetelmiin. (RIL 254, 2016, 51.)

3.4 Vaakakuormitetut paalut

Paalun riittävä varmuus poikittaismitoituskormituksen osalta tulee noudattaa seuraavaa epäyhtälöä kaikilla murtorajatilan kuormitustapauksilla ja kuormitusyhdistelmillä:

$$F_{tr;d} \leq R_{tr;d} \quad (4.1)$$

missä $F_{tr;d}$ kuvaa paalun tai paaluperustukseen kohdistuvaa poikittaisen kuorman mitoitusarvoa ja $R_{tr;d}$ kuvaa paalun geoteknistä kestävyuden mitoitusarvoa poikittaisille kuormille.

Lyhyillä paaluilla murtomekanismina toimii paalun kiertymä tai siirtymä ja pitkillä, hoikilla paaluilla taivutusmurto yhdistettynä ympäröivän maan myötäämiseen ja siirtymiseen paalun yläpään kohdalla.

Paalujen ryhmävaikutus tulee ottaa huomioon, kun arvioidaan poikittain kuormitettujen paalujen kestävyttä. Poikittaissuuntainen kuorma paaluryhmään voi aiheuttaa yksittäiselle paalulle puristus-, veto- ja poikittaisten kuormien yhdistelmän. (RIL 254, 2016, 88–89.)

3.5 Kestävyys vaakakuormille

Laskettaessa vaakakuormien tai -siirtymien suuruutta käytetään rakennemallia, joka ottaa huomioon sekä paalun, että maan muutosominaisuudet. Maan ominaisuuksia voidaan kuvailla esimerkiksi jousilla, jotka tukevat paalua. Jousen jäykkyyden määrää maan jäykkyys, sekä maan ”vaakasuuntaisen kantokestävyden” raja eli sivuvastuksen ääriarvo. Ääriarvon ylityttyä ei jousen voima enää kasva.

Paalu, joka kuormittuu tai tukeutuu maanpaineen ansiosta, oletetaan pääsääntöisesti murtorajatilaksi varren murtuminen. Toissijaisen ehdon muodostaa nurjahdus, jossa murtorajatilana toimivat sekä paalun varren, että ympäröivän maan murtuminen. (Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 59.)

Poikittaiskuormitetun paalun tai paaluryhmän geotekninen kestävyys tulee laskea kuormien, maan vastuksen, siirtymien ja yhteensopivien rakenteeseen kohdistuvien vaikutusten perusteella. Paalun maassa olevan osan murtumisen mahdollisuus tulee ottaa huomioon poikittaiskuormitetun paalun analysoinnissa. Pitkille ja hoikille paaluille voidaan käyttää laskennassa teoriaa päästä kuormitetulle palkille, jota tukee deformatiivinen väliaine. Maan vaakasuuntaista alustalukua käytetään väliaineen mallintamiseen. Arvioitaessa poikittaiskuormitetun perustuksen geoteknistä kestävyttä paalujen ja rakenteen yhtymäkohdassa tulee ottaa huomioon paalujen kiertymävapausasteen määrä. (RIL 254, 2016, 90.)

Poikittaiskuormitetun paalun käyttäytyminen riippuu maan ja paalun suhteellisesta jäykkyydestä sekä paalun kiinnityksestä rakenteeseen.

Poikittaiskuormitetun paalun käyttäytymistä voidaan alustavasti arvioida hienorakeisessa maassa parametrilla R ja karkearakeisessa maassa parametrilla T .

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{E_s}} \quad (4.2)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \quad (4.3)$$

missä:

EI Paalun taivutusjäykkyys (kNm^2)

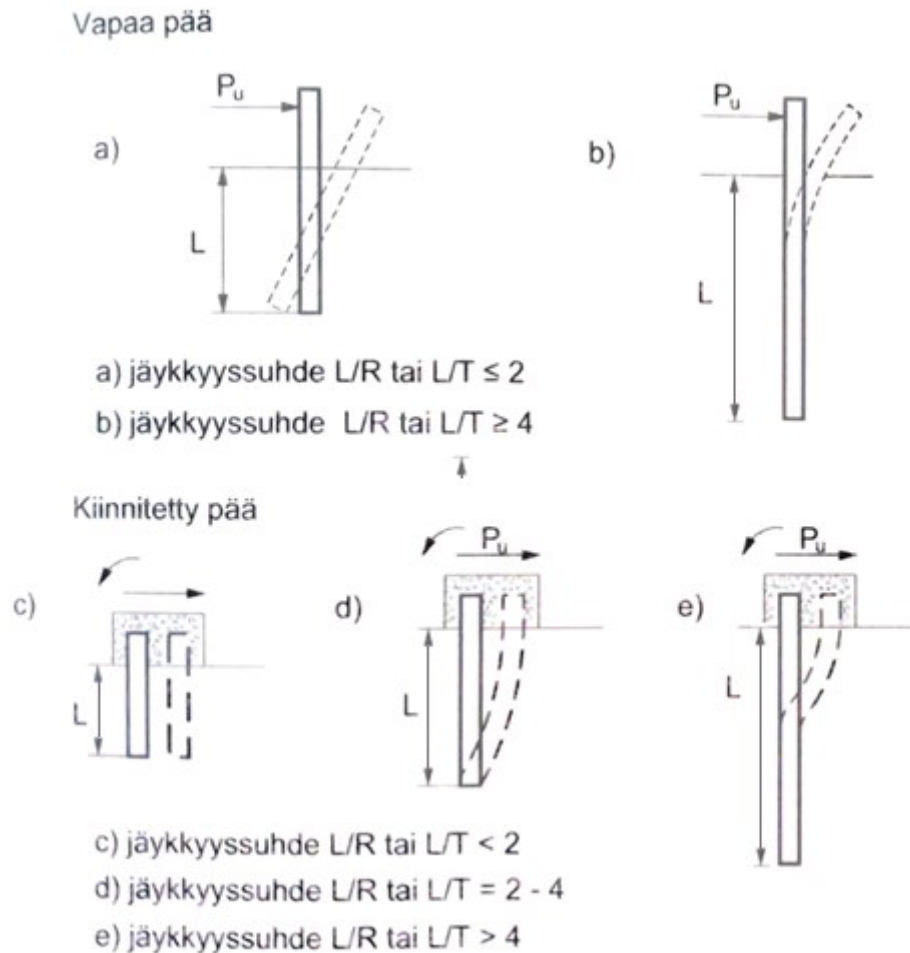
E_s Koheesiomaan vaakasuuntainen kimmomoduuli (kN/m^2)

n_h Vaakasuuntainen alustakerroin karkearakeisessa maassa (kN/m^3)

Teräsbetonipaaluilla sekä paaluilla, joissa käytetään materiaaleja, jotka voivat mitoitustilassa halkeilla, tulee laskennassa käyttää halkeilleen tilan taivutusjäykkyyttä.

Paalun muodonmuutoksia ei tarvitse ottaa huomioon, kun upotussyvyyden (D) ja parametrien suhde L/R tai L/T , eli jäykkyyssuhde on enintään kaksi. Tällöin paalua kohdellaan maassa kiertyvänä jäykkänä kappaleena, jonka kiertokeskuksen paikka lasketaan momenttitasapainon perusteella. Kiertokeskus sijaitsee homogeenisessä maassa suurin piirtein 70 % paalun asennussyvyydestä. Tämä tarkoittaa sitä, että maan murtuminen tapahtuu ennen paalun murtumista (kuva 5 tapaus a&c). (RIL 254, 90.)

Jäykkyyssuhteen ääriarvona sivuvastuksen suhteen voidaan pitää arvoa neljä, jonka jälkeen paalun asennussyvyyden lisääminen ei vaikuta paalun toimintaan, koska tällöin paalun murtuminen tapahtuu ennen maan murtumista. Jäykkyyssuhteen väliarvot 2–4 välillä tulee interpoloida riittävällä tarkkuudella. (RIL 254, 2016, 91.)



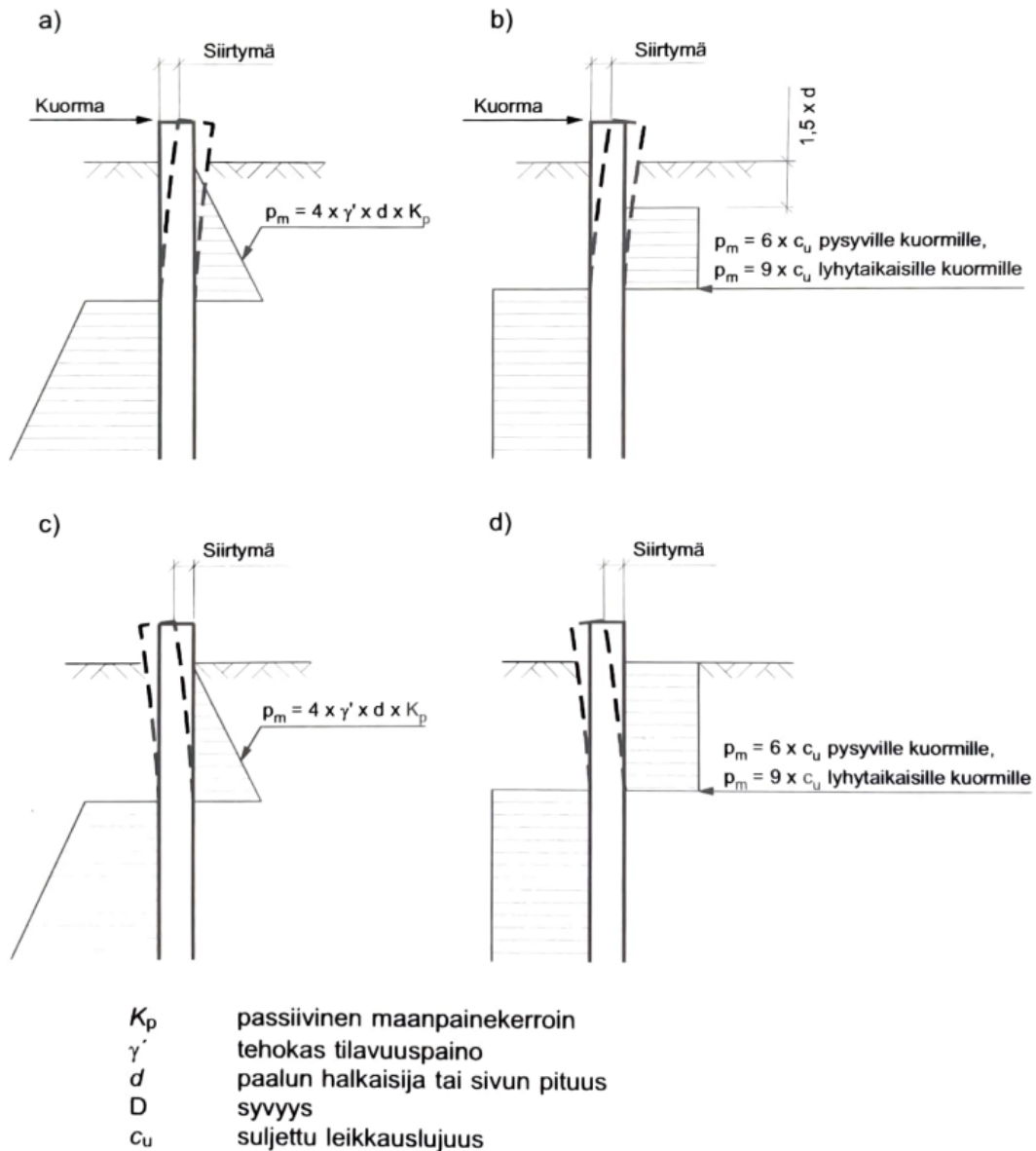
Kuva 5. Jäykkyysuhteen vaikutus vapaaseen sekä kiinnitettyyn päähän eri pituisilla paaluilla. (RIL 254, 2016, 91.)

3.5.1 Sivuvastuksen ääriarvo

Sivuvastuksen ääriarvo, toisin sanoen murtoarvon oletetaan kasvavan karkearakeisessa maassa (kitkamaassa) lineaarisesti syvyyden kasvaessa (Kuva 6, tapaus a), kun taas hienorakeisessa maassa oletetaan sivuvastuksen olevan vakio syvyydestä riippumatta. Toisin kuin karkearakeisessa maassa, hienorakeisessa maassa jätetään huomioimatta pintakerros sivuvastusta laskettaessa 1,5d syvyyteen (Kuva 6, tapaus b). (RIL 254, 2016, 92.)

3.5.2 Sivukuormituksen ääriarvo

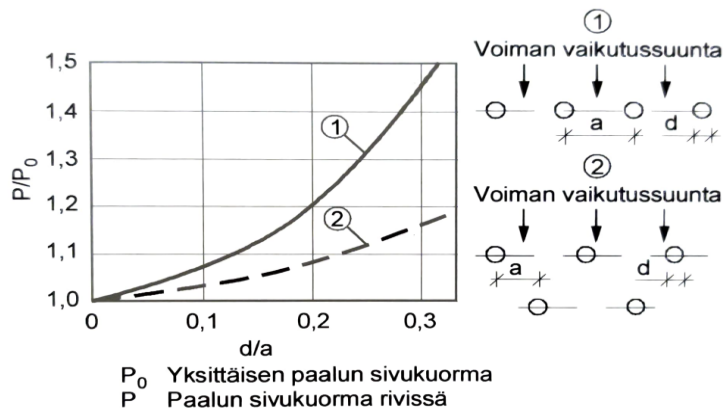
Sivukuormituksen ääriarvo eli maan aiheuttama kuorma paalulle lasketaan karkearakeisessa maassa kuvan 6 tapaus c mukaan. Toisin kuin hienorakeisen maan sivuvastuksen ääriarvoa laskettaessa, tulee sivukuormitukseen ottaa huomioon myös pintakerroksen osuus (Kuva 6, tapaus d). (RIL 254, 2016, 92.)



Kuva 6. Paaluun kohdistuvan paineen p_m ääriarvot a) karkearakeisessa maassa (kitkamaassa) maan toimiessa tukena, b) hienorakeisessa maassa (koheesiomaassa) maan toimiessa tukena, c) karkearakeisessa maassa maan toimiessa kuormana ja d) hienorakeisessa maassa maassa maan toimiessa kuormana. (RIL 254, 2016, 92.)

3.5.3 Paaluryhmän sivukuormituskestävyys

Paaluryhmään kohdistuva maan aiheuttama sivuvastus lasketaan joko yksittäisten paalujen sivuvastuksen summana tai paalujen muodostaman ryhmän sivuvastuksena, olettaen ryhmä yhtenäiseksi perustukseksi. Mitoittavana arvona pidetään pienempää edellä mainituista arvoista. (RIL 254, 2016, 93.)



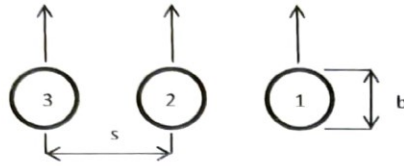
Kuva 7. Sivukuorman ja paaluvälin suhde hienorakeisessa maaperässä. (RIL 254, 2016, 93.)

Liikkeenvastaisesti poikkisuunnassa riviin asennettujen yksittäisten paalujen sivuttaisvastus riippuu paalujen keskiöetäisyydestä maan puristuessa paalujen välistä. Kuvasta 7 voidaan todeta, että ensimmäisen paalurivin yksittäiseen paaluun kohdistuva sivukuorma kasvaa koheesiomaassa paaluvälivälillä (a) $3 \dots 10 \cdot d$. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä kauempana paalut ovat toisistaan, sitä suurempi yksittäisen paalun sivuvastus on. Myös liikkeen suuntaisen paalurivin pituudella on merkitystä. Sivukuormamitoituksessa voidaan ottaa huomioon paaluryhmän liikkeen suuntaisten pintojen leikkausvoima. (RIL 254, 2016, 93–94.)

3.5.4 Redusointikerroin

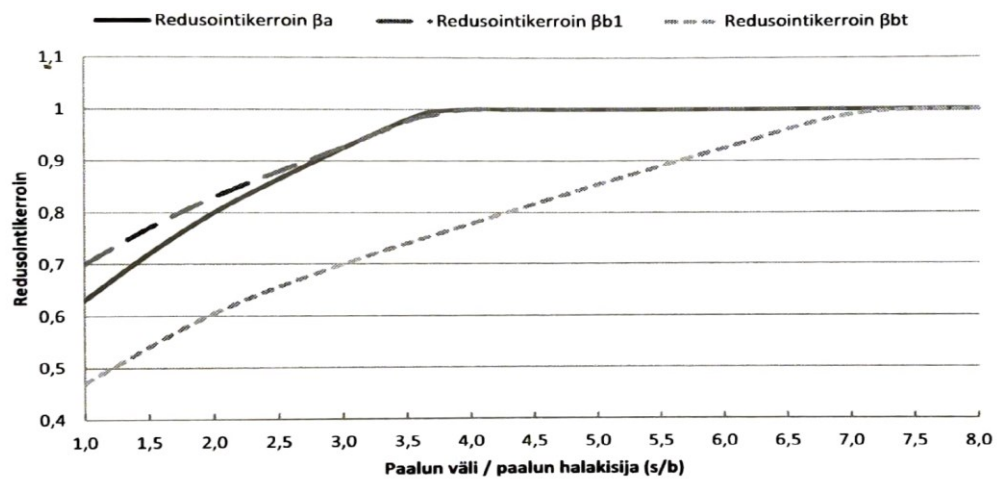
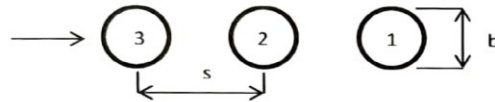
Laskettaessa yksittäisen paalun alustalukua tai sivuvastuksen ääriarvoa paaluryhmässä tulee laskelmissa käyttää redusointikerrointa (f_m) eli vähennyskerrointa, jolla kerrotaan alustaluku sekä sivuvastuksen ääriarvo. Redusointikerroin voidaan määrittää jokaiselle paalulle erikseen tai tarvittaessa kokonaisuudelle paaluryhmälle. Vähennyskerroin määritetään kuvan 8 perusteella paalujen sijainnin sekä paalujen keskinäisen etäisyyden avulla. Vähennyskerroin (f_m) lasketaan reunimmiselle paalulle kertomalla β_a ja β_{b1} sekä sisempien paalurivien paaluille kertomalla β_a ja β_{bt} .

Kuormaan nähden poikittainen paalurivi, redusointikerroin β_s



Kuorman suunnassa, ensimmäinen paalu, redusointikerroin β_{b1}

Kuorman suunnassa, toisesta paalusta eteenpäin, redusointikerroin β_{bt}

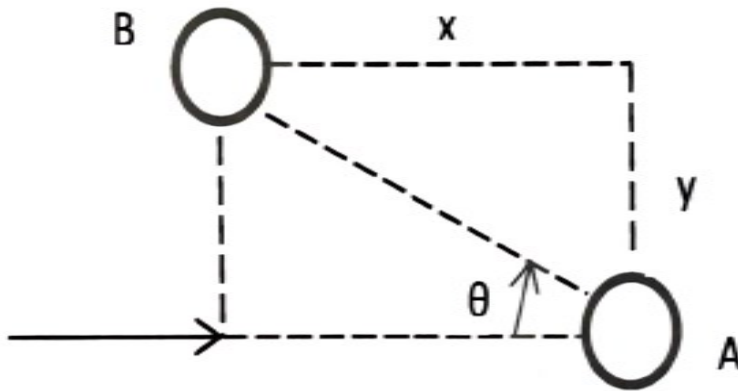


Kuva 8. Redusointikertoimet paaluille (RIL 254, 2016, 95.)

Mikäli paalut eivät sijoitu suorakulmaisesti toisiaan vasten voidaan redusointikertoimen laskemiseen kuvan 9 mukaisille A sekä B paaluille käyttää seuraavaa kaavaa:

$$\beta_s = (\beta_b^2 * \cos(\theta)^2 + \beta_a^2 * \sin(\theta)^2)^{0,5} \quad (5.4)$$

Missä β_a arvo löydetään kuvasta 8 käyttämällä paalujen välistä etäisyyttä. β_b (β_{b1} tai β_{bt}) löydetään vastaavasti riippuen tarkasteltavasta paalusta. (RIL 254, 2016, 94–96.)



Kuva 9. Epäsymmetrisesti asennetut paalut (RIL 254, 2016, 95.)

3.5.5 Kitkamaan alustaluku

Kitkamaan alustaluku määritetään joko kokoonpuristuvuusmodulin M tai avoimen tilan kimmomoduulin E_d avulla. Molempien moduulien arvot voidaan mitata ödometri- tai kolmiaksisiaalilaitteella. Kitkamaassa ongelmaksi muodostuu näytteen oikean tiiveysasteen saavuttaminen. Moduulien arvoja voidaan myös arvioida kairausten perusteella.

Alustalukukerroin vaativissa (GL 2) ja erittäin vaativissa (GL 3) kohteissa moduulien perusteella:

$$n_h = \alpha * \beta * \frac{M}{z} = \alpha * \frac{E_d}{z} \quad (5.5)$$

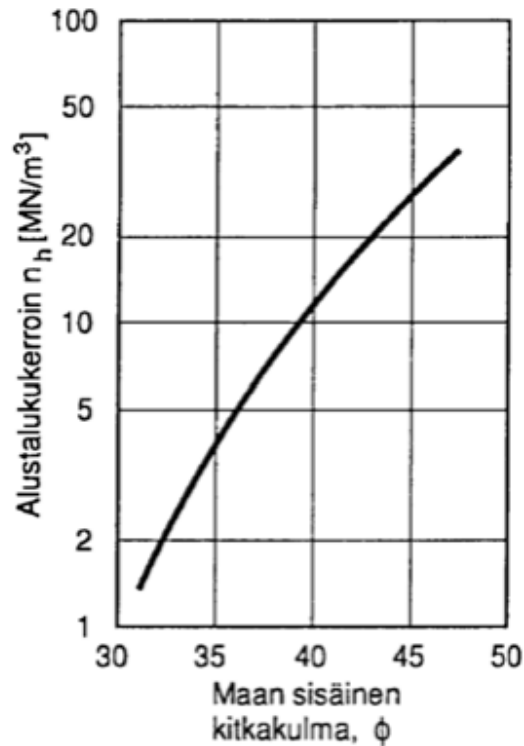
missä:

$$\alpha = 0,74$$

$\beta = 0,83 \dots 0,95$ hiekalle Poissonin vakion vaihdella vastavasti välillä $0,25 \dots 0,15$.

z = paalun syvyys maanpinnasta (m)

Alustalukukerroin voidaan myös arvioida kokemukseräisesti kuvasta 10 kitkakulman funktiolla ottaen huomion, että alustakertoimen arvo on 60 % kuvan arvosta pohjaveden pinnan alapuolella.



Kuva 10. Alustalukukertoimen (n_h) arviointi kitkakulman perusteella kitkamaassa. (NCCI 7, 2017, 61.)

Alustaluku saadaan alustakertoimen avulla:

$$k_s = \frac{n_h z}{d} \quad (5.6)$$

missä:

k_s = maan alustaluku (kN/m^3)

n_h = alustalukukerroin (kN/m^3)

z = syvyys maanpinnasta (m)

d = paalun halkaisija (m)

Alustaluvun k_s oletetaan kasvavan lineaarisesti homogeenisessa kitkamaassa syvyyteen $z=10d$ asti, minkä jälkeen alustaluku pysyy vakiona.

(Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 60-61.)

3.5.6 Koheesiomaan alustaluku

Koheesiomaa, eli hienorakeisen maan alustaluku lasketaan pitkäaikaiselle ja lyhytaikaiselle kuormitukselle. Lyhytaikaisessa kuormitustilanteessa käytetään suljetun tilan kimmomoduulia E_u .

$$k_s = \frac{E_u}{d} \quad (5.7)$$

missä:

k_s = maan alustaluku (kN/m³)

E_u = kimmomoduuli (kN/m²)

d = paalun halkaisija (m)

Pitkäaikaisessa kuormitustilanteessa voidaan alustaluku (k_s) määrittää kokoonpuristuvuusmoduulin (M) avulla:

$$k_s = \beta * \frac{M}{d} \quad (5.8)$$

missä:

M = kokoonpuristuvuusmoduuli

$\beta = 0,46...0,74$ savelle Poissonin vakion vaihdella 0,4...0,3 välillä tai

$\beta = 0,62...0,83$ siltille Poissonin vakion vaihdella välillä 0,35...0,25

Alustalukua koheesiomaassa voidaan arvioida myös kokemusperäisillä kaavoilla:

$$k_s = 50 * \frac{s_u}{d}, \text{ pitkäaikaiselle kuormalle ja} \quad (5.9)$$

$$k_s = 150 * \frac{s_u}{d}, \text{ lyhytaikaiselle kuormalle} \quad (5.10)$$

missä:

s_u = maan suljettu leikkauslujuus

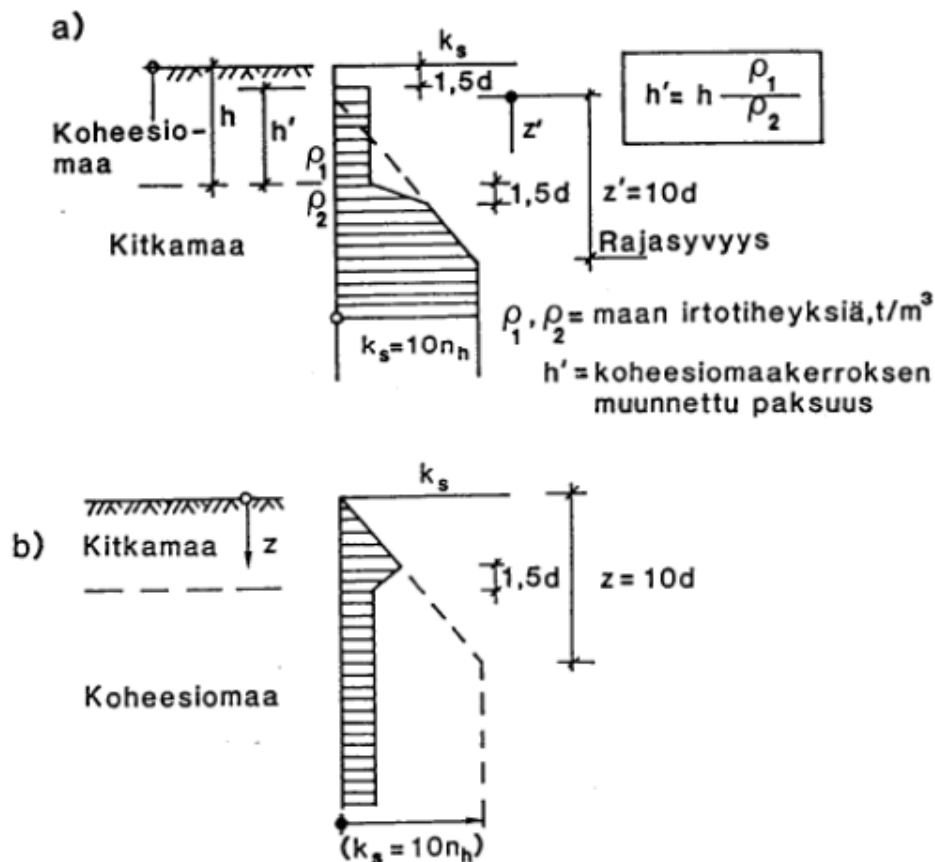
d = paalun halkaisija (m)

(Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7, 63.)

3.5.7 Kerroksellisen maan alustaluku

Maaperän koostuessa kitkamaasta sekä koheesiomaasta voi alustalukua arvioida kuvan 11 perusteella. Koheesiomaan ollessa pintakerroksena (kuva 11a) oletetaan alustaluku nolllaksi syvyyteen $1,5d$ maanpinnasta. Koheesiomaan vaihtuessa kitkamaaksi vaihtuu alustaluku lineaarisesti $1,5 d$ syvyyden aikana kaavaan 5.6 ja pysyy vakiona rajasyvyyden ylityttyä.

Kitkamaan ollessa ylimpänä kerroksena (kuva 11b) käytetään kaavaa 5.6 koheesiomaan rajapintaan asti, minkä jälkeen alustaluku vaihtuu $1,5d$ aikana koheesiomaan alustaluvuksi. Kitkamaan ollessa ylimpänä kerroksena tulee rajasyvyys laskea maanpinnasta. (Luukkonen S. 61.)



Kuva 11. Kerroksellisen maan alustaluku a) koheesiomaan kitkamaan yläpuolella ja b) kitkamaan koheesiomaan yläpuolella (Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu NCCI 7, 2017, 62.)

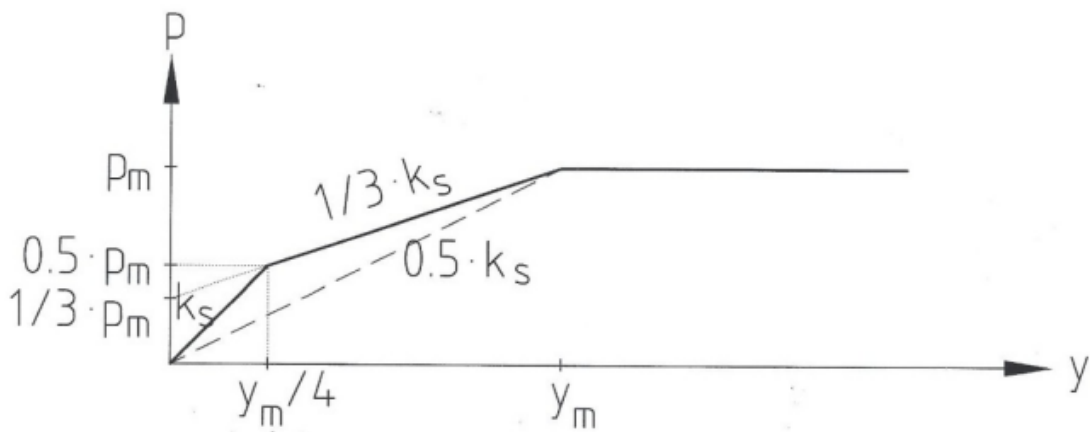
3.5.8 Sivupaineen ja siirtymän yhteys

Kuvassa 12 näytetään sivupaineen sekä siirtymän yhteys kitkamaassa. Vaaka-akselilla näkyy siirtymä (y_m), pystyakselilla paaluun kohdistuvan paineen ääriarvo (p_m) ja alustaluku (k_s). Katkoviiva määrittää pisteen (y_m, p_m), eikä se kuvaa maan todellista käyttäytymistä.

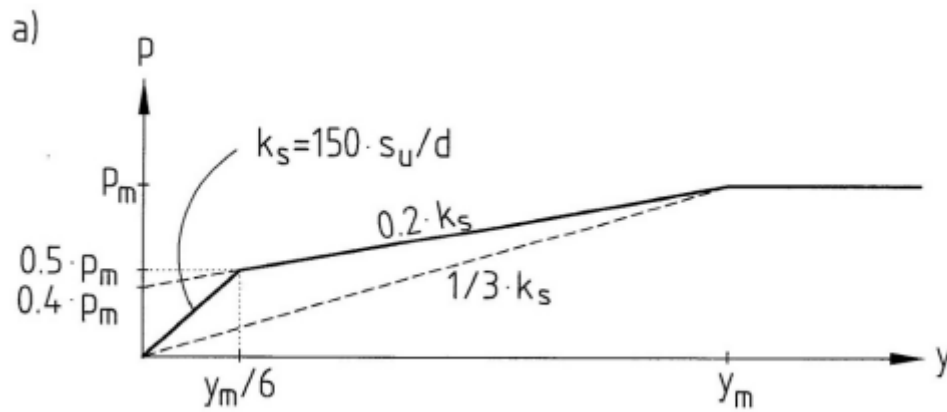
Kuvassa 13 ja 14 näytetään koheesiomaan sivupaineen sekä siirtymän yhteys lyhytaikaisessa- ja pitkäaikaisessa kuormituksessa.

Laskentaohjelmissa, joissa on ainoastaan mahdollista laskea lineaarikimmoisella jousella, aloitetaan laskenta alustaluvulla k_s vastaavalla jousella. Mikäli jousen siirtymä kitkamaassa on suurempi, kuin $y_m/4$ tulee jousta laskettaessa käytettävää alustalukua pienentää, kunnes kaikki jousien voimat ovat kuvan 12 mukaisella yhtenäisellä viivalla.

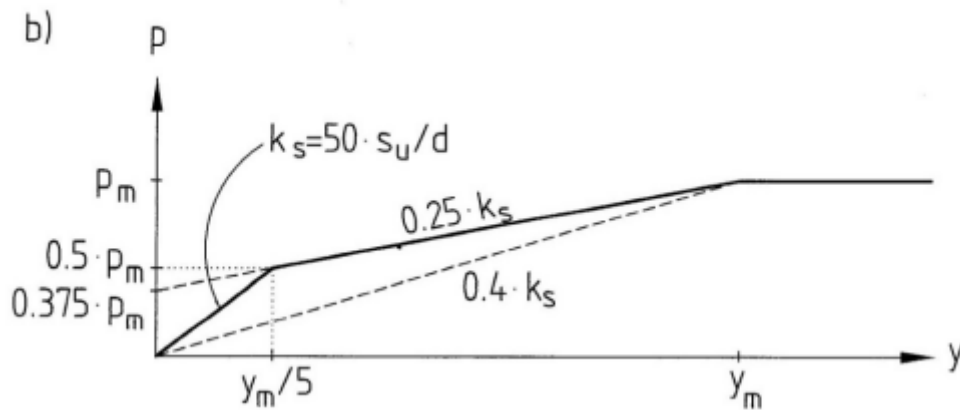
Koheesiomaassa toimitaan edellä mainitulla esimerkillä muuttamalla jousen siirtymää. Lyhytaikaisella kuormituksella siirtymä ei saa ylittää arvoa $y_m/6$ (kuva 13) ja pitkäaikaisella kuormituksella arvoa $y_m/5$ (kuva 14). Mikäli laskentaohjelmat sallivat epälineaarisen mallituksen kimmoisella alueella, tarvitaan vain yksi laskenta kitkamaalle sekä koheesiomaalle. (LO 11-2012, 2012, 31-33.)



Kuva 12. Kitkamaan sivupaine – siirtymän yhteys (Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu NCCI 7, 2017, 62.)



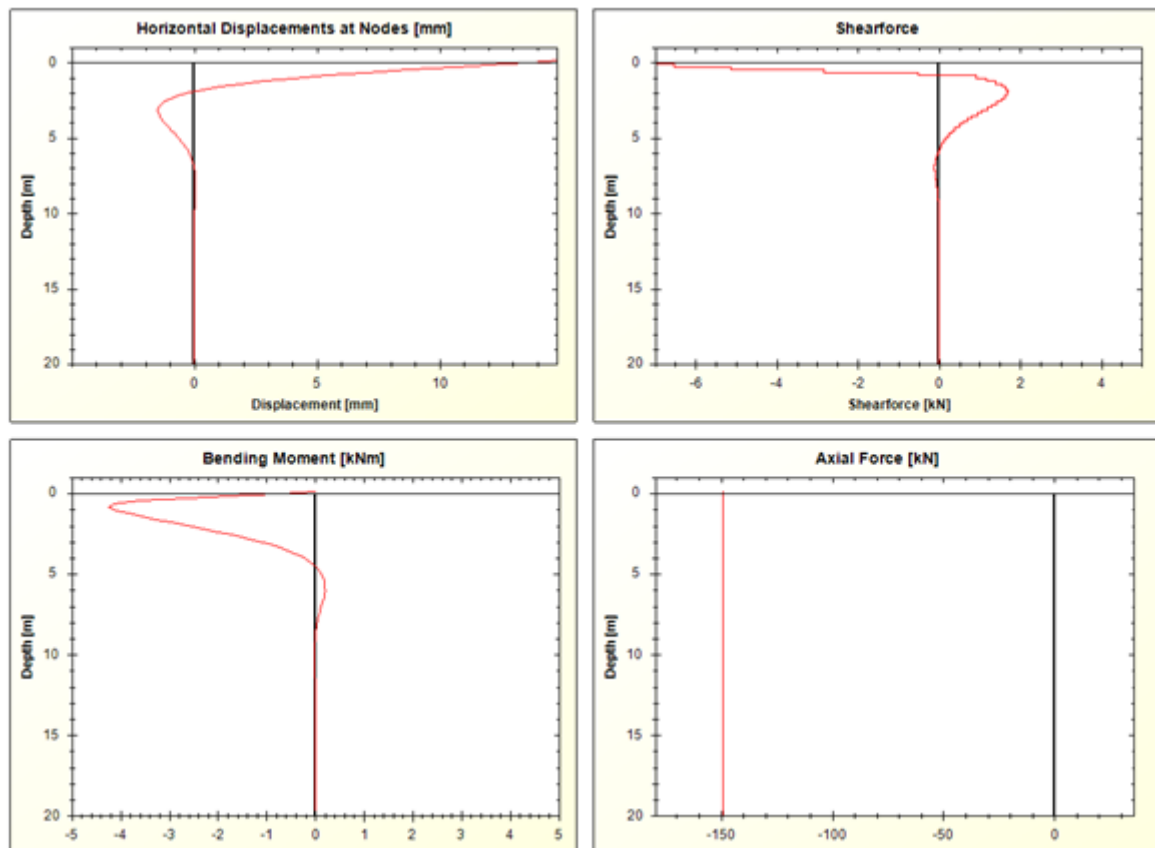
Kuva 13. Koheesiomaan sivupaine - siirtymäyhteys lyhytaikaisessa kuormituksessa (Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu NCCI 7, 2017, 62.)



Kuva 14. Koheesiomaan sivupaine - siirtymäyhteys pitkäaikaisessa kuormituksessa (Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu NCCI 7, 2017, 62.)

3.5.9 Geocalc 5.1 ohjelma

Laskentojen nopeuttamiseksi tullaan sivuvastuslaskelmiin käyttämään Geocalc 5.1 ohjelmaa. Ohjelma laskee tuloksen yksittäisen paalun siirtymälle, leikkausvoimalle, momentille sekä aksiaaliselle voimalle. Paaluryhmän vaikutus täytyy kuitenkin erikseen laskea. Ohjelmaan vaatii lähtötiedoiksi paalun materiaalin, koon, maan ominaisuudet sekä paalukuorman. Kuvassa 15 näytetään ohjelman laskema esimerkki tulos.

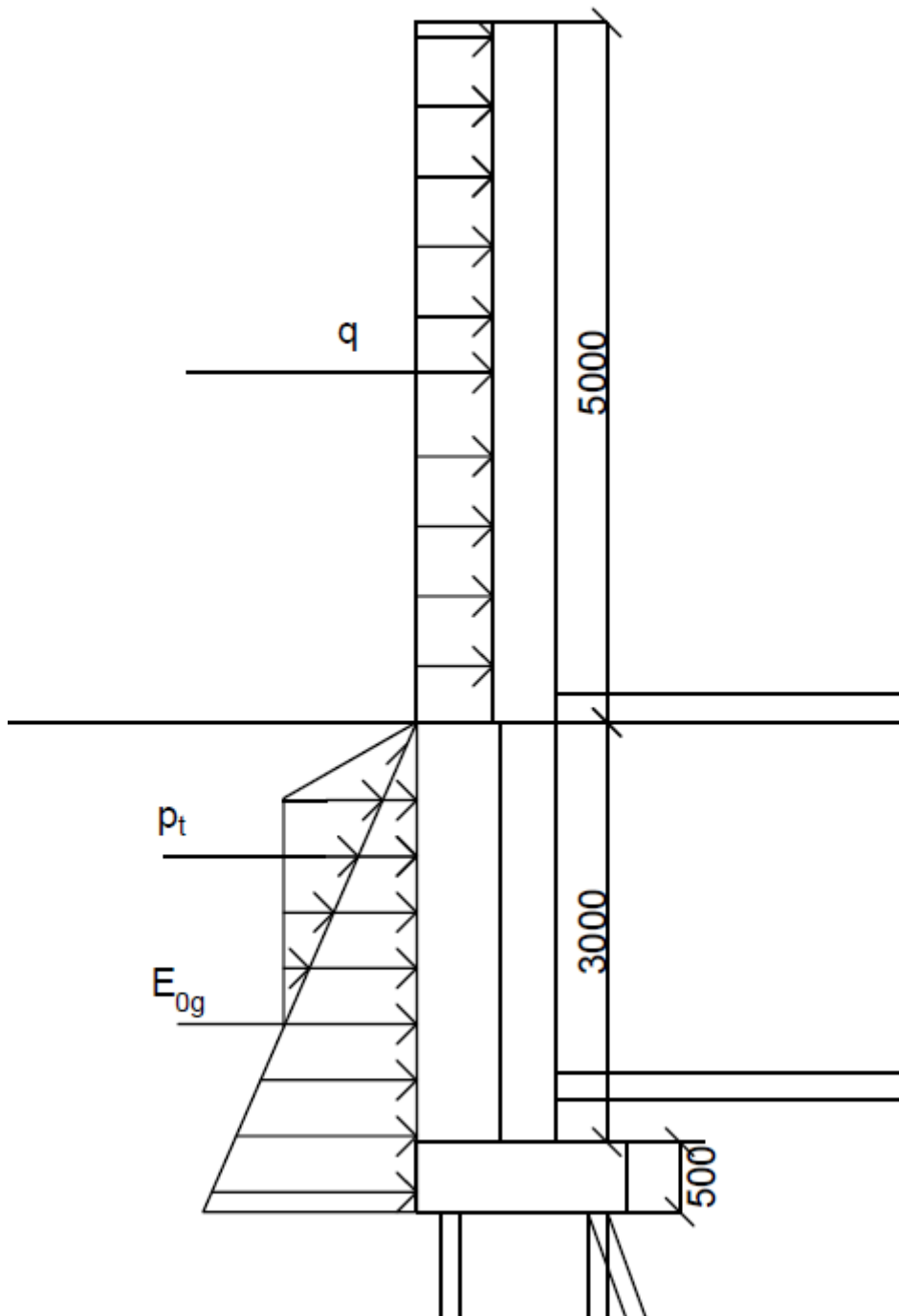


Kuva 15 Geocalc 5.1 ohjelman laskema tulos. Graafit vasemmalta oikealle ovat: paalun siirtymä, leikkausvoima, momentti ja aksiaalinen voima.

4 Esimerkkirakennelma

Tämän opinnäytetyön esimerkkirakennuksena toimii 5 metriä korkea halli, missä on myös 3 metriä korkea kellarikerros. Seuraamusluokka hallille on CC2, joten k_{fi} :n arvoksi asetetaan 1. Laskelmissa tutkitaan, pystyykö vaakavoimia ottamaan vastaan paalujen sivuvastuksella, vai vaaditaanko vinopaaluja. Hallirakennukseen aiheutuva vaakavoima johtuu tuulesta ja pystyvoimat rakennuksen omapainosta. Kellarikerrokseen aiheutuva vaakavoima johtuu maanpaineesta sekä tiivistyspaineesta. Vaakavoimat näkyvät kuvasta 16 ja niiden arvo kuvasta 17. Kuvassa 16 näkyvä p_t tarkoittaa tiivistyspainetta ja E_{og} maanpainetta. Vaakavoimien resultanttien sijainnit saadaan tukimuurille tarkoitetulla Excel-laskentapohjalla, minkä laskentaperiaate on sama, kuin kellarin seinällä. Tuulen aiheuttama kuorma on 3,5 kN/m ja sen resultantti sijaitsee hallin seinän keskellä 2,5 metrin korkeudella maanpinnasta.

Laskelmissa tarkastetaan myös, miten paalun halkaisija ja paalun korroosiokerros vaikuttaa tuloksiin. Sivuvastuksen laskelmiin käytetään GeoCalc 5.1 ohjelmaa, mikä antaa tuloksen paalun siirtymälle, leikkausvoimalle, momentille sekä aksiaaliselle voimalle, huomioimatta paaluryhmän vaikutusta. Paaluiksi valittiin teräspaalu, sillä paaluhalkaisijan vaihtoehtoja on enemmän, kuin betonipaaluilla ja täten tuloksiin saadaan enemmän variaatiota.



Kuva 16. Esimerkkirakennuksen leikkauskuva. Kuvassa näkyy vaakakuormaa aiheuttavat voimat.

4.1.1 Vinopaalu

Suurissa vaakakuormatapauksissa ongelmaksi muodostuu saada tarpeeksi pystykuormaa vinopaalulle. Vinopaalun kaltevuus määräytyy pysty- vaakavoimasuhteesta, jonka maksimisuhte on 1:3 mutta paalutuslaitteiston rajoitusten takia pyritään paalut asentamaan korkeintaan 1:4:ään. Pystykuormaa voidaan lisätä tehokkaasti leventämällä

anturaa ulospäin. Tämä johtaa siihen, että pystykuormaa aiheuttava maanpaino kasvaa. Ellei anturan leventäminen riitä, voidaan pystykuormaa lisätä harventamalla pystypaalujen määrää tai harkita vaakavoimien siirtämistä muihin perustuksiin, kuten kohdassa 4.1.3 esitetään. Alustavilla laskennoilla todetaan, että pystykuorma ei ole riittävän suuri vinopaalulle, joten anturan leveyttä suurennetaan sekä seinän sijaintia siirretään. Anturan uudeksi leveydeksi asetetaan 3 m ja seinän sijaintia muutetaan anturan oikeaan laitaan. Näillä toimenpiteillä saavutetaan kuvassa 17 esitetyt kuormat.

	Pysyvät kuormat		Epäkeskeisyys anturan oikeasta nurkasta
G1	37,5	Anturan omapaino (kN/m)	e1 1,5 m
G2	160	Seinän omapaino (kN/m)	e2 2,80 m
G3	148,2	Täyttömaan omapaino (kN/m)	e3 1,3 m
Vgk	345,7	kN/m	eVg 2,02 m
Vaakakuormat			
pt	16		Resultantin korkeus anturan alapinnasta 1,63 m
Tuuli	3,5		6 m
	46,34	kN/m	1,17 m
Hk	65,84		1,54 m

Kuva 17. Excel-laskentapohjalla lasketut kuormat sekä niiden epäkeskeisyydet. G2 osuuteen on lisätty yläpohjan kuorma.

Kuormien laskennan jälkeen tulee kuormat tarkistaa kuormitusyhdistelmillä. Kuormitusyhdistelmällä 4.1 ja 4.2 tulee valita epädullisempi vaihtoehto:

Pystykuorma:

$$1,35 * 1 * 0 + 0,9 * 345,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 311 \text{ kN/m} \quad (4.1)$$

$$1,15 * 1 * 0 + 0,9 * 345,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 1,5 K_{FI} * 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 311 \text{ kN/m} \quad (4.2)$$

Vaakakuorma:

$$1,35 * 1 * (46,34 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 16 \frac{\text{kN}}{\text{m}}) + 0,9 * 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 84,16 \text{ kN/m} \quad (4.1)$$

$$1,15 * 1 * (46,34 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 16 \frac{\text{kN}}{\text{m}}) + 0,9 * 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 1,5 K_{FI} * 3,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 76,91 \text{ kN/m} \quad (4.2)$$

Edellä lasketuista kuormitusyhdistelmistä nähdään, että kuormitusyhdistelmä 4.1 on epäedullisempi ja täten myös mitoittava.

Uudella anturamitalla sekä seinän siirrolla saavutetaan 311 kN/m pystykuorma sekä 84,16 kN/m vaakavoima. Kyseiset arvot ovat kuormitusyhdistelmällä laskettu ja näillä voimilla sekä epäkeskeisyyksillä pystyy paalukuormat laskemaan käsin statiikan avulla. Tässä esimerkissä käytetään 115 mm sekä 320 mm teräspaalua, joiden keskipisteet sijaitsevat 240 mm anturan molemmista laidoista. Excel-laskentapohjasta saaduilla epäkeskeisyyksillä (kuva 17) voi paalukuormat laskea staattisesti kuvan 4 esimerkin mukaan.

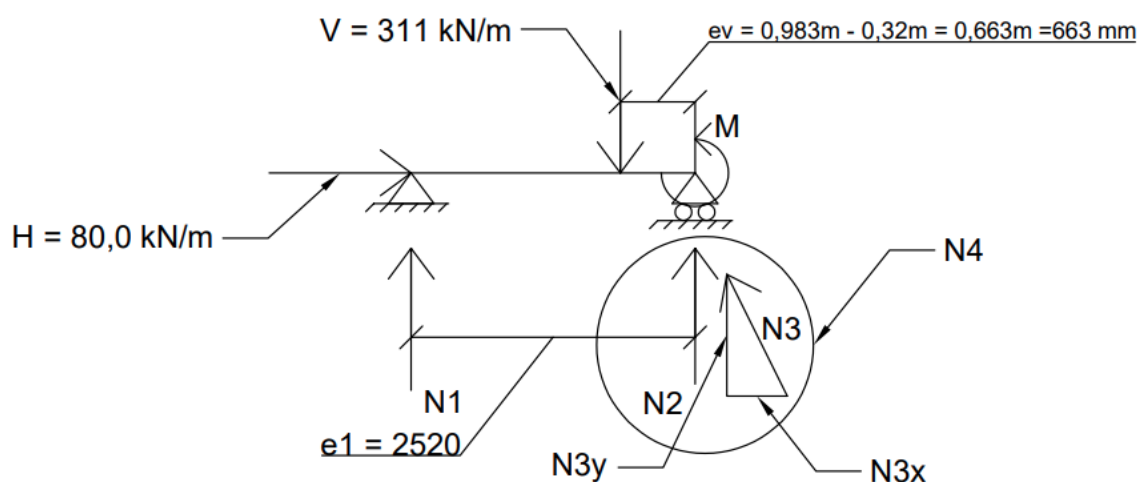
Ensimmäiseksi lasketaan edulliset ($M_{vakauttava}$) sekä epäedulliset ($M_{kaatava}$) momentit:

$$M_{vakauttava} = 311 \frac{kN}{m} * 0,98m = 304,78 \frac{kNm}{m}$$

$$M_{kaatava} = 84,2 \frac{kN}{m} * 1,54m = 129,66 \frac{kNm}{m}$$

Tämän jälkeen lasketaan kokonaismomentti anturalle:

$$M = M_v - M_k = 304,78 \frac{kNm}{m} - 129,66 \frac{kNm}{m} = 176kNm/m$$



Kuva 18. Staattisesti määrätty paalukuorma.

Kuvan 18 tapauksesta määritetään kuormat seuraavasti:

$$-N_1 * e_1 - M + V * e_v = 0$$

Aloitetaan laskemalla N1 kuorma:

$$N_1 = \frac{V * e_v - M}{e_1} = \frac{311 \frac{kN}{m} * 0,663m - 176 \frac{kN}{m}}{2,52m} = 13,17 \frac{kN}{m}$$

Seuraavaksi lasketaan N4 kuorma:

$$N_4 = V - N_1 = 311 \frac{kN}{m} - 13,17 \frac{kN}{m} = 297,8 \frac{kN}{m}$$

N₂ ja N₃ kuormat riippuvat paalujen jaosta. Jotta vinopaaluille tuleva pystykuorma on vähintään 3 kertaa suurempi, kuin vaakakuorma eli tässä tapauksessa 252,5 kN täytyy pystypaalujen jako asettaa tarpeeksi harvaksi, että vinopaalun N_{3y} arvo ylittää yli minimin. N₄ kuormasta voidaan ratkaista pystypaalujen jako kertaamalla N₄ pystykuorma paalujaolla mistä saadaan seuraava tulos:

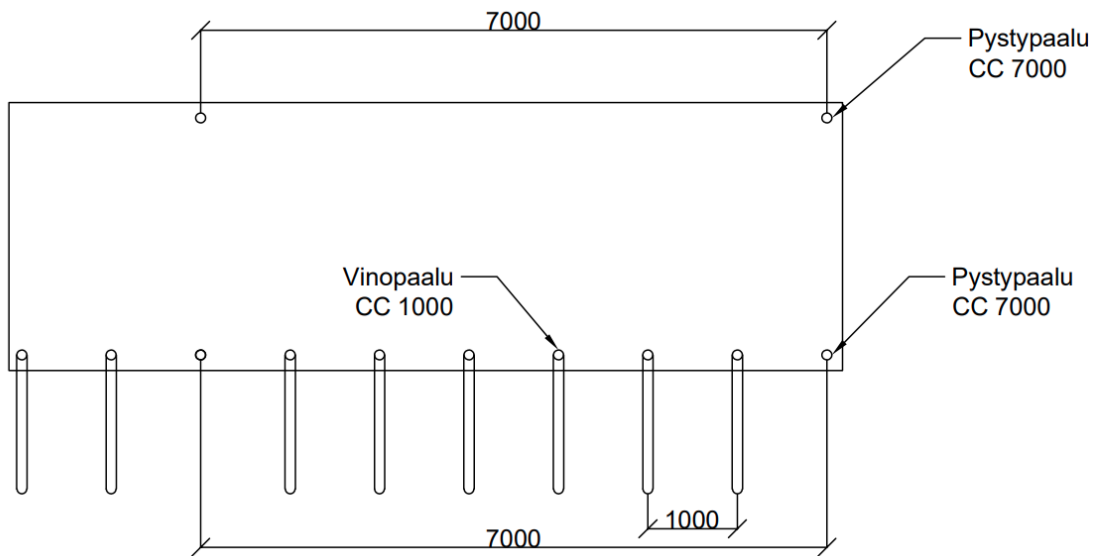
$$V_{vinopaalu} = N_4 * \left(\frac{6}{7}\right) = 255,3kN$$

$$H_{vinopaalu} = H = 84,16 kN$$

$$V_{pystypaalu} = \frac{N_4}{7} = \frac{297,8 \frac{kN}{m}}{7} = 42,5 kN$$

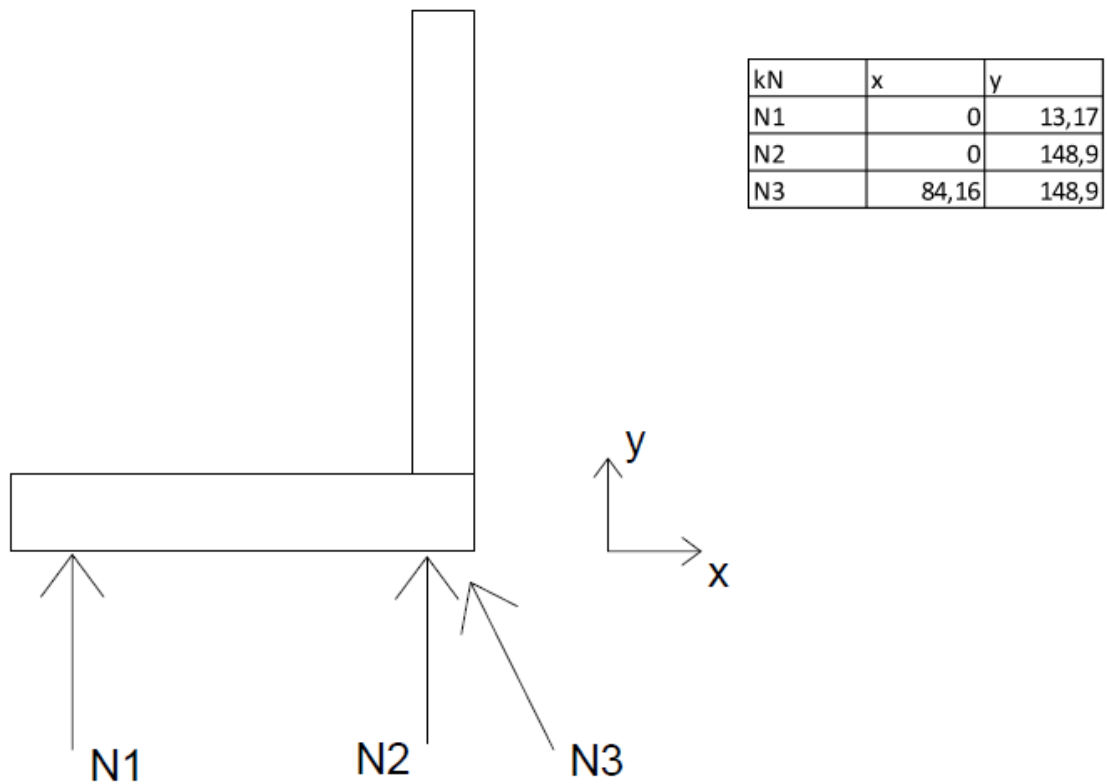
Tuloksena paalujaolle saatiin 7 m pystypaalujako, sekä 1 m vinopaalujako. Todellisuudessa 7 m pystypaaluväli on liian suuri, joten toista ratkaisua tulisi käyttää. Tässä opinnäytetyössä esitetään myöhemmin esimerkkiratkaisu liian vähäiselle pystykuormalle menemättä tarkemmin laskentaan.

Kuvassa 19 näkyy anturan pohjakuva, mistä pystyy havainnollistamaan paaluvälit.



Kuva 19. Paalujen pohjakuva missä myös merkittynä paalujen jako.

Pystypaalujen jakoa lisäämällä voidaan tehokkaasti lisätä pystykuormaa vinopaalulle, jotta vinopaalun pysty- vaakavoimasuhde ylittää 1:3 minimiarvoon. Kuvassa 20 näkyy paaluille aiheutuvat kuormat yhden metrin paaluväleillä.



Kuva 20. Paalukuormat yhden metrin jaolla pysty- sekä vinopaaluille. N₁ ja N₂ kuormat ovat pystypaaluille ja N₃ vinopaalulle.

4.1.2 Paalujen sivuvastus

Paalujen sivuvastuksella pystytään myös vastaanottamaan vaakakuormia. Yleisesti oletetaan sivuvastuksilla vastaanotettavan vain muuttuvia kuormia, lyhytaikaisia kuormia, eli tässä tapauksessa vain tuulikuormasta aiheutuvaa voimaa. Tuulikuorman arvo on 3,5 kN/m, joka aiheuttaa pystypaalulle seitsemän metrin paaluvälillä 12.25 kN vaakavoiman.

Maan ominaisuudet tulevat tavallisesti geosuunnittelijalta, joka on käynyt tutkimassa maan koostumusta. Esimerkkirakennuksen esimerkkipaalu asetetaan koheesiomaahan, jonka parametrit näkyvät taulukossa 3. Korroosioerrokseksi paaluille asetetaan 2 mm ja, koska paalu on päästä tukittuna ei paalu pääse ruostumaan sisäpuolelta, joten korroosiota ei huomioida paalun sisäpuolelta. Sivuvastusta on tarkoitus tarkastella 115/8 mm paksulla teräspaalulla sekä 320/12 mm paksulla teräspaalulla.

Redusointikerroin on selvitettävä molemmille paalukoolle erikseen. Redusointikertoimeen vaikuttaa paalujen leveys sekä paaluväli. Kuvasta 8 huomataan, että mikäli paalun paksuus ja paaluvälin suhde on yli 7,2 voidaan redusointikertoimeksi asettaa arvo 1. Tässä tapauksessa epäedullisempi arvo saadaan 320 mm paalusta, minkä paalun paksuus ja paaluvälin suhde on 7,8 mikä merkitsee sitä, että redusointikertoimeksi asetetaan arvo 1. Kappaleessa 3.5.3. mainitaan, että paaluryhmään kohdistuva maan aiheuttama sivuvastus lasketaan joko yksittäisten paalujen sivuvastuksen summana tai paalujen muodostaman ryhmän sivuvastuksena. Näistä vaihtoehtoista kuuluu valita epäedullisempi vaihtoehto. Tässä tapauksessa paaluväli on yli kymmenen kertaa paalun halkaisijan verran, joten paaluryhmän vaikutusta ei tarvitse huomioida.

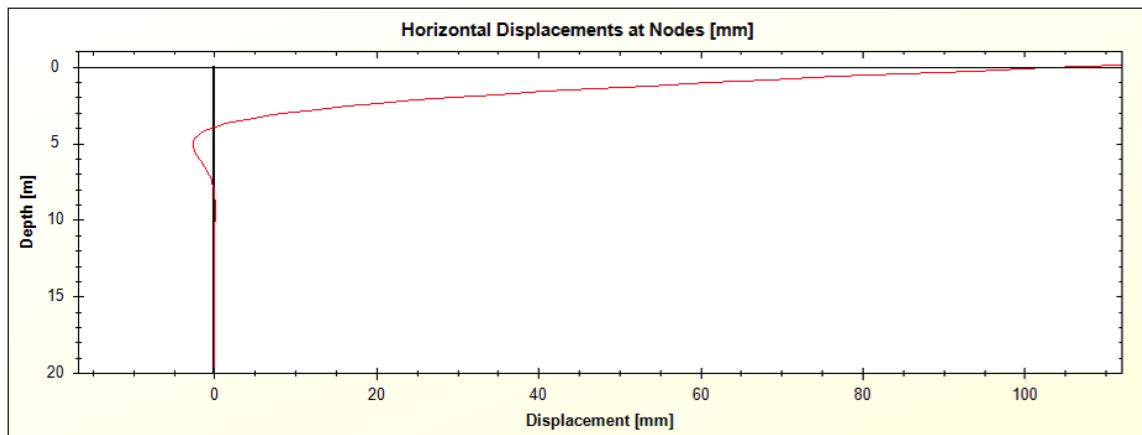
Taulukko 3. Maan parametrit. Arvot haettu Geocalc 5.1 ohjelman esimerkkilaskelmasta.

Maan ominaisuudet

Maa-aines	h (m)	γ (kN/m ³)	Kitkakulma (φ)	s_u
Täyttö	1	18	34	0
Savi	5	15	22	3
Siltti	12	15	25	8
Karkea siltti	5	19	33	0
Moreeni	5	21	34	0

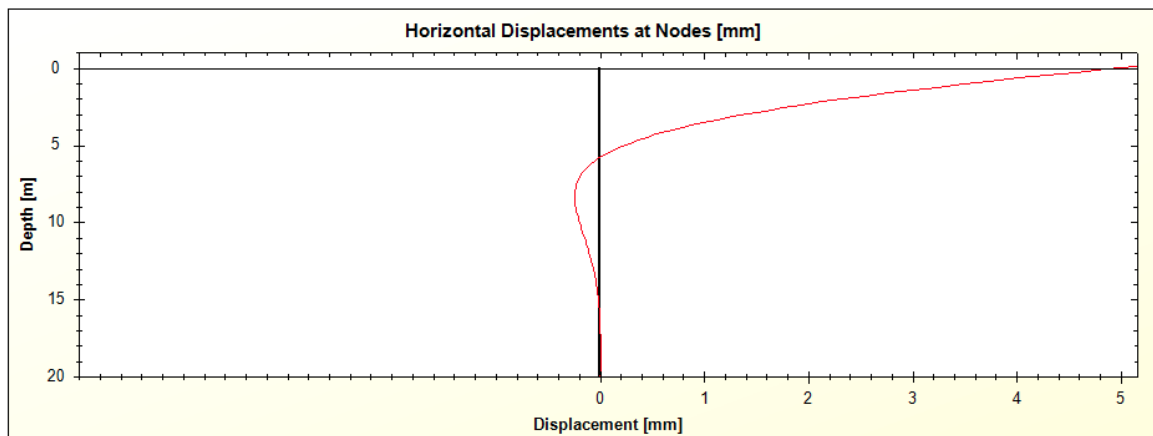
Geocalc 5.1 ohjelmalla saadaan laskettua yksittäisen paalun siirtymä, leikkausvoima, momentti sekä aksiaalinen voima, huomioimatta paaluryhmän vaikutusta. Maan

ominaisuudet asetetaan Geocalc 5 ohjelmaan taulukosta 3. Kuvasta 20 poimitaan sivuttaiskuormitetun paalun pystykuorma ja sivuttaiskuorma lasketaan kertomalla tuulikuorma (3,5 kN/m) pystypaalujen välin kanssa (7 m) ja tämän jälkeen tulos täytyy vielä jakaa kahdella, sillä kaksi pystypaalu ottaa vastaan horisontaalista kuormaa. Lopullinen vaakakuorma paalulle on 12,25 kN. Korroosioerrokseksi asetetaan 2 mm ja näillä parametreilla saadaan seuraavat tulokset:



Kuva 21. 115/ 8 mm paalun horisontaalinen siirtymä

Kuva 21 osoittaa 115/ 8 mm paalun sivuttaista siirtymää. Graafista huomaa, että paalun siirtymä on 110 mm, mikä on rakennukselle liikaa. Siirtymää voidaan vähentää muuttamalla paalu leveämmäksi ja jäykemmäksi, kuin 115/ 8 mm paalu.



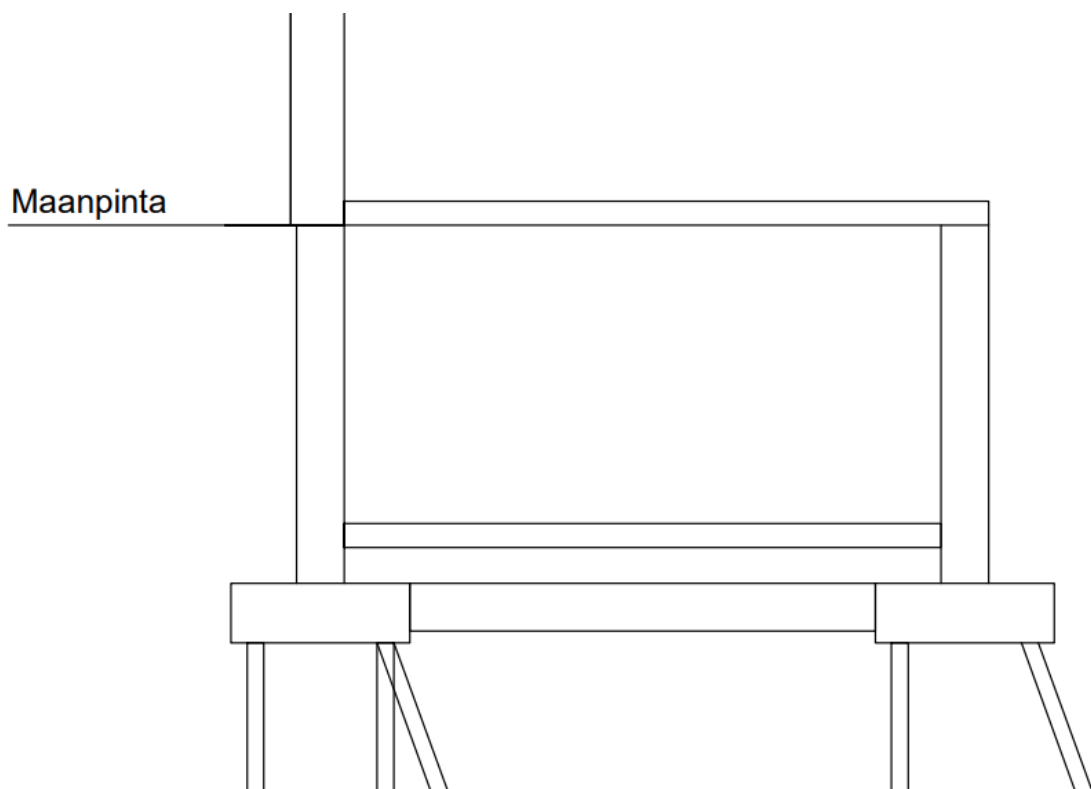
Kuva 22. 320/12 mm paalun horisontaalinen siirtymä

Kuva 22 näyttää 320/12 mm paalun sivuttaisen siirtymän. Siirtymän suuruus on 4,7 mm, mikä on huomattavasti pienempi verrattuna 115/8 mm paalun siirtymään. 320/12 mm paalu voi siis käyttää tuulikuorman tukemiseen, mikä vähentää vinopaalulle tulevaa

horisontaalista kuormaa. Täten kuvan 20 N_3 paalun uusi pysty- vinovoima suhde nousee 1:3:sta 1:3,1.

4.1.3 Vaakakuorman siirtäminen toisiin perustuksiin

Kuvassa 23 on tyypillinen paalutustapaus missä vaakakuormat viedään rakenteita pitkin rakennuksen alle, missä pystykuorma on suurimmillaan. Rakennuksen keskellä oleva paaluanturan ei tarvitse kolmea paaluriviä ollakseen stabiili, sillä antura on jäykistettynä ulkoseinän anturaan mistä löytyy jäykkyyttä jokaiseen siihen kohdistuvaan kuormitukseen. Kuvan 23 esimerkki on hyvin yleinen esimerkiksi parkkihalleissa ja muissa rakennuksissa, missä vaakakuorma on suuri. Tässä opinnäytetyössä ei perehdytä vaakavoimien siirron lasketaan.



Kuva 23. Esimerkkiratkaisu liian vähäiselle pystykuormalle

5 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä on käyty läpi vaakavoimien siirtämistä paaluilla maaperään. Suurissa vaakakuormissa koituu ongelmaksi tuottaa tarpeeksi pystykuormaa vinopaalulle, jotta minimikaltevuus toteutuisi.

Laskenta osiossa käytiin läpi, miten kuormat täytyy mitoittaa ja mistä kuormat johtuvat. Tärkeää kuormien mitoituksessa on tietää, mitkä kuormat ovat pysyviä tai muuttuvia ja ovatko kuormat kaatavia vai vakauttavia. Esimerkkirakennelmassa huomattiin, että pystypaalujen jako nousi todellisuudessa liian suureksi, joten toista ratkaisua pitäisi käyttää. Syy sille, miksi pystypaalujen jako kasvoi liian suureksi, oli vinopaaluille tuleva pystykuorma. Vinopaalut tarvitsevat vähintään 1:3 vaakapystyvoimasuhteen ja todellisuudessa vielä suuremman pystykuorman paalutus laitteiston takia.

Paalujen sivuvastuksella vastaanotetaan yleisesti vain muuttuvia kuormia ja Esimerkkitapauksessa toimi tuuli ainoana muuttavana vaakakuormituksena. Sivuttaisvastusta laskettiin kahdella erilaisella teräspaalulla, jotta olisi mahdollista nähdä, miten suuri vaikutus paalun leveydellä sekä paksuudella on paalun sivuttaiseen liikkeeseen. Tuloksista huomattiin, että hoikemmalla 115 mm paalulla nousi paalun sivuttainen liike liian suureksi ollakseen hyväksyttävä rakennukselle. Paalun muuttaminen paksumpaan 320 mm paaluun pudotti paalun sivuttaisen liikkeen hyväksyttäviin arvoihin.

Tutkittavaksi jäi vielä laskentaosuus vaakakuormien siirtämiseen rakennuksen keskelle, missä pystykuorma on huomattavasti suurempi. Kyseinen ratkaisu on tyypillinen tapa tuottaa riittävää pystykuormaa vinopaaluille.

6 Lähteet

Liikennevirasto 2012. Sillan geotekninen suunnittelu – LO 11-2012 Sillat ja muut taitorakenteet https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2012-11_sillan_geotekninen_web.pdf

Liikennevirasto 2017. Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Liikenneviraston ohjeita 13/2017. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf

Lohiniva K. 2019. Kulmatukimuurin mitoittaminen eurokoodin mukaan. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/172874/Lohiniva_Katja.pdf?sequence=2

Luukkonen S. 2015. Sivukuormitettujen pylväsperustusten geotekninen käyttäytyminen. https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/17753/master_Luukkonen_Simo_2015.pdf?sequence

RIL 166. 1986. Pohjarakenteet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 207-2017. 2017. Geotekninen suunnittelu. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 254-2016. 2016. Paalutusohje PO-2016. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

SFS-EN 1990 + A1 + AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet.

SFS-EN 1991-1-4 + AC+ A1. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat

Yli-Pietilä A. 2019. Paaluryhmän jäykkyyden vaikutus rungon suunnittelussa. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/117489/Yli-Pietil%C3%A4Arttu.pdf?sequence=2>

Ympäristöministeriö 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus – Kantavien rakenteiden suunnitteluperiaatteet. <https://www.eurocodes.fi/ymn-kansalliset-liitteet/>