

PAALUJEN SIVUVASTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN KORKEASSA RAKENTAMISESSA

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Annamari Tissari			
Työn nimi Paalujen sivuvastuksen hyödyntäminen korkeassa rakentamisessa			
Päiväys	11.4.2019	Sivumäärä/Liitteet	48/4
Ohjaajat Rakennetekniikan yliopettaja, TkT Arto Puurula ja lehtori Kai Auvinen			
Toimeksiantaja Sweco Rakennetekniikka Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Vaakavoimien aiheuttamat kuormat otetaan vastaan yleensä vinopaaluilla tai paalujen sivuvastuksen avulla. Sivusuuntaisessa kuormituksessa maan ja paalun vuorovaikutusta kuvataan usein rakennemallilla, jossa maaperän ominaisuuksia havainnollistetaan epälineaaristen sivusuuntaisien jousien avulla. Jousien jäykkyys määritetään alustalukujen avulla, jotka valitaan maaperän ominaisuuksien mukaan. Jousivakiot kuvaavat maamateriaalin jäykkysominaisuuksia. Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella Dlubal RFEM v5.14 © -ohjelmistolla tehdystä jousimallista, kuinka jousivakioiden arvot vaikuttivat rakennuksen ja paalun yläpään siirtymiin sekä paalukuormien jakautumiseen tuulikuormituksessa.</p> <p>Opinnäytetyössä tarkasteltiin RFEM-rakennemallia, joka oli 23-kerroksinen paikallavalettu teräsbetoninen toimistorakennus, jonka kaksi alinta kerrosta olivat pysäköintitaloa. Tästä mallista tutkittiin seitsemän erilaista laskentatapaa, joissa jousivakioiden arvot vaihtelivat maaperän jäykkyyden mukaan. Yhteen laskentatapaukseen tarvittiin kolme erilaista jousivakiota, joiden arvot annettiin paaluille riippuen sen sijainnista paaluryhmässä. RFEM-mallien kuormitukset ja tarkastelusuunnat pysyivät samoina, vain jousivakioiden arvot muuttuivat.</p> <p>Tämän insinöörityön tuloksena saatiin selville, että jousivakioiden muutokset vaikuttivat siirtymiin ja paalukuormien jakautumiseen. Tässä tutkimuksessa siirtymien arvot olivat suoraan riippuvaisia jousivakioiden arvoista, sillä mitä pienempi jousivakio oli, sitä suuremman arvon siirtymä sai. Siirtymä rakennuksen yläpäässä kasvoi suurimmillaan noin 6,5 % jousivakion muutoksesta johtuen. Maaparametrien määrittäminen on tärkeää ja niiden tulisi vastata todellisen rakennuspaikan maaperän ominaisuuksia. Joten maaparametrien arvot tulisi määrittää tapauskohtaisesti, eikä käyttää mitoittamiseen vakioarvoja.</p>			
Avainsanat sivuvastus, paaluperustus, jousimalli, alustaluku			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Construction Engineering			
Author Annamari Tissari			
Title of Thesis Utilizing the Lateral Stiffness of Pile Foundations in High Construction			
Date	11 April 2019	Pages/Appendices	48/4
Supervisors Mr Arto Puurula, PhD, Principal Lecturer and Mr Kai Auvinen, Senior Lecturer			
Client Organisation Sweco Rakennetekniikka Ltd			
<p>Abstract</p> <p>Horizontal loads are generally received with raking piles or by means of lateral resistance of the piles. A laterally loaded pile is often analysed by the model where the soil is substituted with non-linear lateral springs. The stiffness of the springs is defined by means of the subgrade reaction. The spring constant describes the stiffness of the soil. The aim of the thesis was to analyse the spring model made with Dlubal RFEM v5.14 © software, how the values of the spring constants affected the displacements of the top of the building and the top of the pile and the distribution of pile loads in wind load.</p> <p>The thesis examined the RFEM-structural model, which was a 23-storey cast-in-place reinforced concrete building with two lower floors being a parking garage. Seven different calculation cases were researched in this model, where the values of spring constants varied according to soil stiffness. Three unequal spring constants were required in one calculation and the values of spring constant were given to piles depending on its position in the pile group. Loads and viewing directions of the RFEM-model remained the same, only the values of the spring constants changed.</p> <p>As a result, it was found that changes in the spring constants affected deformations and the distribution of pile loads. In this study, the values of the deformations were directly proportional to the values of the spring constant. As the spring constant decreased, the displacement increased at the top of the building and on top of the pile. The deformation at the top of the building increased to a maximum of 6.5% due to the change in the spring constant. The determination of soil parameters is significant, and the parameters should correspond to the properties of the soil of the construction site. Therefore, the values of the soil parameters should be defined a case-by-case basis and standard values should not be used for dimensioning.</p>			
Keywords lateral resistance, pile foundation, spring model, subgrade reaction			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	PAALUPERUSTUKSET	7
2.1	Paalutyypit	7
2.1.1	Paalutyypien jako asennustavan mukaan	7
2.1.2	Paalutyypien jako toimintatavan mukaan	8
2.1.3	Paaluryhmä	9
2.2	Paalujen kuormitukset.....	10
2.2.1	Tuuli	11
2.2.2	Maanpaine.....	12
2.2.3	Lisävaakavoimat.....	14
3	PAALUPERUSTUSTEN SIVUKUORMITUS	15
3.1	Paalun sivuvastus ja -kuormitus.....	15
3.2	Paalun sivukuormakestävyys.....	18
3.3	Winklerin menetelmä	18
3.3.1	Kitkamaan alustaluku	19
3.3.2	Koheesiomaan alustaluku	21
3.3.3	Alustaluku kerroksellisessa maassa.....	22
3.3.4	Syklisen kuorman vaikutus alustalukuun	23
3.3.5	Jousimalli	23
3.3.6	Alustaluvun ja siirtymän yhteys	25
3.4	Paaluperustuksen käyttäytyminen sivukuormituksessa.....	27
3.4.1	Paalua ympäröivän maan käyttäytyminen	27
3.4.2	Paalun toiminta sivukuormituksessa	28
4	VÄRÄHTELY	32
5	JOUSIMALLIMENETELMÄ.....	34
5.1	RFEM-mallit	35
5.1.1	Malli 1: Yksinkertaisesti tuettu.....	35
5.1.2	Malli 2: Alustalukumenettely, jossa ei huomioida paaluryhmän vaikutusta.....	35
5.1.3	Malli 3: Perustuu kuormitus-siirtymä analyysiin	36
5.1.4	Malli 4: Perustuu mallin 3 yksinkertaistamiseen	37

5.2	Herkkyysanalyysi	38
5.3	Mallin tarkastelu	38
5.3.1	Rakennemalli	38
5.3.2	Kuormat ja kuormitusyhdistelmät	39
5.3.3	Paaluryhmä	40
5.3.4	Laskennan lähtötiedot	40
6	TULOKSET	41
6.1	Siirtymät	41
6.2	Paalukuormat	42
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	45
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	46
	LIITE 1: MAAKERROSTEN MUODONMUUTOS- JA LUJUUSOMINAISUUKSIEN ARVIOINTI KAIKAUSVASTUKSEN PERUSTEELLA	49
	LIITE 2: EUROKOODIN 1997-1 MUKAISET NOMOGRAMMIT PASSIIVIPAINEKERTOIMEN MÄÄRITTÄMISEKSI	50
	LIITE 3: PAALUJEN SIJAINNIT	52
	LIITE 4: PAALUKUORMIEN JAKAUTUMINEN +X-SUUNNASSA	53
	LIITE 5: PAALUKUORMIEN JAKAUTUMINEN +Y-SUUNNASSA	54

1 JOHDANTO

Paaluperustukset ovat alttiita vaakavoimille, jotka ovat yleensä pienempiä kuin paaluille kohdistuvat pystykuormat. Nämä vaakavoimien aiheuttamat kuormat voidaan ottaa vastaan vinopaaluilla, jotka ovat tällä hetkellä se yleisin ratkaisu, tai paalujen sivuvastuksella. Sivuvastuksella tarkoitetaan maaperän kykyä vastustaa paalun sivusiirtymää ja ottaa sivusuuntaista kuormitusta vastaan. Vinopaalujen asentaminen on haastavampaa ja 5 – 15 % kalliimpaa kuin normaalin pystysuoran paalun, joten sivuvastuksen hyödyntäminen olisi käytännöllistä, jos sitä osataan käyttää hyväksi. Nykypäivänä kaupunkirakentamisen tontit ovat pieniä ja sivusuuntaista tilaa ei ole, näin ollen vinopaalujen käyttö ei välttämättä ole mahdollista, joten uusia tehokkaita rakenneratkaisuja tarvitaan. Hyödyntämällä paalujen sivuvastusta, on mahdollista saada tilaa vievät ja kalliit vinopaalut pois perustusrakenteista. (de Souza Magnus, 2018, s. 7).

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Sweco Rakennetekniikka Oy. Tämä opinnäytetyö on jatkoa Tiago de Souzan diplomi-insinööriyölle (The effect of modeling lateral stiffness of pile foundations on numerical analyses of structural frames), jonka tilaajana on myös ollut Sweco Rakennetekniikka Oy. Tiagon työssä tutkitaan, kuinka paalujen sivuvastus mallinnetaan jousien avulla rakennemalliin erilaisissa tapauksissa. Tiago tuotti neljä erilaista RFEM-jousimallia ja tässä työssä tarkastellaan näistä mallia numero 4. Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia RFEM-ohjelmistolla tehdystä 3D-jousimallista, kuinka jousivakiot vaikuttavat rakennuksen yläpään ja paalun siirtymiin sekä paalukuormiin tuulikuormituksessa. Samalla tarkastellaan sivukuormitetun paalun geoteknistä käyttäytymistä. Tavoitteena on tuottaa suomenkielinen ohjekortti Sweco Rakennetekniikan rakennesuunnittelijoille ohjeistamaan, millä tavoin sivuvastus tulisi mallintaa rakennemalliin erityyppisissä tapauksissa. Ohjekortti tulee vain Sweco Rakennetekniikan käyttöön eikä sitä julkaista.

2 PAALUPERUSTUKSET

Paalut ovat pilarimaisia ja hoikkia perustusrakenteita, jotka siirtävät ylempien rakenteiden kautta tulevat kuormat heikkojen maakerrosten läpi kovaan maapohjaan tai kallioon. Paalut ovat kantavia rakenteita, joten ne tehdään kantavien rakenteiden materiaalivaatimusten mukaisesti joko raudoitettuna teräsbetoni-, liitto-, teräs- tai puurakenteena. Paaluperustukset suunnitellaan siten, että ne kestävät rakenteesta ja ulkopuolisista kuormista tulevat kuormat sekä maan aiheuttamat rasitukset riittävällä varmuudella. Perustusten siirtymät eivät saa ylittää sallittuja raja-arvoja. (Juuti, 2016, s. 49; Pohjarakennusohjeet: RIL 121, 2004, s. 83).

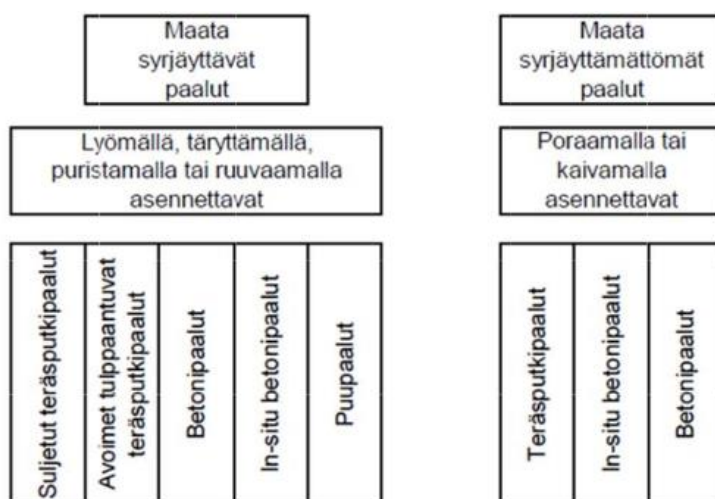
Paaluperustuksia käytetään, jos rakennuksen tai rakenteen perustaminen maan varaan ei painumien, siirtymien, kiertymien tai jonkun muun syyn, kuten ympäristössä olevien rakennusten sijainnin tai perustustapojen vuoksi ole mahdollista. Yleensä paaluperustusta käytetään, jos kantava maapohja on liian syvällä perustettavaksi anturoilla tai perusmuureilla sekä pilariperustus tiiviiseen pohjamaahan tulisi kalliiksi ja vaivalloiseksi. Pintamaan pehmeys voi estää maanvaraisen antura- tai laattaperustuksen käytön. (Jääskeläinen, 2009, s. 52; Rasi-Koskinen, 2015, s. 12).

2.1 Paalutyypit

Paalutyypit voidaan jaotella toiminta- ja asennustavan sekä materiaalin mukaan.

2.1.1 Paalutyypien jako asennustavan mukaan

Paalut jaetaan asennustavan perusteella maata syrjäyttäviin ja syrjäyttämättömiin paaluihin (kuva 1). Maata syrjäyttäviin paaluihin kuuluu lyömällä, täryttämällä, puristamalla tai ruuvaamalla asennettavat paalut. Tällaisia voivat olla suljetut teräsputkipaalut, avoimet tulppaantuvat teräsputkipaalut, betonipaalut, in-situ betonipaalut ja Puupaalut. Maata syrjäyttämättömiin paaluihin kuuluu poraamalla tai kaivamalla asennettavat, joita voivat olla esimerkiksi teräsputkipaalut, in-situ betonipaalut ja betonipaalut. (Kinnunen, 2015, s. 13-14; Pohjarakennusohjeet: RIL 121, 2004, s. 83).



Kuva 1 Eurooppalaisen tuotestandardin mukainen paalutyypien jako kahteen pääryhmään. (Kinnunen, 2015, s. 14)

Suomessa yleisimmin käytettäviä maata syrjäyttäviä paalutyypppejä ovat:

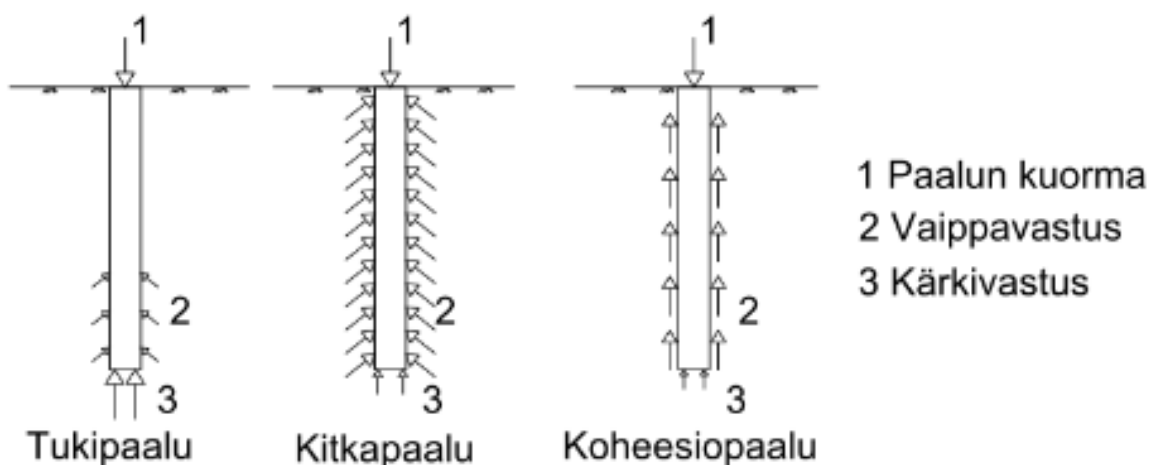
- teräsbetoniset lyöntipaalut, yleensä sivun pituudella 180 mm, 250 mm, 300 mm ja 350 mm
- lyötävät tai puristettavat pienpaalut, halkaisija on $30 \text{ mm} \leq d \leq 300 \text{ mm}$ ja materiaalina teräs tai pallograffittirauta
- lyötävät suuriläpimittaiset teräsputkipaalut, joiden halkaisija $d \geq 300 \text{ mm}$
- puupaalut halkaisija $d \geq 150 \text{ mm}$
- lyötävät avoimet paalut

Suomessa yleisimmin käytettäviä maata syrjäyttämättömiä eli kaivettavia paalutyypppejä ovat:

- kaivinpaalut
 - porattavat pienpaalut, halkaisija $30 \text{ mm} \leq d \leq 300 \text{ mm}$
 - porattavat suuriläpimittaiset teräsputkipaalut, halkaisija $d \geq 300 \text{ mm}$
- (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 139 - 140).

2.1.2 Paalutyypin jako toimintatavan mukaan

Paalut voidaan jakaa toimintatapansa mukaan tukipaaluihin, kitkapaaluihin ja koheesiopaaluihin (kuva 2). Tukipaalut kantavat pääosan kuormastaan kärjen välityksellä, kun taas kitka- ja koheesiopaalut kantavat pääosan kuormastaan vaipan välityksellä. Kitkapaalusta puhutaan, kun paalu on karkearakeisessa maassa, jossa vaippavastus muodostuu maan ja paalun vaipan välisestä kitkasta. Koheesiopaalulla tarkoitetaan paalua, joka on koheesiomaassa, jossa vaippavastus muodostuu maan ja paalun vaipan välisestä adheesiosta. (Kinnunen, 2015, s. 13).



Kuva 2 Paalutyypin jako toimintatavan mukaan.

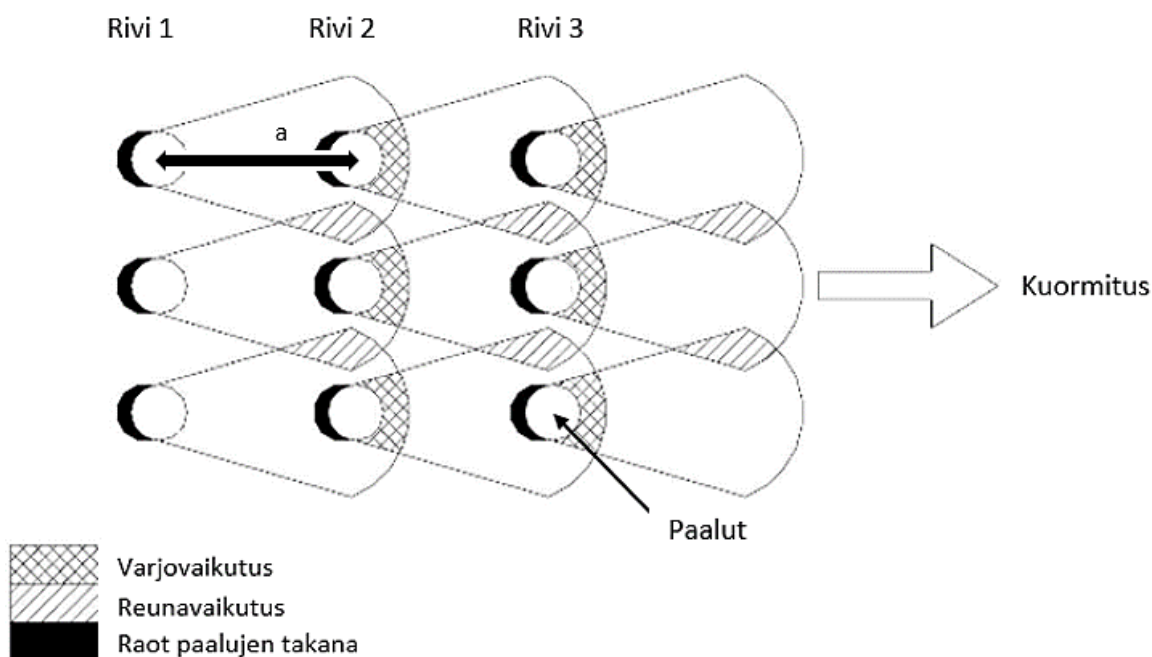
(Rasi-Koskinen, 2015, s. 16)

2.1.3 Paaluryhmä

Paaluryhmällä tarkoitetaan useamman paalun perustusta, joka toimii yhdessä. Paaluryhmän tulee kestää riittävällä varmuudella sille tulevat sivukuormitukset eri kuormitusyhdistelmillä, sekä vaakasuuntaisten siirtymien tulee pysyä rakenteen sallimissa rajoissa. Tätä kutsutaan paaluryhmän sivukuormakestävyudeksi. Paaluryhmän vaakasuuntaisten siirtymien raja-arvot määräytyvät rakennusmateriaalin ja ylärakenteen mukaan. Siirtymien arvioimisessa tulee huomioida ryhmävaikutus, rakenteen ja paalun välisen liitoksen momenttijäykkyys, syklinen kuorma tai kuormituksen suunnan muutokset, siirtymien aiheuttamat kiertymät ja kaltevuuden muutokset rakenteessa, yksittäisen paalun taiputusjäykkyys sekä maan jäykkyys. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 93-94).

Paaluryhmään kohdistuva sivuvastus on joko yksittäisten paalujen sivuvastuksen summa tai paaluryhmän sivuvastus riippuen kumpi saa pienemmän arvon. Yksittäisen paalun sivuvastus riippuu paalujen keskinäisestä sijainnista, sillä mitä lyhyempi välimatka paalujen välillä, sitä pienempi on sivuvastus. Paaluryhmän kulmissa ja reunoilla olevat paalut saavat isommat kuormitukset kuin paaluryhmän keskellä sijaitsevat paalut. Suurempien kuormitusten vuoksi reunapaaluihin kehittyä enemmän taiputusta ja muodonmuutoksia kuin sisäpuolisiin paaluihin. Paaluryhmän vaakasuuntainen kuormitus voi aiheuttaa yksittäiseen paaluun veto-, puristus- ja poikittaisten kuormien yhdistelmän. (Hartman, 2008, s. 22; Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 89-93).

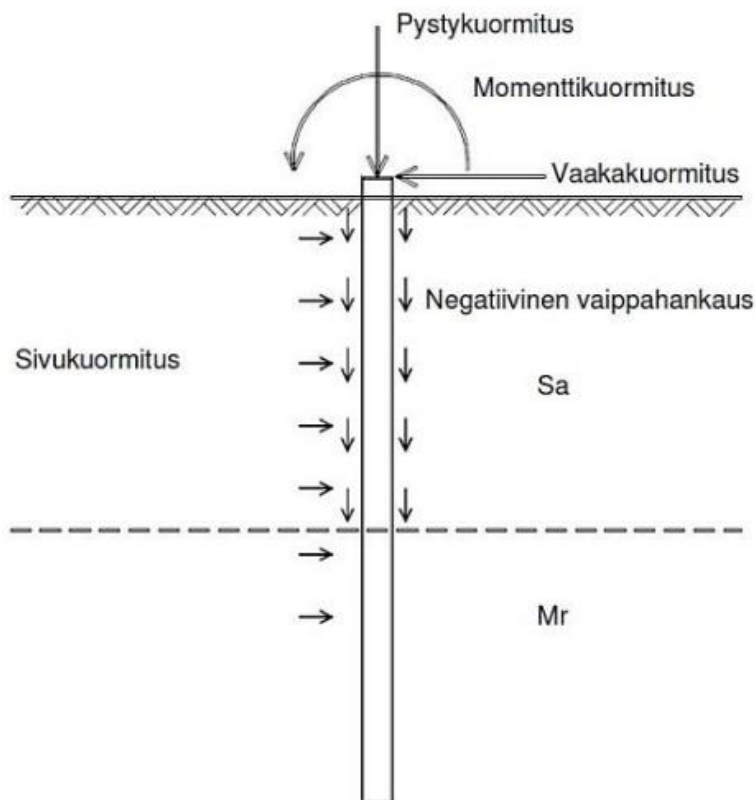
Maaperään muodostuu leikkausvyöhyke, kun peräkkäisissä riveissä olevat paalut muodostavat paaluryhmän ja painautuvat kuormituksen vaikutuksesta maata vasten (kuva 3). Ryhmävaikutus on huomattava, jos keskiöetäisyys a paalujen välillä on pienempi kuin paalun halkaisija d kerrottuna kolmella. (Larkela, 2008, s. 14).



Kuva 3 Paaluryhmän leikkausvuohykkeiden varjo- ja reunavaikutukset ja rakojen muodostuminen paalujen taakse. (Muokattu lähteestä: Walsh, 2005, s. 2)

2.2 Paalujen kuormitukset

Paalut altistuvat erilaisille ulkoisille kuormituksille, kuten vaaka-, pysty-, sivu- ja momenttikuormituksille sekä negatiiviselle vaippahankaukselle (kuva 4). Nämä kuormat jaotellaan Eurokoodin 1991-1-4 ja 1990 mukaan muuttuviin (Q) ja pysyviin kuormiin (G) sekä onnettomuuskuormiin (A). Paalujen rakenteellisessa mitoituksessa tulee huomioida, että ne kestävät eri tekijöiden aiheuttamat taivutusrasitukset paalun suuntaisten kuormien lisäksi. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005: RIL 223, 2005, s. 46-48).



Kuva 4 Paaluun kohdistuvat ulkoiset kuormitukset
(Lyöntipaalutusohje LPO-2005: RIL 223, 2005, s. 46)

Negatiivista vaippahankausta syntyy, kun maaperä painuu paalun ympäriltä paalua nopeammin. Painuminen voi aiheutua pohjaveden pinnan alenemisesta, paalutustyöstä tai täytemaan laadusta. Negatiivinen vaippahankaus on yleistä savimaissa, joissa on painuvia välikerroksia. Vaippahankauksen aiheuttama lisäkuorma tulee huomioida paalun mitoituksessa. Hiekkamaassa vaippahankausta ei tarvitse huomioida. (Pohjarakenteet: RIL 166, 1986, s. 184).

Paaluille kohdistuvia pystykuormia välitetään paalun päällä tai vaippaa pitkin eri maakerrokseen riippuen kuormituksen tyypistä. Pysyvät pystykuormitukset voidaan siirtää moreenikerrokseen tai kalliolle, eli karkearakeisiin maakerrokseen. Lyhytaikaiset pystykuormitukset voidaan ohjata myös muihin maakerrokseen. Momentti- ja vaakakuormituksia voidaan siirtää vain vähäisesti, sillä ne aiheuttavat paaluille taivutusrasituksia, joita pyritään paalurakenteissa välttämään tai minimoimaan.

Paaluille muodostuu sivukuormitusta, kun paaluryhmän tai paalun sivukapasiteettia tai momenttikapasiteettia hyödynnetään tai maa liikkuu paaluja kohti. Sivukuormitus aiheuttaa taivutusrasituksen paaluille, joka voi aiheutua esimerkiksi pystysuoran kuorman epäkeskisyydestä ja paalun käyryydestä. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005: RIL 223, 2005, s. 47-48).

Tässä insinööriyössä käsitellään sivuvastuksen hyödyntämistä, joten kuormituksista vaakavoimat ovat merkityksellisiä sivuvastuksen kannalta.

2.2.1 Tuuli

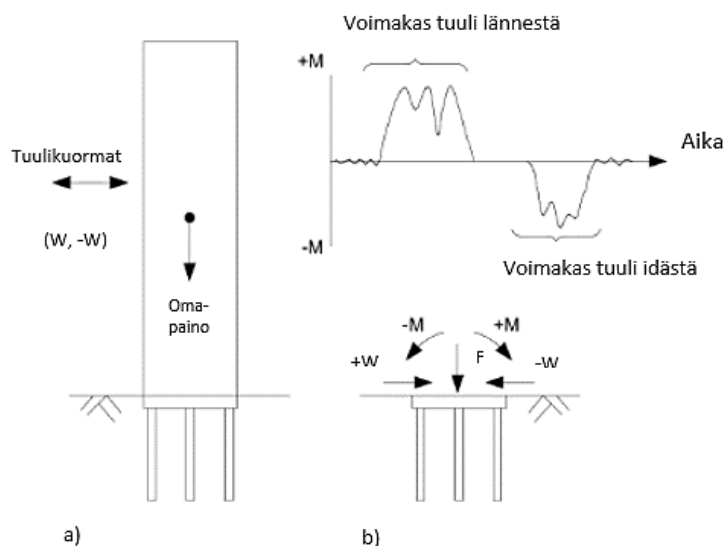
Tuulikuorma, joka kohdistuu rakenteisiin, saadaan laskettua nopeuspaineen (q) [kN/m^2] ja tuulen suunnan sekä rakennuksen muodosta riippuvan aerodynaamisen muotokertoimen avulla. Muotokerroin voi olla voimakerroin C_f tai painekerroin C_p , joiden avulla määritetty tuulikuorma on kiinteä muuttuva kuorma. Tuulikuorma kasvaa epälineaarisesti korkeuden mukaan. Voimakerroin-menettelmää käytetään yleensä mitoittaessa rakennuksen perustuksia ja jäykistystä. Painekerroin-menettelmää hyödynnetään rakenneosien mitoittamiseen. Voimakerroin- ja painekerroin-menettelmät ovat eurokoodin SFS EN 1991-1-4 mukaisia menetelmiä. (Mäkinen, 2017, s. 9; Rakenteiden kuormitusohjeet: RIL 144, 2002, s. 29).

Rakenteisiin kohdistuvan tuulikuorman oletetaan vaikuttavan horisontaalisessa suunnassa, joten se aiheuttaa vaakakuormituksen. Tuulikuormat ovat yleensä mitoittavia vaakakuormia, joten kuormituksen suuruuden laskeminen on tärkeää. Kuormien yliarvioiminen tuo tarpeettoman suuret ja kalliit rakennepaksumat ja aliarvioiminen liian pienet sekä kestäättömät rakenteet. (de Souza Magnus, 2018, s. 13).

Vaikka tuulikuormat mallinnetaan yleensä staattisina kuormina, ne voivat esiintyä myös toistuvina kuormina. Perustustasossa toistuvat kuormitukset voivat vähentää maaperän kapasiteettia ja lisätä liikkeitä maaperässä. Perustusten yläpuolella tällainen dynaaminen kuormitus voi aiheuttaa värähtelyä korkeissa ja joustavissa rakenteissa. Erityisesti hoikat rakenteet ovat alttiita värähtelylle. (de Souza Magnus, 2018, s. 13; Rakenteiden kuormitusohjeet: RIL 144, 2002, s. 51).

Kuvassa 5 esitetään tuulikuormien syklinen luonne, jolla tarkoitetaan tuulen kuormitussuunnan vaihtumista erilaisin aikaväleihin. Kuormitus loppuu, kun tuuli lakkaa puhaltamasta ja alkaa taas tuulen puhaltaessa samasta tai eri suunnasta. Tämä tapahtuu useita kertoja rakennuksen elinkaaren aikana, joten kyseessä on dynaaminen kuormitus. (de Souza Magnus, 2018, s. 13).

Tuulen dynaamisuuden aiheuttamaa värähtelyä käsitellään kappaleessa 4.



Kuva 5 Tuulikuorman aiheuttama dynaaminen kuormitus:
 a) korkeaan rakennukseen vaikuttavat voimat
 b) perustuksiin vaikuttavat voimat.
 (Muokattu lähteestä: de Souza Magnus, 2018, s. 13)

2.2.2 Maanpaine

Maanpaineella tarkoitetaan maamassan aiheuttamaa painetta määrättyä rakennetta vasten. Maanpaine voi olla aktiivista, passiivista tai lepopainetta, riippuen rakenteen siirtymistä suhteessa maahan. Rakenteen ollessa täysin liikkumaton, sen takana olevassa maamassassa ei tapahdu myöskään liikeitä ja rakenteeseen vaikuttaa lepopaine (p_0) ja liukupintoja ei synny. Lepopaine on yleensä kuorma, jonka oletetaan vaikuttavan aina vaakasuunnassa. Kyseessä on aktiivipaine (p_a), jos rakenne liikkuu maasta pois päin. Tällöin maan leikkauslujuus laittaa maamassan vastustamaan muodonmuutosta ja paine rakennetta vasten pienenee. Passiivipaine (p_p) muodostuu, kun rakenne siirtyy maaperää vasten ja siihen kohdistuva maanpaine saavuttaa vähitellen maksimi arvon. Passiivipaineen maksimi arvo tarkoittaa suurinta mahdollista maanpaineen arvoa murtorajatilassa. Maan tiiveys, rakenteen siirtymät sekä maalaji vaikuttavat passiivisen maanpaineen syntymiseen. Aktiivi- ja passiivipaine ovat molemmat murtotilapaineita ja niiden kehittymiseen tarvittavan siirtymän suuruus on riippuvainen rakenteen maassa olevan osan korkeudesta sekä maan ominaisuuksista. Kuitenkin passiivisen maanpaineen kehittymiseen tarvitaan suurempi siirtymä kuin aktiivipaineen kehittymiseen. Paaluperustusta laskettaessa alustalukumenetelmällä alustaluku määrää passiivisen maanpaineen kehittymiseen vaadittavan siirtymän. (Jääskeläinen, 2009, s. 172).


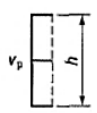
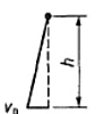
Sivukuormitus syntyy, kun maamassa painautuu paalua vasten. Sivukuormituksen aiheuttajina voi toimia kaivannoista ja kaltevista luiskista siirtyvät maamassat, maanpinnan korkeuserot, maan painuminen ja routimispaine. Maan leikkauslujuus, kuormitusnopeus ja paalun muoto vaikuttavat sivukuorman suuruuteen. Maaperän ottaessa vastaan rakenteelta tulevia kuormia, käytetään suunnittelussa passiivista maanpainetta. Passiivinen maanpaine lasketaan yleensä klassisen eli Coulombin tai Rankinen maanpaineteoriaan perustuen. Rankinen maanpaineteoria pohjautuu plastisuusteoriaan ja

siinä tarkastellaan plastisoituneen maamassan jännityksiä. Rankinen menetelmä soveltuu yksinkertaisiin tapauksiin, joissa rakenne on pystysuora ja sileä, maanpinta vaakasuora sekä maanpinnalla kuormitus on tasainen. Rakenteen ja maan välistä kitkaa ei huomioida. Coulombin maanpaineteoria on plastisen tilan maanpaineteoria, joka perustuu tasoliukupintojen tarkasteluun. Teorian lähtökohdaksi on, että murtotila vallitsee yhdessä liukupinnassa ja muut maamassat ovat kimmoisessa tilassa. Maan ja rakenteen välinen kitka huomioidaan laskelmissa. (Jääskeläinen, 2009, s. 175; Nummelin & Tolla, 2017, s. 22, 39; Pohjarakennusohjeet: RIL 121, 2004, s. 104).

Eurokoodissa on kuitenkin oma tapa laskea passiivinen maanpaine (kaava 1). Maanpainekerroin K_p suositellaan eurokoodin mukaan määrittämään nomogrammimenetelmässä liitteen 2 mukaan, sillä Coulombin maanpaineteoria antaa suurilla leikkauskestävyyskulman ja seinäkitkan arvoilla todellisia suurempia passiivipaineita. Eurokoodin mukainen passiivisen maanpaineen kehittymiseen tarvittava siirtymä ja siirtymistapa luonnontilaisessa maassa on esitetty taulukossa 1.

$$\sigma_p = K_p * \left(\int_0^z \gamma dz + q - u \right) + 2c * \sqrt{K_p * \left(1 + \frac{a}{c} \right)} + u \quad (1)$$

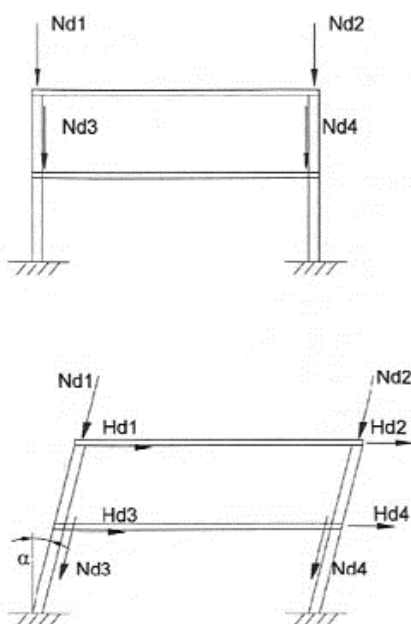
missä σ_p on vaakasuuntainen passiivinen kokonaisjännitys rakennetta vastaan kohtisuoraan [kN/m²],
 K_p maanpaineluku passiivipaineelle,
 γ maan tilavuuspaino [kN/m³],
 z syvyys maanpinnasta [m],
 q tasainen kuorma maanpinnalla [kN/m²],
 u huokosvedenpaine [kN/m²],
 c maan suljetun tilan koheesio [kN/m²] ja
 a adheesio [kN/m²].

Seinän liikkeen tyyppi		v_p/h löyhä maa %	v_p/h tiivis maa %
a)		7 (1,5)...25 (4,0)	5 (1,1)...10 (2,0)
b)		5 (0,9)...10 (1,5)	3 (0,5)...6 (1,0)
c)		6 (1,0)...15 (1,5)	5 (0,5)...6 (1,3)
missä: v_p on passiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän liike h on seinän korkeus			

Taulukko 1 Eurokoodin mukainen passiivisen maanpaineen kehittymiseen tarvittava siirtymä luonnontilaisessa maassa. Suluissa suhdetta v_p/h vastaava maanpaine on 50 % tehokkaan passiivisen maanpaineen raja-arvosta. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 109).

2.2.3 Lisävaakavoimat

Rakenteiden vinouden, kuormien epäedullisten vaikutussuuntien sekä sijaintivirheiden takia pystykuormat aiheuttavat lisävaakavoimia (kuva 6). Korkeissa rakennuksissa tuuli voi kallistaa rakennusta, joka aiheuttaa rakenteellisia epäkeskisyyksiä ja luo lisävaakavoimia. Kaikissa rakenteissa on pieniä epätarkkuuksia, joten lisävaakavoimia tulee väistämättä. Lisävaakavoimien oletetaan vaikuttavan samassa pisteessä kuin sen aiheuttaman pystykuorman, jonka vaikutussuuntana on rakennuksen stabiiliteetin kannalta määräävä suunta. Rasitus lisävaakavoimasta oletetaan jakautuvan pystyrakenteille niiden jäykkyyksien mukaan. (de Souza Magnus, 2018, s. 14; Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: RIL 201, 2017, s. 79).



Kuva 6 Lisävaakavoimat (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: RIL 201, 2017, s. 78)

3 PAALUPERUSTUSTEN SIVUKUORMITUS

3.1 Paalun sivuvastus ja -kuormitus

Paalun sivuvastus tai sivukuormitus johtuu paalun ja maan liikkeestä toisiinsa nähden. Sivuvastuksesta puhutaan, kun maa vastustaa paalun sivusiirtymää ja kuormituksesta, kun maa siirtyy paalua vasten. Sivuvastusta hyödynnetään laskettaessa paalun sivukapasiteettia. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005: RIL 223, 2005, s. 58).

Paalun sivukuormitus sekä samalla taivuturasitus aiheutuu ulkoisesta kuormasta, joko routimispainesta, maan painumisesta, maanpaineesta tai tunnetun siirtymän synnyttämästä pakkovoimasta. Yleisin pakkovoimien aiheuttaja on ylärakenteen lämpötilanmuutokset. Paalun muoto, kuormitusnopeus ja maan leikkauslujuus vaikuttavat sivukuorman suuruuteen. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 28).

Sivuvastuksen ja sivukuormituksen ääriarvot voidaan määrittää maan murtotilan mukaan maanpaineeteoriaan perustuen. Ääriarvojen suuruuteen vaikuttavat maan lujuusominaisuudet sekä kitkamaalla tehokas tilavuuspaino. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 23; Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 91).

Yksittäisen paalun sivuvastuksen ja -kuormituksen ääriarvot karkearakeisessa maassa ja moreenissa kasvavat lineaarisesti syvyyden kasvaessa. Kitkamaan ääriarvoa määrittämisessä käytetään yhtälöä 2. Kertoimet 3...4,4 kuvaavat normaalia sivuvastuksen ja -kuormituksen vaihtelualueita. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 60)

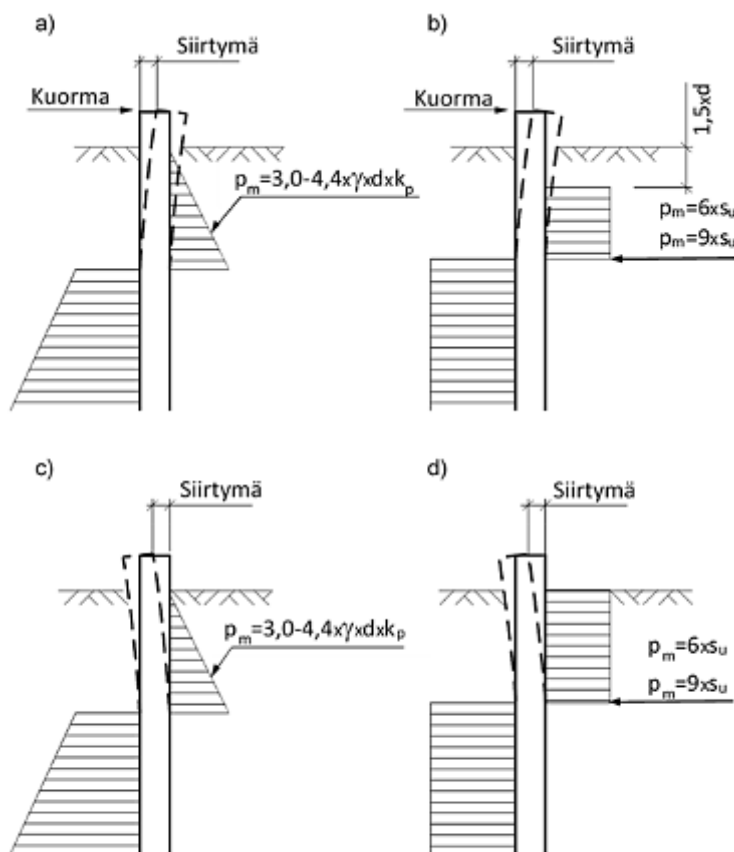
$$p_m = 3,0 \dots 4,4 * z * y' * K_p \quad (2)$$

missä p_m on sivukuormituksen tai -vastuksen ääriarvo [kN/m^2],
 z on syvyys maanpinnasta [m],
 y' on maan tehokas tilavuuspaino [kN/m^3] ja
 K_p on Rankinen passiivipaine kerroin.

Suomalaisten suunnitteluohjeiden mukaan koheesiomaassa käytetään sivuvastuksen ja -kuormituksen ääriarvona syvyydestä riippumattoman yhtälön (3) arvoa. Pysyville kuormille suositellaan käytettävän kerrointa 6 ja lyhytaikaisille kuormille kerrointa 9. Kuvassa 7 selvennetään sivukuormituksen ja -vastuksen eurokoodien mukainen murtoarvojen määrittäminen kitka- ja koheesiomaassa. Koheesiomaassa maan ollessa tukena (kuva 7, kohta b) eli sivuvastuksen tapauksessa pintakerros syvyydelle 1,5d saakka jätetään laskelmissa huomioimatta. Maan ollessa kuormana (kuva 7, kohta d) eli sivukuormituksessa myös pintakerros huomioidaan. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 23).

$$p_m = 6 \dots 9 * s_u \quad (3)$$

missä p_m on sivukuormituksen tai -vastuksen ääriarvo [kN/m^2] ja
 s_u on suljettu leikkauslujuus [kN/m^2].

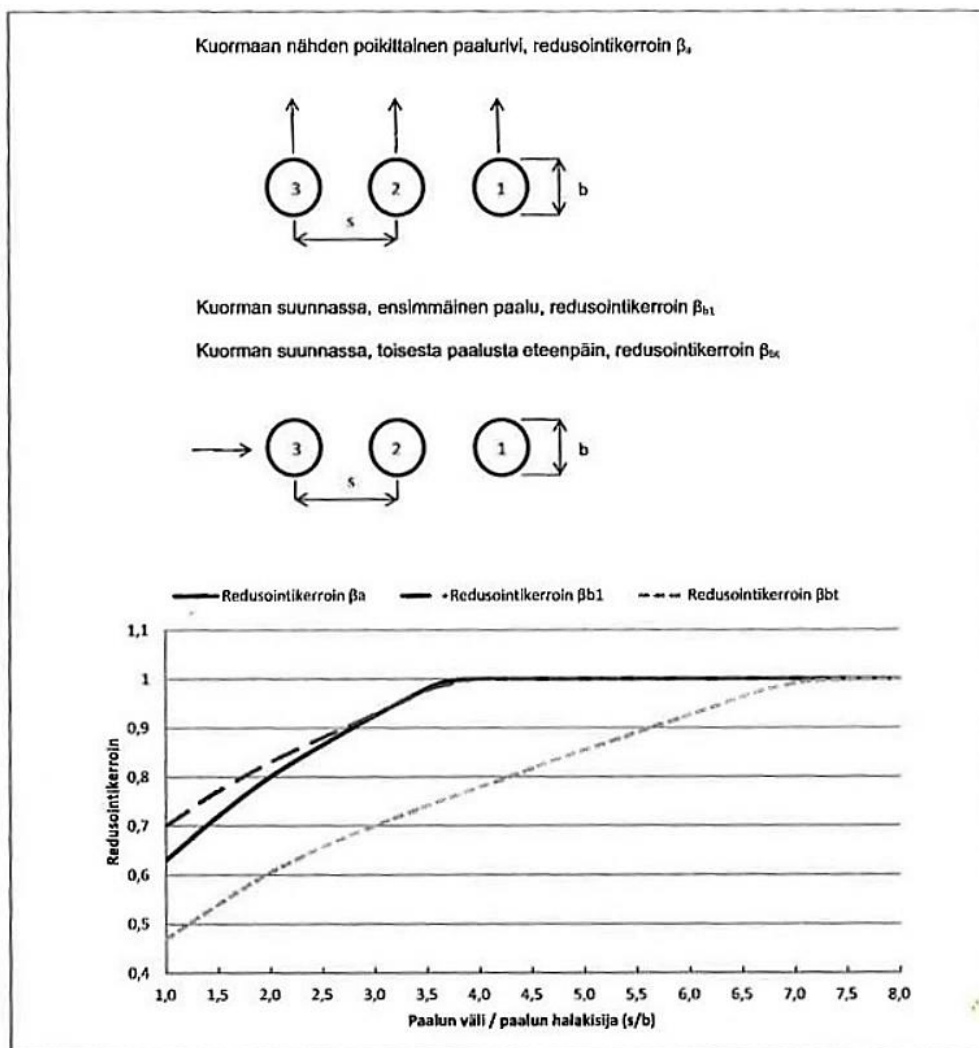


k_p = passiivinen maanpainekerroin
 γ = tehokas tilavuuspaino
 d = paalun halkaisija tai sivun pituus
 s_u = suljettu leikkauslujuus

Kuva 7 Paineen p_m ominaisarvon ääriarvot, jotka kohdittuvat paaluun
 a) kitkamaassa maan ollessa tukena,
 b) koheesiomaassa maan ollessa tukena,
 c) kitkamaassa maan ollessa kuormana ja
 d) koheesiomaassa maan ollessa kuormana.
 (Nummelin & Tolla, 2017, s. 24).

Yksittäisen paalun sivuvastus paaluryhmässä riippuu paalujen keskinäisestä sijainnista. Mitä kauempana paalut ovat toisistaan, sitä suurempi yksittäisen paalun sivuvastus on. Paaluryhmän yksittäisen paalun sivuvastuksen maksimiarvoa ja alustalukua voidaan pienentää vähennyskerroimella f_m , jolla sivuvastuksen ääriarvo ja alustaluku kerrotaan. Vähennyskerroin on riippuvainen paalujen keskinäisistä etäisyyksistä sekä paalujen sijainnista paaluryhmässä.

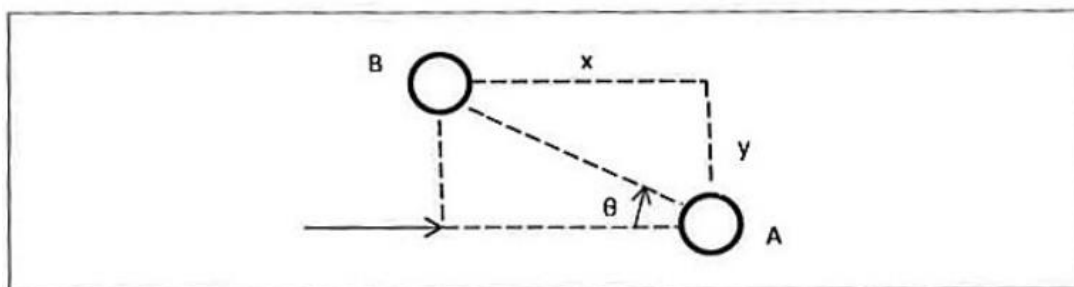
Kuvassa 8 esitetään kuorman suuntaiset ja kuormaan nähden poikittaiset redusointikertoimet. Paaluryhmän reunimmaisen rivin paaluille vähennyskerroin f_m lasketaan kertomalla β_a ja β_{b1} keskenään ja muiden sisempien paalurivien paaluille kertomalla β_a ja β_{bt} keskenään. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 95).



Kuva 8 Paalujen redusointikertoimet (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 95)

Jos paalut eivät sijaitse suorakulmaisesti toisiinsa nähden (kuva 9), niiden vähennyskerroin voidaan laskea kaavasta 4. Kerroin β_a saadaan kuvasta 8 käyttäen paalujen välistä etäisyyttä ja β_b (β_{b1} tai β_{bt}) riippuen tarkasteltavasta paalusta. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 96).

$$\beta_s = (\beta_b^2 * \cos(\theta)^2 + \beta_a^2 * \sin(\theta)^2)^{0,5} \quad (4)$$



Kuva 9 Paalujen sijainti toisiinsa nähden (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 95)

3.2 Paalun sivukuormakestävyys

Paalun sivukuormakestävyydellä tarkoitetaan paalun kestäväksi suurinta vaakakuormitusta. Paalun tulee kestää asianmukaisella varmuudella sille tulevat sivukuormitukset eri kuormitusyhdistelmillä ottaen huomioon maan sivutuennan. Paalun sivukuormakestävyys vastaa paalun myötömomenttia, suurinta sallittua sivusiirtymää tai paalun sivuvastusta. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005: RIL 223, 2005, s. 58; Suurpaalutusohje SPO-2001: RIL 212, 2001, s. 63).

Sallitun sivukuormakestävyuden määrää usein suurin sallittu taipuma tai siirtymä, eikä paalun tai maan murtuminen. Paalujen sivukuormakestävyys vaikuttavat maakerrosten jäykkyys ja lujuus, kiinnitysaste paalun päissä sekä paalun taivutusjäykkyys. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 26; Pienpaalutusohje PPO-2007: RIL 230, 2007, s. 97).

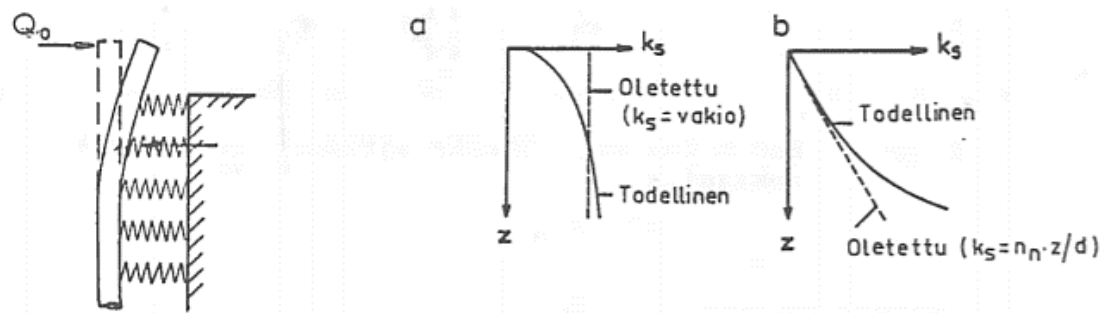
Paaluryhmän sivukuormakestävyys on pienempi kuin yksittäisellä paalulla, jos paaluryhmän paalujen leikkusvyöhykkeet osuvat päällekkäin (kts. kuva 3). Kapasiteettia on mahdollista kasvattaa esimerkiksi parantamalla maan lujuusominaisuuksia, pienentämällä sivukuormituksia tai hitsaamalla paaluun siivekkeet. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 27; Rasi-Koskinen, 2015, s. 27).

3.3 Winklerin menetelmä

Alustalukumallia eli Winklerin menetelmää käytetään sivukuormitettujen paalujen sivusiirtymien laskemisessa. Alustaluvuilla kuvataan sivukuormituksen ja -vastuksen sekä siirtymän välistä riippuvuutta. Maa-aines paalun ympärillä korvataan rakennemallissa kimmoisien jousien jousisarjalla. Jousien jäykkyyttä kuvataan alustaluvuilla (kaava 5, yleinen muoto), joiden arvot ovat riippuvaisia maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista, rakenteen mitoista, kuormituksen tyypistä sekä siirtymän suuruudesta. Alustaluvun arvo k_s on vakio vain pienillä siirtymän arvoilla, sillä sen arvo muuttuu huomattavasti siirtymän kasvaessa. Kuvan 10 vasemmassa reunassa maamassa on korvattu jousisarjalla ja oikealla esitetään alustaluvut koheesio- ja kitkamaassa. (Suutarinen & Slunga, 1981, s. 22).

$$k_s = \frac{p}{y'} \quad (5)$$

missä k_s on maan alustaluku [kN/m^3],
 p on jouseen kohdistuva maanpaine [kN/m^2] ja
 y' siirtymä [m].



Kuva 10 Winklerin alustalukumalli vasemmalla ja oikealla a) alustaluku koheesiomaassa sekä b) kitkamaassa (Suutarinen & Slunga, 1981, s. 22).

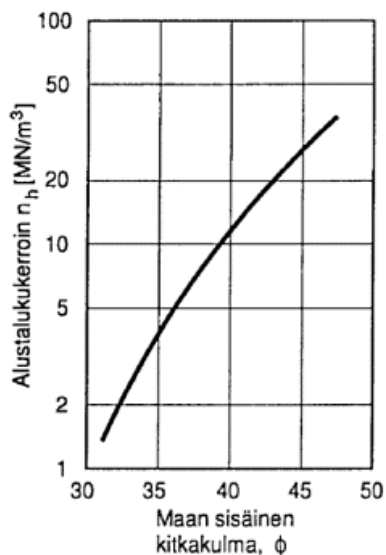
3.3.1 Kitkamaan alustaluku

Karkearakeisessa maassa ja moreenissa vaakasuuntainen alustaluku on riippumaton ajasta, koska siirtymät tapahtuvat heti kuormituksen alkaessa. Kitkamaan alustaluku voidaan määrittää yhtälön 6 avulla staattisessa kuormituksessa. Moreenissa ja karkearakeisessa maassa vaakasuuntainen alustaluku k_s oletetaan kasvavan lineaarisesti syvyydelle $10d$ saakka, jonka jälkeen alustaluku pysyy vakiona. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 98; Rasi-Koskinen, 2015, s. 32).

$$k_s = n_h * \frac{z}{d} \quad (6)$$

missä k_s on maan alustaluku [kN/m^3],
 n_h on alustalukukerroin [kN/m^3],
 d on paalun ulkohalkaisija [m] ja
 z syvyys maanpinnasta [m].

Alustalukukerroin n_h voidaan määrittää pohjavedenpinnan yläpuolella kuvan 11 avulla leikkauskestävyyskulman perusteella. Pohjavedenpinnan alapuolella alustalukukerroin n_h on 60 % kuvan 11 saaduista arvoista. Alustalukukerroin n_h havainnollistaa alustaluvun k_s muuttumisnopeuden syvyyden kasvaessa. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 98; Rasi-Koskinen, 2015, s. 32).



Kuva 11 Alustalukukertoimen arvointi kitkamaassa leikkauskestävyysskulman perusteella pohjavedenpinnan yläpuolella. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 98)

Kitkamaan erittäin vaativissa (GL3) ja vaativissa (GL2) pohjarakennuskohteissa alustaluku k_s suositellaan määritettäväksi kokoonpuristuvuusmoduulin M_s tai avoimen tilan kimmomoduulin E_d avulla (kaava 7). (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 99)

$$k_s = \beta * \frac{M_s}{d} = \frac{E_d}{d} \quad (7)$$

missä k_s on maan alustaluku [kN/m³],
 β hiekalle 0,83...0,95 Poissonin vakion vaihdellessa vastaavasti välillä 0,25...0,15,
 d on paalun halkaisija [m],
 M_s on kokoonpuristuvuusmoduuli [kN/m²] ja
 E_d on avoimen tilan kimmomoduuli [kN/m²].

Kokoonpuristuvuusmoduulin M_s ja avoimen tilan kimmomoduulin E_d arvot riippuvat muodonmuutos- ja jännitystasosta, joten ne täytyy määrittää oikealla jännitys-muodonmuutosalueella. Kimmomoduulin arvo on mahdollista määrittää kolmiaksaali- tai ödometrikokeella. Kokoonpuristuvuusmoduuli voidaan selvittää kairausvastuksen perusteella (liite 1) jännityseksponentin β ja moduuliluvun m perusteella kaavalla 8 tai ödometrikokeella. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 99).

$$M_s = m * 100 * \left(\frac{\sigma'_v}{100}\right)^{1-\beta} \quad (8)$$

missä M_s on kokoonpuristuvuusmoduuli [kN/m²],
 m moduuliluku (liite 1),
 σ'_v tehokas pystyjännitys [kN/m²] ja
 β jännityseksponentti (liite 1).

3.3.2 Koheesiomaan alustaluku

Hienorakeisessa maassa lyhytaikaista kuormitusta vastaava alustaluku on verrannollinen maan suljetun tilan kimmokertoimeen, joka on useimmiten suoraan verrannollinen maan suljetun tilan leikkauslujuuteen. Koheesiomaan leikkauslujuus kasvaa syvyyden funktiona, jos maa on normaalikonsolidoinut. Ylikondolisoituneessa koheesiomaassa leikkauslujuus on lähes vakio riippumatta syvyydestä ja kuivakuoressa syvyyden kasvaessa leikkauslujuus pienenee. Laskelmissa käytetään yleensä vakioarvoja. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 48; Suutarinen & Slunga, 1981, s. 23).

Vaakasuoran alustaluvun arvoon koheesiomaassa vaikuttaa kuormitusaika sekä paalun halkaisija. Vaativissa pohjarakennusolosuhteissa (GL2) alustaluvun vaihteluväli voidaan määrittää yhtälöllä (9) pitkäaikaisessa kuormituksessa. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 99-100).

$$k_s = 20 \dots 50 * \frac{c_u}{d} \quad (9)$$

Lyhytaikaisessa kuormituksessa alustaluvun vaihteluväli määritetään yhtälöllä (10).

$$k_s = 50 \dots 150 * \frac{c_u}{d} \quad (10)$$

missä k_s on maan alustaluku [kN/m^3],
 c_u on maan suljettu leikkauslujuus [kN/m^2] ja
 d on paalun halkaisija [m].

Erittäin vaativissa pohjarakennusolosuhteissa (GL3) pitkäaikaisessa kuormituksessa alustaluku k_s suositellaan määritettäväksi koheesiomaassa ödometrikokeella määritetyn kokoonpuristuvuusmoduulin M_s avulla yhtälöllä (11).

$$k_s = \beta * \frac{M_s}{d} \quad (11)$$

missä k_s on maan alustaluku [kN/m^3],
 β 0,46...0,74 savelle Poissonin vakion vaihdellessa vastaavasti välillä 0,4...0,3,
 β 0,62...0,83 siltille Poissonin vakion vaihdellessa vastaavasti välillä 0,35...0,25,
 d on paalun halkaisija [m] ja
 M_s on kokoonpuristuvuusmoduuli [kN/m^2].

Lyhytaikaisessa kuormituksessa koheesiomaassa pohjarakennusolosuhteiden ollessa erittäin vaativia (GL3) alustaluku k_s tulisi määrittää kolmiakσιαalikoekella määritetyn suljetun tilan kimmomoduulin E_u avulla (kaava 12). (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 99).

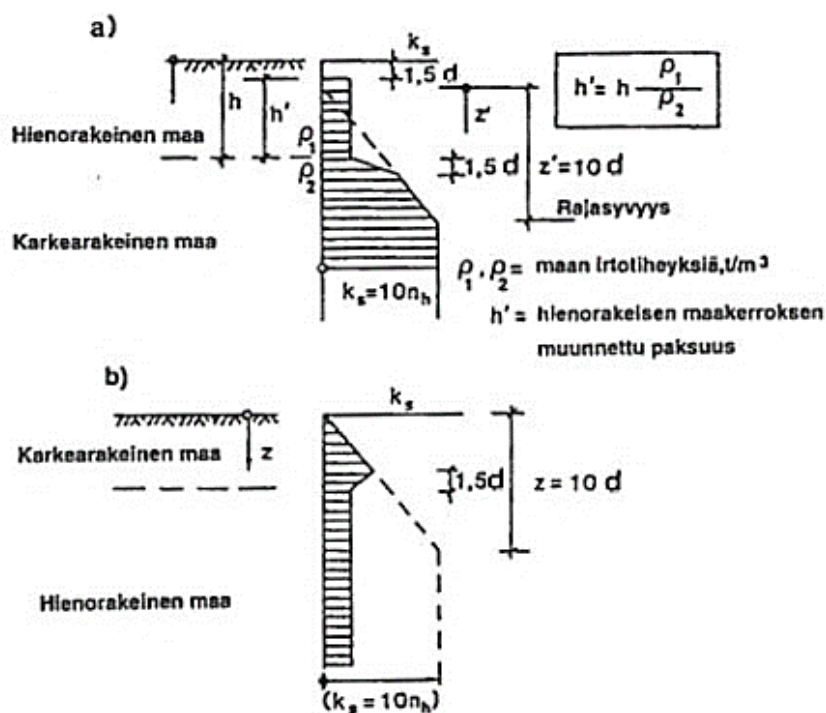
$$k_s = \frac{E_u}{d} \quad (12)$$

missä k_s on maan alustaluku [kN/m^3],
 d on paalun halkaisija [m] ja
 E_u on avoimen tilan kimmomoduuli [kN/m^2].

3.3.3 Alustaluku kerroksellisessa maassa

Kerroksellisen maan vaakasuuntainen alustaluku määritetään kuvan 12 mukaisesti. Koheesiomaan ollessa pintakerroksena (12a) alustaluku pysyy nollana syvyydelle $1,5d$ saakka. Koheesio- ja kitkamaan rajapinnasta alkaen koheesiomaan alustaluvut muuttuvat lineaarisesti kitkamaata vastaaviin alustalukuihin syvyyden $1,5d$ aikana. Kitkamaassa alustaluku kasvaa lineaarisesti $10d$ matkalla syvyydestä $1,5d$ alkaen yhtälön 4 mukaisesti ja pysyy vakiona syvyyden $11,5d$ jälkeen.

Kitkamaan ollessa pintakerroksena (12b) alustaluvut lasketaan kaavan 6 mukaisesti. Kitka- ja koheesiomaan rajapinnassa alustaluku muuttuu lineaarisesti $1,5d$ matkalla koheesiomaan alustaluvuiksi. (Luukkonen, 2015, s. 61).



Kuva 12 Kerroksellisen maan vaakasuora alustaluku
 a) hienorakeinen maa karkearakeisen maakerroksen yläpuolella
 b) karkearakeinen maa hienorakeisen maakerroksen yläpuolella
 (Suurpaalutusohje SPO-2001: RIL 212, 2001, s. 71)

3.3.4 Syklisen kuorman vaikutus alustalukuun

Syklisellä kuormituksella tarkoitetaan ajan suhteen muuttuvaa kuormitusta, jossa hitausvoimilla ei ole yleensä vaikutusta rakenteen rasitukseen. Kuormituksen suunta voi olla vaihtuvaa tai yksisuuntaista. Syklisen eli toistuvan kuormituksen ylärajana pidetään yleensä taajuutta 1 Hz. Staattiseen kuormitustilanteeseen verrattuna syklinen kuormitus tiivistää maata paalun ympäriltä, joten se lisää sivusiirtymien suuruutta. Hiekan tiivyyden ollessa toistuvassa kuormituksessa alle kriittisen arvon, sen nesteytymisvaara on otettava huomioon. Tämä kriittinen arvo vastaa heijarikairausvastusta 15 lyöntiä/0,2 m. (Suurpaalutusohje SPO-2001: RIL 212, 2001, s. 73).

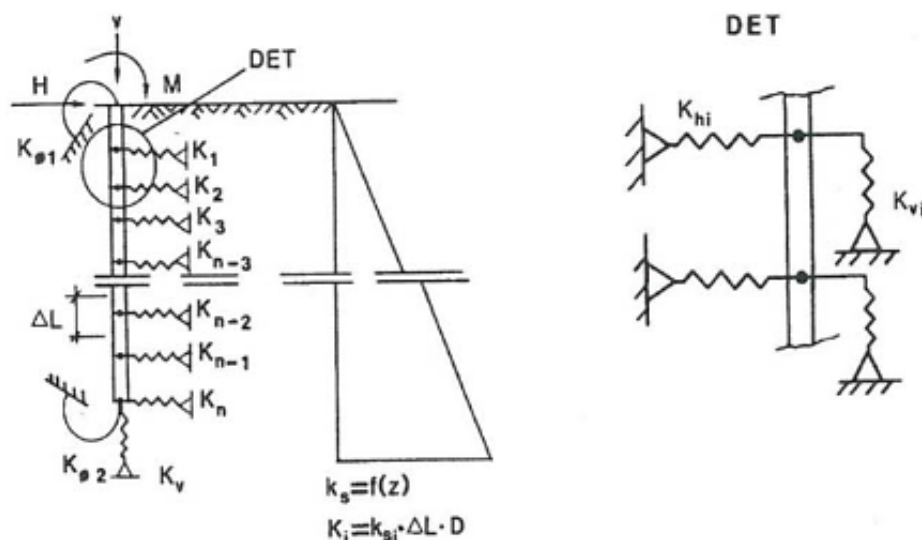
Toistuvasti kuormitetun paalun tai paaluryhmän tarkastelussa voidaan hyödyntää staattista alustalukumenetelmää soveltaen. Syklisen kuormituksen takia, suositellaan käytettäväksi taulukon 2 arvoja alustalukuina karkearakeisessa maassa. Toistuva kuormitus kasvattaa siirtymiä syvyyteen 3...4d saakka, jonka jälkeen käytetään staattisia alustaluvun arvoja. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005: RIL 223, 2005, s. 65).

Alustaluku syklisessä kuormituksessa	Suhteellinen tiiviyys D_r		
	<0,35 (löyhä)	0,35-0,65 (keskitiivis)	>0,65 (tiivis)
k_{ss}	0,25 k_s	0,33 k_s	0,50 k_s

Taulukko 2 Karkearakeisessa maassa syklisessä kuormituksessa käytettävät alustaluvun k_{ss} arvot. k_s tarkoittaa staattista alustalukua. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005: RIL 223, 2005, s. 66)

3.3.5 Jousimalli

Vaakavoimien tai -siirtymien rasittamat paalut mitoitetaan hyödyntäen rakennemallia, joka huomioi maan ja paalun muodonmuutosominaisuudet. Tällaista rakennemallia kutsutaan esimerkiksi jousimalliksi (kuva 13), jossa jouset kuvaavat maaperän ominaisuuksia. Jousien jäykkyys ja maan vaakasuuntainen kantokestävyys määräytyvät maaperän ominaisuuksien mukaan. Maan vaakasuuntaisella kantokestävyydellä tarkoitetaan sivuvastuksen ääriarvoa, jonka jälkeen jousen voima ei kasva. Jousien avulla voidaan kuvata paaluun vaikuttavan paineen ja sitä vastaavien siirtymien välistä riippuvuutta. Jousien jäykkyys lasketaan alustaluvuilla, jotka ovat materiaaliparametreja eli niiden arvot riippuvat maan kokoonpuristuvuudesta sekä rakenteen mitoista. (Nummelin & Tolla, 2017).



Kuva 13 Maaperän ja paalun vuorovaikutusta havainnollistava elementti-jousimalli (Suurpaalutusohje SPO-2001: RIL 212, 2001, s. 72)

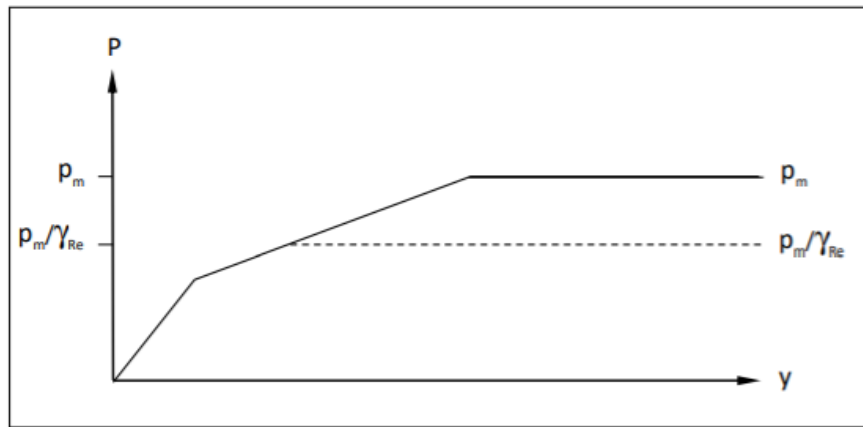
Jousimallissa huomioidaan maan kimmoplastinen käyttäytyminen sekä maanpaineen jakautuminen paalun levyiselle maakaistaleelle. Paalun kärjen ja pään reunaehdot mallinnetaan jousien avulla mahdollisimman hyvin vastaamaan todellista rakenteen toimivuutta. Paalujen liikkeistä aiheutuvat reaktiovoimat keskitetään solmupisteisiin jousilla, joiden jousivakioiden arvot vastaavat maan alustaukua tarkasteltavassa rajatilassa. Jousivakiot lasketaan yhtälöllä 13. Maan kerroksellinen rakenne on myös mahdollista huomioida jousimallin avulla. (Suurpaalutusohje SPO-2001: RIL 212, 2001, s. 72).

$$k_{1,2} = k_s * \Delta L * d \quad (13)$$

missä $k_{1,2}$ on jousivakio [kN/m],
 k_s on maan alustaluku [kN/m³],
 ΔL on jousien väli [m] ja
 d on paalun halkaisija [m].

Maan lujuuden osavarmuusluku osoitetaan vaikuttavan mitoittaessa kestävyys, ei lujuusominaisuuksiin. Kestävyys osavarmuusluvut eivät vaikuta jousen jäykkyyteen, vaan jäykkyys määräytyy maaparametrien arvojen perusteella. Kuorman yhdistelykerroin ja osavarmuusluku määräytyvät aiheuttavan kuormituksen mukaan.

Murtorajatilassa maan ollessa tukena, laskennassa hyödynnetään jouta, jonka sivuvastuksen ääriarvo on jaettu kestävyys osavarmuusluvulla. Maan ollessa kuormana, hyödynnetään käyttö- ja murtorajatilassa sivuvastuksen ääriarvon mukaista jouta. Kuvassa 14 esitetään laskennassa käytettäviä sivupaine-siirtymäyhteyksiä. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 64).

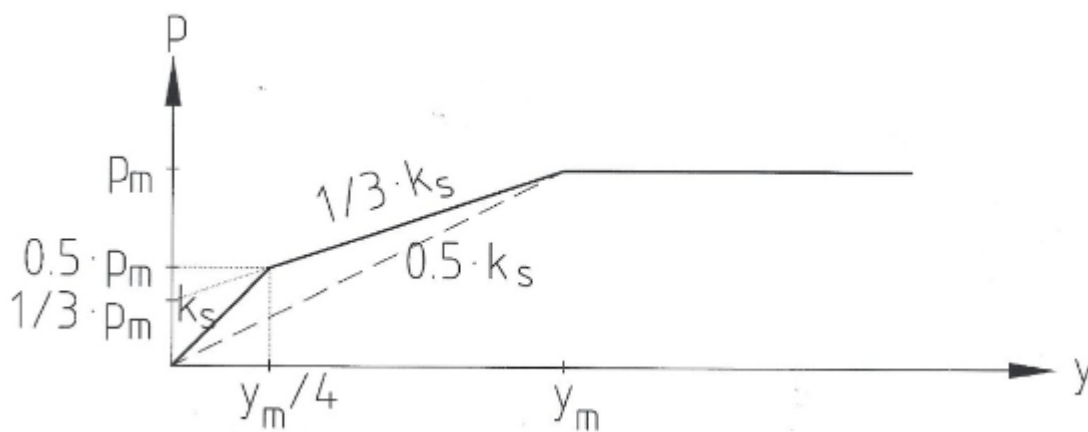


Kuva 14 Käyttö- ja murtorajatilan laskennassa hyödynnettävä sivupaine–siirtymäyhteys maan ollessa kuormana (p_m) ja murtorajatilassa maan ollessa tukena (p_m/g_{Re}) (Nummelin & Tolla, 2017, s. 64)

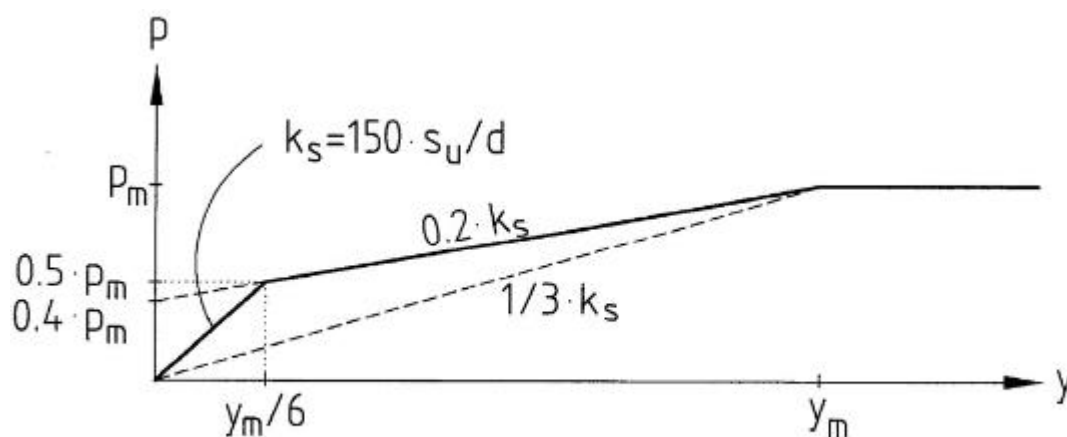
Rakenteen rasittaminen yksittäisillä kuormilla sekä näiden vaikutusten yhdisteleminen (voimasuureet, jousivoimat) ei ole sallittua, sillä maan epälineerisen käyttäytymisen vuoksi superpositioperiaate ei ole voimassa. Superpositioperiaate on kuitenkin voimassa, jos rakenne on kokonaisuudessaan lineaarisella alueella. Poikkeuksen tähän sääntöön tuo koheesiomaassa olevat paalut, joihin kohdistuu sekä lyhyt-, että pitkäaikaisia kuormituksia. Tällöin kuormien vaikutukset lasketaan erikseen ja summataan yhteen, koska hienorakeisen maan jäykkyys ei ole riippuvainen pitkäaikaisten kuormien aiheuttamasta muodonmuutostilasta hetkellisessä kuormituksessa. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 65).

3.3.6 Alustaluvun ja siirtymän yhteys

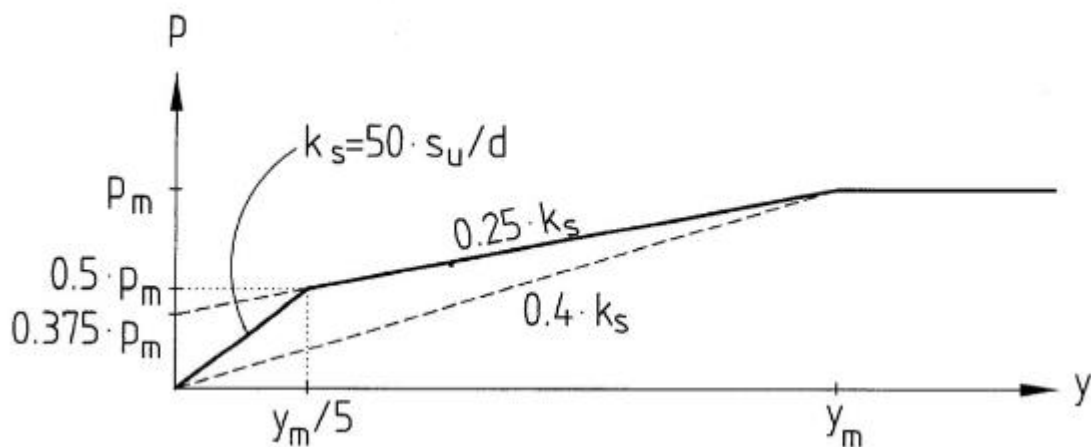
Alustaluvun likimääräinen sivupaineen ja siirtymän välinen yhteys kitkamaassa on esitetty kuvassa 15. Hienorakeisen maan alustaluvun likimääräinen sivupaineen ja siirtymän välinen yhteys on esitetty kuvassa 16 lyhytaikaisella kuormituksella ja pitkäaikaisella kuormituksella kuvassa 17. Kuvassa p_m on paaluun kohdituvan sivupaineen ääriarvo, y_m sitä vastaava siirtymä sekä k_s alustaluku. Katkoviiva määrittää pisteen (p_m, y_m) , eikä se havainnollista maan todellista käyttäytymistä. Jos siirtymä on suurempi kuin y_m , jousi on plastinen ja jousivoima on vakio siirtymästä riippumatta. Alustaluvun arvo pysyy vakiona, jos siirtymät ovat pieniä. (Luukkonen, 2015, s. 58; Nummelin & Tolla, 2017, s. 63).



Kuva 15 Paalun sivupaineen ja siirtymän välinen yhteys karkearakeisessa maassa. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 62)



Kuva 16 Paalun sivupaine – siirtymäyhteys hienorakeisessa maassa lyhytaikaisella kuormituksella. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 63)



Kuva 17 Paalun sivupaine – siirtymäyhteys hienorakeisessa maassa pitkäaikaisella kuormituksella. (Nummelin & Tolla, 2017, s. 64)

Kitkamaassa laskentaohjelman hyödyntäessä vain lineaarikimmoista joustua laskeminen aloitetaan jousella, joka vastaa alustalukua. Jos jousen siirtymä on suurempi kuin $y_m/4$, alustaluvun arvoa pienennetään ja tehdään uusi laskenta. Laskennassa kaikkien jousien voimat tulee olla kuvan 10 yhtenäisellä viivalla.

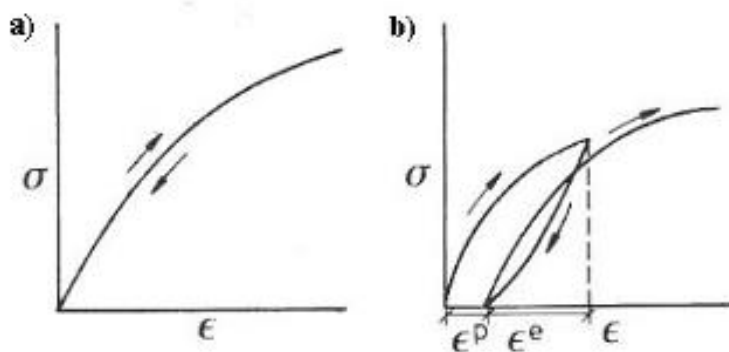
Sama tulos saavutetaan, jos ensimmäisen laskennan jälkeen $p > p_m/2$ tai $y > y_m/4$ laitetaan jousen kohdalle paaluun kohdistuva sivupainetta $p_m/3$ vastaava vaakavoima ja määritetään jousi uudelleen alustaluvun $k_s/3$ arvolla, ja suoritetaan uusi laskenta kyseisillä arvoilla. Jos laskennan jälkeen $y > y_m$, jousi poistetaan ja sen paikalle laitetaan sivupainetta p_m vastaava voima. Laskentaa jatketaan niin pitkään, että jokaisen jousen voimaa vastaava paaluun vaikuttava paine ja siirtymä ovat kuvan 14 mukaisella yhtenäisellä viivalla. Laskentaohjelman salliessa epälineaarisen mallinnuksen kimmoisella alueella, tarvitaan vain yksi laskenta. (Liikennevirasto, 2012, s. 31-33)

3.4 Paaluperustuksen käyttäytyminen sivukuormituksessa

3.4.1 Paalua ympäröivän maan käyttäytyminen

Maapohja koostuu useista päällekkäisistä maakerroksista, joten se on yleensä anisotrooppista, epäjatkuvaa ja epähomogeenista. Tästä johtuu, että kiinteän aineen jännitys–muodonmuutosriippuvuutta kuvaavat yhtälöt eivät suoraan päde maamateriaalille. Maapohjan käyttäytymiseen vaikuttavat sen komponenttien ominaisuudet, kuten raekoko ja sen jakauma, sekä tiiveys.

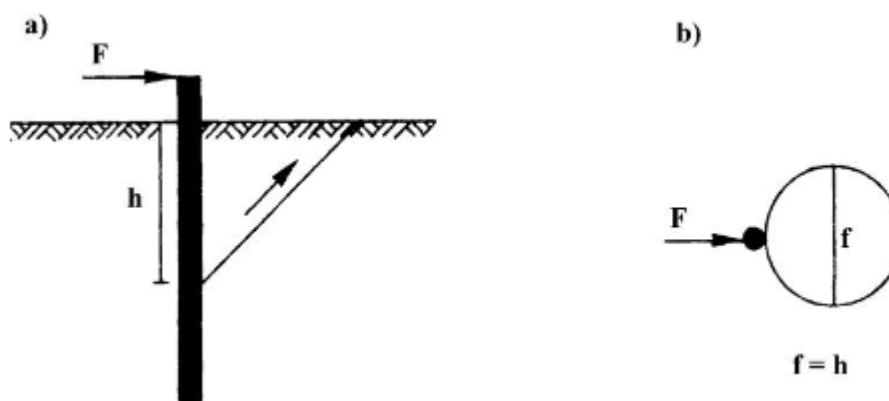
Maamateriaalille on luonteenomaista kimmoisen alueen epälineaarinen käyttäytyminen, Bauschingerin ilmiö, hystereesi sekä vetolujuuden puuttuminen. Kuvan 18 kohdassa a esitetään maan epälineaarinen kimmainen käyttäytyminen. Bauschingerin ilmiö tarkoittaa materiaalin myötörajan alenemista sekä myötörajan ylittämisen jälkeen maa käyttäytyy eri lailla puristuksessa ja vedossa. Hystereesillä tarkoitetaan, ettei muodonmuutos-jännitys –polku kuormituksessa ja palautuksessa yhdy (kuva 18, kohta b). (Geomekaniikka II: RIL 157, 1990, s. 15; Rasi-Koskinen, 2015, s. 21).



Kuva 18 Muodonmuutos-jännitys –kuvaaja
 a) kimmoisen alueen epälineaarinen käyttäytyminen
 b) saven toiminta suljetussa kolmiakσιαalikokeessa
 (Rasi-Koskinen, 2015, s. 21)

Maan muodonmuutokset jakautuvat tavallisesti kimmoiseen eli palautuvaan ja plastiseen eli palautumattomaan osaan. Palautuvia muodonmuutoksia esiintyy pääasiassa kuormituksen alussa ja niiden osuus vähenee huomattavasti kuormituksen kasvaessa. Plastisten muodonmuutosten osuus lisääntyy kuormituksen kasvaessa, kunnes tavoitetaan maaperän murtotila. Maamateriaalin leikkausjännitykset ovat murtotilassa maan leikkauslujuuden suuruisia. (Geomekaniikka II: RIL 157, 1990, s. 16-17).

Maan murtuminen tapahtuu sivukuormitetun paalun ympärillä joko maan pinnassa liukupintamurtumana tai syvemmällä maassa vaakasuuntaisena liikkeenä. Liukupintamurtumassa paalun eteen muodostuu kartion muotoinen liukupinta, jonka halkaisija on likimain maanpinnan ja liukupinnan alapään välisen etäisyyden mittainen (kuva 19). Karkearakeisessa maassa liukupintamurtuminen tapahtuu likimäärin syvyydelle $15d$ saakka ja hienorakeisessa maassa noin syvyydelle $3d$ asti. Syvemmällä maaperässä ei kehity liukupintaa, joten murtuminen tapahtuu paikallisesti maan plastisoituessa paalun ympäriltä, jolloin paalu leikkautuu maaperän läpi. Murtuminen tapahtuu horisontaalisena liikkeenä, jolloin paalun taakse syntyy rako paalun pää siirtyessä. Rako täyttyy pohjavedenpinnan alapuolisissa ja kuivissa karkearakeisissa maissa. Hienorakeisissa maissa ja kosteissa karkearakeisissa maissa rako jää pysyväksi. Syklisellä kuormituksella maa valuu rakoon ja se tiivistyy paalun ympärillä, jolloin maa painuu ja paalun ympärille kehittyy kuoppa. (Luukkonen, 2015, s. 44-45; Rasi-Koskinen, 2015, s. 23).

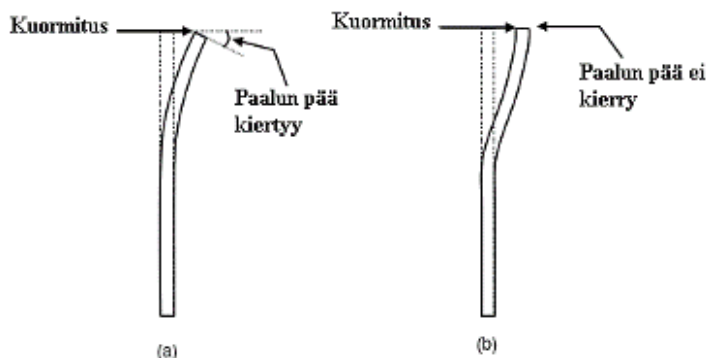


Kuva 19 Paalun eteen kehittyvä liukupinta murtotilassa a) sivulta b) ylhäältä katsottuna. (Luukkonen, 2015, s. 45)

3.4.2 Paalun toiminta sivukuormituksessa

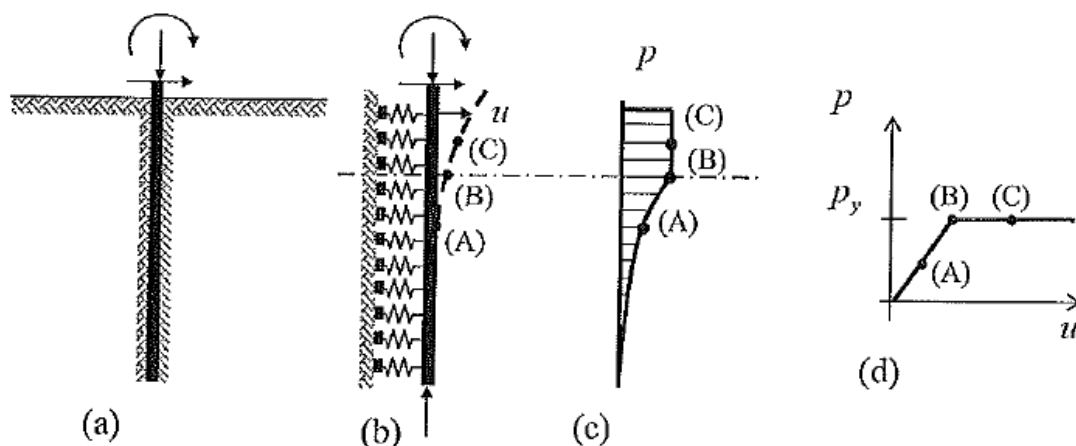
Horisontaalisesti kuormitetun paalun toiminnan analysointi pohjautuu siihen, että sivusuuntainen kuormitus aiheuttaa maaperässä ulkoista kuormitusta vastustavia voimia eli sivuvastusta. Kyseisen sivuvastuksen jakautuminen ja suuruus ovat riippuvaisia paalun kiinnityksestä rakenteeseen sekä paalun ja maan suhteellisesta jäykkyydestä. Paalun suhteellinen jäykkyys on riippuvainen ympäröivän maan jäykkyydestä, paalun pituudesta sekä paalun jäykkyydestä. Poikittaiskuormitetut paalut voidaan jakaa murtomekanismin perusteella pitkiin ja taipuisiin sekä lyhyisiin ja jäykkiin perustuksiin. (Das, 2011, s. 40; Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 90).

Vaakakuormitetussa paalussa voi tapahtua yläpään kiertymistä (kuva 20), jos yläpään kiinnitys on vapaa. Silloin se pääsee vapaasti kiertymään ja sivukuormakestävyys on noin 50 % pienempi kuin jäykästi kiinnitetyllä paalulla. Paalun yläpään olessa kiinnitettyinä jäykästi rakenteeseen, se ei pääse kiertymään. (Das, 2011, s. 40).



Kuva 20 Paalun yläpään kiertyminen:
 a) vapaa yläpää
 b) jäykästi kiinnitetty yläpää.
 (Rasi-Koskinen, 2015, s. 28)

Kuvassa 21 yläpästä vapaata paalua kuormitetaan vaakasuuntaisella voimalla, momentilla ja normaalivoimalla. Paalu kantaa normaalivoiman kärjellään, joten sen arvo pysyy vakiona koko paalun matkan. Paalussa on vaihteleva poikittaissuuntainen siirtymä u paalun akselin suuntaisesti. Kuvan syvyydellä A poikittainen siirtymä on niin pieni, ettei sivupaineen ääriarvoa p_y saavuteta. Maaperä vastustaa paalun liikkeitä ja ottaa kuormitusta vastaan, joten siirtymä on pieni. Syvyydellä B, joka on lähempänä paalun yläpäätä kuin piste A, vaakasuuntainen siirtymä on jo niin iso, että sivupaineen ääriarvo saavutetaan. Pisteessä C siirtymä on suurin, vaikka kuormitus paalulle on sama. Mitä lähempänä tarkasteltava piste on paalun yläpäätä, sitä suurempia siirtymät ja kuormitukset ovat, koska maaperä ei ole vastustamassa paalun liikkeitä ja ottamassa kuormituksia vastaan. (Alén & Svahn, 2006, s. 5).



Kuva 21 Paalun käyttäytyminen sivukuormituksessa:
 a) paalua kuormitetaan momentilla, normaalivoimalla ja vaakasuuntaisella voimalla
 b) maaperä kuvataan kimmoisilla jousilla kuormitusten vaikuttaessa

- c) kuormituksen vaikutus pisteissä A, B ja C
 d) sivupaineen ja siirtymän välinen yhteys.
 (Alén & Svahn, 2006, s. 5).

Hienorakeisessa maassa eli savessa ja siltissä, poikittaiskuormitetun paalun käyttäytymistä voidaan arvioida parametrilla R (kaava 14). Vastaavasti karkearakeisissa maalajeissa eli hiekassa ja sorassa, paalun toimintaa arvioidaan parametrin T avulla (kaava 15).

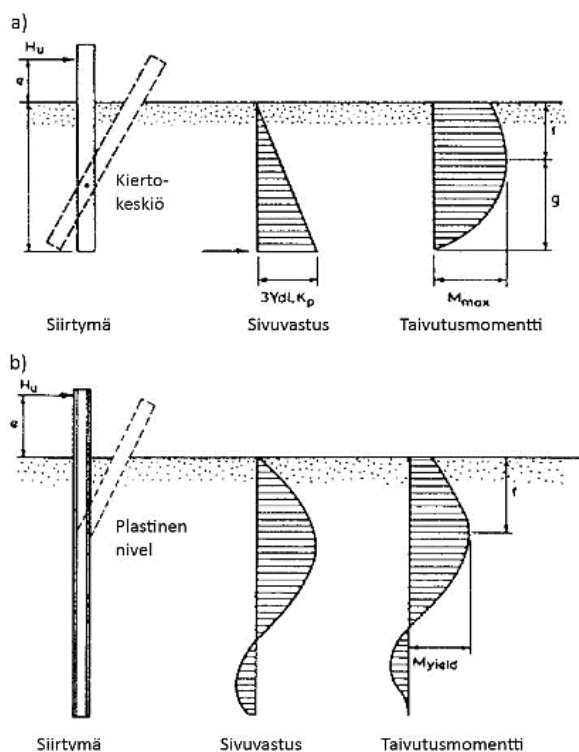
$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{E_s}} \quad (14)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \quad (15)$$

missä EI = paalun taivutusjäykkyys [kNm^2],
 E_s = koheesiomaan vaakasuuntainen kimmomoduli [kN/m^2] ja
 n_h = vaakasuuntainen alustalukkerroin karkearakeisessa maassa [kN/m^3].

Paalun jäykkyysuhteen ollessa enintään kaksi (L/R tai L/T), sitä käsitellään maassa kiertyvänä jäykkänä kappaleena ja muodonmuutoksia paalussa ei huomoida. Jäykkä ja lyhyt paalu kiertyy maaperässä kiertokeskuksensa ympäri ja maa murtuu ennen kuin paalu myötää. Jäykkyysuhteessa verrataan paalun upotussyvyyden L suhdetta parametriin R tai T . Kiertokeskuksen paikka lasketaan momenttitasapainoehdon perusteella. Homogeenisessa maassa kiertokeskus sijaitsee likimain syvyydellä, joka on 70 % paalun upotussyvyydestä. (Paalutusohje: RIL 254, 2016, s. 90).

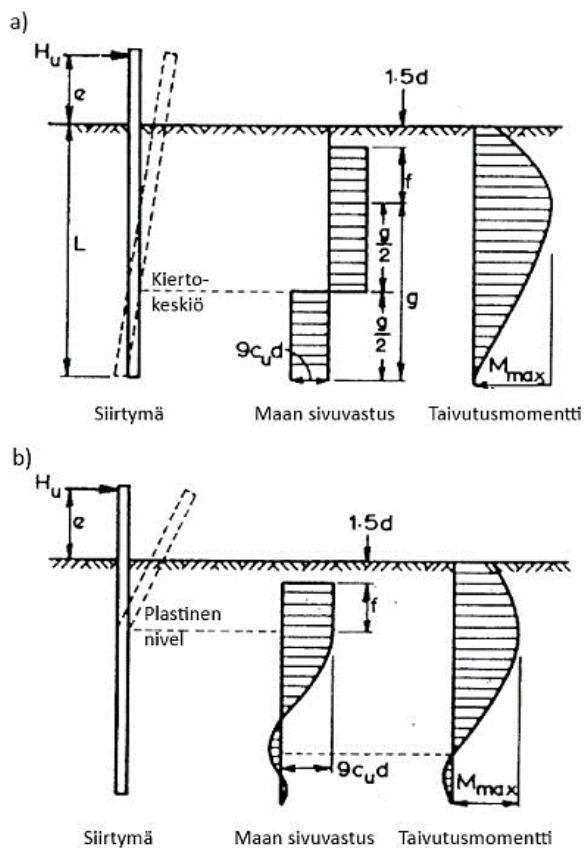
Jäykkyysuhteen ollessa vähintään neljä, laskelmissa tulee huomioida paalun muodonmuutokset. Tällöin jäykkyysuhteen arvoa neljä vastaava paalupituus on saavuttanut sivuvastukseen verrattain paalun toiminnallisen pituuden äärimmäisen arvon. Paalu murtuu silloin ennen maan murtumista ja perustussyvyyden lisääminen ei enää vaikuta paalun toimintaan. Jäykkyysuhteen saadessa arvot 2–4, voidaan interpoloida arvot tarpeellisella tarkkuudella. Kuvissa 22 ja 23 esitetään yläpäästään vapaasti kiertyvän paaluperustuksen jäykkyysuhteen vaikutusta paalun rasitukseen ja murtomekanismiin kitka- ja koheesiomaassa.



Kuva 22 Kitkamaassa jäykkyysuhteen vaikutus paalun rasitukseen ja murtomekanismiin

a) jäykkä ja lyhyt paalu (Broms, 1964, s. 130)

b) taipuisa ja pitkä paalu. (Broms, 1964, s. 138)



Kuva 23 Koheesiomaassa jäykkyysuhteen vaikutus paalun rasitukseen ja murtomekanismiin

a) jäykkä ja lyhyt paalu (Broms, 1964, s. 48)

b) taipuisa ja pitkä paalu. (Broms, 1964, s. 51).

4 VÄRÄHTELY

Korkeaan rakennukseen vaikuttava tuuli on usein dynaaminen eli ajan suhteen vaihtuva kuormitus, joten se voi aiheuttaa värähtelyä. Tuulen vaikutuksia rakenteisiin sanotaan yleisesti vasteiksi, tällaisia ovat esimerkiksi kaatava momentti, kiihtyvyydet, taipumat ja eri rakenneosien momentit. Korkeissa rakennuksissa rakenteiden ominaisuuksilla on suuri vaikutus rakenteen vasteeseen tuulikuormituksessa. Korkeiden rakennusten tuulensuuntainen ja tuulta vastaan kohtisuora värähtely sekä vääntövärähtely ovat kaikki merkittäviä rakenteiden kelpoisuuden ja käyttömukavuuden kannalta. (Kortelainen, 2012, s. 37, 53; Mäkinen, 2017, s. 29).

Tuulikuormitus voi aiheuttaa staattista tai dynaamista kuormitusta. Likimain tasainen ja matalataajuuksinen tuulennopeus aiheuttaa rakenteelle siirtymän, joka on vastaava kuin staattisen kuorman aiheuttama. Tällöin puhutaan taustavärähTELystä tai kvasistaattisesta kuormasta, jolloin dynaaminen kuorma on korvattu normimitoituksessa staattisella kuormalla. Tuulikuormitusta käsitellään dynaamisena kuormituksena, jos tuulennopeuden vaihtelun taajuus on lähellä rakenteen ominaistaajuutta. Ominaistaajuudella tarkoitetaan taajuutta, jolla rakennus vapaasti värähtelee. (Kortelainen, 2012, s. 21-22).

Tuulen turbulentsuus sekä tuulen pyörteiden irtoaminen rakenteen sivuilta aiheuttavat rakenteiden värähtelyä. Pyörteiden irtoaminen rakenteen sivuilta tapahtuu yhtäaikaaisesti pienillä tuulennopeuksilla, mutta tuulennopeuden voimistuessa pyörteet irtoavat eri aikoihin, jolloin rakenteeseen syntyy vaihteleva vaakasuuntainen kuormitus. Korkeissa rakenteissa tämä voi olla määräävä tuulen aiheuttama vaste. Värähtely voidaan jakaa resonoivaan eli rakenteen ominaistaajuudella tapahtuvaan värähtelyyn sekä taustavärähTELyyn. TaustavärähTELy on matalilla taajuuksilla tapahtuvaa ja se vaikuttaa kaikkiin rakenteisiin ja rakennuksiin samalla lailla. Korkeammilla taajuuksilla tuulen aiheuttamasta värähTELystä voidaan erottaa rakenteen ominaistaajuudella resonoivat vasteet. Mitä korkeampi rakennus on, sitä merkittävämpiä kuormituksia värähtely aiheuttaa. Korkeiden rakenteiden ominaistaajuus on yleensä matala ja resonointi tapahtuu matalilla taajuuksilla, jossa taustavärähTELy on myös voimakasta. (Kortelainen, 2012, s. 24-25).

Tuulikuormitusta tarkasteltaessa oleellisimpia ovat vaakasiirtymät käyttörajatilassa, jotka ovat usein dynaamisissa analyysissä mitottavia. Paaluperustukset ovat pystysuunnassa erittäin jäykkiä, joten resonanssivaaraa pystysuunnassa ei ole. Vaakasuunnassa värähtely on yleistä, vaikka paalut lisäävät myös vaakasuuntaista jäykkyyttä. Paaluperustuksilla voidaan pienentää perustuksen värähtelyamplitudeja sekä lisätä perustuksien ominaistaajuutta ilman, että anturan kokoa suurennetaan. (Juuti, 2016, s. 49-50).

Rakenteen ominaistaajuuden tarkalla määrittämisellä on suuri merkitys resonanssivärähTELyn arvioimisessa, johon tarvittavia lähtötietoja ovat rakennuksen mitat, jäykkyys kahteen suuntaan, massa kerroksittain sekä hitausmomentti, kiertymäjäykkyys ja jäykkyysskeskiö. Näiden avulla saadaan määritettyä rakennuksen ominaismuodot ja -taajuudet, jotka ovat värähTELyanalyysin tärkein ja keskeisin vaihe. (Kortelainen, 2012, s. 53).

Rakennuksen ominaistajuutta ja sen muutoksia voidaan myös tarkastella jousimallilla. Jousivakioiden muutokset vaikuttavat rakennuksen ominaistajuuteen, joten se tulee tarkistaa suunnittelun ja mitoittamisen yhteydessä. Tässä opinnäytetyössä ei tarkastella jousivakioiden vaikutusta rakennuksen ominaistajuuteen.

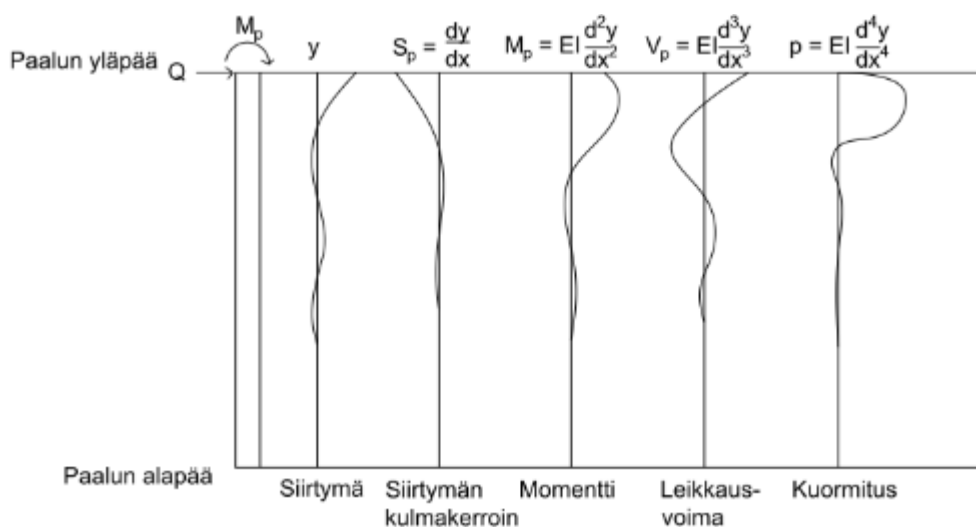
5 JOUSIMALLIMENETELMÄ

FEM-menetelmällä (Finite Element Method) tarkoitetaan elementtimenetelmällä tehtävää laskentaa, jossa hyödynnetään matriisilaskentaa. Elementtimenetelmä on yleisin ja tehokkain numeerinen ratkaisumenetelmä lujuuslaskennassa. Yksittäisten elementtien tunnetuista kuormitus-muodonmuutoksesta voidaan ratkaista koko rakenteen käyttäytyminen. Kun rakenteen tuenta tunnetaan, elementtimenetelmällä pystytään ratkaisemaan kuormituksen aiheuttamat siirtymät, jännitykset ja muodonmuutokset. Elementit yhdistetään toisinsa solmujen avulla, joihin jouset mallissa sijoitetaan. Tässä opinnäytetyössä hyödynnetään Dlubal RFEM v5.14 © -ohjelmistolla tehtyä 3D-jousimallia. (Matilainen, 2017, s. 22; Rasi-Koskinen, 2015, s. 47).

Paalun ja maan kaksiulotteisessa elementti-jousimallissa paalu esitetään palkkielementtinä ja maan vaakasuuntaisina lineaarisina tai epälinearisina jousina. Neljännen asteen differentiaaliyhtälöllä (kaava 16) voidaan kuvata kimmoisen paalun toimintaa mallissa. FEM-laskentaohjelmistoilla saadaan yhtälön ratkaisuna eri parametrien ja paalun pituuden suhteen kuvan 24 mukaisia käyriä. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 47).

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + Q \frac{d^2 y}{dz^2} + E_a y = 0 \quad (16)$$

missä EI on paalun taivutusjäykkyys [kNm²],
 y paalun sivusuuntainen siirtymä maan pinnalla [m],
 z syvyys maanpinnasta [m],
 Q maan pinnalla oleva vaakasuuntainen kuorma [kN] ja
 E_a maaperän kimmomoduuli [kN/m²].



Kuva 24 Syvyyden vaikutus siirtymään ja sen kulmakertoimeen, momenttiin, leikkausvoimaan ja kuormitukseen. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 48).

Elementtimenetelmän tarkkuus on hyvä, jos mallintaminen on tehty tarkasti ja lähtötiedot ovat todenmukaiset.

5.1 RFEM-mallit

Tiago de Souza tutki diplomi-insinööriyössään (The effect of modeling lateral stiffness of pile foundations on numerical analyses of structural frames), kuinka paalujen sivuvastus mallinnetaan jousien avulla rakennemalliin erilaisissa tapauksissa. Tiago tuotti neljä erilaista RFEM-mallia erityyppisiin tilanteisiin. Alla käydään mallit ja niiden sovellukset läpi. Tässä opinnäytetyössä sovelletaan mallia numero 4 ja tarkastellaan siitä, kuinka jousivakiot vaikuttavat rakennuksen yläpään siirtymiin ja paalukuormiin.

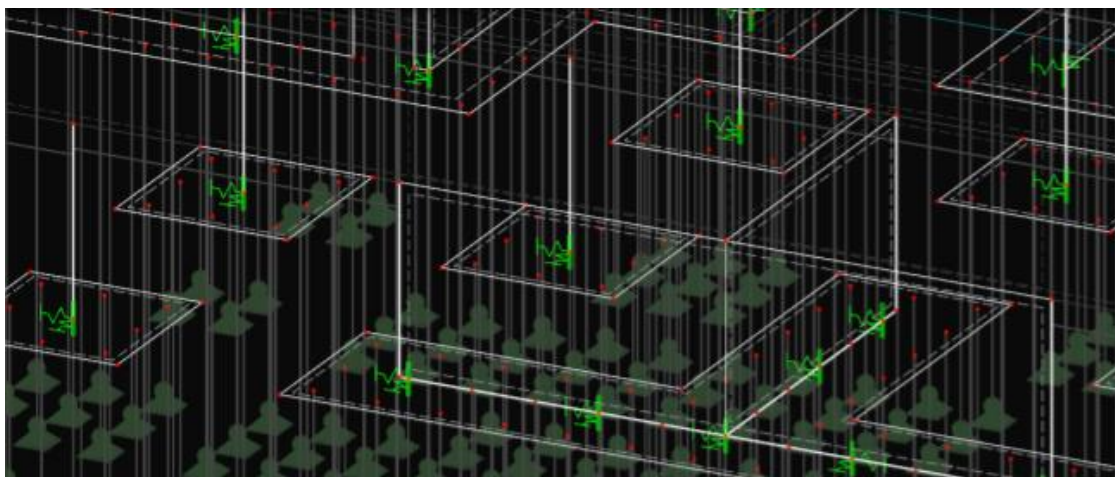
5.1.1 Malli 1: Yksinkertaisesti tuettu

Paaluille kohdistuvat pystysuuntaiset kuormat korvataan 1. mallissa yksinkertaisilla tuilla. Yksinkertaisesti tuettua mallia käytetään vertailukohtana muihin jousimalleihin. Tämän mallin analyysissa tarkastellaan yksinkertaisten tukien vaikutusta rakenteisiin, joka on samankaltainen tutkimus kuin rakennuksen käsinlaskennan stabiliteettitarkastelu.

Mallinnusaika on lyhyt ja kyseinen malli soveltuu suoraan kalliolle perustettaville pienille rakennuksille, jossa maaperän ja perustusten välinen vuorovaikutus ei ole tärkeää tuloksien kannalta. Tällainen tapaus ei kuitenkaan ole yleensä mahdollinen. Mallia voidaan hyödyntää käsinlaskettujen stabiliteettilaskelmien tarkastukseen. Etuina ovat nopea sekä helppo mallintaminen ja haittana on muodonmuutoksien sallimattomuus tuissa. (de Souza Magnus, 2018, s. 51, 67).

5.1.2 Malli 2: Alustalukumenettely, jossa ei huomioida paaluryhmän vaikutusta

Mallissa 2 jäljitellään tyypillistä suomalaista perustuksen jäykkyyksimallia, jossa jousivakiot on laskettu alustalukumenetelmällä. Jokaisen paalun kapasiteetti lasketaan käyttäen RFEM -ohjelmistoa. Jousien jäykkyydet lasketaan kappaleessa 3.3.6 kerrotun tavan mukaisesti. Mallissa huomioidaan vain paaluryhmän johtavien paalujen sivuvastus, joten jousi mallinnetaan keskelle paaluryhmää (kuva 25), jossa voi olla korkeintaan yhdeksän paalua (3x3). Paalujen ryhmävaikutusta ei huomioida. (de Souza Magnus, 2018, s. 51, 67).

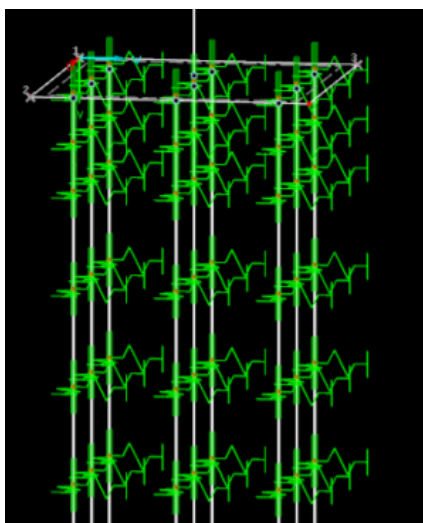


Kuva 25 Jousien mallintaminen 3x3 paaluryhmän keskelle mallissa 2.
(de Souza Magnus, 2018, s. 52)

Mallinnusaika on vähäinen, koska paaluryhmän yhdeksän jousen sijasta tarvitsee mallintaa vain yksi. Täytyy kuitenkin huomioida, että jousi mallinnetaan sellaiselle paikalle, josta se vaikuttaa jokaisella kuormitus suunnalla. Mallissa 2 ei ole mahdollista tarkastella vaakasuuntaista kuormanjakautumista tai taivutusmomenttia jokaiselta paalulta, koska sivuvastus mallinnettiin paaluryhmän keskelle. Siksi paalut käyttäytyvät kuin niihin ei kohdistuisi vaakavoimia. Malli sopii tapauksiin, joissa kantavien elementtien sisäisten voimien vaihtelu ei ole riski suunnittelulle ja perustuksilla ei ole vääntömomenttia. Nämä voidaan välttää ennakkosuunnittelulla. Etuina ovat nopea mallintaminen ja sen yksikertaisuus. Haitana on, ettei yksittäisten paalujen sisäisiä voimia voida tarkastaa eikä malli kuvaa todellista maan ja rakenteen käyttäytymistä. (de Souza Magnus, 2018, s. 56, 67).

5.1.3 Malli 3: Perustuu kuormitus-siirtymä analyysiin

Kolmannessa mallissa jouset sijoitetaan jokaisen paalun varteen tietyllä jakovälillä (kuva 26) ja ryhmävaikutus huomioidaan. Jousivakiot lasketaan alustalukumenetelmällä ja jäykkyydet lasketaan kapaleessa 3.3.6 kerrotun tavan mukaisesti. Suurissa paaluryhmissä, joissa huomioidaan ryhmävaikutus jousivakiot eivät voi saada samaa arvoa jokaisessa rivissä. Paalurivien paalujen alustaluvut kerrotaan vähennyskerroimella f_m kuormitus suunnat huomioiden. Vähennyskerroin voidaan laskea kapaleessa 3.1. kerrotun tavan mukaan. Muodonmuutokset mallissa on rajattu pieniin taipumiin



Kuva 26 Jousien sijoittuminen paalujen vartta pitkin mallissa 3.
(de Souza Magnus, 2018, s. 53)

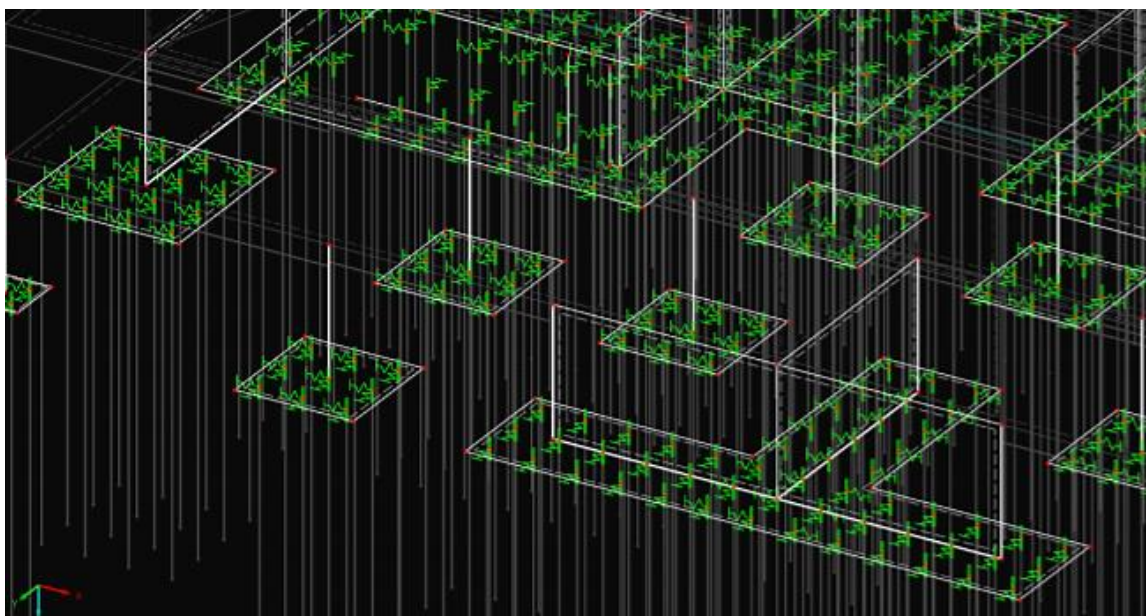
Mallissa 3 huomioidaan tuulen kuormitus suunnana vain positiivinen x- ja y-suunta, sillä negatiivisten suuntien huomioiminen lisää mallinnettavien jousien määrää nelinkertaiseksi. Jos ryhmävaikutus huomioidaan kaikissa kuormitus suunnissa, mallin tekeminen muodostuu työlääksi ja se voi viedä päiviä. Vain positiivisen x- ja y-suunnan huomioiminen vähentää työmäärää useita tunteja ja kaikkien jousien mallintaminen onnistuu työpäivässä.

Jouset mallinnetaan paalun vaippaa pitkin, jolloin se muistuttaa todellista tilannetta, kun maaperä tukee paalua lineaarisesti. Tällöin taivutusmomentti ja voimien jakautuminen paalun vartta pitkin on

mahdollista tarkistaa. Malli 3 soveltuu kaikille rakenteille, mutta erityisesti suurille rakennejärjestelmille, joissa tuloksien vaihtelu voi olla riski. Etuina ovat tarkat tulokset ja kaikkien voimien jakautuminen paaluille on mahdollista saada ulos mallista. Haittana on monimutkainen ja aikaa vievä mallinnus. Mallia suositellaan tapauksiin, joissa taivutusmomentin tarkastaminen on suunnittelun kannalta ratkaisevaa. Pehmeissä maakerroksissa on mahdollista, että vain malli 3 on käyttökelpoinen. Siinä huomioidaan kaikki maakerrokset erilaisilla jousilla ja tämä mahdollistaa ylempien jousien mallintamisen alkuperäisellä siirtymällä, jotta voidaan havainnollistaa muodostuva rako paalun taakse. (de Souza Magnus, 2018, s. 54, 67).

5.1.4 Malli 4: Perustuu mallin 3 yksinkertaistamiseen

Malli 4 (kuva 27) on idealtaan samalainen kuin malli 3, vain jousien jakautumista on muutettu ja ryhmävaikutus huomioidaan kaikissa kuormitussuunnissa. Jousien jaottelua varten paalujen päihin asetetaan samanarvoiset jouset. Mallin tavoitteena on saada yhtä tarkkoja arvoja kuin mallissa 3 mallinussajan ollessa lyhyempi ja mallin ollessa yksinkertaisempi. (de Souza Magnus, 2018, s. 54).



Kuva 27 Jousimalli 4. (de Souza Magnus, 2018, s. 55)

Malli 4 vie eniten aikaa kaikista malleista, sillä ryhmävaikutus huomioidaan kaikissa suunnissa. Kuitenkin, jos mallissa 3 olisi huomioitu kaikki kuormitussuunnat olisi aikaa mennyt kuusi kertaa enemmän kuin tässä jousimallissa. Tulokset ovat samankaltaisia kuin mallissa 2, paitsi vaakavoimat ja niiden jakautumisen näkee paremmin mallista 4, koska jokaisella paalulla on oma jousi.

Tällainen mallinnustapa sopii suurille rakenteille, jos mallin yksinkertaistaminen ei ole riski. Etuna on lähes yhtä tarkat tulokset kuin mallissa 3 ja nopeampi mallinnus. Haittana on, ettei paalun vaipan voimia ja taivutusmomenttia saada tuloksena. (de Souza Magnus, 2018, s. 68).

5.2 Herkkyysanalyysi

Mallin verifiointiin eli mallin toiminnan kelpostamisen arvioimiseen kuuluu herkkyysanalyysit verkon tiheyden sekä mallin parametrien suhteen. Herkkyysanalyysillä testataan mallin stabiilisuutta, eli kuinka paljon parametrien muutokset vaikuttavat koko mallin toimintaan. Verkotuksen todentaminen voidaan tehdä esimerkiksi siten, että tarkastellaan mallin ratkaisemista tiheämmällä verkotuksella ja verrataan tuloksia toisiinsa. Elementtimenetelmässä verkon verifiointi on tärkeää, sillä liian verifiomattoman mallin käyttö voi johtaa vääristyneisiin tuloksiin. (Niiranen & Vuorinen, 2009, s. 149-152).

Tämän opinnäytetyön RFEM-mallissa elementtiverkotus säädettiin neljään alimpaan kerrokseen ja olle k500 ja sitä ylimpiin k1000 jaolle. Laskennassa käytettävä malli on suuri, joten pienellä verkotuksella laskenta olisi kestänyt ajallisesti pitkään. Rakennuksen yläosan verkotuksen harventamisella ei ollut tuloksiin oleellista vaikutusta.

5.3 Mallin tarkastelu

5.3.1 Rakennemalli

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan Tiagon RFEM-mallia numero neljä (kuva 28), joka on 23-kerroksinen toimistorakennus. Kaksi alinta kerrosta ovat pysäköintitaloa ja 21 kerrosta ovat toimistotiloja, joista kahdella ylimmällä on ulkoterassi. Rakenteet ovat paikallavalettua teräsbetonia ja pääasiallisena jäykistävänä rakenteena ovat jäykistävät seinät, joiden paksuus on 300 mm. Palkkien koot vaihtelevat 400 mm x 600 mm ja 600 mm x 1000 mm väliä. Toimistotilojen pilarit ovat 600 mm x 600 mm ja kahden ensimmäiset kerrokset pilarit ovat 800 mm x 800 mm. Betonin lujuusluokka on C40/50 seinissä ja palkeissa, C60/75 pilareissa, C45/55 paaluanturoissa ja paaluissa C50/60 tai C45/55 riippuen paalun sijainnista perustuksissa. Liitteestä 3 näkee paalujen sijainnit perustuksissa.

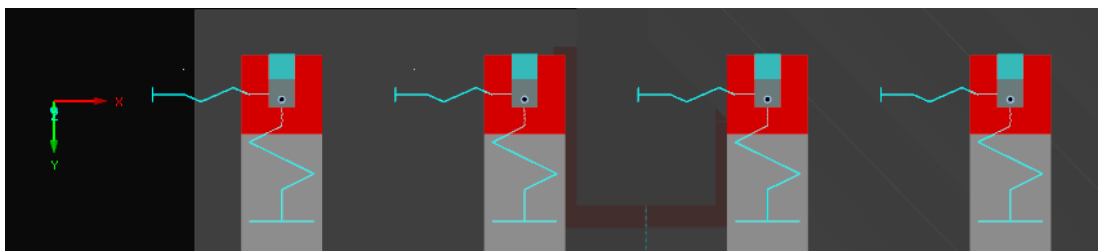
Perustusten yläpinta on metrin maanpinnan alapuolella ja paalut katsotaan kiinnitetyiksi paaluanturaan ja kallioperään, joka oletetaan sijaitsevan 10 metriä maanpinnan alapuolella. Keskimääräinen syvyys paalun päälle on kolme metriä maanpinnan alapuolella. Palkkien ja pilarien liitos on nivelellinen, joten taivutusmomenttia ei siirry liitoksen välityksellä. Jäykistävien seinien kiinnitykset ovat jäykkiä. (de Souza Magnus, 2018, s. 44).



Kuva 28 Tarkasteltava RFEM-malli (de Souza Magnus, 2018)

5.3.2 Kuormat ja kuormitusyhdistelmät

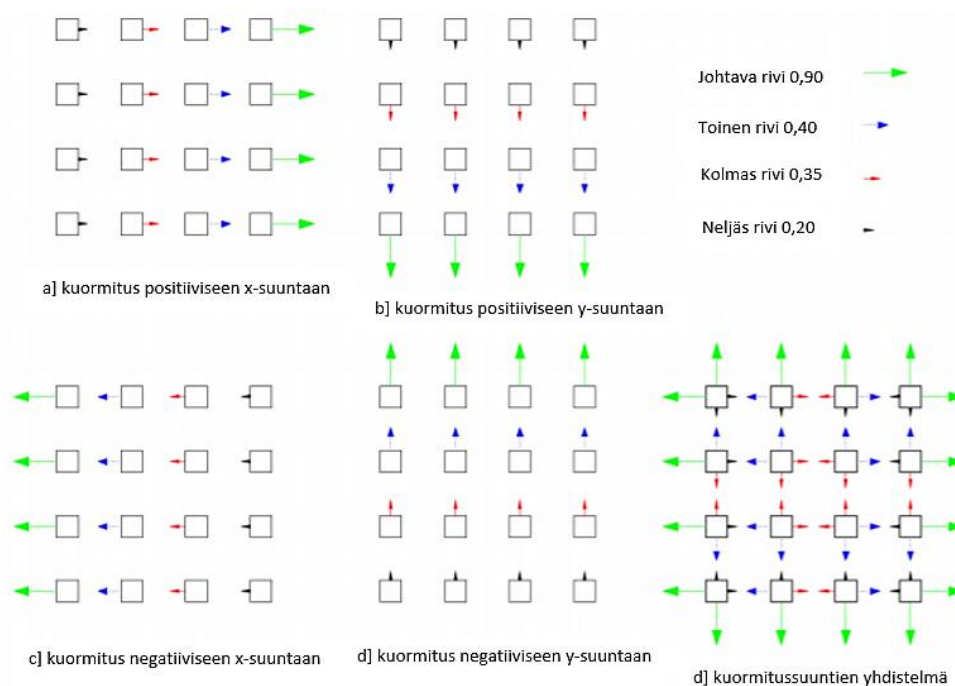
Rakennukseen kohdistuvat muuttuvat pystykuormat saavat arvon $2,5 \text{ kN/m}^2$ eurokoodin 1991-1-1 mukaan ja ne kuuluvat luokkaan B: toimistotilat eurokoodin 1990 mukaisesti. Muuttuvaan pystykuormaan lisätään $0,5 \text{ kN/m}^2$ täydentävä kuorma, joka kattaa ei-kantavien väliseinien painon ja asennuksista aiheutuvan kuorman. Välipohjille lisätään $0,5 \text{ kN/m}^2$ pysyvä kuormitus rakenteiden omapainosta. Lumikuormitus katolle lasketaan eurokoodin EN 1991-1-3 mukaisesti ja rakennuksen tuulikuormat eurokoodin EN 1991-1-4 mukaisesti. Kuormitusyhdistelmät murto- ja käyttörajatilassa tehdään eurokoodien mukaisesti. Rakennuksen siirtymät tarkastellaan käyttörajatilan kuormitusyhdistelmien mukaisesti. Maaperän ja perustuksien väliset sivukuormitukset käsitellään käyttörajatilassa, sillä maan muodonmuutokset ovat riippuvaisia kuormista ja murto-rajatilassa rasitus on suurempi, joten maaperään tulisi suurempia muodonmuutoksia kuin todellisuudessa. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan positiivista x- ja y-suuntaa tuulikuormituksella, joten jouset mallinnetaan paalun yläpäähän positiivisten vaikutussuuntien mukaisesti (kuva 29). (de Souza Magnus, 2018, s. 44).



Kuva 29 Jouset mallinnetaan x- ja y-akselien mukaisesti (Tissari, 2019)

5.3.3 Paaluryhmä

Mallissa esimerkin paaluryhmän paalujen jakoväli on kolme kertaa paalun halkaisija eli 3 x 350 mm eli 1050 mm paalun keskeltä keskelle. Tarkasteltavan mallin ensimmäinen paalurivi saa vähennyskertoimen 0,90, toinen rivi 0,40, kolmas rivi 0,35 ja neljäs 0,20. Kuvassa 30 esitetään ryhmävaikutus eri kuormitussuunnissa. Kaikkien kuormitussuuntien huomioiminen tarkoittaisi neljää erilaista joustaperäistä paalu 4x4 paaluryhmässä. Yhteensä paaluun tulee kaksi erilaista joustaperäistä kuormitussuuntaa, kun huomioidaan vain positiiviset kuormitussuunnat. (de Souza Magnus, 2018, s. 50).



Kuva 30 Ryhmävaikutuksen huomioiminen 4x4 paaluryhmässä.
Muokattu lähteestä: (de Souza Magnus, 2018, s. 50)

5.3.4 Laskennan lähtötiedot

RFEM-mallista tarkasteltiin seitsemää erilaista tapausta, joiden jousivakiot esitetään taulukossa 3. Yhteensä laskentatapaukseen tarvittiin kolme erilaista jousivakiota, joiden arvot annettiin paaluille riippuen sen sijainnista paaluryhmässä. Tarkasteltavina kuormitussuuntina ovat positiivinen x- ja y-suunta ja kuormituksena tuulikuorma. Ensimmäisen tapauksen jousivakiot ovat suurimpia, jolloin maaperä on jäykkin. Jousivakioiden arvojen pienentyessä maaperän jäykkyys heikkenee.

	Jousivakio 1 (kN/m)	Jousivakio 2 (kN/m)	Jousivakio 3 (kN/m)
Tapaus 1	25 000	12 500	22 500
Tapaus 2	20 000	10 000	16 500
Tapaus 3	16 500	8 250	15 000
Tapaus 4	13 500	6 750	12 000
Tapaus 5	10 500	5 250	9 000
Tapaus 6	5 500	2 750	4 000
Tapaus 7	2 500	1 500	1 000

Taulukko 3 Eri laskentatapauksien jousivakiot.

6 TULOKSET

6.1 Siirtymät

Rakennemallin siirtymät tarkasteltiin tuulikuormituksella. Taulukossa 4 esitetään paalun ja rakennuksen yläpään siirtymät positiiviseen x-suuntaan, kun tuulikuormitus vaikuttaa samaan suuntaan. Taulukossa 5 vaikutussuuntana on positiivinen y-suunta.

Tuulen suunta +x							
Siirtymä (mm)	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5	Tapaus 6	Tapaus 7
Paalun yläpää	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6
Rakennuksen yläpää	4,6	4,7	4,7	4,7	4,8	4,9	4,9

Taulukko 4 Paalun ja rakennuksen yläpään siirtymä positiiviseen x-suuntaan.

Tuulen suunta +y							
Siirtymä (mm)	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5	Tapaus 6	Tapaus 7
Paalun yläpää	1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,5	1,6
Rakennuksen yläpää	23,1	23,3	23,4	23,4	23,5	23,6	23,7

Taulukko 5 Paalun ja rakennuksen yläpään siirtymä positiiviseen y-suuntaan.

Taulukoissa 6 ja 7 tuodaan esille siirtymien kasvu prosentteina, kun siirtymän kasvua verrataan tapaukseen 1.

Tuulen suunta +x							
Siirtymän kasvu (%)	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5	Tapaus 6	Tapaus 7
Paalun yläpää		0,00	0,00	25,00	25,00	50,00	50,00
Rakennuksen yläpää		2,17	2,17	2,17	4,35	6,52	6,52

Taulukko 6 Siirtymien prosentuaalinen kasvu positiivisessa x-suunnassa.

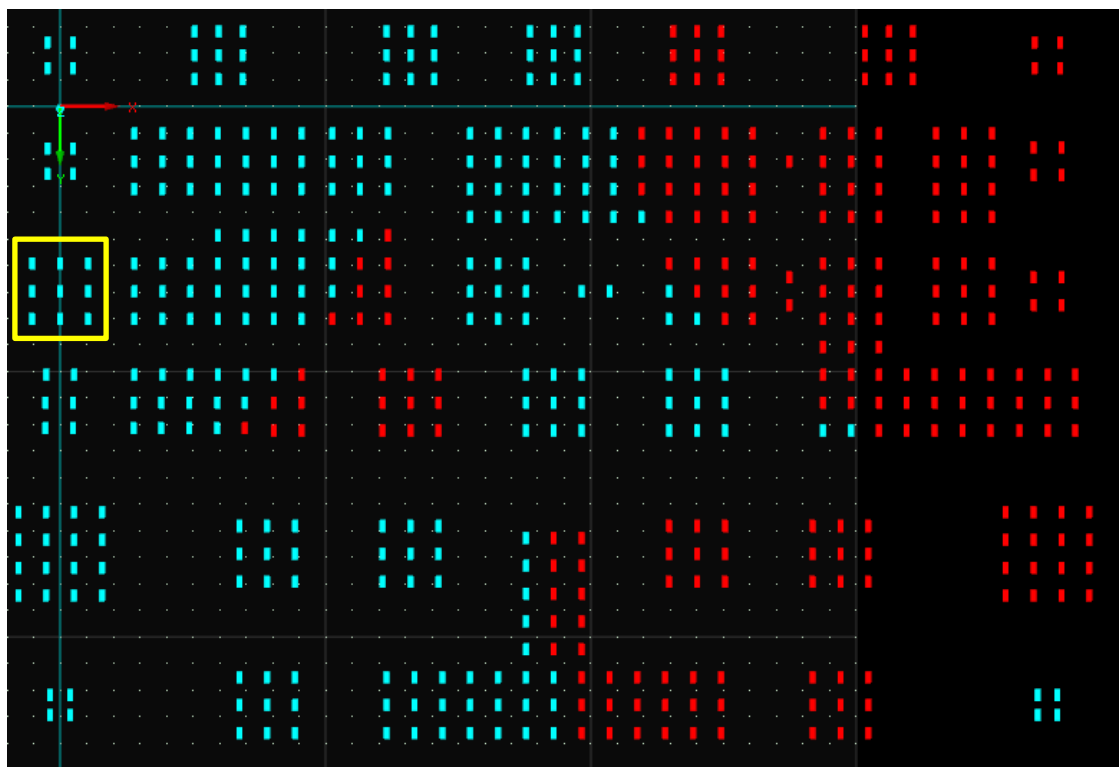
Tuulen suunta +y							
Siirtymän kasvu (%)	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5	Tapaus 6	Tapaus 7
Paalun yläpää		10,00	20,00	30,00	30,00	50,00	60,00
Rakennuksen yläpää		0,87	1,30	1,30	1,73	2,16	2,60

Taulukko 7 Siirtymien prosentuaalinen kasvu positiivisessa y-suunnassa.

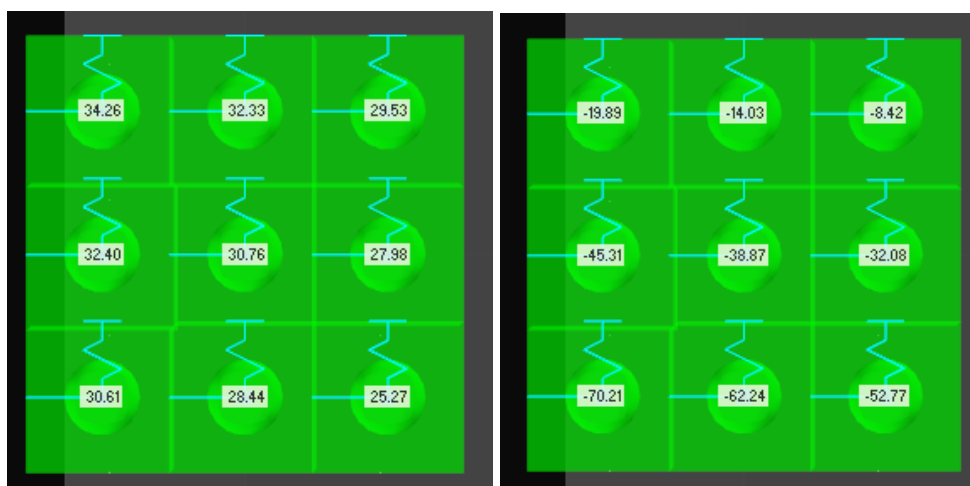
Ensimmäisessä tapauksessa jousivakioiden arvot ovat suurimpia, jolloin maaperä on jäykkin ja ottaa eniten vaakasuuntaisia kuormia vastaan. Jousivakiot ovat kaikista pienimpiä tapauksessa seitsemän, jolloin siirtymien arvot ovat suurimpia niin x- kuin y-suunnassa. Tuulen puhaltaessa positiivisesta x-suunnasta, tapauksessa 7 siirtymän arvo rakennuksen yläpäässä on kasvanut 6,52 % verrattuna ensimmäiseen tapaukseen. Y-suunnassa siirtymän kasvu rakennuksen yläpäässä on 2,60 % samojen tapauksien välillä. Paalun päässä tapahtuvat siirtymät ovat pieniä molemmissa suunnissa. X-suunnassa siirtymä paalun päässä vaihtelee 0,4 mm...0,6 mm välillä ja y-suunnassa 1 mm...1,6 mm välillä.

6.2 Paalukuormat

Jousimallista tarkastasteltiin, miten jousivakioiden arvot vaikuttavat paalukuormien jakautumiseen, kun kuormituksena on tuulikuorma. Kuvassa 31 esitetään rakennuksen paaluperustukset ylhäältä päin katsottuna, kun tuulen kuormitussuuntana on positiivinen x-suunta. Kuvasta 31 nähdään tapauksen 7 tulokset. Sinisiin paaluihin kohdistuu puristusta ja punaisiin vetoa. Muiden tapauksien paalukuormien jakautumisen tuulikuormalla näkee liitteestä 4 ja 5. Mallista tutkittiin 3x3 paaluryhmää, joka on keltaisen neliön sisällä kuvassa 31. Tämän paaluryhmän kuormien jakautumista analysoitiin. Kuvassa 32 havainnollistetaan paaluryhmää ylhäältä päin katsottuna. Positiiviset arvot tarkoittavat, että paaluun kohdistuu puristusta ja negatiiviset arvot tarkoittavat vetoa.



Kuva 31 Kuormien jakautuminen tapauksessa 7, kun kuormitussuuntana on positiivinen x-suunta. (Tissari, 2019)



Kuva 32 Tapauksen 7 paalukuormat, jossa vasemmalla sijaitsevassa kuvassa kuormitussuuntana on positiivinen x-suunta ja oikealla positiivinen y-suunta. (Tissari, 2019)

Taulukossa 8 esitetään paaluille tuleva kuormitus eri tapauksissa, kun tuuli puhaltaa positiiviseen x-suuntaan. Taulukossa 9 tuulen suuntana on positiivinen y-suunta. Paalujen numerointi alkaa kuvan 32 vasemmasta yläkulmasta.

Tuulen suunta +x							
Paalukuorma (kN)	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5	Tapaus 6	Tapaus 7
Paalu 1	34,37	34,44	34,41	34,37	34,34	34,25	34,26
Paalu 2	32,43	32,49	32,46	32,43	32,4	32,32	32,33
Paalu 3	29,63	29,68	29,65	29,62	29,6	29,53	29,53
Paalu 4	32,49	32,56	32,53	32,51	32,48	32,4	32,4
Paalu 5	30,84	30,91	30,88	30,86	30,83	30,76	30,76
Paalu 6	28,05	28,1	28,08	28,06	28,03	27,98	27,98
Paalu 7	30,68	30,75	30,73	30,71	30,68	30,61	30,61
Paalu 8	28,50	28,56	28,54	28,52	28,5	28,44	28,44
Paalu 9	25,35	25,37	25,36	25,34	25,33	25,28	25,27

Taulukko 8 Paalukuormien arvot, kun vaikutussuuntana on positiivinen x-suunta.

Tuulen suunta +y							
Paalukuorma (kN)	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5	Tapaus 6	Tapaus 7
Paalu 1	-19,23	-19,25	-19,34	-19,42	-19,52	-19,72	-19,89
Paalu 2	-13,44	-13,46	-13,54	-13,61	-13,7	-13,88	-14,03
Paalu 3	-7,94	-7,96	-8,02	-8,08	-8,15	-8,3	-8,42
Paalu 4	-44,63	-44,65	-44,72	-44,8	-44,89	-45,08	-42,31
Paalu 5	-38,24	-38,26	-38,33	-38,4	-38,48	-38,66	-38,87
Paalu 6	-31,55	-31,58	-31,63	-31,69	-31,76	-31,9	-32,08
Paalu 7	-69,53	-69,55	-69,6	-69,68	-69,76	-69,92	-70,21
Paalu 8	-61,63	-61,66	-61,7	-61,77	-61,84	-61,99	-62,24
Paalu 9	-52,25	-52,27	-52,31	-52,36	-52,42	-52,54	-52,77

Taulukko 9 Paalukuormien arvot, kun vaikutussuuntana on positiivinen y-suunta.

Taulukoissa 10 ja 11 havainnollistetaan paalukuormien muutos prosentteina, kun kuorman muutosta verrataan tapaukseen 1. Positiivinen arvo tarkoittaa kuorman kasvua ja negatiivinen vähentymistä.

Tuulen suunta +x							
Paalukuorman kasvu (%)	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5	Tapaus 6	Tapaus 7
Paalu 1		0,20	0,12	0,00	-0,09	-0,35	-0,32
Paalu 2		0,19	0,09	0,00	-0,09	-0,34	-0,31
Paalu 3		0,17	0,07	-0,03	-0,10	-0,34	-0,34
Paalu 4		0,22	0,12	0,06	-0,03	-0,28	-0,28
Paalu 5		0,23	0,13	0,06	-0,03	-0,26	-0,26
Paalu 6		0,18	0,11	0,04	-0,07	-0,25	-0,25
Paalu 7		0,23	0,16	0,10	0,00	-0,23	-0,23
Paalu 8		0,21	0,14	0,07	0,00	-0,21	-0,21
Paalu 9		0,08	0,04	-0,04	-0,08	-0,28	-0,32

Taulukko 10 Paalukuormien prosentuaalinen muutos positiivisessa x-suunnassa.

Tuulen suunta +y							
Paalukuorman kasvu (%)	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5	Tapaus 6	Tapaus 7
Paalu 1		0,10	0,57	0,99	1,51	2,55	3,43
Paalu 2		0,15	0,74	1,26	1,93	3,27	4,39
Paalu 3		0,25	1,01	1,76	2,64	4,53	6,05
Paalu 4		0,04	0,20	0,38	0,58	1,01	1,52
Paalu 5		0,05	0,24	0,42	0,63	1,10	1,65
Paalu 6		0,10	0,25	0,44	0,67	1,11	1,68
Paalu 7		0,03	0,10	0,22	0,33	0,56	0,98
Paalu 8		0,05	0,11	0,23	0,34	0,58	0,99
Paalu 9		0,04	0,11	0,21	0,33	0,56	1,00

Taulukko 11 Paalukuormien prosentuaalinen muutos positiivisessa x-suunnassa.

Jousivakioiden arvot vaikuttavat paalukuormien jakautumiseen, mutta jousien jäykkyydestä sitä ei voida suoraan päätellä. Tässä tutkimuksessa jousien jäykkyys oli suurin ensimmäisessä tapauksessa, joka toimii vertailukohtana muihin tapauksiin. Tuulen puhaltaessa positiivisesta x-suunnasta paalukuormien arvot kasvavat tapauksissa 2 ja 3 verrattuna ensimmäiseen tapaukseen. Tapauksessa 4 osa kuormista kasvaa ja osa vähenee. Viidennessä tapauksessa kahden paalun kuormat ovat samoja kuin ensimmäisessä tapauksessa ja muut paalukuormat pienenevät. Lopuissa tapauksissa paalukuormien arvot ovat pienempiä kuin tapauksessa 1. Tuulen puhaltaessa positiivisesta y-suunnasta paalukuormien arvot kasvoivat jousivakioiden pienentyessä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä insinööriyössä tarkasteltiin RFEM-jousimallista sivukuormitettujen paaluperustuksien geoteknistä käyttäytymistä eri jousivakioiden arvoilla. Työ oli jatkoa Tiago de Souzan diplomi-insinööriyölle (The effect of modeling laterall stiffness of pile foundations on numerical analyses of structural frames) ja tässä opinnäytetyössä hyödynnettiin hänen tekemää RFEM-jousimallia. Jousimallissa huomiointiin tuulikuormituksessa vaikutussuuntina positiivinen x- ja y-suunta. Paalujen ryhmävaikutus otettiin huomioon kaikissa kuormitussuunnissa. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, onko jousivakioiden arvojen muutoksilla vaikutusta rakennuksen ja paalun yläpään siirtymiin sekä paalukuormien jakautumiseen tuulikuormituksessa.

Jousivakioiden arvoilla oli vaikutusta siirtymiin ja paalukuormien jakautumiseen. Siirtymien arvot olivat suoraan riippuvaisia jousivakioiden arvoista, sillä mitä pienempi jousivakio sitä suurempi siirtymä. Mitä pienempi jousivakio on, sitä huonompi on maaperän kyky ottaa vaakasuuntaisia kuormia vastaan ja maan jäykkyys on alhaisempi. Siirtymän suuruus on kuitenkin tapauskohtainen ja se on riippuvainen maaparametrien arvoista, joten niiden määrittäminen on tärkeää. Maaparametrien arvot tulisi määrittää tapauskohtaisesti, eikä käyttää vakioarvoja mitoittamiseen. Jousivakiot vaikuttivat paalukuormien jakautumiseen eri tapauksissa, eikä niiden arvot olleet suoraan verrannollisia jousen jäykkyyteen.

Jousivakioiden muutokset vaikuttavat myös rakennuksen ominaistajuuteen, joten se tulee tarkistaa suunnittelun ja mitoittamisen yhteydessä.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Alén, C.; & Svahn, P.-O. (2006). *Rapport 101: Transversalbelastade pålar - statiskt verkiningsätt och dimensioneringsanvisningar*. Linköping: Pålkommissionen.

Broms, B. (1964). *Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils*. Journal of the Soil Mechanics Division, American Society of Civil Engineers.

Das, B. M. (2011). *Geotechnical Engineering Handbook*. Yhdysvallat: J. Ross Publishing Incorporation.

de Souza Magnus, T. (Elokuu 2018). *The effect of modelling laterall stiffness of pile foundations on numerical analyses of structural frames*. Noudettu osoitteesta Aaltodoc:
https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/34185/master_de_Souza_Magnus_Tiago_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Geomekaniikka II: RIL 157. (1990). *RIL 157-2-1990*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Hartman, E. (Helmikuu 2008). *Paaluperustuksiin kohdistuvien sivukuormitusten vähentäminen - Toukorannan suojaseinä*. Noudettu osoitteesta Aaltodoc:
https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/30141/master_hartman_essi_2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Juuti, J. (Maaliskuu 2016). *Vaakasuuntaisesti värähtelevien paaluperustusten dynaamiset analyysimenetelmät*. Noudettu osoitteesta Tampereen teknillinen yliopisto:
<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23778/Juuti.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Jääskeläinen, R. (2009). Pohjarakennuksen perusteet. Teoksessa R. Jääskeläinen, *Pohjarakennuksen perusteet*. Jyväskylä: Tammertekniikka.

Kinnunen, J. (Elokuu 2015). *Liikenneviraston julkaisut*. Haettu 28. 1 2019 osoitteesta Liikenneviraston sivusto: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-49_ajan_vaikutus_web.pdf

Kortelainen, P. (Marraskuu 2012). *Korkeiden rakennusten vaste tuulikuormituksessa*. Noudettu osoitteesta Tampereen teknillinen yliopisto:
<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21761/Kortelainen%20Petri.pdf?sequence=1>

Larkela, A. (Tammikuu 2008). *Modeling of a pile group under static lateral loading*. Noudettu osoitteesta https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/30134/A1ster_larkela_antti_2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Liikennevirasto. (Kesäkuu 2012). *Sillan geotekninen suunnittelu*. Noudettu osoitteesta https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2012-11_sillan_geotekninen_web.pdf

Luukkonen, S. (Elokuu 2015). *Sivukuormitettujen pylväsperustusten geotekninen käyttäytyminen*. Noudettu osoitteesta https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/17753/master_Luukkonen_Simo_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lyöntipaalutusohje LPO-2005: RIL 223. (2005). *RIL 223-2005*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Matilainen, H. (Toukokuu 2017). *Pilari-seinä-liitoksen FEM-mallinnus*. Noudettu osoitteesta Theseus: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/130402/OPPARI_HMAT.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mäkinen, P. (Toukokuu 2017). *Korkeiden rakennusten EN-standardien mukainen jäykistysuunnittelu*. Noudettu osoitteesta Tampereen teknillinen yliopisto: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/24823/makinen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Niiranen, J.;& Vuorinen, M. (2009). *Elementtimenetelmän adaptiivinen verkotihennys laattarakenteiden analysoinnissa*. Noudettu osoitteesta Rakenteiden mekaniikka: http://rmseura.tkk.fi/rmllehti/2009/nro3/RakMek_42_3_2009_4.pdf

Nummelin, M.;& Tolla, P. (Toukokuu 2017). *Geotekninen suunnittelu - NCCI7*. Noudettu osoitteesta Liikenneviraston ohjeita: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf

Paalutusohje: RIL 254. (2016). *RIL 254-2016*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Pienpaalutusohje PPO-2007: RIL 230. (2007). *RIL 230-2007*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Pohjarakennusohjeet: RIL 121. (2004). *RIL 121-2004*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Pohjarakenteet: RIL 166. (1986). *RIL 166-1986*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Rakenteiden kuormitusohjeet: RIL 144. (2002). *RIL 144-2002*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto ry.

Rasi-Koskinen, H. (Toukokuu 2015). *Liikenneviraston julkaisut*. Noudettu osoitteesta Liikenneviraston sivusto: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-34_vaakasuuntaiset_alustaluvut_web.pdf

Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: RIL 201. (2017). *RIL 201-1-2017*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Suurpaalutusohje SPO-2001: RIL 212. (2001). *RIL 212-2001*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Suutarinen, I.;& Slunga, E. (1981). *Lyhyiden lyöntipaalojen käyttö*. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Tissari, A. (Maaliskuu 2019). RFEM-jousimalli. Kuopio.

Walsh, J. M. (Elokuu 2005). *Full-Scale Lateral Load Test of a 3 x 5 Pile Group in Sand*. Noudettu osoitteesta BYU Scholars Archive Citation:

<https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1604&context=etd>

LIITE 1: MAAKERROSTEN MUODONMUUTOS- JA LUJUUSOMINAISUUKSIEN ARVIOINTI KAIRAUSVASTUKSEN PERUSTEELLA

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohjavedenpinnan		Kitkakulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduulilukum	Jännityksen eksponentti β	Puristuskairaus q _c (MPa)	Painokairaus P _k /0,2 m	Heijari-kairaus L/0,2 m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keskitiivis			30	70 ... 150	0,3	7 ... 15	40 ... 100	8 ... 25
	Tiivis	16 ... 18	11	32	100 ... 300	0,3	> 15	> 100	> 25
Hieno hiekka d ₁₀ <0,06	Löyhä	15 ... 17	9 ...	30	50 ... 150	0,5	< 10	20 ... 50	5 ... 15
	Keskitiivis			33	100 ... 200	0,5	10 ... 20	50 ... 100	15 ... 30
	Tiivis	16 ... 18	11	36	150 ... 300	0,5	> 20	> 100	> 30
Hiekka d ₁₀ >0,06	Löyhä	16 ... 18	10 ...	32	150 ... 300	0,5	< 6	10 ... 30	5 ... 12
	Keskitiivis			35	200 ... 400	0,5	6 ... 14	30 ... 60	12 ... 25
	Tiivis	18 ... 20	12	38	300 ... 600	0,5	> 14	> 60	> 25

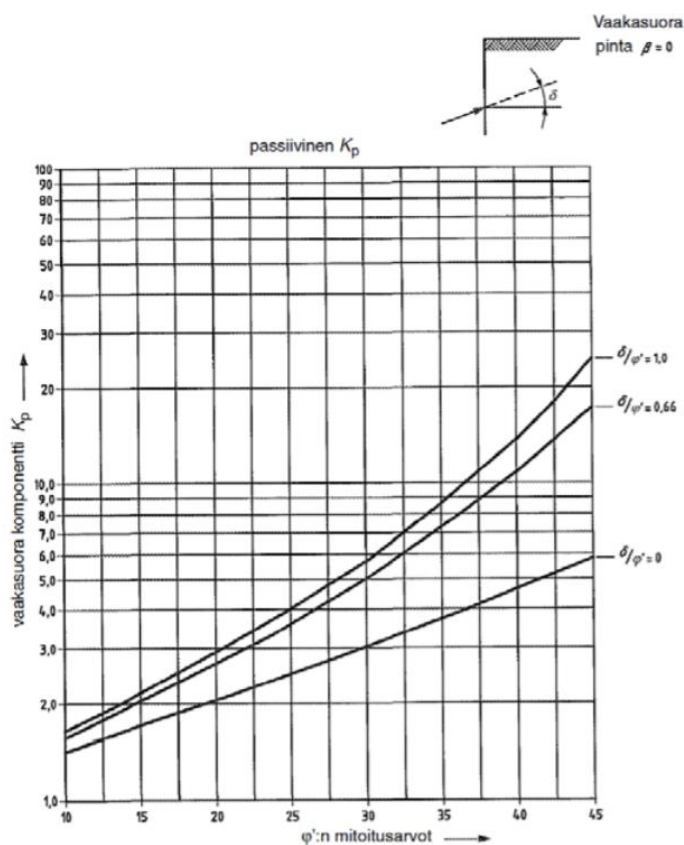
Taulukko 12 Hiekan ja karkean siltin muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksien arviointi kairausvastuksen perusteella (Nummelin & Tolla, 2017, s. 119)

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohjavedenpinnan		Kitkakulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduulilukum	Jännityksen eksponentti β	Puristuskairaus q _c (MPa)	Painokairaus P _k /0,2 m	Heijari-kairaus L/0,2 m
Sora	Löyhä	17 ... 19	10 ...	34	300 ... 600	0,5	< 5,5	10 ... 25	5 ... 10
	Keskitiivis			37	400 ... 800	0,5	5,5 ... 12	25 ... 50	10 ... 20
	Tiivis	18 ... 20	12	40	600 ... 1200	0,5	> 12	> 50	> 20
Moreeni	Hyvin löyhä	16 ... 19	10 ... 12	... 34	(≤100)* 300 ... 600	0,5	< 10	< 40	< 20
	Löyhä	17 ... 20	10 ... 12	... 36	(100...250)* 600 ...	0,5	> 10	40 ... 100	20 ... 60
	Keskitiivis	18 ... 21	11 ... 13	... 38	800 ...	0,5	-	> 100	60 ... 140
	Tiivis	19 ... 23	11 ... 14	... 40	1200 ...	0,5	-	Lyömällä	> 140

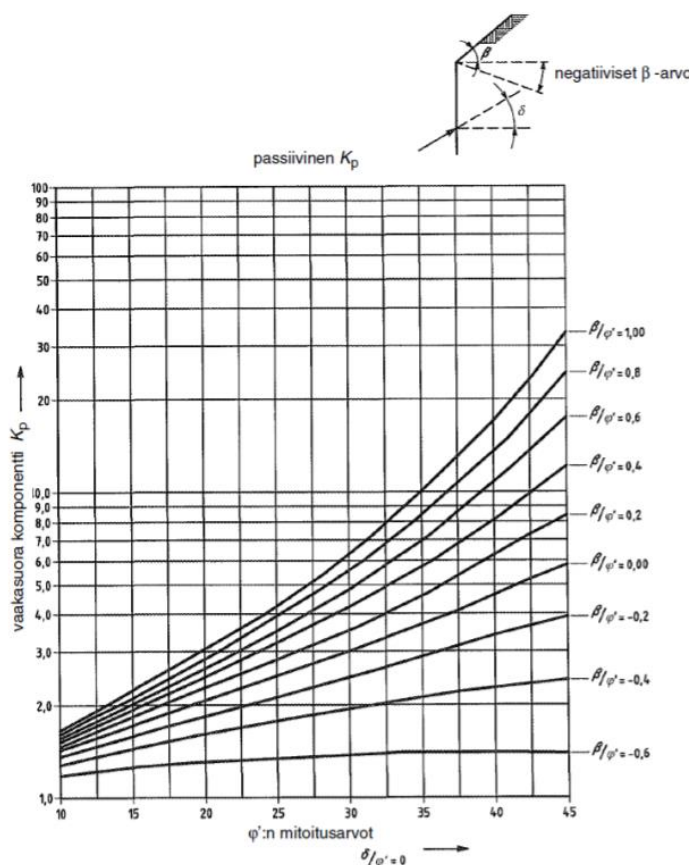
(*) jos moreeni ei ole jäätikön puristama

Taulukko 13 Soran ja moreenin muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksien arviointi kairausvastuksen perusteella (Nummelin & Tolla, 2017, s. 121)

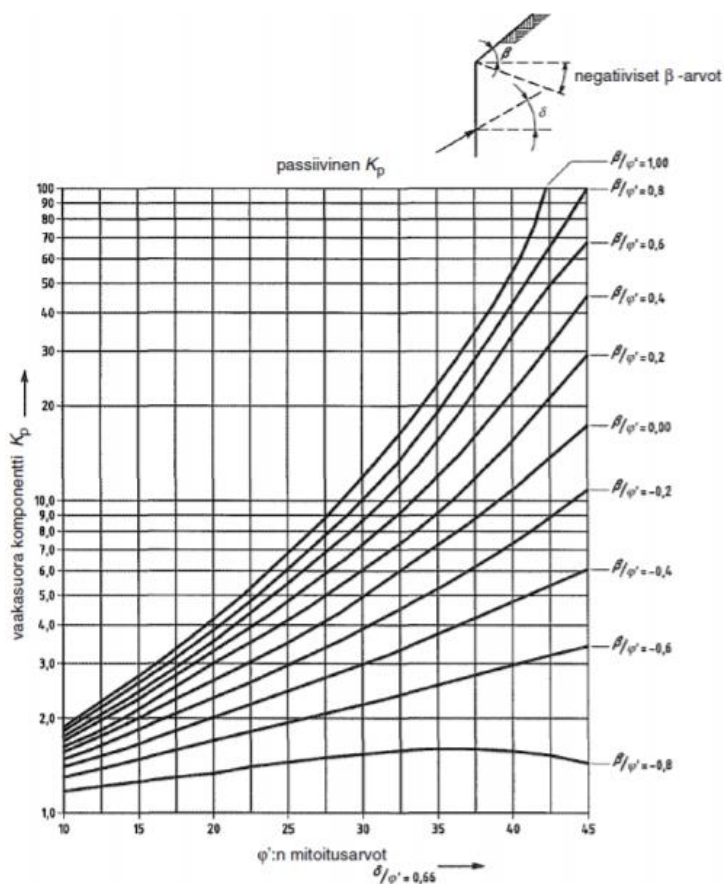
LIITE 2: EUROKOODIN 1997-1 MUKAISET NOMOGRAMMIT PASSIIVIPAINEKERTOIMEN MÄÄRITTÄMISEKSI



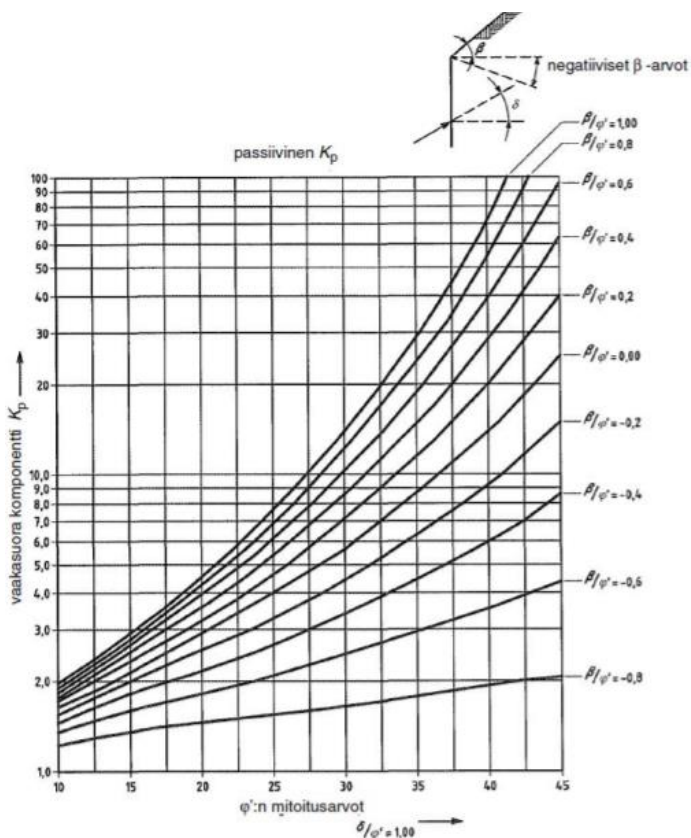
Taulukko 14 Eurokoodin 1997-1 mukainen passiivipainekerroin, kun tuettu maanpinta on vaakasuora ($\beta=0$)



Taulukko 15 Eurokoodin 1997-1 mukainen passiivipainekerroin, kun tuettu maanpinta on kalteva ($\beta > 0$, $\delta/\varphi' = 0$ ja $\delta = 0$)

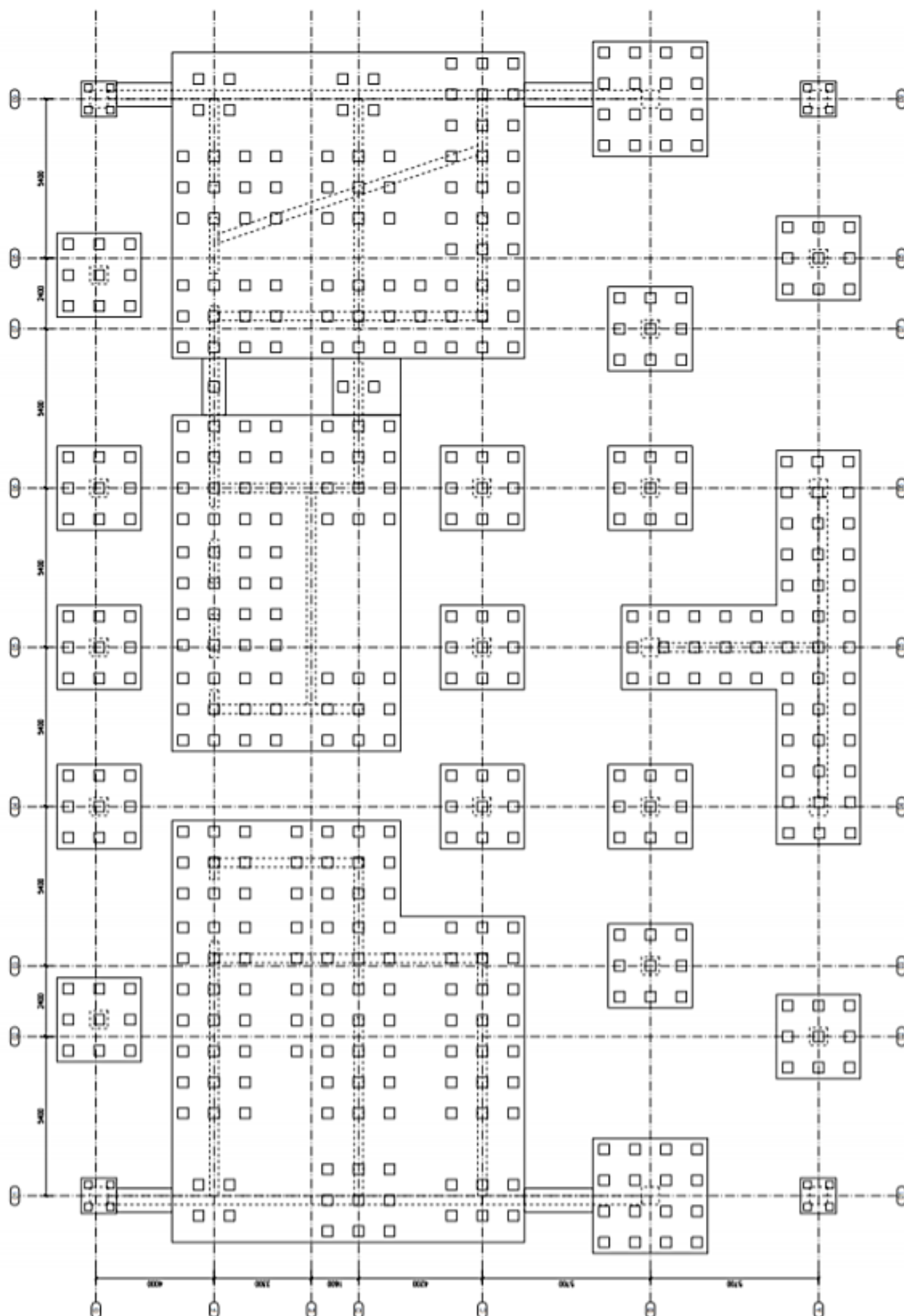


Taulukko 16 Eurokoodin 1997-1 mukainen passiivipainekerroin, kun tuettu maanpinta on kalteva ($\beta > 0$ ja $\delta/\phi' = 0,66$)



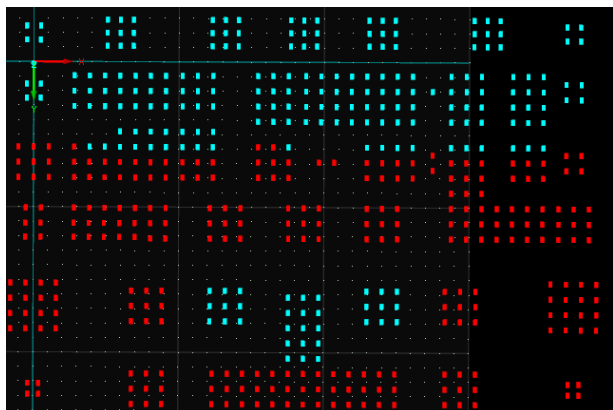
Taulukko 17 Eurokoodin 1997-1 mukainen passiivipainekerroin, kun tuettu maanpinta on kalteva ($\beta > 0$ ja $\delta/\phi' = 1$)

LIITE 3: PAALUJEN SIJAINNIT

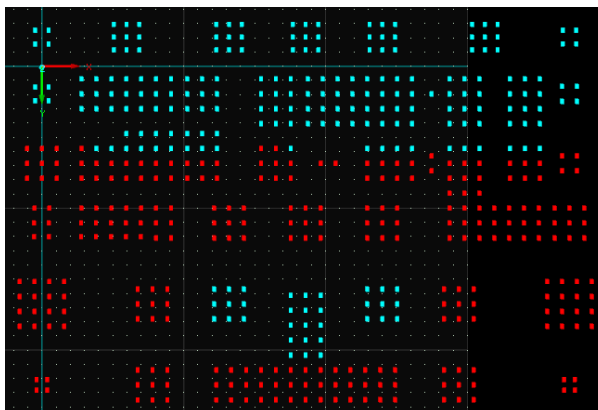


LIITE 5: PAALUKUORMIEN JAKAUTUMINEN +Y-SUUNNASSA

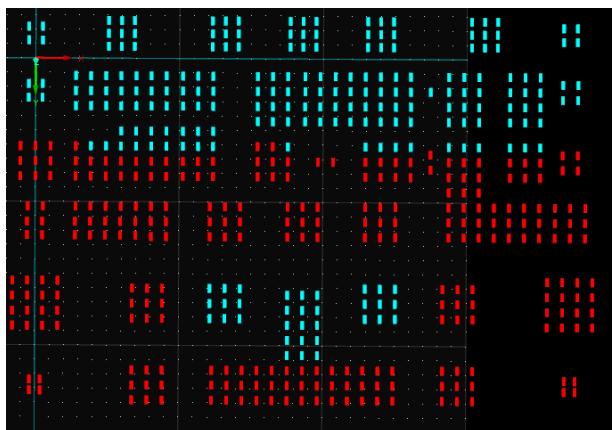
Tapaus 1:



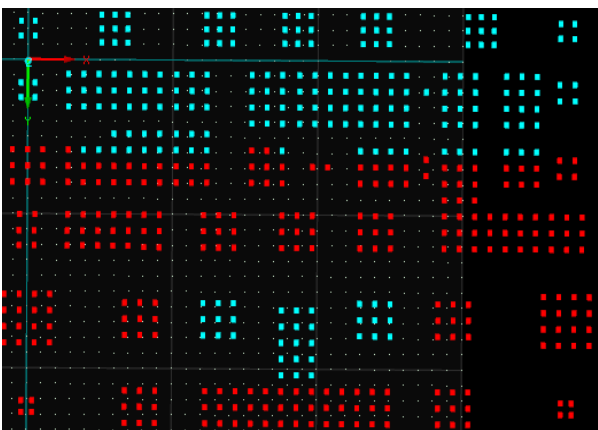
Tapaus 2:



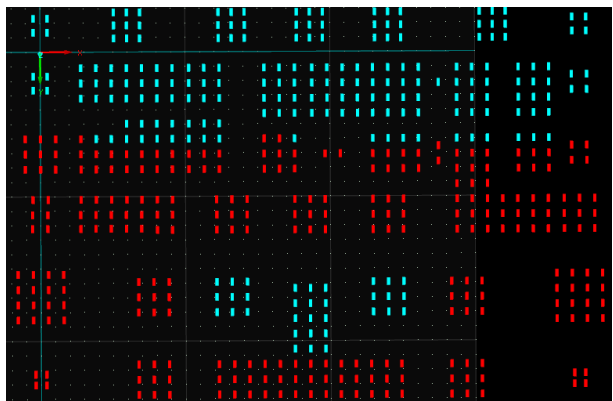
Tapaus 3:



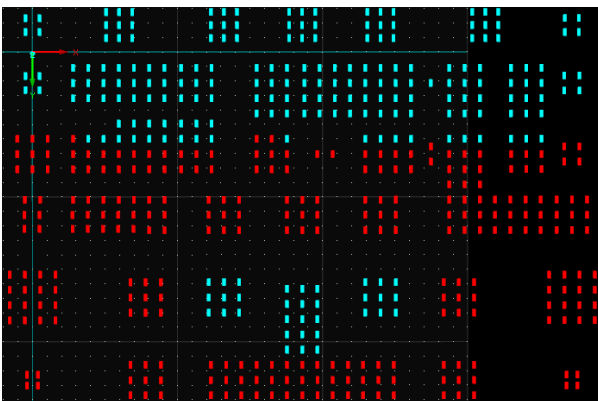
Tapaus 4:



Tapaus 5:



Tapaus 6:



Tapaus 7:

