

Samu Portaankorva

MAANPAINEEN LASKEMINEN ERI TEO- RIOILLA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kandidaatintyö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

Samu Portaankorva: Maanpaineen laskeminen eri teorioilla

Tampereen yliopisto

Kandidaatintyö, 29 sivua

Kesäkuu 2019

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Maa- ja pohjarakenteet

Tarkastaja: Markus Haikola

Avainsanat: maanpaine, maanpaineteoria, Rankine, Coulombi, Eurokoodi

Erityisesti kaupunkien keskusta-alueilla rakentaminen tapahtuu usein ahtaissa olosuhteissa, jolloin työmaakaivanto voidaan rajata maan sortumista estävillä tukiseinillä. Niiden kestävyuden mitoittamiseen tarvitaan kuitenkin tuettavien maakerroksien aiheuttaman maanpaineen laskemista. Maanpaineen aiheuttamat voimat ovat tukiseinän mitoituksessa merkittäviä, sillä ne kuormittavat tukiseinää sekä kaivannon ylä-, että alapäästä.

Tässä kandidaatintyössä käydään läpi maanpaineen eri lajit, eli maan lepopaine, aktiivipaine ja passiivipaine. Lisäksi työssä käsitellään maanpaineen laskentamenetelmistä Rankinen ja Coulombin maanpaineteoriat sekä eurokoodista löytyvä taulukkolaskentamalli. Esiteltyjä menetelmiä käyttäen lasketaan maanpaineen suuruutta hiekka- ja savimaassa. Eri laskentamenetelmillä saatuja tuloksia vertaillaan keskenään ja pyritään havaitsemaan eroavaisuuksia niiden välillä. Laskelmia tehdään myös tutkimalla momenttitasapainon perusteella maanpaineen vaikutusta yhdeltä tasolta tuetun tukiseinän lyöntisyvyyteen.

Maanpainetta laskettaessa huomattiin, että maan ja tukiseinän välinen kitkakulma vaikuttaa hyvin paljon maanpaineen arvoon. Lisäksi Tutkimuksessa selvisi, että eurokoodin laskentamenetelmällä saadaan Coulombin teoriaa luotettavampia tuloksia suurilla seinäkitkan arvoilla erityisesti passiivipaineelle. Suurella seinäkitkalla vaadittiin tukiseinälle huomattavasti pienempää lyöntisyvyyttä kuin ilman seinäkitkaa. Savimaassa maan kitkakulman ollessa 0° saatiin kaikilla tässä kandidaatintyössä tutkituilla laskentamenetelmillä yksi tulos passiivi- ja aktiivipaineelle, sillä maanpaineen arvoon vaikuttavat maanpainekertoimet olivat kaikilla laskentamenetelmillä samat.

ABSTRACT

Samu Portaankorva: Calculating Lateral Earth Pressure with Various Theories

Tampere University

Bachelor Thesis, 29 pages

June 2019

Bachelor's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Earth and Foundation Structures

Examiner: Markus Haikola

Keywords: lateral earth pressure, earth pressure theory, Rankine, Coulomb, Eurocode

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	MAAN LUJUUS.....	3
3.	MAANPAINNE	6
3.1	Maanpaineen lajit	6
3.1.1	Lepopaine	6
3.1.2	Aktiivipaine	7
3.1.3	Passiivipaine	8
3.2	Maanpaineteoriat	10
3.2.1	Rankinen maanpaineteoria	10
3.2.2	Coulombin maanpaineteoria.....	11
3.2.3	Eurokoodit	14
4.	MAANPAINNEEN LASKEMINEN	17
5.	TULOSTEN KÄSITTELY.....	20
5.1	Tukiseinä hiikkamaassa.....	22
5.2	Tukiseinän lyöntisyvyyden mittaaminen	23
5.3	Tukiseinä savimaassa.....	25
6.	YHTEENVETO.....	27
	LÄHTEET	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

σ	maan pystyjännitys
z	syvyys
γ_m	maan tilavuuspaino
H	täytön korkeus
γ_t	täytön tilavuuspaino
σ'	maan tehokas jännitys
u	huokosvedenpaine
τ	maan leikkauslujuus
c	koheesio
φ	maan sisäinen kitkakulma
K_0	lepopainekerroin
p_0	lepopaine
R_{oc}	ylikonsolidaatiokerroin
K_a	aktiivipainekerroin
p_a	aktiivipaine
K_p	passiivipainekerroin
p_p	passiivipaine
α	vaakatason ja tukiseinän välinen kulma
δ	maan ja seinän välinen kitkakulma
β	kaivannon yläpään maanpinnan ja vaakatason välinen kulma

1. JOHDANTO

Kaupungistumisen vuoksi Suomessa on jouduttu etsimään ratkaisuja suurien kaupunkien asuntopulalle. Täydennysrakentamista on enemmän kuin aikaisemmin, ja esimerkiksi pysäköintialueet sijoitetaan yhä useammin maan alle. Erityisesti kaupunkirakentamisessa päädytään usein tilanteisiin, joissa pitäisi rakentaa hyvin lähelle toisia rakennuksia. Purkamisen ja uudisrakentamisen ovat kuitenkin aina haasteita, sillä kaupunkien ydinkeskustoissa rakentaminen ruuhkauttaa usein liikennettä ja työmaat ovat ahtaita. Samalla mahdolliset vauriot ympäröiviin rakennuksiin ja niiden rakenteisiin tulisi välttää kokonaan.

Rakennettaessa maanalaisia perustuksia rakennustyöt alkavat aina pohjatöillä ja kaivannolla, jolloin ympäröivät rakennukset voivat vaurioitua kaivannon vaikutuksesta. Maan kaivaminen aiheuttaa usein ympäröivän maan lujuuden heikentymistä, joka lisää riskejä suurille muodonmuutoksille. Sortumista voi estää esimerkiksi loiventamalla kaivannon ympärillä olevia luiskia, mutta pienessä tilassa se ei aina ole mahdollista. Kaupunkien keskustoissa luiskattuja kaivantoja ei voida käyttää juuri ollenkaan, sillä tilaa ei ole riittävästi.

Kaivantojen tukemiseen käytetään tukiseiniä, jotka voidaan asentaa kaivannon seinämien eteen pystysuoraan. Silloin kaivantoa ei tarvitse tehdä luiskattuna, sillä tukiseinä ottaa vastaan maan kuormituksen ja estää kaivantoa sortumasta. Tukiseiniä käytettäessä on kuitenkin osattava määrittää vaakasuuntaista kuormitusta aiheuttava maanpaine, jotta seinän tarkka mitoitus olisi mahdollista. Tukiseinä on yleensä rakennusvaiheen väliaikainen ratkaisu, minkä takia siitä kannattaa tehdä kustannustehokas. Sen turvalliselle ja taloudelliselle mitoitukselle on oleellista määrittää siihen kohdistuvat kuormitukset mahdollisimman tarkasti. Maanpaineen aiheuttamat vaakasuuntaiset kuormitukset ovat keskeisimpiä tukiseiniin kohdistuvia kuormia, joten niiden vaikutus tulee tietää hyvin tarkkaan. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tarkastella maanpaineen laskutapoja sekä vertailla niiden antamia tuloksia eri tilanteissa.

Tutkimuksessa käsitellään maanpaineen laskemiseen käytettävistä teorioista Rankinen ja Coulombin teoria sekä eurokoodin maanpaineekerrointaulukot. Laskutapoja vertaillaan keskenään kahdessa eri tapauksessa, savimaassa ja hiekkamaassa. Työssä tutustutaan aluksi maan lujuuteen ja siihen vaikuttaviin maan ominaisuuksiin. Kolmannessa luvussa esitellään maanpaineen eri lajit, joita ovat maan lepopaine, aktiivimaanpaine ja passiivimaanpaine. Niiden lisäksi kolmannessa luvussa käydään läpi käsiteltävät teoriat, joiden avulla voidaan laskea maanpainetta. Neljännessä luvussa lasketaan tuloksia eri teorioilla

kahdessa tilanteessa, joita ovat tukiseinä savimaassa ja hiekkamaassa. Viidennessä luvussa käsitellään tuloksia ja pohditaan laskentamenetelmien ominaisuuksia ja eroavuuksia toisistaan.

2. MAAN LUJUUS

Maa poikkeaa muista rakennusmateriaaleista paljon, sillä se koostuu vaihtelevan kokoisista rakeista ja niiden väliin jäävistä huokosista. Maan heterogeenisyys ja rakeiden koko määräävät suuren osan maan ominaisuuksista. Toisin kuin useilla muilla rakennusmateriaaleilla, maalla ei ole vetolujuutta, eikä sen puristuslujuutta voida määrittää yksiselitteisesti. Sen sijaan maamateriaalille voidaan määrittää leikkauslujuus, jota voidaan käyttää sen lujuuden kuvaamiseen. (Rantamäki et al. 1997, s. 31, 122)

Rakenteita mitoitettaessa on tärkeää tietää etukäteen, millaisia kuormia rakenteisiin kohdistetaan. Käyttö- ja murtorajatilamitoituksella verrataan kahta eri tilannetta, joissa mitoituksella on erilaiset tarpeet maan muodonmuutoksille, mikä vaikuttaa sallitun kuorman määrään. Käyttörajatilamitoituksessa oletetaan, että maan lujuus riittää kestäämään kuormat, ja keskitytään tarkastelemaan maan muodonmuutosominaisuuksia, kuten painumia ja muita siirtymiä. Murtorajatilamitoitus keskittyy tarkastelemaan maan lujuutta ja jännitystä suhteessa kohdistuviin kuormiin, jotta maa ei murtuisi kuormien vaikutuksesta. (Rantamäki et al. 1997, s. 171)

Maalle on ominaista, että se on jatkuvassa jännitystilassa. Maa aiheuttaa kuormitusta oman painonsa verran sen alempiin kerroksiin, mikä aiheuttaa maalle pystyjännitystä. Pystyjännitystä lisää mahdolliset maanpäälliset rakenteet. Maan pystyjännitystä voidaan laskea kaavalla

$$\sigma = z\gamma_m + H\gamma_t, \quad (1)$$

jossa σ on maan pystyjännitys, z on syvyys, jolla maan pystyjännitystä mitataan, γ_m on maan tilavuuspaino, H on maan päällä olevan täytön korkeus ja γ_t on täytön tilavuuspaino. Maan pystyjännitykseen vaikuttaa myös ulkopuoliset tekijät, kuten maan huokokset täytävä pohjavesi. Maan huokokset ovat pohjaveden pinnan alapuolella täysin veden kyllästämiä, mikä aiheuttaa vedenpaineesta johtuvan maan jännitystilan pienenemisen. Huokosveden aiheuttama maan pystyjännityksen pieneneminen on yhtä suuri kuin veden tilavuuspaino sillä alueella, jossa huokosvettä esiintyy. Maan tehokas pystyjännitys σ' kuvaa maan ja siellä sijaitsevan huokosveden aiheuttamaa jännitysten erotusta tietyllä syvyydellä ja se voidaan laskea kaavasta

$$\sigma' = \sigma - u, \quad (2)$$

jossa σ' on tehokas jännitys, σ on maan pystyjännitys ja u on huokosvedenpaine. Jos pohjaveden pinta sijaitsee syvemmällä kuin tarkasteltava maakerros, on tehokas pystyjännitys σ' silloin sama kuin maan pystyjännitys σ . Maan tehokas jännitys on yksi tärkeimmistä

maan ominaisuuksia määrittävistä tekijöistä, sillä sen muutokset ovat paljon yleisempiä kuin maan muiden ominaisuuksien muutokset. (Rantamäki et al. 1997, s. 51, 106–109)

Maa aiheuttaa ympärilleen myös vaakasuuntaista jännitystä, sillä maarakeet ovat jatkuvassa kosketuksessa myös vaakasuunnassa. Maan vaakajännitys on yleisesti pystyjännitystä huomattavasti pienempi, elleivät ulkoiset voimat kuormita maata vaakasuuntaisesti. Maarakeisiin kohdistuvat vaakasuuntaiset voimat aiheuttavat maassa myös leikkausjännitystä, jonka maksimiarvo saadaan maan pystyjännityksen ja vaakajännityksen erotuksesta.

Maan leikkausjännityksen takia sille voidaan määrittää murtolujuus eli maan leikkauslujuus. Se määritetään suurimmaksi leikkausjännitykseksi, jonka maa voi kestää murtumatta. Maan leikkauslujuuden ylittäminen johtaakin usein maan sortumiseen tiettyä liukupintaa pitkin. Joissakin tapauksissa, kuten esimerkiksi Rankinen maanpaineteoriassa, murtuma oletetaan kuitenkin vyöhykemurtumaksi, jolloin koko maamassa on murtotilassa, eikä liukupintaa synny. Maan leikkauslujuus on kytköksissä myös maan tehokkaan pystyjännitykseen, sillä sitä voidaan tutkia esimerkiksi Mohr-Coulombin murtokriteeriä käyttäen kaavalla

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi, \quad (3)$$

jossa τ on leikkauslujuus, c on koheesio, σ' on tehokas jännitys ja φ maan sisäinen kitkakulma. Maan leikkauslujuus vaikuttaa myös tukirakenteisiin kohdistuvaan maanpaineeseen, joka määrittää suurelta osin tukirakenteiden tarvittavan lujuuden. (Rantamäki et al. 1997, s. 122–124)

Maan leikkauslujuutta laskettaessa käytetty maan sisäinen kitkakulma φ muodostuu maarakeiden välisestä hankauksesta. Maan sisäisen kitkakulman suuruuteen vaikuttaa erityisesti maarakeiden koko, muoto, pyöristyneisyys sekä maan tiiviys. Kitkakulman suuruus vaihtelee maalajeittain, mutta karkearakeisille maalajeille se määritetään pääasiassa 30–40 ° välille. Hienorakeisille maalajeille, kuten savelle, kitkakulma on usein 20–30 °, mutta laskelmissa käytetyn kuvitteellisen koheesiomaalajin kitkakulmana pidetään 0 °. (Rantamäki et al. 1997, s. 123–124)

Maan lujuuteen vaikuttavan pohjaveden pinnan alla sijaitsevan huokosveden käyttäytyminen riippuu maan vedenjohtavuudesta, joka taas riippuu maan raekokojakaumasta. Maata kuormitettaessa huokosvesi pyrkii tiivistymään maan mukana, sillä maarakeiden väliin jäävä huokostila pienenee. Vesi ei kuitenkaan tiivisty, jolloin sen paine kasvaa ja se pyrkii siirtymään pois maarakeiden tieltä. Karkearakeisessa maassa huokosvesi pääsee nousemaan huokosveden ylipaineen ansiosta pohjaveden pinnan yläpuolelle täyttämään vedellä kyllästämättömiä huokosia ja nostamaan pohjavedenpintaa. Jos huokosvesi pääsee poistumaan maasta siten, ettei se aiheuta huokosvedelle pysyvää ylipainetta ja maan

tilavuus pääsee pienenemään, on kyseessä avoin tila. Huokosveden eteneminen on kuitenkin hienorakeisella maalla hidasta, jolloin huokosvesi ei pääse siirtymään pois kuormituksen tieltä. Syntyy huokosveden ylipainetta eikä maan tilavuus pääse muuttumaan. Tilannetta kutsutaan suljetuksi tilaksi ja se havaitaan, kun hienorakeista maata kuormitetaan nopeasti. Suljetussa tilassa maan lujuutta kuvataan suljetulla leikkauslujuudella s_u , jonka suuruus riippuu maan ominaisuuksista sekä jännitystilasta. (Rantamäki et al. 1997, s. 101)

3. MAANPAINE

3.1 Maanpaineen lajit

Maanpainetta tutkitaan, kun maahan on sijoitettu esimerkiksi tukiseinä tai jokin muu rakenne. Maanpaine ilmenee maan aiheuttamana vaakasuuntaisena kuormituksena rakenteisiin niiden ollessa kosketuksessa maahan. Maanpaineen rakenteeseen kohdistama kuormitus riippuu maan ominaisuuksista, maan ja rakenteen liikkeistä sekä niiden välisestä kitkasta kosketuspinnossa. Maanpaineella on kolme erilaista lajia, joiden suljetulle välille maanpaineen arvo sijoittuu. Ne ovat lepopaine, aktiivipaine sekä passiivipaine. Maanpaineen muutokset aiheutuvat aina ulkoisesta kuormituksesta eli maata koskettavan rakenteen liikkeestä maan suhteen. (Avellan 1990)

3.1.1 Lepopaine

Maan lepopaineeksi kutsutaan tilannetta, kun maahan on asennettu seinä, joka on täysin jäykkä eikä sen asennus ole muuttanut maan jännitystilaa. Kun maa on seinän molemmin puolin lepopaineessa, ei maan pois kaivaminen seinän toiselta puolelta aiheuta minkäänlaista liikettä seinässä. Lepopaine ilmenee parhaiten massiivisten liikkumattomien rakenteiden, kuten esimerkiksi tukimuurien läheisyydessä. Silloin tiedetään, että rakenteeseen ei aiheudu siirtymiä sen toisella puolella olevasta maamassasta, joten maamassa on lepopaineessa. (Rantamäki et al. 1997, s. 233)

Lepopainetta lasketaan kaavalla

$$p_0 = \sigma' K_0, \quad (4)$$

jossa p_0 on maan lepopaine, σ' on maan tehokas pystyjännitys ja K_0 on lepopaine kerroin. Maan lepopaine kerrointa voidaan laskea riittäväällä tarkkuudella esimerkiksi Jakyn kaavalla. Silloin Lepopaine kertoimen suuruuteen vaikuttaa tasaisella maalla ainoastaan maan kitkakulma φ . Lepopaine kerroin lasketaan Jakyn kaavalla

$$K_0 = 1 - \sin \varphi. \quad (5)$$

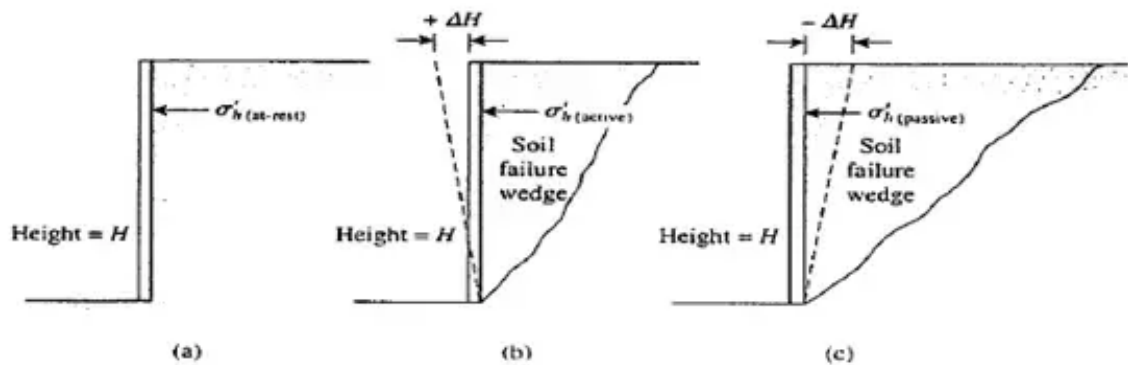
Mayne ja Kulhawy julkaisivat vuonna 1982 kirjassaan, että ylikonsolidoituneille eli aiemmin normaalia suurempaan kuormitukseen joutuneille maille lepopaine kertoimen suuruuteen vaikuttaa myös maan kuormitushistoria. Maan kuormitushistoriaa kuvaava ylikonsolidaatiokerroin, joka on tunnettu myös terminä OCR, aiheuttaa muutoksen maan lepopaine kertoimeen kaavan

$$K_0 = (1 - \sin \varphi)(R_{oc})^{\sin \varphi} \quad (6)$$

mukaisesti. Kaavaan merkitty R_{oc} kuvaa ylikonsolidaatiokerrointa. Lepopainekertoimen arvo vaihtelee pääasiassa kitkamailla 0,4 ... 0,6 ja koheesiomailla 0,5 ... 0,7 välillä, mutta esimerkiksi hyvin paljon ylikonsolidoituneilla savimailla lepopainekerroin voi olla jopa 0,9 ... 1,2. (Craig, R. F. 1997, s. 194) (Rantamäki et al. 1997, s. 242)

3.1.2 Aktiivipaine

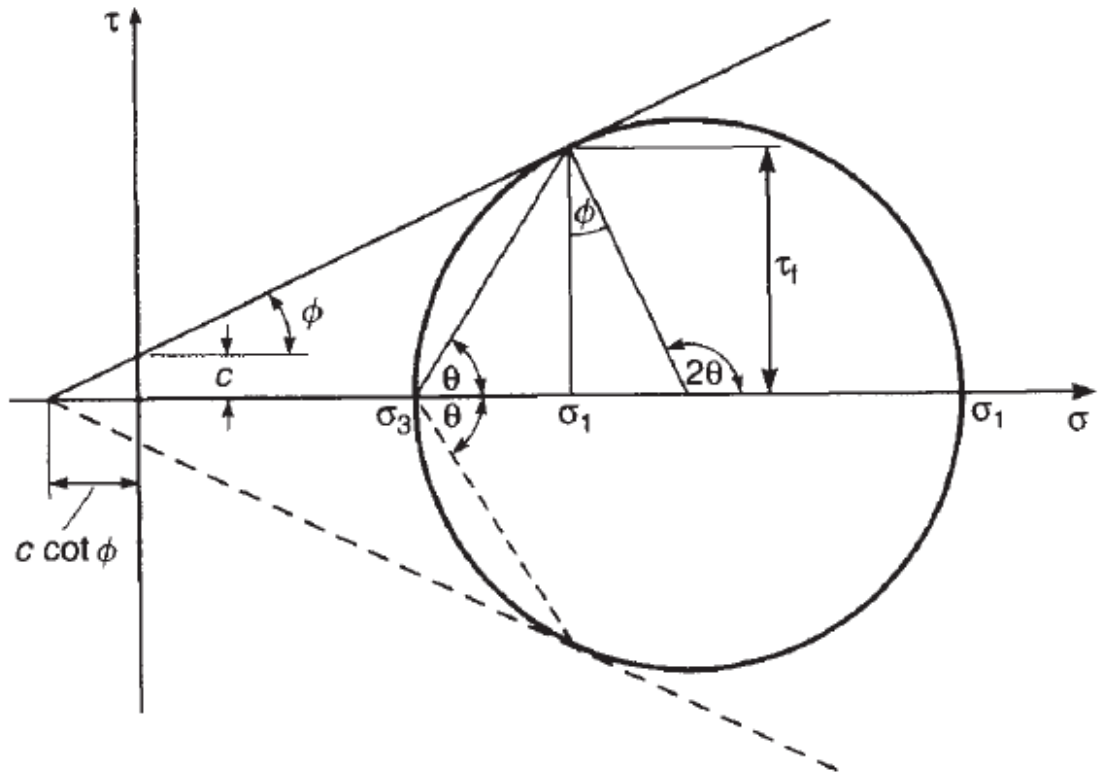
Aktiivipainetta kehittyy, kun tukirakenne ei ole täysin liikkumaton. Kun rakenteen toiselta puolelta kaivetaan, alkaa rakenne liikkua pois päin maasta tyhjää tilaa kohti, jolloin seinään kohdistuva maanpaine pienenee (Avellan 1990). Leikkausjännitykset alkavat kasvaa seinän takana olevassa maassa, mikä johtuu maan vaakajännityksen pienenemisestä. Kun leikkausjännitys ylittää maassa vallitseva leikkauslujuuden, syntyy maahan murtuma tason muotoisessa leikkauspinnassa. Aktiivipaine on pienin vaakajännitys, jonka maa kestää murtumatta, joten se on maan murtorajatilamitoituksen minimiarvo. (Rantamäki et al. 1997, s. 233)



Kuva 1. Maanpaineen lajit a) Lepopaine, b) Aktiivipaine, c) Passiivipaine.

Kuvassa 1a nähdään tukiseinä lepopaineessa, mutta kuvassa 1b nähdään, miten aktiivipaine vaikuttaa tukiseinään. Seinän siirtyessä maan jännitys pienenee kaivannon yläpäässä, kunnes maahan syntyy tason muotoinen leikkauspinta, jota pitkin maa sortuu. Leikkauspinta ei ole koskaan täysin suora, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi useat eri laskentamenetelmät olettavat tason suoraksi, sillä maan leikkauspinnan todellista sijaintia on hyvin vaikea ennustaa.

Aktiivipaineen kehittymistä voidaan tarkastella esimerkiksi kuvan 2 Mohrin ympyrän avulla, sillä maanpaineen ääritilanteissa eli aktiivipaineessa sekä passiivipaineessa tutkitaan maassa ilmenevää suurinta ja pienintä jännitystä, joiden riippuvuutta Mohrin ympyrä tarkastelee.



Kuva 2. Mohrin ympyrä Rankinen maanpaineteoriassa. σ_3 kuvaa maan pienintä jännitystä ja σ_1 maan suurinta jännitystä. ϕ on maan kitkakulma. (Craig, R. F. 1997, s. 181)

Mohrin ympyrää tarkasteltaessa oletetaan, että maata kuormittaa sille ominaiset vaakaja pystyjännitykset σ_h ja σ_v . Lähtötilanteessa maan pystyjännitys on maan vaakajännitystä suurempi. Mohrin ympyrä muodostetaan näiden kahden jännityksen väliin siten, että ympyrän halkaisija on jännitysten erotus. Tukiseinän siirtyessä pois päin maasta sen vaakajännitys σ_h alkaa pienentyä ja siirtyä kuvaajassa vasemmalle, jolloin ympyrän halkaisija alkaa kasvaa. Kun vaakajännitys on pienentynyt riittävästi, se saavuttaa pienimmän mahdollisen jännityksen σ_3 , jolloin maan pystyjännityksestä tulee maan suurin mahdollinen jännitys σ_1 . Vaakajännityksen ja pystyjännityksen välille piirretty ympyrä sivuaa maalle määritettyä murtosuoraa, jolloin syntyy aktiivipaine. Vaakajännityksen pienentäminen entisestään aktiivipaineessa suurentaa ympyrän niin suureksi, että murtosuora leikkaa ympyrän ja maa murtuu. (Craig, R. F. 1997, s. 181-183)

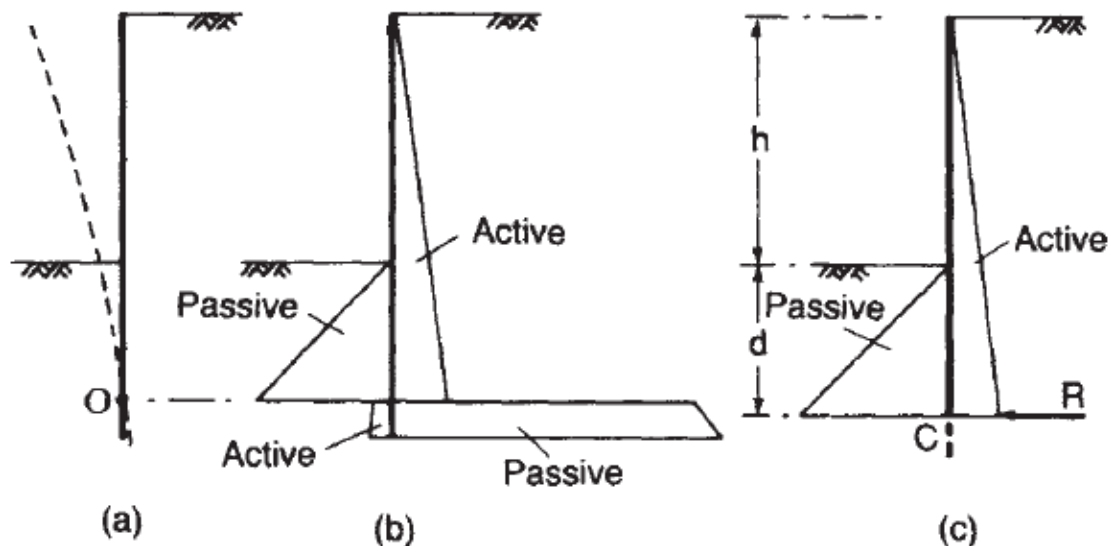
3.1.3 Passiivipaine

Maan passiivipainetta esiintyy, kun tukiseinä siirtyy maata kohti, usein ulkoisen voiman työntämänä. Seinä alkaa puristaa maata tiiviimmäksi, jolloin maan seinään kohdistama vaakajännitys kasvaa, kunnes se saavuttaa murtorajansa eli passiivipaineen. Passiivipaine on siis maanpaineen maksimi-arvo, ja käytännössä maanpaineen arvo laskuissa vaihtelee aktiivi- ja passiivipaineen välillä. (Rantamäki et al. 1997, s. 233)

Myös passiivipainetta voidaan tarkastella kuvan 2 Mohrin ympyrän avulla. Passiivipaineen kehittyminen lähtee Mohrin ympyrässä samoista lähtökohdista, kuin aktiivipaineen kohdalla eli maan pystyjännitys on vaakajännitystä suurempi ja niiden välille on piirretty ympyrä, jonka halkaisija on jännitysten erotus. Maan vaakajännityksen kasvaessa σ_h siirtyy lähemmäs σ_v :tä, jolloin ympyrä pienenee, kunnes se katoaa jännitysten ollessa yhtä suuret. Kun maan vaakajännitystä aletaan kasvattaa entisestään, siirtyy σ_h edelleen oikealle kuvaajassa ja ympyrä alkaa jälleen kasvaa, kunnes se sivuaa murtosuoraa ja syntyy passiivipaine. Maan vaakajännitys on saavuttanut maksimiarvonsa ja näkyy kuvassa suurimpana jännityksenä σ_3 , kun taas maan pystyjännitys, joka on pysynyt vakiona, onkin maan pienin jännitys σ_1 . Passiivipaineen syntymiseen vaadittu jännityslisäys on itseisarvoltaan noin kymmenkertainen aktiivipaineen jännitykseen verrattuna, jolloin myös seinän siirtymän täytyy passiivipaineen tilanteessa olla noin kymmenkertainen verrattuna aktiivipaineeseen, jotta maa murtuu. (Craig, R. F. 1997, s. 181-184)

Passiivipaineen esiintyminen tukiseinän yläpäässä on hyvin harvinaista. Kuvassa 1c nähdään, että tukiseinän siirtyessä maamassaa kohti maa lähtee nousemaan ylöspäin liukupintaa pitkin, sillä tilavuus seinän ja liukupinnan välissä pienenee. Käytännössä näin ei koskaan tapahdu, mutta esimerkiksi ankkuroinnilla voidaan aiheuttaa tukiseinän yläpään pieni liike maata kohti.

Passiivipaine esiintyykin kaivannoissa tukiseinän alaosassa kaivannon pohjassa. Passiivipaine pitää tukiseinän alapään paikallaan, ettei se pääse siirtymään kaivantoon päin, jolloin seinä voisi kaatua kohti kaivantoa ja aiheuttaa sortumia. (Craig, R. F. 1997, s. 214)



Kuva 3. Aktiivi- ja passiivimaanpaineen tukiseinään kohdistamat voimakuviot. (Craig, R. F. 1997, s. 215)

Kuvassa 3 nähdään tilanne, jossa tukiseinään kohdistuvat maanpainet pitävät seinän paikallaan, kunhan se on lyöty tarpeeksi syväälle. Passiivipaineen aiheuttama vastavoima kaivannon puolelle kasvaa aktiivipainetta huomattavasti nopeammin, joten tukiseinän tulisi

olla niin syvällä, että passiivipaine olisi suurempi kuin aktiivipaine. Jos näin ei ole, syntyy kuvan 3a katkoviivan mukainen tilanne ja sortuma kaivannon yläpäähän. (Craig, R. F. 1997, s. 214)

3.2 Maanpaineteoriat

Maanpainetta on tutkittu laajasti kahden viime vuosisadan aikana, ja sen laskemiseen on laadittu useita eri menetelmiä. Lepopaineen määrittäminen on todettu helpoimmaksi kimmo-teorian tai kokeiden perusteella, sillä se vaatii maalta liikkumattomuutta. Aktiivi- ja passiivipaineen määrittäminen perustuu sen sijaan maan murtotilaan, sillä molempien ääriarvojen ylittäminen johtaa maan murtumiseen liukupintaa pitkin. Maanpaineteoria on kuitenkin vaikiintunut muutama pitkään käytössä ollut laskentatapa, sekä uusia, monipuolisempia ja tarkempia laskentatapoja. (Rantamäki et al. 1997, s. 234-235)

3.2.1 Rankinen maanpaineteoria

Rankinen maanpaineteoria on skotlantilaisen William John Macquorn Rankinen vuonna 1857 kehittämä teoria, jolla voidaan tarkastella maan oman massan synnyttämiä jännityksiä maamassan sisällä. Teoria ei oikeastaan käsittele suoraan maanpainetta aiheuttamia voimia tukiseinästä vastaan, vaan maahan syntyviä jännityksiä, jotka aiheuttavat voimia tukiseinän kosketuspinnossa. Tukiseinään kohdistuvat voimat voidaan kuitenkin selvittää teoriassa saatujen maanpaineteorioiden avulla. (Tornivaara-Ruikka, R. 1990)

Maan ominaisuuksia on yksinkertaistettu Rankinen maanpaineteoriaa varten, sillä yksiselitteinen laskentatapa, joka ottaa huomioon kaikki maan ominaisuudet, on vieläkin keksimättä. Koska teoria perustuu plastisuusteoriaan, se olettaa maamassan olevan täysin plastinen. Maa on myös oletettu isotrooppiseksi ja homogeeniseksi materiaaliksi, jossa jännitykset ovat tasaisesti jakaantuneet. Sen lisäksi tukiseinässä oleva kitka oletetaan nolllaksi, ja maahan syntyvien leikkauspintojen oletetaan olevan suorina. Alkuperäisen teorian mukaan tukiseinä on pystysuora ja maanpinta seinän molemmin puolin vaakasuora, eikä maalla ollut koheesiota. Myöhemmin teoriaa on kuitenkin täydennetty, jotta maanpainetta voi laskea sekä kaltevilla maanpinnoilla, että koheesiomailla. Tässä kandidaatintyössä keskitytään tarkastelemaan tilannetta, jossa maanpinnat ovat vaakasuoria ja tukiseinä pystysuora. (Tornivaara-Ruikka, R. 1990)

Rankinen maanpaineteoriaa voidaan käyttää maan tukiseinään kohdistaman jännityksen määrittämiseen. Tukiseinän liikkuessa kaivantoon päin syntyy kuvan 3.1.2 mukainen aktiivipaine, jonka aiheuttamaa jännitystä voidaan laskea kuvan 2 Mohrin ympyrästä johdetulla Rankinen aktiivipainekaavalla

$$p_a = \sigma' K_a - 2c' \sqrt{K_a}, \quad (7)$$

jossa $p_a = \sigma_3$ on aktiivipaine ja $\sigma' = \sigma_1$ on maan pystyjännitys. c' on koheesio ja K_a on aktiivipaineekerroin, joka lasketaan kaavalla

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (8)$$

jossa φ on maan kitkakulma. (Tornivaara-Ruikka, R. 1990)

Tukiseinän liikuessa kaivantoon päin se pyrkii työntämään kaivannon pohjaa pois tieltänsä, joka aiheuttaa luvun 3.1.3 mukaisen passiivipaineen syntymisen. maan aiheuttamaa jännitystä voidaan passiivipaineen puolella laskea Rankinen passiivipaineakaavalla

$$p_p = \sigma' K_p + 2c' \sqrt{K_p}, \quad (9)$$

jossa $p_p = \sigma_1$ on passiivipaine ja $\sigma' = \sigma_3$ on maan pystyjännitys. c' on koheesio ja K_p on passiivipaineekerroin, joka lasketaan kaavalla

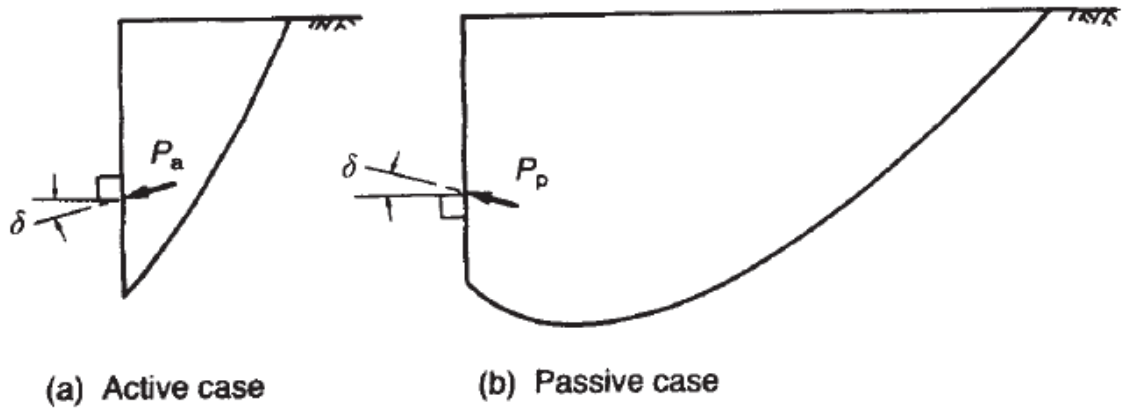
$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (10)$$

jossa φ on maan kitkakulma. (Tornivaara-Ruikka, R. 1990)

3.2.2 Coulombin maanpaineteoria

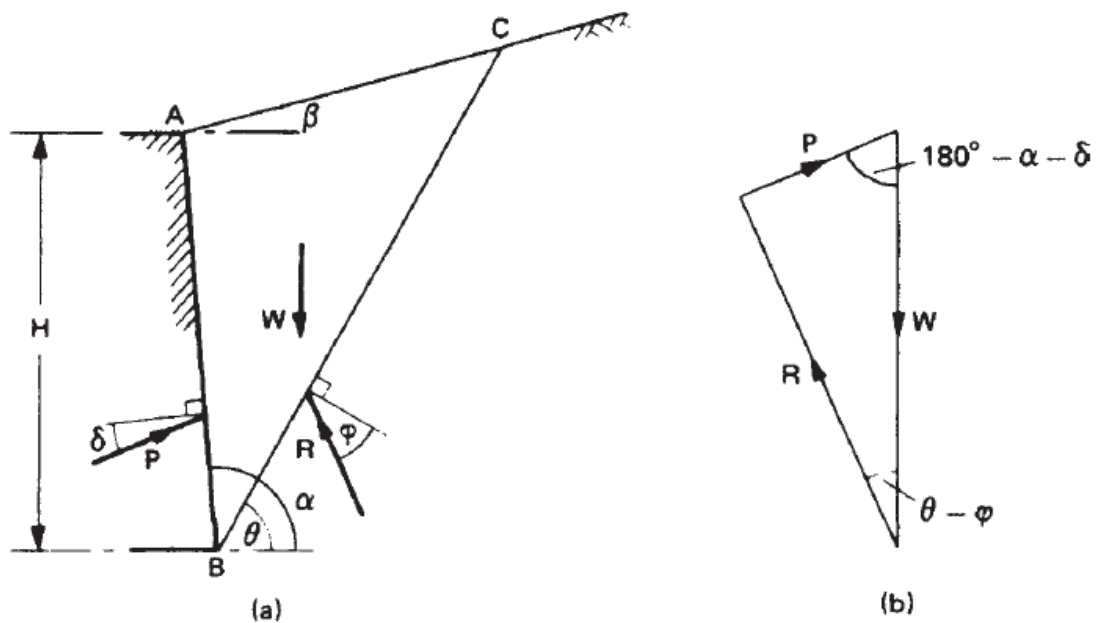
Coulombin maanpaineteoria on Charles Augustin de Coulombin vuonna 1776 kehittämä teoria, joka tarkastelee maanpaineen aiheuttaman murtuman tasoliukupintoja (Craig, R. F. 1997, s. 195). Teoria käsittelee sen maamassan tasapainotilaa, joka jää tukimuurin ja maan murtumaliukupinnan väliin. Tarkastelussa keskitytään maahan kohdistuvien voimien tarkasteluun, jolloin maahan kohdistuva momentti jätetään huomioimatta. Murtuman ajatellaan sijaitsevan ainoastaan tarkasteltavalla pinnalla ja maa on muuten kimmoisessa tilassa. (Tornivaara-Ruikka, R. 1990)

Coulombin maanpaineteoria ottaa Rankinen maanpaineteoriasta poiketen huomioon maan ja tukiseinän välisen kitkan, mutta jo Coulomb itse huomasi kitkan kaareuttavan tasoliukupintaa seinän lähellä. Kaareutumisen vaikutus laskelmiin on kuitenkin pieni aktiivipaineella sekä pienillä kitkakulman arvoilla passiivipaineella. Suurella seinäkitkan arvolla passiivipaineessa voi olla suurikin virhe, joka johtuu siitä, että kaareutuminen on jyrkempää suurilla kitkakulman arvoilla. vaikutuksen erot aktiivi- ja passiivipaineessa havaitaan selkeästi kuvasta 4. (Tornivaara-Ruikka, R. 1990)



Kuva 4. Tukiseinän ja maamassan kitkasta johtuva liukupinnan kaareutuminen aktiivi- ja passiivipaineessa. (Craig, R. F. 1997, s. 195)

Coulombin maanpaineteoriassa tarkastellaan ja vertaillaan maalle erilaisia suoria tasoliukupintoja, joita pitkin murtuma voisi tapahtua. Tasoliukupintojen kulmaa vaakatasoon nähden vaihdellaan ja yritetään etsiä arvo, jolla maanpaineen resultantti saa maksimiarvonsa.



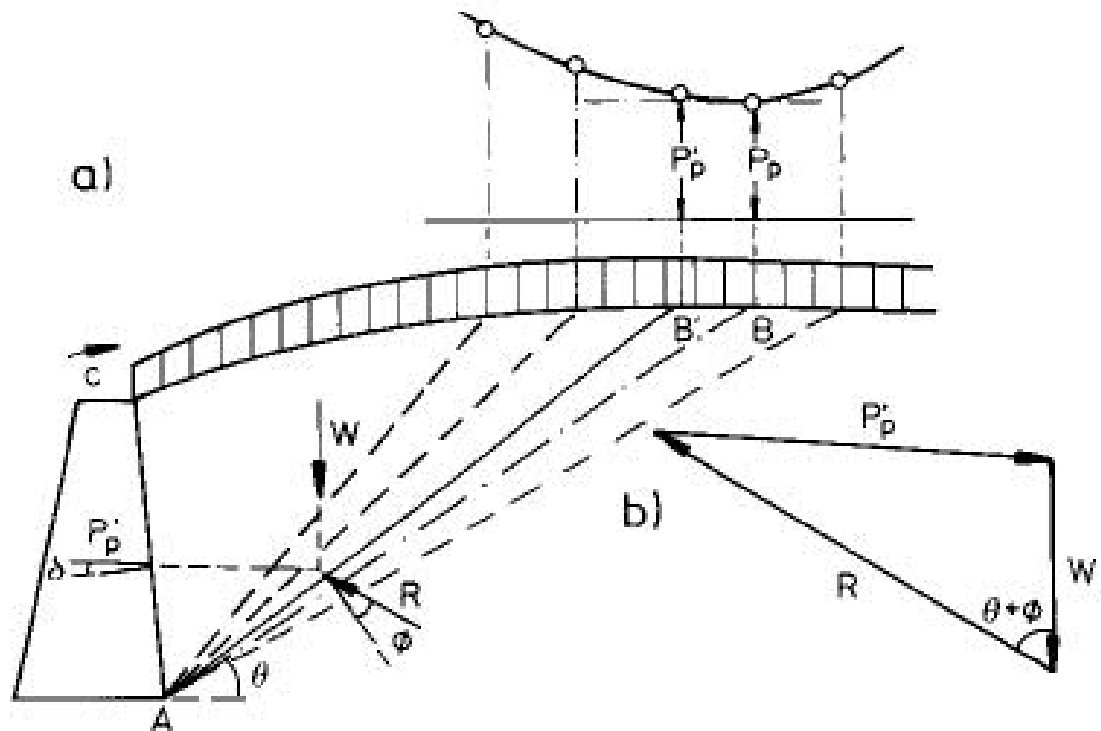
Kuva 5. Coulombin aktiivimaanpaineen resultantin P laskeminen kitkamaalle. (Craig, R. F. 1997, s. 196)

Kuvassa 5 on havainnoitu, miten Coulombin teorian mukaan lasketaan resultantti aktiivimaanpaineelle. Kuvan perusteella voidaan resultantti P ilmaista sinilauseella ja etsiä sille maksimia lauseen avulla. Tällöin saadaan aktiivipainekertoimelle K_a kaava

$$K_a = \left(\frac{\sin(\alpha - \varphi) / \sin \alpha}{\sqrt{\sin(\alpha + \delta) + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}}}} \right)^2, \quad (11)$$

jossa α on vaakatason ja tukiseinän välinen kulma, φ on maan kitkakulma, δ on maan ja seinän välinen kitkakulma ja β on kaivannon yläpään maanpinnan ja vaakatason välinen kulma. Aktiivipainekerrointa K_a hyödynnetään sen laskemisen jälkeen Rankinen aktiivimaanpaineen kaavassa 7, jolla saadaan Coulombin aktiivimaanpaine. (Craig, R. F. 1997, s. 197)

Passiivimaanpainetta tarkastellessa etsitään minimiarvoa passiivipaineen seinään aiheuttamalle resultanttivoimalle. Sitä tarkastellaan myös kuvan 5 kaltaisesti, mutta seinän siirtyessä maamassaa kohti seinäkitkan vaikutussuunta vaihtuu. Lisäksi tasoliukupinnan ollessa pienemmässä kulmassa vaakatasoon resultantin R suunta ja suuruus muuttuu, jolloin syntyvä tilanne nähdään kuvassa 6.



Kuva 6. Coulombin passiivimaanpaineen resultantin P_p laskeminen kitkamaalle. (Tornivaara-Ruikka, R. 1990)

Kuvassa 6 esiintyvä resultantti P_p voidaan ilmaista myös sinimuodossa, jolloin passiivipainekerroin K_p voidaan esittää kaavalla

$$K_p = \left(\frac{\sin(\alpha + \varphi) / \sin \alpha}{\sqrt{\sin(\alpha - \delta) - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi + \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}}}} \right)^2, \quad (12)$$

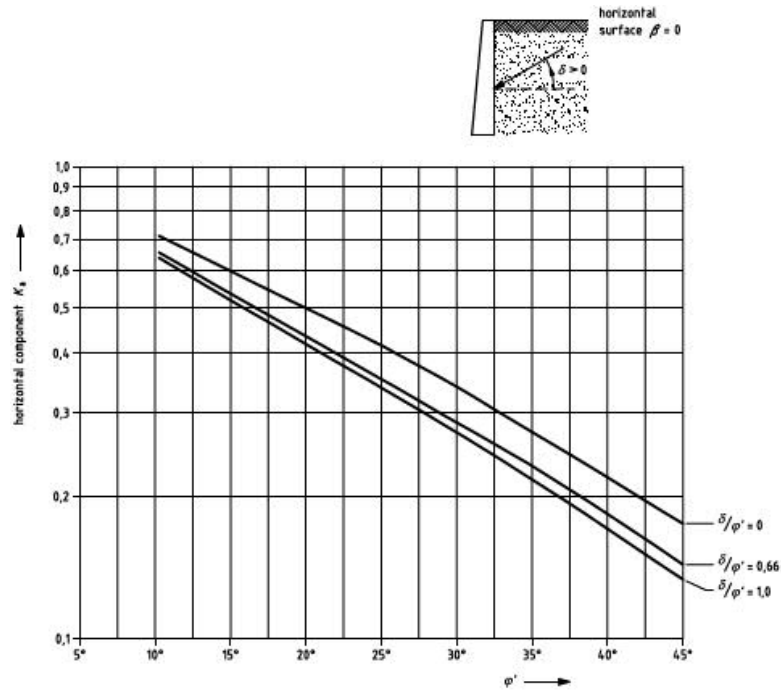
jossa α on vaakatason ja tukiseinän välinen kulma, φ on maan kitkakulma, δ on maan ja seinän välinen kitkakulma ja β on kaivannon yläpään maanpinnan ja vaakatason välinen kulma. Passiivipainekerrointa K_p hyödynnetään sen laskemisen jälkeen Rankinen passiivimaanpaineen kaavassa 9, jolla saadaan Coulombin passiivimaanpaine. Suurilla kitkakulman arvoilla teoria aiheuttaa kuitenkin suurta virhettä epävarmalle puolelle, joten se on kyseisessä tilanteessa käyttökelvoton. (Craig, R. F. 1997, s. 199)

Kuvissa 5 ja 6 esitetyt tilanteet eivät koske koheesiomaita, sillä teoriassa koheesiomaalla maan kitkakulma on 0° . Silloin maanpainekertoimet saavat aina arvon 1, jolloin ainoastaan koheesio lisää maanpainetta. Kuitenkin kuvien 5 ja 6 tilanteita voidaan tarkastella sekä kitka- että koheesiomaan ominaisuuksia omistavaan yhdistelmämaahan, jolloin maanpaineresultanttia muodostettaessa voimamonikulmioon täytyy lisätä koheesio aiheuttama leikkausvoima F_c sekä adheesiovoima F_a . Laskennassa maan tyyppi huomataan selkeästi maan parametreissa, joten se ei aiheuta muutoksia laskutapaan. (Tornivaara-Ruikka, R. 1990)

3.2.3 Eurokoodit

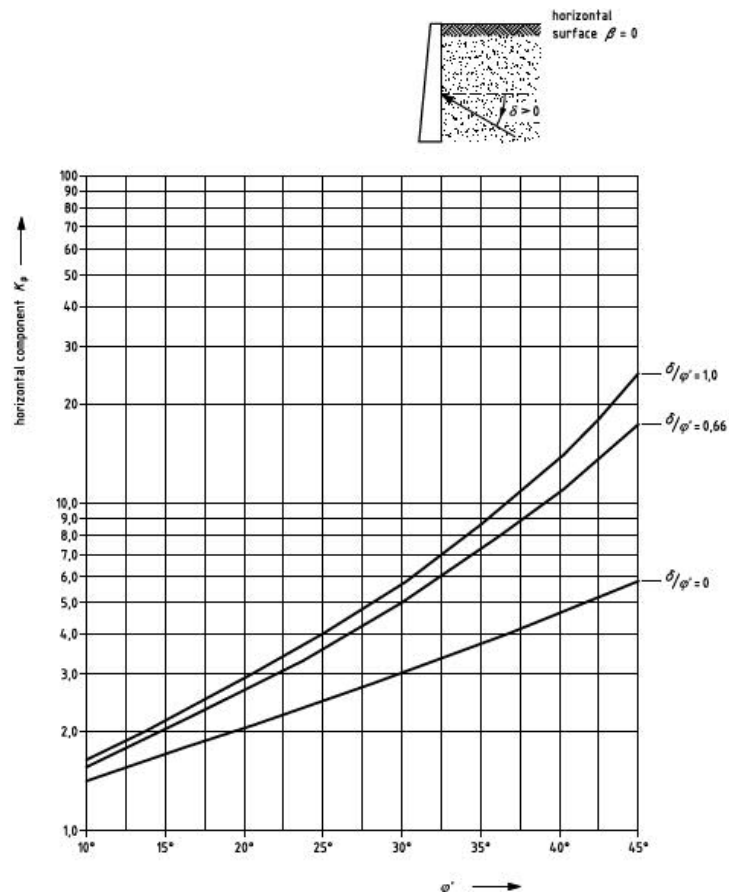
Eurokoodit ovat syntyneet 1970-luvun loppupuolella, kun Euroopan unioni halusi tehostaa rakennusalan vientiä yhdistämällä kansalliset rakentamisen ja rakennustuotteiden laatumääräykset sekä -vaatimukset. EU:n Komissio julkaisi rakenteellisen suunnittelun ohjeet, ensimmäiset eurokoodit, vuonna 1984. Sen jälkeen rakennustuotteisiin laadittiin CE-merkintä, joka tarkoittaa tuotteen hyväksyvän EU:n jäsenvaltioiden yhteiset laatuvaatimukset. Nykyään eurokoodistandardit koostuvat 10 eri pääosasta, mutta tässä työssä tutkitaan ainoastaan eurokoodia 7, Geotekninen suunnittelu, joka sisältää laskumenetelmiä maanpaineelle. (SFS ry, 2018)

Eurokoodissa aktiivi- ja passiivipaineiden arvot lasketaan Rankinen maanpaineteorian mukaisilla kaavoilla 7 ja 9. Kaavoissa olevat aktiivi- ja passiivipainekertoimet K_a ja K_p otetaan kuitenkin Eurokoodin suunnitteluohjeessa olevien taulukoiden kuvaajista. Kuvaajia on useita, sillä niiden käyrät vaihtelevat eri seinäkitkakulmien arvoilla ja taulukoita on useita, sillä kuvaajien tulee huomioida myös maanpinnan poikkeama vaakatasosta. Aktiivipainekerroin K_a saadaan pystysuoralle tukiseinälle ja vaakasuoralle maanpinnalle Kuvasta 7.



Kuva 7. Aktiivipainekerroin K_a tehokkaalle aktiivipaineelle. (Lehtonen, V. 2017)

Kuvassa 8 esiintyvää passiivipainekerrointa suositellaan laskettavaksi eurokoodilla, sillä Coulombin passiivipaineessa syntyy virhettä erityisesti suurilla seinäkitan arvoilla.



Kuva 8. Passiivipainekerroin K_p tehokkaalle passiivipaineelle. (Lehtonen, V. 2017)

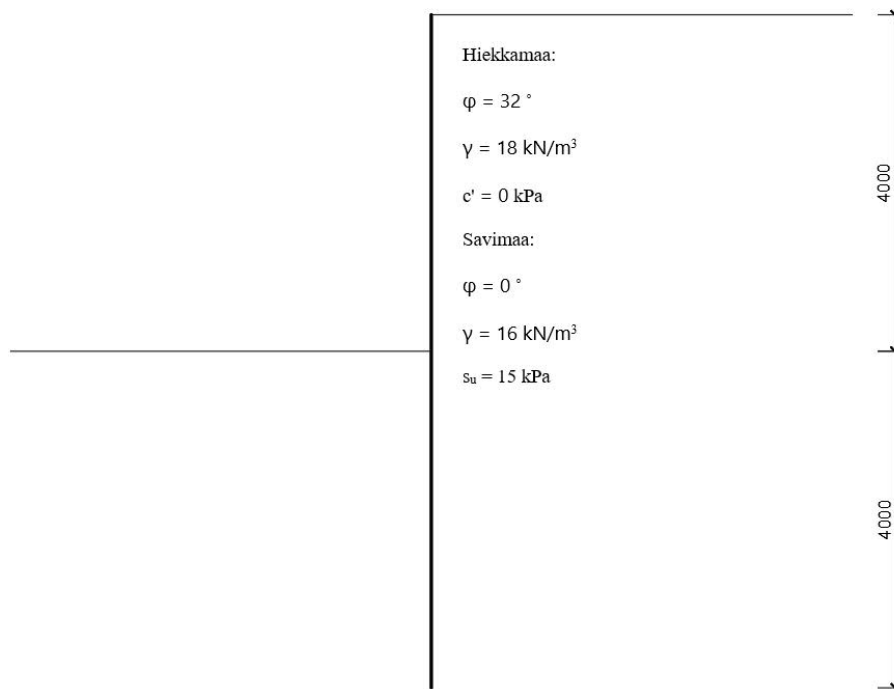
Kuvien 7 ja 8 taulukoista saadaan selville laskennassa käytettävä aktiivi- tai passiivipainekerroin K_a tai K_b . Aluksi tutkitaan seinän ja maan välisen kitkakulman δ ja maan kitkakulman φ välistä suhdetta. Taulukossa on annettu kolmelle eri suhteelle kuvaajat, joiden arvoista nähdään maanpainekertoimen arvo tietyllä maan kitkakulmalla. Tarvittaessa taulukoiden käyrien välistä saadaan puuttuvia arvoja interpoloimalla. Taulukoiden alareunassa on eri arvoja maan kitkakulmalle φ , jolloin taulukosta voidaan lukea maanpainekerroin tietyillä kitkakulman ja seinäkitkan arvoilla.

Eurokoodissa on kerrottu aktiivi- ja passiivipainekertoimien taulukoiden lisäksi myös muita tapoja laskea maanpainetta. Ne ovat kuitenkin monimutkaisia ja ne soveltuvat paremmin käytännön tilanteisiin. Niitä ei käydä tarkemmin läpi tässä kandidaatintyössä. (SFS ry, 2018)

4. MAANPAINEN LASKEMINEN

Maanpainetta ja maanpaineteorioita voidaan käyttää maanpaineen laskemiseen esimerkiksi oletetuissa olosuhteissa tai todellista tilannetta kuvaavassa mallissa. Jotta malli tulisi todellista tilannetta, tulisi laskuissa käytettävien parametrien arvot mitata esimerkiksi maaperänäytteistä. Tässä kandidaatintyössä käytetyt parametrien arvot eivät perustu mitauksiin, vaan ne on valittu kuvaamaan tyypillisintä tilannetta kitka- ja koheesiomaalle.

Maanpainetta laskiessa tulee määrittää kaivannolle syvyys ja tukiseinän pituus. Lisäksi laskelmia varten tulee määrittää kitkakulma φ , koheesio c sekä tukiseinän molemmilla puolilla olevien maamassojen tilavuuspaino γ . Kaivannon reunalla olevaa tukiseinää voidaan kuvata esimerkiksi kuvan 9 piirroksella.



Kuva 9. Esimerkkitapaus 1, jossa maanpainetta lasketaan hiekka- ja savimaassa. Parametrit on määritetty erikseen molempiin tapauksiin.

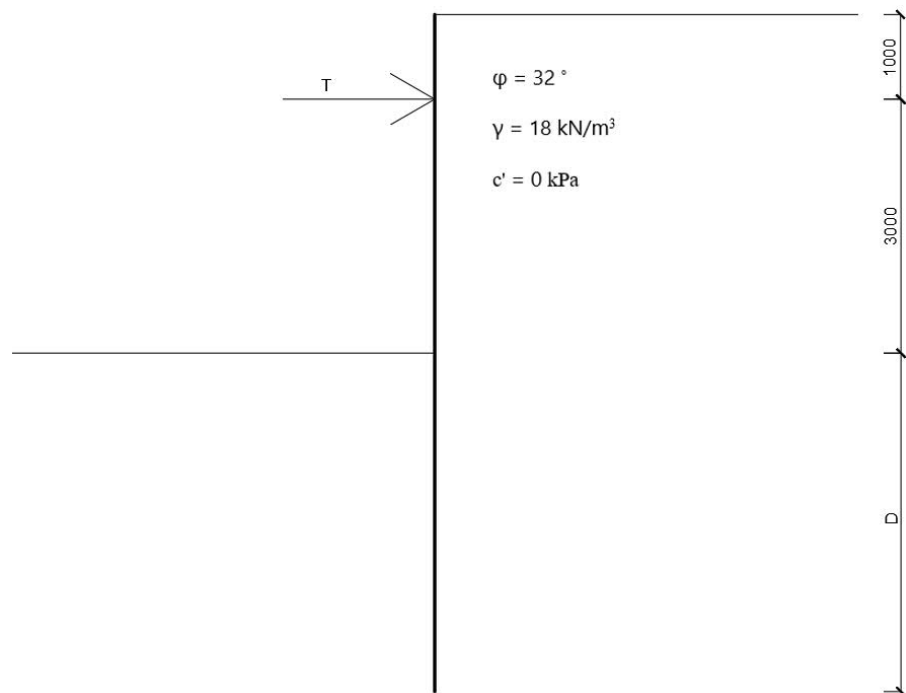
Kuvassa 9 nähdään esimerkkitapauksen 1 tukiseinä, jonka pituus on 8 m ja kaivanto on 4 m syvä. Pohjaveden-pinta on syvällä maaperässä, joten se ei vaikuta laskelmiin. Laskelmia varten valittiin hiekka- ja savimaille niiden ominaisuuksia vastaavat parametrit. Hiekkamaa kuvaa kitkamaata, jonka ominaisuuksiin kuuluu lujuuden muodostuminen pelkästä maarakeiden välisestä kitkasta. Tällöin koheesio on 0. Hiekkamaalle oletettiin kitkakulmaksi $\varphi = 32^\circ$ ja maan tilavuuspainoksi $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$.

Savimaa kuvaa sen sijaan koheesiomaata, jonka lujuus koostuu ainoastaan koheesiosta, jolloin savimaan kitkakulma on $\varphi = 0^\circ$. Savimaan tilavuuspainoksi oletettiin $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$.

ja koheesiomaalla lujuutta kuvaavaksi suljetuksi leikkauslujuudeksi $s_u = 15$ kPa. Todellisuudessa maata ei voi jakaa näin yksiselitteisesti, sillä maa ei koskaan ole täysin homogeenistä. Laskelmat tehdään kuitenkin kitka- ja koheesiomaille, jolloin niiden eroavaisuudet tulevat parhaiten esille.

Yksi tukiseinälle ominaisista parametreista on seinäkitka δ . Seinäkitkan arvoon vaikuttaa seinän materiaalin lisäksi maan kitkakulma. Seinäkitkan suuruus vaikuttaa merkittävästi maanpaineen ja erityisesti passiivipaineen suuruuteen, mutta se johtuu osittain laskentamenetelmistä. Seinäkitkalle on määritetty ylärajat siten, että terästukiseinälle ja muottia vasten valetulle betonitukiseinälle $\delta = 2/3 \varphi$ ja maata vasten valetulle betonitukiseinälle $\delta = \varphi$. Esimerkiksi GeoCalc-ohjelmistosta, jota käytetään paljon tukiseinien mitoituksessa, löytyvälle Larssen 24 -tukiseinälle seinäkitkan arvo on määritetty $\delta = 0,4 \varphi$ (Viasys VDC Oy, 2013). Myös $\delta = 1/2 \varphi$ on hyvin tyypillinen arvo tukiseinän seinäkitkalle. (Liikennevirasto, 2010)

Jotta seinäkitkan eri arvojen vaikutusta tukiseiniin pystyttäisiin havaita paremmin, suoritettiin myös laskelma, jossa tutkittiin, kuinka suuri tukiseinän lyöntisyvyyden kuuluisi olla, jotta se säilyisi momenttitasapainossa. Maan parametreina käytettiin esimerkkitapauksessa 2 esimerkin 1 kitkamaan parametrejä. Kuvassa 10 nähdään Esimerkkitapaus 2.



Kuva 10. Esimerkkitapaus 2, jossa määritetään tukiseinän lyöntisyvyys momenttitasapainon perusteella eri seinäkitkan arvoilla.

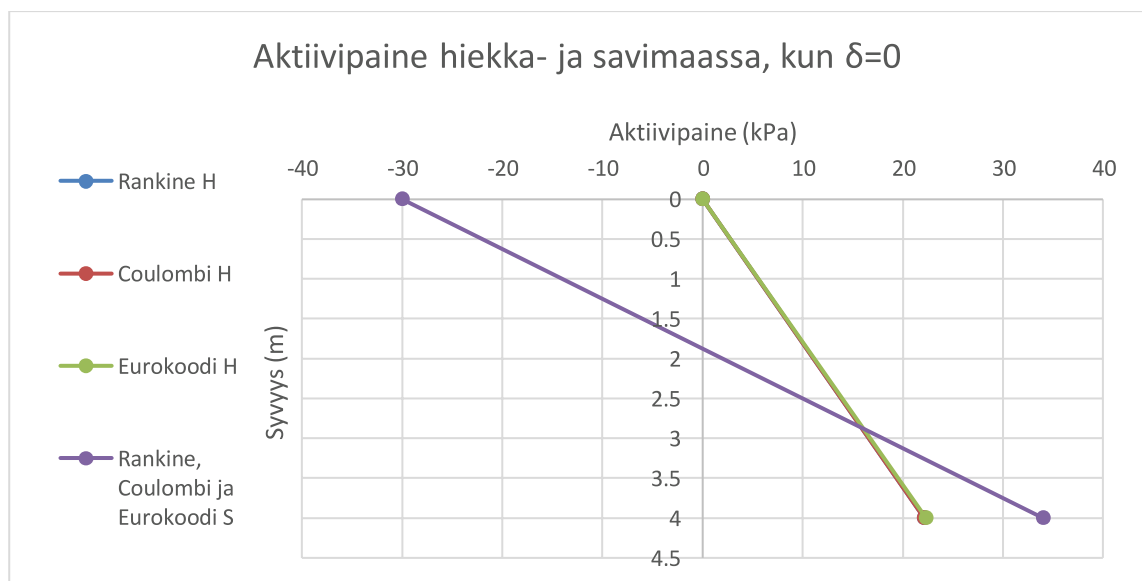
Kuvasta 10 nähdään, että tilanne on hyvin samankaltainen kuin esimerkissä 1. Momenttitasapainon säilyttämiseksi tukiseinä tulee kuitenkin olla tuettu voimalla T, joka kuvaa

esimerkiksi ankkuroinnin aiheuttamaa tukireaktiota. Laskelman tavoitteena on etsiä eroavaisuuksia seinän minimilyöntisyvyydelle D ja tukivoiman T suuruudelle eri laskentamenetelmiä ja seinäkitkan arvoja käyttäen.

Esimerkkitapauksessa 1 laskettiin aktiivi- ja passiivimaanpainetta neljän metrin syvyyteen asti savi- ja hiekkamaassa. Laskelmat tehtiin kolmella eri laskentamenetelmällä; Rankinen ja Coulombin maanpaineteorioilla sekä eurokoodin laskentataulukkojen avulla. Coulombin teoriassa ja eurokoodissa maanpaineet laskettiin myös neljällä eri seinäkitkan arvolla, jotta sen vaikutus maanpaineen suuruuteen havaittaisiin. Esimerkkitapauksessa 2 laskelmat suoritettiin kitkamaassa ja siinä käytettiin Coulombin lakia ja eurokoodia neljällä eri seinäkitkalla. Laskelmat tehtiin Excel-tilukkolaskentaohjelmalla.

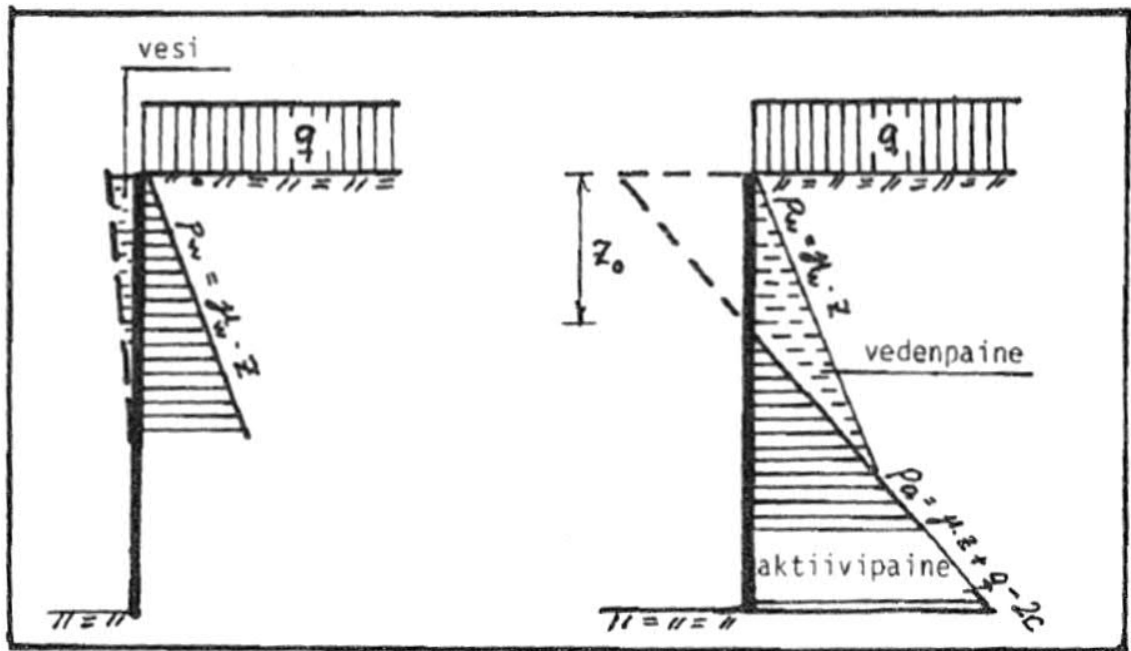
5. TULOSTEN KÄSITTELY

Maanpaineen laskeminen kitka- ja koheesiomaalla esimerkin 1 tilanteessa onnistuu maanpaineteorioiden kaavoilla, mutta koheesiomaan ominaisuuksien takia sille saadut maanpaineen arvot poikkeavat hyvin paljon kitkamaan vastaavista. Sen voi havaita esimerkiksi Rankinen aktiivimaanpaineen kaavassa 7, jossa koheesiomaalle käytetään koheesion c sijasta suljettua leikkauslujuutta s_u , minkä takia lähellä maanpintaa maanpaine onkin negatiivinen. Aktiivipaineen suuruuden hiekka- ja savimaassa voi nähdä kuvasta 11.



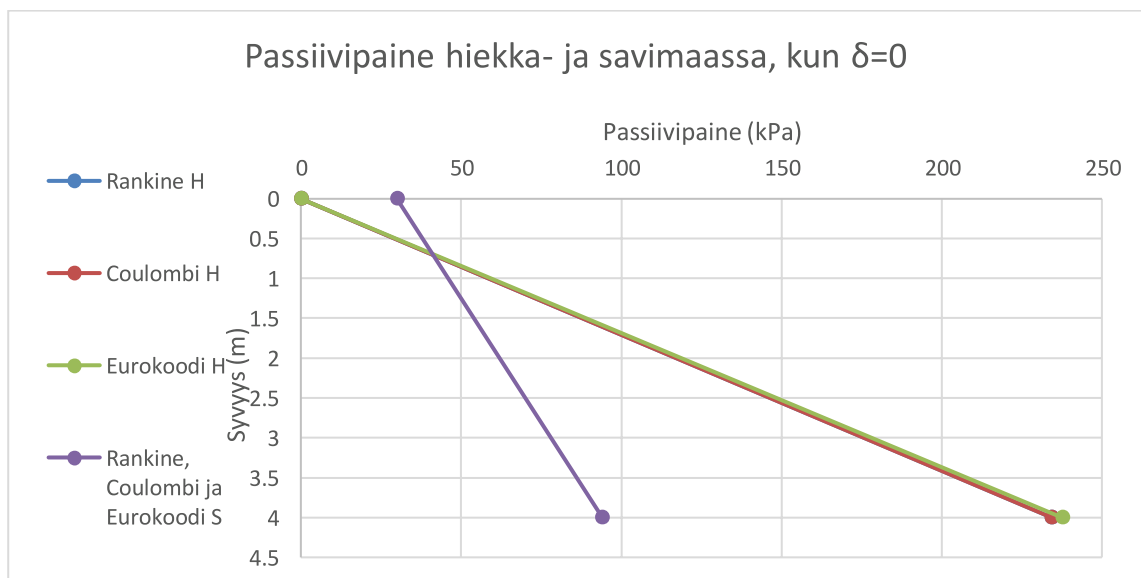
Kuva 11. Aktiivipaine hiekka- ja savimaassa Rankinen, Coulombin ja eurokoodin mukaan, kun tukiseinän aiheuttama seinäkitka $\delta=0$.

Kuvassa 11 nähdään, että aktiivipaineet hiekkamassa ovat hyvin lähellä toisiaan. Itse asiassa Rankinen ja Coulombin teorioilla saadaan aina täysin samat arvot maanpaineelle seinäkitkan δ ollessa 0. Koheesiomaassa nähdään, että maanpinnan läheisyydessä aktiivimaanpaine on negatiivinen. Maanpaineen ollessa negatiivinen ei maan ja seinän välillä ole maanpainetta, vaan maan ja seinän väliin saattaa jopa ilmestyä rako, jonka syvyys voi olla siihen syvyyteen asti, jossa aktiivimaanpaine on pienempi kuin 0. Tämä rako voi sateella täyttyä vedestä, jolloin maanpaine on tulkittava vähintään yhtä suureksi kuin maakerroksessa olevan vesikerroksen aiheuttama hydrostaattinen paine. Pohjarakennusohjeissa maanpaine ei siis koskaan ole negatiivinen, vaan se lasketaan kuvan 12 mukaan. (Rantamäki et al. 1997, s. 243–244)



Kuva 12. Aktiivimaanpaine koheesiomaassa maanpinnan lähellä. (Rantamäki et al. 1997, s. 243)

Passiivipainetta laskiessa maanpaineen suuruus kitkamailla kasvaa noin kymmenker-
taiseksi verrattuna aktiivipaineeseen. Tämä johtuu aktiivi- ja passiivipainekerrointen K_a
ja K_p eroista, sillä aktiivipainekertoimen ollessa kitkamailla usein noin 0,3 passiivipaine-
kerroin on usein noin 3. Koheesiomailla sen sijaan aktiivi- ja passiivipainekertoimet ovat
aina 1, sillä maan kitkakulma φ on 0. Passiivipaineen suuruudet hiekka- ja savimaassa
nähdään kuvasta 13.

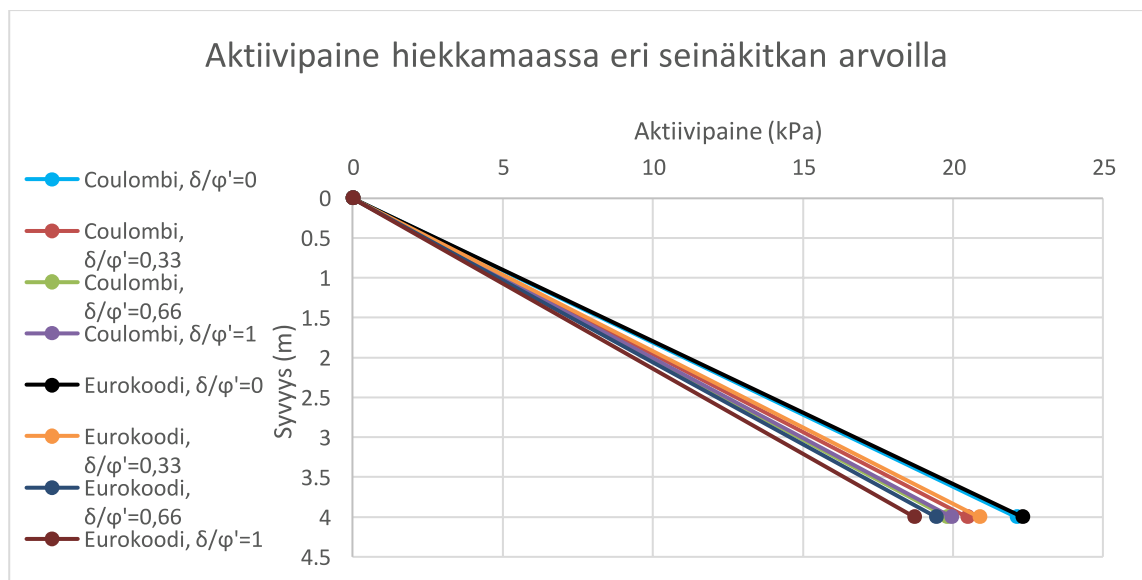


Kuva 13. Passiivipaine hiekka- ja savimaassa Rankinen, Coulombin ja eurokoodin mukaan, kun tukiseinän aiheuttama seinäkitka $\delta=0$.

Kuvassa 13 kitkamaalla passiivipaineen arvot eivät juurikaan poikkea toisistaan, mutta koheesiomaalla passiivipaine on huomattavasti pienempi. Eurokoodin ja Rankinen sekä Coulombin teorioiden välistä eroa voidaan perustella sillä, että Eurokoodin taulukosta pystytään määrittämään aktiivi- ja passiivipainekertoimet silmämääräisesti vain 2 merkitsevän numeron tarkkuudella.

5.1 Tukiseinä hiekkamaassa

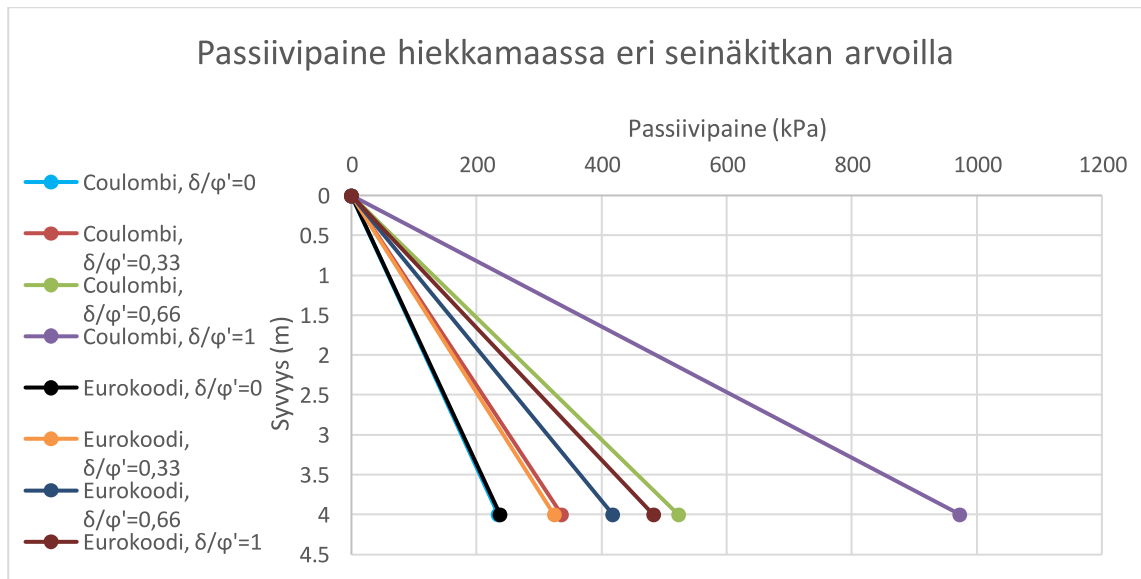
Laskettaessa maanpaineita hiekka- eli kitkamaassa keskityttiin erityisesti Coulombin teorian ja eurokoodin laskentatapoihin, sillä Rankinen teoria antaa täysin samat maanpaineen arvot kuin Coulombin teoria ilman tukiseinän ja maan välistä seinäkitkaa. Rankinen teoria ei myöskään ota huomioon seinäkitkan arvoa. Kuvassa 14 on esitetty aktiivipaine hiekkamaassa neljällä eri seinäkitkan arvolla Coulombin teorialla ja eurokooditaulukolla laskettuna.



Kuva 14. Aktiivipaine hiekkamaassa Coulombin teorian ja eurokooditaulukon avulla laskettuna neljällä eri seinäkitkan arvolla.

Kuten kuvasta 14 nähdään, antaa Coulombin teoria hyvin samankaltaisia arvoja kuin eurokoodin laskentataulukot. Pienellä seinäkitkan arvolla eurokoodin aktiivipaine on hiekan suurempi, mutta suurilla arvoilla tilanne on päinvastainen. Pääpiirteissään arvot ovat keskenään hyvin samankaltaisia, eikä tuloserolla ole vaikutusta laskentamenetelmän valintaan.

Passiivipainetta kitkamaassa tutkittiin samoilla kriteereillä kuin aktiivipainetta. Passiivi- ja aktiivipaineen suuruusluokkaeroista johtuen tiedettiin etukäteen, että laskentamenetelmien erot ovat paljon suuremmat passiivi- kuin aktiivipaineella. Kuvassa 15 nähdään passiivipaine hiekkamaassa neljällä eri seinäkitkan arvolla Coulombin teorialla ja eurokooditaulukolla laskettuna.

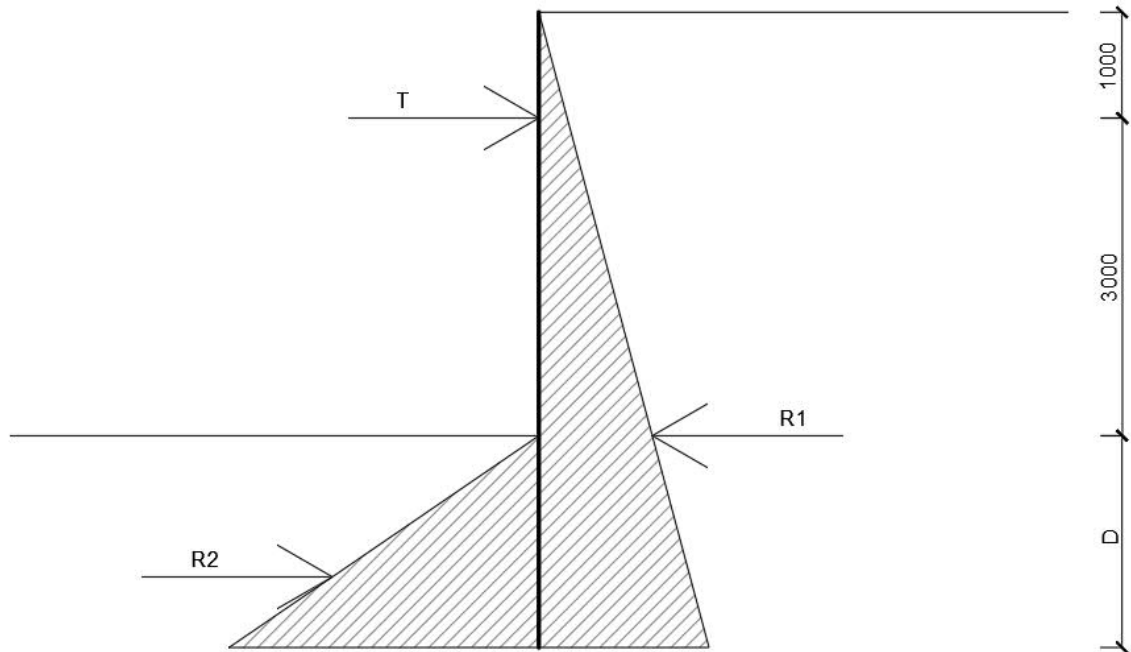


Kuva 15. Passiivipaine hiekkamaassa Coulombin teorian ja eurokooditaulukon avulla laskettuna neljällä eri seinäkitkan arvolla.

Kuvan 15 perusteella nähdään selkeästi jo Coulombin teoriaa tutkiessa huomattu seikka, jonka mukaan Coulombin teoria ei sovellu laskentamenetelmänä passiivipaineelle suurilla seinäkitkan arvoilla, sillä sen aiheuttama virhe on merkittävä ja epävarmalla puolella. Coulombin teorian antama arvo on yli kaksinkertainen vastaavaan eurokoodin arvoon verrattuna, kun seinäkitkan ja maan kitkakulman suhde on 1. Myös suhdeluvulla 0,66 Coulombin teorian arvo on 1,25 kertainen eurokoodiin verrattuna. Kahdella pienimmällä seinäkitkan arvolla tulokset ovat aktiivipaineen kaltaisia, eikä laskentamenetelmien tulokset poikkea merkittävästi toisistaan.

5.2 Tukiseinän lyöntisyvyyden mittaaminen

Esimerkkitapauksessa 2 tutkittavaa tukiseinän lyöntisyvyyttä laskettaessa tulee ensimmäiseksi ratkaista maanpaineen aiheuttamat voimat tukiseinään. Tämä on helpointa ratkaista piirtämällä tukiseinän ympärille aktiivi- ja passiivimaanpainekuvaajat. Kuvaajien avulla voidaan laatia maanpaineelle resultantit, jotka kuvaavat aiheutuvan voiman määrän sen ”painopisteessä”, jonka paikka riippuu kuvaajan muodosta. Esimerkiksi kolmiolla resultantti sijaitsee alhaalta katsottuna yhden kolmasosan korkeudella sen koko korkeudesta. Maanpainekuvaajat ja niiden resultantit on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Esimerkkitapauksen 2 maanpaineen aiheuttamat voimaresultantit esitettyinä kuvassa.

Kuvasta 16 nähdään, että maanpaineiden kuvaajat on jaettu 2 eri resultantiksi, joista 1 kuvaa aktiivipainetta ja 1 passiivipainetta. Resultanttien momenttitasapaino mitattiin tukivoiman T ympäriltä ja resultanteille oli määritetty momenttivarsi, joka on mitattu voiman T kohdalta. Esimerkkitapauksesta 2 laskettiin tukiseinän lyöntisyvyys ja tukivoiman T suuruus Coulombin teorialla sekä eurokoodilla, joissa käytettiin neljää eri seinäkitkan arvoa. Saadut arvot resultanteille, momenttivarsille, lyöntisyvyydelle sekä tukivoimalle on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tukiseinän lyöntisyvyyden laskentataulukko. Lyöntisyvyys laskettiin iteroimalla D 1 cm tarkkuudelle momenttitasapainon perusteella.

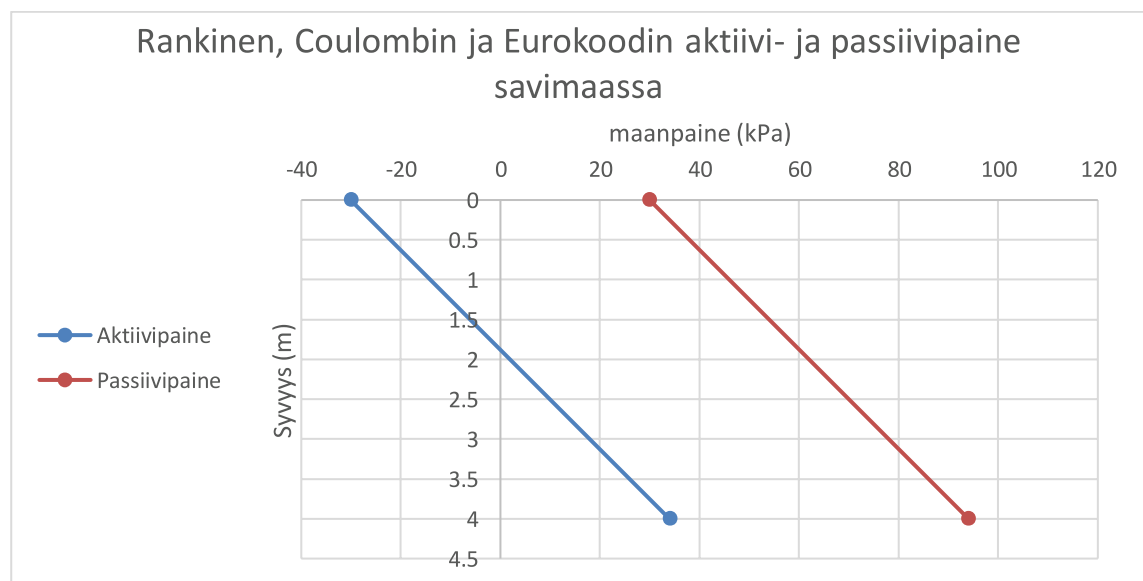
Teoria	δ/φ'	R1	R2	D (m)	T (kN)
Coulombi	0	78,56	51,81	1,33	26,75
Coulombi	0,33	63,48	40,29	0,98	23,20
Coulombi	0,67	55,16	33,87	0,72	21,29
Coulombi	1	50,50	30,39	0,50	20,11
Eurokoodi	0	78,96	51,75	1,32	27,21
Eurokoodi	0,33	65,77	42,14	1,02	23,64
Eurokoodi	0,67	56,45	35,10	0,82	21,36
Eurokoodi	1	52,35	32,13	0,73	20,22

Taulukosta 1 nähdään, että Coulombin teorialla lyöntisyvyys on seinäkitkasta riippuen 0,50 m – 1,33 m ja eurokoodilla 0,73 m – 1,32 m. Mitä suurempi seinäkitka on, sitä pienempi seinän lyöntisyvyys on. Tilannetta tutkittaessa täytyy kuitenkin muistaa, että suurilla seinäkitkan arvoilla Coulombin teorialla saadaan liian suuria passiivipaineen arvoja,

jotka ovat epävarmalla puolella. Sekä lyöntisyvyys, että tukivoima ovat todelliseen tilanteeseen verrattuna liian pieniä Coulombin teorialla laskettuna, mikä aiheuttaa tukiseinän sortuman. Suurilla seinäkitkan arvoilla ja ylipäättänsä passiivipainetta tutkittaessa olisi parempi käyttää eurokoodin laskentamenetelmää, sillä se ei aiheuta virhettä epävarmalle puolelle.

5.3 Tukiseinä savimaassa

Savi- eli koheesiomaassa maanpaineen käyttäytyminen poikkeaa huomattavasti kitkamaan maanpaineesta. Kuten kuvassa 11 nähtiin, voi maan aktiivipaine olla jopa negatiivinen maalla, jolla on koheesiota. Laskelmissa savimaan kitkakulmaksi oletettiin 0° , jolloin savimaan maanpaine johtuu täysin sen suljetusta leikkauslujuudesta. Tämä johtaa siihen, että Rankinen, Coulombin ja eurokoodin laskentamenetelmillä saadaan aktiivi- ja passiivipainekertoimiksi 1, jolloin myös maanpaineet saavat täysin identtiset arvot. Seinäkitkakertoimen huomioiminen on myös mahdotonta, sillä se tapahtuu vertaamalla seinäkitkan ja kitkakulman suhdetta, jolla ei ole ratkaisuja kitkakulman ollessa 0° . Kuvassa 17 nähdään aktiivi- ja passiivipaineen arvot savimaassa kaikilla tutkituilla teorioilla laskettuina.



Kuva 17. Rankinen, Coulombin ja Eurokoodin aktiivi- ja passiivipaine savimaassa.

Kuvasta 17 huomataan, että kitkamaasta poiketen koheesiomaan aktiivi- ja passiivipaineiden kulmakerroin on sama ja se riippuu ainoastaan maan tilavuuspainosta. Toisena eroavaisuutena on toisistaan poikkeavat maanpaineet maan pinnalla. Aktiivipaine kasvaa koheesiomaassa huomattavasti nopeammin kuin kitkamaassa, mutta passiivipaineella tilanne on päinvastainen. Koheesiomaassa aktiivi- ja passiivipaineen välinen ero on vakio, sillä kulmakertoimet ovat samat. Eron suuruus riippuu pelkästään suljetusta leikkauslujuudesta s_u ja se on Rankinen teorian kaavojen (7) ja (9) mukaan

$$p_p - p_a = (\sigma'K_p + 2c'\sqrt{K_p}) - (\sigma'K_p - 2c'\sqrt{K_a}) = 4c' = 4s_u, \quad (13)$$

sillä aktiivi- ja passiivipainekertoimet K_a ja K_p ovat yhtä suuret.

Todellisuudessa koheesiomaata ei ole olemassa, vaan maalla on olemassa nollasta poikkeava kitkakulma. Jos laskettaisiin maanpainetta kyseiselle yhdistelmämaalle, näkyisi tuloksissa sekä kitka-, että koheesiomaalle ominaiset piirteet, mutta maan eri ominaisuuksien aiheuttamat muutokset maanpaineisiin olisivat vaikeammin havaittavissa. Tässä kandidaatintyössä suoritettujen laskelmien tavoitteena oli havainnollistaa kitkakulman, seinäkitkan ja suljetun leikkauslujuuden vaikutuksia aktiivi- ja passiivipaineiden arvoihin, ja esitettyjen tulosten perusteella tavoitteeseen päästiin.

6. YHTEENVETO

Maanpaineen tutkiminen ja laskeminen on tärkeää erityisesti, kun harrastetaan nykyisen kaupunkikehityksen mukaista täydennysrakentamista. Työmaakaivannoissa käytettävien tukiseinien tulee kannatella maan lisäksi myös ympäröivien rakennusten ja infrastruktuurin aiheuttamat kuormat. Kaikki kuormat vaikuttavat suoraan tukiseinään kohdistuvaan maanpaineeseen, jolloin maanpaineen laskeminen on kaivantojen tukiseinien mitoituksessa välttämätöntä turvallisen työmaaympäristön takaamiseksi.

Maanpaineen laskemisessa on tärkeää ymmärtää, minkä tyyppinen maanpaine tukiseinään kohdistuu sen eri osissa. Kaivannon yläpäästä tukiseinään kohdistuu usein aktiivipaine, joka aiheuttaa maan löyhtymistä tukiseinän takana ja tukiseinän taipumista kohti kaivantoa. Samaan aikaan Tukiseinän alapäähän vaikuttaa kaivannon puolelta passiivipaine, jonka seurauksena tukiseinä painuu kohti maata ja kasvattaa maan vaakajännitystä. Samalla passiivipaine ottaa vastaan aktiivipaineen tukiseinään aiheuttaman kuorman, jotta seinä ei kaadu kokonaan kaivantoon.

Maanpainetta voidaan laskea usealla eri tavalla, mutta Rankinen ja Coulombin teoriat ovat vakiinnuttaneet asemansa käytetyimpinä menetelminä jo 1700-luvun loppupuolelta lähtien. Viime vuosikymmeninä rakentaminen on tehostunut ja laskentamenetelmät tarkentuneet yhteisen eurokoodistandardin myötä. Eurokoodin avulla Eurooppaan luotiin yhteinen järjestelmä, jolla taataan riittävä, mutta samalla kustannustehokas varmuus rakenteille, sillä sen laskentamenetelmät ovat nykyaikaisia ja tarkempia kuin edeltäjänsä. Eurokoodi perustuu kuitenkin pääasiassa Rankinen ja Coulombin teorioihin, mutta se tuo laskentamenetelmät nykyaikaan ja parantaa niiden tarkkuutta entisestään. Erityisesti suurta virhettä epävarmalle puolelle tuottanut Coulombin passiivipaine on mahdollista laskea eurokoodin avulla tarkasti.

Maanpainetta ja sitä määrittäviä maanpaineteorioita on yksinkertaisinta tutkia laskemalla maanpaineen suuruutta eri tilanteissa. Maanpaineen laskeminen hiekkamaalla osoitti selkeästi eri teorioiden ominaisuuksia, jotka tulivat osittain esiin jo teorioita esiteltäessä. Rankinen teoria on teorioista yleisin, ja se toimii myös muiden teorioiden jalustana. Rankinen teorian suurin puute, seinäkitkan huomiotta jättäminen, on korjattu muissa tutkituissa teorioissa, mikä tekee niistä tarkemmat ja luotettavammat kuin Rankinen teoria. Molemmat esimerkkilaskelmat osoittivat, että eurokoodilla voidaan laskea passiivipainetta suurillakin seinäkitkan arvoilla luotettavammin kuin Coulombin teoriolla, mikä tekee siitä yleispätevimmän ja tarkimman tutkituista laskentamenetelmistä.

Koheesiomaalla maanpaineen laskeminen poikkeaa hyvin paljon hiekkamaasta, mutta se on samalla yksinkertaisempaa, sillä maan kitkakulma on 0° . Koheesiomaalla maanpaine kerroin K on 1 lepo- aktiivi- sekä passiivipaineella, jolloin maanpaineen suuruuteen

vaikuttaa ainoastaan maan tilavuuspaino, tarkastelusyvyys sekä maan suljettu leikkauslujuus. Koheesiomaata laskettaessa aktiivi- ja passiivipaineet kasvavat samaa tahtia, jolloin niiden erotus on maan parametreistä riippuva vakio.

Maanpaineen laskeminen on mahdollista myös tyypilliselle maalle, jolla on sekä kitka- kulma, että koheesiota. Laskelmien tarkkuus riippuu kuitenkin täysin siitä, kuinka hyvin valitut laskentaparametrit kuvaavat maan ominaisuuksia. Laskelmien ja samalla valittujen parametrien tarkkuus voitaisiinkin todeta mittaamalla kokeellisesti maanpainetta, mutta usein siihen ei ole tarpeeksi resursseja. Siksi nykyään suositaankin tapoja, joilla saadaan määritettyä maalle tiettyjä parametrejä kustannustehokkaasti, jotta niitä voidaan käyttää kaikissa maahan liittyvissä mitoituslaskelmissa. Maata tulee kuitenkin tutkia riittäväällä tiheydellä, jotta sen mahdollisesti muuttuvat ominaisuudet huomataan ja huomioidaan laskelmissa.

LÄHTEET

- Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. (1997). Geotekniikka, Ota-tieto, Espoo.
- Avellan, K. (1990). Maanpaine. Korhonen, K-H., Mäkelä, H. & Suomen rakennusinsinöörien liitto (toim.). Teoksessa Geomekaniikka 2, Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL, Helsinki, s. 151–162, 168–198.
- Craig, R.F. (1997). Soil Mechanics: Solutions manual, Routledge, Milton.
- Tornivaara-Ruikka, R. (1990). Maanpaine. Korhonen, K-H., Mäkelä, H. & Suomen rakennusinsinöörien liitto (toim.). Teoksessa Geomekaniikka 2, Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL, Helsinki, s. 162–168.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry (2018). Eurokoodit – Eurooppalaiset kantavien rakenteiden suunnittelustandardit. saatavissa: https://www.sfs.fi/files/309/eurokoodi_web.pdf
- Lehtonen, V. (2017). Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje, [Päivitetty versio]. ed. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry, Helsinki.
- Viasys VDC Oy (2013), GeoCalc Tukiseinä, Espoo. Saatavissa: https://docs.civil-point.fi/GeoCalc/3.2/GeoCalc_Tukiseina.pdf
- Liikennevirasto (2010), Liikenneviraston ohjeita 32/2010, Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7, Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet, Helsinki. saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2010-32_ncci7_eurokoodi.pdf