

LAATTAPERUSTUKSEN MAAJOUSIEN
MÄÄRITTÄMINEN

Simo Luukkonen
2010
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

LAATTAPERUSTUKSEN MAAJOUSIEN MÄÄRITTÄMINEN

Simo Luukkonen
Opinnäytetyö
8.11.2010
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

Koulutusohjelma	Opinnäytetyö	Sivuja	+	Liitteitä
Rakennustekniikka	Insinöörityö	41	+	4
Suuntautumisvaihtoehto	Aika			
Rakennetekniikka	8.11.2010			
Työn tilaaja	Työn tekijä			
Pöyry Finland Oy	Simo Luukkonen			
Työn nimi				
Laattaperustuksen maajousien määrittäminen				
Avainsanat				
rakennesuunnittelu, laattaperustus, alustaluku, jousivakio				

Laattaperustusten rakenteellisessa mitoituksessa maapohjan kuvaamiseen käytetään jousimallia. Siinä laatan alla olevaa kuormituksen johdosta kokoonpuristuvaa maata kuvataan jousilla, joiden päällä laatta lepää. Jousiarvot määritetään kuormitusten ja niiden aiheuttaman maapohjan painuman avulla. On yleistä, että laatan alla käytetään jousina vakioarvoa. Koska jännitykset eivät jakaudu maapohjassa suoraan alaspäin vaan jakautuvat myös sivusuunnassa, vakiojouset eivät kuvaa todellista tilannetta. Opinnäytetyön tavoitteena oli määrittää tarkempia jousiarvoja laatan alle ja tutkia niiden vaikutusta laatan mitoitukseen. Lisäksi tarkoitus oli tehdä työstä opas maajousien määrittämiseen.

Tässä opinnäytetyössä määritettiin laattaperustuksen alle jousiarvot niin, että kuormitusten ja jännitysten vaikutus maapohjaan on huomioitu. Tämän jälkeen tutkittiin tarkkojen jousivakioiden vaikutusta laatan mitoitukseen jousien vakioarvoihin verrattuna. Jousivakioiden määrittäminen tapahtui iteratiivisesti, maapohjaa ja ylärakennetta vuorotellen käsittelemällä tietokoneohjelmien avulla. Jousiarvot laskettiin ohjelmista saatujen tuloksien perusteella.

Jousivakioiden määrittämiseen käytetty menetelmä todettiin käyttökelpoiseksi. Tarkempien jousiarvojen seurauksena tutkittujen laattojen taivutusmomentit muuttuivat merkittävästi. Lisäksi tutkituissa kohteissa laatan painumaerot pienenevät vakiojoussiin verrattuna. Tulosten perusteella jousivakioiden tarkempi määrittäminen todettiin hyödylliseksi laattaperustusta mitoittaessa.

Degree Programme	Thesis	Pages	+	Appendices
Construction Engineering	B.Sc	41	+	4
Line	Date			
Structural Engineering	8.11.2010			
Commissioned by	Author			
Pöyry Finland Oy	Simo Luukkonen			
Thesis title				
Determining of Subgrade Springs of Slab Foundation				
Keywords				
slab foundation, subgrade modulus, subgrade spring constant				

In structural design of slab foundations the subsoil underneath the slab is simulated by using a spring model. The subsoil compresses because of loading and the compressing soil is simulated by the springs on which the slab rests. The subgrade spring values are specified with loadings and the settlement of the subsoil caused by loadings. It is common that only one invariable spring value is used under the entire slab. Since stresses are not distributed just vertically, but also spread laterally, the invariable springs do not reflect the true situation. The objective of this thesis was to determine precise spring values under a slab and examine their effect on the slab design. The thesis is also meant to be a guidebook determining the spring values.

In this thesis the spring values under the slab were determined by paying attention to the effect of the loads and stresses in the subsoil. The effect of new spring values compared to the invariable old ones was examined after that. Determining the spring values was an iterative process in which the subsoil and superstructure were handled in turns. The subsoil and superstructure were investigated using computer programs and the spring values were calculated on the basis of the results of these programs.

The used method was found out to be useful. The more accurate spring values caused significant changes in the bending moments of the slabs. The settlement margins of the investigated slabs decreased also when using the new more precise spring values. Based on the results, a more detailed determining of the springs was found out to be useful when designing slab foundations.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
1 JOHDANTO.....	6
2 LAATTAPERUSTUS.....	8
2.1 Laattaperustuksen käyttökohteet.....	8
2.2 Geoteknisen suunnittelun pääperiaatteet.....	9
2.3 Geoteknisiä mitoitusmenetelmiä.....	11
2.4 Rakenteellinen mitoitus.....	13
3 MAAPOHJAN JOUSIVAKIO.....	15
3.1 Jousivakion laskeminen.....	15
3.2 Painuma.....	17
3.2.1 Painumakuormat.....	18
3.2.2 Painuman laskentamenetelmät.....	19
3.2.3 Painuman parametrit.....	22
4 JOUSIVAKIOIDEN MÄÄRITTÄMINEN.....	26
4.1 Määrittämisen alkuvaiheet.....	26
4.2 Laatanmitoitusohjelman käyttö.....	27
4.3 Painumanlaskentaohjelman käyttö.....	27
4.4 Jousien iterointi.....	28
4.5 Laattaohjelman laskentaperusteet.....	30
5 TUTKITUT LAATTAPERUSTUKSET.....	31
5.1 Biomassasiilon pohjalaatta.....	31
5.2 Polaniecin voimalaperustus.....	32
5.3 Teoreettinen laattaesimerkki.....	33
6 TUTKIMUSTULOSTEN TARKASTELU.....	34
6.1 Jousivakioiden muuttuminen.....	34
6.2 Mitoitussuureiden muutokset.....	35
7 POHDINTA.....	38
LÄHTEET.....	40
LIITTEET.....	41

1 JOHDANTO

Laattaperustusten rakenteellisessa mitoituksessa maapohjan kuvaamiseen käytetään tavanomaisia valmisohjelmia käytettäessä jousimallia. Siinä laatan alla olevaa kuormituksen johdosta kokoonpuristuvaa maata kuvataan jousilla, joiden päällä laatta lepää. Jousiarvot määritetään kuormitusten ja niiden aiheuttaman maapohjan painuman avulla. On yleistä, että laatan alla käytetään jousina vakioarvoa tai vain muutamaa eri jousiarvoa, mikä ei vastaa todellista tilannetta kovinkaan hyvin. (1.)

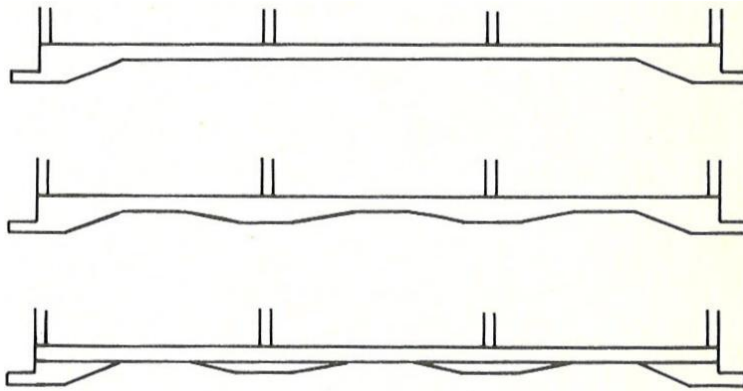
Tasaisessakin kuormituksessa ja homogeenisessa maapohjassa alustaluku on eri jokaisessa pisteessä laatan alla. Tasaisesti kuormitettu laatta painuu keskeittä enemmän kuin reunoilta, joten keskiosan jousien tulisi mitoituksessa olla reunaosia löysemmät. Tämä taas aiheuttaa pohjapaineen siirtymistä laatan keskiosista reunoille. Maajousien määrittäminen on hankalaa, koska kuormitusalueen maapohjan painumiin vaikuttaa kyseisen kohdan kuormitusten lisäksi myös viereisten kohtien kuormitukset. Näin ollen ne täytyy myös ottaa huomioon jousiarvoja määritettäessä. Jousien arvoihin vaikuttaa useita eri asioita. Esimerkiksi laatan kuormien sijainti ja suuruus, laatan koko, jäykkyys ja muoto sekä maapohjan ominaisuudet vaikuttavat jousien arvoihin. Jos näitä arvoja muutetaan, muuttuvat myös jouset laatan alla. (1.)

Työn tarkoituksena on määrittää laattaperustuksen alle tulevat jousiarvot siten, että niissä on huomioitu kuormituksen ja jännitysten vaikutus maapohjaan, ja tarkastella tarkkojen jousivakioiden vaikutusta laatan mitoitukseen jousien vakioarvoihin verrattuna. Tarkoituksena on vertailla laatan jännitysten ja kuormitusten jakautumisen muutosta, kun jousivakioita iteroidaan kohti todellisempia arvoja. Iterointi tapahtuu käsittelemällä maapohjaa ja ylärakennetta vuorotellen. Lopuksi saatuja tuloksia tarkastellaan ja arvioidaan alustavasti, minkälaisissa tapauksissa jousivakioiden tarkempi laatiminen on tarpeellista tavallisille laattaperustuksille. Toisin sanoen työssä tarkastellaan, kuinka suuri painuman suhde laatan jäykkyyteen täytyy olla, jotta tarkempien maajousien määrittäminen on tarpeell-

lista. Työn teoriaosassa kerrotaan myös yleisesti, mitä laattaperustuksen maajouset ovat ja kuinka maajousien määrittäminen laatan alle tapahtuu, jos mitoituksessa arvioidaan menettely tarpeelliseksi. Teoriaosan on myös tarkoitus opastaa alueellisesti muuttuvien maajousien määrittämiseen. Työssä käytetään apuna laatanmitoitushjelmaa laatan tutkimiseen ja painumanlaskentaohjelmaa painumien määrittämiseen.

2 LAATTAPERUSTUS

Laattaperustus valitaan perustustavaksi yleensä silloin, kun maapohjan geotekninen kantavuus on liian pieni anturaperustukselle tai anturoiden väli jäisi niin pieneksi, että on käytännöllisempää toteuttaa anturat yhtenäisenä laattana. Laatta jakaa ylärakenteilta tulevan kuorman laajemmalle alueelle, jolloin pohjapaine pienenee ja varmuus maapohjan murtumista vastaan kasvaa. Myös rakennuksen painuma pienenee jonkin verran laajemmalle jakautuneen kuormituksen johdosta. Kuvassa 1 näkyy perinteisiä laattaperustusmalleja. (2, s. 147.)



KUVA 1. Perinteisiä laattaperustusmalleja (2, s.155)

2.1 Laattaperustuksen käyttökohteet

Talonrakentamisessa laattaperustuksia suunnitellaan yleensä vain pientaloihin ja joskus mataliin kerrostaloihin rajoittamaan painumia ja painumaeroja. Korkeammille kerrostaloille ei yleensä uskalleta sallia kovin suuria painumia, vaan ne perustetaan silloin paaluille. Yleensä tällaiset laatat ovat suhteellisen ohuita, korkeintaan muutamia kymmeniä senttimetrejä paksuja. (3, s. 2.)

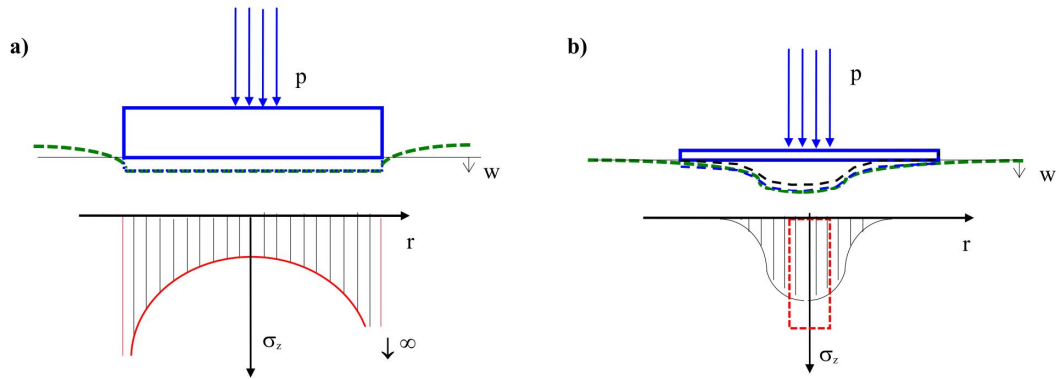
Laattaperustuksia käytetään myös suurten teollisuuden erityisrakenteiden, kuten sillojen tai altain perustusmallina. Tällaiset laatat eroavat kuitenkin paljon pienrakennuslaatoista. Yleensä näille tulee suuria kuormia ja laattojen paksuudet saattavat olla paikoin useita metrejä. Tällaisten laattojen pinta-alatkin voivat

olla tuhansia neliömetrejä. Tässä työssä tutkitaan suuresti kuormitettuja maanvaraisia laattaperustuksia, joiden painumat ja painumaerot voivat olla kymmeniä millimetrejä.

Laattaperustus valitaan perustamistavaksi yleensä heikosti kantaville maapohjille kuten savi-, siltti- tai hienoille hiekkamaille. Tällaisilla maapohjilla maapohjan kantokyky on huono ja laatan avulla kuormia saadaan jaettava tasaisemmin laajemmalle alueelle. Näin maahan kohdistuva keskimääräinen pohjapaine pienenee ja samalla painumat jäävät alhaisemmiksi. Suomen rakentamismääräyskoelmassa kehoitetaan kuitenkin välttämään laattaperustuksia tiheään rakennetuilla kaupunkialueilla, koska laattaperustuksen viereen rakentaminen saattaa muuttaa huomattavasti laattaperustuksen toimintatapaa. (4, s. 18.)

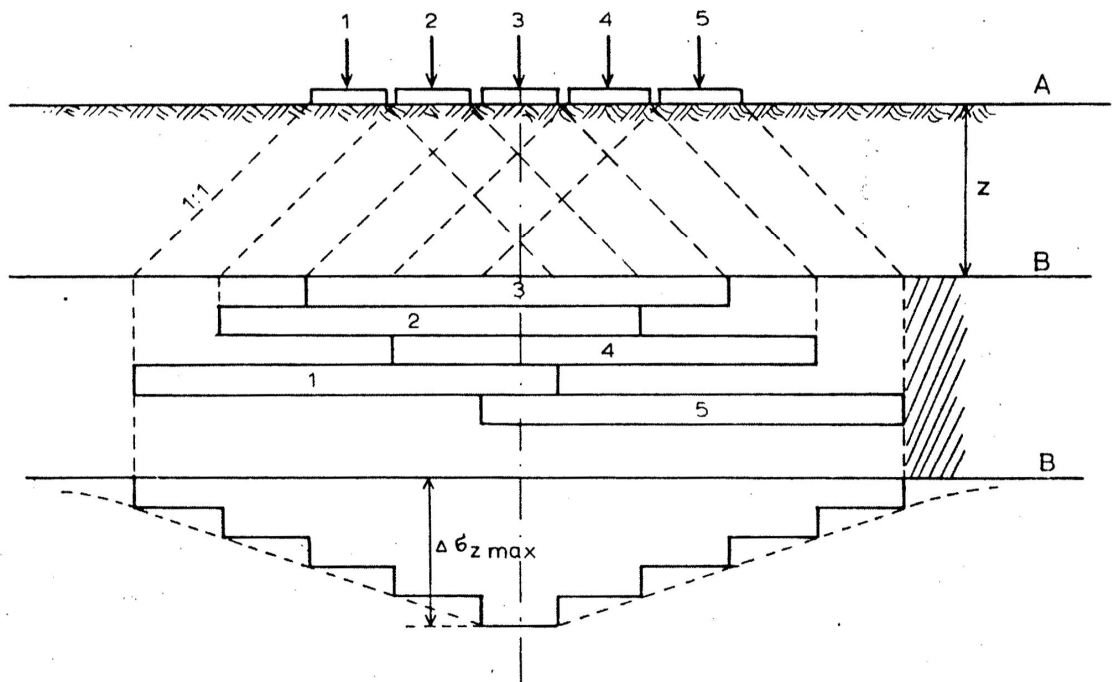
2.2 Geoteknisen suunnittelun pääperiaatteet

Laattaperustuksen tarkoitus on siirtää rakennuksen kuormat laajemmalle alueelle kuin tukirakenteen välittömään läheisyyteen. Täysin jäykkä laatta painuu tasaisesti säilyttäen muotonsa täysin. Ei ole kuitenkaan taloudellisesti järkevää – eikä aina edes teknisesti mahdollista – mitoittaa laattaa täysin jäykäksi, vaan järkevästi mitoitettu laatta on jossain määrin taipuisa, jolloin kantavien rakenteiden alla olevat osat pyrkivät painumaan enemmän kuin laatan vähemmän kuormitetut osat. Maapohja vastustaa tällaista muodonmuutosta. Maapohjan reaktiota kutsutaan kosketuspaineeksi. Kosketuspaineen jakautuminen riippuu laatan jäykkyydestä. Kuvassa 2 näkyy laatan jäykkyyden vaikutus kosketuspaineen jakautumiseen. (3, s. 2.)



KUVA 2. Laatan jäykkyyden vaikutus kosketuspaineen (σ_z) jakautumaan
a) jäykkä laatta, b) taipuisa laatta

Painuma ei ole suoraan verrannollinen kosketuspaineeseen, koska se ei aiheudu kosketuspaineesta, vaan syvemmällä maapohjassa vaikuttavista jännityksistä. Koska syvemmällä perustuksen keskiosille jakautuu suurempi jännitys kuin reunoilla, pyrkii maapohja painumaan enemmän perustuksen keskiosan alla. Kun painuma tapahtuu laatan keskellä, siirtyy osa keskellä olevasta kosketuspaineesta laatan reunoille. Kuva 3 havainnollistaa jännitysten jakautumista maapohjassa ja sen vaikutusta painumaan.



KUVA 3. Lähekkäisten kuormitusten yhteisvaikutus maapohjassa (5, s. 40)

Laatan kuormitus ja kosketuspaine ovat aina tasapainossa. Maapohjan muodonmuutosnopeus on yleensä kuitenkin erittäin hidasta laatan muodonmuutosnopeuteen verrattuna. Tämä korostuu erityisesti silloin, kun laattaperustuksia käytetään paljon hienorakeisilla mailla, joilla painuminen on hidasta. Ylärakenteen, laatan ja maapohjan tasapainonhakuprosessi saattaa kestää maalajista riippuen päivistä vuosiin. (3, s. 4.)

2.3 Geoteknisiä mitoitusmenetelmiä

Yksinkertaisten laattojen mitoitukseen on olemassa helppoja ja nopeita menetelmiä. Tällaiset menetelmät ovat riittäviä, jos laatat eivät ole suuria ja kuormat jakautuvat laatalle tasaisesti. Jos laatan koko kasvaa ja kuormitukset jakautuvat epäkeskeisesti, on syytä ottaa monimutkaisempia ja tarkempia menetelmiä käyttöön.

Yksinkertaisin tapa on olettaa, että kosketuspaine jakaantuu laatan alla lineaarisesti. Laattaa kuvataan täysin jäykällä palkilla, joka lepää jousialustalla. Tämä menetelmä sopii pienten anturoiden mitoitukseen, pinta-alaltaan suurempien ja monimutkaisesti kuormitettujen laattojen kohdalla se johtaa yleensä laatan suureen ylimitoitukseen. (3, s. 6; 1, s. 147.)

Hieman edellistä tarkempi tapa on muokata kosketuspainetta niin, että se vastaa paremmin laatan muodonmuutoksia. Laatan kuormitetun osan kohdalle lasketaan suurempi pohjapaine ja kuormittamattoman osan kohdalla pohjapainetta pienennetään. Tällaisen kosketuspaineen redusointimenetelmän on esittänyt Schultze. Kumpikaan yllä olevista menetelmistä ei ota huomioon maapohjan muodonmuutoksia. Nämä täytyisi kuitenkin ottaa huomioon mahdollisimman totuudenmukaisesti. (3, s. 6.)

Alustalukumenetelmässä maapohjaa kuvataan lineaarisesti kimmoisalla alustalla, joka painuu vain kuormitetun alueen kohdalla. Alustalukumenetelmän mukaan painuma on suoraan verrannollinen pohjapaineeseen. Laattaperustukset lasketaan alustalukumenetelmällä siten, että laatta jaetaan sopiviin osiin ja osiin

sijoitetaan sellaiset jouset, jotka toteuttavat kosketuspaineen ja painuman välisen yhteyden. Alustalukumenetelmä ei kuitenkaan ota huomioon sitä, että todellisuudessa maapohja painuu myös kuormitetun alueen ulkopuolella. Maapohjassa kuormitukset jakaantuvat myös sivuttaissuuntaan, mikä vaikuttaa viereisten alueiden painumiin. Näin ollen alustalukumenetelmällä saadut alustaluvut eivät vastaa todellisuutta. (3, s. 7; 2, s. 151.)

Tarkin menetelmä alustalukujen ja jousivakioiden määrittämiseen on iterointimenetelmä. Iterointimenetelmässä maapohjaa ja ylärakennetta käsitellään vuorotellen. Nykyään on olemassa elementtimenetelmään perustuvia laskentaohjelmia, joista saadaan maapohjaan kohdistuvat pohjapaineet tietoon kätevästi. Myös painumien laskentaan on olemassa ohjelmia, jotka ottavat huomioon maapohjan painumisen todenmukaisesti. (2, s. 153.)

Iterointimenetelmässä ylärakenne ratkaistaan ensin mitoitusohjelmalla, mistä saatavat maapohjaan kohdistuvat jännitykset sijoitetaan painumanlaskentaohjelmaan. Painumalaskentaohjelmalla ratkaistaan kuormitettujen kohtien painumat, joiden avulla voidaan ratkaista mitoitusohjelmaan laitettavat maapohjan jousivakiot. Jokaiseen kuormituskohtaan lasketaan oma jousivakio. Uusilla jousivakioilla lasketaan kuormituskohtiin uudet pohjapaineet, jotka sijoitetaan takaisin painumanlaskentaohjelmaan. Uusilla painumilla lasketaan taas uudet jousivakiot. Tätä iterointiprosessia jatketaan kunnes jännitysten ja muodonmuutosten tasapainotila on saavutettu niin ylärakenteessa kuin maapohjassakin. (3, s. 10–13; 2, s. 153.)

Iterointimenetelmässä edetään vaiheittain seuraavasti:

1. Lasketaan laatan tunnuspuoleen painuma olettaen kosketuspaine tasaisesti jakautuneeksi.
2. Lasketaan alustaluku ja sen jälkeen jouset rakenteellisissa solmupisteissä.
3. Lasketaan jousien jousivoimat.

4. Lasketaan painumat edellä laskettuja jousivoimia ja rakenteellista solmujakoa käyttäen. Näiden painumien avulla saadaan uudet jousiarvot.

5. Uusilla jousiarvoilla lasketaan uudet jousivoimat.

6. Tehdään kohdat 4 ja 5 uudelleen.

Iterointia jatketaan, kunnes jousiarvot eivät enää muutu merkittävästi.

Edellä kerrotut menetelmät jousien määrittämiseksi koskevat sellaisia tapauksia, missä jousivakiot täytyy itse määrittää. On myös olemassa ohjelmia, joissa maapohja kuvataan kimmoisena puoliavaruutena, kuten oikeasti pitäisi. Tällöin saadaan saumaton yhteistoiminta ylärakenteen ja maapohjan välille. Ohjelmat ottavat huomioon maapohjan oikeanlaisen käyttäytymisen laattaa mitoitettaessa.

2.4 Rakenteellinen mitoitus

Maanvaraisen laatan rakenteellinen mitoitus on helpointa tehdä elementtimenetelmään perustuvalla tietokoneohjelmalla. Näissä ohjelmissa maapohjaa voidaan kuvata erillisillä jousivakioilla, joita sijoitetaan laatan alle tuiksi. Jousivakio kuvaa maapohjaa sen painuman mukaan. Mitä enemmän maapohja painuu, sitä pienempi on jousivakion arvo ja sitä löysempi maajousi on.

Rakenteellisessa mitoituksessa laatta mitoitetaan niille voimasuureille, jotka saadaan mitoitusohjelman rakenneanalyysistä. Murtorajatilassa laatta mitoitetaan taivutukselle, leikkaukselle, lävistykselle ja raudoituksen ankkuroinnille. Käyttöraajatilassa laatasta tarkistetaan taipuma ja halkeamaleveys.

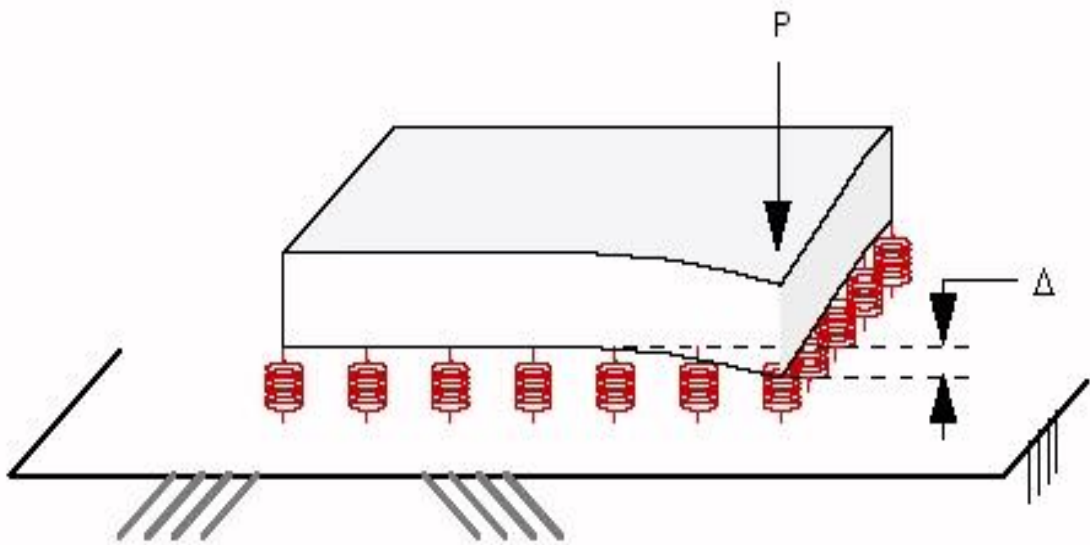
Rakenneanalyysissä tukien parametrit vaikuttavat laatan voimasuureiden jakaantumiseen. Näin ollen maajousien arvoilla on merkitystä laatan voimasuureiden jakaantumiseen. Jousien tarkka määrittäminen on monimutkainen prosessi, missä täytyy ottaa huomioon maapohjan painuminen laatan alla. Yleensä

jousina on käytetty arvioita eikä jousien tarkkoja arvoja. Maan jousivakio laske-
taan kuormituksen ja painuman suhteena. Koska kuormitus jakautuu maapoh-
jassa myös sivusuuntaan, ei painumaa voi laskea suoraan painuvan kohdan
kuormituksesta vaan painuman laskentaan täytyy ottaa huomioon myös ympä-
rillä olevien kuormitukset. Jousiarvot eivät siis ole samoja laatan joka kohdassa
vaan ne vaihtelevat eri kohdissa laatan alla. (1.)

Rakenneanalyysi antaa siis erilaisia tuloksia riippuen siitä, millaisia jousiarvoja
laatan tukina käytetään. Tässä opinnäytetyössä lasketaan laattaperustuksen
alle tarkempia jousiarvoja ja tarkastellaan, miten rakenneanalyysin antamat voi-
masuureet muuttuvat laatasta, kun uusien arvojen tuloksia verrataan vanhojen
epätarkempien jousiarvojen antamiin tuloksiin.

3 MAAPOHJAN JOUSIVAKIO

Laattaperustusta mitoitettaessa laatan alla olevaa maata kuvataan jousilla joiden päällä laatta makaa. Laatan alla olevat jouset eivät ole vakioita, vaan jousen arvo on eri jokaisessa tarkastelukohdassa. Jousen arvo ei ole minkäänlainen maalajivakio vaan suunnitteluarvo, jonka suuruuteen vaikuttavat esimerkiksi laatan kuormitus, perustamissyvyys, maapohjan ominaisuudet tai perustuksen koko. Näin ollen on hankala määrittää minkäänlaista kaavaa tai taulukkoa, koska jokainen perustamistilanne on erilainen. Paras tapa jousiarvojen määrittämiseen on määrittää ne geoteknisillä painumalaskelmilla. Näissä täytyy määrittää ensin painumaan vaikuttavat kuormat ja sen jälkeen niistä aiheutuva maapohjan painuma. Kuvassa 4 näkyy jousimenetelmän periaatekuva. Jokainen kuvassa näkyvä jousi vastaa yhden elementin alle määritettyä jouta tai alustalukua.



KUVA 4. Jousimallin periaatekuva

3.1 Jousivakion laskeminen

Maan jousivakio lasketaan maapohjalle tulevan kuormituksen ja maapohjan painuman suhteena. Tietyn alueen jousivakio saadaan, kun kerätään kaikki alu-

eelle tulevat kuormat ja lasketaan niiden aiheuttama painuma. Jousivakio saadaan laskettua kaavalla 1.

$$K = \frac{F}{s}$$

KAAVA 1

K = kokonaisjousi [kN/m]

F = kuorma [kN]

s = painuma [m]

Perustuksen kokonaisjousi voidaan muuttaa alustaluvuksi jakamalla se laatan pinta-alalla kaavan 2 mukaisesti

$$k_s = \frac{K}{A}$$

KAAVA 2

k_s = alustaluku [kN/m³]

K = kokonaisjousi [kN/m]

A = laatan pinta-ala [m²]

Erikokoisten laattaperustusten jousivakioita on helppo vertailla muuttamalla jousivakiot alustaluvuiksi. Alustaluku kertoo jousen suhteellisen jäykkyyden ja se on helppo muuttaa takaisin jousivakioksi kertomalla se laatan tai sen osan pinta-alalla. Alustaluku saadaan laskettua myös suoraan kaavalla 3, jos kuormituksenä käytetään pohjapainetta eli kuormaa neliömetrille.

$$k_s = \frac{P}{s}$$

KAAVA 3

k_s = alustaluku [kN/m³]

P = pohjapaine [kN/m²]

s = painuma [m]

3.2 Painuma

Painuman laskeminen kuuluu olennaisena osana maajousien määrittämiseen. Rakennuksen kokonaispainuman voidaan katsoa koostuvan pääasiassa alkupainumasta S_i , konsolidaatiopainumasta S_k , jälkipainumasta S_s sekä plastisista ja kimmoisista sivusiirtymistä aiheutuvasta painumasta. (5, s. 42.)

Alkupainumalla tarkoitetaan painumaa, joka tapahtuu maaperää kuormitettaessa siinä ilmenevien leikkausjännitysten johdosta. Alkupainumassa oletetaan, ettei kokoonpuristuvan maakerroksen tilavuus muutu. Alkupainumaa kutsutaan usein myös kimmoiseksi painumaksi. Tavallisesti alkupainuma tapahtuu jo rakennusaikana. Mitä karkearakenteisempaa ja paremmin vettäläpäisevää maapohja on, sitä suurempi on alkupainuman merkitys itsenäisenä painumana. Laattaperustuksissa alkupainuma ei yleensä ole määräävä painuma johtuen hienorakeisista maapohjista. (5, s. 42.)

Konsolidaatiopainuma tarkoittaa rakennuspohjan tiivistymisestä aiheutuvaa painumaa. Tiivistymisen johdosta maan vesi- ja mahdollinen ilmapitoisuus pienenee. Hienorakeisilla savimailla konsolidaatiopainuman tapahtuminen on hidasta ja saattaa kestää useita vuosikymmeniä. Karkearakeisemmillä mailla veden poistuminen maakerroksista on kuitenkin verrattain nopeaa, joten konsolidaatiopainumakin on nopeaa. Tällaisissa tapauksissa alkupainuman ja konsolidaatiopainuman erottaminen toisistaan voi olla hyvin vaikeaa. Koska laattaperustuksia tehdään usein hienorakeisille maapohjille, on konsolidaatiopainuma usein määräävin painumamuoto. (5, s. 42.)

Jälkipainuman oletetaan alkavan silloin, kun jännityksen lisäyksen aiheuttama huokosveden ylipaine kokoonpuristuvista maakerroksista on kokonaan purkautunut. Konsolidaatiopainuman ja jälkipainuman rajakohdan määrittäminen on yleensä vaikeaa. Jälkipainuman suuruus on yleensä pieni konsolidaatiopainumaan verrattuna. (5, s. 43.)

Plastisista ja kimmoisista sivusiirtymistä aiheutuvaa painumaa tapahtuu merkittävästi silloin, kun varmuus maapohjan murtumista vastaan on pieni. Maanvaraisesti rakennettavien asuin- ja teollisuusrakennusten perustukset tulee kuitenkin mitoittaa suuremmalla varmuudella, joten tämän painuman määrittämisellä ei ole merkitystä. (5, s. 43.)

Tietokonepohjaisilla painumanlaskentaohjelmilla voidaan laskea kaikkien painumien yhteisvaikutus. Maapohjan ominaisuuksista riippuen eri painumalajit voivat olla erisuuruiset suhteessa kokonaispainumaan.

3.2.1 Painumakuormat

Rakennuksen painumaa määritettäessä tavoitteena on saada selville rakennuksen todellinen painuma. Painuman laskennassa pyritään näin ollen käyttämään todellisia käyttörajatilan kuormia ilman osavarmuuslukuja. Maapohjalle tulevaa kuormitusta määritettäessä rakenteista aiheutuvat kuormat voidaan jakaa kolmeen pääryhmään; pysyviin kuormiin, hyötykuormiin ja luonnonkuormiin. (5, s. 56.)

Pysyviksi kuormiksi katsotaan pysyvistä tai hyvin pitkäaikaisista rakenteista maapohjalle aiheutuvat kuormat. Pysyvät kuormat tulee aina ottaa täysimääräisinä huomioon painumaa laskettaessa. Pysyviin kuormiin on laskettava myös perustuksia kuormittava täytemaa. (5, s. 56–57.)

Konsolidaatiopainumaa laskettaessa hyötykuormista otetaan huomioon vain se osa, jonka voidaan katsoa olevan riittävän pitkäaikaisen. Yleisesti konsolidaatiopainumaa aiheuttavaksi hyötykuorman osaksi oletetaan noin puolet rakennuksen lasketusta hyötykuormasta. (5, s. 56.)

Luonnonkuormista konsolidaatiopainumaa aiheuttavaksi kuormaksi voidaan laskea vain lumikuorma. Laattaperustuksissa tuulikuorma on niin lyhytaikaista, ettei se ehdi aiheuttaa konsolidaatiopainumaa. Pienissä pilarianturaperustuksissa tuulikuorma voi aiheuttaa löyhällä maapohjalla merkittäviä painumia, mutta

laattaperustuksissa tätä ei tarvitse ottaa huomioon. Lumikuormaakaan ei laske-
ta mukaan täysimääräisenä, koska sen vaikutusaika on vain muutaman kuu-
kauden mittainen. Konsolidaatiopainumaa aiheuttavaksi lumikuormaksi voidaan
olettaa korkeintaan noin puolet kuormitusnormien mukaisesta lumikuormasta.
(5, s. 57.)

Edellä mainituista kuormista muodostuvasta kuormasta täytyy vähentää perus-
tamissyvyydestä johtuva peruskuopasta poistetun maamassan kuormitus sekä
myös mahdollinen pysyvä pohjaveden noste. Koska perustusten tilalla ollut maa
on jo aiheuttanut painumaa, ei sen tilalle tuleva kuorma aiheuta lisäpainumaa
maapohjassa. Lopullista kuormitusta, mistä on vähennetty perusmaan paino,
kutsutaan nettokuormitukseksi. Rakennuksen painuma lasketaan nettokuormi-
tukselle. (5, s. 56.)

3.2.2 Painuman laskentamenetelmät

Suorakaiteen muotoisen laatan kokonaispainuma koheesio- tai kitkamaassa
voidaan arvioida käyttämällä kimmoteoriaa ja kaavaa 4. Tämä kaava toimii, kun
maapohja laatan alla on homogeeninen. Kaavasta saadaan likimääräinen arvo
painumalle. Tätä arvoa voidaan käyttää ensimmäisten likimääräisten jousien
laskennassa. Kaavassa tarvittavat muuttujat saadaan käyrästöstä, joka on esi-
tetty kuvassa 5.

$$s = f_s \cdot \frac{qB}{E}$$

KAAVA 4

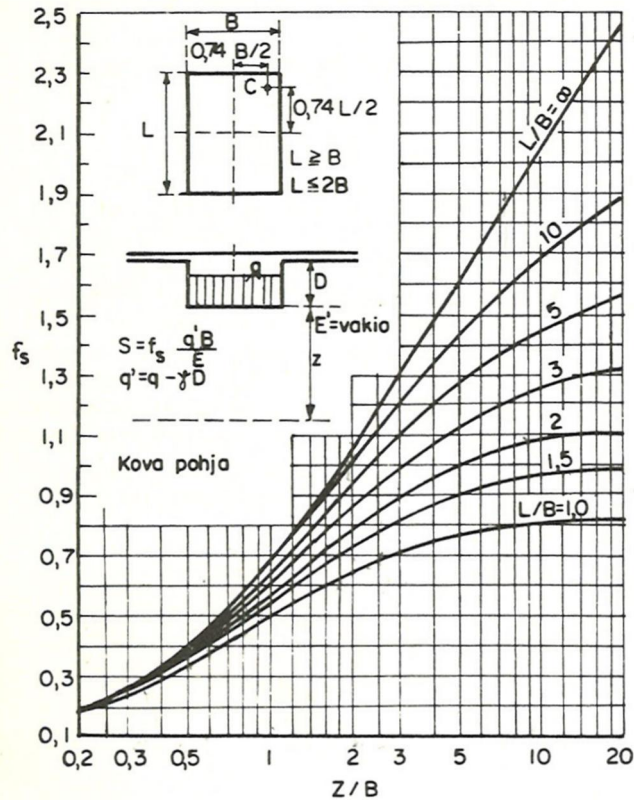
s = laatan alkupainuma

f_s = painumakerroin

q = lineaarisesti perustuksen pohjalla jakautunut pohjapaine

B = peruslaatan leveys

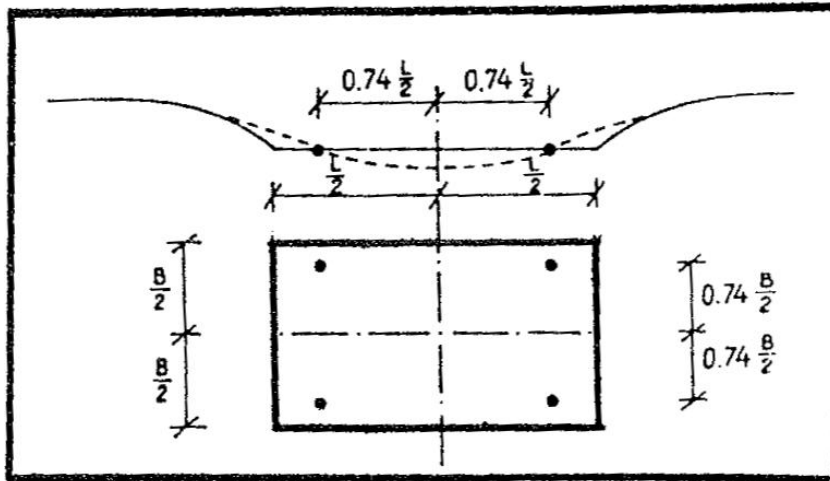
E = painuvan maakerroksen keskimääräinen kimmomoduuli



KUVA 5. Suorakaidelaitaan tunnuspuiteen painuman määrittäminen (6, s. 90)

Painumakertoimen f_s arvo riippuu perustuksen pinta-alan muodosta ja mitoista sekä kokoonpuristuvan maakerroksen paksuudesta. Kokoonpuristuvan maakerroksen kimmomoduuli E voidaan arvioida laboratorikokeiden tai in situ -kokeiden tuloksista. Kimmomoduulin tulisi olla määritetty häiriintymättömästä näytteestä, koska näytteiden häiriintyminen antaa maalle pienemmän kimmomoduulin kuin todellisuudessa on. Näin ollen lasketusta painumasta tulisi todellista suurempi. (7, s. 148.)

Kaava 4 laskee painuman taipuisan laatan tunnuspuiteeseen. Taipuisan laatan tunnuspuiteen painuma vastaa jäykän laatan painumaa. Jäykkä laatta painuu joka kohdasta saman verran riippumatta kuormituksista tai maapohjan ominaisuuksista. Kuvassa 6 näkyy taipuisan suorakaiteenmuotoisen laatan tunnuspuiteen muodostuminen ja sijainti.



KUVA 6. Taipuisan laatan tunnuspuistein muodostuminen ja sijainti (8, s. 215)

Tarkempia maapohjan kokoonpuristuvuuksia määrittäessä tavallisin käytetty menetelmä on Janbun tangenttimoduulimenetelmä. Painuma lasketaan erikseen maan normaalisti konsolidoituneelle ja ylikonsolidoituneelle osalle. Lisäksi jos maassa on kokoonpuristuvuusominaisuuksiltaan erilaisia kerroksia, niin niille kaikille lasketaan painuma erikseen. Lopullinen painuma saadaan laskemalla eri kerrosten painumat yhteen. Janbun tangenttimoduulimenetelmässä on kaksi kaavaa riippuen käytettävästä jännitysesponentista β . Kaavaa 5 käytetään kun $\beta \neq 0$ ja kaavaa 6 kun $\beta = 0$. (9, s. 43.)

$$\varepsilon = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma_c'}{\sigma_v} \right)^\beta \right] \quad \text{KAAVA 5}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'}{\sigma_c'} \quad \text{KAAVA 6}$$

ε = maakerroksen suhteellinen kokoonpuristuma

m = moduuliluku

β = jännityseskponentti

σ' = maan tehokas pystyjännitys [kPa]

σ = vertailujännitys, 100 kPa

σ_c' = maan tehokas konsolidaatiojännitys [kPa]

3.2.3 Painuman parametrit

Painuman laskemiseen tarvittavat maakerrosten ominaisuudet saadaan tarkimmin ödometrikokeilla määrittämällä. Ödometrikokeiden tulosten perusteella määritetään konsolidaatiopainuman suuruuden ja nopeuden laskemisessa tarvittavat parametrit. Parametrien tulisi olla mahdollisimman todelliset, koska varsinkin moduuliluvun ja jännitysekspONENTIN muutokset vaikuttavat suuresti painuman suuruuteen. Ödometrikokeen huolellisuudella on tässä suuri merkitys. Moduuliluku ja jännitysekspONENTTI täytyy määrittää erikseen näytteen normaalisti konsolidoituneelle ja ylikonsolidoituneelle osalle. (8, s. 147–149.)

Aina ei voida kuitenkaan saada ödometrikokeiden tuloksia, joten on olemassa myös nopeampia, joskin epätarkempia keinoja parametrien määrittämiseen. Karkearakeisten maalajien moduuliluku ja jännitysekspONENTTI voidaan arvioida maanäytteen rakeisuuden ja maakerroksen kairausvastuksen perusteella. Tutkittavasta maapohjasta täytyy määrittää rakennekerrokset kairauksien ja maanäytteiden avulla. Näiden perusteella saadaan selville maalajit ja niiden parametrit saadaan selville taulukoiden 1 ja 2 avulla.

TAULUKKO 1. Karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointi kairausvastusten perusteella (10, s.10)

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohja-vedenpinnan		Kitka-kulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Ylä-puolella	Ala-puolella		Moduulilukum	Jännitys-eksponentti β	Puristin-kairaus q _c (MPa)	Paino-kairaus Pk/0,2 m	Heijari-kairaus L/0,2 m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keski-tiivis			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
	Keski-tiivis			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
	Keski-tiivis			35	200 ... 400	0,5	6 ... 14	30 ... 60	12 ... 25
	Tiivis	18 ... 20	12	38	300 ... 600	0,5	> 14	> 60	> 25

TAULUKKO 2. Soran ja moreenin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointi kairausvastusten perusteella (10, s.12)

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohja-vedenpinnan		Kitka-kulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Ylä-puolella	Ala-puolella		Moduulilukum	Jännitys-eksponentti β	Puristin-kairaus q _c (MPa)	Paino-kairaus Pk/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
	Keski-tiivis			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
	Keski-tiivis	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 ollut jäätikön puristamana

Hienorakeisilla mailla eli savella ja hienolla siltillä painuman parametrit saadaan laskettua maakerroksen vesipitoisuuden perusteella. Ensin lasketaan maan kokoonpuristuvuusindeksi C_c kaavalla 7 ja huokoisuusluku e_0 kaavalla 8.

$$C_c \approx 0,85 \sqrt{\left(\frac{w}{100}\right)^3} \quad \text{KAAVA 7}$$

C_c = kokoonpuristuvuusindeksi

w = vesipitoisuus, %

$$e_0 = \frac{\gamma_s \cdot w}{100 \cdot \gamma_w} \quad \text{KAAVA 8}$$

e_0 = maan huokoisuusluku

w = vesipitoisuus, %

γ_s = maan tilavuuspaino

γ_w = veden tilavuuspaino

Kokoonpuristuvuusindeksin ja huokoisuusluvun avulla saadaan määritettyä moduuliluku m käyttämällä kaavaa 9.

$$m = \frac{(1 + e_0) \ln 10}{C_c} \quad \text{KAAVA 9}$$

Kun parametrien määrittämiseen käytetään kaavoja 7, 8 ja 9, täytyy jännityksenpotenttina käyttää arvoa $\beta = 0$.

Rakeisuuksiin, kairausvastuksiin ja vesipitoisuuteen perustuvat menetelmät eivät ole yhtä tarkkoja kuin tapauskohtaiset ödometrikokeet, mutta ne ovat nopeampia ja helpompia menetelmiä. Aarno Valkeisenmäki on kirjoittanut teoksen "Rakeisuuden vaikutus hiekan ja soran painumis- ja tiiveysominaisuuksiin" (VTT, Otaniemi 1973), missä on tehty ödometrikokeita erilaisille maanäytteille. Teoksessa on määritetty erilaisten rakeisuuskäyrien m ja β eri huokoisuusluvil-

le. Myös kyseisestä teoksesta voi etsiä täsmäviä rakeisuuskäyriä ja huokoisuuslukuja parametrien määrittämisessä.

4 JOUSIVAKIOIDEN MÄÄRITTÄMINEN

Maapohjan jousivakioiden määrittäminen tapahtuu tietokoneella käyttämällä laatanmitoitusohjelmaa ja painumanlaskentaohjelmaa. Näistä ohjelmista saatuja tuloksia käsitellään taulukkolaskentaohjelmalla, jolla saadaan laskettua jousivakiot alueittain. Jousivakioiden määrittäminen tapahtuu iteratiivisesti, missä laatta lasketaan ensin mitoitusohjelmalla ja siitä saatujen pohjapaineiden mukaan lasketaan painuma painumanlaskentaohjelmalla. Näistä ohjelmista saadut tiedot voidaan siirtää taulukkolaskentaohjelmaan, missä niillä voidaan määrittää jousivakiot. Maapohjaa ja ylärakennetta käsitellään vuorotellen, kunnes saadut jousivakiot tai alustaluvut eivät enää muutu merkittävästi.

4.1 Määrityksen alkuvaiheet

Ensimmäisenä vaiheena on päättää, kuinka tarkasti jousivakiot halutaan laatan alle määrittää. Laatta jaetaan halutun mukaisesti osiin eli elementteihin ja jokaisen osan alle saadaan laskettua oma jousivakio. Tietenkin mitä pienempiin osiin laatta jaetaan, sitä tarkemmin voidaan jousilla kuvata todellista maapohjaa. Myös todelliset kuormien ja jännitysten jakautumiset saadaan selville sitä tarkemmin, mitä enemmän jousivakioita lasketaan. Elementtien lukumäärää valittaessa täytyy ottaa huomioon haluttu tulosten tarkkuus ja käytettävissä oleva aika. Mitä tiheämpi jouselementtiverkko on, sitä tarkempi on saatava tulos. Toisaalta tiheämmän verkon käsittelyyn ja kuormien syöttämiseen kuluva aika on pidempi.

Perustuksen alapuolisen maan ominaisuudet täytyy myös selvittää aluksi. Täytyy selvittää painuvien maakerrosten syvyys, luvussa 3.2.3 esitellyt maakerrosten parametrit ja pohjaveden pinta. Painumaan vaikuttavien maakerrosten laskentasyvyys riippuu perustuksen koosta ja muodosta, maan jäykkyyden vaihteiluista syvyyden mukaan ja perustuselementtien etäisyydestä. Tavallisesti syvyydeksi voidaan ottaa syvyys, jossa perustuksen kuorman aiheuttama tehokas

pystysuuntainen jännitys on 20 % maakerrosten painon aiheuttamasta tehokkaasta jännityksestä. Monissa tapauksissa tämä syvyys voidaan karkeasti arvioida olevan 1 – 2 kertaa perustuksen leveys, mutta sitä voidaan vähentää kevyesti kuormitetuilla laajoilla laattaperustoilla. (7, s. 61)

Alustava jousivakio voidaan laskea jäykän laatan keskimääräisestä painumasta, joka saadaan tasaisen kuormituspinnan tunnuspuolelta painuman avulla. Painumaohjelmaan voidaan jakaa laatan painumakuorma tasaiseksi kuormaksi ja katsotaan painuma laatan tunnuspuolelta. Tämän painuman ja kuormituksen avulla voidaan laskea alustava jousivakio tai alustaluku kaavalla 1. Alustava jousivakio voidaan sijoittaa laatan jokaisen jousielementin alle ensimmäiselle laskentakierrokselle. Jousivakio voidaan jakaa pienemmille alueille laatan alle muuntamalla se ensin alustaluvuksi kaavalla 3 ja kertomalla alustaluku pienemmän alueen pinta-alalla. Joihinkin ohjelmiin jousivakio annetaan alustalukuna, kun taas toisiin se annetaan tietyn alueen kokonaisjousena. Ohjelmasta riippuen käytetään alustalukua tai jousivakiota.

4.2 Laatanmitoitusohjelman käyttö

Tässä opinnäytetyössä käytettävä laatanmitoitusohjelmana on käytetty pääasiassa StruSoftin FEM-Design 6.0:aa. Tässä keskitytään ainoastaan laatan mitoituksessa tarvittavien maan jousivakioiden määrittämiseen, joten laatan yläpuolisten rakenteiden ja siitä laatalle tulevien kuormien täytyy olla selvillä ensin. Laatalle tulevista kuormista voidaan tehdä oma kuormitustapaus painuman laskentaan. Painumakuormat valitaan luvun 3.2.2 ohjeiden mukaan. Tämän jälkeen laatta lasketaan alustavilla jousivakioilla tai alustaluvuilla. Laskennan jälkeen ohjelmasta katsotaan jokaiselle jousielementille tullut pintakuorma, jota käytetään pohjapaineena painumanlaskentaohjelmassa painuman laskentaan.

4.3 Painumanlaskentaohjelman käyttö

Painuman simulointiin tarvitaan tietokoneohjelmaa. Tässä työssä käytettäviä ohjelmia ovat Novapointin GeoCalc ja Rocsciencen Settle 3D. Ohjelmilla voi-

daan laskea painumia kaikenlaisille maakerroksille, ja ohjelma laskee painumat kolmiulotteisesti ottaen huomioon tarkastelukohdan ulkopuolelta tulevien kuormitusten vaikutuksen tarkastelukohdan painumaan. Ohjelmista saadaan ulos painumatiedot halutuista kohdista. Jousia määritettäessä jokaisen kuormituselementin kohdalta katsotaan kuormituksen aiheuttama painuma. Painumien tiedot on helppo ottaa taulukkolaskentaohjelmaan, jossa jousivakiot saadaan laskettua nopeasti.

Perustusalueen maaperästä tehtyjen tutkimuksien ja raporttien perusteella ohjelmaan luodaan malli painuvista maakerroksista. Tarvittaessa ohjelmaan luodaan useita erilaisia maakerroksia, mikäli maalajit ja kerrokset vaihtelevat laatan alla. Eri maakerrokseen annetaan niiden parametrit ja paksuudet. Maakerroksien kokonaispaksuudeksi laitetaan arvioitu kokoonpuristuvien maakerrosten paksuus. Pohjaveden pinta annetaan myös maakerrosten tietoihin, jolloin ohjelma ottaa pohjaveden aiheuttaman nosteen huomioon.

Painumaohjelmaan tehdään sama alussa suunniteltu elementtijako kuin laatanmitoitusohjelmassa oli. Kuormitukset asetetaan elementtikohtaisesti laatanmitoitusohjelmasta saatujen pohjapaineiden mukaisesti. Laattaohjelmasta saaduista pohjapaineista tulee kuitenkin vähentää laatan tilalta poistettavan maan paino. Esimerkiksi jos laatta perustetaan 2 metrin syvyyteen, pohjapaineesta vähennetään 2 metrin maakerrosta vastaava kuormitus. Kun kuormitukset on sijoitettu elementteihin, valitaan pisteet, mistä painumat mitataan. Pisteiksi voidaan valita elementtien keskipisteet.

4.4 Jousien iterointi

Maajousien määrittäminen tapahtuu iteratiivisesti. Laatanmitoitusohjelmaa ja painumanlaskentaohjelmaa käytetään vuorotellen, kunnes jousiarvot eivät enää muutu merkittävästi. Laattaohjelman ja painumaohjelman tulosten yhdistelyyn ja jousien laskentaan on kätevä käyttää taulukkolaskentaohjelmaa. Kummastakin ohjelmasta saadaan tarvittavat tiedot taulukkolaskentaohjelmaan, esimerkiksi

Microsoft Exceliin. Kun ohjelmiin on kerran tehty pohjat, tapahtuu itse iterointiprosessi varsin nopeasti.

Ensimmäisenä vaiheena laattaohjelmalla lasketaan elementtien alle tulevat pohjapaineet. Nämä pohjapaineet voidaan liittää Exceliin, jossa niistä voidaan vähentää mahdollinen perustuksen tilalta poistettavan maan paino. Mikäli perustusten alle on tehty maatäyttöjä, täytyy pohjapaineeseen lisätä täyttömaiden paino. Saadut nettopohjapaineet sijoitetaan painumanlaskentaohjelmaan. Ohjelmasta saadaan painumat kuormitusalueiden kohdilta ja painumatiedot saadaan liitettyä Exceliin. Kuormituksen ja painuman avulla saadaan laskettua elementin alle tuleva alustaluku kaavalla 2 (s. 16).

Nyt saadut uudet alustaluvut vaihdetaan laattaohjelmassa vanhojen alustalukujen tilalle. Koska laatta painuu enemmän keskeltä kuin reunoilta, muuttuvat keskialueiden jouset löysemmiksi ja reunoilla taas jäykemmiksi. Tämä aiheuttaa laatan pohjapaineen siirtymistä keskeltä reunoille. Uusilla alustaluvuilla lasketaan taas laatan jousielementtien alle tulevat pohjapaineet aivan kuten ensimmäisessä vaiheessa. Näistä vähennetään taas mahdollinen poistetun maan paino tai lisätään täyttömaan paino ja uudet nettopohjapaineet vaihdetaan painumaohjelmaan vanhojen tilalle.

Nyt kun painumat ovat muuttuneet muuttuneiden kuormitusten takia, siirretään ne taas Exceliin. Uudet alustaluvut lasketaan toisen vaiheen nettopohjapaineella ja painumalla. Nyt on päästy taas lähemmäksi todellisia alustalukuja ja maapohjaa saadaan kuvattua todellisemmin. Jos on vielä tarvista, iterointiprosessia jatketaan. Mitä useampia iterointikierroksia tehdään, sitä tarkempia arvoja saadaan. Myös elementtien lukumäärä vaikuttaa laskelmien tarkkuuteen, koska käytännössä jousivakio on eri jokaisessa pisteessä laatan alla.

Laatan jäykkyyden vaikutus jousiarvoihin tulee otettua huomioon laatanmitoitushjelmassa. Jännitysten jakautuminen laatussa riippuu laatan paksuudesta ja laatan kuormien aiheuttama pohjapaine laatan alla riippuu laatan jäykkyydestä. Näin ollen jousivakioiden määrittäminen tulee tehdä laatan todellisella paksuudella

ja jäykkyydellä, koska laatan paksuuden muuttuessa sen jäykkyys muuttuu ja siten myös jännitykset jakautuvat laatasta eri tavalla.

4.5 Laattaohjelman laskentaperusteet

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on havainnollistaa todellisten maajousien vaikutusta laatan suunnitteluun. Tässä työssä keskitytään enemmän maajousien geotekniseen puoleen, joten laatanmitoitushjelmassa mitoitusta on yksinkertaistettu joidenkin tavallisesti mitoituksessa käytettävien tekijöiden osalta. Laatan lopullisessa mitoituksessa voidaan jousien määrityksessä poisjätetyt tekijät ottaa sitten huomioon.

FEM-Designissa mitoitukseen pystyy vaikuttamaan paljon erilaisilla muuttuvilla arvoilla, kuten esimerkiksi betonin virumaluvulla tai ympäristöolosuhteilla. Viruman lisäksi laatan halkeilulla ja sitä myötä raudoituksella on vaikutusta laatan käyttäytymiseen ja lopulliseen mitoitukseen. Tämän työn yhteydessä tehdyissä laskelmissa ei virumaa, halkeilua ja raudoitusta ole otettu huomioon. Näitä asioita voidaan tarkastella sitten, kun lopullista laattaa mitoitetaan. Tässä työssä pyritään keskittymään enemmän maan jousivakioihin ja niiden vaikutukseen laatan suunnittelussa.

5 TUTKITUT LAATTAPERUSTUKSET

Työssä oli tutkittavana kaksi erilaista laattaa, jotka molemmat tulivat todellisiin rakennuskohteisiin. Lisäksi kolmanneksi havainnollistavaksi esimerkiksi keksittiin yksinkertainen ja selkeä laattaesimerkki.

5.1 Biomassasiilon pohjalaatta

Ensimmäinen laskentaesimerkki oli ympyränmuotoinen, biokaasulaitoksen bioreaktorin massasiilon pohjalaatta. Laatalle tuli kuormituksia siilon seinistä viiva-kuormaa laatan reunoille ja laatan keskelle tasaista kuormaa siilossa olevasta biomassasta. Laatan alla oleva maapohja on vähän painuvaa tiivistä hiekkaa. Laatan perustamistaso on noin 2 metriä nykyisen maanpinnan alapuolella ja kallion arvellaan olevan 20–25 metrin syvyydessä. Pohjaveden pinta on noin metrin verran laatan alapuolella.

Laatan halkaisija oli 14,6 m ja paksuus 0,4 m. Siilon sisähalkaisija oli 13 m ja seinien paksuudeksi oletettiin 0,4 m. Laatalle tuli kuormia seinistä ja siilossa olevasta biomassasta. Seinien kautta tulee kuormitusta paitsi seinien omasta painosta, myös siilon päällä olevista rakenteista. Näistä kuormista kaikki lunta lukuun ottamatta ovat pysyviä kuormia, joten kaikki kuormat otetaan huomioon painumaa laskettaessa. Myös siilossa oletetaan olevan biomassaa lähes koko ajan, joten myös biomassan aiheuttama kuormitus otetaan täysimääräisenä huomioon painumassa.

Maapohja on maaperätutkimusten perusteella keskitiiviistä tiiviiseen olevaa hiekkaa. Painumaan vaikuttavien maakerroksen paksuus on noin 20 metriä. Maapohjan parametrit painuman laskentaa varten määritettiin painokairaustosten ja maanäytteiden rakeisuuskäyrien perusteella. Arvioitu painuma on tällaisella maapohjalla noin 10–15 mm. Tarkemmat tiedot laatasta, maapohjasta, jousien iteroinnista ja tuloksista löytyvät liitteestä 1.

Ensimmäistä laattaesimerkkiä tarkasteltiin vertailun vuoksi myös toisenlaisella maapohjalla ja erilaisella elementtijaolla. Maapohjaksi valittiin tiivis karkea siltti, missä painumat ovat hiekkaa suurempia. Näin saatiin tietoa myös painumasuuruuden vaikutuksesta maajousien ja mitoitussuureiden muutokseen. Arvioitu painuma tällaisella maapohjalla on noin 25–30 mm samoilla vallitsevilla painumakuormilla, kuin mitä ensimmäisessä tapauksessa käytettiin.

Ensimmäinen maapohja laskettiin laatan keskeltä neliönmuotoisilla elementeillä ja reunoilla oli kolmionmuotoisia elementtejä täydentämässä ympyrää. Toinen esimerkkipohja laskettiin kahdella erilaisella elementtijaolla. Ensimmäisessä jaossa laatta jaettiin kymmeneen kehään ja toisessa vain viiteen. Näin saatiin vertailutietoa elementtitiheyden vaikutuksesta jousiarvoihin. Liitteestä 1 löytyvät tarkat tiedot laatasta, maapohjista, jousien iteroinnista ja laskentatuloksista.

5.2 Polaniecin voimalaperustus

Toisena laattaesimerkkinä käytettiin edellisestä suuresti poikkeavaa laattaa. Esimerkkinä oli Puolaan tulevan Polaniecin voimalaitoksen kattilalaitoksen perustuslaatta. Laatan perusmitat olivat 47 x 60 metriä. Lisäksi laatan reunoilla oli kahdessa kohtaa erilliset porraskäytävien ulokelaatat. Laatan paksuus vaihteli niin, että keskeltä laatta oli 3,2 metriä paksu, reunoilta 1,5 metriä ja näiden osien välissä 2,2 metriä paksu. Ensimmäisestä laatasta poiketen tässä laatassa suurimmat kuormitukset tulivat alussa laatan keskiosaan kattiloiden painosta.

Tämän esimerkin laattaperustus sijaitsi paksulla savikolla. Maaperästä oli tehty paikan päällä tutkimuksia, joista saatiin maapohjan parametrien arvot. Painuvan savikerroksen paksuudeksi pohjatutkimusraportissa ilmoitettiin 50 metriä. Raportista saatiin myös maan kimmomoduulin arvo, tilavuuspaino ja Janbun parametrit painuman laskentaa varten. Rakennuksen perustamistaso oli 4 metriä maan pinnan alapuolella. Pohjaveden pinta sijaitsi 1,5 metrin syvyydessä maanpinnasta. Tarkemmat tiedot laatasta, maapohjasta, jousien iteroinnista ja tuloksista löytyvät liitteestä 2.

5.3 Teoreettinen laattaesimerkki

Kolmanneksi laskentaesimerkiksi otettiin vielä yksinkertainen, ympyränmuotoinen laatta, jolle tuli vain sama tasainen pintakuorma joka kohtaan. Laattana käytettiin samaa biomassasiilon laattaa kuin kohdassa 5.1. Elementtijakona käytettiin kymmentä kehän muotoista elementtiä. Kehän muotoiset elementit olivat paras vaihtoehto laatan ja kuormituksen symmetrisyyden vuoksi. Maapohjana käytettiin samaa silttimaapohjaa kuin liitteen 1 esimerkissä.

Tällainen teoreettinen esimerkki otettiin mukaan, jotta voitaisiin yksinkertaisesti ja selkeästi näyttää mitoitusvoimasuureiden muutokset laatussa todellisia alustalukuja käytettäessä. Liitteessä 3 on tiedot laatasta, maapohjasta, kuormituksesta ja tulokset iteroinnista ja mitoituksesta.

6 TUTKIMUSTULOSTEN TARKASTELU

Kun laatan alle on saatu laskettua tarkkoja jousiarvoja, tarkastellaan tuloksia ja selvitetään laatan mitoitukseen vaikuttavien voimasuureiden muutoksia. Muuttuvat jousivakiot muuttavat myös laatan painumia ja painumaeroja. Jos laatan painumaerot muuttuvat, muuttuvat myös voimasuureet ja jännitykset laatassa. Tarkoituksena on selvittää muuttavatko tarkemmat jousiarvot laatan voimasuureita niin paljon, että tarkempien jousiarvojen määrittäminen olisi tarpeellista.

Tutkittavana oli laattaperustuksia erilaisilla maapohjilla. Tavoitteena oli saada tietoa maajousien muutoksien vaikutuksia laattaan, kun maapohjien painumiksi yritettiin saada toisistaan poikkeavia arvoja. Savipohjilla laatan painumat ovat suuremmat, joten jousivakioiden muutokset vaikuttavat enemmän myös painumien muutoksiin. Karkeammilla maapohjilla ei painumia tapahdu kovin paljoa, joten jousivakioiden muutoksien vaikutukset painumaeroihin ovat vähäisemmät. Liitteissä 1, 2, 3 ja 4 on esitetty työssä tutkittujen laattaperustusten alustalukujen iterointilaskelmat ja alustalukujen muutokset. Liitteistä löytyvät numeroarvot sekä käyrät tuloksille. Lisäksi laattojen taivutusmomenttien muutokset iteroinnin aikana on esitetty liitteissä.

6.1 Jousivakioiden muuttuminen

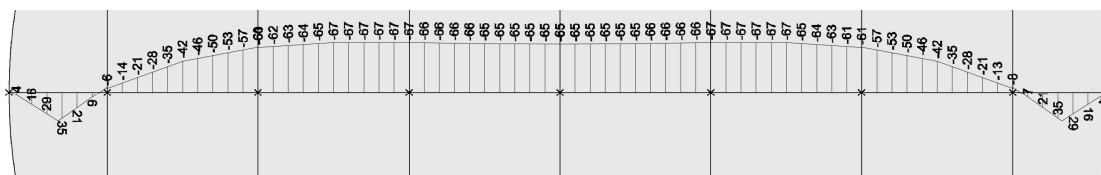
Jousivakioita lähdettiin iteroimaan laatan alle antamalla ensimmäiseksi alustaluvuksi sama arvo koko laatan alle, mikä vastaa hyvin usein nykyistä laattaperustusten mitoitustapaa. Alustavaan alustalukuun laskettiin jäykän laatan painuma ohjelmalla ja alustaluku laskettiin kokonaisuormaan ja painuman avulla. Tätä alustalukua lähdettiin sitten iteroimaan luvussa 4.4 esitetyllä tavalla. Iterointikierroksia tehtiin enimmillään viisi kertaa.

Kaikissa tehdyissä laskelmissa jousien muutoksessa havaittiin sama ilmiö. Jouset jäykistyivät laatan reunoilla ja vastaavasti löysenivät laatan keskellä. Maa-

pohja siis painui enemmän laatan keskellä kuin laatan reunoilla, vaikka kuormitus laatan reunoilla olisi suurempi kuin keskellä. Samalla kun reunaosien alustaluvut suurenivat, myös laatan aiheuttama pohjapaine jakautui keskemältä enemmän reunoille. Reunaosien alustaluvut kasvoivat jokaisen iterointikierroksen jälkeen, kun taas keskemällä olevat alustaluvut pienenevät. Iteroinnilla oli vaikutusta enemmän laatan reunoille kuin keskiosille. Saatujen tulosten perusteella iterointiprosessin jatkaminen tasasi hieman laatan painumaeroja, koska pohjapaine siirtyi keskeltä enemmän laatan reunoille jäykistyvien jousien takia. Tämä painumaerojen tasoittuminen tapahtui kuitenkin vasta ensimmäisen iterointikerran jälkeen. Jos laatta mitoitetaan vakiojousilla, laatan keskiosien painumat ovat huomattavasti todellista pienemmät.

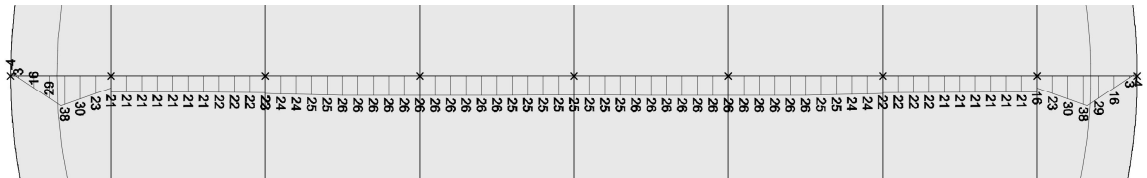
6.2 Mitoitussuureiden muutokset

Laattaperustusta mitoitettaessa tärkein mitoittava voimasuure on laatan taivutusmomentti. Yksi tämän opinnäytetyön tavoitteista oli saada tietoa taivutusmomenttien muutoksista laatussa, kun laatan alla käytetään todellisempia alustalukuja vakioalustaluvun sijaan. Ensimmäisessä mitoitetussa laattaesimerkissä on kuormitusta enemmän reunoilla kuin keskellä. Siilon seinät aiheuttavat nauhakuormaa laatan reunoille ja keskelle tulee tasaista kuormaa massasiilossa olevasta biomassasta. Kun mitoitusohjelmaan laitettiin sama alustaluku joka kohtaan laatan alle, antoi ohjelma laatan siirtymiksi reunoille suuremman arvon kuin keskelle. Näin laatan yläpinta tuli vedetyksi laatan keskellä ja alapintaan tuli vetoa vasta lähellä nauhamaista seinäkuormaa reunalla. Kuvassa 7 näkyy taivutusmomentin alkutilanne vakioalustaluvuilla.



KUVA 7. Laatan taivutusmomentti ennen alustalukujen iterointia

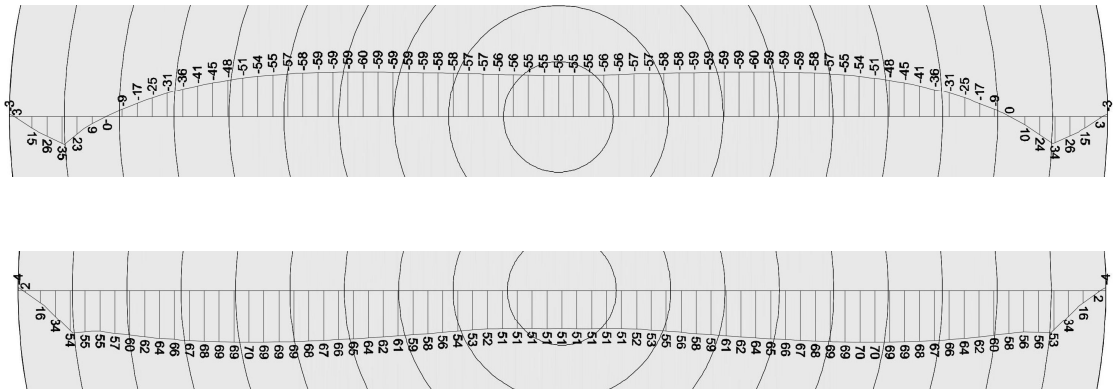
Kun laatan alle iteroitiin todenmukaisempia alustalukuja, laatan taivutusmomenttipinta muuttui täysin. Maapohja painui laatan keskellä enemmän kuin reunoilla huolimatta pienemmästä kuormituksesta. Uusilla jousiarvoilla laatan alapinta muuttui vedetyksi koko laatan osalta. Kun alussa laatan taivutusmomentti oli laatan keskellä noin -65 kNm/m yläpinta vedettynä, lopussa viimeisten jousiarvojen jälkeen momentti oli muuttunut 20 ja 25:n kNm/m:n välille niin, että alapinta oli vedetty. Siilon seinien kohdalla ei momentti muuttunut iteroinnin aikana kuin hieman. Alussa se oli noin 35 kNm/m ja lopussa 38 kNm/m. Kuvassa 8 näkyy viidennen iterointikerran jälkeinen taivutusmomentti. Iteroinnin tulokset ja kuvat alustalukujen ja taivutusmomenttien kehityksestä löytyvät liitteestä 1.



KUVA 8. Laatan taivutusmomentti viidennen iterointikerran jälkeen

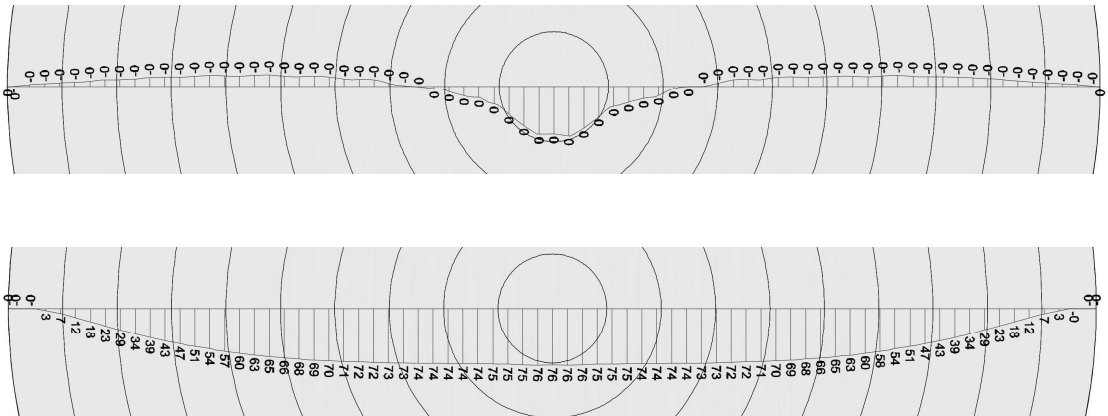
Samaa laattaa tutkittiin myös enemmän painuvalla maapohjalla ja kehän muotoisilla elementeillä. Tässä maapohjassa keskimääräinen painuma oli noin kaksinkertainen ensimmäiseen maapohjaan verrattuna. Havainnot ensimmäiseen maapohjaan verrattuna olivat samansuuntaiset. Ensin vetoa syntyi yläpintaan ja viimeisten jousiarvojen jälkeen koko laatan alapinta oli muuttunut vedetyksi. Samat ilmiöt toistuivat myös kun elementtejä suurennettiin. Ensin alustaluvut määritettiin kymmenellä kehänmuotoisella elementillä ja sen jälkeen vielä viidellä. Tarkat tulokset näistä laskelmista löytyvät liitteestä 2.

Taivutusmomenttien muutos suureni, kun laatan alla oleva maapohja painui enemmän. Kuvassa 9 näkyvät laatan taivutusmomentti toisella maapohjalla ennen iterointia ja viidennen iterointikerran jälkeen.



KUVA 9. Taivutusmomentti [kNm/m] vakiojousiarvoilla (ylh.) ja viidennen iterointikerran jälkeisillä arvoilla

Ymmärrettävimmän momentin muutoksen ja alustalukujen määrittämisen tarpeen havaitsee liitteen 4 yksinkertaisesta esimerkistä. Siinä laattalla on pelkkää tasaista kuormaa. Vakioalustaluvuilla laattaan ei synny taivutusmomenttia, koska se painuu joka kohdassa saman verran. Kun alustalukuja iteroitiin, muuttuivat jouset laatan keskellä löysemmiksi ja laatta painui keskeltä enemmän. Tämä taas aiheutti vetoa laatan alapintaan. Kuvassa 10 näkyvät tämän esimerkin momentin muutokset.



KUVA 10. Teoreettisen laattaesimerkin taivutusmomentti vakiojousilla ja lopullisilla, iteroiduilla jousiarvoilla

Polaniecin laattaperustukseen laskettiin tässä työssä ainoastaan jousiarvot. Polaniecin perustuksen mitoituksen teki toinen konsultti. Näin ollen tästä laatasta ei ole saatavilla muuta tietoa kuin lasketut jousiarvot ja niiden muutokset.

7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli opastaa alueellisesti muuttuvien maajousien määrittämiseen ja tutkia, miten tarkasti määritetyt jouset vaikuttavat laatan mitoitukseen. Jousiarvojen määrittämiseen laadittiin ohje, jonka mukaan määritettiin jouset useaan laattaan ja tutkittiin jousiarvojen sekä laatan rakenteellisten mitoitussuureiden muutosta iterointiprosessin aikana.

Työn aikana tuli selväksi, että jousivakioiden tarkempi määrittäminen on hyödyllistä laattaperustusta mitoittaessa. Ainakin laatan mitoitukseen vaikuttava taivutusmomentti muuttui jousien iteroinnin jälkeen merkittävän paljon. Toisaalta tässä mitoituksessa käytettiin ainoastaan yhtä käyttörajatilan kuormitustapaus-ta, joten tietoa murtorajatilan mitoituksesta ei ole. Oletettavasti taivutusmomen-tin muutokset kuitenkin ovat samankaltaisia myös muilla kuormitustapauksilla. Näin ollen jousivakiot kannattaisi määrittää ainakin suuremmissa mitoituskoh-teissa.

Tässä työssä käytetty menettely on käyttökelpoinen, kunhan laatan elementtija-osta ei tehdä liian tiheää. Jo 5 x 5 elementtijako riittää jo suuntaa-antavien tu-losten saamiseen pienemmillä laatoilla. Elementtijakoa voi myös miettiä raken-teen solmukohtien perusteella. Suuremmilla laatoilla voi jakoa tihentää hieman, mutta tiheämmällä elementtijaolla elementtien lukumäärä nousee ja näin myös aikaa kuluu enemmän, koska alustaluvut ja nettopohjapaineet täytyy syöttää ohjelmiin käsin. Tuloksista näkyy, etteivät alustaluvut ja momentit muutu enää paljoa kolmannen iterointikierroksen jälkeen. Näin ollen kolmella iterointikierrok-sella päästään jo riittävään tarkkuuteen. Aivan täydellisesti ei maapohjaa ole tarkoitus mallintaa.

Kun otetaan noin 25 elementtiä ja kolme iterointikierrosta, kuluu jousien määrit-tämiseen aikaa arviolta 4 – 8 tuntia. Maapohjan painumaparametrien selvittämi-nen vie arviolta tunnin ja mallin tekeminen painumaohjelmaan saman verran. Yhteen jousien iterointikierrukseen kuluu aikaa alle tunti, joten jousien tulisi olla

selvillä noin viidessä tunnissa. Suurempien laattojen mitoitukseen kokonaisuudessaan käytettävä aika saattaa olla kymmeniä tunteja, joten jousien määräytyminen ei ole ajallisesti kovin suuri prosessi koko laatan mitoituksessa.

Iteroitujen jousiarvojen vaikutuksesta laatan raudoitukseen ei saatu tietoa. Laatanmitoitushjelmassa ei ollut lisenssiä laatan raudoituksen laskemiseen, joten sitä ei laskettu. Myös laatan halkeilu, raudoitus ja viruman vaikutus jäi huomioimatta. Viruman vaikutuksesta laatta taipuu enemmän maapohjan painuessa sen alla. Tämä siis muuttaisi laattaan syntyvää taivutusmomenttia. Toisaalta raudoitus jäykistäisi laattaa ja vähentäisi tapahtuvaa virumaa.

Selkeää raja-arvoa painumalle, minkä jälkeen tarkemmat jouset olisi tarpeellista mitoittaa, ei saatu. Pienin tarkasteltu kokonaispainuma oli noin 15 millimetriä (ks. liite 1). Siinä jousien määräytyminen olisi jo taivutusmomentin muutoksen perusteella hyödyllistä. Toisaalta jokainen laatta ja sen kuormitukset ovat yksilöllisiä, joten mitään yleispätevää ohjetta on hankala määrittellä näiden tutkimusten perusteella.

LÄHTEET

1. Lassila, Jari. 2010, Osastopäällikkö, geotekniikka, Pöyry Finland Oy. Keskustelu 10.5.2010.
2. RIL 166 Pohjarakenteet. 1986. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
3. Ravaska, Olli 1976. Perustusrakenteiden suunnittelu osa VII, Laattaperustusten geoteknillinen suunnittelu. Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus INSKO.
4. Suomen rakentamismääräyskokoelma B3. 2004. Pohjarakenteet. Määräykset ja ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö.
5. Tammirinne, Markku 1975. Rakennusten perustaminen maanvaraan. Painuman laskeminen. Otaniemi: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
6. RIL 95 Pohjarakennus. 1974. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
7. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. 2009. Osa 1: Yleiset säännöt. SFS-EN 1997-1 + AC. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
8. Rantamäki, Martti – Jääskeläinen, Raimo – Tammirinne, Markku 2008. Geotekniikka. Helsinki: Otatieto.
9. RIL 95 Pohjarakennus. 1974. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
10. Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, Liite 5. 2001. Helsinki: Tiehallinto

LIITTEET

- Liite 1. Massasiilon pohjalaatta, 1. maapohja
- Liite 2. Massasiilon pohjalaatta, 2. versio
- Liite 3. Polaniecin laattaperustus
- Liite 4. Teoreettinen laattaesimerkki

Kohde: Biokaasulaitoksen massasiilon pohjalaatta

Laatan mitat: (ympyränmuotoinen laatta)

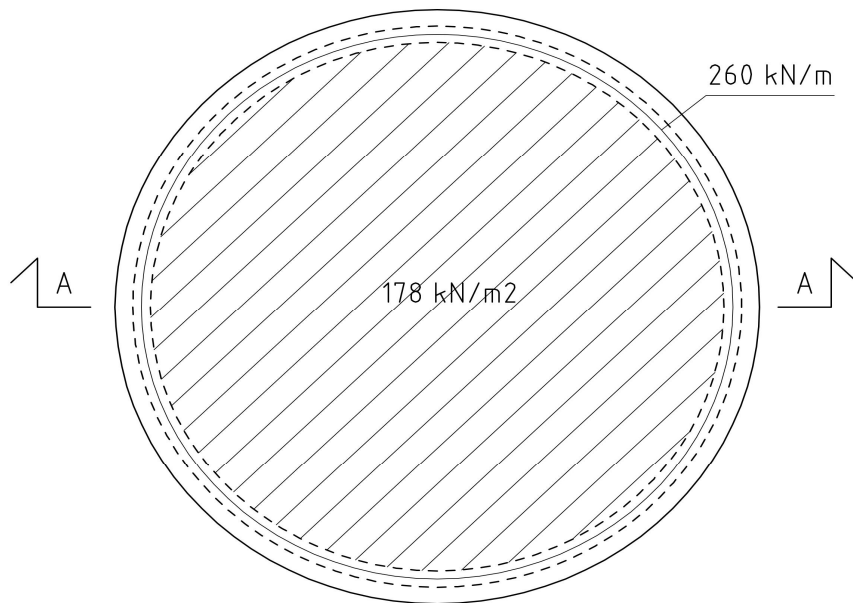
$$d = 14,6 \text{ m}$$

$$h = 0,4 \text{ m}$$

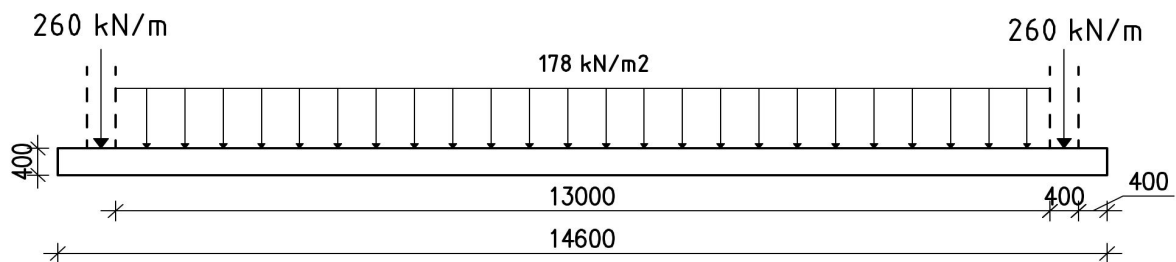
Laatan kuormitukset:

Säiliössä oleva biomassa 178 kN/m^2

Seiniltä ja kattorakenteilta tuleva kuorma 260 kN/m



A - A



Maapohjan ominaisuudet:

Maakerrokset:

Humus, $h = 1 \text{ m}$
 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Janbun parametrit:
 $m = 150 \quad \beta = 0,5 \quad c_v = 1$

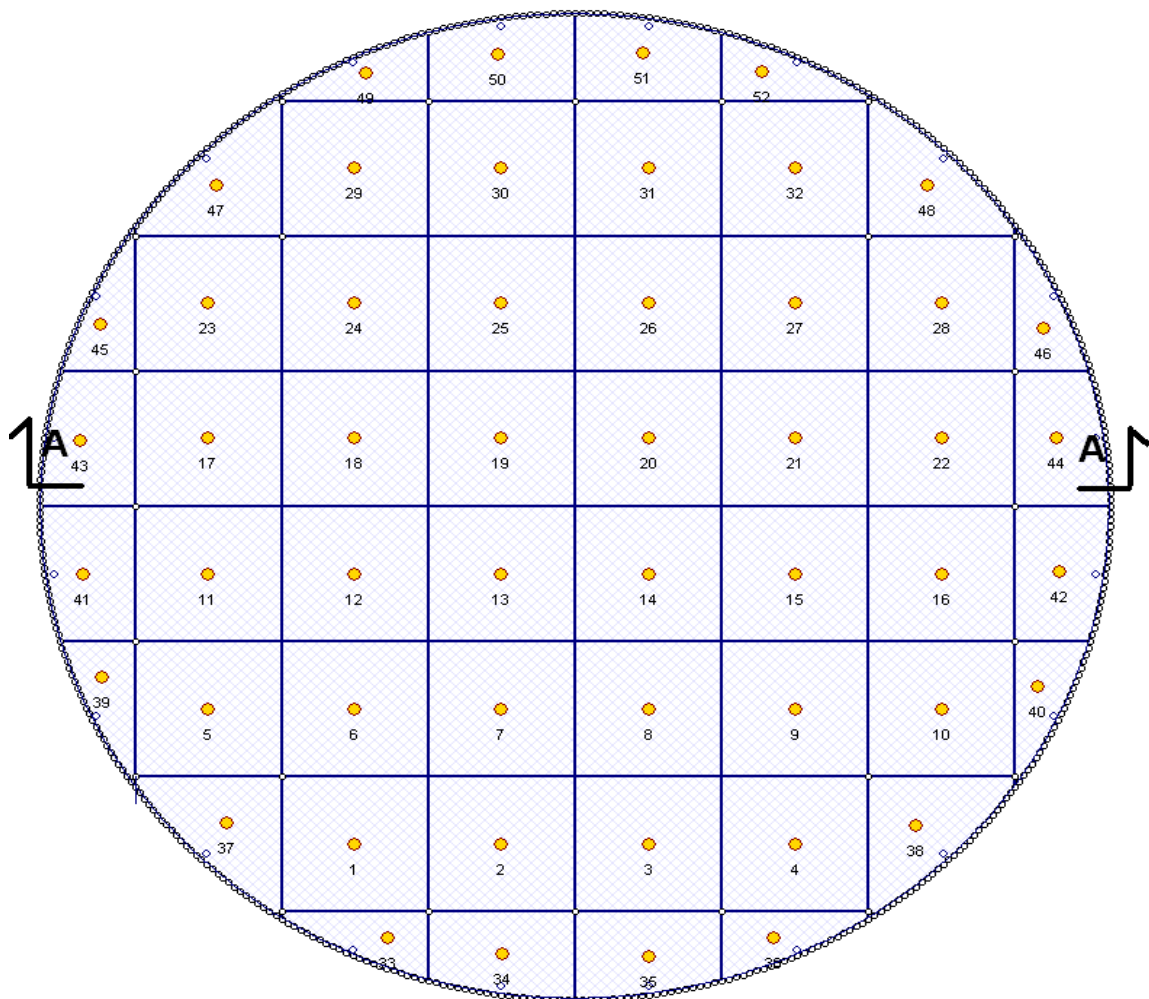
Keskittiivis Hk, $h = 14 \text{ m}$
 $\gamma = 18,5 \text{ kN/m}^3$
 $\gamma' = 8,5 \text{ kN/m}^3$

Janbun parametrit:
 $m = 400 \quad \beta = 0,5 \quad c_v = 1$

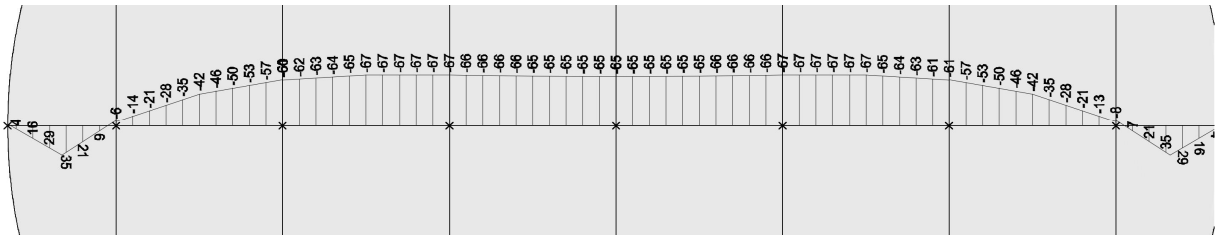
Pohjaveden taso -2,5 m maan pinnasta

Perustamissyvyys -2 m maan pinnasta

Laatan elementtijako ja numerointi:



Taivutusmomentti alussa [kNm/m], alustaluku on 6900 kPa/m joka kohdassa

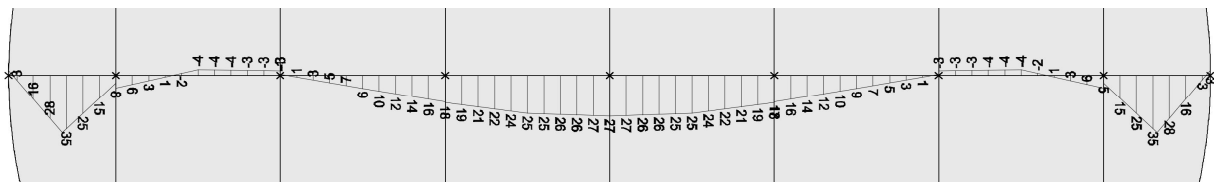


1. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohja-paine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopoh japaine [kPa]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	4	219	0.4	-30	189	756	0.0131	57606	14402
2	4	210	0.4	-30	180	720	0.0138	52019	13005
3	4	210	0.4	-30	180	720	0.0138	52016	13004
4	4	218	0.4	-30	188	753	0.0131	57399	14350
5	4	220	0.4	-30	190	760	0.0132	57813	14453
6	4	199	0.4	-30	169	677	0.0142	47551	11888
7	4	189	0.4	-30	159	638	0.0144	44186	11047
8	4	189	0.4	-30	159	638	0.0144	44187	11047
9	4	199	0.4	-30	169	677	0.0142	47549	11887
10	4	218	0.4	-30	188	753	0.0132	57280	14320
11	4	210	0.4	-30	180	720	0.0138	51986	12997
12	4	189	0.4	-30	159	638	0.0144	44173	11043
13	4	180	0.4	-30	150	598	0.0145	41298	10324
14	4	180	0.4	-30	150	598	0.0145	41300	10325
15	4	189	0.4	-30	159	638	0.0144	44177	11044
16	4	210	0.4	-30	180	720	0.0138	51983	12996
17	4	210	0.4	-30	180	720	0.0138	51987	12997
18	4	189	0.4	-30	159	638	0.0144	44178	11044
19	4	180	0.4	-30	150	598	0.0145	41302	10325
20	4	180	0.4	-30	150	598	0.0145	41303	10326
21	4	189	0.4	-30	159	638	0.0144	44181	11045
22	4	210	0.4	-30	180	720	0.0138	51993	12998
23	4	219	0.4	-30	189	755	0.0131	57455	14364
24	4	199	0.4	-30	169	677	0.0142	47568	11892
25	4	189	0.4	-30	159	638	0.0144	44200	11050
26	4	189	0.4	-30	159	638	0.0144	44202	11051
27	4	199	0.4	-30	169	677	0.0142	47576	11894
28	4	220	0.4	-30	190	760	0.0131	57834	14459
29	4	218	0.4	-30	188	753	0.0131	57532	14383
30	4	210	0.4	-30	180	720	0.0138	52044	13011
31	4	210	0.4	-30	180	720	0.0138	52056	13014
32	4	218	0.4	-30	188	754	0.0131	57573	14393
33	1.2	231	0.4	-30	201	251	0.0108	23187	18565
34	2.4	228	0.4	-30	198	478	0.0114	41854	17331
35	2.4	228	0.4	-30	198	477	0.0113	42280	17507
36	1.2	231	0.4	-30	201	251	0.0106	23721	18992
37	2.5	229	0.4	-30	199	500	0.0115	43296	17208
38	2.5	228	0.4	-30	198	499	0.0117	42856	17033

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
39	1.2	232	0.4	-30	202	252	0.0107	23614	18906
40	1.2	232	0.4	-30	202	252	0.0110	22969	18390
41	2.4	228	0.4	-30	198	477	0.0112	42809	17726
42	2.4	228	0.4	-30	198	477	0.0115	41522	17193
43	2.4	228	0.4	-30	198	477	0.0111	43198	17887
44	2.4	228	0.4	-30	198	477	0.0116	41253	17082
45	1.2	232	0.4	-30	202	252	0.0103	24474	19595
46	1.2	232	0.4	-30	202	252	0.0107	23517	18828
47	2.5	229	0.4	-30	199	499	0.0111	44942	17862
48	2.5	229	0.4	-30	199	500	0.0113	44292	17604
49	1.2	231	0.4	-30	201	251	0.0103	24375	19515
50	2.4	228	0.4	-30	198	477	0.0112	42500	17598
51	2.4	228	0.4	-30	198	477	0.0112	42746	17700
52	1.2	231	0.4	-30	201	251	0.0106	23693	18969

Taivutusmomentti 1. iterointikerran jälkeen, [kNm/m]

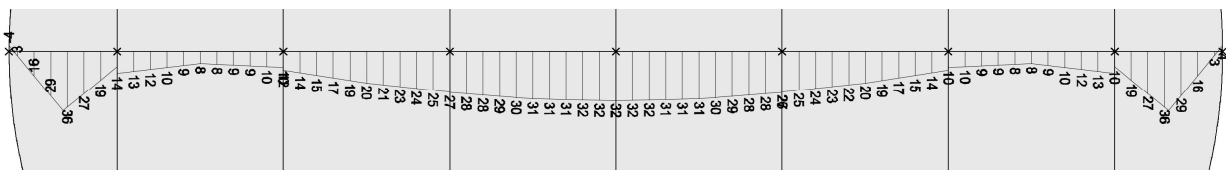


2. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	4	216.5	0.4	-30	187	746	0.0121	61760.9	15440
2	4	197.4	0.4	-30	167	670	0.0124	53884.7	13471
3	4	197.4	0.4	-30	167	670	0.0124	53884.1	13471
4	4	216.7	0.4	-30	187	747	0.0121	61808.2	15452
5	4	215.9	0.4	-30	186	744	0.0121	61659.7	15415
6	4	184.2	0.4	-30	154	617	0.0126	48977.4	12244
7	4	174.5	0.4	-30	145	578	0.0127	45643.7	11411
8	4	174.5	0.4	-30	145	578	0.0127	45648	11412
9	4	184.2	0.4	-30	154	617	0.0126	48984.9	12246
10	4	216.3	0.4	-30	186	745	0.0121	61793.6	15448
11	4	197.1	0.4	-30	167	668	0.0124	53824.9	13456
12	4	174.4	0.4	-30	144	578	0.0126	45727.4	11432
13	4	167.3	0.4	-30	137	549	0.0126	43511.2	10878
14	4	167.3	0.4	-30	137	549	0.0126	43514.4	10879
15	4	174.4	0.4	-30	144	578	0.0126	45735.6	11434
16	4	197.1	0.4	-30	167	668	0.0124	53825.5	13456
17	4	197.0	0.4	-30	167	668	0.0124	53827.7	13457
18	4	174.4	0.4	-30	144	578	0.0126	45740.2	11435
19	4	167.3	0.4	-30	137	549	0.0126	43531.9	10883
20	4	167.3	0.4	-30	137	549	0.0126	43531.7	10883

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohja-paine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopoh japaine [kPa]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
21	4	174.4	0.4	-30	144	578	0.0126	45739.7	11435
22	4	197.1	0.4	-30	167	668	0.0124	53831.4	13458
23	4	216.1	0.4	-30	186	745	0.0121	61755.1	15439
24	4	184.1	0.4	-30	154	617	0.0126	48996.8	12249
25	4	174.5	0.4	-30	144	578	0.0126	45756.6	11439
26	4	174.5	0.4	-30	144	578	0.0126	45755.2	11439
27	4	184.1	0.4	-30	154	616	0.0126	48994.6	12249
28	4	215.9	0.4	-30	186	743	0.0121	61652.4	15413
29	4	216.3	0.4	-30	186	745	0.0121	61819.8	15455
30	4	197.1	0.4	-30	167	668	0.0124	53855.5	13464
31	4	197.1	0.4	-30	167	668	0.0124	53855.2	13464
32	4	216.4	0.4	-30	186	746	0.0121	61828.8	15457
33	1.2	273.5	0.4	-30	243	304	0.0107	28307	22664
34	2.4	257.8	0.4	-30	228	550	0.0112	49288.7	20409
35	2.4	257.8	0.4	-30	228	550	0.0113	48738.6	20182
36	1.2	273.3	0.4	-30	243	304	0.0108	28161.5	22547
37	2.5	255.1	0.4	-30	225	566	0.0112	50536.8	20086
38	2.5	254.9	0.4	-30	225	566	0.0113	50028.6	19884
39	1.2	277.0	0.4	-30	247	309	0.0109	28296.6	22655
40	1.2	276.7	0.4	-30	247	308	0.0109	28315.6	22671
41	2.4	257.1	0.4	-30	227	548	0.0112	49056.1	20313
42	2.4	257.0	0.4	-30	227	548	0.0116	47437	19643
43	2.4	257.0	0.4	-30	227	548	0.0112	49035.9	20305
44	2.4	257.1	0.4	-30	227	548	0.0115	47611.9	19715
45	1.2	276.7	0.4	-30	247	308	0.0106	29129.2	23322
46	1.2	277.0	0.4	-30	247	308	0.0108	28528.6	22841
47	2.5	254.6	0.4	-30	225	565	0.0112	50307.1	19995
48	2.5	254.7	0.4	-30	225	565	0.0113	50183.2	19946
49	1.2	277.0	0.4	-30	247	308	0.0106	29145	23335
50	2.4	257.1	0.4	-30	227	548	0.0111	49610.8	20543
51	2.4	257.1	0.4	-30	227	549	0.0111	49491.6	20493
52	1.2	277.0	0.4	-30	247	309	0.0107	28720	22994

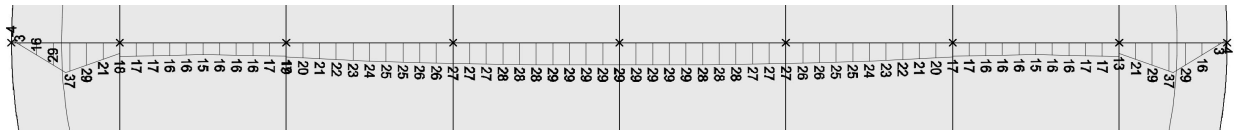
Taivutusmomentti 2. iterointikerran jälkeen, [kNm/m]



3. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohja-paine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopoh japaine [kPa]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	4	211	0.4	-30	181	724	0.012	60625.5	15156
2	4	189	0.4	-30	159	636	0.012	52160.8	13040
3	4	189	0.4	-30	159	636	0.012	52160.8	13040
4	4	211	0.4	-30	181	726	0.012	60768.5	15192
5	4	211	0.4	-30	181	722	0.012	60514	15128
6	4	179	0.4	-30	149	596	0.012	48058.5	12015
7	4	173	0.4	-30	143	571	0.013	45510.5	11378
8	4	173	0.4	-30	143	571	0.013	45515.3	11379
9	4	179	0.4	-30	149	596	0.012	48067.5	12017
10	4	212	0.4	-30	182	727	0.012	60894.4	15224
11	4	190	0.4	-30	160	639	0.012	52272.3	13068
12	4	173	0.4	-30	143	573	0.013	45646	11411
13	4	172	0.4	-30	142	566	0.013	44465.2	11116
14	4	172	0.4	-30	142	566	0.013	44468.7	11117
15	4	173	0.4	-30	143	573	0.013	45654.9	11414
16	4	190	0.4	-30	160	639	0.012	52274.1	13069
17	4	189	0.4	-30	159	638	0.012	52213.2	13053
18	4	173	0.4	-30	143	573	0.013	45632.1	11408
19	4	172	0.4	-30	142	566	0.013	44456.4	11114
20	4	172	0.4	-30	142	566	0.013	44456	11114
21	4	173	0.4	-30	143	573	0.013	45631	11408
22	4	189	0.4	-30	159	638	0.012	52216.2	13054
23	4	211	0.4	-30	181	724	0.012	60614.7	15154
24	4	179	0.4	-30	149	596	0.012	48021	12005
25	4	173	0.4	-30	143	573	0.013	45636.3	11409
26	4	173	0.4	-30	143	573	0.013	45634.3	11409
27	4	179	0.4	-30	149	596	0.012	48017.8	12004
28	4	210	0.4	-30	180	721	0.012	60336.1	15084
29	4	211	0.4	-30	181	725	0.012	60725.8	15181
30	4	189	0.4	-30	159	635	0.012	52105.6	13026
31	4	189	0.4	-30	159	635	0.012	52104.9	13026
32	4	211	0.4	-30	181	725	0.012	60733.5	15183
33	1.2	297	0.4	-30	267	334	0.011	30231.9	24205
34	2.4	265	0.4	-30	235	568	0.011	49545.7	20516
35	2.4	265	0.4	-30	235	568	0.011	49895.3	20661
36	1.2	297	0.4	-30	267	334	0.011	29612.1	23709
37	2.5	264	0.4	-30	234	589	0.011	51754.2	20570
38	2.5	264	0.4	-30	234	589	0.012	50305.4	19994
39	1.2	294	0.4	-30	264	330	0.011	30203.1	24182
40	1.2	294	0.4	-30	264	329	0.011	29672.8	23757
41	2.4	264	0.4	-30	234	564	0.011	49829.8	20633
42	2.4	264	0.4	-30	234	564	0.012	48851.5	20228
43	2.4	263	0.4	-30	233	563	0.011	49057.2	20314
44	2.4	263	0.4	-30	233	564	0.012	48491.9	20079
45	1.2	298	0.4	-30	268	335	0.011	30807.8	24666
46	1.2	298	0.4	-30	268	335	0.011	30436	24368
47	2.5	264	0.4	-30	234	588	0.011	52713	20951
48	2.5	264	0.4	-30	234	588	0.012	50816	20197
49	1.2	297	0.4	-30	267	334	0.011	30589.7	24491
50	2.4	265	0.4	-30	235	568	0.011	49641.9	20556
51	2.4	265	0.4	-30	235	568	0.011	49731.6	20593
52	1.2	297	0.4	-30	267	334	0.011	30039.2	24051

Taivutusmomentti 3. iterointikerran jälkeen, [kNm/m]

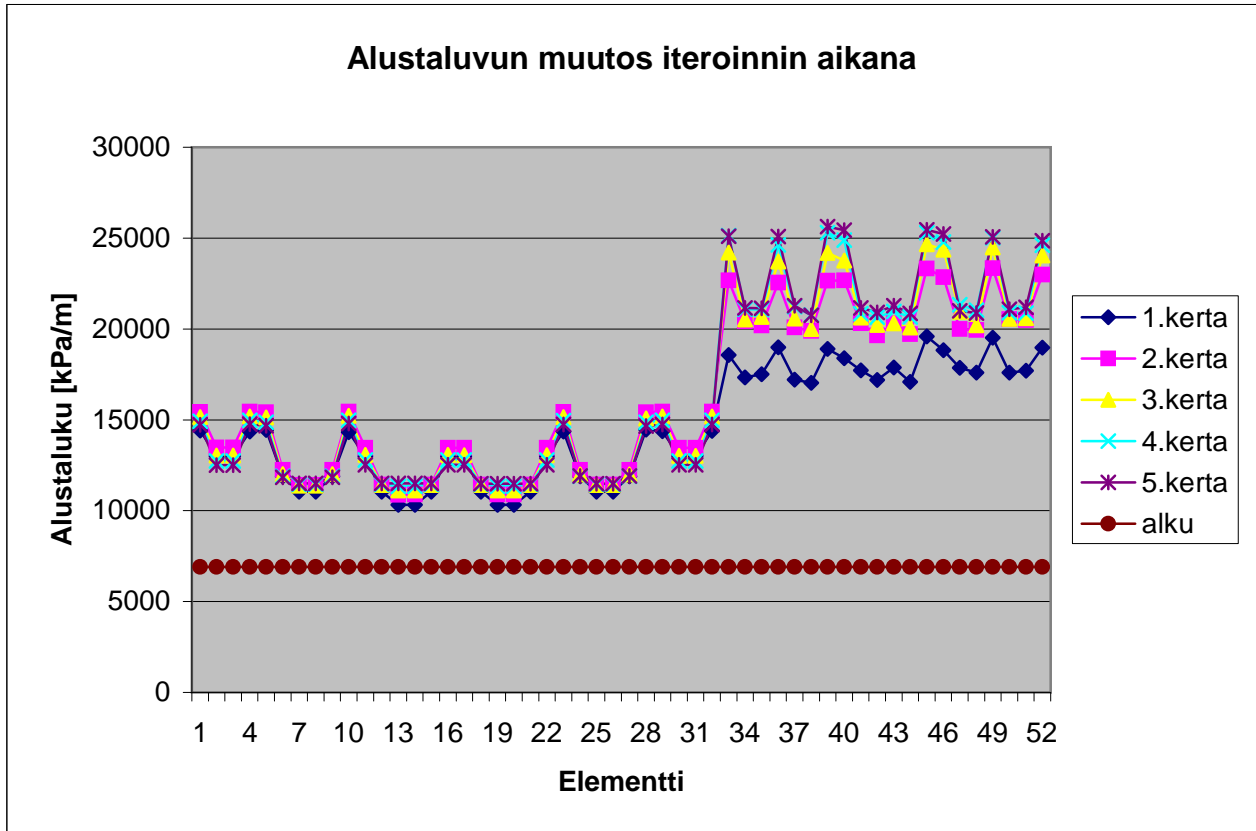
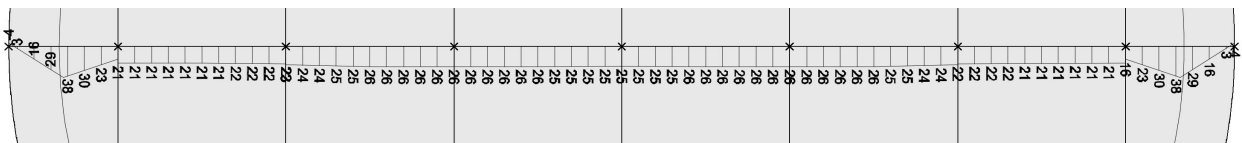


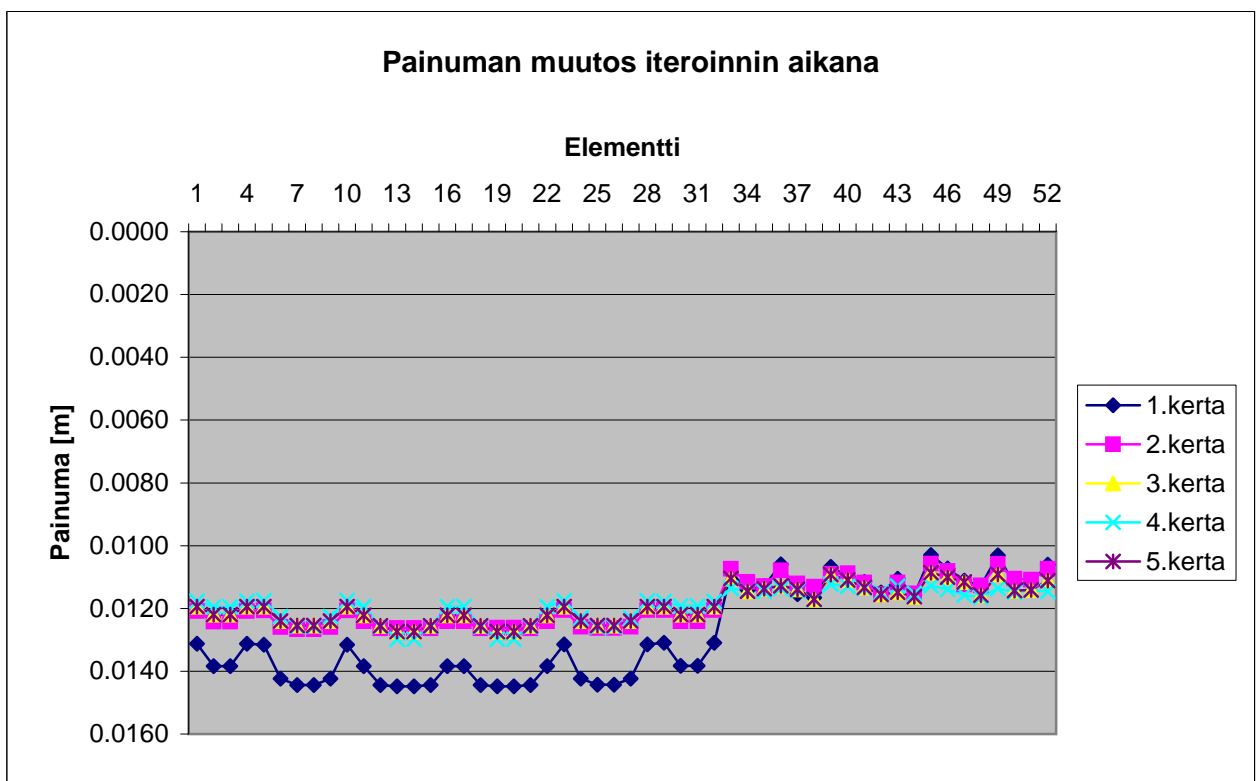
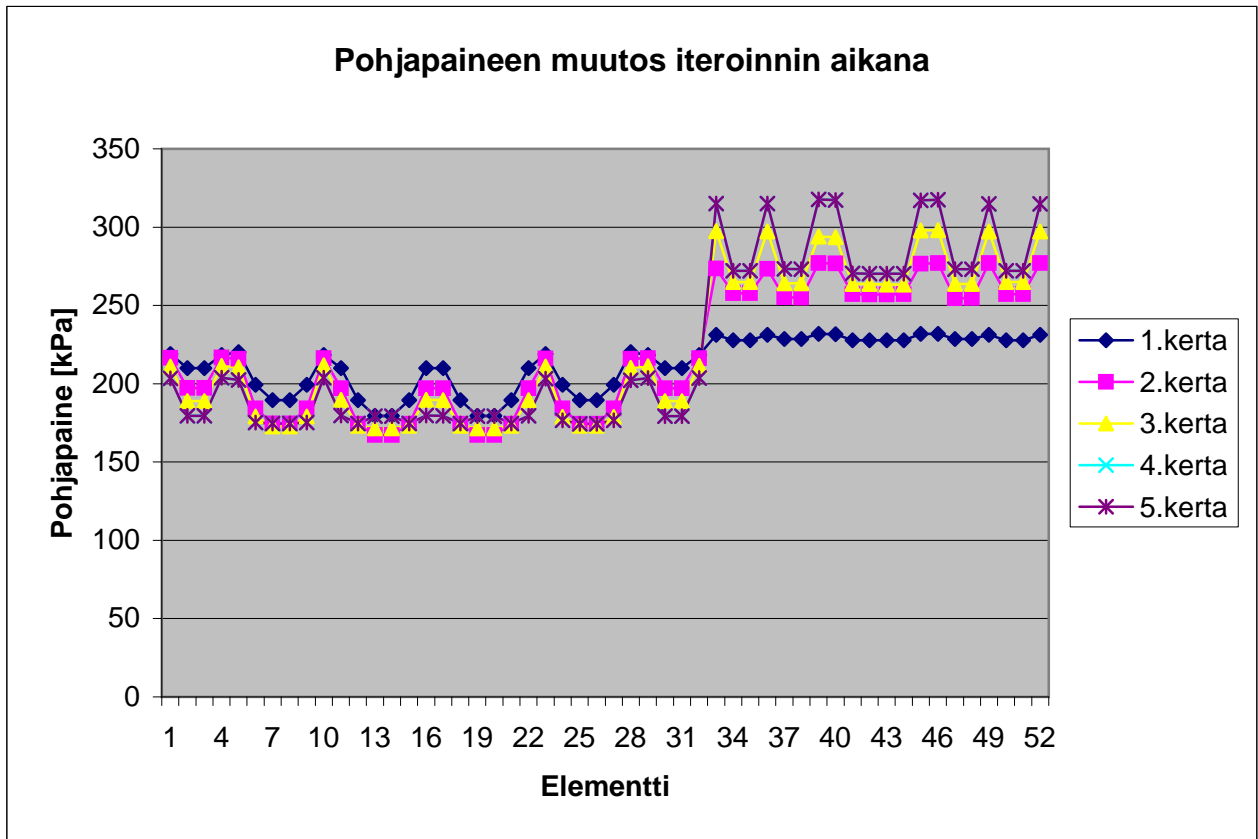
4. Iterointikerta

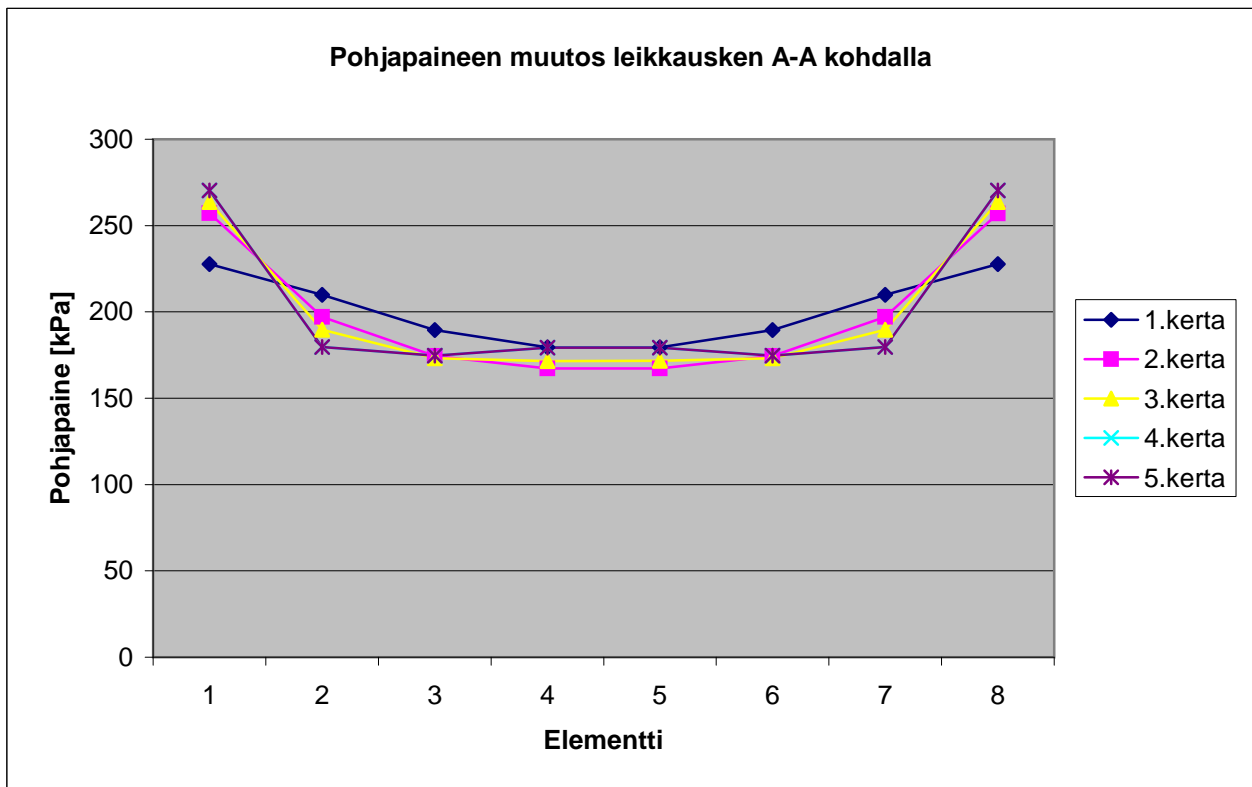
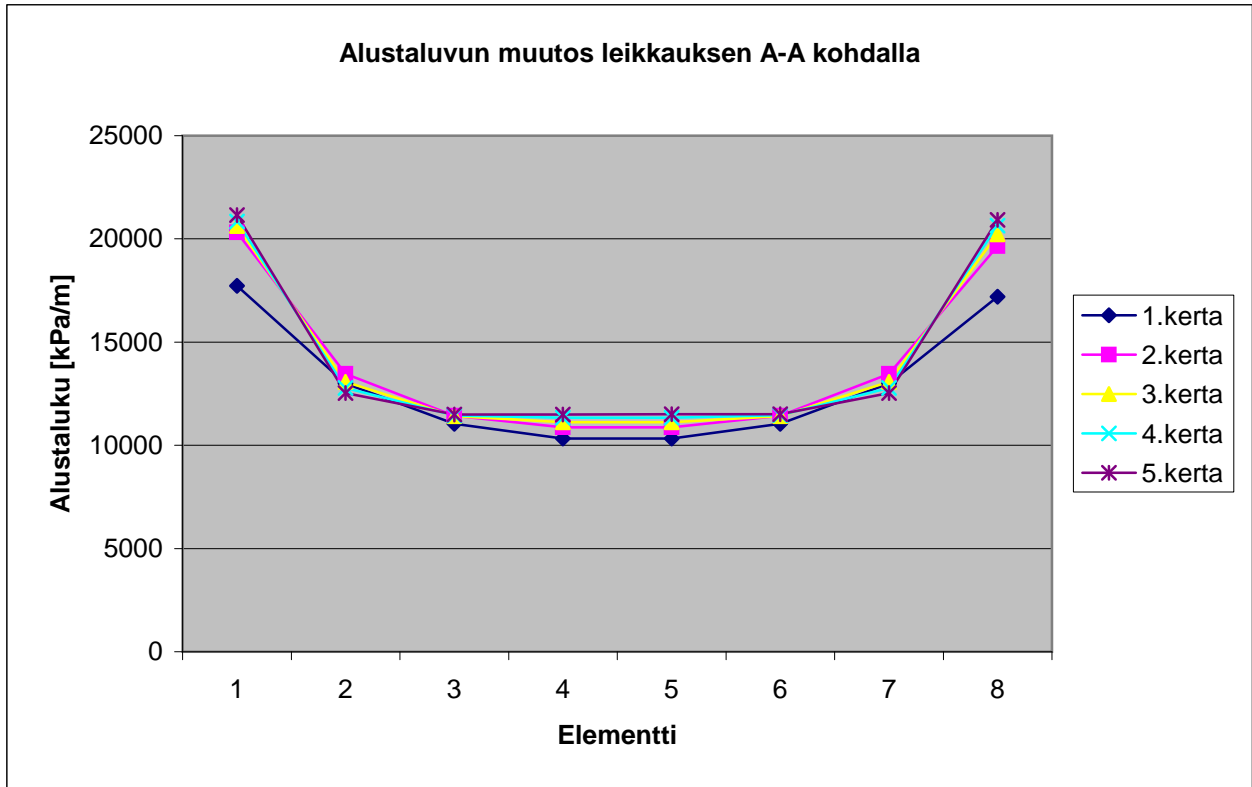
Elem. nro	Ala [m ²]	Pohja-paine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopoh japaine [kPa]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	4	207	0.4	-30	177	708	0.012	59715.2	14929
2	4	184	0.4	-30	154	614	0.012	50952.9	12738
3	4	184	0.4	-30	154	614	0.012	50952.9	12738
4	4	207	0.4	-30	177	709	0.012	59883.2	14971
5	4	206	0.4	-30	176	704	0.012	59463	14866
6	4	177	0.4	-30	147	587	0.012	47572	11893
7	4	174	0.4	-30	144	575	0.013	45768.1	11442
8	4	174	0.4	-30	144	575	0.013	45772.8	11443
9	4	177	0.4	-30	147	587	0.012	47581.1	11895
10	4	207	0.4	-30	177	710	0.012	59914.2	14979
11	4	184	0.4	-30	154	616	0.012	51123.4	12781
12	4	174	0.4	-30	144	575	0.013	45805.7	11451
13	4	176	0.4	-30	146	584	0.013	45359.6	11340
14	4	176	0.4	-30	146	584	0.013	45363.1	11341
15	4	174	0.4	-30	144	575	0.013	45814.8	11454
16	4	184	0.4	-30	154	616	0.012	51125.3	12781
17	4	184	0.4	-30	154	616	0.012	51124.1	12781
18	4	174	0.4	-30	144	575	0.013	45810.4	11453
19	4	176	0.4	-30	146	584	0.013	45361.2	11340
20	4	176	0.4	-30	146	584	0.013	45360.9	11340
21	4	174	0.4	-30	144	575	0.013	45809.5	11452
22	4	184	0.4	-30	154	616	0.012	51127.1	12782
23	4	207	0.4	-30	177	708	0.012	59791.1	14948
24	4	177	0.4	-30	147	587	0.012	47577.6	11894
25	4	174	0.4	-30	144	575	0.013	45770.5	11443
26	4	174	0.4	-30	144	575	0.013	45768.5	11442
27	4	177	0.4	-30	147	587	0.012	47574.3	11894
28	4	206	0.4	-30	176	704	0.012	59465.3	14866
29	4	207	0.4	-30	177	710	0.012	59906.6	14977
30	4	184	0.4	-30	154	614	0.012	50949.9	12737
31	4	184	0.4	-30	154	614	0.012	50949.2	12737
32	4	207	0.4	-30	177	710	0.012	59913.9	14978
33	1.2	310	0.4	-30	280	350	0.011	31388	25131
34	2.4	268	0.4	-30	238	574	0.011	50936.9	21092
35	2.4	268	0.4	-30	238	574	0.011	50899.6	21076
36	1.2	310	0.4	-30	280	350	0.011	30763.3	24630
37	2.5	268	0.4	-30	238	600	0.011	53422.1	21233
38	2.5	268	0.4	-30	238	599	0.011	52245.6	20765
39	1.2	310	0.4	-30	280	350	0.011	31601.2	25301
40	1.2	309	0.4	-30	279	349	0.011	31081.1	24885
41	2.4	267	0.4	-30	237	572	0.011	50320.4	20837

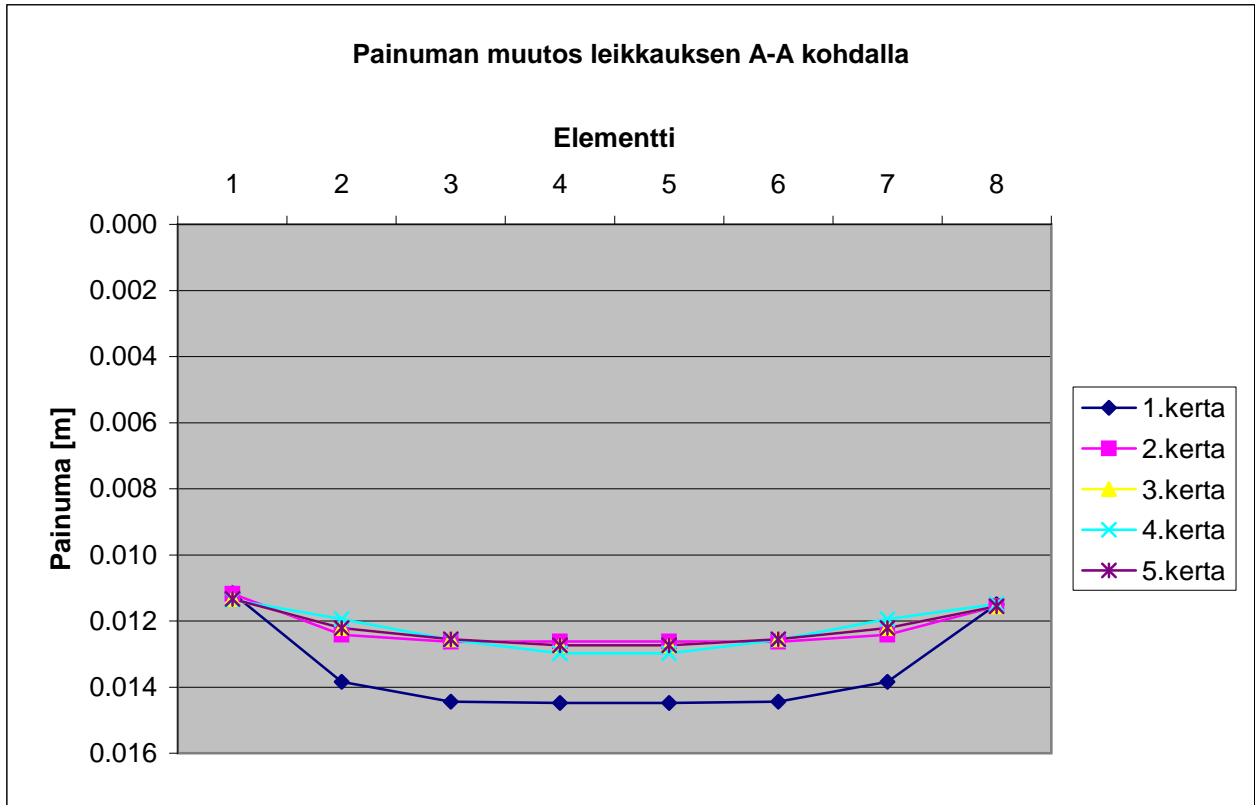
Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
42	2.4	267	0.4	-30	237	572	0.011	49854.2	20644
43	2.4	267	0.4	-30	237	572	0.011	50619.6	20960
44	2.4	267	0.4	-30	237	572	0.011	49916	20669
45	1.2	309	0.4	-30	279	349	0.011	31589.4	25292
46	1.2	310	0.4	-30	280	350	0.011	30967.7	24794
47	2.5	268	0.4	-30	238	599	0.011	53666	21330
48	2.5	268	0.4	-30	238	600	0.011	52899.5	21025
49	1.2	310	0.4	-30	280	350	0.011	31245.5	25016
50	2.4	268	0.4	-30	238	574	0.011	50464.7	20896
51	2.4	268	0.4	-30	238	574	0.011	50393.9	20867
52	1.2	310	0.4	-30	280	350	0.011	30737.4	24610

Taivutusmomentti 4. iterointikerran jälkeen, [kNm/m]









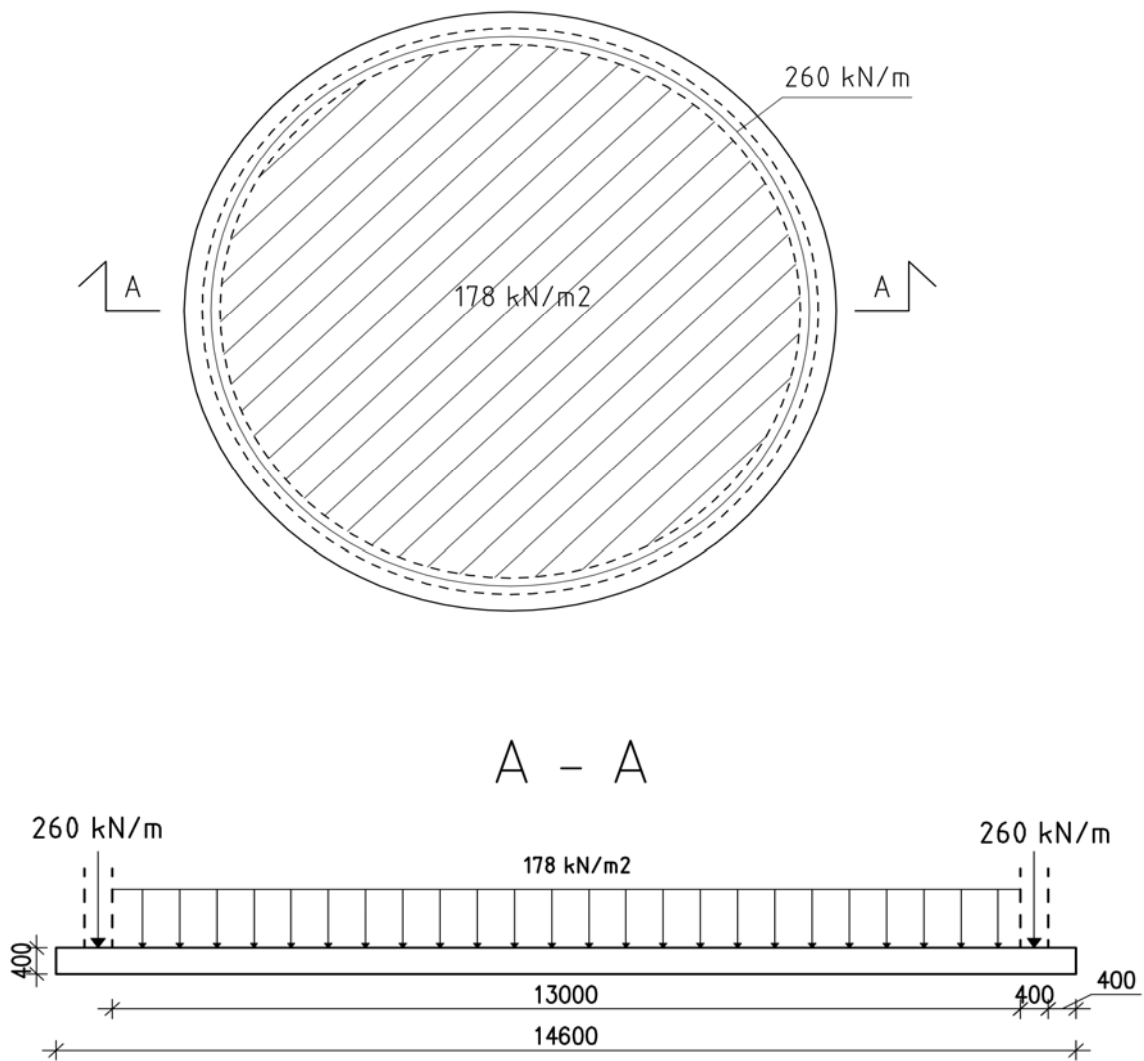
Kohde: Biokaasulaitoksen massasiilon pohjalaatta

Laatan mitat: (ympyränmuotoinen laatta)

d = 14,6 m
h = 0,4 m

Laatan kuormitukset:

Säiliössä oleva biomassa 178 kN/m²
Seiniltä ja kattorakenteilta tuleva kuorma 260 kN/m



Maapohjan ominaisuudet:

Maakerrokset:

Humus, $h = 1$ m
 $\gamma = 20$ kN/m³

Janbun parametrit:
 $m = 150$ $\beta = 0,5$ $c_v = 1$

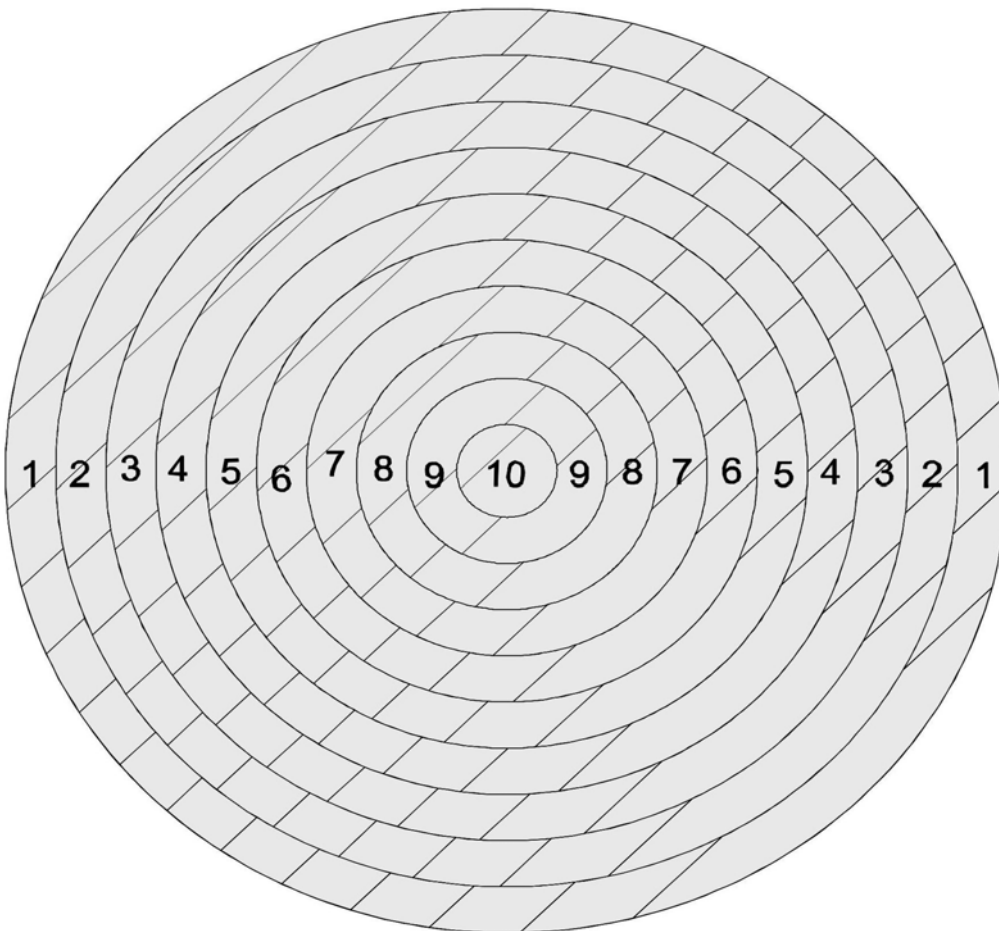
tiivis, karkea Si, $h = 14$ m
 $\gamma = 19,0$ kN/m³
 $\gamma' = 9,0$ kN/m³

Janbun parametrit:
 $m = 250$ $\beta = 0,3$ $c_v = 1$

Pohjaveden taso -2,5 m maan pinnasta

Perustamissyvyys -2 m maan pinnasta

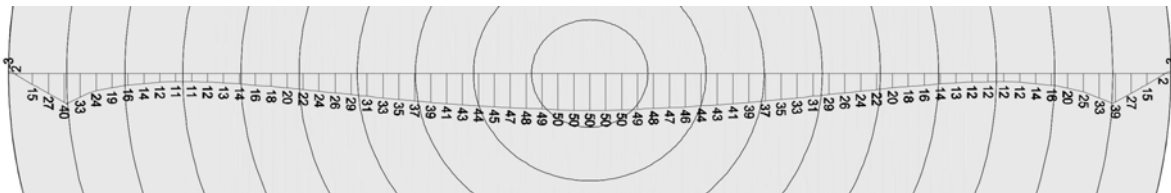
Laatan elementtijako ja numerointi:



1. Iterointi

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	31.8	230.9	0.4	-30	201	6389	0.017	371555	11681
2	28.5	222.2	0.4	-30	192	5469	0.021	264895	9307
3	25.1	212.9	0.4	-30	183	4593	0.022	205878	8198
4	21.8	203.9	0.4	-30	174	3785	0.023	162888	7484
5	18.4	196.0	0.4	-30	166	3058	0.024	128661	6986
6	15.1	189.3	0.4	-30	159	2399	0.024	99775	6622
7	11.7	183.9	0.4	-30	154	1803	0.024	74476	6355
8	8.4	179.9	0.4	-30	150	1255	0.024	51723	6179
9	5.0	177.2	0.4	-30	147	739	0.024	30797	6132
10	1.7	176.0	0.4	-30	146	244	0.024	10067	6014

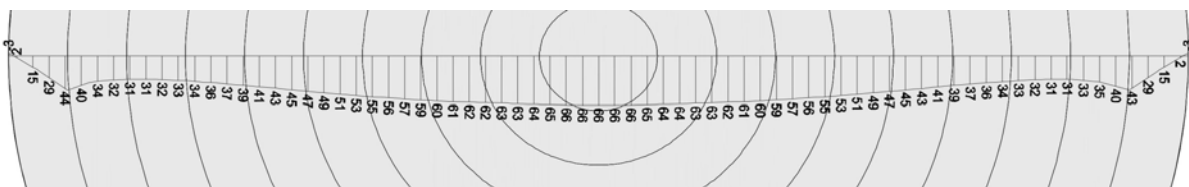
Taivutusmomentti [kNm/m], kun käytetään 1:n iterointikerran alustalukuja elementteittäin



2. Iterointi

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	31.8	272.3	0.4	-30	242	7708	0.018	426903.3	13421
2	28.5	223.7	0.4	-30	194	5512	0.021	263139.4	9246
3	25.1	202.3	0.4	-30	172	4328	0.022	197058.5	7847
4	21.8	189.4	0.4	-30	159	3469	0.022	154481.8	7098
5	18.4	180.9	0.4	-30	151	2779	0.023	122282.2	6640
6	15.1	175.1	0.4	-30	145	2186	0.023	95568	6343
7	11.7	171.1	0.4	-30	141	1654	0.023	71934	6138
8	8.4	168.8	0.4	-30	139	1162	0.023	50409	6022
9	5.0	169.2	0.4	-30	139	699	0.023	30587	6091
10	1.7	166.8	0.4	-30	137	229	0.023	9911	5921

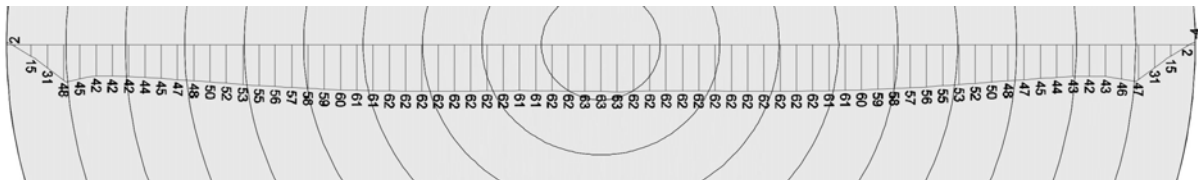
Taivutusmomentti [kNm/m], kun käytetään 2:n iterointikerran alustalukuja elementteittäin



3. Iterointi

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	31.8	295.5	0.4	-30	266	8446	0.018	459572	14448
2	28.5	215.1	0.4	-30	185	5268	0.021	252305	8865
3	25.1	191.6	0.4	-30	162	4058	0.022	187973	7485
4	21.8	180.9	0.4	-30	151	3285	0.022	149253	6858
5	18.4	175.7	0.4	-30	146	2682	0.022	120031	6518
6	15.1	173.2	0.4	-30	143	2158	0.023	95333	6327
7	11.7	172.0	0.4	-30	142	1664	0.023	72654	6200
8	8.4	172.0	0.4	-30	142	1189	0.023	51449	6146
9	5.0	176.3	0.4	-30	146	735	0.023	31890	6350
10	1.7	172.5	0.4	-30	142	239	0.023	10216	6103

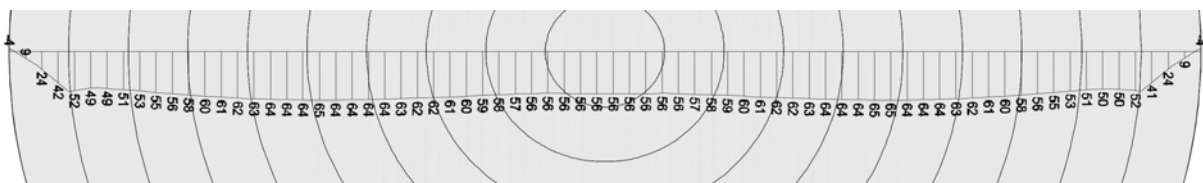
Taivutusmomentti [kNm/m], kun käytetään 3:n iterointikerran alustalukuja elementittäin



4. Iterointi

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	31.8	312.4	0.4	-30	282	8982	0.019	484200.7	15222
2	28.5	204.4	0.4	-30	174	4965	0.021	239436.4	8413
3	25.1	182.5	0.4	-30	153	3830	0.021	180205.9	7176
4	21.8	175.5	0.4	-30	146	3167	0.022	145875.3	6703
5	18.4	173.6	0.4	-30	144	2645	0.022	119287.1	6477
6	15.1	174.2	0.4	-30	144	2173	0.023	96073	6376
7	11.7	175.2	0.4	-30	145	1702	0.023	73865	6303
8	8.4	177.0	0.4	-30	147	1231	0.023	52624	6286
9	5.0	185.2	0.4	-30	155	779	0.023	33274	6626
10	1.7	179.1	0.4	-30	149	250	0.024	10494	6269

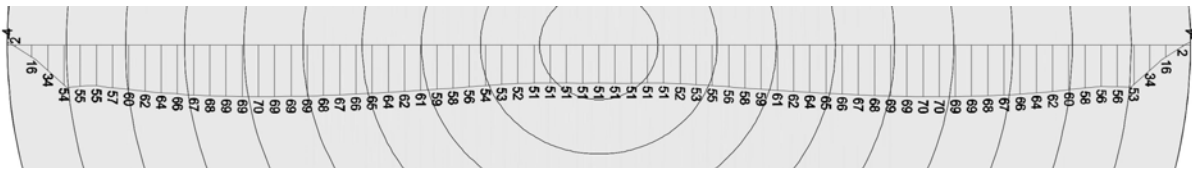
Taivutusmomentti [kNm/m], kun käytetään 4:n iterointikerran alustalukuja elementittäin



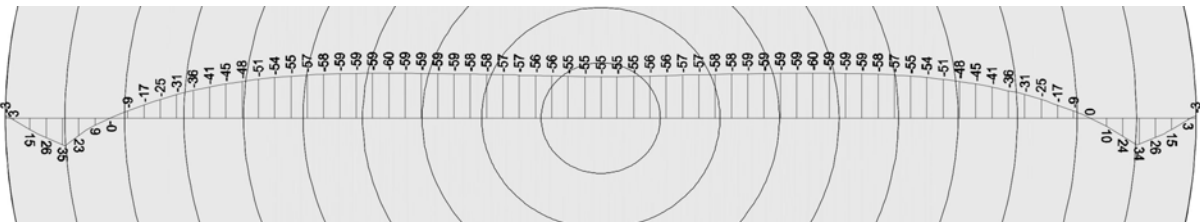
5. Iterointi

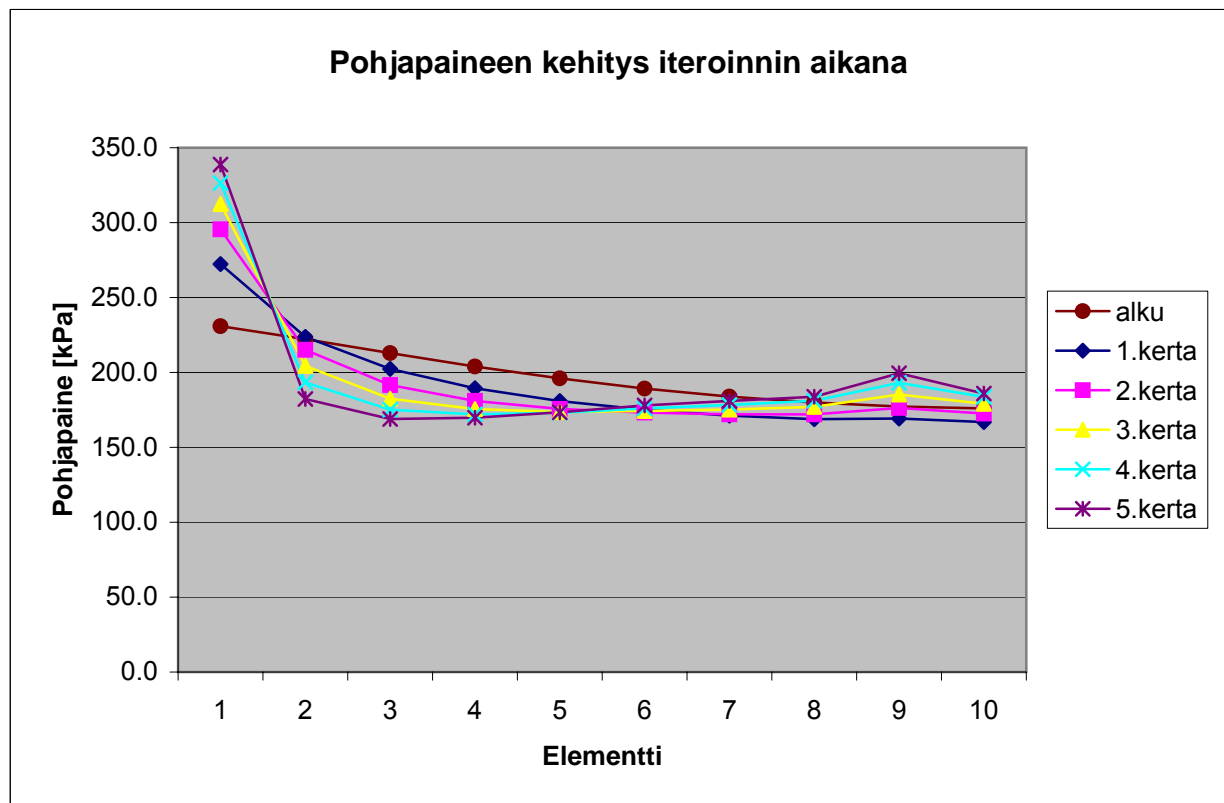
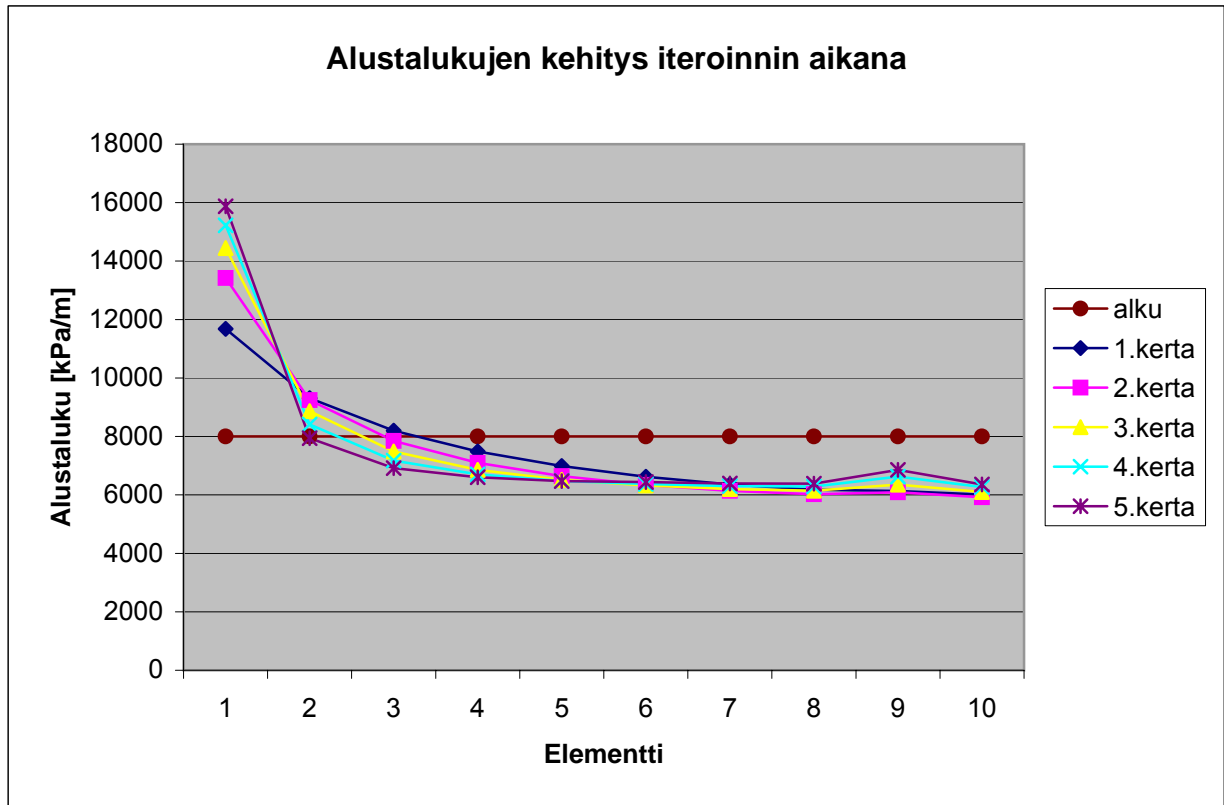
Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	31.8	326.4	0.4	-30	296	9428	0.019	504964.6	15875
2	28.5	193.4	0.4	-30	163	4650	0.021	225961.4	7939
3	25.1	175.1	0.4	-30	145	3643	0.021	173695.4	6917
4	21.8	172.0	0.4	-30	142	3090	0.021	143709.5	6603
5	18.4	173.0	0.4	-30	143	2634	0.022	119235.3	6475
6	15.1	176.0	0.4	-30	146	2200	0.023	97027	6440
7	11.7	178.4	0.4	-30	148	1739	0.023	74917	6393
8	8.4	181.1	0.4	-30	151	1264	0.024	53454	6386
9	5.0	193.1	0.4	-30	163	819	0.024	34438	6857
10	1.7	183.7	0.4	-30	154	257	0.024	10647	6360

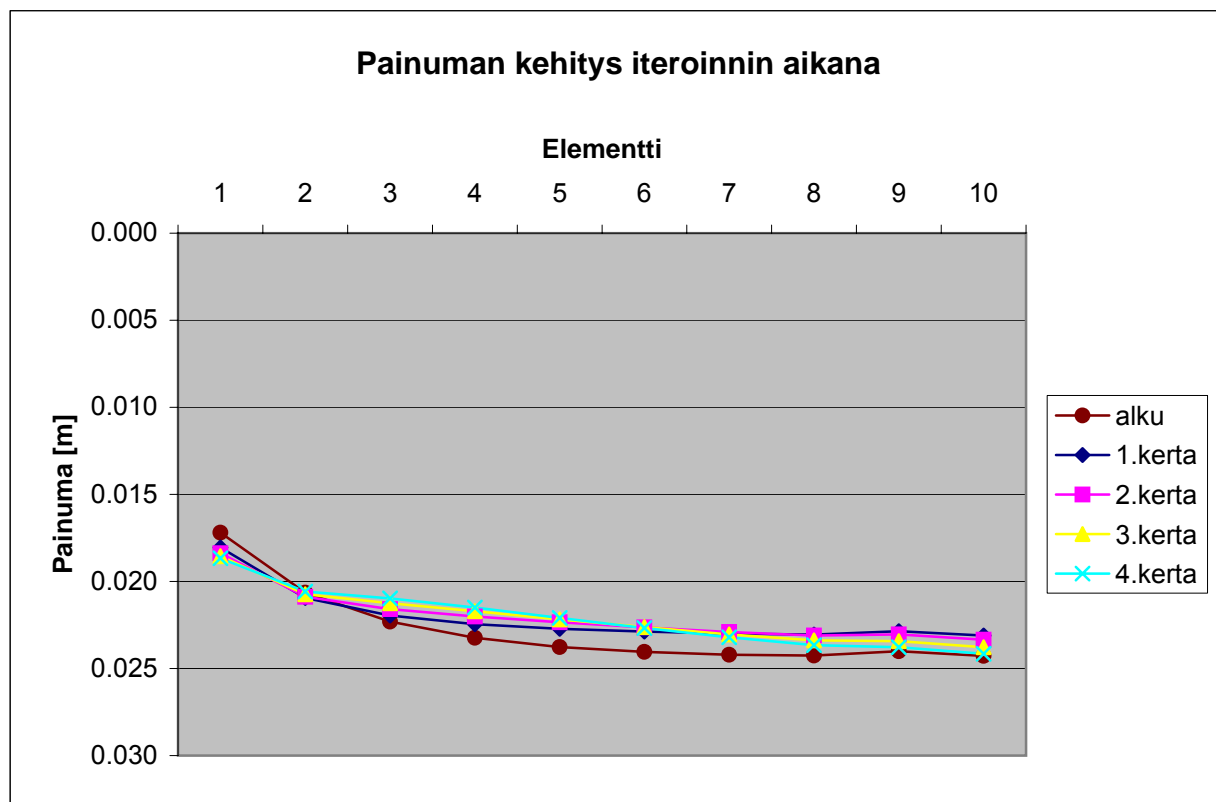
Taivutusmomentti [kNm/m], kun käytetään 5:n iterointikerran alustalukuja elementteittäin



Taivutusmomentti ennen iterointia, kun joka elementillä käytetään samaa alustalukua $k_s = 8000$ kPa/m



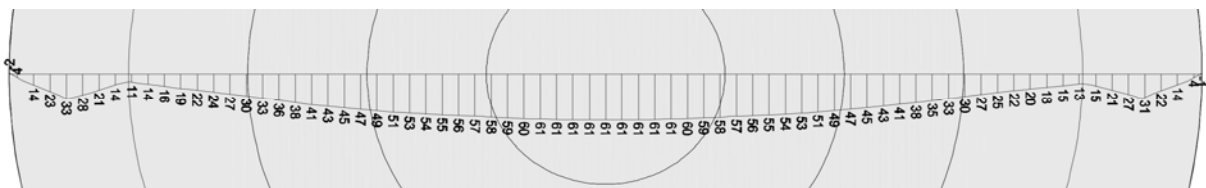




3. Iterointi

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	60.3	260.8	0.4	-30	230.8	13909.2	0.020	689270	11436
2	46.9	187.9	0.4	-30	157.9	7400.45	0.022	334709	7140
3	33.5	171.9	0.4	-30	141.9	4752.2	0.022	211504	6317
4	20.1	168.0	0.4	-30	138.0	2772.92	0.023	121829	6064
5	6.7	167.6	0.4	-30	137.6	921.582	0.023	40164	5997

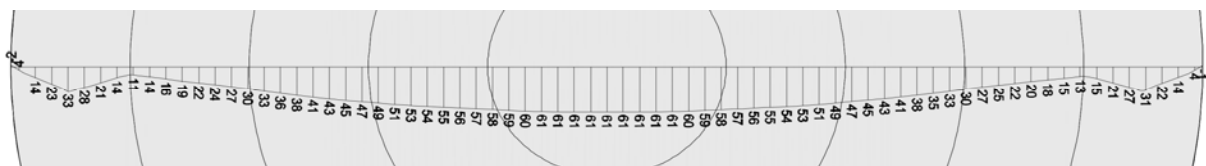
Taivutusmomentti [kNm/m], kun käytetään 3:n iterointikerran alustalukuja elementteittäin



4. Iterointi

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	60.3	266	0.4	-30	236.2	14235	0.020	701970	11647
2	46.9	180	0.4	-30	149.9	7027	0.022	321607	6861
3	33.5	170	0.4	-30	140.3	4696	0.022	210309	6281
4	20.1	171	0.4	-30	141.3	2839	0.023	124056	6175
5	6.7	173	0.4	-30	143.5	961	0.023	41341	6173

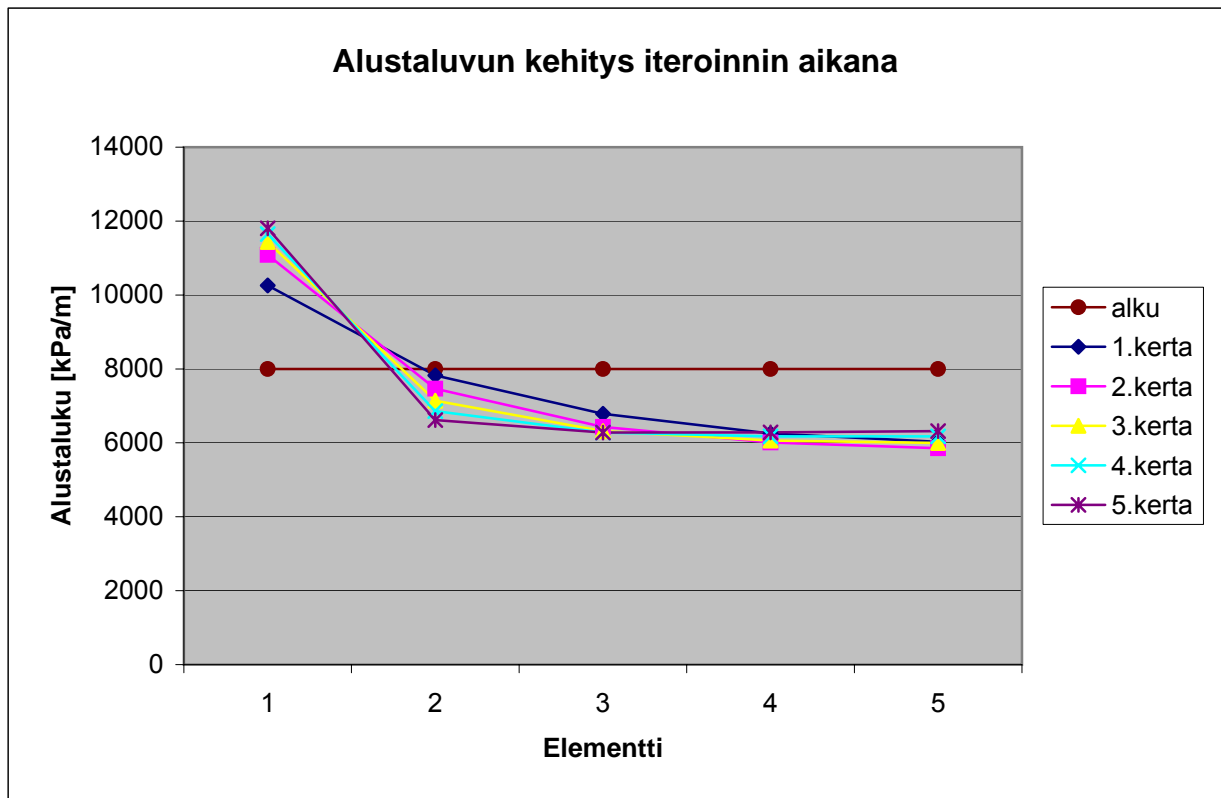
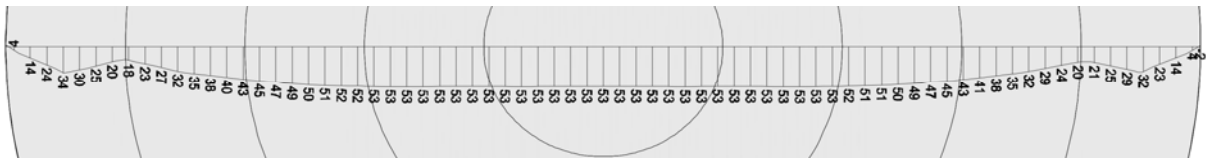
Taivutusmomentti [kNm/m], kun käytetään 4:n iterointikerran alustalukuja elementteittäin

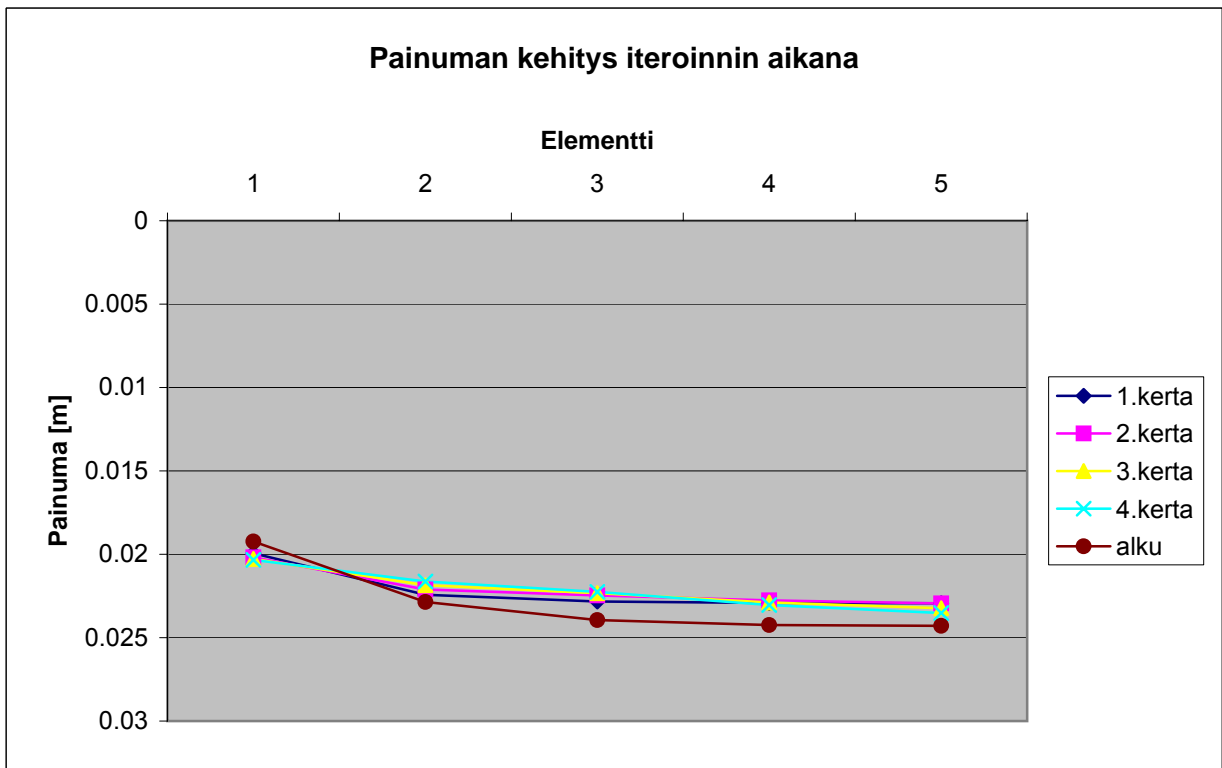
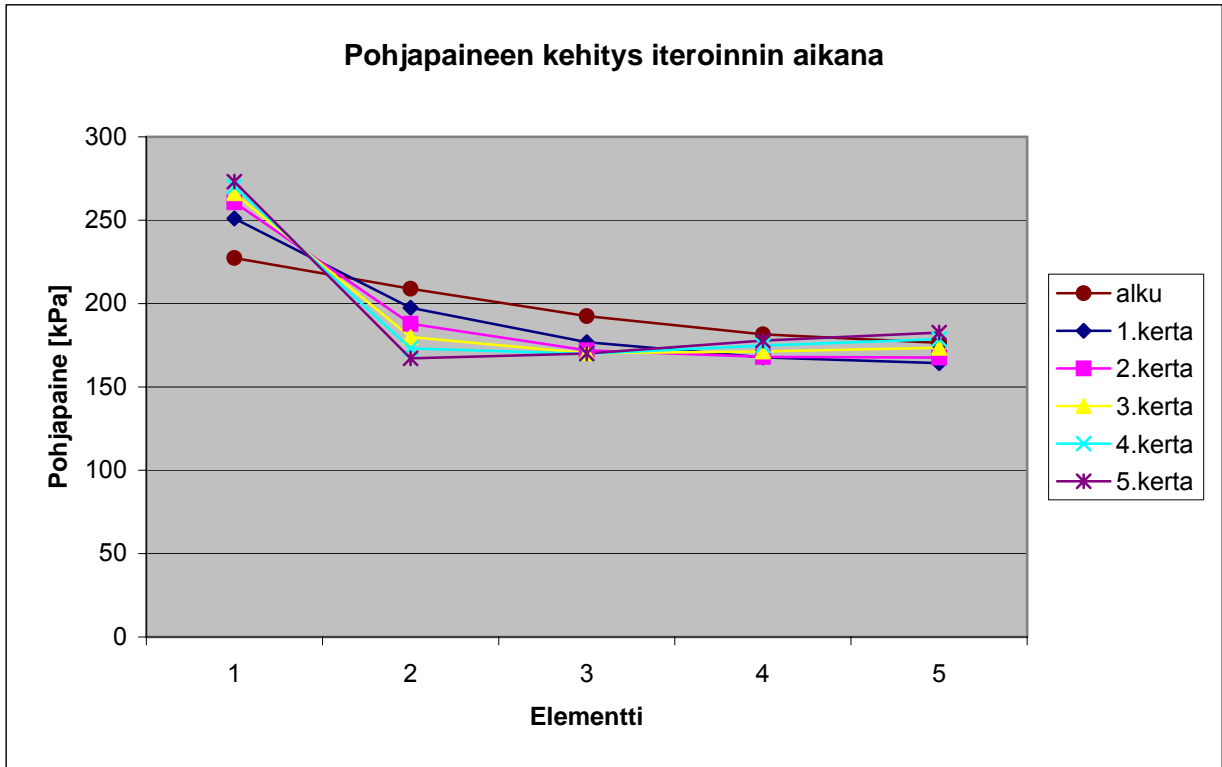


5. Iterointi

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopohjapaine [kPa]	Nettokuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kN/m ³]
1	60.3	270	0.4	-30	240.0	14467	0.020	711410	11804
2	46.9	173	0.4	-30	143.1	6708	0.022	310139	6616
3	33.5	170	0.4	-30	139.8	4680	0.022	210265	6280
4	20.1	175	0.4	-30	144.8	2908	0.023	126205	6282
5	6.7	179	0.4	-30	148.6	995	0.024	42314	6318

Taivutusmomentti [kNm/m], kun käytetään 5:n iterointikerran alustalukuja elementteittäin





Kohde: Polaniecin laattaperustus**Maapohjan ominaisuudet:**

Maakerrokset:

Savi, $h = 50$ m

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

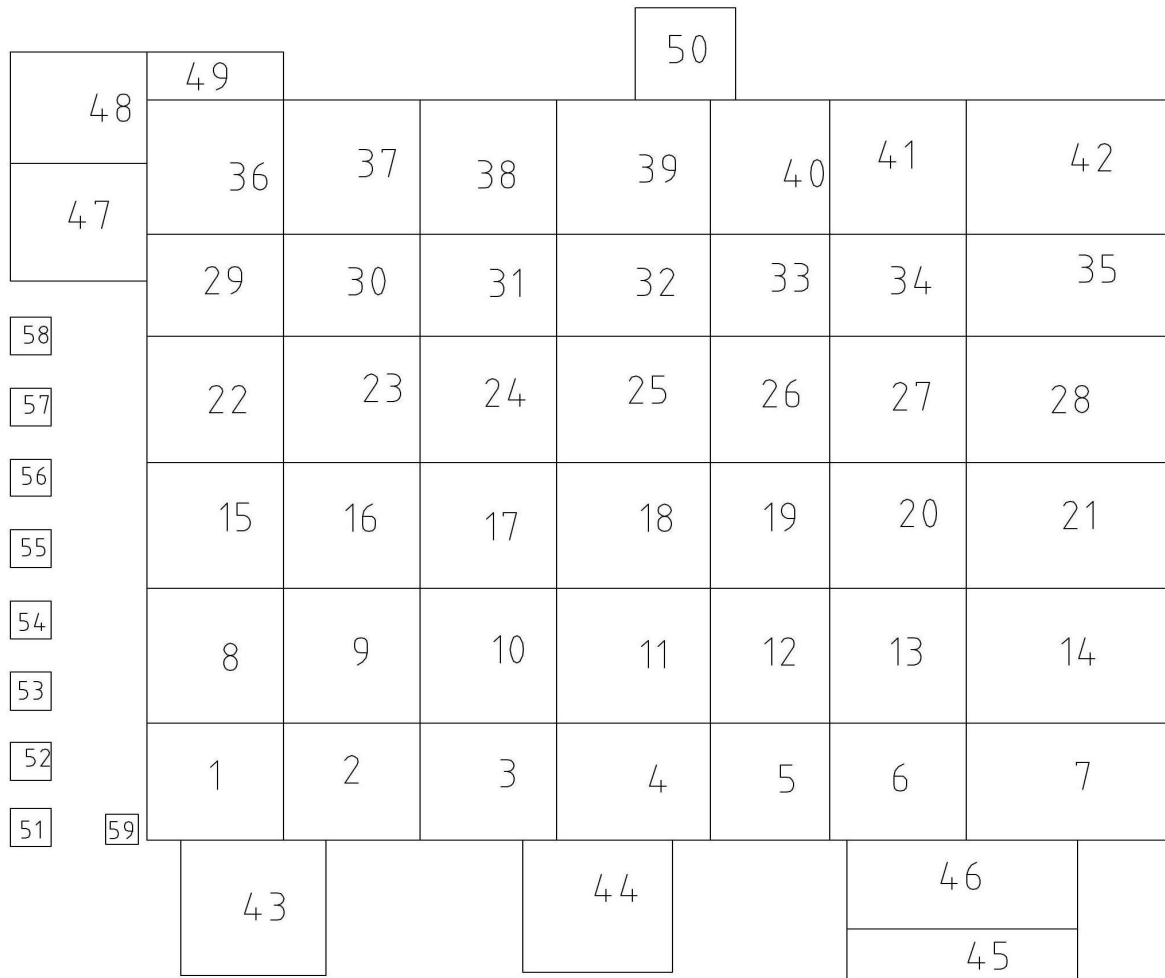
$\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$

Janbun parametrit:

$m = 300 \quad \beta = 1,0 \quad E = 30\,000 \text{ kPa}$

Pohjaveden taso -1,5 m maan pinnasta

Perustamissyvyys -4 m maan pinnasta

Laatan elementtien numerointi:

1. Iterointikerta

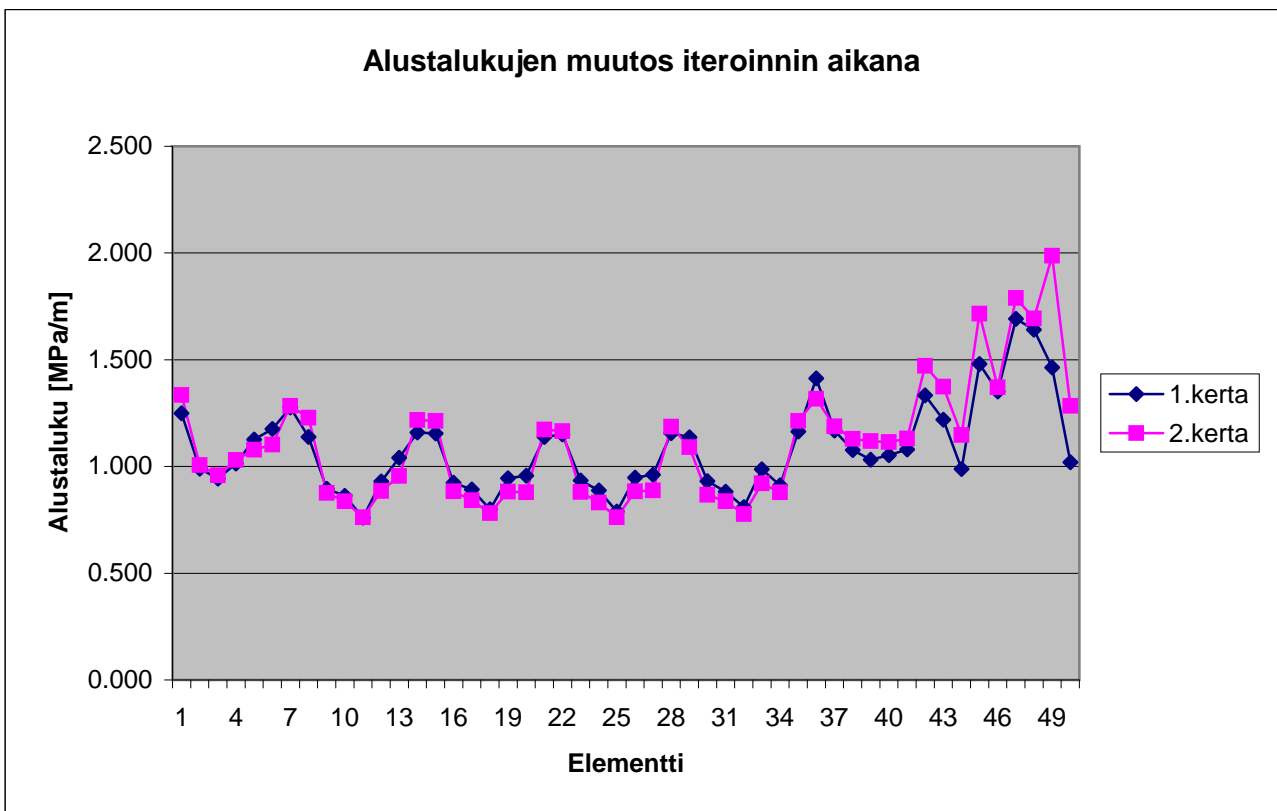
Elem. nro	Ala [m ²]	Pohja-paine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopoh-japaine [kPa]	Netto-kuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [MN/m ³]
1	60	106.2	1.5	-30	76.2	4572	0.061	74951	1.249
2	60	100.3	1.5	-30	70.3	4218	0.071	59408	0.990
3	60	104.5	1.5	-30	74.5	4470	0.079	56582	0.943
4	67.5	122.2	1.5	-30	92.2	6224	0.091	68390	1.013
5	52.5	143.8	1.5	-30	113.8	5975	0.101	59153	1.127
6	60	158.2	1.5	-30	128.2	7692	0.109	70569	1.176
7	96	148.7	1.5	-30	118.7	11395	0.093	122529	1.276
8	68	127.1	2.2	-44	83.1	5651	0.073	77408	1.138
9	68	122.8	2.2	-44	78.8	5358	0.088	60891	0.895
10	68	127.6	2.2	-44	83.6	5685	0.097	58606	0.862
11	76.5	142.3	3.2	-64	78.3	5990	0.103	58155	0.760
12	59.5	151	2.2	-44	107	6367	0.115	55361	0.930
13	68	168.9	2.2	-44	124.9	8493	0.12	70777	1.041
14	102	164.6	2.2	-44	120.6	12301	0.104	118281	1.160
15	64	141	2.2	-44	97	6208	0.084	73905	1.155
16	64	135.5	2.2	-44	91.5	5856	0.099	59152	0.924
17	64	139.5	2.2	-44	95.5	6112	0.107	57121	0.893
18	72	152.8	3.2	-64	88.8	6394	0.111	57600	0.800
19	56	158.3	2.2	-44	114.3	6401	0.121	52899	0.945
20	64	160.7	2.2	-44	116.7	7469	0.122	61220	0.957
21	96	165.8	2.2	-44	121.8	11693	0.107	109279	1.138
22	64	147.5	2.2	-44	103.5	6624	0.09	73600	1.150
23	64	140.2	2.2	-44	96.2	6157	0.103	59775	0.934
24	64	140.8	2.2	-44	96.8	6195	0.109	56837	0.888
25	72	151.5	3.2	-64	87.5	6300	0.111	56757	0.788
26	56	155.8	2.2	-44	111.8	6261	0.118	53058	0.947
27	64	156.4	2.2	-44	112.4	7194	0.117	61484	0.961
28	96	162	2.2	-44	118	11328	0.102	111059	1.157
29	52	150.9	2.2	-44	106.9	5559	0.094	59136	1.137
30	52	138.1	2.2	-44	94.1	4893	0.101	48448	0.932
31	52	133.9	2.2	-44	89.9	4675	0.102	45831	0.881
32	58.5	147.4	3.2	-64	83.4	4879	0.103	47368	0.810
33	45.5	150.5	2.2	-44	106.5	4846	0.108	44868	0.986
34	52	138.8	2.2	-44	94.8	4930	0.104	47400	0.912
35	78	151	2.2	-44	107	8346	0.092	90717	1.163
36	68	160	1.5	-30	130	8840	0.092	96087	1.413
37	68	135.2	1.5	-30	105.2	7154	0.09	79484	1.169
38	68	124.8	1.5	-30	94.8	6446	0.088	73255	1.077
39	76.5	120.8	1.5	-30	90.8	6946	0.088	78934	1.032
40	59.5	122.7	1.5	-30	92.7	5516	0.088	62678	1.053
41	68	120.7	1.5	-30	90.7	6168	0.084	73424	1.080
42	102	127.3	1.5	-30	97.3	9925	0.073	135953	1.333
43	73.1	76.4	1.2	-24	52.4	3830	0.043	89080	1.219
44	73.9	83.3	1.2	-24	59.3	4383	0.06	73058	0.988
45	47.3	120.2	1.2	-24	96.2	4545	0.065	69930	1.480
46	76.3	142.9	1.2	-24	118.9	9069	0.088	103058	1.351
47	60	163.6	1.5	-30	133.6	8016	0.079	101468	1.691

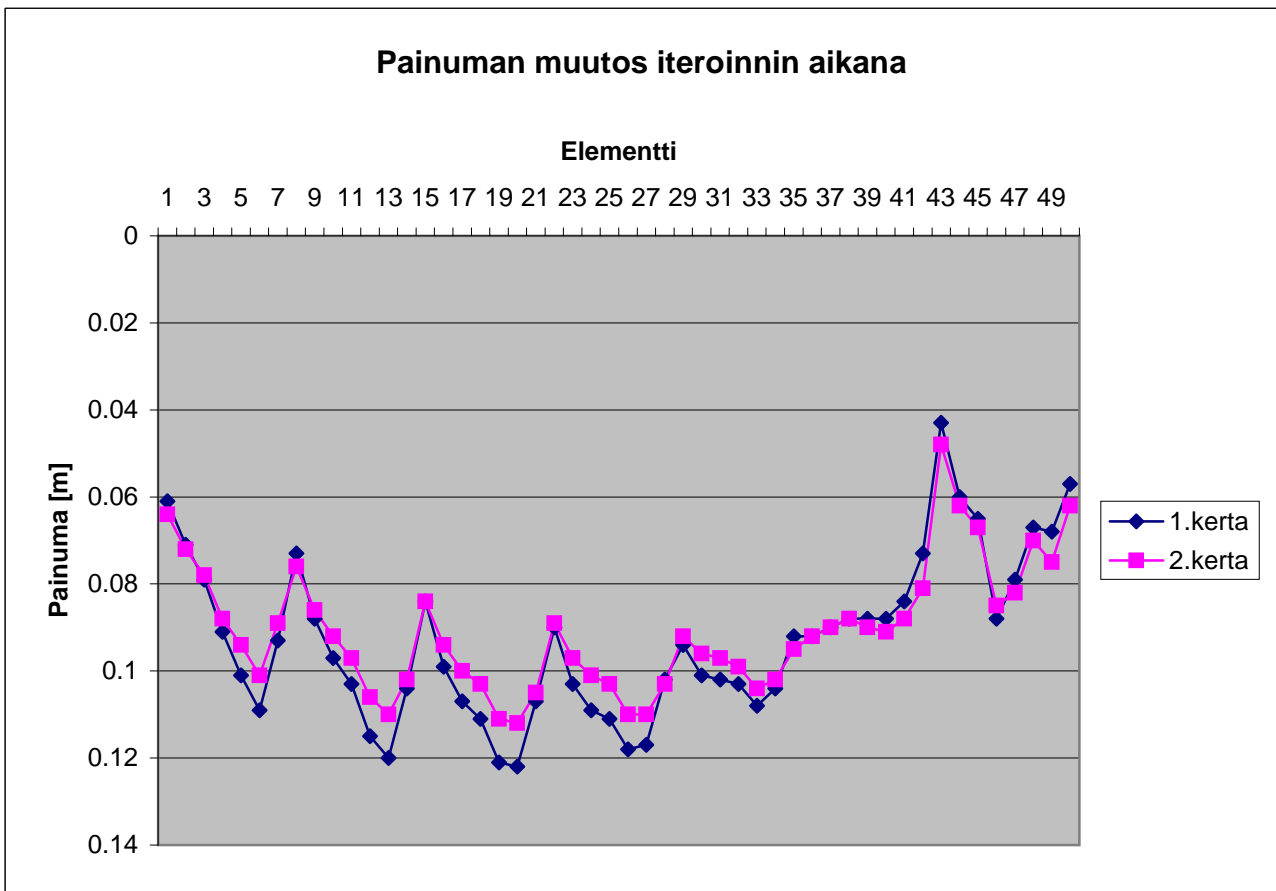
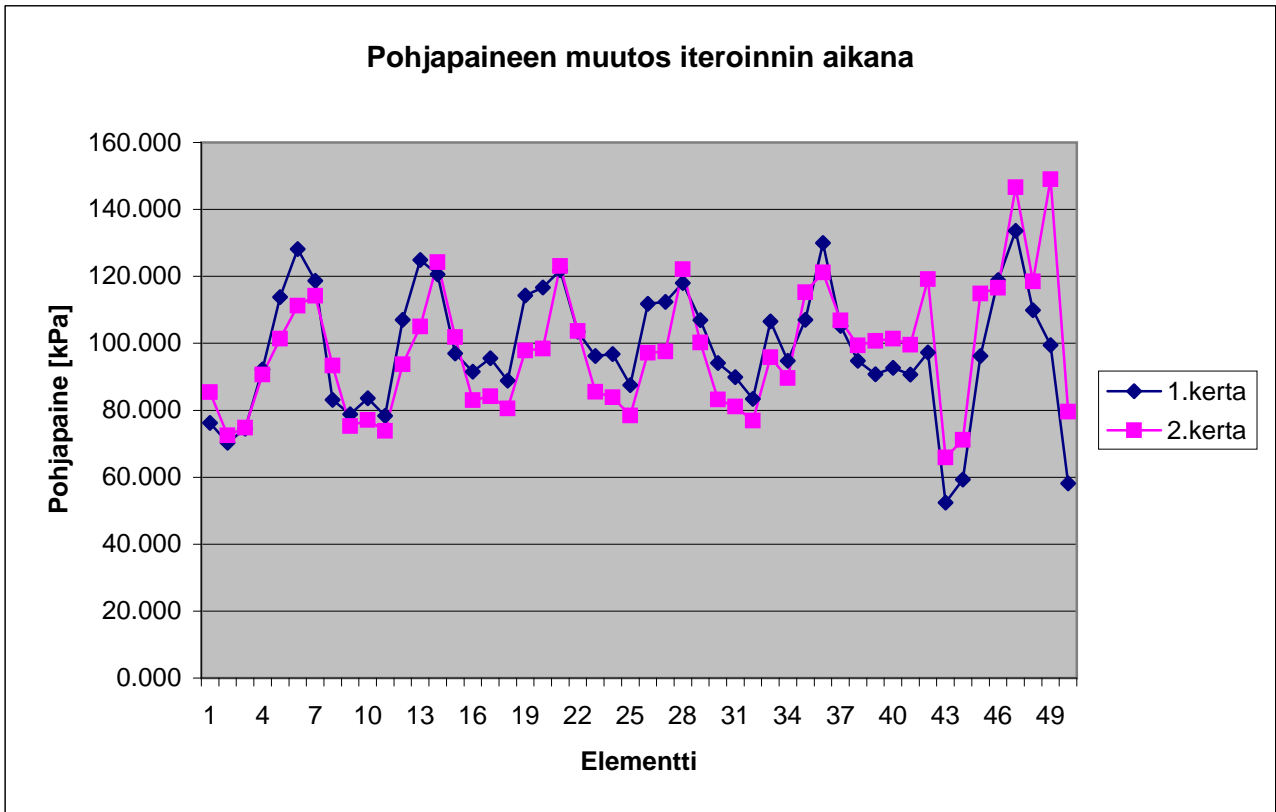
Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjaja ine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopoh- japaine [kPa]	Netto- kuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [MN/m ³]
48	56	139.9	1.5	-30	109.9	6154	0.067	91857	1.640
49	24	129.5	1.5	-30	99.5	2388	0.068	35118	1.463
50	34.2	88.1	1.5	-30	58.1	1988	0.057	34880	1.019
51	5.8	26	0.6	-12	14	81	0.022	3665	0.636
52	5.8	48.8	0.6	-12	36.8	212	0.027	7851	1.363
53	5.8	50.4	0.6	-12	38.4	221	0.031	7135	1.239
54	5.8	51.6	0.6	-12	39.6	228	0.034	6709	1.165
55	5.8	51.6	0.6	-12	39.6	228	0.036	6336	1.100
56	5.8	75.6	0.6	-12	63.6	366	0.04	9158	1.590
57	5.8	77.2	0.6	-12	65.2	376	0.043	8734	1.516
58	5.8	78.8	0.6	-12	66.8	385	0.047	8187	1.421

2. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Kuorma [kN]	Pohjapai ne [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopoh- japaine [kPa]	Netto- kuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [MN/m ³]
1	60	6926	115.4	1.5	-30	85.4	5126	0.064	80094	1.335
2	60	6149	102.5	1.5	-30	72.5	4349	0.072	60403	1.007
3	60	6286	104.8	1.5	-30	74.8	4486	0.078	57513	0.959
4	67.5	8143	120.6	1.5	-30	90.6	6118	0.088	69523	1.030
5	52.5	6896	131.4	1.5	-30	101.4	5321	0.094	56606	1.078
6	60	8476	141.3	1.5	-30	111.3	6676	0.101	66099	1.102
7	96	13844	144.2	1.5	-30	114.2	10964	0.089	123191	1.283
8	68	9340	137.4	2.2	-44	93.4	6348	0.076	83526	1.228
9	68	8111	119.3	2.2	-44	75.3	5119	0.086	59523	0.875
10	68	8231	121.0	2.2	-44	77.0	5239	0.092	56946	0.837
11	76.5	10544	137.8	3.2	-64	73.8	5648	0.097	58227	0.761
12	59.5	8194	137.7	2.2	-44	93.7	5576	0.106	52604	0.884
13	68	10135	149.0	2.2	-44	105.0	7143	0.11	64936	0.955
14	102	17158	168.2	2.2	-44	124.2	12670	0.102	124216	1.218
15	64	9337	145.9	2.2	-44	101.9	6521	0.084	77631	1.213
16	64	8131	127.0	2.2	-44	83.0	5315	0.094	56543	0.883
17	64	8200	128.1	2.2	-44	84.1	5384	0.1	53840	0.841
18	72	10404	144.5	3.2	-64	80.5	5796	0.103	56272	0.782
19	56	7943	141.8	2.2	-44	97.8	5479	0.111	49360	0.881
20	64	9117	142.5	2.2	-44	98.5	6301	0.112	56259	0.879
21	96	16044	167.1	2.2	-44	123.1	11820	0.105	112571	1.173
22	64	9452	147.7	2.2	-44	103.7	6636	0.089	74562	1.165
23	64	8285	129.5	2.2	-44	85.5	5469	0.097	56381	0.881
24	64	8185	127.9	2.2	-44	83.9	5369	0.101	53158	0.831
25	72	10256	142.4	3.2	-64	78.4	5648	0.103	54835	0.762
26	56	7906	141.2	2.2	-44	97.2	5442	0.11	49473	0.883
27	64	9062	141.6	2.2	-44	97.6	6246	0.11	56782	0.887
28	96	15947	166.1	2.2	-44	122.1	11723	0.103	113816	1.186
29	52	7502	144.3	2.2	-44	100.3	5214	0.092	56674	1.090
30	52	6613	127.2	2.2	-44	83.2	4325	0.096	45052	0.866
31	52	6506	125.1	2.2	-44	81.1	4218	0.097	43485	0.836
32	58.5	8243	140.9	3.2	-64	76.9	4499	0.099	45444	0.777
33	45.5	6361	139.8	2.2	-44	95.8	4359	0.104	41913	0.921
34	52	6950	133.7	2.2	-44	89.7	4662	0.102	45706	0.879
35	78	12422	159.3	2.2	-44	115.3	8990	0.095	94632	1.213
36	68	10277	151.1	1.5	-30	121.1	8237	0.092	89533	1.317
37	68	9306	136.9	1.5	-30	106.9	7266	0.09	80733	1.187
38	68	8794	129.3	1.5	-30	99.3	6754	0.088	76750	1.129
39	76.5	10002	130.7	1.5	-30	100.7	7707	0.09	85633	1.119
40	59.5	7816	131.4	1.5	-30	101.4	6031	0.091	66275	1.114
41	68	8810	129.6	1.5	-30	99.6	6770	0.088	76932	1.131
42	102	15213	149.1	1.5	-30	119.1	12153	0.081	150037	1.471
43	73.1	6573	89.9	1.2	-24	65.9	4819	0.048	100388	1.373
44	73.9	7033	95.1	1.2	-24	71.1	5259	0.062	84821	1.147
45	47.3	6563	138.9	1.2	-24	114.9	5429	0.067	81030	1.715
46	76.3	10720	140.5	1.2	-24	116.5	8889	0.085	104581	1.371
47	60	10599	176.7	1.5	-30	146.7	8799	0.082	107305	1.788

Elem. nro	Ala [m ²]	Kuorma [kN]	Pohjapai ne [kPa]	Laatan paksuus [m]	Poistettu maa [kPa]	Nettopoh- japäine [kPa]	Netto- kuorma F [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [MN/m ³]
48	56	8318	148.5	1.5	-30	118.5	6638	0.07	94829	1.693
49	24	4297	179.0	1.5	-30	149.0	3577	0.075	47693	1.987
50	34.2	3749	109.6	1.5	-30	79.6	2722	0.062	43910	1.283
51	5.76	150	26.0	0.6	-12	14.0	81	0.023	3517	0.611
52	5.76	282	49.0	0.6	-12	37.0	213	0.028	7603	1.320
53	5.76	302	52.4	0.6	-12	40.4	233	0.032	7278	1.263
54	5.76	294	51.0	0.6	-12	39.0	225	0.035	6425	1.115
55	5.76	435	75.5	0.6	-12	63.5	366	0.039	9382	1.629
56	5.76	528	91.7	0.6	-12	79.7	459	0.042	10926	1.897
57	5.76	453	78.6	0.6	-12	66.6	384	0.044	8725	1.515
58	5.76	450	78.1	0.6	-12	66.1	381	0.048	7935	1.378
59	4	222	55.5	0.6	-12	43.5	174	0.039	4462	1.115





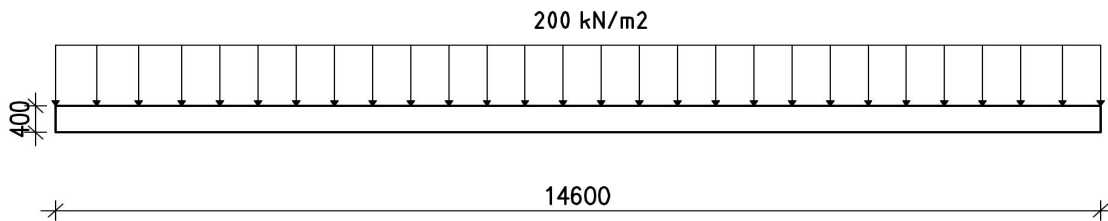
Kohde: Teoreettinen laskentaesimerkki

Laatan mitat: (ympyränmuotoinen laatta)

$$d = 14,6 \text{ m}$$

$$h = 0,4 \text{ m}$$

Laatan kuormitukset:

Pelkkä tasainen pintakuorma $q = 200 \text{ kN/m}^2$ **Maapohjan ominaisuudet:**

Maakerrokset:

Humus, $h = 1 \text{ m}$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

Janbun parametrit:

$$m = 150 \quad \beta = 0,5 \quad c_v = 1$$

tiivis, karkea Si, $h = 14 \text{ m}$

$$\gamma = 19,0 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = 9,0 \text{ kN/m}^3$$

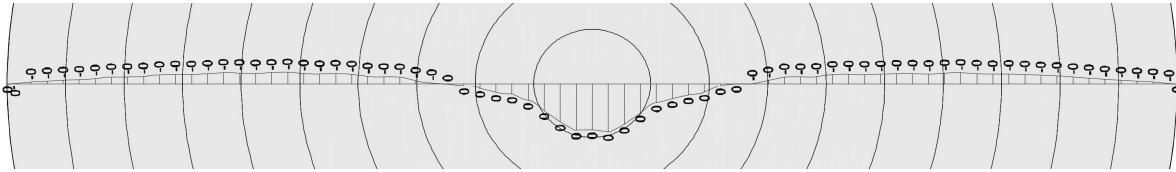
Janbun parametrit:

$$m = 250 \quad \beta = 0,3 \quad c_v = 1$$

Pohjaveden taso -2,5 m maan pinnasta

Perustamissyvyys -2 m maan pinnasta

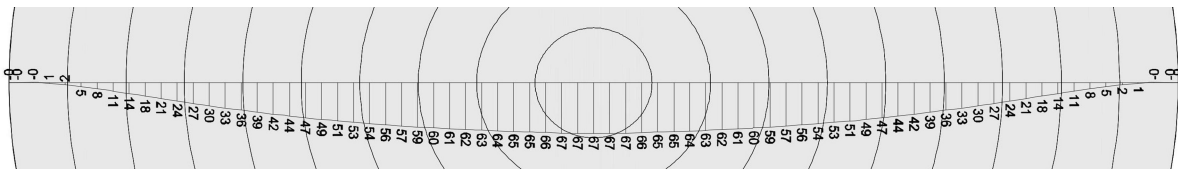
Laatan taivutusmomentti ennen iterointia (0 kNm/m)



1. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kPa/m]
1	31.8	210.0	0.4	6680	0.026	254812	8011
2	28.5	210.0	0.4	5977	0.030	198546	6976
3	25.1	210.0	0.4	5274	0.032	163601	6515
4	21.8	210.0	0.4	4570	0.034	135485	6225
5	18.4	210.0	0.4	3867	0.035	110943	6024
6	15.1	210.0	0.4	3164	0.036	88600	5880
7	11.7	210.0	0.4	2461	0.036	67688	5776
8	8.4	210.0	0.4	1758	0.037	47766	5706
9	5.0	210.0	0.4	1055	0.037	28430	5661
10	1.7	210.0	0.4	352	0.037	9440	5639

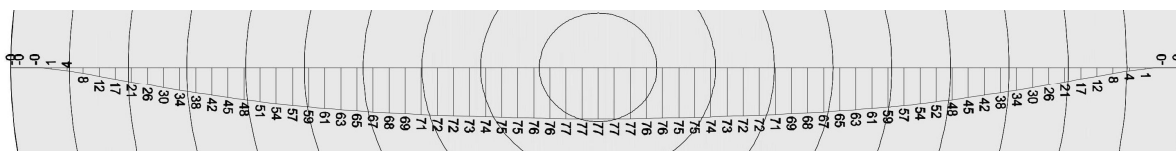
Taivutusmomentti 1:n iterointikerran jälkeisillä alustaluvuilla [kNm/m]



2. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kPa/m]
1	31.8	233.9	0.4	7440	0.027	273084	8585
2	28.5	211.3	0.4	6013	0.030	198525	6975
3	25.1	204.4	0.4	5133	0.032	160981	6411
4	21.8	201.9	0.4	4394	0.033	132760	6100
5	18.4	201.2	0.4	3705	0.034	108718	5903
6	15.1	201.4	0.4	3035	0.035	87032	5776
7	11.7	202.0	0.4	2367	0.036	66675	5689
8	8.4	202.7	0.4	1697	0.036	47186	5637
9	5.0	203.3	0.4	1021	0.036	28143	5604
10	1.7	203.6	0.4	341	0.036	9354	5588

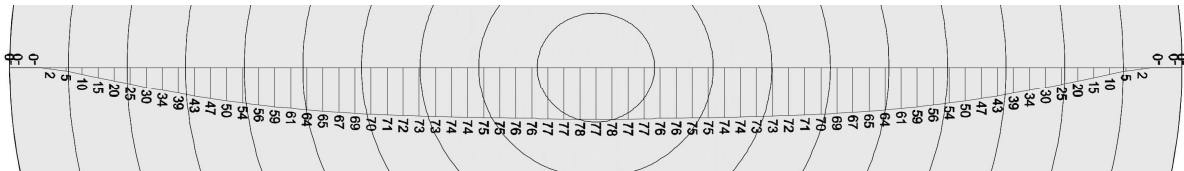
Taivutusmomentti 2:n iterointikerran jälkeisillä alustaluvuilla [kNm/m]



3. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kPa/m]
1	31.8	244.4	0.4	7774	0.028	281399	8847
2	28.5	208.0	0.4	5921	0.030	196180	6893
3	25.1	199.9	0.4	5019	0.032	158775	6323
4	21.8	198.1	0.4	4311	0.033	131389	6037
5	18.4	198.5	0.4	3656	0.034	108051	5867
6	15.1	200.2	0.4	3016	0.035	86874	5766
7	11.7	202.0	0.4	2367	0.035	66791	5699
8	8.4	203.8	0.4	1706	0.036	47415	5664
9	5.0	205.1	0.4	1030	0.036	28336	5642
10	1.7	205.8	0.4	344	0.037	9426	5631

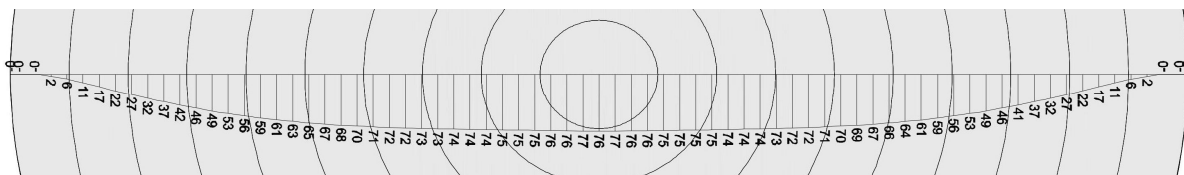
Taivutusmomentti 3:n iterointikerran jälkeisillä alustaluvuilla [kNm/m]



4. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kPa/m]
1	31.8	250.1	0.4	7956	0.028	286072	8993
2	28.5	204.8	0.4	5828	0.030	193946	6814
3	25.1	196.9	0.4	4944	0.031	157316	6265
4	21.8	196.2	0.4	4269	0.033	130686	6005
5	18.4	197.7	0.4	3641	0.034	107839	5856
6	15.1	200.4	0.4	3020	0.035	86966	5772
7	11.7	203.0	0.4	2379	0.036	67001	5717
8	8.4	205.5	0.4	1720	0.036	47644	5692
9	5.0	207.2	0.4	1041	0.037	28504	5676
10	1.7	208.0	0.4	348	0.037	9488	5668

Taivutusmomentti 4:n iterointikerran jälkeisillä alustaluvuilla [kNm/m]



5. Iterointikerta

Elem. nro	Ala [m ²]	Pohjapaine [kPa]	Laatan paksuus [m]	Netto-kuorma [kN]	Painuma [m]	Jousi [kN/m]	Alustaluku [kPa/m]
1	31.8	253.6	0.4	8067	0.028	289018	9086
2	28.5	202.2	0.4	5755	0.030	192199	6753
3	25.1	195.0	0.4	4897	0.031	156445	6230
4	21.8	195.2	0.4	4248	0.033	130358	5990
5	18.4	197.5	0.4	3637	0.034	107794	5853
6	15.1	200.8	0.4	3025	0.035	87072	5779
7	11.7	203.8	0.4	2388	0.036	67155	5730
8	8.4	206.6	0.4	1730	0.036	47798	5710
9	5.0	208.5	0.4	1047	0.037	28610	5697
10	1.7	209.5	0.4	351	0.037	9524	5689

Taivutusmomentti 5:n iterointikerran jälkeisillä alustaluvuilla [kNm/m]

