

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Yhdyskuntatekniikka

Mikko Mielonen

PAINUMALASKELMAMENETELMIEN ARVIOINTI

Työn valvoja

Diplomi-insinööri Hannele Kulmala

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Matti Honkaniemi

Tekijä: Mikko Mielonen
Työn nimi: Painumalaskelmamenetelmien arviointi
Sivumäärä: 64+24
Valmistumisaika: 12/2010
Työn ohjaaja: DI Hannele Kulmala, TAMK
Työn tilaaja: FCG Finnish Consulting Group Oy

TIIVISTELMÄ

Painumat ovat oleellinen osa pohjarakentamista. Kaikkien rakenteiden teossa on huomioitava painumien vaikutus valmiiseen rakennelmaan. Esimerkiksi siltojen ja talojen rakentamisessa tämä on oleellinen osa rakenteiden kestävyyttä mitoittaessa.

Tämän työn tarkoituksena on vertailla esimerkkikohteiden toteutuneita painumia ohjelmistoilla laskettuihin arvioihin. Lisäksi vertaillaan ohjelmilla saatuja arvoja toisiinsa ja tarkastellaan eri ohjelmistojen vaatimia lähtöarvoja. Tavoitteena on selvittää laskentaan vaikuttavia tekijöitä ja ohjelmistojen tulosten luotettavuutta.

Teoriaosuudessa selvitetään perusteet painumalaskelmissa käytetyistä teorioista ja yleisimpiä käytettyjä menetelmiä. Tämän lisäksi tutustutaan eri laskentaohjelmien laskentaperiaatteisiin ja niiden teoriataustaan. Laskentaohjelmoina käytetään seuraavia ohjelmistoja: Geocalc, Geomitoitus Smura, Settle 3D ja Plaxis. Kohteiksi on valittu Sipoonrannan painopenger, Kemiran tehtaan fosforihapposäiliö ja Onnisen pystyöjitettu painopenger.

Tutkimustyötä tehdessä havaittiin, että ohjelmistoilla lasketut painumat ovat suhteellisen lähellä toteutuneita painumia ja ohjelmien väliset erot ovat pieniä. Painumatilanne on pyritty mallintamaan kaikilla ohjelmilla samanlaiseksi, mutta niissä on kuitenkin pieniä eroja. Tämä selittää hieman osaltaan ohjelmien toisistaan poikkeavia tuloksia. Kaikkien ohjelmien peruskäyttö oli helppoa ja niiden tarjoamat edistyneemmät mallintamiset vaativat laajemman perehtymisen. Kaikki ohjelmistot tarjoavat hyvät mahdollisuudet painumien tarkasteluun.

Writer: Mikko Mielonen
Thesis: Analysis of settlement calculating methods
Number of pages: 64+24
Graduation time: 12/2010
Thesis supervisor: Di Hannele Kulmala, TAMK
Co-operating Company:FCG Finnish Consulting Group Oy

ABSTRACT

Settlements are an essential part of ground engineering. One has to take settlement in consideration while planning any kind of construction. For example, in bridge and house building it is a relevant part of calculating the durability of the structure.

The purpose of this thesis is to compare calculated settlements to measured ones at three different worksites. Additionally, I compare the calculated results to each other and the needed parameters for different programs. The goal is to clarify things that have effect on the results and to compare the reliability of all the programs.

Theory part of the thesis is for clearing out the theories and the most used methods for settlement calculations. Furthermore, I go through the calculation programs, their computing precepts and theories. For calculating software I selected the next programs: GeoCalc, Geomitoitus Smura, Settle 3D and Plaxis. The worksites were an embankment in Sipoonranta, a phosphoric acid tank at Kemira facility and a wick drained embankment in Onninen.

In this research we come to the conclusion, that calculations from all programs were very close to the measured values and dispersion among the programs was sparse. The settlement circumstances aimed at being the exact same for all programs but there are small differences among the calculation models. This partly explains the difference in the results. As for all programs, the basics were easy to use, but using more accurate modeling would have taken a longer introduction. All programs suit well for settlement analysis.

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
MERKINNÄT	6
1 JOHDANTO	8
2 KIRJALLISUUSOSUUS	10
2.1 Teorian käsittely	10
2.2 Painumien muodostuminen	11
2.2.1 Alkupainuma	12
2.2.2 Konsolidaatiopainuma	13
2.3 Pohjatutkimukset	15
2.3.1 Kairaukset	16
2.3.2 Näytteenotto	18
2.3.3 Pohjavesitutkimukset	23
2.4 Jännitystilän muutokset maaperässä	24
2.4.1 Likimääräismenetelmä	24
2.4.2 Boussinesqin teoria	25
2.5 Maakerrosten rakenne ja hydrauliset ominaisuudet	27
2.6 Kokoonpuristuvuusparametrit	28
2.6.1 Tangenttimodulimenetelmä	28
2.6.2 Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä	30
2.6.3 Sekanttimodulimenetelmä	31
2.6.4 Vesipitoisuuteen perustuvat menetelmät	32
2.7 Esikonsolidaatiojännityksen määrittäminen painumalaskennassa	35
2.8 Painumiin vaikuttaminen	36
2.6.1 Pystyjoitus	36
2.6.2 Syvästabilointi	37
2.6.2 Perustusten vienti painumattomaan kerrokseen	37
2.6.2 Massanvaihto	38
3 LASKENTAOHJELMAT	39
3.1 Numeeriset menetelmät	39
3.2 Elementtimenetelmä (FEM)	40
3.2.1 Elementtimenetelmän edut	42
3.2.2 Elementtimenetelmän rajoitukset	42
3.3 GeoCalc	42
3.4 Geomitoitus Smura	43
3.5 Plaxis	44
3.5.1 Teoria	45

3.5.2 Parametrien syöttäminen.....	45
3.6 Settle 3D.....	47
4 TUTKIMUSKOHTEIDEN PAINUMAT	48
4.1 Kemira, Kokkola, Kemiran tehtaiden fosforihapposäiliön painumaseuranta	48
4.1.1 Pohjatutkimustiedot	49
4.1.2 Laskennan tulokset.....	49
4.1.3 Tulosten arviointi	49
4.2 Onninen, Lahti, pystyöjitetun penkereen painumaseuranta	50
4.2.1 Pohjatutkimustiedot	51
4.2.2 Laskennan tulokset.....	51
4.2.3 Tulosten arviointi	52
4.3 Sipoon-ranta, Sipoo, syvästabiloidun penkereen painumaseuranta	52
4.3.1 Pohjatutkimustiedot	53
4.3.2 Laskennan tulokset.....	54
4.3.3 Tulosten arviointi	54
5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	55
5.1 Yleistä	55
5.2 Parametrien määrittäminen.....	56
5.2.1 Pohjatutkimukset.....	56
5.2.2 Laskentaparametrit.....	57
5.2.3 Ylikonsolidaation antaminen	58
5.3 Ohjelmistot.....	58
5.4 Laskentojen tulokset	59
LÄHDELUETTELO.....	62
LIITTEET	64

Liitteiden sisällysluettelo s. 64.

MERKINNÄT

Kreikkalaiset aakkoset

β = jännityseksponentti

γ' = tilavuuspainoveden alla

γ_s = kivirakeiden paino

γ_w = veden tilavuuspaino

$\Delta\epsilon$ = suhteellisen kokoonpuristuman lisäys

σ_c = konsolidaatiojännitys

$\Delta\sigma$ = kokoonpuristuvuuskokeen jännityslisäys

$\Delta\sigma_i$ = jännitysvälit 1 – i

δ_z = pystyjännitys syvyydellä z

ϵ = suhteellinen kokoonpuristuma

ϵ = kokoonpurustuma

ν = Poissonin luku

φ = kitkakulma

ψ = dilaatiokulma

Roomalaiset aakkoset

c = koheesio

C_c = kokoonpuristuvuusindeksi

c_v = konsolidaatiokerroin

e = maan hukosluku, kun pystysuora kuormitus on σ_z

E_{50} = sekanttimoduli

E_{ur} = palautusmoduli

E_{oed} = esikuormituksen aikainen tangenttimoduli

k = virtausnopeus

k_c = kerroin, yleensä 0,85, vaihteluväli $0,5 < k_c < 1,5$

M = kokoonpuristuvuusmoduuli

m = moduuliluku

M_{s_i} = sekanttimodulit väleillä 1 – i

n = huokoisuus

P = pistejännitys

S = kokonaispainuma

S_i = alkupainuma

S_k = konsolidaatiopainuma

S_τ = sivusiirtymän aiheuttama painuma

S_s = jälkipainuma

t = aika konsolidaatioprosessin alusta

u = huokospaine

V = koko näytteen tilavuus

V_h = huokostilavuus

V_s = kiviaineksen tilavuus

w = vesipitoisuus

Lyhenteet

OCR = ylikonsolidaatioaste

POP = ylikonsolidaatio

1 JOHDANTO

Tutkimuksen tausta

Geoteknisistä laskelmista painumalaskelmat ovat yksi käytetyimmistä muodoista. Painumien laskeminen on tärkeä osa niin infra- kuin talonrakentamistakin. Painumien määrittäminen valmistuville rakenteille on tärkeä osa rakenteen käyttöikä ja korjauskustannuksia määrittäessä.

Maaperästä saatujen tutkimuspohjaisten arvojen avulla voidaan laskea painumien suuruuksia. Nykyisin laskentaan käytetään mitoitusohjelmia, joilla voidaan saada kohteesta riippuen suuriakin tuloseroja. Lisäksi suunnittelijalla ei usein ole kaikkia tarvittavia parametreja tiedossaan, joten laskelmien paikkansapitävyys riippuu usein käyttäjän henkilökohtaisesta kokemuksesta.

Painumien väärinarvioinnilla voi olla todella merkittäviä vaikutuksia rakentamiseen ja valmiin rakennuksen korjaus- ja kunnossapitokuluihin. Laskelmien onnistumisen kannalta on tärkeää saada vertailukelpoista tietoa mitoitusohjelmien arvoista ja niiden suhteesta toteutuneisiin painumiin.

Tutkimusmenetelmät

Työn teoriaosassa käsitellään painumaan liittyviä teorioita. Lisäksi selvitetään, mitä teorioita laskentaohjelmat käyttävät ja millaisia arvoja ohjelmaan on syötettävä tulosten saamiseksi.

Työn tutkimusosassa käsitellään kolmen toteutuneen kohteen painumalaskelmia eri ohjelmilla ja niiden tulosten eroja. Näitä arvoja vertaillaan myös mitattuihin arvoihin. Käytettävät mitoitusohjelmat ovat Geocalc, Geomitoitus Smura, Plaxis ja Settle 3D.

Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Työn tavoitteena on saada vertailukelpoiset laskelmat eri ohjelmista.

Laskentakohteina toimivat huomattavan erilaiset kohteet, joten samalla saadaan myös

tietoa ohjelmien soveltuvuudesta eri laskentatapauksiin. Tutkimuksessa selviävät myös eri ohjelmistojen tarvitsemat lähtöarvot, jotta voitaisiin valita nopein suunnitteluohjelma käytännön projektitöihin.

Tutkimuksessa käytettyjen kohteiden pohjaolosuhteet, käyttötarkoitukset ja lähtötiedot ovat hyvin vaihtelevia. Laskentaparametrit määritellään kunkin kohteen kairaus- ja näytteenottopöytäkirjoista.

Käsittelen työssä laajemmin konsolidaatiopainumaa ja siihen liittyviä teorioita. Muiden painumalajien merkitys laskennassa on usein pieni tai olematon. Tietokoneohjelmat laskevat myös muita painumalajeja mallintaessaan maaperän käyttäytymistä, mutta suurin painuma rakennetuilla alueilla muodostuu kuitenkin konsolidaatiosta.

Työssä käsitellään lyhyesti painumien hallintaan käytettyjä menetelmiä, mutta niiden teoriaan ei paneuduta syvällisesti.

Työn lukijan oletetaan tuntevan perusteet geotekniikasta ja fysiikasta. Painumien teorian käydään lävitse hieman tarkemmalla tasolla ja ohjelmistojen laskentaperiaatteet lyhyesti.

2 KIRJALLISUUSOSUUS

2.1 Teorian käsittely

Käsittelen erilaisiin painumatyyppeihin liittyviä teorioita ja lähtöarvojen hankintamenetelmiä jaettuna seitsemään pääkappaleeseen.

Aluksi selvitän painumista yleistasolla. Kappaleessa käydään läpi painumien muodostuminen ja painumalajien esittely.

Toiseksi esittelen millaisilla menetelmillä maaperästä hankitaan tietoa ja miten niitä voidaan käyttää hyväksi painumia laskettaessa. Käsittelen yleisimmät menetelmät, joista saadaan tarvittavat arvot painuman laskemiseksi.

Seuraavaksi käsittelen jännityksen jakautumista maaperässä. Selvitän kaksi ylivoimaisesti yleisintä menetelmää, toinen käsin laskennassa käytetty ja toinen useimpien ohjelmistojen pohjana oleva.

Tämän jälkeen käsittelen laskennoissa yleensä käytettyjä rakenteellisia ja hydraulisia ominaisuuksia. Laskennoissa käytetään yleensä tilavuuspainoa ja vedenjohtavuutta. Kumpaakin mitataan usein muiden laboratoriokokeiden yhteydessä.

Maakerroksien määrittämisessä valitaan myös erilaisia kokoonpuristuvuusparametreja. Niiden avulla suoritetaan itse laskenta ja myös suurimmat riskit virheille ovat juuri näissä. Kokemuksella parametrien oikeellisuudesta ja käyttäytymisestä sekä niiden tuloperiaatteiden ymmärtämisellä on suuri merkitys laskennan luotettavuudelle.

Selvittelen lyhyesti ylikonsolidoitumisen mallintamista varten kehitettyjä keinoja. Esittelen kaksi menetelmää, jotka ovat käytössä laajalti ympäri maailmaa.

Lopuksi käsittelen lyhyesti, miten painuma-aikaan ja -määrään voidaan vaikuttaa. Suomessa esimerkiksi pääkaupunkiseudulla on todella hankalia pohjaolosuhteita ja uudisrakentamisessa joudutaan väistämättä myös käsittelemään maaperää etukäteen. Esittelen muutaman yleisimmän keinon painumanhallintaan.

2.2 Painumien muodostuminen

Maaperän jännitystilän muutokset aiheuttavat painumia. Muutoksia tulee useimmiten rakenteiden aiheuttamista kuormituksista, mutta myös pohjavedenpinnan laskeminen tai nouseminen aiheuttaa muutoksia jännitystilassa.

Kuormitustilojen synnyttämiä jännitys jakaumia on tutkittu runsaasti teoria- ja koepohjaisesti. Tarkasteluissa usein oletetaan maaperä äärettömäksi ja tasalaatuiseksi puoliavaruudeksi. Vaikka tämä on lähtökohtaisesti väärä oletamus, se ei aiheuta laskennassa suuria virheitä. Suurempia virheitä aiheuttaa maaperän kerrosrakenteiden tuntemisen epätarkkuus. (Rantamäki, Jääskeläinen & Tammirinne 1979, 212)

Maa on materiaalina epähomogeeninen, epäjatkuva ja anisotrooppinen koostuen maainertäpartikkeleista, vedestä ja ilmasta. Maan mekaaniseen käyttäytymiseen vaikuttavat muun muassa seuraavat seikat:

- mineraalikoostumus ja mineraalien lujuus
- raekoon vaihtelu
- rakeiden muoto ja pinnan rakenne
- koheesio
- rakeiden asento toisiinsa nähden
- kosteusvaihtelut
- aika
- kuormitustapa
- jännityspolku ja jännityshistoria
- huokospaine
- erilainen käyttäytyminen avoimessa ja suljetussa tilassa

(Mansikkamäki 2009, 28)

Painumat voidaan jakaa neljään painumalajiin seuraavasti:

Kaava (1) painumalajit.

$$S = S_i + S_k + S_\tau + S_s \quad (1)$$

jossa

S = kokonaispainuma

S_i = alkupainuma

S_k = konsolidaatiopainuma

S_τ = sivusiirtymän aiheuttama painuma

S_s = jälkipainuma

Sivusiirtymien aiheuttama painuma ja jälkipainuma ovat merkitykseltään vähäisempiä verrattuna muihin painumalajeihin. Sivusiirtymien aiheuttamien painumien määrittämiseen ei ole keksitty vielä luotettavaa menetelmää. Niiden ilmeneminen vaatii plastisen muodonmuutoksen ja murtorajatilan lähellä olevaa tapausta, siksi niitä ei käytännön rakentamisessa juuri tapahdu. Näiden painumien esiintyminen pyritään kumoamaan käyttämällä tarpeeksi suurta varmuutta murtoa vastaan. Jälkipainumien syntyminen alkaa vasta konsolidaatiopainuman jälkeen, eli jopa vuosikymmenten päästä jännitystilän muutoksesta. Jälkipainuma jää usein myös suuruusluokassa vähäiseksi verrattuna konsolidaatiopainumaan. Humuspitoisissa savissa jälkipainuma voi olla merkittävää luokkaa, mutta rakenteita ei normaalisti perusteta tällaiselle maaperälle. (Rantamäki ym. 1979, 207)

Käsittelen lyhyesti, mitä tarkoitetaan alkupainumalla ja tarkemmin konsolidaatiopainuman, sillä sen laskeminen on lähes kaikissa tapauksissa tärkeintä, koska konsolidaatiopainuma muodostaa lähes koko painuman useimmissa tapauksissa. (Jääskeläinen 2009, 119)

2.2.1 Alkupainuma

Alkupainumalla tarkoitetaan kimmoisia muodonmuutoksia maakerroksissa. Maa pullistuu hieman sivuttaissuunnassa ja jännityksen reunoilla ylöspäin. Kimmoinen muodonmuutos poistuu, jos jännitys palautetaan alkuperäiseen. Ilmiö ei muodosta tilavuudenmuutosta maakerroksissa. (Rantamäki 1979, 145)

Koheesiomailla alkupainuma tarkoittaa maakerrostumien pieniä muodonmuutoksia ja rakeiden liukumista toisiinsa nähden. Vesipitoisuus ei kuitenkaan muutu tapahtumien aikana. (Jääskeläinen 2009, 119)

Kitkamailla alkupainuma tarkoittaa rakeiden siirtymistä ja huokosten ilman ja veden poistumista. Tästä johtuen kitkamaiden muodonmuutokset lasketaan usein kokonaan joko alkupainumana tai yleisemmin konsolidaatiopainumana. (Rantamäki ym. 2009, 119)

2.2.2 Konsolidaatiopainuma

Konsolidaatiopainumalla tarkoitetaan painumaa, jossa maan kokonaistilavuus pienenee. Ilmaa ja vettä poistuu huokosista. Tämä tapahtuu luonnollisesti nopeammin suurirakeisilla maalajeilla kuin hienorakeisilla. Konsolidaatiopainuma ei palaudu, vaikka kuormitus poistettaisiin. (Rantamäki ym. 1979, 209)

Hienorakeisten maalajien konsolidaatiopainuma on hidasta, koska maan vedenläpäisevyys on pientä. Painumissa on kuitenkin normaalioloissa tiedostettava, että veden ja kiven kimmomoduulit ovat niin suuria, etteivät niiden muodonmuutokset ole merkittäviä. Painuma muodostuu kokonaan huokostilan pienenemisestä. (Jääskeläinen 2009, 119)

Terzaghin laki

Terzaghi esitti 1900-luvun alkupuolella lain, jonka mukaan konsolidaatiosta aiheuttavaa jännitystä vastustaa huokosvedenpaine. Näin saadaan jännitykselle kaava 2:

Kaava (2) Terzaghin laki.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2)$$

jossa

σ = kokonaispystyjännitys

σ' = tehokas pystyjännitys

u = huokospaine

Terzaghin yksiulotteinen konsolidaatioteoria

Tämä klassiseksi konsolidaatioteoriaksi kutsuttu teoria voidaan esittää seuraavasti

Kaava (3) Terzaghin konsolidaatioteoria.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3)$$

jossa

u = huokosveden ylipaine syvyydessä z hetkellä t

t = aika konsolidaatioprosessin alusta

z = syvyys

c_v = konsolidaatiokerroin

Kaava (4) Konsolidaatiokerroimen määrittäminen.

$$c_v = \frac{k \cdot M}{\gamma_w} \quad (4)$$

jossa

k = virtausnopeus

M = kokoonpuristuvuusmoduuli

γ_w = veden tilavuuspaino

Teoriassa tehdään seuraavat oletukset:

- Maa on homogeenistä.
- Maa on kyllästettyä.
- Maa-aines ja vesi eivät kokoonpuristu.
- Yksiulotteinen kokoonpuristuma.
- Yksiulotteinen virtaus.
- Darcyn laki pätee.
- Vedenläpäisevyys on koko ajan sama.
- Kokoonpuristuvuus on koko ajan yhtä suurta.
- Kuivuminen tapahtuu tasaisesti.
- Painetta aiheuttavan jännityksen ja huokosvedenpaineen summa on yhtä suuri kuin lisätty kuorma.
- Konsolidaatiossa kestävä aika johtuu vain huonosta vedenjohtavuudesta.

(John Lowe III 1974, 344)

Osa alkuperäisistä olettamuksista on sittemmin todettu vääräksi, mutta niiden muodostamat virheet ovat pieniä. Maamekaniikassa yleistyksiset ovat hyväksyttäviä, sillä maakerrosten tutkiminen rae kerrallaan olisi liian kallista.

Kolmiulotteinen konsolidaatioteoria

Maurice A. Biot julkaisi teoksessaan General Theory of Three-Dimensional Consolidation 1940 Terzaghin teorian johtamisen kolmiulotteiseksi. Biotin Teoriassa pätevät samat oletukset kuin klassisessa konsolidaatioteoriassa. (Biot 1941, 155) Sitä on käytetty muun muassa Plaxis-ohjelmiston pohjana.

Muita konsolidaatioteorioita

Erilaisille maalajeille ja erilaisiin tilanteisiin on luotu huomattavan monta konsolidaatioteoriaa. Niissä mallinnetaan erilaisilla parametreilla maaperää tarkemmin kuin Terzaghin yksiulotteisessa konsolidaatioteoriassa. Esimerkkeinä mainittakoon muutama maailmalla laajalti käytössä oleva teoria:

- Koppejan 1948
- Bjerrum 1967
- Janbu 1969.

2.3 Pohjatutkimukset

Pohjatutkimuksilla tarkoitetaan maa- ja kallioperän tutkimuksia, joiden tarkoituksena on määrittää niiden rakennetta ja ominaisuuksia. Pohjatutkimukset ovat oleellinen osa niin kaavoitusta kuin maanrakennustakin. Maanrakennuksessa käytettävän materiaalin ominaisuuksia, saatavuutta ja kelpoisuutta voidaan selvittää pohjatutkimusten avulla. (Rantamäki ym. 1979, 249)

Pohjatutkimuksien laajuus riippuu vallitsevista pohjaolosuhteista, tulevista kuormituksista ja tulevien rakenteiden tyypistä. Pohjatutkimusten tarkoitus on yleisesti tuoda tarpeeksi tietoa suunnittelijalle maaperän kerrosjärjestyksestä, laadusta ja paksuudesta, kalliopinnan asemasta ja tarvittaessa sen laadusta ja vallitsevista pohjavesisuhteista. (Rantamäki ym. 1979, 249)

Pohjatutkimusmenetelmiksi luetaan:

- maastokatselmus
- koekuoppa
- kairaukset
- näytteenotto
- pohjavesitutkimukset
- maan luonnontilaisen tilavuuspainon mittaukset
- pressiometritutkimus
- geofysikaaliset pohjatutkimukset.

(Rantamäki ym. 1979, 5)

Yleisesti painuman mittauskohteissa käytetään kairaustuloksia, näytteiden laboratoriotutkimusten pohjalta saatuja tuloksia ja pohjavesitutkimuksia. Näiden tutkimusten perusteella voidaan määrittää tarvittavat parametrit painumalaskelmien suorittamiseen.

2.3.1 Kairaukset

Kairauksina yleisesti pidetään tutkimuksia, joissa maaperään tungetaan kairatangon tai kairaputken avulla nk. kairan kärkikappaletta. Tähän kärkeen kohdistuvaa vastusta ja sen muutoksia tutkimalla voidaan päätellä maakerrosten laatua, tiiviyyttä, lujuutta ja kantavuutta. (Rantamäki ym. 1979, 250)

Suomessa yleisesti käytetyt kairausmenetelmät ovat:

- painokairaus
- lyöntikairaus
- tärykairaus
- heijarikairaus
- puristinkairaus
- putkikairaus
- porakonekairaus.

Taulukon 1 mukaisesti voidaan määrittellä, millainen kairaus olisi paras haluttujen tietojen pohjalta.

Selvitettävä X = Pääasiallinen tarkoitus O = Toissijainen tarkoitus	Painokairaus	Lyöntikairaus	Tärykairaus	Heijarikairaus	Puristinkairaus	Putkikairaus	Porakonekairaus	Sydännytekairaus	Siipikairaus
Kalliopinta luotettavasti						X	X	X	
Kalliopinta arvoilta	O	O	O	O					
Kiinteä pohjakerros	X	X	X	X					
Tiiveydeltään erilaiset kerrokset	X	O	O	X	X	O	O		
Maalajit likimääräisesti	X				O	O	O		
Maakerrosten lujuus tarkasti									X
Maakerrosten lujuus likimain	O				X				
Maakerrosten tiiviys likimain	X			X	X				
Kaivuluokitus likimain	X			X					

Taulukko 1: Kairausmenetelmien käyttötarkoitukset.

Siipikairaus

Siipikairalla voidaan määrittää maan leikkauslujuutta ilman näytteenottoa. Se soveltuu hyvin saveen ja hienoon silttiin. (Jääskeläinen 2009, 112)

Kaira tungetaan maahan suojaputkessa, ettei tankoon kohdistuva maan tartunta sekoita tulosta. Koe suoritetaan riittävän hitaasti, etteivät saven viskoosiset ominaisuudet vaikuta tulokseen. Kairaa pyörittämällä saadaan tulokseksi se momentti, jolla maa murtuu. Tuntemalla kairan siipien koko tästä voidaan laskea maan leikkauslujuus. (Jääskeläinen 2009, 113)

Leikkauslujuuden mittauksen jälkeen maata usein pyöritetään 20 kertaa, että saadaan maa häiriintyneeksi. Tämän jälkeen lasketaan vielä sensitiivisyyttä maasta. (Jääskeläinen 2009, 113)

2.3.2 Näytteenotto

Kairaustulosten tarkentamiseen sekä vaikeammin määriteltäviä parametreja varten otetaan usein maaperästä myös näytteitä. Niiden avulla voidaan määritellä maaperän ominaisuuksia huomattavasti tarkemmin. Painumalaskelmien tekoa varten näytteiden ottaminen on yhtä tärkeää kuin itse kairaukset. Näytteidenottamiseen on paljon erilaisia työkaluja ja menetelmiä, mutta pääasiassa näytteet jaetaan kahteen osaan; häiriintyneet näytteet ja häiriintymättömät näytteet.

Häiriintynyt näyte

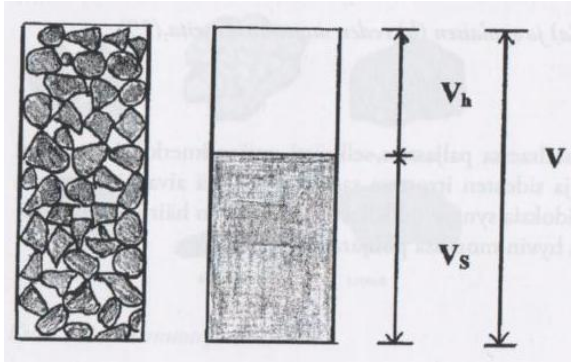
Näyte otetaan esim. pieneen muovipussiin. Näytteessä maalajin rakenne on hajonnut, mutta esim. rakeisuus pysyy muuttumattomana. Häiriintyneistä näytteistä voidaan määritellä rakeisuus, humuspitoisuus ja pohjavedenpinnan yläpuolella myös vesipitoisuus.

Häiriintymätön näyte

Näyte otetaan esim. putken sisälle, jossa se on luonnontilassaan. Näytteen jännitystila muuttuu sitä ottaessa, mutta muuten näyte kuvastaa hyvin maaperää luonnontilassa. Häiriintymättömästä näytteestä määritellään useilla eri kokeilla erilaisia parametreja esim. painuma-, stabiliteetti- ja kantavuuslaskelmiin. (Rantamäki ym. 1979, 265)

Huokosluvun ja huokoisuuden määrittäminen

Maa-aines muodostuu kivirakeista ja huokosista. Huokoisuus on tärkeä tekijä lähes kaikissa maalajien ominaisuuksissa. Jos maa-aineksen ajattelee kuvan 1 mukaan eri osiksi, voidaan helpommin mieltää, miksi se on niin tärkeä osa esimerkiksi painumalaskelmia. (Jääskeläinen 2009, 49)



Kuva 1: Maa-aineen huokoisuus (Jääskeläinen 2009, 48)

Huokoisuus n kuvaa huokostilavuuden ja näytteen koko tilavuuden suhdetta.

Kaava 5: Huokoisuuden määritelmä

$$n = V_h / V \quad (5)$$

jossa

$n = \text{huokoisuus}$

$V_h = \text{huokostilavuus}$

$V = \text{koko näytteen tilavuus}$

Huokoslukua e käytetään myös tarkasteluissa, se kuvaa huokostilavuuden suhdetta kiviaineksen tilavuuteen.

Kaava 6: Huokosluvun määritelmä

$$e = V_h / V_s \quad (6)$$

jossa

$V_s = \text{kiviaineksen tilavuus}$

Huokosluku voidaan määrittää esimerkiksi kaavan 7 mukaan, jos tunnetaan vesipitoisuus. Kaava pätee vain, jos maaperä on vedellä kyllästynyt.

Kaava 7: Huokosluvun ja vesipitoisuuden välinen riippuvuus

$$e_0 = \frac{w}{100} * 2,65 \quad (7)$$

jossa

e_0 = maan alkuperäinen huokosluku

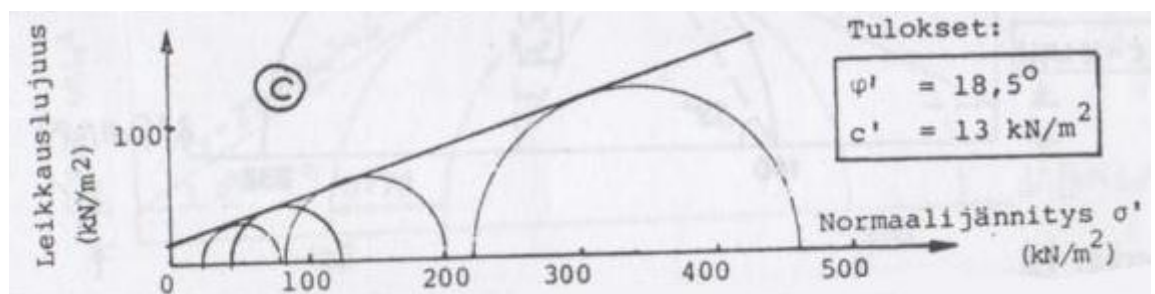
w = vesipitoisuus

Kolmiaksaalikoe

Kolmiaksaalikoetta (tunnetaan myös kolmiakselikokeena) pidetään leikkauslujuuden ja jännitys- ja muodonmuutosominaisuuksien määrittämismenetelmistä tarkimpana ja monipuolisimpana. (Rantamäki ym. 1979, 134)

Kolmiaksaalikokeen ideana on kuormittaa sylinterinmuotoista näytekappaletta kolmen kohtisuoran akselin suunnista. Tämä luo jännitystilaksi lähes normaalin maaperän suhteet. Puristus toteutetaan nesteellä, ja näyte on itsessään suojattu vettä läpäisemättömällä kalvolla. Nesteen luomaa painetta kutsutaan sellipaineeksi. (Rantamäki ym. 1979, 134)

Näytettä aletaan tämän jälkeen puristaa pystysuunnassa tasaisella nopeudella. Huokosvedenpainetta voidaan lukea samalla painemittarista. Kun pystysuora lisäjännitys saavuttaa suurimman arvonsa, on saavuttu murtotilanteeseen. Näitä kokeita tehdään usealla eri sellipaineella ja niistä muodostuvista jännitysympyröistä saadaan leikkauslujuuden kuvaajaksi yhteinen tangentsuora kuvan 2 mukaan. (Rantamäki ym. 1979, 135)



Kuva 2: Kolmiaksaalikokeen jännitysympyrät ja tangentsuora (Rantamäki ym. 1979, 135)

Ödometrikoe

Ödometrikoe on yleisin koe kokoonpuristuvuusominaisuuksien määrittelemisessä. Se tehdään häiriintymättömälle näytteelle. (Rantamäki ym. 1979, 146)

Ödometrikokeessa kuormitetaan sylinterinmuotoista maanäytettä pystysuuntaisella jännityksellä ja näyte on tutkimuksen aikana teräsrenkaan sisällä. Rengas estää näytteen laajenemisen sivusuunnassa. Näyte on tutkimuksen aikana myös upotettuna veteen ja sen kokoonpuristuessa vesi pääsee poistumaan näytteestä. (Rantamäki ym. 1979, 146)

Näytteen kokoonpuristuvuudesta tehdään havaintoja pitenevin aikavälein esimerkiksi 6 s, 12 s, 18 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min... Kuormitusta lisätään yleensä 24 h välein kaksinkertaiseksi edelliseen nähden ja puristumahavainnot tehdään uudestaan samoin aikavälein. (Rantamäki ym. 1979, 148)

Liitteessä 1 on esimerkki ödometrikokeen tuloksista ja parametreista, joita sen avulla on määritetty.

Koetulosten tulkinta

Kokoonpuristuvuusparametrien saamiseksi koetulokset esitetään yleensä jännityksen ja suhteellisen kokoonpuristuman välisenä riippuvuutena. Kuvaajaa tulkittaessa on huomioitavaa, että näyte on otettu maakerroksen sisältä, ja siksi näyte on aluksi kuormitettava takaisin luonnontilaansa. (Rantamäki ym. 1979, 148)

Kokoonpuristuvuusmoduuli M , jota myös kutsutaan sekanttmoduuliksi M_s , määritellään kuvasta 3 kaavalla 8. (Rantamäki ym. 1979, 148)

Kaava 8: Kokoonpuristuvuusmoduulin määritelmä

$$M = \Delta\sigma / \Delta\epsilon = \cot \alpha \quad (8)$$

jossa

$\Delta\sigma$ = kokoonpuristuvuuskokeen jännityslisäys

$\Delta\epsilon$ = suhteellinen kokoonpuristuma jännityslisällä $\Delta\sigma$

α = kuvan 4 mukainen kulma

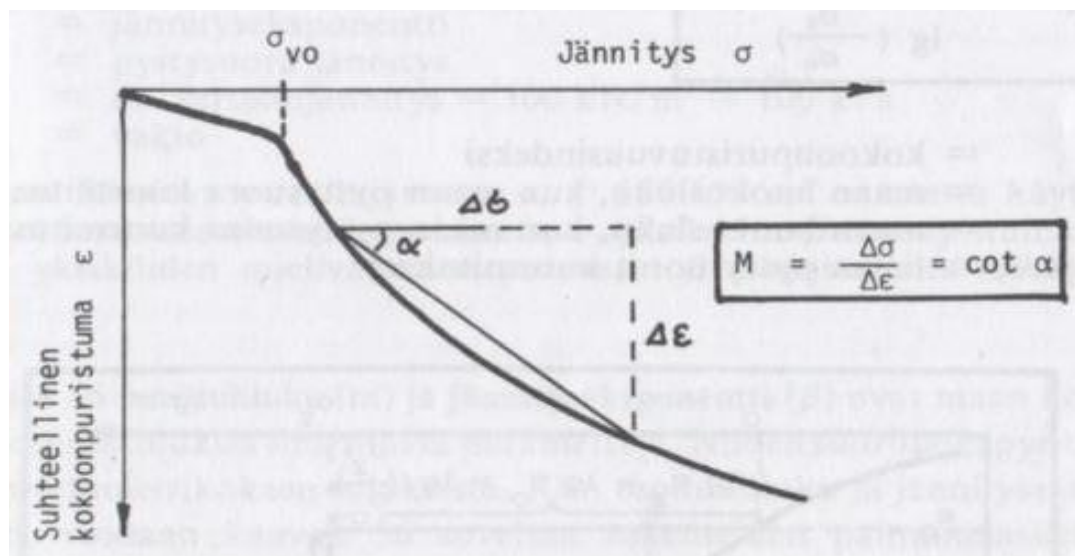
Kokoonpuristuvuuslaskelmissa käytetään myös kokoonpuristuvuuskerrointa m_v , joka on kokoonpuristuvuusmoduulin käänteisluku. (Rantamäki ym. 1979, 148)

Kaava 9: Kokoonpuristuvuuskerroimen määritelmä

$$m_v = 1/M \quad (9)$$

jossa

m_v = kokoonpuristuvuuskerroin



Kuva 3: Ödometrikokeen tulos kokoonpuristuma-jännitys akselistolla (Rantamäki ym. 1979, 149)

Kokoonpuristuvuusindeksiä C_c käytetään myös laskelmien pohjana. Se määritellään huokosluvun ja jännityksen logaritmin välille. Kokeen alussa on siis tiedettävä huokosluku. (Rantamäki ym. 1979, 150)

Kaava 10: Kokoonpuristuvuusindeksin määritelmä

$$C_c = \frac{e_0 - e}{\log_{10}(\sigma_z / \sigma_0)} \quad (10)$$

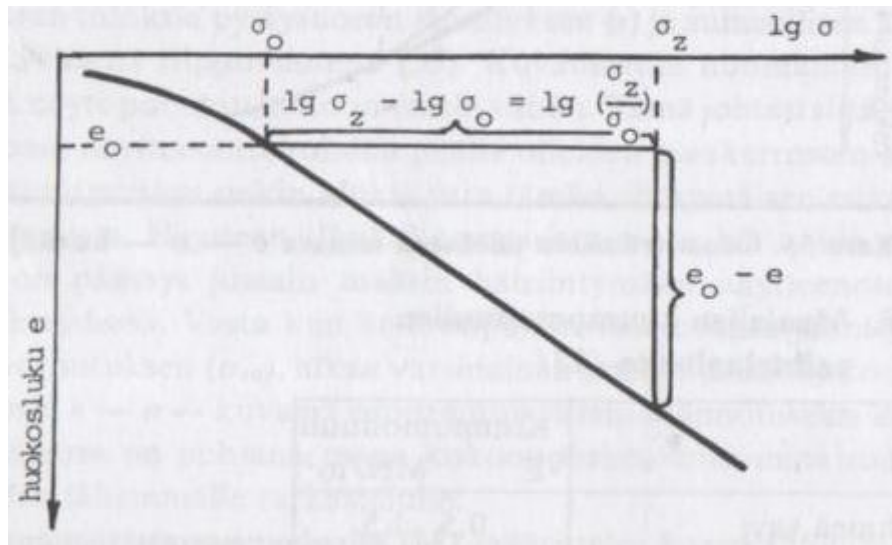
jossa

C_c = kokoonpuristuvuusindeksi

e_0 = maan huokosluku, kun pystysuora kuormitus on σ_0

e = maan huokosluku, kun pystysuora kuormitus on σ_z

σ_z ja σ_0 = kuvan 5 mukainen jännitys



Kuva 4: Kokoonpuristuvuusindeksin määrittäminen (Rantamäki ym. 1979, 150)

2.3.3 Pohjavesitutkimukset

Pohjaveteen liittyvät havainnot ja tutkimukset ovat tärkeitä lähtötietoja suunnittelussa.

Pohjavedestä usein tarkastellaan seuraavia asioita:

- pohjavedenpinnan syvyys
- pohjavedenpinnan vaihtelut
- huokosvedenpaine
- pohjaveden laatu
- pohjaveden virtausmäärät.

(Rantamäki ym. 1979, 271)

Painumalaskelmien kannalta tärkeimmiksi asioiksi muodostuvat pohjavedenpinnan syvyys, huokosvedenpaine, vesipitoisuus ja virtausmäärät. Veden aiheuttama noste

muuttaa radikaalisti pohjavedenpinnan alapuolella olevan maaperän käyttäytymistä. Huokosvedenpaine vaikuttaa maan leikkauslujuuteen ja puristumisnopeuteen. Virtausnopeus ja vesipitoisuus vaikuttavat konsolidaatiopainuman nopeuteen.

2.4 Jännitystilän muutokset maaperässä

Painuman laskemisen lähtökohtana tutkitaan jännitystilojen muutoksia maaperässä. Pystyjännityksen jakautumista maakerrokseen mallinnetaan muutamalla erilaisella teoriolla. Yksinkertaisella likimääräismenetelmällä (ns. 2:1 menetelmä) saadaan varsin hyviä tuloksia. Tietokoneohjelmien perustana ovat tosin useimmiten hieman syvällisemmät ja monimuotoisemmat teoriat. (Jääskeläinen 2009, 145)

Perehdyn tässä tutkimuksessa kahteen tunnetuimpaan menetelmään, likimääräismenetelmään ja Boussinesqin teoriaan.

2.4.1 Likimääräismenetelmä

Kyseessä on todella yksinkertainen mallinnusmenetelmä, joka kuitenkin tuottaa varsin hyviä tuloksia. Teorian pohjana on oletus siitä, että jännitys leviää maahan 2:1-suhteessa etenevien janojen sisäpuolen muodostaman vyöhykkeen sisällä. Täten jännityksen vaikutuksen alaisena oleva pinta-ala kasvaa syvemmälle mentäessä tasaisesti (ks. kuva 5). (Jääskeläinen 2009, 145)

Kaava 11: Likimääräismenetelmän mukainen jännitys syvyydellä z

$$\delta_z = \frac{p \cdot b}{(b+z)} \quad (11)$$

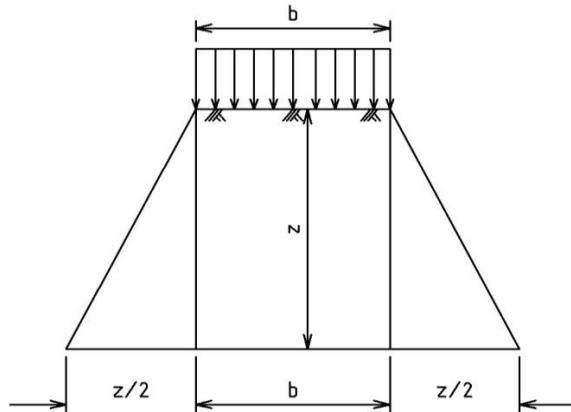
jossa

δ_z = pystyjännitys syvyydellä z

p = jännityslisä eli kuorma

b = jännityslisän poikkileikkauksen leveys tarkastelukohdassa

z = tarkastelusyvyys

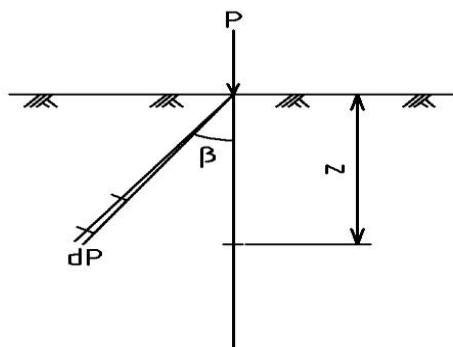


Kuva 5: likimääräismenetelmän mukainen jännitys jakauma

2.4.2 Boussinesqin teoria

Boussinesqin teoria on huomattavasti monimutkaisempi kuin likimääräismenetelmä, ja sitä sovelletaan useimmiten geoteknisten ongelmien ratkomisessa. Boussinesqin teorian mukaan voidaan laskea kaikki yleisimmät tapaukset, vain harva erikoistapaus tarvitsee vielä syvällisemmän teorian laskentaan. Tämän takia lähes kaikki jännityksen jakautumisnomogrammit ja tietokoneohjelmat perustuvat teorian mukaiselle jännitys jakaumalle.

Boussinesqin teorian mukaan voima jaetaan pieniin osarasituksiin, jotka lähtevät jännityksen alkupisteestä (ks. kuva 6). Voimat kulkevat kartion mallisessa muodossa, jonka pohjapinta kasvaa etäisyyden neliössä. Koska kartion sisässä kulkeva voima on vakio, on jännityksen suhde kääntäen verrannollinen etäisyyden (syvyyden) neliöön. (Jääskeläinen 2009, 151)



Kuva 6: Osarasituksiin jakaminen Boussinesqin teorian mukaan.

Boussinesqin teoriassa oletetaan, että maaperä käyttäytyy nesteen tavoin, joten paine on määrättyssä pisteessä sama jokaiseen suuntaan. Teoria on johdettu nk. Frölichin kaavasta (12) määrittämällä nk. paineen keskityskertoimelle nesteen arvo $n=3$, joka tarkoittaa myös, että Poissonin luku on 0,5. (Jääskeläinen 2009, 151)

Kaava (12) Frölichin kaava.

$$\delta_z = (n \cdot P / 2\pi \cdot z^2) \cdot \cos \beta^{n+2} \quad (12)$$

Kaava (13) Boussinesqin kaava.

$$\delta_z = (3 \cdot P \cdot \cos \beta^5 / 2\pi \cdot z^2) \quad (13)$$

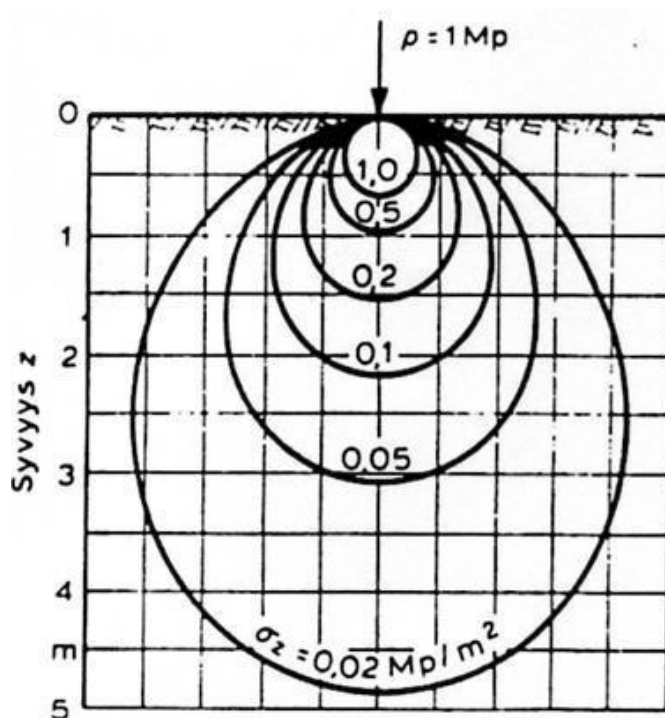
jossa

$\delta_z =$ pystyjännitys syvyydellä z

$P =$ pistejännitys

$\beta =$ kulma pystysuoraan nähden

$z =$ tarkasteltavan pisteen syvyys



Kuva 7: Boussinesqin teorian jännitys jakauman aproksimaatio. (Leena Korkiala-Tanttu 2010, luentomoniste)

2.5 Maakerrosten rakenne ja hydrauliset ominaisuudet

Painumalaskelmien tekemisessä maan tilavuuspaino on keskeisessä asemassa. Sen avulla voidaan määrittää esimerkiksi tulevan tien rakennekerrosten aiheuttama jännitelisä maapohjalle.

Maan tilavuuspaino annetaan usein kuiva- ja märkätilavuuspainona. Ne voidaan määrittää punnitsemalla tai tuntemalla huokoisuus n . Yleisenä olettamuksena kivirakeiden paino $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$.

Lisäksi käytetään tilavuuspainoa veden alla γ' . Sen avulla voidaan määrittää tilavuuspaino veden alla, eli tilavuuspainosta vähennetään nosteen vaikutus. Tästä syystä on tärkeää tuntea pohjaveden pinnankorkeus.

Vedenläpäisevyyttä maassa kuvataan usein Darcyn kehittämän lain avulla. Sen avulla voidaan laskea konsolidaatiopainuman nopeutta, kun tiedetään kuinka nopeasti huokosvedenpaine pääsee purkautumaan maaperässä.

Kaava 14: Darcyn laki

$$v = k * H/L \quad (14)$$

jossa

$v = \text{veden keskimääräinen nopeus}$

$k = \text{vedenläpäisevyyskerroin}$

$L = \text{virtausmatka}$

$H = \text{paine – ero virtausmatkan päiden välillä}$

Vedenläpäisevyyttä voidaan tutkia joko koepumppauksella tai laboratoriokokeilla.

Vedenläpäisevyydelle on myös tehty monia eri taulukoita ja kuvaajia, josta maalajien tyyppin tai esimerkiksi tehokkaan raekoon mukaan voidaan arvioida vedenläpäisevyyttä.

Kuten kaavassa 2 totesimme, maahan kohdistuvaa jännitystä ottaa vastaan raepaine ja huokosvedenpaine. Jännityksen lisääntyessä huokosvedenpaine ottaa kokoajan

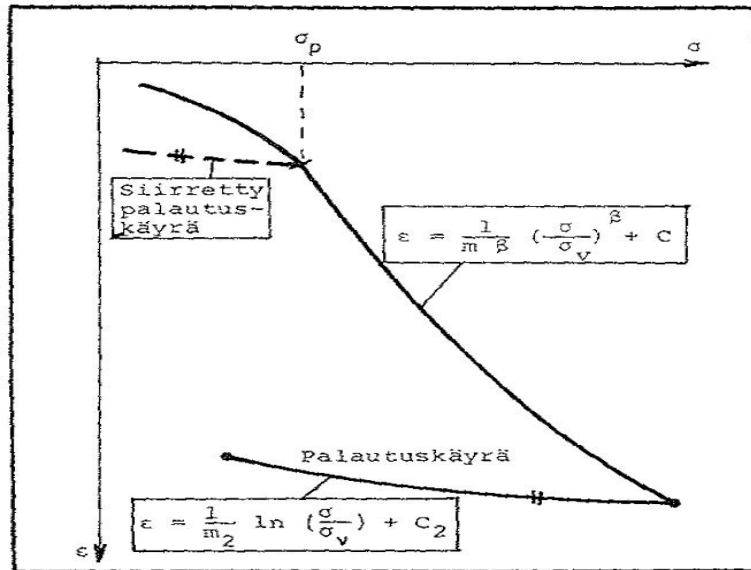
enemmän painetta vastaan. Tämä paine pyrkii purkautumaan ympäristöön kun painuma etenee, kivrakeet lopulta ovat puristuneet niin tiiviisti, että se kannattelee uutta jännitystilannetta. Raepaineen ja huokosvedenpaineen suuruudet vaihtuvat kokoajan kokonaispaineen pysyessä samana. (Jääskeläinen 2009, 80)

2.6 Kokoonpuristuvuusparametrit

Kokoonpuristuvuusparametrit kuvaavat maan puristumaa jännitystä lisättäessä. Parametreja arvioidaan lähinnä ödometrikokeesta saaduista kuvaajista. Työssä on keskitytty muutamaankeskeiseen parametriin, jotka ovat lähtökohtia kaikille painumalaskentamenetelmille. Käytetystä maaperämallista ja laskentamenetelmästä riippuu se, mitkä ödometrikokeen tuloksista tutkitaan ja millaisessa akselistossa kokeen tulos tulee esittää.

2.6.1 Tangenttimodulimenetelmä

Tangenttimodulimenetelmässä pyritään kuvaamaan matemaattisella funktiolla konsolidaatiopainumaa. Kuvassa 8 on esitetty esimerkki kokoonpuristuman ε ja jännityksen σ välisestä riippuvuudesta. Koetuloksista saadaan tämän riippuvuuden nk. taitepiste, joka on erittäin tärkeä realistisen kuvan saamiseksi. Piste kuvaa maakerroksen konsolidaatiokuormitusta σ_p , jonka alaisena maakerros on ollut jossakin vaiheessa historiaa. Ennen tätä jännitystilaa (nk. ylikonsolidoitunut alue) todellisen kokoon puristuman arvioiminen on epäluotettavaa johtuen kokeessa käytetyn näytteen osittaisesta häiriintymisestä. Ylikonsolidoituneen alueen painumaa on katsottu paremmin kuvaavan palautuskäyrä, joka tulee konsolidaatiopainumakokeen jälkeen jännityksen poistamisesta seuraavasta laajenemisesta. Konsolidaatiokuormitusta suuremmilla jännitystiloilla (nk. normaalikonsolidoitunut alue) menetelmä antaa paremman kuvan kokoonpuristuvuuskäyttäytymisestä. (Rantamäki ym. 1979, 218)



Kuva 8: Tangenttimodulikäyrä kokoonpuristuma-jännitys-akselilla. (Rantamäki ym. 1979, 218)

Suhteellisen kokoonpuristuman käyrää on todettu kuvaavan matemaattinen kaava 15. Kaavan parametrit saadaan ödometrikokeen tuloksista. (Jääskeläinen 2009, 151)

Kaava 15: Suhteellisen kokoonpuristuman lisäys normaalikonsolidoituneella alueella

$$\epsilon = \frac{1}{m_1 \beta} * \left(\frac{\sigma_c + \Delta\sigma}{\sigma_v} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_v} \right)^\beta$$

(15)

jossa

ϵ = suhteellinen kokoonpuristuma

m_1 = moduuliluku normaalikonsolidoituneella alueella

β = jännityseksponentti

$\Delta\sigma$ = jännityslisä

σ_v = ns. vertailujännitys = 100 kN/m² = 100kPa

σ_c = konsolidaatiojännitys

Kaava 16: Suhteellisen kokoonpuristuman lisäys ylikonsolidoituneella alueella

$$\epsilon = \frac{1}{m_2} \ln \left(\frac{\sigma_c + \Delta\sigma}{\sigma_c} \right) \quad (16)$$

jossa

m_2 = moduuliluku ylikonsolidoituneella alueella

2.6.2 Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä on puolilogaritminen menetelmä ja yleisesti kaikki muut puolilogaritmiset menetelmät on johdettu tästä menetelmästä (Länsivaara 2000, 37). Menetelmä perustuu kokoonpuristuvuuskokeista saatuun suhteelliseen kokoonpuristumaan ϵ kuormituksen logaritmin ($\lg \sigma$) funktiona. Näin on johdettavissa suhteelliselle kokoonpuristuman lisäykselle kaava 17. (Rantamäki ym. 1979, 221)

Kokoonpuristuvuusindeksin C_c määritelmä on käyty läpi kaavassa 10.

Kaava 17: Suhteellisen kokoonpuristuman lisäys

$$\Delta\epsilon = \frac{C_c \cdot \log_{10} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{vo}} \right)}{(1+e_0)} \quad (17)$$

jossa

$\Delta\epsilon$ = suhteellisen kokoonpuristuman lisäys

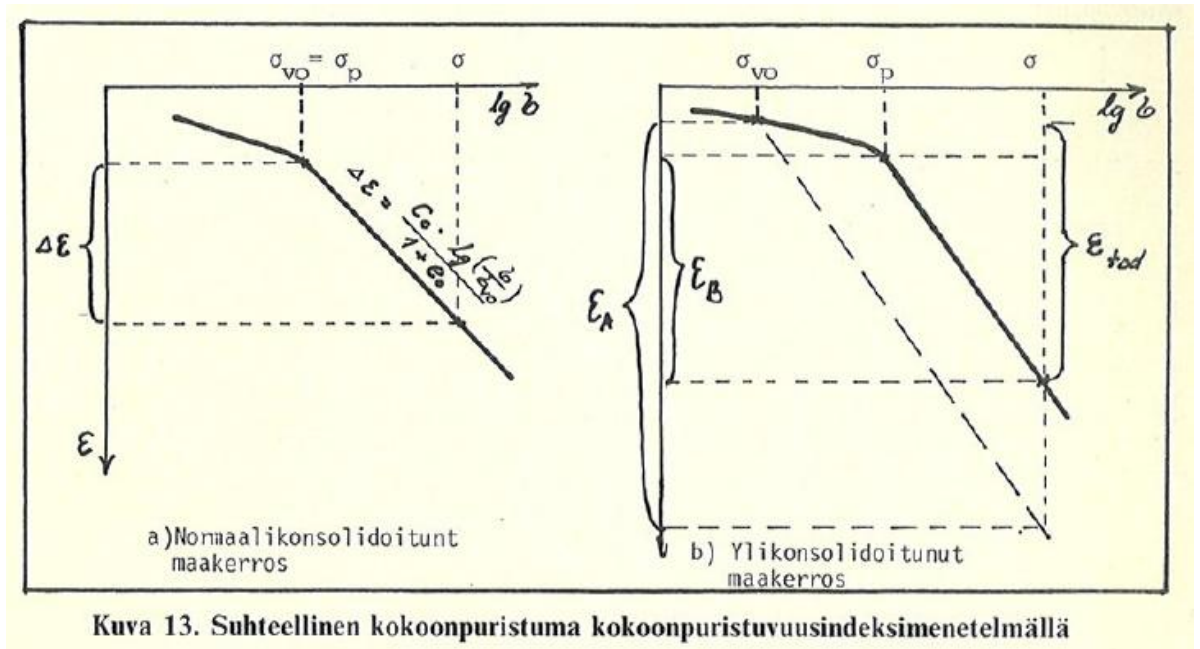
C_c = kokoonpuristuvuusindeksi

σ = konsolidoivaa kuormaa vastaava maakerroksen jännitystila

σ_{vo} = maan pystysuora jännitys kokoonpuristumisen alkaessa

e_0 = maan alkuperäinen huokosluku

Ylikonsolidoituneessa tapauksessa kaava 17 antaa liian suuria arvoja suhteelliselle puristumalle. Tarkemman arvon saamiseksi alkujännityksen σ_{vo} paikalle sijoitetaan konsolidaatiojännitys σ_p . (Rantamäki ym. 1979, 221)



Kuva 9: Suhteellinen kokoonpuristuma kokoonpuristuvuusindeksimenetelmällä.
(Jääskeläinen 1979, 221)

Yleisesti maakerrokset ovat vedellä kyllästettyjä. Huokosluvun e_0 ja vesipitoisuuden w välillä on kaavan 7 muotoinen yhteys. Yhdistettäessä tämä kaavaan 17 saadaan suhteelliselle kokoonpuristumalle kaava 10. (Rantamäki ym. 1979, 221)

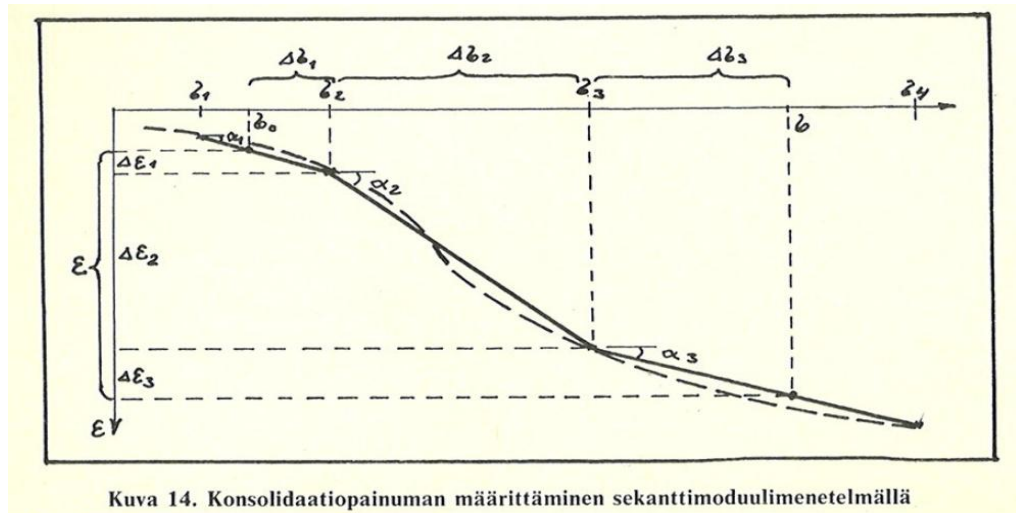
Kaava 18: Suhteellisen kokoonpuristuman lisäys

$$\Delta \epsilon = \frac{C_c \cdot \log_{10} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{vo}} \right)}{\left(\frac{100}{w} + 2,65 \right)} \quad (18)$$

2.6.3 Sekanttimodulimenetelmä

Sekanttimodulimenetelmä on konsolidaatiopainuman määrittystapa, jossa käytetään hyväksi kokoonpuristuvuuskoekkeista saatua sekanttimodulia M_s . (Rantamäki ym. 1979, 214)

Sekanttimodulin määritelmä on käyty läpi kaavassa 8.



Kuva 10: Sekanttimoduulimenetelmä. (Rantamäki ym. 1979, 222)

Menetelmässä jaetaan kuvan 10 mukaan likimääräisiin jännitysalueisiin ja lasketaan yhteen niiden tuottamat konsolidaatiopainumat kaavan 19 avulla

Kaava 19: Sekanttimodulin osapainumien summa

$$\epsilon = \sum_i \left(\frac{\Delta\sigma_i}{M_{s_i}} \right) \quad (19)$$

jossa

$\Delta\sigma_i$ = jännitysvälit 1 – i

M_{s_i} = sekanttimodulit väleillä 1 – i

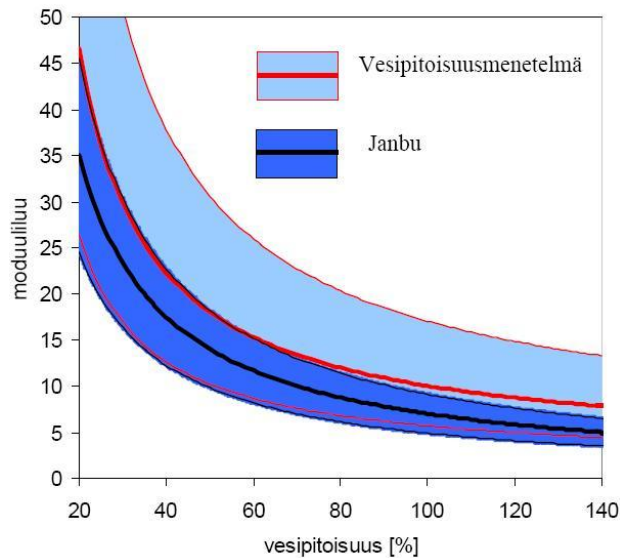
2.6.4 Vesipitoisuuteen perustuvat menetelmät

Vesipitoisuuteen perustuvia menetelmiä on kahdentyyppisiä. Empiirisiin kokeisiin perustuvista menetelmistä on esimerkkinä Janbun vesipitoisuusmenetelmä.

Kokoonpuristuvuusindeksin ja maan ominaisuuksien välille perustuvista menetelmistä käsitellään esimerkkinä Helenelundin vesipitoisuusmenetelmä.

Menetelmien lähtökohdat ovat erilaisia, mutta niitä voidaan kuitenkin vertailla muuttamalla vesipitoisuusmenetelmän mukainen kokoonpuristuvuusindeksi jännitysekspONENTtia $\beta=0$ vastaavaksi moduuliluvuksi. Kuvasta 11 voidaan havaita tulosten olevan samansuuntaisia, joskin vesipitoisuusmenetelmässä saadaan hieman suurempi moduuliluku, eli pienemmät painumat. Kuvassa on myös tehty kaksi

oletusta Helenelundin vesipitoisuusmenetelmässä: maa on vedellä kyllästettyä ja sen tilavuuspaino on $2,7 \text{ g/cm}^3$. (Länsivaara 2000, 39)



Kuva 11: Vesipitoisuusmenetelmän ja Janbun menetelmän keskihajonnat ja liikkumisrajat (Luentosarja, Tim Länsivaara)

Janbun vesipitoisuusmenetelmä

Janbu on esittänyt runsaasti materiaalia moduuliluvun vaihtelusta vesipitoisuuden funktiona. Hän esitti vuonna 1998 vesipitoisuuteen perustuvan empiirisen yhtälön moduuliluvulle:

Kaava 20: Janbun vesipitoisuusmenetelmä

$$m = 700\%/w_n \quad \text{epävarmuus} \pm 30\% \quad (20)$$

jossa

$m = \text{moduuliluku}$

$w_n = \text{vesipitoisuus}$

Kansainvälisessä kirjallisuudessa savelle annetaan jännitysekspontin β arvoksi usein $\beta=0$. Lisäksi on otettava huomioon, että Janbun tutkimusaineisto perustuu lähinnä saviin, joiden vesipitoisuus on alle 70 %. Suomalaisissa savissa vesipitoisuus on usein korkeampi. Janbun mukaan kaavalla saatu minimiarvo vastaa savia, joiden

esikonsolidaatiojännityksen arvo on pieni, ja maksimiarvo taas sellaisia savia, joiden esikonsolidaatiojännityksen arvo on suuri. Nämä seikat huomioon otettaessa kaavaa voidaan käyttää myös suomalaisien savien painumalaskelmien alustavissa arvioinneissa. (Länsivaara 2000, 11)

Helene Lundin vesipitoisuusmenetelmä

Suomessa tunnetuin vesipitoisuuteen perustuva kokoonpuristuvuuden arviointimenetelmä on Helene Lundin 1967 esittämä nk. vesipitoisuusmenetelmä. Menetelmä on johdettu arvioimalla kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmää vesipitoisuuden perusteella. (Länsivaara 2000, 38)

Kaava 21: Helene Lundin vesipitoisuusmenetelmällä arvioitu kokoonpuristuvuusindeksi

$$C_c = k_c * \sqrt{w^3} \quad (21)$$

jossa

$C_c =$ kokoonpuristuvuusindeksi

$k_c =$ kerroin, yleensä 0,85, vaihteluväli $0,5 < k_c < 1,5$

$w =$ vesipitoisuus

Johtamalla kaavat 7 ja 21 yhteen saadaan suhteellinen muodonmuutos. Täysin vedellä kyllästyneessä kerroksessa korvataan huokosluku yleensä lausekkeella $e = w * \gamma_s / \gamma_w$. Olettamalla maan kiintotiheydeksi $2,7 \text{ g/cm}^3$ ja kertoimelle k_c arvo 0,85 saadaan kaava 22. (Länsivaara 2000, 38)

Kaava 22: Helene Lundin vesipitoisuusmenetelmällä arvioitu suhteellinen muodonmuutos

$$\varepsilon = \frac{0,85 * \sqrt{w^3}}{(1+w * 2,7)} * \log_{10} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{vo}} \right) \quad (22)$$

2.7 Esikonsolidaatiojännityksen määrittäminen painumalaskennassa

Esikonsolidaatiojännityksellä tarkoitetaan jännitystilaa, joka on joskus vallinnut maaperässä. Maa on alkanut jo painua ja muuttaa muotoa sen mukaiseksi. Siksi ennen normaalikonsoloidoitunutta aluetta painumien muodostuminen on hitaampaa.

Esikonsolidaation määritetään ödometrikokeiden tuloksista. Sitä voidaan arvioida alustavasti suljetun leikkauslujuuden perusteella. (Länsivaara 2000, 19)

Esikonsolidaatiojännitystä voidaan mallintaa monella eri tavalla, joista käyn lävitse lyhyesti kaksi, OCR (Over Consolidation Ratio) eli ylikonsolidaatioaste ja POP (Pre-Overburden Pressure) eli ylikonsolidaatio.

Kaava 23: OCR-määritelmä.

$$OCR = \frac{\sigma'_{cv}}{\sigma'_v} \quad (23)$$

jossa

$OCR =$ ylikonsolidaatioaste

$\sigma'_{cv} =$ esikonsolidaatiojännitys

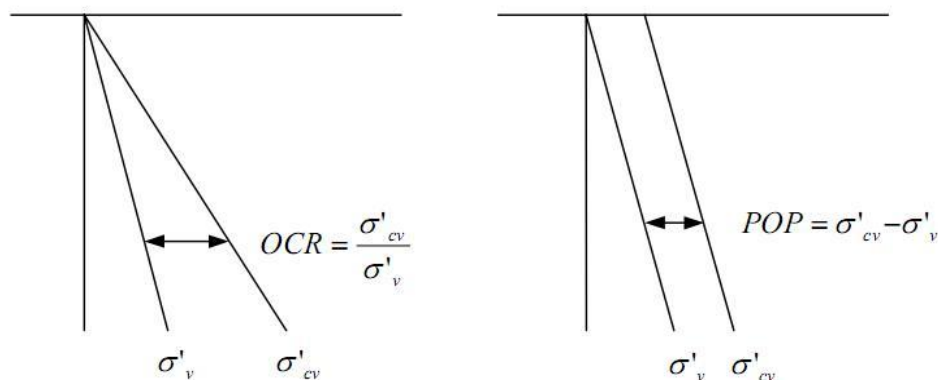
$\sigma'_v =$ tehokas pystysuuntainen *in situ* jännitys

Kaava 24: POP-määritelmä.

$$POP = \frac{\sigma'_{cv}}{\sigma'_v} \quad (24)$$

jossa

$POP =$ ylikonsolidaatio



Kuva 12: OCR- ja POP-määritelmät. (Länsivaara 2000, 19)

2.8 Painumiin vaikuttaminen

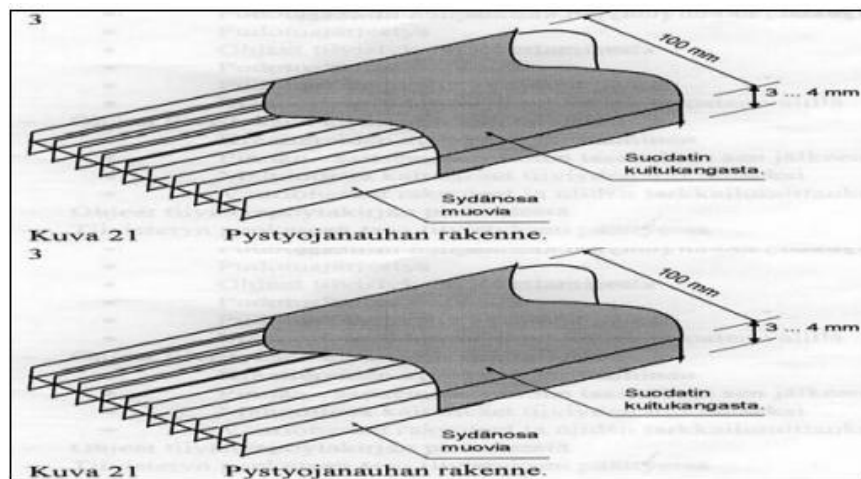
Painuman määrään ja nopeuteen voidaan vaikuttaa monella tapaa.

Konsolidaatiopainumaa voidaan nopeuttaa tai painumamäärää voidaan pienentää huomattavasti. Rakenteen tyypistä ja koosta riippuen voidaan painuma-ajan ollessa liian pitkä valita menetelmä, jolla painuma pienennetään halutuksi tai nopeutetaan ajan säästämiseksi.

Käyn läpi lyhyesti muutamia menetelmiä, joilla voidaan estää suurien painumien syntyminen tai nopeuttaa sen tapahtumista.

2.6.1 Pystyjoitus

Pystyjoituksella tarkoitetaan menetelmää, jolla lyhennetään veden virtausmatkaa laittamalla painuma-alueelle pystysuuntaisia huokoisista materiaalista tehtyjä reikiä. Näin veden virtausmatka saadaan huomattavasti lyhemmäksi, ja siksi myös konsolidaatio tapahtuu nopeammin.



Kuva 13: Esimerkkikuva liuskapystyjoitanauhasta.

(http://www.rts.fi/infraryl/Kasiteltavat_luvut/14122_Liuskapystyjoitukset_TK242_15032005.pdf)

Menetelmän nopeuttamiseksi rakennetaan alueen päälle myös ns. painumapenger. Sen tehtävänä on luoda enemmän painetta konsolidoituvaan kerrokseen ja siten nopeuttaa veden liikettä.

Vakuumpistytyksellä tarkoitetaan sitä, että painuvan kerroksen päälle muodostetaan ilmaa läpäisemätön kerros, jonka avulla vedenvirtausta voidaan nopeuttaa imemällä maaperästä vettä pystyobjien kautta.

2.6.2 Syvästabilointi

Syvästabiloinnilla tarkoitetaan menetelmiä, joissa maapohjaa vahvistetaan ruiskuttamalla siihen sideaineita. Menetelmällä lujitetut kerrokset puristuvat kokoon huomattavasti vähemmän ja yleisesti niiden päälle voidaan rakentaa painumien puolesta lähes mitä vain.

Suomessa yleisin syvästabilointimenetelmä on pilaristabilointi. Siinä pohjamaahan porataan suihkutusputki. Kun vartta nostetaan maan sisästä se suihkuttaa sideainetta ja näin muodostuu sylinterinmallisia pilareita.

Syvästabilointia käytetään lähinnä alueiden, teiden ja rautateiden alapuolisten maakerrosten vahvistamisessa.

2.6.2 Perustusten vienti painumattomaan kerrokseen

Rakennuksia voidaan perustaa painuvilla mailla paalujen varaan. Ne viedään kantavaan kerrokseen asti lyömällä ja rakennukset tehdään niiden varaan. Paalut lyödään niin syväälle, että haluttu kantavuus saavutetaan. Paalujen painumista estää näin ollen paalun koko mitalle muodostuva adheesio ja paalun alapäässä sijaitseva maakerros. Paalut voidaan myös lyödä kalliokärjillä, mikäli kallio on tarpeeksi lähellä. Tämä estää paalujen painuman lähes kokonaan normaalista rakentamisesta aiheutuvilla kuormilla.



Kuva 14: Esimerkki teräspuutkipaalutuskoneesta.

(http://www.terasrakenneyhdistys.fi/terasrakennelehti/s41-4_2-03.jpg)

2.6.2 Massanvaihto

Nimensä mukaisesti tämän menetelmän ajatuksena on vaihtaa painuvien maakerrosten tilalle kerroksia, joiden painuma on huomattavasti pienempää. Menetelmässä kaivetaan pois esim. saviset kerroksen ja laitetaan tilalle hiekkaa tai muuta tarkoituksen mukaista maa-ainesta.

Massanvaihto on yleistä esimerkiksi teiden rakentamisessa. Sen avulla voidaan ylittää soita tai savilinssejä helposti. Menetelmän käyttämistä rajoittaa eniten tilan tarve. Pehmeiden maiden kaivamisessa on käytettävä suhteellisen loivia luiskia, joten riippuen kaivun syvyydestä voi kaivettava alue olla todella laaja.

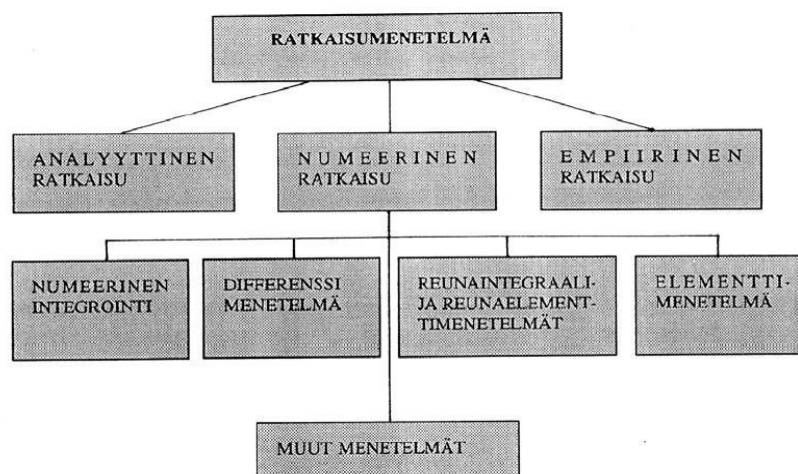
3 LASKENTAOHJELMAT

3.1 Numeeriset menetelmät

Geoteknisiä laskelmia tehdään yhä useammin numeerisilla menetelmillä toimivilla laskentaohjelmilla. Huomattavasti käsin laskua nopeampi ja käytettäviltä teorioiltaan monimutkaisempi ratkaisumalli antaa selvästi tarkempia tuloksia. Samalla kuitenkin käyttäjälle siirtyy suurempi vastuu tulosten arvioinnissa. Kuvassa 15 on esitettyä ratkaisuvaihtoehtoja painumalaskelmille.

Käyttäjän asiantuntemuksella voidaan varmistaa ohjelmien antamien tulosten oikeellisuutta ja myös huomata mahdollisia virheitä annetuissa parametreissa. Ohjelmat antavat myös mahdollisuuden todella monen eri asian samanaikaiseen tarkasteluun ja laskemiseen kaikissa ulottuvuuksissa. Toisaalta käyttäjällä tulee olla myös selkeä käsitys siitä mitä ohjelman halutaan laskevan ja millaisiin suuruusluokkiin ratkaisujen pitäisi osua.

Käsittelen ohjelmistoihin liittyviä yleisiä teorioita aluksi lyhyesti ja sen jälkeen esittelen työssä käyttämäni ohjelmat. Käyn myös lyhyesti niissä käytetyt ratkaisumallit lävitse.



Kuva 15: Ratkaisumallit (Vepsäläinen, luentomoniste)

Yleistä ohjelmistoista

Laskentaohjelmissa käytetään usein huomattavasti vaikeampia ja tarkempia teorioita kuin käsinlaskussa. Tietokoneiden kehittyessä voidaan mallintaa esim. maaperän käyttäytymistä todella tarkasti. On kuitenkin muistettava pohjatutkimuksilla saatujen tulosten epätarkkuus ja maan epähomogeenisyys, joiden takia täydellisen oikeaa laskentaa on lähes mahdotonta mallintaa.

Menetelmistä ehkä tunnetuin ja käytetyin on elementtimenetelmä. Menetelmä perustuu osittaisdifferentiaaliyhtälöiden jatkuvien arvojoukkojen ratkaisemiseen diskretoimalla paloittain elementtiverkon avulla. Diskretoimisella tarkoitetaan funktion arvioita diskreettisellä funktiolla, jossa on äärellinen määrä pisteitä. (Mansikkamäki 2008, 28)

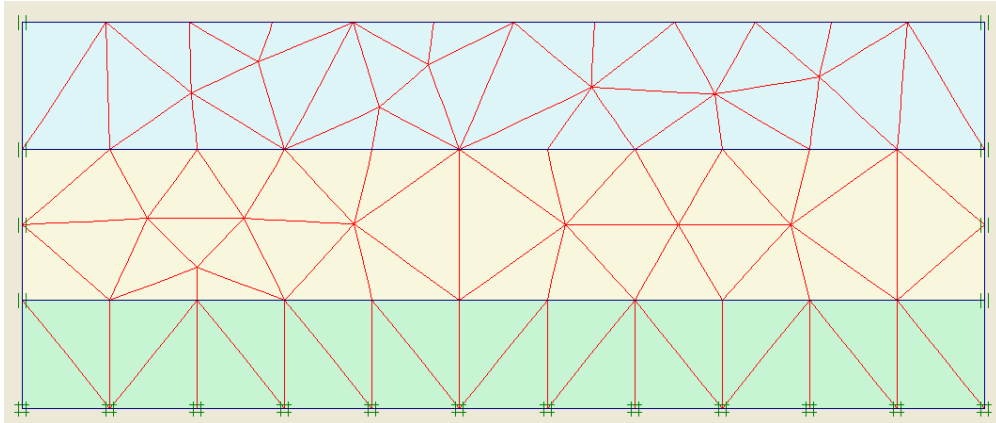
3.2 Elementtimenetelmä (FEM)

Elementtimenetelmää (Finite Element Method) on kehitetty 1940-luvun alusta alkaen rakenne- ja avaruustekniikan tarpeisiin ratkaisemaan monimutkaisia rakenteellisia ongelmia. Menetelmän syntypaikkana pidetään mittavien aiheeseen liittyvien tutkimustöiden johdosta Berkeleyn yliopistoa. (Mansikkamäki 2008, 30)

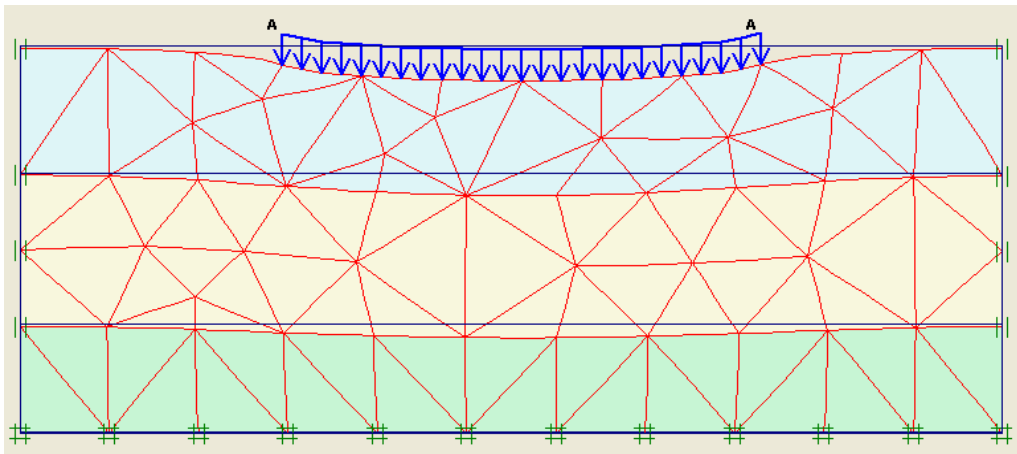
Elementtimenetelmän perusidea on vaikeiden tai mahdottomien ongelmien jakaminen osiksi ja niiden ratkaiseminen. Osat kootaan yhteen ja näin saadaan approksimaatio alkuperäisen ongelman vastauksesta. Tietokoneiden laskentatehojen kasvaessa ongelmat voidaan jakaa todella pieniin osiin ja näin saadaan koko ajan tarkempia approksimaatioita ratkaisusta. (Mansikkamäki 2008, 31)

Elementtimenetelmään perustuvat ohjelmat koostuvat pääosin kolmesta osiosta. Esikäsitteilyssä luodaan geometria, määritetään elementtiverkko ja ominaisuudet, määritellään materiaaliarvot ja jännitykset ja annetaan reunaehdot. Ratkaisijassa voidaan muokata vielä reunaehtoja, valitaan analyysityyppi ja -vaihtoehto (esim. materiaalmalli) ja ratkaistaan ongelma. Jälkikäsitteilyssä tutkitaan saatuja tuloksia. (Mansikkamäki 2008, 31)

Menetelmän nimenmukaisesti ratkaistavan ongelman päälle luodaan verkko, jonka solmupisteissä laskenta tapahtuu. Useimmissa ohjelmissa verkot luodaan automaattisesti, käyttäjä voi vaikuttaa lähinnä elementtiverkon tiheyteen ja mahdollisesti myös muotoon. Elementtiverkon tihentämisellä saadaan useampi solmukohta, joten tulos on numeerisesti tarkempi. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty elementtiverkko laskennan eri vaiheissa. (Mansikkamäki 2008, 34)



Kuva 16: Elementtimenetelmän verkko laskennan alussa.



Kuva 17: Elementtimenetelmän verkko laskennan lopussa.

Mohr-Coulombin materiaalmallin yhteydessä käytetty Gaussin iteratiivinen ratkaisutekniikka on teoriassa yksinkertainen. Ohjelma luo geometriasta ja materiaalien ominaisuuksista jäykkyysmatriisin. Matriisia iteroidaan ja päivitetään muodonmuutoksia niin kauan, että virhetoleranssi alitetaan ja tulos on tarpeeksi tarkka. Hyväksytty tulos viedään jälkikäsittelijään. (Mansikkamäki 2008, 35)

Maamekaniikassa saadut tulokset ovat joka tapauksessa likimääräisiä, sillä muuttujia, tuntemattomia tekijöitä ja yleistyksiä on huomattavasti. (Mansikkamäki 2008, 32)

3.2.1 Elementtimenetelmän edut

Elementtimenetelmä mahdollistaa seuraavien asioiden käsittelyn:

- Pystytään käsittelemään vaikeita geometriamalleja.
- Pystytään tekemään monimutkaisia analyysejä, kuten mallintamaan epälineaarisia muodonmuutoksia tai dynaamista käyttäytymistä.
- Pystytään hallitsemaan monimutkaisia kuormitustapauksia, kuten aikariippuvaisia kuormia.
- Voidaan analysoida staattisesti määräämättömiä rakenteita.
- Pystytään mallintamaan epähomogeenisia materiaaleja, sillä periaatteessa jokaisella mallin elementillä voi olla eri materiaaliominaisuudet.

(Mansikkamäki 2008, 38)

3.2.2 Elementtimenetelmän rajoitukset

Menetelmä tarjoaa tehokkaan työkalun ongelmien mallintamiseen ja ratkaisuun, ottamatta kantaa esitetyn ongelman asetteluun tai laatuun. Ohjelman käyttäjälle jää siis suuri vastuu ratkaisun onnistumisesta. Ohjelmat eivät myöskään ole täysin virheettömiä ja numeeriset menetelmät asettavat myös laskennalle muutamia ongelmakohtia. Käyttäjällä on siis oltava ymmärrystä ja arviointikykyä ohjelman laskeman ongelman ilmiöistä ja tulosten sekä lähtöarvojen tarkkuudesta.

(Mansikkamäki 2008, 38)

3.3 GeoCalc

GeoCalc kuuluu suurempaan Novapoint-tuoteperheeseen. Novapoint on monta pienempää ohjelmaa sisäältäävä ohjelmisto, jolla voidaan laskea ja suunnitella monipuolisesti lähes kaikkea infra-rakentamisen osa-alueita.

Ohjelmiston laskentamoduulit toimivat GeoCad piirtoalustan päällä. Sillä voidaan piirtää perustason 2D CAD -kuvia. Laskentamoduuli itsessään muokkaa piirtoalustan

kuvaa siihen syötettyjen arvojen perusteella. Lisäksi piirtoalustan kuvaa käytetään tulostuskuvien luomisessa ja jälkikäsitelyssä.

Ohjelman painumalaskentamoduulin ydin on Aalto-yliopistolla (entinen TKK) kehitelty ja ohjelmoitu SETTLE-laskentamoottori. (NPGeoCalc, ohjelmiston info osuus)

Teoria

Ohjelman painumalaskenta perustuu Terzaghin yksiulotteiseen konsolidaatiopainumateoriaan.

Jännityslisä lasketaan kimmoteorian mukaan. Painuman suuruuden määrittämisessä käytetään kokoonpuristuvuusmodulia M , joka voidaan mallintaa seuraavilla menetelmillä:

- Tangenttimoduuli
- Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä
- Helenelundin vesipitoisuusmenetelmä
- Janbun vesipitoisuusmenetelmä
- Ruotalainen CRS-koe menetelmä

(Länsivaara, luentomoniste)

3.4 Geomitoitus Smura

Geomitoitus Smura for Windows on DI Mikko Smuran laatima ohjelmistopaketti Microsoft Exceliin. Ohjelmistoilla voidaan tarkastella painumaa, vakavuutta ja syvästabiloinnin sekä pystyjoituksen mitoitusta. Ohjelmasta voidaan tulostaa selkeitä A4-kokoisia sivuja, joilla laskettu asia esitetään.

Teoria

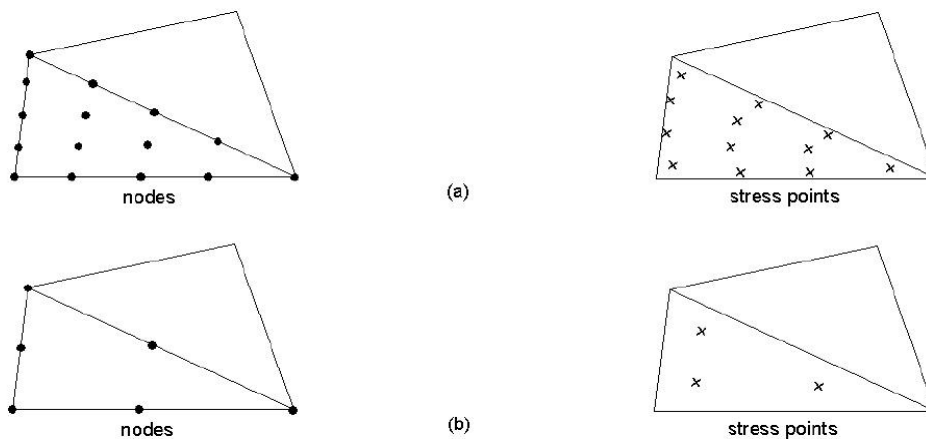
Ohjelman painumalaskenta perustuu Janbun teoriaan tai vesipitoisuusmenetelmään.

Jännitys jakauma lasketaan Boussinesqin teorian mukaan. Ohjelmassa painumaa mallinnetaan tangentialmoduulimenetelmällä tai vesipitoisuusmenetelmällä. Mukana Janbun teoriaan perustuva painuma-aika ohjelma painuma-aika kuvaajan tarkasteluun.

3.5 Plaxis

Plaxisin kehittäminen aloitettiin Delftin yliopistossa Alankomaissa vuonna 1987. Projektin päämääränä oli kehittää helppokäyttöinen 2D-elementtimenetelmä jokivarsien stabiiliteetin laskemiseen. Plaxisin käyttömahdollisuudet ovat kasvaneet tästä huomattavasti ja sen kehitystä varten on perustettu PLAXIS b.v -niminen yhtiö. Plaxis-tuoteperheeseen kuuluu tällä hetkellä yhdeksän kaksi- ja kolmiulotteista laskentaohjelmaa ja ne kattavat lähes kaikki käytännön geotekniikassa tarvittavat laskentatehtävät. (Brinkgreave R.B.J. & Broere W, 2006, PLAXIS Theory Manual version 8)

Plaxis on käyttöliittymältään graafinen. Laskettavat tapaukset piirretään CAD-maailmasta tuttuun malliin. Ohjelma luo mallin päälle nk. verkon Sepran kehittämän kolmiogeneroinnin avulla. Ohjelma laskee muutosparametrit verkon kulmapisteissä. (Brinkgreave R.B.J. & Broere W, 2006, PLAXIS Theory Manual version 8)



Kuva 18: Plaxisin kolmioelementit. (Kärki 2010, 56)

3.5.1 Teoria

Ohjelman painumalaskenta perustuu Biotin kolmiulotteiseen konsolidaatiopainumateoriaan.

3.5.2 Parametrien syöttäminen

Muodonmuutosparametrit annetaan Plaxiksessa hieman erilailla kuin muissa vertailun ohjelmissa. Ohessa on selitetty annettavat parametrit ja esitelty kaksi ohjelman käyttämistä maaperämalleista.

Maaperämallit

Maaperän ominaisuuksien kuvaamiseen on luotu monia maaperämalleja. Ne eroavat toisistaan vaadittavien parametrien ja olettamusten erilaisuuksien takia huomattavasti. Oikean maaperämallin valitseminen ei ole aina itsestään selvää, sillä geoteknikon täytyy käyttää parasta mallia, jonka parametrit ovat kokeellisesti määritetty. On myös mahdollista, että kokemuseräisesti arvioidut parametrit tuottavat paremman tuloksen tarkemmalla maaperämallilla. Tässä on kuitenkin vaarana laskelman suuretkin virheet.

Maaperämalleja on huomattavan monta ja ne on tarkoitettu erilaisten olosuhteiden ja eri raekoon maalajien tulkintaa ja käyttäytymistä mallintamaan. Kuitenkin kaikissa malleissa tarvitaan jäykkyyttä ja plastisuutta kuvaavia parametreja. Lisäksi niillä voidaan kuvata maaperän myötälujenemistä tai virumaa.

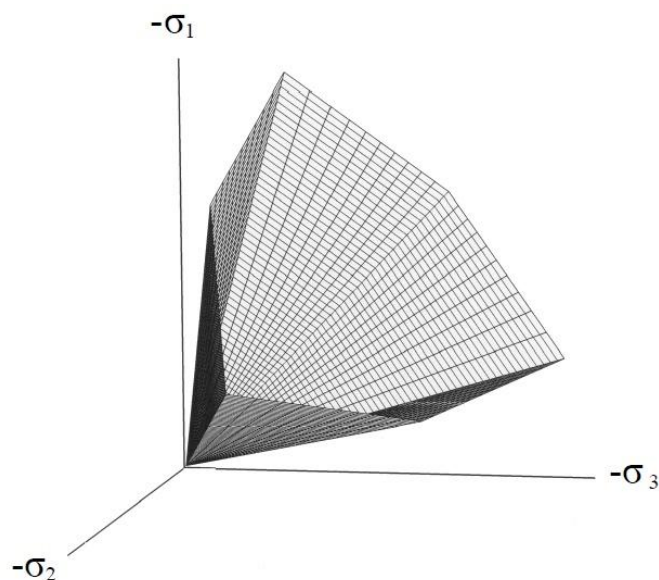
Mohr-Coulomb (MC)

Mohr-Coulombin materiaalimallissa lähtötiedot annetaan viiden eri parametrin muodossa. Jäykkyyssparametrina annetaan kimmomoduuli E [MN/m²] ja Poissonin luku ν . Plastisina parametreina määritetään maan kitkakulma ϕ [°], koheesio c [kN/m²] ja dilaatiokulma ψ [°], joka kuvaa plastista tilavuudenmuutosta.

(<http://www.plaxis.nl/publication/20/info/>, viitattu 25.6.2010)

Kimmomoduulin arvoa kuvataan mallissa vakiona jokaisessa maakerroksessa. Todellisuudessa sen arvo kuitenkin vaihtelee jännityksen ja muodonmuutoksen mukana. Tätä muutosta varten mallissa voidaan syöttää lähtötietona arvo $E_{increment}$ [kN/m²/m], joka kuvaa kimmomoduulin kasvua syvyyden kasvaessa. Lisäksi sama voidaan määrittää koheesiolle arvolla $c_{increment}$ [kN/m²/m]. (Kärki 2010, 59)

Mohr-Coulombin materiaalmalli on yksinkertainen malli, joka soveltuu hyvin geoteknisten ongelmien alustaviin tarkasteluihin. Useimmissa tapauksissa kuitenkin monimutkaisempien materiaalmallien vaatimia lähtötietoja ei ole käytettävissä ja tarvittavien lähtötietojen hankkiminen on liian kallista. (Kärki 2010, 59)



Kuva 19: Mohr-Coulombin myötöehto pääjännitysakselistossa kun $c = 0$. (Kärki 2010, 58)

Hardening Soil (HS)

Hardening Soil -mallissa annetaan lähtöarvoina plastiset parametrit kitkakulma ϕ , koheesio c ja dilaatiokulma ψ . Maan jäykkyyttä kuvataan tässä mallissa huomattavasti tarkemmin antamalla seuraavat parametrit E_{50} , E_{ur} ja E_{eod} . Näiden parametrien määrittämiseen tarvitaan avoin kolmiaksaalikoe sekä ödometrikoe. Esikuormituksen aikainen tangenttimoduuli E_{eod} määritetään ödometrikokeesta. Avoimella kolmiaksaalikokeella saadaan määritettyä sekanttimoduuli E_{50} ja palautusmoduli E_{ur} .

Hardening Soil -mallissa huomioidaan jäykkyyden riippuminen vallitsevasta jännitystasosta. (<http://www.plaxis.nl/publication/24/info/>, viitattu 25.6.2010)

Hardening Soil -mallia käytetään harvemmin, sillä se vaatii huomattavasti kalliimmat ja tarkemmat tutkimukset maaperästä. Sillä voidaan kuitenkin mallintaa maaperän toimintaa jännitystilanteissa tarkemmin, jos siihen on kohteessa tarvetta.

3.6 Settle 3D

Settle 3D on Rocsciencen kehittämä ohjelma painumien laskemista varten. Rocscience on kehittänyt lukuisia muitakin ohjelmia kattamaan kaikki tavalliset geotekniset ongelmat ja niiden ratkaisemiset. Ohjelmalla voidaan mallintaa maaperän käyttäytyminen alku-, konsolidaatio- ja loppupainumassa. Ohjelma laskee kolmiulotteisesti painuman, jännityksen ja huokospaineen muutokset. (<http://www.rocscience.com/products/Settle3D.asp>, viitattu 2.7.2010)

Teoria

Ohjelman painumalaskenta perustuu valittavissa olevaan teoriaan. Vaihtoehtoina ovat seuraavat: lineaarinen, epälineaarinen, Janbu ja Koppejan.

Jännityslisä voidaan laskea joko Boussinesqin mukaan tai likimääräisteoriolla.

Ohjelma laskee alkupainuman, konsolidaatiopainuman ja loppupainuman.

Huokosvedenpainetta mallinnetaan samalla Skemptonin teorian mukaan. Ohjelmaan voidaan ottaa myös huomioon nk. Buoyancy-ilmiö, mikä tarkoittaa, että painuman edetessä yhä suurempi osa painuvasta materiaalista on pohjavedenpinnan alla, täten nostaa huokosvedenpainetta ja laskien jännitystä. (Settle 3D Settlement and consolidation analysis Theory Manual, 2007-2008)

4 TUTKIMUSKOHTEIDEN PAINUMAT

4.1 Kemira, Kokkola, Kemiran tehtaiden fosforihapposäiliön painumaseuranta

Projekti on tehty 1987 ja sen tarkemittaukset ovat tehty noin vuosi rakentamisen jälkeen.



Kuva 20: Kemiran tehtaan fosforihapposäiliö.

Säiliön halkaisija on 26-metriä ja se on sylinterinmuotoinen.

Monimutkainen teräsbetoni-laattaperustus aiheuttaa pieniä vääristymiä laskelmille. Se jakaa kuormia tasaisemmin varsinkin keskelle syntyvän painuman arviointiin on syytä kiinnittää huomiota. Teräsbetoni-laatan päällä on ilmastointisäleikkö ja sen päällä itse säiliö. Näin menetellään, ettei kylmä fosforihappo säiliössä jäädyttäisi maata altansa. Rakenteen taipuvuutta on myös hankalaa määrittää olosuhteiden takia. Laskennat on suoritettu mallintamatta teräsbetoni-laattaa jäykisteeksi, jotta kaikille ohjelmille saadaan tasapuoliset lähtötiedot.

4.1.1 Pohjatutkimustiedot

Pohjamaa on jaettu kolmeen kerrokseen pohjatutkimusten perusteella. Ylimpänä oleva löyhä noin metrin kerros on massanvaihdolla korvattu tiivistettyyn soraan, joten sitä ei huomioida painumalaskelmissa muuten kuin jännityslisänä. Tutkimustiedot on esitetty liitteessä 2.

Kerros	Maalaji	Paksuus	m1	β_1	m2	β_2
1	Hk	6,6	600	0,3	800	0
2	saSi	7,8	200	0,3	200	0
3	Hk	3	500	0,3	500	0

Taulukko 2: Maapohjan parametrit

Täydelliset laskuparametrit on esitetty liitteessä 3.

4.1.2 Laskennan tulokset

	Mitatut painumat	GeoCalc	Geomitoitus	Plaxis	Settle 3D	w%	esim. lasku
Reunalla	20 mm	30 mm	19,5 mm	30 mm	23 mm	190,6 mm	32,6 mm
Keskellä	35 mm	47 mm	33 mm	50 mm	40 mm	279,7 mm	59,7 mm

Taulukko 3: Mitatut ja lasketut arvot

Ohjelmista tulostetut tarkemmat painumatulokset on esitetty ohjelmakohtaisesti liitteissä 4 1-6.

4.1.3 Tulosten arviointi

Laskentojen tulosten osumatarkkuus vaihteli. Tässä kohteessa ohjelmien laskemissa painumissa oli eniten eroa. Kohteesta lasketut painumat osoittavat hyvin sen, että

vertailuarvo toisesta ohjelmasta tai menetelmästä olisi hyvä olla saatavilla. Pohjarakenteen taivutusvastusta mallintamalla olisi päässyt vielä tarkempiin tuloksiin kaikilla ohjelmistoilla, mutta ohjelmien vertailua varten oli helpompaa jättää se mallintamatta.

Lähimmäksi todellisia painumia pääsi tässä laskennassa Geomitoitus Smura - ohjelmisto. Sen tulosten virhemarginaali on pieni ja varsinkin keskellä mitattu arvo poikkeaa hyvin vähän toteutuneesta painumasta.

Vesipitoisuusmenetelmällä lasketun painuman todella huomattava poikkeaminen johtuu maalajeista. Laskennasta saatu tulos on hyvä esimerkki oikean painumanlaskentamenetelmän valinnan tärkeydestä.

Esimerkkiparametreilla lasketut tulokset eivät ole kovinkaan kaukana normaaleilla arvoilla lasketuista.

4.2 Onninen, Lahti, pystyjoitetun penkereen painumaseuranta

Onnisen liikekeskus sijaitsee Lahdessa. Kohde on rakennettu vuonna 2007 ja sen pinta-ala on 2500 m².

Kohteessa on tehty esimerkkikohteista laajimmat pohjatutkimukset, joihin kuuluu ödometrikokoe. Parametrien määrittäminen tästä kohteesta oli erittäin helppoa ja niiden avulla päästiinkin todella tarkkoihin tuloksiin.



Kuva 21: Onnisen liikekeskus, Lahti.

Kohteen painuma-aika on lyhyt, vain kolme kuukautta.

4.2.1 Pohjatutkimustiedot

Pohjatutkimustietojen perusteella maaperä on jaettu kolmeen osaan. Kahdelle ylimmälle kerrokselle saadaan laskentaparametrit ödometrikoetuloksista, joista on esitetty esimerkitulos liitteessä 1.

Kerros	Maalaji	Paksuus	m1	β_1	m2	β_2
1	KuSa	3,4	77,4	1,3	103,6	0
2	Sa	13,1	7,1	-0,4	120,5	0
3	Si	3,3	200	0,3	500	0

Taulukko 4: Maapohjan parametrit

Täydelliset laskentaparametrit on esitetty liitteessä 3.

4.2.2 Laskennan tulokset

	Mitatut painumat	GeoCalc	Geomitoitus	Plaxis	Settle 3D	w%
Piste	108 mm	110,1 mm	106 mm	109,3 mm	102,5 mm	125,9 mm

Taulukko 5: Mitatut ja lasketut arvot

Ohjelmista tulostetut tarkemmat painumatulokset on esitetty ohjelmakohtaisesti liitteissä 4-12. Geomitoituksen tuloksissa on otettava huomioon mittauspisteen paikka penkereessä. Taulukon tulos ei vastaa suoraan ohjelmasta saatuja arvoja, vaan se on interpoloitu vasemman reunan ja penkereen keskustan painumien mukaan vastaamaan mahdollisimman hyvin oikeaa mittauspistettä.

4.2.3 Tulosten arviointi

Laskentaohjelmien tulokset vastasivat erittäin hyvin toteutuneita painumia. Kaikissa ohjelmistoissa ei ollut mahdollista mallintaa pystyöjitusta, joten se mallinnettiin mahdollisimman hyvin muulla tavalla.

Ödometrikokeista saatujen painumaparametrien takia esimerkkilaskua huonosti valituilla parametreilla ei ole syytä esittää tämän kohteen yhteydessä.

Lähimmäksi todellisia painumia pääsi tässä laskennassa Plaxis-ohjelmisto. Tulos osuu lähes todellisen painuman mittausten virhemarginaaliin, joten sen voidaan katsoa vastaavan todellista painumaa.

Vesipitoisuusmenetelmällä laskettu painuma on myös melko lähellä toteutunutta. Sillä lasketun tuloksen liian suurta painumaa selittää myös alin laskettu kerros, joka ei sovellu täysin menetelmän käyttöön.

4.3 Sipoon-ranta, Sipoo, syvästabiloidun penkereen painumaseuranta

Sipoon-ranta on Sipoosen merenrantaan rakenteilla oleva asuinalue, joka sijaitsee 20 km päässä Helsingistä. Alueelle tulee myös venesatama ja palvelut. Koko rakennusurakan arvioidaan olevan valmis vuonna 2013. FCG Finnish Consulting Group Oy vastaa alueen geosuunnittelusta.

Alueen pohjaolosuhteet ovat varsin haastavat paksun savikerroksen takia. Kantavuuden parantamiseksi ja painumien pienentämiseksi alue on syvästabiloitu.

Painuman mittaamispiste sijaitsee Lillörenintiellä. Painuma-aika mittauksessa on varsin lyhyt, vain kaksi kuukautta.

Mittauspisteen viereiset maakerrokset on jaettu pohjatutkimustietojen avulla kolmeen osaan ja niille on saatu seuraavia parametreja laskentaan.



Kuva 22: Sipoon-rannan tiepohjan painumapenger, Sipoo.

Laskentaa vaikeuttavat epätarkat maaperätiedot. Savikerroksen päälle on kasattu aikojen saatossa monipuolisesti erilaisia maakerroksia. Sen alkuperäisestä paksuudesta ei ole kuitenkaan tietoa, sillä se kaivettiin noin puoli metriä paksuksi ennen kairausten tekoa. Tämä vaikeuttaa saven esikonsolidaation arviointia.

4.3.1 Pohjatutkimustiedot

Pohjatutkimustietojen perusteella maaperä on jaettu kolmeen osaan. Ylin kerros on merkitty louheeksi, vaikka se on sekoitus suurirakeisia maalajeja, eikä sen rakeisuutta ole määritelty koeperäisesti.

Kerros	Maalaji	Paksuus	m1	β_1	m2	β_2
1	Lo	0,5	600	0,5	800	0
2	Sa	3,8	16	-0,4	60	0
3	Mr	1,9	600	0,5	600	0

Taulukko 6: Maapohjan parametrit

Täydelliset laskentaparametrit on esitetty liitteessä 3.

4.3.2 Laskennan tulokset

	Mitatut painumat	GeoCalc	Geomitoitus	Plaxis	Settle 3D	w%	esim. lasku
Piste	53 mm	50,2 mm	50 mm	50,7 mm	53,4 mm	37,4 mm	78,6 mm

Taulukko 7: Mitatut ja lasketut arvot

Ohjelmista tulostetut tarkemmat painumatulokset on esitetty ohjelmakohtaisesti liitteissä 4 12-18. Geomitoituksen tuloksissa on otettava huomioon mittauspisteen paikka penkereessä. Taulukon tulos ei vastaa suoraan ohjelmasta saatuja arvoja, vaan se on interpoloitu vasemman reunan ja penkereen keskustan painumien mukaan vastaamaan mahdollisimman hyvin oikeaa mittauspistettä.

4.3.3 Tulosten arviointi

Kohteen laskentatulokset ovat lähellä mitattua tulosta. Lähimmäksi mitattua tulosta tässä laskennassa pääsi Settle 3D. Sen arvioitu painuma on helposti mittauksen virhemarginaalissa ja voidaan katsoa, että laskennan tulos on oikein. Stabiloinnin vaikutus parametreihin on luultavasti arvioitu hyvin kohdalleen. Laskennan muun epätarkkuuden vuoksi on todella vaikeaa arvioida ovatko parametrit todellisia, vai osuiko vain kerrosten yhteispainuma lähelle toteutunutta.

Vesipitoisuusmenetelmällä laskettu arvio jää yllättävän pieneksi ottaen huomioon että vain yksi kerros muodostaa lähes koko painuman, kun vesipitoisuusmenetelmä laskee jokaisen kerroksen painuvan. Esimerkkiparametreilla saadaan laskennan painumat huomattavasti suuremmiksi, tosin stabiloinnin aiheuttamaa painuman vastustusta on vaikeaa arvioida ylipäänsäkin.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Yleistä

Painumalaskelmien tekemisessä täytyy huomioida paljon eri asioita. Laskelmien tuloksien analysoinnissa laskijan kokemus ja käsitys maamekaniikasta on todella tärkeää. Parametrien käytössä on todella monta asiaa, jotka tulee ottaa huomioon. Myös laskentaohjelmien numeeriset virheet ja koodausvirheet ovat mahdollisia.

Jaan johtopäätökseni teorian esittelyä vastaavaan järjestykseen ja käsittelen ensin teorioihin perustuvat päätelmät ja sen jälkeen laskentojen tulokset.

Ensimmäiseksi käyn lävitse parametrien määrittämisessä huomioitavia asioita. Pohjatutkimukset ja niistä määritetyt laskentaparametrit ovat tärkein yksittäinen tekijä painumalaskennassa. Laskennassa käytetyn painumalaskentamenetelmän potentiaalia ei saada esiin väärin tulkituista pohjatutkimuksista ja laboratoriokokeista. Laskentaparametrien valinnalla on suurin yksittäinen merkitys lopputuloksen onnistumisen kannalta.

Seuraavassa kappaleessa käsittelen ohjelmistojen käyttämistä hyödyksi painumalaskennassa. Ohjelmistoja käytettäessä on syytä muistaa käyttäjän vastuu. Laskennan tuloksia on aina käsiteltävä objektiivisesti ja mahdollisuuksien mukaan olisi hyvä tarkistaa tuloksien oikea suuruusluokka eri ohjelmistolla tai eri laskentamenetelmällä. Ohjelmistojen käyttämät yksiköt ja niiden määritelmät eroavat usein hieman toisistaan ja kannattaa aina varmistaa, että syötettävä arvo vastaa ohjelman yksikköä.

Lopuksi käsittelen laskentojen tulokset. Laskennoissa ei ole voitu mallintaa kaikkea täysin oikein, sillä pidin tasapuolisia lähtöarvoja tärkeämpänä asiana, kuin mahdollisimman tarkkoja tuloksia. Lisäksi ohjelmien käyttökokemuksen perusteella olisi helppoa tehdä laskennoista jotain tiettyä ohjelmaa suosivia.

5.2 Parametrien määrittäminen

Parametrien määrittämistä varten tarvitaan pohjatutkimustulokset ja rakennussuunnitelmat. Parametrien oikeellisen käytön varmistamiseksi on tarpeellista tuntea tuleva jännitystilä. Maaperän jännityshistorian tunteminen auttaa myös esikonsolidaation arvioimisessa, mikäli ödometrikoketuloja ei ole saatavilla. Esikonsolidaatiojännitystä pienemmällä jännityksellä maaperän painumakäyttäytyminen on huomattavan erilaista, kuin sen jälkeen. Tästä syystä on todella tärkeää määrittää oikein ylikonsolidaatio.

Maaperän pohjavesiolosuhteet ja veden virtaamisnopeus ovat nykyrakentamisessa todella tärkeitä tekijöitä, koska esirakentamiselle ei usein jää paljon aikaa. Pohjan mahdollinen vahvistaminen on toteutettava lähes aina nopeasti. Tästä syystä syvästabilointi on yleisin vaihtoehto savisilla mailla. Massanvaihdon tekeminen pienille savilinsseille on myös yleistä ja vakuumpystyöjituksen kehittyminen saattaa tulevaisuudessa tarjota myös oivan keinon painumien nopeuttamiseen.

5.2.1 Pohjatutkimukset

Tutkimusten avulla on tarkoitus määrittää mahdollisimman hyvä arvio maakerrosrajoista ja kerrosten ominaisuuksista. Vaikka monissa eri julkaisuissa on esitetty taulukoita maalajeille tyypillisistä parametreista, eivät ne kuitenkaan riitä mitenkään korvaamaan hyvin suunniteltuja kairauksia ja laboratoriotutkimuksia.

Pohjatutkimusohjelmaa suunniteltaessa olisi hyvä tuntea alustavasti pohjamaan tyyppi. Maastokäynti ja Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) kartta ovat esimerkiksi hyviä pohjatutkimusohjelmansuunnittelun lähtökohtia.

Pohjatutkimusten ja laboratoriokokeiden teettäminen vie aikaa ja ne ovat kalliita. Siksi onkin tärkeää, että jokaisessa kohteessa harkitaan tapauskohtaisesti tarvittava määrä tutkimuksia. Pohjatutkimukset eivät käytännössä voi koskaan olla liian tarkkoja, johtuen maaperän epähomogeenisyydestä. Toisaalta todella tarkkojen mallien ja pienten maalajikerrosten tekeminen on usein hyödytöntä saatuihin tuloksiin nähden. Tarkoituksena onkin tuottaa juuri kohteen vaatimuksiin tarpeeksi tarkka ohjelma.

Painumanlaskelmat ovat aina arvioita ja siksi on hyvä muistaa myös realistisen laajuiset tutkimusohjelmat. Todella painumaherkkien rakenteiden vieminen esimerkiksi teräsputkipaaluilla kallioperään on usein halvempaa kuin suunnitella ja toteuttaa vaikea pohjanvahvistus.

5.2.2 Laskentaparametrit

Olen käyttänyt laskelmissani lähinnä tangenttimoduulimenetelmää. Se on yleisin painumalaskentamenetelmä Suomessa, joskin kaikkien kirjallisuusosuuden menetelmien käyttämisessä on huomioitava samoja asioita.

Puolilogaritmisten menetelmien käyttö on yleistä maailmalla. Suomalaisissa varsin vesipitoisissa savissa painumakäytöstä on kuitenkin kyseisillä menetelmillä vaikeampi arvioida, poikkeuksena Suomessa kehitelty Helenelundin vesipitoisuusmenetelmä.

Parametrien määrittäminen on todella tärkeä asia. Tämän tuntemiseksi ödometrikokeiden tulostuloksia on päästävä itse katsomaan. Myös tulevan rakenteen aiheuttama jännitys tulisi tietää suurpiirteisesti, jotta voidaan määrittää parametrit oikealta jännitysväliltä. Olisikin suotavaa, että parametrit määritellään mahdollisimman kattavista ödometrikoe tuloksista.

Saville voi myös ilmetä negatiivisia β :n arvoja. Tämä johtuu siitä, että esikonsolidaatiojännityksen ylittymisen jälkeen maaperä painuu erittäin nopeasti. Samalla tapahtuu rakenteellista lujittumista ja maaperän suhteellinen painuminen jännityslisään nähden hidastuu. Parametrien käytössä on myös tärkeä käyttää saatuja β ja m arvoja aina yhdessä. Savelle voidaan antaa tiettyjä vaihteluvälejä moduuliluvulle m käyttämällä eksponentin arvoa $\beta = 0$ Hiekkojen ja silttien kohdalla voidaan antaa samoja arvoja käyttämällä $\beta = 0,5$.

Jos savien parametreja halutaan käyttää muilla esikonsolidaation arvoilla, kuin ödometrikokeen mukaisilla, tulisi niitä muuntaa. Tim Länsivaara on käsitellyt selventävin esimerkein parametrien muuntamista teoksessa Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi.

Veden virtausnopeus maaperässä vaikuttaa painuman nopeuteen. Yleisesti tämä ei aiheuta vaikeuksia kuin savimailla. Virtausnopeus luonnollisesti hidastuu painuman edetessä ja maaperän tiivistyessä. Virtausnopeuden arviointia varten on kehitetty diagrammeja, jotka yleensä perustuvat tehokkaaseen raekokoon d_{10} .

5.2.3 Ylikonsolidaation antaminen

Ylikonsolidaation antamisen pitäisi perustua laajaan ödometrikoetus aineistoon. Sen antaminen on yleensä kannattavampaa POP eli ylikonsolidaation mukaan. Ylikonsolidaatioparametrin määrittäminen on helpompaa ja sen käytölle ei ole havaittu helppoja virheitä.

Ylikonsolidaatioaste OCR antaa tulokseksi virheellisiä esikonsolidaation syvyysriippuvuuksia. Kappaleessa 2.7 on esitetty menetelmien erot ja kuvassa 12 on esitetty miten kummatkin parametrit luovat jännitys-syvyysriippuvuutensa.

5.3 Ohjelmistot

Painumalaskentaan soveltuvia ohjelmistoja on monia ja niihin on sisällytetty kaikki yleisimmät painumateoriat. Ohjelmistojen helppokäyttöisyys ja niiden graafinen esitystapa on avuksi laskelmien tarkastuksessa. Ohjelmilla voidaan käsitellä paljon nopeammin ja laajemmin tutkimus- ja parametridataa, kuin käsin laskennassa. Se ei kuitenkaan poista ohjelman käyttäjän tietovaatimuksia.

Ohjelmien antamat tulokset ovat täysin numeerisia, eikä ohjelmisto itsessään osaa suhtautua tulokseen objektiivisesti. Käyttäjälle jääkin laskennan tulosten arviointi kokonaan. Ohjelmistot tarjoavat kyllä asiantuntijoille huomattavan laskunopeuden, ja samalla tulokset esitetään muodossa, josta niitä on helppo analysoida ja esittää laskelmien tilaajalle.

Käyttäjän vastuulla on myös parametrien syöttäminen. Ohjelmistot käyttävät saman arvon syöttämiselle monia erilaisia termejä. Esimerkiksi vedenvirtausta saatetaan

syöttää eri ohjelmissa metreinä päivässä tai metreinä vuodessa. Ohjelman käyttäjän vastuulle jää parametrien syöttämisen ohella tarkistaa myös niiden oikeellisuus.

Ohjelmistoissa on myös välillä havaittu koodaamiseen perustuvia virheitä. Niiden löytäminen ei ole yleistä, mutta käyttäjällä olisi hyvä olla kuitenkin suuruusluokan hahmottamiseen kokemusperäistä tuntemusta tai toisen ohjelman tulokset.

5.4 Laskentojen tulokset

Laskentojen tulokset ja todellisista painumista mitatut arvot ovat todella lähellä toisiaan, jos ottaa huomioon pohjatutkimusten vähyyden ja käytetyt pohjatutkimusmenetelmät. Parametrien arvioinnin perusteena käytin todella laaja-alaisesti eri lähteistä saatuja arviointitaulukoita. Kohteiden maaperäolosuhteet olivat vaihtelevia ja myös lähtötiedot laskentoihin olivat erilaisia.

Geomitoitus Smura -ohjelmalla laskettiin myös painumat vesipitoisuusmenetelmällä. Niiden tulokset olivat hieman vaihtelevammat. Todella huomattava ero Kemiran painumissa johtuu maaperästä. Vesipitoisuusmenetelmä on tarkoitettu savisten maiden painumien arviointiin, kun Kemiran maaperä on lähinnä hiekkaa ja silttiä.

Liitteessä 3 on esitetty vaihtoehtoiset laskentaparametrit Settle 3D:llä ja Geomitoituksella tehtyihin laskelmiin Kemiran ja Sipoonrannan kohteista. Parametrit on haettu samojen lähteiden taulukkoarvoilla, kuin varsinaiset laskelmat. Parametrit näihin laskelmiin on valittu satunnaisesti taulukon antamalta parametriväliltä. Saatujen tuloksien avulla huomataan, kuinka taulukon arvoilla voidaan laskea väärin, jos arvioidaan virheellisesti maaperän laskentaparametreja. Onnisen liikekeskusta ei ole sisällytetty näihin vertailuihin, sillä ödometrikokeista saadut tulokset ovat yksiselitteisiä.

Ohjelmien käyttötaito vaikuttaa myös laskentojen tuloksiin. Kaikkien ohjelmien mallit ovat mahdollisimman samanlaiset ja yksinkertaiset, sillä käyttökokemukseni eri ohjelmilla on vaihtelevaa. Ohjelmien käyttökokemuksen myötä myös vaikeammat mallintamiset, kuten jäykisteet, pystyojien parametrit ja rakenteellisen lujittumisen voisi mallintaa tarkemmin. Pohjatutkimusten tulosten määrittäminen Plaxis-ohjelmaan

osoittautui hankalaksi, koska tarvittavat parametrit poikkesivat muista ohjelmista. Tehtävää vaikeutti myös tarvittujen parametrien määrittelytaulukoiden vähyys.

Kemiran säiliön laskennassa olisi voitu arvioida säiliöpohjarakenteelle jäykkyysparametreja ja näin olisi päästy tarkempiin tuloksiin. Sen arviointi olisi kuitenkin ollut todella epätarkkaa johtuen rakenteen monimutkaisuudesta ja lämpötilan vaikutuksesta rakenteisiin. Pohjatutkimuksista arvioiduilla parametreilla laskennan tulokset jakoutuivat kahtia. GeoCalc- ja Plaxis-laskennoista saadut tulokset olivat samansuuntaiset ja ne poikkesivat mitatuista tuloksista 10–15 mm. Geomitoitus Smura - ja Settle 3D -laskelmat osuivat todella lähelle mitattuja arvoja. Kaikista kohteista Kemiran laskelmatulokset poikkeavat eniten toisistaan. Maaperä on karkearakeisempaa ja tiiviimpää kuin muissa kohteissa. Vesipitoisuusmenetelmä ei sovellu laskentaan tällaisella maaperällä ja sillä laskettu arvio on lähes 10-kertainen toteutuneisiin painumiin.

Onnisen liikerakennuksen laskennoissa kaikkien ohjelmien tulokset olivat todella lähellä mitattua painumaa. Settle 3D ja Plaxis sisälsivät mahdollisuuden mallintaa pystyjoja laskentamalliin. Pystyjojat pyrittiin mallintamaan samanlaisiksi. Ohjelmien laskutulokset ovatkin melko lähellä toisiaan ja niiden eroavaisuuksia selittävät myös täysin erilaiset laskentaparametrit. Geomitoituksella pystyjojen vaikutusta arvioitiin korkeammalla konsolidaatiokertoimella. GeoCalc-laskennassa pystyjojen vaikutusta mallinnettiin virtausnopeuden nostolla. Kummankin pystyjojen korvaamisvariaation toimivuutta testattiin laskemalla ilman pystyjoja kaikkien ohjelmien painumat ja todettiin niiden olevan lähellä toisiaan.

Sipoon-rannan mallintamisessa vaikeuksia tuli stabiloinnin vaikutuksen arvioinnissa maan painumaominaisuuksiin. Lisäksi maaperän jännityshistorian ja pinnalla olevan isorakeisen maan poistamisen epätarkkuus lisäsivät painumaparametrien ja maaperän kerrosten arviointia. Stabiloinnin vaikutusta mallinnettiin nostamalla savikerroksen parametrien arvoja verrattuna kairauksista arvioituihin. Laskentojen tulokset osuivat kuitenkin lähelle mitattuja painumia. Vesipitoisuusmenetelmällä laskettu painuma ei ole kauhean kaukana toteutuneesta. Vaikka sen sillä saadut painumat jakautuvat virheellisesti eri kerroksiin, on kokonaispainuma melko lähellä toteutunutta painumaa.

Esimerkkilaskulla saadut painumat ovat huomattavasti suuremmat, kuin todelliset painumat.

LÄHDELUETTELO

Brinkgreave R.B.J. & Broere W, 2006, PLAXIS Theory Manual version 8,
Netherlands

InfraRYL [www-sivu]. [viitattu 25.6.2010] Saatavissa:

http://www.rts.fi/infraryl/Kasiteltavat_luvut/14122_Liuskapystyjojitukset_TK242_15032005.pdf

Jääskeläinen Raimo, 2009, Geotekniikan perusteet, Tammertekniikka/Amk-Kustannus
Oy, Tampere

Korkiala-Tanttu Leena, Geotekniikan peruskurssi, luentosarja, Aaltoyliopisto,
Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Espoo.

Kärki Tuomas, 2010, Syvien kaivantojen maanpaineeseinät, Diplomityö,
Aaltoyliopisto, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Espoo.

Lowe John, 1974, Terzaghi lectures 1974-1982, American Society of Civil Engineers,
United States of America

Länsivaara Tim, 2000, Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi,
Tiehallinnon julkaisuja 44/2000, Helsinki

Länsivaara Tim, Novapoint Geocalc, luentosarja, Tampereen teknillinen yliopisto,
Maa- ja pohjarakenteen laitos. Tampere

Mansikkamäki Juho, 2009, Olemassa olevien ratapenkereiden stabiiliteetin laskenta
elementtimenetelmällä, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja
pohjarakenteen laitos. Tampere

Plaxis Ltd. [www-sivu]. [viitattu 25.6.2010] Saatavissa:

<http://www.plaxis.nl/publication/24/info/>,

Plaxis Ltd. [www-sivu]. [viitattu 25.6.2010] Saatavissa:

<http://www.plaxis.nl/publication/20/info/>

Rantamäki Martti, Jääskeläinen Raimo, Tammirinne Markku, 1979, Geotekniikka, Yliopistokustannus/Otatieto, Helsinki

Rocscience inc. [www-sivu]. [viitattu 2.7.2010] Saatavissa:

<http://www.rocscience.com/products/Settle3D.asp>

Rocscience inc. 2007-2008, Settle 3D Settlement and consolidation analysis Theory Manual

Teräsrakenneyhdistys [www-sivu]. [viitattu 25.6.2010] Saatavissa:

http://www.terasrakenneyhdistys.fi/terasrakennelehti/s41-4_2-03.jpg

Vepsäläinen P, Geotekniikan numeeriset menetelmät, luentosarja, Aaltoyliopisto, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Espoo

Vianova Systems Finland Oy , NPGeoCalc, ohjelmiston info osuus

LIITTEET

Liite 1: Ödometrikokeen tuloksia

Liite 2: Pohjatutkimusleikkaukset 3/3

Liite 3: Täydelliset laskentaparametrit 4/4

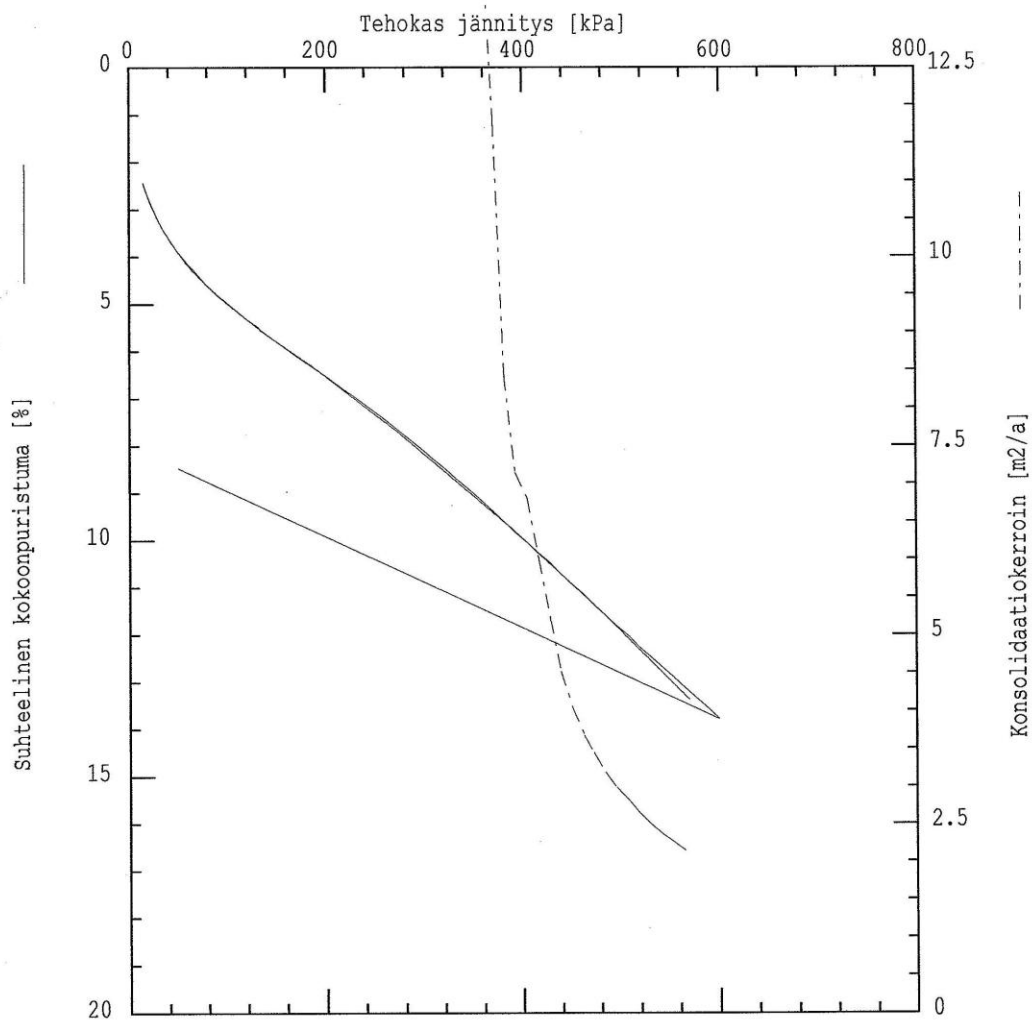
Liite 4: Laskentaohjelmien tulostussivut 18/18

MAATEKNIikka OY
Nuijamiestentie 5 C

00400 HELSINKI

Tilaaaja	SIPT
Kohde	Onninen
Työnumero	22195
Tutkimuspäivä	8.6.2006
Näytepiste	1
Syvyys	2.40
Näyttenumero	204845

Tiedosto	20845MT.DA2
Koetyyppi	CRS-koee
Nopeus	.01 mm/min
Kesto	3.8 h
Palautus	1.5 h
Palautusk.	50 kPa
Palautuss.	-35.36377%



b = 1.264
 m = 77.4
 Konsol. jänn. = 135.6 kPa

b2 = 0.307
 m2 = 57.8 (103.6 palautus)

IPT INSINÖÖRITOIMISTO
POHJATUTKIMUS OY

Pvm 17.4.1984

Laatija M. Honkanen

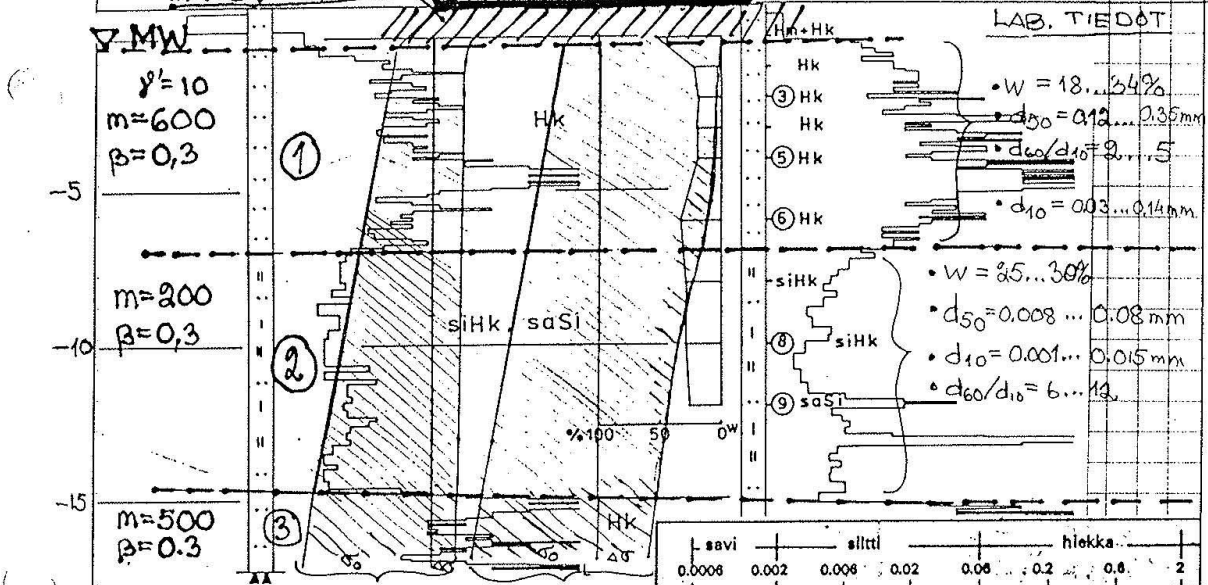
Kohde: KEMIRA OY
Kokkolan tehtaiden fosforihapposäiliö

PAINUMASEURANNAN JÄLKITARKASTELU

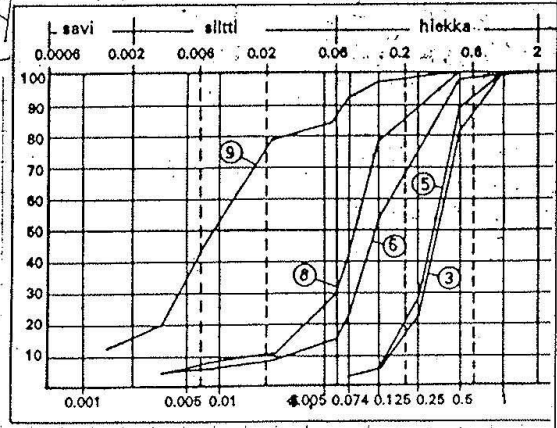
Lähtötietoja:

- Pinnassa oleva lyhyä kerros korvattu tiivistetyllä soralla
- Alkumittaus suoritettu valmiin peruslaatan päältä ennen säiliön pystytystä
- Toinen mittaus suoritettu 1-2 vuotta säiliön pystytyksen jälkeen

SÄILIÖ $\phi = 26\text{ m}$
tb-laatta $d = 400\text{ mm}$
 $q = 200\text{ kPa}$ (5 k.m.)
massanvaihto



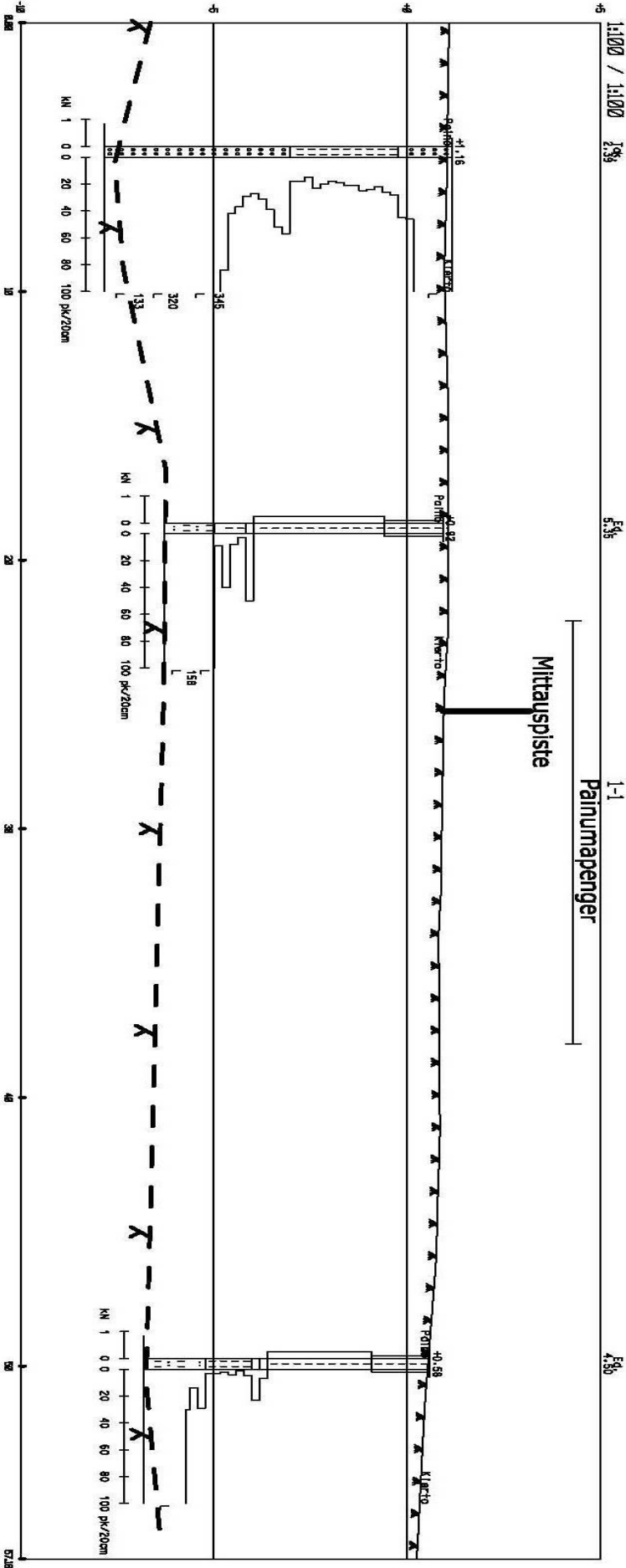
KER- ROS	LAS- KETTU	MITTILAS- TU	KESKI- PISTE	MITAT- TU
①	4 mm	13 mm		
②	18 mm	30 mm		
③	8 mm	4 mm		
YHT.	18 mm	20 mm	47 mm	35 mm



LASKELMAT TANG. MOD. MENETELMÄN KAAVALLA:

$$E_s = \frac{1}{m \cdot \beta} \left[\left(\frac{\sigma_s + 45}{100} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma_s}{100} \right)^\beta \right]$$

- VALITUT PARAMETRIT OHEISISSÄ KUVASSA
- Huom! Laskelma edustaa täysin tavanomaista rakennusta jatkuvasti tb-laatta jakaa kuormitusta.



Kemira, fosforisäiliön painumatarkastelu

Kerros 1

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	19	w [%]	24	yunsat[kN/m ³]	19	UW [kN/m ³]	19
y' [kN/m ³]	19	$\Delta\sigma$ [kPa]	50	ysat[kN/m ³]	19	satUW [kN/m ³]	19
m1	600	m1	600	kx [m/d]	8	m	600
β_1	0,3	β_1	0,3	ky [m/d]	8	mr	800
m2	800	m2	800	Eref [kN/m ²]	55000	a	0,3
β_2	0	β_2	0	v	0,3	Pc [kPa]	50
σ_c [kPa]	50	Cv [m ² /v]	30	c [kN/m ²]	5	K [m/y]	2920
k [m/y]	2920			ϕ [°]	38	Kr [m/y]	2920
				ψ [°]	0	B-bar	1
				MC Drained			

Kerros 2

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	17	w [%]	27	yunsat[kN/m ³]	17	UW [kN/m ³]	17
y' [kN/m ³]	17	$\Delta\sigma$ [kPa]	0	ysat[kN/m ³]	17	satUW [kN/m ³]	17
m1	200	m1	200	kx [m/d]	8,6E-06	m	200
β_1	0,3	β_1	0,3	ky [m/d]	8,6E-06	mr	200
m2	200	m2	200	Eref [kN/m ²]	35000	a	0,3
β_2	0	β_2	0	v	0,34	Pc [kPa]	0
σ_c [kPa]	0	Cv [m ² /v]	15	c [kN/m ²]	20	K [m/y]	0,00314
k [m/y]	0,00314			ϕ [°]	33	Kr [m/y]	0,00314
				ψ [°]	0	B-bar	1
				MC UnDrained			

Kerros 3

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	19	w [%]	30	yunsat[kN/m ³]	19	UW [kN/m ³]	19
y' [kN/m ³]	19	$\Delta\sigma$ [kPa]	0	ysat[kN/m ³]	19	satUW [kN/m ³]	19
m1	500	m1	600	kx [m/d]	5,5	m	500
β_1	0,3	β_1	0,3	ky [m/d]	5,5	mr	500
m2	500	m2	600	Eref [kN/m ²]	60000	a	0,3
β_2	0	β_2	0	v	0,3	Pc [kPa]	0
σ_c [kPa]	0	Cv [m ² /v]	30	c [kN/m ²]	15	K [m/y]	2000
k [m/y]	2000			ϕ [°]	40	Kr [m/y]	2000
				ψ [°]	0	B-bar	1
				MC Drained			

	Laskettu (mm)		Erotus (mm)		Erotus %	
	Keskellä	Reunalla	Keskellä	Reunalla	Keskellä	Reunalla
Geocalc	47	30	12	10	34,3 %	50,0 %
Geomitoitus	33	19,5	-2	-0,5	-5,7 %	-2,5 %
Plaxis	50	30	15	10	42,9 %	50,0 %
Settle 3D	40	23	5	3	14,3 %	15,0 %
Mitattu	35	20				

Onninen, ostoskeskus lahdessa

Kerros 1

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	12,3	w [%]	35	yunsat [kN/m ³]	12,3	UW [kN/m ³]	12,3
y' [kN/m ³]	17,5	$\Delta\sigma$ [kPa]	97,3	ysat[kN/m ³]	17,5	satUW [kN/m ³]	17,5
m1	77,4	m1	77,4	kx [m/d]	8,6E-06	m	77,4
β 1	1,3	β 1	1,3	ky [m/d]	8,6E-06	mr	103,6
m2	103,6	m2	103,6	Eref [kN/m ²]	20000	a	1,3
β 2	0	β 2	0	v	0,3	Pc [kPa]	1
σ c [kPa]	97,3	Cv [m ² /v]	14	c [kN/m ²]	21	k [m/mon]	0,00026
k [m/y]	0,13498			ϕ [°]	25	Kr [m/mon]	0,00026
				ψ [°]	0	B-bar	1
				MC Drained			

Kerros 2

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	11,3	w [%]	46	yunsat [kN/m ³]	11,3	UW [kN/m ³]	11,3
y' [kN/m ³]	16,6	$\Delta\sigma$ [kPa]	63,2-10	ysat[kN/m ³]	16,6	satUW [kN/m ³]	16,6
m1	7,16	m1	7,1	kx [m/d]	8,6E-06	m	7,1
β 1	-0,4	β 1	-0,4	ky [m/d]	8,6E-06	mr	120,5
m2	120,5	m2	120,5	Eref [kN/m ²]	6500	a	-0,4
β 2	0	β 2	0	v	0,26	Pc [kPa]	30
σ c [kPa]	30	Cv [m ² /v]	4	c [kN/m ²]	18	k [m/mon]	0,00026
k [m/y]	0,13498			ϕ [°]	16	Kr [m/mon]	0,00026
				ψ [°]	1	B-bar	1
				MC Drained			

Kerros 3

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	19	w [%]	20	yunsat [kN/m ³]	19	UW [kN/m ³]	19
y' [kN/m ³]	19	$\Delta\sigma$ [kPa]	0	ysat[kN/m ³]	19	satUW [kN/m ³]	19
m1	200	m1	200	kx [m/d]	0,001	m	200
β 1	0,5	β 1	0,3	ky [m/d]	0,001	mr	500
m2	500	m2	500	Eref [kN/m ²]	45000	a	0,3
β 2	0	β 2	0	v	0,35	Pc [kPa]	0
σ c [kPa]	0	Cv [m ² /v]	14	c [kN/m ²]	20	k [m/mon]	0,0304
k [m/y]	15,695			ϕ [°]	33	Kr [m/mon]	0,0304
				ψ [°]	1	B-bar	1
				MC Drained			

	Laskettu (mm)	Erotus (mm)	Erotus %
Geocalc	110,1	2,1	1,9 %
Geomitoitus	106	-2	-1,9 %
Plaxis	109,3	1,3	1,2 %
Settle 3D	102,5	-5,5	-5,1 %
Mitattu	108		

Sipoonrata, Sipoo

Kerros 1

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	20	w [%]	20	yunsat [kN/m ³]	20	UW [kN/m ³]	20
y' [kN/m ³]	20	$\Delta\sigma$ [kPa]	22	ysat[kN/m ³]	20	satUW [kN/m ³]	20
m1	600	m1	600	kx [m/d]	0,01	m	600
β_1	0,5	β_1	0,5	ky [m/d]	0,01	mr	800
m2	800	m2	800	Eref [kN/m ²]	80000	a	0,5
β_2	0	β_2	0	v	0,3	Pc [kPa]	20
σ_c [kPa]	22	Cv [m ² /v]	14	c [kN/m ²]	1	k [m/mon]	0,304
k [m/y]	3,65			ϕ [°]	45	Kr [m/mon]	0,304
				ψ [°]	0	B-bar	1
				MC Drained			

Kerros 2

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	16,5	w [%]	32	yunsat [kN/m ³]	16,5	UW [kN/m ³]	16,5
y' [kN/m ³]	16,5	$\Delta\sigma$ [kPa]	5	ysat[kN/m ³]	16,5	satUW [kN/m ³]	16,5
m1	16	m1	16	kx [m/d]	8,6E-06	m	16
β_1	-0,4	β_1	-0,4	ky [m/d]	8,6E-06	mr	60
m2	60	m2	60	Eref [kN/m ²]	2500	a	-0,4
β_2	0	β_2	0	v	0,35	Pc [kPa]	0
σ_c [kPa]	5	Cv [m ² /v]	2	c [kN/m ²]	20	k [m/mon]	0,00026
k [m/y]	0,003139			ϕ [°]	15	Kr [m/mon]	0,00026
				ψ [°]	0	B-bar	1
				MC Drained			

Kerros 3

Geocalc		Geomitoitus		Plaxis		Settle 3D	
Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo	Parametri	Arvo
y [kN/m ³]	20	w [%]	20	yunsat [kN/m ³]	20	UW [kN/m ³]	20
y' [kN/m ³]	20	$\Delta\sigma$ [kPa]	0	ysat[kN/m ³]	20	satUW [kN/m ³]	20
m1	600	m1	600	kx [m/d]	0,00086	m	600
β_1	0,5	β_1	0,5	ky [m/d]	0,00086	mr	600
m2	600	m2	600	Eref [kN/m ²]	50000	a	0,5
β_2	0	β_2	0	v	0,3	Pc [kPa]	0
σ_c [kPa]	0	Cv [m ² /v]	14	c [kN/m ²]	25	k [m/mon]	0,02615
k [m/y]	0,3139			ϕ [°]	40	Kr [m/mon]	0,02615
				ψ [°]	0	B-bar	1
				MC Drained			

	Laskettu (mm)	Erotus (mm)	Erotus %
Geocalc	49	-4	-7,5 %
Geomitoitus	50	-3	-5,7 %
Plaxis	50,7	-2,3	-4,3 %
Settle 3D	53,4	0,4	0,8 %
Mitattu	53		

Kemira, fosforisäiliön painumatarkastelu**Kemira****Kerros 1**

Settle 3D

Parametri	Arvo
UW [kN/m ³]	19
satUW [kN/m ³]	19
m	300
mr	600
a	0,5
Pc [kPa]	50
K [m/y]	2920
Kr [m/y]	2920
B-bar	1

Kerros 2

Settle 3D

Parametri	Arvo
UW [kN/m ³]	17
satUW [kN/m ³]	17
m	150
mr	200
a	0
Pc [kPa]	0
K [m/y]	0,00314
Kr [m/y]	0,00314
B-bar	1

Kerros 3

Settle 3D

Parametri	Arvo
UW [kN/m ³]	19
satUW [kN/m ³]	19
m	400
mr	400
a	0,5
Pc [kPa]	0
K [m/y]	2000
Kr [m/y]	2000
B-bar	1

	Laskettu (mm)		Erotus (mm)		Erotus %	
	Keskellä	Reunalla	Keskellä	Reunalla	Keskellä	Reunalla
Malliparametrit	59,7	32,6	24,7	12,6	70,6 %	63,0 %
Lähin laskettu	33	19,5	-2	-0,5	-5,7 %	-2,5 %
Mitattu	35	20				

Sipoonranta**Kerros 1**

Settle 3D

Parametri	Arvo
UW [kN/m ³]	20
satUW [kN/m ³]	20
m	600
mr	800
a	0,5
Pc [kPa]	20
k [m/mon]	0,304
Kr [m/mon]	0,304
B-bar	1

Kerros 2

Settle 3D

Parametri	Arvo
UW [kN/m ³]	16,5
satUW [kN/m ³]	16,5
m	16
mr	60
a	-0,3
Pc [kPa]	0
k [m/mon]	0,00026
Kr [m/mon]	0,00026
B-bar	1

Kerros 3

Settle 3D

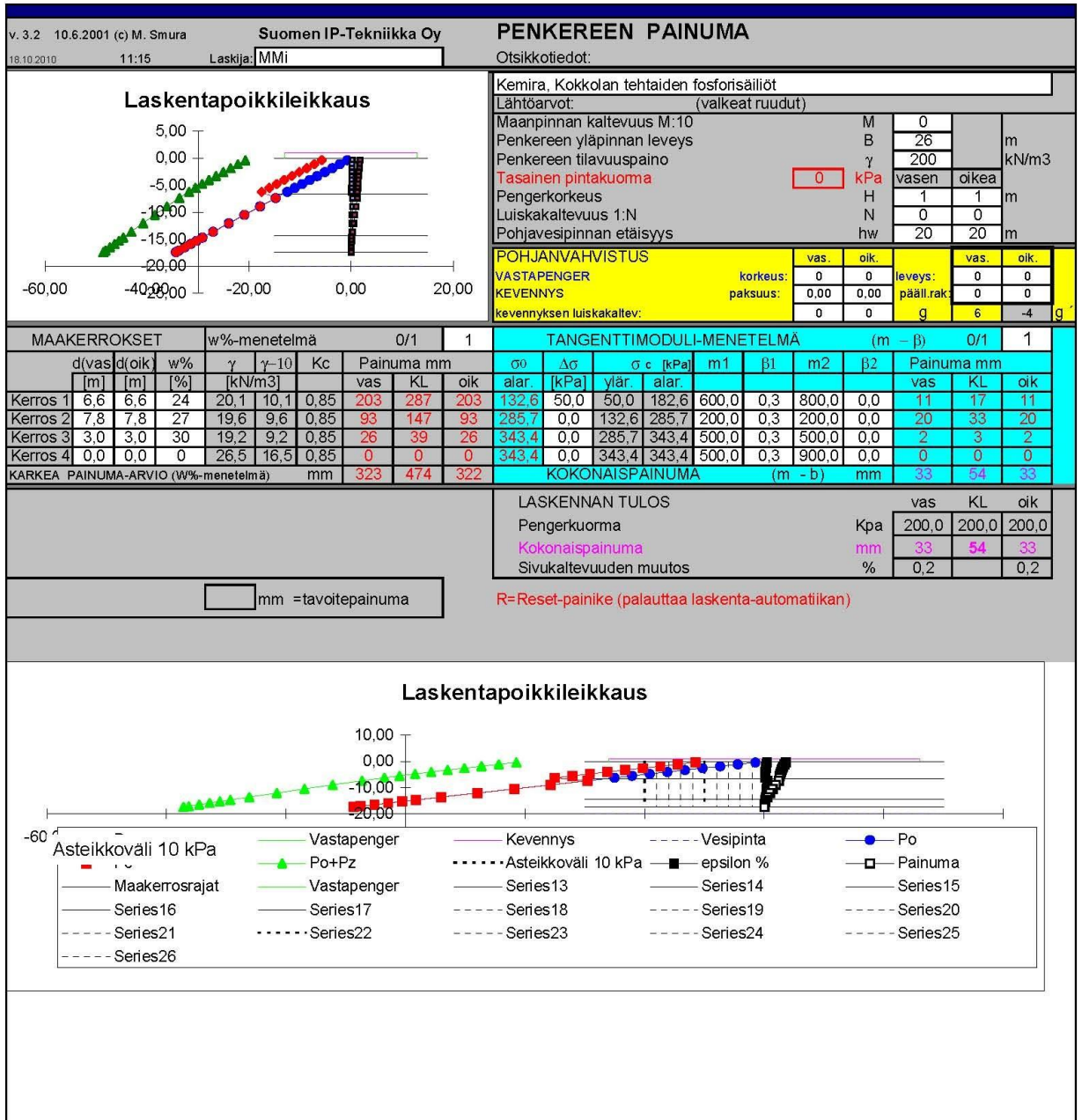
Parametri	Arvo
UW [kN/m ³]	20
satUW [kN/m ³]	20
m	600
mr	600
a	0,5
Pc [kPa]	0
k [m/mon]	0,02615
Kr [m/mon]	0,02615
B-bar	1

	Laskettu (mm)		Erotus (mm)		Erotus %	
	Keskellä	Reunalla	Keskellä	Reunalla	Keskellä	Reunalla
Malliparametrit	89	36	36	67,9 %		
Lähin mitattu	53,4	0,4	0,4	0,8 %		
Mitattu	53					

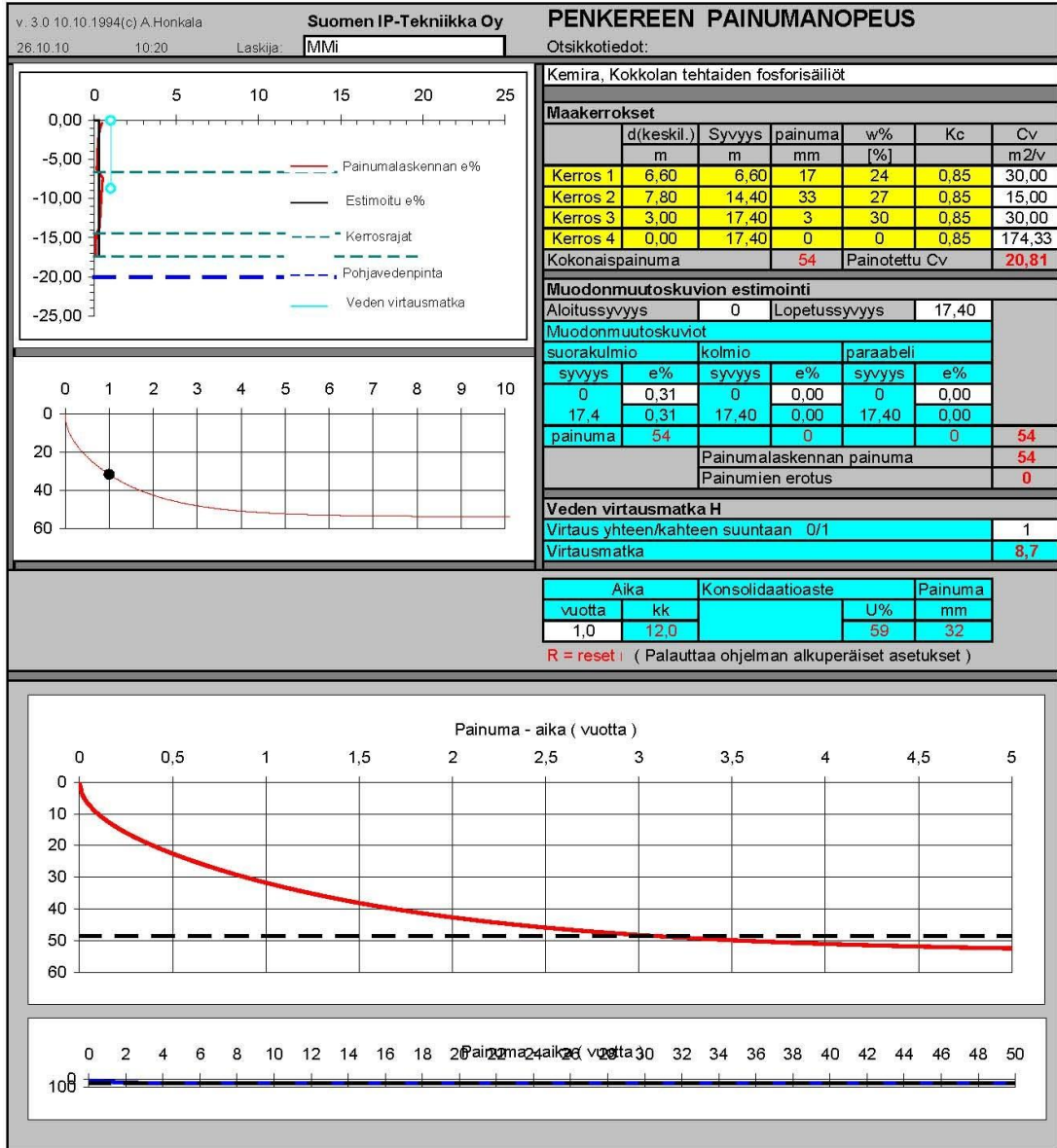


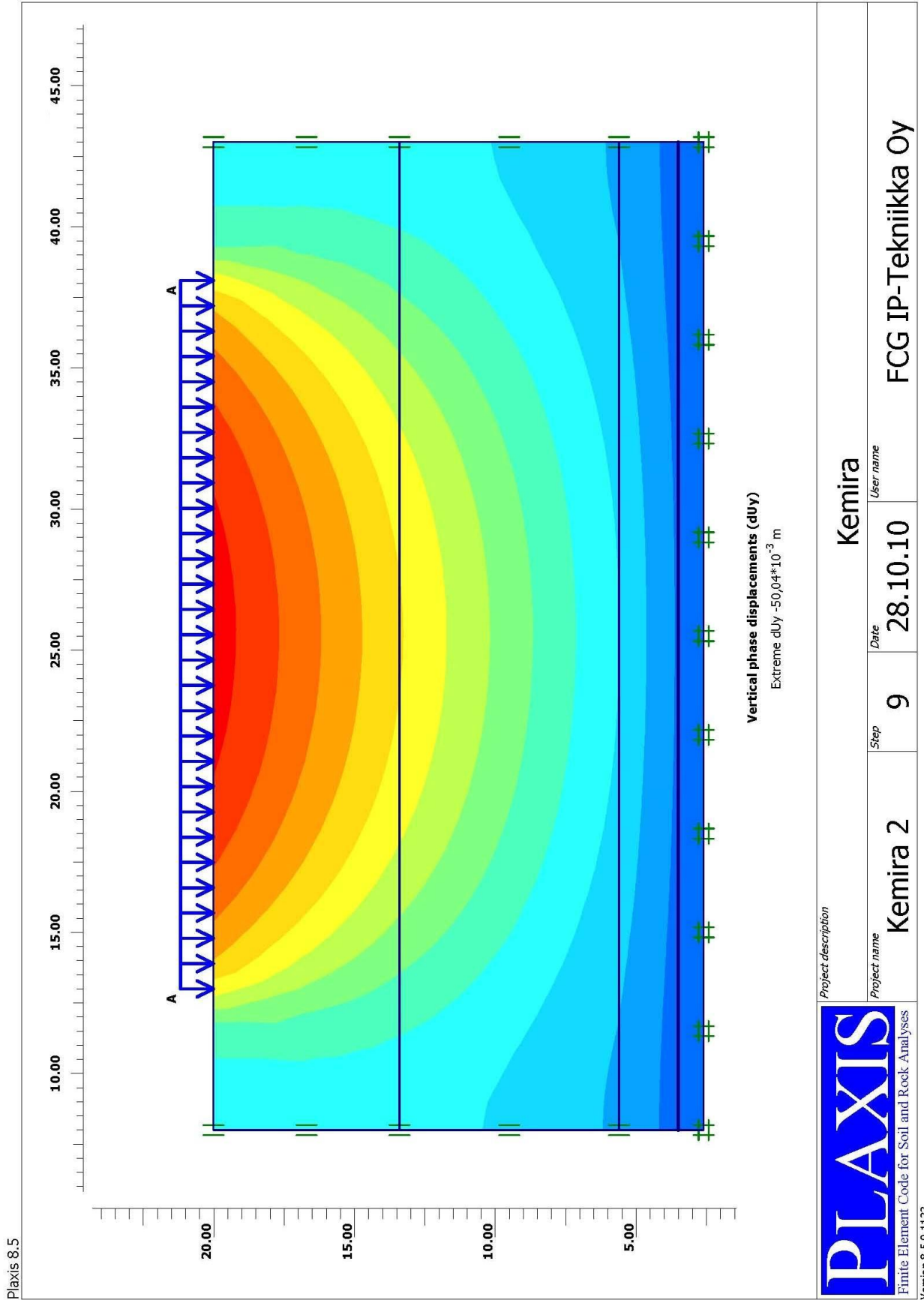
ins. työ/Kemira
 TAMK
 Mikko Mielonen/FCG
Neurapointi Oyj: 2.9.3 (27.10.2010 11:10)

Soil layer	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	Consolidation input	k [m/a]	Permeable horizontally	Material model	m1	$\beta 1$	m2	$\beta 2$	oc oedo [kPa]	m ¹ bound to oc	Consolidation pressure
1 Hk	19,000	19,000	Constant k	2920,000000	no	Ohde-Janbu	600,00	0,30	800,00	0,00	50,00	no	NC
2. siHk/saSi	17,000	17,000	Constant k	0,00314	no	Ohde-Janbu	200,00	0,30	200,00	0,00	0,00	no	NC
3 Hk	19,000	19,000	Constant k	2000,000000	no	Ohde-Janbu	500,00	0,30	500,00	0,00	0,00	no	NC



Laskentapoikkileikkaus

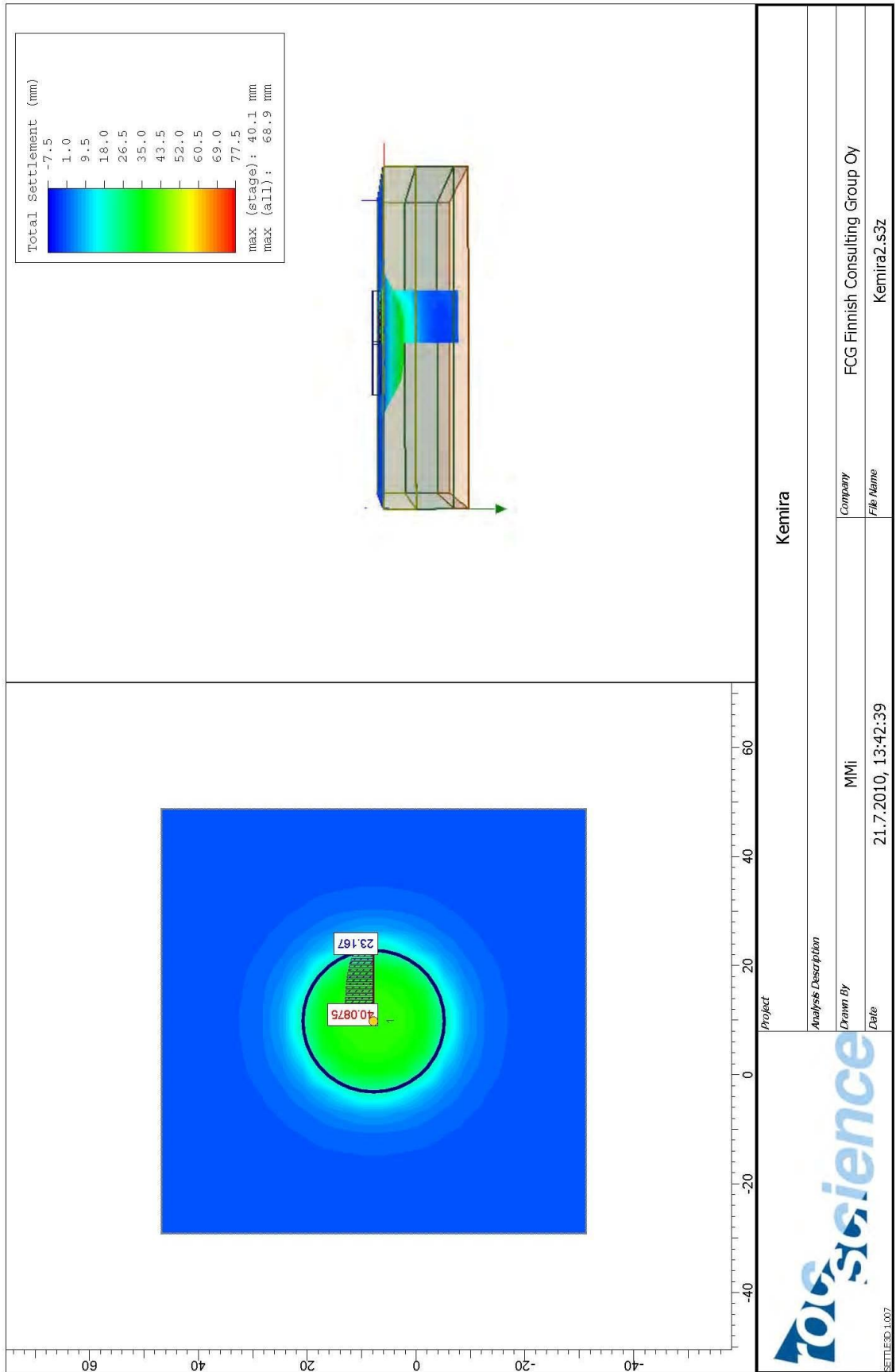




Plaxis 8.5



Finite Element Code for Soil and Rock Analyses
Version 8.5.0.1133



SETTLE3D 1007

Project

Kemira

Analysis Description

Drawn By

MMI

Date

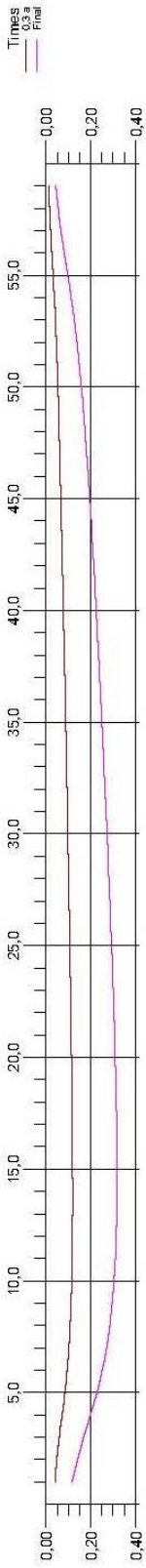
21.7.2010, 13:42:39

Company

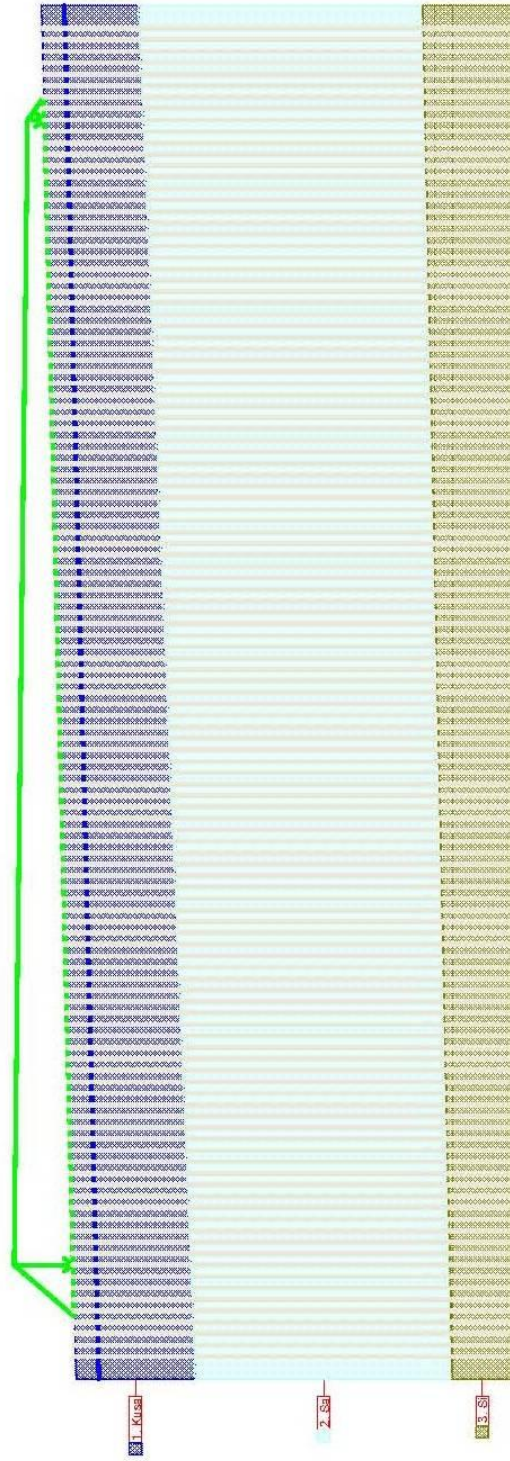
FCG Finnish Consulting Group Oy

File Name

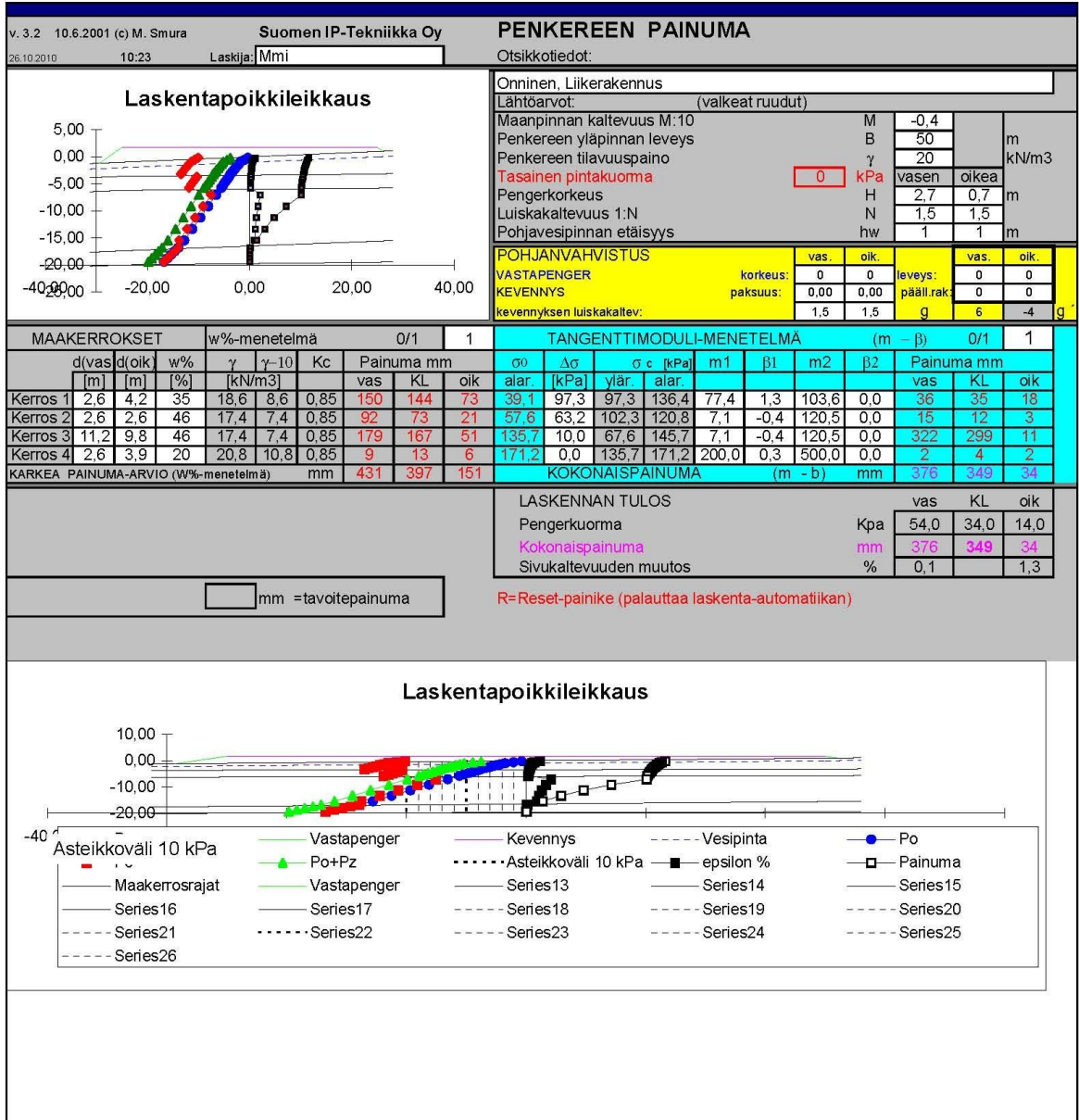
Kemira2.s3z



2D: 176 Calculation Points



Soil layer	Y [N/mm ²]	Y* [N/mm ²]	Consolidation input	k [mm]	Permeability	Material model	m1	β1	m2	β2	σ _{c,0} [kPa]	m1 bound to σ _c	Consolidation pressure
1. Kusta	12,900	17,500	Constant k	0,13498	no	Ohde-Jan Bu	77,40	1,30	1,03,60	0,00	97,30	no	NC
2. Silt	11,300	16,600	Constant k	0,13498	no	Ohde-Jan Bu	7,19	-0,40	1,20,50	0,00	30,00	no	NC
3. Silt	15,000	15,000	Constant k	15,695,00	no	Ohde-Jan Bu	2,00,00	0,30	5,00,00	0,00	0,00	no	NC



v. 3.0.10.10.1994(c) A.Honkala
26.10.10 10:23 Laskija: MMI

Suomen IP-Tekniikka Oy

PENKEREEN PAINUMANOPEUS

Otsikkotiedot:

Onninen, Liikerakennus

Maakerrokset						
	d(keskil.) m	Syvyys m	painuma mm	w% [%]	Kc	Cv m2/v
Kerros 1	3,40	3,40	35	35	0,85	14,00
Kerros 2	2,60	6,00	12	46	0,85	4,00
Kerros 3	10,50	16,50	299	46	0,85	4,00
Kerros 4	3,25	19,75	4	20	0,85	14,00
Kokonaispainuma			349		Painotettu Cv	5,10

Muodonmuutoskuvion estimointi

Aloitussyvyys	5,9	Lopetussyvyys	17,00
---------------	-----	---------------	-------

Muodonmuutoskuviot

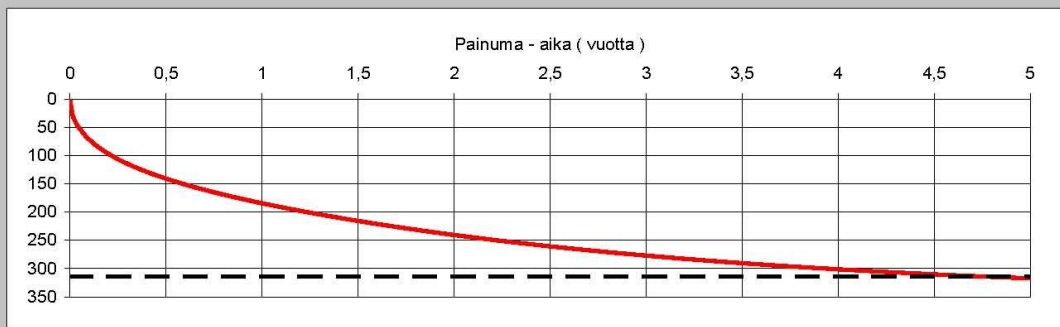
suorakulmio		kolmio		paraabeli	
syvyys	e%	syvyys	e%	syvyys	e%
5,9	2,20	5,9	0,00	5,9	5,04
17	2,20	17,00	0,00	17,00	2,20
painuma	244		0	105	349
		Painumalaskennan painuma		349	
		Painumien erotus		0	

Veden virtausmatka H

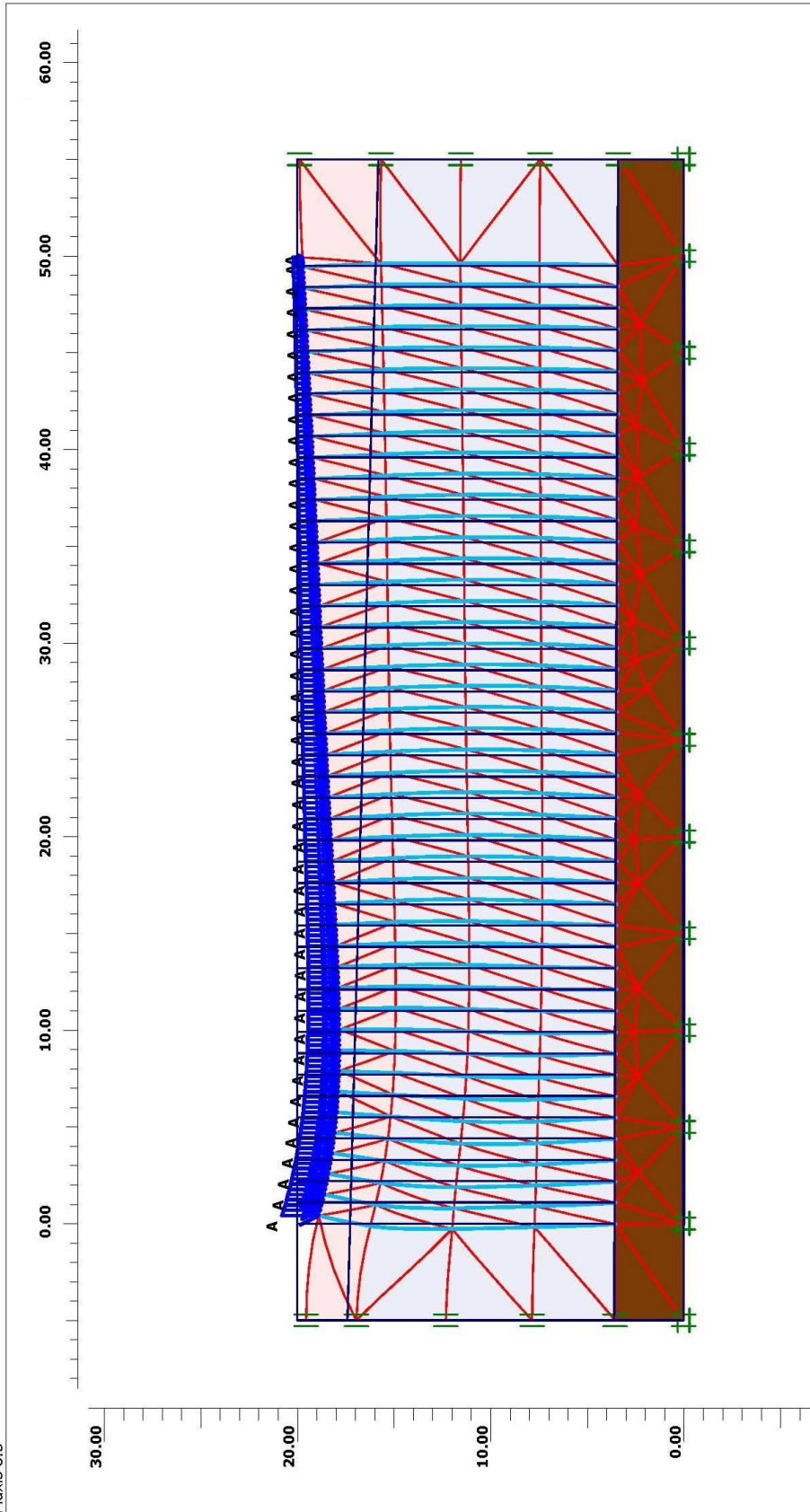
Virtaus yhteen/kahteen suuntaan 0/1	1
Virtausmatka	5,55

Aika		Konsolidaatioaste		Painuma
vuotta	kk		U%	mm
0,3	3,0		30	106

R = reset | (Palauttaa ohjelman alkuperäiset asetukset)

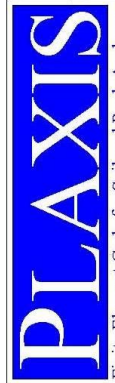


Plaxis 8.5



Deformed mesh

Extreme total displacement: $1.09,33 \times 10^{-3}$ m
(displacements scaled up 20,00 times)



Finite Element Code for Soil and Rock Analyses

Version 8.5.0.1133

Project description

Onninen

User name

18.10.10

Date

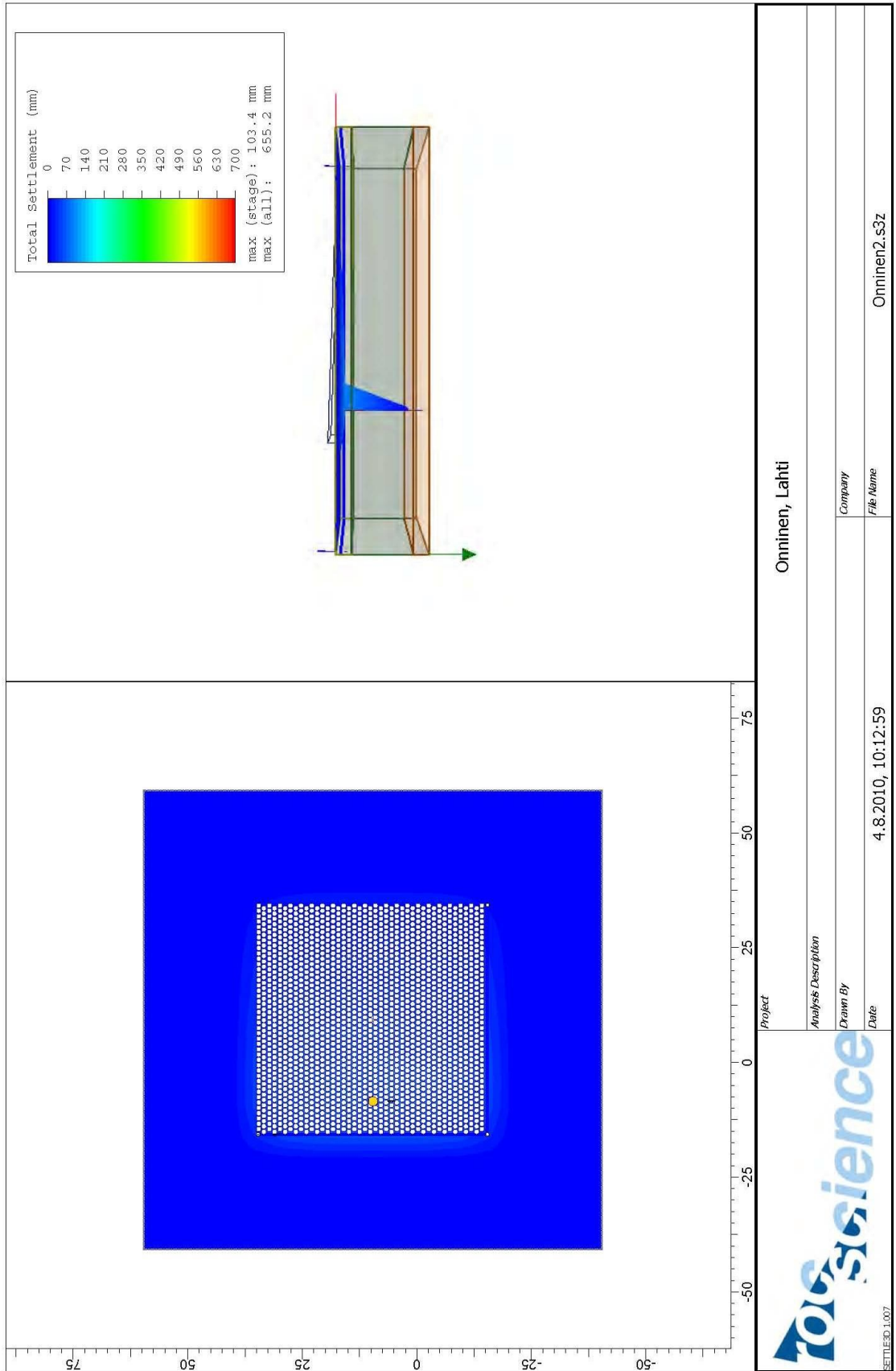
2

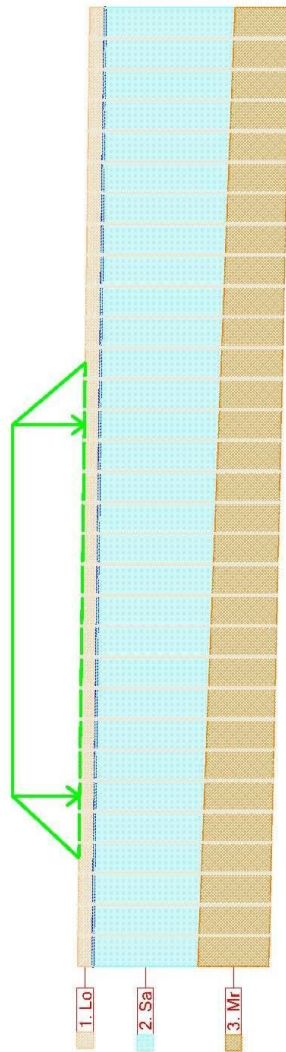
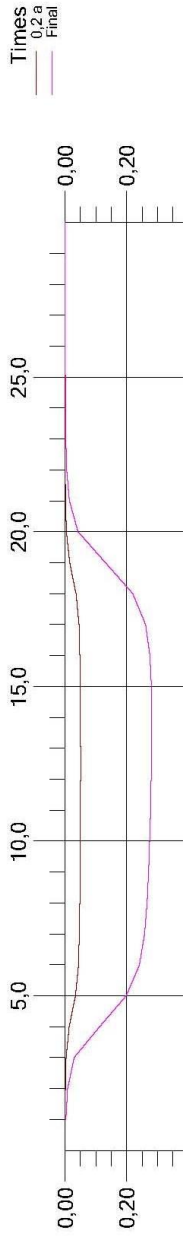
Step

Onninen 2

Project name

FCG IP-Tekniikka Oy



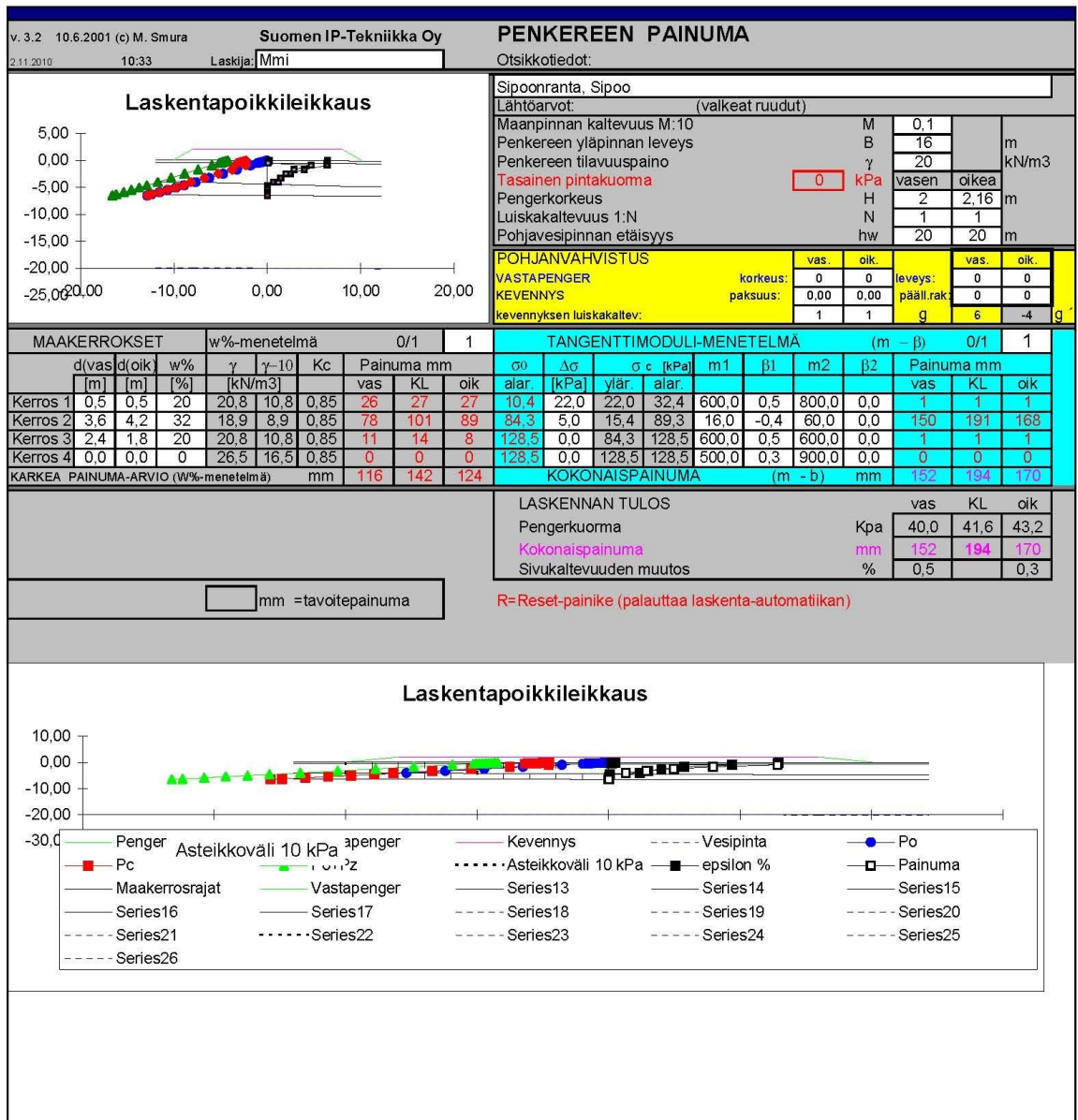


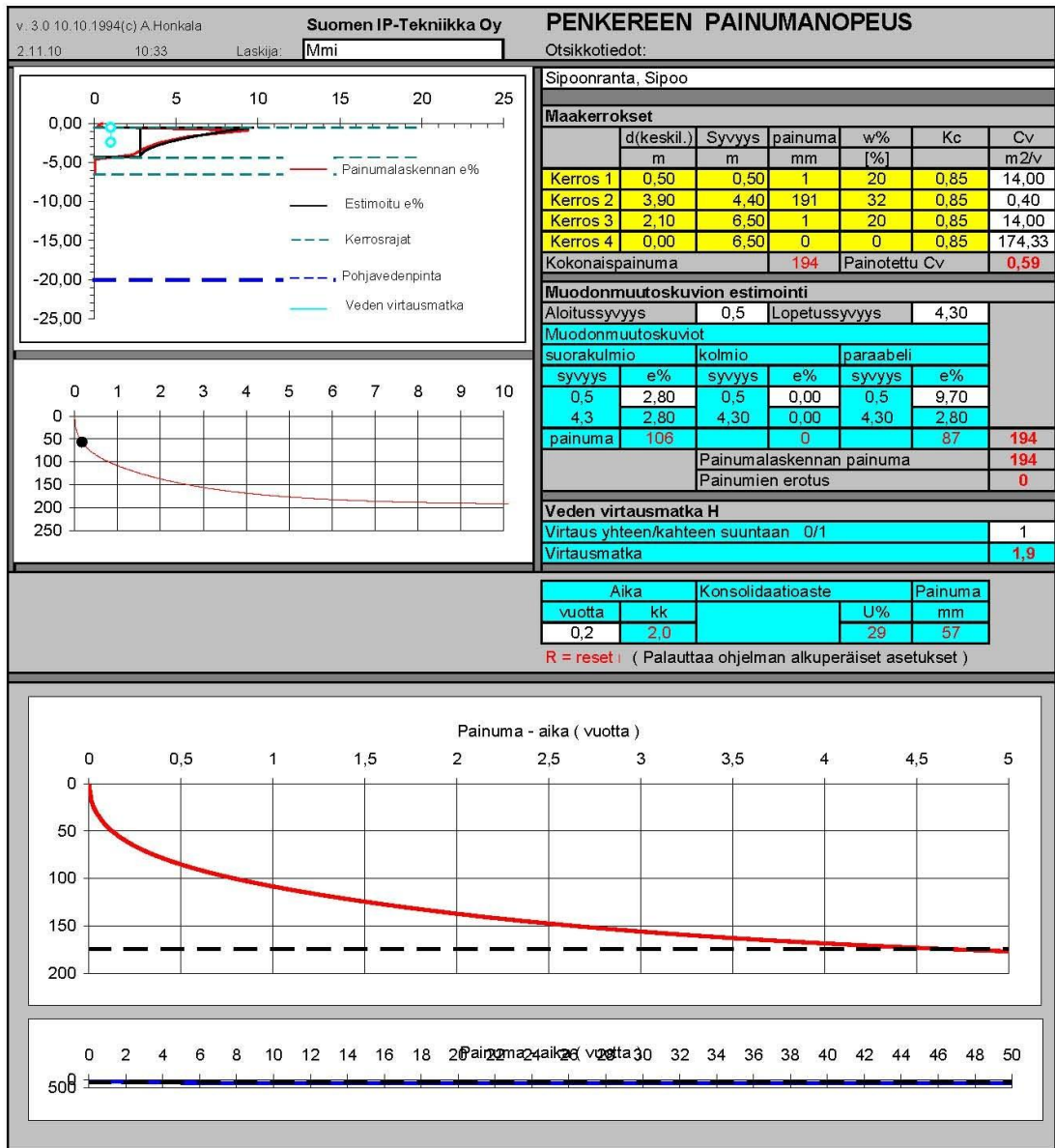
Soil layer	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	Consolidation input	k [m ³ /a]	Permeable horizontally	Material model	m_1	β_1	m_2	β_2	oc. oedo [kPa]	m_1 bound to oc	Consolidation pressure	POP
1. Lo	20.000	15.000	Constant k	3.65000	no	Ohde-Jambu	600,00	0.50	800,00	0.00	0.00	no	POP	22,00
2. Sa	16.500	10.000	Constant k	0.00314	no	Ohde-Jambu	16,00	-0.40	60,00	0.00	0.00	no	POP	5,00
3. Mr	19.000	8,000	Constant k	0.31390	no	Ohde-Jambu	600,00	0.50	600,00	0.00	0.00	no	NC	NC

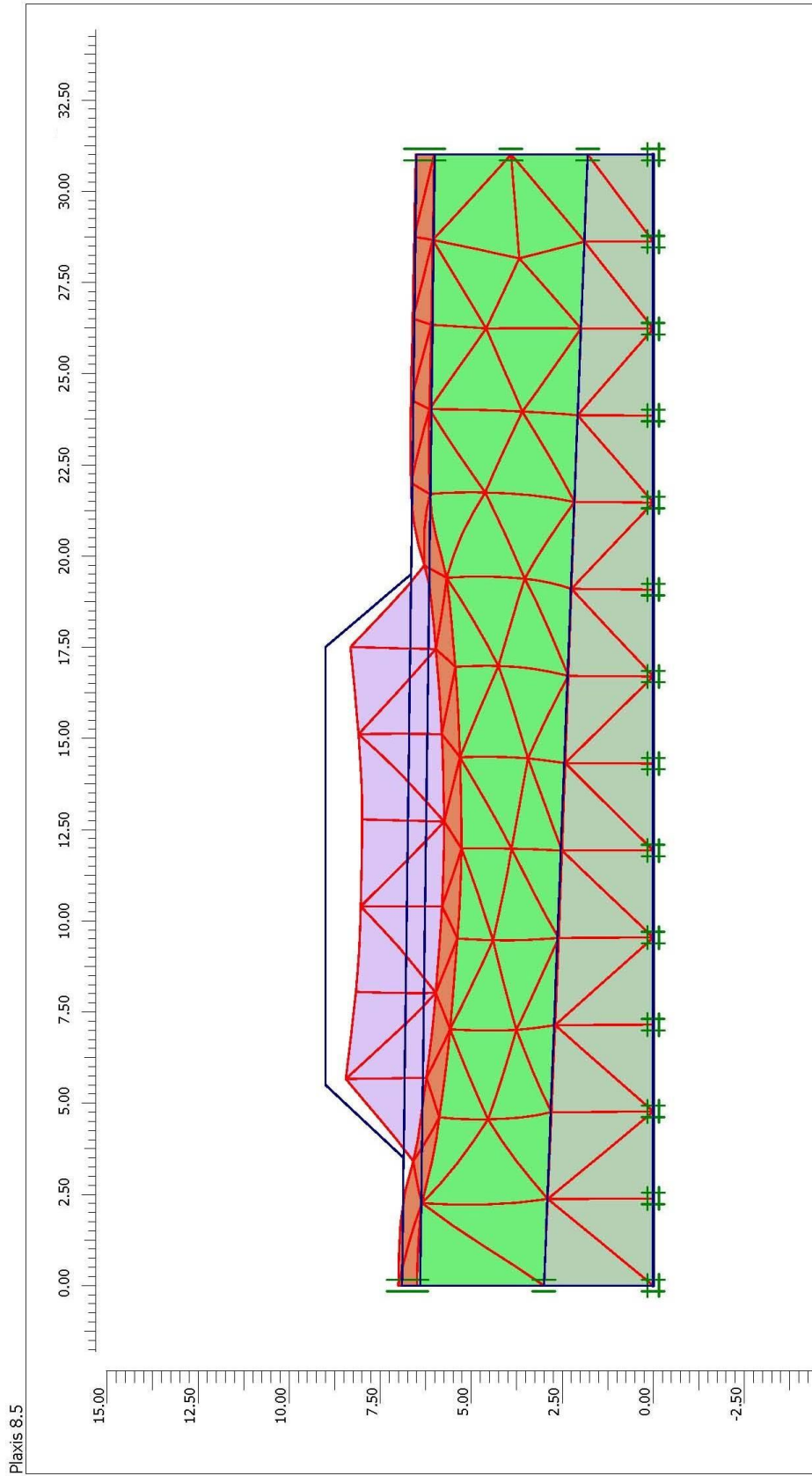
ins. työ/Sipoonranta
 TAMK

MMi/FCG

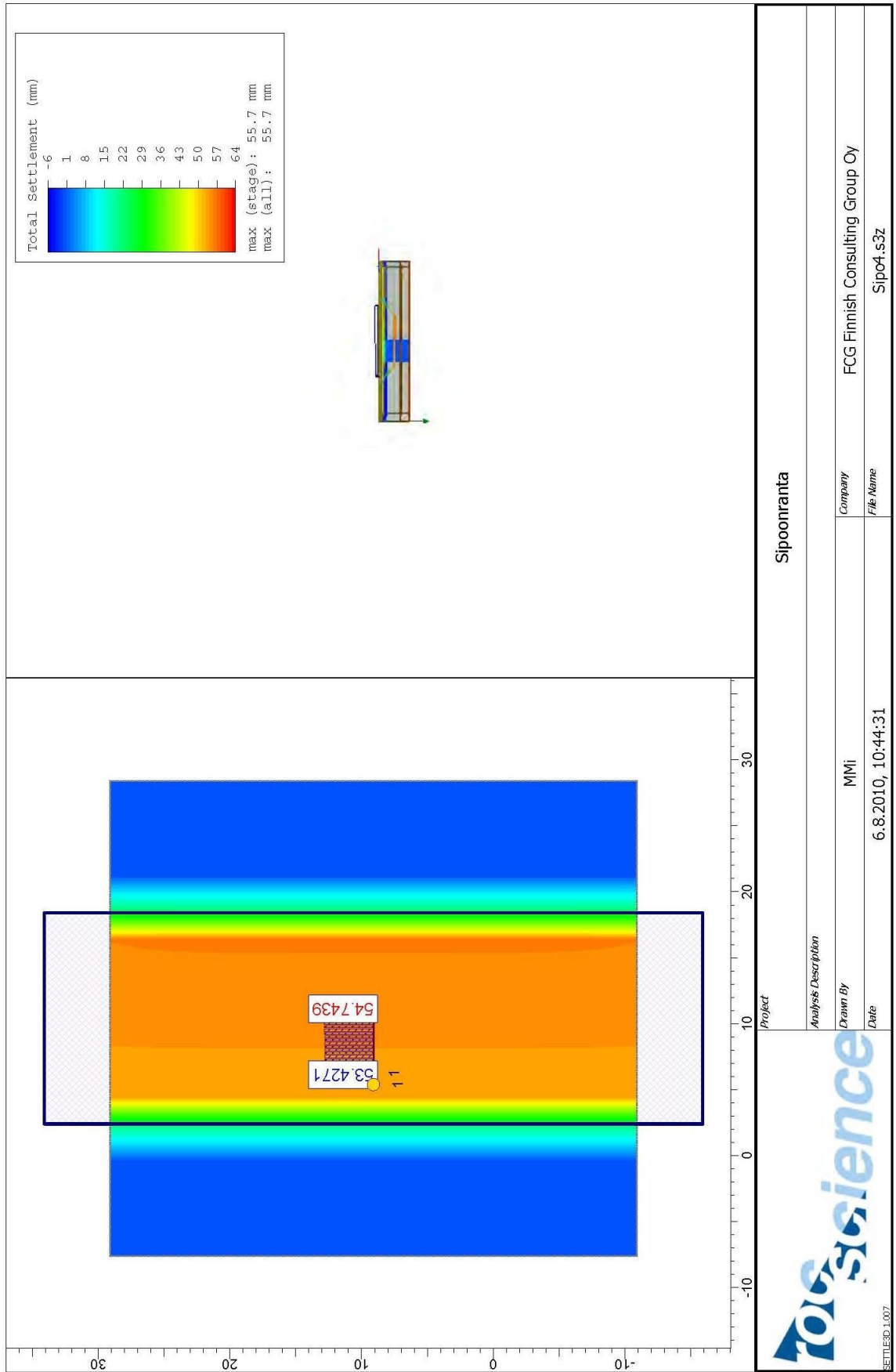
Keuhattori/Geotec 2.0.2 (27.10.2016 16:09)







<i>Project description</i>		Sipoonranta	
<i>Project name</i>	<i>Date</i>	<i>Step</i>	<i>User name</i>
Sipoonranta	18.10.10	41	FCG IP-Tekniikka Oy



SETTLE3D-1.007

Project		Sipoonranta	
Analysis Description			
Drawn By	MMI	Company	FCG Finnish Consulting Group Oy
Date	6.8.2010, 10:44:31	File Name	Sip04.s3z

