

JANIKA ALANEN

## Pohjaveden alenemisesta aiheutuvien painumien mallintaminen pehmeikkökohteissa







Janika Alanen

Pohjaveden alenemisesta  
aiheutuvien painumien  
mallintaminen pehmeikkökohteissa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 57/2013

Liikennevirasto  
Helsinki 2013

*Kannen kuva: Janika Alanen*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-393-5

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

**Janika Alanen: Pohjaveden alenemisesta aiheutuvien painumien mallintaminen pehmeikkökohteissa.** Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 57/2013. 81 sivua ja 9 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-393-5, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-393-5

**Avainsanat:** Painuma, pohjaveden alenema, elementtimenetelmä, Soft Soil malli, Tangenttimoduuli

## Tiivistelmä

Pohjavedenpinnan aleneminen aiheuttaa lisäkuormitusta pohjavedenpinnan alapuolisille maakerroksille. Koheesiomaalajeille lisäkuormasta seuraava jännitystilän muutos aiheuttaa usein painumia, joita pohjavedenpinnan palautuminen ei välttämättä pysäytä. Usein nämä painumat ovat epätasaisia synnyttäen sekä esteettisiä että rakenteiden kantavuuteen liittyviä ongelmia rakennetussa ympäristössä. Tässä diplomityössä tutkittiin pohjavedenpinnantason merkittävistä muutoksista pehmeikkökohteille aiheutuvien painumien laskentaa ja siihen liittyvää mallinnusta. Työssä verrailtiin analyttisten ja numeeristen laskentamenetelmien antamia tuloksia tehtyihin painumahavaintoihin. Analyttiset laskelmat tehtiin GeoCalc 2.4 -ohjelmalla ja käsinlaskennalla tangenttimoduulimenetelmällä. Numeeriset laskelmat tehtiin elementtimenetelmään perustuvalla Plaxis 2011 -ohjelmalla.

Laskentakohteena oli Vantaan Ilolassa sijaitseva pehmeikkö, joka sijaitsee Kehäradan itäisen suuaukon eteläpuolella. Alueella on rakennustöiden myötä havaittu merkittäviä muutoksia pohjavedenpinnantasossa vuosien 2010 ja 2012 välillä. Työn tavoitteena oli arvioida analyttisillä ja numeerisilla menetelmillä laskettujen painumien vastaavuutta tehtyjen havaintojen kanssa. Työn tavoitteena oli myös selvittää alueen lopullisten laskennallisten painumien mittaluokka, alueellinen painumajakauma ja jäljellä olevan painuman suuruus.

GeoCalcilla saadut laskennalliset painumat olivat noin viisinkertaiset painumahavaintoihin verrattuna. Tämä johtui tavasta, jolla pohjavedenpinnan alenemasta maakerroksille aiheutuva tilavuuskuorma jouduttiin mallintamaan GeoCalcissa. Käsinlaskennan tulokset vastasivat painumahavaintojen mittaluokkaa ja aika-painumakuvaajan muotoa paremmin. Käsinlaskennassa monimutkaisten kuormitusolosuhteiden yksinkertaistaminen aiheutti kuitenkin runsaasti virheitä tuloksiin. Numeerisessa mallinnuksessa pohjavedenpinnantason muutokset syötettiin ohjelmaan kutakin ajanhetkeä vastaavana moreenissa vallitsevana pohjavedenpainetasona. Tulokset olivat mittaluokkansa puolesta uskottavia, mutta aika-painumakuvaajan muoto poikkesi painumahavainnoista. Herkkyystarkastelujen perusteella todettiin laskennallisten painumien ja aika-painumakuvaajan muodon riippuvan vahvasti käytetyistä vedenläpäisevyyden ja sen muutoksen arvoista.

**Janika Alanen: Modellering av sättningar orsakade av avsänkningar av grundvattnet i mjuka markområden.** Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 57/2013. 81 sidor och 9 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-393-5.

**Nyckelord:** Sättning, avsänkning av grundvattnet, elemenmetod, Soft Soil modell, tangentmodul

## Sammanfattning

Sänkning av det hydrauliska trycket av grundvatten orsakar extra belastning i jordlagren nedanför freatisk nivå. Den ytterligare belastningen orsakar förändringar i spänningstillståndet för kohesionsjordar, vilket ofta genererar sättningar som inte alltid upphör vid återhämtning av hydrauliska trycknivån. Ojäma sättningar orsakar komplikationer utav både estetiska och strukturella perspektivet i den byggda miljön. Denna diplomarbete studerar beräkning och modellering av sättningar orsakade av stora avsänkningar av grundvattnet i mjuka markområden. Arbetet jämför resultat producerad av analytiska och numeriska kalkylmetoder med de observerade sättningarna. De analytiska beräkningarna gjordes med GeoCalc 2.4 -programmet och handberäkningarna utfördes med tangentmodulmetoden. Elementmetodbaserade Plaxis 2011 -programvaran användes för numerisk kalkyl.

Området som användes för beräkningarna ligger i Ilola, Vanda, södra Finland, söderut från den östra avfarten av Ringbanan. När byggandet av den östra avfarten pågick mellan år 2010 och 2012 visade observationerna förändringar i grundvattensnivån i närheten. Syftet med arbetet var att evaluera trovärdigheten av det analytiska och numeriska kalkylerna baserat på observationer av sättningar. Ett annat mål var att bedöma omfattningen, arealspridningen och resterande mängden av sättningarna.

Sättningar beräknade av GeoCalc 2.4 programmet blev fem gånger större än de observerade värdena. Detta berodde på det sättet på vilket belastningen som orsakas av grundvatten upptrekk kan modelleras i GeoCalc. Resultaten av handberäkningar beskriver de observerade sättningar väl när det gäller omfattningen av forskjutningar och tid-reglering -kurvans form. Resultaten av handberäkningar drabbades dock mycket av förenklingar som gjordes för att underlätta kalkylprocessen. I de numeriska beräkningarna grundvattnets optrekk modellerades genom att ange freatiska nivåer som motsvarar de uppmätta porevatten presset i moränen vid varje tidssteg. De resultat som erhöles genom numerisk modellering var trovärdiga när det gäller omfattningen av sättningarna, men graden av sättningarna matchas inte med observationer. Därför konkluderades det att permeabiliteten och förändring av permeabilitetsparametrar har en stor påverkan på formen av tid-regleringskurvan.



**Janika Alanen: The modelling of settlements in soft soil areas caused by groundwater draw-down.** Finnish Transport Agency, Railway Maintenance Department. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 57/2013. 81 pages and 9 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664 ISBN 978-952-255-393-5 (pdf)

**Keywords:** Settlement, groundwater drawdown, finite element method, Soft Soil model, TAngen modulus

## Summary

Lowering of the hydraulic pressure of groundwater causes additional loading in the soil layers located below the phreatic level. For cohesive soils the alterations in the stress state caused by the additional loading often generate settlements, which might not be caused by the recovery of the hydraulic pressure level. Differential settlements inflict complications for both aesthetic and structural perspectives in the built environment. This master's thesis studies the calculation and modelling of settlements caused by dramatic groundwater drawdowns in soft soil areas. The work compares the results produced by analytical and numerical calculation methods together with the observed settlements. The analytical calculations were conducted using the GeoCalc 2.4 program and by hand calculations using the tangent modulus method. For numerical calculations Paxis 2011 program based on finite element method was used.

The area used for the calculations is located in Ilola, Vantaa, Southern Finland, South from the East exit of the Helsinki Ring Rail Line tunnel. During the constructions of the Eastern exit between the years 2010 and 2012 changes were detected in the groundwater levels in the surrounding areas. The aim of the thesis was to evaluate the credibility of the analytical and numerical calculations based on the settlement observations. Another goal was to assess the scale, areal distribution and remaining amount of the settlements.

Settlements calculated by GeoCalc 2.4 program were fivefold compared to the observed values. This was due to the manner in which the loading caused by the groundwater drawdown could be modelled in GeoCalc. The results of the hand calculations described the observed calculations well regarding the scale of the displacements and the shape of the time-settlement-curve. Nevertheless results of the hand calculations were heavily affected by the simplifications made to the loading history in order to facilitate the hand calculation process. In the numerical calculations the groundwater drawdown was modelled by entering the phreatic levels corresponding to the measured pore water pressures in the moraine at each time-step. The results gained by numerical modelling were credible in respect of the scale of the settlements. However the rate of the settlements did not match the observations. Hence the permeability and change of permeability parameters were concluded to have a major influence on the shape of the time-settlement-curve.

## Esipuhe

Tämä julkaisu on tehty diplomityönä Aalto yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaanikan laboratoriolle. Työn on tehnyt tekniikan kandidaatti Janika Alanen Pöyry Finland Oy:ssä. Työn tilaajana ja rahoittajana toimi Liikennevirasto.

Työn valvojana toimi Aalto yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun professori Leena Korkiala-Tanttu Pohjarakennuksen ja maakaniikan laboratoriosta. Ohjaajina toimivat DI Jaakko Heikkilä Arcus Oy:stä ja DI Essi Hartman Pöyry Finland Oy:stä. Heidän lisäksi ohjausryhmään kuului Erkki Mäkelä Liikennevirastosta.

Helsingissä joulukuussa 2013

Liikennevirasto  
Kunnossapito

# Sisällysluettelo

|  |    |
|--|----|
| MERKINNÄT JA LYHENTEET .....                         | 9  |
| 1 JOHDANTO .....                                     | 11 |
| 1.1 Tutkimuksen tausta .....                         | 11 |
| 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus .....                  | 12 |
| 1.3 Työn rakenne .....                               | 12 |
| 2 MAAPERÄ JA POHJAVESI .....                         | 13 |
| 2.1 Yleistä .....                                    | 13 |
| 2.2 Vedenläpäisevyys .....                           | 14 |
| 2.3 Pohjavesi .....                                  | 14 |
| 2.4 Huokosvedenpaine .....                           | 15 |
| 2.5 Isotropia ja homogeenisuus .....                 | 16 |
| 3 PAINUMAT .....                                     | 18 |
| 3.1 Elastinen ja plastinen muodonmuutos .....        | 18 |
| 3.2 Painumalajit .....                               | 19 |
| 3.3 Avoin- ja suljettu tila .....                    | 20 |
| 4 ANALYYTTISET PAINUMALASKENTAMENETELMÄT .....       | 23 |
| 4.1 Kokonaispainumamenetelmät .....                  | 23 |
| 4.1.1 Yleistä 23                                     |    |
| 4.1.2 Tangenttimoduulimenetelmä .....                | 23 |
| 4.1.3 Ruotsalainen painumalaskentamenetelmä .....    | 25 |
| 4.1.4 Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmä .....       | 27 |
| 4.1.5 Vesipitoisuusmenetelmät .....                  | 28 |
| 4.2 Aikapainuman laskentamenetelmät .....            | 29 |
| 4.2.1 Terzaghin konsolidaatioteoria .....            | 29 |
| 4.2.2 Janbun konsolidaatioteoria .....               | 31 |
| 4.3 Sekundääripainuman laskeminen .....              | 34 |
| 5 ELEMENTTIMENETELMÄ .....                           | 35 |
| 5.1 Yleistä .....                                    | 35 |
| 5.2 Lineaarisesti elastinen malli .....              | 35 |
| 5.3 Mohr-Coulombin malli .....                       | 36 |
| 5.4 Soft Soil- ja Soft Soil Creep -mallit .....      | 37 |
| 6 LAAKSOTIEN PAINUMASEURANTA-ALUE .....              | 41 |
| 6.1 Yleistä .....                                    | 41 |
| 6.2 Maaperä .....                                    | 42 |
| 6.2.1 Pohjasuhteet .....                             | 42 |
| 6.2.2 Kairausten ja laboratoriokeiden tulokset ..... | 44 |
| 6.3 Pohjavesi .....                                  | 47 |
| 6.4 Painumahavainnot .....                           | 48 |
| 7 LASKELMAT .....                                    | 50 |
| 7.1 Käytetyt ohjelmat ja suoritettut laskelmat ..... | 50 |
| 7.2 Analyttiset laskelmat .....                      | 50 |
| 7.2.1 Yleistä 50                                     |    |
| 7.2.2 Vesipitoisuusmenetelmät .....                  | 53 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 7.2.3 | Tangenttimoduulimenetelmä.....                            | 55 |
| 7.2.4 | Käsinlaskenta tangenttimoduulimenetelmällä.....           | 56 |
| 7.3   | Numeerinen mallinnus Plaxis 2011 -ohjelmalla .....        | 59 |
| 7.3.1 | Yleistä 59  |    |
| 7.3.2 | Kaivantojen kuivatuksen mallintaminen ajan funktiona..... | 61 |
| 7.3.3 | Kaivannon kuivatuksen mallintaminen kaivojen avulla ..... | 62 |
| 7.3.4 | Pohjaveden mallintaminen moreenin painetason avulla ..... | 64 |
| 7.4   | Herkkyystarkastelut .....                                 | 70 |
| 8     | LASKEMIIEN TULOSTEN ANALYYSI JA VERTAILU .....            | 72 |
| 9     | JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET .....                 | 79 |
|       | LÄHDELUETTELO .....                                       | 80 |

#### LIITTEET

|         |   |
|---------|---|
| Liite 1 | Pohjatutkimuskartta                           |
| Liite 2 | Leikkaus A                                    |
| Liite 3 | Leikkaus B                                    |
| Liite 4 | Laaksotien geotekniset laboratoriotutkimukset |
| Liite 5 | Painumaseurantapisteet                        |
| Liite 6 | Pohjavedenpintamallit                         |
| Liite 7 | Painumalaskennan tulokset (GeoCalc 2.4)       |
| Liite 8 | Käsinlaskenta tangenttimoduulimenetelmällä    |
| Liite 9 | Painumalaskelmien tulokset (Plaxis 2011)      |



## Merkinnät ja lyhenteet

|                      |                     |   |
|----------------------|---------------------|---|
| $C_c$                | [-]                 | kokoonpuristuvuusindeksi  |
| $C_r$                | [-]                 | palautus- ja toistokuormituksen kokoonpuristuvuusindeksi                |
| $C_{\alpha}$         | [-]                 | sekundääripainuman kerroin huokostuvun mukaan                           |
| $C_{\alpha\epsilon}$ | [%]                 | sekundääripainuman kerroin muodonmuutoksen mukaan                       |
| $H$                  | [m]                 | veden kulkema matka (konsolidaatiossa)                                  |
| $M$                  | [kPa]               | kokoonpuristuvuusmoduuli  |
| $M'$                 | [kPa]               | moduuliluku kun tehokasjännitys ylittää rajajännityksen                 |
| $M_t$                | [kPa]               | tangenttimoduuli  |
| $M_L$                | [kPa]               | vakiokokoonpuristuvuusmoduuli konsolidaatio- ja rajajännityksen välillä |
| $M_o$                | [kPa]               | ylikonsolidoituneen alueen kokoonpuristuvuusmoduuli                     |
| $R$                  | [s/mm]              | aikavastus  |
| $S_r$                | [%]                 | kylläisyysaste  |
| $S$                  | [mm]                | painumapotentiali   |
| $S$                  | [mm]                | primääripainuma   |
| $S_p$                | [mm]                | lopullinen painuma  |
| $T_p$                | [-]                 | Janbun aikatekijä   |
| $T_v$                | [-]                 | Terzaghin aikatekijä  |
| $U_p$                | [-]                 | primäärikonsolidaation konsolidaatioaste                                |
| $V$                  | [mm <sup>3</sup> ]  | maanäytteen kokonaistilavuus  |
| $V_s$                | [mm <sup>3</sup> ]  | rakeiden tilavuus   |
| $V_v$                | [mm <sup>3</sup> ]  | huokosten tilavuus  |
| $c$                  | [kPa]               | koheesio  |
| $c'$                 | [kPa]               | tehokas koheesio  |
| $c_v$                | [m <sup>2</sup> /a] | konsolidaatiokerroin  |
| $e$                  | [-]                 | huokosluku  |
| $e_o$                | [-]                 | alkuhuokosluku  |
| $k$                  | [m/a]               | vedenläpäisevyyskerroin   |
| $m$                  | [-]                 | moduuliluku   |
| $m_1$                | [-]                 | normaalistikonsolidoituneen osan moduuliluku                            |
| $m_2$                | [-]                 | ylikonsolidoituneen osan moduuliluku                                    |
| $m_s$                | [g]                 | maaperässä olevan kuivan aineksen massa                                 |
| $m_w$                | [g]                 | maaperässä olevan veden massa   |
| $n$                  | [%]                 | huokoisuus  |
| $p$                  | [kPa]               | hydrostaattinen paine (kaavassa 2.5)                                    |
| $p$                  | [kPa]               | hydrostaattinen jännitys  |
| $p'$                 | [kPa]               | hydrostaattinen tehokas jännitys  |
| $q$                  | [kPa]               | pintakuorma   |
| $q$                  | [kPa]               | deviatorinen jännitys   |
| $r_s$                | [-]                 | Janbun hiipumaluku  |
| $s$                  | [mm]                | painuma   |
| $s_o$                | [mm]                | alkupainuma   |
| $t$                  | [s]                 | aika  |
| $t_r$                | [s]                 | referenssiaika  |
| $u$                  | [kPa]               | huokosvedenpaine  |
| $u_{\text{excess}}$  | [kPa]               | huokosvedenylipaine   |
| $w$                  | [%]                 | vesipitoisuus   |

|                    |                      |   |
|--------------------|----------------------|---|
| $w_n$              | [%]                  | luonnollinen vesipitoisuus  |
| $z$                | [m]                  | syvyyskoordinaatti  |
| $\Delta$           | [-]                  | muutos  |
| $\beta$            | [-]                  | jännitysekspONENTTI   |
| $\beta_k$          | [-]                  | vedenläpäisevyyden muutos   |
| $\gamma$           | [kN/m <sup>3</sup> ] | maan tilavuuspaino  |
| $\gamma'$          | [kN/m <sup>3</sup> ] | maan tehokas tilavuuspaino  |
| $\gamma_w$         | [kN/m <sup>3</sup> ] | veden tilavuuspaino   |
| $\delta$           | [mm]                 | painuma   |
| $\varepsilon$      | [%]                  | muodonmuutos  |
| $\varepsilon_{cr}$ | [%]                  | hiipuman muodonmuutos   |
| $\varepsilon_p$    | [%]                  | pystysuuntainen muodonmuutos  |
| $\varepsilon_v$    | [%]                  | tilavuuden muutos   |
| $\kappa$           | [-]                  | paisumisvaiheen suoran kaltevuus<br>lnp'-v -koordinaatistossa (Cam Clay malli)                    |
| $\kappa^*$         | [-]                  | munnettu paisumisindeksi (Plaxis)   |
| $\lambda$          | [-]                  | normaalisti konsolidoituneen tilan suoran kaltevuus<br>lnp'-v -koordinaatistossa (Cam Clay malli) |
| $\lambda^*$        | [-]                  | muunnettu kokoonpuristuvuusindeksi (Plaxis)   |
| $\mu^*$            | [-]                  | muunnettu hiipumaindeksi (Plaxis)   |
| $\nu$              | [-]                  | Poissonin luku  |
| $\rho_s$           | [kN/m <sup>3</sup> ] | kiintotiheys  |
| $\sigma$           | [kPa]                | kokonaisjännitys  |
| $\sigma'$          | [kPa]                | tehokas kokonaisjännitys  |
| $\sigma_a$         | [kPa]                | referenssijännitys  |
| $\sigma'_{v0}$     | [kPa]                | tehokas pystysuuntainen alkujännitys  |
| $\sigma'_n$        | [kPa]                | tehokas normaalijännitys  |
| $\sigma'_p$        | [kPa]                | tehokas konsolidaatiojännitys   |
| $\sigma'_L$        | [kPa]                | rajajännitys  |
| $\sigma'_1$        | [kPa]                | suurin pääjännitys  |
| $\sigma'_2$        | [kPa]                | keskimäinen pääjännitys   |
| $\sigma'_3$        | [kPa]                | pienin pääjännitys  |
| $\tau_f$           | [kPa]                | leikkauslujuus  |
| $\varphi$          | [°]                  | kitkakulma  |
| $\varphi'$         | [°]                  | tehokas kitkakulma  |
| $\psi$             | [°]                  | dilataatiokulma   |
| CPTU               |                      | Puristinkairaus huokospainemittauksella   |
| FEM                |                      | Elementtimenetelmä  |
| LE                 |                      | Lineaarisesti elastinen materiaalimalli   |
| MC                 |                      | Mohr-Coulombin materiaalimalli  |
| SS                 |                      | Soft Soil Model   |
| SSC                |                      | Soft Soil Creep Model   |
| POP                |                      | ylikonsolidaatio (Pre-Overburden Pressure)  |

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Pohjavedenpinnan aleneminen aiheuttaa kuormituksen lisäystä pohjavedenpinnan alapuolisille maakerroksille. Koheesiomaalajeista koostuville maakerroksille, jotka ovat tyypillisesti kokoonpuristuvia, lisäkuorma aiheuttaa usein merkittäviä muodonmuutoksia. Tämä johtuu pohjaveden nostevaikutuksen pienenemisestä pohjavedenpinnan aletessa. Muutokset pohjavedenpinnantasossa vaikuttavat maaperässä vallitsevaan jännitystilaan, jonka muutosten seurauksena maaperässä tapahtuu pysyviä muodonmuutoksia, pääasiassa maaperän painumista. Näistä pysyvistä muodonmuutoksista aiheutuu moninaisia haittoja rakennetulle ympäristölle. Vaikka maaperän painuminen saataisiinkin pysäytettyä nostamalla pohjavedenpinta takaisin luonnolliselle tasolle, eivät jo tapahtuneet siirtymät tule kuitenkaan palautumaan. Sen lisäksi on mahdollista, että painumien jatkuu vielä jonkin aikaa viipeellä.

Painumat itsessään eivät välttämättä aiheuta haittaa ympäröivälle rakennuskannalle. Pohjasuhteiden vaihtelusta johtuen painumat ovat kuitenkin usein epätasaisia. Epätasaiset painumat aiheuttavat esteettisten haittojen lisäksi kantokykyyn ja toimintaan liittyviä ongelmia rakennuksille sekä kunnallistekniikalle että kaduille. Maanvaraisesti perustetuille rakennuksille epätasaiset painumat aiheuttavat lisäkuormitusta, joka voi johtaa vääntymiin, halkeiluun ja mahdollisesti lopulta rakenteiden murtumiseen. Paaluperusteisten rakenteiden yhteydessä ongelmia tuottavat lisääntyneestä pystykuormasta (ns. negatiivinen vaippahankaus) ja maan painumisesta johtuvat, erityisesti vinopaaluihin kohdistuvat rasitukset, joita kestämään paaluja ei välttämättä ole suunniteltu. Paaluperusteisten rakennusten usein maanvaraiset pihat painuvat paalutettujen rakennusten ympärillä. Tästä seuraa paitsi esteettisiä haittoja, myös mahdollisia painumia tai murtumia kunnallistekniikan liittymissä. Katu- ja piha-alueilla painumien suurimpana haittana ovat painumista kunnallistekniikalle aiheutuvat muutokset putkien kaatoihin. Kaadon pieneneminen tai kokonaan häviäminen heikentää kunnallistekniikan verkostojen toimivuutta sekä aiheuttaa rakenteille lisärasituksia lyhentäen niiden käyttöikä.

Pohjavedenpinnan muutoksia arvioidaan erilaisin virtausmallein. Yleensä virtauksen mallintaminen vaatii monimutkaisten virtausolosuhteiden vuoksi laaja-alaista ja kolmiulotteista tarkastelua. Tämän seurauksena myös painumatarkasteluissa on suositeltavaa ottaa huomioon kuormituksen kolmiulotteisuus. Pohjavedenpinnan muutoksista aiheutuvien kuormitusolosuhteiden muutosten mallintaminen ei ole yhtä suoraviivaista kuin ulkoisen kuorman mallintaminen. Tämä johtuu siitä, että pohjavedenpinnantasoon muutoksista aiheutuvat kuormat eivät kohdistu maanpinnantasoon, vaan kuorma on ns. tilavuuskuormaa ja sen suuruus vaihtelee syvyyden funktiona. Pohjavedenpinnan muutoksista aiheutuvan kuormituksen monimutkaisuudesta johtuen pohjaveden hallinnan rooli on painumien mallintamisen ja ehkäisyn kannalta merkittävä.

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on tutkia pohjavedenpinnantason alenemisen aiheuttamia painumia pehmeiköillä esimerkkikohteen avulla. Työssä tutkitaan tapausta, jossa pohjavedenpinnantason alenema on merkittävä ja tapahtuu suhteellisen lyhyellä aikavälillä. Painumat laskettiin analyttisillä ja numeerisilla menetelmillä, joiden antamia tuloksia verrattiin toisiinsa sekä todellisiin painumahavaintoihin. Työssä mallinnettiin ensin jo tapahtuneet painumat. Vertaamalla laskennallisia painumia painumahavaintoihin voitiin arvioida laskelmien luotettavuutta. Lisäksi työssä pyrittiin mallintamaan lopullisten painumien mittaluokkaa, alueellista painumajakaumaa sekä jäljellä olevaa painumaa.

Diplomityö keskittyi pehmeikön painumatarkasteluihin pohjaveden muutosten seurauksena. Työn esimerkissä oletettiin, että painumaprosessi on jo alkanut, eikä painumien syihin voida enää vaikuttaa pohjaveden hallinnan keinoilla.

## 1.3 Työn rakenne

Työ koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen osa on kirjallisuusselvitys; toisessa osassa käsitellään aihetta esimerkkikohteen kautta olemassa olevaa tilannetta mallintamalla. Kirjallisuusselvityksessä kaavoissa on käytetty kunkin lähdeteoksen mukaisia merkintätapoja. Työn mallinnusosaan liittyen tehtiin täydentäviä pohja- ja laboratoriotutkimuksia. Laboratoriotutkimukset on tehty ja raportoitu erillisenä erikoistyönä Aalto yliopistolle (Liite 4).

Esimerkkikohteenä oli Vantaan Ilolassa sijaitsevaa Kehäradan Itäisen suuaukon eteläpuolista aluetta. Alueelta suoritettiin kaksiulotteisia painumalaskentoja sekä analyttisillä, että numeerisilla painumalaskentamenetelmillä. Laskelmissa käytettiin sekä analyttisiin menetelmiin perustuvaa Novapoint GeoCalc 2.4 -laskentaohjelmaa että elementtimenetelmään perustuvaa Plaxis 2011 -ohjelmaa. Painumatarkastelut suoritettiin Laaksotien linjalta, jonka alueelta myös merkittävimmät Itäisen suuaukon kaivannon ulkopuoliset painumahavainnot on tehty.

Työssä ei mallinnettu pohjavedenpinnan käyttäytymistä, vaan lähtötietona käytettiin Pöyry Finland Oy:n tuottamaa pohjavedenpinnan 3D-pintamallia. Olemassa olevasta pintamallista projisoitiin laskentaleikkaukseen pohjavedenpinnantasot, jotka syötettiin painumalaskentaohjelmiin pohjavedenpinnantason pisteistöinä. Pohjaveden muutoksista aiheutuneiden kuormien kolmiulotteisuus otettiin siis mallinnuksessa huomioon, vaikka itse painumalaskelmat suoritettiinkin 2D-laskelmina. Painumalaskelmissa pohjaveden virtaussuunnat huomioitiin mallin raja-arvojen määrittelyssä.



## 2 Maaperä ja pohjavesi

### 2.1 Yleistä

Maaperä voidaan jakaa kiinteään ainekseen eli rakeisiin ja huokostilaan. Koska maaperän rakeet oletetaan kokoonpuristumattomiksi, on maaperän huokoisuus painumisen kannalta olennainen ominaisuus. Maanäytteen kokonaistilavuus  $V$  voidaan jakaa rakeiden tilavuuteen  $V_s$  ja huokostilavuuteen  $V_v$ . Huokoisuus  $n$  kertoo huokostilavuuden suhteen näytteen kokonaistilavuuteen nähden kaavan 2.1 mukaan. Painumalaskelmissa puhutaan usein huokoisuuden sijaan huokosluvusta  $e$ , joka saadaan jakamalla huokostilavuus  $V_v$  kiintoaineksen  $V_s$  tilavuudella (kaava 2.2). Huokoisuuden ja huokosluvun välille voidaan johtaa kaavan 2.3 mukainen yhteys.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.1)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.2)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.3)$$

|       |       |   |
|-------|-------|---|
| missä | $n$   | on huokoisuus [-]                               |
|       | $V_v$ | huokosten tilavuus [mm <sup>3</sup> ]           |
|       | $V$   | maanäytteen kokonaistilavuus [mm <sup>3</sup> ] |
|       | $e$   | huokosluku [-]                                  |
|       | $V_s$ | rakeiden tilavuus [mm <sup>3</sup> ]            |

Huokostilavuudesta voidaan erottaa vielä erikseen huokosveden tilavuus  $V_w$ . Huokosvedentilavuuden ja huokostilavuuden suhde kertoo maaperän kylläisyysasteen  $S_r$ , eli kuinka suuri osa näytteen huokosista on veden kyllästävä. Huokoslukuun ja kylläisyysasteeseen liittyy myös maaperän vesipitoisuus  $w$ , jolla tarkoitetaan maaperässä olevan veden ja kuivan aineksen massojen suhdetta (kaava 2.4).

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.4)$$

|       |       |                                      |
|-------|-------|--------------------------------------|
| missä | $m_w$ | on maaperässä olevan veden massa [g] |
|       | $m_s$ | kuivan aineksen massa [g]            |

Suomessa on yleisesti sovellettu kaivuluokitustutkimuksen yhteydessä vuonna 1971 kehitettyä geoteknistä maalajiluokitusta (GEO-luokitus) (Korhonen et al. 1974). Geotekninen maalajiluokitus otettiin käyttöön vuonna 1974. Vuonna 2008 siirryttiin eurokoodin mukaiseen maalajiluokitukseen (EN ISO 14688-2.). Geoteknistä maalajiluokitusta käytetään kuitenkin yhä eurokoodin mukaisen luokituksen rinnalla.

Geoteknisen maalajiluokituksen maalajirajat vastaavat pitkälti muualla maailmassa yleisesti käytettyjä maalajiluokituksia. Eurokoodin mukaisen EN ISO 14688-2-luokituksen myötä on kuitenkin pyritty yhtenäistämään eri maiden maalajiluokituksia. Merkittävimmät erot eurokoodin ja geoteknisen maalajiluokituksen välillä ovat moreenimaalajien puuttuminen eurokoodista sekä plastisuusominaisuuksien käyttö hienorakeisten maalajien luokituksessa.

## 2.2 Vedenläpäisevyys

Maakerroksen vedenläpäisevyys  $k$  riippuu kerroksen raejakaumasta ja maaperän rakenteesta. Karkearakeisissa maissa kivennäisrakeet ovat niin suuria, että niiden voidaan olettaa toimivan erillisinä partikkeleina. Hienorakeisilla maalajeilla rakeet ovat puolestaan niin pieniä, että niiden välillä vallitsee sähkökemiallisia vetovoimia, jotka pitävät rakeet kasassa. Tämä käy ilmi jos hiekka- ja savinäytteet nostetaan pöydälle: savi pysyy hyvin kasassa, mutta hiekka valuu kolmioksi, jonka sivun kulma vastaa tyypillisesti hiekan kitkakulmaa.

Hienorakeisilla maalajeilla on karkearakeisia maalajeja alhaisempi vedenläpäisevyys. Tämä johtuu kahdesta asiasta. Ensiksi hienorakeisessa maassa kivennäisrakeet pääsevät asettumaan tiiviimmin kuin karkearakeisessa maassa. Toiseksi hienorakeisissa maalajeissa rakeiden välillä vallitsevat sähkökemialliset voimat vaikuttavat vahvasti myös veden virtaukseen rakeiden välissä. Moreenien vedenläpäisevyyteen vaikuttaa vahvasti maalajin raejakauma: mitä enemmän moreeni sisältää hienoainesta, sitä alhaisempi vedenläpäisevyys sillä on. (Korhonen 1985a.)

Vedenläpäisevyyttä voidaan mitata laboratoriossa yksiaksiaalisen painumakokeen, ödometrikokeen, yhteydessä. Tällöin tulokseksi saadaan myös saven vedenläpäisevyys ja sen muutos eri tiiveysasteilla. Mikäli vedenläpäisevyysskojeita ei ole käytettävissä, voidaan se määrittää myös ödometrikokeesta konsolidaatiokertoimen  $c_v$  ja kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  avulla kaavan 2.5 mukaan (Terzaghi & Peck 1948).

$$k = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{M} \quad (2.5)$$

missä  $c_v$  on konsolidaatiokerroin [ $\text{m}^2/\text{a}$ ]  
 $\gamma_w$  veden tilavuuspaino [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]  
 $M$  kokoonpuristuvuusmoduuli [ $\text{kPa}$ ]

## 2.3 Pohjavesi

Kun maaperän huokoset ovat täysin vedellä kyllästyneitä, on maaperän kylläisyysaste  $S_r=1(100 \%)$ . Pohjavedenpinnan tasolla maaperän huokosissa olevan veden paine vastaa ilmanpainetta. Pohjavedenpinnan yläpuolella maaperän huokosten tilavuus koostuu yleisimmin vedestä ja ilmasta. Jos vettä läpäiseviä kerroksia erottaa tiivis maakerros, saattaa sen yläpuolelle olla kertynyt ns. orsivettä vaikka varsinainen pohjavedenpinta olisikin syvemmällä. Savikkoaltaiden pohjavesi on usein todellisuudessa orsivettä.

Hyvin vettä läpäisevässä maassa pohjavedenpinta (pohjaveden aiheuttama painekorkeus) voidaan määrittää mittaamalla vedenpinta maahan asennetusta havaintoputkesta tai kaivosta. Hienorakeisilla maalajeilla pohjaveden pinnan määrittäminen on vaikeampaa kuin karkearakeisilla maalajeilla. Savi- ja silttikerroksilla pohjavedenpinta määritellään näiden kerrosten alla hyvin vettä johtavista kerroksista mitattua pohjavedenpainetta vastaavana pietsometrisenä painetasona.

Pohjavedenpinta Suomessa sijaitsee yleensä noin 2–5 metrin syvyydessä ja seurailee karkeasti maanpinnan muotoja. Hyvin vettä johtavissa maalajeissa pohjavedenpinta

voi kuitenkin sijaita jopa 30–50 metrin syvyydessä; savikoilla se sijaitsee tyypillisesti noin 1 metrin syvyydellä (Suomen ympäristökeskus 2012).

## 2.4 Huokosvedenpaine

Huokosnesteiden ja maaraakeiden välillä vallitsevaa painetta kutsutaan huokosvedenpaineeksi. Tässä kappaleessa keskitytään tarkastelemaan tilannetta, jossa maaperä on täysin vedellä kyllästynyt eli kylläisyysaste  $S_r$  on 100 %. Tällaisessa tapauksessa voidaan puhua huokosvedenpaineesta. Koska karkearakeisten maalajien vedenläpäisevyys on tyypillisesti suuri, on niissä vallitseva huokosvedenpaine lähellä vallitsevaa pohjaveden hydrostaattista painetasoa (kaava 2.6). Tästä johtuen huokosvedenpaineita mitataan usein vain hienojakoisista maalajeista.

$$p = \gamma_w \cdot z \quad (2.6)$$

missä  $p$  on hydrostaattinen paine [kPa]  
 $\gamma_w$  vedentilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>]  
 $z$  etäisyys vedenpinnasta [m]

Huokosvedenpaineen  $u$  voidaan tasapainotilassa olettaa koostuvan yksinomaan hydrostaattisesta jännityksestä kaavan 2.7 mukaan.

$$u = \gamma_w \cdot z \quad (2.7)$$

missä  $u$  on huokosvedenpaine [kPa]  
 $\gamma_w$  veden tilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>]  
 $z$  syvyys pohjavedenpinnantasosta mitattuna [m]

Tasapainotilassa huokosylipaine on nolla, ja huokosvesi pysyy liikkumattomana. Tasapainotilan voidaan olettaa olevan voimassa silloin, kun normaalikonsolidoituneeseen maaperään ei kohdistu ylimääräisiä kuormia, eikä maaperässä ole korkeuseroista aiheutuvia virtauspaineita. (Wood 1990.)

Kun maaperää kuormitetaan kuormalla  $q$ , pyrkii maa-aines sekä painumaan kasaan että leviämään sivusuunnassa. Painumalaskentateorioissa kiintoaine ja huokosneste oletetaan usein kokoonpuristumattomiksi (Terzaghi & Peck 1948). Näin ollen saven painumisen oletetaan olevan seurausta huokosten tilavuuden muutoksesta. Tästä voidaan päätellä kuormituksen lisäyksen näkyvän huokosvedenpaineen kasvuna  $\Delta u$  välittömästi kuormituksen lisäyksen jälkeen. Primääriconsolidaation aikana huokosylipaine purkautuu ylimääräisen huokosveden poistuessa saven huokosista aiheuttaen saven tilavuuden pienenemisen. (Wood 1990.)

Saven muodonmuutokset riippuvat maaperän tehokkaasta jännitystilasta  $\sigma'$  kaavassa 2.8 esitetyllä tavalla.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.8)$$

missä  $\sigma'$  on tehokas kokonaisjännitys [kPa]  
 $\sigma$  kokonaisjännitys [kPa]  
 $u$  huokosvedenpaine [kPa]

Kun maaperää ei kuormiteta ulkopuolisilla kuormilla, voidaan yhtälö 2.8 kirjoittaa myös kaavan 2.9 muotoon maaperän kylläisyysasteen ollessa 100 %.

$$\sigma' = \gamma' z \quad (2.9)$$

ja

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w \quad (2.10)$$

|       |            |   |
|-------|------------|---|
| missä | $\sigma'$  | on tehokas kokonaisjännitys [kPa]                       |
|       | $\gamma'$  | maakerroksen tehokas tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ] |
|       | $\gamma$   | maakerroksen tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]         |
|       | $\gamma_w$ | veden tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]                |
|       | $z$        | etäisyys maanpinnasta [m]                               |

Toisin sanottuna huokosveden voidaan ajatella keventävän savea oman tilavuuspainonsa  $\gamma_w$  verran nostevaikutuksen ansiosta (Wood 1990). Koska muutokset pohjaveden painetasossa vaikuttavat myös pohjaveden nostevaikutukseen, voidaan pohjaveden äkillisen alenemisen olettaa vastaavan maaperään kohdistuvaa pintakuormaa  $q$  (kaava 2.11).

$$q = \gamma_w \cdot \Delta z_w \quad (2.11)$$

|       |              |  |
|-------|--------------|--|
| missä | $q$          | on pintakuorma [kPa]                     |
|       | $\gamma_w$   | veden tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ] |
|       | $\Delta z_w$ | pohjaveden alenema [m]                   |

Tämä tarkoittaa sitä, että pohjaveden yhden metrin suuruinen alenema vastaa maaperässä 10 kPa:n suuruista lisäkuormaa. Näin ollen pohjaveden laskiessa pystyjännitys  $\sigma_v$  kasvaa lineaarisesti alkuperäisen ja uuden pohjavedenpinnan välisissä maakerroksissa (kuva 24). Savien alhaisesta vedenläpäisevyydestä johtuen oletetaan saven huokospaineen kasvavan samassa suhteessa pystyjännityksen kasvun kanssa (Leroueil et al. 1990. s.149).

## 2.5 Isotropia ja homogeenisuus

Maan isotrooppisuudella tarkoitetaan sitä, että maaperän ominaisuudet ovat samansuuruisia kaikissa eri tarkastelusuunnissa. Eroosiosta ja sedimentoitumisesta johtuen maaperä ei kuitenkaan käytännössä ole koskaan täysin isotrooppista vaan sen ominaisuudet vaihtelevat eri suuntiin. Tätä kutsutaan anisotropiaksi. Anisotrooppisuus vaikuttaa myös pohjaveden virtaukseen, sillä maaperän tiiviysasteen ja raekoon vaihtelut sekä raemuoto aiheuttavat muutoksia maaperän vedenläpäisevyyteen.

Maan homogeenisuudella tarkoitetaan sitä, että maaperän elementin fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet pysyvät samanlaisina. Homogeenisessä maakerroksessa pysty- ja vaakasuuntaiset ominaisuudet voivat kuitenkin poiketa toisistaan. Esimerkiksi saven vaakasuuntainen vedenläpäisevyys on usein huomattavasti pystysuuntaista vedenläpäisevyyttä suurempi.

Mitoituslaskelmissa maaperä jaetaan maakerrokseen. Maakerroksella tarkoitetaan homogeenista aluetta, jonka sisällä materiaalin ominaisuuksien oletetaan olevan sa-



manlaisia. Maakerrosjako tehdään jakamalla pohjamaa kerroksiin, joissa maaperän ominaisuudet saavat keskimäärin vakioarvoja. Muodostuneille maakerroksille käytetään näin ollen keskimääräisiä maakerroksen käyttäytymistä kuvaavia arvoja tai arvoja, jotka muuttuvat tasaisesti esimerkiksi syvyyden funktiona.

## 3 Painumat

### 3.1 Elastinen ja plastinen muodonmuutos

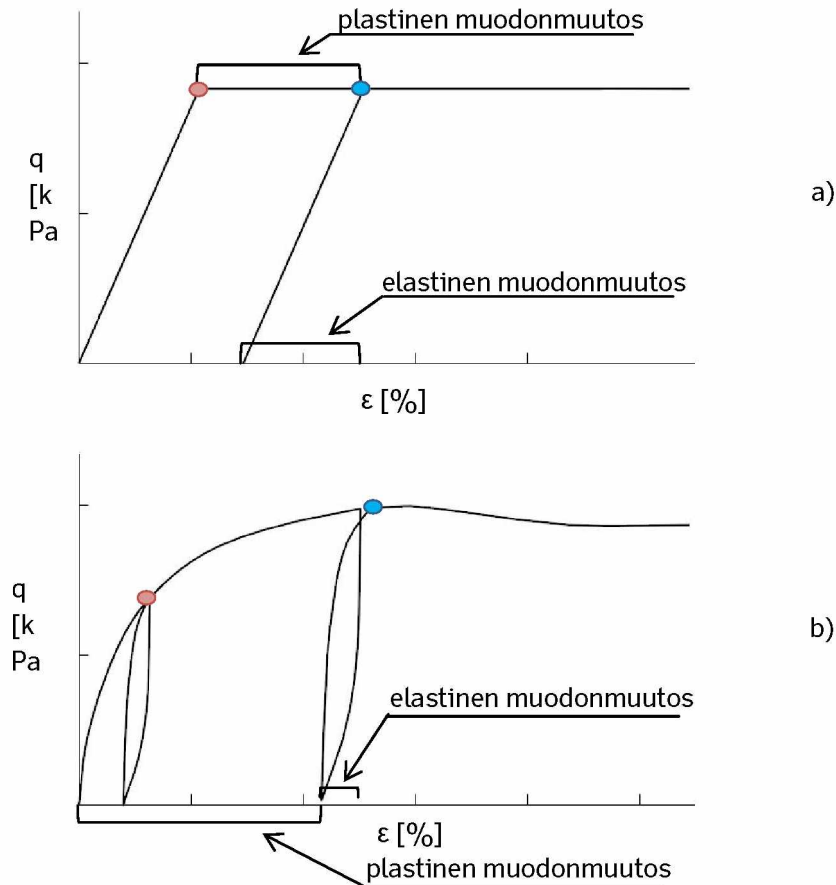
Maaperä tiivistyy kuormituksen alaisena. Hienorakeiset maalajit ovat useimmiten voimakkaammin kokoonpuristuvia kuin karkearakeiset maalajit, jonka vuoksi maaperän painuminen aiheuttaa ongelmia pääasiassa pehmeikköalueilla. Painumat itsessään eivät välttämättä aiheuta vaurioita rakenteille, ongelmallisempaa on maaperän epätasaisista painumista aiheutuvat rakenteen tai rakennuksen eri kulmien tai osien väliset painumaerot. Painumaerot aiheuttavat perustuksiin ja rakenteisiin kohdistuvia vääntö- ja leikkausrasituksia, joita rakenteita ei useinkaan ole mitoitettu kestäväksi.

Riskialteimpia rakenteita painumien kannalta ovat maanvaraisesti perustetut rakenteet, mutta myös paalutetut rakenteet voivat kärsiä maaperän painumista. Maaperän painuminen aiheuttaa paaluille negatiivisen vaippahankauksen lisäksi myös huomattavia vertikaalivoimia vinopaalujen tapauksessa. Paalutettujen rakenteiden yhteydessä myös rakennusta ympäröivien maanvaraisten pihojen, katujen ja kunnallistekniikan painuminen suhteessa painumattomiin rakennuksiin voi aiheuttaa vakavia ongelmia ja putkijohtojen murtumista.

Hooken lain mukaan materiaalin muodonmuutokset ovat riippuvaisia materiaaliin kohdistuvasta jännityksestä (Wood 1990). Maaperän muodonmuutokset voidaan jakaa kimmoisiin ja plastisiin muodonmuutoksiin (kuva 1). Kimmoisella muodonmuutoksella tarkoitetaan muodonmuutosta, joka palautuu kuormituksen poistuttua ennalleen. Plastiset muodonmuutokset ovat puolestaan pysyviä. (Korhonen 1985a.)

Maaperän painuessa kimmoista ja plastista muodonmuutosta on kuitenkin vaikea erottaa erillisiksi ilmiöiksi. Kuormituksen poistuessa saven muodonmuutokset palautuvat vain osittain. Muodonmuutokset ovat siis osin kimmoisia, osin plastisia. Mikäli savea kuormitetaan uudestaan aiemmin vallinneelle kuormitustasolle, voidaan nyt tapahtuvien muodonmuutosten havaita olevan pääasiassa kimmoisia. Jos aikaisemmin vallinnut kuormitustaso kuitenkin ylitetään, kasvaa plastisten muodonmuutosten osuus kokonaisuudenmuutoksesta. Kuormituksen kasvaessa niin suureksi, että muodonmuutokset vaihtuvat elastisista elastoplastisiksi (kuva 1), sanotaan materiaalin myötävän. Tätä pistettä, jossa muutos elastisesta plastiseen muodonmuutokseen tapahtuu, kutsutaan myötöpisteeksi. Kuvassa 1 on havainnollistettu myötöpisteiden sijaintia jännitys-muodonmuutoskuvaajalla. Ylempänä ideaalitalanne, jossa muodonmuutokset on jaettu kimmoisiin ja plastisiin muodonmuutoksiin. Alempana on kuvattu saven todellista käyttäytymistä. Jos kuormitus lopetetaan myötöpisteen jälkeen, palautuvat muodonmuutokset kimmoisien muodonmuutoksen osalta takaisin. Jos kuormitusta taas lisätään, huomataan että rakennetta voidaan kuormittaa aina edeltävään kuormitustasoon asti ennen kuin materiaalissa on havaittavissa merkittäviä plastisia muodonmuutoksia. Edellisen kuormituksen maksimiarvosta on siis tullut materiaalin uusi myötöpiste. (Wood 1990, s. 55–76.)

Koska maaperä on koostumukseltaan epähomogeenistä, maaperän lujuusominaisuudet - ja näin ollen myös myötöpiste - vaihtelevat usein sekä syvyyden että vaakageometrian suhteen. (Wood 1990.)



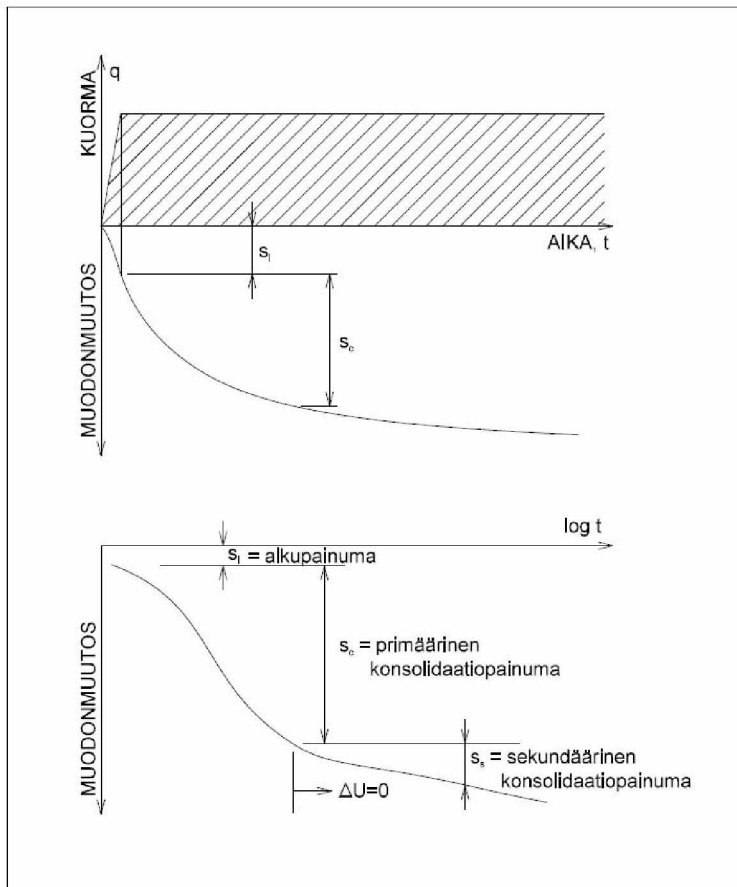
Kuva 1. Saven myötääminen. Punaiset ympyrät kuvaavat myötöpisteitä, siniset ympyrät toistokuormituksen myötöpisteitä. Käyrä a) edusta ideaalista tilannetta, jossa elastinen ja plastinen muodonmuutos tapahtuvat erikseen. Käyrä b) kuvaa saven todellista käyttäytymistä, jossa kimmoinen ja elastinen muodonmuutos tapahtuvat osin samanaikaisesti.

## 3.2 Painumalajit

Maaperän painuminen voidaan luokitella erilaisiin painumalajeihin usealla eri tavalla: elastiseen ja plastiseen painumaan (kuva 1), alku-, konsolidaatio- ja sekundääripainumaan (kuva 2) tai tilavuuden- ja leikkausmuodonmuutokseen. Nämä jaottelut ovat rinnakkaisia keskenään, eivätkä siis sulje toisiaan pois. Esimerkiksi konsolidaatiopainuma voi olla osin elastista ja osin plastista. Tässä kappaleessa käsitellään jalkoa alku-, primääriseen konsolidaatio- ja sekundääripainumaan, joka perustuu painuman aikariippuvuuteen ja painumamekanismeihin.

Alkupainumalla tarkoitetaan rakenteessa rakentamisen aikana tai heti sen jälkeen tapahtuvaa painumaa. Vedellä kyllästetyssä koheesiomaassa alkupainuma tapahtuu suljetussa tilassa, jossa ei tapahdu tilavuuden muutoksia tai suotovirtausta. Alkupainuma johtuu kuormituksen aiheuttamista leikkausmuodonmuutoksista. Alkupainuma tapahtuu myötöpinnan alapuolella, eli elastisella alueella. Kitkamailta painumat koostuvat lähes yksinomaan välittömästä painumasta. Hyvin vettäläpäiseviin maakerrokseen ei synny suljettua tilaa, jonka vuoksi lyhyen ajan painumat tapahtuvat erilaisissa olosuhteissa kuin koheesiomaiden alkupainuma. Kitmaakerroksissa tapahtuu tilavuudenmuutosta samanaikaisesti leikkausmuodonmuutosten kanssa. (Korhonen 1985b, s. 371–397.)

Primääriseellä konsolidaatiopainumalla tarkoitetaan painumaa, joka tapahtuu veden poistuessa maaperän huokosista maanperän tiivistyessä. Kitkamailla konsolidaatiopainuma tapahtuu samanaikaisesti välittömän painuman kanssa. Tämä johtuu kitkamaiden korkeasta vedenläpäisevyydestä, jonka ansiosta vesi pääsee virtaamaan nopeasti pois maaperästä. Koheesiomailla konsolidaatio on tyypillisesti hidasta. Painuma on riippuvainen ajasta ja maaperän konsolidaatioasteesta (Terzaghi & Peck, 1948). Savella konsolidaatio alkaa saven myötöpisteen ylityttyä eli normaalikonsolidoidulla alueella. (Korhonen 1985b.)



Kuva 2 Koheesiomaan painumalajit.

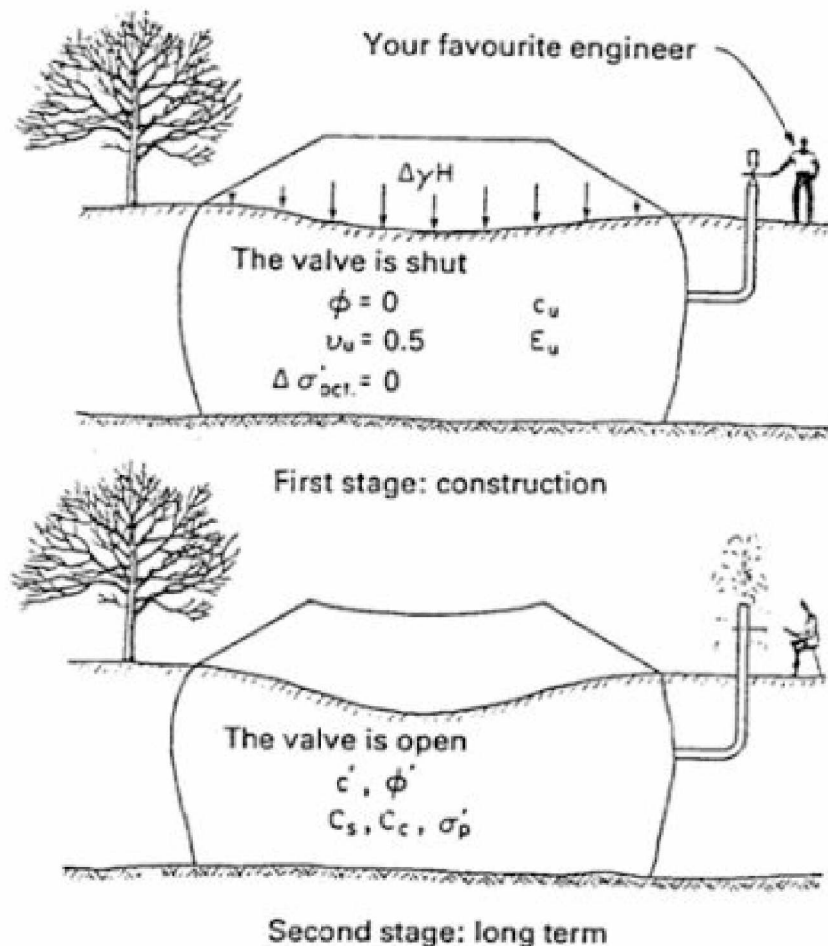
Saven on kokemusperäisesti havaittu jatkavan painumistaan primäärisen konsolidaation päätyttyä. Tätä vaihetta kutsutaan sekundääriseksi konsolidaatiopainumaksi eli hiipumaksi. Sekundääriseessä konsolidaatiossa savi painuu tehokkaiden jännitysten pysyessä vakiona. Toisin sanottuna savi jatkaa painumistaan huokosylipaineen jo tasaannuttua. (Leroueil et al. 1990, Wood 1990.) Primäärisen ja sekundäärisen konsolidaation on myös esitetty olevan yhtenäinen ilmiö, jota ei voida erottaa toisistaan (Barden, 1968).

### 3.3 Avoin- ja suljettu tila

Geoteknisessä suunnittelussa muodonmuutokset jaotellaan avoimen- ja suljetun tilan muodonmuutoksiin (Kuva 3). Suljetulla tilalla tarkoitetaan tilaa, jossa kuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine ei ehdi poistua maaperästä. Geoteknisessä mielessä tämä tarkoittaa lyhyen aikavälin tarkastelua, yleisimmin rakentamisen aikaista ti-

lannetta. Avoimessa eli pitkäaikaisessa tilassa huokosvesi pääsee poistumaan maaperästä, aiheuttaen saven konsolidoitumisen: veden ylipaineen poistuessa huokosista ympäröivät savipartikkelit tiivistyvät eli savi kokoonpuristuu. (Leroueil et al. 1990, s. 147.)

Avoimessa tilassa saven painumanopeus riippuu nopeudesta, jolla ylimääräinen huokosvesi poistuu saven huokosista. Painumanopeuteen vaikuttavat saven vedenläpäisevyys, savikerroksen paksuus sekä rajapinnat. Tasapaksussa, horisontaalisesti yhtenäisessä ja rajoittamattomassa savikerroksessa huokosveden oletetaan yleensä poistuvan vain savikerroksen ylä- tai alapinnan läpi. Jos esimerkiksi kaivanto katkaisee savikerroksen vaakasuunnassa, on otettava huomioon myös saven vaakasuuntainen vedenläpäisevyys. Mikäli savi rajoittuu vettä läpäisemättömään kerrokseen, kuten kallioon, voidaan kaiken ylimääräisen huokosveden olettaa poistuvan saven vapaan yläpinnan lävitse. Tämä luonnollisesti kasvattaa huokosveden kulkemaa matkaa ja hidastaa konsolidaatiota.



Kuva 3 Rakentamisen aikainen ja pitkän aikavälin tilanne (Leroueil et al. 1990.)

Suljetussa tilassa huokosvesi ei maaperän alhaisen vedenläpäisevyyden vuoksi pääse virtaamaan maaperän läpi ja näin ollen poistumaan maasta. Siksi suljetun tilan kuormituksessa täysin vedellä kyllästetyn materiaalin kokonaistilavuudenmuutos  $\varepsilon_v$  on nolla. Tällöin kaikki muodonmuutokset aiheutuvat leikkausmuodonmuutoksista. Tämä tarkoittaa, että tehokas hydrostaattinen jännitys (kaava 3.1) vastaa kuormitusta edeltänyttä tilaa. Eli kuormituksesta aiheutuva jännitys siirtyy kokonaisuudessaan huokosveden ylipaineeksi (kaava 2.8). (Leroueil et al. 1990.)

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad (3.1)$$

missä  $p'$  on tehokas hydrostaattinen jännitys [kPa]  
 $\sigma'_1$  suurin pääjännitys [kPa]  
 $\sigma'_1$  keskimäinen pääjännitys [kPa]  
 $\sigma'_1$  pienin pääjännitys [kPa]

Pitkän ajan tilanteessa huokosveden ylipaine kuitenkin purkautuu veden hitaasti poistuessa savesta. Koska maapartikkelit oletetaan kokoonpuristumattomiksi, voidaan kaiken tilavuuden muutoksen olettaa johtuvan huokosten kokoonpuristumisesta. Näin ollen saadaan tilavuuden muutoksen ja huokosluvun välille kaavassa 3.2 esitetty yhteys.

$$\varepsilon_v = \Delta e / (1 + e) \quad (3.2)$$

missä  $\varepsilon_v$  on tilavuudenmuutos [%]  
 $e$  huokosluku [-]

## 4 Analyttiset painumalaskentamenetelmät

### 4.1 Kokonaispainumamenetelmät

#### 4.1.1 Yleistä

Monet konsolidaatioteoriat ovat yksinkertaistuksia ja sisältävät olettamuksia, jotka eivät todellisuudessa vastaa maaperän ominaisuuksia eivät käyttäytymistä. Mittaus- ja laboratoriotekniikan ja kriittisen tilan teorioiden kehittymisen myötä on kuitenkin ollut mahdollista luoda edistyksellisempiä elementtimenetelmän (FEM) soveltamiseen perustuvia numeerisia malleja kuvaamaan painumaa paremmin. (Leroueil et al. 1990.)

Geotekniikassa elementtimenetelmää hyödyntävien laskentaohjelmien kehitys on ollut suhteellisen hidasta johtuen osin geoteknisten ongelmien monimutkaisuudesta ja osin vanhojen yksinkertaisempien menetelmien vakiintuneesta asemasta suunnittelun osana. Analyttisten menetelmien ongelmana on, että niiden antamat tulokset ovat usein epätarkkoja ja saattavat näin ollen johtaa yli- tai alimitoitukseen. Numeerisilla menetelmillä muodonmuutoksia voidaan kuvata paremmin kuin analyttisillä laskentamenetelmillä. Numeeristen menetelmien käyttämät materiaalimallit vaativat kuitenkin usein lähtötiedoiksi parametreja, joiden määrittäminen vaatii runsaasti näytteitä ja niistä suoritettuja laboratorioskokeita. Tämä on sekä kallista että aikaa vievää. Analyttisten laskentamenetelmien käyttö mitoituksessa voi olla perusteltua, kun tarkasteltava ongelma on laajuudeltaan pieni. Vaativissa kohteissa elementtimenetelmän käyttö on kuitenkin yleensä suositeltavaa, joskaan ei kovin yleistä.

Suomessa on savikerrosten painumalaskentaan yleisesti käytetty Janbun 1963 kehittämää tangenttimoduulimenetelmää (Länsivaara 2000, s. 7). Menetelmä perustuu suhteellisen kokoonpuristuman laskemiseen ödometrikokeesta saatavan, jännityksestä riippuvan kokoonpuristuvuusmoduulin avulla. Kokoonpuristuvuusmoduulin jännitysriippuvuutta kuvaavat moduuliluku  $m$  ja jännitysekspONENTTI  $\beta$ . (Janbu, 1970.) Tangenttimoduulimenetelmän lisäksi tässä työssä käsitellään ruotsalaista painumalaskentamenetelmää, kokoonpuristuvuusindeksimenetelmää, sekä Janbun ja Helenelundin vesipitoisuusmenetelmiä.

Joissakin ödometrikokeiden tulkintamenetelmissä ja niihin perustuvissa laskentamenetelmissä käytetään aritmeettisen mittakaavan sijaan puolilogaritmistä mittakaavaa. Näistä yleisin on kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä, jonka sovellutuksia muut puolilogaritmiset menetelmät tavalla tai toisella ovat. (Länsivaara 2000, s. 37.)

#### 4.1.2 Tangenttimoduulimenetelmä

Tangenttimoduulimenetelmä perustuu suoraviivaiseen syy-seuraussuhteeseen, jossa maaperässä vallitsevan jännitystilän muutoksesta aiheutuvaa saven muodonmuutosta kuvataan tangenttimoduulin  $M_t$  (kaava 4.1) avulla (kuva 4) (Janbu 1970, s. 153).

$$M_t = d\sigma'/d\varepsilon \quad (4.1)$$

missä  $M_t$  on tangenttimoduuli [kPa]  
 $d\sigma'$  tehokkaan kokonaisjännityksen muutos [kPa]  
 $\varepsilon$  muodonmuutos [-]

Tangenttimoduuli määritellään empiirisellä yhtälöllä 4.2 (Ohde 1939, s. 451; Janbu 1963).

$$M_t = m\sigma_a \left(\frac{\sigma'}{\sigma_a}\right)^{1-\beta} \quad (4.2)$$

missä  $m$  on moduuliluku [-]  
 $\beta$  jännitysekspONENTTI [-]  
 $\sigma'$  tehokas kokonaisjännitys [kPa]  
 $\sigma_a$  referenssi jännitys [kPa]

Referenssijännitystä (100 kPa) käytetään muodonmuutosparametrien dimensiotomaksi saamiseen. JännitysekspONENTIN ollessa nolla ( $\beta=0$ ), voidaan tangenttimoduulin todeta olevan kaavan 4.3 mukaisesti lineaarisesti jännityksestä riippuvainen (Janbu 1970, s. 170).

$$M_t = m\sigma' \quad (4.3)$$

Tehokkaan kokonaisjännityksen kasvaessa vallitsevasta jännityksestä  $\sigma'_0$  arvoon  $\sigma'$  voidaan muodonmuutokselle johtaa kaavoissa 4.4 ja 4.5 esitetyt, jännitysekspONENTIN  $\beta$  arvoista riippuvat yhtälöt (Janbu 1970, s. 178, 185).

$$\varepsilon = \int \frac{d\sigma'}{M} = \frac{1}{m\beta} \left[ \left(\frac{\sigma'}{\sigma_a}\right)^\beta - \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_a}\right)^\beta \right] \quad \beta \neq 0 \quad (4.4)$$

$$\varepsilon = \int \frac{d\sigma'}{M_t} = \frac{1}{m} * \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad \beta = 0 \quad (4.5)$$

Ylikonsolidoituneelle savelle muodonmuutokset lasketaan erikseen normaali- ja ylikonsolidoituneelta osalta kaavojen 4.6 ja 4.7 mukaan. Kaavoissa on oletettu jännitysekspONENTIN  $\beta$  saavan arvon nolla.

$$\varepsilon_p = \frac{1}{m_1} \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_p}\right) \quad \text{kun } \beta = 0 \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_p = \frac{1}{m_2} \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad \text{kun } \beta = 0 \quad (4.7)$$

missä  $\varepsilon_p$  = pystysuuntainen muodonmuutos [%]  
 $m_1$  = normaalikonsolidoituneen osan moduuliluku [-]  
 $m_2$  = ylikonsolidoituneen osan moduuliluku [-]  
 $\sigma'$  = kuormanlisäyksen jälkeen vallitseva jännitystila [kPa]  
 $\sigma'_p$  = esikonsolidaatiojännitys [kPa]  
 $\sigma'_0$  = vallitseva jännitystila ennen kuormitusta [kPa]

Tangenttimoduulimenetelmästä on vuosien käytön tuloksena muodostunut useita eri muunnoksia kaavasta 4.2, joita käytetään eri maalajeille. Ensinnäkin saven ylikonsolidoituneelle osalle käytetään usein yksinkertaisuuden vuoksi vakiomoduulia  $M_t = M_{0c}$  yhtälön 4.2 sijaan. Toiseksi hiekalla ja silttisellä hiekalla jännitysekspONENTIN keski-



arvona voidaan pitää arvoa  $\beta=0,5$ . Tästä seurauksena moduulille saadaan kaavan 4.8 mukainen lauseke. (Länsivaara 2000, s. 11.)

$$M_t = m \sqrt{\sigma' \cdot \sigma_a} \quad (4.8)$$

missä  $M_t$  on tangenttimoduuli  
 $m$  moduuliluku  
 $\sigma'$  tehokas kokonaisjännitys [kPa]  
 $\sigma_a$  referenssijännitys [kPa]

Kolmanneksi kansainvälisessä kirjallisuudessa yhtälö 4.2 esitetään usein kaavan 4.3 muodossa, jolloin  $\beta = 0$ . Tällaisilla tavilla vesipitoisuus on tyypillisesti suomalaisia savia alhaisempi (Länsivaara 2000, s. 11). Janbun (1998) mukaan moduuliluvun ja vesipitoisuuden välillä on kokemusperäinen yhteys (kaava 4.9).

$$m = \frac{700 \%}{w_n} \quad (4.9)$$

missä  $w_n$  on saven luonnollinen vesipitoisuus

Tuloksen vaihteluväli on  $\pm 30 \%$ . Janbun (1998) yhtälön (4.7) voidaan olettaa pätevän jännitysekspONENTIN ollessa nolla; yhtälö perustuu kuitenkin saviin, joiden vesipitoisuus on korkeintaan  $70 \%$  (Länsivaara 2000, s. 11). Neljänneksi suomalaisilla savilla tangenttimoduulin arvo putoaa tyypillisesti esikonsolidaation jälkeen hetkellisesti hyvin alas, jonka vuoksi saatetaan joutua käyttämään jännitysekspONENTILLE negatiivista arvoa. JännitysekspONENTIN arvo vaihtelee tyypillisesti välillä  $0 \dots -1$ . Tätä suurempien negatiivisten arvojen käyttöä tulisi Länsivaaran (2000, s. 12) mukaan välttää painumalaskennan virheiden välttämiseksi.

Tyypillisimmät virheet tangenttimoduulimenetelmän käytössä ovat ilmenneet epärealistisen suurina painuman arvoina. Tangenttimoduulimenetelmän käytössä esiintyneistä virheistä suuri osa johtuu moduuliluvun ja jännitysekspONENTIN arvojen käyttämisestä saven yleisinä parametreina myös esikonsolidaatiota pienemmillä jännitysväleillä. Kuten aikaisemmin mainittiin, tangenttimoduuli, ja siten myös moduuliluku ja jännitysekspONENTTI, vaihtelevat saven syvyyden suhteen. Yhdeltä tasolta suoritettuna ödometrikokeen tuloksia ei siis voi soveltaa saven kokopaksuudelle, vaan ödometrikokeita tulisi tehdä useammalta tasolta. (Länsivaara 2000, s. 12)

#### 4.1.3 Ruotsalainen painumalaskentamenetelmä

Ruotsalainen painumalaskentamenetelmä (Embankco) perustuu CRS-ödometrikokeen jatkuvan kokoonpuristuvuusmoduulikuvaajan hyödyntämiseen. Alun perin Embankco oli tietokoneohjelma, joka kehitettiin primääriseen ja sekundääriseen painuman laskentaan. (Statens Geotekniska Institut 1994.) Nykyään myös GeoCalc 2.4 -ohjelma käyttää ruotsalaista painumalaskentamenetelmää (GeoCalc, 2012). Menetelmä perustuu Janbun tangenttimoduulimenetelmään, mutta eroaa tangenttimoduulin kuvaamiseen käytettävien yhtälöiden osalta (Kuva 7) (Länsivaara 2000, s. 28).

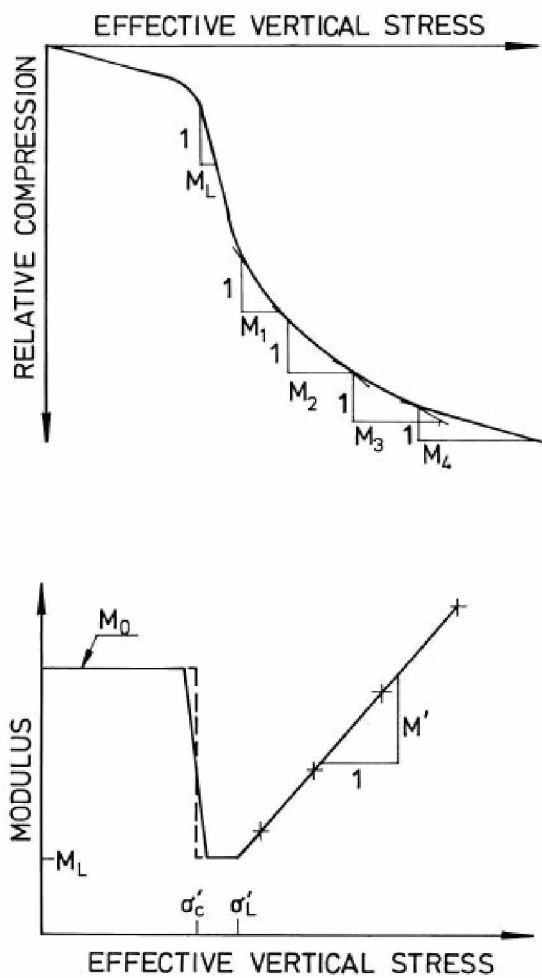
Ruotsalaisessa menetelmässä käytetään ylikonsolidoituneella alueella vakiomoduulia  $M=M_0$ . Ylikonsolidoituneen alueen jälkeen käytetään myös vakiomoduulia  $M=M_L$  rajajännitykseen asti, jonka jälkeen käytetään lineaarisesti kasvavaa moduulia (Kuva 4). (Larsson et al. 1997.) Koska moduuli on lineaarisesti kasvava, ei ruotsalaisessa pai-

numalaskentamenetelmässä törmätä tangettimoduulimenetelmän ongelmaan negatiivisten jännityseksponenttien tapauksessa.

Ruotsalaisessa painumalaskentamenetelmässä tarvittavat laskentaparametrit ovat (Statens Geotekniska Institut 1994.):

|                |   |
|----------------|---|
| $M_0$          | kokoonpuristuvuusmoduuli ylikonsolidoituneella alueella                           |
| $\sigma'_{vo}$ | tehokas pystysuuntainen alkujännitys  |
| $\sigma'_p$    | tehokaskonsolidaatiojännitys  |
| $\sigma'_L$    | rajajännitys  |
| $M_L$          | vakiokokoonpuristuvuusmoduuli konsolidaatiojännityksen ja rajajännityksen välillä |
| $M'$           | moduuliluku, kun tehokas jännitys ylittää rajajännityksen (kaava 4.10)            |

$$M' = \frac{\partial M}{\partial \sigma'} \quad (4.10)$$



Kuva 4 Kokoonpuristuvuusmoduulin määrittäminen ödometrikokeesta (Larsson et al. 1997, s. 13.)

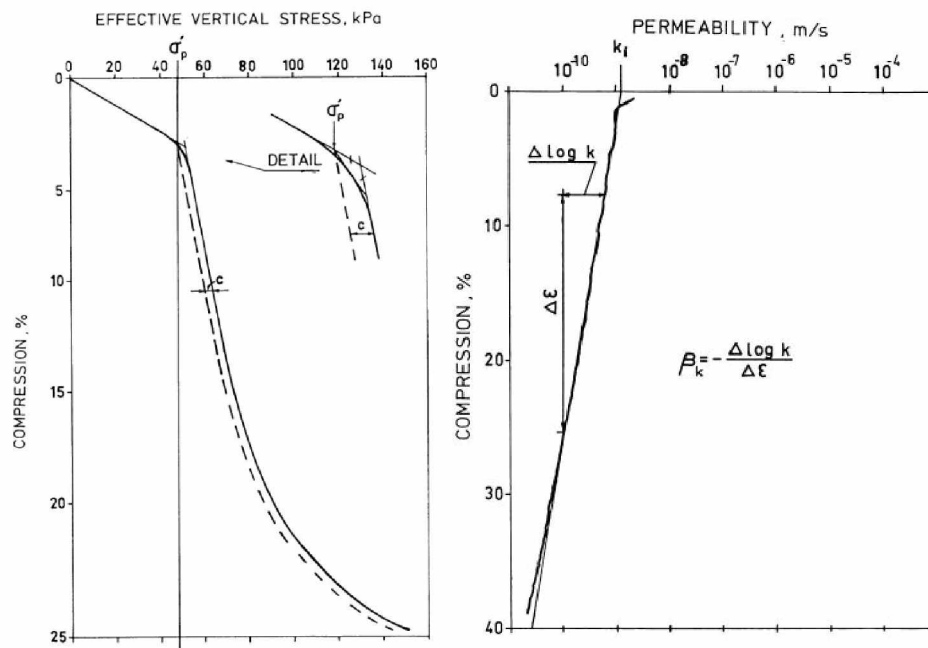
Moduuliluku vastaa tangenttimoduulimenetelmän moduulilukua  $m_i$  jännityks-eksponentin  $\beta_1$  ollessa nolla. Rajajännityksen  $\sigma'_L$  ylittävällä osalla kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  lasketaan kaavalla 4.11 (Statens Geotekniska Institut 1994.).

$$M = M_L + M'(\sigma' - \sigma'_L) \quad (4.11)$$

Ruotsalaisessa painumalaskentamenetelmässä vedenläpäisevyyttä kuvataan parametrien  $k$  ja  $\beta_k$  avulla (kaava 4.13). Kuvassa 5 on esitetty kokoonpuristuvuusominaisuuksien ja vedenläpäisevyyden arviointi CRS-kokeen perusteella. (Larsson et al. 1997, s. 14.)

$$\beta_k = \frac{-\Delta \log k}{\Delta \varepsilon} \quad (4.13)$$

Ruotsalainen painumalaskentamenetelmä on ollut käytössä lähes 20 vuoden ajan, jonka aikana menetelmän tuottamien painumalaskelmien on todettu vastaavan hyvin tehtyjä painumahavaintoja. Tehokkaiden jännitysten noustessa lähelle esikonsolidatiojännityksen tasoa, on laskentamenetelmän tulosten havaittu riippuvan suuresti valitusta kerrosjaosta. Huokosvedenylipaine saattaa tällöin myös ylittää huokosvedenpaineen lähtöarvon yli kaksinkertaistaen huokosveden kokonaispaineen. On myös havaittu, että pitkän aika-välin painumalaskennoissa menetelmän tulokset ovat erittäin herkkiä pienillekin muutoksille lähtöarvoissa. (Claesson 2003, s. 26.).



Kuva 5 Kokoonpuristuvuusominaisuuksien (vasemmalla) ja vedenläpäisevyyden (oikealla) arviointi CRS-kokeen perusteella. (Larsson et al. 1997.)

#### 4.1.4 Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmä

Kokoonpuristuvuusmenetelmä on maailman laajuisesti yleisesti käytössä oleva menetelmä. Sen on kuitenkin todettu kuvaavan heikosti pohjoismaalaisten savien käyttäytymistä, jonka vuoksi sen käyttö on Suomessa vähäisempää. Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmä olettaa maan huokosluvun ja logaritmiseen mittakaavaan piirretyn tehokkaan pystyjännityksen välille lineaarisen riippuvuuden. Normaalkonsolidoituneella alueella muodonmuutoksia kuvataan yhtälöllä 4.14. (Länsivaara 2000, s. 38.)

$$\varepsilon = \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma_0'} \quad (4.14)$$

missä  $C_c$  on kokoonpuristuvuusindeksi [-]  
 $e_0$  alkuhuokosluku [-]

Ylikonsolidoituneella alueella kulmakertoimelle käytetään merkintää  $C_r$ . Jännityseksponenttia  $\beta=0$  vastaavan moduuliluvun  $m$  ja kokoonpuristuvuusindeksin välillä voidaan huomata olevan yhteys kaavojen 4.15 ja 4.16 mukaan. (Länsivaara 2000, s. 38.)

$$C_c = \frac{1+e_0}{m} \ln 10 \quad (4.15)$$

$$C_r = \frac{1+e_0}{m} \ln 10 \quad (4.16)$$

missä  $m$  on moduuliluku [-]  
 $C_r$  palautus- ja toistokuormituksen kokoonpuristuvuusindeksi [-]

#### 4.1.5 Vesipitoisuusmenetelmät

Vesipitoisuuteen perustuvat painumalaskentamenetelmät ovat pitkälti empiirisiä menetelmiä. Ne pohjautuvat siihen olettamukseen, että kokoonpuristuvuusindeksin ja vesipitoisuuden välillä vallitsee yhteys. Helenelund (1951) ja Janbu (1998) ovat molemmat kehittäneet omat versionsa vesipitoisuusmenetelmästä. Vesipitoisuusmenetelmissä alkuhuokosluku  $e_0$  lasketaan kyllästyneen maan vesipitoisuuden  $w$  ja kiintotiheyden  $\rho_s$  perusteella kaavalla 4.17.

$$e_0 = \rho_s \frac{w}{100} \quad (4.17)$$

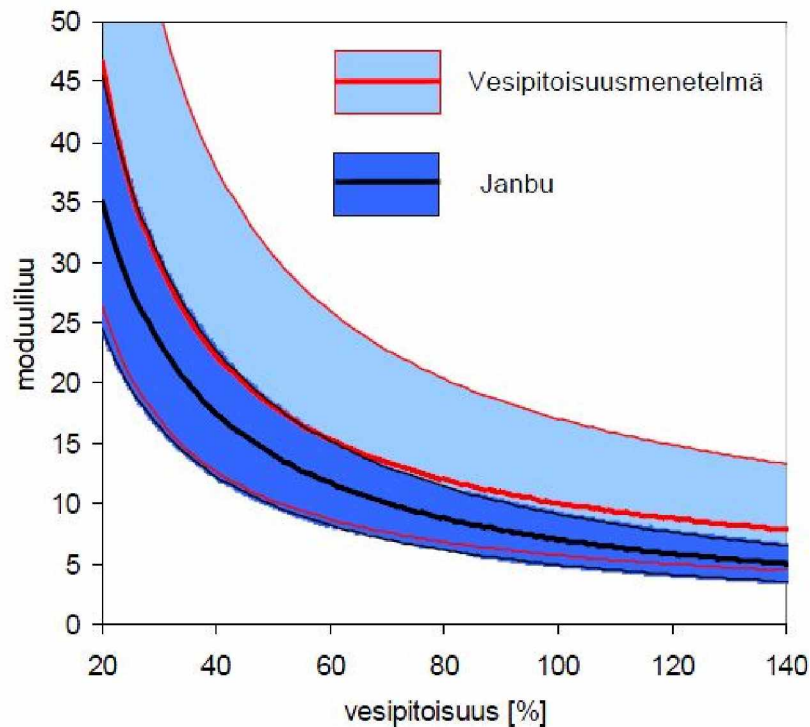
missä  $e_0$  on alkuhuokosluku [-]  
 $\rho_s$  kiintotiheys [ $\text{kN/m}^3$ ]

Helenelundin (1951) menetelmässä kokoonpuristuvuusindeksi  $C_c$  lasketaan vesipitoisuuden perusteella

$$C_c = 0,85 \left( \frac{w}{100} \right)^{1,5} \quad (4.18)$$

Janbu (1998) puolestaan havaitsi, että jännityseksponentin  $\beta$  ollessa nolla voidaan moduuliluvun  $m$  ja vesipitoisuuden välillä todeta olevan kaavan 4.7 mukainen yhteys.

Kuvassa 9 on esitetty vesipitoisuuden perusteella laskennallisesti saatavat moduuliluvut ja vaihteluvälit. Helenelundin menetelmällä lasketut kokoonpuristuvuusindeksit on muunnettu kaavan 3.13 mukaisesti jännityseksponenttia  $\beta=0$  vastaavaa moduulilukua  $m$ .



Kuva 6 Janbun ja Helenelundin vesipitoisuusmentelmillä saatavat moduuliluvut (Länsivaara 2000.)

Kuvasta 9 voidaan havaita menetelmien antamien moduuliluvun arvojen vastaavan hyvin toisiaan sillä erotuksella, että Helenelundin menetelmällä saadaan suurempia moduuliluvun arvoja. Jännityseksponeentin arvon ollessa nolla, johtavat suuremmat moduuliluvun arvot pienempiin painumiin.

Vesipitoisuuteen perustuvat painumalaskentamenetelmät ovat likiarvomenetelmiä, jotka eivät huomioi maaperän kuormitushistorian aiheuttamaa mahdollista ylikonsolidaatiota. Tästä johtuen vesipitoisuusmenetelmät soveltuvat vain normaalisti konsolidoituneen maapohjan painumien laskentaan. (Vepsäläinen & Takala 2004.)

## 4.2 Aikapainuman laskentamenetelmät

### 4.2.1 Terzaghin konsolidaatioteoria

Terzaghi esitteli ensimmäisenä klassisen konsolidaatioteorian vuonna 1925, joka luo vielä nykyäänkin perustan yksiulotteiselle konsolidaatiopainuman teorialle (Ortiago 1995, Leroueil et al. 1990). Konsolidaatioteorian tavoitteena on määrittää yhtälö jännitysten ja huokosluvun määrittämistä varten missä tahansa pisteessä, millä tahansa ajan hetkellä ja minkä paksuisessa konsolidoituvassa maakerroksessa tahansa (Taylor 1948, s. 226).

Terzaghin teoria perustuu lukuisiin olettamuksiin todellisuuden yksinkertaistamiseksi. Muodonmuutosten ja jännitysten välillä oletetaan olevan suora, ajasta riippumaton yhteys. Savikerrosten muodonmuutokset oletetaan yksiulotteisiksi ja pieniksi ja maaperän vedenläpäisevyyden oletetaan pysyvän vakiona. Lisäksi Terzaghin kehittämä ratkaisu yksiulotteiselle konsolidaatiolle on voimassa kun (Taylor 1948, s. 226.):

1. maaperä on homogeenista
2. maaperä kylläisyysaste on 100 %
3. maapartikkelit ja huokosneste ovat kokoonpuristumattomia
4. maaperällä ei ole rakenteellista lujuutta
5. kuormitus on yksiulotteista
6. huokosnesteen virtaus on yksiulotteista
7. huokosnesteen virtaus noudattaa Darcyn lakia
8. huokosluku on suoraan verrannollinen tehokkaisuuden jännityksiin

Tällöin pystysuuntaisen kuormituksen pysyessä vakiona (Terzaghi & Peck 1948, s. 238.)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4.19)$$

missä konsolidaatiokerroin  $c_v$  määritellään kaavan 4.20 mukaan.

$$c_v = \frac{k \cdot M}{\gamma_w} \quad (4.20)$$

missä  $k$  on vedenläpäisevyys [m/a]  
 $M$  kokoonpuristuvuusmoduuli [kPa]  
 $u$  huokosvedenpaine [kPa]  
 $z$  syvyys [m]  
 $\gamma_w$  veden tilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>]

Yhtälö voidaan kirjoittaa myös huokosylipaineelle kaavan 4.21 muotoon (Leroueil et al. 1990).

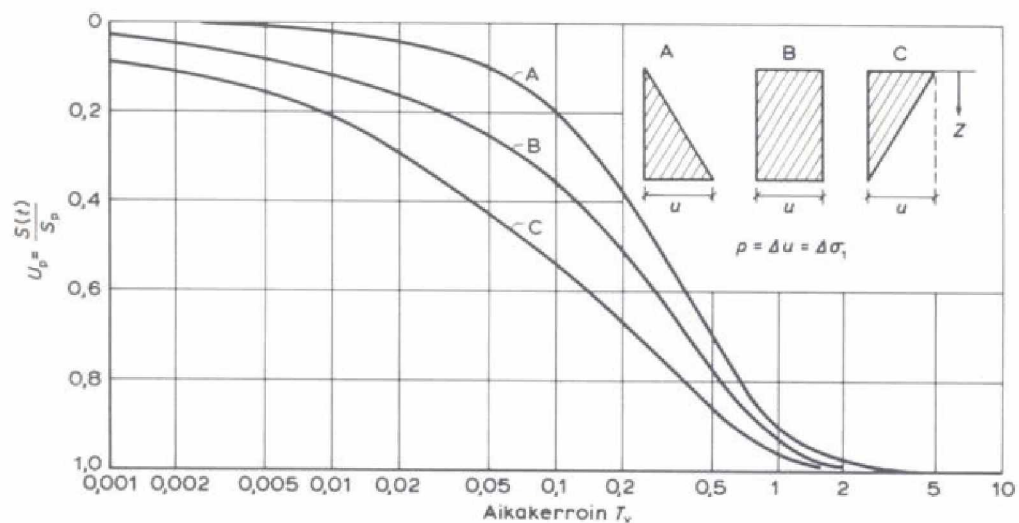
$$\frac{\partial(\Delta u)}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2(\Delta u)}{\partial z^2} \quad (4.21)$$

Terzaghi (1948, s. 239.) esitti myös ratkaisumallin konsolidaatioasteen laskemiseksi aikatekijän  $T_v$  avulla (Kuva 7).

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (4.22)$$

$$U_p = \frac{S(t)}{S_p} \quad (4.23)$$

missä  $c_v$  on konsolidaatiokerroin [m<sup>2</sup>/s]  
 $H$  veden kulkema matka [m]  
 $t$  aika [s]  
 $U_p$  primäärikonsolidaation konsolidaatioaste hetkellä  $t$  [-]  
 $S(t)$  primääripainuma ajanhetkellä  $t$  [mm]  
 $S_p$  rakenteen lopullinen painuma hetkellä  $t$  [mm]



Kuva 7 Konsolidaatioasteen ja aikakerroimen välinen riippuvuus Terzaghi & Peck (1948) mukaan

Harvoin löytyy tilanteita, jossa tilavuudenmuutokset olisivat täysin yksiulotteisia, ja näin ollen huokosvedenpaineen ja vertikaalisen jännityksen suhde on todellisuudessa monimutkaisempi kuin teoria esittää. Terzaghin teoria pätee vain pienille muodonmuutoksille, pehmeillä savilla muodonmuutokset voivat kuitenkin olla jopa yli 15 % luokkaa. Lisäksi maaperä ei ole käytännössä koskaan täysin kyllästynyttä, eivätkä huokosvesi ja kiintoainne ole täysin kokoonpuristumatonta. Koska Terzaghin esittämät oletukset muun muassa muodonmuutosten yksiulotteisuudesta ja maaperän homogeenisuudesta ovat ristiriidassa todellisuuden kanssa, voivat teorialla saadut tuloksetkin olla vain arvioita todellisesta ilmiöstä. Numeeristen laskentamenetelmien kehittymisen myötä on voitu kehittää uusia laskentamalleja, joissa ainakin osa edellä mainituista oletuksista on voitu kumota tai korjata niiden puutteita. (Leroueil et al. 1990, s. 95–96.)

#### 4.2.2 Janbun konsolidaatioteoria

Janbu esitti konsolidaatioajan ja ja konsolidaatioasteesta riippuvan aikatekijän välille kaavassa 4.24 esitettyä yhteyttä (Janbu 1970, s. 201).

$$t = T_p \frac{H^2}{c_v} \quad (4.24)$$

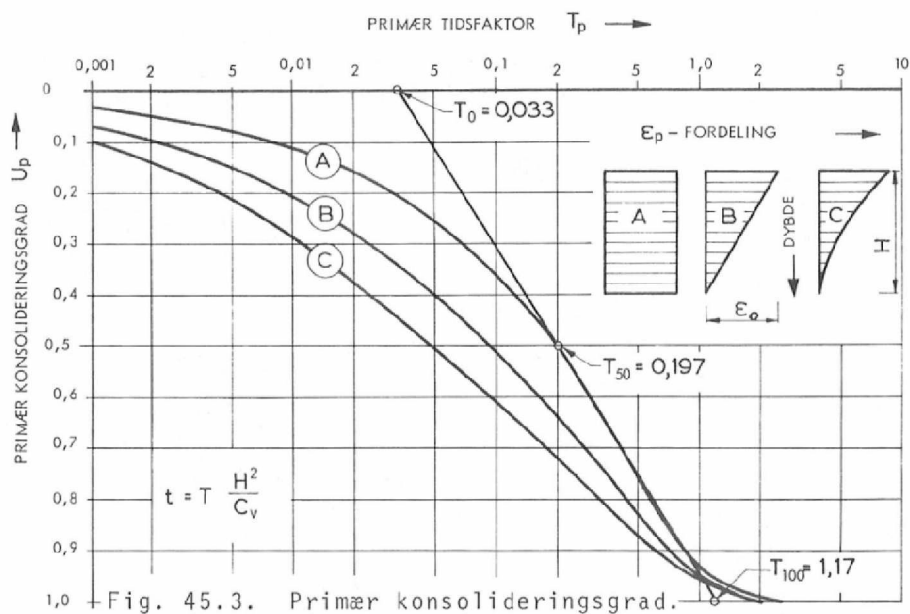
missä  $t$  on aika [a]  
 $T_p$  aikatekijä [-]  
 $H$  poistuvan huokosveden kulkema matka [m]  
 $c_v$  konsolidaatiokerroin [ $m^2/a$ ]



Taulukko 1 Janbun (1970, s. 205) konsolidaatioteorian mukaisia aikatekijän  $T_p$  arvoja eri konsolidaatioasteille  $U_p$ .

| Tabell 45.1. Primær konsolideringsgrad. |                          |             |             |
|---|--------------------------|-------------|-------------|
| Tidsfaktor,<br>$T_p$                    | Konsolideringsgrad $U_p$ |             |             |
|   | A = Rektangel            | B = Trekant | C = Parabel |
| 0,000                                   | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000      |
| 0,001                                   | 0,0357                   | 0,0694      | 0,1012      |
| 0,002                                   | 0,0505                   | 0,0969      | 0,1398      |
| 0,005                                   | 0,0798                   | 0,1496      | 0,2110      |
| 0,01                                    | 0,1128                   | 0,2057      | 0,2830      |
| 0,02                                    | 0,1596                   | 0,2792      | 0,3715      |
| 0,05                                    | 0,2523                   | 0,4047      | 0,5075      |
| 0,1                                     | 0,3568                   | 0,5159      | 0,6132      |
| 0,2                                     | 0,5041                   | 0,6378      | 0,7159      |
| 0,5                                     | 0,7639                   | 0,8284      | 0,8659      |
| 1,0                                     | 0,9313                   | 0,9500      | 0,9609      |
| 2,0                                     | 0,9942                   | 0,9958      | 0,9967      |
| $\infty$                                | 1,0000                   | 1,0000      | 1,0000      |

Aikatekijä on riippuvainen konsolidaatioasteesta ja kerroksen muodonmuutosprofiilista (Kuva 9). Taulukossa 1 on esitetty eri konsolidaatioasteita  $U_p$  ja muodonmuutosprofiileja vastaavat aikatekijät  $T_p$ .



Kuva 8 Janbun konsolidaatioteorian mukaiset ratkaisukäyrät. (Janbu 1970, s. 205.)

Saven kuormitettaessa on painuma riippuvainen kuormituksen kestosta. Janbu (1969) esitteli aikavastuksen  $R$ , joka kuvaa saven virumista. Koska hiipumassa huokosyli-paine voidaan olettaa nolaksi, voidaan aikavastusta  $R$  kuvata yhtälöllä 4.25 (Janbu 1970, s. 152.)



$$R = \frac{dt}{d\varepsilon} \quad (4.25)$$

Kokemusperäisesti on havaittu aikavastuksen  $R$  kasvavan tietyn ajan  $t_0$  jälkeen ajan suhteen lähes lineaarisesti (Kuva 8). Aikavastusta voidaan tällöin kuvata kaavalla 4.26. (Janbu 1970, s. 219.)

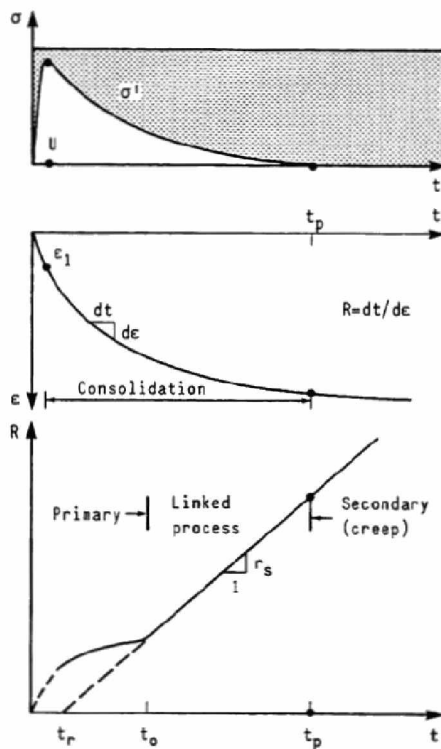
$$R = r_s \cdot (t - t_r) \quad , \quad t > t_0 \quad (4.26)$$

missä  $r_s$  on hiipumaluku [-]  
 $t$  aika [a]  
 $t_r$  referenssiaika [a]

Referenssiaika  $t_r$  on useimmiten nolla. Ajan  $t_0$  on myös havaittu olevan usein huomattavasti primäärikonsolidaatioaikaa  $t_p$  pienempi. Tämä tarkoittaa sitä, että hiipumaluku kuvaa saven käyttäytymistä jo melko aikaisessa vaiheessa. Kun  $t_r$  on nolla, saadaan hiipumaluvun  $r_s$  ja sekundääripainuman kertoimen  $C_\alpha$  välille johdettua kaavan 4.27 mukainen yhteys. (Länsivaara 2001, s. 8.)

$$r_s = \frac{1+e_0}{C_\alpha} \ln 10 \quad (4.27)$$

missä  $e_0$  on alkuhuokosluku [-]  
 $C_\alpha$  sekundääripainuman kerroin [-]



Kuva 9 Aikavastuksen  $R$  ja hiipumaluvun  $r_s$  määrittäminen (Janbu 1998)

Saven painumanopeutta voidaan arvioida lisäksi Janbun painumapotentiaali-menetelmällä. Painumapotentialimenetelmä perustuu Janbun hiipumateoriaan. (Länsivaara 2001, s. 7.)

Painumat ajan  $t_0$  ja  $t$  välille saadaan olettamalla aikavastuuskelle

$$R = \frac{1}{\varepsilon} = r_s \cdot t \quad , \quad t > t_0 \quad (4.28)$$

näin ollen painumille voidaan todeta pätevän:

$$\delta = \int_{t_0}^t \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot H dt = \int_{t_0}^t \frac{H}{r_s \cdot t} dt = \frac{H}{r_s} \ln \frac{t}{t_0} = S \ln \frac{t}{t_0} \quad (4.29)$$

missä  $\delta$  on painuma [mm]  
 $S$  painumapotentialiaali ( $H/r_s$ ) [mm]

Länsivaaran (2001) mukaan painumapotentialimenetelmän hyviä puolia ovat, että se perustuu klassisiin painumateorioihin. Tämän vuoksi menetelmää on mahdollista käyttää maaparametrien takaisinlaskentaan painumahavaintojen avulla. Menetelmää voidaan kuitenkin käyttää myös perinteiseen painumalaskentaan lähtöarvojen perusteella. Painumapotentialimenetelmällä on kuitenkin haastavaa kuvata painuman alkuarvoja, jolloin painumapotentialiaali ei ole vielä saavuttanut vakioarvoa. Tämä ongelma voidaan kuitenkin ratkaista käyttämällä painumapotentialin määrittämiseen kah-ta eri sovitusta: Janbun (1998) esittämää paraabelisovitusta ja Länsivaaran (2001) esittämää hyperbelisovitusta. (Länsivaara 2001, s. 83–84.)

## 4.3 Sekundääripainuman laskeminen

Taylor esitteli vuonna 1942 saven hiipumaa kuvaavan sekundääripainumankertoimen  $C_\alpha$ , joka määritellään kaavan 4.27 mukaan. Ruotsissa on yleisesti käytössä sekundää-ri-painumaparametri  $C_{\alpha\varepsilon}$  (kaava 4.31). Sekundääripainuman kertoimien välinen ero on siinä, että  $C_\alpha$  on huokosluvun  $e$  ja  $C_{\alpha\varepsilon}$  muodonmuutoksen  $\varepsilon$  funktio. (Claesson 2003.)

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log(t)} \quad (4.30)$$

missä  $e$  on huokosluku [-]  
 $t$  aika [h]

$$C_{\alpha\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon_{cr}}{\Delta \log(t)} \quad (4.31)$$

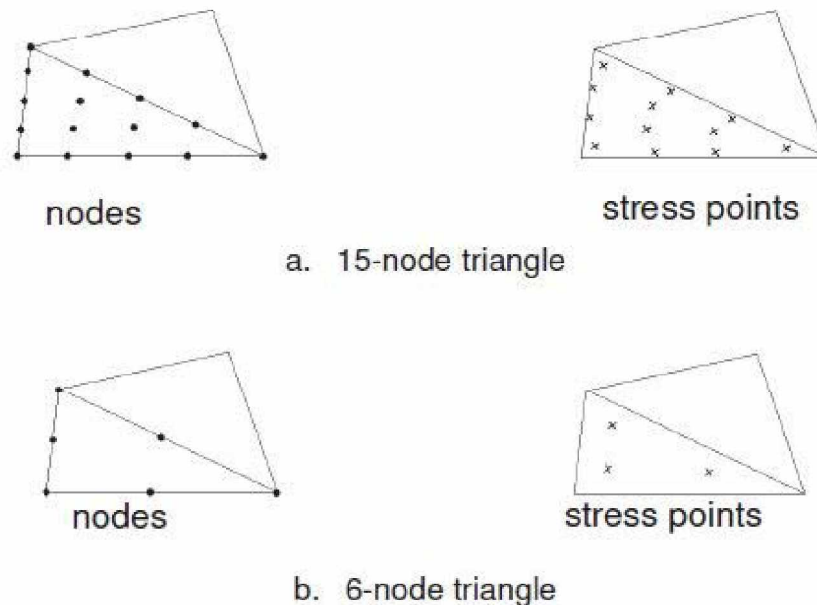
missä  $\varepsilon_{cr}$  on hiipuman muodonmuutos [%]  
 $t$  aika [s]

Ödometrikokeissa on havaittu, että  $C_\alpha$  arvo on pieni jännitystasoilla, jotka ovat esi-konsolidaatiojännitystä pienempiä. Konsolidaatioasteen ylittyessä  $C_\alpha$  voidaan havaita kasvavan huomattavasti, kunnes korkeammilla jännitystasoilla sen arvo tasoittuu jäl-leen. Mesri ja Godlewski (1977) ovat osoittaneet että  $C_{\alpha\varepsilon}$  on riippuvainen kokoon-puristuvuusindeksistä  $C_c$ . Savilla suhde  $C_{\alpha\varepsilon}/C_c$  on yleensä noin 0,04. Orgaanisilla maalajeilla suhde on korkeampi.

## 5 Elementtimenetelmä

### 5.1 Yleistä

FEM-laskennassa tarkasteltavan ongelman geometria jaetaan pienempiin, usein joko kolmion tai suorakaiteen muotoisiin elementteihin, jotka liittyvät toisiinsa solmujen avulla. Mitä pienempiin elementteihin geometria jaetaan, sitä tarkempia laskentatuloksia saadaan. Jos solmuja on myös reunojen välissä, kutsutaan elementtejä korkeamman asteen elementeiksi (kuva 10). FEM-mallinnuksessa pyritään usein selvittämään maaperässä tapahtuvia siirtymiä. Siirtymiä approksimoidaan elementtien solmukohtissa muotofunktioiden avulla. Tasotapauksessa solmuilla on kaksi vapausastetta, eli mahdollisia siirtymäsuuntia on kaksi. Muotofunktio on usein yksinkertainen polynomi. Kun tiedetään solmujen koordinaatit, voidaan solmujen siirtymiä ilmaista polynomien avulla. (Potts & Zdravkovic 1999.)



Kuva 10. 6 ja 15 solmuisten elementtien käyttö Plaxis 2011 ohjelmassa (Plaxis, 2011b)

Seuraavaksi käydään läpi muutamia esimerkkikohteen mallinnuksessa käytettyjä Plaxis 2011 ohjelman materiaalimalleja.

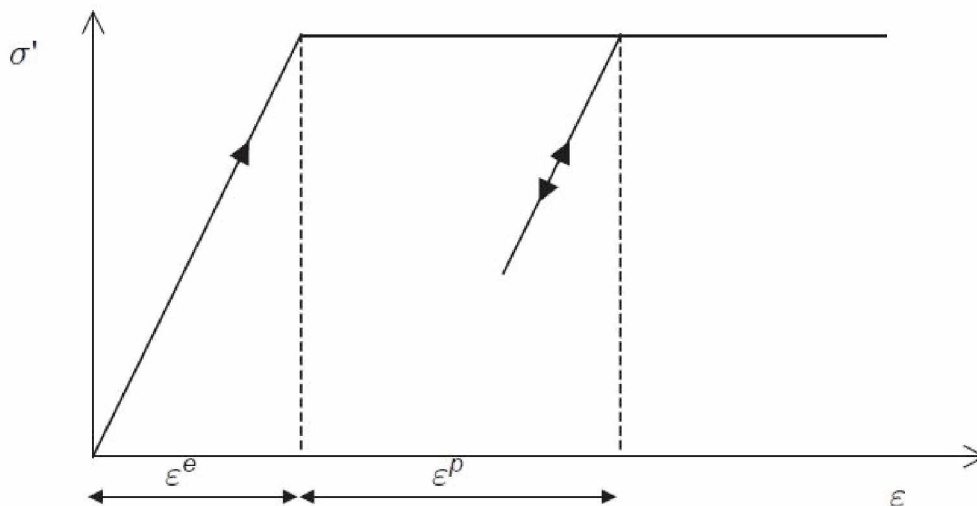
### 5.2 Linearisesti elastinen malli

Linearisesti elastinen malli (LE) on materiaalimalli, joka perustuu Hooken lakiin. Linearisesti elastinen materiaalimalli sisältää vain kaksi lähtöarvoa: Youngin moduulin eli kimmomodulin ja Poissonin luvun. (Plaxis 2011a, s. 7.) Se olettaa materiaalin olevan täysin isotrooppinen ja muodonmuutokset elastisiksi eli palautuviksi. Koska nämä perusolettamukset ovat maa- tai kallioperän osalta harvoin totta, on linearisesti elastinen materiaalimalli usein aivan liian pelkistetty kuvaamaan maaperän tai kallion käyttäytymistä. Sitä voidaan kuitenkin käyttää betonirakenteiden tai massiivisten, lujien peruskallioesiintymien mallintamiseen. Mallinnettaessa kalliota LE-

materiaalimallilla tulee huomioida, että malli sallii materiaalille rajattoman lujuuden. Tästä johtuen mallia ei tulisi käyttää tapauksissa, joissa materiaalin lujuus vaikuttaa rakenteen kantavuuteen. Sitä pitäisikin käyttää vain sellaisten rakenteiden ja materiaalien mallintamiseen, joiden lujuus on huomattavasti vallitsevaa jännitystasoa suurempi. (Plaxis 2011a, s. 9–10.)

## 5.3 Mohr-Coulombin malli

Plaxisen käyttämä Mohr-Coulombin (MC) materiaalimalli on pelkistetty, kimmoisen ideaaliplastinen materiaalimalli, joka ei huomioi materiaalin myötölujenemistä. MC-malli perustuu Mohr-Coulombin murtoehtoon. Kimmoisen ideaaliplastisuus tarkoittaa sitä, että materiaalin otaksutaan käyttäytyvän murtoon asti täysin kimmoisesti, kunnes materiaali myötää jännityksen saavuttaessa murtotason (Kuva 11). Näin ollen muodonmuutokset kasvavat äärettömästi jännityksen pysyessä vakiona. MC-mallin myötöehto on kitkakulman ja koheesion funktio ja se on kiinnitetty alussa määritettyjen materiaaliparametrien mukaiseen pisteeseen. Myötöpinta ei liiku tai laajene plastisten muodonmuutosten mukana. Kun vallitseva jännitystila sijaitsee myötöpinnan sisäpuolella, olettaa malli materiaalin toimivan elastisesti. (Plaxis 2011a, s.29.)



Kuva 11 Kimmoisen ideaaliplastisen materiaalimallin periaate. (Plaxis 2011a, s. 30.)

Mohr-Coulombin murtoehto voidaan kirjoittaa tehokaiden jännitysten avulla kaavassa 5.1 esitettyyn muotoon.

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \cdot \tan \varphi' \quad (5.1)$$

missä  $\tau_f$  on leikkauslujuus [kPa]  
 $c'$  tehokas koheesio [kPa]  
 $\sigma_n'$  tehokas normaalijännitys [kPa]  
 $\varphi'$  tehokas kitkakulma [°]

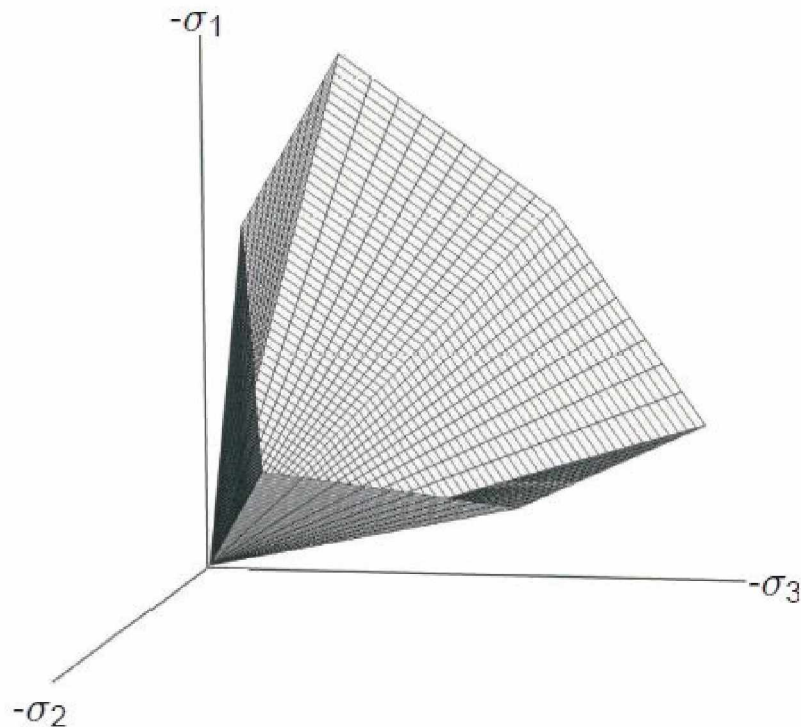
Mohrin ympyröiden avulla voidaan murtoehto kirjoittaa aksisymmetrisille tapauksille kaavan 5.2 muotoon.

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = 2c' \cos \varphi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' \quad (5.2)$$

missä  $\sigma'_1$  on suurin pääjännitys  
 $\sigma'_3$  pienin pääjännitys.

Plaxis 2D:n käyttämässä MC-mallissa myötöfunktiona käytetään kaavan 5.2 murtoehtoa. Kun myötöpinnan ja plastisen muodonmuutoksen suunnan välillä on yhteys, on myötösääntä assosiatiivinen. Koska assosiatiivisen MC-myötöehdon antamien plastisten muodonmuutosten on havaittu olevan epärealistisen suuria, suositellaan MC-mallissa käytettävän ei-assosiatiivista myötöehtoa. Tällöin plastinen potentiaali-funktio saadaan korvaamalla myötöfunktion tehokas kitkakulma  $\varphi'$  dilataatiokulmalla  $\psi$ . (Potss & Zdravkovic 1999.)

MC mallin myötöpinta muodostaa jännitysavaruuudessa kuusikulmaisen kartion (Kuva 12). Myötöpinnan nurkat muodostavat numeerisessa analyysissä epäjatkuvuuskohdan, joka aiheuttaa mallinnusohjelmistoissa laskennallisia vaikeuksia.



Kuva 12 Mohr-Coulombin myötöpinta pääjännityskoordinaatistossa ( $c=0$ ). (Plaxis 2011a, s. 31.)

## 5.4 Soft Soil- ja Soft Soil Creep -mallit

Soft Soil (SS) on Plaxiksen Cam Clay malliin perustuva materiaalmalli. Soft Soil malli on suunniteltu soveltumaan vahvasti kokoonpuristuvien materiaalien mallintamiseen. SS-mallin ominaisuuksia:

- jäykkyyden jännitysriippuvuus (logaritminen painuma käyttäytyminen)
- primäärinen kuormitus erotettu palautuksesta ja toistokuormituksesta



- esikonsolidaatiojännityksen huomioiminen
- Mohr-Coulombin murtokriteeri

SS-mallissa oletetaan tilavuudenmuutoksen  $\varepsilon_v$  ja tehokkaan jännityksen  $p'$  välille kaavan 5.3 mukainen logaritminen yhteys (Plaxis 2011a, s. 73).

$$\varepsilon_v - \varepsilon_v^0 = -\lambda^* \ln \frac{p'}{p^0} \quad (5.3)$$

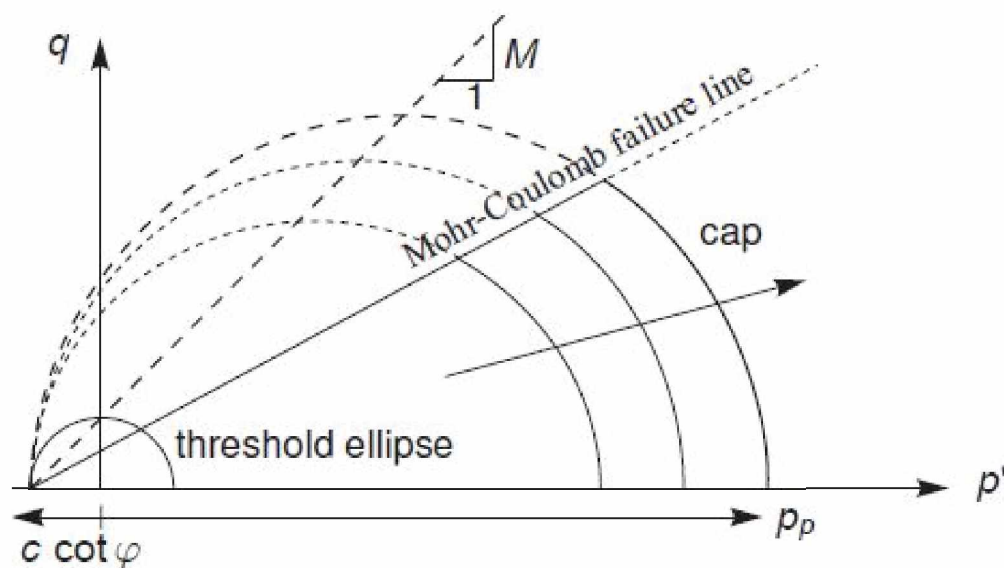
missä  $\lambda^*$  on muunnettu kokoonpuristuvuusindeksi (Plaxis) [-]  
 $\varepsilon_v$  tilavuudenmuutos [-]  
 $p'$  tehokas hydrostaattinen jännitys [kPa]

Isotrooppisen palautuksen ja uudelleenkuormituksen aikana materiaali noudattaa kuitenkin kaavan 5.4 mukaista suoraa (Plaxis 2011a, s. 73).

$$\varepsilon_v^e - \varepsilon_v^{e0} = -\kappa^* \ln \frac{p'}{p^0} \quad (5.4)$$

missä:  $\kappa^*$  on muunnettu paisumisindeksi [-]

Soft Soil-mallin myötöpinnat on esitetty kuvassa 13, missä parametri  $M$  kuvaa myötöpinnan muodostaman ellipsin korkeutta. Parametri  $M$  määrittää pitkälti maanlepopaineen  $K_0$  saaman arvon. Parametrille  $M$  voidaan määrittää arvo, joka vastaa tiedettyä  $K_0$  arvoa primäärisessä yksiulotteisessa puristuskokeessa. Perinteisessä kriittisen tilan mallissa parametrin  $M$  kuvaama kriittisen tilan suora lähtee origosta ja kulkee murtosuoran alapuolella. Plaxiksessa materiaalin myötö ja murto eivät kuitenkaan ole riippuvaisia kriittisen tilan suorasta. Plaxiksen käyttämä kriittisen tilan suoran määritelmä kuitenkin mahdollistaa parametrien  $M$  ja  $K_0$  yhteensovittamisen. Myötöpinnat eroavat Plaxis 2011 -ohjelman Hardening Soil -mallin tapaan MC-mallista siten, että materiaalin myötääminen on huomioitu hydrostaattisen akselin suunnassa ns. kuvun (cap) avulla. SS-malli olettaa maaperän käyttäytyvän palautuksen ja uudelleenkuormituksen alaisena elastisesti Hooken lain mukaan. (Plaxis 2011a, s. 74–75.)



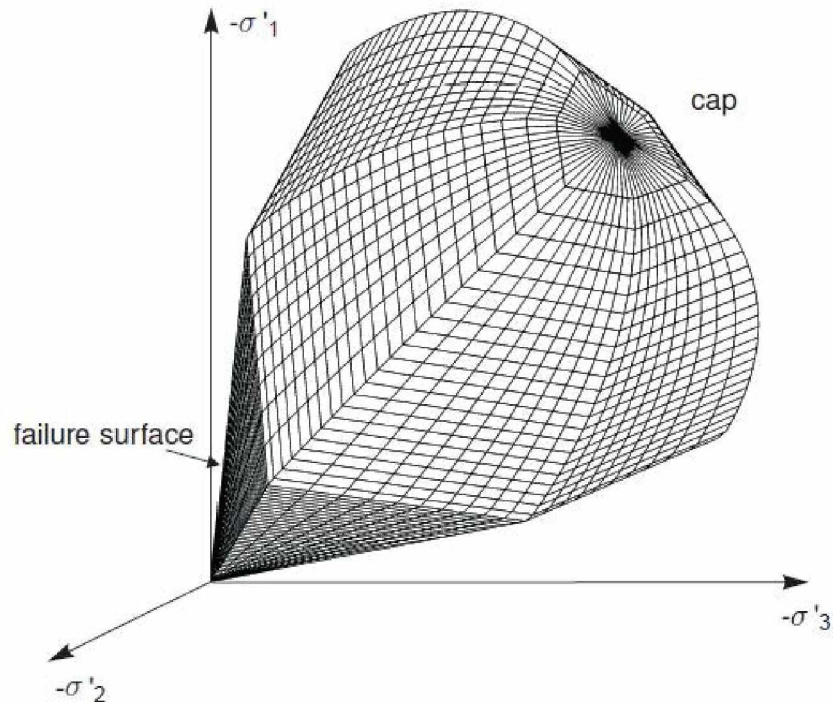
Kuva 13 Soft Soil -mallin myötöpinnat  $q$ - $p'$ -koordinaatistossa. (Plaxis 2011a, s. 75.)

Kuvassa 14 on esitetty Soft Soil -mallin myötöpinnat pääjännityskoordinaatistossa. Soft Soil mallissa tarvittavat parametri voidaan laskea Cam-Clay-mallin kokoonpuristuvuusindeksien  $\lambda$  ja  $\kappa$  perusteella kaavojen 5.5 ja 5.6 mukaan (Plaxis 2011a, s. 78).

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e_0} \quad (5.5)$$

$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e_0} \quad (5.6)$$

missä  $\lambda$  on normaalisti konsolidoituneen tilan suoran kaltevuus  $\ln p'$ - $v$ -koordinaatistossa (Cam Clay malli)  
 $\kappa$  paisumisvaiheen suoran kaltevuus  $\ln p'$ - $v$ -koordinaatistossa (Cam Clay malli)

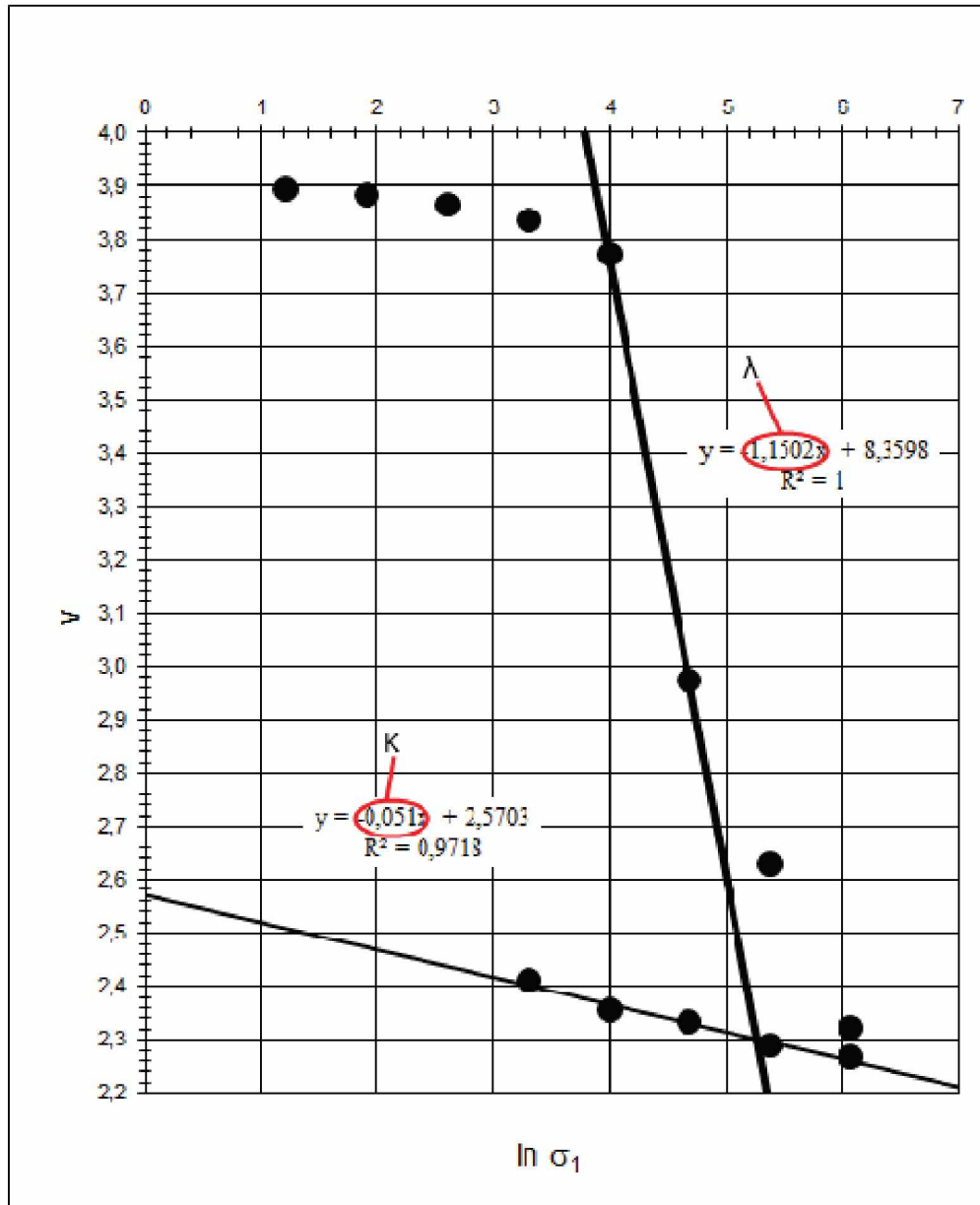


Kuva 14 Soft Soil -mallin myötöpinta pääjännityskoordinaatistossa. (Plaxis 2011a, s. 76.)

Kuvassa 15 on esitetty parametrien  $\lambda$  ja  $\kappa$  määrittäminen ödometrikokeen tuloksista. Vaihtoehtoisesti  $\lambda^*$  ja  $\kappa^*$  voidaan määrittellä myös kokoonpuristuvuusmoduulin  $C_c$  ja uudelleenkokoonpuristuvuusmoduulin  $C_r$  perusteella kaavojen 5.7 ja 5.8 avulla (Plaxis 2011a, s. 78).

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1+e)} \quad (5.7)$$

$$\kappa^* = \frac{2C_r}{2,3(1+e)} \quad (5.8)$$



Kuva 15 Esimerkki Cam Clay -mallin parametrien määrittämisestä

Soft Soil Creep -malli on SS-malliin perustuva materiaalimalli, joka ottaa edellä mainittujen parametrien lisäksi huomioon myös hiipuman. Hiipuman parametri  $\mu^*$  voidaan laskea sekundääripainumasta kaavalla 5.9 (Plaxis 2011a, s. 92).

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{(1+e_0) \ln 10} \quad (5.9)$$

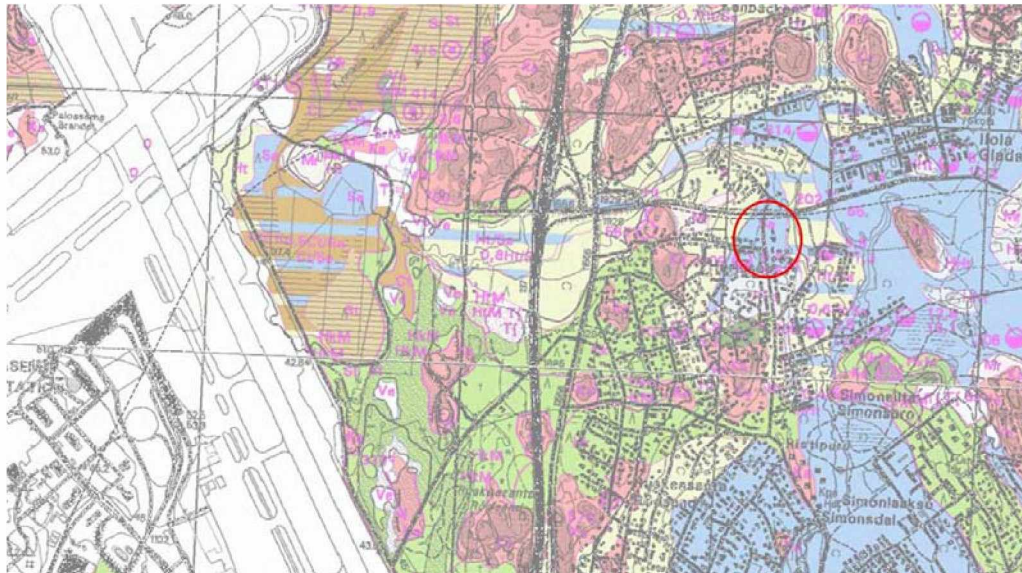
missä  $C_\alpha$  on sekundääripainuman kerroin  
 $e_0$  alkuhuokosluku



## 6 Laaksotien painumaseuranta-alue

### 6.1 Yleistä

Laskentaesimerkkikohde sijaitsee Vantaalla Ruskeasannan kaupunginosassa, Kehäradan itäisen suuaukon eteläpuolella (Kuva 16). Tarkastelualue sijaitsee rakennetulla alueella. Laaksotien varrella sijaitsevat rakennukset on rakennettu 1960–90 luvuilla. Maisematien varrella sijaitsevat rakennukset on rakennettu suurimmaksi osaksi 80-luvun puolessa välissä ja Laitakujan rakennukset 80-luvun loppupuolella. Tarkastelualueella pohjavedenpinnantasossa havaittiin huomattavia muutoksia Kehäradan itäisen suuaukon rakennustöiden alettua vuoden 2010 kesällä. Kohde sijaitsee pehmeiköllä, jossa pohjaveden alenemisen jälkeen mitattiin merkittäviä, laajalle alueelle ulottuvia painumia.



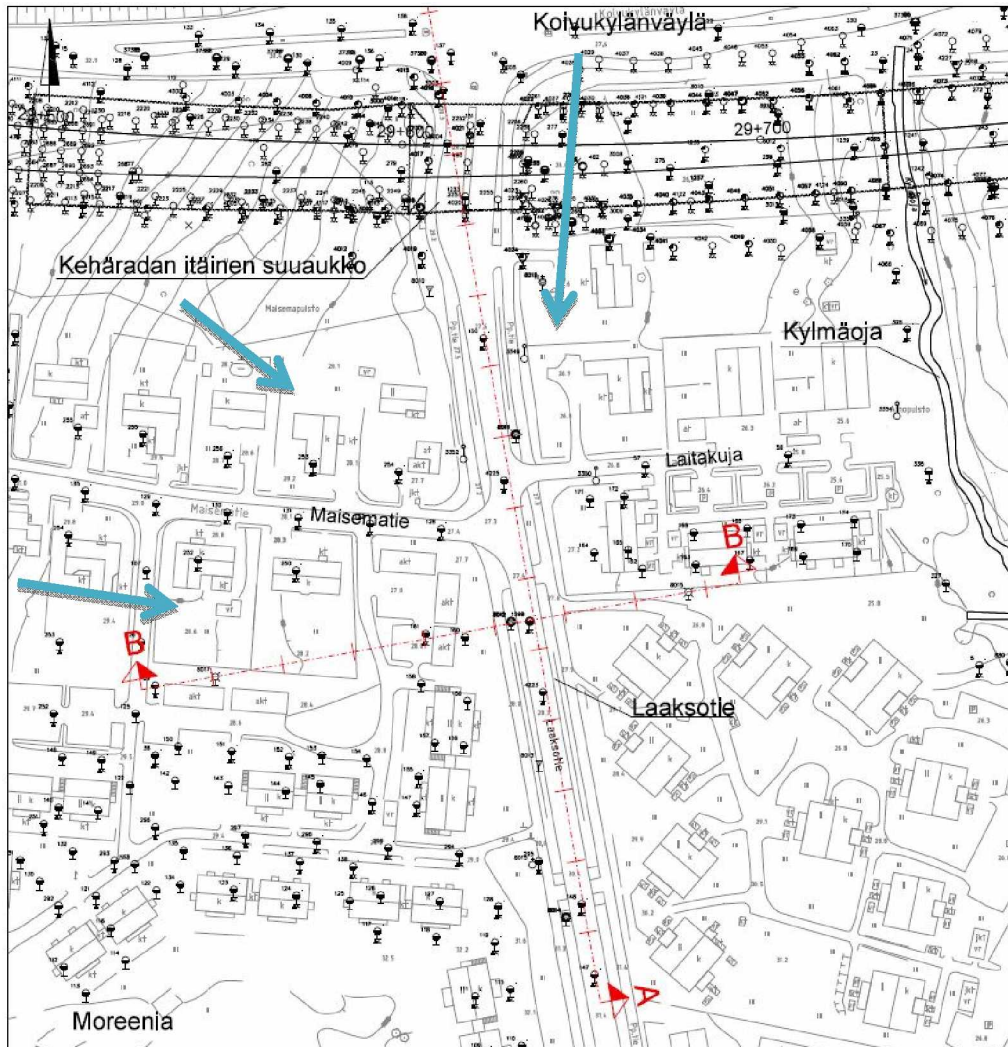
Kuva 16 Esimerkkikohteen sijainti on ympyröity kartalla. (GTK 2013.)

Tämän työn painumalaskelmien tarkastelualue kattaa vain osan havaituista painumista. Mallinnettavan alueen rajaus perustuu sekä painumahavaintoihin että alueella suoritettuihin pohjatutkimuksiin. Rajauksessa on pyritty keskittymään alueeseen, jolla pohjavedenpinnan muutokset ja näin ollen myös painumat ovat kaikkein merkittävimpiä. Painumatarkasteluun otettu alue on esitetty kuvassa 17.

Tarkastelualue rajautuu pohjoisessa Kehäradan ratalinjaan ja idässä ratalinjan alittavaan Kylmäojaan. Lounaassa tarkastelualueetta rajaa moreenimäki. Rajaus perustuu maaston muotojen perusteella tehtyihin tulkintoihin pohjaveden virtaussuunnista. Pohjaveden virtaussuunta on Kehäradasta etelään ja kohti Kylmäojaa. Pohjavesiolosuhteista johtuen itäisen suuaukon rakennustöiden vaikutukset pohjavedenpinnantasoon ovat olleet merkittävimpiä radan eteläpuolella ja Kylmäojan länsipuolella, jossa myös suurimmat siirtymät on havaittu. Lännessä alue rajautuu moreenimäkeen, jota lähestyttäessä savi ja silttikerrokset ohenevat.

Alueella on ennestään Kehärata-projektin yhteydessä suoritettu runsaasti pohjatutkimuksia. Lisäksi käytettävissä oli myös Vantaan kaupungin arkistokairauksia. Näi-

tä pohjatutkimuksia täydennettiin tätä työtä varten teetetyillä CPTU- ja siipikairauksilla, huokospainemittareilla sekä laboratoriokokeilla. Työssä tarkastellaan kahta leikkausta A ja B (Kuva 17). Leikkaus A kulkee Laaksotien suuntaisena, B leikkaa Laaksotietä kohtisuoraan.



Kuva 17 Mallinnettava alue rajautuu pohjoisessa Kehäradan itäiseen suuaukkoon, idässä Kylmäojaan ja lounaassa sijaitsevaan moreenimäkeen. Siniset nuolet osoittavat pohjaveden pohjasuhteiden perusteella arvioidut virtaussunnat.

## 6.2 Maaperä

### 6.2.1 Pohjasuhteet

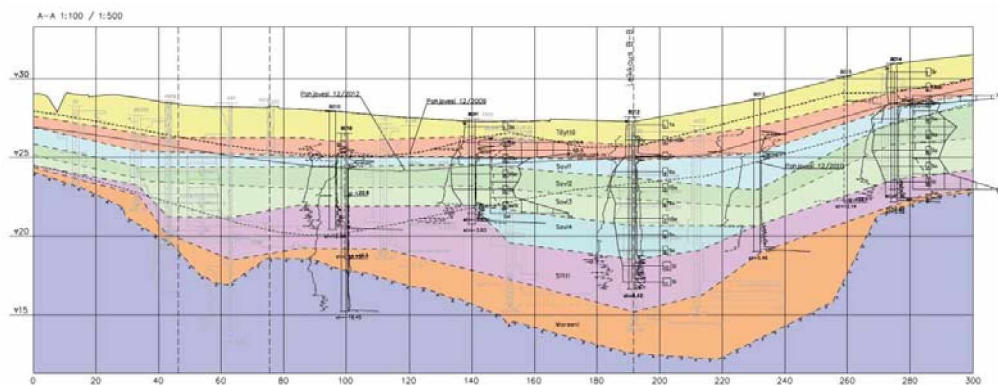
Kohde sijaitsee pääosin rakennetulla alueella, jossa on kiinteistöjen rakentamisen yhteydessä tehty myös muutoksia maanpinnan muotoihin. Näin ollen kuormitushistoria voi olla paikoitellen vaihteleva eikä se ole täysin tiedossa.

Laaksotien tasaus on Kehäradan ja Maisematien välillä tasolla +28,2...+27,3. Laaksotien tasaus nousee pituusleikkauksen A paaluvälillä 100..200 etelään päin mentäessä noin tasolle +31,4. Pituusleikkauksessa A tasaus pysyy tasaisena paalun 200 jälkeen. Laaksotien itäpuolella maanpinta laskee loivasti Kylmäojaa kohti, noin tasolle

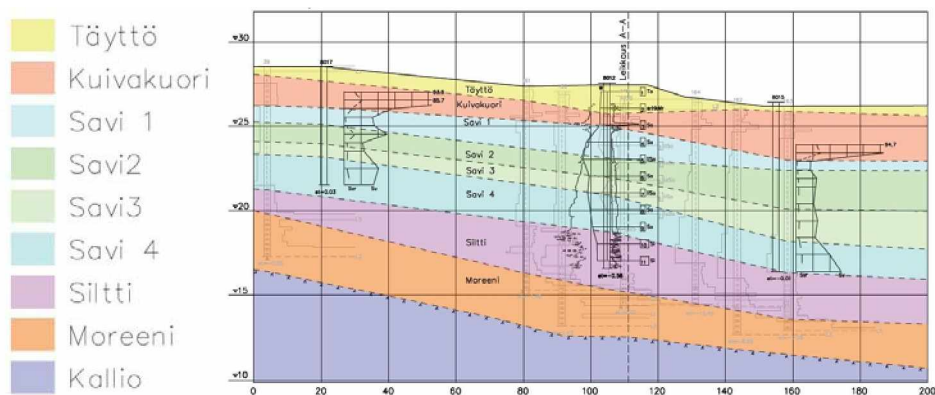


+23,8..+25. Vastaavasti Laaksotien länsipuolella maanpinta nousee tasaisesti. Maisematien tasaus on Laaksotien risteyksessä tasolla +27,3 ja Maisematien ja Ylänkötien risteyksessä, noin 225 metrin etäisyydellä Laaksotiestä, tasolla +35,0.

Laskentaleikkauksissa A ja B maanpinta sijaitsee tasolla +28,00...+29,00. Rakennekerrosten ja täyttömaan alapuolella maaperä on savea 4...10 metrin paksuudelta. Savikerroksen alapuolella sijaitsee 1...4 m paksuinen silttikerros, jonka alapuolella on tiiviimpi moreenikerros. Kallionpinta sijaitsee noin tasolla +12,00...+24,00. Lännessä savikerros ohenee kovan pohjan noustessa lähelle maanpintaa. Maalajirajat on esitetty leikkauksissa A-A ja B-B (Kuva 18 ja 19, tarkemmin liitteessä 2).



Kuva 18 Leikkaus A, maalajirajat.



Kuva 19 Leikkaus B, maalajirajat

Laaksotiellä kuivakuorisaven alapinta sijaitsee pohjatutkimusten mukaan noin 2–3,5 metrin syvyydellä. Kuivakuorikerrostuma on paksuimmillaan 0–60 metrin etäisyydellä Kehäradasta ja ohenee etelään päin siirryttäessä. Kuivakuorikerroksen alapuolisesta savesta voidaan erottaa 3-4 erillistä kerrostumaa. Savikerrokset ovat paksuimmillaan leikkauksen A paaluvälillä 60–150.

Laaksotien rakennekerrosten ja täyttömaan alapuolella on noin 0,5...1 m paksuinen savikerros, jonka leikkauslujuus vaihtelee välillä 17...23 kPa. Tämän alla sijaitsee 1...2 m paksuinen tiiviimpi savikerrostuma, jonka leikkauslujuus on 19...27 kPa. Tämän alapuolella sijaitsee jälleen heikompi 1...2 m paksuinen vyöhyke, jonka leikkauslujuus on 15...17 kPa. Tarkasteltavan poikkileikkauksen A-A puolivälissä, eli Laaksotiellä noin 100 m suuaukon eteläpuolella on havaittavissa vielä neljäs, jäykempi savikerros. Alin savikerros näytepisteen 8012 perusteella noin 2 m paksuinen ja sen suljettu leikkauslujuus kartiokokeen perusteella on noin 23 kPa.

Saven alapinta sijaitsee itäisen suuaukon ja Laaksotien risteyksessä noin 6 m syvyydellä maanpinnan tasosta. Savikko syvenee Laaksotiellä etelään päin siirryttäessä. Laaksotien kohdalla saven alapinta sijaitsee syvimmillään noin 10 m syvyydellä maanpinnasta, noin 110 m etäisyydellä suuaukosta. Tämän jälkeen savikerrokset ohenevat tasaisesti. Noin 200 m päässä suuaukosta saven alapinta sijaitsee noin 7..8 m maanpinnan alapuolella. Myös silttikerros on paksuimmillaan noin 100..120 m etäisyydellä itäisestä suuaukosta etelään.

Leikkauksen B kohdalta pohjatutkimuksia on huomattavasti niukemmin. Laaksotien länsipuolella voidaan siipikairauksen perusteella havaita leikkausta A vastaavat savikerrokset. Laaksotien itäpuolella kerrosrajat ovat siipikairauksen perusteella huomattavasti epäselvemmät.

Laaksotien länsipuolella sijaitsevassa pohjatutkimuspisteessä 8017 (liitteet 1 ja 3) ylimmän kerroksen redusoimaton leikkauslujuus on siipikairauksen perusteella noin 17 kPa, toisen noin 22 kPa, kolmannen noin 12 kPa ja alimman noin 19 kPa. Leikkauksen B-B länsiosassa pohjavedenpinnan tason vaihtelut ovat olleet vähäisempiä kuin Laaksotien linjalla.

Laaksotien itäpuolella, siipikairauspisteessä 8015 kuivakuorisaven alapuolella maaperä on savea noin 6,5 m paksuudelta. Tästä on erotettavissa kolme kerrosta. Kuivakuorikerroksen alla sijaitsee noin 1 m paksuinen kerros savea, jonka redusoimaton leikkauslujuus on noin 8 kPa. Tämän alapuolella on noin 4 metrin paksuinen kerros savea, jonka redusoimaton leikkauslujuus on noin 12 kPa. Alin savikerros on noin 1,5 metrin paksuinen ja sen redusoimaton leikkauslujuus on noin 23 kPa.

### **6.2.2 Kairausten ja laboratorikokeiden tulokset**

Mallinnettavalla alueella on suoritettu runsaasti pohjatutkimuksia, pääasiassa paino- ja porakonekairauksia, joita on täydennetty heijari-, puristinheijari-, CPTU- ja siipikairauksilla, sekä näytteenotoilla. Alueella suoritettut pohjatutkimukset on esitetty liitteessä 1.

Alueelta aikaisemmin tehtyjä laboratorikokeita täydennettiin kolmella häiriintymättömällä näytteenottopisteellä. Häiriintymättömistä näytteistä tehtiin luokitus-, ödometri- ja kolmiakσιαalikokeita. Suoritettut laboratoriotutkimukset on esitetty taulukossa 2. Liitteessä 4 on tarkempi kuvaus suoritetuista laboratorikokeista ja niiden tuloksista. Tau-lukossa 3 on esitetty laboratorikokeiden tulosten perusteella määritetyt laskentaparametrit.

Taulukko 2 Tämän työn yhteydessä suoritettut laboratoriokokeet.

| Piste | Putki nro. | syvyys    | Ödometrikoe | Ödometrikoe<br>veden-<br>läpäisevyydellä | 3-aksiaali<br>(suljettu) | 3-aksiaali<br>(avoin) | Kartiokoe | Rakeisuus | Kiintotiheys | Humuspitoisuus |
|-------|------------|-----------|-------------|--|--------------------------|-----------------------|-----------|-----------|--------------|----------------|
| 8011  | DE1        | 3,00-4,00 | X           |  | X                        | X                     | X         | X         | X            | X              |
|       | DE2        | 5,00-6,00 | X           |  |                          |                       | X         | X         | X            | X              |
| 8012  | 152        | 3.2-3.37  | X           |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 166        | 3.37-3.54 |             | X  |                          |                       | X         |           |              |                |
|       | 412        | 3.54-3.7  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 308        | 4.2-4.37  |             |  | X                        |                       | X         |           |              |                |
|       | 415        | 4.37-4.54 | X           |  | X                        |                       | X         | X         | X            | X              |
|       | 416        | 4.54-4.7  |             |  | X                        |                       |           |           |              |                |
|       | 315        | 5.2-5.37  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 361        | 5.37-5.54 | X           |  |                          |                       | X         |           |              |                |
|       | 411        | 5.54-5.7  | X           | X  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 180        | 6.2-6.37  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 376        | 6.37-6.54 | X           |  |                          |                       | X         | H         | H            | H              |
|       | 378        | 6.54-6.7  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 182        | 7.2-7.37  | X           |  | X                        |                       |           |           |              |                |
|       | 341        | 7.37-7.54 | X           |  | X                        |                       | X         | X         | X            | X              |
|       | 409        | 7.54-7.7  |             |  | X                        |                       |           |           |              |                |
|       | 317        | 8.2-8.37  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
| 348   | 8.37-8.54  | X         |             |  |                          | X                     |           |           |              |                |
| 410   | 8.54-8.7   |           |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
| 8014  | 3          | 3.2-3.37  |             |  | X                        |                       |           |           |              |                |
|       | 21         | 3.37-3.54 | X           |  | X                        |                       | X         | X         | X            | X              |
|       | 190        | 3.54-3.7  |             |  | X                        |                       |           | X         | X            | X              |
|       | 228        | 4.2-4.37  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 311        | 4.37-4.54 | X           |  |                          |                       | X         |           |              |                |
|       | 367        | 4.54-4.7  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 208        | 5.2-5.37  |             |  |                          | X                     |           |           |              |                |
|       | 434        | 5.37-5.54 | X           |  | X                        |                       | X         |           |              |                |
|       | 905        | 5.54-5.7  |             |  | X                        |                       |           |           |              |                |
|       | 1004       | 6.2-6.37  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 1012       | 6.37-6.54 | X           |  |                          |                       | X         |           |              |                |
|       | 6596       | 6.54-6.59 |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 702        | 7.2-7.37  |             |  |                          |                       |           |           |              |                |
|       | 800        | 7.37-7.54 | X           |  |                          |                       | X         | H         | H            | H              |
| 807   | 7.54-7.7   |           |             |  |                          |                       |           |           |              |                |

H = häiriintyneestä näytteestä

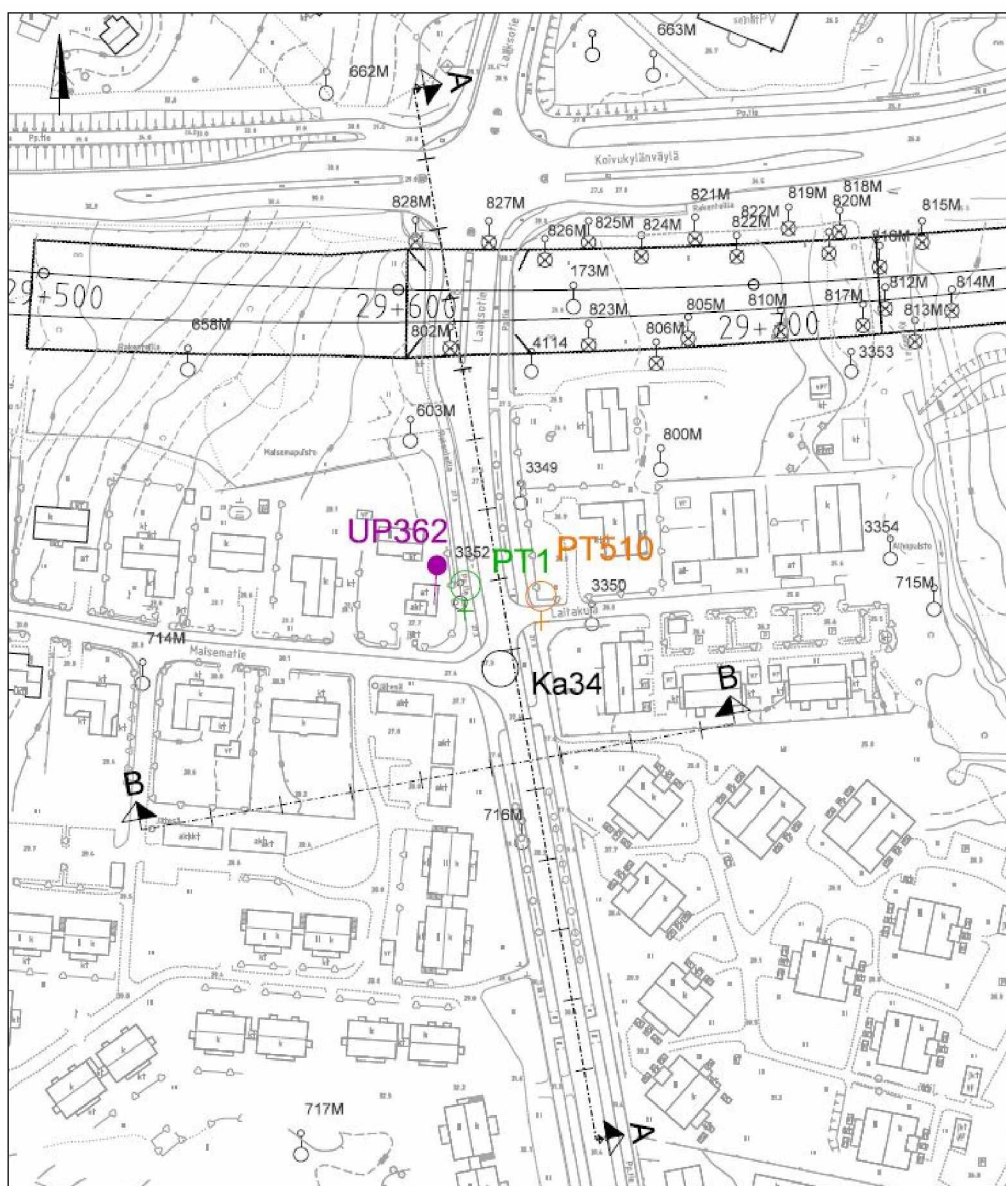
\* Kolme koetta

Taulukko 3 Laboratoriokokeiden tulosten perusteella määritetyt laskenta-parametreja.

| piste | kerros   | dometrikoe<br>(k=vedenläpäisevyyskoe) | m                  | syvyys       | V                    | PP        | OCR         | m1          | B1           | m2           | B2           | CV OC           | CV NC           | Cq, max     | cc do      | W         | $\lambda$     | k             | $\lambda^*$   | k*            | $\mu^*$ | Cc          | Cr          | e0          | m1 (laskennallinen) | m2 (laskennallinen) | k (Taylor)      | Bk (Taylor)  | k (vedenläp.koe) | Bk (vedenläp.koe) |
|-------|----------|---------------------------------------|--------------------|--------------|----------------------|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|-------------|-------------|-------------|---------------------|---------------------|-----------------|--------------|------------------|-------------------|
|       |          |                                       |                    |              | kN<br>m <sup>3</sup> | kPa       |             |             |              |              |              | $\frac{m^2}{a}$ | $\frac{m^2}{a}$ | %           | kPa        | %         |               |               |               |               |         |             |             |             |                     |                     | $\frac{m}{s}$   |              | $\frac{m}{s}$    |                   |
| 8011  | 2        | 6088                                  | 3,84-3,87          | 14,23        | 14,23                | 25        | 1,78        | 4,72        | -1,07        | 75,47        | 0,965        | 8,32            | 0,44            | 0,08        | 57         | 104       | 0,6265        | 0,0377        | 0,1940        | 0,0117        | 0,0112  | 1,44        | 0,09        | 2,23        | 5,16                | 85,39               | 8E-10           | 3,89         | -                | -                 |
|       | si       | 6116                                  | silttiä, ei painu! |              |                      |           |             |             |              |              |              |                 |                 | <b>0,09</b> |            |           |               |               |               |               |         |             |             |             |                     |                     |                 |              |                  |                   |
| 8012  | 1        | 6101                                  | 3,20-3,23          | 14,89        | 14,89                | 9         | 0,88        | 5,81        | -0,165       | 64,03        | 0,68         | 2,19            | 0,25            | 0,10        | 46         | 98,7      | 0,5561        | 0,0470        | 0,1557        | 0,0132        | 0,0122  | 1,28        | 0,11        | 2,572       | 6,42                | 76,07               | 5,31E-10        | 3,92         | -                | -                 |
|       | 1        | 6108H                                 | 3,43-3,46          | 15,72        | 15,72                | 62        | 2,63        | 2,35        | -1,12        | 97,75        | 0,505        | 3,82            | 0,69            | 0,06        | 100        | 76,7      | 0,703         | 0,0306        | 0,2328        | 0,0101        | 0,0088  | 1,62        | 0,07        | 2,02        | 4,30                | 99,23               | 5,34E-09        | 13,96        | 6,0E-10          | 2,03              |
|       | 1        | 6109KV                                | 3,48-3,51          | 15,27        | 15,27                | 13        | 1,33        | 5,33        | -0,4         | 56,73        | 0,33         | 2,8             | 0,23            | 0,60        | 52         | 87,3      | 0,6457        | 0,0538        | 0,1921        | 0,0160        | 0,0778  | 1,49        | 0,12        | 2,362       | 5,21                | 62,36               | 1,01E-10        | 3,78         | 6,7E-10          | 2,77              |
|       | 2        | 6091                                  | 4,40-4,43          | 15,86        | 15,86                | 19        | 1,42        | 6,28        | -0,21        | 29,16        | 2,02         | 2,79            | 0,62            | 0,07        | 64         | 76,1      | 0,458         | 0,0446        | 0,1532        | 0,0149        | 0,0102  | 1,05        | 0,10        | 1,99        | 6,53                | 66,77               | 4,1E-10         | 3,22         | -                | -                 |
|       | 2        | 6104                                  | 5,40-5,43          | 15,2         | 15,2                 | -2        | 0,96        | 4,53        | -0,84        | 66,43        | 0,295        | 2,37            | 0,16            | 0,05        | 50         | 104       | 1,1502        | 0,0510        | 0,3606        | 0,0160        | 0,0065  | 2,65        | 0,12        | 2,19        | 2,77                | 62,71               | 4,30E-10        | 2,77         | -                | -                 |
|       | 2        | 6121                                  | 5,57-5,60          | 16,52        | 16,52                | 9         | 1,17        | 5,48        | -0,85        | 78,99        | 0,775        | 7,01            | 0,51            | 0,04        | 62         | 56,3      | 0,415         | 0,0250        | 0,1626        | 0,0098        | 0,0063  | 0,96        | 0,06        | 1,553       | 6,15                | 101,2               | 8,04E-10        | 4,9          | -                | -                 |
|       | 2        | 6119KV                                | 5,60-5,63          | 16,24        | 16,24                | -4        | 0,92        | 7,08        | -0,42        | -            | -            | 5,31            | 0,51            | 0,03        | 49         | 58,6      | 0,39          | 0,0295        | 0,1495        | 0,0113        | 0,0057  | 0,90        | 0,07        | 1,608       | 6,69                | 88,21               | 6,12E-10        | 3,87         | 1,2E-06          | 12,1              |
|       | 2        | 6120KH                                | 5,63-5,66          | 16,24        | 16,24                | -         | -           | 6,92        | -0,33        | -            | -            | 4,92            | 0,45            | 0,04        | 42         | 54,3      | 0,4226        | 0,0305        | 0,1549        | 0,0112        | 0,0068  | 0,97        | 0,07        | 1,729       | 6,46                | 89,67               | 4,93E-10        | 3,45         | 1,3E-09          | 3,09              |
|       | 2        | 6117                                  | 6,37-6,40          | 15,99        | 15,99                | 5         | 1,08        | 4,81        | -0,84        | 151,1        | 1,03         | 3,68            | 0,28            | 0,07        | 64         | 69,4      | 0,6001        | 0,0242        | 0,2092        | 0,0084        | 0,0101  | 1,38        | 0,06        | 1,869       | 4,78                | 117,8               | 5,04E-10        | 3,69         | -                | -                 |
|       | 3        | 6122                                  | 7,34-7,37          | 15,06        | 15,06                | 18        | 1,28        | 4,41        | -0,565       | 52,25        | 0,655        | 7,89            | 0,58            | 0,06        | 82         | 80,8      | 0,6312        | 0,0553        | 0,1942        | 0,0170        | 0,0076  | 1,45        | 0,13        | 2,25        | 5,15                | 58,86               | 6,05E-10        | 3,73         | -                | -                 |
|       | 3        | 6099                                  | 7,40-7,43          | 16,1         | 16,1                 | 34        | 1,52        | 2,23        | -2,24        | 39,88        | 1,015        | 3,25            | 0,31            | 0,09        | 99         | 66,8      | 0,6486        | 0,0406        | 0,2312        | 0,0145        | 0,0132  | 1,49        | 0,09        | 1,805       | 4,32                | 69,37               | 6,51E-10        | 3,68         | -                | -                 |
|       | <b>3</b> | <b>6092</b>                           | <b>8,40-8,43</b>   | <b>17,42</b> | <b>17,42</b>         | <b>83</b> | <b>2,15</b> | <b>2,31</b> | <b>-1,51</b> | <b>190,4</b> | <b>2,775</b> | <b>13,7</b>     | <b>6,19</b>     | <b>??</b>   | <b>155</b> | <b>46</b> | <b>0,1852</b> | <b>0,0108</b> | <b>0,0838</b> | <b>0,0049</b> | -       | <b>0,43</b> | <b>0,03</b> | <b>1,21</b> | <b>11,93</b>        | <b>203,3</b>        | <b>3,92E-09</b> | <b>15,23</b> | -                | -                 |
| 8014  | 1        | 6095                                  | 3,40-3,43          | 14,5         | 14,5                 | 14        | 1,38        | 5,33        | -0,705       | 97,48        | 1,66         | 5,78            | 0,13            | 0,21        | 50         | 104       | 0,918         | 0,0579        | 0,2408        | 0,0152        | 0,0234  | 2,11        | 0,13        | 2,812       | 4,15                | 65,92               | 5,35E-10        | 3,33         | -                | -                 |
|       | 2        | 6105                                  | 4,40-4,43          | 14,94        | 14,94                | 57        | 2,36        | 1,69        | -1,74        | 127,2        | 1,895        | 6,1             | 0,37            | 0,22        | 99         | 99        | 1,101         | 0,0361        | 0,3008        | 0,0099        | 0,0255  | 2,53        | 0,08        | 2,66        | 3,32                | 101,4               | 4,49E-10        | 3,06         | -                | -                 |
|       | 2        | 6096                                  | 5,40-5,43          | 14,78        | 14,78                | 41        | 1,89        | 3,59        | -0,805       | 48,56        | 2,995        | 6,01            | 0,8             | 0,07        | 87         | 83,5      | 0,645         | 0,0472        | 0,2019        | 0,0148        | 0,0101  | 1,48        | 0,11        | 2,194       | 4,95                | 67,4                | 6,24E-10        | 3,62         | -                | -                 |
|       | 2        | 6118                                  | 6,37-6,40          | 16,33        | 16,33                | 5         | 1,09        | 6,38        | -0,44        | 97,63        | 0,65         | 5,36            | 1,34            | 0,05        | 58         | 67        | 0,4339        | 0,03          | 0,1564        | 0,0108        | 0,0080  | 1,00        | 0,07        | 1,774       | 6,39                | 92,47               | 1,01E-09        | 3,56         | -                | -                 |
|       | si       | 6100                                  | 7,37-7,40          | 16,3         | 16,3                 | -         | -           | 2,63        | -1,66        | 70,78        | 2,89         | 7,19            | 0,58            | 0,04        | 99         | 63,6      | 0,522         | 0,0367        | 0,1961        | 0,0138        | 0,0070  | 1,20        | 0,08        | 1,662       | 5,10                | 72,89               | 2,40E-09        | 8,6          | -                | -                 |

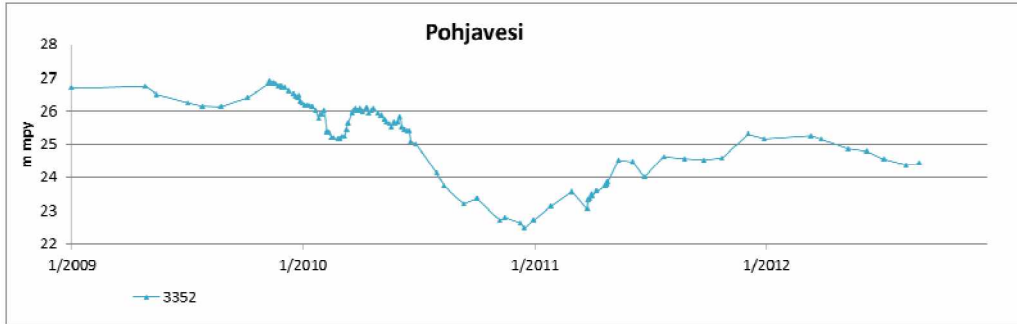
## 6.3 Pohjavesi

Pohjavedenpinnantaso on tarkkailtu Kehäradan itäisen suuaukon suunnittelun ja rakentamisen aikana säännöllisesti. Havaintojen perusteella pohjavedenpinnantason on todettu laskeneen rakentamisen edetessä vuosien 2010 ja 2011 välisenä aikana. Alhaisimmillaan pohjaveden taso on ollut joulukuussa 2010, jonka jälkeen pohjavedenpinta on palautunut lähemmäs alkuperäistä tasoaan (Kuva 20 ja 21). Joulukuussa 2012 pohjavedenpinnantaso sijaitsi suurimpien painumien alueella, Laaksotien ja Laitakujan risteyksessä, noin 1,5–2 metriä pohjaveden pinnan alkuperäisen tason alapuolella. Alhaisimmillaan pohjavesi on rakentamisen aikana käynyt noin 4–5 metriä rakentamista edeltäneen tason alapuolella.



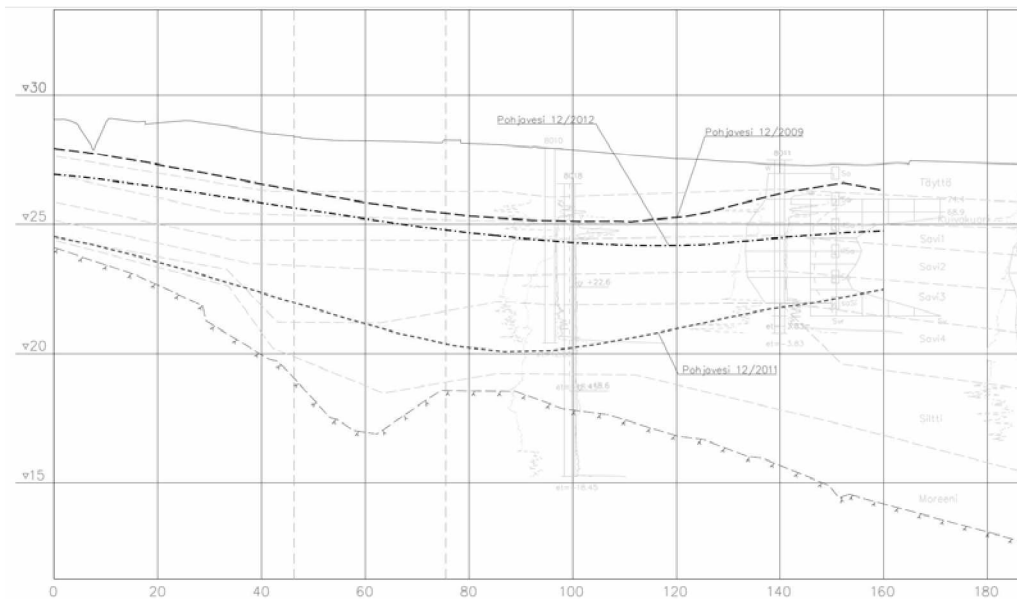
Kuva 20 Kehäradan itäinen suuaukko: Pohjaveden havaintopisteet ja painuma-seurantapisteet PT1, UP362, Ka34 ja PT510.





Kuva 21 Kehäradan itäinen suuaukko: pohjavesihavainnot pisteestä 3352

Painumien mallinnuksessa on käytetty Pöyry Finland Oy:n tuottamia pohjavesihavaintojen perusteella iteroituja pohjavesimalleja. Laskelmissa pohjaveden nollatasona on käytetty joulukuun 2009 pohjavesitilannetta, johon vuosien 2010 ja 2012 joulukuun tilanteita on verrattu. Kuvassa 22 on esitetty pintamallien mukaiset pohjavedenpinnantasot vuosien 2009, 2010 ja 2012 joulukuussa. Alueen pohjavesihavaintojen perusteella tehdyt pohjavesimallin on esitetty liitteessä 6. Kuten kuvasta 22 voidaan havaita, ulottuvat pohjaveden pintamallit noin leikkauksen A paalulle 160. Paaluille 160–300 pohjavedenpinnantasot on arvioitu yksittäisten pohjavedenhavaintopisteiden ja muiden pohjatutkimuspisteiden perusteella.



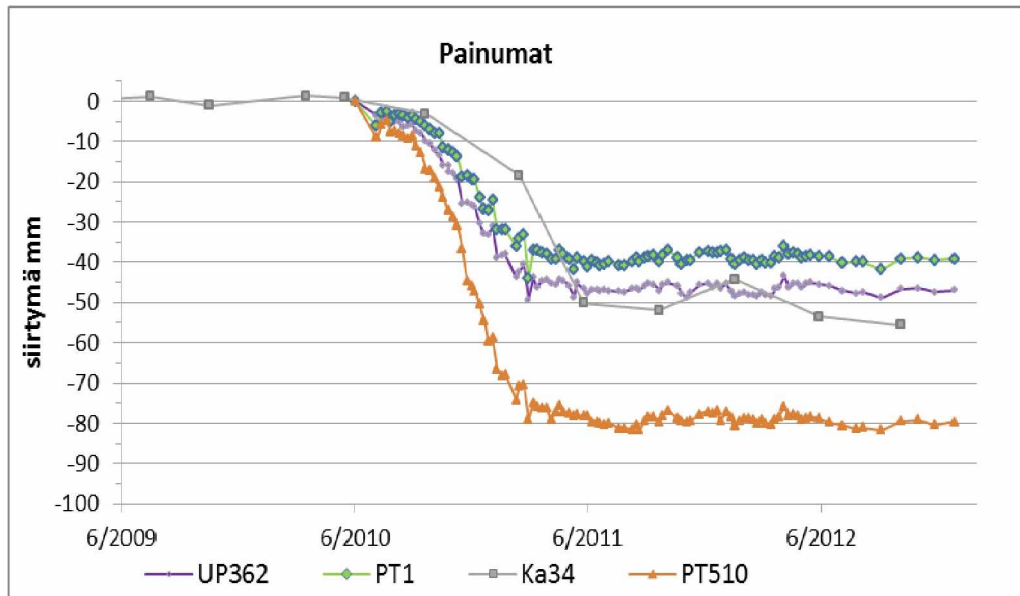
Kuva 22 Leikkaus A: Pohjavedenpintamallit ylin musta katkoviiva kuvaa pohjavedenpinnantasoa 12/2009, keskimäinen 12/2012 ja alin 12/2012.

## 6.4 Painumahavainnot

Kehäradan itäisen suuaukon vaikutusalueella painumia on seurattu painumalevyjen ja pulttien avulla sekä kaivonkansimittauksin. Alueen painumaseuranta aloitettiin ennen rakentamisen käynnistämistä syyskuussa 2008 painumaseurantapisteiden ja painumapulttien asennusmittauksilla. Painumien kasvun ja painuma-alueen laajenemisen myötä myös painumaseurantapisteitä lisättiin ja mittaustiheyttä kasvatettiin. Näiden uusien pisteiden osalta alkumittaukset suoritettiin toukokuussa 2010, jonka jälkeen mittauksia suoritettiin kuukausittain. Edellä mainitun painumaseurannan



ohella tehtiin alueella viikoittaisia painumamittauksia 16 painumalevyllä ja 21 painumaseurantapultilla. Viikoittainen painumaseuranta kattaa yhteensä 18 rakennusta ratalinjan eteläpuolella, sekä yhden rakennuksen ratalinjan pohjoispuolella. Kuvissa 20 ja 23 on esitetty Laaksotien ja Maisematien risteyksessä sijaitsevat painumahavaintopisteet sekä niissä tehtyjä painumahavainnointoja. Liitteessä 5 on esitetty koko alueelta tehdyt painumahavainnot.



Kuva 23 Kehäradan itäinen suuaukko: painumahavainnot pisteitä PT1, UP362 ja Ka34.

Painumamittausten tuloksissa on selvästi havaittavissa muutokset pohjaveden pinnan laskiessa. Siirtymien voidaan havaita leviävän pohjaveden alenemisen myötä koko seuranta-alueelle. Suurimmat painumat havaittiin kaivannon läheisyydessä sekä Laaksotiellä noin 60 metriä kaivannon eteläpuolella. Painuma-alue rajautuu idässä Kylmäojaan ja lännessä sekä osittain etelässäkin hiekka- ja moreenialueisiin. Toisaalta pohjaveden muutosten laajuuden voidaan olettaa pienenevän siirryttäessä kauemmas rakennuskohteesta.

## 7 Laskelmat

### 7.1 Käytetyt ohjelmat ja suoritettut laskelmat

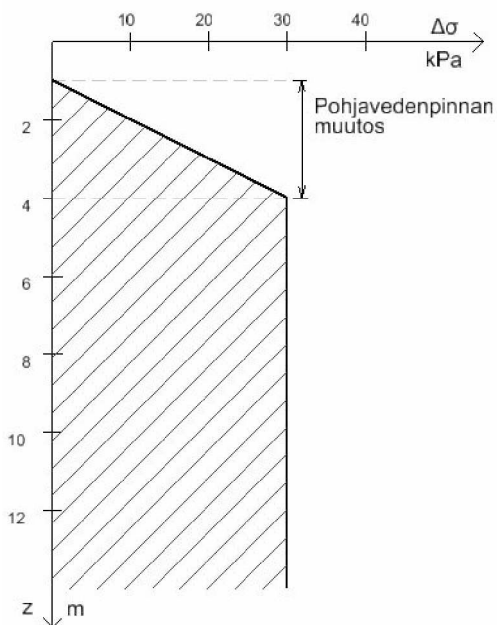
Laskelmissa on käytetty GeoCalc 2.4 ja Plaxis 2010 laskentaohjelmia siten, että alustavat laskelmat on suoritettu GeoCalc 2.4:llä, joista on edetty Plaxis 2010:llä suoritettuihin mallinnuksiin. Plaxiksella kaksiulotteinen mallinnus suoritettiin leikkaukselta A.

GeoCalc 2.4 on analyyttisiä laskentamenetelmiä hyödyntävä geotekninen laskentaohjelma (GeoCalc 2012). Plaxis 2010 on geotekninen mallinnusohjelma, joka perustuu elementtimenetelmän hyödyntämiseen (Plaxis 2011a). GeoCalcissa painumalaskelmat tehtiin sekä tangenti-moduulimenetelmällä, vesipitoisuusmenetelmällä ja jatkuvapuristeisen ödometrikokeen tuloksiin perustuvalla ruotsalaisella painumalaskentamenetelmällä. Plaxiksessa maalajien mallintamiseen käytettiin Mohr-Coulombin-, Soft Soil- ja lineaarisesti elastista materiaalimallia.

### 7.2 Analyttiset laskelmat

#### 7.2.1 Yleistä

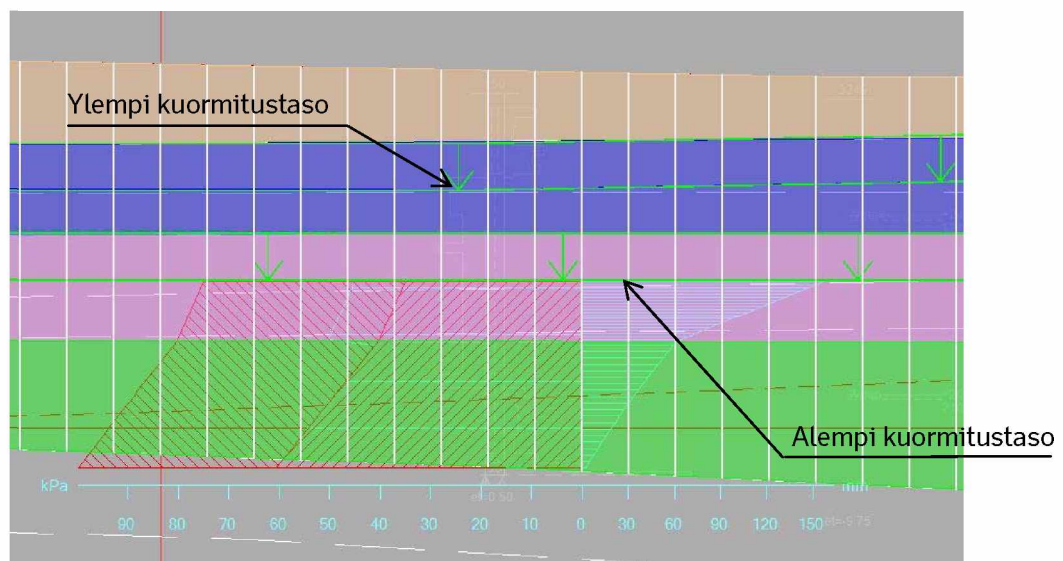
Analyttiset laskelmat suoritettiin Novapoint GeoCalc 2.4 -ohjelmalla. Painumalaskelmat tehtiin aluksi Janbun ja Helenelundin vesipitoisuusmenetelmällä. Lisäksi painumat laskettiin käsin tangenti-moduulimenetelmää käyttäen.



Kuva 24 Pohjavedenpinnan alenemisesta maakerroksille aiheutuva lisäjännitys.

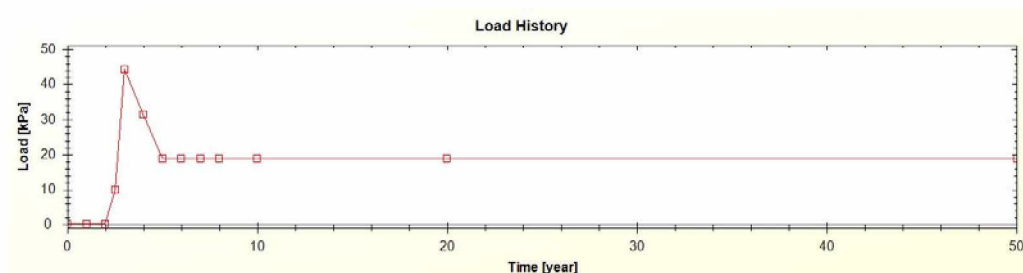
GeoCalc 2.4 ohjelmassa ei ole erillistä valintaa pohjaveden aleneman syöttämiselle. Kuten aikaisemmin on jo todettu, pohjaveden alenemasta aiheutuva kuorma on niin sanottu tilavuuskuorma, joka kasvaa syvyyden funktiona (kuva 24). Pohjaveden ale-

nemasta aiheutuvat jännityksenlisäys syötettiin kuitenkin ulkoisena, epätasaisesti jakautuneena, nauhakuormana. Tämä johtuu siitä, että GeoCalc käsittelee kaikkia kuormia nauhakuormina. Jos ohjelmaan syötetään pengerkuorma, jonka suuruus määräytyy penger materiaalin tilavuuspainon perusteella, laskee ohjelma kuorman kuitenkin penkereen alapintaan kohdistuvana nauhakuormana. Koska ohjelma laskee painumat vain alimman kuormitustason alapuoliselta osalta (kuva 25), ei kuormaa kannattanut jakaa eri syvyyksitasoille kohdistuviin osiin. Jotta ohjelma saatiin laskemaan painumat kaikilta tarkasteltavilta kerroksilta, mallinnettiin pohjavedenpinnan muutokset alkuperäisen pohjavedenpinnan tasolle kohdistuvan jakautuneen kuorman avulla. Tästä johtuen GeoCalcin laskentamallissa ylimpiin maakerroksiin kohdistunut kuorma oli huomattavasti todellista lisäkuormitusta suurempi.



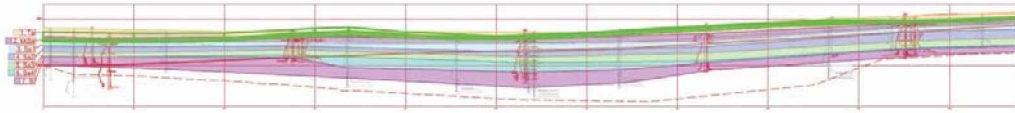
Kuva 25 GeoCalc 2.4 -ohjelma laskee savikerroksen painumat vain alimman kuormitustason alapuolelta.

GeoCalc 2.4 mahdollistaa kuorman lisäyksen ajan funktiona. Laskelmissa pohjavedenpinta pidettiin nollassa ensimmäisen kahden vuoden ajan lähtötilanteen selvittämiseksi. Laskelmissa kahden vuoden piste vastaa siis vuoden 2009 tilannetta. Kuorma mallinnettiin kasvamaan lineaarisesti kolmessa osassa siten, että ensimmäisen puolen vuoden aikana se kasvoi tasaisesti nollassa 10 kPa:n suuruuteen, seuraavan puolen vuoden aikana kuormaa kasvatettiin maksimitasolle, josta se laskettiin lineaarisesti lopulliselle tasolle (Kuva 26).



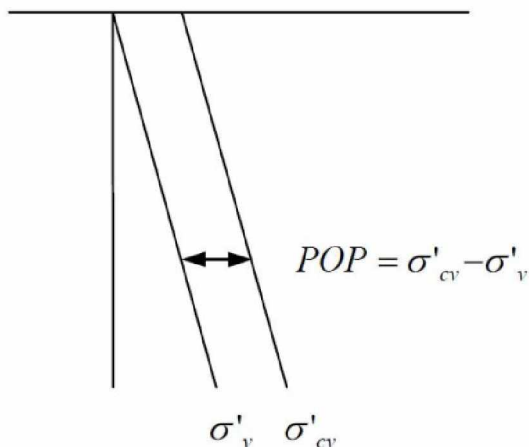
Kuva 26 Kuormitushistoria, paalu 65 leikkauksessa A.

Kuvassa 27 ja liitteessä 7 on esitetty GeoCalc laskelmissa käytetty geometria. Kuivakuoren alapuolinen savi jaettiin neljään kerrokseen kairausten ja laboratoriokoetulosten perusteella. Koska leikkaus on 300 metrin pituinen, jaettiin se laskelmia varten kolmeen osaan. Kun laskentaleikkaus jaettiin kolmeen osaan, voitiin parametrien määrittämisessä myös ottaa huomioon maaperän parametrien muutos leikkauksen pituussuunnassa.



Kuva 27 GeoCalc 2.4 ohjelmassa käytetty laskentaleikkauksen A geometria.

Taulukoihin 4-6 on koottu laskelmissa käytetyt tilavuuspainot  $\gamma$  ja  $\gamma'$ , konsolidaatiokerroimet  $c_v$  yli- ja normaalikonsolidoituneille osille, esikonsolidaatiojännitykset  $\sigma_c$  ja ylikonsolidaation POP (Pre-Overburden Pressure) arvot. Esikonsolidaatiojännitys annettiin kaikissa laskelmissa ylikonsolidaation POP avulla. POP arvo ilmaisee vallitsevan jännityksen ja esikonsolidaatiojännityksen eron kilopascaleina (Kuva 28). Ödometrikokeiden perusteella määritellyt ylikonsolidaation arvot on esitetty kuvassa 29.



Kuva 28 POP (Pre-Overburden Pressure) arvon määritelmä. (Länsivaara 2000, s. 19.)

Taulukko 4 Laskentaparametrit leikkaus A (1/3).

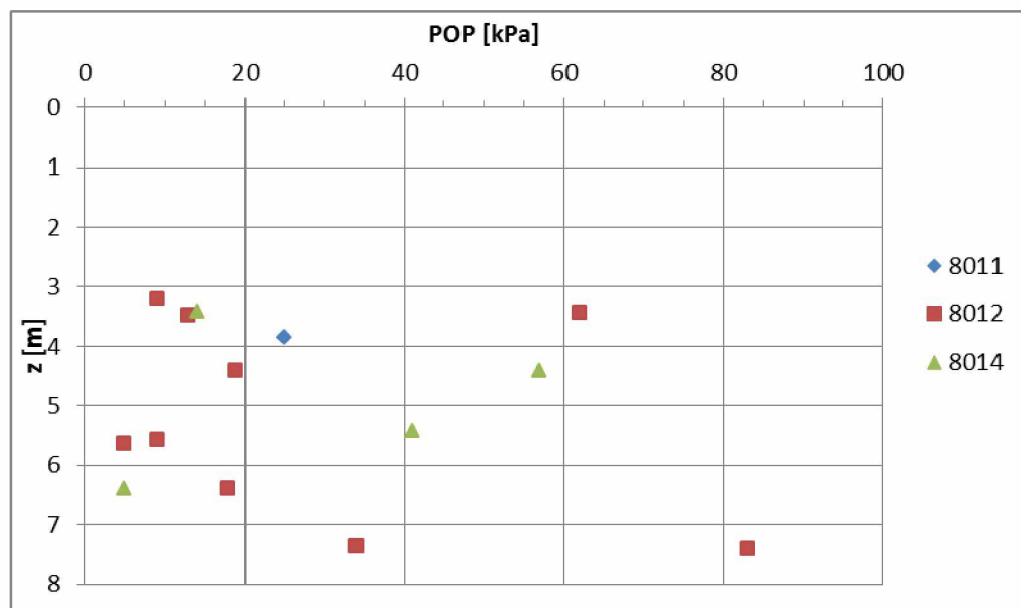
| Kerros     | $\gamma'$         | $\gamma$          | $c_v$ NC          | $c_v$ OC          | POP  |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|
|            | kN/m <sup>3</sup> | kN/m <sup>3</sup> | m <sup>2</sup> /a | m <sup>2</sup> /a | kPa  |
| Täyttö     | 10                | 20                | 50                |                   |      |
| Kuivakuori | 8                 | 18                | 50                |                   |      |
| Savi 1     | 5,72              | 15,72             | 0,37              | 2,59              | 14,0 |
| Savi 2     | 4,23              | 14,23             | 0,44              | 8,32              | 10,0 |
| Savi 3     | 7,55              | 17,55             | 0,317             | 4,35              | 4,0  |
| Savi 4     | 6,64              | 16,64             | 0,445             | 5,57              | 45,0 |
| Siltti     | 7,5               | 17,5              | 50                |                   |      |

Taulukko 5 Laskentaparametrit leikkaus A (2/3).

| Kerros     | $\gamma'$         | $\gamma$          | $c_v$ NC          | $c_v$ OC          | POP  |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|
|            | kN/m <sup>3</sup> | kN/m <sup>3</sup> | m <sup>2</sup> /a | m <sup>2</sup> /a | kPa  |
| Täyttö     | 10                | 20                | 50                |                   |      |
| Kuivakuori | 8                 | 18                | 50                |                   |      |
| Savi 1     | 5,72              | 15,72             | 0,37              | 2,59              | 14,0 |
| Savi 2     | 5,2               | 15,2              | 0,62              | 2,79              | -2,0 |
| Savi 3     | 7,55              | 17,55             | 0,317             | 4,35              | 4,0  |
| Savi 4     | 6,64              | 16,64             | 0,445             | 5,57              | 45,0 |
| Siltti     | 7,5               | 17,5              | 50                |                   |      |

Taulukko 6 Laskentaparametrit leikkaus A (3/3).

| Kerros     | $\gamma'$         | $\gamma$          | $c_v$ NC          | $c_v$ OC          | POP  |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|
|            | kN/m <sup>3</sup> | kN/m <sup>3</sup> | m <sup>2</sup> /a | m <sup>2</sup> /a | kPa  |
| Täyttö     | 10                | 20                | 50                |                   |      |
| Kuivakuori | 8                 | 18                | 50                |                   |      |
| Savi 1     | 4,7               | 14,7              | 0,13              | 5,78              | 14,0 |
| Savi 2     | 4,9               | 14,9              | 0,585             | 6,06              | 49,0 |
| Savi 3     | 6,67              | 16,67             | 1,34              | 5,36              | 5,0  |
| Savi 4     | 7                 | 17                | 0,58              | 7,19              | 45,0 |
| Siltti     | 7,5               | 17,5              | 50                |                   |      |



Kuva 29 Ödometrikokeiden perusteella määritellyt ylikonsolidaation (POP) arvot.

### 7.2.2 Vesipitoisuusmenetelmät

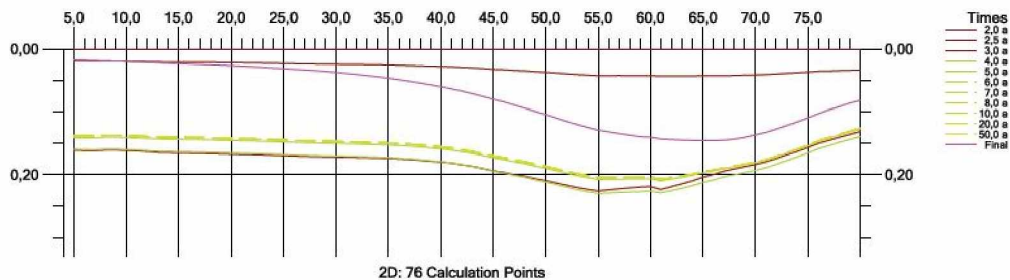
Janbun ja Helenelundin vesipitoisuusmenetelmissä maaperän kokoonpuristuvuusominaisuudet lasketaan maaperän vesipitoisuuden perusteella. Taulukkoon 7 on koottu laskelmissa käytetyt vesipitoisuudet kerroksittain.



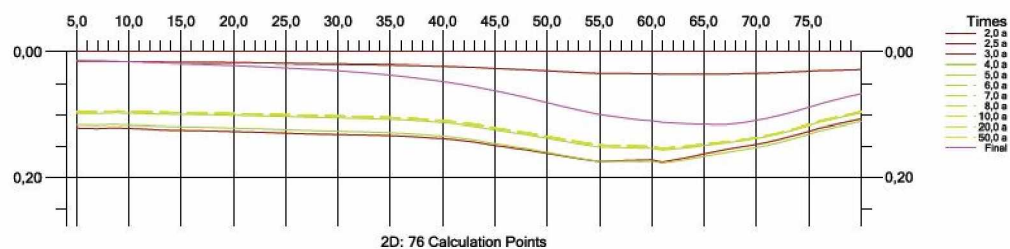
Taulukko 7 Vesipitoisuudet leikkaus A.

| Kerros     | w (1/3) | w (2/3) | w (3/3) |
|------------|---------|---------|---------|
|            | %       | %       | %       |
| Täyttö     | 22,00   | 17,50   | 22,00   |
| Kuivakuori | 27,00   | 20,60   | 17,00   |
| Savi 1     | 63,00   | 76,50   | 104,00  |
| Savi 2     | 104,0   | 105,0   | 86,10   |
| Savi 3     | 62,00   | 58,60   | 67,00   |
| Savi 4     | 28,00   | 74,40   | 57,00   |
| Siltti     | 26,00   | 29,00   | 28,00   |

Kuvissa 30 ja 31 on esitetty painumalaskennan tulokset leikkauksen A ensimmäisellä osalla Janbun ja Helenelundin vesipitoisuusmenetelmällä. Toisen ja kolmannen laskentaosan tulokset on esitetty liitteessä 7. Kuvaajista voidaan havaita molempien menetelmien antavan tulokseksi huomattavan suuria painumia koko laskenta-alueella jo 3 vuoden kohdalla, eli kuormituksen ollessa maksimitasolla. Laskelmien mukaan pohjaveden palautuessa myös painumat palautuvat huomattavasti. Todellisuudessa saven palautuminen on kuitenkin huomattavasti vähäisempää ja hitaampaa. Laskelmien tulosten suuret painumat ja suuri painumanopeus johtuvat pääosin kuormituksen kohdistumisesta vain yhteen tasoon. Kun kuorma kohdistetaan kokonaisuudessaan pohjavedenpinnan alkuperäiseen tasoon, on ylimpiin maakerrokseen kohdistuva lisäjännitys huomattavasti todellista jännitystilaa suurempi. Vaikka laskennan antamat painumien suuruudet ovatkin täysin epärealistisia sekä mittakaavan että painumanopeuden puolesta, vastaavat lopullisen painuman käyrät painumien sijainnin ja painumaerojen puolesta hyvin tehtyjä painumahavaintoja.



Kuva 30 Painumat Janbun vesipitoisuusmenetelmällä, leikkaus A (1/3).



Kuva 31 Painumat Helenelundin vesipitoisuusmenetelmällä, leikkaus A (1/3).

### 7.2.3 Tangenttimoduulimenetelmä

Ödometrikokeiden jännitys-kokoonpuristumakuvaajien käyränsovitusten perusteella määritettiin materiaalien tangenttimoduulimenetelmässä käytetyt parametrit moduuliluku  $m$  ja jännityseksponentti  $\beta$ . Laskentaparametrien määrittäminen laboratorio-kokeiden tuloksista on käsitelty tarkemmin liitteessä 4. Taulukoihin 8–10 on koottu tangenttimoduulimenetelmällä käytetyt laskentaparametrit.

Taulukko 8 Laskentaparametrit tangenttimoduuli leikkaus A (1/3).

| Kerros     | $m_1$ | $\beta_1$ | $m_2$  | $\beta_2$ | $\sigma_c$ |
|------------|-------|-----------|--------|-----------|------------|
|            | -     | -         | -      | -         | kPa        |
| Täyttö     | 100,0 | 0,00      |        |           |            |
| Kuivakuori | 100,0 | 0,00      |        |           |            |
| Savi 1     | 5,81  | -0,17     | 64,03  | 0,68      | 49,50      |
| Savi 2     | 4,72  | -1,07     | 75,47  | 0,97      | 71,33      |
| Savi 3     | 4,81  | -0,84     | 151,13 | 1,03      | 58,33      |
| Savi 4     | 2,31  | -1,51     | 190,35 | 2,78      | 98,61      |
| Siltti     | 100,0 | 0,00      |        |           |            |

Taulukko 9 Laskentaparametrit tangenttimoduuli leikkaus A (2/3).

| Kerros     | $m_1$ | $\beta_1$ | $m_2$  | $\beta_2$ | $\sigma_c$ |
|------------|-------|-----------|--------|-----------|------------|
|            | -     | -         | -      | -         | kPa        |
| Täyttö     | 100,0 | 0,00      |        |           |            |
| Kuivakuori | 100,0 | 0,00      |        |           |            |
| Savi 1     | 5,81  | -0,17     | 64,03  | 0,68      | 49,50      |
| Savi 2     | 4,53  | -0,84     | 66,43  | 0,30      | 50,00      |
| Savi 3     | 4,81  | -0,84     | 151,13 | 1,03      | 58,33      |
| Savi 4     | 2,31  | -1,51     | 190,35 | 2,78      | 98,61      |
| Siltti     | 100,0 | 0,00      |        |           |            |

Taulukko 10 Laskentaparametrit tangenttimoduuli leikkaus A (3/3).

| Kerros     | $m_1$ | $\beta_1$ | $m_2$ | $\beta_2$ | $\sigma_c$ |
|------------|-------|-----------|-------|-----------|------------|
|            | -     | -         | -     | -         | kPa        |
| Täyttö     | 100,0 | 0,00      |       |           |            |
| Kuivakuori | 100,0 | 0,00      |       |           |            |
| Savi 1     | 5,33  | -0,71     | 97,48 | 1,66      | 50,00      |
| Savi 2     | 3,59  | -0,81     | 48,56 | 3,00      | 87,00      |
| Savi 3     | 6,38  | -0,44     | 97,63 | 0,65      | 58,00      |
| Savi 4     | 2,63  | -1,66     | 70,78 | 2,89      | 99,00      |
| Siltti     | 100,0 | 0,00      |       |           |            |

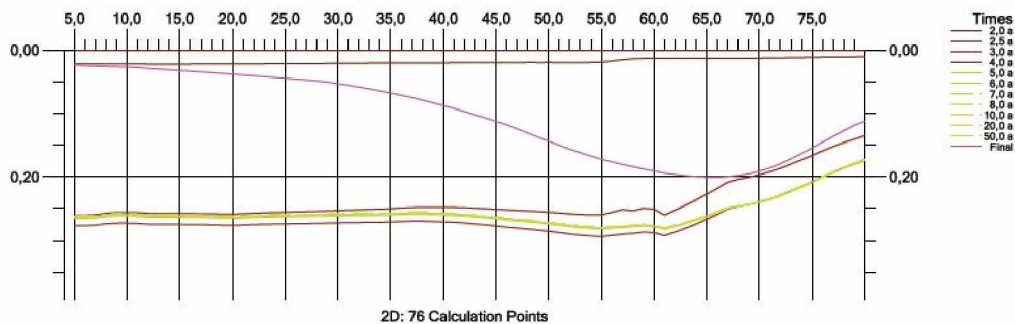
Jännityseksponentille saatiin käyrän sovitusten perusteella hyvin alhaisia lukemia ( $\beta = -0,5 \dots -2,5$ ). Koska näin suurten negatiivisten arvojen käyttäminen jännityseksponentille ei ole suositeltavaa (luku 4.1.2), korjattiin laskelmia antamalla jännityseksponentille arvo nolla. Jännityseksponentin ollessa nolla voitiin moduulilukujen arvot laskea kaavojen 4.12 ja 4.13 avulla.

Taulukkoon 11 on koottu jännityseksponenttia  $\beta = 0$  vastaavat moduulilukujen  $m_1$  ja  $m_2$  arvot.

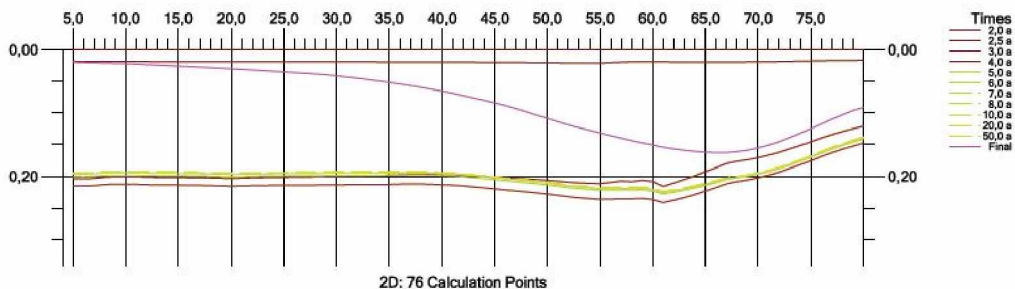
Taulukko 11 Tangenttimoduulin arvot alueittain, kun  $\beta=0$ .

| Kerros | m1 (1/3) | m2 (1/3) | m1 (2/3) | m2 (2/3) | m1 (3/3) | m2 (3/3) |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Savi 1 | 6,05     | 68,40    | 6,05     | 68,40    | 4,15     | 65,92    |
| Savi 2 | 5,16     | 85,39    | 2,77     | 62,71    | 4,14     | 84,41    |
| Savi 3 | 5,47     | 109,54   | 5,47     | 190,54   | 6,39     | 92,47    |
| Savi 4 | 4,74     | 64,11    | 4,74     | 64,11    | 5,10     | 72,89    |

Kuvissa 32 ja 33 on esitetty GeoCalcilla tehtyjen painumalaskelmien tulokset (leikkauksen A ensimmäisellä osalla) tangenttimoduulimenetelmällä sekä alkuperäisillä moduuliluvuilla ja jännityseksponeenteilla laskettuna sekä jännityseksponeentin  $\beta$  arvolla nolla. Täydelliset painumalaskennan tulokset on esitetty liitteessä 7. Kuvaajista voidaan havaita, että tangenttimoduulimenetelmällä (kun  $\beta=0$ ) saadut laskennalliset painumat (kuva 33) ovat samaa luokkaa kuin Janbun vesipitoisuusmenetelmällä saadut (kuva 30). Edellisessä kappaleessa todetut ongelmat kuorma mallinnuksessa ovat havaittavissa myös tangenttimoduulimenetelmällä saaduista painumalaskennan tuloksista. Kuvista 32 ja 33 voidaan todeta, että käyttämällä jännityseksponeentille arvoa nolla, saadaan painumalaskelmien tuloksista hieman realistisempia. Laskennalliset painumat ja painumanopeus ovat kuitenkin edelleen moninkertaiset havaittuihin painumiin nähden.



Kuva 32 Painumat tangenttimoduulimenetelmällä, leikkaus A (1/3).

Kuva 33 Painumat tangenttimoduulimenetelmällä kun  $\beta=0$ , leikkaus A (1/3).

#### 7.2.4 Käsinelaskenta tangenttimoduulimenetelmällä

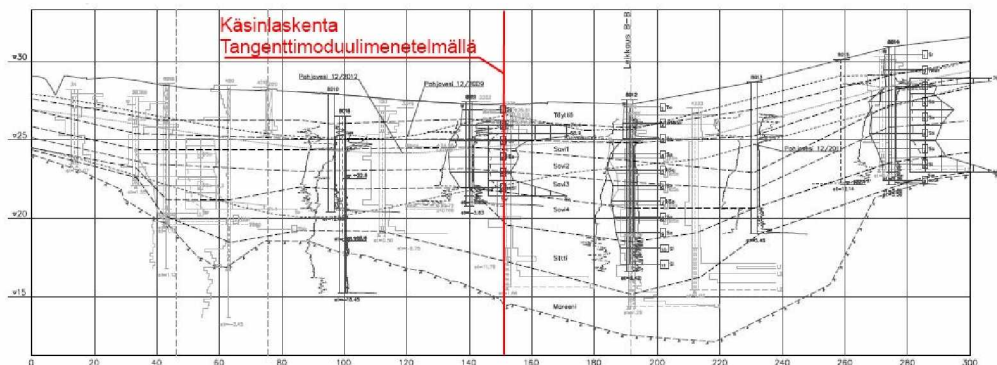
Koska kuorma voitiin mallintaa GeoCalc 2.4 ohjelmassa vain yhteen tasoon kohdistuvana jakautuneena kuormana, laskettiin painumat myös käsin tangenttimoduulimenetelmää käyttäen. Käsinelaskennat suoritettiin Excel-laskentana vain yhdestä pisteestä, leikkauksen A paalulta 153 (Kuva 34). Tämä kohta valittiin käsinelaskenta siksi, että siinä savikon paksuus oli suurin suhteessa pohjavedenpinnan alenemaan. Tämän



perusteella voidaan siis olettaa, että myös suurimmat painumat tapahtuvat noin paullulla 153. Myös GeoCalc laskelmat ja painumahavainnot tukevat tätä olettamusta.

Käsinlaskennassa käytettiin samaa kerrosjakoa kuin Plaxis 2011:llä tehdyssä mallissa. Käsinlaskentaa varten kerrokset jouduttiin kuitenkin jakamaan useaan osaan laskentatuloksen tarkkuuden parantamiseksi. Taulukossa 12 on esitetty käsinlaskennassa käytetty kerrosjako.

Käsinlaskennassa muodonmuutokset laskettiin erikseen normaalikonsolidoituneelle osalle kaavalla 4.6 ja ylikonsolidoituneelle osalla kaavalla 4.7.



Kuva 34 Käsinlaskentapiste Laaksotiellä.

Käsinlaskennassa pohjavedenpinnan oletettiin laskevan ensin vuoden 2009 tasosta vuoden 2010 tasolle. Kahden vuoden kuluttua pohjavedenpinnan oletettiin palautuvan vuoden 2012 tasoa vastaavalle tasolle. Laskennassa kuormitustilanteen oletettiin tapahtuvan nopeasti. Alkutilanteessa pohjavedenpinta sijaitsi laskentapisteessä 0,6 metrin syvyydellä maanpinnasta. Vuonna 2010 pohjavedenpinta sijaitsi noin 5,2 metrin ja vuonna 2012 noin 3,4 metrin syvyydellä maanpinnantasosta.

Taulukko 12 Kerrosjako.

| kerros  | kerrospaksuus | syvyys |
|---------|---------------|--------|
|         | $\Delta h$    | z      |
|         | m             | m      |
| Kusa/ta | 0,6           | 0,3    |
| Kusa2   | 1,7           | 1,45   |
| Sa1     | 0,7           | 2,65   |
| Sa1/2   | 0,7           | 3,35   |
| Sa2/2   | 0,7           | 4,05   |
| Sa3/2   | 0,7           | 4,75   |
| Sa4/2   | 0,7           | 5,45   |
| Sa1/3   | 0,95          | 6,275  |
| Sa2/3   | 0,95          | 7,225  |
| Si      | 2,4           | 8,9    |

Painumalaskennassa laskettiin ensin molempia kuormitustapauksia vastaavat pystysuuntaiset muodonmuutokset  $\epsilon_p$  jokaisen laskentakerroksen normaali- ja ylikonsolidoituneille osille (liite 8). Tämän jälkeen laskettiin suurempaa lisäkuormaa vastaa-

vat aikatekijä  $T_v$  ja konsolidaatioaste  $U_p$  kullekin laskentakerrokselle Janbun (1970) konsolidaatioteorian mukaan (kaava 4.21 ja taulukko 1). Konsolidaatioasteen avulla saatiin laskettua kunkin laskentakerroksen painuma sekä kerrosten kokonaispainuma kullekin ajan hetkelle.

Kuormituksen oletettiin laskevan kahden vuoden jälkeen lopulliselle, vuoden 2012 pohjavedenpinnantasoa vastaavalle tasolle. Pohjavedenpinnan osittaisen palautumisen jälkeiset painumat laskettiin ensimmäisen kuormitustason kahden vuoden painuma-aikaa vastaavien painumien perusteella. Lähtötietona oli ensimmäistä kuormitustasoa vastaavat painumat  $S(2 \text{ vuotta})$  ajan hetkellä  $t = 2 \text{ vuotta}$  (kaava 7.4). Kun tiedettiin myös kerroksien lopulliset painumat toisella kuormitustasolla  $S_{p,2}$  voitiin laskea niitä vastaava konsolidaatioaste  $U_{p,2}$  kaavan 7.5 mukaan.

$$S(t) = U_{p,1}(t) \cdot S_{p,1} \quad (7.4)$$

$$U_{p,2}(t) = \frac{S(t)}{S_{p,2}} \quad (7.5)$$

missä  $S(t)$  on kerroksen painuma ajanhetkellä  $t$  [mm]

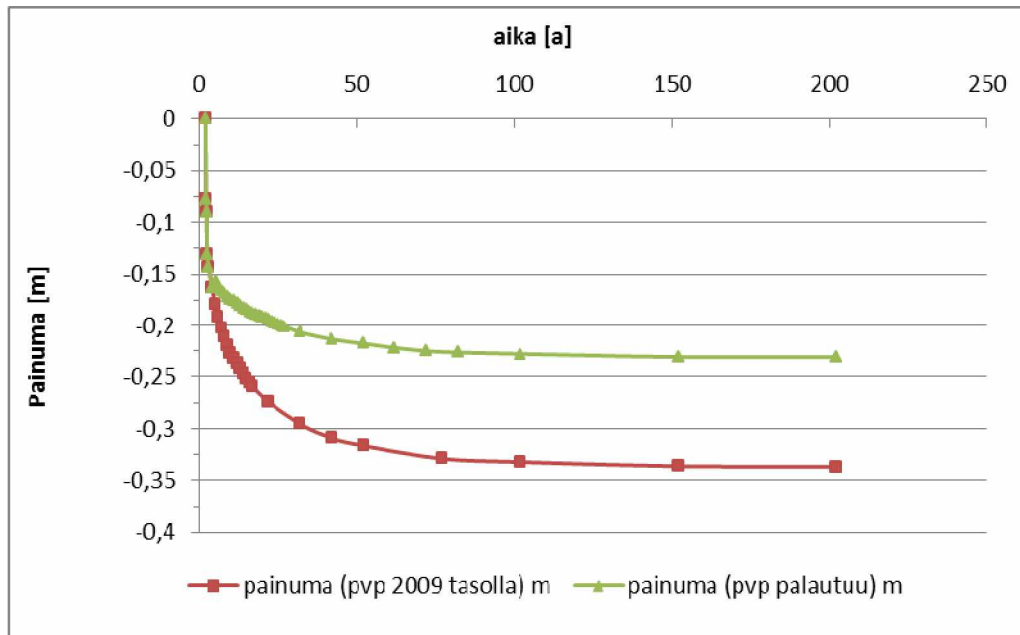
$U_{p,1}(t)$  kerroksen ensimmäistä kuormitustasoa vastaava konsolidaatioaste ajan hetkellä  $t$  [%]

$S_{p,1}$  ensimmäistä kuormitustasoa vastaava kerroksen lopullinen painuma [mm]

$U_{p,2}(t)$  kerroksen toista kuormitustasoa vastaava konsolidaatioaste ajan hetkellä  $t$  [%]

$S_{p,2}$  toista kuormitustasoa vastaava kerroksen lopullinen painuma [mm]

Taulukon 1 avulla määritettiin konsolidaatioastetta  $U_{p,2}(2 \text{ vuotta})$  vastaava aikatekijä  $T_p$  ja sitä vastaava konsolidaatioaika  $t_0$  (kaava 4.21). Laskettaessa kutakin ajanhetkeä vastaava aikatekijä  $T_v$  jälkimmäiselle kuormitustasolle, käytettiin kahden vuoden painuma-ajalle arvoa  $t_0$ . Kuvassa 35 on esitetty aika-painuma -kuvaajat käsinlaskennan tulosten perusteella.



Kuva 35 Painumat käsinlaskennalla. Punainen käyrä kuvaa tilannetta, jossa pohjavedenpinta jää vuoden 2010 tasolle pysyvästi, vihreä viiva kuvaa tilannetta, jossa pohjavedenpinta laskee vuoden 2010 tasolle, ja palautuu kahden vuoden kuluttua vuoden 2012 tasolle.

## 7.3 Numeerinen mallinnus Plaxis 2011 -ohjelmalla

### 7.3.1 Yleistä

Plaxis 2011 -ohjelma jakaa tarkastettavan leikkauksen kolmion mallisiin elementteihin. Tässä työssä käytettiin mallinnuksessa 15 solmuisia elementtejä (Kuva 10). Painumahavaintojen perusteella suurimmat painumat oli havaittu Laaksotien kohdalla. Tämän vuoksi mallinnettavaksi valittiin Laaksotien suuntainen leikkaus A-A. Leikkaus laajennettiin kattamaan myös Kehäradan itäisen suuaukon kaivanto, sillä pohjaveden alenema pyrittiin mallintamaan kaivannon avulla.

Poikkileikkaukset mallinnettiin syöttämällä maan-, kallion- ja maakerrosrajojen koordinaattipisteet ohjelmaan. Numeeristen ongelmien välttämiseksi ja laskelmien nopeuttamiseksi geometriaa kuitenkin yksinkertaistettiin muun muassa yhdistämällä kaksi savikerrosta toisiinsa sekä karsimalla maanpinnan koordinaattipisteitä. Tämän jälkeen määritettiin muodostuneille alueille laboratoriotulosten perusteella määritellyt materiaalit.

Savi- ja silttikerrokset mallinnettiin Soft Soil (SS) -mallilla, joka soveltuu hyvin vahvasti kokoonpuristuvien maakerrosten mallintamiseen. Koska täyttö- ja kuivakuorikerrokset toimivat mallissa vain painona, eikä niissä voitu olettaa tapahtuvan merkittäviä painumia, mallinnettiin ne Mohr-Coulombin (MC) materiaalimallilla. Koska kirkkaalajeilla painumat ovat huomattavan vähäisiä ja tapahtuvat lähes välittömästi kuormituksen kasvaessa, mallinnettiin myös moreenikerros MC-mallilla. Koska moreenin vedenläpäisevyys on tyypillisesti korkea (Korhonen 1985), oli moreenikerroksella mallissa olennainen tehtävä toimia kuivattavana kerroksena. Tarkasteltavalla

alueella kallionpinta vaihtelee syvyydeltään huomattavasti. Koska Plaxis 2011 -ohjelmassa mallin alapinnan tulee olla vaakasuora, mallinnettiin moreenin alapuolelle vielä ohut kalliokerros. Kallion mallintamiseen käytettiin lineaarielastista mallia, joka olettaa muodonmuutokset lineaarielastisiksi.

Soft Soil- (SS) ja Soft Soil Creep (SSC) -mallissa tarvittavat parametrit on esitetty taulukossa 13. Hiipuman kerroin  $\mu^*$  on käytössä vain SSC-mallissa, jota ei käytetty mallinnuksessa.

Taulukko 13 Soft Soil ja Soft Soil Creep mallien parametrit.

| parametri | $\lambda^*$ | $\kappa^*$ | $\mu^*$ | $\gamma$          | $\gamma'$         | c   | $\phi$ | kx    | ky    | POP/OCR |
|-----------|-------------|------------|---------|-------------------|-------------------|-----|--------|-------|-------|---------|
| yksikkö   | -           | -          | -       | kN/m <sup>3</sup> | kN/m <sup>3</sup> | kPa | °      | m/day | m/day | kPa/-   |

SSC-mallin hiipumaparametrin  $\mu^*$  määrittämisessä päätettiin käyttää ödometrikokeista saatujen sekundääripainuman kertoimien  $C_\alpha$  maksimiarvoja. Sekundääripainuman kerroin saa tyypillisesti suurimmat arvot jännitystilan ollessa lähellä esikonsolidaatiojännitystä ja laskee jännitystilan kasvaessa huomattavasti esikonsolidaatiojännitystä suuremmaksi. Sekundääripainuman kertoimien maksimiarvoja päädyttiin käyttämään koska mallinnettavassa tilanteessa jännitystila on lähellä esikonsolidaatiojännityksen tasoa.

Käytetty kerrosjako ja laskentaparametrit on koottu taulukkoon 14. Geometriasta pyrittiin tekemään mahdollisimman yksinkertainen numeeristen ongelmien välttämiseksi Plaxis 2011 -ohjelmassa. Tämä johti GeoCalc-laskelmissa olleiden savikerrosten Savi 2 ja Savi 3 yhdistämiseen numeerisessa mallissa.

Kuivakuorelle, moreenille ja kalliolle käytettiin standardin EN 1997-2 liitteen D perusteella arvioituja kimmomoduulin  $E'$  ja Poissonin luvun  $\nu$  arvoja. Plaxis 2011-ohjelmassa materiaalimallien ja näin ollen myös parametrien määrittäminen tapahtuu niin kutsutussa input-ohjelmassa. Laskenta-askleet ja laskennan tyyppi määritetään sen sijaan laskentaohjelmassa. Samaa materiaalimallia voidaan siis käyttää sekä avoimen että suljetun tilan tarkasteluille.

Taulukko 14 Numeerisessa mallinnuksessa käytetyt laskentaparametrit.

|   | Kuivakuori | Savi 1   | Savi 2   | Savi 3   | Siltti   | Moreeni  | Kallio  |
|---|------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| <b>Materiaalimalli</b>                        | MC         | SS       | SS       | SS       | SS       | MC       | LE      |
| <b>Kuivatustapa</b>                           | D          | U        | U        | U        | U        | D        | N       |
| <b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b> | 18,00      | 15,72    | 15,20    | 17,55    | 17,00    | 20,00    | 25,00   |
| <b>E' (Pa)</b>                                | 5,0E+04    | -        | -        | -        | 2,5E+01  | 9,0E+04  | 3,0E+07 |
| <b><math>\nu'</math> (-)</b>                  | 0,2        | -        | -        | -        | 0,3      | 0,25     | 0,2     |
| <b><math>\lambda^*</math> (-)</b>             | -          | 0,1739   | 0,1697   | 0,1697   | 0,1961   | -        | -       |
| <b><math>\kappa^*</math> (-)</b>              | -          | 0,0146   | 0,0116   | 0,0121   | 0,0138   | -        | -       |
| <b><math>\mu^*</math> (-)</b>                 | -          | 0,0380   | 0,0074   | 0,0069   | -        | -        | -       |
| <b>c' (kPa)</b>                               | 10,0       | 4,00     | 8,00     | 6,10     | 10,0     | 1,00     | -       |
| <b><math>\phi'</math> (°)</b>                 | 35,0       | 20,0     | 20,0     | 20,4     | 20,4     | 40,0     | -       |
| <b>su (kPa)</b>                               | 70,00      | 18,00    | 20,00    | 15,00    | 70,00    | 1,00     | -       |
| <b>ky (m/d)</b>                               | 3,00E-05   | 3,40E-05 | 1,73E+06 | 1,30E+06 | 6,05E+06 | 8,65E-01 | -       |
| <b>e0 (-)</b>                                 | 0,5        | 2,467    | 2,236    | 0,856    | 1,755    | 0,5      | -       |

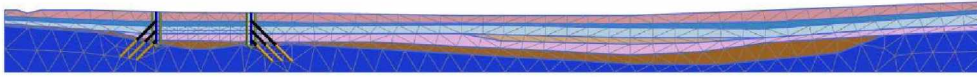
MC = Mohr-Coulomb, SS = Soft Soil, LE = Linear elastic  
D = drained, U = Undrained A, N = Non-porous

Materiaalimallissa on valittava materiaalin kuivatustapa: *Drained*, *Undrained A*, *Undrained B*, *Undrained C* tai *Non-porous*. Nämä valinnat viittaavat kyseisen materiaalimallin käyttäytymiseen kuivatuksen suhteen. Kuivakuori ja täyttökerrokset sekä moreeni päätettiin mallintaa käyttäen kuivatustapana valintaa ”*Drained*”, jolloin huokosylipainetta ei pääse muodostumaan. Kyseinen valinta soveltuu hyvin vettä johtaville maalajeille sekä kuiville maakerroksille. Saville käytettiin valintaa Undrained A, joka soveltuu vedellä kyllästyneille maalajeille, joilla on alhainen vedenläpäisevyys. Valinta Undrained A käyttää kuitenkin laskelmissa tehokkaita jännityksiä sekä tehokkaita lujuusparametreja. Ohjelma laskee suljetun leikkauslujuuden syötettyjen lähtöarvojen perusteella. Valinnan voidaan siis ajatella olevan suljetun ja avoimentilan analyysin välimuoto. (Plaxis, 2011b)

Mallinnus suoritettiin kolmella eri tavalla. Seuraavissa luvuissa on käyty läpi kolme erilaista mallinnusmenetelmää, joiden avulla pohjaveden alenemaa pyrittiin mallintamaan.

### 7.3.2 Kaivantojen kuivatuksen mallintaminen ajan funktiona

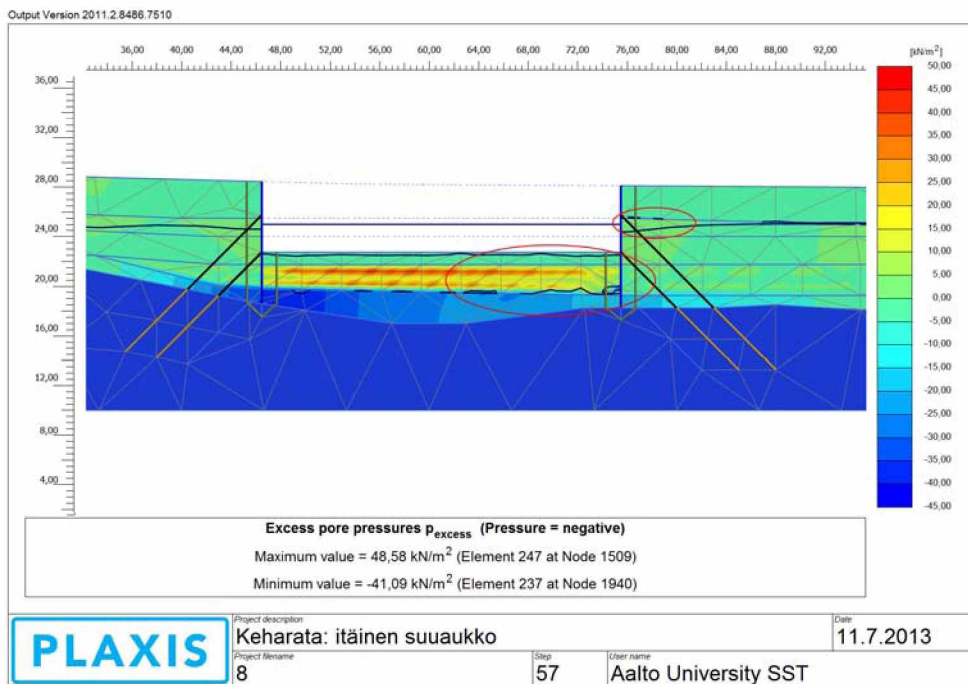
Ensimmäiseksi poikkileikkaus mallinnettiin mallintamalla myös Kehäradan itäisen suuaukon kaivanto ja sen tuennat. Kuvassa 36 on esitetty laskelmissa käytetty elementtiverkko. Pohjavedenpinnantason muutoksia ei syötetty suoraan ohjelmaan, vaan ohjelman annettiin itse laskea pohjavedenpinnantaso kaivannon kuivatukselle annettujen reunaehtojen avulla. Ponttiseinät mallinnettiin *Plates*-työkalulla, ankkurit mallinnettiin *node-to-node*-ankkureina ponttiseinän ja kallionpinnan välillä. Ankkureiden päiden kallioinjektointi mallinnettiin geotekstiilinä. Koska tämän työn tarkoituksena ei ollut tarkastella kaivannon seinän vakavuutta tai sen vaakasuuntaisia siirtymiä, valittiin ponttiseinille ja ankkureille huomattavan korkeat lujuudet seinien vaakasuuntaisten siirtymien minimoimiseksi.



Kuva 36 Plaxis-laskelmissa käytetty geometria ja elementtiverkko.

Pohjaveden alentaminen mallinnettiin syöttämällä ohjelmaan vuoronperään laskenta-askleet kaivulle ja kaivetun tilan kuivatukselle. Kaivuvaihe mallinnettiin plastisena, lyhyen aikavälin tarkasteluna, jossa pohjaveden virtauksessa ei tapahdu muutoksia. Kaivuvaiheessa poistettiin maaperää kaivannosta ja aktivoitiin kaivutasolla sijaitsevat ankkurit. Konsolidaatiovaiheessa pohjavedenpintaa alennettiin edellisen laskentavaiheen tasolta saavutettuun kaivutasoon lineaarisesti laskentavaiheen mittaisella ajanjaksolla.

Tämä lähestymistapa johti kuitenkin numeerisiin vaikeuksiin pohjaveden pinnan laskeutumisessa. Kuten kuvasta 37 voidaan havaita, pohjavedenpinnantason alenema ponttiseinän vierellä on erittäin vähäistä. Lisäksi kuvasta voidaan havaita, että pohjavedenpinnan taso ei ole yhtenäinen ja useissa osissa mallia näkyy useampi päällekkäinen pohjavedenpinnantaso.

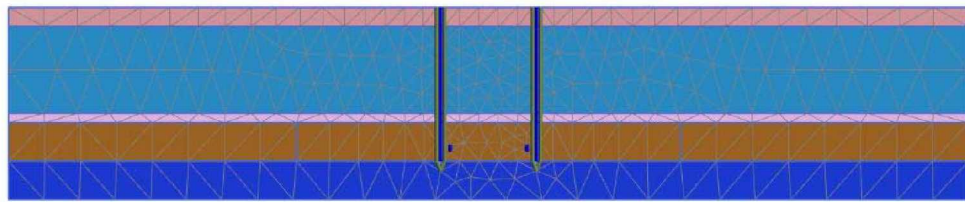


Kuva 37 Huokosvedenylipaine ja laskennallinen pohjavedenpinta.

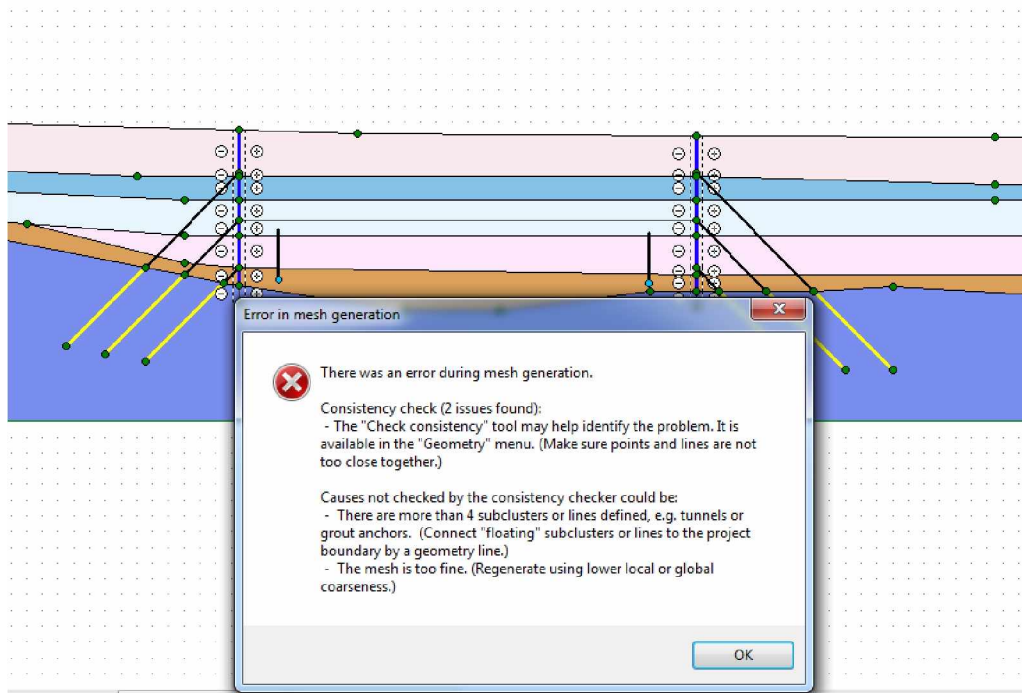
### 7.3.3 Kaivannon kuivatuksen mallintaminen kaivojen avulla

Plaxis 2011 Tutorial Manual neuvoo mallintamaan kaivannon kuivatuksen ja siitä aiheutuvat pohjaveden pinnan muutokset kaivojen avulla. Menetelmä toimii hyvin yksinkertaistetulla geometrialla (Kuva 38), mutta monimutkaiseen geometriaan sovellettuna Plaxis 2011 ei onnistu luomaan elementtiverkkoa liian lähekkäisten geometriaelementtien vuoksi (Kuva 39).



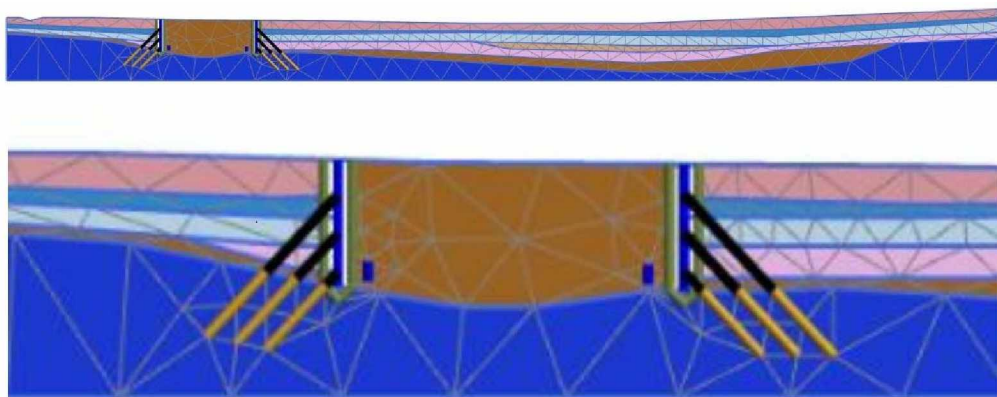


Kuva 38 Elementtiverkko yksinkertaistetulla geometrialla.



Kuva 39 Plaxis 2011 antama virheilmoitus elementtiverkkoa luodessa.

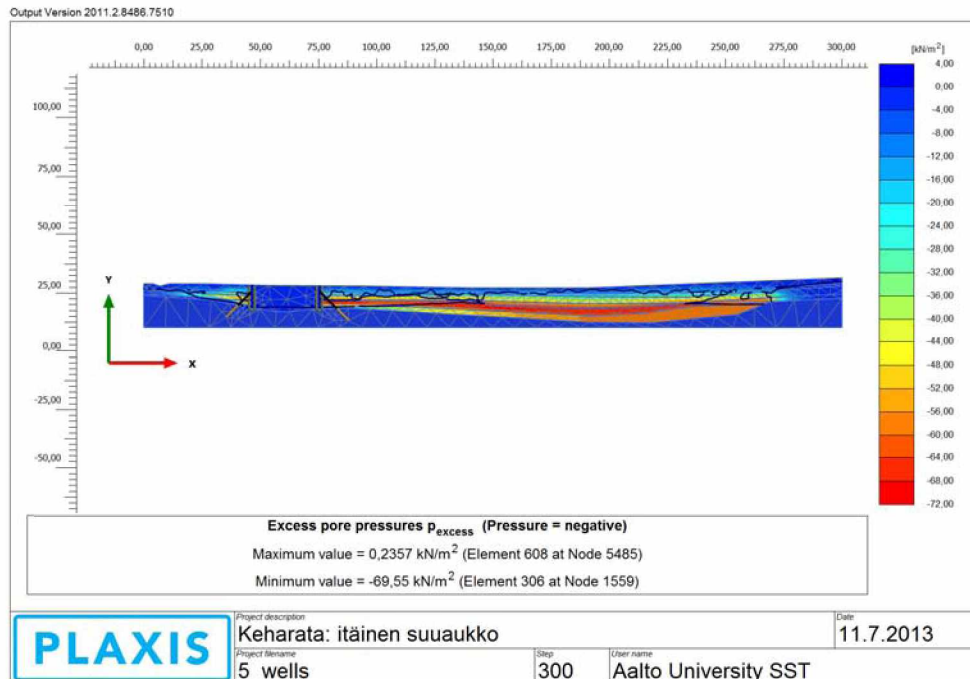
Jotta elementtiverkko saataisiin luotua, yksinkertaistettiin mallia karsimalla geometriaviivoja kaivannon sisäpuoliselta osalta (Kuva 40).



Kuva 40 Elementtiverkko kaivoilla.

Pohjaveden mallintaminen suoritettiin syöttämällä ohjelmaan alkuperäinen pohjavedenpinnantaso ja määrittämällä pohjavedenpinnantaso laskennallisesti kaivojen pumppausmäärien perusteella. Kuvassa 41 on esitetty laskennallisesti saatu pohja-

vedenpinnantaso. Kuten kuvasta voidaan havaita, laskennallisesti määritetty pohjavedenpinnantaso on usealla päällekkäisellä tasolla. Koska savella on huomattavasti alhaisempi vedenläpäisevyys kuin moreenilla, voidaan olettaa suurimpien huokosvedenylipaineiden esiintyvän savikerroksissa, siinä missä moreenikerroksessa voidaan huokosvedenpaineen olettaa vastaavan pohjavedenpinnan painetasoa. Kuvasta voidaan kuitenkin havaita, että savikerroksissa laskennallisesti vallitseva huokosvedenylipaine on noin 0–60 kPa, kun puolestaan siltti- ja moreenikerroksissa vallitseva huokosvedenylipaine on noin 60–72 kPa. Mallin voidaan näin ollen todeta mallintavan pohjavedenpinnan virheellisesti.

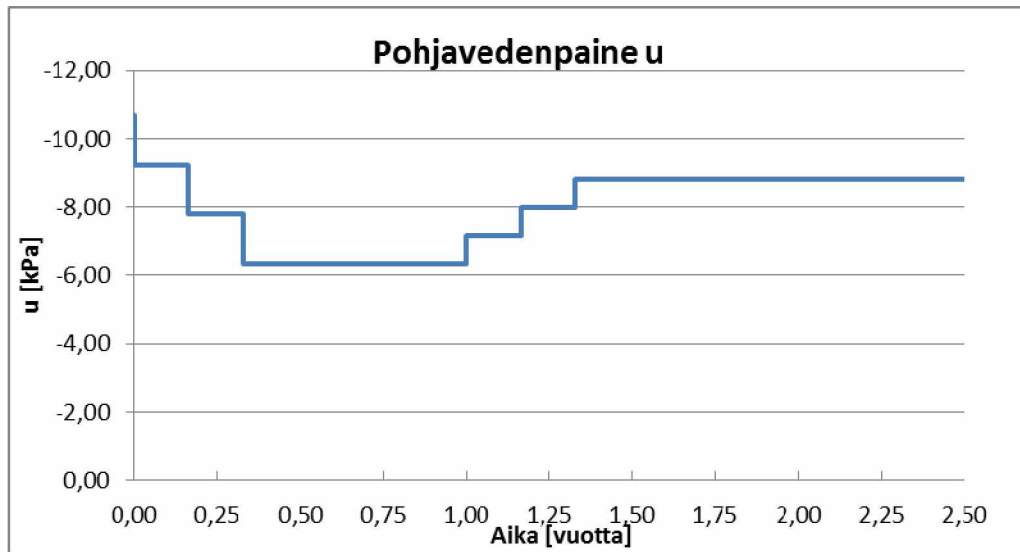


Kuva 41 *Plaxis 2011-ohjelman kaivojen pumppausmäärien perusteella laskema pohjavedenpinnantaso.*

### 7.3.4 Pohjaveden mallintaminen moreenin painetason avulla

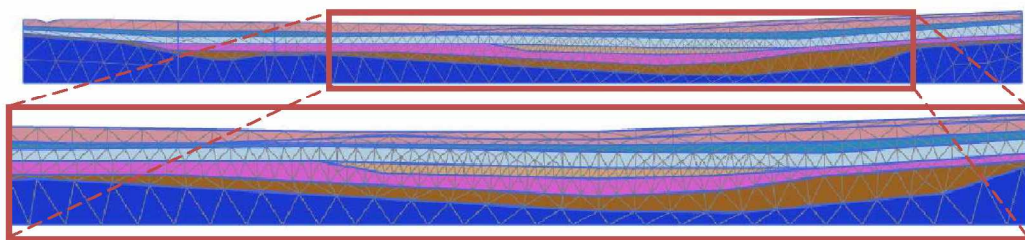
Koska edellä esitetyt pohjaveden virtauksen mallintamiseen perustuvat lähestymistavat osoittautuivat liian monimutkaisiksi käytettävälle mallinnusohjelmalle, päädyttiin pohjavesi ja sen muutokset mallintamaan olemassa olevia pohjavesihavaintoja ja pohjavesimalleja hyväksi käyttäen. Laskentaohjelmassa pohjavedenpinta määritettiin syöttämällä kutakin laskenta-askelta vastaavat moreenikerroksessa vallitsevat pohjavedenpainetasot (kuva 42). Koheesiomaakerroksille käytettiin valintaa, jossa Plaxis 2011 interpoloi kerroksessa vallitsevat huokosvedenpaineet moreenikerroksen pohjavedenpinnan ja koheesiomaiden vedenläpäisevyyden perusteella.





Kuva 42 Pohjavedenpaine moreenikerroksen keskellä laskentapoikkileikkauksen paaluluvulla 152 11,4 metrin syvyydellä maanpinnasta.

Koska moreenissa vallitseva pohjaveden painetaso päätettiin syöttää pohjavesihavaintojen perusteella, voitiin geometriaa yksinkertaistaa kaivannon osalta. Kaivannon kaivu jätettiin mallintamatta ja näin ollen myös ponttiseinät ja ankkurointi voitiin poistaa mallista. Käytetty elementtiverkko on esitetty kuvassa 43.



Kuva 43 Elementtiverkko ilman ponttiseiniä. (Tarkemmin liitteessä 9)

Koska pohjavedenpinnat jouduttiin syöttämään Plaxis 2011 ohjelmaan manuaalisesti piste kerrallaan, karsittiin pohjaveden pintamallien perusteella tuotettuja pohjavedenpinnan pisteistöä niiden syöttämisen sujuvoittamiseksi. Laskenta-askelia jouduttiin lisäämään painumalaskelmien tulosten tarkentamiseksi. Muun muassa pohjavedenpinnan alenema vuoden 2010 aikana syötettiin malliin kolmessa osassa. Lisätyjen väliaskelten osalta pohjavedenpinnantasot arvioitiin olemassa olevien pohjavedenpintamallien perusteella.

Mallin reunoille määritettiin suljetut rajapinnat, jotka estävät veden virtaamisen pois mallista. Toinen vaihtoehto olisi ollut määrittää reunojen läpi virtaavan veden määrä. Malli on kuitenkin niin laaja, että suljettuja rajapintoja voitiin käyttää ilman, että ne vaikuttivat laskennan tuloksiin merkittävästi. Lisäksi maaston muotojen perusteella voitiin olettaa alueen virtaussuunnan kulkevan pohjoisesta etelään ja lännestä itään, eli laskentapoikkileikkauksen läpi.

Mallin laskenta-askeleet määritettiin siten, että aluksi laskettiin maaperässä alkutilanteessa vallitseva jännitystila. Tämän jälkeen luotiin kolme kahden kuukauden mittaista konsolidaatioaskelta, joiden aikana pohjavedenpinnan painetaso moreenis-

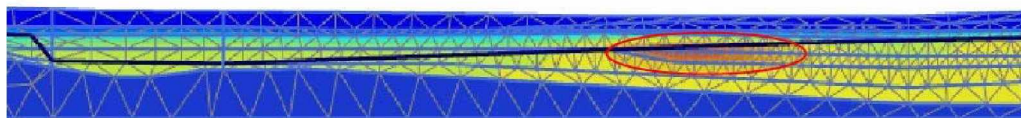
sa laskettiin asteittain alas (kuva 44). Tätä seurasi kuuden kuukauden mittainen konsolidaatiojakso, jonka aikana pohjavedenpinnan painetasoon ei tehty muutoksia. Seuraavaksi pohjavedenpinnan painetaso (moreenissa) nostettiin jälleen kolmen kahden kuukauden mittaisen laskenta-askeleen aikana nykyiselle (joulukuu 2012) tasolle (Kuva 44). Seuraavassa vaiheessa ohjelmaan syötettiin kuuden kuukauden, vuoden ja lopulta kymmenen vuoden mittaisia konsolidaatiojaksoja. Näiden jaksojen aikana pohjaveden moreenissa vallitseva painetaso säilytettiin vakiona.



Kuva 44 Huokosveden ylipaineen kehittyminen pohjaveden muutosten seurauksena 2009–2013

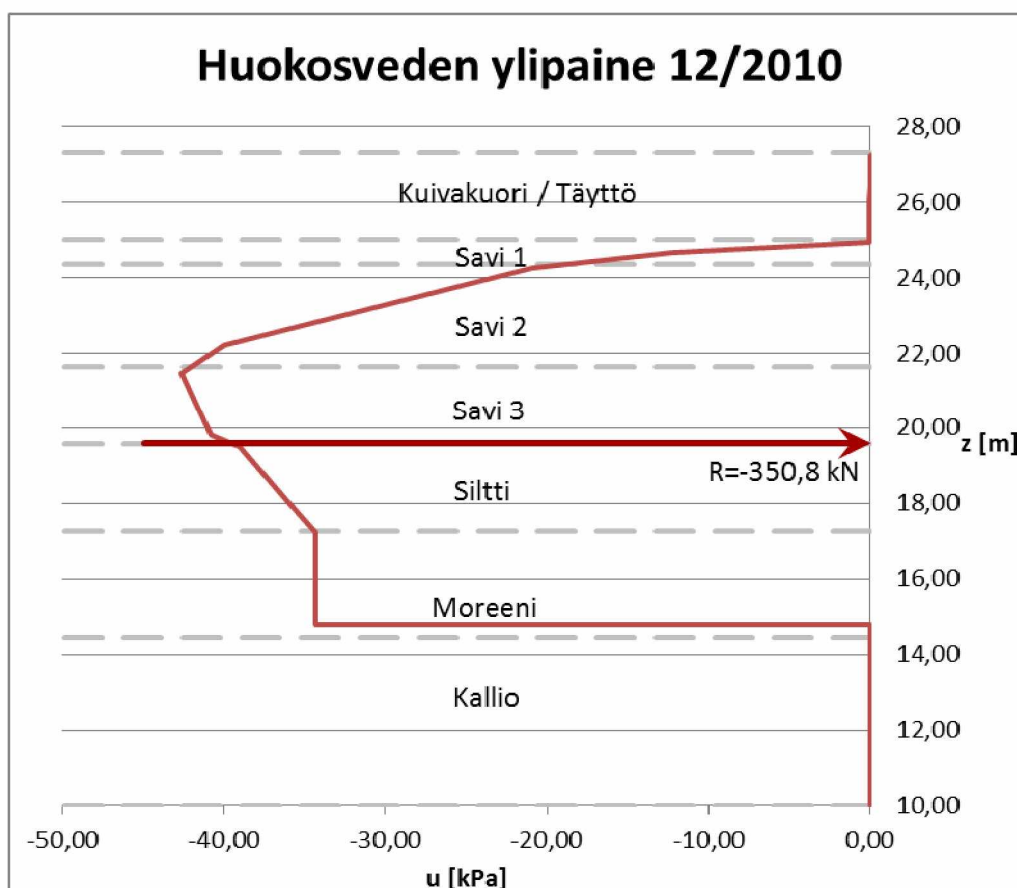
Laskentajaksoja määriteltäessä jouduttiin havaittua pohjavedenpinnan käyttäytymistä yksinkertaistamaan. Esimerkiksi vuodenaajoista johtuvaa pohjavedenpinnantason luonnollista vaihtelua ei ole huomioitu mallinnuksessa. Pohjavedenpinnantason alenemis- ja palautumisjaksot on määritetty pohjaveden havaintopisteen 3352 perusteella. Havaintopiste 3352 sijaitsee alueella, jossa havaitut painumat ovat olleet suurimpia.

Plaxiksella tehtyjen painumalaskelmien tulokset ja käytetty geometria on koottu liitteeseen 9. Kuvassa 44 on esitetty 12 ensimmäisen laskenta-askeleen tulokset huokosveden ylipaineen osalta. Alkutilassa huokosveden ylipainetta ei ole, vaan maaperässä vallitsevat jännitykset ovat tasapainotilassa. Kuvasta nähdään, että huokosveden ylipaine kasvaa aikavälillä 12/2009–12/2010. Vuoden 2011 talven ja kevään aikana huokosveden ylipaine kuitenkin tasaantuu. Kesäkuussa 2011 huokosveden ylipaineen nähdään keskittyvän alueelle, jossa savikerrokset paksunevat pohjavedenpinnan aleneman ollessa merkittäviä noin leikkauksen A paalulla 152 (kuva 45). Pohjavedenpinnan painetasoon palautuessa myös huokosveden ylipaine tasoittuu nopeasti. Kuitenkin vielä nykytilannetta vastaavalla laskentahetkellä 06/2013 huokosveden ylipainetta havaitaan olevan jäljellä lähes koko mallin alueella.



Kuva 45 Huokosveden ylipaine kesäkuussa 2011

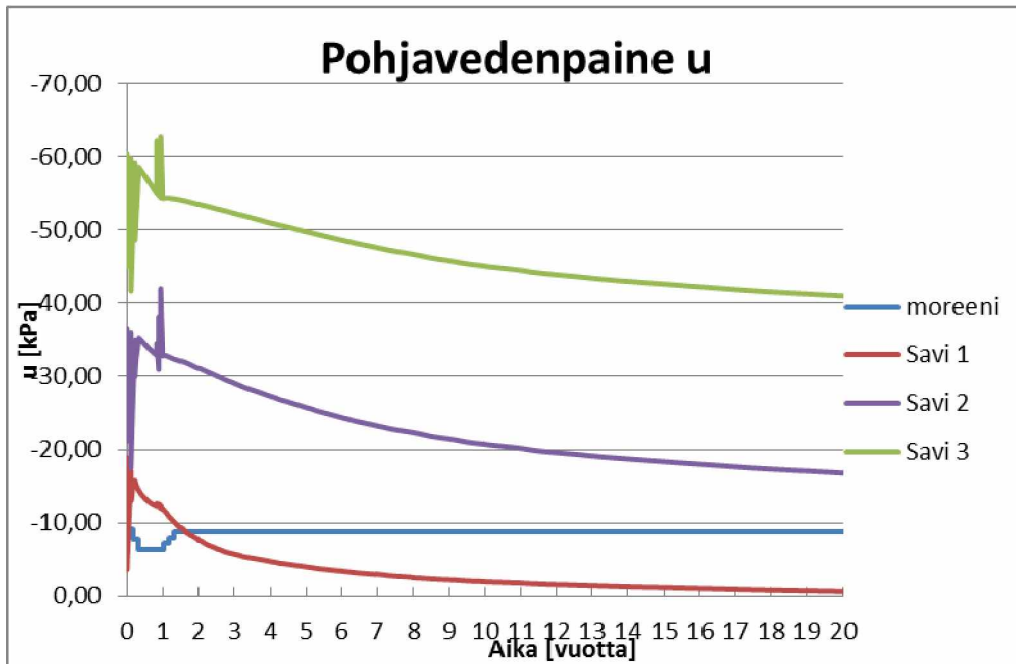
Kuvassa 46 on esitetty huokosveden ylipainejakauma eri kerroksissa leikkauksen A paalulla 152. Jakauma esittää huokosveden ylipainejakaumaa joulukuussa 2010 pohjavedenpinnan ollessa alimmalla tasollaan. Tällöin huokosveden ylipaine on laskennallisesti korkeimmillaan. Kuvaajasta voidaan havaita, että huokosveden ylipainetta ei muodostu lainkaan kuivakuori- ja täyttökerrokseen eikä kallioon. Moreenissa huokosveden ylipaine vastaa silttikerroksen alapinnan tasoa. Huokosveden ylipaineen maksimiarvo sijaitsee savikerrosten 2 ja 3 välistä ja sen voimaresultantti alimman savikerroksen ja silttikerroksen rajapinnalla.



Kuva 46 Huokosveden ylipaine 12/2010 paalulla 152. Huokospaineen ylipaineen maksimiarvo  $u_{\text{excess, max}} = -42,65$  kPa, huokosveden ylipaineen voimaresultantti  $R = -530,8$  kN, resultantin sijainti  $z = 19,615$  m.



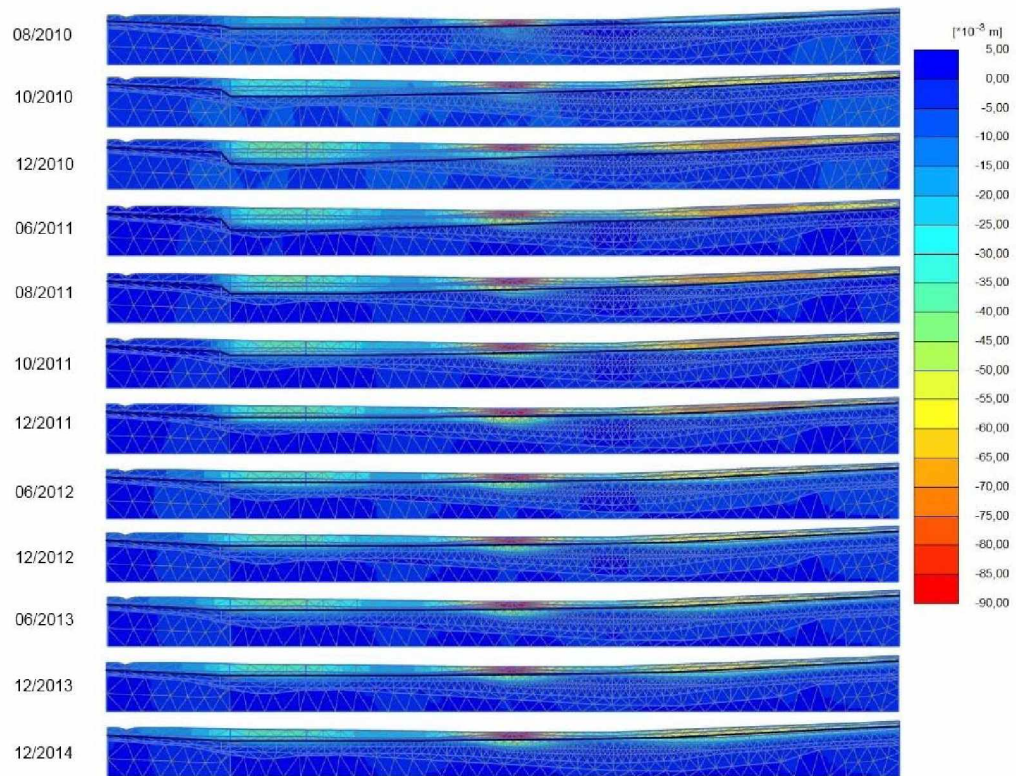
Kuvassa 47 on esitetty moreenille syötetyt pohjavedenpainetasot sekä mallinnetut pohjavedenpaineen  $u$  arvot laskentapoikkileikkauksen paaluluvulta 152. Pohjavedenpaineet edustavat kukin maakerroksen keskikohdassa vallitsevaa pohjavedenpainetta. Kuvasta nähdään, että savikerroksissa pohjavedenpaine laskee huomattavasti hitaammin kuin moreenissa. Myös pohjavedenpaineen nousu nähdään muutoksena savikerrosten pohjavedenpainumakäyrän kulmakertoimessa.



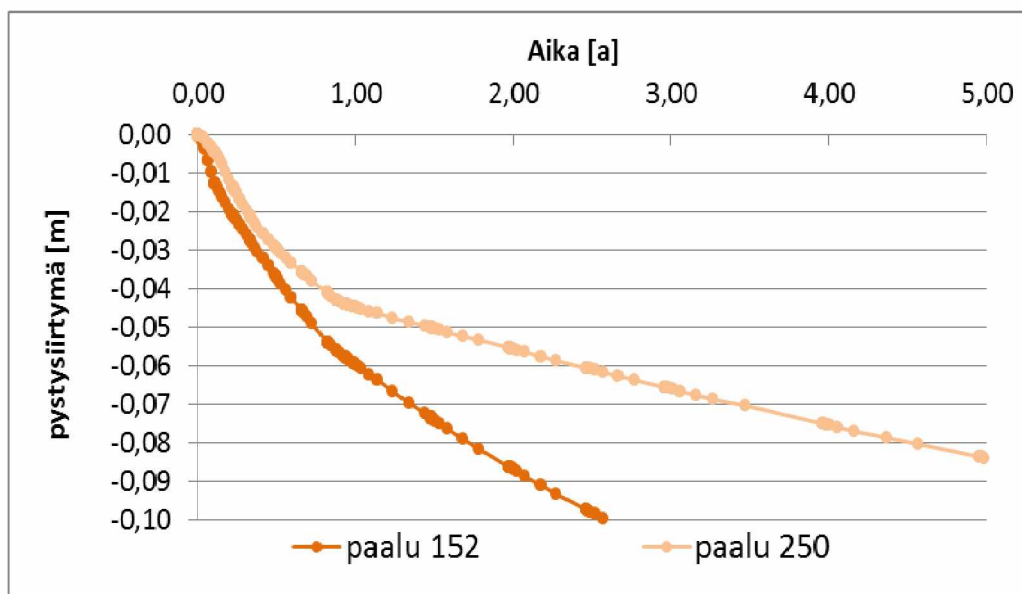
Kuva 47 Pohjavedenpaineen kehittyminen moreeni-, siltti ja savikerrosten keskellä, paaluluvulla 152.

Kuvassa 48 on esitetty mallinnuksen tuloksina saadut vertikaaliset siirtymät. Positiiviset siirtymän arvot kuvaavat maaperän nousua ja negatiiviset arvot painumia. Kuvasta havaitaan suurimpien painumien sijoittuvan samoille alueille, joilla huokosveden ylipaine on suurimmillaan. Nämä tulokset vastaavat myös tehtyjä painumahavaintoja.

Kuvassa 49 on esitetty laskennalliset kokonaispainumat paaluilla 152 ja 250. Paalu 152 sijaitsee kohdalla, jossa savikon paksuus suhteessa pohjavedenpinnan alenemaan on suurimmillaan. Paalulla 250 savikko on edelleen suhteellisen paksu, mutta pohjavedenpinnassa ei ole tapahtunut yhtä merkittäviä muutoksia. Kuvasta nähdään, että ensimmäisen 9 kuukauden painumat eivät juuri eroa toisistaan. Paaluluvulla 250 painumat kuitenkin hidastuvat nopeammin.



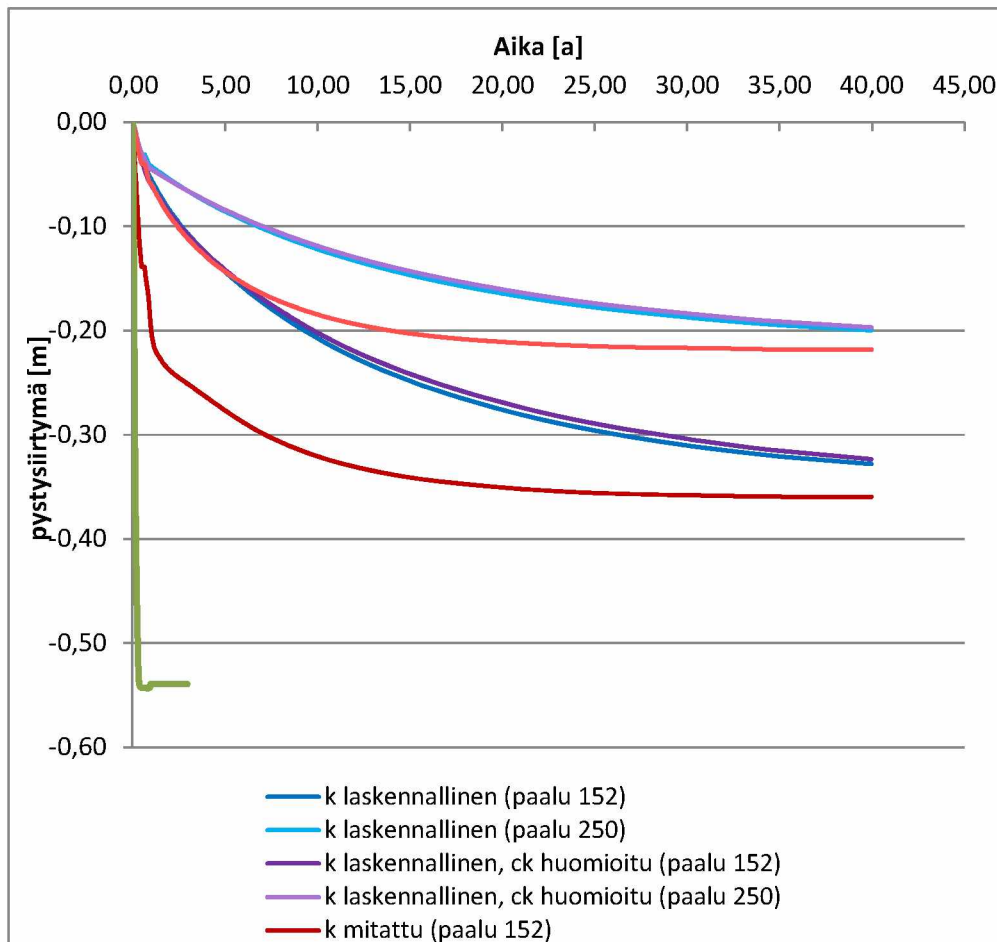
Kuva 48 Painumien kehittyminen 2010–2014.



Kuva 49 Kokonaispainuma paalulla 152 ja 250.

## 7.4 Herkkyystarkastelut

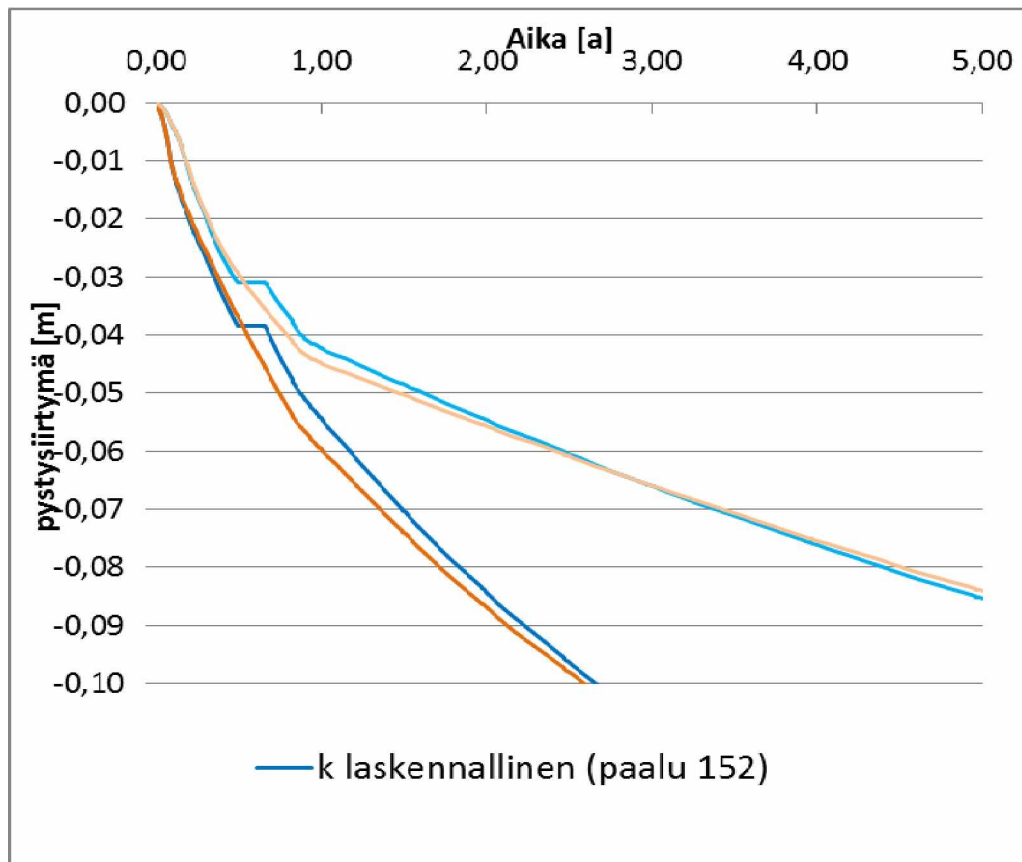
Kuvassa 50 on esitetty aika-painumakuvaajat erilaisilla vedenläpäisevyyden arvoilla leikkauksen A paalujen 152 ja 250 kohdalla. Siniset käyrät kuvaavat aika-painumaa, kun vedenläpäisevyydelle on käytetty ödometrikokeiden perusteella Taylorin menetelmällä laskettuja vedenläpäisevyyden arvoja. Violeteissa käyrissä on käytetty samoja vedenläpäisevyydenden arvoja, mutta vedenläpäisevyyden muutosta  $c_k$  on kasvatettu. Punaisissa käyrissä vedenläpäisevyydelle on käytetty vedenläpäisevyyskokeista saatuja arvoja. Näistä voidaan havaita, että aika-painumakäyrät eroavat toisistaan merkittävästi vedenläpäisevyyden arvoista riippuen. Vertaamalla laskennallisia painuma-käyriä painumahavaintoihin, voidaan todeta, että todellinen vedenläpäisevyys on luultavasti jotain mitatun ja laskennallisen arvon väliltä.



Kuva 50 Vedenläpäisevyyden määrittämenetelmän vaikutus. Aika-painuma kuvaaja suurimpien painumien kohdalta (paalu 152) ja kauempaa paalulta 250, jossa painumat vähäisempiä.

Kuvasta 51 nähdään vedenläpäisevyyden muutoksen  $c_k$  vaikutus laskennallisiin painumiin. Ohjelmaan syötetty vedenläpäisevyyden  $k$  arvo edustaa maalajin keskimääräistä vedenläpäisevyyttä. Todellisuudessa maaperän tiivistyessä myös sen vedenlä-

päisevyys heikkenee. Pienentämällä parametrin  $c_k$  arvoa, ohjelma tulkitsee materiaalin vedenläpäisevyyden olevan alussa suurempi ja pienentyvät maaperän tiivistyessä.



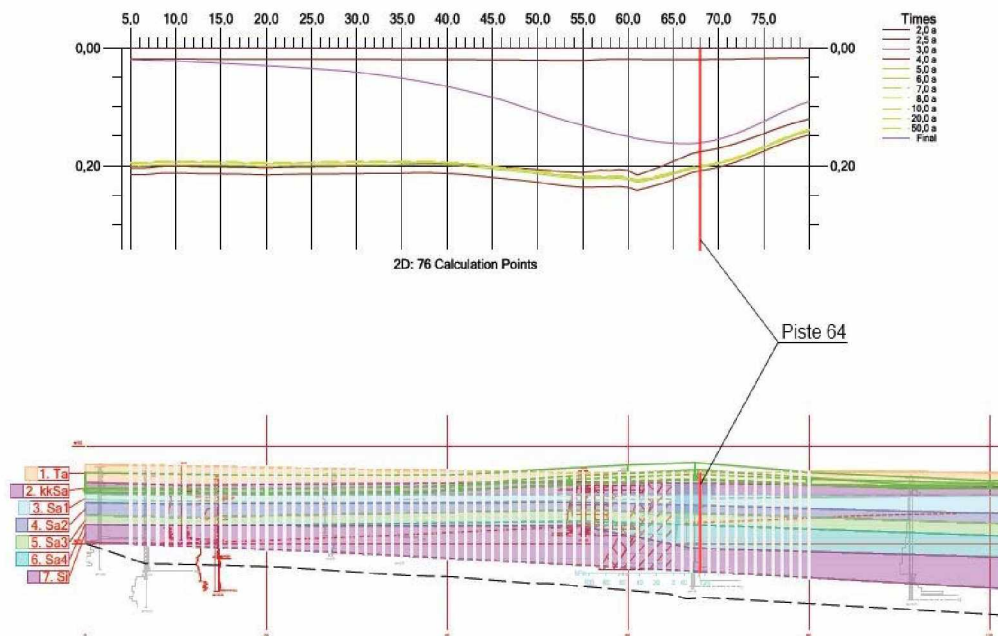
Kuva 51 Vedenläpäisevyyden konsolidaatiosta aiheutuvan muuttumisen vaikutus.



## 8 Laskemien tulosten analyysi ja vertailu

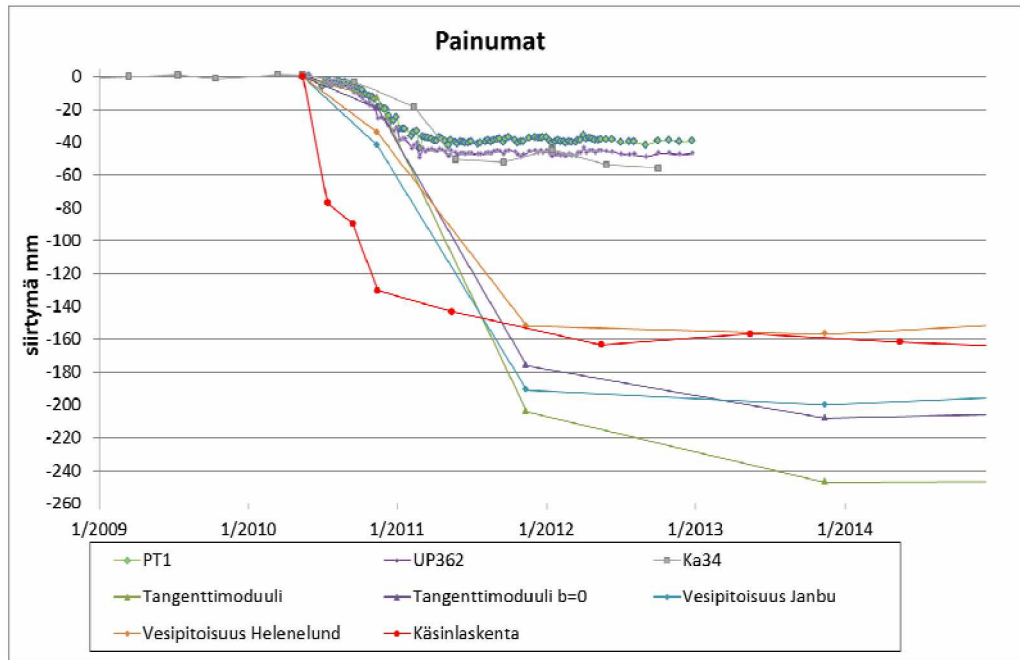
Sekä tangenttimoduulimenetelmällä että vesipitoisuusmenetelmällä tehtyjen laskelmien tuloksista on selvästi havaittavissa epärealistisen suuria painumia. Tämä johtuu siitä, että ylimpiin maakerrokseen kohdistuva kuormitus ei ole todellisuudessa niin suuri kuin ohjelmaan mallinnettiin. Todellisuudessa pohjaveden alenemasta aiheutuva kuorman-lisäys kasvaa syvyyden funktiona alkuperäisen ja uuden pohjavedenpinnan välillä. Kuorman mallintaminen näin ei kuitenkaan ollut mahdollista GeoCalc 2.4-ohjelmassa. Näin ollen ylimpien maakerrosten laskennallisten painumien voidaan olettaa olevan huomattavasti painumahavaintoja suurempia, sillä niihin laskennallisesti kohdistunut kuorma oli liian suuri.

GeoCalc laskelmissa suurimpien painumien havaittiin sijaitsevan noin GeoCalc-leikkauksen paalulla 68 (laskentapiste 64), jolla savikko on paksuimmillaan ja pohjaveden alenema on merkittävin (Kuva 52). Tämä osoittaa mallin toimivan tältä osin.



Kuva 52 Paalu 68, laskentapiste 64 leikkauksessa A.

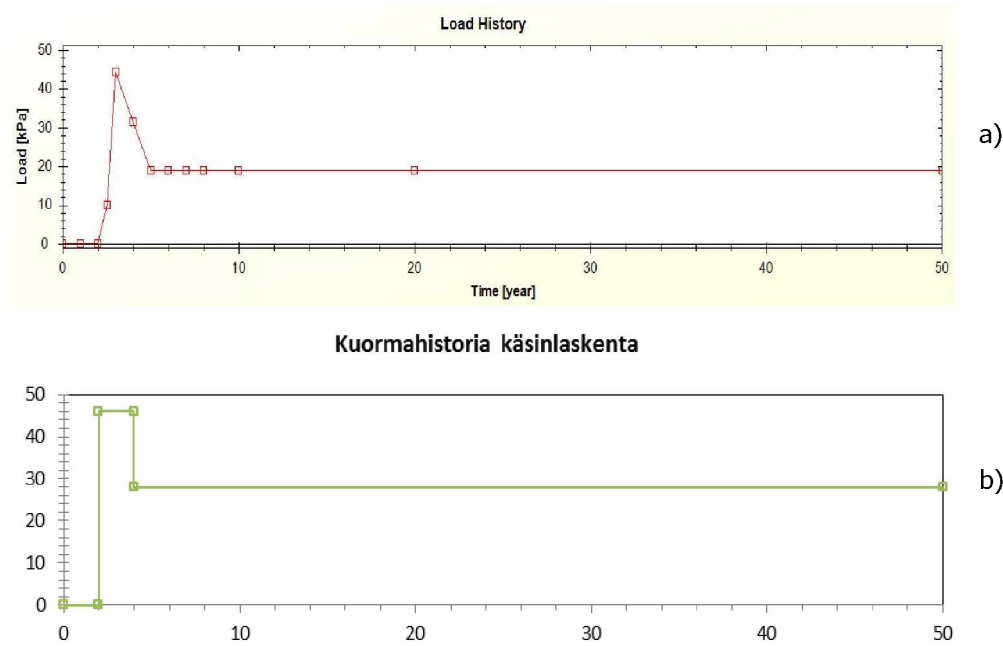
Kuvassa 53 on esitetty paalulta 68 tehdyt painumahavainnot painumalevystä PT1, painumapultista UP362 ja kaivonkannesta Ka34, vastaavan GeoCalc-mallin laskentapisteen laskennallinen kokonaispainuma vesipitoisuusmenetelmällä ja tangenttimoduulimenetelmällä sekä tangenttimoduulimenetelmällä käsinlaskennalla saatu laskennallinen painuma.



Kuva 53 Painumahavainnot ja laskennalliset kokonaispainumat, paalu 68 (Leikkaus GeoCalc).

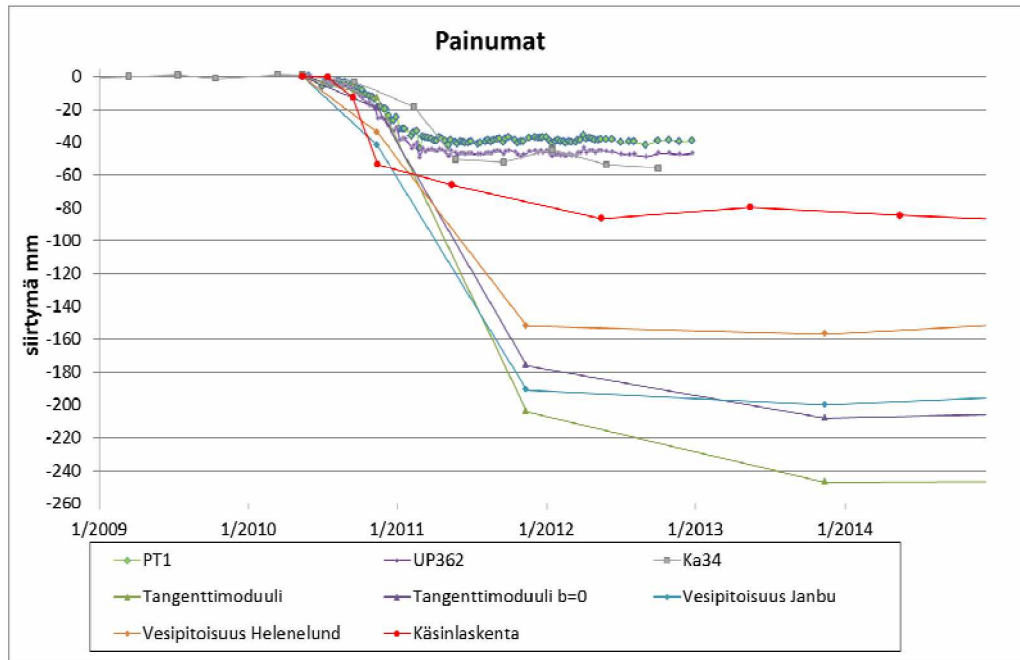
Kuvaajasta havaitaan, että suoritettavat painumalaskelmat tuottavat huomattavasti painumahavaintoja suurempia painuman arvoja. Lisäksi laskelmien mukaan painumat tapahtuvat huomattavasti todellisia painumahavaintoja nopeammin.

Käsinlaskennalla saatu aika-painumakuvaaja vastaa tehtyjä painumahavaintoja muotonsa ja mittaluokkansa puolesta huomattavasti GeoCalc-laskelmia paremmin. Huomataan kuitenkin käsinlaskennassa maaperän painuvan ensimmäisen 2 kuukauden aikana jopa 77 mm, jonka jälkeen painumanopeus hidastuu huomattavasti. GeoCalc-laskelmissa painumat sen sijaan alkavat rauhallisemmin. Syy tähän on kuorman aika-riippuvuudessa. GeoCalc-laskemissa kuorma kasvoi nolasta täyteen arvoonsa vuoden kuluessa ja palautui vastaavasti kahden vuoden aikana (kuva 54a). Käsinlaskennassa käytettiin kuormalle vain sen maksimi- ja lopullista arvoa. Tästä johtuen käsinlaskennassa kuorma kasvoi laskennallisesti nopeammin. Kuorman maksimiarvo myös kuormitti maaperää kauemmin kuin GeoCalc-laskelmissa (kuva 54b). Tämän vuoksi voidaan olettaa 2 kuukauden kohdalla laskennallisen 77 mm painuman johtuvan laskennallisesta virheestä kuormitushistoriassa. Mikäli ensimmäisen laskentajakson aikana tapahtunut painuma poistetaan käsinlaskennan tuloksista (kuva 55), huomataan tulosten vastaavan kohtuullisesti painumahavaintoja.



Kuva 54 Kuormahistoria. a) GeoCalcin käyttämä kuormahistoria, b) käsinlaskennassa käytetty kuormahistoria.

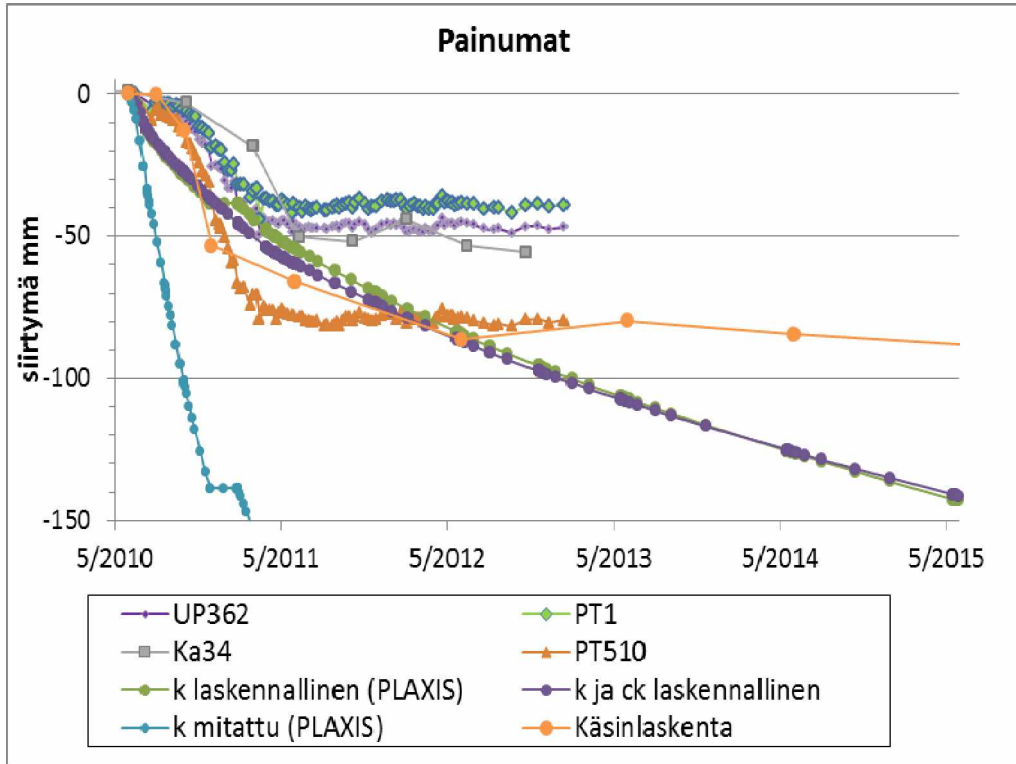
Verrattaessa painumahavaintoja laskennallisiin painumiin on otettava huomioon, että numeerista mallia luotaessa leikkausta A jouduttiin laajentamaan pohjoisessa, mikä vaikutti myös leikkauksen juokseviin paalulukemiin. GeoCalc-poikkileikkauksen paalu 68 vastaa sijaintinsa puolesta Plaxis-poikkileikkauksen paalua 152. Painumahavaintopisteet PT1, UP362 ja Ka34 ovat laskentapisteitä lähinnä sijaitsevat painumaseurantapisteet. Etäisyys laskentapisteiden ja painumaseurantapisteiden välillä on kuitenkin noin 2 metriä. Etäisyydellä saattaa olla merkitystä laskennallisia painumia ja painumahavaintoja verrattaessa, sillä alueella on havaittu merkittäviä painumaeroja lyhyen matkan sisällä. Samalla etäisyydellä laskentapisteistä sijaitsee myös painumahavaintopiste PT510 (Kuva 56), jossa havaitut painumat ovat olleet noin kaksinkertaiset pisteisiin PT1, UP362 ja Ka34 verrattuna.



Kuva 55 Painumahavainnot ja laskennalliset kokonaispainumat. Käsinlaskennasta on poistettu ensimmäisen 2 kk painuma.

Laskennallisten ja havaittujen painumien vertaamisessa on myös kiinnitettävä huomiota painumahavaintojen aloitusmittausten ajankohtaan. Painumahavainnoista 0 mm painuma vastaa painumahavainnoissa aloitusmittauksen ajankohtan korkeus-asemaa. Pohjavesihavaintojen perusteella ensimmäiset muutokset pohjavedenpinnan tasossa havaittiin keväällä 2010. Painumahavaintopisteiden PT1m UP362 ja PT510 aloitusmittaukset suoritettiin 1.6.2010. On siis huomioitava, että vain painumaseurantapiste Ka34 kattaa ennen kesäkuuta 2010 tehdyn painumaseurannan.

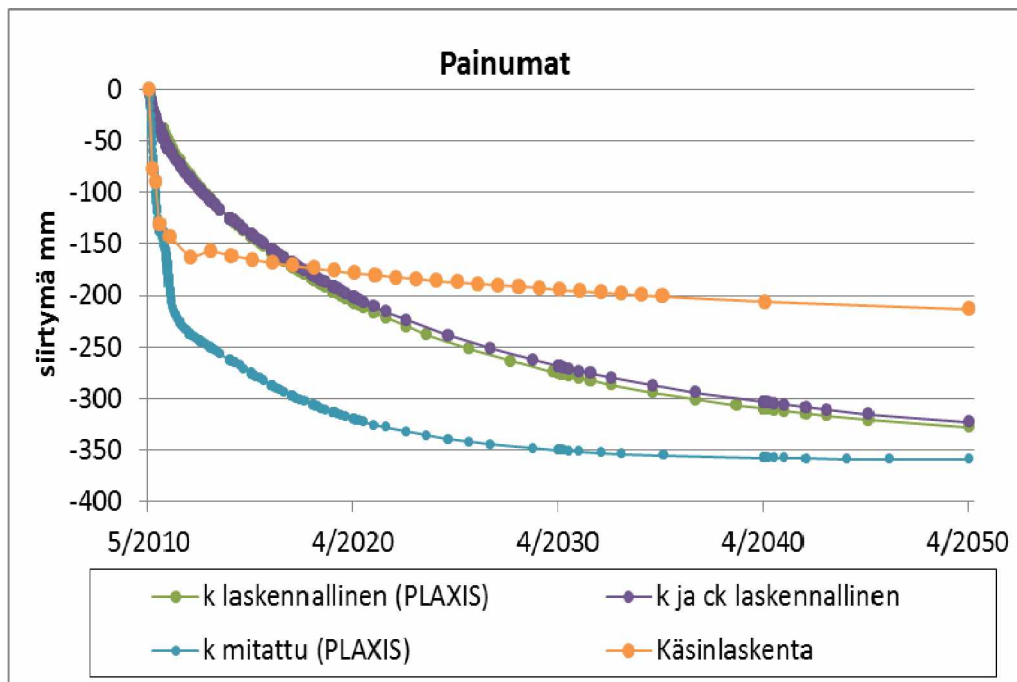
Numeerisella mallinnuksella saadut tulokset ovat suuruusluokkansa puolesta huomattavasti luotettavampia GeoCalc 2.4-ohjelman painumalaskentatuloksiin verrattuna. GeoCalc-ohjelman tulosten perusteella painumat olivat noin viisinkertaisia painumahavaintoihin verrattuna. Tangenttimoduulimenetelmällä käsin tehdyt laskemat antoivat tulokseksi noin puolitoistakertaisia painumia painumahavaintoihin verrattuna. Plaxis 2011-ohjelman painumat olivat jo tapahtuneiden painumien osalta lähimpänä painumahavaintojen tasoa (kuva 56), mutta edelleen suurempia kuin havaintopisteissä havaitut painumat. Plaxis-mallin tuottamien painumien voidaan todeta vastaavan suuruusluokaltaan pisteestä PT510 tehtyjä painumahavaintoja (kuva 56).



Kuva 56 Numeerisella mallinnuksella (Plaxis), käsinlaskennalla (tangenti-moduulimenetelmä, ensimmäinen 2kk karsittu) ja painumahavaintojen perusteella saadut aika-painumakäyrät välillä 5/2010–12/2012.

Vaikka Plaxis-mallin tuottamat painumat ovat aikavälillä 5/2010–5/2012 samaa suuruusluokkaa painumahavaintojen kanssa, ei aika-painumakuvaajan muoto kuitenkaan ole samanlainen (kuva 56). Painumahavainnoissa painumat tapahtuivat erittäin nopeasti pohjaveden ollessa alhaisella tasolla ja hidastuvat selvästi pohjaveden palautuessa nykyiselle tasolle. Plaxis-mallin tuloksissa pohjaveden palautuminen ei ole havaittavissa aika-painumakuvaajasta. Mallinnuksen tuottamat laskennalliset painumat tapahtuvat rauhallisemmin, eikä pohjaveden palautuminen aiheuta yhtä selkeää muutosta painumanopeudessa. Korkeammilla vedenläpäisevyyden arvoilla aika-painumakuvaajan muoto on lähempänä painumahavaintojen muotoa. Tällöin painumat ovat kuitenkin huomattavasti painumahavaintoja suurempia (kuva 56 ja 57).

Erot havaittujen ja laskennallisten painumien välillä voivat johtua useasta eri syystä. Ensimmäiseksi Plaxiksessa 2D-mallin geometriaa jouduttiin yksinkertaistamaan huomattavasti mallin hallittavuuden parantamiseksi ja laskennallisten ongelmien välttämiseksi. Toiseksi käytetyt laskentaparametrit ovat eri pisteistä tehtyjen laboratoriokokeiden tulosten perusteella laskettuja keskimääräisiä arvoja. Käyttämällä laskentaparametreina keskiarvoja, mediaania, maksimi- tai minimiarvoja saadaan hyvin erilaisia tuloksia. Kokonaispainuman kannalta erityisesti muunnetun kokoonpuristuvuusindeksin  $\lambda^*$  arvolla on suuri merkitys. Kolmanneksi muutokset pohjavedentasossa jouduttiin mallintamaan ajan suhteen lineaarisena ja jakamaan ne selkeisiin aika-askeliin, joissa ei ole otettu huomioon pohjavedenpinnantason luonnollista, vuodenaajoista johtuvaa vaihtelua. Kuormitus-, konsolidaatio- ja palautusjaksot ja näin ollen myös kuormitusolosuhteet ovat siis rajusti yksinkertaistettuja todellisuuteen nähden.



Kuva 57 Käsinlaskennalla (tangenttimoduulimenetelmä) ja numeerisella mallinnuksella (Plaxis) saadut aika-painuma -kuvaajat.

Herkkyystarkasteluissa havaittiin, että vedenläpäisevyydellä ja sen muutoksella on merkittävä vaikutus aika-painumakuvaajan muotoon. Valitsemalla vedenläpäisevyydelle arvo, joka on laskennallisten ja mitattujen arvojen väliltä ja pienentämällä vedenläpäisevyyden muutoksen parametria voi kuitenkin olla mahdollista saada aikaan aika-painumakäyrä, joka kuvaa havaittuja painumia painumanopeuden osalta. Ongelmana on kuitenkin kokonaispainuman voimakas yliarviointi. Numeerisella mallinnuksella saadut laskennalliset kokonaispainumat ovat noin 3–5-kertaiset tähän mennessä havaittuihin painumiin nähden. Kuvasta 57 voidaan havaita, että tangenttimoduulimenetelmällä tehty käsinlaskenta antaa kaikkein pienimmät jäljellä olevat painumat. Tangenttimoduulimenetelmän mukaan laskennallinen kokonaispainuma on noin 231 mm. Plaxiksen tuloksissa vastaava laskennallisen painuman arvo on noin 359 mm. Painumahavaintojen perusteella voidaan painumien todeta hidastuneen merkittävästi. Vaikka painumalaskelmat yliarvioivatkin lopullisen kokonaispainuman arvoa, voidaan laskelmien perusteella pitää todennäköisenä painumien jatkumista vielä pitkään. Käsinlaskennan mukaan painumat ovat täysin loppuneet vasta 200 vuoden kuluttua. Kuvasta 57 voidaan havaita vuoden 2050 kohdalla ilmenevän laskennallisten painumien lievää kasvua.

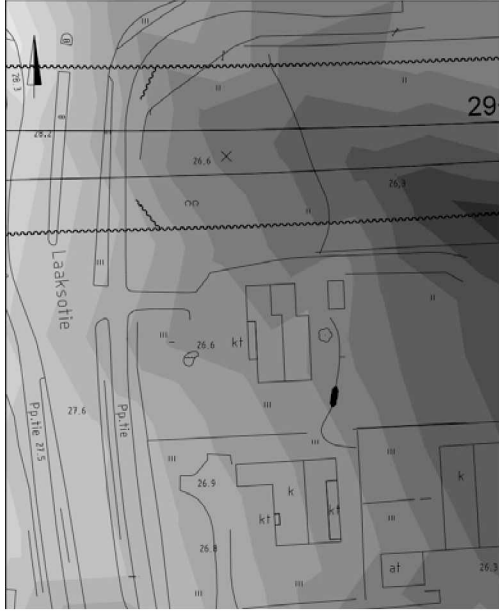
Vaikka esimerkkitapauksesta ei luotu 3D-mallia, voidaan 2D-mallin tulosten perusteella arvioida painumia myös poikkileikkauksen ulkopuolella. Mallinnuksen tulosten perusteella voidaan erottaa kaksi painumien suuruuteen vaikuttavaa tekijää: pehmeiden maakerrosten paksuus ja pohjavedenpinnantason alenema. Näin ollen voidaan olettaa, että alueilla joilla savikon paksuus ja kokoonpuristuvuusominaisuudet sekä pohjavedenpinnan alenema vastaavat leikkauksen A olosuhteita, myös tulevat painumat ovat samaa suuruusluokkaa.

Kuvassa 58 on esitetty savikerrosten kokonaispaksuus ja pohjaveden alenema vuoden 2010 aikana. Kuvassa 59 on esitetty vasemmalla puolella pinta, joka on saatu kertomalla savikerrosten kokonaispaksuus pohjaveden alenemalla. Oikealla puolella on painumahavaintojen perusteella luotu pinta maaperän painumista. Kuvissa tumma

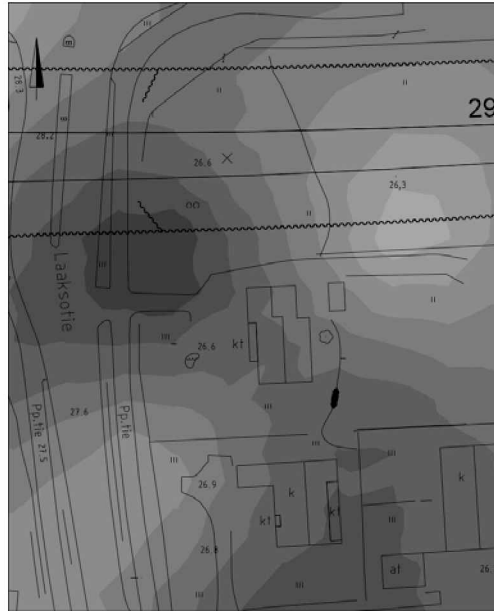


väri kuvaa paksua savikkoa tai suurta pohjavedenpinnan alenemaa tai painumaa. Lähestymistavan mukaan tummalla piirityneiden alueiden pitäisi siis painua enemmän kuin vaalealla piirityneiden alueiden.

Savikerrosten kokonaispaksuus

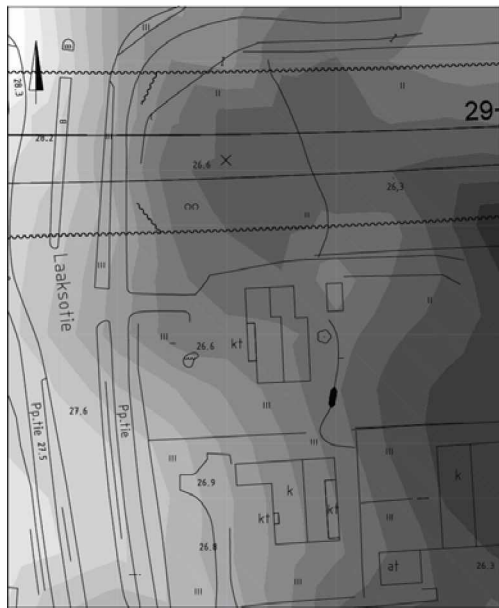


Pohjavedenpintojen erotus välillä 12/1009 - 12/2010

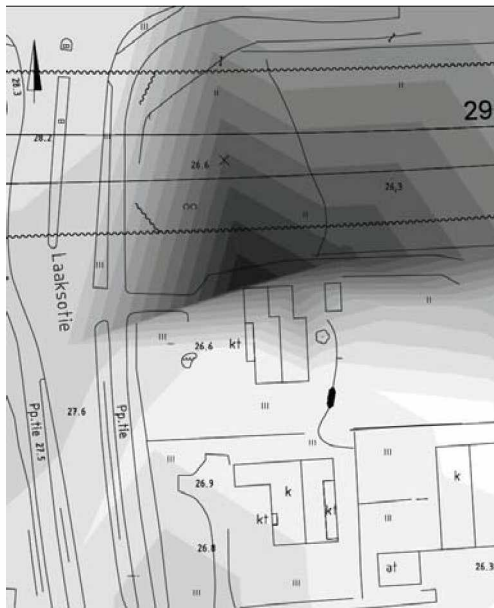


Kuva 58 Vasemmalla savikerrosten paksuus, oikealla pohjaveden alenema välillä 12/2009 ja 12/2010. Vasemmalla vaalea väri kuvaa ohutta ja tumma paksua savikerrosta, vastaavasti oikealla puolella vaalea väri kuvaa vähäisempää pohjavedenpinnantason laskua ja tumma väri merkittäväm-

Arvioidut painuma-alueet



Havaitut painuma-alueet



Kuva 59 Painumien jakautuminen Laaksotien itäpuolella. Mitä tummempi väri, sitä suurempia painumien oletetaan olevan.

Kuten kuvasta 59 nähdään, molemmissa kartoissa suurimmat painumat sijoittuvat samoille alueille, mutta painumaerot eivät vastaa toisiaan.



## 9 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset

Pohjavedenpinnan vaihtelusta aiheutuvia kuormia ei pystytty mallintamaan riittäväällä tarkkuudella GeoCalc 2.4. ohjelmassa. Tämä ei johdu käytettävistä analyyttisistä laskelmamenetelmistä, vaan käytettävissä olevan laskentaohjelman puutteista. Analyyttisiä painumalaskentamenetelmiä voidaan kuitenkin soveltaa perinteiseen käsinlaskentaan. Käsinlaskennassa haasteena on kuitenkin laskelmien työläys: laskelmat joudutaan suorittamaan erikseen jokaisen laskentaleikkauksen pisteestä ja jokaisesta laskentapisteen kerroksesta erikseen. Käsinlaskettaessa kerrosjako joudutaan pitämään harvempana kuin, eikä kuormituksen aikariippuvuutta voida huomioida samalla tarkkuudella kuin tietokoneella laskettaessa. Tästä johtuen myös käsinlaskennalla saadut tulokset ovat epätarkempia.

Elementtimenetelmän käyttöön perustuvassa Plaxis 2011 ohjelmassa esimerkitapaus mallinnettiin kolmella tavalla. Näistä mallinnusmenetelmistä vain yksi, pohjavedenpinnan moreenissa vallitsevan painetason syöttäminen ohjelmaan tuotti luotettavia tuloksia. Käytetty menetelmä vaatii, että käyttäjä on jo mallintanut pohjaveden käyttäytymisen erillisellä ohjelmalla tai tekee olettamuksia pohjaveden tulevasta käyttäytymisestä. Plaxis 2011 ohjelmassa pohjaveden virtauksen mallintamista on haasteellista yhdistää painumien mallintamiseen.

Analyyttisten menetelmien käyttökelpoisuuden edellytyksenä on GeoCalc-ohjelmiston kehittäminen siten, että ohjelmaan tulee mahdolliseksi syöttää syvyyden funktiona kasvavia kuormia. Ohjelman tulisi myös kyetä laskemaan painumat myös alimman kuormitustason yläpuoliselta osalta.

Numeerisen mallinnuksen osalta käytössä olleen ohjelmiston osalta pohjaveden virtausanalyysi ja painumalaskenta oli haastavaa yhdistää. Mikäli tämä puute saadaan korjattua Plaxis-ohjelmistosta, on mallia mahdollista kehittää laskemaan pohjavedenpinnan pumppausmäärien tai kaivannon kuivatuksen perusteella sen manuaalisen syöttämisen sijaan. Tämä nopeuttaisi tarkasteluja, joissa pyritään selvittämään esimerkiksi pohjaveden kaivannosta pumppaamiselle sallittavia raja-arvoja pohjavedenpinnalle sallitulla vaihteluvälillä.

## Lähdeluettelo

Barden, L. 1968. Primary and secondary consolidation of Clay and Peat. *Geotechnique* vol. 18, no.1, s.1-24

Claesson, P. 2003. Long term settlements in soft clays. Göteborg, Department of geotechnical engineering, Chalmers University of Technology.

GeoCalc. 2012. Novapoint CeoCalc 2.4. [viitattu 25.3.2013]. Saatavissa: Vianova Systems Finland Oy, <http://docs.vianova.fi/GeoCalc/2.4/index.html>

Geologian tutkimuskeskus. 2013. Geologiset aineistot. [viitattu 24.10.2013]. saatavissa: GTK, <http://geomaps2.gtk.fi/geo/>

Helenelund, K. 1951. Om konsolidering och sättning av belastade marklager. Maa- ja vesiteknillisiä tutkimuksia. Helsinki.

Janbu, N. 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Europäische Baugrundtagung 1963*, Wiesbaden. Myös julkaisussa *Bulletin 1*, Geotechnical Division, Norwegian Institute of technology.

Janbu, N. 1969. Computation of stress- and time dependent settlement for structures on clay. *Academy of science and arts of bosnia and herzegovina: Special publications*. vol 19. The international symposium on civil engineering structures resting on soil and rocks. s. 135-142

Janbu, N. 1970. *Grunnlag I geoteknikk*. Trondheim, Tapirforlag.

Janbu, N. 1998. Sediment deformations. *Bulletin 35*. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering.

Korhonen, K.-H., Gardemeister, R. & Tammirinne, M. 1974. *Geotekninen maalajiluokitus*. Espoo, VTT.

Korhonen, K.-H. 1985a. Muodonmuutosominaisuudet. Teoksessa: RIL 157-1. *Geomekaniikka 1*. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. 479 s. ISBN 951-758-086-X

Korhonen, K.-H. 1985b. Rakenteiden painuminen. Teoksessa: RIL 157-1. *Geomekaniikka 1*. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. 479 s. ISBN 951-758-086-X

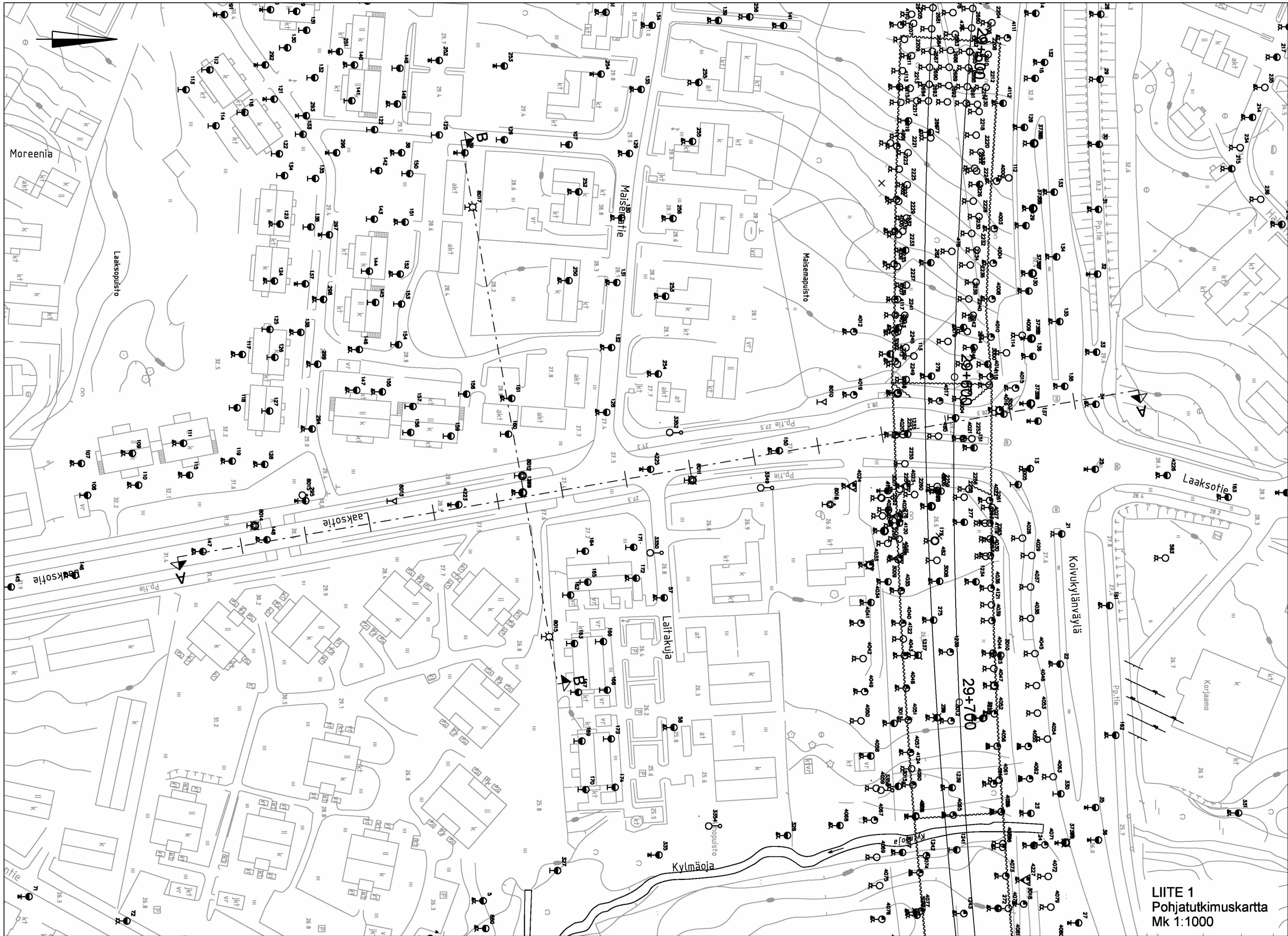
Larsson, R. Bengtsson, P.-E. & Eriksson, L. 1997. Prediction of settlements of embankments on soft, fine-grained soils. Calculation of settlements and their course with time. Linköping, Swedish Geotechnical Institute. ISSN 0281-7578.

Leroueil, S. & Magnan, S-P. & Tavenas, F. 1990. *Embankments on Soft Clays*. Chinchester, Ellis horwood Limited. 365 s. ISBN 0-13-275736-2

Länsivaara, T. 2000. Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi. Tielaitoksen selvityksiä 44/2000. Helsinki, Tielaitos. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-681-2

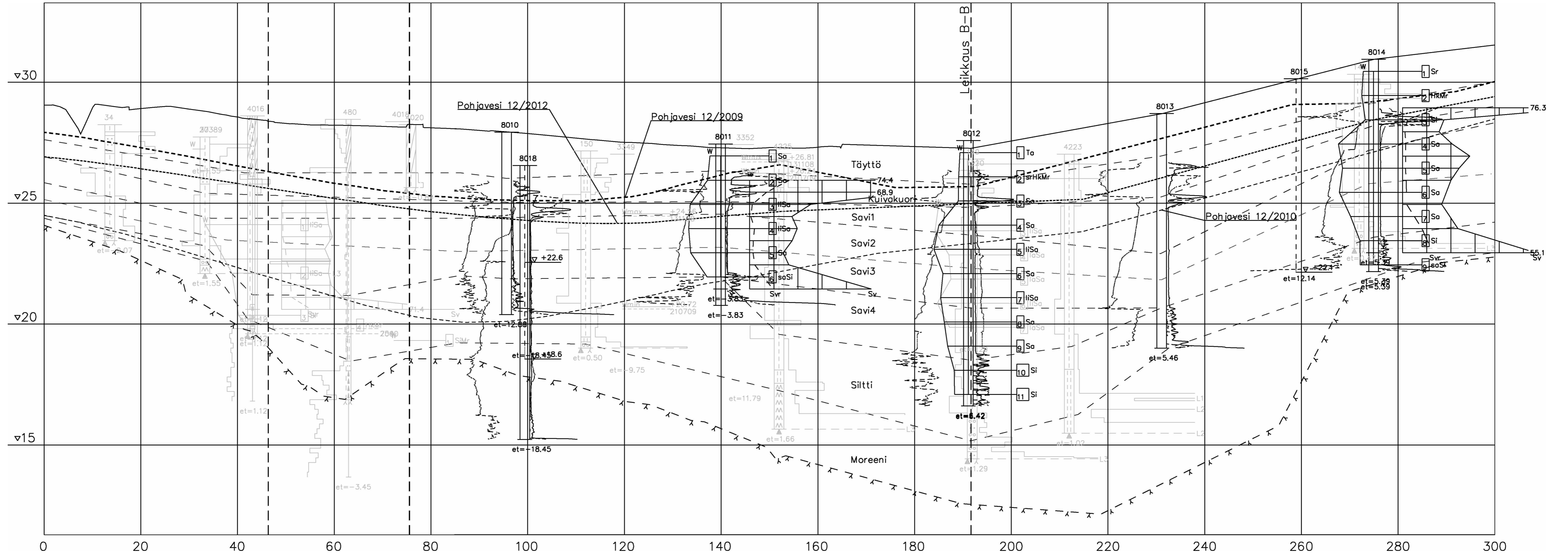
- Länsivaara, T. 2001. Painuman ennustaminen painumahavaintojen perusteella. Tiehallinnon selvityksiä 49/2001. Helsinki, Tiehallinto.
- Mesri, G & Godlewski, P. M. 1977. Time- and Stress-Compressibility Interrelationship. Journal of the geotechnical Engineering Division, ASCE vol.103. s.417-430
- Ohde, J. 1939. Zur theorie der Druckverteilung im Baugrund. Bauingenieur 20 (1939).
- Ortiago, J. 1995. Soil mechanics in the light of critical state theories. Rotterdam, Balkema. ISBN 90 5410 194 6
- Plaxis. 2011a. Plaxis Material Models Manual. [viitattu 2.4.2013] Saatavilla: <http://www.plaxis.nl/files/files/2D2011-3-Material-Models.pdf>
- Plaxis. 2011b. Plaxis Reference Manual. [viitattu 5.6.2013] Saatavilla: <http://www.plaxis.nl/files/files/2D2011-2-Reference.pdf>
- Potts, D. M. & Zdravkovic, L. 1999. Finite element analysis in geotechnical engineering. London, Thomas Telford Ltd.
- SFS 2011. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus. SFS-EN 1997-2 + AC. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS RY. ISBN 978-952-5650-59-4.
- Statens geotekniska institut. Information 13. Sättningsprognoser för bankar på lös finkornig jord. Linköping 1994. 51s.
- Suomen ympäristökeskus. 2012. Pohjavesi [viitattu 2.4.2013] Saatavilla: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=321187&lan=fi>
- Taylor, D. W. 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. New York, John Wiley Sons.
- Terzaghi, K. & Peck, R. P. 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice. New York, John Wiley and Sons.
- Vepsäläinen, P. & Takala, J. 2004. Settlement theory manual. [viitattu 22.2.2013] Saatavilla: Novapoint GeoCalc <http://docs.vianova.fi/GeoCalc/2.4/index.htm>
- Wood, D. M. 1990. Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge, Cambridge University Press. 447s. ISBN 0-521-33782-8





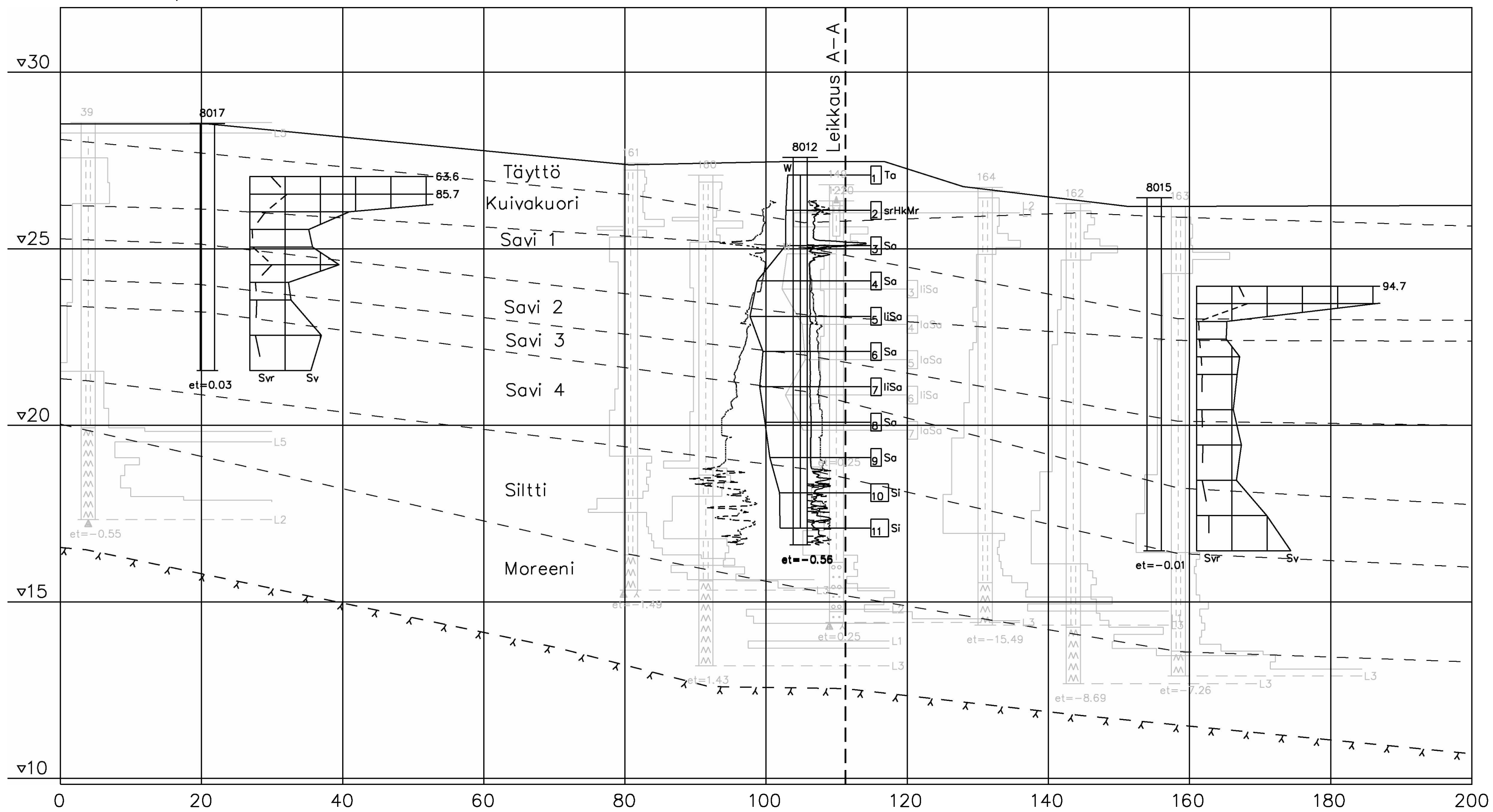
LIITE 1  
Pohjatutkimuskartta  
Mk 1:1000

A-A 1:100 / 1:500





B-B 1:100 / 1:500





**Aalto-yliopisto**  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Janika Alanen

## **Laaksotien geotekniset laboratoriotutkimukset**

Essoossa 4.11.2013  
Ohjaaja: Matti Lojander

## Sisällysluettelo

|  |    |
|--|----|
| Sisällysluettelo.....                                  | 1  |
| Merkinnät .....  | 2  |
| 1 Johdanto.....  | 4  |
| 2 Kohde .....  | 5  |
| 3 Luokituskokeet.....                                  | 8  |
| 3.1 Tutkimukset ja näytteenotot.....                   | 8  |
| 3.2 Plastisuusrajat ja vesipitoisuus .....             | 8  |
| 3.3 Rakeisuus .....                                    | 9  |
| 3.4 Kiintotiheys ja humuspitoisuus .....               | 15 |
| 4 Ödometrikokeet.....                                  | 17 |
| 4.1 Portaittaiset ödometrikokeet.....                  | 17 |
| 4.2 Vedenläpäisevyyden määrittäminen ödometrillä ..... | 26 |
| 5 Kolmiakselikokeet.....                               | 29 |
| 5.1 Näytteet ja koetyypit .....                        | 29 |
| 5.2 Suljetut kokeet .....                              | 30 |
| 5.3 Avoimet kokeet .....                               | 33 |
| 6 Nopeuden vaikutus kolmiakselikokeessa .....          | 37 |
| Lähdeluettelo .....                                    | 38 |

## Merkinnät

|                         |                     |   |
|-------------------------|---------------------|---|
| $C_{\alpha}$            | [-]                 | sekundääripainuman kerroin huokosluvun mukaan                   |
| $C_{\alpha\varepsilon}$ | [%]                 | sekundääripainuman kerroin muodonmuutoksen mukaan               |
| $C_c$                   | [-]                 | kokoonpuristuvuusindeksi  |
| $C_r$                   | [-]                 | palautus- ja toistokuormituksen kokoonpuristuvuusindeksi        |
| $E$                     | [kPa]               | kimmomoduuli  |
| $E_{ur}$                | [kPa]               | sekanttimoduuli, toistokuormitus                                |
| $E_{50}$                | [kPa]               | sekanttimoduuli   |
| $F$                     | [%]                 | hienousluku   |
| $H_k$                   | [%]                 | hehkutushäviö   |
| $H_m$                   | [%]                 | humuspitoisuus  |
| $I_C$                   | [-]                 | konsistenssiluku  |
| $I_L$                   | [-]                 | juoksevuusluku  |
| $I_P$                   | [-]                 | plastisuusluku  |
| $K_0$                   | [-]                 | lepopaine kerroin   |
| $K_v$                   | [%]                 | kidevesi  |
| $M$                     | [kPa]               | kokoonpuristuvuusmoduuli  |
| $S_t$                   | [-]                 | häiriintymisherkkyys  |
| $S_r$                   | [%]                 | kyllästyneisyysaste   |
| $e_0$                   | [-]                 | huokosluku  |
| $c$                     | [kPa]               | koheesio  |
| $c'$                    | [kPa]               | tehokas koheesio  |
| $c_k$                   | [                   | vedenläpäisevyyden muutos (PLAXIS)                              |
| $c_u$                   | [kPa]               | maan leikkauslujuus   |
| $c_{ur}$                | [kPa]               | maan häiritty leikkauslujuus                                    |
| $c_v$                   | [m <sup>2</sup> /a] | konsolidaatiokerroin  |
| $k$                     | [m/s]               | vedenläpäisevyydenkerroin                                       |
| $k_1$                   | [-]                 | murtosuoran kulmakerroin  |
| $m$                     | [-]                 | tangenttimoduuli  |
| $m_a$                   | [g]                 | pyknometrin ja veden yhteenlaskettu massa                       |
| $m_b$                   | [g]                 | pyknometrin, veden ja näytteen yhteenlaskettu massa             |
| $m_k$                   | [g]                 | kuivan näytteen massa   |
| $n$                     | [%]                 | huokoisuus  |
| $s$                     | [mm]                | painuma   |
| $s_0$                   | [mm]                | alkupainuma   |
| $s_k$                   | [kPa]               | suljettu leikkauslujuus   |
| $w$                     | [%]                 | vesipitoisuus   |
| $w_L$                   | [%]                 | juoksuraja  |
| $w_P$                   | [%]                 | plastisuusraja  |
| $z$                     | [m]                 | syvyys  |
| $\alpha_s$              | [-]                 | sekundääripainuman kerroin                                      |
| $\beta$                 | [-]                 | tangenttimoduulimenetelmän jännityseksponentti                  |
| $\beta_k$               | [-]                 | vedenläpäisevyyden muutos                                       |
| $\gamma$                | [kPa]               | maan tilavuuspaino  |
| $\gamma'$               | [kPa]               | maan tehokas tilavuuspaino                                      |
| $\gamma_w$              | [kPa]               | veden tilavuuspaino   |
| $\varepsilon$           | [%]                 | muodonmuutos  |
| $\kappa$                | [-]                 | paisumisvaiheen suoran kaltevuus $\ln p'$ -v –koordinaatistossa |

|                |                      |  |
|----------------|----------------------|--|
|                |                      | (Cam Clay malli)   |
| $\kappa^*$     | [-]                  | muunnettu paisumisindeksi (Plaxis)   |
| $\lambda$      | [-]                  | normaalisti konsolidoituneen tilan suoran kaltevuus $\ln p'-v$ -koordinaatistossa (Cam Clay malli) |
| $\lambda^*$    | [-]                  | muunnettu kokoonpuristuvuusindeksi (Plaxis)  |
| $\mu^*$        | [-]                  | muunnettu hiipumaindeksi (Plaxis)  |
| $\rho$         | [g/cm <sup>3</sup> ] | tiheys   |
| $\rho_s$       | [g/cm <sup>3</sup> ] | kiintotiheys   |
| $\rho_w$       | [g/cm <sup>3</sup> ] | veden tiheys   |
| $\sigma$       | [kPa]                | jännitys   |
| $\sigma'$      | [kPa]                | tehokas jännitys   |
| $\sigma_p'$    | [kPa]                | tehokas esikonsolidaatiojännitys   |
| $\sigma_{v0}'$ | [kPa]                | tehokas vallitseva vertikaalijännitys  |
| $\nu$          | [-]                  | Poissonin luku   |
| $\varphi$      | [°]                  | kitkakulma   |
| OCR            |                      | Over Consolidation Ratio   |
| POP            |                      | Pre-Overburden Pressure  |

# 1 Johdanto

Tämä erikoistyö tehtiin Aalto yliopistossa, Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Työ liittyy Liikenneviraston tilaamaan ja Pöyry Finland Oy:ssä tehtyyn diplomityöhön pohjaveden alenemisesta aiheutuvien painumien mallintamisesta pehmeikkökohteissa. Erikoistyössä määritettyjä parametreja on käytetty diplomityössä painumalaskelmien laskentaparametreina.

Tässä erikoistyössä on esitelty Kehäradan itäisen suuaukon alueelta otetuista maaperä-  
näytteistä tehdyt laboratoriokokeet ja niiden tulokset, sekä analysoitu kolmiakksiaaliko-  
keiden osalta leikkauskuormituksen nopeusvaikutusta.



## 2 Kohde

Kohde sijaitsee Vantaalla, Ruskeasanan kaupunginosassa. (Kuva 1) Laboratoriotutkimukset on suoritettu Laaksotien varrella sijaitsevista näytepisteistä 8011, 8012 ja 8014 (Kuva 1).

Kairausten perusteella alueen maaperä on rakennekerrosten tai täytön alapuolella savea tai silttiä 5...11 metrin paksuudelta. Savi ja silttikerrosten alapuolella sijaitsee tiivis moreenikerros. Alueen pohjoisosassa pohjavedenpinta sijaitsi vuonna 2009 pohjavesihavaintojen perusteella noin 2 metriä maanpinnan alapuolella. Kehäradan itäisen suuaukon rakennustöiden alettua vuonna 2010, havaittiin pohjavedenpinnan laskeneen noin 3,5...5 metriä alkuperäisestä tasosta. Nykytilassa pohjavedentaso on 0...2,5 metriä vuoden 2009 tason alapuolella.



Kuva 1 Suoritetut pohjatutkimukset

Taulukoihin 1-3 on koottu suoritettavat laboratoriotutkimukset ja koenumerot.





## 3 Luokituskokeet

### 3.1 Tutkimukset ja näytteenotot

Kaikki näytteet punnittiin ja näytteiden laatu ja väri tarkasteltiin silmämääräisesti ennen laboratoriokokeita. Näytteet todettiin silmämääräisesti laadultaan kelpollisiksi laboratoriokokeita varten. Kaikista näytteistä määritettiin tiheys  $\rho$  ja tilavuuspaino  $\gamma$ . Pisteistä 8012 ja 8014 otetuista näytteistä määritettiin vesipitoisuus, sekä kartiokokeella yksipisementelmää käyttäen suljettu- ja häiritty leikkauslujuus  $c_u$  ja  $c_{ur}$  teknisiä spesifikaatioita noudattaen (CEN ISO/TS 17892-1, 2007; CEN ISO/TS 17892-6, 2007). Kartiokokeen perusteella laskettiin näytteiden häiriintymisherkkyys  $S_t$  ja juoksuraja  $w_L$ .

Koetulosten perusteella määritettiin rakeisuus, humuspitoisuus ja kiintotiheys  $\rho_s$  useimmilta syvyyksiltä teknisten spesifikaatioiden mukaisesti (CEN ISO/TS 17892-3, 2007; CEN ISO/TS 17892-4, 2007).

### 3.2 Plastisuusrajat ja vesipitoisuus

Plastisuusrajoja ovat kartiokokeella määritettävä juoksuraja  $w_L$  ja kierityskokeella määritettävä plastisuusraja  $w_P$ . Tässä työssä ei tehty kierityskokeita, joten plastisuusrajoista määritettiin vain juoksurajat. Juoksu- ja plastisuusrajojen perusteella voidaan määrittää plastisuusluku  $I_p$ , juoksevuusluku  $I_L$  ja konsistenssiluku  $I_C$ , jotka kuvaavat maaperän plastista aluetta. (CEN ISO/TS 17892-12, 2007)

Määritetyt plastisuusrajat, sensitiivisyys ja vesipitoisuus on esitetty taulukossa 2. Plastisuusrajat ja vesipitoisuudet määritettiin myös ödometrikoenäytteille ödometrikokeen suorittamisen jälkeen. Ödometrikoenäytteiden plastisuusrajat ja vesipitoisuudet on esitetty luvussa 3.

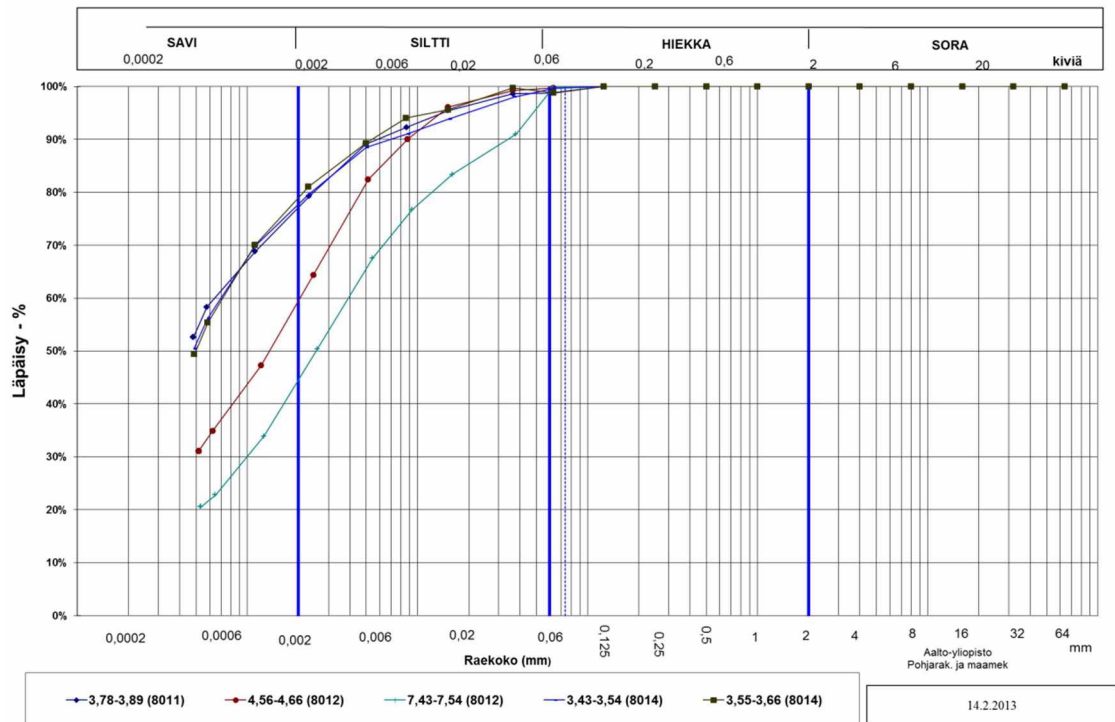
Taulukko 4 Plastisuusrajat, sensitiivisyys ja vesipitoisuus

| Piste<br>n:o | Levy<br>n:o | Syvyys<br>z<br>m | Hienous-<br>luku<br>KARTIO<br>F (=w <sub>L</sub> ) | Suljettu<br>leikk.<br>lujuus<br>s <sub>k</sub> | Kiinto-<br>tiheys<br>ρ <sub>s</sub><br>g/cm <sup>3</sup> | Häiriin-<br>tymis-<br>herk-<br>kyys<br>H <sub>3</sub> /H <sub>1</sub> =S <sub>t</sub> | Vesi-<br>pitoi-<br>suus<br>w<br>% |
|--------------|-------------|------------------|--|--|--|---|-----------------------------------|
| 8011         | DE1         | 3,78–4,00        | 97,6   | 20,7   | 2,76   | 15,1  | 104                               |
| 8012         | DE1         | 3,78–4,01        | 97,6   | 21,7   | 2,78   | 16,1  | 104                               |
| 8011         | DE2         | 5,95–6,00        | ei onnistu   | 45,3   | 2,71   | -   | 26,6                              |
| 8012         | 152         | 3,23–3,26        | -  | -  | -  | -   | -                                 |
| 8012         | 166         | 3,37–3,40        | 72,5   | 22,1   | -  | 17,4  | 78,0                              |
| 8012         | 308         | 4,20–4,23        | 52,8   | 20,3   | -  | 13,8  | 55,8                              |
| 8012         | 415         | 4,37–4,40        | 85,3   | 33,9   | 2,73   | 15,7  | 82,2                              |
| 8012         | 416         | 4,54–4,57        | -  | 24,4   | 2,74   | -   | 50,0                              |
| 8012         | 361         | 5,37–5,40        | 110  | 20,9   | -  | 9,68  | 105,0                             |
| 8012         | 411         | 5,54–5,57        | 54,8   | 18,3   | -  | 9,84  | 54,3                              |
| 8012         | 341         | 7,37–7,40        | 78,6   | 36,0   | -  | 17,1  | 75,6                              |
| 8012         | 348         | 8,37–8,40        | 48,5   | 22,9   | -  | 13,7  | 48,9                              |
| 8014         | 3           | -                | -  | -  | -  | -   | -                                 |
| 8014         | 21          | 3,37–3,40        | 90,26  | 22,7   | 2,79   | 21,0  | 101,42                            |
| 8014         | 190         | 3,55–3,66        | -  | -  | 2,76   | -   | -                                 |
| 8014         | 311         | 4,37–4,40        | 142  | 28   | -  | 7,71  | 109                               |
| 8014         | 208         | 5,20–5,23        | 64,5   | 26   | -  | 9,81  | 58,6                              |
| 8014         | 434         | 5,37–5,40        | 77,2   | 26,8   | -  | 18,2  | 80,42                             |
| 8014         | 800         | 7,37–7,40        | 46,93  | 20,9   | -  | 17,71   | 51,00                             |

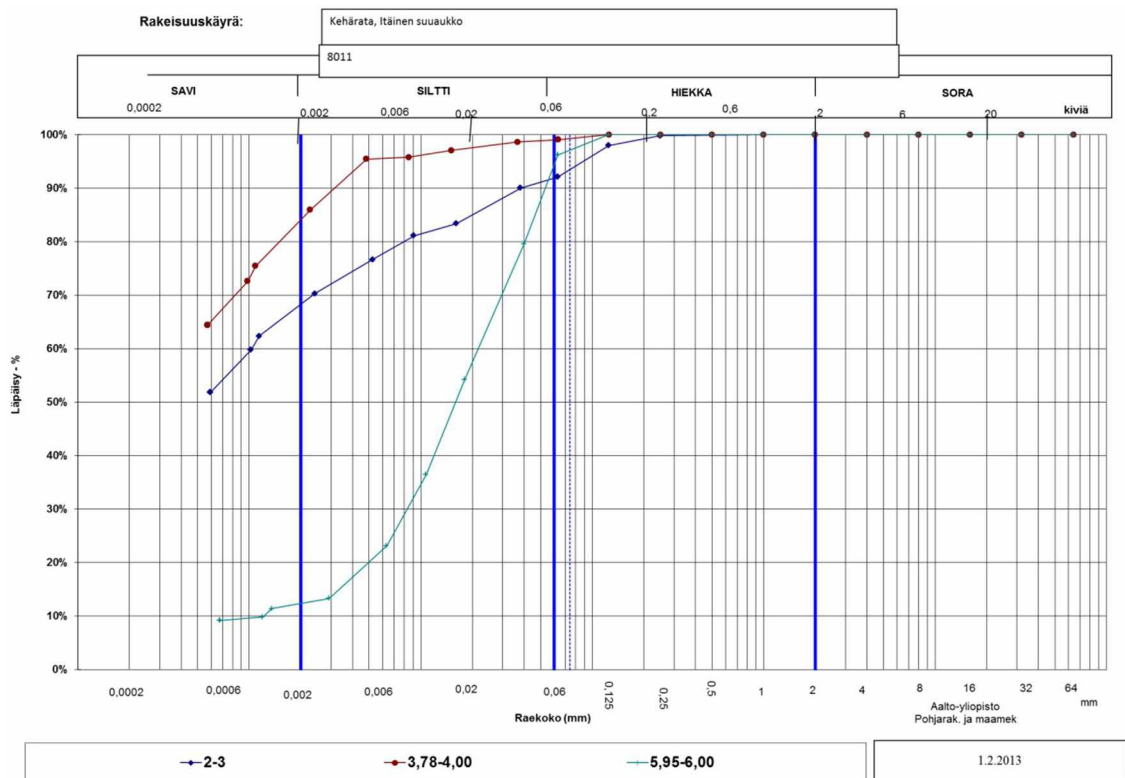
### 3.3 Rakeisuus

Rakeisuuden määrittämiseen käytettiin teknisten spesifikaatioiden (CEN ISO/TS 17892-1, 2007) mukaisesti seulontaa, sekä hienorakeiselle osalle areometrimenetelmää. Kuvissa 2-5 on esitetty kolmiakσιαalikoepisteistä suoritettuja rakeisuuskäyriä. Kaikkien kokeiden rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 2.

Suomessa on yleisesti sovellettu kaivuluokitustutkimuksen yhteydessä vuonna 1971 kehitettyä geoteknistä maalajiluokitusta (GEO-luokitus) (Korhonen et al. 1974). Geotekninen maalajiluokitus otettiin käyttöön vuonna 1974 ja se on ollut käytössä kunnes Eurokoodin mukainen maalajiluokitus (SFS, 2008) korvasi sen vuonna 2008. Geoteknistä maalajiluokitusta käytetään kuitenkin yhä eurokoodin mukaisen luokituksen rinnalla.

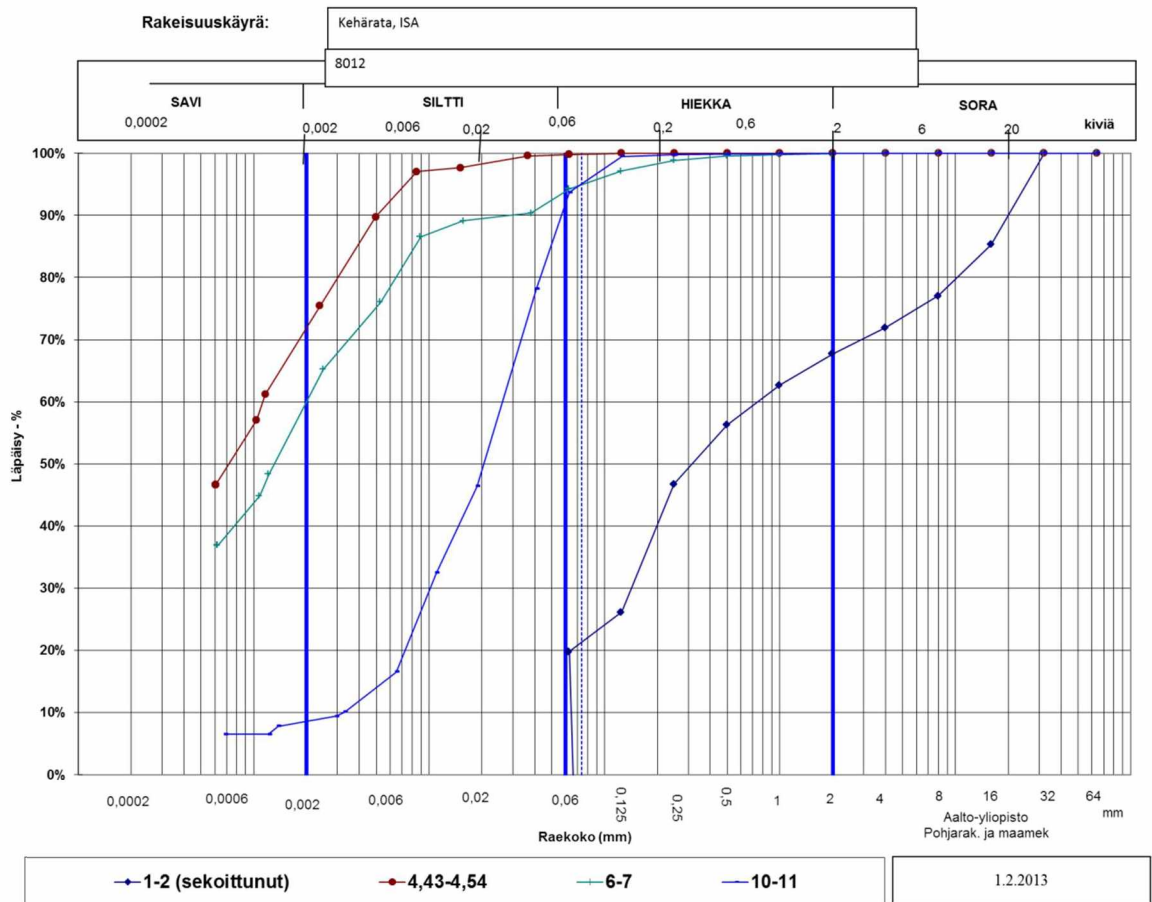


Kuva 2 Rakeisuuskäyrät kolmiakσιαalikoepisteistä

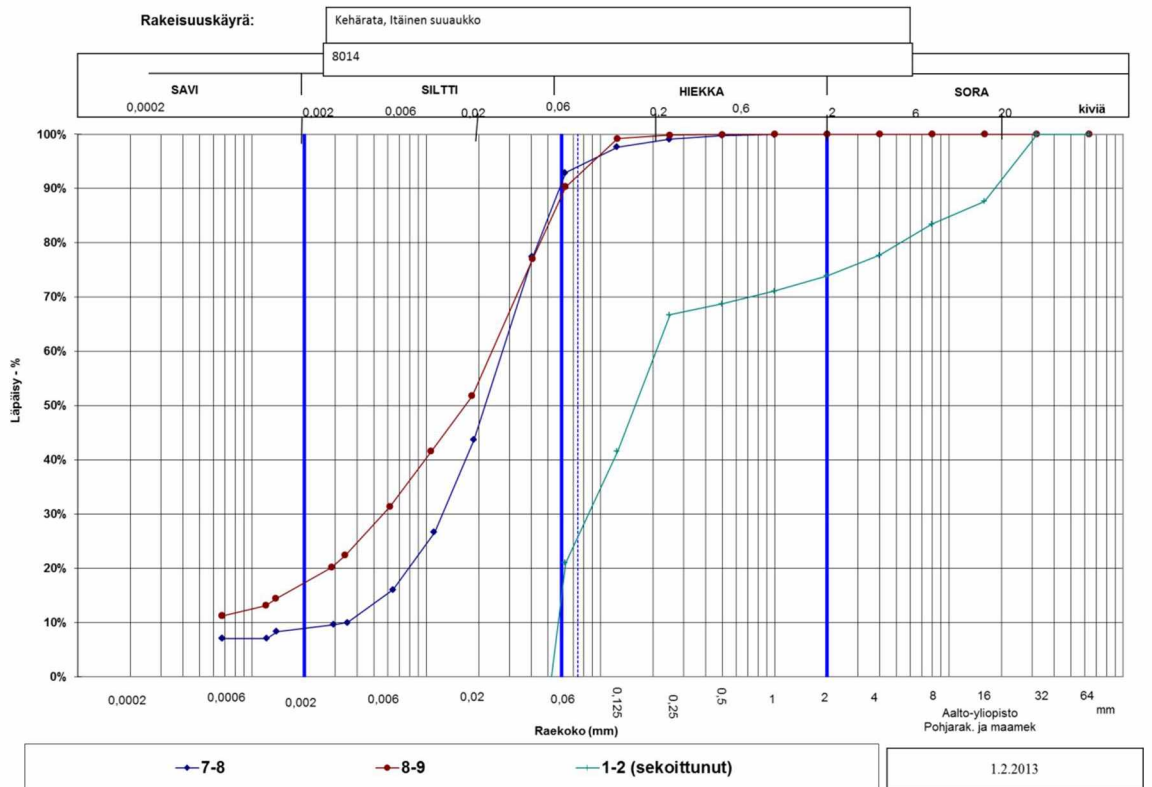


Kuva 3 Rakeisuuskäyrät pisteestä 8011





Kuva 4 Rakeisuuskäyrät pisteestä 8012



Kuva 5 Rakeisuuskäyrät pisteestä 8014

Geotekninen maalajiluokitus (Korhonen et al. 1974) jakaa maalajit ryhmiin geologisen syntyvän, humuspitoisuuden ja raekoostumuksen perusteella. Näitä ryhmiä ovat: eloperäiset-, hienorakeiset-, karkearakeiset- ja moreenimaalajit. Taulukossa 5 on esitetty maalajien nimeäminen raekoon mukaan. Maalajille voidaan antaa myös lisänimi kuvaamaan paremmin maalajin koostumusta, mikäli maaperässä on maalajin nimen antavan lajitteen ohella 30 % jotain muuta lajitetta. Tästä poikkeuksena savi, sillä yli 30 % savipitoisuus tekee maalajista liihan saven. Tästä johtuen lisänimi savinen annetaan maalajeille, joissa on 10–30 % savea. (Jääskeläinen 2009, Rantamäki et al. 1982)

**Taulukko 5 Geotekninen maalajiluokitus. Maalajit (Korhonen et al. 1974)**

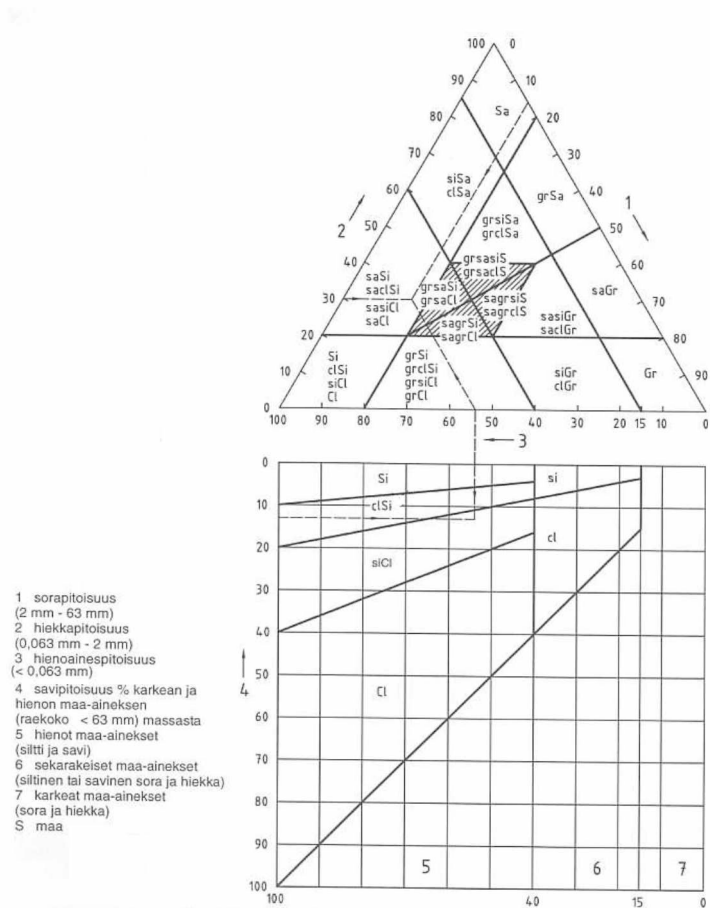
| Maalajiryhmä            | Maalaji       | Lyhenne | Lajitepitoisuus, paino- % |            |       | Raekoko d50, mm |
|-------------------------|---------------|---------|---------------------------|------------|-------|-----------------|
|                         |               |         | Savi                      | Hienoaines | Sora  |                 |
| Eloperäiset maalajit    | Turve         | Tv      |                           |            |       |                 |
|                         | Lieju         | Lj      |                           |            |       |                 |
| Hienorakeiset maalajit  | Savi          | Sa      | ≥ 30                      |            |       |                 |
|                         | Siltti        | Si      | < 30                      | ≥ 50       | < 5   | ≤ 0,06          |
| Karkearakeiset maalajit | Hiekka        | Hk      |                           | < 50       | ≥ 50  | > 0,06...2      |
|                         | Sora          | Sr      |                           | < 5        | > 50  | > 2...60        |
| Moreeni maalajit        | Sittimoreeni  | SiMr    |                           | ≥ 50       | ≥ 5   | ≤ 0,06          |
|                         | Hiekkamoreeni | HkMr    |                           | 5...50     | 5..50 | > 0,06...2      |
|                         | Soramoreeni   | SrMr    |                           | ≥ 5        | > 50  | > 2             |

Geoteknisen maalajiluokituksen maalajirajat vastaavat pitkälti muualla maailmassa yleisesti käytettyjä maalajiluokituksia. Eurokoodin (SFS EN 1997-2) mukaisen EN ISO 14688-2-luokituksen myötä on kuitenkin pyritty yhtenäistämään eri maiden maalajiluokituksia. Merkittävimmät erot eurokoodin ja geoteknisen maalajiluokituksen välillä ovat moreenimaalajien puuttuminen eurokoodista, sekä plastisuus-ominaisuuksien käyttäminen hienorakeisten maalajien luokituksessa.

EN ISO 14688-2-luokituksessa maalajien nimeämiseen käytetään perinteisen rakeisuus-käyrän sijaan nimen määrittämissä kolmiota (kuva 6), josta maalajit nimetään lajitepitoisuuksien mukaan. Eri maalajien väliset raekorajat eivät kuitenkaan muutu merkittävästi. Uuden luokituksen mukaiset maalajit on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6 Maalajiluokitus. (SFS 2008 179-1)

| Kriteeri  | Maa-ainesryhmä         | Määrän määrittäminen             | Nimeäminen saman ominaisuuden omaaviin ryhmiin                             |                                    | Alaluokituksen käytön tarve   |  |
|---|------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|---|--|
| Kostean maa-aineksen rakeet eivät tartu toisiinsa | hyvin karkea           | useimmat rakeet > 200 mm         | Bo   | xBo                                | Edellyttää erityistä harkintaa  |  |
|   |                        | useimmat rakeet > 63 mm          | Co   | boCo coBo<br>saCo, grCo sagrCo     |   |  |
|   | karkea                 | useimmat rakeet > 2 mm           | Gr   | cosaGr                             | Raekoko (rakeisuus)<br>Rakeisuuskäyrän muoto<br>Suhteellinen tiivys<br>Läpäisevyys                        |  |
|   |                        | useimmat rakeet > 0,063 mm       | Sa   | siGr, clGr<br>orSa                 | (Mineralogia)<br>(Raemuoto)   |  |
| Kostean maa-aineksen rakeet tarttuvat toisiinsa   | hieno                  | alhainen plastisuus, paisuva     | Si   | saSi sagrSi<br>sacSi               | Plastisuus<br>Vesipitoisuus<br>Lujuus, sensitiivisyys<br>Kokoonpuristuvuus, jäykkyys<br>(Savimineralogia) |  |
|   |                        | plastinen, ei paisuva            | Cl   | clSi, siCl<br>sagrCl<br>orSi, orCl |   |  |
| Tumma väri, alhainen tiheys                       | orgaaninen             |                                  | Or   | saOr, siOr clOr                    | Edellyttää erityistä harkintaa  |  |
| Ei luonnollinen                                   | keinotekoinen maapohja | rakennettu täyte                 | Mg   | xMg                                | Tehty aines   | Edellyttää erityistä harkintaa   |
|   |                        |                                  |  |                                    | Uudelleen sijoitetut luonnonainekset  | Kuten luonnon maa-aineksille   |
| <b>Tunnusten tulkinta-avain</b>                   |                        |                                  |  |                                    |   |  |
| <i>Maa-aines</i>                                  | <i>Päänimike</i>       | <i>Toinen tai kolmas aineosa</i> |  |                                    |   | Tapaukset, jotka vaativat erityistä harkintaa, tulisi luokitella kansallisten tai hankekohtaisten vaatimusten mukaisesti |
| Lohkareet   | Bo                     | bo                               |  |                                    |   |  |
| Kivet   | Co                     | co                               |  |                                    |   |  |
| Sora  | Gr                     | gr                               | Gr(gr) ja Sa(sa) voidaan jakaa hienoon F(f), keski- M(m) tai karkeaan C(c) |                                    |   |  |
| Hiekka  | Sa                     | sa                               |  |                                    |   |  |
| Siitti  | Si                     | si                               |  |                                    |   |  |
| Savi  | Cl                     | cl                               |  |                                    |   |  |
| Humus/Orgaaninen                                  | Or                     | or                               |  |                                    |   |  |
| Keinotekoinen maa                                 | Mg                     | -                                |  |                                    |   |  |
|   |                        | x                                |  | Mikä tahansa osien yhdistelmä      |   |  |



Kuva 6 Maalajiluokitus rakeisuuden perusteella. (SFS 2008 179-1)

Taulukkoon 7 on koottu maanäytteiden geoteknisen maalajiluokituksen mukaiset maalajit.

Taulukko 7 Näytteiden maalajit geoteknisen maalajiluokituksen mukaan

| Piste<br>n:o | Syvyys<br>z (m) | Maalaji | Näyte          |
|--------------|-----------------|---------|----------------|
| 8011         | 2–3             | liSa    | häiriintynyt   |
| 8011         | 3,78–3,40       | liSa    | häiriintymätön |
| 8011         | 5,95–6,00       | saSi    | häiriintymätön |
| 8012         | 1–2             | HkMr    | häiriintynyt   |
| 8012         | 4,20–4,23       | liSa    | häiriintymätön |
| 8012         | 4,43–4,54       | liSa    | häiriintymätön |
| 8012         | 4,56–4,66       | liSa    | häiriintymätön |
| 8012         | 6–7             | liSa    | häiriintynyt   |
| 8012         | 7,43–7,54       | laSa    | häiriintynyt   |
| 8012         | 10–11           | Si      | häiriintynyt   |
| 8014         | 1-2             | HkMr    | häiriintynyt   |
| 8014         | 3,43–3,54       | liSa    | häiriintymätön |
| 8014         | 3,55–3,66       | liSa    | häiriintynyt   |
| 8014         | 7–8             | Si      | häiriintynyt   |
| 8014         | 8–9             | saSi    | häiriintynyt   |

### 3.4 Kiintotiheys ja humuspitoisuus

Kiintotiheyden määrittämiseen käytettiin teknisten spesifikaatioiden (CEN ISO/TS 17892-3, 2007) mukaisesti pyknometria. Kiintotiheydet laskettiin kaavan 1 avulla.

$$\rho_s = \frac{\rho_w * m_k}{m_k + m_a - m_b} \quad (1)$$

missä  $\rho_s$  kiintotiheys [g/cm<sup>3</sup>]  
 $m_k$  kuivan näytteen massa [g]  
 $m_a$  pyknometrin ja veden yhteenlaskettu massa [g]  
 $m_b$  pyknometrin, veden ja näytteen yhteenlaskettu massa [g]

Humuspitoisuus määritettiin Eurokoodin (SFS-EN 19997-2 + AC, 2007) liitteen N mukaisesti kaavojen 2 ja 3 avulla.

$$H_m = H_k - K_v \quad (2)$$

missä  $H_m$  humuspitoisuus [%]  
 $H_k$  hehkutushäviö [%]  
 $K_v$  kidevesi [%]

$$H_k = \frac{H_h}{m_k} \quad (3)$$

missä  $H_k$  hehkutushäviö [g]  
 $m_k$  kuivan näytteen massa [g]

Taulukkoon 8 on koottu näytteistä määritetyt kiintotiheydet ja humuspitoisuudet.

Taulukko 8 Luokitusominaisuudet

| <b>Piste<br/>n:o</b> | <b>Levy<br/>n:o</b> | <b>Syvyys<br/>z<br/>m</b> | <b>Savi-<br/>pitoi-<br/>suus<br/>S<sub>a</sub><br/>%</b> | <b>Hehku-<br/>tus-<br/>häviö<br/>H<sub>k</sub><br/>%</b> | <b>Kide-<br/>vesi<br/>%</b> | <b>Humus-<br/>pitoi-<br/>suus<br/>H<sub>m</sub><br/>%</b> | <b>Tiheys<br/>ρ<br/>g/cm<sup>3</sup></b> | <b>Kiinto-<br/>tiheys<br/>ρ<sub>s</sub><br/>g/cm<sup>3</sup></b> |
|----------------------|---------------------|---------------------------|--|--|-----------------------------|---|--|--|
| 8011                 | DE1                 | 3,78–4,00                 | 83,00  | 4,21   | 3,70                        | 0,51  | 1,451                                    | 2,76   |
| 8011                 | DE1                 | 3,78–4,00                 | 77,50  | 3,318  | 3,53                        | 0,00  | 1,451                                    | 2,78   |
| 8011                 | DE2                 | 5,95–6,00                 | 12,50  | 0,92   | 1,00                        | 0,00  | 1,956                                    | 2,71   |
| 8012                 | 152                 | 3,23–3,26                 | -  | -  | -                           | -   | 1,518                                    | -  |
| 8012                 | 166                 | 3,37–3,40                 | -  | -  | -                           | -   | 1,570                                    | -  |
| 8012                 | 308                 | 4,20–4,23                 | -  | -  | -                           | -   | 1,623                                    | -  |
| 8012                 | 415                 | 4,37–4,40                 | 72,00  | 3,915  | 3,40                        | 0,51  | 1,618                                    | 2,73   |
| 8012                 | 416                 | 4,54–4,57                 | 59,00  | 5,682  | 3,02                        | 2,70  | 1,719                                    | 2,74   |
| 8012                 | 361                 | 5,37–5,40                 | -  | -  | -                           | -   | 1,550                                    | -  |
| 8012                 | 411                 | 5,54–5,57                 | -  | -  | -                           | -   | 1,687                                    | -  |
| 8012                 | 341                 | 7,37–7,40                 | -  | -  | -                           | -   | 1,638                                    | -  |
| 8012                 | 348                 | 8,37–8,40                 | -  | -  | -                           | -   | 1,776                                    | -  |
| 8014                 | 3                   | -                         | -  | -  | -                           | -   | 1,507                                    | -  |
| 8014                 | 21                  | 3,37–3,40                 | 77,50  | 4,715  | 3,53                        | 1,2   | 1,479                                    | 2,79   |
| 8014                 | 190                 | 3,55–3,66                 | 79,50  | 4,371  | 3,60                        | 0,8   | 1,505                                    | 2,76   |
| 8014                 | 311                 | 4,37–4,40                 | -  | -  | -                           | -   | 1,524                                    | -  |
| 8014                 | 208                 | 5,20–5,23                 | -  | -  | -                           | -   | 1,598                                    | -  |
| 8014                 | 434                 | 5,37–5,40                 | -  | -  | -                           | -   | 1,507                                    | -  |
| 8014                 | 800                 | 7,37–7,40                 | -  | -  | -                           | -   | 1,662                                    | -  |

## 4 Ödometrikokeet

### 4.1 Portaittaiset ödometrikokeet

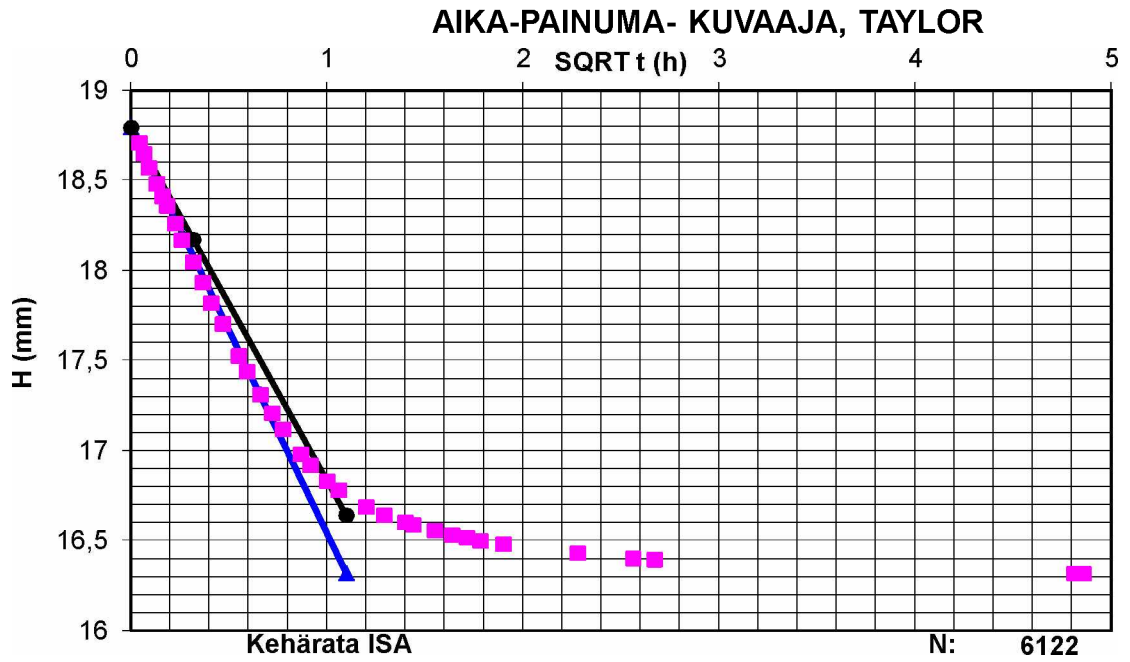
Alueelta suoritettiin portaittaisia ödometrikokeita kolmesta näytepisteestä (8011, 8012 ja 8014), yhteensä 13 kappaletta. Kokeet suoritettiin teknisten spesifikaatioiden (CEN ISO/TS 17892-5, 2007.) mukaisesti. Kokeissa käytettiin 14 tunnin mittaisia kuormitusportaita. Jokaisella kuormitusportaalla näytteeseen kohdistuva jännitys kaksinkertaistettiin edelliseen kuormitusportaaseen nähden, eli LIR=2. Taulukkoon 9 on koottu ödometrikoe näytteiden indeksiominaisuudet.

**Taulukko 9 Ödometrikoe näytteiden tiedot ja indeksiominaisuudet**

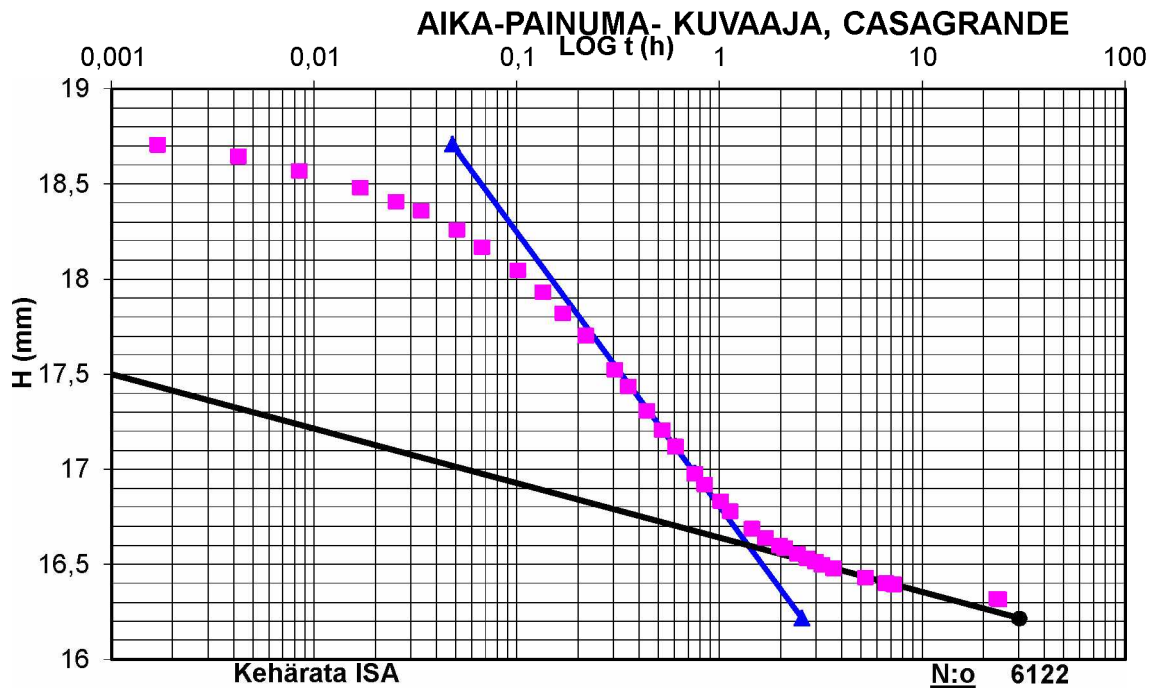
| näyte | syvyys    | w <sub>0</sub><br>[%] | S <sub>r</sub><br>[%] | e <sub>0</sub> | n <sub>0</sub><br>[%] | s <sub>k</sub><br>[kPa] | S <sub>t</sub> | F     | ρ <sub>s</sub><br>[t/m <sup>3</sup> ] | γ <sub>0</sub><br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|-------|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|----------------|-------|---------------------------------------|--|
| 6088  | 3,84–3,87 | 104                   | 100                   | 2,230          | 68,7                  | 20,7                    | 15,1           | 97,6  | 2,73                                  | 14,23                                  |
| 6116  | 5,92–5,95 | 104                   | 100                   | 2,190          | 68,7                  | -                       | -              | -     | 2,73                                  | 14,23                                  |
| 6101  | 3,20–3,23 | 98,7                  | 100                   | 2,572          | 72                    | -                       | -              | -     | 2,73                                  | 14,89                                  |
| 6108  | 3,43–3,46 | 76,7                  | 100                   | 2,020          | 66,9                  | 22,1                    | 17,4           | 72,5  | 2,74                                  | 15,72                                  |
| 6109  | 3,48–3,51 | 87,3                  | 100                   | 2,362          | 70,2                  | 22,1                    | 17,4           | 97,6  | 2,74                                  | 15,27                                  |
| 6091  | 4,40–4,43 | 76,1                  | 100                   | 1,990          | 66,6                  | 33,9                    | 15,7           | 85,3  | 2,73                                  | 15,86                                  |
| 6104  | 5,40–5,43 | 104                   | 100                   | 2,190          | 68,7                  | 20,7                    | 9,68           | 110   | 2,73                                  | 15,2                                   |
| 6121  | 5,57–5,60 | 56,3                  | 99,7                  | 1,553          | 60,8                  | 18,3                    | 9,84           | 54,8  | 2,75                                  | 16,52                                  |
| 6119  | 5,60–5,63 | 58,6                  | 100                   | 1,608          | 61,7                  | 18,3                    | 9,84           | 54,8  | 2,75                                  | 16,24                                  |
| 6120  | 5,62–5,65 | 64,3                  | 100                   | 1,729          | 63,4                  | 18,3                    | 9,84           | 54,8  | 2,75                                  | 16,24                                  |
| 6117  | 6,37–6,40 | 69,4                  | 100                   | 1,869          | 65,1                  | 36                      | 17,1           | 78,6  | 2,76                                  | 15,99                                  |
| 6122  | 7,34–7,37 | 80,8                  | 99,1                  | 2,250          | 69,2                  | 36                      | 17,1           | 78,6  | 2,76                                  | 15,06                                  |
| 6099  | 7,40–7,43 | 66,8                  | 100                   | 1,805          | 64,3                  | 36                      | 17,1           | 78,6  | 2,76                                  | 16,1                                   |
| 6092  | 8,40–8,43 | 46                    | 100                   | 1,210          | 54,8                  | 22,9                    | 13,7           | 48,5  | 2,71                                  | 17,42                                  |
| 6095  | 3,40–3,43 | 104                   | 99,9                  | 2,812          | 73,8                  | 22,7                    | 21             | 90,26 | 2,7                                   | 14,5                                   |
| 6105  | 4,40–4,43 | 99                    | 100                   | 2,660          | 72,7                  | 28                      | 7,71           | 142   | 2,7                                   | 14,94                                  |
| 6096  | 5,40–5,43 | 83,5                  | 100                   | 2,194          | 68,7                  | 26,8                    | 17,7           | 77,2  | 2,7                                   | 14,78                                  |
| 6118  | 6,37–6,40 | 67                    | 100                   | 1,744          | 63,6                  | -                       | -              | -     | 2,73                                  | 16,33                                  |
| 6100  | 7,37–7,40 | 63,6                  | 100                   | 1,662          | 62,4                  | 20,9                    | 17,71          | 46,93 | 2,73                                  | 16,3                                   |

Ödometrikokeen tulosten perusteella voidaan määrittää näytteen koonsolidaatiokerroin  $c_v$  ja sekundääripainuman kerroin  $C_\alpha$  kullekin kuormitusportaille joko Taylorin tai Casagranden menetelmällä. Kuvissa 7 ja 8 on esitetty  $c_v$ :n määrittäminen Taylorin ja Casagranden menetelmällä.

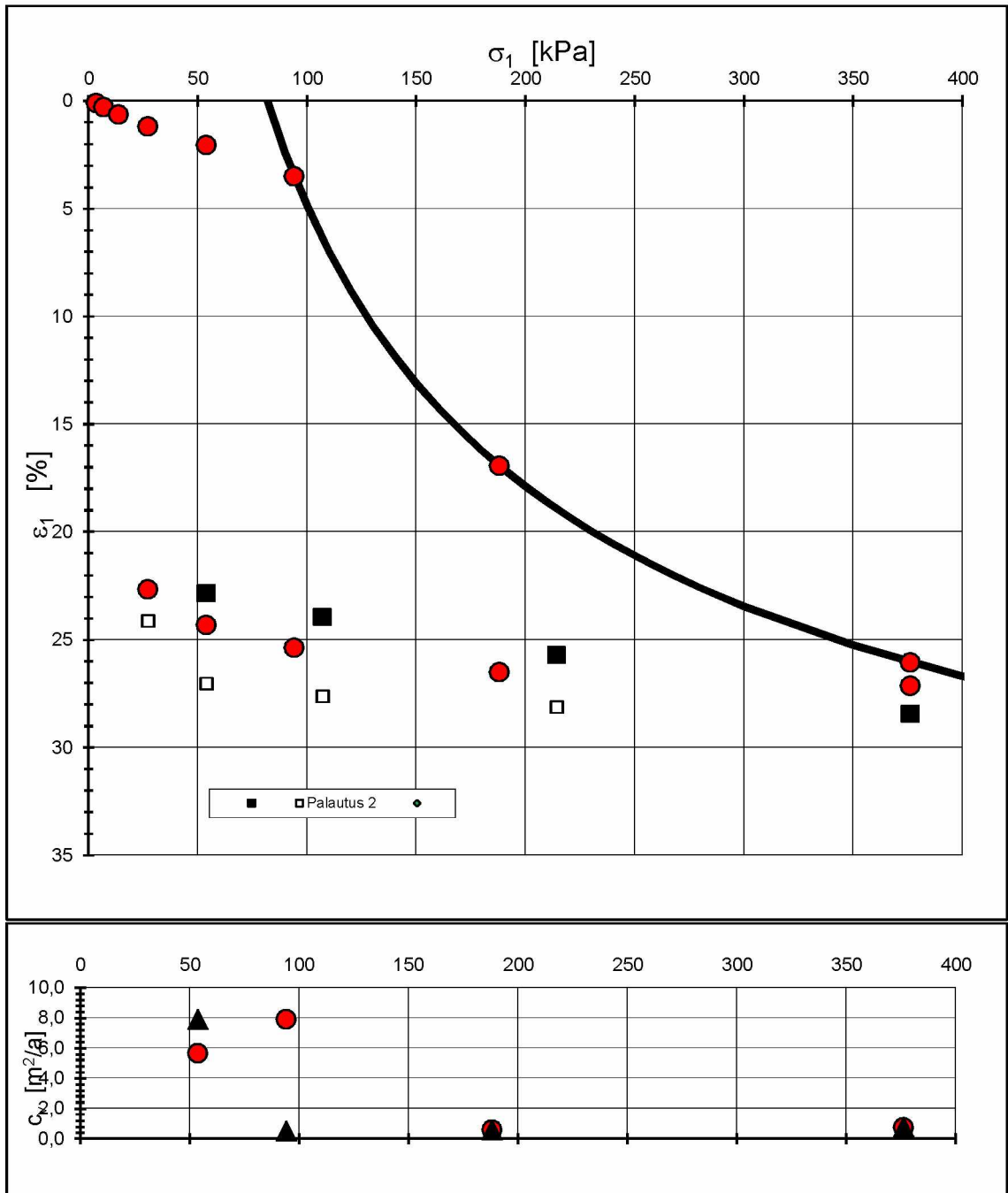




Kuva 7  $c_v$ :n määrittäminen Taylorin menetelmällä, seitsemäs kuormitusporras: 94,05 → 188 kPa, piste 6122, LIR=2



Kuva 8  $c_v$ :n määrittäminen Casagranden menetelmällä, kuudes kuormitusporras: 94,05 → 188 kPa, piste 6122, LIR=2



$\sigma_{v0}$  (kPa) = 60

$\beta_1 = -0,565$

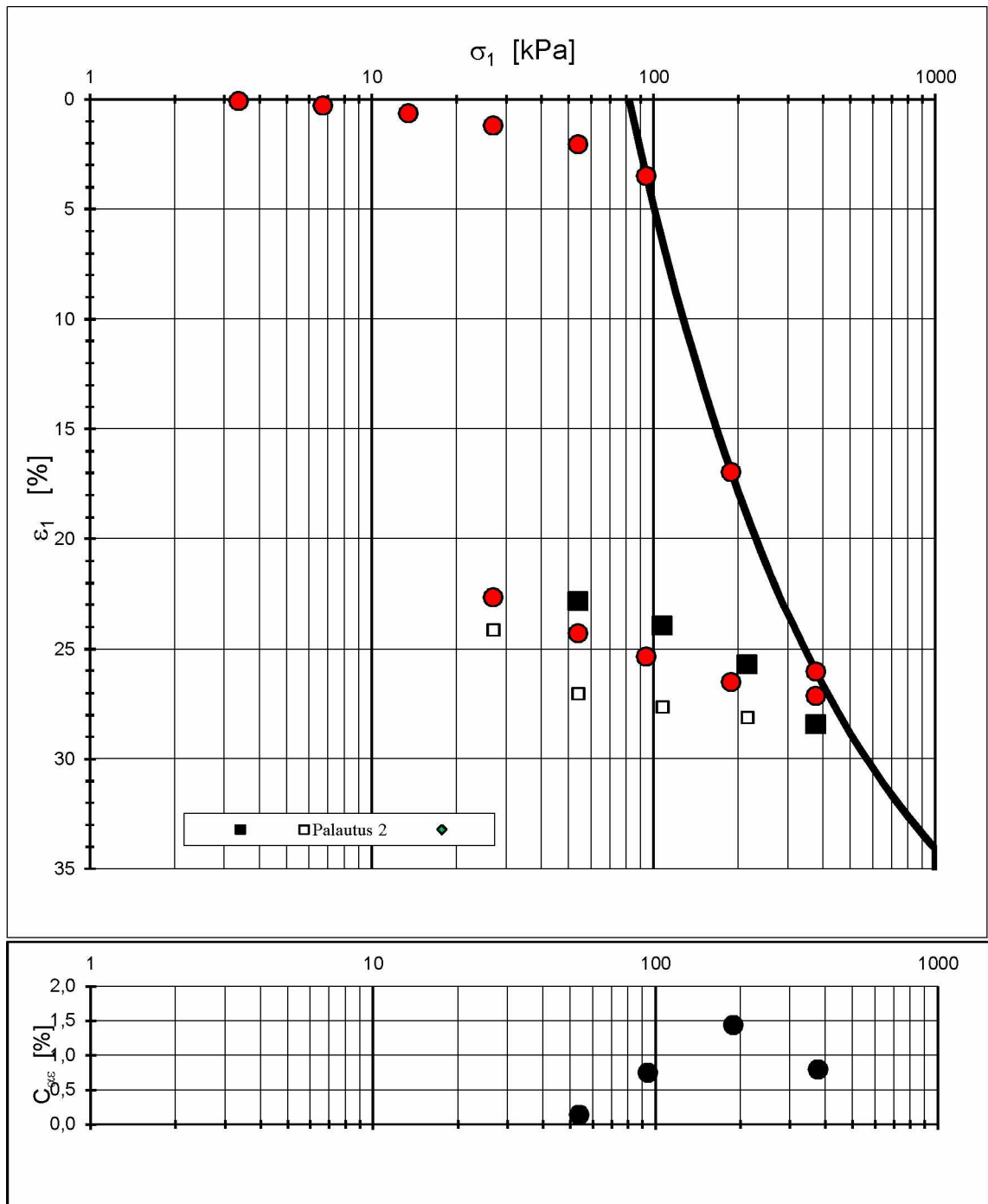
$\beta_2 = 0,655$

$\sigma_P$  (kPa) = 90

$m_1 = 4,41$

$m_2 = 52,25$

Kuva 9 Janbun mallin mukainen jännitys-muodonmuutoskäyrä ja  $c_v$  arvot, piste 6122



$\sigma_{v0}$  (kPa) = 60                       $\beta_1 = -0,565$                        $\beta_2 = 0,655$   
 $\sigma_P$  (kPa) = 90                       $m_1 = 4,41$                        $m_2 = 52,25$

**Kuva 10** Kokoonpuristuvuusmoduulin mukainen jännitys-muodonmuutuskäyrä ja  $C_{\alpha}$  arvot, piste 6122

Kuvissa 9 ja 10 on esitetty ödometrikokeen 6122 tulosten perusteella piirretyt jännitys-muodonmuutoskuvaajat. Kokeelle 6122 on saatu painumakäyrän sovitukseksi arvot  $m_1=4,41$  ja  $\beta=-0,565$ . Länsivaaran (2000) mukaan negatiivisten beetan arvojen käyttäminen johtaa kuitenkin helposti virheisiin laskelmissa. Tämä johtuu siitä, että kuten kokeen 6122 jännitys-kokoonpuristumakäyrästäkin voidaan havaita, aiheuttaa negatiivisen jännityksen eksponentin käyttö sen, että käyrän yläosa on lähes pystysuora. Käytettäessä parametreja esikonsolidaatiojännitystä pienemmillä jännitystasoilla, johtavat parametrit siihen, että laskennallisesti jo äärettömän pieni jännitystilän kasvu aiheuttaa äärettömän

suuria muodonmuutoksia. Tämän vuoksi tangenttimoduulille  $m$  laskettiin myös jännityseksponeentin arvoa  $\beta=1$  vastaavat tangenttimoduulin  $m$  arvot kaavojen 4 ja 5 mukaan. (Länsivaara, 2000)

$$m_1 = 2,3 \frac{1+e_0}{c_c} \quad (4)$$

$$m_2 = 2,3 \frac{1+e_0}{c_r} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{c_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma_0'} \quad (6)$$

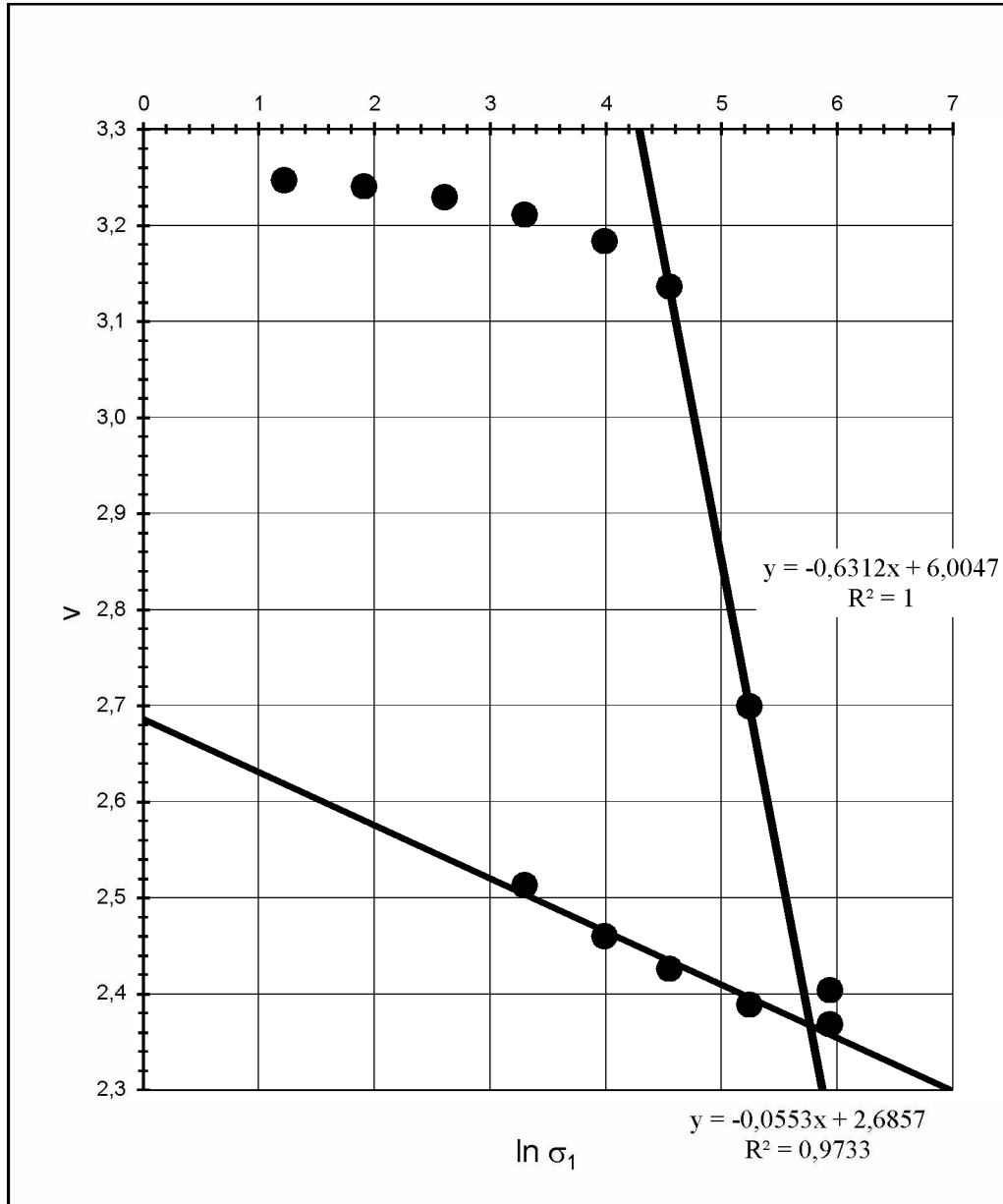
missä  $m$  tangenttimoduuli [-]  
 $e_0$  alkuhuokosluku [-]  
 $C_c$  kokoonpuristuvuusindeksi [-]  
 $C_r$  toistokuormituksen kokoonpuristuvuusindeksi [-]  
 $\sigma'$  tehokas kokonaisjännitys [kPa]

Taulukkoon 10 on koottu ödometrikeista määritetyt tangenttimoduulin  $m$  ja jännityseksponeentin  $\beta$  arvot, sekä jännityseksponeentin  $\beta=1$  arvoa vastaavat tangenttimoduulin  $m$  arvot.

**Taulukko 10 Tangenttimoduulimenetelmän laskentaparametrit**

| Kun $\beta=1$ |           |      |           |       |           |      |      |       |       |        |
|---------------|-----------|------|-----------|-------|-----------|------|------|-------|-------|--------|
| koe nro       | syvyys    | m1   | $\beta_1$ | m2    | $\beta_2$ | Cc   | Cr   | e0    | m1    | m2     |
| 6088          | 3,84–3,87 | 4,72 | -1,07     | 75,47 | 0,97      | 1,44 | 0,09 | 2,230 | 5,16  | 85,39  |
| 6101          | 3,20–3,23 | 5,81 | -0,165    | 64,03 | 0,68      | 1,28 | 0,11 | 2,572 | 6,42  | 76,07  |
| 6108kH        | 3,43–3,46 | 2,35 | -1,12     | 97,75 | 0,51      | 1,62 | 0,07 | 2,020 | 4,30  | 99,23  |
| 6109kV        | 3,48–3,51 | 5,33 | -0,4      | 56,73 | 0,33      | 1,49 | 0,12 | 2,362 | 5,21  | 62,36  |
| 6091          | 4,40–4,43 | 6,28 | -0,21     | 29,16 | 2,02      | 1,05 | 0,10 | 1,990 | 6,53  | 66,77  |
| 6104          | 5,40–5,43 | 4,53 | -0,84     | 66,43 | 0,30      | 2,65 | 0,12 | 2,190 | 2,77  | 62,71  |
| 6121          | 5,57–5,60 | 5,48 | -0,85     | 78,99 | 0,78      | 0,96 | 0,06 | 1,553 | 6,15  | 101,24 |
| 6119kV        | 5,60–5,63 | 7,08 | -0,42     | -     | -         | 0,90 | 0,07 | 1,608 | 6,69  | 88,21  |
| 6120kH        | 5,63–5,66 | 6,92 | -0,33     | -     | -         | 0,97 | 0,07 | 1,729 | 6,46  | 89,67  |
| 6117          | 6,37–6,40 | 4,81 | -0,84     | 151,1 | 1,03      | 1,38 | 0,06 | 1,869 | 4,78  | 117,83 |
| 6122          | 7,34–7,37 | 4,41 | -0,565    | 52,25 | 0,66      | 1,45 | 0,13 | 2,250 | 5,15  | 58,86  |
| 6099          | 7,40–7,43 | 2,23 | -2,24     | 39,88 | 1,02      | 1,49 | 0,09 | 1,805 | 4,32  | 69,37  |
| 6092          | 8,40–8,43 | 2,31 | -1,51     | 190,4 | 2,78      | 0,43 | 0,03 | 1,210 | 11,93 | 203,32 |
| 6095          | 3,40–3,43 | 5,33 | -0,705    | 97,48 | 1,66      | 2,11 | 0,13 | 2,812 | 4,15  | 65,92  |
| 6105          | 4,40–4,43 | 1,69 | -1,74     | 127,2 | 1,90      | 2,53 | 0,08 | 2,660 | 3,32  | 101,42 |
| 6096          | 5,40–5,43 | 3,59 | -0,805    | 48,56 | 3,00      | 1,48 | 0,11 | 2,194 | 4,95  | 67,40  |
| 6118          | 6,37–6,40 | 6,38 | -0,44     | 97,63 | 0,65      | 1,00 | 0,07 | 1,774 | 6,39  | 92,47  |
| 6100          | 7,37–7,40 | 2,63 | -1,66     | 70,78 | 2,89      | 1,20 | 0,08 | 1,662 | 5,10  | 72,89  |

Kriittisen tilan parametrit  $\lambda$  ja  $\kappa$  määritetään kokoonpuristuvuusmoduuliin perustuvasta  $\ln(\sigma_1)$ - $v$  kuvaajasta, jossa  $v=1+e$  ilmaisee näytteen tilavuudenmuutosta. Parametri  $\lambda$  määritetään näytteen normaalikonsolidoitunutta osaa ja  $\kappa$  ylikonsolidoitunutta osaa kuvaavan suoran kulmakertoimena (kuva8).



| $\lambda$ | $\kappa$ |
|-----------|----------|
| 0,631     | 0,0553   |

Kuva 11 Lambda  $\lambda$  ja kappa  $\kappa$  parametrien määrittäminen ödometrikokeen tuloksista, koe 6122

Osa numeerisista materiaalimalleista käyttää parametrien  $\lambda$  ja  $\kappa$  sijaan muunnettuja kokoonpuristuvuusindeksejä  $\lambda^*$  ja  $\kappa^*$ , jotka voidaan laskea kaavojen 5 ja 6 avulla.

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e_0} \quad (5)$$

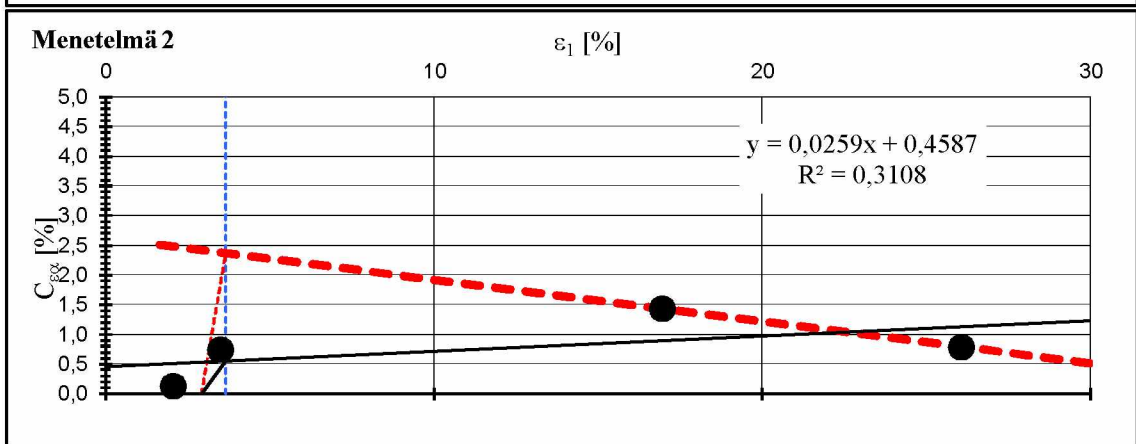
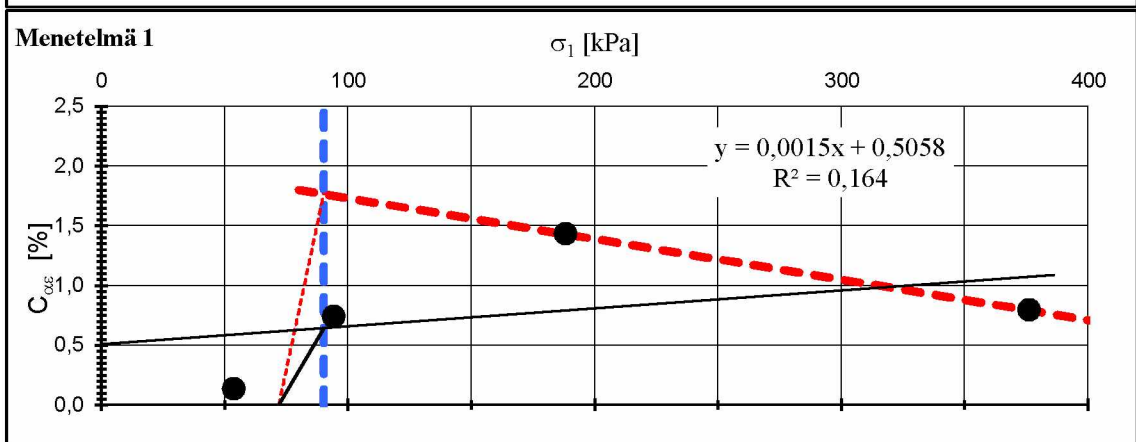
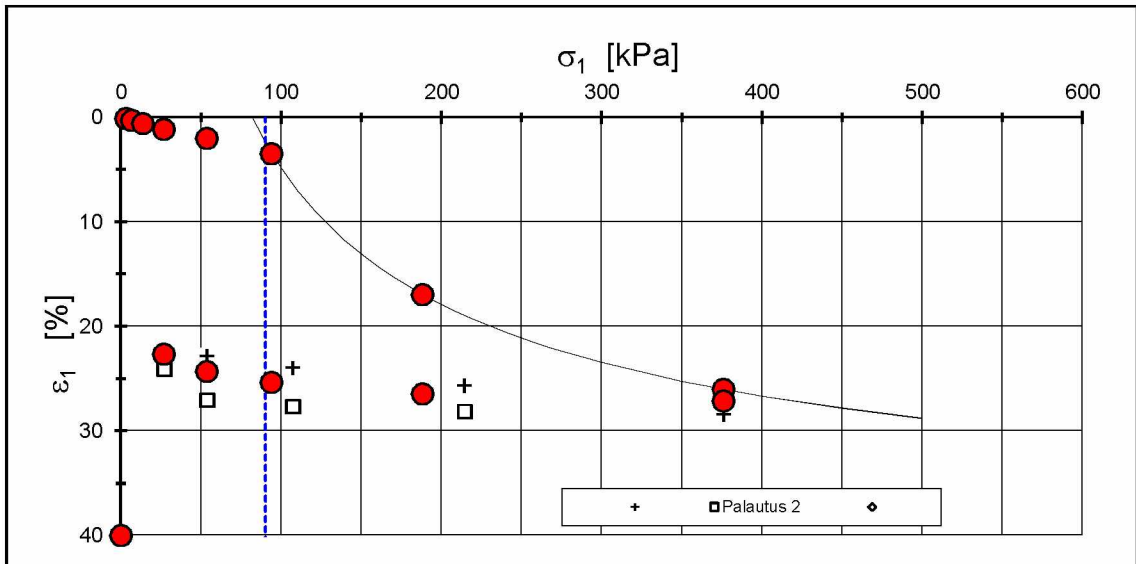
$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e_0} \quad (6)$$

Taulukkoon 11 on koottu ödometrikokeista määritetyt kriittisen tilan parametrit.

**Taulukko 11 Ödometrikokeista määritetyt kriittisen tilan parametrit**

| piste | koe nro | syvyys    | $\lambda$ | $\kappa$ | $\lambda^*$ | $\kappa^*$ | $\mu^*$ |
|-------|---------|-----------|-----------|----------|-------------|------------|---------|
| 8011  | 6088    | 3,84–3,87 | 0,6265    | 0,0377   | 0,1940      | 0,0117     | 0,0112  |
| 8012  | 6101    | 3,20–3,23 | 0,5561    | 0,0470   | 0,1557      | 0,0132     | 0,0122  |
| 8012  | 6108kH  | 3,43–3,46 | 0,703     | 0,0306   | 0,2328      | 0,0101     | 0,0088  |
| 8012  | 6109kV  | 3,48–3,51 | 0,6457    | 0,0538   | 0,1921      | 0,0160     | 0,0778  |
| 8012  | 6091    | 4,40–4,43 | 0,458     | 0,0446   | 0,1532      | 0,0149     | 0,0102  |
| 8012  | 6104    | 5,40–5,43 | 1,1502    | 0,0510   | 0,3606      | 0,0160     | 0,0065  |
| 8012  | 6121    | 5,57–5,60 | 0,415     | 0,0250   | 0,1626      | 0,0098     | 0,0063  |
| 8012  | 6119kV  | 5,60–5,63 | 0,39      | 0,0295   | 0,1495      | 0,0113     | 0,0057  |
| 8012  | 6120kH  | 5,63–5,66 | 0,4226    | 0,0305   | 0,1549      | 0,0112     | 0,0068  |
| 8012  | 6117    | 6,37–6,40 | 0,6001    | 0,0242   | 0,2092      | 0,0084     | 0,0101  |
| 8012  | 6122    | 7,34–7,37 | 0,6312    | 0,0553   | 0,1942      | 0,0170     | 0,0076  |
| 8012  | 6099    | 7,40–7,43 | 0,6486    | 0,0406   | 0,2312      | 0,0145     | 0,0132  |
| 8012  | 6092    | 8,40–8,43 | 0,1852    | 0,0108   | 0,0838      | 0,0049     | -       |
| 8014  | 6095    | 3,40–3,43 | 0,918     | 0,0579   | 0,2408      | 0,0152     | 0,0234  |
| 8014  | 6105    | 4,40–4,43 | 1,101     | 0,0361   | 0,3008      | 0,0099     | 0,0255  |
| 8014  | 6096    | 5,40–5,43 | 0,645     | 0,0472   | 0,2019      | 0,0148     | 0,0101  |
| 8014  | 6118    | 6,37–6,40 | 0,4339    | 0,03     | 0,1564      | 0,0108     | 0,0080  |
| 8014  | 6100    | 7,37–7,40 | 0,522     | 0,0367   | 0,1961      | 0,0138     | 0,0070  |

Hiipumaparametrin  $\mu^*$  määrittämisessä käytettiin sekundääripainuman kertoimen  $C_\alpha$  maksimiarvoja. Tämä johtuu siitä, että sekundääripainuman kerroin saa tyypillisesti suurimmat arvot jännitystilan ollessa lähellä esikonsolidaatiojännitystä. Kuvassa 12 ja taulukossa 12 on esitetty sekundääripainuman kertoimien  $C_\alpha$  ja  $C_{\alpha\epsilon}$  maksimiarvojen määrittäminen ödometrikokeen tulosten perusteella.



|                      |                      |             |                  |
|----------------------|----------------------|-------------|------------------|
| Paikka:              | <b>KEHÄRATA</b>      | N:o         | <b>6122</b>      |
| Piste:               | <b>8012 p182 St2</b> | Syvyys:     | <b>7,34–7,37</b> |
| $\sigma_{v0}$ (kPa)= | 60                   | $\beta_1 =$ | -0,565           |
|                      |                      | $\beta_2 =$ | 0,655            |
|                      |                      | Huom.       | -                |
| $\sigma_p$ (kPa)=    | 90                   | $m_1 =$     | 4,41             |
|                      |                      | $m_2 =$     | 52,25            |

Kuva 12 Sekundääripainuman parametrien määrittäminen, koe 6122

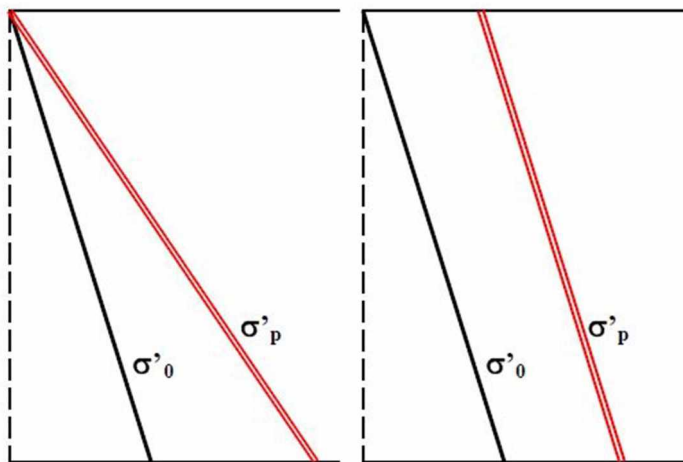


Taulukko 12 Sekundääripainuman parametrit, koe 6122

| <b>Sekundääripainuman parametrit:</b>                               |               |          |  |        |          |
|---|---------------|----------|--|--------|----------|
| <b>Menetelmä 1 (<math>\sigma_1 - C_{\alpha\varepsilon}</math>):</b> |               |          | <b>Menetelmä 2 (<math>\varepsilon_1 - C_{\alpha\varepsilon}</math>):</b> |        |          |
|   | Excel         | Käyttäjä |  | Excel  | Käyttäjä |
| $C_{\alpha\varepsilon \max}$  | 0,64 %        | 1,76 %   | $C_{\alpha\varepsilon \max}$   | 0,55 % | 2,36 %   |
| $\alpha_{s \max}$   | 0,021         | 0,057    | $\alpha_{s \max}$  | 0,018  | 0,077    |
| $\beta_{\varepsilon\alpha\sigma}$                                   | -0,0015 %/kPa | 0,0034   | $\beta_{\varepsilon\alpha}$  | -0,026 | 0,070    |

a) OCR

b) POP



Kuva 13 Konsolidaatiojännityksen ilmaisu a) OCR:n ja b) POP:n avulla (Vepsäläinen &amp; Takala, 2004)

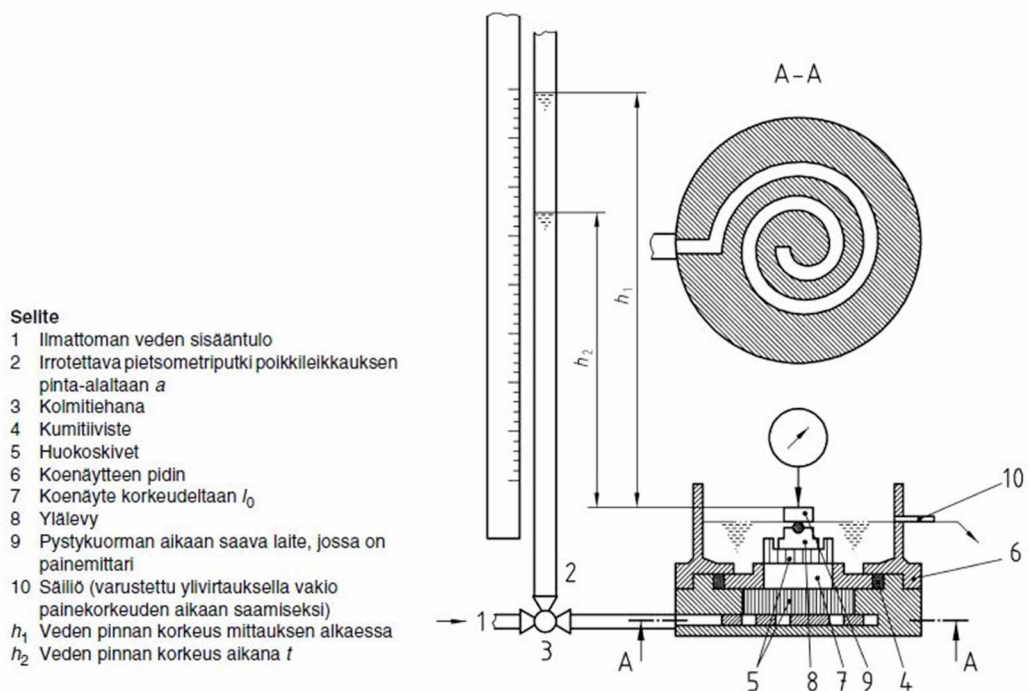
Ödometrikokeiden perusteella määritettiin myös jokaisen näytteen konsolidaatiojännitys, sekä POP (Pre-Overburden Pressure) ja OCR (Over Consolidation Ratio) arvot, joita käytetään konsolidaatiojännityksen ja vallitsevan tehokkaan pystysuoran jännityksen välisen suhteen ilmaisemiseen. Kuvassa 13 on esitetty OCR ja POP arvojen periaate. OCR ilmaisee, kuin moninkertainen konsolidaatiojännitys on maaperässä vallitsevaan tehokkaaseen pystyjännitykseen nähden. POP puolestaan ilmaisee, kuinka monta kilopascalia konsolidaatiojännitys on vallitsevaa tehokasta pystyjännitystä suurempi. Taulukkoon 13 on koottu ödometrikokeista määritetyt OCR ja POP arvot.

Taulukko 13 ödometrinäytteiden POP ja OCR arvot

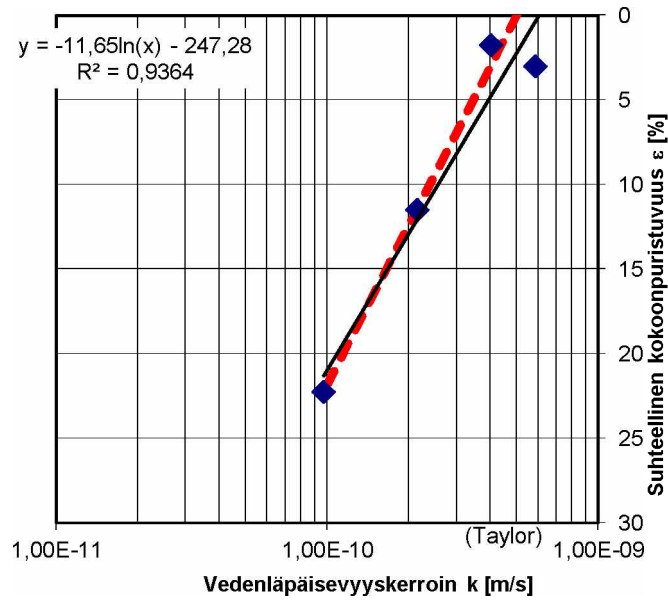
| koe nro | syvyys    | POP | OCR  |
|---------|-----------|-----|------|
| 6088    | 3,84–3,87 | 25  | 1,78 |
| 6101    | 3,20–3,23 | 9   | 0,88 |
| 6108kH  | 3,43–3,46 | 62  | 2,63 |
| 6109kV  | 3,48–3,51 | 13  | 1,33 |
| 6091    | 4,40–4,43 | 19  | 1,42 |
| 6104    | 5,40–5,43 | -2  | 0,96 |
| 6121    | 5,57–5,60 | 9   | 1,17 |
| 6119kV  | 5,60–5,63 | -4  | 0,92 |
| 6120kH  | 5,63–5,66 | -   | -    |
| 6117    | 6,37–6,40 | 5   | 1,08 |
| 6122    | 7,34–7,37 | 18  | 1,28 |
| 6099    | 7,40–7,43 | 34  | 1,52 |
| 6092    | 8,40–8,43 | 83  | 2,15 |
| 6095    | 3,40–3,43 | 14  | 1,38 |
| 6105    | 4,40–4,43 | 57  | 2,36 |
| 6096    | 5,40–5,43 | 41  | 1,89 |
| 6118    | 6,37–6,40 | 5   | 1,09 |
| 6100    | 7,37–7,40 | -   | -    |

## 4.2 Vedenläpäisevyyden määrittäminen ödometrillä

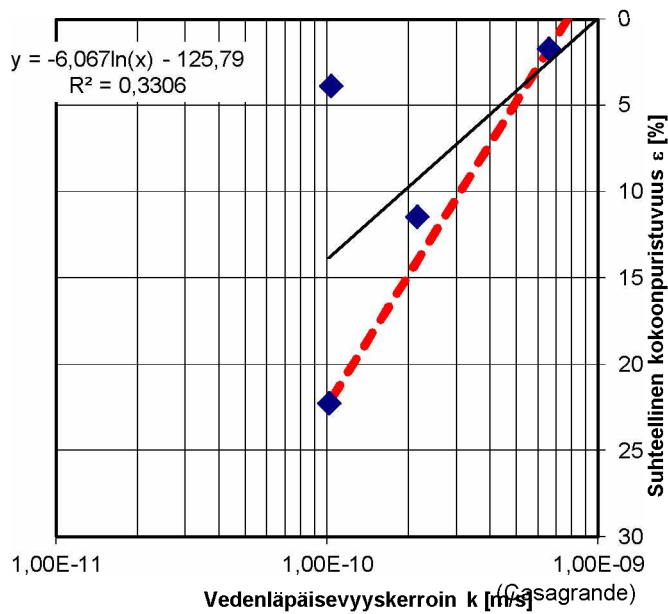
Työssä suoritettiin kahdelta tasolta vedenläpäisevyysskoet ödometrikokeen yhteydessä. Vedenläpäisevyysskoet suoritettiin teknisten spesifikaatioiden (CEN ISO/TS 17892-11, 2007.) mukaisesti (kuva14).



Kuva 14 Vedenläpäisevyyden mittaus ödometrikokeeseen liitetyllä läpäisevyyssmittarilla (CEN ISO/TS 17892-11, 2007.)



a)



b)

**Kuva 15 Vedenläpäisevyyden k määrittäminen a) Taylorin ja b) Casagranden menetelmillä**  
 Molemmilta tasoilta otettiin näytteet sekä pysty- että vaakasuuntaisesti.

Niistä ödometrikokeista, joista vedenläpäisevyyskoetta ei suoritettu ödometrikokeen yhteydessä, laskettiin jokaista kuormitusporrasta vastaava vedenläpäisevyyden  $k$  arvo kaavalla 6 (Claesson, 2003.).

$$c_v = \frac{k \cdot M}{\gamma_w} \quad (6)$$

missä  $k$  vedenläpäisevyys [m/s]  
 $M$  kokoonpuristumusmoduuli [kPa]  
 $\gamma_w$  veden tilavuuspaino [ $\text{kN/m}^3$ ]

Vedenläpäisevyyden muutosta maaperän tiivistymisen myötä voidaan kuvata vedenläpäisevyyden muutosparametrilla  $\beta_k$ , joka ilmaisee vedenläpäisevyyden muutoksen kokoonpuristuvuuden muutoksen  $\Delta\varepsilon$  suhteen kaavan 7 (Bengtsson & Larsson, 1994.) mukaisesti. Numeeriseen mallinnukseen käytettävässä Plaxis 2011 ohjelmassa vedenläpäisevyyden muutosta kuvataan parametrilla  $c_k$ , joka ilmaisee vedenläpäisevyyden muutoksen huokosluvun muutoksen  $\Delta e$  suhteen (kaava 8). (PLAXIS, 2011.)

$$\beta_k = \frac{\log(k/k_0)}{\Delta\varepsilon} \quad (7)$$

missä  $\beta_k$  vedenläpäisevyyden muutos [-]  
 $k$  vedenläpäisevyys [m/s]  
 $\varepsilon$  muodonmuutos [%]

$$c_k = \frac{\Delta e}{\log(k/k_0)} \quad (8)$$

missä  $c_k$  vedenläpäisevyyden muutos [-]  
 $e$  huokosluku [-]  
 $k$  vedenläpäisevyys [m/s]

Kuvassa 15 on esitetty vedenläpäisevyyden arvojen määrittäminen ödometrikokeen tulosten perusteella Taylorin ja Casagranden menetelmillä. Taulukkoon 11 on koottu sekä laskennalliset, että vedenläpäisevyyskokeella määritetyt vedenläpäisevyyden  $k$ , sekä sen muutoksen arvot  $\beta_k$ .

**Taulukko 14 Ödometrikoeäytteidien vedenläpäisevyys**

| koe    | syvyys    | k (Taylor) | $\beta_k$ (Taylor) | k (vedenläp.koe) | $\beta_k$ (Vedenläp.koe) |
|--------|-----------|------------|--------------------|------------------|--------------------------|
| 6088   | 3,84–3,87 | 8E-10      | 3,89               | -                | -                        |
| 6101   | 3,20–3,23 | 5,31E-10   | 3,92               | -                | -                        |
| 6108kH | 3,43–3,46 | 5,34E-09   | 13,96              | 6,0E-10          | 2,03                     |
| 6109kV | 3,48–3,51 | 1,01E-10   | 3,78               | 6,7E-10          | 2,77                     |
| 6091   | 4,40–4,43 | 4,1E-10    | 3,22               | -                | -                        |
| 6104   | 5,40–5,43 | 4,30E-10   | 2,77               | -                | -                        |
| 6121   | 5,57–5,60 | 8,04E-10   | 4,9                | -                | -                        |
| 6119kV | 5,60–5,63 | 6,12E-10   | 3,87               | 1,2E-06          | 12,1                     |
| 6120kH | 5,63–5,66 | 4,93E-10   | 3,45               | 1,3E-09          | 3,09                     |
| 6117   | 6,37–6,40 | 5,04E-10   | 3,69               | -                | -                        |
| 6122   | 7,34–7,37 | 6,05E-10   | 3,73               | -                | -                        |
| 6099   | 7,40–7,43 | 6,51E-10   | 3,68               | -                | -                        |
| 6092   | 8,40–8,43 | 3,92E-09   | 15,23              | -                | -                        |
| 6095   | 3,40–3,43 | 5,35E-10   | 3,33               | -                | -                        |
| 6105   | 4,40–4,43 | 4,49E-10   | 3,06               | -                | -                        |
| 6096   | 5,40–5,43 | 6,24E-10   | 3,62               | -                | -                        |
| 6118   | 6,37–6,40 | 1,01E-09   | 3,56               | -                | -                        |
| 6100   | 7,37–7,40 | 2,40E-09   | 8,6                | -                | -                        |

## 5 Kolmiakksiaalikoheet

### 5.1 Näytteet ja koetyypit

Työssä suoritettiin yhteensä 5 kolmiakksiaalikoesarjaa, joihin sisältyi 14 suljettua (CAUC) kolmiakksiaalikoetta ja kaksi avointa (CADC) kolmiakksiaalikoetta (Taulukko 12). Suoritetut kolmiakksiaalikoheet näytteenottotasoineen on esitetty taulukossa 15. Kolmiakksiaalikoheet tehtiin teknisten spesifikaatioiden (CEN ISO/TS 17892-9, 2007) mukaisesti. Komiakksiaalikoehenäytteet valittiin luokituskokeiden perusteella siten, että koesarjat pyrittiin tekemään mahdollisimman hodgeenisistä häiriintymättömistä näytesarjoista ja mahdollisimman kattavasti eri syvyyksiltä. Näytteen halkaisijana käytettiin 5 senttimetriä ja korkeutena 10 senttimetriä.

**Taulukko 15 Suoritetut kolmiakksiaalikoheet**

| piste | putki nro. / tyyppi | syvyys (m) | koenumero | sellipaine (kPa) |
|-------|---------------------|------------|-----------|------------------|
| 8011  | DE1/norjalainen     | 3,78–3,89  | CAUC6089  | 75               |
|       | DE1/norjalainen     | 3,67–3,78  | CAUC6090  | 50               |
|       | DE1/norjalainen     | 3,57–3,67  | CAUC6093  | 37,5             |
|       | DE1/norjalainen     | 3,46–3,57  | CADC6112  | 37,5 (YK 50)     |
| 8012  | 308 / St2           | 4,22–4,32  | CAUC6097  | 60               |
|       | 415 / St2           | 4,43–4,54  | CAUC6094  | 40               |
|       | 416 / St2           | 4,56–4,66  | CAUC6098  | 80               |
|       | 182 / St2           | 7,23–7,34  | CAUC6110  | 60               |
|       | 341 / St2           | 7,43–7,54  | CAUC6107  | 90 -> 45         |
|       | 409 / St2           | 7,57–7,68  | CAUC6111  | 120              |
| 8014  | 3 / St2             | 3,23–3,34  | CAUC6103  | 65               |
|       | 21 / St2            | 3,43–3,54  | CAUC6102  | 45               |
|       | 190 / St2           | 3,55–3,66  | CAUC6106  | 85 -> 45         |
|       | 208 / St2           | 5,23–5,34  | CADC6113  | 50 (YK 75)       |
|       | 434 / St2           | 5,43–5,54  | CAUC6114  | 75               |
|       | 905 / St2           | 5,54–5,65  | CAUC6115  | 100              |

Kaikkien tehtyjen kolmiakksiaalikoekoiden tulokset on koottu liitteeseen 5.

Kolmiakksiaalikoheet koostuivat konsolidaatio- ja leikkausvaiheista. Konsolidaatiovaiheessa näyte pyrittiin konsolidoimaan maassa vallitsevaa jännitystilaa vastaavalle tasolle. Vallitseva jännitys laskettiin näytteen syvyyden ja pohjaveden nykyisen tason perusteella. Kokeissa käytetyt sellipaineet valittiin maaperässä vallitsevan jännityksen ja ödometrikokeiden perusteella määriteltyjen esikonsolidaatiojännitysten perusteella. Jokaiselta tasolta suoritettiin kolme tai neljä ödometrikoeetta eri sellipaineilla. Kaikki näytteet konsolidoitiin portaittain. Portattaisella konsolidaatiolla varmistettiin, että näytettä ei kuormitettu millään portaalla liian lähelle murtotilaa. Konsolidaation aikana seurattiin näytteen painumaa ja näytteestä poistuvan veden määrää. Seuraavaksi aloitettiin näytteen leikkausvaihe. Suljetuissa kokeissa estetään veden poistuminen näytteistä sulkeamalla byretit, avoimissa kokeissa byretit jätettiin auki. Koska vesi ei pääse suljetussa kokeessa poistumaan näytteestä, ei näytteen tilavuus pääse muuttumaan. Avoimessa kokeessa vesi pääsee poistumaan näytteestä ja näin ollen huokosveden ylipainetta ei pääse syntymään.

Kolmiakσιαalikokeissa leikkausnopeutena käytettiin aluksi 0,6mm/h. Koska näytteen alkuperäinen korkeus oli 10 cm, vastaa leikkausnopeus noin 0,6 %/h muodonmuutosta. Kokeiden aikana näytteiden leikkausnopeutta vaihdeltiin. Alkuperäisen 0,6 %/h nopeuden lisäksi käytettiin myös nopeuksia 0,06 %/h ja 6 %/h. Kokeissa tehtiin myös palautus- ja uudelleen kuormitusvaiheita.

Maaperän vakavuuden kannalta olennaiset murtotilan parametrit, tehokas koheesio  $c'$  ja tehokas kitkakulma  $\phi'$  määritettiin suljetuilla kolmiakσιαalikokeilla. Avoimia kolmiakσιαalikokeita käytettiin Plaxis 2011 ohjelman käyttämien mallien lähtötiedoiksi tarvitsemat kimmotilan parametrit  $E_{50}$ ,  $E_{ur}$  ja  $\nu$ .

## 5.2 Suljetut kokeet

Tehokkaan koheesio  $c'$  ja tehokkaan kitkakulman  $\phi'$  määrittämiseen vaaditaan pääsääntöisesti kolme eri sellipaineilla suoritettua leikkausta samasta materiaalista. (CEN ISO/TS 17892-9, 2007.) Kuvaan 16 on koottu pisteestä 8012 4 metrin syvyydestä suoritettujen kolmiakσιαalikokeiden  $p'$ - $q$  kuvaajat ja kuvaan 17 vataavien kokeiden  $q$ - $\varepsilon$ -kuvaajat. Sarjaan kuului kolme suljettua kolmiakσιαalikoetta, joille käytettiin 40 kPa, 60 kPa ja 80 kPa sellipaineita. Leikkausparametrit määritettiin kuvaajaan piirretyn murtosuoran ja huokospainerajan kulmakertoimen perusteella. Tehokkaita parametreja ei saisi määrittää  $K_0$  tason alapuolelta.

Tehokkaat parametrit määritettiin kaavojen 9 ja 10 avulla.

$$\sin\phi' = \left(\frac{3k_1}{6+k_1}\right) \quad (9)$$

missä  $k_1$  = valitun murtosuoran kulmakerroin

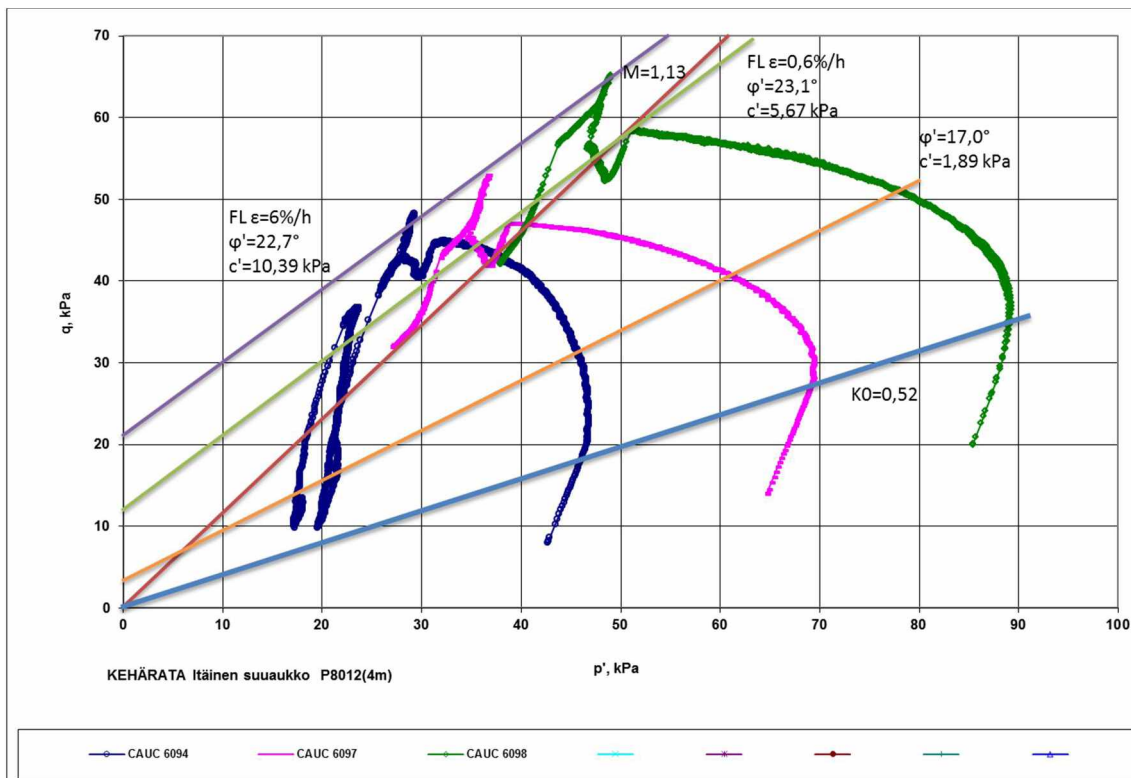
$$c' = q_0 \frac{(3-\sin\phi')}{(6\cos\phi')} \quad (10)$$

missä  $q_0$  = y-akselin ja valitun murtosuoran leikkauspiste

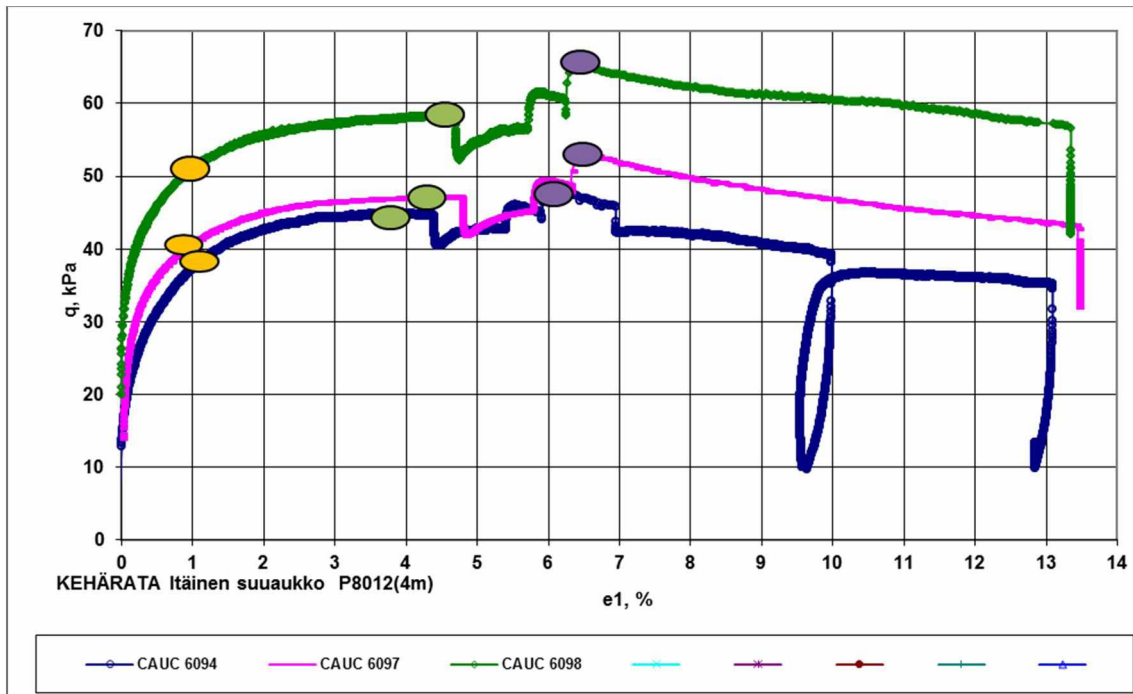
Avoimien kokeiden puuttuessa kriittisen tilan suora voidaan määrittää vetämällä suora origosta suurimmalla sellipaineella tehdyn suljetunkokeen murtopisteeseen. Kriittisen tilan kitkakulma  $\phi'_c$  voidaan määrittää kaavan 9 avulla kriittisen tilan suorasta. Näin määritetyn kitkakulman  $\phi'_c$  avulla voidaan arvioida lepopainetilaa. Lepopainekerroin  $K_0$  määritetään Jakyn kaavalla (kaava 11).

$$K_0 = 1 - \sin\phi'_c \quad (11)$$

Kuten kuvasta 13 voidaan havaita, riippuvat tehokkaat lujuusparametrit näytteen kuormitusnopeudesta. Nopeudella  $\varepsilon=0,6$  %/h saatiin tehokkaalle kitkakulmalle  $\phi'=23,1^\circ$  ja tehokkaalle koheesiolle  $c'=5,67$  kPa. Kuormitusnopeudella  $\varepsilon=6$  %/h saatiin tehokkaalle kitkakulmalle  $\phi'=22,7^\circ$  ja tehokkaalle koheesiolle  $c'=10,39^\circ$ .



Kuva 16 piste 8012, 4m tehokkaiden parametrien määrittäminen. Violetti viiva kuvaa  $\varepsilon=6\%/h$  ja vihreä  $\varepsilon=0,6\%/h$  kuormitusvauhtia vastaavaa murtosuoraa, oranssi huokospainerajaa, punainen kriittisentilansuoraa ja sininen  $K_0$ -tilaa.

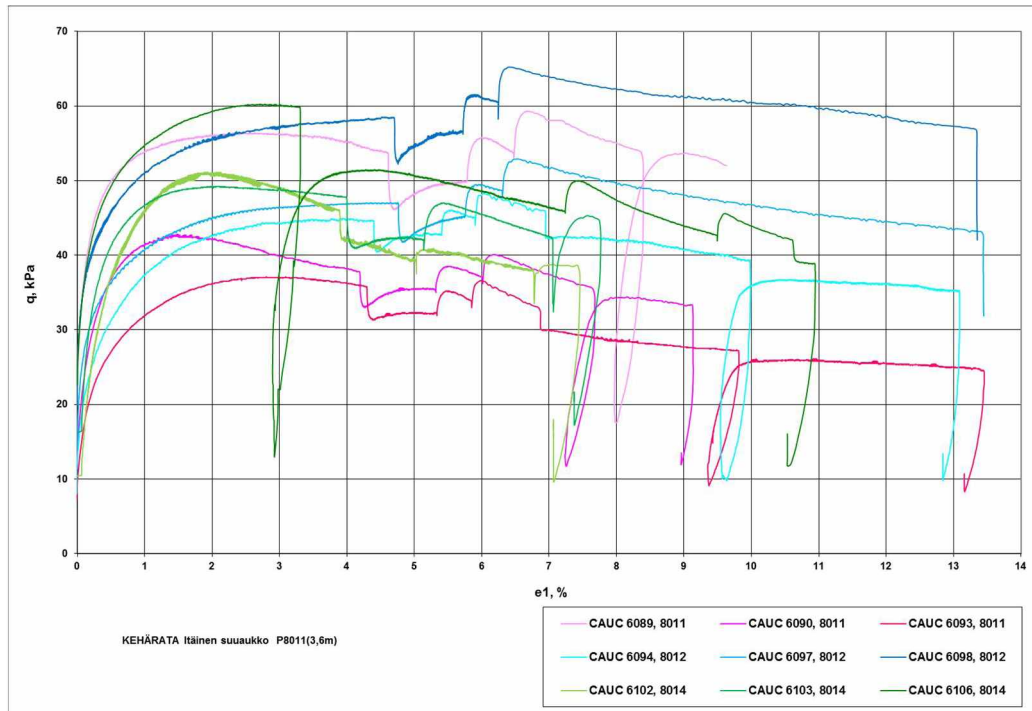


Kuva 17 Huokospaineraja (oranssi) ja murtosuorat (vihreä  $\varepsilon=0,6\%/h$  ja violetti  $\varepsilon=6\%/h$ ) q-e koordinaatistossa. Huokospaineraja

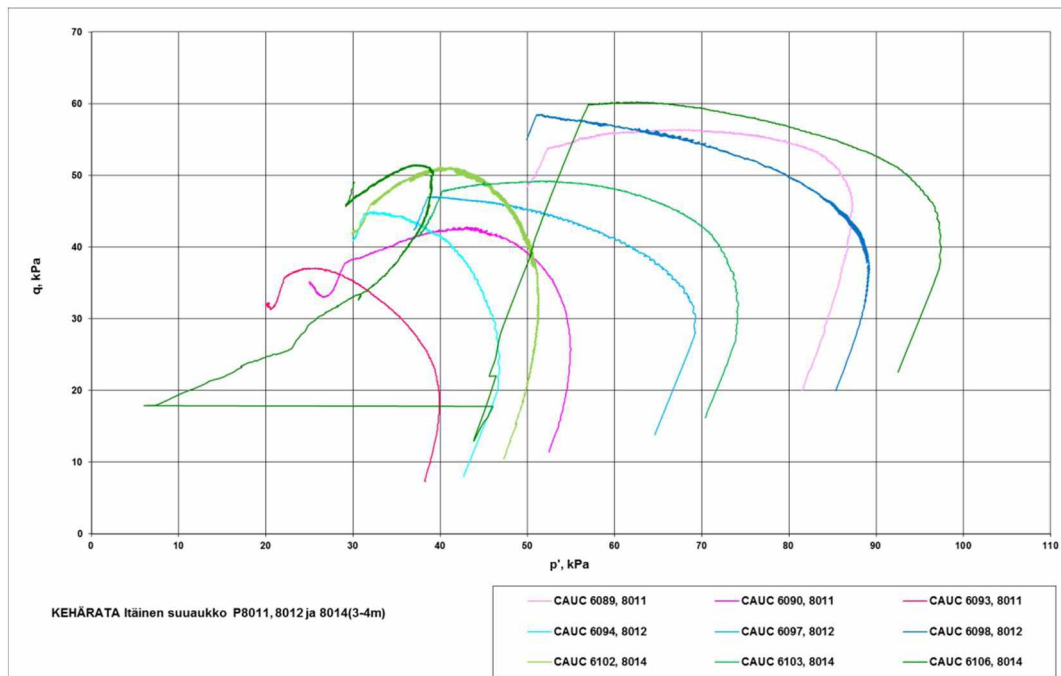
Kuviin 18 ja 19 on koottu kaikki 3 ja 4 metrin syvyydeltä tehtyjen suljettujen kolmiak-siaalikoekiden tulokset. Punaiset käyrät kuvaavat pisteestä 8011, siniset pisteestä 8012 ja vihreät pisteestä 8014 tehtyjä kolmiak-siaalikoesarjoja. Kuvan 18 perusteella voidaan todeta näytteiden kuvaavan keskimäärin samaa savikerrosta, sillä käyrien muodot vas-



taavat hyvin toisiaan. Näin ollen voidaan olettaa, että sama savikerros jatkuu kaikissa näytepisteissä 3-4 metrin syvyydellä. Näytepisteestä 8012 määritettyjä tehokkaita lujuusparametreja voidaan siis käyttää yleisinä parametreina kuvaamaan ylintä savikerrosta.



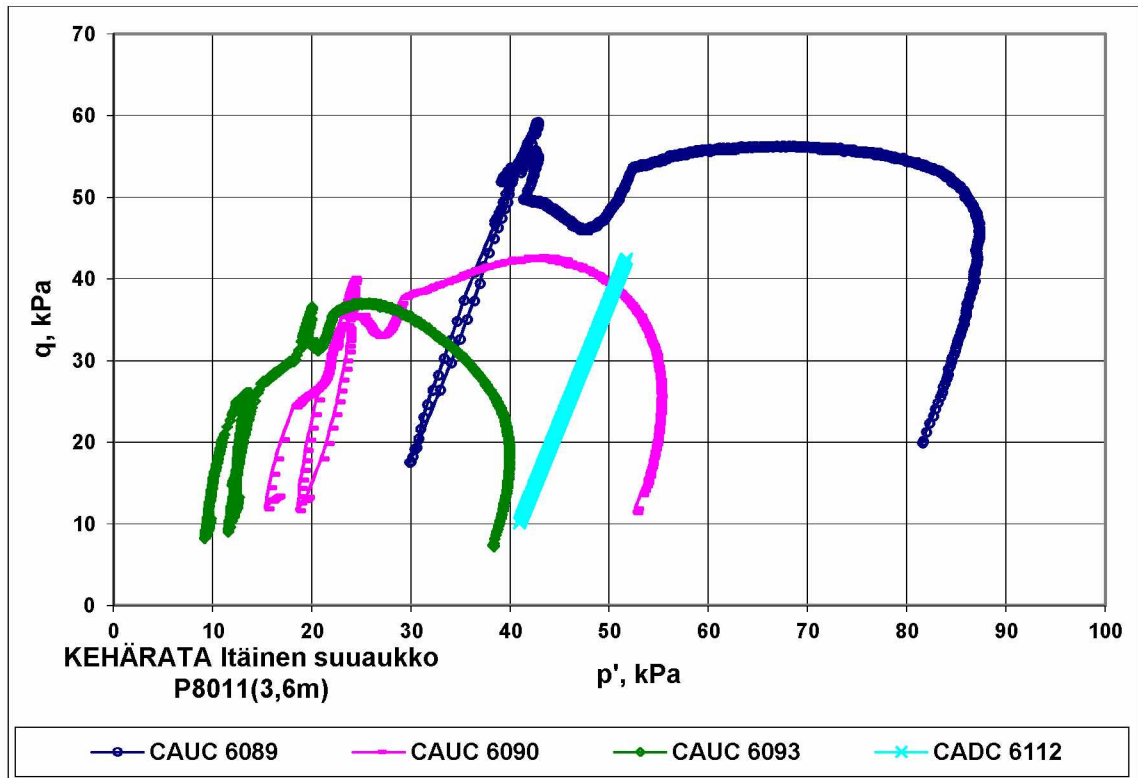
Kuva 18  $q$ - $e_1$  kuvaaja, 3 ja 4m



Kuva 19  $q$ - $p'$  -kuvaaja, 3 ja 4m

### 5.3 Avoimet kokeet

Avoimia kolmiakksiaalikoiteita tehtiin kahdesta näytestä: pisteestä 8011 3,3 metrin syvyydeltä ja toinen pisteestä 8014 5,3 metrin syvyydeltä. Kuvassa 20 on esitetty pisteestä 8011 samalta syvyydeltä otetuista näytteistä tehtyjen kolmen suljetun ja yhden avoimen kolmiakksiaalikoiteen  $p'$ - $q$  kuvaajat.



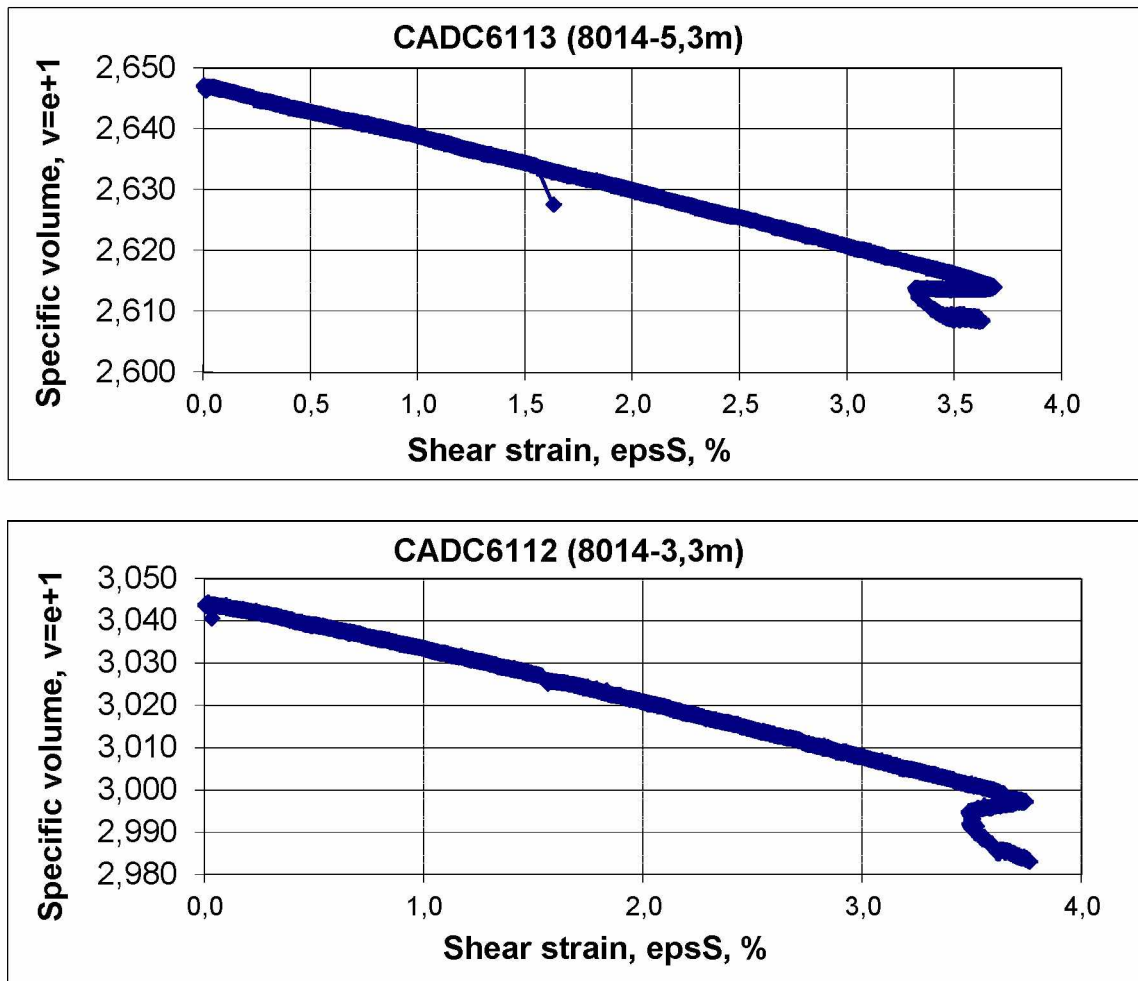
Kuva 20 Piste 8011 3,6 m syvyydeltä tehdyt avoimet ja suljetut kolmiakksiaalikoiteet

Poissonin luku  $\nu$  voidaan laskea avoimesta kolmiakksiaalikoiteesta kaavan 12 mukaisesti.

$$\nu = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_v}{2 \cdot \varepsilon_1} \quad (12)$$

missä  $\varepsilon_1$  = suhteellinen pystymuodonmuutos [mm]  
 $\varepsilon_v$  = suhteellinen tilavuuden muutos [mm<sup>3</sup>]

Kuvassa 21 ja 22 on esitetty näytteiden tilavuudenmuutos ja Poissonin luku kokeen aikana.



Kuva 21 ev-e1 kuvaaja CADC 6113 ja CADC6112

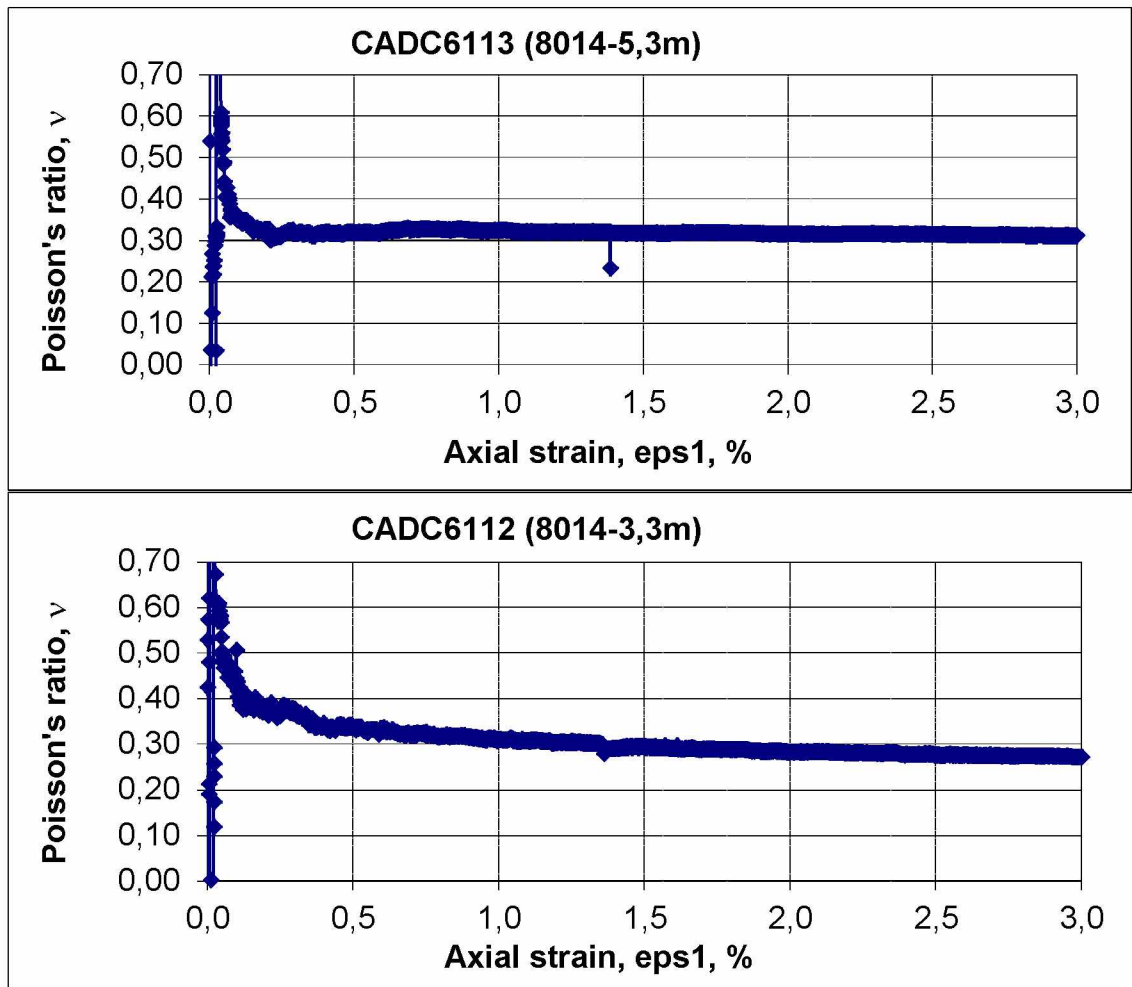
Kimmomoduuli  $E_{ur}^{ref}$  lasketaan avoimen kolmiaksaalikokeen palautus-toistokuormitus vaiheesta  $q$ - $\varepsilon$  kuvaajasta (kuva 23 ja 24) sekanttimoduulina. Sellipaineena käytetään referenssipainetta  $p^{ref}=100$  kPa vastaavaa arvoa.

$$E_{ur}^{ref} = \frac{q_l - q_0}{\varepsilon_l - \varepsilon_0} \quad (13)$$

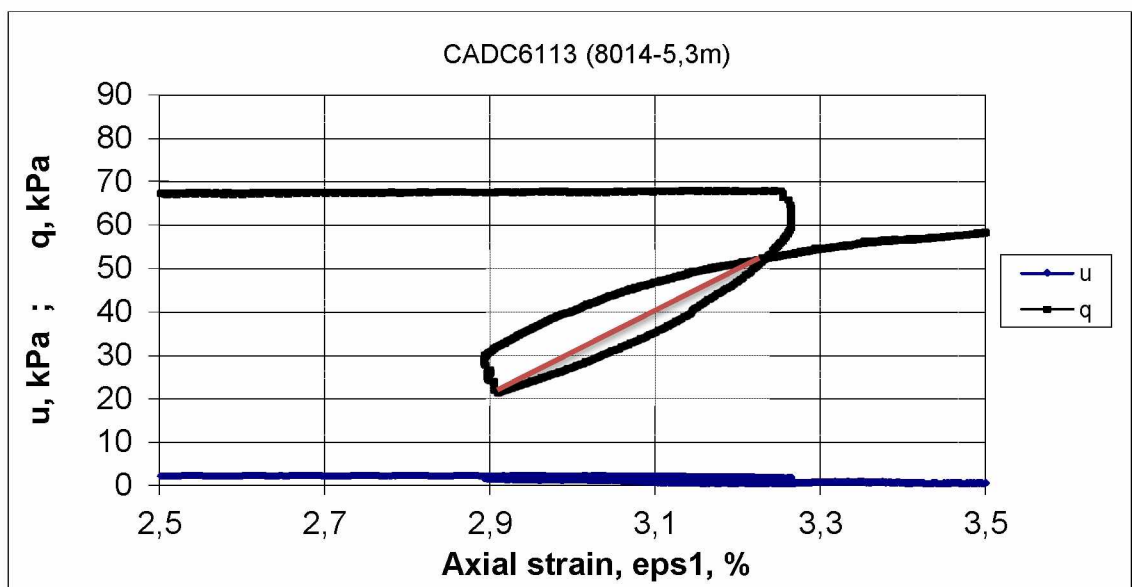
missä  $q_l$  = palautus-toistokuormitus silmukan leikkauskohta (ks. kuvat 19 ja 20)  
 $q_0$  = palautus-toistokuormitus silmukan minimiarvo  
 $\varepsilon_l$  = suhteellinen pystymuodonmuutos leikkauskohdassa  
 $\varepsilon_0$  = suhteellinen pystymuodonmuutos silmukan alimmassa kohdassa

Plaxis 2011 ohjelmassa oletetaan kimmomoduulien  $E_{50}^{ref}$  ja  $E_{ur}^{ref}$  noudattavan kaavaa 14.

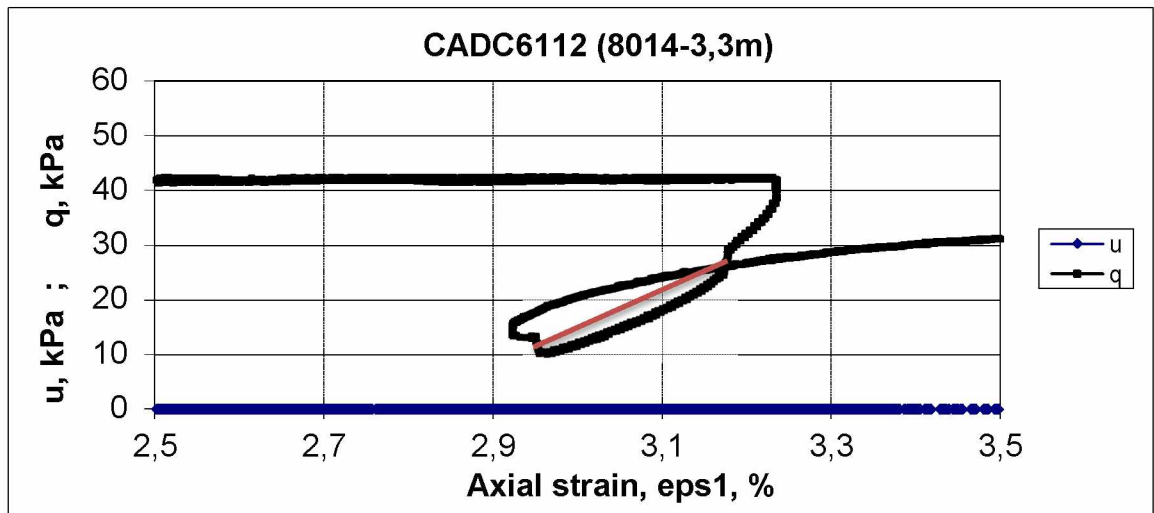
$$E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} \quad (14)$$



Kuva 22 Poissonin luku CADC6113 ja CADC6112



Kuva 23  $E_{ur}^{ref}$  määrittäminen avoimen kolmiakselikokeen palautus-toistokuormitussilmukasta sekanttimoduulin avulla (CADC6113)



Kuva 24  $E_{ur}^{ref}$  määrittäminen avoimen kolmiaksaalikokeen palautus-toistokuormitussilmukasta sekanttimoduulin avulla (CAD6113)

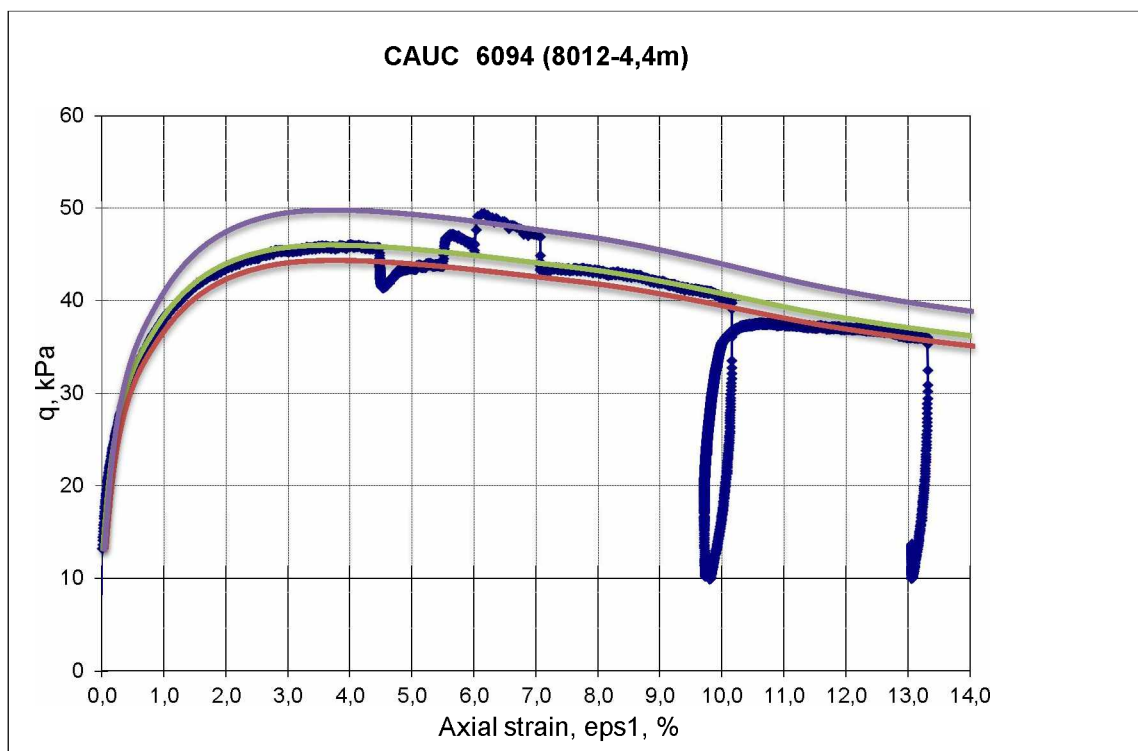
Taulukossa 16 on esitetty avoimista kolmiaksaalikokeista määritellyt kimmomoduulien arvot.

Taulukko 16 Avoimista kokeista määritetyt kimmomoduulien arvot

| koe      | $E_{ur}^{ref}$ | $E_{50}^{ref}$ |
|----------|----------------|----------------|
| CADC6112 | 70,91          | 23,64          |
| CADC6113 | 92,66          | 30,89          |

## 6 Nopeuden vaikutus kolmiakselikokeessa

Kuten luvussa 4 mainittiin, käytettiin jokaisessa kolmiakselikokeessa kolme eri kuormitusnopeutta. Kuvasta 13 voitiin havaita kuormitusnopeuden vaikuttavan tehokkain lujuusparametreihin  $\varphi'$  ja  $c'$ . Kuormitusnopeuden vaikutus näytteen lujuuteen käy selvimmän ilmi kun katsotaan  $\varepsilon$ - $q$  kuvaajaa. Kuvassa 25 on esitetty kokeen CAUC 6094 jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Kuvaajasta voidaan havaita, että näyte reagoi kuormitusnopeuden muutokseen deviatorisen jännityksen tason kautta. Kun kuormitusnopeutta lasketaan kesken kokeen, laskee näytteen deviatorinen jännitystaso nopeasti. Käyrän muoto ei kuitenkaan näytä muuttuvan.



Kuva 25 Kuormituksen nopeusvaikutus. Violetti viiva kuvaa kuormitusnopeutta 6%/h, vihreä 0,6%/h ja punainen 0,06%/h

## Lähdeluettelo

Bengtsson, P.E., & Larsson R. 1994, Användarhandbok Program Embankco, version 1.02. Statens Geotekniska Institut och Vägverket, Linköping.

CEN ISO/TS 17892-1 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 1: Vesipitoisuuden määrittäminen. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-2 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 2: Hienorakeisen maan irtotiheyden määrittäminen

CEN ISO/TS 17892-3 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 3: Kiintotiheyden määrittäminen. Pyknometrinen menetelmä ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-4 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 4: Rakeisuuden määrittäminen ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-5 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 5: Ödometrikoe (kuorman lisäys portaittain) ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-6 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 6: Kartiokoe ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-9 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 9: Konsolidoidut kolmiakselialikokeet (vedellä kyllästetty näyte) ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-11 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 11: Vedenläpäisevyyden määrittäminen. Vakiopaine- ja muuttovapainekoe ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

CEN ISO/TS 17892-12 (2007). Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 12: Konsistenssirajojen määrittäminen. Atterbergin rajat ja sen soveltaminen Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 19997-2 + AC (2007). Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus. Suomen Standardisoimisliitto.



Claesson, P. 2003. Long term settlements in soft clays. Göteborg, Department of geotechnical engineering, Chalmers University of Technology.

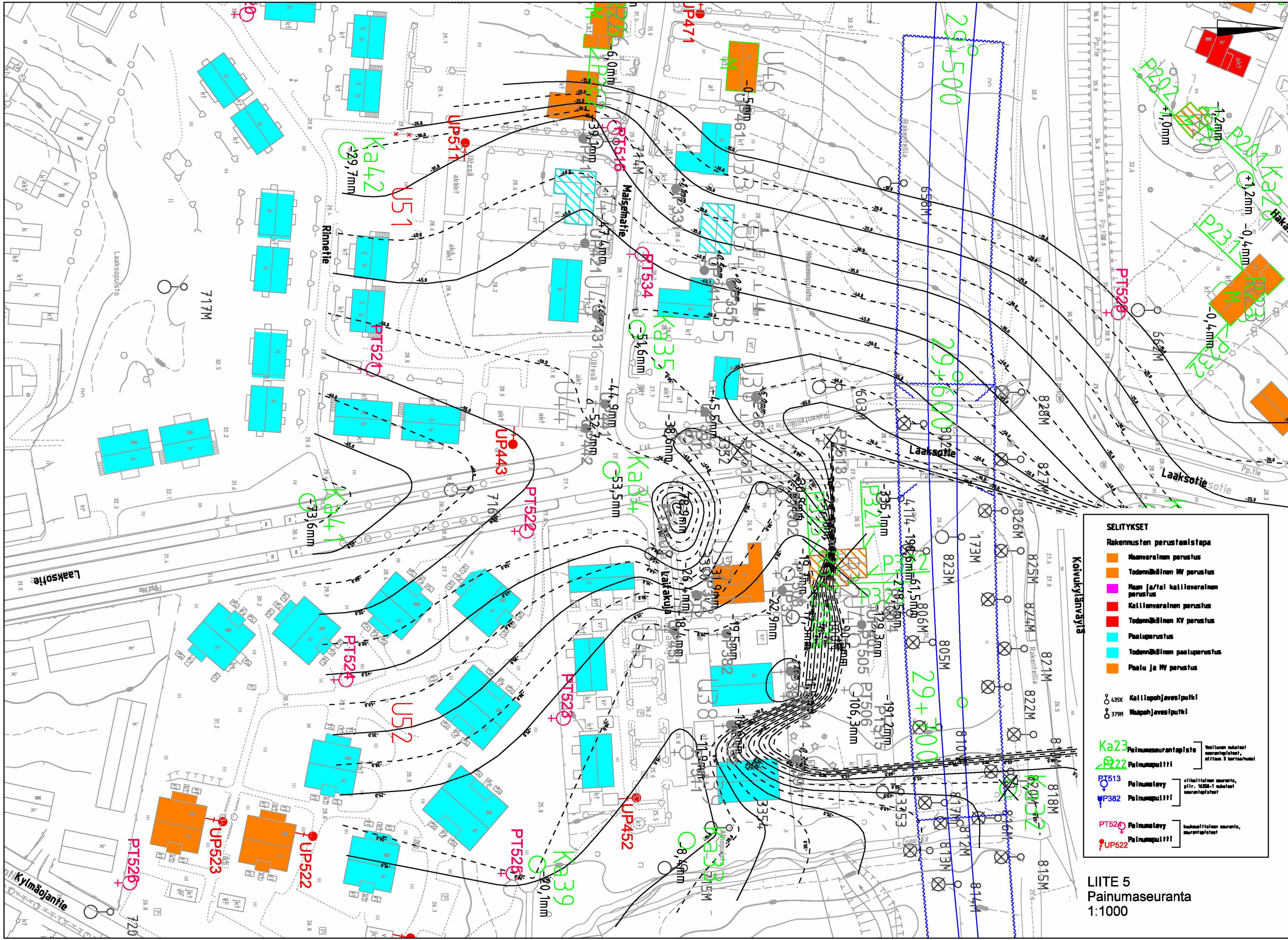
Larsson, R. Bengtsson, P-E. & Eriksson, L. 1997. Prediction of settlements of embankments on soft, fine-grained soils. Calculation of settlements and their course with time. Linköping, Swedish Geotechnical Institute. ISSN 0281-7578.

Länsivaara, T. (2000). Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi. *Tielaitoksen selvityksiä 44/2000*. Helsinki, Suomi: Tielaitos.

Jääskeläinen, R. (2009). Geotekniikan perusteet. Tampere, Tammertekniikka. 2. painos. 332 s. ISBN 978-952-5491-50-0

Vepsäläinen, P. & Takala, J. 2004. Settlement theory manual. [viitattu 22.2.2013] Saatavilla: Novapoint GeoCalc <http://docs.vianova.fi/GeoCalc/2.4/index.htm>





**SELITYKSET**

**Rakennusten perustamistapa**

- Maanvarainen perustus
- Todennäköinen MV perustus
- Maan ja/tai kalliovarainen perustus
- Kalliovarainen perustus
- Todennäköinen KV perustus
- Paaluperustus
- Todennäköinen paaluperustus
- Paalu ja MV perustus

○ 435K Kalliojahvasiputki

○ 379M Maapohjahvasiputki

**Ka23 Painumaseurantapiste** Vertailun mukaiset seurantapisteen, mittaus 3 kertaa/vuosi

○ 222 Painumapuntti

♀ PT513 Painumalevy viitittävään seuranta, pilt. 4000-4 mukaiset seurantapisteen

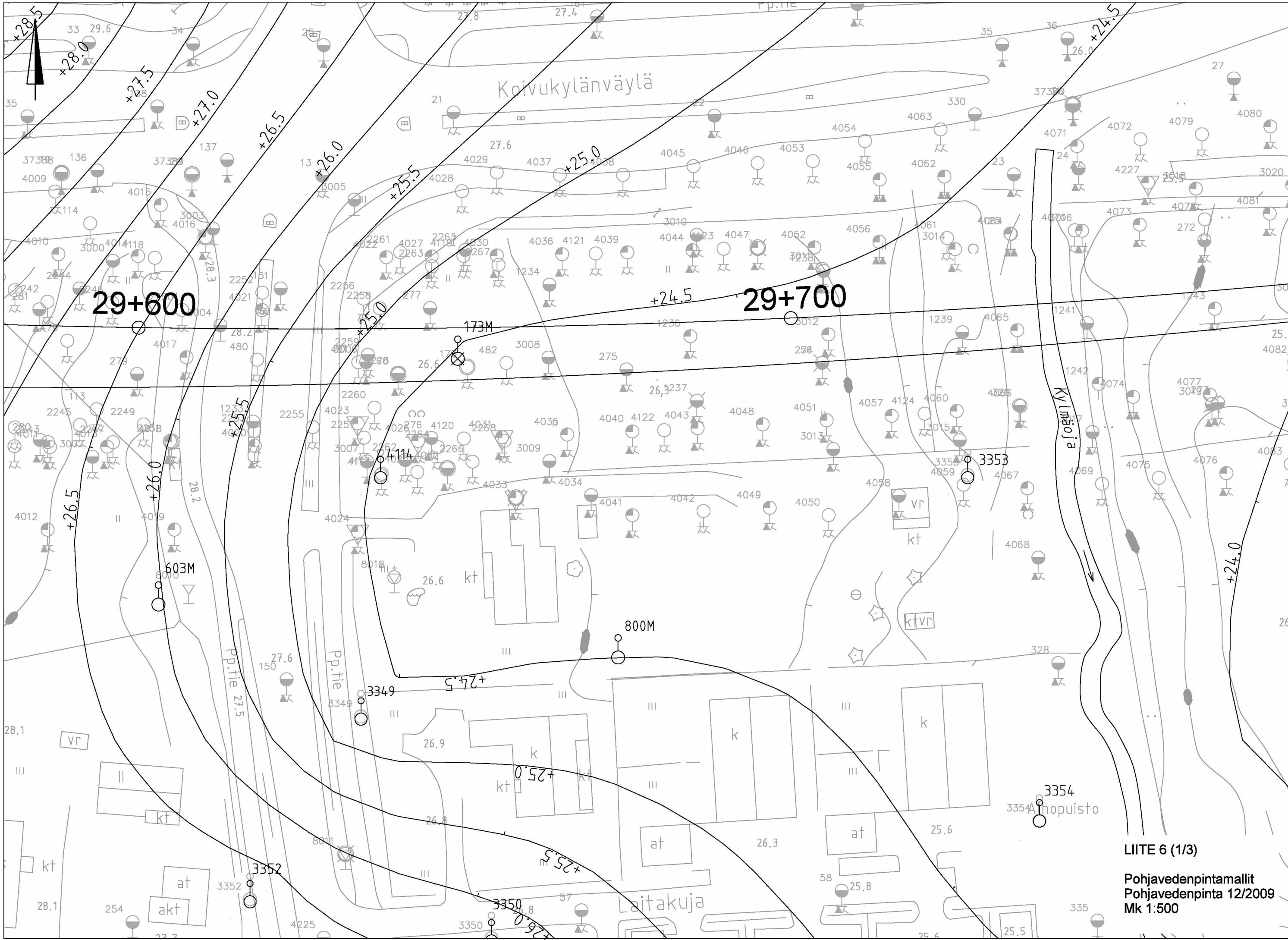
♂ P382 Painumapuntti

♀ PT526 Painumalevy kaasulliseen seuranta, seurantapisteen

♂ UP522 Painumapuntti

LIITE 5  
Painumaseuranta  
1:1000





Koivukylänväylä

Kylmäoja

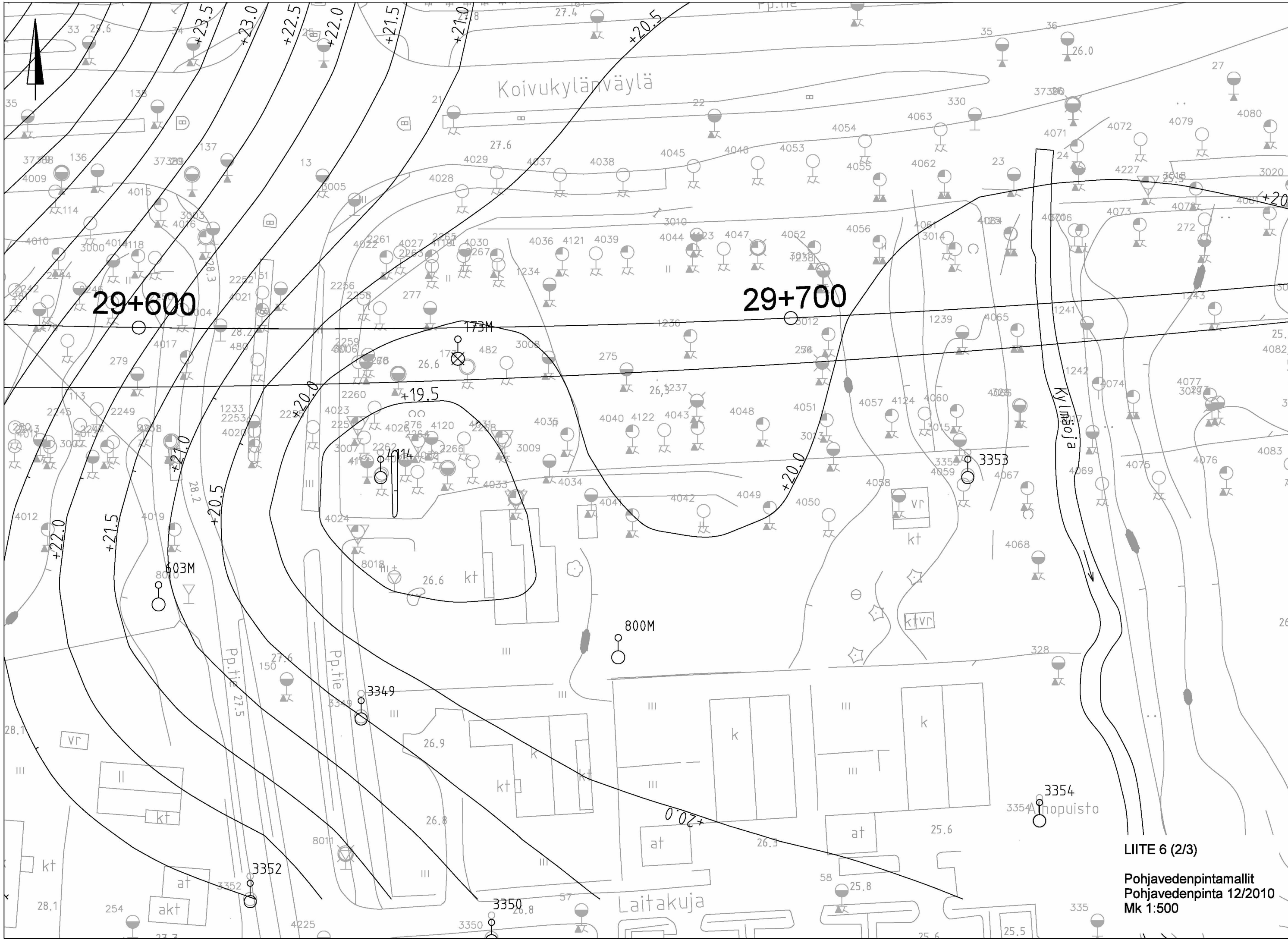
Laitakuja

29+600

29+700

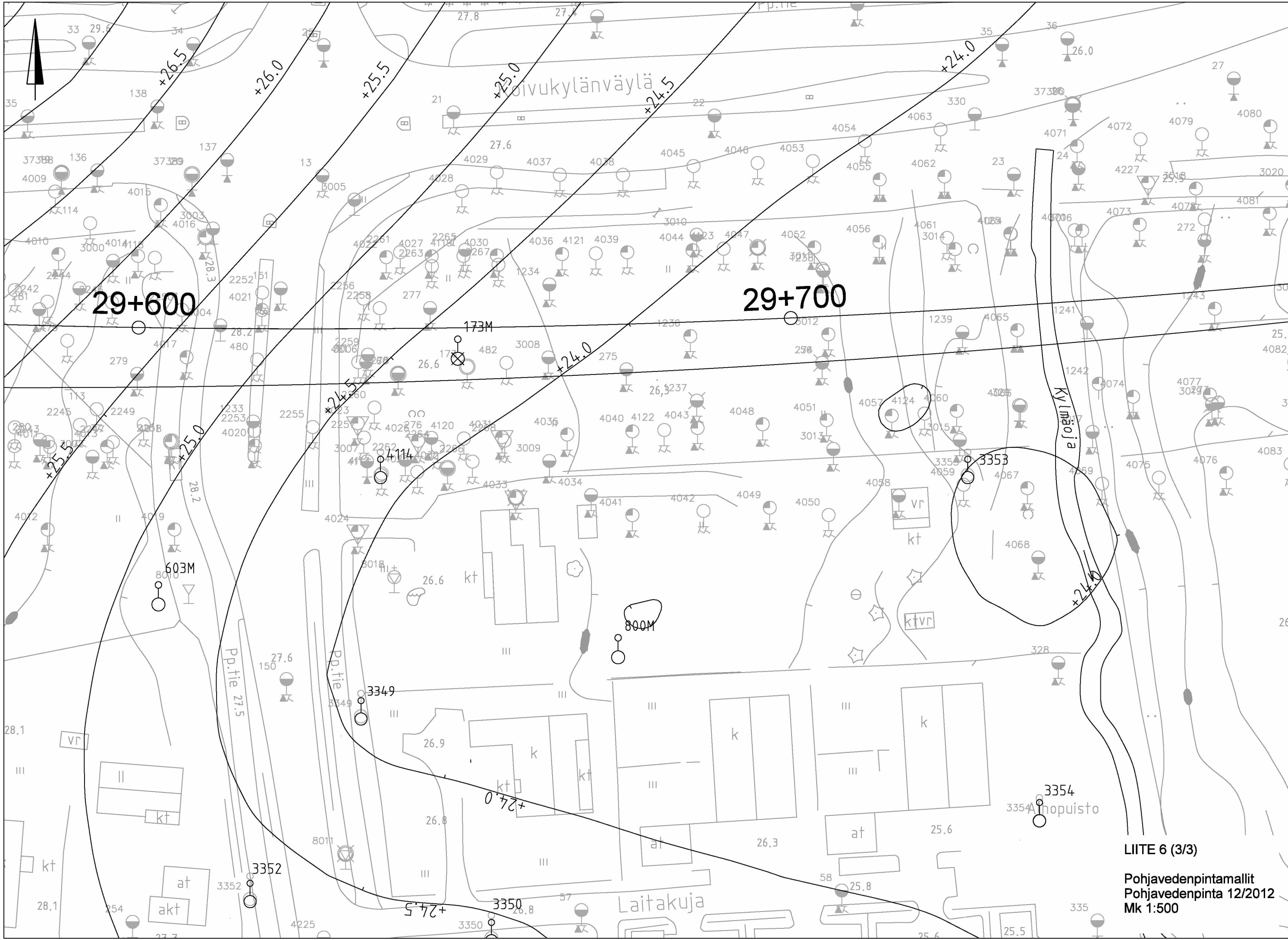
LIITE 6 (1/3)

Pohjavedenpintamalli  
 Pohjavedenpinta 12/2009  
 Mk 1:500



LIITE 6 (2/3)

Pohjavedenpintamallit  
Pohjavedenpinta 12/2010  
Mk 1:500



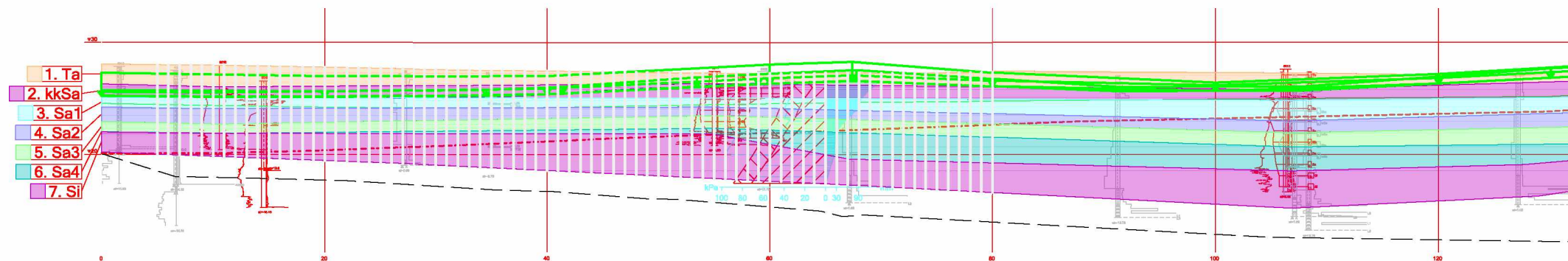
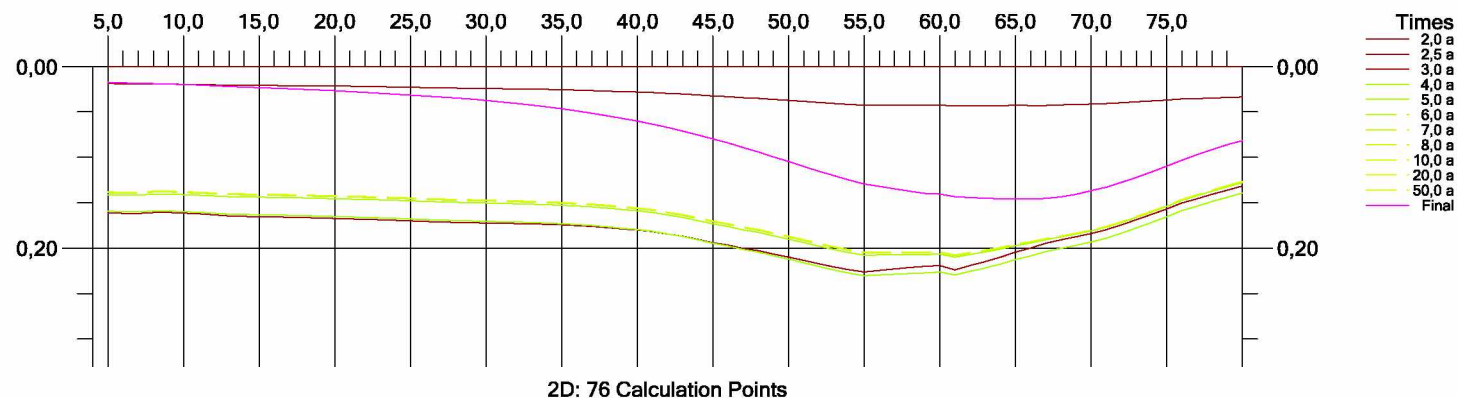
29+600

29+700

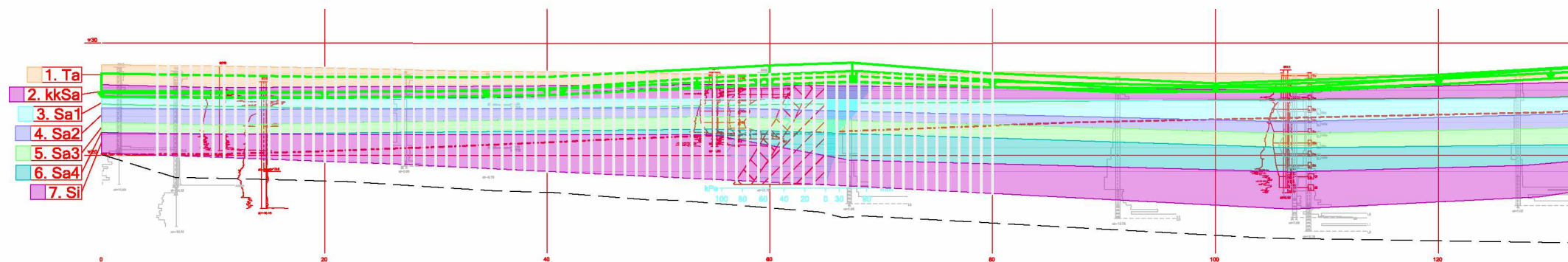
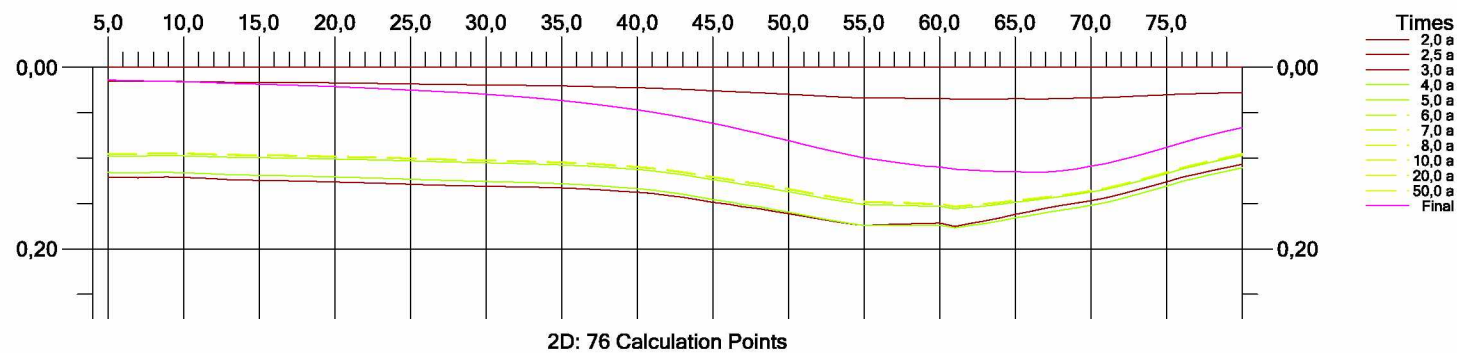
LIITE 6 (3/3)

Pohjavedenpintamalli  
 Pohjavedenpinta 12/2012  
 Mk 1:500



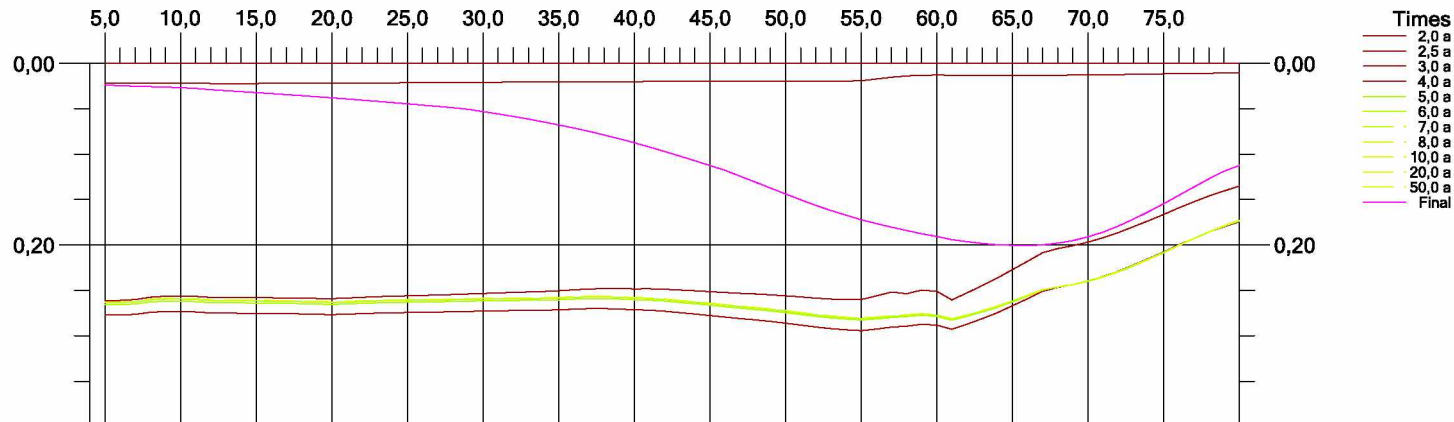


| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m2 | w [%]  | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----|--------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 22,00  |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 27,00  |       |
| 3 Sa1      | 5,720                         | 15,720                              | Constant cv         | 0,37000                      | 2,59000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 63,00  | 14,00 |
| 4 Sa2      | 4,230                         | 14,230                              | Constant cv         | 0,44000                      | 8,32000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 104,00 | 10,00 |
| 5 Sa3      | 7,550                         | 17,550                              | Constant cv         | 0,31700                      | 4,35000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 62,00  | 4,00  |
| 6 Sa4      | 6,640                         | 16,640                              | Constant cv         | 0,44500                      | 5,57000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 28,00  | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 26,00  |       |

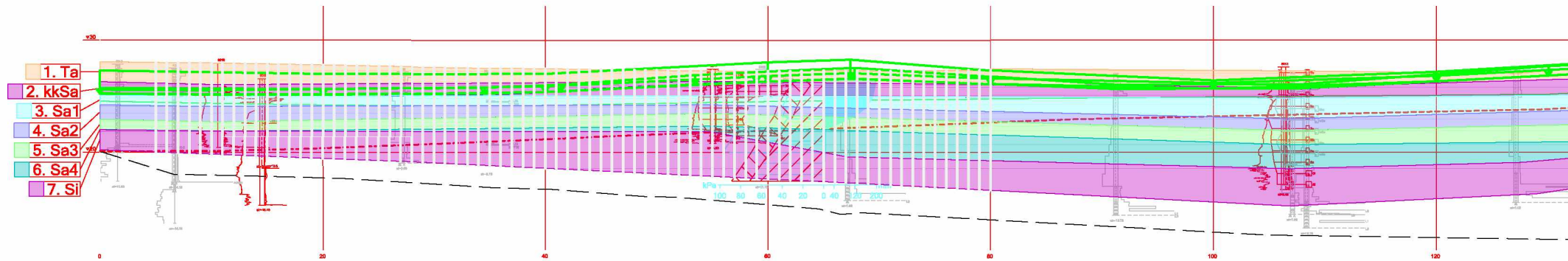


| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m2 | w [%]  | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----|--------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 22,00  |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 27,00  |       |
| 3 Sa1      | 5,720                         | 15,720                              | Constant cv         | 0,37000                      | 2,59000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 63,00  | 14,00 |
| 4 Sa2      | 4,230                         | 14,230                              | Constant cv         | 0,44000                      | 8,32000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 104,00 | 10,00 |
| 5 Sa3      | 7,550                         | 17,550                              | Constant cv         | 0,31700                      | 4,35000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 62,00  | 4,00  |
| 6 Sa4      | 6,640                         | 16,640                              | Constant cv         | 0,44500                      | 5,57000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 28,00  | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 26,00  |       |

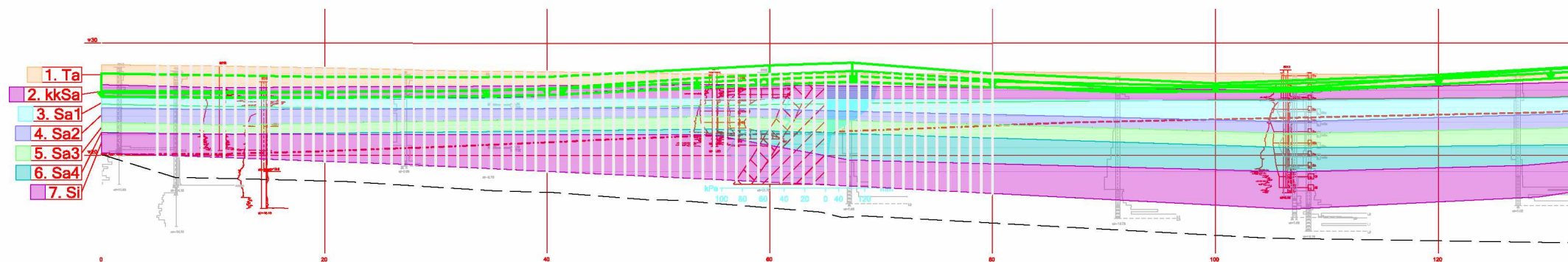
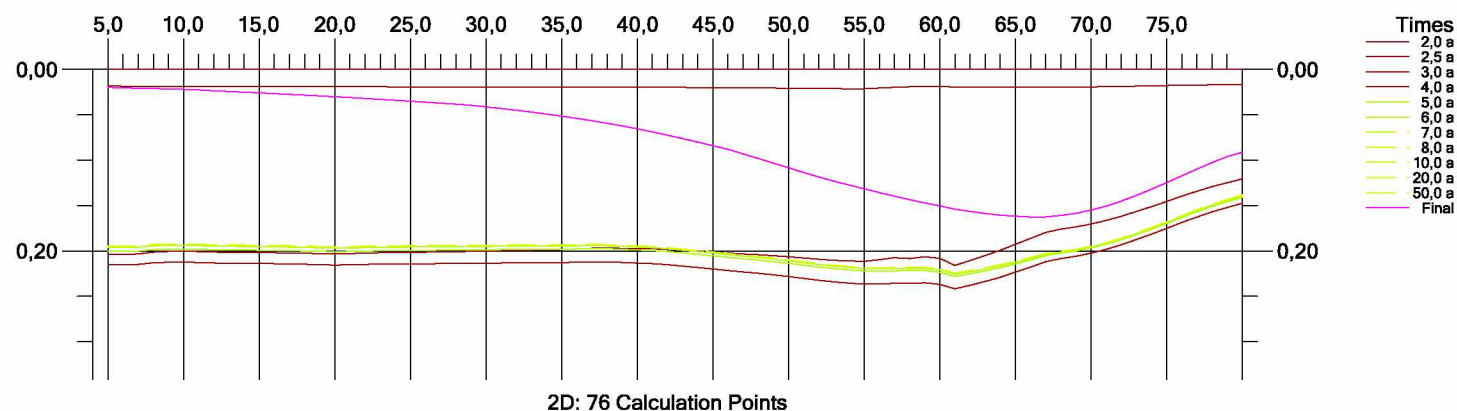




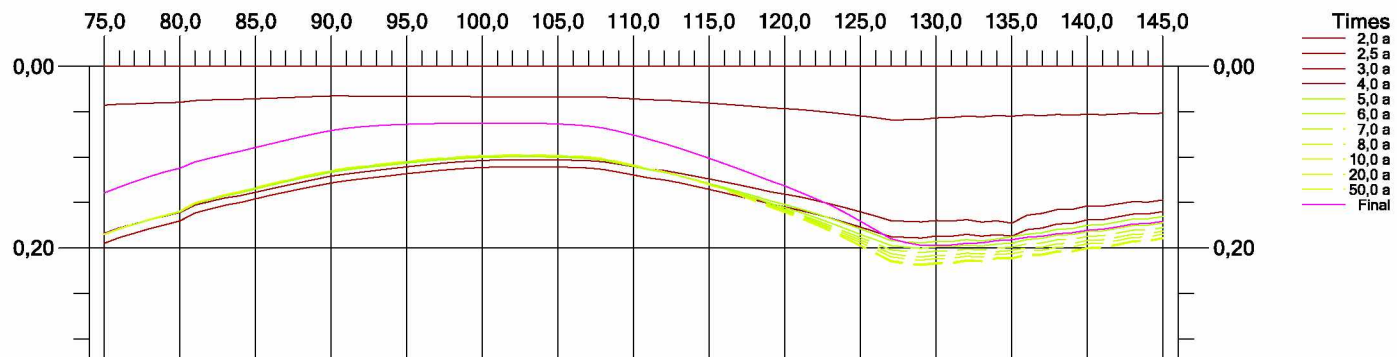
2D: 76 Calculation Points



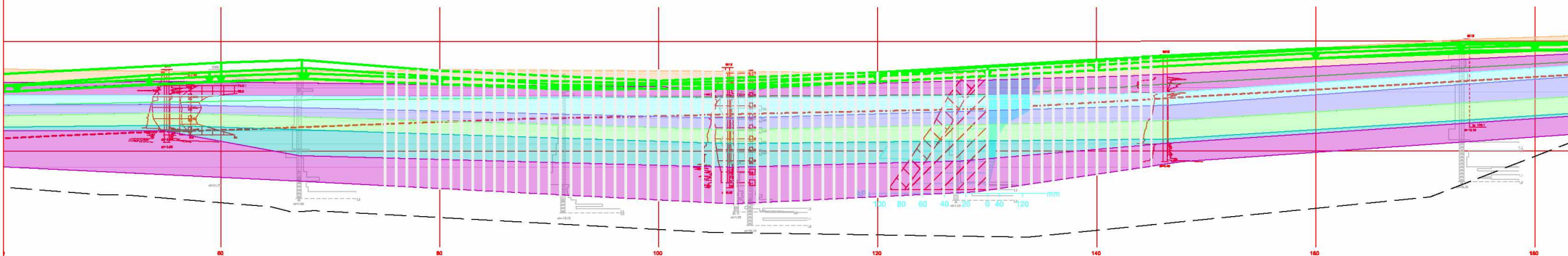
| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m1     | $\beta_1$ | m2     | $\beta_2$ | oc oedo<br>[kPa] | m1 bound to oc | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------|-----------|--------|-----------|------------------|----------------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |
| 3 Sa1      | 5,720                         | 15,720                              | Constant cv         | 0,37000                      | 2,59000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 5,81   | -0,17     | 64,03  | 0,68      | 49,50            | yes            | 14,00 |
| 4 Sa2      | 4,230                         | 14,230                              | Constant cv         | 0,44000                      | 8,32000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 4,72   | -1,07     | 75,47  | 0,97      | 71,33            | yes            | 10,00 |
| 5 Sa3      | 7,550                         | 17,550                              | Constant cv         | 0,31700                      | 4,35000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 4,81   | -0,84     | 151,13 | 1,03      | 58,33            | yes            | 4,00  |
| 6 Sa4      | 6,640                         | 16,640                              | Constant cv         | 0,44500                      | 5,57000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 2,31   | -1,51     | 190,35 | 2,78      | 98,61            | yes            | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |



| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m1     | $\beta_1$ | m2     | $\beta_2$ | oc oedo<br>[kPa] | m1 bound to oc | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------|-----------|--------|-----------|------------------|----------------|-------|
| 1. Ta      | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |
| 2. kkSa    | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |
| 3. Sa1     | 5,720                         | 15,720                              | Constant cv         | 0,37000                      | 2,59000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 6,05   | 0,00      | 68,40  | 0,00      | 49,50            | yes            | 14,00 |
| 4. Sa2     | 4,230                         | 14,230                              | Constant cv         | 0,44000                      | 8,32000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 5,16   | 0,00      | 85,39  | 0,00      | 71,33            | yes            | 10,00 |
| 5. Sa3     | 7,550                         | 17,550                              | Constant cv         | 0,31700                      | 4,35000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 5,47   | 0,00      | 109,54 | 0,00      | 58,33            | yes            | 4,00  |
| 6. Sa4     | 6,640                         | 16,640                              | Constant cv         | 0,44500                      | 5,57000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 4,74   | 0,00      | 64,11  | 0,00      | 98,61            | yes            | 45,00 |
| 7. Si      | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |

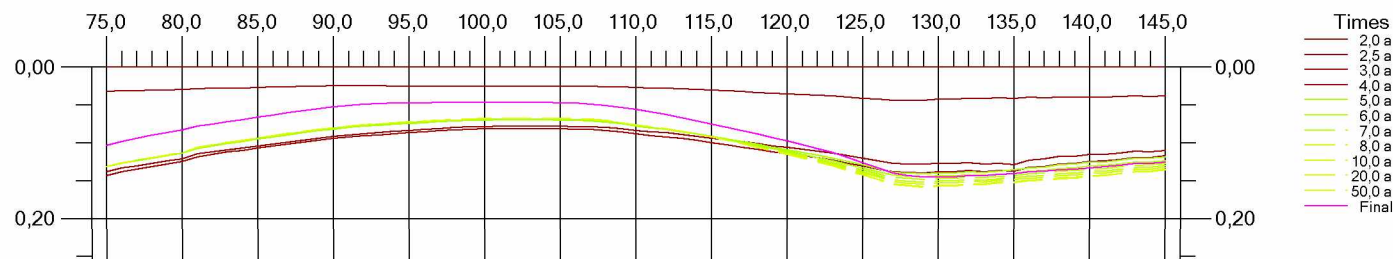


2D: 71 Calculation Points

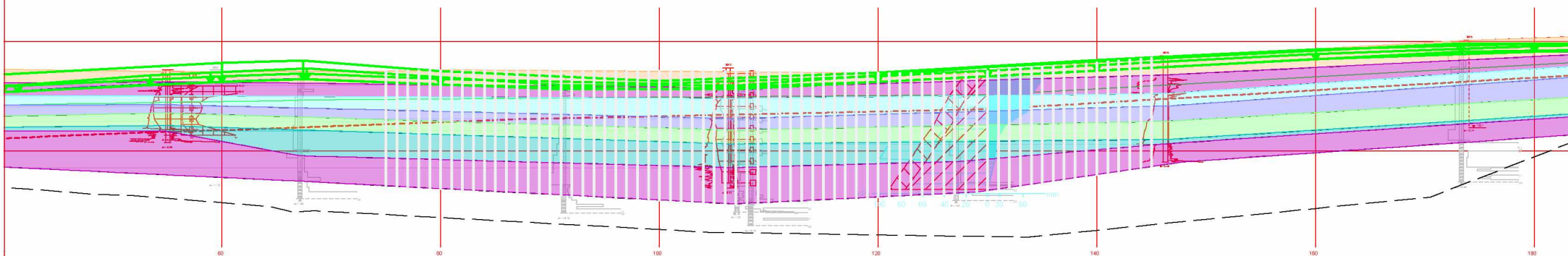


|   | Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m2 | w [%]  | POP   |
|---|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----|--------|-------|
| 1 | Ta         | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 17,50  |       |
| 2 | kkSa       | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 20,60  |       |
| 3 | Sa1        | 5,720                         | 15,720                              | Constant cv         | 0,37000                      | 2,59000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 76,50  | 14,00 |
| 4 | Sa2        | 5,200                         | 15,200                              | Constant cv         | 0,62000                      | 2,79000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 105,00 | -2,00 |
| 5 | Sa3        | 7,550                         | 17,550                              | Constant cv         | 0,31700                      | 4,35000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 58,60  | 4,00  |
| 6 | Sa4        | 6,640                         | 16,640                              | Constant cv         | 0,44500                      | 5,57000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 74,40  | 45,00 |
| 7 | Si         | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 29,00  |       |

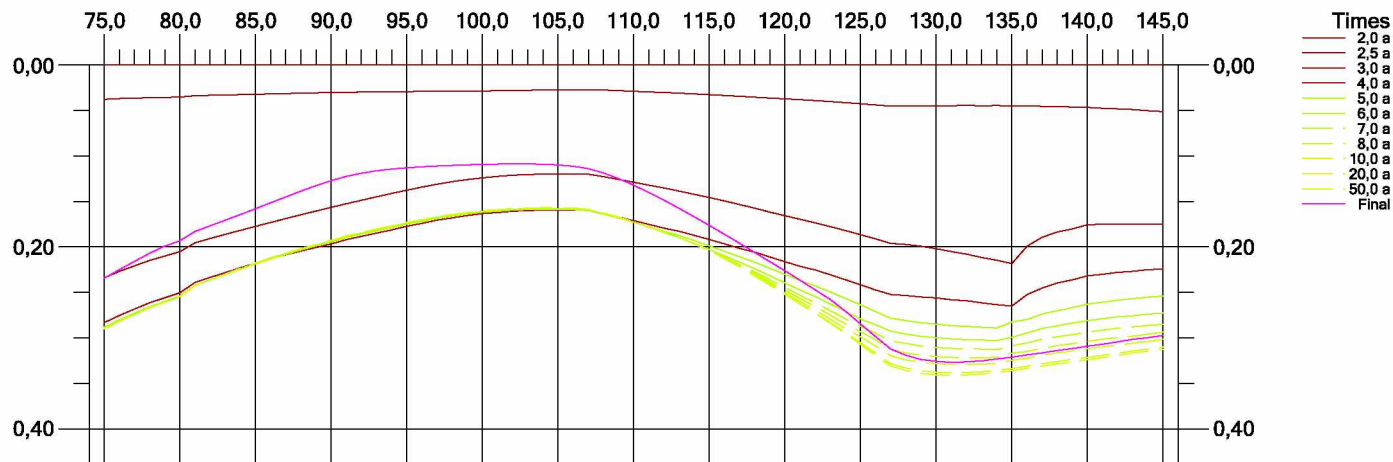




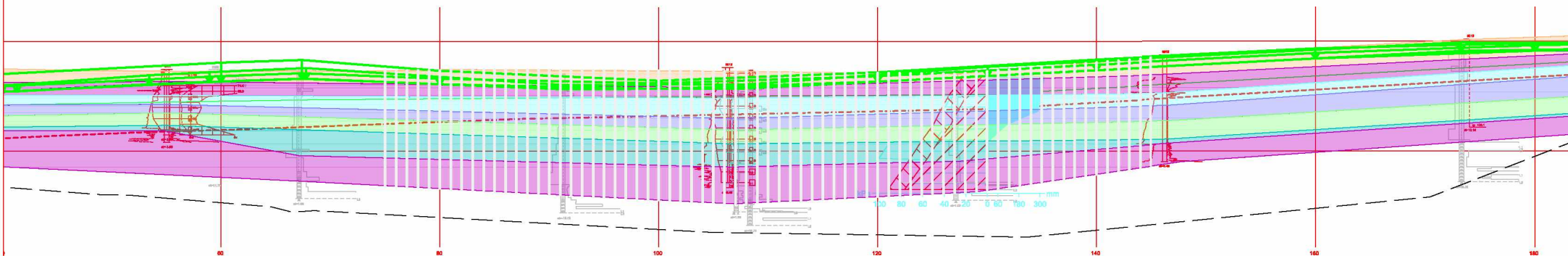
2D: 71 Calculation Points



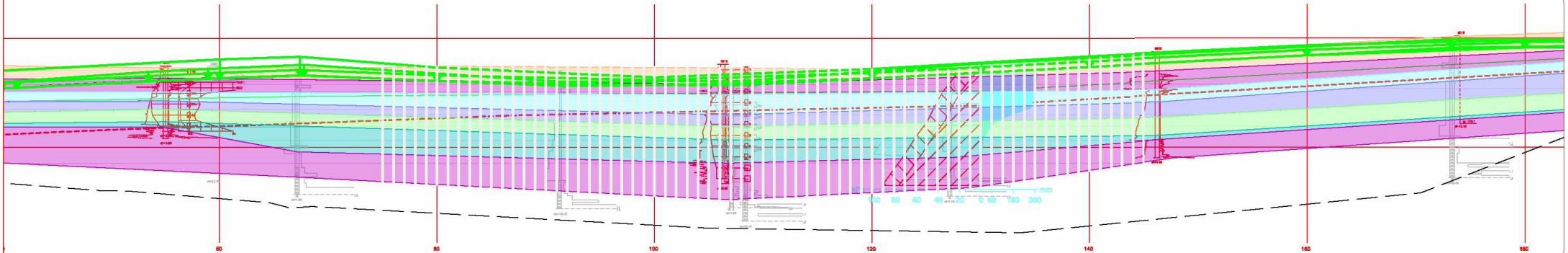
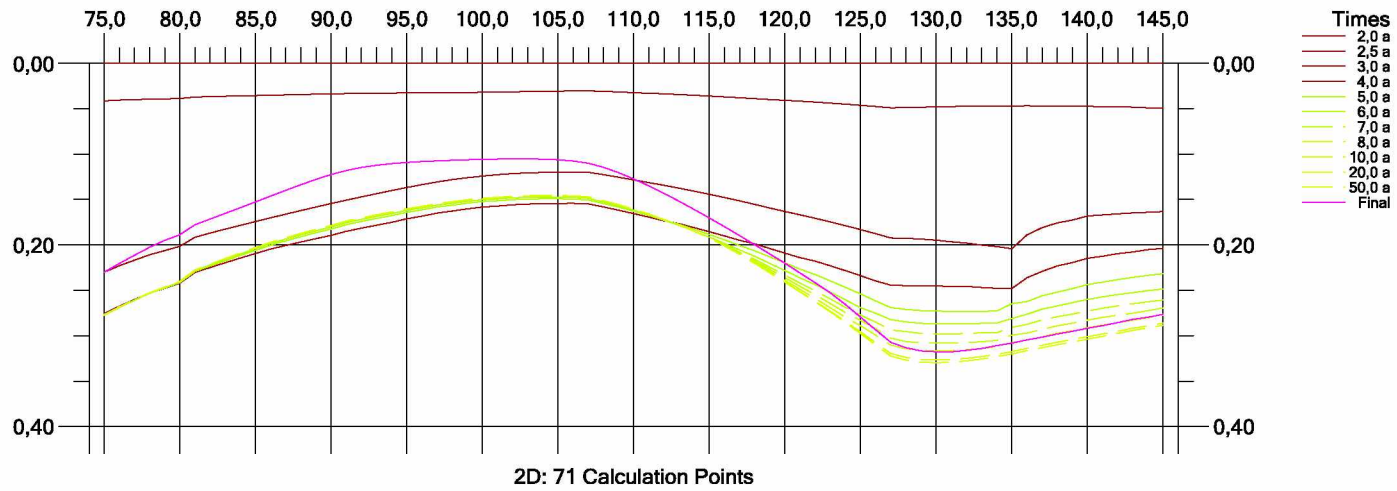
|   | Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m2 | w [%]  | POP   |
|---|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----|--------|-------|
| 1 | Ta         | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 17,50  |       |
| 2 | kkSa       | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 20,60  |       |
| 3 | Sa1        | 5,720                         | 15,720                              | Constant cv         | 0,37000                      | 2,59000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 76,50  | 14,00 |
| 4 | Sa2        | 5,200                         | 15,200                              | Constant cv         | 0,62000                      | 2,79000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 105,00 | -2,00 |
| 5 | Sa3        | 7,550                         | 17,550                              | Constant cv         | 0,31700                      | 4,35000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 58,60  | 4,00  |
| 6 | Sa4        | 6,640                         | 16,640                              | Constant cv         | 0,44500                      | 5,57000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 74,40  | 45,00 |
| 7 | Si         | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 29,00  |       |



2D: 71 Calculation Points

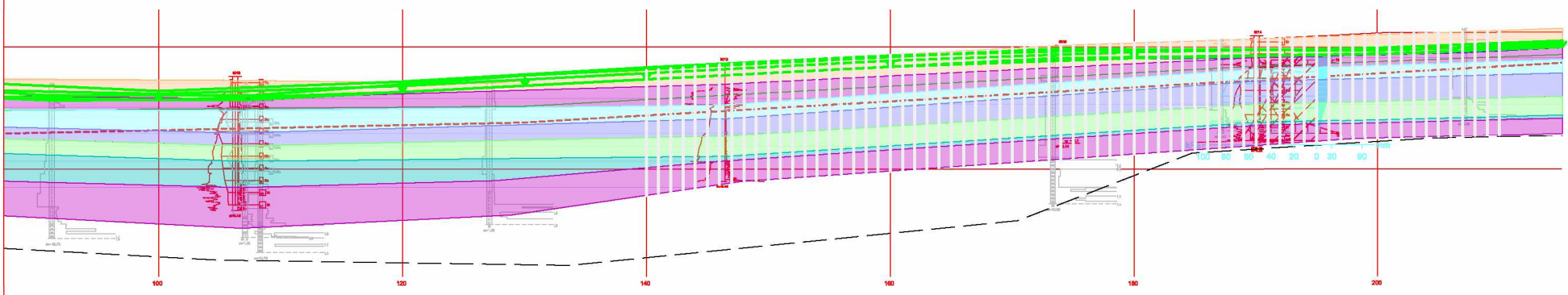
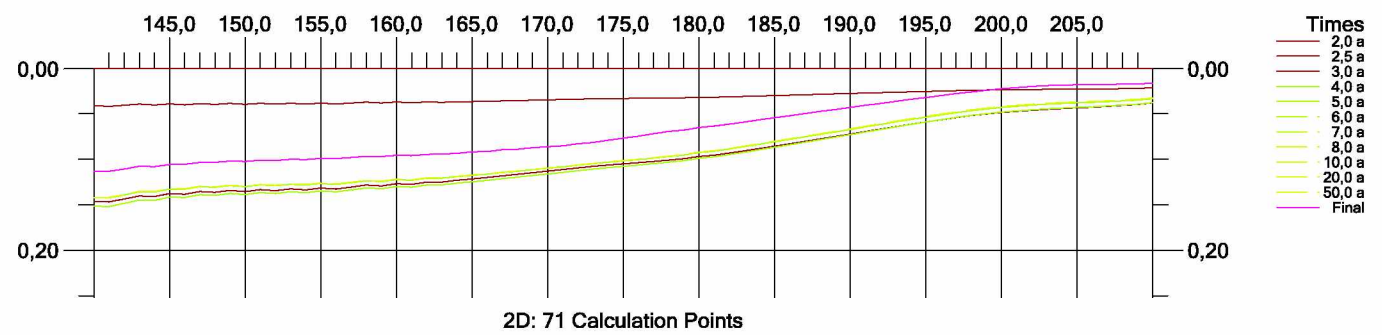


| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m1     | $\beta_1$ | m2     | $\beta_2$ | oc oedo<br>[kPa] | m1 bound to oc | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------|-----------|--------|-----------|------------------|----------------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |
| 3 Sa1      | 5,720                         | 15,720                              | Constant cv         | 0,37000                      | 2,59000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 5,81   | -0,17     | 64,03  | 0,68      | 46,00            | yes            | 14,00 |
| 4 Sa2      | 5,200                         | 15,200                              | Constant cv         | 0,62000                      | 2,79000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 4,53   | -0,84     | 66,43  | 0,30      | 50,00            | yes            | -2,00 |
| 5 Sa3      | 7,550                         | 17,550                              | Constant cv         | 0,31700                      | 4,35000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 4,81   | -0,84     | 151,13 | 1,03      | 64,00            | yes            | 4,00  |
| 6 Sa4      | 6,640                         | 16,640                              | Constant cv         | 0,44500                      | 5,57000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 2,31   | -1,51     | 190,35 | 2,78      | 155,00           | yes            | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00             | yes            |       |

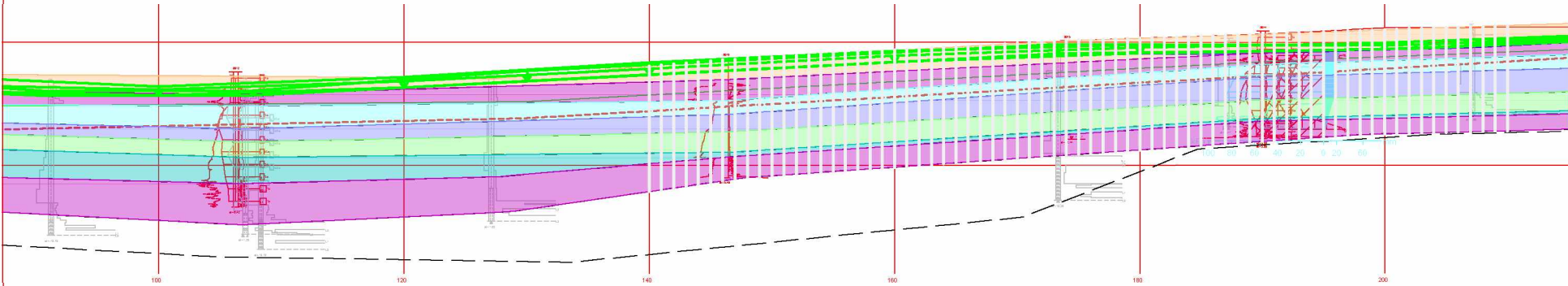
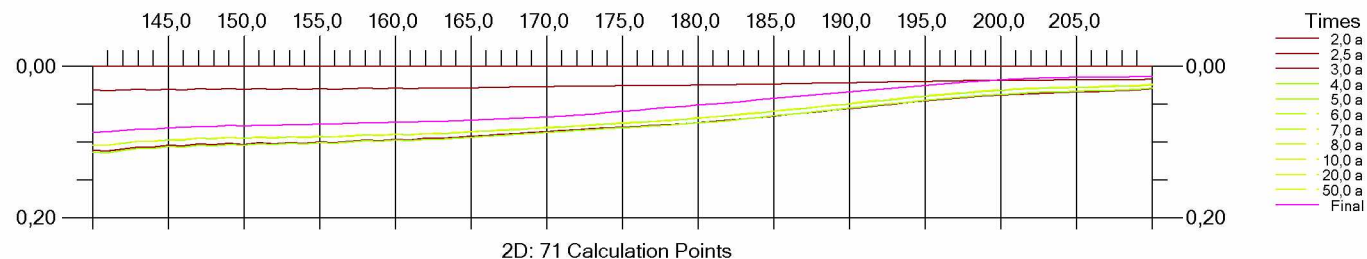


| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m1     | $\beta_1$ | m2     | $\beta_2$ | $\sigma_c$ oedo<br>[kPa] | m1 bound to $\sigma_c$ | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------|-----------|--------|-----------|--------------------------|------------------------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00                     | yes                    |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00                     | yes                    |       |
| 3 Sa1      | 5,720                         | 15,720                              | Constant cv         | 0,37000                      | 2,59000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 6,05   | 0,00      | 68,40  | 0,00      | 46,00                    | yes                    | 14,00 |
| 4 Sa2      | 5,200                         | 15,200                              | Constant cv         | 0,62000                      | 2,79000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 2,77   | 0,00      | 62,71  | 0,00      | 50,00                    | yes                    | -2,00 |
| 5 Sa3      | 7,550                         | 17,550                              | Constant cv         | 0,31700                      | 4,35000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 5,47   | 0,00      | 190,54 | 0,00      | 64,00                    | yes                    | 4,00  |
| 6 Sa4      | 6,640                         | 16,640                              | Constant cv         | 0,44500                      | 5,57000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 4,74   | 0,00      | 64,11  | 0,00      | 155,00                   | yes                    | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |        |           | 0,00                     | yes                    |       |

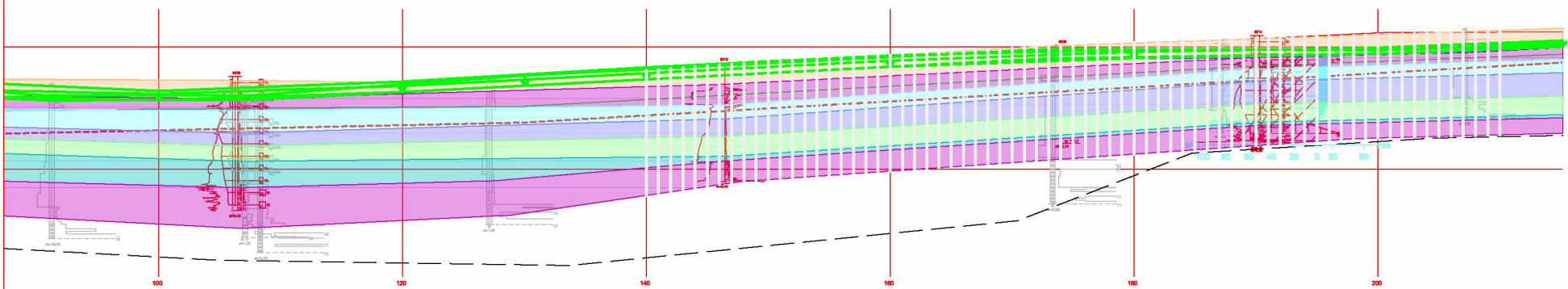
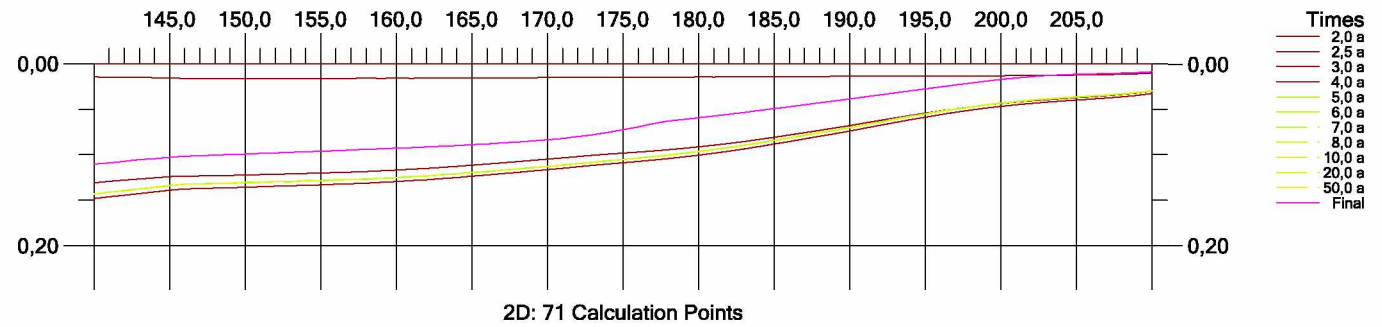




| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m2 | w [%]  | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----|--------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 22,00  |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 17,00  |       |
| 3 Sa1      | 4,700                         | 14,700                              | Constant cv         | 0,13000                      | 5,78000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 104,00 | 14,00 |
| 4 Sa2      | 4,900                         | 14,900                              | Constant cv         | 0,58500                      | 6,06000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 86,10  | 49,00 |
| 5 Sa3      | 6,670                         | 16,670                              | Constant cv         | 1,34000                      | 5,36000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 67,00  | 5,00  |
| 6 Sa4      | 7,000                         | 17,000                              | Constant cv         | 0,58000                      | 7,19000                      | no                        | w Janbu        | POP                       |    | 57,00  | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Janbu        | NC                        |    | 28,00  |       |

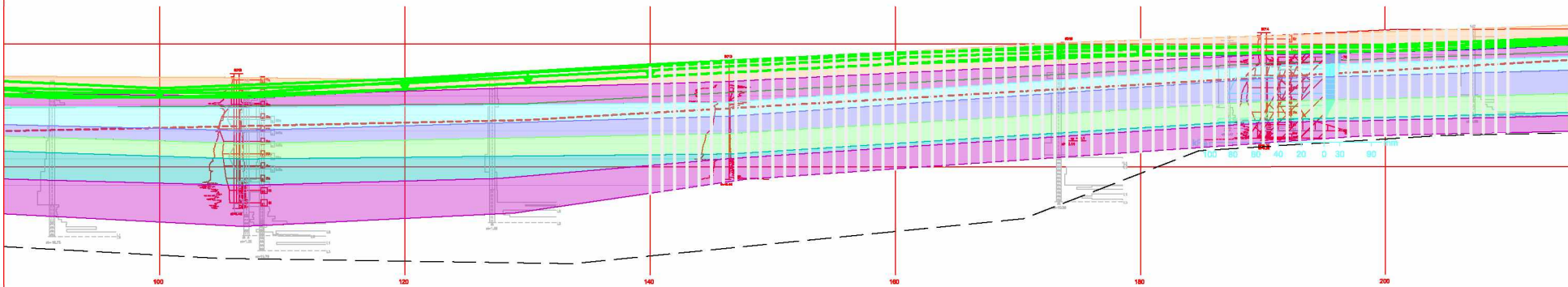
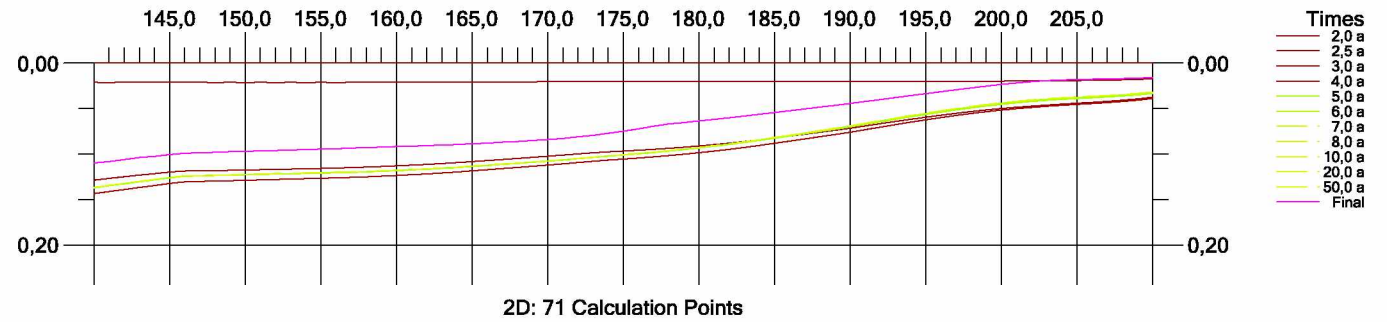


| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m2 | w [%]  | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----|--------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 22,00  |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 17,00  |       |
| 3 Sa1      | 4,700                         | 14,700                              | Constant cv         | 0,13000                      | 5,78000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 104,00 | 14,00 |
| 4 Sa2      | 4,900                         | 14,900                              | Constant cv         | 0,58500                      | 6,06000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 86,10  | 49,00 |
| 5 Sa3      | 6,670                         | 16,670                              | Constant cv         | 1,34000                      | 5,36000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 67,00  | 5,00  |
| 6 Sa4      | 7,000                         | 17,000                              | Constant cv         | 0,58000                      | 7,19000                      | no                        | w Helenelund   | POP                       |    | 57,00  | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | w Helenelund   | NC                        |    | 28,00  |       |



| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m1     | $\beta_1$ | m2    | $\beta_2$ | $\sigma_c$ oedo<br>[kPa] | m1 bound to $\sigma_c$ | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------|-----------|-------|-----------|--------------------------|------------------------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |       |           | 0,00                     | yes                    |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |       |           | 0,00                     | yes                    |       |
| 3 Sa1      | 4,700                         | 14,700                              | Constant cv         | 0,13000                      | 5,78000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 5,33   | -0,71     | 97,48 | 1,66      | 50,00                    | yes                    | 14,00 |
| 4 Sa2      | 4,900                         | 14,900                              | Constant cv         | 0,58500                      | 6,06000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 3,59   | -0,81     | 48,56 | 3,00      | 87,00                    | yes                    | 49,00 |
| 5 Sa3      | 6,670                         | 16,670                              | Constant cv         | 1,34000                      | 5,36000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 6,38   | -0,44     | 97,63 | 0,65      | 58,00                    | yes                    | 5,00  |
| 6 Sa4      | 7,000                         | 17,000                              | Constant cv         | 0,58000                      | 7,19000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 2,63   | -1,66     | 70,78 | 2,89      | 99,00                    | yes                    | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |       |           | 0,00                     | yes                    |       |



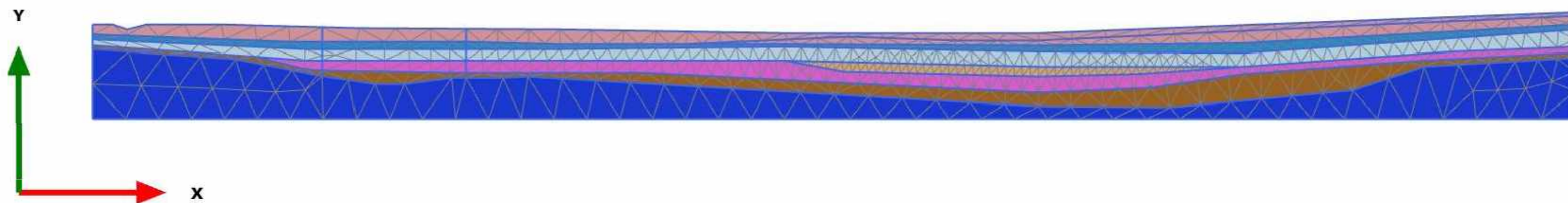


| Soil layer | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Consolidation input | Cv<br>NC [m <sup>2</sup> /a] | Cv<br>OC [m <sup>2</sup> /a] | Permeable<br>horizontally | Material model | Consolidation<br>pressure | m1     | $\beta_1$ | m2    | $\beta_2$ | $\sigma_c$ oedo<br>[kPa] | m1 bound to $\sigma_c$ | POP   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------|-----------|-------|-----------|--------------------------|------------------------|-------|
| 1 Ta       | 10,000                        | 20,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |       |           | 0,00                     | yes                    |       |
| 2 kkSa     | 8,000                         | 18,000                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |       |           | 0,00                     | yes                    |       |
| 3 Sa1      | 4,700                         | 14,700                              | Constant cv         | 0,13000                      | 5,78000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 4,15   | 0,00      | 65,92 | 0,00      | 50,00                    | yes                    | 14,00 |
| 4 Sa2      | 4,900                         | 14,900                              | Constant cv         | 0,58500                      | 6,06000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 4,14   | 0,00      | 84,41 | 0,00      | 87,00                    | yes                    | 49,00 |
| 5 Sa3      | 6,670                         | 16,670                              | Constant cv         | 1,34000                      | 5,36000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 6,39   | 0,00      | 92,47 | 0,00      | 58,00                    | yes                    | 5,00  |
| 6 Sa4      | 7,000                         | 17,000                              | Constant cv         | 0,58000                      | 7,19000                      | no                        | Ohde-Janbu     | POP                       | 5,10   | 0,00      | 72,89 | 0,00      | 99,00                    | yes                    | 45,00 |
| 7 Si       | 7,500                         | 17,500                              | Constant cv         | 50,00000                     |                              | no                        | Ohde-Janbu     | NC                        | 100,00 | 0,00      |       |           | 0,00                     | yes                    |       |

| kerros  | kerr. paks. | syvyys | til.paino         | esik.jänn.     | mod.luku       |                | jänn. eksp     |                | kons. kerr.        |                    | vall. jän. | lisäjänn. | vallitseva li | muodonmuutos     |                    | yht.     | painuma                          |                     | yht.     |
|---------|-------------|--------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|------------|-----------|---------------|------------------|--------------------|----------|----------------------------------|---------------------|----------|
|         |             |        |                   |                | m <sub>1</sub> | m <sub>2</sub> | β <sub>1</sub> | β <sub>2</sub> | c <sub>v</sub> NC  | c <sub>v</sub> OC  |            |           |               | σ' <sub>v0</sub> | σ <sub>z</sub> (l) |          | σ' <sub>v0</sub> +σ <sub>z</sub> | ε <sub>p</sub> , YC |          |
|         | Δh          | z      | Υ/Υ'              | σ <sub>p</sub> |                |                |                |                | cm <sup>2</sup> /s | cm <sup>2</sup> /s | kPa        | kPa       | kPa           |                  |                    | %        |                                  |                     | m        |
|         | m           | m      | kN/m <sup>3</sup> | kPa            |                |                |                |                |                    |                    |            |           |               |                  |                    |          |                                  |                     |          |
| kusa/ta | 0           | 0,6    | 0,5               | 18,00          | 5,40           | 100            |                | 0              | 0,01585            |                    | 5,40       | 0         | 5,40          | FALSE            | FALSE              | 0,000000 | 0,000000                         | 0,000000            | 0,000000 |
| kusa2   | 0,6         | 1,7    | 1,45              | 8,00           | 17,60          | 100            |                | 0              | 0,01585            |                    | 17,60      | 17        | 34,60         | FALSE            | 0,00676            | 0,006760 | 0,000000                         | 0,011491            | 0,011491 |
| sa1/1   | 2,3         | 0,35   | 2,475             | 5,72           | 39,40          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00012            | 0,0008             | 25,40      | 20,5      | 45,90         | 0,00686          | 0,02876            | 0,035612 | 0,002400                         | 0,010065            | 0,012464 |
| sa2/1   | 2,65        | 0,35   | 2,825             | 5,72           | 41,40          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00012            | 0,0008             | 27,40      | 24        | 51,40         | 0,00645          | 0,04074            | 0,047188 | 0,002256                         | 0,014260            | 0,016516 |
| sa1/2   | 3           | 0,35   | 3,35              | 5,20           | 39,31          | 5,56           | 75,47          | 0              | 0,00014            | 0,0026             | 29,31      | 27,5      | 56,81         | 0,00389          | 0,06622            | 0,070113 | 0,001361                         | 0,023178            | 0,024539 |
| sa2/2   | 3,35        | 0,35   | 3,7               | 5,20           | 41,13          | 5,56           | 75,47          | 0              | 0,00014            | 0,0026             | 31,13      | 31        | 62,13         | 0,00369          | 0,07418            | 0,077874 | 0,001292                         | 0,025964            | 0,027256 |
| sa3/2   | 3,7         | 0,35   | 4,05              | 5,20           | 42,95          | 5,56           | 75,47          | 0              | 0,00014            | 0,0026             | 32,95      | 34,5      | 67,45         | 0,00351          | 0,08117            | 0,084684 | 0,001229                         | 0,028410            | 0,029639 |
| sa4/2   | 4,05        | 0,35   | 4,4               | 5,20           | 44,77          | 5,56           | 75,47          | 0              | 0,00014            | 0,0026             | 34,77      | 38        | 72,77         | 0,00335          | 0,08736            | 0,090711 | 0,001172                         | 0,030577            | 0,031749 |
| sa5/2   | 4,4         | 0,35   | 4,75              | 5,20           | 46,59          | 5,56           | 75,47          | 0              | 0,00010            | 0,0014             | 36,59      | 41,5      | 78,09         | 0,00320          | 0,09289            | 0,096086 | 0,001120                         | 0,032510            | 0,03363  |
| sa6/2   | 4,75        | 0,35   | 5,1               | 5,20           | 48,41          | 5,56           | 75,47          | 0              | 0,00010            | 0,0014             | 38,41      | 45        | 83,41         | 0,00307          | 0,09785            | 0,100912 | 0,001073                         | 0,034246            | 0,035319 |
| sa7/2   | 5,1         | 0,35   | 5,45              | 5,20           | 50,23          | 5,56           | 75,47          | 0              | 0,00010            | 0,0014             | 40,23      | 48,5      | 88,73         | 0,00294          | 0,10233            | 0,105271 | 0,001029                         | 0,035815            | 0,036845 |
| sa8/2   | 5,45        | 0,35   | 6                 | 5,20           | 52,05          | 5,56           | 75,47          | 0              | 0,00010            | 0,0014             | 42,05      | 48,5      | 90,55         | 0,00283          | 0,09958            | 0,102407 | 0,000989                         | 0,034853            | 0,035842 |
| sa1/3   | 5,8         | 0,95   | 6,75              | 7,55           | 89,73          | 4,74           | 87,74          | 0              | 0,00014            | 0,0018             | 44,7       | 48,5      | 93,23         | 0,00793          | 0,00807            | 0,016007 | 0,007538                         | 0,007669            | 0,015207 |
| sa2/3   | 6,75        | 0,95   | 7,225             | 7,55           | 98,72          | 4,74           | 64,11          | 0              | 0,00014            | 0,0018             | 53,7       | 48,5      | 102,22        | 0,00949          | 0,00735            | 0,016841 | 0,009017                         | 0,006982            | 0,015999 |
| si      | 7,7         | 2,4    | 8,9               | 7,00           | 155            | 11,93          | 203,3          | 0              | 0,00434            | 0,0020             | 65,7       | 48,5      | 114,21        | 0,00422          | FALSE              | 0,004221 | 0,010131                         | 0,000000            | 0,010131 |
|         | 10,1        |        |                   |                |                |                |                |                |                    |                    |            |           |               |                  |                    |          | kokonaispainuma:                 |                     | 0,336628 |

| kerros  | kerr. paks. | syvyys | til.paino         | esik.jänn.     | mod.luku       |                | jänn. eksp     |                | kons. kerr.        |                   | vall. jän. | lisäjänn. | vallitseva li | muodonmuutos     |                    | yht.     | painuma                          |                     | yht.     |
|---------|-------------|--------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|-------------------|------------|-----------|---------------|------------------|--------------------|----------|----------------------------------|---------------------|----------|
|         |             |        |                   |                | m <sub>1</sub> | m <sub>2</sub> | β <sub>1</sub> | β <sub>2</sub> | c <sub>v</sub> NC  | c <sub>v</sub> OC |            |           |               | σ' <sub>v0</sub> | σ <sub>z</sub> (l) |          | σ' <sub>v0</sub> +σ <sub>z</sub> | ε <sub>p</sub> , YC |          |
|         | Δh          | z      | Υ/Υ'              | σ <sub>p</sub> |                |                |                |                | cm <sup>2</sup> /s |                   | kPa        | kPa       | kPa           |                  |                    | %        |                                  |                     | m        |
|         | m           | m      | kN/m <sup>3</sup> | kPa            |                |                |                |                |                    |                   |            |           |               |                  |                    |          |                                  |                     |          |
| kusa/ta | 0           | 1      | 0,5               | 18,00          | 9,00           | 100            |                | 0              | 0,01585            |                   | 9,00       | 0         | 9,00          | FALSE            | FALSE              | 0,000000 | 0,000000                         | 0,000000            | 0,000000 |
| kusa2   | 1           | 1,3    | 1,65              | 8,00           | 23,20          | 100            |                | 0              | 0,01585            |                   | 23,20      | 13        | 36,20         | FALSE            | 0,00445            | 0,004449 | 0,000000                         | 0,005784            | 0,005784 |
| sa1/1   | 2,3         | 0,35   | 2,475             | 5,72           | 43,40          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00012            | 0,0008            | 29,40      | 16,5      | 45,90         | 0,00608          | 0,01055            | 0,016629 | 0,002129                         | 0,003691            | 0,00582  |
| sa2/1   | 2,65        | 0,35   | 2,825             | 5,72           | 45,40          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00012            | 0,0008            | 31,40      | 20        | 51,40         | 0,00576          | 0,02337            | 0,029132 | 0,002015                         | 0,008181            | 0,010196 |
| sa1/2   | 3           | 0,35   | 3,35              | 5,72           | 47,41          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00014            | 0,0026            | 33,41      | 23,5      | 56,91         | 0,00547          | 0,03440            | 0,039865 | 0,001913                         | 0,012039            | 0,013953 |
| sa2/2   | 3,35        | 0,35   | 3,7               | 5,72           | 49,41          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00014            | 0,0026            | 35,41      | 27        | 62,41         | 0,00520          | 0,04399            | 0,049193 | 0,001821                         | 0,015396            | 0,017218 |
| sa3/2   | 3,7         | 0,35   | 4,05              | 5,72           | 51,41          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00014            | 0,0026            | 37,41      | 30,5      | 67,91         | 0,00496          | 0,05242            | 0,057386 | 0,001738                         | 0,018347            | 0,020085 |
| sa4/2   | 4,05        | 0,35   | 4,4               | 5,72           | 53,41          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00014            | 0,0026            | 39,41      | 34        | 73,41         | 0,00475          | 0,05990            | 0,064645 | 0,001662                         | 0,020964            | 0,022626 |
| sa5/2   | 4,4         | 0,35   | 4,75              | 5,72           | 55,41          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00010            | 0,0014            | 41,41      | 37,5      | 78,91         | 0,00455          | 0,06658            | 0,071127 | 0,001592                         | 0,023302            | 0,024894 |
| sa6/2   | 4,75        | 0,35   | 5,1               | 5,72           | 57,42          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00010            | 0,0014            | 43,42      | 41        | 84,42         | 0,00437          | 0,07259            | 0,076953 | 0,001528                         | 0,025406            | 0,026933 |
| sa7/2   | 5,1         | 0,35   | 5,45              | 5,72           | 59,42          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00010            | 0,0014            | 45,42      | 44,5      | 89,92         | 0,00420          | 0,07802            | 0,082220 | 0,001469                         | 0,027308            | 0,028777 |
| sa8/2   | 5,45        | 0,35   | 6                 | 5,72           | 61,42          | 5,31           | 64,03          | 0              | 0,00010            | 0,0014            | 47,42      | 48        | 95,42         | 0,00404          | 0,08297            | 0,087008 | 0,001414                         | 0,029039            | 0,030453 |
| sa1/3   | 5,8         | 0,95   | 6,75              | 7,55           | 97,01          | 4,74           | 87,74          | 0              | 0,00014            | 0,0018            | 52,01      | 44,5      | 96,51         | 0,00711          | FALSE              | 0,007105 | 0,006750                         | 0,000000            | 0,00675  |
| sa2/3   | 6,75        | 0,95   | 7,225             | 7,55           | 104,18         | 4,74           | 64,11          | 0              | 0,00014            | 0,0018            | 59,2       | 44,5      | 103,68        | 0,00882          | FALSE              | 0,008821 | 0,008380                         | 0,000000            | 0,00838  |
| si      | 7,7         | 2,4    | 8,9               | 7,00           | 155            | 11,93          | 203,3          | 0              | 0,00434            | 0,0020            | 71,2       | 44,5      | 115,67        | 0,00383          | FALSE              | 0,003829 | 0,009189                         | 0,000000            | 0,009189 |
|         | 10,1        |        |                   |                |                |                |                |                |                    |                   |            |           |               |                  |                    |          | kokonaispainuma:                 |                     | 0,231059 |

## LASKENNASSA KÄYTETTY GEOMETRIA



## Connectivity plot

**PLAXIS***Project description*

Keharata: itäinen suuaukko

*Date*

11.7.2013

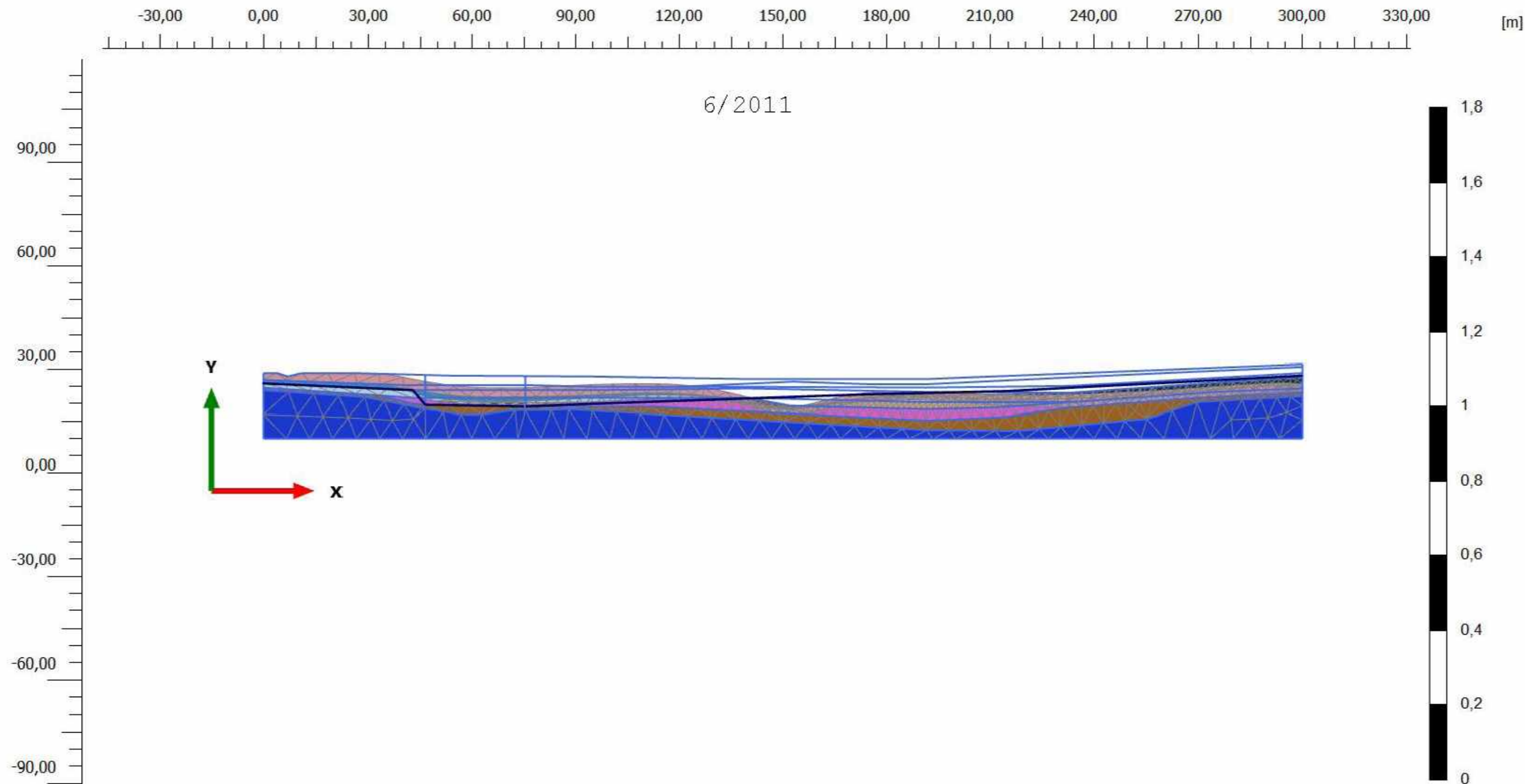
*Project filename*

pohjavesi\_moreeni

*User name*

Aalto University SST





**Deformed mesh |u| (scaled up 100 times)**

Maximum value = 0,08036 m (Element 964 at Node 4068)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata ISA**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

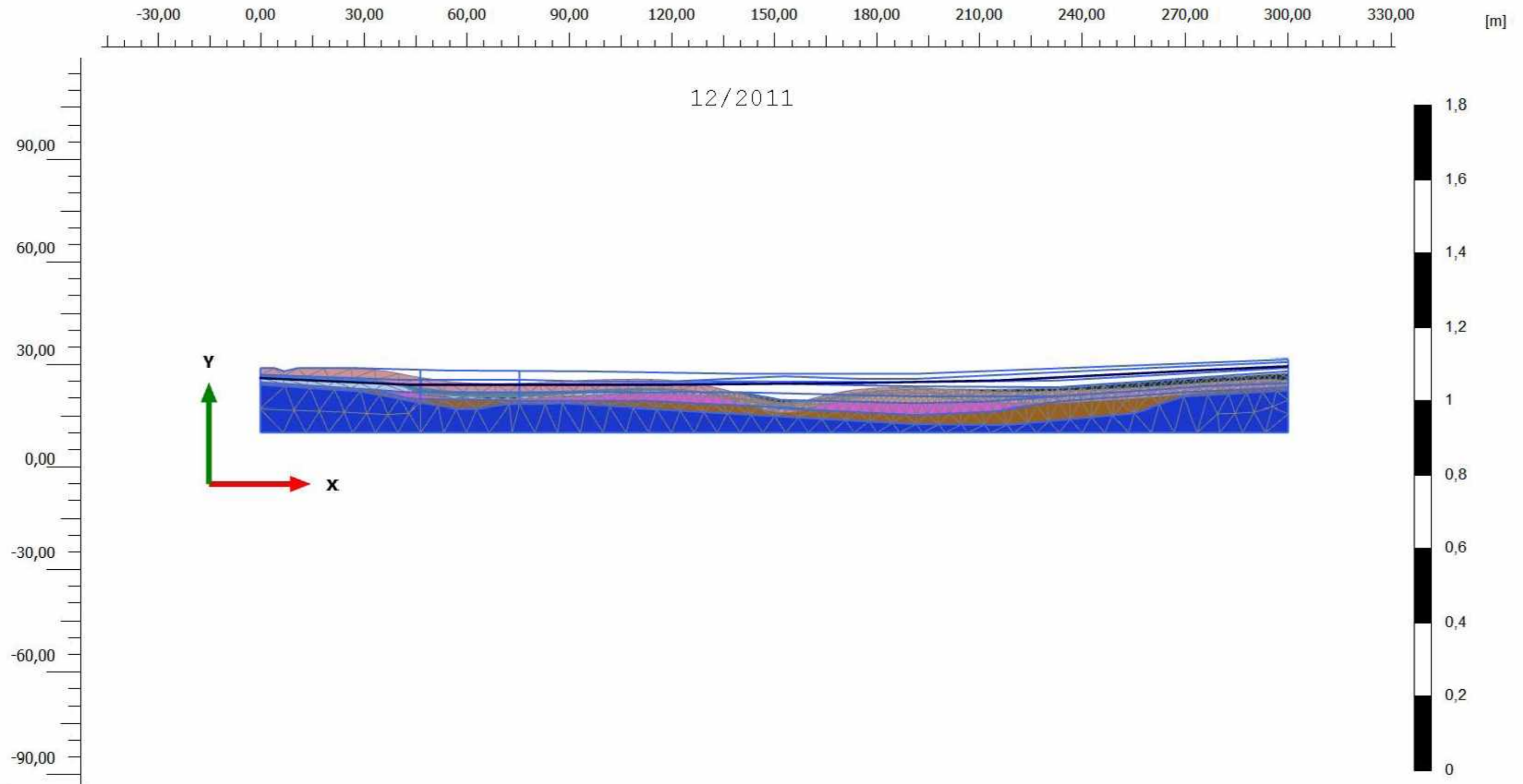
**pohjavesi\_moreeni**

*Step*

**236**

*User name*

**Aalto University SST**



**Deformed mesh |u| (scaled up 100 times)**

Maximum value = 0,08990 m (Element 964 at Node 4067)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata ISA**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

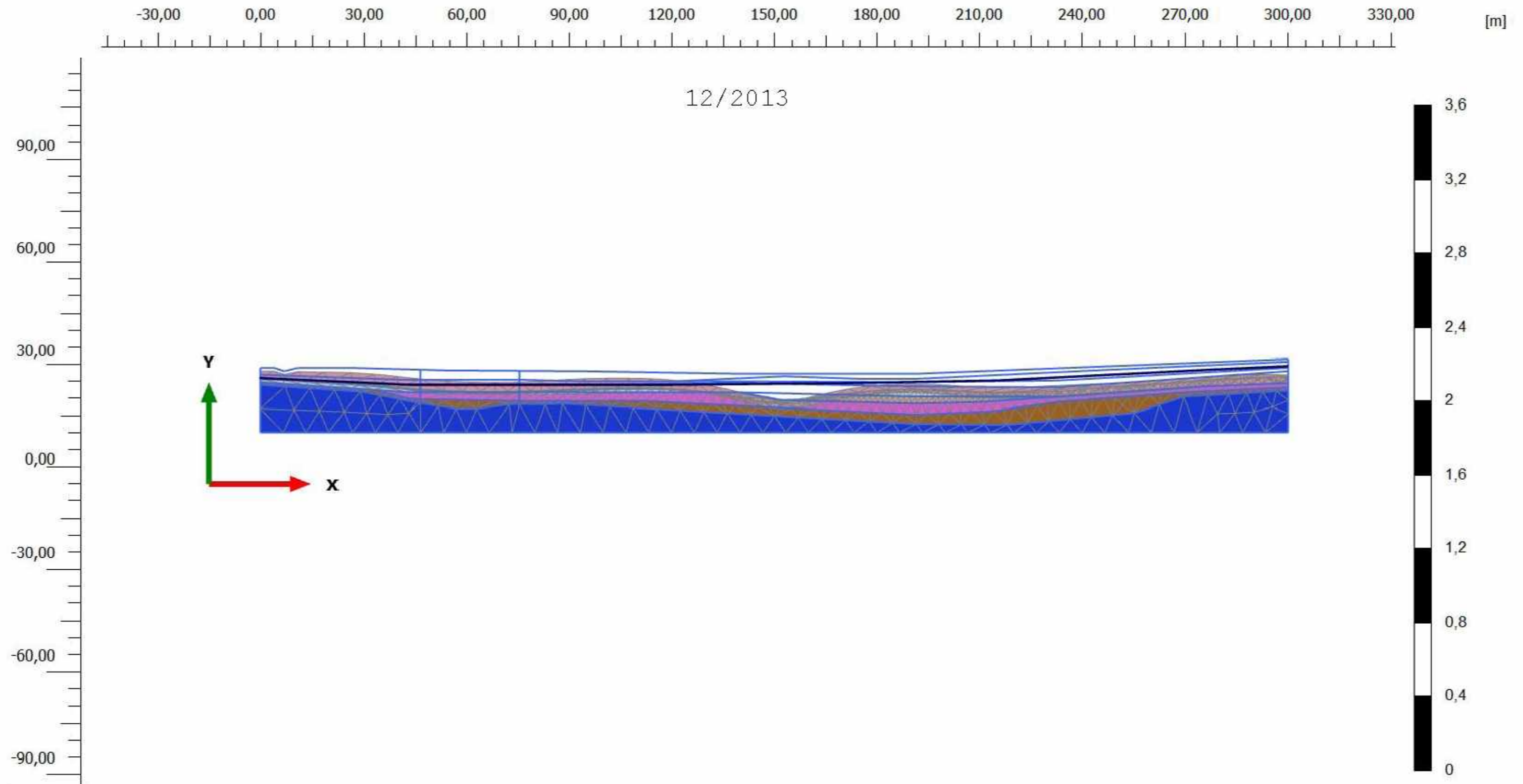
**pohjavesi\_moreeni**

*Step*

**39**

*User name*

**Aalto University SST**



**Deformed mesh |u| (scaled up 50,0 times)**

Maximum value = 0,1621 m (Element 964 at Node 4067)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

**pohjavesi\_moreeni**

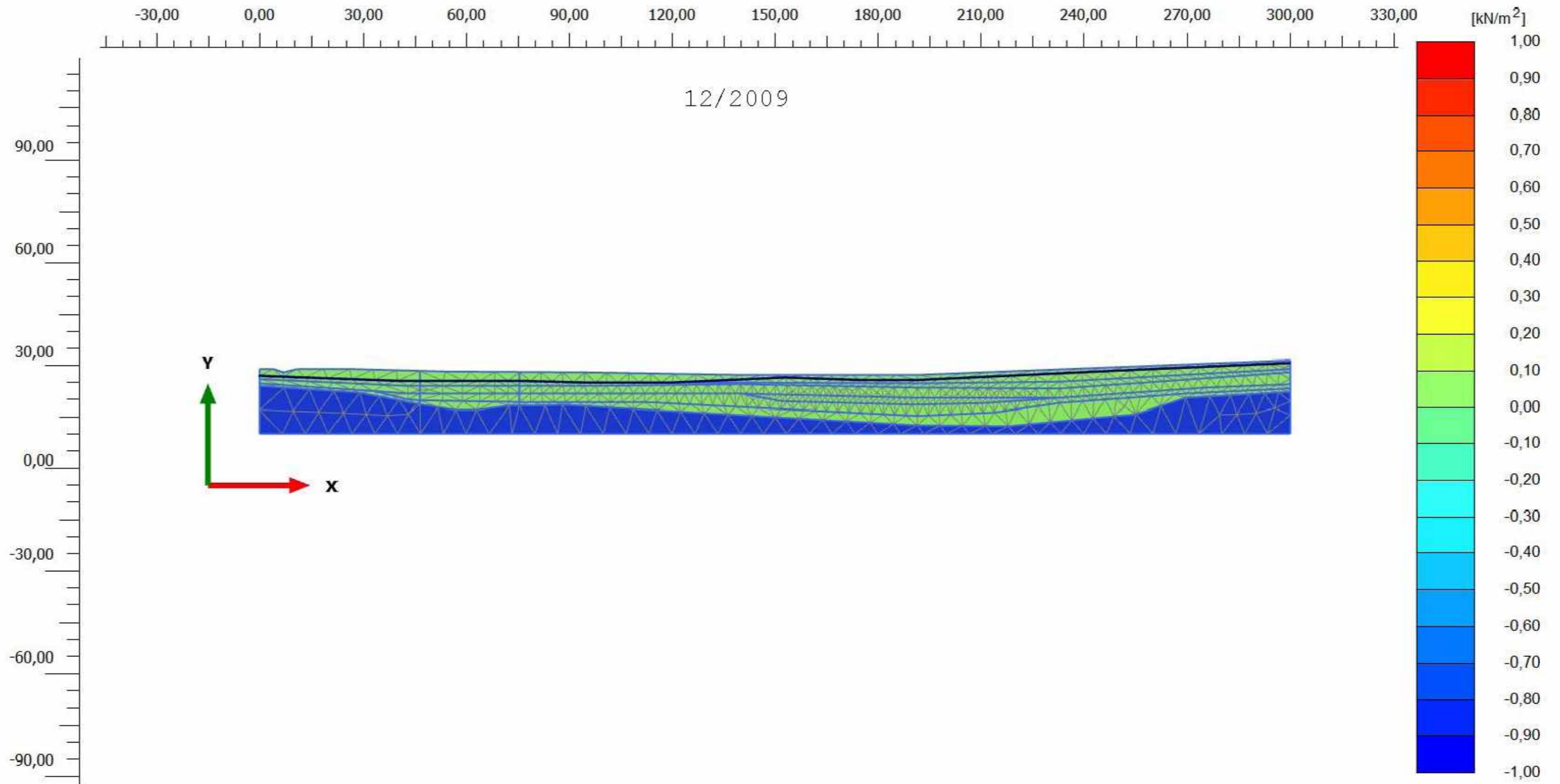
*Step*

**166**

*User name*

**Aalto University SST**





**Excess pore pressures  $p_{\text{excess}}$  (Pressure = negative)**

Uniform value of 0,000 kN/m<sup>2</sup>

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

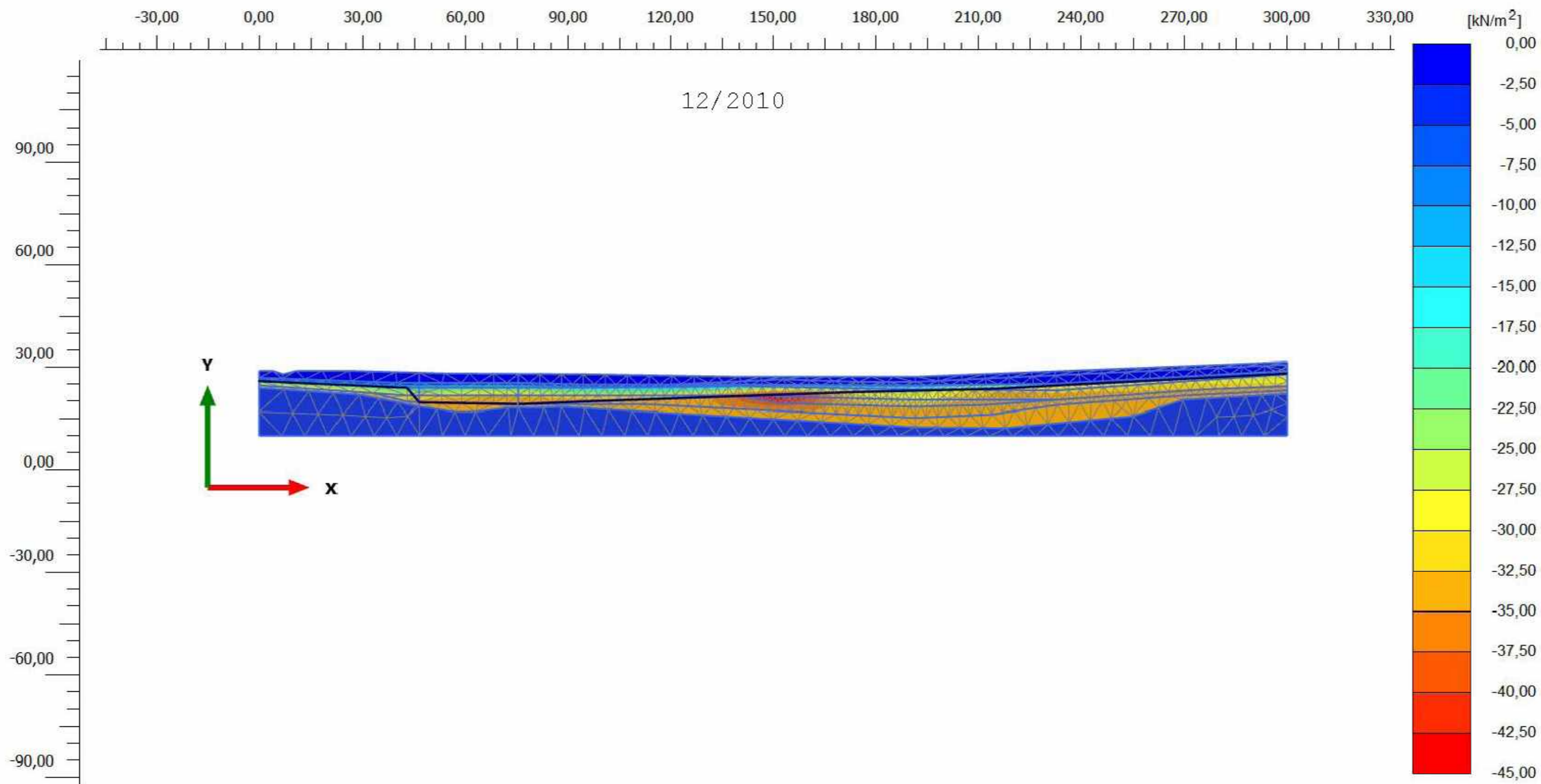
**pohjavesi\_moreeni**

*Step*

**2**

*User name*

**Aalto University SST**



**Excess pore pressures  $p_{\text{excess}}$  (Pressure = negative)**

Maximum value = 0,00 kN/m<sup>2</sup> (Element 162 at Node 957)

Minimum value = -42,89 kN/m<sup>2</sup> (Element 1100 at Node 3521)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

**pohjavesi\_moreeni**

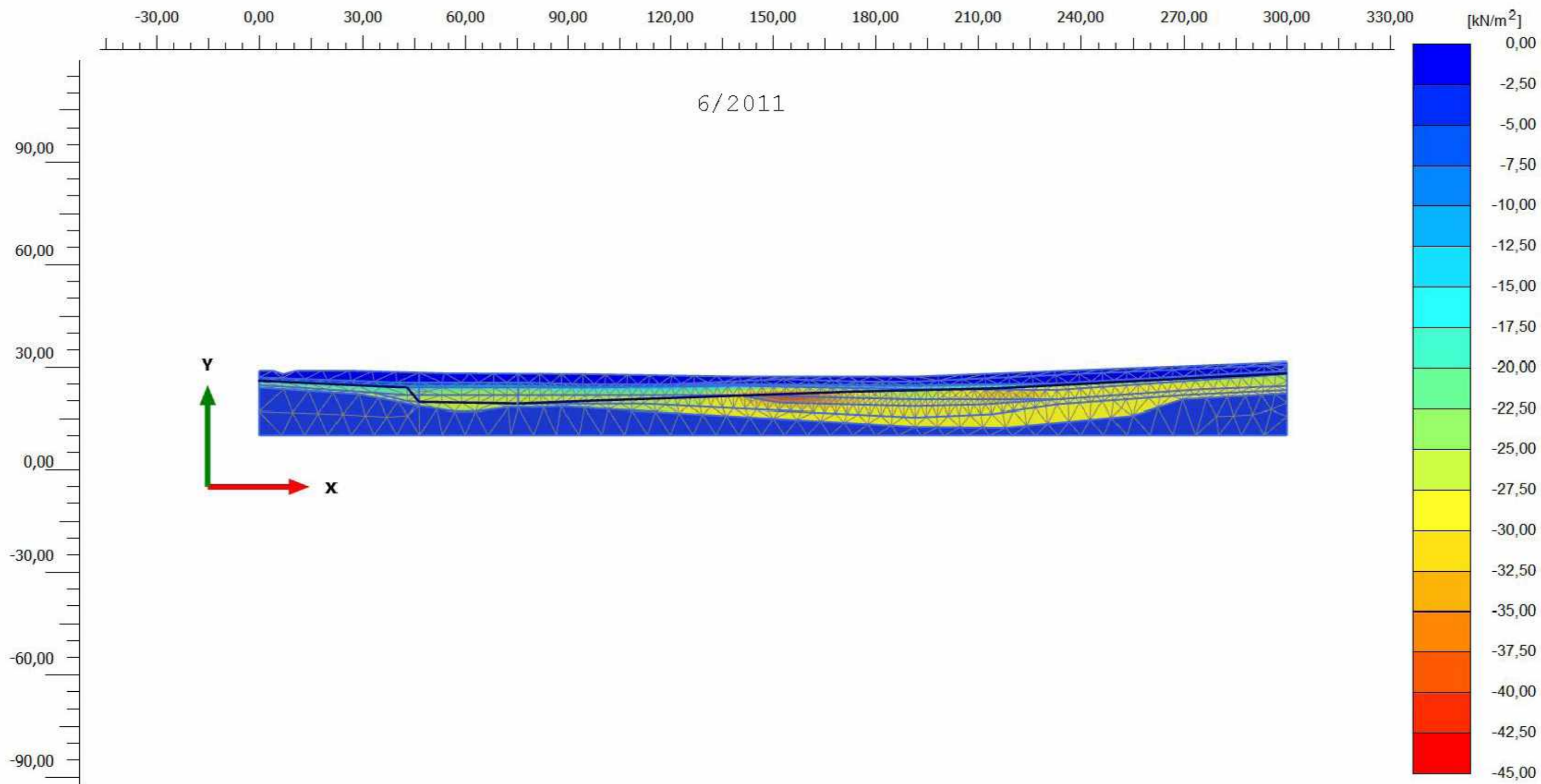
*Step*

**282**

*User name*

**Aalto University SST**





**Excess pore pressures  $p_{\text{excess}}$  (Pressure = negative)**

Maximum value = 0,00 kN/m<sup>2</sup> (Element 162 at Node 957)

Minimum value = -39,69 kN/m<sup>2</sup> (Element 1017 at Node 3568)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

**pohjavesi\_moreeni**

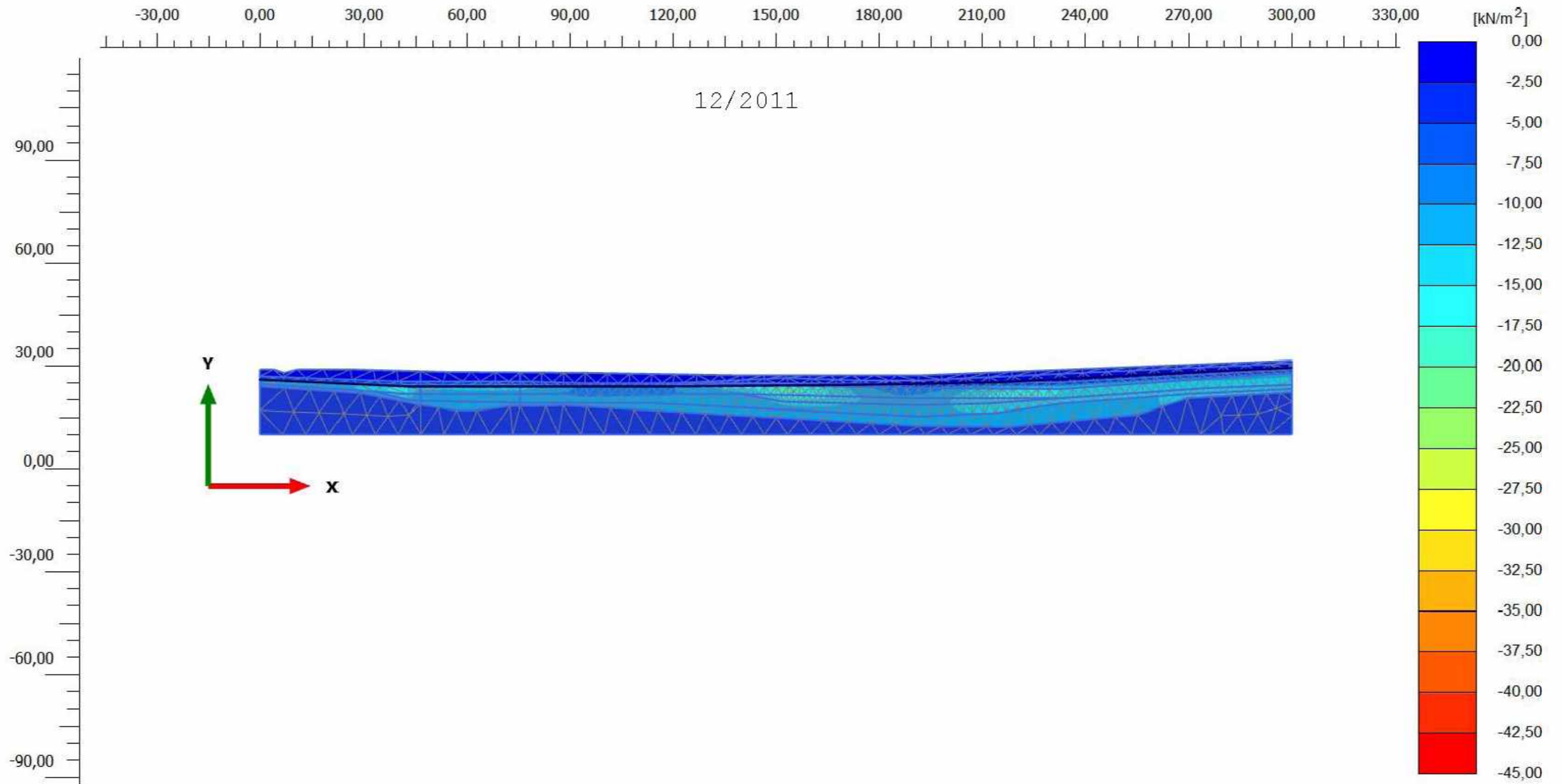
*Step*

**236**

*User name*

**Aalto University SST**





**Excess pore pressures  $p_{\text{excess}}$  (Pressure = negative)**

Maximum value = 0,000 kN/m<sup>2</sup> (Element 162 at Node 957)

Minimum value = -18,69 kN/m<sup>2</sup> (Element 661 at Node 3854)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

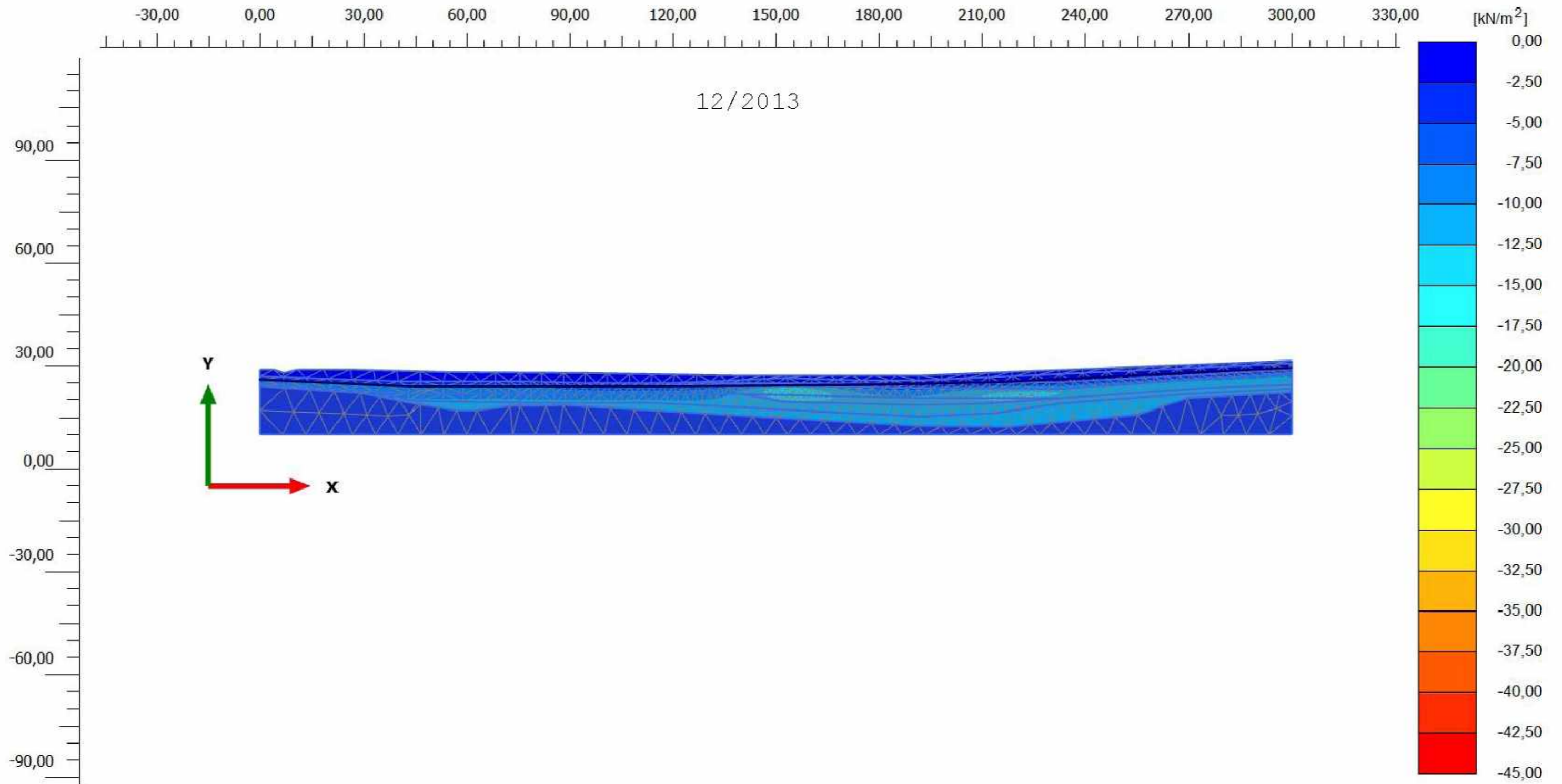
**pohjavesi\_moreeni**

*Step*

**39**

*User name*

**Aalto University SST**



**Excess pore pressures  $p_{\text{excess}}$  (Pressure = negative)**

Maximum value = 0,00 kN/m<sup>2</sup> (Element 162 at Node 957)

Minimum value = -14,84 kN/m<sup>2</sup> (Element 528 at Node 3618)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

**pohjavesi\_moreeni**

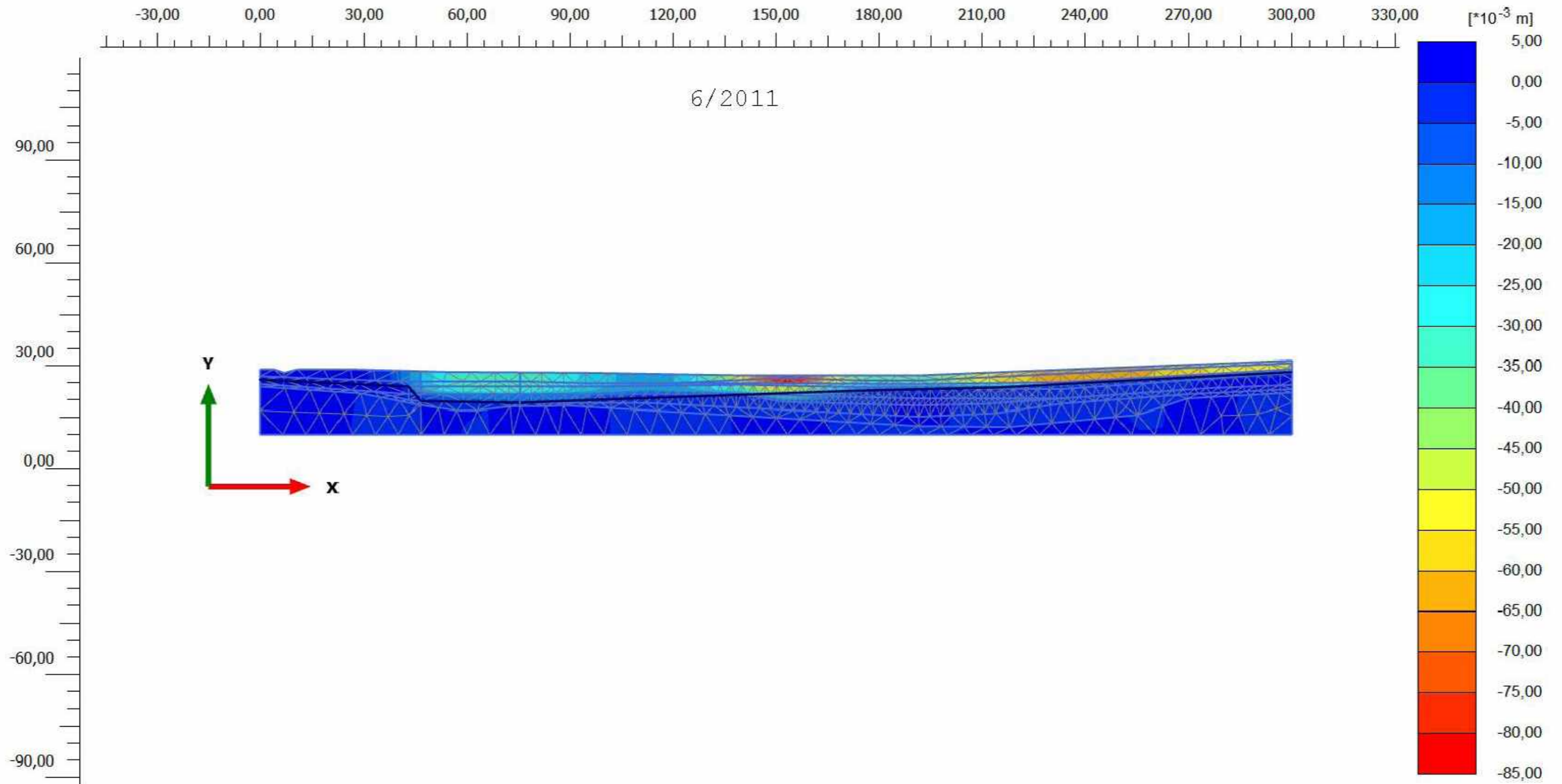
*Step*

**166**

*User name*

**Aalto University SST**





**Total displacements  $u_y$**

Maximum value =  $1,697 \cdot 10^{-3}$  m (Element 159 at Node 244)

Minimum value = -0,08027 m (Element 964 at Node 4068)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

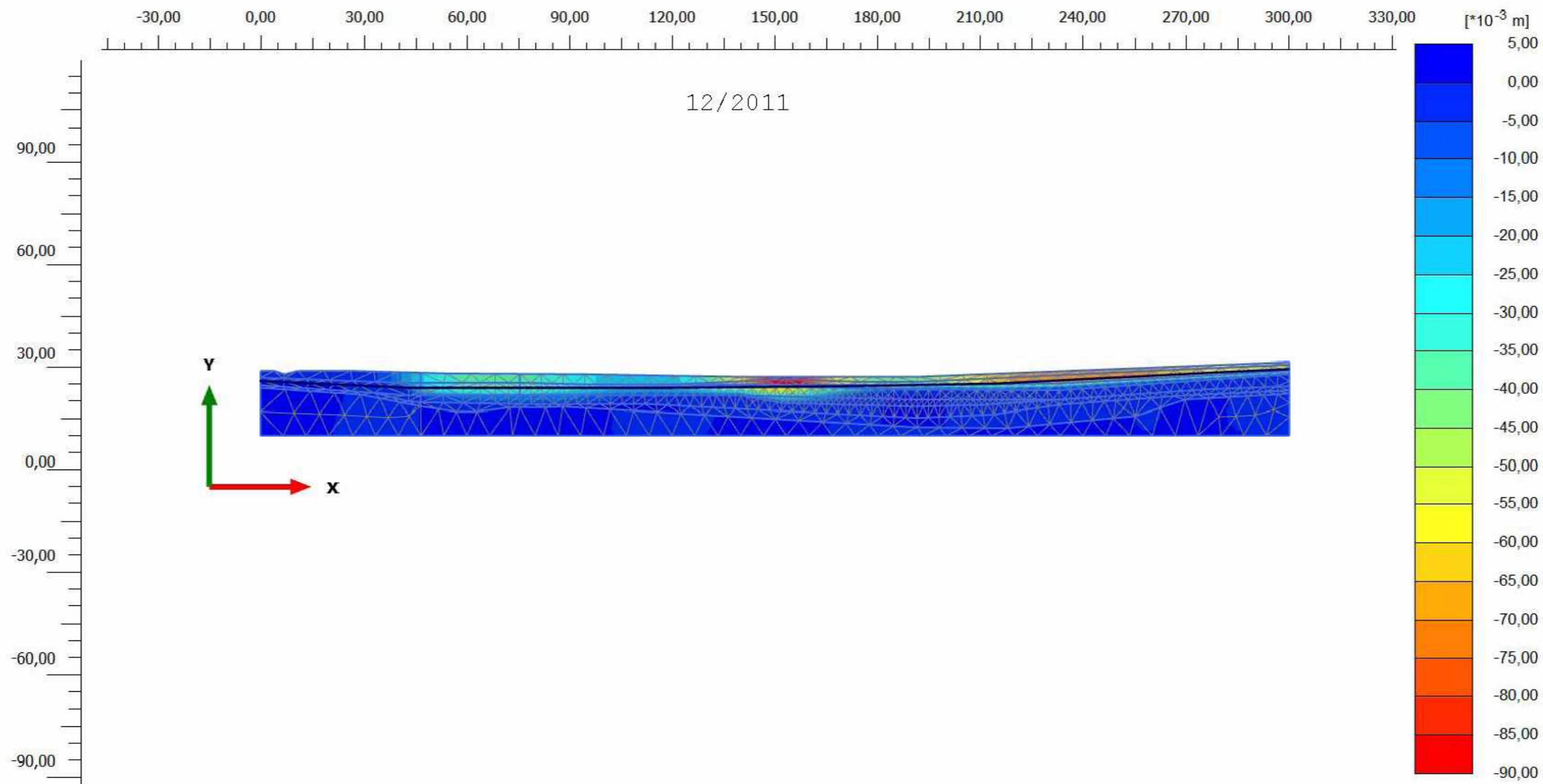
**pohjavesi\_moreeni**

*Step*

**236**

*User name*

**Aalto University SST**



**Total displacements  $u_y$**

Maximum value =  $0,3236 \cdot 10^{-3}$  m (Element 549 at Node 5403)

Minimum value =  $-0,08982$  m (Element 964 at Node 4067)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

**pohjavesi\_moreeni**

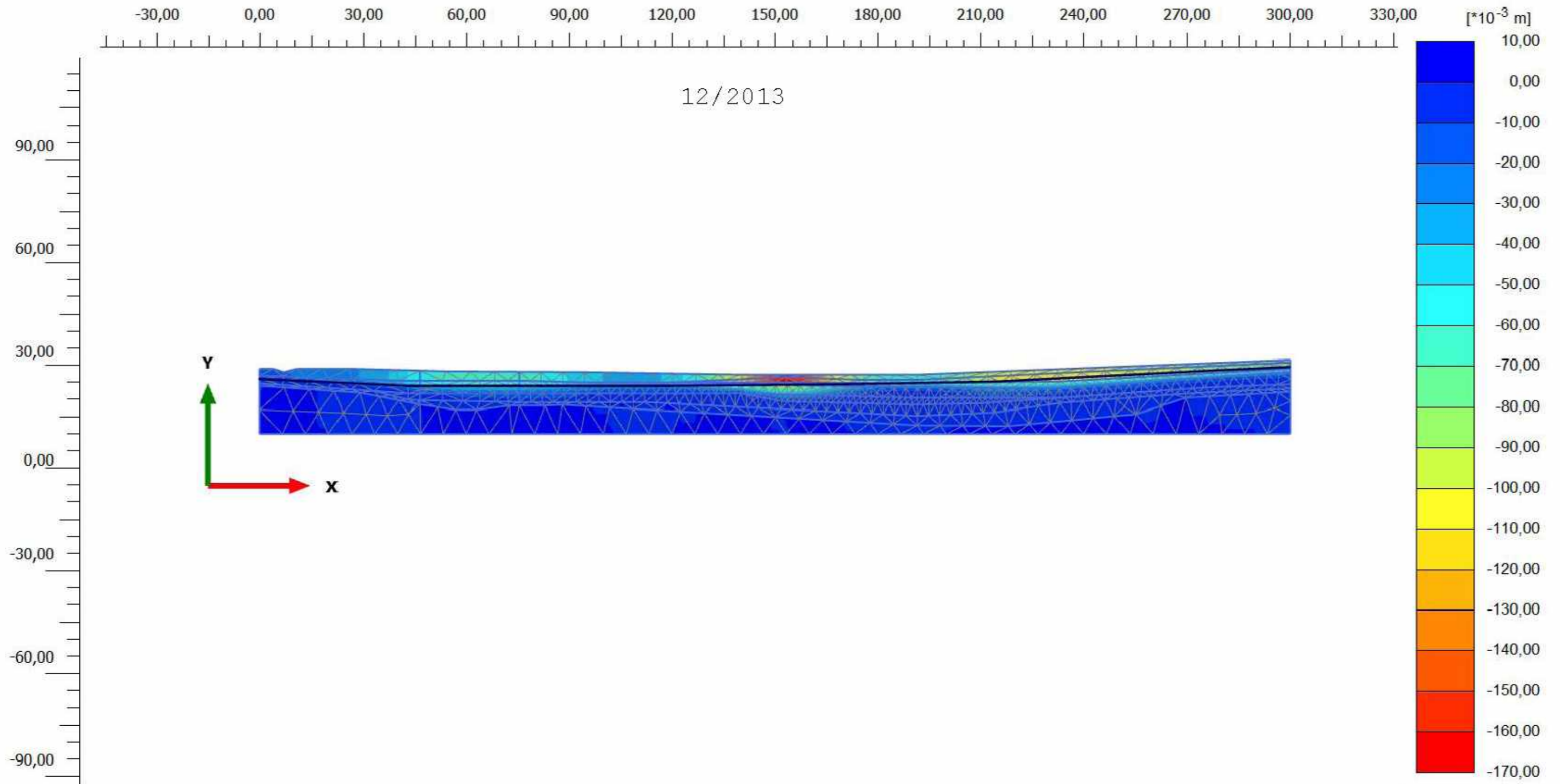
*Step*

**39**

*User name*

**Aalto University SST**





**Total displacements  $u_y$**

Maximum value =  $0,02493 \cdot 10^{-3}$  m (Element 311 at Node 1993)

Minimum value = -0,1620 m (Element 964 at Node 4067)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**5.7.2013**

*Project filename*

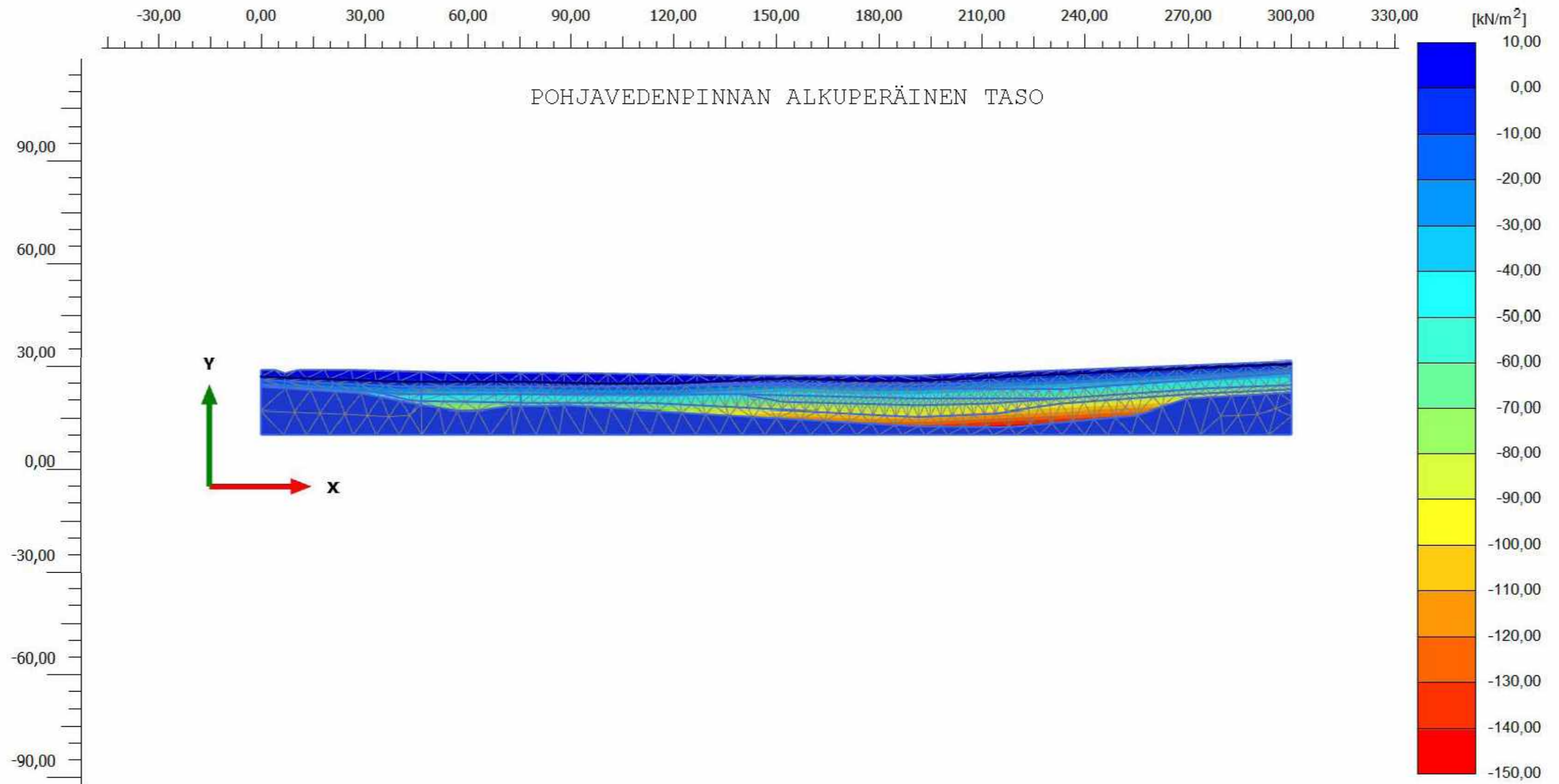
**pohjavesi\_moreeni**

*Step*

**166**

*User name*

**Aalto University SST**



Project description

Keharata: itäinen suuaukko

Date

11.7.2013

Project filename

pohjavesi\_moreeni

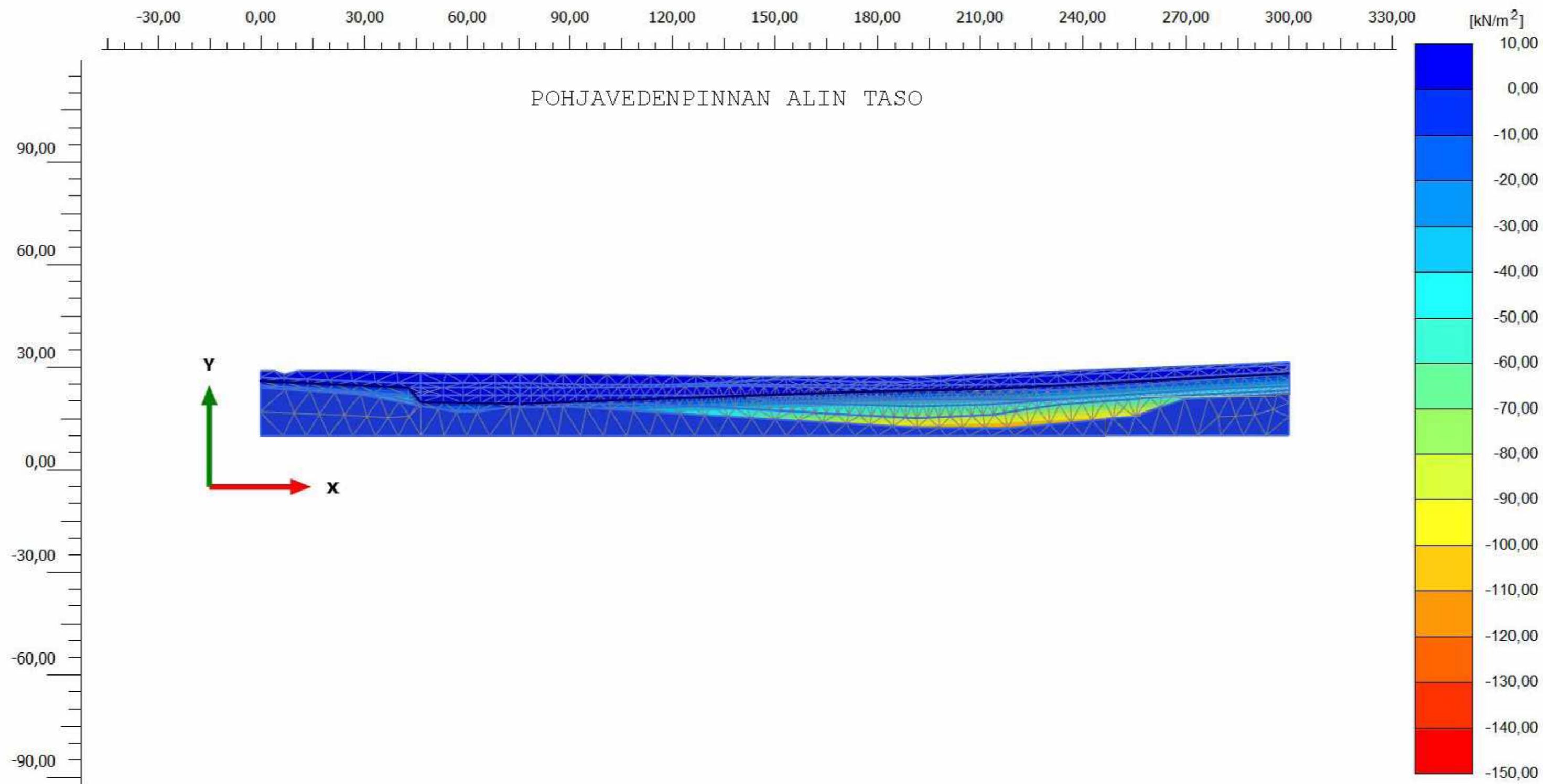
Step

2

User name

Aalto University SST





**Steady state pore pressures  $p_{steady}$  (Pressure = negative)**

Maximum value = 0,000 kN/m<sup>2</sup> (Element 117 at Node 809)

Minimum value = -116,6 kN/m<sup>2</sup> (Element 242 at Node 6551)

**PLAXIS**

*Project description*

**Keharata: itäinen suuaukko**

*Date*

**11.7.2013**

*Project filename*

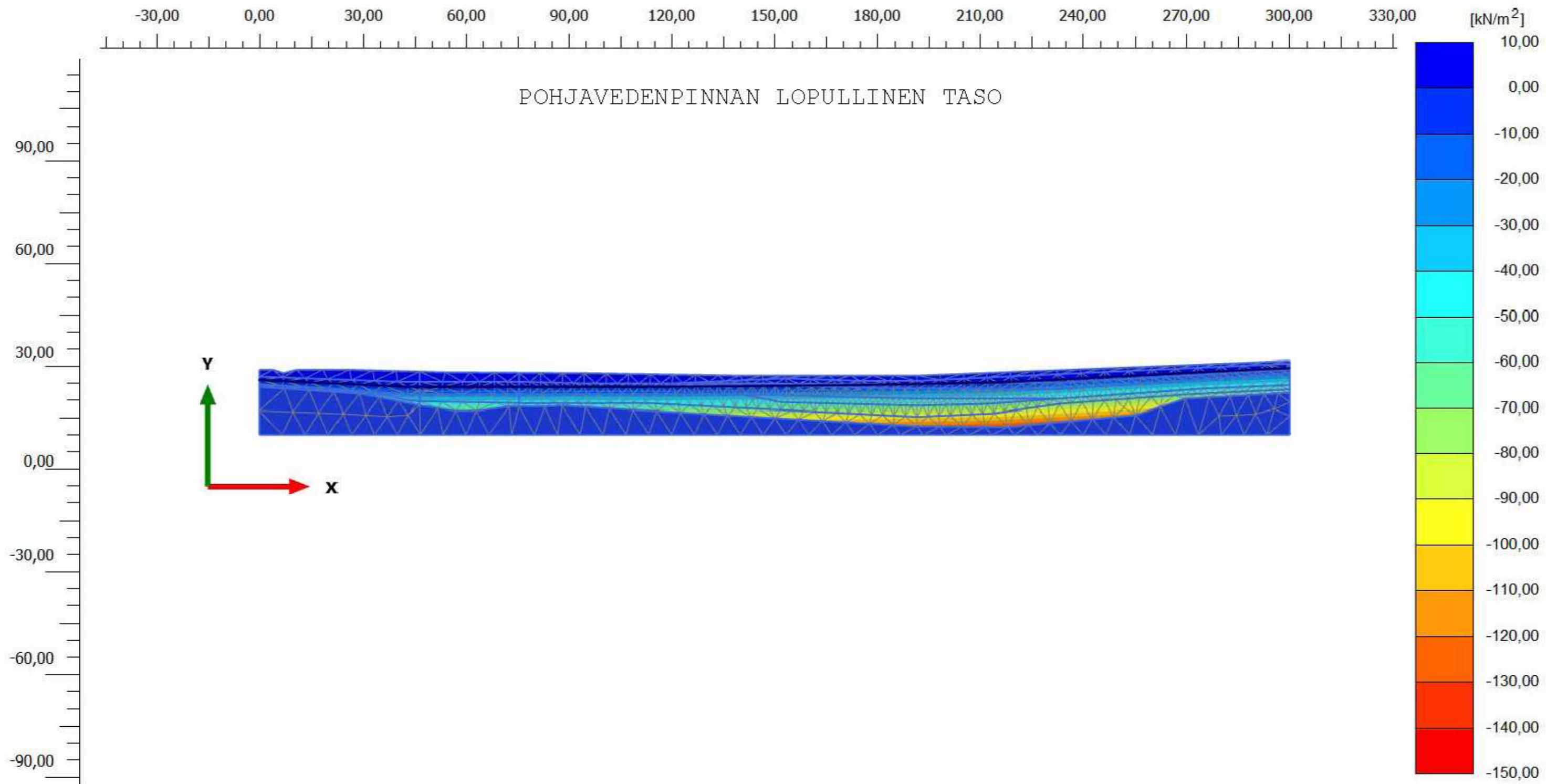
**pohjavesi\_moreeni**

*Step*

**236**

*User name*

**Aalto University SST**



**Steady state pore pressures  $p_{\text{steady}}$  (Pressure = negative)**

Maximum value = 0,000 kN/m<sup>2</sup> (Element 134 at Node 897)

Minimum value = -131,5 kN/m<sup>2</sup> (Element 242 at Node 6551)

**PLAXIS**

*Project description*

Keharata: itäinen suuaukko

*Date*

11.7.2013

*Project filename*

pohjavesi\_moreeni

*Step*

39

*User name*

Aalto University SST





