



Ville Lehtonen

Ratapenkereen sorrutuskokeen instrumentointi ja analysointi

Ville Lehtonen

Ratapenkereen sorrutuskokeen instrumentointi ja analysointi

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2010

Liikennevirasto

Helsinki 2010

Kannen kuvat: Ville Lehtonen

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-553-3

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Ville Lehtonen: Ratapenkereen sorrutuskokeen instrumentointi ja analysointi. Liikennevirasto, rautatieosasto. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2010. 150 sivua ja 6 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-553-3.

Avainsanat: sorrutuskoe, stabiliteetti, stabiliteettilaskenta, lamellimenetelmä, ratapenger, instrumentointi, monitorointi, huokospaine, painumaletku

Tiivistelmä

TTY ja RHK (nykyisin Liikenneviraston rautatieosasto) suorittivat Salon Perniössä lokakuussa 2009 täysimittaisen ratapenkereen sorrutuskokeen. Kokeen tarkoituksena oli kerätä kattavasti mittausdataa sortumasta ja siihen liittyvistä ilmiöistä. Tätä dataa on tarkoitus käyttää erilaisten stabiliteettilaskentamenetelmien kehittämiseen. Tämän diplomityön puitteissa kokeesta saatuja mittaustuloksia sovelletaan lamellimenetelmällä tehtäviin stabiliteettilaskelmiin. Lisäksi kokeessa testattiin erilaisten mittausrakenteiden teknistä soveltuvuutta stabiliteetiltaan heikkojen penkereiden monitorointiin.

Kokeessa rakennettiin savimaalle matala ratapenger vanhan, käytöstä poistetun pistoraiteen paikalle. Penkereen päälle sijoitettiin neljä 12 metriä pitkää palkistoa, joilla simuloitiin lyhyitä telivaunuja. Palkistojen päälle sijoitettiin modifioituja merikontteja, joita kuormattiin vähitellen hiekalla.

Koealue instrumentoitiin kattavasti. Alueella oli 40 huokospaineanturia, yhdeksän inklinometriputkea (yhteensä 163 automaatti-inklinometriananturia), kaksi takymetriä monitoroimassa 27 prismaa, 9 maanpaineanturia, kolme painumaletkua ja 76 liukupinnan sijainnin mittausputkea. Lisäksi konttien painoa mitattiin palkistoihin asennetuilla venymäliuskoilla ja kallistuskulmaa kontteihin asennetuilla kiihtyvyyssantureilla. Kokeesta tehtiin maastomallit laserkeilaamalla.

Kontteja kuormattiin kahtena koepäivänä. Kuormituksen aikana siirtymät ja huokospaineet kasvoivat melko lineaarisesti. Muutosten nopeus alkoi kasvaa eksponentiaalisesti noin 2,5 tuntia ennen sortumaa, kuormituksen loppuvaiheessa ja sen loputtua. Lopullinen murtokuorma vastasi 87 kPa junakuormaa penkereen päällä.

Muodostunut, pituussuunnassa noin 50 m pitkä sortuma oli poikkileikkaukseltaan hyvin kiilamainen. Tarkkaa liukupintaa ei saatu varsinaisesti määritettyä, vaan liukuvyöhyke on voinut olla jopa reilusti yli 1 m paksu. Koko liikkunut savimassa häiriintyi sortumassa huomattavasti, mikä viittaa Rankine-vyöhykemurtuman mahdollisuuteen.

Kuormasta aiheutunut huokospaineen kasvu vastasi likimain pystyjännityksen kasvua maassa. Myöden aiheuttama huokosveden ylipaine ennen sortumaa oli merkittävän suuri. Tehtyjen laskelmien perusteella lamellimenetelmissä käytettävä kuorman huokospaineparametri r_{uq} tulee määrittää siten, että liukupinnan kaltevuus kuorman alla huomioidaan.

Penkereen stabiliteetin monitoroinnissa selkeimmiksi mittaussuureiksi osoittautuivat penkereen painuma (painumaletkut), maan sivusiirtymä (erityisesti liukupinnan kehittyminen inklinometreillä mitattuna) sekä näitä täydentämään huokospaineiden kehittyminen penkereen keskilinjan ja alareunan alla.

Ville Lehtonen: Instrumentering och analys av ett skredexperiment på en järnvägsbank. Trafikverket, järnvägsavdelningen. Helsingfors 2010. Trafikverkets undersökningar och utredningar 25/2010. 150 sidor och 6 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-553-3.

Nyckelord: skredexperiment, stabilitet, stabilitetsberäkning, lamellmetod, järnvägsbank, instrumentering, övervakning, portryck, sättningslang

Sammanfattning

TTU och Banförvaltningscentralen (nuförtiden Trafikverkets järnvägsavdelning) genomförde ett fullskala skredexperiment på en järnvägsbank i Bjärnå, Salo i Oktober 2009. Syftet med experimentet var att samla data av skredet och samhörande fenomen. Datat skall användas för att vidare utveckla olika beräkningsmetoder för stabilitet. I detta diplomarbete tillämpas resultaten för stabilitetsberäkningar med lamellmetoden. I tillägg användes experimentet för att testa hur olika instrument tillämpar sig för övervakning av bankar med låg stabilitet.

En låg järnvägsbank byggdes på lera, på plats av en gammal, avlagd stickspår. På banken placerades fyra 12 m långa bjälklag som simulerade korta vagnar med boggi-er. På bjälklagen placerades modifierade containrar som gradvis lastades med sand.

Försöksområdet instrumenterades omfattande. I området placerades 40 portrycksensorer, 9 inklinometer (med tillsammans 163 automatiska inklinometersensorer), två robotiska takymetrar som övervakte 27 prismor, 9 jordtrycksensorer, tre sättningslangar och 76 mätningsspipor för glidytaens läge. Dessutom vägde man containrars vikt med töjningsgivare och mätte deras lutningsvinklar med accelerationssensorer. Mätning av terrängmodeller gjordes med lasersvepning.

Containrar lastades i två dagar. Under lastning ökade förskjutningarna och portrycken relativt linjärt. Förändringarnas fart började öka exponentiellt ungefär 2,5 timmar före raseringen, på lastningens sista tamp och därefter. Slutlig brottlast motsvarade en 87 kPa tågbelastning på banken.

Den 50 m lång rasering som bildats hade en kilformig genomskärning. En precis glidyta kunde inte bestämmas, utan glidzonen kan ha varit över 1 m tjock. Den hela lermassan som var i bevegelse blev betydligt störd i raseringen, vilket pekar på ett Rankine-typ zombrott.

Ökning av portryck som förorsakades av lastning stämde ungefär överens med ökningen av vertikalspänningen in jorden. Porvattens övertryck som förorsakades av brottet var markant hög. Beräkningarna påpekar att portryckparametern r_{uq} borde bestämmas så att glidytaens lutning under belastningen medtas.

De tydligaste mätbara fysikaliska storheter för bankstabilitet visade sig vara bankens sättning (sättningslangar), jordens biförskjutning (inklinometer) och som kompletment utvecklingen av portryck under bankens mittlinje och underkant.

Ville Lehtonen: Instrumentation and analysis of a railway embankment failure experiment. Finnish Transport Agency, Rail Department. Helsinki 2010. Research reports of the Finnish Transport Agency 25/2010. 150 pages and 6 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-553-3.

Keywords: railway embankment, failure test, stability, instrumentation, monitoring, pore pressure, slip surface, LEM, settlement tube

Summary

In October of 2009 Tampere University of Technology (TUT) and the Finnish Rail Administration conducted a full-scale railway embankment failure experiment in Salo, Finland. One goal of the test was to collect extensive monitoring data for further development of different stability calculation methods. In the scope of this thesis some measurements are applied to limit equilibrium methods (LEM). Another goal of the experiment was to test the technical suitability of different methods for monitoring the stability of embankments.

A new, small railway embankment was built in place of an old, de-commissioned blind track on a clayey soil. Four steel frameworks, each 12 meters long, were used to simulate short railway cars with bogie carriages. The frameworks were loaded with modified shipping containers which were gradually filled with sand.

The test area was extensively instrumented with 40 pore pressure gauges, 9 inclinometer tubes, 2 total stations monitoring a total of 27 prisms, 9 earth pressure gauges, 3 settlement tubes and 76 slip surface measuring pipes. In addition, the weight of the containers was measured with strain gauges on the frameworks. Acceleration gauges were used to measure the tilt angle of the containers.

The loading of the containers took place during two days. During the initial loading the displacements and pore pressures increased fairly linearly. The rates of displacement and pore pressure increase began to accelerate exponentially at about 2.5 hours before collapse, during the final stages of loading. The final train load was equivalent to 87 kPa.

The resulting landslide (about 50 m wide along the embankment) had a distinctively wedge-shaped cross-section. A clearly defined slip surface could not be measured. Instead, the measurements point to a fairly thick slip zone (more than 1 m). The entire clay mass was significantly disturbed, which would indicate a Rankine zone failure.

The load-induced pore pressure increase was roughly equivalent to the increase in vertical stress. Strain-induced pore pressure increase before the final failure was significant. According to LEM calculations based on the measurements, it is apparent that the load-induced pore pressure parameter r_{uq} should be chosen according to the inclination angle of the slip surface under the load.

The best indicators for an impending embankment failure seem to have been settlement under the embankment (settlement tubes) and lateral displacements in the soil (inclinometers). For monitoring, these should be supplemented with pore pressure measurements.

Esipuhe

Tämä julkaisu on Ville Lehtosen diplomityö Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan koulutusohjelmassa. Työ ja siinä kuvattu sorrutuskoe ovat osa Liikenneviraston ja TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikön yhteistä projektia ”Ratapenkereen stabiliteetti ja stabiliteetin parantaminen” (RASTAPA), joka toteutetaan vuosina 2009–2012. RASTAPA kuuluu Liikenneviraston ”Elinkaaritehokas rata” –tutkimushankkeeseen.

Diplomityötä ohjasivat TTY:ltä professori Tim Länsivaara sekä DI Jaakko Heikkilä Arcus Oy:stä. Tilaajan edustajana projektin ohjausryhmässä toimi aluepäällikkö Erkki Mäkelä Liikenneviraston rautatieosastosta. Sorrutuskokeen päätutkijana toimi DI Juho Mansikkamäki TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden osastolta.

Heidän lisäksi sorrutuskokeen ideointiin ja järjestelyihin osallistui yhteensä jopa kymmeniä ihmisiä niin TTY:ltä, Liikennevirastosta kuin muista toimijoista. Nimeltä mainittakoon TTY:ltä tutkija Heikki Luomala sekä yli-insinööri Kauko Sahi, joiden mitaustekniikan osaaminen ja suuri työpanos käytännön järjestelyissä oli korvaamaton.

Työ jatkuu RASTAPA-projektissa ratapenkereiden stabiliteettilaskennan ja stabiliteetin parantamismenetelmien kehittämisen parissa.

Helsingissä syyskuussa 2010

Liikennevirasto
Rautatieosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	STABILITEETILASKENNASTA LAMELLIMENETELMILLÄ.....	10
2.1	Lamellimenetelmistä yleisesti	10
2.2	Laskenta tehokkailla jännityksillä	14
2.3	Laskenta kokonaisjännityksillä	15
2.4	Kokeen yhteydessä tarkasteltavia näkökohtia.....	16
2.4.1	Huokospaineen jakautuminen ja kehittyminen	16
2.4.2	Liukupinnan muoto ja päätyvastuksen vaikutus	19
3	KOHTEEN KUVAUS	23
3.1	Yleistä	23
3.2	Pohjatutkimukset	24
4	INSTRUMENTOINTI JA MUUT KOEJÄRJESTELYT.....	31
4.1	Mittaustarpeet sorrutettavassa penkereessä	31
4.2	Kuormitusjärjestelyt	32
4.3	Käytetyt mittausmenetelmät ja -laitteet.....	38
4.3.1	Huokospaineanturit	39
4.3.2	Inklinometrit	44
4.3.3	Monitorointi takymetreillä.....	45
4.3.4	Painumaletkut.....	46
4.3.5	Maanpaineanturit.....	48
4.3.6	Liukupinnan havaintoputket	51
4.3.7	Laserkeilaus	54
4.3.8	Venymäliuskat	54
4.3.9	Kallistuskulma-anturit	56
4.4	Mittalaitteiden sijoittelu	57
4.4.1	Huokospaineanturit	59
4.4.2	Inklinometrit	60
4.4.3	Takymetrit ja prismat	61
4.4.4	Painumaletkut.....	61
4.4.5	Maanpaineanturit.....	62
4.4.6	Liukupinnan havaintoputket	63
4.5	Datan keruu ja seuranta	63
5	KOKEEN SUORITUS	66
5.1	Toimenpiteet työmaalla ennen koetta.....	66
5.2	Kokeen kulku	70
6	MITTAUSTULOKSET.....	81
6.1	Huokospaine- ja maanpaineanturit.....	81
6.2	Inklinometrit.....	89
6.3	Takymetrimittaukset.....	95
6.4	Painumaletkut	100
6.5	Liukupintaputket	103
6.6	Laserkeilaukset	105
6.7	Venymäliuskat.....	107
6.8	Kallistuskulma-anturit.....	108
6.9	Kokeen jälkeiset CPTu-kairaukset	109

6.10	Liukupinnan syvyyden ja muodon arviointi	111
6.11	Stabiliteetin takaisinlaskentaa	118
6.11.1	Huokospaineiden mallintaminen.....	118
6.11.2	Liukupinnan päätyvastus ja kuorman jakautuminen.....	131
7	MITTALAITTEIDEN TOIMIVUUS KOKEESSA JA NIIDEN SOVELTUVUUS STABILITEETIN MONITOROINTIIN	135
7.1	Huokospaineanturit.....	136
7.2	Inklinometrit.....	138
7.3	Takymetrimittaukset.....	140
7.4	Painumaletku.....	142
7.5	Laserkeilaukset	143
8	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	144
8.1	Mittaukset ja monitorointi	144
8.2	Stabiliteettilaskenta ja mittaustulokset	145

LIITTEET

Liite 1	Koetta edeltäneitä pohjatutkimustuloksia
Liite 2	Palkistojen toteutuspiirustukset
Liite 3	Huokospaineanturien sijainnit koealueella
Liite 4	Troxler-mittaukset
Liite 5	Inklinometrikuvaajien laskennasta
Liite 6	Kokeen jälkeiset CPTu-kairaukset

1 Johdanto

Suuri osa Suomen rataverkosta on rakennettu pehmeälle maaperälle. Tämä asettaa suuret vaatimukset muun muassa ratapenkereiden stabiliteetilaskennalle ja niiden stabiliteetin monitoroinnille. Tarkkojen stabiliteettilaskelmien tarvetta lisäävät entisestään mahdollisesti tulevaisuudessa käytettävät nykyistä suuremmat akselipainot. TTY:n Rakennustekniikan laitoksen Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö ja Liikenneviraston rautatieosasto (31.12.2009 asti Ratahallintokeskus) toteuttavat vuosina 2009–2012 ”Ratapenkereen stabiliteetti ja stabiliteetin parantaminen” (RASTAPA) -projektin, johon liittyen Salon Perniössä tehtiin lokakuussa 2009 täysimittainen ratapenkereen sorrutuskoee. Tässä diplomityössä käsitellään kyseisen sorrutuskokeen instrumentointia ja muita koejärjestelyjä, analysoidaan koetuloksia ja sovelletaan niitä stabiliteetilaskentaan.

Tällä työllä on kaksi päätavoitetta:

- Eri mittaustekniikoiden soveltuvuuden ja kehityskelpoisuuden arviointi penkereiden stabiliteetin mittauksessa ja seurannassa. Sorrutuskoeeella saaduilla kokemuksilla voidaan sekä tarkastella nykyisin käytössä olevien mittaustapojen soveltuvuutta että kehittää niitä edelleen. Lopullisena tavoitteena on kehittää Suomen rataverkolle toimiva järjestelmä penkereiden stabiliteetin monitorointiin. Tämän diplomityön rajaus kulkee näiltä osin kuitenkin mittalaitteiden teknisen toimivuuden tarkastelussa sorrutuskoekin havaintojen perusteella eikä niinkään niiden soveltamisessa monitorointijärjestelmään.
- Sorrutuskoekin analysointi ja tehtyjen havaintojen soveltaminen stabiliteettilaskentaan lamellimenetelmiä (LEM) käyttäen. Tarkastelun kohteena stabiliteettilaskennassa olivat huokospaineiden tarkoituksenmukainen mallintaminen laskentaa varten, jännityksen jakautuminen kuorman alla ja päätyvastuksen vaikutus. Stabiliteettilaskennan teoriaa käsitellään tässä lähinnä siltä osin kuin se oli relevanttia instrumentoinnin suunnittelussa, tulosten tulkinnassa ja takaisinlaskennassa. Saatujen mittaustulosten hyödyntämistä elementtimenetelmään (FEM) pohjautuvissa laskentamenetelmissä tutkitaan erikseen tutkija Juho Mansikkamäen (TTY) väitöstudkimuksessa, joka myös liittyy samaan RASTAPA-projektiin.

2 Stabiliateetilaskennasta lamellimenetelmillä

2.1 Lamellimenetelmistä yleisesti

Stabiliateetilaskennan menetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen yleisimpään päätyyppiin: lamellimenetelmät (LEM, Limit Equilibrium Method) ja elementtimenetelmään perustuva FEM-laskenta (Finite Element Methods). FEM-laskennan tarkastelu on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Lamellimenetelmissä oletetaan, että maan murto tapahtuu liukupintaa pitkin. Liukupinta voi olla ympyränmuotoinen, tasomainen, spiraalinmuotoinen tai näiden yhdistelmä. Usein liukupinta oletetaan kuitenkin ympyränmuotoiseksi, sillä varsinkin (homogeenisilla) koheesiomailla ympyrän on todettu olevan yleinen liukupinnan muoto (Rantamäki et al 2004 s.187).

Erilaiset lamellimenetelmät ovat olleet stabiliateetilaskennan käytetyimpiä työkaluja jo 1900-luvun alkupuolelta lähtien. Kaksiulotteisissa lamellimenetelmissä liukupinnan rajaama alue jaetaan pystysuoriin lamelleihin. Vastaavasti kolmiulotteisessa laskennassa voidaan liukukappale jakaa lamellien sijasta kolmiulotteisiin kiiloihin tai pylväisiin. Menetelmissä tarkastellaan yksittäisten lamellien ja/tai koko liukukappaleen voima- ja/tai momenttitasapainoa, minkä avulla lasketaan sekä liukupinnalle mobilisoitua leikkausjännitys että normaalivoimasta riippuva leikkauslujuus. Voidaan erottaa yksinkertaistetut (simplified) menetelmät, joissa tarkastellaan joko voima- tai momenttitasapainoa, sekä yleiset (generalised/rigorous), joissa tarkastellaan molempia.

Lamellimenetelmissä tehdään usein tiettyjä yksinkertaistuksia ja oletuksia esimerkiksi lamellien välillä vaikuttavista voimista, sillä muuten tuntemattomien tekijöiden määrä olisi suurempi kuin käytettävissä olevien yhtälöiden määrä. Näiden yksinkertaistuksien ei kuitenkaan oleteta vaikuttavan laskelmien tarkkuuteen merkittävästi.

Lamellimenetelmissä lasketaan varmuuskerroin F , joka yleisen määritelmän mukaan kuvaa leikkauspinnalle lasketun keskimääräisen leikkauslujuuden suhdetta tasapainotilan leikkausjännityksiin:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

missä

τ_f = liukupinnan keskimääräinen leikkauslujuus
 τ = liukupinnalle tasapainotilassa mobilisoitua keskimääräinen leikkausjännitys

Varmuuskerroin voidaan ilmaista lamellimenetelmissä myös voimien tai momenttien suhteena (Tavenas et al 1980 s. 62):

$$F = \frac{\text{Liikettä _ vastustava _ voima _ tai _ momentti}}{\text{Liikettä _ aiheuttava _ voima _ tai _ momentti}} \quad (2)$$

Liikettä vastustavien voimien tai momenttien suuruus on riippuvainen maan leikkauslujuudesta, ja liikettä aiheuttavat voimat ja momentit riippuvat maahan mobilisoitu-neista leikkausjännityksistä.

Kaikissa lamellimenetelmissä on implisiittisenä oletuksena, että maa ei ole jännitys-muodonmuutosominaisuuksiltaan haurasta, ja että sama varmuus murtoa vastaan vallitsee koko liukupinnalla maan jännitys-muodonmuutuskäyttäytymisestä riippu-matta. Lisäksi kaikissa käytetään erilaisia alkuoletuksia ja yksinkertaistuksia, joilla vähennetään laskelmissa tuntemattomien tekijöiden määrä samaksi kuin käytettävissä olevien yhtälöiden määrä. (Duncan & Wright 1980).

Ulkoista kuormaa ei jaeta maahan todellisuutta vastaavasti, vaan se kohdistuu täysi-määräisenä sen alapuolisten lamellien pohjiin. Kuormasta aiheutuva huokos-painelisäys pyritään mallintamaan laskennallisen jännityslisäyksen suuruusena. Näin kuorma ei aiheuta leikkauslujuuden kasvua suljetussa tilassa, mikä korjaa kuorman epätarkasta mallintamisesta aiheutuvat ongelmat laskennallisessa leikkauslujuudes-sa.

Eräs käytetyimmistä lamellimenetelmistä on Bishopin (1955) menetelmä, jossa tarkastellaan liukuvan kappaleen momenttitasapainoa liukupintaympyrän keskipisteen suhteen (kuva 1). Bishopin menetelmää pidetään yleisesti hyvin tarkkana laskenta-menetelmänä. Sitä on kuitenkin käytettävä varoen erityisesti silloin, jos kohteessa esiintyy huomattavia vaakasuuntaisia voimia, sillä se ei ota vaakasuuntaista tasapai-noehtoa huomioon (Mansikkamäki 2009 s. 5). Lisäksi sen rajoitteena on mahdollisuus käyttää vain ympyrän muotoista liukupintaa.

Bishopin menetelmän mukainen varmuuskertoimen laskentakaava voidaan muotoilla useilla eri tavoilla merkintätavoista ja mahdollisista yksinkertaistuksista riippuen. Kaava 3 on lähteen Tavenas et al 1980 mukainen. Lamellien väliset leikkausvoimat voidaan yleensä jättää yhtälöstä kokonaan pois tarkkuuden merkittävästi kärsimättä (Helenelund 1981 s. 202). Koska varmuuskerroin F on yhtälön molemmilla puolilla, yhtälö ratkaistaan iteratiivisesti esimerkiksi alkuarvauksella $F=1$. Seuraavassa iterointivaiheessa alkuarvauksena käytetään edellisellä kerralla saatua tulosta. Näin jatketaan, kunnes alkuarvaus ja tulos ovat riittävällä tarkkuudella samat.

Muita yleisesti käytettyjä lamellimenetelmiä ovat esimerkiksi Janbun yksinkertaistettu menetelmä (toteuttaa vaakavoimien kokonaistasapainoehdon ja lamellikohtaisen pystytasapainoehdon) ja Morgenstern-Price -menetelmä (toteuttaa lamellien voimatasapainoehdon ja koko liukupinnan momenttitasapainoehdon).

Vaarallisimman liukupinnan löytämiseksi stabiliteettilaskentaohjelmat laskevat usein tuhansia eri liukupintoja. Eri ohjelmilla on tähän erilaisia algoritmeja. Vaarallisimmilla liukupinnoilla on tiettyjä yleisesti esiintyviä piirteitä: esimerkiksi liukupinta alkaa usein ulkoisen pintakuorman takareunasta ja päättyy sopivalla etäisyydellä sijaitsevaan ojaan tai muuhun koveraan taitteeseen.

Lamellimenetelmissä käytetty maan leikkauslujuus voidaan määrittää joko käyttäen Mohr-Coulomb-murtokriteerin (kaava 4) mukaisia tehokkaita lujuusparametreja tai vaihtoehtoisesti voidaan määrittää jännityksistä ja huokosvedenpaineesta riippumaton suljettu leikkauslujuus koko maakontinuumille.

2.2 Laskenta tehokkailla jännityksillä

Tehokkailla jännityksillä laskettaessa maan lujuus määräytyy tehokaiden lujuusparametrien c' ja φ' perusteella, mistä tulee menetelmän toinen nimitys c' - φ' -menetelmä. Maan tehokas leikkauslujuus voidaan laskea yleisesti tunnetulla Mohr-Coulombin kaavalla

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \cdot \tan \varphi' = c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan \varphi' \quad (4)$$

missä

τ_f	= maan leikkauslujuus
c'	= maan tehokas koheesio
σ_n'	= vallitseva tehokas normaalijännitys
φ'	= maan tehokas sisäinen kitkakulma
σ_n	= vallitseva liukupinnan normaalin suuntainen kokonaisjännitys
u	= vallitseva huokosvedenpaine

Maan leikkauslujuus muuttuu siis kokonaisjännitysten ja huokosvedenpaineen funktiona. Huokosvedenpaine vaikuttaa maassa vallitseviin tehokkaisiin jännityksiin ja siten suoraan maan lujuuteen. Koska tehokas normaalijännitys on maassa vallitsevan kokonaisjännityksen ja huokosvedenpaineen erotus, huokosvedenpaineen kasvu kokonaisjännitysten pysyessä samana vähentää maan lujuutta.

Savella on heikko vedenläpäisevyys. Kun savea kuormitetaan nopeasti suljetussa tilassa, kuormitus aiheuttaa huokosveden ylipainetta, joka nopeassa kuormituksessa ei ehdi tasaantua. Tämä ylipaine heikentää saven lujuutta ja siten heikentää penkereen stabiliteettia. Tästä syystä huokosveden ylipaineen tunteminen tehokkailla jännityksillä laskettaessa on hyvin tärkeää.

Periaatteessa c' - φ' -menetelmällä laskettaessa liukupinnalla käytetään teoreettisesti ”oikeita” leikkauslujuuksia, jolloin voisi olettaa tämän laskentatavan olevan hyvin todellisuutta vastaava (täytyy kuitenkin muistaa lamellimenetelmissä käytetty kuorman vaikutuksen jakamattomuus, joka vaikuttaa laskennalliseen jännitystilaan ja lujuuksiin liukupinnalla – katso kohta 2.4.1). Koheesio ja kitkakulma voidaankin selvittää melko yksinkertaisesti kolmiaksoalikoilla, ja kokonaisjännitykset ovat helposti laskettavissa kun maaperän ominaisuudet on selvitetty riittävällä pohjatutkimuksilla ja näytteenotolla. Tehokaiden jännitysten tuntemiseksi pitäisi kuitenkin saada selville sekä käyttö- että murtotilaa vastaava huokosvedenpaine, mikä on käytännössä hyvin vaikeaa.

Tavanomaisen penkereen rakentamisen yhteydessä huokosvedenpaineen jakaumaa ja sen kehittymistä voidaan tietysti mitata rakentamisen aikana, ja sen jälkeen käytön aikana. Murtotilan huokosvedenpainejakaumaan ei kuitenkaan päästä mittaamalla käsiksi ennen murron tapahtumista, mikä on luonnollisesti myöhäistä suunnittelua tai monitorointia palvelevia stabiliteetilaskelmia ajatellen. Tämän takia murtotilan huokospaineita tulisi arvioida laskennallisesti, mikä on aina huomattavan epävarmaa siihen liittyvien useiden muuttujien takia. Lisäksi matalilla kokonaisvarmuuden arvoilla liukupinnalla tapahtuu saven myötämistä, mikä lisää huokosvedenpainetta (katso

kohta 2.4.1) ja näin ollen heikentää leikkauslujuutta liukupinnalla. Tätä osaa huokospaineen kasvusta on hyvin vaikea arvioida laskennallisesti.

Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että tehokkailla jännityksillä laskettaessa saadaan liian suuria kokonaisvarmuuden arvoja, mikä johtuu mm. siitä, että liukupinnalla murtotilassa muodostuvaa, myöhdön aiheuttamaa huokosveden ylipainetta ei useinkaan oteta huomioon.

2.3 Laskenta kokonaisjännityksillä

Kokonaisjännitysten menetelmässä eli $\varphi = 0$ -menetelmässä määritetään maakerroskohtaisesti leikkauslujuuden arvo tai lujuusprofiili, jota käytetään laskelmissa sellaisenaan. Tämä lujuus ei siis riipu laskennallisesta jännityksestä tai huokosvedenpaineesta. Periaatteessa lujuus määritellään edelleen Mohr-Coulombin murtoehdon mukaisesti, mutta nyt kaavan kitkakulmatermi merkitään nolaksi ja koheesion paikalla käytetään (yleensä) suljettua leikkauslujuutta, joka sisältää implisiittisesti jännitystilän ja huokospaineen vaikutuksen. Usein kokonaisjännitysten menetelmää kutsutaankin nimenomaan suljetun leikkauslujuuden menetelmäksi, mutta laskelmissa käytetty leikkauslujuus voi myös periaatteessa olla suunnittelijan harkinnan mukaan jotakin muuta kuin perinteinen in situ -suljettu leikkauslujuus (RHK 2006 s.24).

Kokonaisjännityksillä laskettaessa ympyräliukupinnan kokonaisvarmuus voidaan ilmaista kuvan 1 mukaisesti yksinkertaisella kaavalla (Tavenas et al 1980 s.71):

$$F = \frac{R \sum \tau_f l}{\sum W_x} \quad (5)$$

missä

R	= liukuympyrän säde
τ_f	= leikkauslujuus
l	= lamellin pohjan leveys
W	= lamellin paino
x	= sivusuuntainen etäisyys liukupinnan keskipisteestä

$\varphi=0$ -menetelmää sovelletaan usein suljetun tilan stabiileetin laskentaan lyhytaikaisessa kuormituksessa tai esimerkiksi heti penkereen rakentamista seuraavassa tilanteessa (varmuuden minimi). Pitkäaikaisten kuormitustilanteiden tarkasteluun se ei sovi. Näennäisen yksinkertaisuutensa takia $\varphi=0$ -menetelmä on ylivoimaisesti yleisin stabiileettilaskentamenetelmä. Käytännössä menetelmän ongelmana on suljetun leikkauslujuuden määrittäminen tarkasti ja kuormitustilannetta vastaavasti. Suljetun leikkauslujuuden arvoon vaikuttavat esimerkiksi koenoisuus ja leikkaustason suunta (saven anisotropia).

Suljettu leikkauslujuus vastaa implisiittisesti murtotilan lujuutta murtotilan huokospaineessa. Sen avulla laskettuna saadaan huomattavasti $c'-\varphi'$ -menetelmää pienempiä kokonaisvarmuuden arvoja, kun penkereen varmuus sortumaa vastaan on selvästi yli 1. (RHK 2006 s. 18–19)

Saven suljettu leikkauslujuus määritellään Suomessa yleensä siipikairalla tai häiriintymättömille näytteille tehtävillä kartiokokeilla. Näitä menetelmiä varten on olemassa

saven juoksurajaan perustuvia redusointikaavoja, joilla kairauksesta tai kokeesta saatua leikkauslujuuden arvoa voidaan korjata todellisuutta paremmin vastaavaksi. Eräs tällainen on Ratahallintokeskuksen julkaisussa B15 Stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet (RHK 2005 s. 5) annettu kaava:

$$\mu = \frac{1,5}{1 + F/100} \quad (6)$$

missä

μ = redusointikerroin
 F = hienousluku [%] (jos $F < 50$ %, käytetään $\mu = 1$)

Kaavassa 6 käytetty hienousluku määritellään kartiokokeella, ja se vastaa likimäärin kierityskokeella määritettyä juoksurajaa.

2.4 Kokeen yhteydessä tarkasteltavia näkökohtia

Tässä työssä tarkasteltavia stabiliteettilaskelmiin vaikuttavia tekijöitä ovat huokospaineen todellinen jakautuminen ja kehittyminen sekä liukupinnan muoto ja päätyvastus. Perniön sorrutuskokeen yhteydessä tehtiin muun muassa näihin seikkoihin liittyviä instrumentointeja, mittauksia ja laboratoriotutkimuksia. Näistä saatuja tuloksia käytettiin lamellimenetelmien yhteydessä takaisinlaskentaan, jossa parametreja varioitiin niin, että laskentamenetelmät vastaisivat mahdollisimman hyvin teoreettisesti oikeaa laskentatilannetta (katso luku 7).

2.4.1 Huokospaineen jakautuminen ja kehittyminen

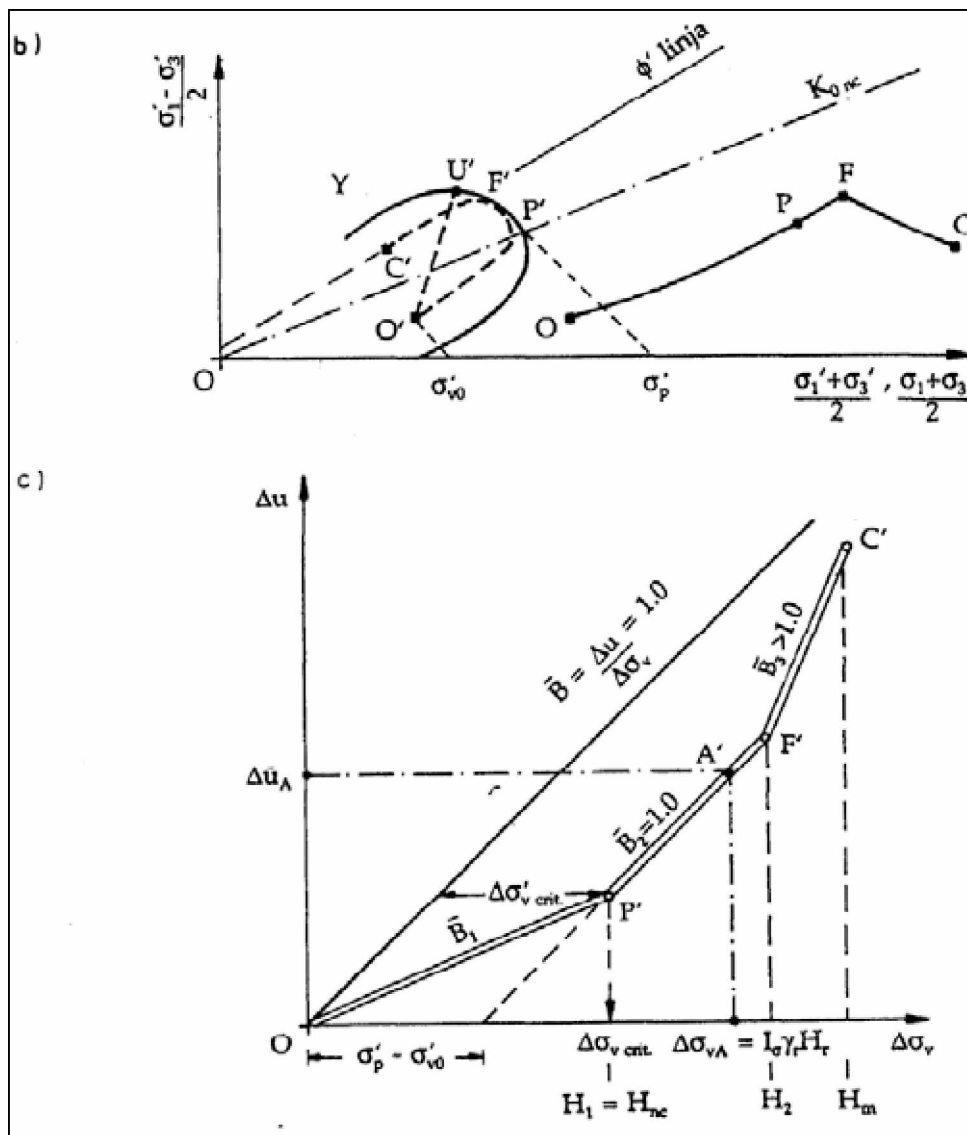
Huokosvedenpaineen suuruuden ja jakauman tunteminen on ensiarvoisen tärkeä asia tehokkailla jännityksillä laskettaessa, sillä se vaikuttaa suoraan tehokkaisiin jännityksiin ja sitä kautta leikkauslujuuksiin. Tehokkaiden jännitysten menetelmässä laskelmien tulisi perustua laskentahetkellä mitattuihin huokospaineisiin laskennallisten paineiden sijasta, sillä huokospaineiden laskennallinen arviointi on hyvin vaikeaa. Mitoitushetkellä havaittujen huokospaineiden lisäksi joudutaan kuitenkin arvioimaan huokospaineiden arvot kuormitustilanteessa ja murtotilanteessa. (RHK 2006 s. 14)

Stabiliteettilaskennassa oletetaan usein, että penkereen nopea kuormittaminen (esimerkiksi junakuormalla) aikaansaa likimain kuormituksen muutosta vastaavan lisäyksen huokosvedenpaineeseen. On todettu (RHK 2006 s. 14), että penkereen kuormittaminen ei lisää huokosvedenpainetta vain penkereen alla vaan myös sen sivuilla. Lisäksi huokosvedenpaineet muuttuvat penkereen sivuilla ja alla eri tahdissa ajan funktiona.

Huokosvedenpaineen muutoksen laskennalliseen arviointiin on kehitetty joitakin laskentamenetelmiä. Tunnetuimpia näistä ovat Skemptonin, Henkelin/Scottin ja Janbun yhtälöt. Näistä kaikissa huokospaineen muutosten arviointi perustuu pääjännitysten muutoksiin ja erilaisiin, lähinnä kokemusperäisiin huokospaineparametreihin.

Tavenas & Leroueil (1980, s. 238) huomauttavat, että pääjännitysten kiertymisellä on huomattava vaikutus huokosvedenpaineisiin. Tästä johtuen huokosvedenpaineen laskennallinen ennakointi edellä mainituilla menetelmillä voidaan tehdä luotettavasti vain penkereen keskilinjan alta. Yleisesti ottaen on myös havaittu, että erilaiset huokospaineen laskentamenetelmät antavat hieman liian suuria tuloksia todelliseen, mitattuun huokospaineeseen nähden. Tämän ajatellaan johtuvan siitä, että rakennusai-kaista konsolidaatiota ei useinkaan oteta huomioon. (Tavenas & Leroueil 1980)

Kuvassa 2 on esitetty huokosvedenpaineen tyypillinen kehittyminen pystyjännityksen kasvaessa. Välillä OP' savi on ylikonsolidoitunutta, ja huokosvedenpaine kehittyy hitaammin kuin pystyjännitys. Normaalikonsolidoituneella, suljetulla alueella $P'F'$ huokosvedenpaineen nousu vastaa pystyjännityksen kasvua. Pisteiden F' jälkeen savi alkaa olla murtotilassa, ja murtuminen leviää maa-alkiosta toiseen kun kuormitusta lisätään. Tällöin huokosvedenpaine kasvaa jyrkemmin kuin pystyjännitys. Suomalaisissa, usein normaalikonsolidoituneissa savissa ei ole useinkaan erotettavissa väliä OP' , vaan savi käyttäytyy yleensä välin $P'F'C'$ mukaisesti. (Tielaitys 1994)



Kuva 2. Jännityspolut (b) ja huokosvedenpaineen kehittyminen savissa pystyjännityksen funktiona (c) (Tielaitys 1994 s. 13).

Myötöpehmenemisestä johtuva huokosvedenpaineen nopea kasvu tapahtuu yleensä heikoilla kokonaisvarmuuden tasoilla (1,4...1,0) (RHK 2006 s. 16). Tämän takia sitä voidaan myös pitää indikaattorina huonosta stabiliteetista rakennusaikana (pengertä korotettaessa).

On kuitenkin huomattava, että Quebecissä 1970-luvulla tehdyissä vaiheittain rakennettuja instrumentoituja penkereitä koskevissa tutkimuksissa (mm. La Rochelle et al 1974, Leroueil et al 1978a, Leroueil et al 1978b, Tavenas et al 1978, Tavenas & Leroueil 1980) penkereiden rakentamisnopeus oli hyvin hidas. Esimerkiksi Saint-Albanin koepengertä (La Rochelle et al 1974) korotettiin kahdentoista päivän aikana 0,3 m – 0,6 m/d. St. Lawrence Valleyn neljää koepengertä (Tavenas et al 1978) rakennettiin ja seurattiin usean vuoden ajan. Kirjallisuudessa usein esiintyvä kuvaaja huokospaineiden kehittymisestä (kuva 2, osa c) on juuri näihin tutkimuksiin perustuva yleistys. Ennen koetta oli siis epäselvää, vastaako junakuorman kaltaisessa hyvin nopeassa kuormituksessa tapahtuva huokospaineen kehittyminen lainkaan tätä mallia. Ainakaan ”rakennusaikaista” konsolidaatiota ei voitu olettaa tapahtuvan junakuorman tapauksessa.

Tehokkaiisiin jännityksiin perustuvissa stabiliteetilaskelmissa oletetaan huokospaineen ja tehokkaan normaalijännityksen olevan sama sekä käyttö- että murtotilassa. Tämä tarkoittaa sitä, että huokospaineen kasvu käyttötilasta murtotilaan jätetään huomioimatta. (RHK 2006 s.17) Koska vanhojen ratapenkereiden tapauksessa savi on usein normaali- tai jopa alikonsolidoitunutta, oletuksena on, että pengerkuorman noustessa huokosvedenpaine kasvaa likimain pystyjännityksen lisäyksen $d\sigma_v$ verran. (RHK 2006 s.18)

Esimerkiksi junakuorman vaikutusaika on niin lyhyt, että sen aiheuttama huokosveden ylipaine ei ehdi purkautua. Kuorman siis oletetaan aiheuttavan likimain pystysuoraa jännityslisäystä vastaavan huokosveden ylipaineen, eikä maan lujuus näin ollen kasva ($\Delta\sigma_v' = \Delta\sigma_v - \Delta u = 0$). Lamellimenetelmissä ulkoisen pintakuorman jakautumista ei yleisesti ottaen mallinneta, eli pintakuorma kohdistuu suoraan alaspäin. Huokosvedenpainetta sen sijaan mallinnetaan usein todellisen tilanteen mukaan (RHK 2006 s. 23). Tällainen toiminta aiheuttaa tilanteen, jossa liukupinnalla kuorman alapuolella laskennallinen pystyjännitys kasvaa enemmän kuin huokosvedenpaine, mikä saattaa aiheuttaa laskennassa kuorman alle suuremmat leikkauslujuudet kuin todellisuudessa. Vastaavasti laskelmissa käytetty kasvanut huokosvedenpaine penkereen sivuilla aiheuttaa tällä liukupinnan osalla laskennallista leikkauslujuuden heikkenemistä. Jotta lamellimenetelmässä päädyttäisiin todelliseksi arveltuun tilanteeseen, jossa nopea kuormitus ei aiheuta lujuuden kasvua, tulisi pintakuorman aiheuttama huokospaineen kasvu mallintaa vain pintakuorman alla olevien lamellien pohjiin kuormituslisäystä vastaavana (RHK 2006 s.23). Tätä voidaan mallintaa kuorman huokospaineparametrilla r_{uq} :

$$u_q = r_{uq} \cdot q \quad (7)$$

missä

u_q	= kuormasta aiheutuva huokosveden ylipaine [kPa]
r_{uq}	= kuorman huokospaineparametri (ei yksikköä)
q	= pintakuorma [kPa]

Usein käytetään arvoa $r_{uq} = 1$, joka vastaa tilannetta, missä huokospaine liukupinnalla kuorman alla kasvaa kuormituslisäyksen verran. On kuitenkin esitetty (Länsivaara 2009), että tämä aiheuttaakin laskennassa liian suuren huokospaineen kasvun. Kuorman alla jyrkästi laskevalla liukupinnalla pinnan leikkauslujuuteen Mohr-Coulombin murtoehdon mukaisesti vaikuttava normaalijännityksen lisäys on huomattavasti pienempi kuin (tässä tapauksessa teoreettinen) pystyjännityksen lisäys, ja pystyjännityksen kasvun suuruinen huokospainelisäys heikentänee laskennallista leikkauslujuutta liikaa. Tätä ajatellen tulisi käyttää $r_{uq} < 1$ (käytettävä arvo riippuu liukupinnan kaltevuuskulmasta). Sorrustuskokeen tuloksia käytettiin takaisinlaskentaan, jossa muun muassa varioitiin parametria r_{uq} parhaan laskentatilanteen löytämiseksi (katso kohta 6.11.1).

Tämän työn yhteydessä stabiliteettilaskelmiin käytetyssä GeoCalc-ohjelmassa huokosvedenpaineen jakauman mallintamisessa voidaan käyttää useita vaihtoehtoja. Luonnontilainen (avoin) huokosvedenpaine voidaan mallintaa joko määrittämällä pohjavedenpinta tai huokospaineparametrin r_u avulla, jota käytettäessä huokosvedenpaine määritellään lamellin painon funktiona:

$$u = r_u \cdot \gamma \cdot h \quad (8)$$

missä

u	= huokosvedenpaine [kPa]
r_u	= huokospaineparametri
γ	= lamellin tilavuuspaino [kN/m^3]
h	= lamellin korkeus [m]

Jos kohteesta on tehty huokospainemittauksia tai sen jakauma on muuten tiedossa, voidaan huokospaine määrittää myös tasa-arvokäyrien perusteella. GeoCalcissa voidaan käyttää pohjavedenpintaa, parametria r_{uq} ja huokospaineen tasa-arvokäyriä vapaasti yhdessä. Parametrin r_u kanssa voidaan käyttää vain parametria r_{uq} .

2.4.2 Liukupinnan muoto ja päätyvastuksen vaikutus

Todellinen sortuma on aina kolmiulotteinen. Laskennan helpottamiseksi ja yksinkertaistamiseksi lamellimenetelmiä hyödyntävässä stabiliteettilaskennassa tarkastellaan kuitenkin yleensä kaksiulotteisia poikkileikkauksia. Jos todellinen sortuma ajatellaan sylinterimäiseksi niin, että liukupinta vastaa vaakatasossa olevan sylinterin vaippaa, jättämällä tämän sylinterin päätyvastukset huomioimatta aliarvioidaan kokonaisvarmuutta sortumaa vastaan. Sorrustuskokeen yhteydessä oli tarkoitus arvioida, millainen vaikutus liukukappaleen päätyvastuksella oli aiheutetussa sortumassa.

Jo intuitiivisesti voidaan ajatella, että päätyvastuksen vaikutus on suurin kun sortuma on pituussuunnassa lyhyt. Tällöin päädyt aiheuttavat suhteessa suuren osan koko liukukappaletta paikallaan pitävistä vastusvoimista. Lähteessä Rantamäki et al 2004 on tarkasteltu päätyvastuksen vaikutusta jäykän, vaakasuoralla homogeenisella koheesiomaalla olevan laatan vakavuuteen. Äärettömän pitkän laatan ($L/B = \infty$) teoreettinen murtokuorma täysin sylinterimäiselle liukupinnalle olisi tässä tilanteessa

$$p_m = 5,52 \cdot s \quad (9)$$

missä

p_m = murtokuorma (murtopohjarasitus) [kPa]

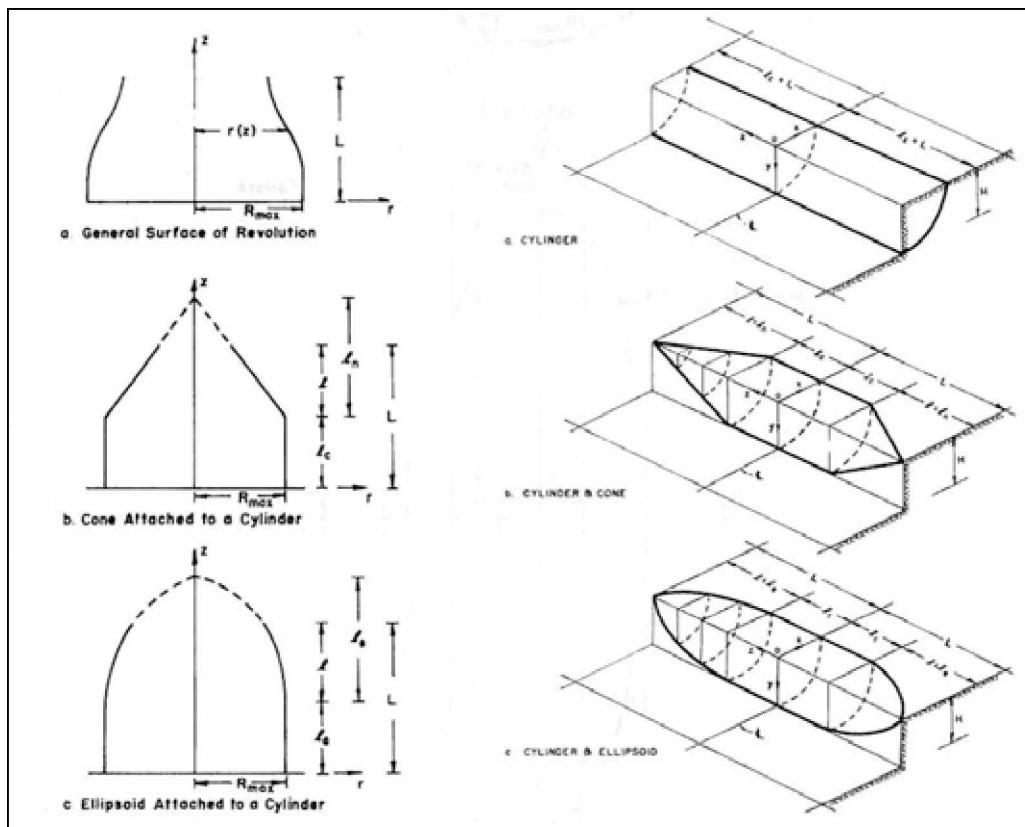
s = saven leikkauslujuus [kPa]

Vastaavasti on laskettu neliömäiselle laatalle ($L/B = 1$):

$$p_m = 6,45 \cdot s \quad (10)$$

Tässä tarkastelussa neliömäisen laatan varmuus murtoa vastaan (tai vaihtoehtoisesti murtoon tarvittavan kuorman) on päätyvastuksen ansiosta noin 16,8 % suurempi kuin äärettömän pitkällä laatalle. Päätyvastuksen vaikutus kuitenkin pienenee hyvin äkkiä sortuman muodon hoikentuessa: jo tilanteessa $L/B = 4$ päätyvastus aiheuttaa vain 5 % vaikutuksen kuormituskestävyyteen. (Rantamäki et al 2004 s. 191)

Yllä olevaa tarkastelua ei tietenkään voida sellaisenaan yleistää kaikkeen stabiliteettitilaskentaan. Myös oletus liukukappaleen puhtaasta sylinterimäisyydestä on käytännössä virheellinen, sillä sortumien on todettu olevan päistään pyörityneitä, kartiomaisia tai yleisemminkin pallomaisia. Siinä missä normaali 2D-tarkastelu vastaa päätyvastusten suhteen äärettömän pitkää sylinterimäistä kappaletta (Baligh & Azouz 1975 s. 1108), 3D-stabiliteettitilaskennassa käytetäänkin sortuman muotona usein sylinteriä, jonka päissä on esimerkiksi kartio-, pallo- tai ellipsoidipinta (kuva 3).



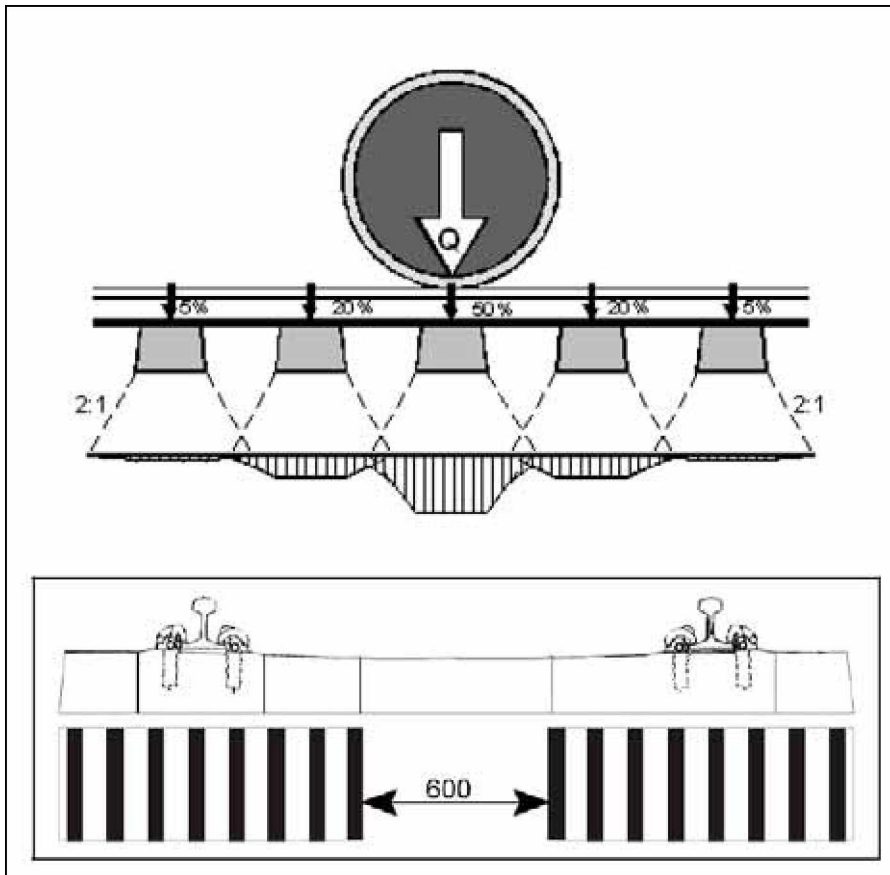
Kuva 3. Erilaisia liukukupinnan päiden muotoja. (Baligh & Azzouz 1975 s. 1108)

Alun perin 3D-stabiliteettilaskentamenetelmiä alettiin kehittää geometrialtaan monimutkaisten tai päädyistään rajattujen penkereiden tarkasteluun, kuten muodoltaan vaihtelevat penkereet tai kapean laakson rajaamat maapadot (Baligh & Azzouz 1975). Tällaisissa tapauksissa kolmiulotteisuuden merkitys on luonnollisesti suuri. Päätyvastuksen vaikutus kokonaisvarmuuteen ja murtokuormaan on myös suuri esimerkiksi tapauksissa, joissa pengker on lähellä sortumaa pelkän oman painonsa vaikutuksesta (Azzouz & Baligh 1983), tai jos sortuma tapahtuu pituussuunnassa hyvin lyhyen kuormituksen vaikutuksesta (Hungry 1987 s. 113).

Vaikka päätyvastuksen vaikutus penkereen kokonaisvarmuuteen on aina todellinen ja myös laskettavissa, mm. Baligh & Azzouz (1975) huomauttavat, että pitkissä, pengergeometrialtaan yksinkertaisissa sortumissa sen vaikutus on hyvin vähäinen ja voidaan näin jättää huomioimatta laskentatarkkuuden mainittavasti kärsimättä. Esimerkiksi tapauksia, joissa sortuman pituus penkereen suunnassa on yli neljä kertaa penkereen korkeus, voidaan heidän mukaansa tarkastella ilman, että päätyvastusta otetaan huomioon. Tehdyn kirjallisuustarkastelun perusteella voitiin siis olettaa etukäteen, että Perniön sorrutuskokeen tapauksessa sortuman päätyvastuksella ei olisi suurta vaikutusta penkereen kokonaisvarmuuteen kuormitettavan alueen pituuden ollessa noin 60 metriä ja pengerkorkeuden noin 1 metri. Oletus pitkästä, yhtenäisestä nauhakuormasta ei kuitenkaan pidä täysin paikkaansa junakuormituksen tapauksessa.

Eräs kokeen yhteydessä tarkasteltu seikka oli kuormituksen jakautumisen aiheuttamat variaatiot liukupinnan muodossa. Käsiteltäessä pitkää mutta äärellistä nauhakuormaa penkereen päällä voidaan periaatteellisesti olettaa, että liukupinnan muoto on suunnilleen kuormitettavan alueen pituinen sylinteri, johon liittyvät päät (niiden muodosta suuremmin riippumatta) alkavat kuormitettavan alueen rajoilta. Junakuorman aiheuttama kuormitus ei kuitenkaan ole tasainen nauhakuorma, vaan käytännössä jakautuu junan pyörien lähellä oleville ratapölkkyille. Tällöin mobilisoituvat leikkausjännitykset eivät todellisuudessa olekaan samoja koko matkalla radan pituussuunnassa, vaan junan akseleiden kohdalla jännitykset ovat huomattavasti suuremmat kuin akseleiden välissä. Tämä saattaisi johtaa paikalliseen sortumaan akselien kohdalla, kun taas akselien väliin voi jäädä alueita, joita ei ole kuormitettu murtoon saakka. Tällainen sortumatyyppi olisi kuitenkin luultavasti progressiivinen, eli sortuma etenisi akselien alta myös niiden väliselle alueelle.

Ratateknisten ohjeiden mukaan (RHK RATO 3 s. 24) yksittäisen akselin aiheuttama kuormitus jakautuu viiden akselin alla ja ympärillä olevan ratapölkyn alle (kuva 4). Jos ratapölkkyjen nimellisjako on 610 mm ja betonipölkyn leveys esim. 300 mm (RHK RAMO 11), akselikuorma jakautuu yhteensä $5 \cdot 300 \text{ mm} + 4 \cdot 310 \text{ mm} = 2740 \text{ mm}$ matkalle.



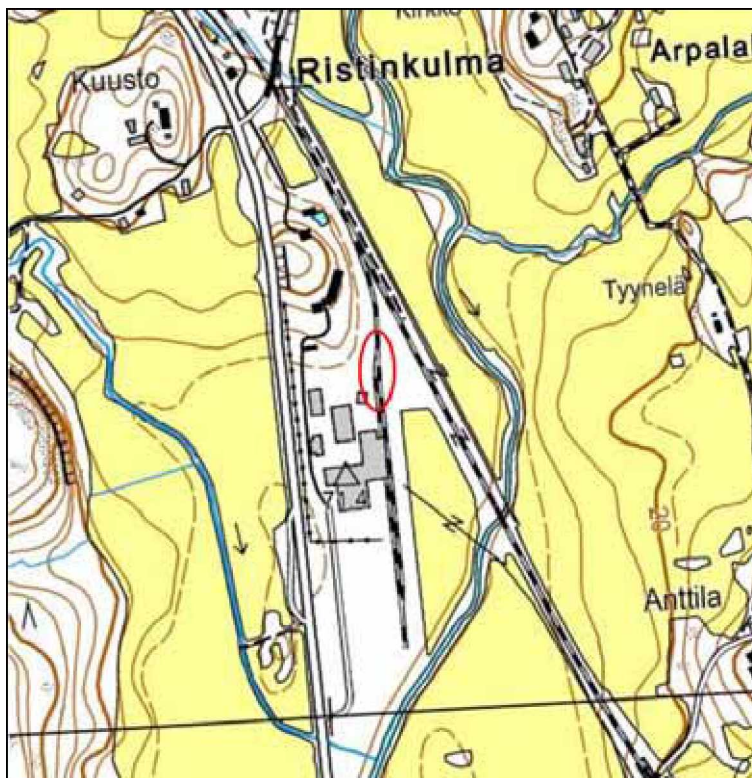
Kuva 4. Pystysuoran junakuorman jakautuminen ratapölkkyistä penkereeseen. (Rato 3 s. 24)

Staattisen junakuorman jakautumista liukupinnalle on tutkittu Ratahallintokeskuksen julkaisussa Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiiliteettitarkasteluihin (Juvankoski 2007), jossa tutkittiin pistekuormiksi jaetun junakuorman jakautumista liukupinnalle Boussinesqin teorian mukaisesti. Tässä yhteydessä todettiin, että päätyvastuksen vaikutus vähentää liukupinnalle välittyvää kuormitusta muutamia prosentteja verrattuna laskentatilanteeseen, jossa päätyvastuksen vaikutusta ei oteta huomioon. Tämä vaikutus oli selvä vain lyhyellä matkalla muodostuvia, akseligeometriasta riippuvia kuormitusmaksimeja tarkasteltaessa. Laskentaoletuksena oli, että liukupinta oli radan suunnassa vakio (sylinterin muotoinen).

3 Kohteen kuvaus

3.1 Yleistä

Sorrutuskokeen kohteeksi valikoitui pitkällisten etsintöjen jälkeen Salon Perniössä sijaitsevan viljasiilon käytöstä poistettu, 1960-luvulta peräisin oleva kaksiraiteinen pistorata, joka aikoinaan yhdisti siilon Helsinki–Turku -rantarataan. Pistorata kulkee siilon yhteydessä olevan varastokentän reunassa niin, että varastokenttä on sen länsipuolella ja itäpuolella raiteen ja rantaradan välissä on leveä, kohtalaisen luonnontilainen savimaa-alue (kuva 5). Kohde valittiin sopivien maaperäolosuhteiden ja hyvien kulkuyhteyksien takia. Kohteeseen pääsee helposti Salon ja Perniön välillä kulkevaa maantietä 52 pitkin, jonka varressa kohde sijaitsee. Pistoradan yhteys rantarataan oli kuvasta 5 poiketen katkaistu jo aiemmin.



Kuva 5. Koekohteen kartta, varsinainen koalue ympyröity punaisella.

Salon alueelle on tyypillistä huomattavan vaihteleva pientopografia, jossa syvät savikkolaaksot vuorottelevat jyrkkien kalliorinteiden välillä. Koalueen savikko syvenee rantarataa kohti, ollen sen kohdalla noin 20 m syvä. Alueen matalin kohta on koalueen itä- ja eteläpuolella virtaava Perniönjoki, jonka keskivedenpinta on noin +4 metriä merenpinnasta. Pistoraiteen viereisen maa-alueen alkuperäinen korkeusasema oli keskimäärin noin +8 m merenpinnasta. Pistoradan raiteet olivat alun perin lähes maanpinnan tasossa, käytännössä ilman pengerrystä.

Savialue oli ennen koetta suurimmaksi osaksi heinikon ja muun matalan kasvillisuuden peitossa. Pistoradan vieressä kasvoi muutamia läpimitaltaan noin 15 cm koivuja ja mäntyjä, ja myös raiteiden väliin oli ehtinyt kasvaa pieniä puita (kuva 6).

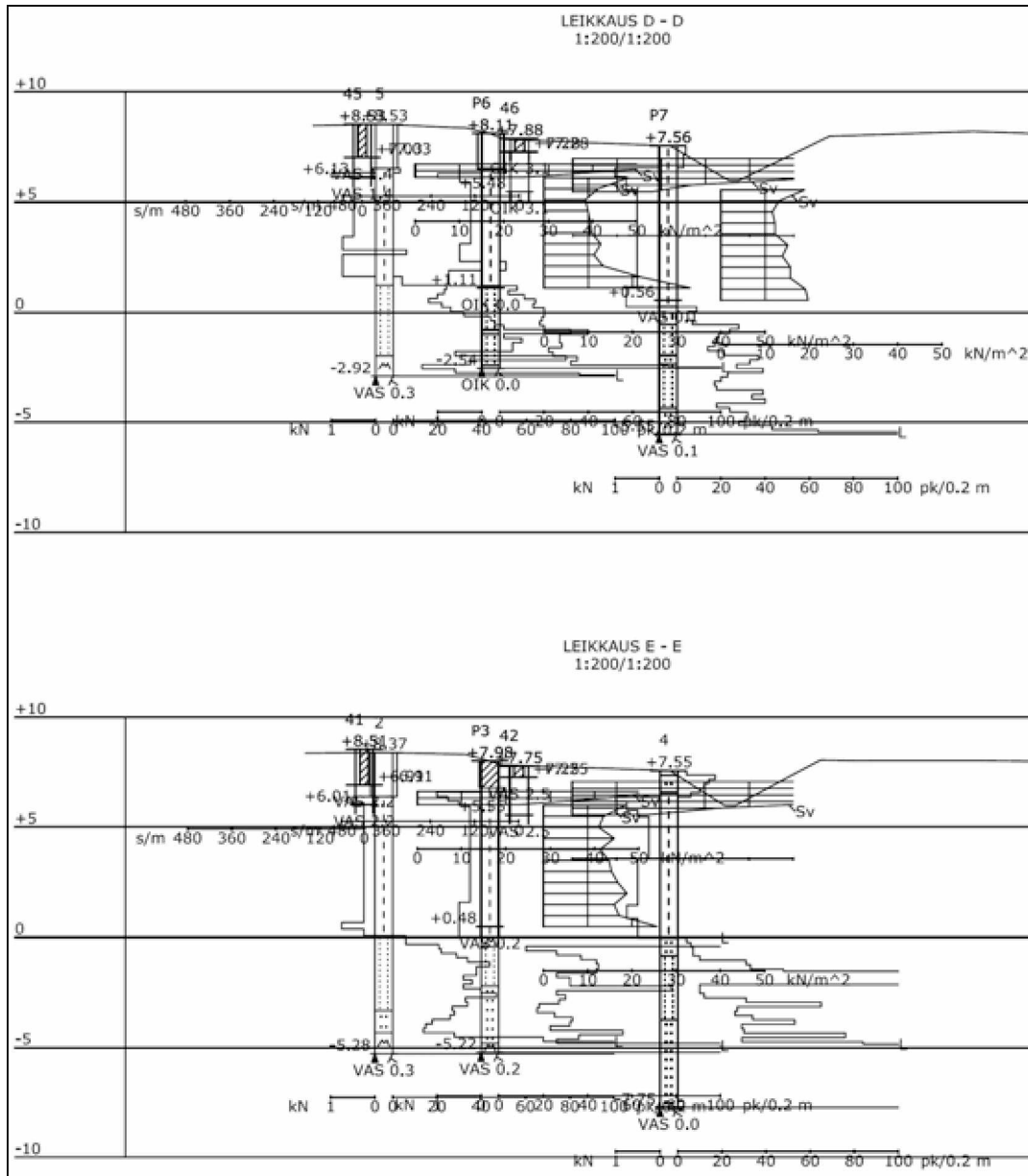


Kuva 6. Koealue kesäkuussa 2009. Koepenger rakennettiin etualalla näkyvän raiteen kohdalle. Viljasiilo näkyy taustalla. Kuva Kauko Sahi.

3.2 Pohjatutkimukset

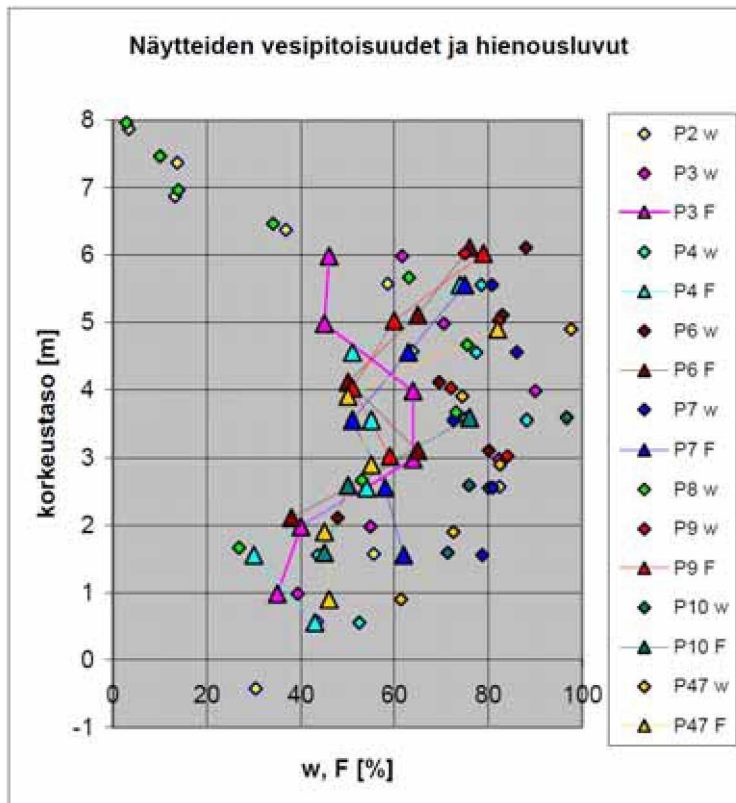
Kokeen suunnittelua ja etukäteislaskelmia varten kohteessa tehtiin kevään, kesän ja syksyn 2009 aikana perusteelliset pohjatutkimukset. Ensimmäisessä, kevään 2009 pohjatutkimuskierroksessa siilolta pohjoiseen, pistoradan kohdalta ja sen itäpuolelta tehtiin painokairauksia ja siipikairauksia (kuva 7). Painokairauksia tehtiin yhteensä 18 (viisi poikkileikkausta 20 m välein, poikkileikkauksessa 3–4 kairausta 15 m välein). Siipikairaukset tehtiin 1 m syvyysvälein savikerroksessa neljästä pisteestä läheltä arvioitua savikon keskiosaa. Lisäksi yhdestä pisteestä tutkimusalueen keskeltä otettiin häiriintymättömät savinäytteet, joista tehtiin kartiokokeet, ödometrikokeet sekä CU-kolmiakσιαalikokeita.

Toisessa pohjatutkimuskierroksessa (kuva 7, kuva 8) loppukesästä 2009 tehtiin täydentäviä painokairauksia ja siipikairauksia aiemmin tehtyjen kairausten pohjoispuolelta sekä raiteiden välistä. Lisäksi savesta otettiin häiriintymättömiä näytteitä laboratoriotutkimuksia varten. On huomattava, että toinen pohjatutkimuskierros tehtiin pintamaan poiston ja maaston muotoilun jälkeen (katso kohta 4.2), mikä näkyy tutkimuksissa esimerkiksi savien lievänä ylikonsolidoitumisena. Ensimmäisten pohjatutkimusten tuloksien arveltiin olevan hieman vääristyneitä täyttökerroksen aiheuttaman tankokitkan takia, joten toisen pohjatutkimuksen kairaukset tehtiin täyttökerrokseen asennetun suojaputken läpi. Toista pohjatutkimuskierrosta täydentämään tehtiin vielä syyskuussa 2009 siipikairauksia kuivakuorikerroksen leikkauslujuuden määrittämiseksi, sekä CPTu-kairauksia herkällä huokospainekärjellä lokakuussa 2009.

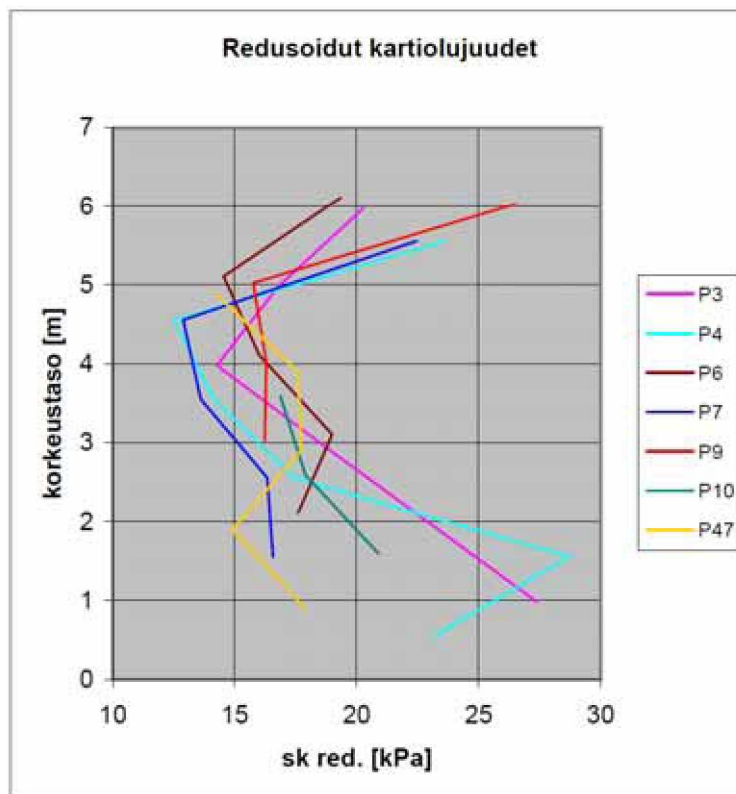


Kuva 8. Pohjatutkimusleikkaukset D-D ja E-E. Mukana myös kuivakuoren siipikairaukset. Leikkausten maanpinta vastaa pintamaan poiston jälkeistä tilannetta. Kuvan laatinut Ramboll Finland.

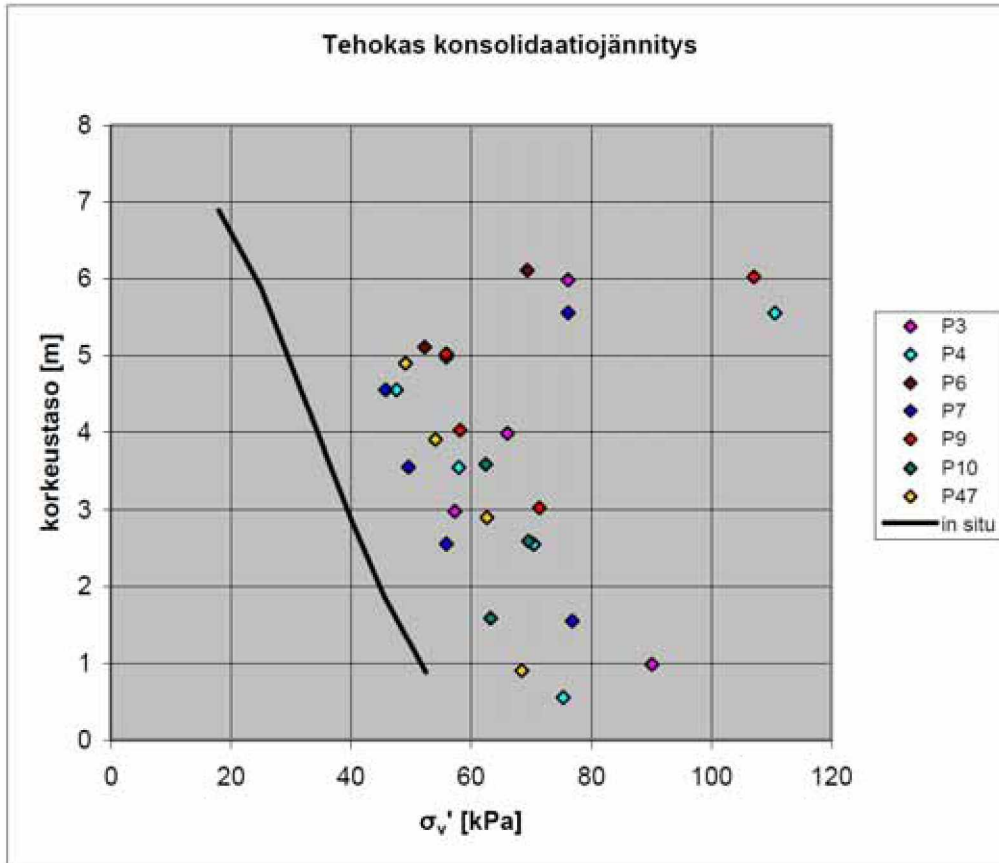
Toisen pohjatutkimuskierroksen häiriintymättömistä näytteistä tutkittiin suljettu leikkauslujuus, hienousluku ja sensitiivisyys kartiokokeilla. Lisäksi määritettiin tilavuuspainot, rakeisuudet sekä vesi- ja humuspitoisuudet, tehtiin CRS-ödometrikokeita sekä pisteestä 6 kattava kolmiaksisiaalikoesarja (sekä K_0 -kokeita että jännityspolkuohjattuja q-p -kokeita). Kuvassa 9 on näytteistä määritettyjen vesipitoisuuksien ja hienouslukujen korkeustasoprofiili. Kuvassa 10 on esitetty näytteiden redusoidut kartiolujuudet. Tarvittava reduktio oli melko vähäinen, ja useissa tapauksissa sitä ei tarvittu lainkaan. Kuvan 11 korkeustasoprofiilissa on näytteistä ödometrikokeilla määritetty tehokas konsolidaatiojännitys ja arvioitu tehokas in situ -pystyjännitys. Kuvien 10 ja 11 numerot viittaavat kuvan 7 pisteisiin.



Kuva 9. Näytteistä määritetyt vesipitoisuudet ja hienousluvut (savinäytteistä). Vesipitoisuuksia määritettiin sekä erillisillä kokeilla että kartio- ja ödometrikokeiden yhteydessä. Kuvan arvot ovat näiden määritysten keskiarvoja tietyistä pisteestä ja syvyydestä.



Kuva 10. Näytteiden redusoidut kartiolujuudet. Redusointi on tehty hienousluvun perusteella julkaisun RHK 2005 s.5 mukaisesti.



Kuva 11. Näytteiden ödometrikokeilla määritetty tehokas konsolidaatiojännitys. Näytteet on otettu pintamaan poiston jälkeen. Tehokasta in situ-pystyijännitystä kuvaava käyrä on arvioitu pisteitä ”keskimäärin” edustavaksi (eroja pisteiden in situ-jännitysten välillä tulee mm. siitä, että maanpinnan korkeustaso vaihteli eri pisteiden välillä noin 1,5 m haarakassa).

Tutkimusten perusteella maaperä koalueella on pääosin lihavaa savea, ja pinnassa on noin 1–2 metriä paksu sekalainen täyttökerros. Täyttökerros on paksuimmillaan radan alla ja ohenee savikolle päin. Savikerroksen paksuus on noin 5–8 metriä, ja sen alla on vaihtelevasti silttiä, hiekkaa ja moreenia. Kova pohja sijaitsee noin 10–13 m syvyydessä.

Aivan täytön alapuolinen kuivakuorisavi oli ylikonsolidoitunutta ja huomattavasti lujempaa kuin syvemmällä oleva savi. Siipikairausten ja kartiokokeiden perusteella lujuudeltaan heikoin vyöhyke savessa oli noin 3–4 m syvyydessä (noin tasolla +4), missä redusoimaton siipikairalujuus oli noin 6,5...13 kPa. Tästä alaspäin suljettu leikkauslujuus kasvoi noin 0,5–1,0 kPa/m. Savi oli lievästi ylikonsolidoitunutta (OCR noin 1...3, POP noin 20 kPa), luultavasti täytön ja ikääntymisen sekä pintakerroksen poiston vaikutuksesta. Kolmiaksaalikokeiden perusteella pehmeän saven tehokas kitkulma oli noin 22° – 24°, alimmissa silttisissä savikerroksissa noin 27°. Savi oli melko sensitiivistä. Kartiokokeiden perusteella määritetty sensitiivisyys (S_{ik}/S_{kr}) kasvoi alaspäin, ollen suurimmaksi osaksi noin 40.

Täyttökerros on yleisesti saven ja hiekan sekaista, jonkin verran kiviä ja lohkareita sisältävää maa-ainesta. Radan alla täyttökerros on melko tasarakeista hiekkaa ($d_{50} \approx 0,3$ mm). Kesäkuussa 2009 tehtiin maastokäynti, jonka yhteydessä maahan asennet-

tiin huokospaineanturi suunnilleen tutkitun alueen keskelle (suunnilleen tutkimuspiste 7:n lähelle). Anturin asentamisen yhteydessä havaittiin, että täyttömaa oli melko hienorakeista. Seassa oli silti sen verran kiviä, että täyttökerrosta ei voitu läpäistä käsin rautakangella, vaan apuna piti käyttää tärykairaa. Kivinen kerros oli kuitenkin ohut, paksuudeltaan noin 1 m, minkä alapuolelle anturi voitiin asentaa helposti käsin painamalla.

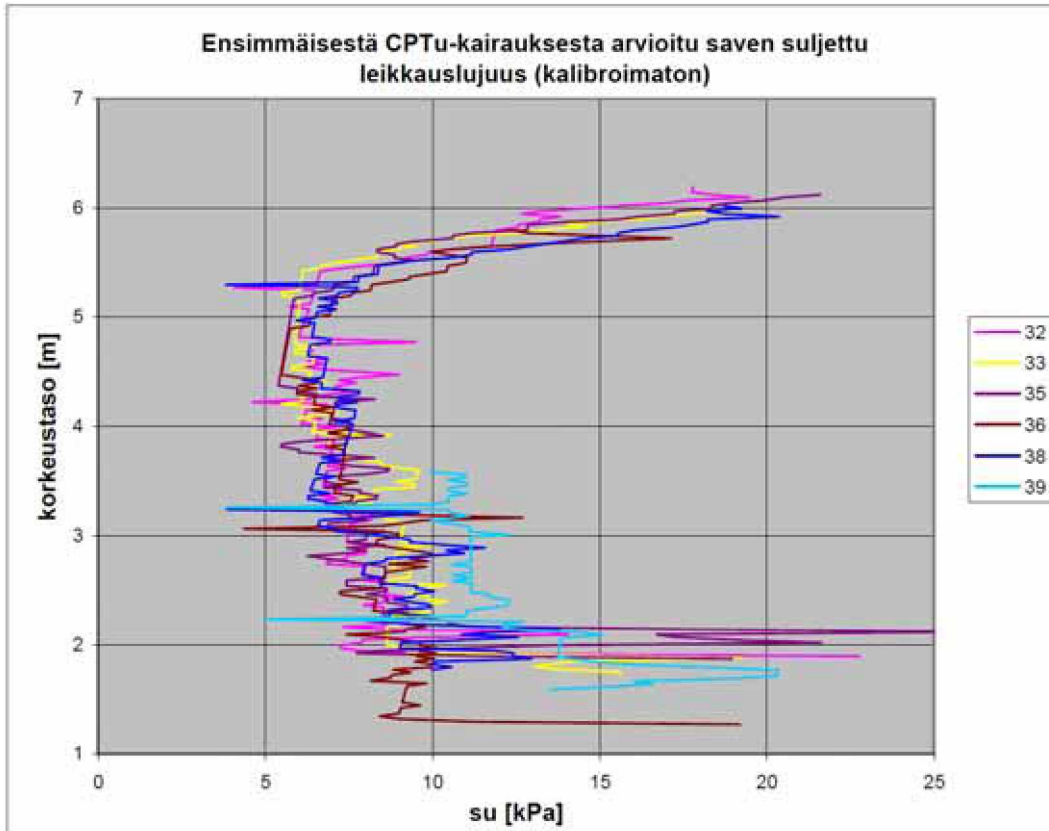
Saven suljettua leikkauslujuutta voitiin arvioida myös CPTu-kairausten nettokärvivastuksen (korjatun kärkivastuksen ja in situ-kokonaisjännityksen erotus) ja juoksurajan avulla (Törnqvist et al 2001 s.27–28):

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{13,4 + 6,65 \cdot w_L} \quad (11)$$

missä

q_t	= korjattu kärkivastus [kPa]
σ_{v0}	= in situ pystysuora kokonaisjännitys [kPa]
w_L	= saven juoksuraja (desimaalilukuna)

Kaavan 11 avulla lasketut suljetun leikkauslujuuden korkeustasoprofiilit on esitetty kuvassa 12. On huomattava, että laskelmissa jouduttiin käyttämään huokospaineiden vaikutusta vastaan korjatun kärkivastuksen q_t sijaan mitattua kärkivastusta q_c , sillä korjauksen laskemiseen tarvittavaa parametria a ei tätä kirjoitettaessa ollut saatu tietoon pyynnöistä huolimatta. Jännitykset on laskettu kairauspisteiden läheltä otettujen näytteiden tilavuuspainojen perusteella ja juoksurajan tilalla on käytetty vastaavia kartiokokeiden hienouslukuja määrittäsyvyyksien välille lineaarisesti interpoloituina. Kuvaajasta näkyy hyvin, että tällä tavoin kaavalla 11 määritetty suljettu leikkauslujuus on kautta linjan noin 5 kPa siipikairalla ja kartiokokeella määrättyjä s_u :n arvoja pienempi. Tarkempi arvio voitaisiin saada kalibroimalla CPTu-kairaustulokset siipikairaustulosten perusteella (Törnqvist et al 2001 s. 28). Tätä ei kuitenkaan katsottu enää tarpeelliseksi, sillä siipikairauksia ja kartiokokeita tehtiin niin kattavasti, että ne yksinään olivat riittäviä.



Kuva 12. Ensimmäisen CPTu-kairauskierroksen kärkivastustuloksista arvioitu saven suljettu leikkauslujuus. Kuvassa on esitetty penkereen ja ojan välissä olleet kairauspisteet pelkän savikerroksen osalta.

Koetta edeltäneiden pohjatutkimusten ja laboratoriokokeiden tuloksia on esitetty laajemmin liitteessä 1.

4 Instrumentointi ja muut koejärjestelyt

4.1 Mittaustarpeet sorrutettavassa penkereessä

Sorrutuskokeessa pyrittiin toisaalta saamaan stabiliteettilaskentaa varten kattava kuva siitä, mitä koko koealueella tapahtuu kuormituksen ja sortuman yhteydessä, ja toisaalta tutkia mittalaitteiden soveltuvuutta stabiliteetin monitorointiin.

Hunter & Fell (2003) ovat tutkineet useiden kattavasti instrumentoitujen koepenkerien deformaatioiden ja huokosvedenpaineiden kehittymistä, ja esittävät stabiliteetin monitorointiin seuraavia suureita:

- Sivusuuntaisten muodonmuutosten monitorointi penkereen juurella
- Pystysuuntaisten muodonmuutosten monitorointi penkereen juurella ja siitä noin 5 m ulospäin
- Huokospainemittaukset penkereen keskikohdan alla (kuormituksen aiheuttamat muutokset huokospaineeseen)
- Huokospainemittaukset pengerialueen alla (myötöheikkenemisen aiheuttama huokospaineen kasvu)

Vähitellen korottamalla rakennetuista penkereistä voitiin aiemmin tehdyissä tutkimuksissa huomata selviä sortumaa ennakoivia muodonmuutoksia, kun pengerkorkeus oli 70–90 % sortumiskorkeudesta, mikä vastaa noin kokonaisvarmuustasoa 1,25. Huokospaineiden ja inklinometrilukemien muutokset sekä penkereeseen syntyvät halkeamat rakentamisessa pidettyjen taukojen aikana olivat myös hyviä lähestyvän sortuman indikaattoreita. (Hunter & Fell 2003)

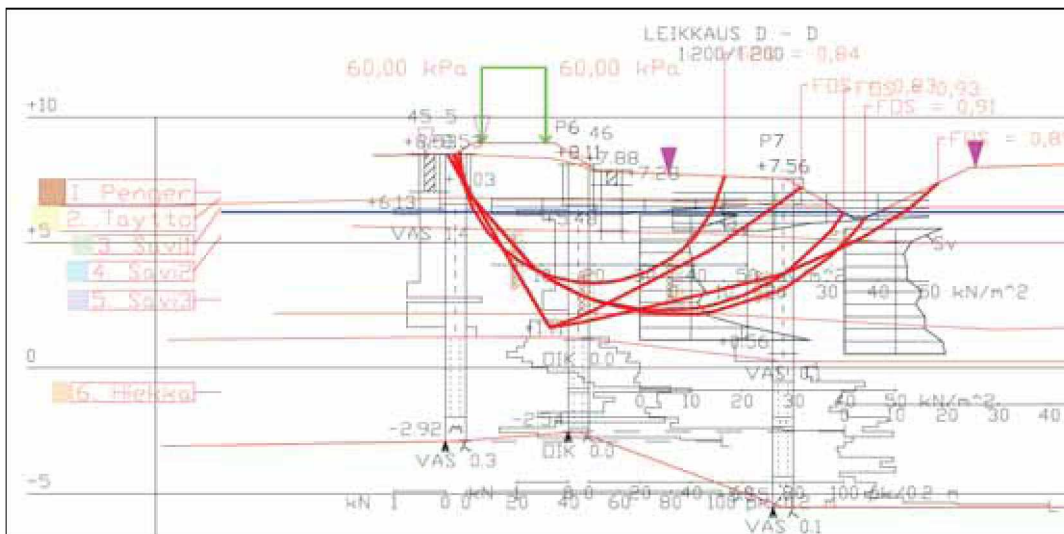
Leroueilin et al (1990, s. 304) mukaan alkava sortuma voidaan havaita parhaiten tarkkailemalla huokosvedenpaineiden kehittymistä penkereen alla riittävän etäisyyden päässä huokospaineen purkautumisrajoista (käytännössä savikerroksen keskellä). Sortuma lähestyy, kun huokosvedenpaine alkaa kasvaa nopeammin kuin kuormituslisäys, eli $du > d\sigma$.

Monitorointinäkökulman lisäksi sorrutuskokeessa haluttiin myös saada stabiliteettilaskennan kehittämistä palvelevaa mittaustietoa koko koealueelta. Pääasialliset mitaussuureet olivat tässäkin siirtymät ja huokosvedenpaine. Erityinen kiinnostuksen kohde oli huokospaineiden kehittyminen ja sen yhteys siirtymiin. Lisäksi haluttiin tarkastella kuorman jakautumista penkereen pituussuunnassa. Näiden lisäksi tarvittiin tietoa mittauksiin mahdollisesti vaikuttavista ympäristöolosuhteista, kuten lämpötilasta ja ilmanpaineesta.

Sortuman tarkastelussa mittausten tuli olla tarkkoja, reaaliaikaisia sekä aika- ja paikkaresoluutioltaan riittäviä. Jotta mittausten yhteys toisiinsa olisi selkeä ja analysoitavissa, ne piti sijoittaa toisiinsa. Helpoin tapa tähän oli kerätä kaikista mittauksista myös aikatieto (mittauksen ajanhetki), joka oli synkronoitu eri mittausvälineiden kesken. Tällöin voitiin helposti havaita eri havaintojen ajallinen vastaavuus.

4.2 Kuormitusjärjestelyt

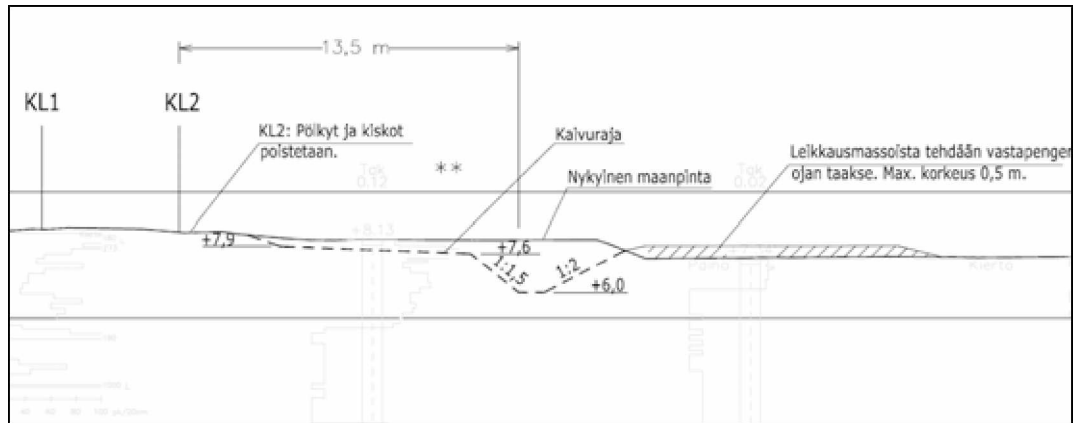
Kuormituksen ja instrumentoinnin suunnittelua varten tehtiin etukäteislaskelmia sekä GeoCalc- (lamellimenetelmä) että Plaxis-ohjelmilla (elementtimenetelmä). GeoCalcilla etukäteislaskelmat tehtiin pääasiassa $\alpha=0$ -menetelmällä käyttäen redusoimattomia siipikairauslujuuksia. Huokospaineiden arviointi oli tässä vaiheessa liian epävarmaa luotettavia $c'-\phi'$ -laskelmia varten. Kuvassa 13 on esitetty eräitä viimeisiä etukäteisarvioita leikkauksesta D-D, johon on kaivettu oja liukupinnan passiivipuolelle.



Kuva 13. Esimerkki eri menetelmillä (Janbu, Bishop, Morgenstern–Price) suljetulla leikkauslujuudella ennen koetta lasketuista liukupinnoista.

Yleisesti ottaen laskelmien perusteella liukupinnan oletettiin olevan muodoltaan kuvassa näkyvien ympyränmuotoisen ja kiilamaisen välimuoto niin, että liukupinta kulki ratapölkkyjen takaa melko jyrkästi alas pehmeän savikerroksen ja silttisen savikerroksen rajalle, mistä se nousi loivasti kaareutuen passiivipäähän kaivettavan ojan pohjalle. Arviot sortumaan tarvittavasta kuormituksesta kasvoivat pohjatutkimuksien tarkentuessa noin 40 kPa:sta aina 80 kPa:iin asti.

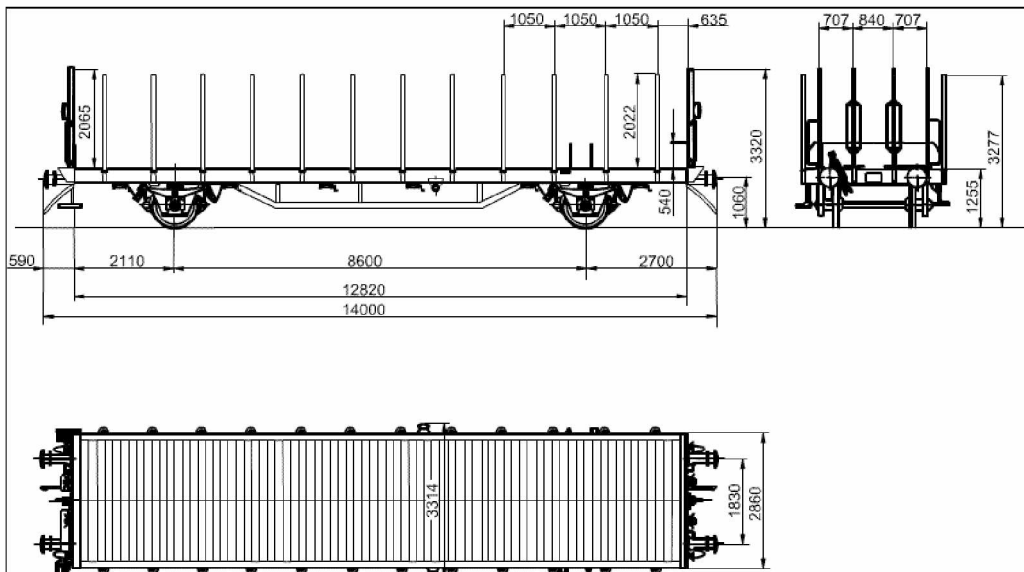
Etukäteislaskelmilla haarukoituun todennäköisen vaarallisimman liukupinnan päähän (passiivipuolelle) päätettiin kaivaa noin 2 m syvä oja, joka puhkaisi täytön (kuva 14). Kokemus on osoittanut, että liukupinnan alapää sijoittuu usein ojiin, penkereen alaosan taitteisiin ja muihin koveriin taitteisiin. Tekemällä oja voitiin varmistua siitä, että liukupinta todella muodostuu ennakoidun kaltaiseksi, mikä oli lähes välttämätöntä instrumentoinnin järkevälle kohdentamiselle. Lisäksi liukupinnan kontrolloinnilla voitiin välttää sortuman hallitsematon eteneminen liian pitkälle. Ojalla voitiin myös huomattavasti pienentää penkereen kokonaisvarmuutta sortumaa vastaan, jolloin sortumiseen tarvittava kuormitus väheni. Raiteen ja ojan välistä poistettiin pintamaata 0,3–0,6 m kerros. Poistettu pintamaa levitettiin 0,5 m korkeaksi vastapenkereeksi ojan taakse (ojan ja rantaradan väliin). Vastapenger rajoitti liukupinnan sijaintia edelleen ja vähensi liian pitkälle etenevän sortuman mahdollisuutta.



Kuva 14. Leikkaus pinnantasasuunnitelmasta (laatinut TTY:n tutkija Juho Mansikkamäki)

Pintamaan poisto 0,2...0,5 m paksuudelta aiheutti pehmeässä savikerroksessa POP:n nousun noin arvoon 10...30 kPa (OCR noin 1,1...3,0 syvyydestä ja poistetun maakerroksen paksuudesta riippuen). Ojan kohdalla savi muuttui selvästi ylikonsolidoituneeksi.

Kokeessa tarvittava kuormitus saatiin aikaan sekä korottamalla nykyistä (hyvin matalaa) ratapengertä 55 cm:llä (RHK:n ohjeistama tukikerroksen paksuus) että ulkoisella kuormalla. Penkereen korottamisella voitiin varmistaa riittävä kantavuus kuorman alla ja voitiin vähentää tarvittavaa ulkoista kuormaa. Alun perin ulkoiseksi kuormaksi kaavailtiin kaksiakselisia Hkb-vaunuja, (kuva 15), joita kuormitettaisiin lastaamalla ne täyteen. Sortumiseen mahdollisesti vaadittava kuorma todettiin kuitenkin hyvin suureksi (jo ensimmäisissä alustavissa laskelmissa yli 100 t/vaunu), kun taas Hkb-vaunujen nimelliskuorma on noin 27 tonnia. Tällaista kuormitusta vaunut olisivat tuskin kestäneet ainakaan ilman huomattavia vahvistamistoimenpiteitä, mikä puolestaan olisi ollut kallista ja aikaa vievää. Tämän vuoksi päädyttiin siihen, että vaunuista aiheutuvaa kuormitusta simuloitiin kiskojen päälle rakennettavalla palkkirakenteella, jolla voitiin myös mallintaa haluttua teligeometriaa kaksiakselisten Hkb-vaunujen sijaan. Palkkikehikot rakennettiin vastaamaan neljää 12 metriä pitkää telivaunua, joiden päät sijoitettiin pituussuunnassa 0,5 m päähän toisistaan.



Kuva 15. Kokeessa alun perin käytettäviksi kaavaillut Hkb-vaunut. (VR Cargo)

Kuormitusjärjestelyjä suunniteltaessa tutkittiin myös mahdollisuutta, että penkereen korottamisen sijaan sortuman puolelta leikattaisiin noin 1–1,5 m maata. Tästä ajatuksesta kuitenkin luovuttiin, sillä kuormituksen vähentäminen savikerroksen päältä jättäisi saven huomattavan ylikonsolidoituneeksi ja muutenkin muuttaisi saven jännitystilaa niin, että sortuman instrumentointi ja mallintaminen vaikeutuisi. Esimerkiksi huokosvedenpaineen muutokset ovat ylikonsolidoituneessa savessa huomattavasti vähäisempiä kuin normaalikonsolidoituneessa (Tavenas & Leroueil 1980).

Kuormaksi valittiin 20-jalkaiset merikontit (taulukko 1), joita täytettiin vähitellen maamateriaalilla. Tavallisen, lyhyehkön avovaunun (suomalaisesta kalustosta esimerkiksi Hkb, Kbp, Rmm, Rmmn, Oa) päälle mahtuisi kaksi kyseistä konttia peräkkäin. Jos maamateriaalin irtotiheydeksi arvioidaan $1,5 \text{ t/m}^3$ ja käytännön kuormaustilavuudeksi 30 m^3 , yhteen konttiin voitiin teoriassa mahdollistaa noin 45 t maamassat. Konttien ilmoitettu kantavuus oli vain 20 t, joten kontteja tuli vahvistaa.

Taulukko 1. Sorrutuskokeessa käytettyjen konttien ominaisuuksia. (Scandic Container 2009 mukaan)

Merikontti 20' DC	
Ulkomitat (p x l x k):	6050 mm x 2440 mm x 2590 mm
Tilavuus	$32,5 \text{ m}^3$
Kantavuus	20000 kg
Massa tyhjänä	2250 kg

Kuormitusta suunniteltaessa tehtiin alustavia stabiliteettilaskelmia GeoCalc- ja Plaxis-ohjelmilla. Näiden laskelmien perusteella arvioitiin tarvittavaksi kuormaksi 60–80 kPa, mikä vastaisi noin 1900 kN eli 190 t kuormaa yhtä 12 m palkistoa kohti. Tällöin yhtä 12 m pitkää palkistoa kohti tuli olla neljä merikonttia (kaksi peräkkäin, kahdessa kerroksessa). Palkistojen toteutuspiirustukset on esitetty liitteessä 2.

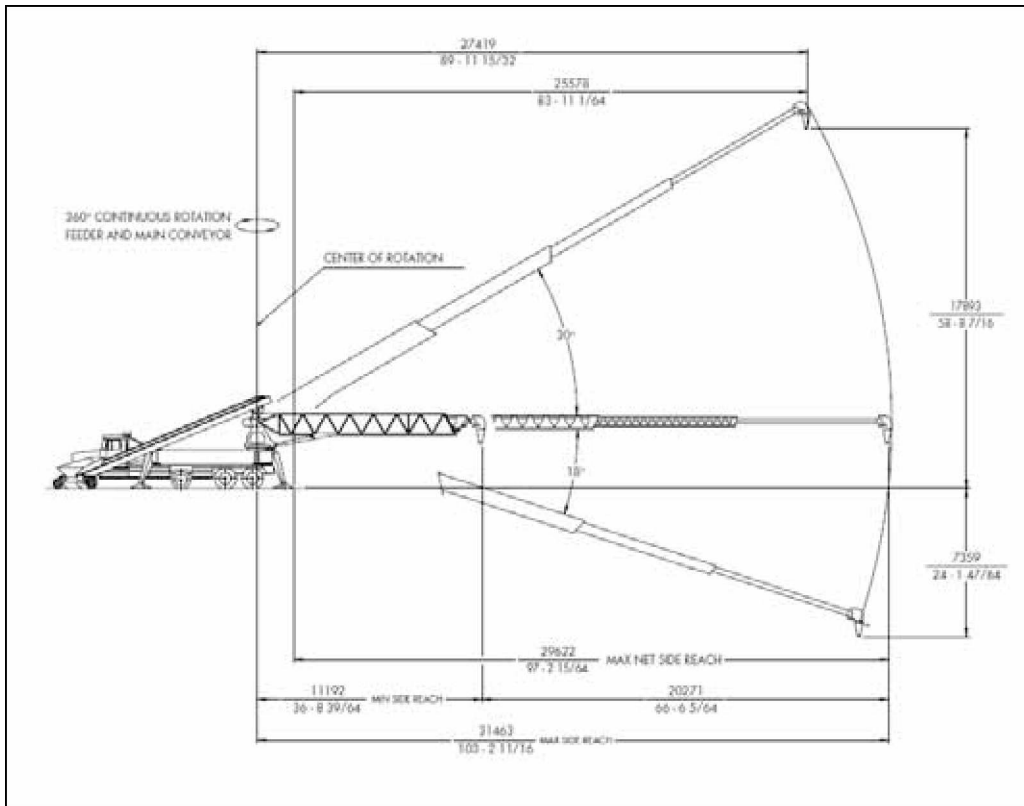
Konttien kuormaukseen käytettävässä kalustossa ja kuormaustavassa oli muutamia vaihtoehtoja, joiden toteuttamiskelpoisuutta vertailtiin huolellisesti. Lähtökohdana oli se, että kontteja ei voinut kuormata aivan vierestä, sillä sortuma olisi voinut olla äkillinen, jolloin konttien alle jäämisen vaara olisi ollut suuri. Tällöin kuormauksen vaihtoehtoiksi jäivät käytännössä mahdollisimman pitkäpuominen kaivinkone, ajoneuvonosturi jonkinlaisella kouralla tai jassikalla tai pitkä hihnakuuljetin. Lisäksi piti ratkaista, siirretäänkö ylemmät kontit paikalleen alempien konttien täytyttyä vai asennetaan molemmat kontit yhdessä paikalleen niin, että ylemmästä kontista poistetaan katto ja pohja sekä alemmasta poistetaan katto. Edellisessä tapauksessa välttyttäisiin konttien suurilta muutostöiltä, jälkimmäisessä taas konttien siirtelyltä silloin, kun vaunukuorma on suuri ja konttien lähellä ei turvallisuussyistä voisi liikkua.

Käytännöllisyys- ja turvallisuussyistä päädyttiin siihen, että kontit asennetaan päällekkäin jo ennen kuormitusta ja niitä muunnetaan poistamalla ylimmistä konteista pohja ja katto sekä alimmista konteista katto. Tällöin välttyttiin ylempien konttien siirtelyltä silloin, kun alemmissa konteissa olisi täysi kuorma (tällöin ongelma olisi ollut esimerkiksi nostolenkkien irrotus, sillä kuormattujen konttien lähelle ei voisi mennä niitä irrottamaan). Kontteja vahvistettiin asentamalla niiden ympärille u-profiilin palkit, jotka sidottiin toisiinsa konttien läpi asennetuilla vetotangoilla. Ylemmän kontin muuten avoimeen pohjaan jätettiin lisäksi siihen rakenteellisesti kuuluvat poikittaiset palkit.

Laskettiin, että näin vahvistettuna kontit kestäisivät hyvin niihin kohdistuvan vaakasuuntaisen maanpaineen. Koska kuormattujen konttien lähelle ei voisi turvallisesti mennä ennen niiden kaatumista, ylempien konttien kulmiin asennettiin vahvat ketjut, joilla ne voisi vetää kumoon siinä tapauksessa, että sortumaa ei tapahtuisikaan tai kontit jäisivätkin pystyyn sortumassa. Vaikka kontit vaativatkin paljon muutostöitä, nämä voitiin helposti teettää aivan koealueen vieressä olleessa metallipajassa, joka valmisti myös palkistot. Suunnitelmapiiirustus palkistosta ja konteista on esitetty liitteessä 2.

Kuormituskaluston valinnassa päädyttiin Telebelt 105 -hihnakuuljettimeen (kuva 16). Telebelt 105 on kuorma-autoalustalle asennettu teleskooppihihnakuuljetin, jolla voi kuljettaa maamateriaalia noin 30 m päähän vaakasuunnassa. Kuljetinta kuormataan sen alkupäässä kaukaloon, josta maamateriaali siirtyy hihnaa pitkin eteenpäin. Tässä tapauksessa, kun kuormauskorkeus oli noin 7 m viereisen maanpinnan yläpuolella, kyseinen kuuljetin yletyi juuri ja juuri kuormaamaan joka konttia yhdeltä turvallisen etäisyyden päässä olevalta pisteeltä. Hihnan päässä oli ohjainkouru, jolla maa-aines saatiin putoamaan suoraan alaspäin. Tällöin välttyttiin maa-aineksen vaakasuuntaiselta ”heittämiseltä”, joka olisi aiheuttanut kuorman pakkautumisen konttien toiselle reunalle. Tasaisen kuormauksen varmistamiseksi hihnan päähän asennettiin myös alaspäin katsova videokamera, jolla konttien täyttymistä voitiin seurata. Kuljetinta lastattiin kauhakuormaajalla, jossa oli punnitseva kauha. Kuormituksessa tuli olla hyvin selvillä kontteihin kuormattavan murskeen massasta. Jotta kuormituksen suuruuteen liittyvät epävarmuustekijät saataisiin poistettua mahdollisimman tarkasti, kauhakuormaajalla punnitsemisen lisäksi teliakseleita mallintaviin poikittaispalkkeihin

päätettiin asentaa venymäliuskat, joilla pystyttiin seuraamaan konttien kuormitusta akselikohtaisesti.



Kuva 16. Telebelt 105-hihnakuuljetin. (Putzmeister 2001)

Tärkeä seikka kuormitusjärjestelyjä suunniteltaessa oli kuormitusnopeus ja viruma. Saven leikkauslujuus riippuu hyvin voimakkaasti kuormitusnopeudesta niin, että nopeasti kuormitettuna suljettu leikkauslujuus on huomattavasti suurempi kuin hitaammassa kuormituksessa. Lisäksi vaihteittain rakennettuja, murtoon kuormitettuja koepenkereitä tutkittaessa on todettu (Hunter & Fell 2003) huomattavaa viruman kaltaista siirtymien kasvua sekä huokospaineiden kasvua myös rakennusvaiheiden välillä ja rakennusvaiheiden päätyttyä niin, että lopullinen sortuma tapahtuu usein vasta päiviä rakentamisen päätyttyä. Tämän ajatellaan johtuvan kriittisesti kuormitetuissa pohjamaan osissa tapahtuvasta myötoheikkenemisestä (strain weakening) Lisäksi liian nopea kuormitustahti heikentää useista mittalaitteista saatavien sortumaa indikoivien tulosten selkeyttä.

Niissä vaihteittain rakennetuissa koepenkereissä, joissa sortumaa indikoineet huokosvedenpaineen muutokset siirtymät ovat olleet kaikkein selkeimpiä, penkereen korotamisnopeus on ollut hyvin hidas, jopa vain 0,15–0,2 m/d. Tämä vastaisi vain noin 3–4 kPa/d kuormitusnopeutta. Kuormitusta suunniteltaessa tultiin siihen tulokseen, että näin hidas kuormitusnopeus ei tulisi kyseeseen jo käytännön aikataulu- ja työpanos- seikkojen takia. Lisäksi tuli huomioida kuormitustilanteen vastaavuus ratapenkereiden stabiliteetin mitoituksessa käytettävän kuormitustilanteen kanssa: Ratahallintokeskuksen ohjeen B15 Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet (RHK 2005 s. 13) mukaan mitoitettava tilanne stabiliteetilaskennassa on raiteelle pysähtynyt juna. Tällöin voidaan olettaa, että pohjamaahan kohdistuva kuormitus kasvaa hyvin

äkillisesti junan saapuessa kohdalle. Tässä ongelmana on kuitenkin edelleen sortumaan tarvittavan kuormituksen keston ja suuruuden valinta: Hyvin raskas juna saattaa aiheuttaa nopeasti kehittyvän sortuman lähes välittömästi pysähtyttyään. Toisaalta huomattavasti kevyempi juna voi myös aiheuttaa penkereen sortuman oltuaan paikallaan riittävän kauan aikaa, johtuen juuri edellä kuvatusista myötöheikkenemisestä ja huokospaineen vähittäisestä kasvusta. Vastaavasti koepenger saataisiin varmasti sortumaan suurella ja nopealla kuormituksella. Toisaalta pienempikin koekuormitus riittäisi, jos kuormitusportaiden välillä pidettäisiin riittävät tauot ja annettaisiin huokospaineiden ja siirtymien kehittyä. Tehdyssä kirjallisuustutkimuksessa ei tavattu yhtäkään tapausta, jossa koepenger olisi kuormitettu murtoon niin nopeasti kuin Perniössä aiottiin tehdä.

Vaunuja mallintavaa palkistoa päätettiin kuormittaa niin, että kahta reunimmaista vaunua kuormitettaisiin hieman vähemmän kuin keskimmäisiä vaunuja. Tällä pyrittiin varmistamaan sortuman alkaminen alueen keskiosasta, mikä helpottaisi instrumentoinnin kohdentamista.

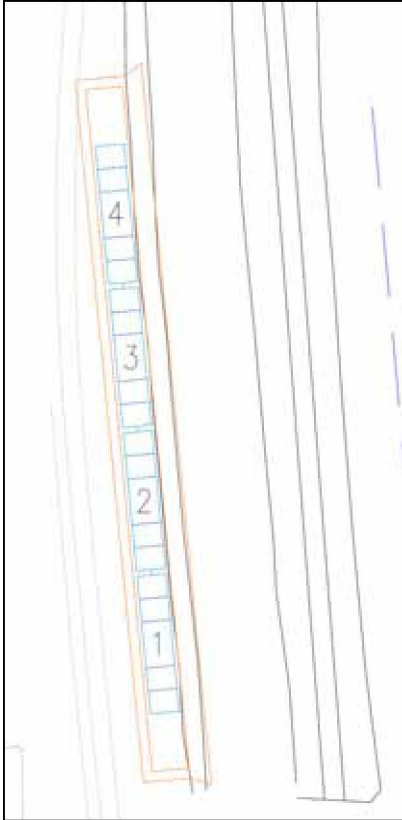
Yhden palkiston pituus oli 12 m ja niiden välinen etäisyys pituussuunnassa 0,5 m. Kun ratapölkkyt jakavat kuorman noin 2,5 m leveälle alalle, voidaan laskea maahan kohdistuvaksi ulkoiseksi pintakuormaksi palkiston alla:

$$q_i = \frac{G_i + G_{kontit} + G_{palkit}}{12,5m \cdot 2,5m} \quad (12)$$

missä

q_i	= pintakuorma palkiston i alla [kPa]
G_i	= palkiston i päällä oleviin kontteihin kuormatun maan paino [kN]
G_{kontit}	= palkiston päällä olevien konttien omapainot yhteensä n. 90 kN
G_{palkit}	= palkiston omapaino n. 35 kN

Kun palkistot ("vaunut") numeroidaan 1...4 niin, että numero 1 on siiloa lähinnä ja numero 4 siilosta kauimpana (kuva 17), vaunujen kuormaus sykli oli 3-2-1-4. Tällöin keskimmäiset vaunut kuormattaisiin aina kuormaus syklin ensimmäisinä. Kuormauksen aluksi kahteen keskimmäiseen vaunuun päätettiin kuormata noin 3,5 kPa pintakuormaa vastaava määrä maa-ainesta, ja tämä erotus keskimmäisten ja reunimmaisten vaunujen välillä pyrittiin säilyttämään koko kokeen ajan. Seuraavissa sykleissä tavoitekuorma kaikille vaunuille oli 7,5 t/konttipari eli 15 t/vaunu, mikä vastaa 4,8 kPa pintakuormaa ja 60 t kuorman lisäystä koko "junalle". Hihnakuuljettimen todellista kapasiteettia ja siten kuormitus syklien todellista kestoa ei voinut tietää ennen itse koetta, mutta etukäteen arvioitiin yhden 60 t syklin vievän aikaa noin puolesta tunnista yhteen tuntiin. Kuormituksessa pidettävät tauot päätettiin kokeen aikana sen mukaan, miten kuormaus oli edistynyt ja mikä oli työn suorituksen kannalta järkevää.



Kuva 17. Tässä työssä käytetty vaunujen numerointitapa.

Koska kuormauksessa arvioitiin kuluva vähintään puoli vuorokautta eikä vuorokauden valoisa aika ollut enää kovin pitkä lokakuun loppupuolella, päätettiin kuormaus aloittaa sorsutuspäivää edeltävänä päivänä. Sorsutuspäivän aamuna jatkettaisiin tilanteesta, jossa keskimmäisten vaunujen kohdalla kuorma olisi 24 kPa (mukaan lukien konttien ja palkistojen aiheuttama 4 kPa kuorma) ja reunimmaisilla vaunuilla vastaavasti 20 kPa, jolloin maa penkereen alla olisi osapuilleen saavuttanut esikonsolidaatiojännityksen. Kuorman arvioitiin olevan niin pieni, että yön aikana ei suuria muutoksia huokospaineissa ja siirtymissä pääsisi tapahtumaan.

4.3 Käytetyt mittausmenetelmät ja -laitteet

Projektin tärkeästä luonteesta johtuen kohdetta instrumentoitiin mahdollisimman kattavasti. Lisäksi erityisesti siirtymiä haluttiin mitata useammalla toisiaan täydentävällä menetelmällä, jotta saatu data olisi mahdollisimman kattavaa ja myös eri mittausmenetelmien luotettavuuden vertailu olisi mahdollista. Mittalaitteiden valinnassa suosittiin laitteita, joista henkilökunnalla oli käyttökokemuksia ja joiden saatavuus oli riittävän hyvä. Esimerkiksi seismiset menetelmät karsiutuivat täten pois.

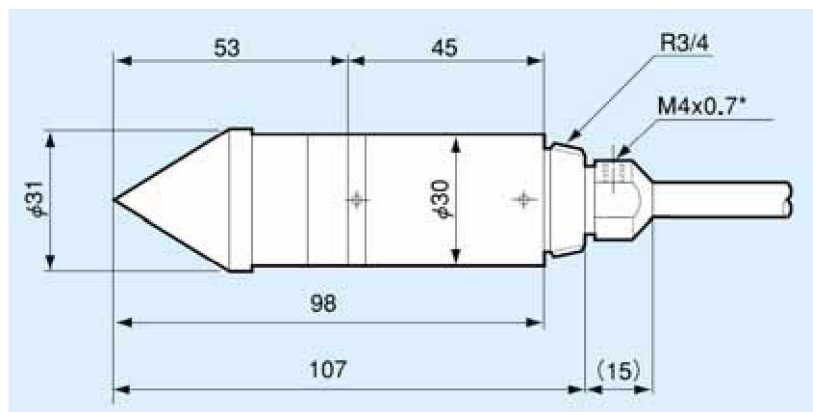
Siirtymien mittaamiseen käytettiin sekä automaattisia inklinometrejä (maassa tapahtuvat siirtymät) että takymetrimittausta (maan pinnalla tapahtuvat siirtymät). Takymetrimittaus päätettiin suorittaa mahdollisimman automatisoituna ja normaalia edistyneempää tiedonkeruutekniikkaa käyttäen, jotta siitä saatava data olisi mahdollisimman tasalaatuista ja helposti analysoitavissa. Näiden lisäksi painumien mittauksessa käytettiin nesteen hydrostaattiseen paineeseen perustuvaa painumaletkua, jonka tekniikkaa on kehitetty TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä.

Huokosvedenpainetta mitattiin huokospaineantureilla. Junakuorman jakautumista penkereen pituussuunnassa mitattiin pituussuunnassa penkereen alle asennetuilla TTY:llä kehitetyillä maanpaineantureilla. Konttien aiheuttamaa kuormaa mitattiin palkistoon asennetuilla venymäliuskoilla. Liukupinnan sijaintia mitattiin inklinometreillä ja maahan asennetuilla muoviputkilla, joihin muodostuvat taitokset luodittiin tarkoitukseen valmistetulla vaijerityökälulla. Kontteihin asennettiin myös kiihtyvyyssanturit, joilla mitattiin konttien kallistuskulmaa kokeen aikana.

Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi käytettyjen mittalaitteiden toimintaperiaatteita ja ominaisuuksia. Mittalaitteiden sijoittelu koealueella on esitetty erikseen kohdassa 4.4.

4.3.1 Huokospaineanturit

Huokospaineantureina käytettiin kahden japanilaisen valmistajan huokospaineantureita (32 kpl Tokyo Sokki Kenkyujo KPD-200KPA sekä 5 kpl Kyowa BPB-A 200KP), jotka molemmat mittaavat painetta aina 200 kPa asti. Molemmat anturimallit ovat läpimitaltaan 30 mm lieriötä, joissa on maahan asentamista varten huokoskivellinen kartiokärki (kuva 18).



Kuva 18. Kartiokärjellisen Kyowa BPB-A -huokospaineanturin mitat (Kyowa 2009). Tokyo Sokkin anturit ovat käytännössä samanlaisia.

Anturissa on kalvo, joka venyy siihen kohdistuvan paineen vaikutuksesta. Venymä puolestaan aiheuttaa mitattavissa olevan jännitteen, joka on anturin syöttöjännitteeseen verrannollinen. Paine lasketaan mitattavan jännitteen ja syöttöjännitteen suhteen lineaarisena funktiona:

$$p = \frac{V_{mit}}{V_s} \cdot k - c \quad (13)$$

missä

p	= paine [kPa]
V_{mit}	= anturilla mitattu jännite [V]
V_s	= syöttöjännite [V]
k	= kalibrointikerroin [kPa/(V/V)]
c	= korjausvakio [kPa] (vakion merkki vaihtelee)

Kaavan 13 periaate pätee käytännössä kaikkiin (lineaarisiin) analogiantureihin. Ko-
keessa käytetyt anturityypit mittaavat absoluuttista painetta, joten ne eivät ota erik-
seen huomioon vallitsevaa ilmanpainetta. Mittaushetkellä vallinnut ilmanpaine tulee
siis ottaa erikseen huomioon mittaustuloksen käsittelyssä. Anturien nollakohta on
tosin lähellä normaali-ilmanpainetta, joten ilmassa mitattuna antureilla mitatut lu-
kemat ovat lähellä nollaa.

Anturien mukana toimitetaan anturikohtaiset kalibrointitodistukset, joissa on ilmoi-
tettu kalibrointikerroin mitatun jännitteen ja paineen vastaavuudelle. Anturien kalib-
rointitodistuksissa on lisäksi mainittu kalvon venymän nollakohta, joka saadaan an-
netulla kalibrointikertoimella muunnettua vastaavaksi paineeksi. Nollakohta on mää-
ritetty normaali-ilmanpainetta 101,3 kPa vastaavaksi (Novotek 2009), eli jos kalvon
venymän nollakohta vastaisi esimerkiksi painetta -5 kPa, normaali-ilmanpaineeseen
asetettuna anturilla mitattu lukema olisi -5 kPa. Anturilla mitattu paine voidaan nor-
malisoida nollakohtavirheen ja vallitsevan ilmanpaineen mukaan seuraavasti:

$$P_{korj} = P_{mit} - P_0 + P_{atm} - P_{0atm} \quad (14)$$

missä

P_{korj}	= korjattu paine
P_{mit}	= anturilla mitattu paine
P_{atm}	= mittaushetkellä vallitseva ilmanpaine
P_{0atm}	= normaali-ilmanpaine 101,3 kPa
P_0	= anturin venymän nollakohtaa vastaava paine.

Huokospaineanturi liitetään kaapelilla dataloggeriin, joka myös mittaa anturin syöttö-
jännitteen ja tekee tarvittavan A/D-muunnoksen tietokonetta varten, johon tiedot tal-
lennetaan. Dataloggerin tyypistä riippuen se voi tallentaa tiedot myös omalle kiinto-
levylleen.

Loggeria ohjataan tietokoneella, jossa käytetään ohjelmaa, joka ohjaa loggerin mitta-
usta ja tallettaa mitatut arvot tiedostoon (jotkut loggerit voidaan myös ohjelmoida
suoraan niin, että ne eivät tarvitse ohjaavaa tietokonetta). Anturin kalibrointi voidaan
sisällyttää mittausohjelmaan, jolloin mittaustiedostoon voidaan tallentaa suoraan
paineen arvoja. Vaihtoehtoisesti voidaan tallentaa vain loggerin mittaamat jännitteen
arvot, jotka muutetaan vastaaviksi paineiksi jälkikäteen esimerkiksi taulukkolasken-
taohjelmassa. Jälkimmäistä tapaa voidaan pitää vähemmän herkkänä virheille, sillä
mahdollisesti alun perin virheellisesti kalibroidun mittaustiedon korjaaminen jälkikä-
teen on työlästä. Toisaalta kertomien käyttö suoraan mittausohjelmassa helpottaa
huomattavasti reaaliaikaista seuranta.

Anturissa on kalvon päällä huokoskivi, jonka läpi paine välittyy kalvolle. Anturit on
ilmattava ennen käyttöä, jotta huokoskivi olisi mittauksen aikana täysin vedellä kyl-
lästetty ja anturin antama mittaustulos olisi täten luotettava. Tähän kehitettiin järjes-
tely, jossa anturi asetetaan vedellä täytettyyn messinkiseen putkeen, jonka toinen pää
on suljettu o-renkaalla tiivistetyllä pleksillä. Anturin runko tiivistetään putkeen sa-
moin o-renkailla. Pleksissä on painemittarilla varustettu läpivienti, jonka kautta put-
keen imetään tyhjiö (kuva 39, s.70). Ilmausvälineet kehitettiin ja rakennettiin tämän
projektin yhteydessä TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä.

Alun perin oli tarkoitus, että kaikki anturit olisi asennettu maahan liittämällä ne kier-teillä anturin kanssa samaläpimittaisen teräsputken päähän, joka painetaan maahan. Putken kierteet tiivistetään esimerkiksi tappuralla, jotta huokospaine ei karkaisi put-ken kautta. Anturin tiedonsiirtopiuhat kulkevat maan pinnalle putken sisällä. Projek-tin ohjausryhmässä käydyissä keskusteluissa ilmaistiin kuitenkin huoli siitä, että jäykkään varteen asennettuna liukupinnan alle jäävä anturi leikkautuu saveen, mikä aiheuttaisi ”ylimääräistä” huokospaineen nousua. Tämän välttämiseksi suuri osa an-tureista päätettiin asentaa ”kelluvana” ilman jäykkää vartta niin, että ne vain paine-taan maahan jäykällä putkella, joka asennuksen jälkeen vedetään pois. Anturiin kiin-nitettyyn kierreholkkiin kiinnitetään vaijeri, jonka avulla anturi voitaisiin vetää maasta pois (kuva 19).



Kuva 19. Ilman vartta asennettava Tokyo Sokki -huokospaineanturi. Anturin pe-rään on liitetty kierreholkki, joka liikuu asennusputken päähän. Asen-nusputki on holkissa sen verran väljästi, että putkea nostettaessa anturi jää siihen syvyyteen mihin se on painettu. Lenkkiin kiinnitetyllä vaijerilla anturi voidaan vetää maasta pois kokeen jälkeen. Kuva Kauko Sahi.

Anturien ja niiden asennuksen toimivuuden testausta varten hankittiin etukäteen kaksi Tokyo Sokkin anturia (jatkossa anturit 1 ja 2). Asennusta testattiin 17.6.2009 Tampereen Kaukajärvellä sijaitsevalla pehmeiköllä käyttäen anturia 1. Ennen koetta anturi oli ilmattu TTY:n geotekniikan laboratoriossa vesihanaan asennetulla venturi-putkella, jolla ainakin ilmauslaitteeseen asennetun alipainemittarin mukaan saatiin lähes täydellinen tyhjiö.

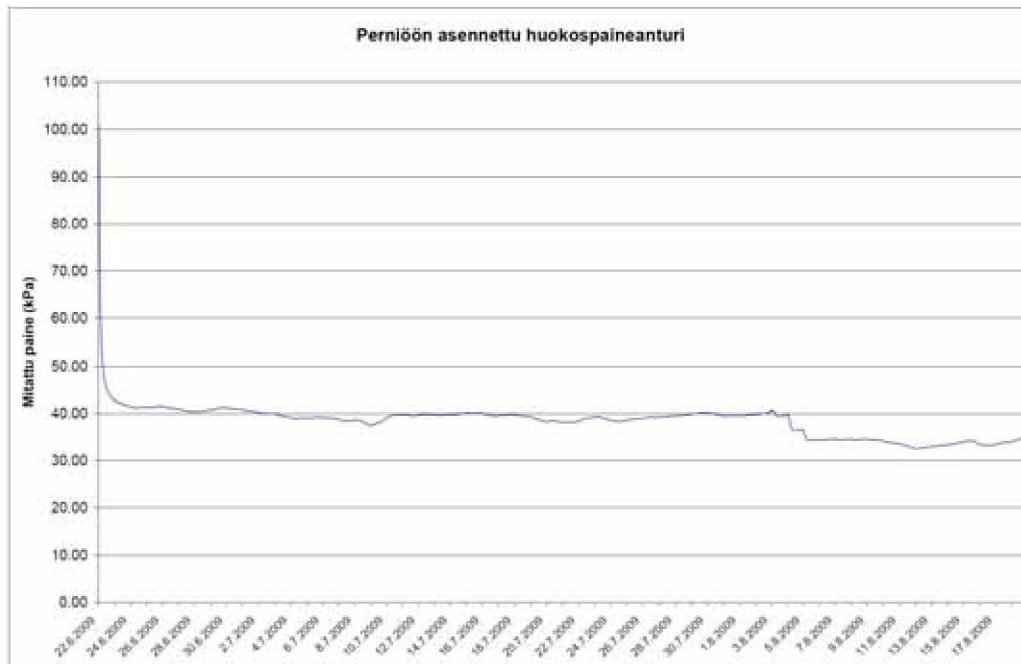
Ilmattu anturi kuljetettiin mittauspaikalle vesiastiassa. Anturi painettiin aluksi 1,3 metrin syvyyteen. Anturin ympäristöä kuormitettiin maahan painamisen jälkeen pun-nuksilla (yhteismassa noin 300 kg, vaikutuspinta-ala 0,28 m²), joiden aiheuttamaa huokosvedenpaineen lisäystä seurattiin. Kokeessa huomattiin, että anturin painami-nen maahan aiheuttaa huomattavan huokosveden ylipaineen, mikä olikin odotettavis-sa. Aivan maahan painamisen aikana mitattu huokosvedenpaine kuitenkin romahti lähes 20 kPa, ennen kuin nousi ”luontevaan” ylipaineeseen. Lisäksi havaittiin, että

kun maan pinnalla aikaansaatii kuormitusta sekä punnuksilla että niiden päällä seisomalla (kolme ihmistä, yhteensä noin 240 kg), anturin mittaama paine nousi huomattavasti vasta kuormituksen poistamisen jälkeen. Lisäksi anturin mittaama paine nousi hieman jopa silloin, kun punnukset poistettiin maan pinnalta.

Kokeen lopuksi kuormitus poistettiin kokonaan, minkä jälkeen anturia nostettiin 15 mm, laskettiin 40 mm ja lopuksi painettiin 1,7 m syvyyteen. Sekä ylös nostamisen että alas painamisen aikana mitattu paine romahti, mutta nousi välittömästi ”luontevaan” arvoon. Anturin painamisesta johtuvan ylipaineen tasaantuminen kestää aikansa, joten anturi päätettiin jättää paikalleen noin viikoksi ja tulla sen jälkeen mittaamaan uudelleen normaalitasoon tasaantunut huokosvedenpaine.

Anturilla 1 Kaukajärvellä mitatut arvot olivat pääpiirteissään sellaisia kuin saattoi odottaa. Maahan painaminen aiheutti ylipaineen, joka kuitenkin alkoi lähes heti tasaantua. Lisäksi anturi reagoi selvästi kuorman muutoksiin maan pinnalla. Kysymyksiä herätti kuitenkin se, että painamisen aikana mitatut paineet laskivat terävästi, sekä se, että anturin kuormituksen yhteydessä mitaamat paineet nousivat selvästi vasta, kun kuormitus otettiin pois. Paineen alenemaa yritettiin selittää mm. venturi-ilmiöllä (virtausnopeus kasvaa, jolloin paine pienenee). Epäiltiin myös, olisiko ilmauksen onnistumisella vaikutusta anturin käyttäytymiseen kuormitusta muutettaessa, mitä päätettiin tutkia erikseen laboratorio-olosuhteissa.

Anturi 2 asennettiin maahan Perniön koekohteessa 22.6.2009. Anturi asennettiin 5 m syvyyteen ja jätettiin paikalleen. Paikalle jätettiin myös dataloggeri ja tietokone, joka tallensi mittausarvon 15 min välein. Tietokoneeseen saatiin etäkäyttöyhteys TTY:ltä maastotietokoneessa olevalla langattomalla laajakaistayhteydellä, jolloin mittaustulokset voitiin lukea TTY:ltä käsin. Perniön kohteeseen asennetun kaukoluettavan huokospaineanturin mitaamat lukemat tasaantuivat muutamassa päivässä (kuva 20). Tämän jälkeen anturi reagoi hyvin selkeästi ilmanpaineen muutoksiin. Mitattu huokosvedenpaine vastasi noin 1 m syvyydessä olevaa pohjavedenpintaa.



Kuva 20. Perniön kesällä 2009 asennetun huokospaineanturin mittaustuloksia. Ilmanpaineen vaihtelu näkyy hyvin selvästi, kuten myös pintamaan poisto elokuun alussa.

Anturia 2 maahan painettaessa mitattu paine ei romahtanut lainkaan, kuten anturilla 1 kävi, vaan paine nousi heti jyrkästi tiettyyn ylipaineen arvoonsa, mistä se alkoi laskea normaalisti. Tämä antoi lisää aihetta epäillä, että anturin 1 käyttäytyminen johtui joko huonosta ilmauksesta tai anturissa itsessään oli jotain vikaa.

Ilmauksen vaikutusta huokospaineanturin toimivuuteen testattiin pienimuotoisesti TTY:n geotekniikan laboratoriossa anturilla 1. Anturi asetettiin o-renkailla tiivistettyyn, toisesta päästä tulpattuun vedellä täytettyyn messinkiputkeen, johon johdettiin painetta kolmiakσιαalikokeessa käytetystä paineyksiköstä. Mittaustulokset luettiin dataloggerilla ja tulokset tallennettiin kannettavalle tietokoneelle. Paineyksikön painetta nostettiin nopeasti 20 kPa portaissa 80 kPa asti, mistä painetta taas laskettiin alas samoissa portaissa. Kokeessa anturilla mitattiin paineita eri tavoin ilmattuna (esimerkiksi mahdollisimman hyvin ilmattuna, ilmattuna mutta sen jälkeen muutamaksi minuutiksi ilmaan jätettynä jne.).

Kokeissa havaittiin muutamia eroja anturin käyttäytymisessä eri ilmaustapojen kesken. Hyvin ilmatuissa kokeissa mitattu paineen muutos oli hieman selkeämpää ja nopeampaa kuin huonosti ilmatuissa. Paineiden muutoksissa oli kuitenkin suurta koe-laitteistosta johtuvaa hystereesiä, mikä vaikeutti tulosten tulkintaa. Paineyksikön hystereesin takia anturia testattiin myös liikuttelemalla sitä pystysuunnassa vesiäm-pärissä, jolloin anturiin kohdistuvan paineen muutos varmasti tapahtuu välittömästi anturia liikutellessa. Tämän kokeen tulosten perusteella voidaan sanoa, että hyvin ilmattu anturi reagoi erittäin nopeasti ja tarkasti ympäristönsä paineen muutoksiin.

Tehtyjen kokeiden tulosten perusteella oli ilmeistä, että hyvin ilmattu huokospaineanturi reagoi paineen muutoksiin huomattavasti nopeammin ja tarkemmin huonosti ilmattuun anturiin verrattuna. Testattua anturityyppiä voitiin myös pitää hyvin sopivana sorrutuskokeen monitorointiin, sillä hyvin ilmattu anturi pystyy mittaamaan nopeai-

ta paineen muutoksia. Oli kuitenkin pidettävä huolta, että ilmaus todella tehdään huolella, ja että ilmauksen jälkeen anturi joko painetaan välittömästi maahan tai säilytetään huolellisesti veden alla ennen asennusta. Lisäksi kokeen yhteydessä oli pidettävä huolta, että jokaisen asennettavan anturin paikka yksilöitiin ja että anturit myös asennettiin juuri sinne minne on tarkoitus, sillä kalibrointikertoimissa ja erityisesti anturien nollakohdissa on huomattavaa vaihtelua anturien välillä, ja anturien sekoittuminen aiheuttaisi pahoja virheitä tulosten tulkintaan.

Koekohteeseen jätetyn anturin havaintojen perusteella oli selvää, että kokeen yhteydessä tuli mitata myös vallitsevaa ilmanpainetta, jotta sen vaikutus voitaisiin laskea pois havainnoista. Ilmanpaineen mittaukseen käytettiin yhtä painumaletkun paineanuria, joka asennettiin vapaasti ilmaan (katso kohta 4.3.4).

4.3.2 Inklinometrit

Inklinometri on anturi, jolla voidaan mitata laitteen asentoa (kulmaa) maan vetovoimaan nähden. Niitä on käytetty jo pitkään maaperän liikkeiden mittaamiseen. Maahan asennetaan (yleensä pystysuora) taipuisa inklinometriputki, jonka alapää asennetaan kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen niin, että se ei pääse liikkumaan sivusuunnassa. Putkeen joko asennetaan useita antureita kiinteästi määräväleihin tai siinä liikutellaan yhtä anturia, joka luetaan määräväleihin. Jos maassa tapahtuu vaakasiirtymiä, putki taipuu vastaavasti. Mittaamalla inkliinaatiolukema useassa eri syvyydessä voidaan laskea putken osan sivusiirtymä mittauspisteiden välillä.

Perinteinen tapa on ollut tehdä mittaukset käsin laskemalla putkeen liikuteltava inklinometri. Tämä on kuitenkin hidasta ja vaivalloista, vaikkakin mittaukset ovat näin tehtynä varsin tarkkoja. Reaaliaikaiseen monitorointiin tarvitaan kuitenkin mittaustehtävän automatisointia. (Luomala 2009)

Automaattista inklinometrijärjestelmää on Suomessa kehittänyt FinMeas Oy. Siinä putkeen asennetaan useita akkukäyttöisiä inklinometrejä määrätyn syvyydsvälein. Inklinometrit mittaavat kaltevuuden säännöllisin väliajoin, ja mittaustieto voidaan lähettää verkossa muualle seurattavaksi. Lisäksi niiden liikkeelle voidaan asettaa hälytysraja, jonka ylittyessä halutuille vastaanottajille lähetetään hälytysviesti.

FinMeasin toimittamat, kokeessa käytetyt inklinometrit ovat digitaalisia, 11-bittisiä antureita, joiden teoreettinen mittausalue on $\pm 30^\circ$ kahdessa toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa (tässä tapauksessa pengertä vastaan kohtisuorassa ja penkereen suuntaisesti). Kulmanmittausresoluutio on $60^\circ/2048 \approx 0,03^\circ$. Anturit ovat akkukäyttöisiä. Jokaisella putkella on oma akku maanpinnalla olevassa kaapissa. Samassa kaapissa on myös tallennin mittaustuloksille ja GSM-modeemi tietojen palvelimelle lähetyksiä varten. Mittaukset voidaan tehdä nopeimmillaan 2–3 minuutin välein ja lähettää dataa palvelimelle 11 minuutin välein. Akkujen säästämiseksi mittaussväli on pitkäaikaisessa monitoroinnissa yleensä harvempi, esimerkiksi 1–12 kertaa vuorokaudessa. Sorrutuskokeen aikana mittauksia tehtiin mahdollisimman tiheästi.

Inklinometriputken asennuksesta aiheutuu usein mittausepä tarkkuutta, jos putki pääsee liikkumaan maahan tehdyn porareian suhteen tai anturien kiertosuunta pysty akselin mukaan poikkeaa oletetusta. Näiden virheiden esiintymistä voidaan yrittää välttää huolellisella asennuksella. Lisäksi paksuilla pehmeiköillä mahdolliset virheet kertautuvat helposti, sillä yhden inklinometrin paikka lasketaan aina suhteessa edelliseen.

4.3.3 Monitorointi takymetreillä

Penkereessä ja sen ympäristössä tapahtuvia siirtymiä mitattiin myös takymetreillä. Takymetrimonitoroinnin suuri etu moniin muihin mittaustapoihin verrattuna on järjestelyjen suhteellinen helppous ja yksinkertaisuus, huomattavan hyvä mittaustarkkuus ja se, että mittauspisteistä saadaan täydelliset x-, y- ja z-koordinaatit. Käytännön mittaustarkkuus muutamien kymmenien metrien matkoilla on tarkimmilla laitteilla helposti alle millimetrin luokkaa.

Perinteinen, manuaalisesti suoritettu takymetrimittaus tarvitsee mittauspaikealle aina laitteen käyttäjän, minkä takia manuaalinen mittaus ei kovinkaan hyvin sovellu jatkuvaan, mittausaikaväleiltään tiheään monitorointiin. Manuaalisessa monitoroinnissa havaintojen väistämätön epäsäännöllisyys vaikeuttaa saadun datan analysointia, ja jatkuvassa mittauksessa pitemmällä aikavälillä käyttäjän virheiden todennäköisyys kasvaa. Takymetrimonitorointia on kuitenkin viime vuosina kehitetty huomattavasti. Nykyään yleisesti käytössä olevilla prismoihin automaattisesti lukittuvilla robottitakymetreillä voidaan mitata ilman manuaalista prismaan tähtäämistä. Suurimmat laitevalmistajat ovat kehittäneet robottitakymetreihin perustuvia monitorointisovelluksia, joilla voidaan automaattisesti monitoroida useaa prismaa säännöllisin väliajoin.

Ensin monitoroitavaan kohteeseen asennetaan seurattavat prismat haluttuihin kohtiin. Prismojen asennuksen tulee olla niin tukeva, että ne eivät liiku tai heilu maanpinnan suhteen. Robottitakymetri asemoidaan ja sopivalla ohjelmistolla ohjelmoidaan niin, että se automaattisesti mittaa vuorollaan jokaisen prisman sijainnin ja etsii seuraavan prisman. Mittaustulokset tallennetaan, ja siirtymiä voidaan seurata ohjausohjelmalla myös graafisesti. Mittaukselle voidaan asettaa joko absoluuttiseen siirtymään tai siirtymän nopeuteen perustuvat hälytysrajat, joiden ylittyessä järjestelmä lähettää hälytyksen halutuille käyttäjille esimerkiksi sähköpostilla tai tekstiviestillä. Tällöin voidaan teoriassa havaita alkava sortuma, jolloin paikalle ehditään ajoissa tekemään korjaavia toimenpiteitä.

Pitkäaikaisessa mittauksessa laitteisto on suojattava sääolosuhteilta niin, että mittaukselle ei kuitenkaan koidu haittaa. Lisäksi Suomen sääolosuhteissa prismojen peittymistä lumeen tai niiden linssien kostumista ja huurtumista voidaan pitää huomattavana haittana. Takymetri vaatii lisäksi suoran näköyhteyden prismoille, joten kohteen geometria ja mahdollinen liikenne aiheuttavat rajoituksia takymetrin ja prismojen sijainnille.

Perniön kohteessa käytettiin Leica Geosystems:n GeoMos-monitorointiohjelmistoa yhdistettynä Leican TM30 -takymetreihin. Kyseiset laitteet ovat tarkkoja, nimenomaan monitorointisovelluksiin tarkoitettuja robottitakymetrejä, joiden kulmanmittaustarkkuus on 0,5 kaarisekuntia (0,15 mgon) (kuva 21). Takymetrejä oli käytössä kaksi kappaletta, joten koealuetta voitiin monitoroida sekä sortuman että varastoken-tän puolelta.

Leica TM30 Performance Specifications

Angle Measurement		
Accuracy ¹⁾	0.5" (0.15 mgon), 1" (0.3 mgon)	
Method	Absolute, continuous, quadruple	
Distance Measurement (Prism)		
Range	Round Prism (GPR1)	3500 m
Accuracy ²⁾ /Measurement time	Precise ^{3,4)}	0.6 mm + 1 ppm/typ. 7s
	Standard	1 mm + 1 ppm/typ. 2.4 s
Method	System analyzer based on phase shift measurement (coaxial, visible red laser)	

Kuva 21. Monitorointiin käytettyjen Leica TM30 -takymetriä ilmoitetut mittaus-tarkkuudet (Leica 2009, s.6 taulukon osa)

Jotta itse takymetriä mahdollinen liike voidaan eliminoida mittauksista, tulee koelämeen ulkopuolelle asentaa vähintään kaksi (mieluumi kolme) varmasti liikkumaton-ta prismaa, joihiin tehdään tarkistusmittaukset tietyin määrääjoiin. Jos takymetri havaitsee liikkuneensa referenssiprismaojen suhteen, se orientoi itsensä uudelleen va-paalla asemapisteellä. Koekohteessa nämä kolme referenssiprismaa asennettiin vil-jasiilon ja metalliverstaan seiniin niin, että molemmilta takymetreiltä oli kaikkiin prismoihin suora näköyhteys.

Takymetrejä käytettiin myös muiden instrumenttien paikalleenmittaukseen. Tähän käytetyt laitteet olivat Leican TCRP 1200 -sarjan takymetrejä. Apupisteet näiden orientointia varten oli tehty Trimble R8 VRS-GPS -laitteella. Samoja apupisteitä käytettiin monitorointitakymetriä ensimmäiseen orientointiin ennen kuormauksen al-kua, johon perustuen seinäprismojen sijainnit mitattiin. Tämän jälkeen laitteiden orientointiin käytettiin yksinomaan seinäprismoja.

4.3.4 Painumaletkut

Painumien mittaus painumaletkulla perustuu hydrostaattisen paineen mittaamiseen putken eri osissa. Painumaletkulla saadaan mitattua painumat nopeasti useasta pisteestä ja näin muodostettua painumaprofiili koko letkun mitalta. Laitteisto koostuu nesteellä täytetystä taipuisasta muoviputkesta, putken sijoitetuista paineantureista ja näihin liitetystä tiedonkeruu- ja ohjauslaitteistosta. Hydrostaattinen paine kasvaa lineaarisesti syvyyden funktiona:

$$p_h = \gamma_l \cdot z \quad (15)$$

missä

- p_h = hydrostaattinen paine [kPa]
- γ_l = painetta välittävän nesteen tilavuuspaino [kN/m³]
- z = nesteen syvyys [m]

Kun letkun yläpää asennetaan niin, että se ei painu (nesteen yläpinta pysyy vakiokor-keusasemassa), voidaan antureiden mittaaman hydrostaattisen paineen muutoksesta alkutilanteeseen nähden laskea letkun painumaprofiili.

Maailmalla perinteisesti käytetyissä painumaletkujärjestelyissä vedellä täytetyn let-kun läpi vedetään yksittäinen paineanturi, ja paine mitataan sijainnin funktiona. Täl-laisessa järjestelyssä mittaus ei siis ole jatkuvaa, ja mittauksesta varten paikalla tulee käydä erikseen. Näissä sovelluksissa käytettävät anturit mittaavat painetta usein suh-teessa ilmanpaineeseen, minkä johdosta anturille tulee saada vallitseva ilmanpaine

pienempää letkua pitkin, mikä rajoittaa tällaisen painumaletkun pituutta. (Luomala 2009 s.15)

Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä on viime vuosina kehitelty huomattavia parannuksia painumaletkun tekniikkaan. TTY:llä kehitetyssä painumaletkussa letkuun on pysyvästi sijoitettu useita datakaapelilla yhdistettyjä digitaalisia, absoluuttista painetta mittaavia paineantureita (kuva 22), joita luetaan tiettyin aikaväleihin. Näin saadaan aika- ja paikkaresoluutioltaan hyvä mittausjärjestelmä, jolla voidaan mitata jatkuvasti tarvitsematta käydä paikan päällä. Jokainen anturi on yhdistetty sen yhteydessä olevaan mikroprosessoriin, joka tallentaa mittaustuloksen ja ilmoittaa sen kysyttäessä tietokoneelle. Tietojen keruuta ohjaa mittausohjelma, joka lukee anturit vuorotellen halutuin väliajoin. Anturit mittaavat absoluuttista painetta. Anturit mittaavat lukemia noin kerran 0,7 sekunnissa. Näistä lasketaan 80 mittauksen keskiarvo, jonka anturit ilmoittavat kysyttäessä. Näin vähennetään huomattavasti kohinan aiheuttamaa epätarkkuutta. Mittaustuloksen haku yhdeltä anturilta kestää yhden sekunnin. Tällöin esimerkiksi 60 anturin painumaletku voidaan kokonaisuudessaan lukea minuutin välein. Itse letkun materiaalina käytetään tavallista, rullatavarana myytävää 40 mm PEM-vesijohtoputkea.



Kuva 22. TTY:n painumaletkussa käytettävä anturipiiri. Itse paineanturi on pyöreä, halkaisijaltaan 6 mm komponentti piirin keskellä. Piirilevy, signaali-johtimet ja käyttöjännitejohtimet on kiinnitetty taustalla näkyvään muovipäällysteiseen kaapeliin, jonka avulla anturiletkaa voidaan liikutella letkun sisällä. (Luomala 2009 s. 26)

Koska anturit on asennettu letkuun pysyvästi, komponenttien korroosion välttämiseksi letkussa käytetään painetta välittävänä nesteinä veden sijasta hydraulikkaöljyä. Tämä ratkaisu pitkälti poistaa komponenttien suojaustarpeen, sillä öljy ei alhaisen sähkönjohtavuutensa ansiosta vaikuta elektronisten komponenttien toimintaan lainkaan. Lisäksi öljy ei jäädy kovallakaan pakkasella. Ympäristönäkökohtien vuoksi painumaletkuissa on käytettävä biohajoavaa öljyä, sillä liitosten vuotaminen tai letkun rikkoutuminen on hyvinkin mahdollisuuksien rajoissa.

Käytettyjen paineanturien mittaustulokset ovat lievästi lämpötilariippuvaisia. Lämpötilakorjausta varten anturit mittaavat paineen lisäksi myös mittaushetken lämpötilan. Korjaus tehdään anturipiirissä automaattisesti ennen mittaustuloksen ilmoittamista, eli niiden antamat painelukemat ovat jo valmiiksi lämpötilakorjattuja. (Luomala 2009)

Letkussa käytettyyn nesteeseen vaikuttaa yleensä luonnollinen ilmanpaine. Jos käytettävä anturi mittaa painetta suhteessa ilmanpaineeseen (eli anturissa on myös kalvon toisella puolella ilmanpaine, jota vasten mitataan), ilmanpaine ei vaikuta mittaustuloksiin. Sen sijaan mitattaessa absoluuttista painetta mittaushetken ilmanpaine tulee vähentää mittaustuloksista. Koska TTY:n painumaletkussa ollaan kuitenkin kiinnostuneita mittaasanturien ja oletettavasti painumattoman referenssianturin mitaamien paineiden erotuksesta, ei ilmanpaineen muutoksista käytännössä tarvitse välittää, sillä se vaikuttaa nesteen välityksellä täysin samalla tavalla sekä referenssianturiin että muihin antureihin.

TTY:n painumaletkun toisessa päässä on paisuntasäiliö, johon öljy pääsee vapaasti virtaamaan esimerkiksi lämpöliikkeiden vaikutuksesta. Myös signaalijohtimet voidaan helposti johtaa paisuntasäiliön kautta ulos ja liittää tietokoneeseen.

4.3.5 Maanpaineanturit

Pystysuoran jännityksen jakautumista ratapölkkyjen alla mitattiin maanpaineantureilla (6 kpl). Käytetyt anturit ovat Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä suunniteltuja ja rakennettuja. Teräsosien koneistukseen on käytetty Tampereen Ruskon teollisuusalueen konepajoja. Kaupallisiakin maanpaineantureita on olemassa, mutta TTY:n anturit eroavat näistä huomattavasti suuremman kokonsa takia, mikä vähentää karkearakeisessa maassa yksittäisten rakeiden ”kantamisen” ja holvautumisen aiheuttamia epätarkkuuksia.

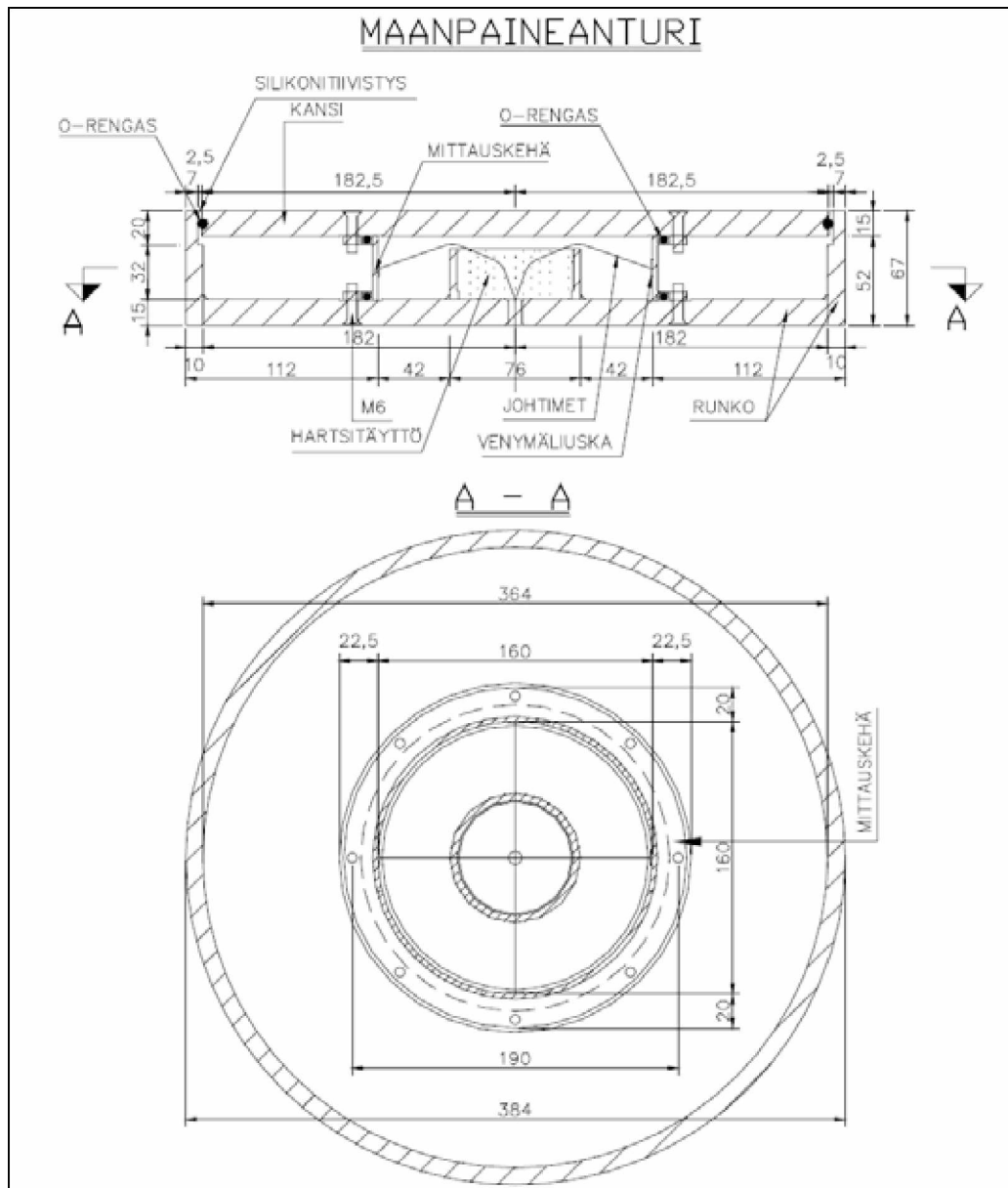
Maanpaineanturin toiminta perustuu teräksiseen mittauskehään kiinnitettyihin venymäliuskoihin, joissa tapahtuvat muodonmuutokset aiheuttavat venymäliuskassa olevien vastuslankojen resistanssiin muutoksia liuskalle ominaisen liuskavakion mukaisesti. Mitatusta resistanssista voidaan laskea liuskan venymä. Venymästä puolestaan voidaan laskea mittauskehässä venymäliuskan kohdalla vallitseva jännitys, kun tunnetaan materiaalin kimmomoduuli:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (16)$$

missä

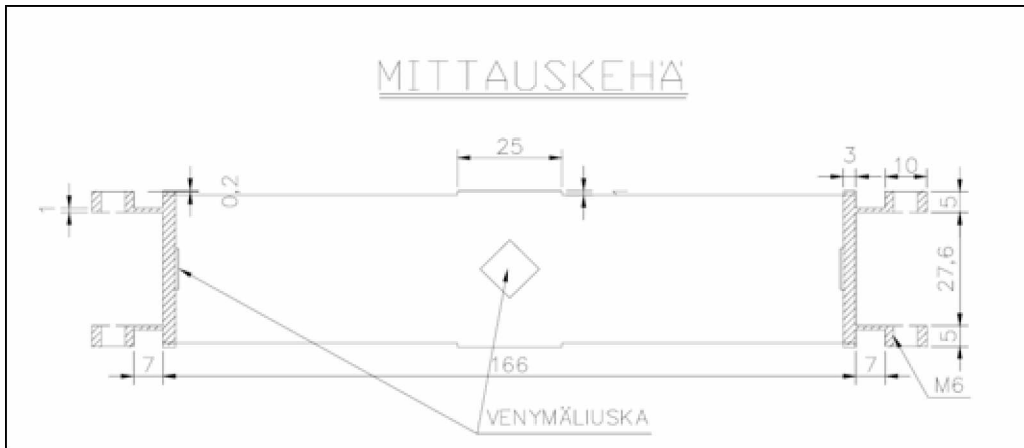
σ	= materiaalin jännitys venymäliuskan kohdalla
ε	= venymä
E	= materiaalin kimmomoduuli

Kun anturin rakenne tunnetaan, voidaan mittauskehässä vallitsevasta jännityksestä laskea anturiin vaikuttava normaalivoima ja edelleen maanpaine. (Laaksonen 2005) Maanpaineanturin pääosat ovat runko, kansi, mittauskehä, venymäliuskat ja tarvittavat kaapeloinnit (kuva 23). Osat on tehty teräksestä S355 (alempi myötöraja 355 MPa). (Laaksonen 2005)



Kuva 23. Kokeessa käytettyjen maanpaineanturien rakenne (Laaksonen 2005 s. 54)

Anturin kansi lepää kokonaan mittauskehän varassa. Kun kanteen kohdistuu painetta, voima välittyy mittauskeuhän, joka puristuu kasaan kimmoisasti. Kehään on kiinnitetty neljä kahteen suuntaan mittaavaa, teräkselle lämpötilakompensoitua venymäliuskaa (kuva 24). Mittauskehässä on liuskojen kohdalla korokkeet, joiden kautta voima välittyy keuhän ja venymäliuskoille. Venymäliuskat on kytketty ristiin ("siltaan") niin, että kuorman mahdollinen epäkeskisyys ei muuta mittaustulosta. (Laaksonen 2005)



Kuva 24. Detaljileikkaus maanpaineanturin mittauskehästä, venymäliuskojen sijoittelu (Laaksonen 2005 s. 54)

Vaikka anturiin vaikuttava maanpaine voidaan teoriassa laskea suoraan liuskojen venymästä, kun tiedetään liuskojen ja anturin materiaalin ominaisuudet ja rakenne, anturit täytyy käytännössä kalibroida. Kalibroitatarve johtuu mm. anturin rakenteen epätarkkuuksista ja venymäliuskojen ilmoitetusta poikkeavista ominaisuuksista. Kalibrointi tehtiin TTY:n rakennushallin koelaitteistolla, jossa anturia kuormitettiin hydraulitunkilla. Tunkin ja anturin väliin asetettiin erillinen voima-anturi, jonka voimajänniteominaisuudet tunnettiin. Voima-anturin avulla maanpaineanturille määritettiin vastaava venymäliuskan jännitteen ja voiman suhde.



Kuva 25. Yhdistetyt vaakasuuntaiset maanpaine- ja huokospaineanturit (‘kirveenterät’). Suuri ympyränmuotoinen osa on maanpaineanturin kalvo, kun taas pienempi kolo sen yläpuolella on huokospaineanturin huokoskivi. Kuva Kauko Sahi.

Projektin ohjausryhmästä ilmaistiin halua mitata myös vaakasuuntaista maanpainetta ja sen suhdetta huokospaineeseen. Ajan puutteen takia ei uusia antureita voitu tilata tähän tarkoitukseen, mutta TTY:llä oli valmiina kolme yhdistettyä maanpaine- ja huokospaineanturia ("kirveenterät"), joita oli käytetty aiemmissa projekteissa (kuva 25). Anturit on kiinnitetty hoikkaa kirveenterää muistuttaviin runkoihin, jotka voidaan asentaa maahan painamalla. Maanpaineanturit mittaavat painetta halkaisijaltaan noin 30 mm kalvon välityksellä. Runkoihin kiinnitetyt Kyowan valmistamat huokospaineanturit ovat hyvin pienikokoisia (halkaisija noin 10 mm). Niiden huokoskivi on yhdistetyn anturirungon leveällä sivulla, mistä paine välittyy itse anturille. Anturit todettiin pikaisissa kokeissa toimiviksi ja kalibroitiin TTY:n rakennushallissa vesipatsaan avulla.

4.3.6 Liukupinnan havaintoputket

Sortumassa muodostuneen liukupinnan sijainnin ja muodon selvittäminen oli erittäin tärkeää, sillä liukupinnan pituus ja sijainti eri maakerroksissa vaikuttaa oleellisesti liukupinnalle mobilisoituvien jännitysten ja käytettävissä olevan leikkauslujuuden suuruuksiin.

Liukupinnan alku- ja loppupäiden sijainti voidaan lukea maan pinnalla tapahtuvista muodonmuutoksista. Liukupinnan syvyyden ja muodon mittaukseen päätettiin käyttää inklinometriä lisäksi maahan pystysuorasti asennettavia muoviputkia. Halpoja muoviputkia voitiin asentaa myös niihin koealueen osiin, joissa inklinometrejä ei ollut. Käyttämällä useaa eri menetelmää liukupinnan mittaamiseen voitiin myös varmistaa, että asiasta saadaan varmasti tietoa, jos jokin menetelmä osoittautuisikin epäluotettavaksi. Lisäksi menetelmien antamia tuloksia voitiin helposti verrata toisiinsa, jolloin mahdollisesti havaittuja säännönmukaisia mittaustulosten eroja ja yhtäläisyyksiä voitaisiin hyödyntää myös jatkossa tehtävissä tutkimuksissa.

Liukupinnan mekaanisen määrittämisen periaate on, että liukusiirtymän tapahtuessa putki taipuu terävästi tai murtuu liukupinnan kohdalla. Liukupinnan (tai oikeammin liukuvyöhykkeen) yläosan syvyys putken kohdalla voidaan mitata putken sisään työnnettävällä terästangolla tai jäykkäkärkisellä vaijerilla, joka pysähtyy taitekohtaan. Käytettävän putken valinnassa päädyttiin siihen, että putki saisi olla mahdollisimman taipuisa, jotta se reagoisi tarkasti maassa tapahtuviin muodonmuutoksiin. Putki ei kuitenkaan saa olla liian taipuisa, jotta se pysyisi asennuksen yhteydessä mahdollisimman suorana ja että siihen ei muodostuisi jo ennen sortumaa liukupinnan yläpuolisia taipumia, jotka haittaisivat taitteen luotimista sortuman jälkeen. Asennusaikaisen taipuman välttämiseksi putki pitää asentaa jäykkää terästankoa apuna käyttäen, alapäästä painamalla.

Putkena kokeiltiin taipuisaa 20 mm sähköputkea, jonka päässä on heijarikairan kärkeä muistuttava holkki (kuva 26). Holkki kiinnitetään putkeen täytemassalla. Putki asennetaan painamalla holkin päätä maahan putken sisällä olevalla 12 mm harjaterästangolla. Kärki on ulkomitaltaan hieman putkea suurempi ($d = 30$ mm), jotta asennusvaiheessa välttyttäisiin putken ja maan väliseltä kitkalta ja näin vältettäisiin putken venyminen tai katkeaminen asennettaessa. Itse putkeen ei näin asennettaessa kohdistuisi suurta vetojännitystä.



Kuva 26. Liukupintaputkia kärkineen ennen asennusta. Kuva Tim Länsivaara.

Putken asennusta ja holkin kiinnitystä testattiin elokuussa 2009 Tampereen Kaukajärvellä sijaitsevalla pehmeiköllä. Kokeessa putki painettiin noin 2 metrin syvyyteen. Asennettaessa holkki pysyi lujasti putken päässä, ja kiinnitys kesti myös putken ylös vetämisen. Maa Kaukajärven koekohteessa oli turvetta, johon putken sai painettua helposti käsivoimin. Perniön savikolla tehdyissä painokairauksissa kaira tunkeutui savikerrokseen painamalla, joten kärjen kiinnityksen ja putken lujuuden saattoi olettaa riittäväksi myös näihin oloihin. Kärjen kiinnityksen todettiin myös olevan niin vahva, että vedettäessä itse putki katkeaa ennen kärjen irtoamista.

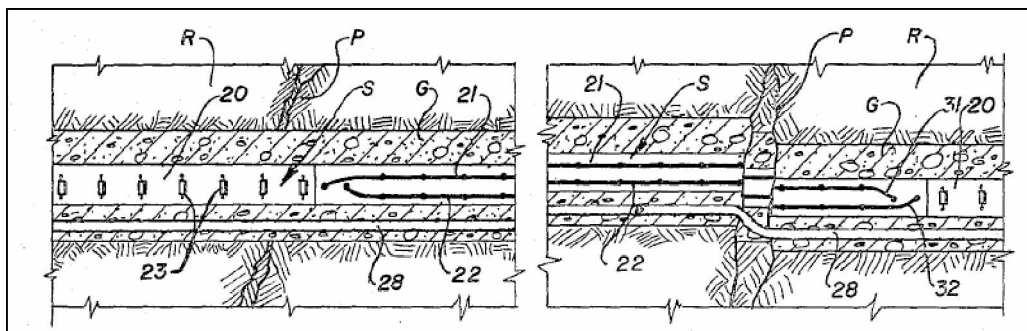
Liukupintainstrumentteja käytettiin myös pinnalla tapahtuvien liikkeiden selvittämiseen mittaamalla niiden sijainti ennen sorrutusta ja sen jälkeen. Koska täytön läpi tehty alkureikä oli huomattavan suuri, sivuttaisliikkeiden estämiseksi putkien yläpää ankkuroitiin maanpinnalle paisuvalla uretaanivaahdolla. Ureetaanivaahdon kuivuttua siihen painettiin jokaisen tarkkailuputken viereen pieni ruuvi, joka toimi yksiselitteisenä sijainnin mittauspisteenä.

Vaihtoehto taipuisalle sähköputkelle olisi ollut jäykkä, mutta hauras putki, joka leikkautuisi siirtymän johdosta poikki. Tällaisia ei kuitenkaan ole saatavissa, sillä normaalikäyttöön suunnitellut sähkö- tai vesiputket ovat ennemminkin sitkeitä. Jäykähkö, mutta sitkeä putki ennemminkin leikkautuisi saveen eikä taipuisi liukumaa vastaan. Tässä tapauksessa ajateltiin taipuisan ”haitariputken” olevan joka tapauksessa paras vaihtoehto.

Maailmalla aiemmin tehdyissä penkereen sorrutuskokeissa on liukupinnan sijainnin mittaamiseen käytetty myös maahan painettavia puusalkoja, jotka katkeavat tai taituvat liukupinnan kohdalla. Liukupinnan syvyys saadaan selville vetämällä salko pois maasta sorrutuksen jälkeen ja mittaamalla katkenneen kohdan paikka. Tämänkin ratkaisun käyttöä mietittiin, mutta ajan puutteen takia asiasta luovuttiin. Lisäksi oli odotettavissa, että salko saattaisi katketa helposti myös muualta kuin liukupinnan kohdalta.

Edellä kuvattujen yksinkertaisten mekaanisten ratkaisujen lisäksi tutkittiin pintapuolisesti mahdollisuutta liukupinnan sijainnin sähköiseen mittaamiseen. Menetelmän perusidea on, että maahan asennetaan virtapiiri, joka koostuu eri syvyyksillä sijaitsevista rinnan kytketyistä vastuksista. Tällöin liukupinnan kohdalla ja sen alapuolella kulkevat virtapiiriin osat katkeaisivat irti leikkausmuodonmuutosten takia, jolloin voitaisiin havaita sekä liukuman syvyys että sen ajanhetki. Aluksi mietittiin mahdollisuutta käyttää suojaputkeen asennettuja johtimia, jotka injektoidaisiin paikalleen. Tässä tultiin kuitenkin siihen tulokseen, että saatavilla olevat johtimet on nimenomaan tehty melko suuria vetomuodonmuutoksia kestäviksi, mikä käytännössä estää niiden käytön tähän tarkoitukseen. Jotta voitaisiin varmistaa virtapiiriin katkeaminen kuormituksessa, materiaalien tulisi päinvastoin olla hyvin hauraita.

Asiaa tutkittaessa löytyi kuitenkin mielenkiintoinen patentti (Hartmann 1969), jossa kuvattiin yllä olevan kaltainen järjestely, mutta piirilevyillä toteutettuna. Tässä patentissa pitkään, hauraaseen piirilevyyn on asennettu tasavälein rinnan kytkettyjä vastuksia (kuva 27). Piirilevyn eräs ominaisuus on se, että levyn katketessa myös siihen kiinteästi etsatut johdinliuskat katkeavat. Piirilevy ja komponentit suojataan ja asennetaan taipuisaan suojaputkeen injektoimalla.



Kuva 27. Piirilevyihin ja vastuksiin perustuva liukupinnan sijainnin havainnointilaitte, kuvassa vaakatasoon asennettuna. (Hartmann 1969)

Rinnan kytkettyjen vastusten kokonaisresistanssi voidaan laskea yleisesti tunnetulla kaavalla

$$\frac{1}{R_{tot}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (17)$$

missä

R_{tot} = piirin kokonaisresistanssi

R_i = yksittäisen vastuksen resistanssi

Kun piirissä mukana olevien vastusten määrä vähenee levyn katketessa, piiristä mitattu resistanssi kasvaa. Jos kaikki vastukset ovat resistanssiltaan samoja, voidaan uuden resistanssin perusteella laskea "jäljellä" olevien vastusten määrä ja tästä liukupinnan syvyys. Jos resistanssin arvoja mitataan ja tallennetaan automaattisesti, saadaan selville myös sortuman (tai ainakin riittävän suuren siirtymän) tarkka ajan kohta. Tällöin laite voisi toimia myös monitorointitarkoituksissa sulaketyyppisenä varoittimena.

Järjestely vaikutti muuten kiintoisalta, mutta asiaa hankaloittaa se, että nykyisten piirilevyjen materiaalit ovat huomattavasti sitkeämpiä kuin 1960-luvulla käytetyissä hauraisissa hartsilevyissä (Sahi 2009). Sopivan materiaalin ja rakenteen löytäminen olisi vaatinut huomattavaa testausta ja kokeilua. Koska projektissa oli muutenkin kattava instrumentointi ja käytettävissä oleva aika oli huomattavan rajallinen, päätettiin piirilevyyn perustuva liukupinnan mittaaminen jättää ainakin tältä erää kokeilematta.

Virtapiirin katkeamiseen perustuvien menetelmien lisäksi liukupinnan sijaintia voitaisiin mitata myös esimerkiksi valokuitutekniikalla (Luomala 2009), mittaamalla kaapelin venymää kaapelitutkalla (Luomala 2009) tai seuraamalla maahan upotettavan elementin kapasitanssin muutoksia (Wright & Hawkes 1982). Näidenkin menetelmien tarkastelusta tässä yhteydessä luovuttiin muun muassa aiemmin todettujen ongelmien (Luomala 2009) tai menetelmien testaamattomuuden ja monimutkaisuuden takia.

Kun tarkasteltiin eri vaihtoehtoja liukupinnan sijainnin mittaamiseen, tarpeeksi hauraiden materiaalien löytäminen osoittautui usein huomattavaksi esteeksi. Lähes missä tahansa käyttötarkoituksessa jäykältä materiaalilta odotetaan myös huomattavaa sitkeyttä ja lujuutta. Tähän tavoitteeseen on myös hyvin pitkälti päästy materiaalien tuotekehityksessä, joten ”sopivan” hauraita tehdasvalmisteisia putki-, johdin- tai levy materiaaleja ei enää nykyään ole juuri saatavissa.

4.3.7 Laserkeilaus

Kolmiulotteisen maastomallin tekoa varten käytettiin laserkeilausta. Laserkeilauksessa keilain lähettää laserpulseja, jotka heijastuvat keilattavasta kohteesta takaisin. Keilain laskee kohteen etäisyyden joko valon kulkuajan tai vaihe-eron perusteella. Kun keilaimesta lähetetyn säteen pysty- ja vaakakulmat ovat tiedossa, voidaan niiden ja lasketun etäisyyden perusteella laskea mitatun kohteen sijainti. Keilain mittaa kohteesta pistepilven, joka vastaa yhdestä mittauspisteestä näkyvää ”kuvaa”. (Joala 2006)

Yhdistämällä useasta pisteestä keilatut pistepilvet voidaan muodostaa kolmiulotteinen maastomalli koalueesta. Pistepilvet voidaan yhdistää maastoon asennettujen, useisiin eri mittauspisteisiin näkyvien tähysmerkkien avulla, joiden sijainnit tunnetaan. (Joala 2006) Kahta eri aikaan keilattua kolmiulotteista maastomallia vertaamalla voidaan nähdä niiden välillä tapahtuneet muodonmuutokset, joita voidaan havainnollistaa esimerkiksi värien käytöllä.

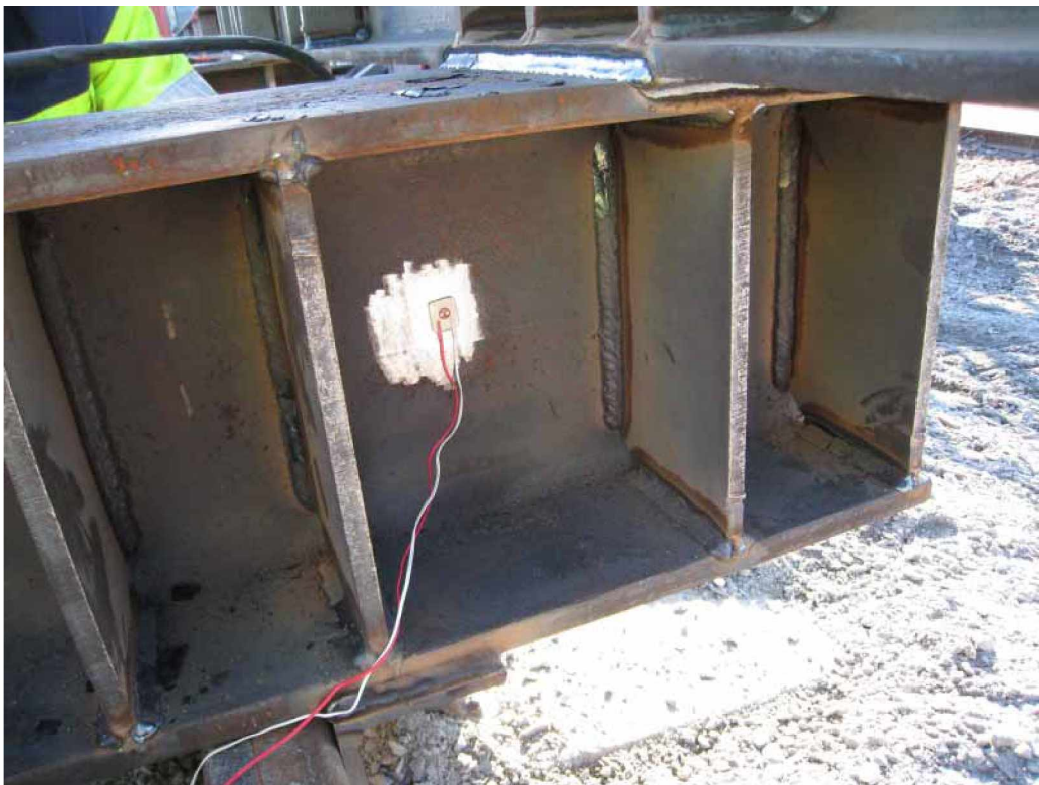
Alueelle asetettiin neljä keilauspistettä, joista käsin keilaus tehtiin. Jokaisessa keilauspisteessä oli oma kolmijalka pakkokeskistysjalustoineen. Tällöin keilainta ei tarvinnut joka keilausta ennen tasata erikseen. Siirtymien havainnollistamiseksi keilaukset tehtiin kokeen alussa, kokeen aikana muutama otteeseen ja kokeen jälkeen. Käytetty keilain oli tyypiltään Leica HDS6000.

4.3.8 Venymäliuskat

Kuormitusta suunniteltaessa tultiin siihen tulokseen, että kontteja tulee punnita lastauksen aikana, jotta maahan kohdistuva kuormitus voidaan määrittää tarkasti. Epävarmuustekijöitä kuormituksen jakautumisessa ovat mm. maa-aineksen jakautuminen kontin sisällä sekä sen tilavuuspaino ja tiivistyminen. Vaikka konttiin lastattavat maamassat punnittiinkin kauhakuormaajalla, oli tämä punnitus myös hyvä varmentaa jollakin keinolla.

Näiden seikkojen vuoksi konttien kuormitusta seurattiin niiden alla olevaan palkistoon asennettavilla venymäliuskoilla. Liuskat toimivat samalla periaatteella kuin maanpaineantureissa käytetyt: palkin muodonmuutos aiheuttaa liuskassa resistanssin muutoksia, joista voidaan laskea palkin jännitys ja tästä edelleen kuorman suuruus.

Venymäliuskat olisi voitu asentaa joko poikittaisen palkin keskelle ylä- ja alapintaan (taivutusmuodonmuutokset) tai poikittaisen palkin uumaan sen päiden lähelle (leikkausmuodonmuutokset). Kokeessa päätettiin mitata leikkausmuodonmuutoksia jokaisen akselin päästä, jolloin kokeen aikana toivottiin voitavan seurata kuorman jakautumista kontissa jopa yksittäisen ”pyöräkuorman” tarkkuudella. Leikkausmuodonmuutoksien mittauksessa oli myös se etu, että liuska voidaan sijoittaa poikittaispalkin pituussuunnassa hyvin vapaasti pitkittäisen palkin ja kiskon väliin, sillä leikkausvoimakuvio on tällä välillä vakio. Ristikkäisiä venymäliuskoja oli jokaista ”pyörää” kohden kaksi, yksi uuman molemmilla puolilla, jolloin yhden ”pyörän” liuskat saatiin kytkettyä kokosiltaan (yhdessä ristiliuskassa on kaksi vastusta, jolloin kahdella liuskalla päästään neljän vastuksen siltakytkenään). Neljään neliakseliseen palkistoon liuskoja asennettiin siis yhteensä $4*4*4 = 64$ kappaletta. (kuva 28)



Kuva 28. Venymäliuska asennettuna poikittaiseen palkkiin. Uuman toisella puolella on myös vastaava ristiliuska. Kisko näkyy kuvassa alavasemmalla, pitkittäispalkki ylhäällä oikealla. Pitävän liimauksen varmistamiseksi asennuskohta pitää hioa sileäksi ja puhdistaa asetonilla. Palkin teräksessä olleiden kuoppien ja viirujen takia sopivan tasaista asennuskohtaa piti usein etsiä, mikä näkyy hiotun alueen laajuudessa. Kuva Kauko Sahi.

Jokainen venymäliuska kalibroitiin työmaalla erikseen palkistoon liimaamisen jälkeen kuormittamalla akselia tunkilla, jossa oli dataloggeriin yhdistetty voima-anturi (kuva 29). Käsikäyttöinen korkeapainetunkki oli kiinnitetty pienempään palkkiin, joka puolestaan kiinnitettiin poikkipalkkiin erillisillä kiinnikkeillä. Näin saatiin aikaan melko hyvin todellisuutta vastaava kuormitustilanne. Kalibrointi oli välttämätöntä sekä antureissa itsessään olevien kalibrointikertoimien erojen että anturin pystysuuntaisesta sijainnista johtuvien mittaustulosten erojen huomioonottamiseksi. Kalibroinnissa selvitettiin siis suoraan palkkia kuormittavan voiman ja liuskasta mitatun jännitteen suhde.



Kuva 29. Venymäliuskojen kalibrointijärjestelyn testausta TTY:n rakennushallissa. Työmaalla liuskat kalibroitiin siten, että kuormituspalkin (ylhäällä) kiinnikkeet tulivat kiskojen väliin.

4.3.9 Kallistuskulma-anturit

Konttien kallistuskulman mittaamiseen käytettiin kontteihin asennettuja kiihtyvyyksiantureita. Nämä ovat pieniä (n. 3 cm x 2 cm) analogisia antureita, jotka tässä sovelluksessa mittaavat omaa asentoaan maan vetovoimaan nähden (periaate on siis sama kuin inklinometriantureissa). Jokaisen vaunun keskelle konttien alaosaan asennettiin magneeteilla yksi pituus- ja yksi poikittaissuuntainen anturi (kuva 30), jotka yhdistettiin dataloggeriin.



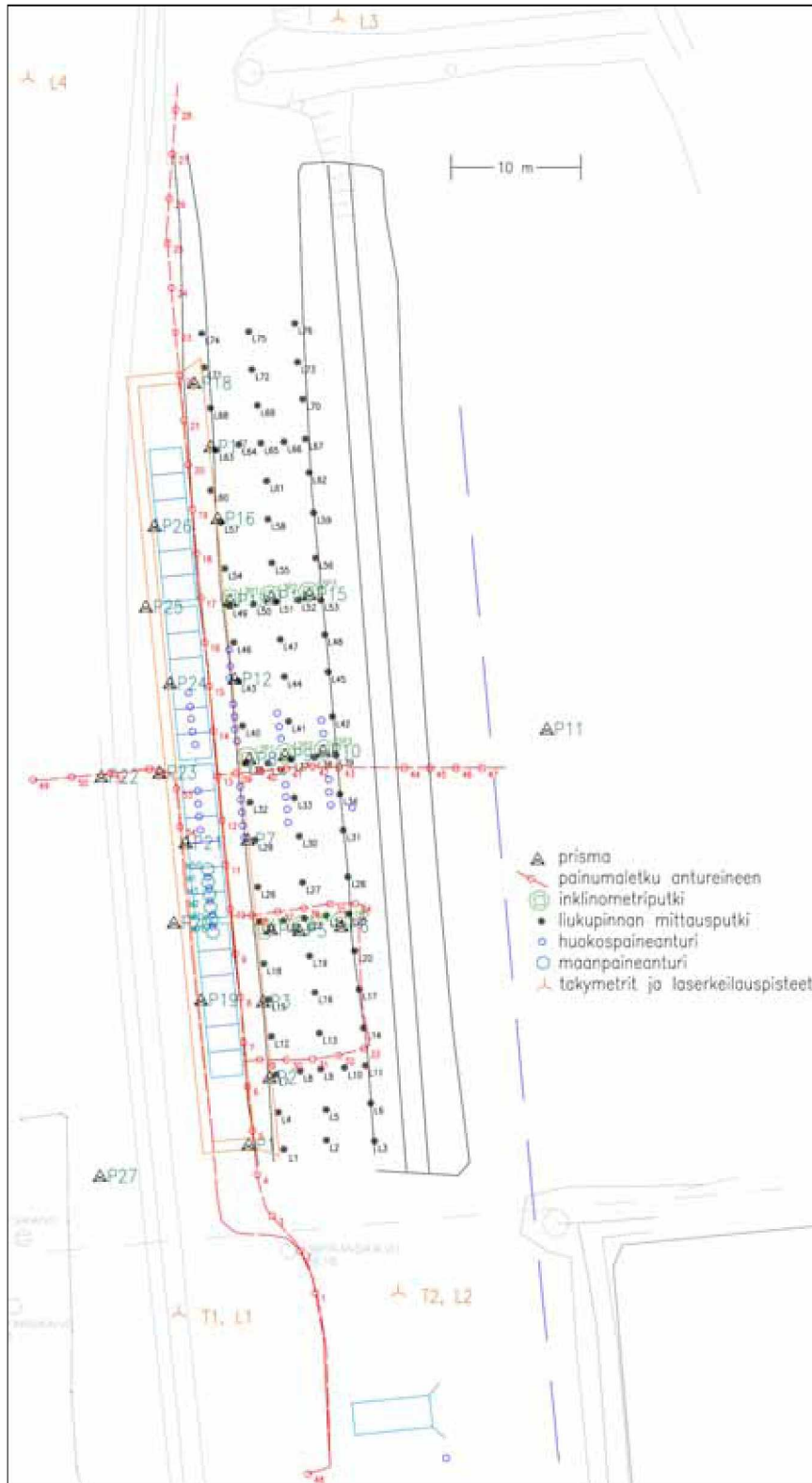
Kuva 30. Kiihtyvyyssantureita konttiin kiinnitettyinä.

Näiden anturien funktio oli lähinnä seurata karkeasti konttien kallistuskulmaa kokeen aikana ja näin käyttää niitä osaltaan sortuman ennakointiin. Koska konttien kallistuskulmaan vaikuttavat pohjamaan liikkeiden lisäksi palkiston ja sen alustan muodonmuutokset ja epätasaiset painumat, kiihtyvyyssanturien mittauksilla ei ajateltu olevan paljoakaan merkitystä ainakaan kvantitatiivisesti.

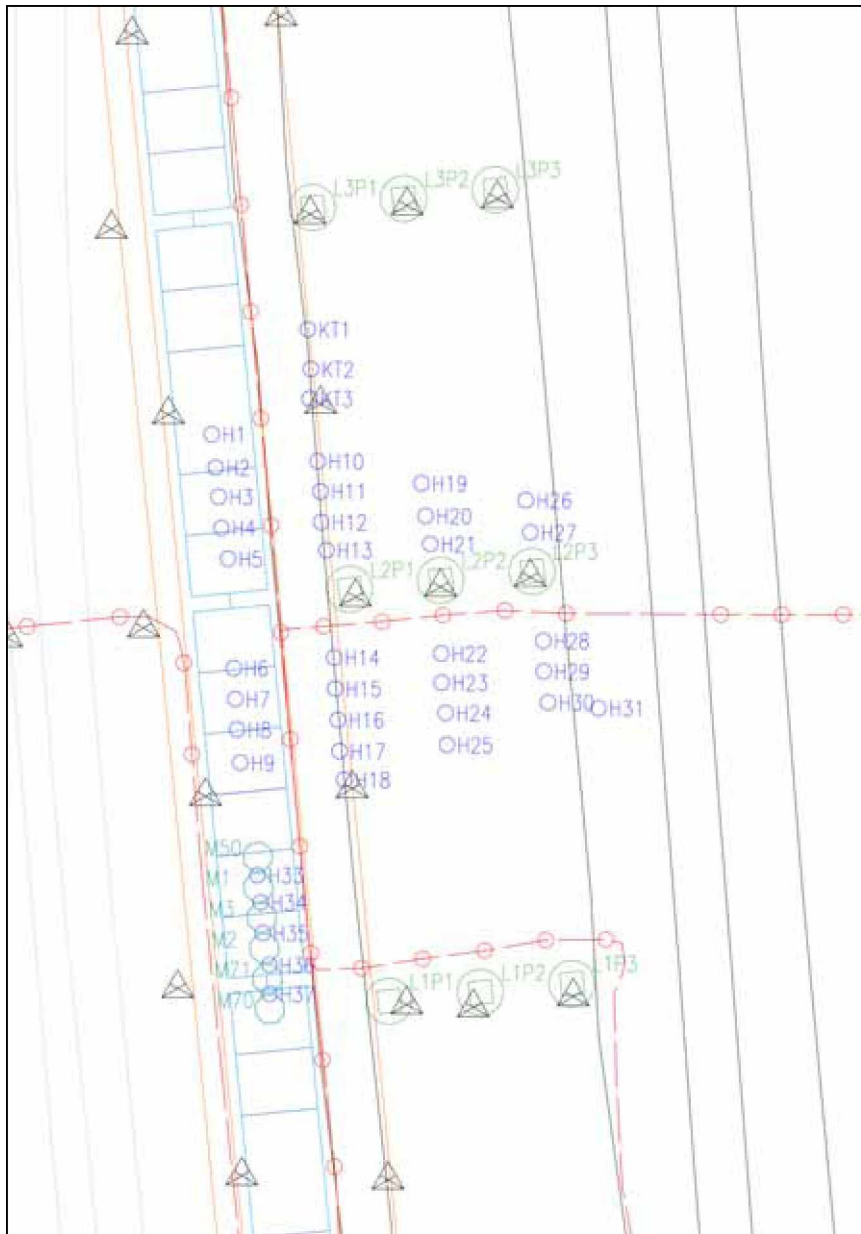
4.4 Mittalaitteiden sijoittelu

Instrumentoinnin sijoittelussa lähtökohtana oli mahdollisimman kattava instrumentointi koko koealueella. Koska käytettävissä olleiden mittalaitteiden määrä oli kuitenkin rajallinen, päädyttiin siihen, että instrumentit keskitetään koealueen keskelle, jossa pohjatutkimusten perusteella oli sortumalle otollisimmat pohjaolosuhteet. Tällöin voitiin saada kattava kuva tällä alueella tapahtuneista ilmiöistä. Koko koealue oli kuitenkin instrumentoitu enemmän tai vähemmän kattavasti, esimerkiksi painumaletku kulki koko penkereen pituudelta ja myös prismoja ja liukupinnan havaintoputkia oli kattavasti koko alueella.

Kuvassa 31 on esitetty koealueella olleiden mittalaitteiden sijainnit. Kuvassa 32 on esitetty tarkemmin koealueen keskiosan mittalaitteiden sijoittelua (selkeyden vuoksi liukupinnan mittausputket on jätetty kuvasta pois). Tarkempi selvitys kunkin mittalaiteryhmän sijoittelusta on asianmukaisessa alaluvussa.



Kuva 31. Kokeessa käytettyjen mittalaitteiden tarkemittatut sijainnit.



Kuva 32. Huokospaineanturien, maanpaineanturien ja inklinometrien sijoittelu. Merkkien selitykset ovat kuvassa 31.

4.4.1 Huokospaineanturit

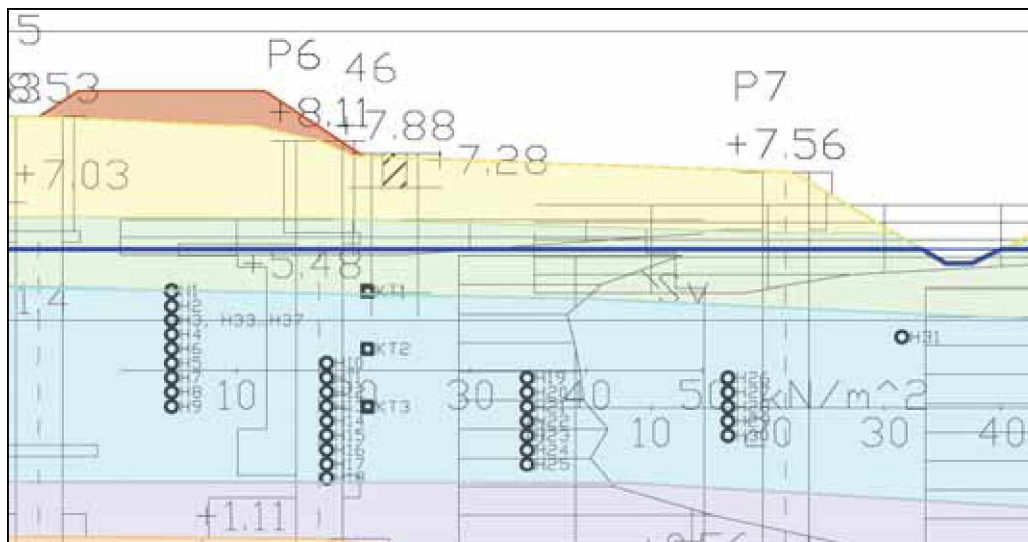
Eryteisesti huokospaineanturien sijoitteluun vaadittiin kattavia etukäteislaskelmia todennäköisen liukupinnan sijainnin haarukoimiseksi. Antureilla haluttiin havaita sekä kuormituksen aiheuttama huokospaineen nousu penkereen alla ja sivuilla että sen kehittyminen liukupinnalla tapahtuvan myöden vaikutuksesta ennen sortumaa ja sen aikana.

Alustavat stabiiliteettilaskelmat tehtiin GeoCalcilla (lamellimenetelmä, sekä suljetun leikkauslujuuden että tehokkaiden parametrien avulla) ja Plaxisilla (elementtimenetelmä). Koska todellisen liukupinnan muodostumissyvyyttä ei voitu laskelmista huolimatta tietää tarkasti etukäteen, piti antureita asentaa useille eri syvyyksille ”osuman” varmistamiseksi. Asentamalla antureita useille eri syvyyksille voitiin lisäksi määrittää huokospaineen jakauma.

Huokospaineanturit asennettiin neljään eri penkereen suuntaiseen päälinjaan koealueen keskelle (penkereen keskilinjan alle, penkereen juurelle, noin 6,6 m penkereen keskilinjasta ojaa kohti ja noin 70 cm ojaluisikan reunasta penkereeseen päin). Anturit asennettiin pituussuunnassa pääasiallisesti 1 m välein ja 0,25 m syvyysvälein niin, että kunkin linjan syvimmälle asennetut anturit sijaitsivat lähimpänä siiloa (poikkeuksena anturit H33...H37, jotka asennettiin keskenään samalle syvyydelle maanpaineanturien yhteyteen, tasolle +5). Anturi H31 asennettiin ojaluisikan alle ylikonsolidoituneeseen saveen ja anturi H32 mittalaittekontin taakse koealueen ulkopuolelle.

Liitteessä 3 on esitetty huokospaineanturien sijainnit paikallisessa (m,n,z)-koordinaatistossa, jossa origo on palkiston 1 siilon puoleisessa päässä penkereen keskilinjan kohdalla, m-akseli on penkereen suuntainen (positiivinen suunta siilosta pois-päin), n-akseli pengertä vastaan kohtisuorassa (positiivinen suunta ojaa kohti) ja z-koordinaatti on N60-korkeusjärjestelmän mukainen korkeuskoordinaatti.

Kuvassa 32 on esitetty huokospaineanturien tasosijainti kartalla ja kuvassa 33 anturien korkeusasemat. Anturien korkeussijainnit suunniteltiin GeoCalc- ja Plaxis-laskelmien perusteella.



Kuva 33. Huokospaineanturien sijainti leikkauksessa.

4.4.2 Inklinometrit

Inklinometrit asennettiin kolmeen raiteeseen nähden kohtisuoraan mittalinjaan (L1...L3), suunnilleen vaunujen välien tasolle. Jokaisessa mittalinjassa oli kolme inklinometriputkea. Anturien syvyysväli oli 0,5 m, paitsi putkessa L3P2 1,0 m. Yhteensä antureita oli 163 kappaletta. Ylin anturi asennettiin aina maanpinnan tasolle ja alin putkesta riippuen 8,0–9,5 m syvyyteen. Inklinometriputkien sijainnit on esitetty kuvissa 31 ja 32.

Inklinometriputkien kohdalle asennettiin myös prismat takymetrimonitorointia varten. Nämä kohdat olivat sinänsä hyviä mittauspisteitä pinnalla tapahtuvien siirtymien monitorointia varten, ja näin voitiin myös verrata inklinometrilukemia ja prismojen liikettä suoraan toisiinsa. Erityisesti inklinometreissä mahdollisesti kertautuva systemaattinen virhe voitiin näin saada selville.

4.4.3 Takymetrit ja prismat

Takymetrimonitorointia varten koealueella oli 27 miniprismaa sekä liikkumattomina referenssiprisminoina kolme suurempaa pyöröprismaa. Prismojen päälinja kulki penkereen ojan puoleisella juurella. Poikittaisiin linjoihin asennetut prismat (P4...P6, P8...P10, P13...P15) asennettiin inklinometriputkien viereen.

Penkereen takapuolelle maahan asennettiin neljä prismaa, joista kolme (P20, P23, P25) oli penkereen juurella ja yksi (P22) 5 m päässä penkereestä. Prismat P22 ja P23 olivat penkereen takana kulkevan painumaletkun kohdalla, joten niitä voitiin käyttää painumaletkun tulosten varmentamisessa. Kontteihin (jokaisen palkiston keskikohdalle) oli kiinnitetty neljä prismaa, joilla voitiin seurata konttien liikkeitä.

Koealueen reunoille asennettiin kaksi prismaa: P11 ojan toiselle puolelle koealueen keskustan tasolle, noin 9,3 m ojan reunasta, sekä P27 metallipajan varastokentän laidalle. Näiden prismojen tehtävä oli normaalin siirtymien monitoroinnin ohella varoittaa mahdollisesti koealueen ulkopuolelle ulottuvista muodonmuutoksista, jolloin olisi voitu varautua esimerkiksi käskemään paikalla ollutta yleisöä kauemmas tai varoittaa paikallista vesilaitosta noin 5 m ojan takana kulkevan runkovesijohdon vaurioitumisen mahdollisuudesta.

Maan tasolle tulleet 24 prismaa asennettiin noin 30 cm pitkiin, maahan lyötyihin harjaterästankoihin, joiden kärkeen oli hitsattu M10 mutterit. Muttereihin oli kierretty normaalit prismatapatit. Prismat asennettiin aivan maan tasolle, jotta mahdollinen alustan kallistuminen ei näkyisi suurina siirtyminä. Lisäksi asennus oli näin hyvin tukeva. Neljä prismaa asennettiin kontteihin hitsattuihin, hieman lyhyempiin tappeihin. Kolme referenssiprismaa asennettiin rakennusten seiniin porattuihin kiilaankkureihin kiinnitettyihin kiinnitystappeihin.

Takymetrit sijoitettiin koealueen siilon puoleiselle reunalle. Takymetri 1 sijaitsi paikalleen jätetyn vanhan raiteen kohdalla niin, että se saattoi monitoroida penkereen takana olleita prismoja (P19...P27). Näiden lisäksi takymetri 1 monitoroi penkereen päässä ollutta prismaa P1 ja ojan toisella puolella ollutta prismaa P11, jotta molemmilla takymetreillä olisi suunnilleen sama määrä prismoja tarkkailtavana. Takymetri 2 sijaitsi suunnilleen ojan pään tasolla, ja tarkkaili muita ojan puolen prismoja (P2...P10, P12...P18). Alun perin oli takymetrit ja laserkeilauspisteet niiden näkymän parantamiseksi ja alueella liikkuvien ihmisten aiheuttamien vahinkojen välttämiseksi tarkoitus sijoittaa tietokonekonttien katoille, mutta konttien todettiin heiluvan niin pahasti, että tästä ideasta luovuttiin. Joka tapauksessa maan tasoltakin takymetreillä oli esteetön näkymä tarkkailemilleen prismoille.

Prismojen ja takymetriensä sijainnit on esitetty kuvissa 31 ja 32.

4.4.4 Painumaletkut

Painumaletkuja oli kolme: letku 1 kulki penkereen sortuman puoleisella juurella penkereen suuntaisesti, letku 2 taivutettiin useaan pengertä vastaan kohtisuoraan linjaan penkereen ja ojan välille ja letku 3 kulki penkereen takapuolella. Letku 3 sijoitettiin penkereen takapuolelle sekä eräänlaiseksi varoitusjärjestelmäksi paikalla liikkuvia työkoneita varten että monitorointikäytön testausta varten: haluttiin tietää, saataisiinko painumaletkulla selkeää dataa tilanteessa, jossa ratapenkereen monitoroinnissa painumaletku asennettaisiin vain yhdelle puolelle penkerettä ja alkava sortuma

kehittyisikin vastakkaiselle puolelle. Penkereen yhteydessä kulkevat letkut asennettiin penkereen harjan taitteiden kohdalle. Kaikki kolme letkua yhdistyivät päästään koealueen eteläpuolelle sijoitettuun öljysäiliöön, jonka kautta myös anturien johdotus vietiin tiedot tallentavalle tietokoneelle.

Penkereen suuntaisessa letkussa 1 oli 28 anturia 3,5 m välein. Letkun ensimmäinen anturi, jota käytettiin kaikkien letkujen referenssianturina, sijaitsi noin 13 m penkereen siilon puoleisesta päästä.

Letkussa 2 oli antureita vain niissä osissa, jotka kulkivat pengertä vastaan koh-tisuorassa. Näissä kolmessa osassa oli penkereen ja ojan välissä kussakin viisi anturia 2 m välein. Lisäksi letkun loppupää vietiin ojan poikki niin, että ojan toisella puolella oli neljä anturia 2 m välein. Letkussa 2 oli yhteensä 19 anturia.

Penkereen takana kulkeneen letkun 3 päässä oli kuusi anturia 3 m välein niin, että ensimmäinen oli vaunun 2 kohdalla penkereen harjan alla. Toisen ja kolmannen anturin välillä letku taittui penkereeseen nähden kohtisuoraan (toisen ja kolmannen vaunun välistä). Viimeinen anturi oli 10 m päässä penkereen juuresta.

Näiden lisäksi letkujen yhteisessä paisuntasäiliössä oli yksi anturi ilmaan asennettu-na. Tätä anturia käytettiin ilmanpaineen mittaamiseen huokospaineanturien ilmanpainekorjausta varten.

Painumaletkut ja niiden antureiden sijainnit on esitetty kuvissa 31 ja 32.

4.4.5 Maanpaineanturit

Suuret, pystysuuntaista jännitystä mittaavat maanpaineanturit (6 kpl) sijoitettiin rakennettavan penkereen alle, noin 1,6 metrin syvyyteen kuormitustasosta (tasolle +7,45). Anturit asetettiin vaunun 2 siilon puoleisen pään alle 1 m välein niin, että ensimmäinen anturi oli telin lähempänä vaunun keskikohtaa olevan akselin alla ja viimeinen vaunun 1 pään alla. Näin pyrittiin saamaan kuva vaunujen alle syntyvästä kuormitusjakaumasta. Vaihtoehtoisesti olisi voitu tutkia kuormituksen jakautumista ratapölkkyjen alla, mutta tätä ei pidetty stabiliteettilaskennan kannalta kovin merkittävänä, ja tästä olisi myös aiheutunut epävarmuustekijä liukupinnalle jakautuvan kuormituksen arvioinnissa. Sijoittamalla anturit huomattavasti kuormitustasoa syvemmälle voitiin arvioida kuormituksen pituussuuntainen jakautuminen ja suuruus liukupinnalla tarkemmin kuin jos anturit olisi sijoitettu suoraan ratapölkkyjen alle. Maanpaineanturien yhteyteen asennettiin huokospaineanturit (H33...H37) kuivakuoren alapuolelle keskenään samalle korkeudelle (tasolle +5), jotta voitiin seurata huokospaineen kehittymistä suhteessa pystysuuntaiseen maanpaineeseen. Tätä kuitenkin vaikeutti ero huokospaine- ja maanpaineantureiden asennussyvyyksissä, erityisesti siksi että niiden välissä oli kuormaa huomattavasti jakava kuivakuorikerros.

Yhdistetyt huokospaineanturit ja vaakasuuntaiset maanpaineanturit KT1...KT3 asennettiin penkereen juurelle tasoille +3,5, +4,5 ja +5,5 siten, että maanpaineanturi oli pengertä kohti.

Asennettujen maanpaineanturien toteutuneet sijainnit on esitetty kuvissa 31 ja 32.

4.4.6 Liukupinnan havaintoputket

Liukupinnan havaitsemiseen käytetyt putket asennettiin penkereen alareunan ja ojan reunan välille ruudukkoon, jonka jako oli 3 m radan pituussuunnassa ja 3,5 m radan poikkisuunnassa. Ruudukko ulottui koko penkereen pituudelle, eli noin 65 metrin matkalle. Pituussuunnassa putkia oli kolmessa rivissä, ja lisäksi aina palkistojen päiden kohdalla oli poikittaiset linjat, joissa oli viisi putkea penkereen ja ojan välissä. Liukupintaputkia asennettiin inklinometrien lähelle, jotta myös liukupinnan syvyydestä saataisiin eri instrumenttien välistä vertailudataa. Yhteensä putkia oli 76 kappaletta.

Liukupinnan havaintoputkien sijainnit on esitetty kuvassa 31.

4.5 Datat keruu ja seuranta

Huokospaine- ja maanpaineanturien sekä venymäliuskojen analoginen mittausdata kerättiin mittalaittekonttiin sijoitetuilla Agilent 34970A -dataloggereilla (kuva 34), jotka lukivat analogisen mittausdatan ja tekivät sille tarvittavan A/D-muunnoksen. Tämän jälkeen data siirrettiin ja tallennettiin ASCII-tekstitiedostoiksi tietokoneille. Dataloggereita ohjattiin QuickBASICilla tehdyllä mittausohjelmalla, johon oli myös syötetty anturikohtaiset kalibrointikertoimet ja -vakiot. Näin saatiin reaaliaikaista seuranta varten dataa, joka oli suoraan sopivassa yksikössä (kPa, kN). Tarvittaessa data saadaan muutettua takaisin alkuperäisiksi millivolteiksi, kun mittausohjelmassa käytetyt kertoimet ja vakiot tiedetään.



Kuva 34. Kokeessa analogisten anturien lukemiseen käytettyjä Agilent-dataloggereita. Toisen loggerin päällä on kytkentälaatikko, jolla loggeriin voidaan liittää 9-pinnisiä D-liittimiä. Loggerien kanavakortteihin voidaan liittää antureita suoraan vain 25-pinnisillä liittimillä (vasemmanpuoleisen loggerin alla).

Painumaletkun mittaukset voitiin lukea suoraan tietokoneen sarjaportin kautta, sillä siitä luettava data on jo valmiiksi digitaalista (numeerista). Myös tämä data tallennettiin tekstitiedostona tietokoneelle.

Agilentin dataloggereilla luettua mittausdataa sekä painumaletkuja voitiin seurata graafisesti erillisillä seurantatietokoneilla tavallisella taulukkolaskentaohjelmalla, jossa oli datan automaattisen tuonnin mahdollistava toiminto. Kokeen aikana mittaukset luettiin ja tallennettiin yhden minuutin välein. Tiedostot tallennettiin verkkolevylle, josta seurantakoneet lukivat ne langattoman verkkoyhteyden avulla. Verkkolevyn käyttö juontui siitä, että seuranta- ja mittauskoneet haluttiin erottaa fyysisesti (galvaanisesti) toisistaan. Seurantakoneiden dataa näytettiin paikalla olleelle yleisölle lähes reaaliajassa erillisillä näytöillä, jotka saivat käyttösähkösä eri lähteestä ja näin ollen saattoivat olla eri maapotentiaalisissa kuin mittauskoneet. Erottamalla mittaus- ja seurantakoneet toisistaan haluttiin ehkäistä tämän mahdollisen potentiaalieron aiheuttamat ongelmat mittauksissa ja laitteiden toimivuudessa.

Leican takymetrimonitoroinnin data tallennettiin mittaustietokoneeseen, mistä sitä myös voitiin seurata graafisesti reaaliaikaisena Leica GeoMos-ohjelman avulla. Laserkeilaukset tallennettiin keilaimen kiintolevylle, mistä ne siirrettiin erilliselle tietokoneelle käsittelyä varten.

Inklinometriä dataa tallennettiin kokeen aikana 2–3 minuutin välein jokaisen inklinometriputken yhteydessä olleelle tallentimelle. Tallennin lähetti lisäksi ulkoiselle palvelimelle mittausdataa 11 minuutin välein. Tällä palvelimella olevaa dataa voitiin lukea graafisesti FinMeasin internetsivujen kautta. Kokeen aikana inklinometrejä seurattiin yksinomaan tätä kautta.

Osa huokospaine- ja maanpaineantureista (H6, H8, H13, H16, H22, H29, M50) ja venymäliuskoista (siilolta luettuna toisen palkiston liuskat) sekä kaikkia kiihtyvyyssantureita luettiin lisäksi yhden sekunnin välein erillisellä nopealla dataloggerilla (IOtech Wavebook 516), jota ohjattiin DASYlab-ohjelmistolla. Koetta seuranneelle yleisölle näytettäviä kuvaajia varten DASYlabilla pystyi tallentamaan halutut kuvaajat jpeg-kuviksi, joita näytettiin web-selaimella yleisölle. Nopean loggerin mittaamiksi valittiin huokospaineanturit, joiden etukäteen ajateltiin parhaalla todennäköisyydellä sijaitsevan liukupinnalla.

Johtomäärän vähentämiseksi huokospaineanturit, maanpaineanturit ja venymäliuskat liitettiin dataloggereihin 12-parisilla JAMAK-datakaapeleilla, jotka johdettiin ensin penkereeltä ojan reunalle ja ojan reunaa pitkin tietokonekontille. Yhteen kaapeliin voitiin liittää kymmenen eri anturia ja näiden yhteinen syöttöjännite, joka myös mitattiin. Lähtökohtaisesti käytettiin 5V syöttöjännitettä, mutta tähän tuli jännitehäviöitä antureista ja kaapeleista, jolloin todellinen syöttöjännite oli noin 3,8–4,3V kaapelista ja anturiryhmästä riippuen. Kohinan ja muiden häiriöiden vähentämiseksi analogiset mittalaitteet maadoitettiin mittalaittekontin metallikuoreen.

Koska tallennetuissa mittaustiedostoissa data on muodoltaan pelkkiä lukuja sarakkeissa, tarkka kirjanpito oli välttämätöntä, jotta tietty datasarake voitiin yhdistää tiettyyn anturiin. Tämä tehtiin niin, että jokainen datakaapeli nimettiin kirjaimilla, ja jokainen tietyn datakaapelin tiettyyn johdinpariin liitetty anturi kirjattiin muistiin. Käytetyn datakaapelityypin johdinparit ovat valmiiksi numeroituna 1...12, jolloin yksittäiselle anturille voitiin antaa kaapelin ja johdinparin mukainen tunnus. Kalibrointia var-

ten piti myös tietää jokaisen anturin sarjanumero. Esimerkiksi huokospaineanturi H16 (sarjanumeroltaan 154) oli liitetty paikkaan C8 (C-kaapelin kahdeksas johdinpari).

Datakaapelit liitettiin loggereihin 25-pinnisillä liittimillä siten, että yhteen liittimeen liitettiin yhden kaapelin kaikki kymmenen anturia. Syöttöjännitteet kerättiin mittaus- ta varten omaan, erilliseen liittimeen. Anturit yritettiin mahdollisuuksien mukaan liittää johtimiin suunnitelmien mukaisessa numerojärjestyksessä (esimerkiksi H1, H2, H3 jne.). Johtimet liitettiin dataloggerien liittimiin samassa numerojärjestyksessä. Lisäksi tuli pitää kirjaa siitä, missä järjestyksessä liittimet (kaapelit) liitettiin dataloggereihin. Tämä kaikki vaati ehdotonta huolellisuutta, sillä prosessissa oli huomattavan monta sekaannuksille altista vaihetta.

5 Kokeen suoritus

5.1 Toimenpiteet työmaalla ennen koetta

Koealueelle asennettiin ensimmäisenä instrumenttina huokospaineanturi kesäkuussa 2009. Tällä haluttiin kokeilla anturin asennustekniikkaa, testata anturin toimivuutta kenttäolosuhteissa ja mitata pohjavedenpinnan tasoa.

Sorrutusalue tasattiin, pintamaa poistettiin, liukupintaa ohjaava oja kaivettiin ja sormutan puoleisen raiteen vanhat kiskot ja pölkyt poistettiin elokuussa 2009 (kuva 35). Varastokentän puoleinen raide jätettiin paikalleen.



Kuva 35. Koealue pintamaan ja kasvillisuuden poiston ja ojan kaivuun jälkeen siilolta päin kuvattuna. "Ruohotuppo" kuvan keskellä on aiemmin asennettu huokospaineanturi, jonka ympäriltä maata ei ole poistettu. Täytön ja harmaan saven raja näkyy selkeästi ojaluiskassa.

Liukupinnan tarkkailuputket asennettiin syyskuun alussa. Ennen asennusta täytön lävitse painettiin alkureiät kaivinkoneen kauhaan puristimella kiinnitetyn, tätä tarkoitusta varten valmistetun teräspiikin avulla. Asennuksessa käytettiin apuna henkilönostinta, jotta asennustankoa päästiin painamaan suoraan ylhäältä käsin. Putkia asennettiin lopulta yhteensä 76 kappaletta, joista viidessä tapauksessa joko asennuksessa käytetty terästanko rikkoi putken tai putki katkesi liiallisen vetojännityksen takia. Koska asennustanko oli kaikissa rikkoutumistapauksissa savinen vain alle metrin pituudelta kärjestään, näiden putkien oletettiin olevan ehjiä ja käyttökelpoisia aivan alapäättään lukuun ottamatta. Kaikki putket oli katkaistu ennen asennusta noin 7 m pituisiksi. Suurin osa putkista saatiin painettua siltti/hiekkakerrokseen saakka, 6–7 m

syvyyteen. Vain muutama putki kaivetun ojan reunalla olisi voitu painaa tätäkin syvemmälle. Tätä ei kuitenkaan pidetty tarpeellisena, sillä liukupinta ei ojan läheisyydessä kulkisi kuitenkaan niin syvältä. Asennettaessa huomattiin, että putkea leveämmästä kärjestä huolimatta putket venyivät hieman maahan painettaessa, sillä alun perin asennustankoa hieman lyhyemmät putket olivat maahan painamisen jälkeen venyneet asennustankoa pidemmiksi.

Liukupintaputkien yläosa ankkuroitiin asennusreikään paisuvalla uretaanivaahdolla. Jotta putki ei pääsisi taipumaan haitallisesti mutkalle yläpäästään ennen uretaanin kuivumista, jokaisen putken päähän asetettiin noin 50 cm pitkä, päästään taivutettu terästanko tai kupariputki. Nämä tangot ja putket jätettiin myös paikalleen asennuksen jälkeen, jotta liukupintaputkiin ei valuisi maa-ainesta, joka voisi mahdollisesti tukkia niitä. Vaahdon kovetuttua jokaisen putken juurelle painettiin pienet ruuvit siirtymän mittausta varten.

Painumaletkut asennettiin syyskuun puolivälissä. Anturit oli valmisteltu ja sijoitettu letkuihin jo TTY:llä. Letkut kuljetettiin työmaalle kelalla, josta ne voitiin helposti vetää suoriksi. Letkuille kaivettiin kaivinkoneella noin 30–50 cm syvät urat, joihin ne asennettiin (kuva 36). Urat täytettiin samoilla kaivumassoilla (hiekkaa ja silttistä hiekkää). Letkut täytettiin öljyllä imemällä niihin alipaine paisuntasäiliön kautta ja kaatamalla hydraulikkaöljyä toisesta päästä. Letkujen sijainnit mitattiin VRS-GPS -laitteella.



Kuva 36. Painumaletkujen asennusta. Kuva Kauko Sahi.

Pian painumaletkujen asentamisen jälkeen rakennettiin noin 35 cm korkea murskepenger 0–16 mm kalliomurskeesta. Penkereen tiivistykseen käytettiin 400 kg maantivistäjää. Heti penkereen teon jälkeen eräs toinen toimija teki työmaalla siipikairauksia kuivakuoren lujuuden selvittämiseksi. Inhimillisen virheen takia penkereen takapuolelle asennettuun painumaletkuun osuttiin yhden kairauspisteen alkureikää pora-

nessa niin, että letku katkesi ja poraan kietoutui viisi painuma-anturia, jotka rikkoutuivat. Vaurioitunut painumaletku saatiin lopulta korjattua lähes alkuperäiseen kuntoonsa, mutta rikkoutuneiden paineanturien tilalla jouduttiin käyttämään TTY:llä valmiina olleita aiempaa versiota olevia antureita, joissa ei ollut usean mittauksen keskiarvon laskentatoimintoa. Maahan valui joitakin litroja biohajoavaa hydrauliiikkaöljyä, joka oli letkun korjaukseen mennessä (noin kaksi viikkoa vaurion jälkeen) hajonnut niin hyvin, että sitä ei aistinvaraisesti havaittu maasta lainkaan.

Inklinometrit (kuva 37), maanpaineanturit ja suurin osa huokospaineantureista asennettiin lokakuun alussa. Inklinometriputket asensi aliurakoitsija ja inklinometrianturit asensi laitetoimittaja.



Kuva 37. Juuri asennettuja inklinometriputkia. Kuvassa on näkyvissä varsinaisten inklinometriputkien noin 2 m pitkät suojaputket, joihin on kiinnitetty tallenninyksiköiden laatikot. Inklinometrit ankkuroitiin putkiin hiekalla, jonka tiivistämiseen käytettiin vettä. Kuva Kauko Sahi.

Kuusi maanpaineanturia asennettiin kaivinkoneella tehtyyn, noin korkeustasossa +7,45 m (syvyys penkereen yläpinnasta noin 1,6 m) olevaan kaivantoon penkereen keskilinjan alle, pituussuunnassa metrin välein (kuva 38). Maanpaineantureiden väleihin asennettiin huokospaineanturit saveen korkeustasolle +5 m, mikä on noin 4 m syvyydellä penkereen yläpinnasta. Nämä huokospaineanturit asennettiin ilman jäykkää vartta niin, että ne pääsisivät liikkumaan melko vapaasti saveen mukana suurilla muodonmuutostasoilla.



Kuva 38. Maanpaineanturin asentamista penkereen alle. Anturin johto on suojattu taipuisalla sähköputkella. Kuva Kauko Sahi.

Muut huokospaineanturit asennettiin kuvan 33 mukaisesti. Suurin osa asennettiin ”vapaasti kelluvina”, eli niihin ei jätetty jäykkää vartta asennuksen jälkeen. Jäykällä varrella asennettiin anturit H1...H5, H10...H11, H19...H20, jotka asennettiin lähimmäs maanpintaa ja näin ollen eivät todennäköisimmin sijoittuisi liukupinnan alle. Lisäksi ojan reunalle sijoitetut anturit H26...H31 ja koealueen ulkopuolelle sijoitettu H32 asennettiin jäykällä varrella. Ojan reunan lähelle suunnitellun linjan huokospaineanturit H26...H30 asennettiin noin viikkoa ennen koetta, sillä antureita oli pitänyt tilata lisää ja nämä eivät vielä olleet lokakuun alussa saapuneet. Samassa yhteydessä asennettiin myös vaakasuuntaiset maanpaineanturit ja näiden yhteydessä olleet huokospaineanturit penkereen juurelle. Penkereen kohdalle tehty asennuskaivanto ja auki kaivettu pengeri tiivistettiin uudelleen maantiivistimellä.

Huokospaineanturit asennettiin painamalla niitä varresta maahan käsivoimin putki-
pihtien avulla. Täytön ja kuivakuoren läpäisevä alkureikä tehtiin samalla kaivinkoneen kauhaan kiinnitettävällä teräspiikillä, jota käytettiin liukupintaputkien asennuksessa. Lähelle kuivakuorta asennettavien huokospaineantureiden asennuksessa tuli olla hyvin varovainen, jotta piikkiä ei olisi painettu anturin asennustasolle tai sitä syvemmälle, mikä olisi varmasti vaikuttanut anturin mittauksiin.

Huokospaineanturien ilmaukseen työmaalla käytettiin samaa messinkiputkea kuin laboratoriotestauksessa. Putki täytettiin vedellä, minkä jälkeen siihen imettiin tyhjiö kannettavalla tyhjiöpumpulla (kuva 39). Anturit pidettiin putkessa veden alla aivan asennukseen asti, jolloin ilmausputki poistettiin ja anturi työnnettiin välittömästi maahan. ”Kirveenterien” huokospaineanturit ilmattiin ennen asennusta asettamalla anturit kokonaisuudessaan veden alle alipainesäiliöön.



Kuva 39. Huokospaineanturin ilmaus työmaalla. Kuvassa paine ei vielä ole laskeutunut täyteen tyhjiöön. Kuva Kauko Sahi.

Urakoitsija asensi ratapölkkyt (BP84) ja kiskot (K60) sekä rakensi penkereen lopulliseen muotoonsa noin viikkoa ennen koetta. Pölkkyjen välit täytettiin ja kiskot tuettiin samalla 0–16 mm kalliomurskeella josta muu pengeri oli tehty. Pölkkyjen välit ja kiskojen tuenta tiivistettiin noin 100 kg pyöreälevyisellä maantiivistimellä. Tämän jälkeen palkistot asennettiin kiskoille, venymäliuskat liimattiin poikittaisiin palkkeihin ja kalibroitiin tunkilla. Kontit nostettiin ajoneuvonosturilla palkistojen päälle välittömästi tämän jälkeen. Palkistoihin hitsattiin pystysuorat lattaraudat estämään niiden ennen aikaista liukumista kiskoilta, ja kontit kiinnitettiin samasta syystä palkkeihin pienillä hitseillä, joiden ajateltiin pettävän konttien kaatuessa.

5.2 Kokeen kulku

Varsinainen sorrutuskoe aloitettiin tiistaina 20.10.2009 (kuva 40). Tällöin asennettiin viimeiset anturit (kontteihin kiinnitetyt kiihtyvyyssanturit) ja prismat, pystytettiin takymetrit ja laserkeilausjalustat, pystytettiin ja mitattiin laserkeilauksen tähysmerkit, viimeisteltiin anturien kytkentöjä sekä aloitettiin kaikki mittaukset. Kaikkien mittaukseen liittyvien tietokoneiden kellot synkronoitiin mittausten aikatietojen vastaavuuden varmistamiseksi. Konttien yläkulmiin kiinnitettiin pitkät ketjut, joilla ne vedettäisiin alas siinä tapauksessa, että ne eivät kaatuisi sortuman yhteydessä. Keskiiviikkona paikalla ollutta yleisöä varten rakennettiin teltta metallipajan varastokentälle. Ojaa alettiin tyhjentää vedestä uppopumpulla. Oja ei missään vaiheessa kokeen aikana ollut täysin vedestä tyhjä johtuen pumpun rakenteesta, mutta vapaata vettä ei ojassa silti ollut 10–20 cm enempää kokeen aikana.



Kuva 40. Koealue ennen kuormauksen aloittamista. Datakaapelit erottuvat kuvassa valkoisina johtoina.

Konttien kuormaamiseen käytetty täyttömateriaali oli aistinvaraisesti arvioituna kärkeää hiekkaa, jossa oli seassa joitakin suurempia kiviä. Ennen kuormasta täyttömateriaalista tehtiin Troxler-tiiveysmittaukset niin, että sitä tiivistettiin vastaamaan suunnilleen konttiin pudotetun aineksen tiiveyttä, mitä oli kylläkin erittäin vaikeaa arvioida tarkasti. Joka tapauksessa jo hyvin kevyesti tiivistetylle täyttömateriaalille saatiin tilavuuspainoksi noin 19 kN/m^3 , mikä oli huomattavasti enemmän kuin etukäteen osattiin arvioida. Myös rakennetusta penkereestä ja täyttömaasta sen ympäriltä tehtiin Troxler-mittaukset (Liite 4).

Konttien kuormaus suoritettiin noin aikavälillä ti 20.10. klo 16 – ke 21.10. klo 19:30 (kuva 41, taulukko 2). Kontit kuormattiin tiistai-illan aikana niin, että keskimmaisissa konteissa ollut murskemäärä vastasi 24 kPa pintakuormaa. Kuormaus eteni hieman odotettua nopeammin. Mittauksissa havaittiin kuormituksen aikana ja sen jälkeen tasaista, mutta suuruudeltaan melko pientä huokospaineen kasvua: penkereen alla olleilla huokospaineantureilla mitattiin noin kolmen kilopascalin paineennousu. Penkereen alla olleet maanpaineanturit mittasivat huomattavasti suurempia muutoksia, noin $10\text{...}25 \text{ kPa}$. Maanpaineantureiden keskinäiset erot olivat tässä vaiheessa odotettuja, sillä kalibrointien perusteella niiden herkkyyks pienillä kuormilla vaihteli huomattavasti. Kalibrointien perusteella ne toimivat kuitenkin hyvin lineaarisesti suurilla kuormilla. Mitatut siirtymät olivat erittäin pieniä, paitsi kontteihin kiinnitetyillä prismoilla, jotka painuivat hieman aina konttia kuormattaessa. Alue myös laserkeilattiin heti kuormituksen alettua sekä muutamia kertoja kuormauksen aikana.



Kuva 41. Konttien kuormasta hihnakuuljettimella. Pällekkäisten konttien väliin jäävä rako on tukittu paisuvalla uretaanimassalla.

Työmaalle palattiin keskiviikkoamuna 21.10 klo 7 jälkeen. Huokospaineiden, maanpaineiden, venymäliuskosten ja kiihtyvyyssantureiden mittaus oli keskeytynyt laitevian vuoksi edellisiltana klo 18:47 heti työryhmän poistuttua työmaalta, mutta mittausta jatkettiin heti aamulla ennen kello puoli kahdeksaa. Mittausten alettua uudelleen havaittiin, että yön aikana mitausten ollessa keskeytyneenä tapahtuneet huokospainemuutokset olivat olleet hyvin pieniä. Keskeytyksestä johtuen tässä työssä esitetyissä mittauskuvaajissa väli 20.10. klo 18.47 – 21.10 klo 7:25 on interpoloitu lineaarisesti näiden pisteiden väliin.

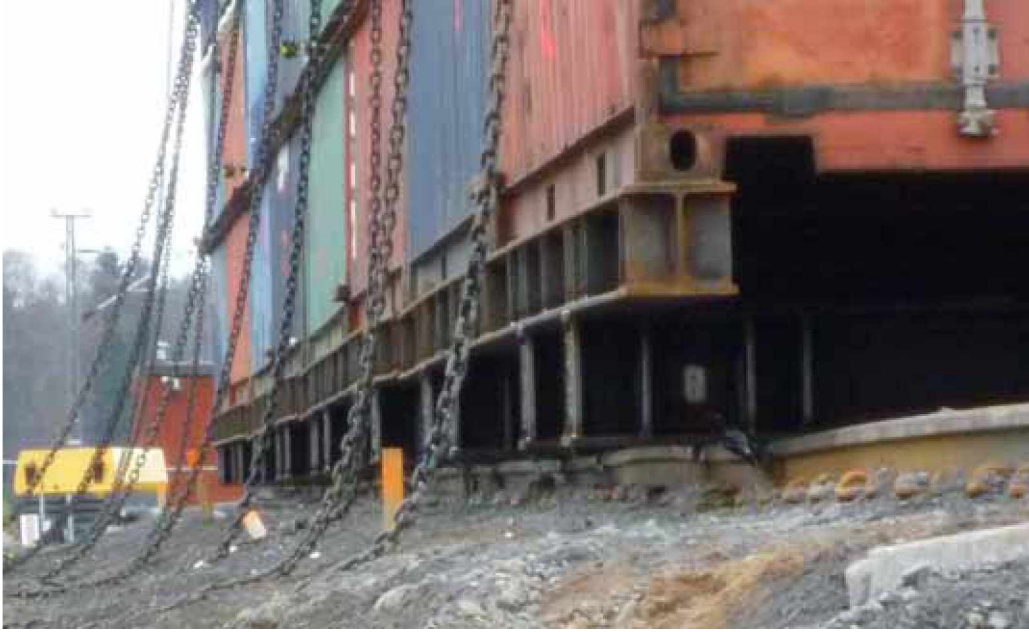
Takymetrimonitorointi oli jatkunut keskeytyksettä koko yön ajan (kuva 42). Näissä mittauksissa oli todettu koko konttien ja ojan välisen alueen lähteneen liikkumaan ojaa kohti melko tasaisella vauhdilla noin kello 6 alkaen. Tämä liike oli hyvin hidasta, mutta selkeästi mitattavissa.



Kuva 42. Leica TM30-takymetri. Kuva Kauko Sahi.

Kuormausta jatkettiin noin kello 8:15. Päivän kuluessa mitattiin huokospaineissa tasaista kasvua, joka oli kuitenkin hyvin selvästi kuormituslisäystä hitaampaa. Takymetriä mittaama vaakasuuntainen liike ojaa kohti jatkui hyvin tasaisena. Painumat penkereen kohdalla kasvoivat sekä painumaletkulla että takymetreillä mitattuna tasaisesti kuormituksen aikana. Lisäksi molemmilla mittaustavoilla nähtiin vastaavaa maanpinnan nousua lähellä ojan reunaa. Laserkeilauksia tehtiin kuormituskierrosten välisillä tauoilla.

Venymäliuskoilla tehty konttien painon mittaus osoittautui ongelmalliseksi: vaikka mittaus toimikin aluksi varsin hyvin, kokeen aikana useassa venymäliuskassa tapahtui äkillisiä, jopa satojen kilonewtoneiden nousuja mitatussa kuormituksessa. Tämän ajateltiin johtuvan siitä, että penkereessä tapahtui painumia ja muita muodonmuutoksia (melko hyvästä mitatusta tiiveydestä huolimatta) ratapölkkyjen alla niin, että pitkittäiset palkit taipuivat ja niihin muodostui puristusjäännityksiä ja vääntöä (Laaksonen 2009). Sekä palkistossa että kiskoissa oli silminnähtäviä muodonmuutoksia jo ennen kuormituksen puoltaväliä (kuva 43), mutta nämä muodonmuutokset pysyivät luultavimmin kimmoisella alueella, ts. palkisto ei myötänyt ennen sortumaa ainakaan merkittävässä määrin.



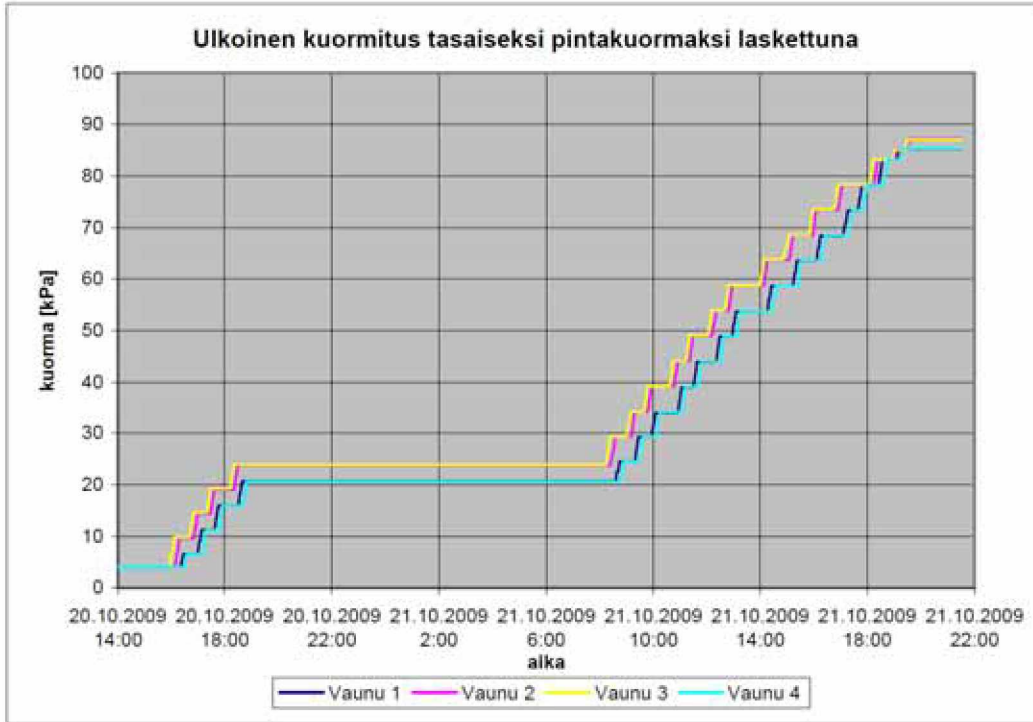
Kuva 43. Palkkien ja kiskojen muodonmuutoksia kuormauksen loppuvaiheessa. Pitkittäiset palkit ovat taipuneet päistään alaspäin ja kiskot ovat painuneet kasaan poikittaisten palkkien alla. Kuva Kauko Sahi.

Kuormaus sujui lähes suunnitellulla tavalla (katso kohta 4.2). Yhteen 60 t kuormauskierrokseen kului aikaa keskimäärin 40 minuuttia. Kokeen loppupuolella, kun keskimmissä vaunuissa kuorma oli jo 78 kPa, päätettiin koetta vauhdittaa nostamalla reunimmaisten vaunujen kuormaa keskimmäisten vaunujen tasolle. Lopulta kontit kuormattiin aivan täyteen – jopa niin, että lopuksi kukkuroillaan olevia kontteja täytettiin hiekkakasojen huippujen väleihin. Konttien täyttämistä lisäksi vedellä harkittiin, mutta tämän arvioitiin kuitenkin heikentävän tietoa todellisesta kuormasta niin paljon, että aikeesta luovuttiin. Käytettävissä olleen hiekkakuorman uskottiin lopulta riittävän. Kuormaus lopetettiin 21.10 kello 19:34, jolloin keskimmissä konteissa ollut kuorma vastasi kontit ja palkit mukaan lukien 87 kPa junakuormaa.

Taulukossa 2 on esitetty vaunukohtaiset kuormat kuormauspöytäkirjoista laskettuna (paino jaettuna 31,25 m² alalle) ja kuvassa 44 vastaavasti vaunujen kuormituskuvaajat ajan funktiona.

Taulukko 2. Vaunukohtaiset kuormat kuormituskerrosten lopussa.

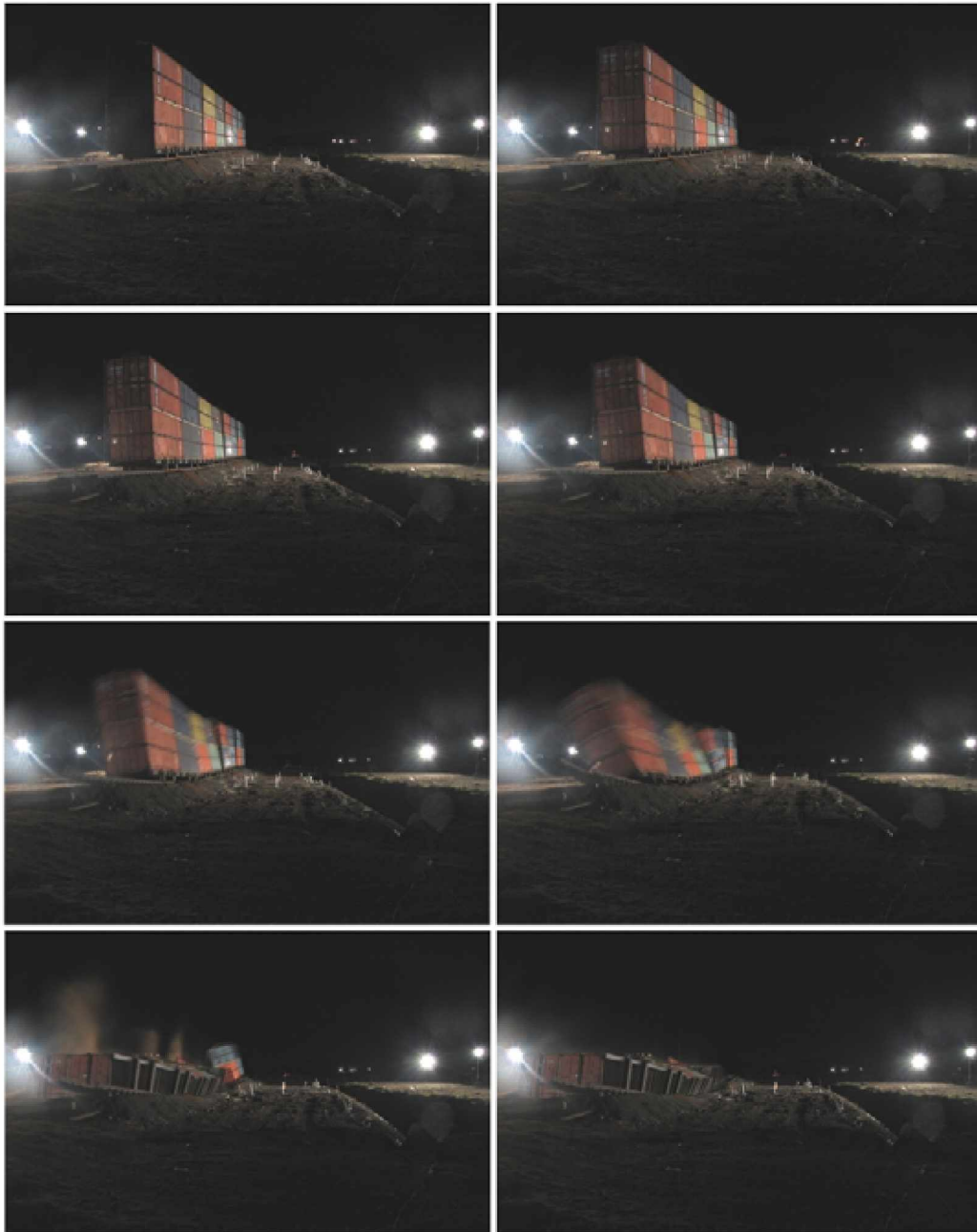
kuormauskerroksen kesto	ulkoinen kuorma [kPa]			
	vaunu 1	vaunu 2	vaunu 3	vaunu 4
lähtötilanne	4	4	4	4
20.10.2009 15:55–16:35	6,6	9,6	9,8	6,5
16:41–17:18	11,3	14,3	14,6	11,2
17:20–17:56	15,9	19,1	19,3	15,9
18:13–18:49	20,7	23,8	23,9	20,6
21.10.2009 8:14–8:53	24,6	29,5	29,4	24,5
9:00–9:36	29,3	34,3	34,3	29,3
9:39–10:14	34,0	39,2	39,2	34,2
10:37–11:11	39,0	44,1	44,2	39,1
11:13–11:47	43,9	49,0	49,1	44,0
12:04–12:39	48,8	53,9	53,9	48,9
12:41–13:15	53,7	58,8	58,8	53,8
14:00–14:35	58,7	63,7	63,8	58,7
14:52–15:31	63,6	68,5	68,6	63,6
15:51–16:26	68,4	73,4	73,5	68,5
16:46–17:27	73,3	78,3	78,4	73,4
17:39–17:59	78,2	78,3	78,4	78,3
18:05–18:46	83,1	83,2	83,2	83,2
18:56–19:19	85,3	85,2	85,1	85,3
19:26–19:34	85,3	87,3	87,1	85,3



Kuva 44. Vaunukuormat tasaiseksi pintakuormaksi laskettuna, mukana konttien ja palkistojen omapainot.

Vasta kuormauksen loppupuolella (21.10 noin klo 19 alkaen, kuorma 85 kPa) mitatuissa paineissa ja siirtymissä alkoi selvästi näkyä laadullista muutosta: kaikki paineet ja siirtymät alkoivat kasvaa kiihtyvällä vauhdilla. Tällöin alkoi varmistua, että pengertodella sortuisi saatavilla olleella kuormalla. Mittauksia seuraamalla ei kuitenkaan voitu ennustaa sortuman hetkeä ennen kuin juuri ennen sortumaa, jolloin paineet ja siirtymät kasvoivat jo kymmeniä kertoja aiemmin päivän aikana havainnoitua nopeammin. Aivan ennen sortumaa myös konttien kiihtyvyysantureilla mitattu kallistuskulma kasvoi huomattavasti. Eräs huomionarvoinen seikka oli, että viimeisinä sortumaa edeltäneinä tunteina useilla penkereen alla sijainneilla huokospaineantureilla mitattiin huokospaineen laskua.

Penger sortui lopulta 21.10.2009 klo 21:28, 87 kPa ulkoisella kuormalla (kuva 45). Sortumaa edeltäneinä hetkinä vaunun 2 kontit olivat jo silminnähden kallistuneet ojasta pois päin ja palkisto oli keskiosistaan selvästi painunut. Itse sortuma tapahtui kolmella etelän puoleisella vaunulla noin viiden sekunnin aikana, jolloin kontit painuivat alas noin metrin verran alkaen vaunuista 2 ja 1. Samalla kontit kallistuivat ja kaatuivat maahan ojasta pois päin. Vaunun 4 kontit kaatuivat suoraan kyljelleen muutamaa sekuntia muita myöhemmin, painumatta juurikaan alaspäin ennen kaatumistaan. Samalla kun kolme ensimmäistä vaunua alkoivat painua ja kaatua, keskimmäisten vaunujen tasolla maa penkereen ja ojan välissä nousi ja pullistui ojaa kohti. Palkisto pysyi konteissa kiinni (kuva 46).



Kuva 45. Koepenkereen sortuminen. Alkuperäiset kuvat Tim Länsivaara.



Kuva 46. Koepenger sortuman jälkeisenä päivänä.

Sortuman jälkeen arvioitiin tilanteen turvallisuutta. Koska kontit olivat jo kaatuneet, rakenteiden alle jäämisen vaara oli pienentynyt huomattavasti. Takymetreillä, painumaletkuilla ja inklinometreillä ei enää havaittu liikkeitä, joten koehenkilökunta saattoi mennä alueelle varovaisesti heti sortuman jälkeen tekemään havaintoja. Palkistot olivat jäänyt konttien pohjaan kiinni hitsausten suhteellisesta pienuudesta huolimatta, ja niiden äkillinen irtoaminen oli suurin yksittäinen turvallisuusriski alueella sortuman jälkeen.

Kuorman ja konttien kallistuskulman mittaus lopetettiin sortuman jälkeen tarpeettomana. Myös takymetrimonitorointi lopetettiin, sillä siirtymiä ei enää havaittu ja suurin osa prismoista oli joko tuhoutunut tai liikkunut niin paljon, että niitä ei enää voitu mitata. Esimerkiksi kuormausalueen puolelta jokainen prisma oli jäänyt konttien ja hiekan alle lukuun ottamatta varastokentän kulmassa ollutta prismaa P27. Huokospaine- ja maanpaineanturit jätettiin mittaamaan, mutta nyt mittaus tallennettiin enää kymmenen minuutin välein. Myös painumaletkut ja inklinometrit jätettiin mittaamaan kokeen jälkeen.

Koetta seuranneena päivänä paikalla käytiin luotimassa liukupintaputket, laserkeilaamassa sortuma ja tekemässä visuaalisia havaintoja. Viimeinen laserkeilaus tehtiin samoilta neljältä pisteeltä kuin aikaisemmatkin keilaukset, mutta lisäksi käytettiin kahta uutta keilauspistettä ojan takaa alueen keskiosista, jotta syntyneet suuret muodonmuutokset yksityiskohtineen saatiin keilattua kattavasti. Liukupinnan päiden muoto voitiin nähdä hyvin jopa maan pinnalle syntyneiden halkeamien avulla.

Sortuma lähti liikkeelle ratapölkkyjen takaa kuormausalueen puolelta. Penger oli painunut alas erityisesti toisen vaunun kohdalta, kun taas neljännen vaunun kohdalla painuma oli muihin verrattuna hyvin vähäistä. Maahan oli haljennut pituussuuntainen

railo penkereen juureen (kuva 47 vasemmalla), jossa oli suuria painumaeroja penkereen ja sen viereisen alueen välillä. Tämä railo kääntyi ojaa kohti molemmista päistään, sekä ensimmäisen että neljännen vaunun puolivälin tienoilla. Maahan oli haljennut myös suuria poikittaisia halkeamia lähelle ojaa, missä maan kohoaminen oli suurinta (kuva 47 oikealla).



Kuva 47. Vasemmalla penkereen juureen haljennut railo, oikealla ojaluiskaan muodostunut poikittainen halkeama (toisen ja kolmannen vaunun välin tasalla).

Liukupinnan passiivipää sijoittui ojan pohjan penkereen puoleiseen taitteeseen (kuva 48). Suurimmat siirtymät sekä pysty- että vaakasuunnassa tapahtuivat vaunun 2 kohdalla.



Kuva 48. Liukupinnan passiivipää ojan pohjalla ojan takaa kuvattuna. Kuvan vasemmassa yläkulmassa näkyy maanpinnan nousu koealueen keskiosassa.

Maaperässä tapahtuneita muutoksia tutkittiin kokeen jälkeen myös uudella CPTu-kairauksella, joka tehtiin joulukuun 2009 alussa (katso kohdat 6.9 ja 6.10 sekä liite 6). Kairauspisteet penkereen ja ojan välillä (6 kappaletta) olivat lähestulkoon samoissa kohdissa kuin koetta edeltäneessä kairauksessa, jolloin voitiin verrata sortumassa tapahtuneita muutoksia. Lisäksi penkereen kohdalta tehtiin kolme kairausta.

6 Mittaustulokset

6.1 Huokospaine- ja maanpaineanturit

Kuvissa 49...53 on esitetty huokospaineiden kehittyminen ajan suhteen kokeen aikana. Ylipaineen nollatasoksi on valittu kuormituksen aloitushetki 20.10 kello 15:57. Anturit on jaoteltu kuvaajiin poikkisuuntaisen sijaintinsa mukaan. Penkereen alla olleet anturit on kuvissa jaettu vielä kahteen osaan niin, että eri syvyyksillä olleet anturit H1...H9 ovat eri kuvaajassa kuin keskenään samalla syvyydellä olleet H33...H37, jotka ovat samassa kuvaajassa suurten maanpaineantureiden kanssa. Huokospaineantureille on tehty ilmanpainekorjaus painumaletkun anturin numero 48 (ilmassa letkujen paisuntasäiliössä) mittausten perusteella kappaleessa 4.3.1 esitetyllä tavalla.

Ulkoisen kuorman muutoksen funktiona piirrettyssä kuvaajassa (kuva 54) alkutilanne on hetki ennen hiekan kuormauksen alkua, eli kuorman muutoksen arvot eivät sisällä palkiston ja konttien osuutta. Antureille H1...H9 käytetty ulkoisen kuorman muutos on laskettu näiden kohdalla olleen vaunun 3 kuormauskirjanpidon mukaisesta kuormituksesta. Muilla antureilla kuormituksen muutos on laskettu vastaavasti näiden kohdalla olleen vaunun 2 kuormituksesta. Kuvassa 55 on vastaavat kuvaajat penkereen reunan alla sijainneista antureista H13, H16 ja H17. Nämä anturit valittiin kuvaajaan niiden huomionarvoisuuden vuoksi: H13 näytti melko aikaisin kiihtyvää huokospaineiden kasvua, ja anturit H16 ja H17 näyttivät suurinta kasvua loppuvaiheessa ennen sortumaa.

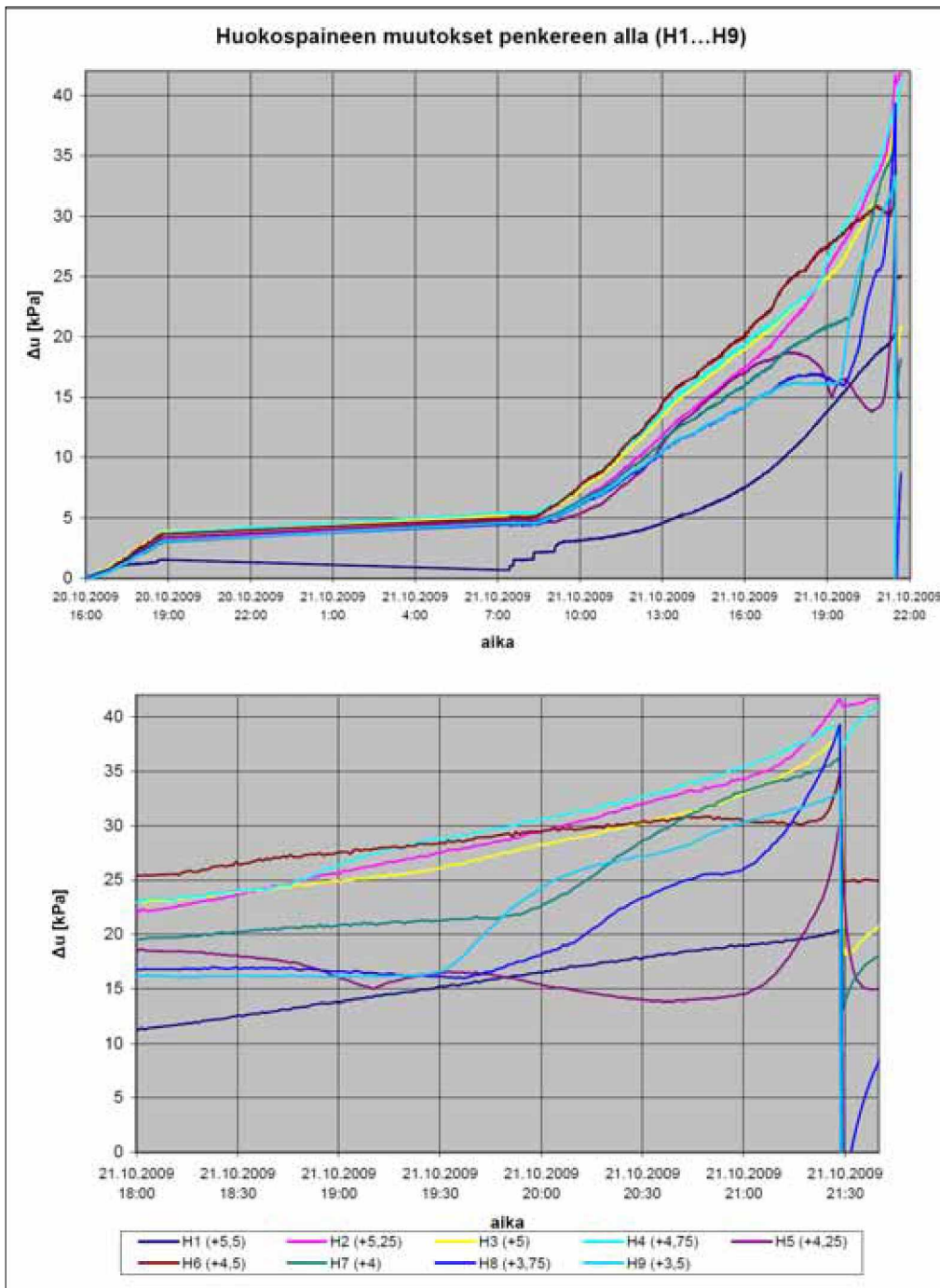
Kokeen jälkeen mitatut huokospaineet jäivät suunnilleen sortuman yhteydessä saavutetuille tasoille laskematta paljoakaan. Penkereen alle jääneillä antureilla tämä johtui osaksi sortuman yhteydessä tapahtuneesta painumisesta ja näin ollen kasvaneesta vapaasta vesipatsaasta anturin päällä, mutta muilla antureilla tämä korkea huokospaine oli todellista.

On huomattava, että huokospaine- ja maanpainemittaukset olivat ohjelmistoviasta johtuen kokonaan pysähdyksissä 20.10. kello 18:47 – 21.10. kello 7:25 välisen ajan. Oheisissa kuvaajissa kyseinen väli on interpoloitu lineaarisesti näiden pisteiden välille. Muitakin lyhyempiä, maksimissaan puolen tunnin katkoksia oli kokeen aikana muutamaan otteeseen, mutta näillä nopeasti havaituilla ja korjatuilla virheillä ei ollut merkitystä mittausten kokonaisuuden onnistumisen kannalta.

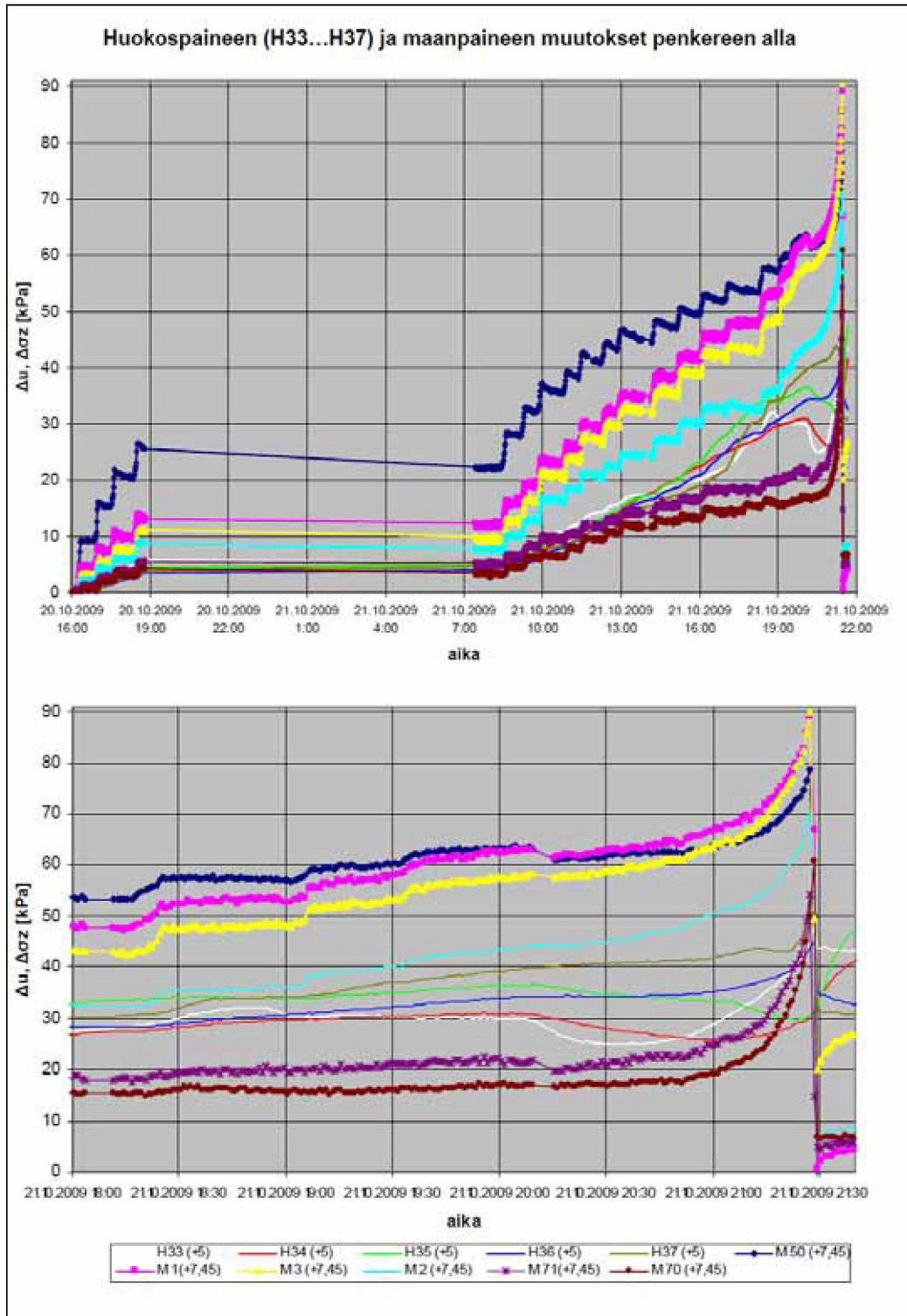
Huokospaine kuvaajien perusteella huonosti toimineita ja mahdollisesti viallisia antureita olivat H1 ja H11 (lievästi epäsäännönmukaisia mittaustuloksia) sekä H28 ja H30 (epäilyttävää paineiden laskua kokeen alkuvaiheista saakka). Muut huokospaineanturit toimivat ilmeisen hyvin.

Noin 1,6 m kuormitustason alapuolella (tasolla +7,45) sijainneissa maanpaineantureissa kuorman jakautuminen akselien alla näkyi hyvin: akselien alla sijainneet anturit mittasivat suurempia maanpaineen nousuja kuin vaunujen 1 ja 2 välillä sijainneet anturit M70 ja M71. Huokospaineissa tätä eroa ei ollut havaittavissa samassa määrin, vaan kaikki noin tasolla +5 sijainneet anturit (H2...H4, H33...H37) mittasivat josta-kuinkin samoja huokospaineen muutoksia pituussuuntaisesta sijainnista riippumatta.

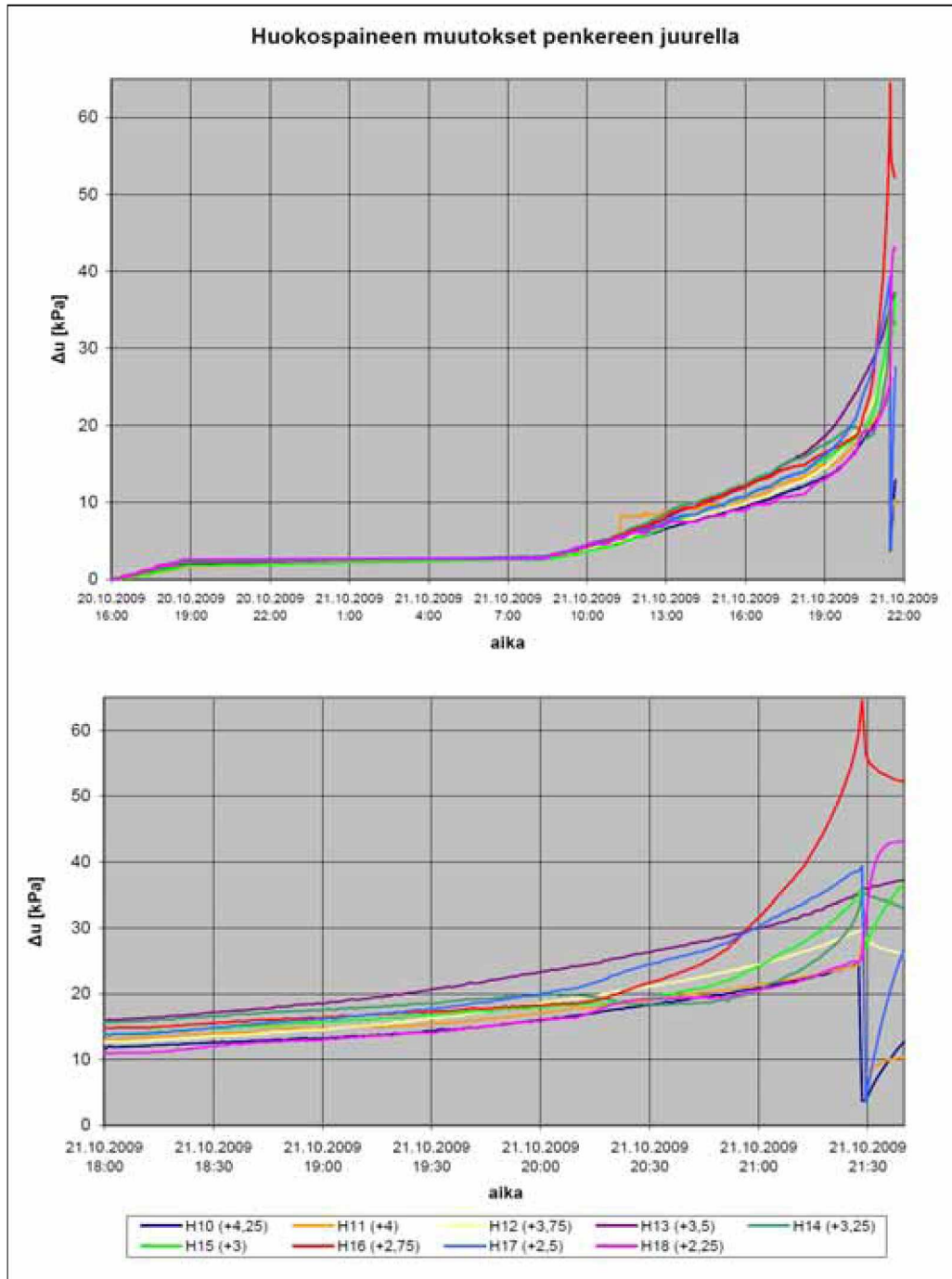
Vaakasuuntaiset maanpaineanturit ja näiden yhteydessä olleet huokospaineanturit toimivat huonosti. Vaikka anturit oli kalibroitu ennen koetta, mittaustuloksista kävi ilmi, että ainakin antureiden KT1 ja KT3 mittauksissa nollakohtat (sekä huokospaine että maanpaine) poikkesivat huomattavasti määritetystä. Lisäksi antureiden KT1 ja KT3 mittaukset ovat yleisemminkin niin epäsäännönmukaisia ja epämääräisiä (mittaustulokset ”vaelsivat” ylös ja alas, vaikka yleinen trendi olikin suunnilleen uskottava), että niitä ei voi pitää käyttökelpoisina. Sen sijaan anturin KT2 mittaustulokset ovat ainakin muodoltaan siistejä. Anturin mittaama huokospaine on myös yhdenmukainen lähes samalla tasolla penkereen juuressa sijainneen anturin H10 kanssa. Kuvassa 56 on anturin KT2 mittaamien paineiden muutos hetken 20.10. klo 15:57 (kuormituksen alku) suhteen.



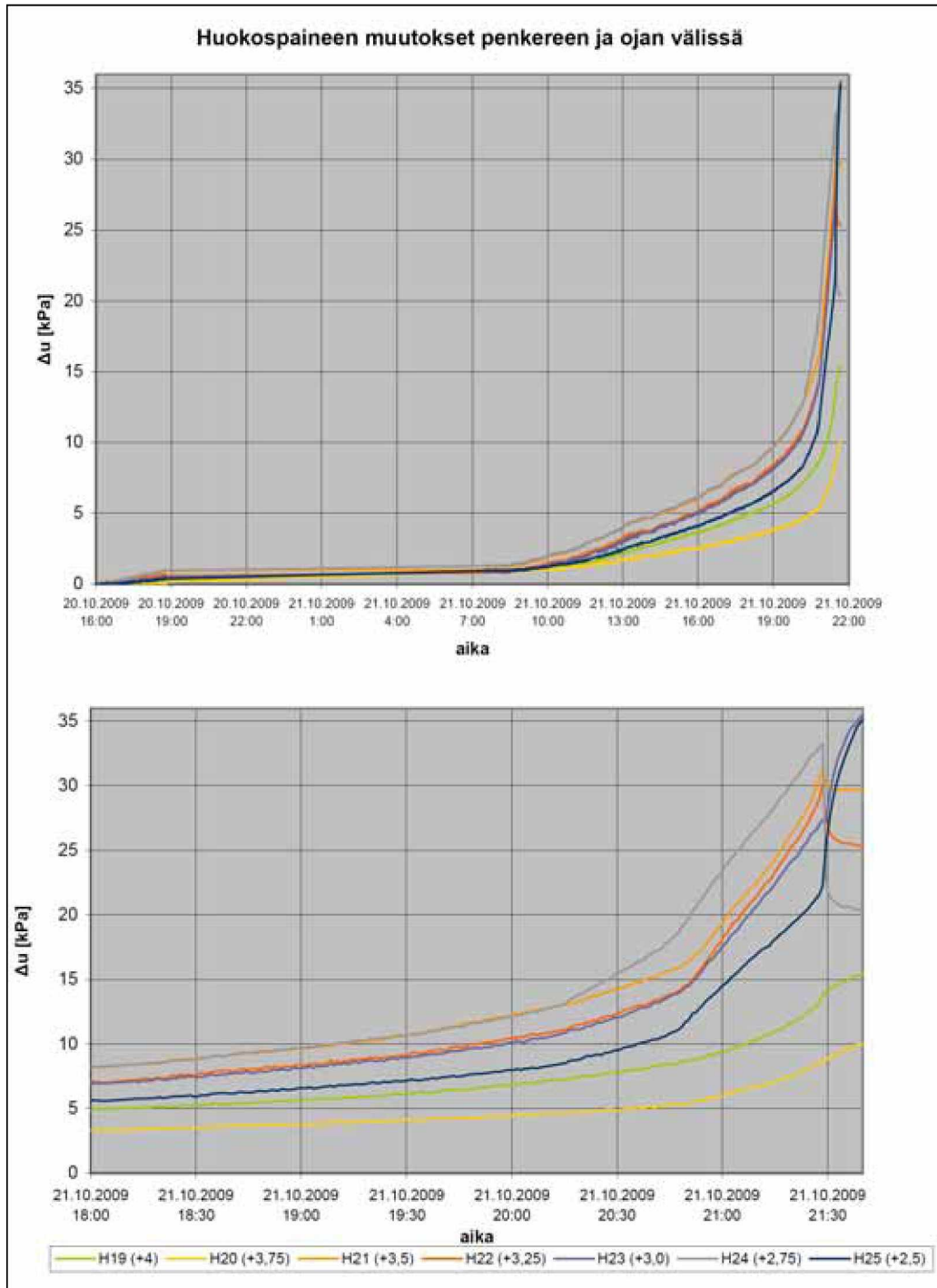
Kuva 49. Antureilla H1...H9 mitatut huokospaineen muutokset penkereen alla.



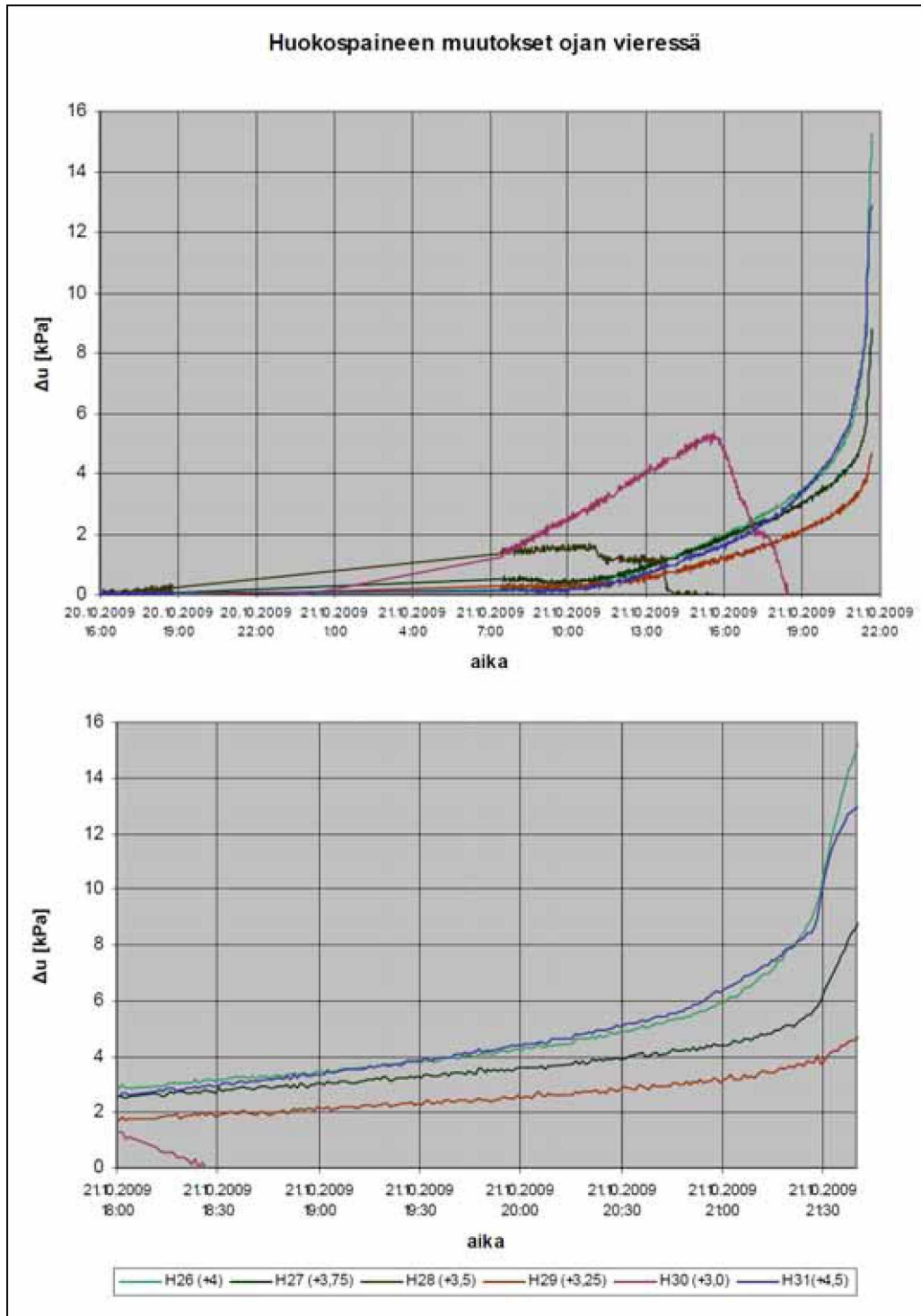
Kuva 50. Antureilla H33...H37 mitatut huokospaineen muutokset sekä maanpaineantureilla mitatut pystysuuntaisen maanpaineen muutokset penkereen alla.



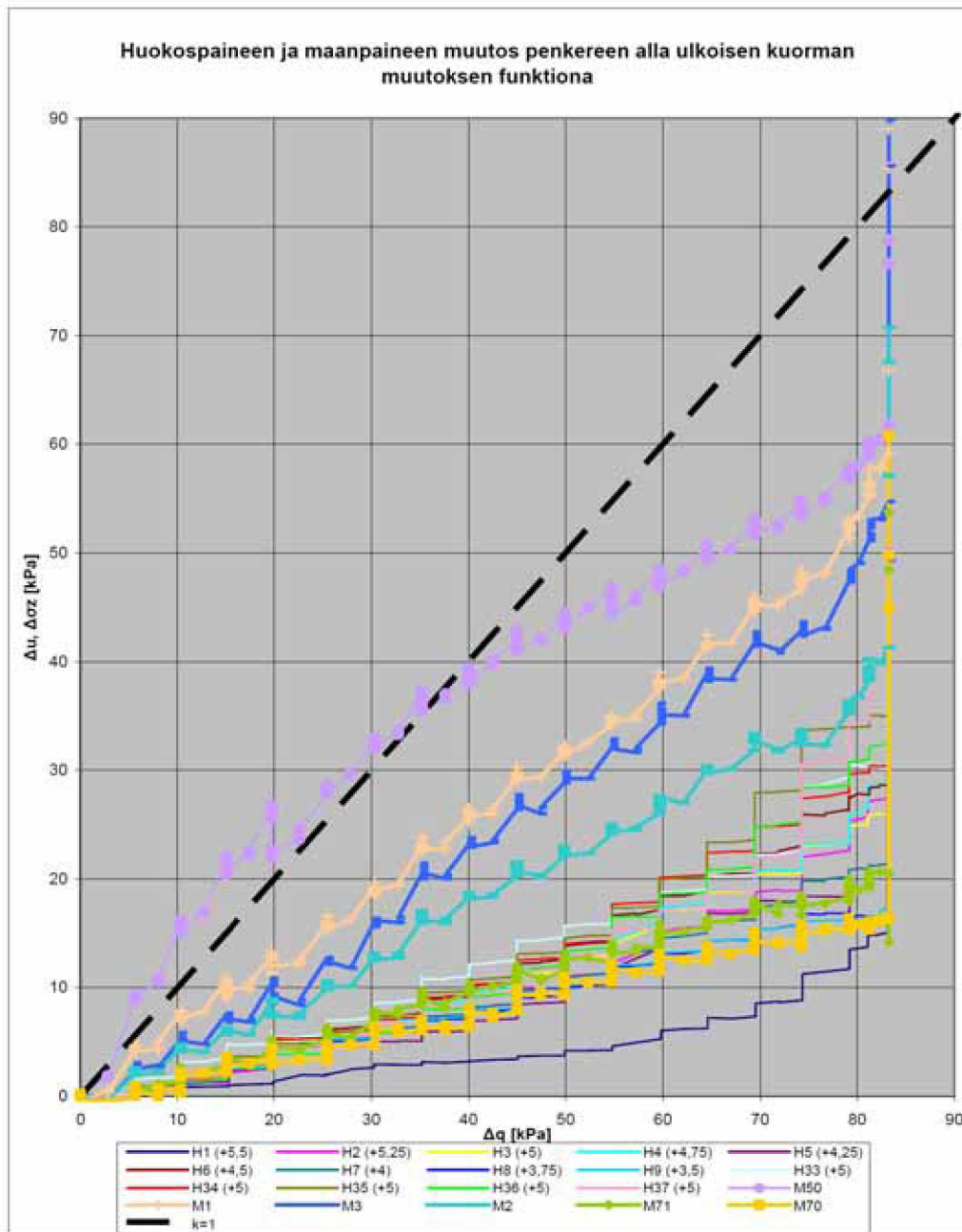
Kuva 51. Antureilla H10...H18 mitatut huokospaineen muutokset penkereen juurella.



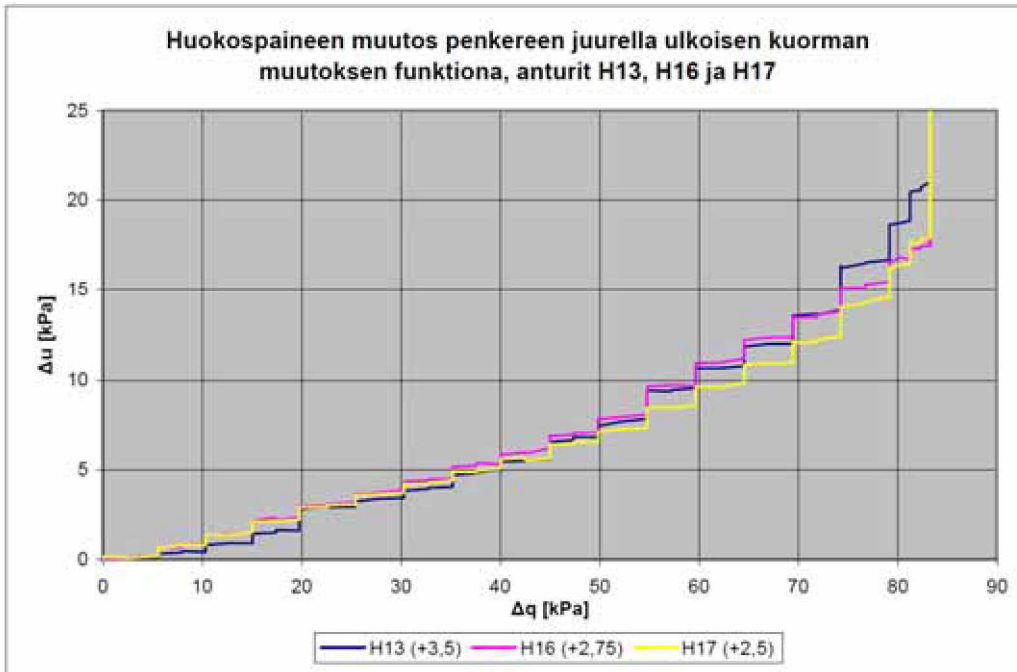
Kuva 52. Antureilla H19...H25 mitatut huokospaineen muutokset penkereen ja ojan välissä.



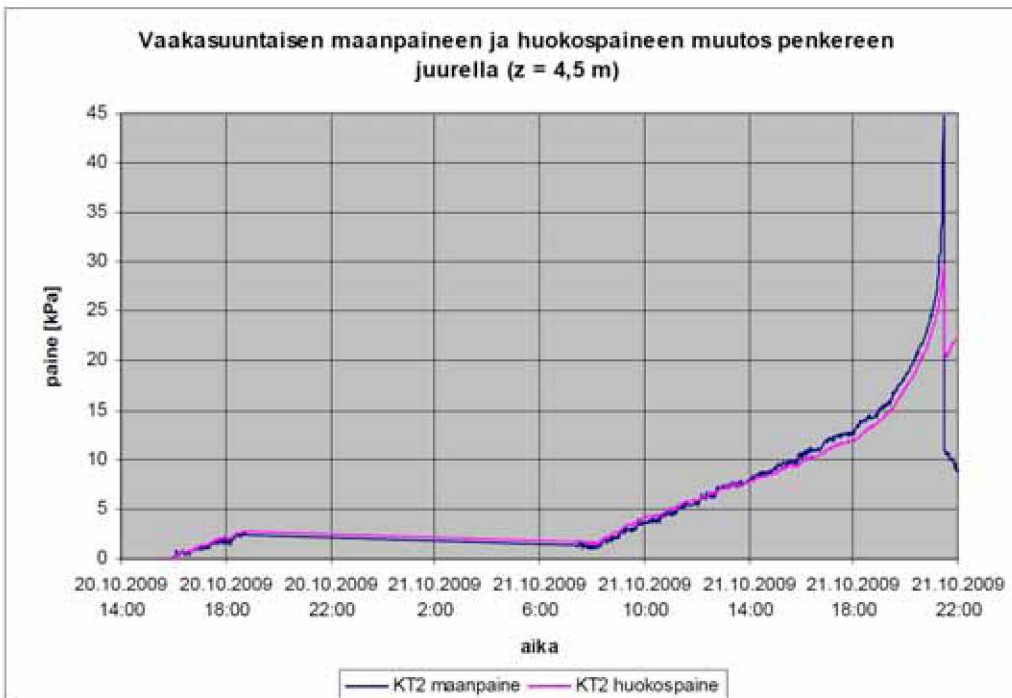
Kuva 53. Antureilla H26...H31 mitatut huokospaineen muutokset ojan reunalla.



Kuva 54. Penkereen alla olleilla antureilla mitattujen huokospaineiden ja maanpaineiden muutokset ulkoisen kuorman muutoksen funktiona. Sarja "k = 1" on kuvaajan lukua helpottava suora, joka vastaa kuormituksen kanssa samalla nopeudella kasvavaa painetta. Selitteessä on mainittu huokospaineanturien korkeustasot (z-koordinaatit). Maanpaineanturit olivat tasolla +7,45.



Kuva 55. Huokospaineen muutos penkereen reunan alla ulkoisen kuorman muutoksen funktiona, anturit H13, H16 ja H17. Pystyakseli on katkaistu havainnollisuuden vuoksi.



Kuva 56. Anturin KT2 mittaama vaakasuuntaisen maanpaineen ja huokospaineen muutos penkereen juurella.

6.2 Inklinometrit

Oheisissa kuvissa 57...65 on esitetty inklinometrien mitaamat poikkisuuntaiset siirtymät (A-suunta) eri ulkoisen kuorman arvoilla. Kuvaajiin valikoidut eri kuorman arvoja vastaavat tilanteet ovat niiltä ajankohdilta, jolloin kyseistä kuormaa keskimmaisissä vaunuissa vastaava kuormituskierros on saatu päätökseen. Ulkoisen kuorman arvo sisältää hiekan, palkiston ja kontit. Kuvaajissa esitetty syvyys on laskettu aina alkutilannetta vastaavaan maan pintaan nähden. Sortuman jälkeistä siirtymää kuvaavissa käyrissä (klo 21:28–21:29) syvyys ei siis vastaa tilannetta sortuman jälkeiseen maanpintaan nähden, mutta käyrän korkeustasot ovat sortumaa edeltäneitä käyriä vastaavia, mikä helpottaa käyrien keskinäistä vertailua. A-suunnan siirtymässä negatiivinen suunta on oja kohti (kuvaajissa oikealle). Penkereen pituussuuntaisen B-suunnan siirtymän mitattu suuruus ja merkin suunta vaihtelivat hyvin epäsäännönmukaisesti eri inklinometriputkien kesken (katso kohta 7.2), minkä vuoksi näitä siirtymiä ei esitetä tässä lainkaan.

Taulukossa 3 on esitetty inklinometriputkien mitaama suurin poikkisuuntainen siirtymä heti sortuman jälkeen ja vastaava laskennallinen siirtymä maanpinnalla. Sortuman jälkeen siirtymissä ei enää tapahtunut suuria muutoksia. On huomattava, että suurimman siirtymän syvyys ei ole sama asia kuin liukupinnan syvyys, vaan liukupinta sijaitsi tätä syvemmällä alueella, jossa anturien kallistuskulma oli suurin (katso kohta 6.10). Lisäksi sortuman jälkeisten suurten siirtymien tapauksessa anturien korkeusaseman kompensointi on melko epävarmaa. Tämän vuoksi parhaat arviot liukupinnan syvyydestä saadaan ennen sortumaa saaduista havainnoista.

Taulukko 3. *Inklinometreillä mitatut poikittaiset siirtymät heti sortuman jälkeen (syvyydet korkeuskompensoituja).*

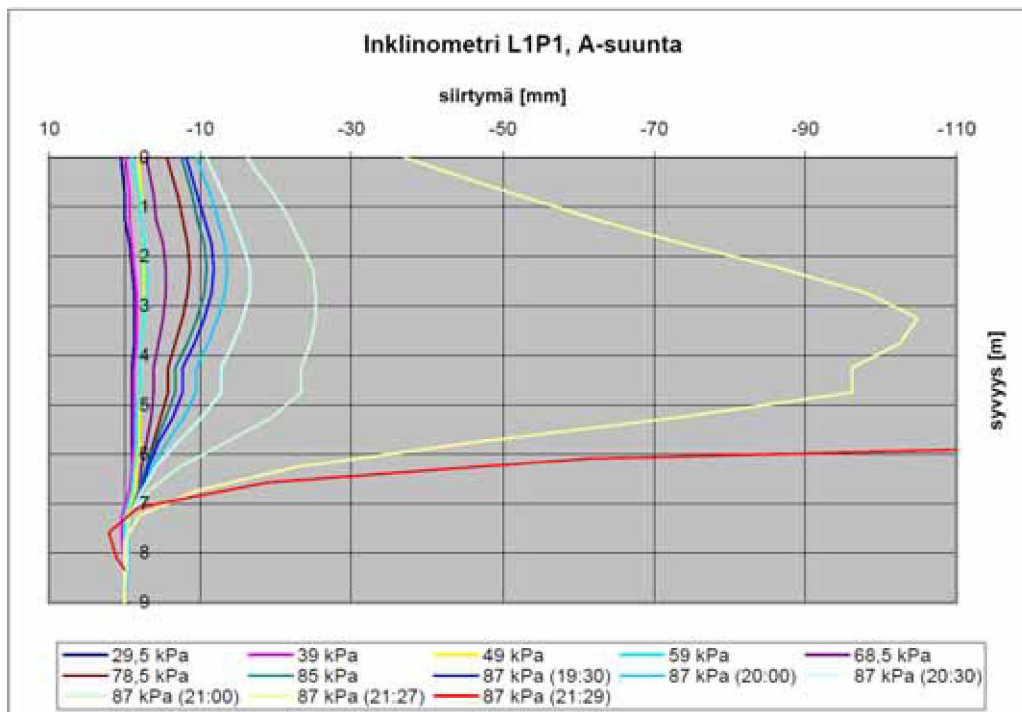
Inklinometri	suurin sivusiirtymä [mm]	suurimman sivusiirtymän syvyys maanpinnalta [m]	sivusiirtymä maanpinnalla [mm]
L1P1	1081*	3,4	413*
L1P2	979	4,0	629
L1P3	870	2,1	810
L2P1	1000	4,1	514
L2P2	894	3,6	661
L2P3	954	1,5	872
L3P1	756	3,4	512
L3P2	529	2,5	503
L3P3	642	0,8	636

* Putkessa oli 4,5 m syvyydellä anturi, joka näytti koko kokeen ajan nolalukemaa. Todelliset siirtymät olivat siis suurempia.

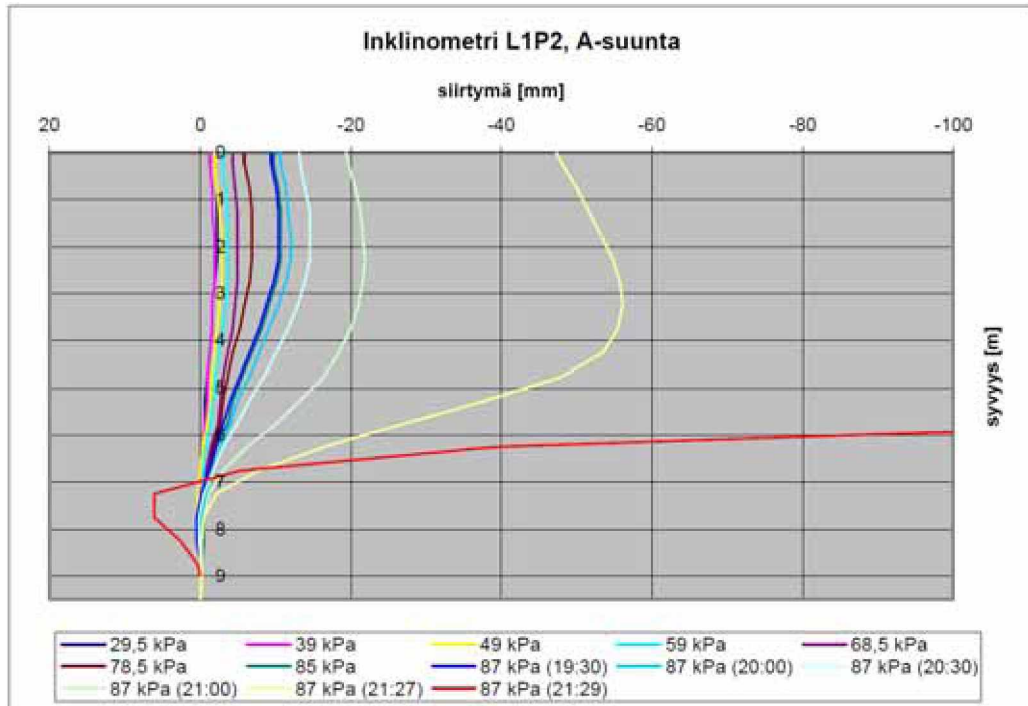
Selostus kuvaajien laskennasta ja antureille tehtävästä korkeusaseman kompensoinnista on liitteessä 5. On huomattava, että anturien käytännön mittausalue oli kalibroinnista riippuen noin $\pm 28-29^\circ$. Koska sortuman jälkeen useilla liukupinnan kohdalla olleilla antureilla mitattiin tämän mittausalueen ääri rajoilla olleita lukuja, voidaan

helposti olettaa näiden antureiden kallistuskulman ja näin ollen myös sivusiirtymän ja korkeusaseman muutoksen olleen todellisuudessa suurempi. (Ryhänen 2009)

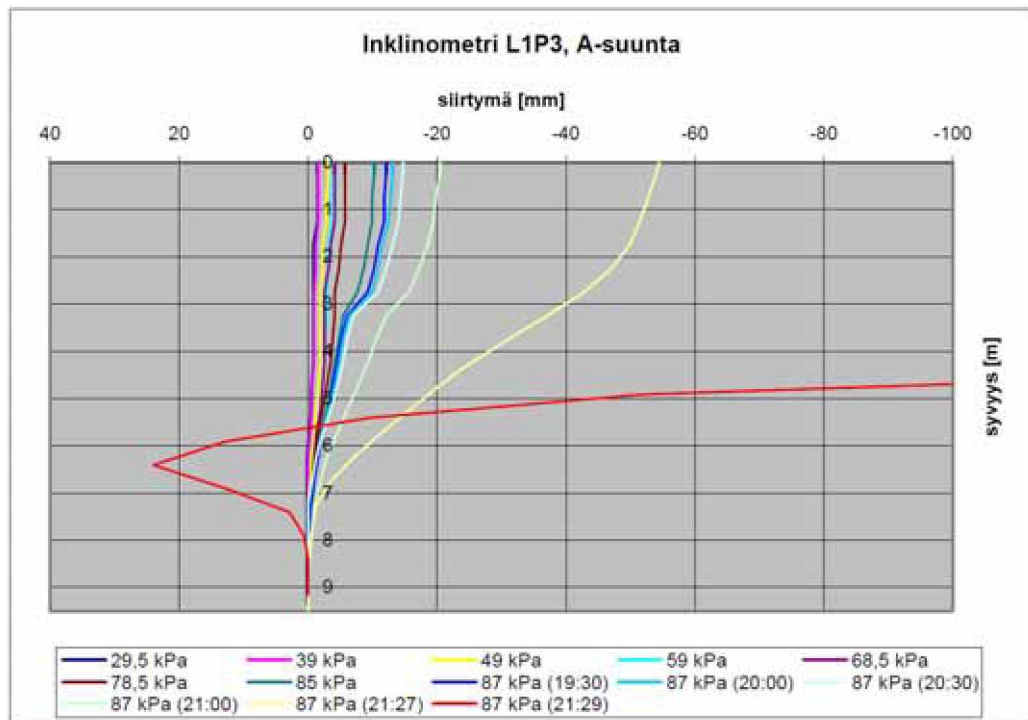
Monissa antureissa oli paljon bittivirheitä. Virhe toistui kaikissa tapauksissa samana: normaalien mittausten lomassa oli satunnaisia mittauksia arvoltaan noin -1,86 astetta. Muuten mitatut kulman arvot ennen sortumaa edeltäneitä kiihtyviä muodonmuutoksia (21.10. noin klo 18 alkaen) olivat tyypillisesti asteen kymmenes- tai sadasosa. Koska anturien mittausrésoluutio oli noin 0,03 astetta ja valtaosan aikaa mitatut kulmat muuttuivat hyvin hitaasti, virhemittaukset voitiin hyvällä varmuudella korvata niitä edeltäneillä, luultavimmin oikeilla mittauservoilla. Jos näitä bittivirheitä ei olisi korjattu, ne olisivat vaikuttaneet kaikkien niitä ylempienkin antureiden laskennallisiin siirtymiin (esimerkiksi 1,86° virhe vastaa 500 mm anturijaolla noin 16,2 mm virhettä vaakasiirtymässä). Virheet liittyivät luultavasti anturien lämpötilakorjauksiin ja toistuivat aina tietyissä lämpötiloissa.



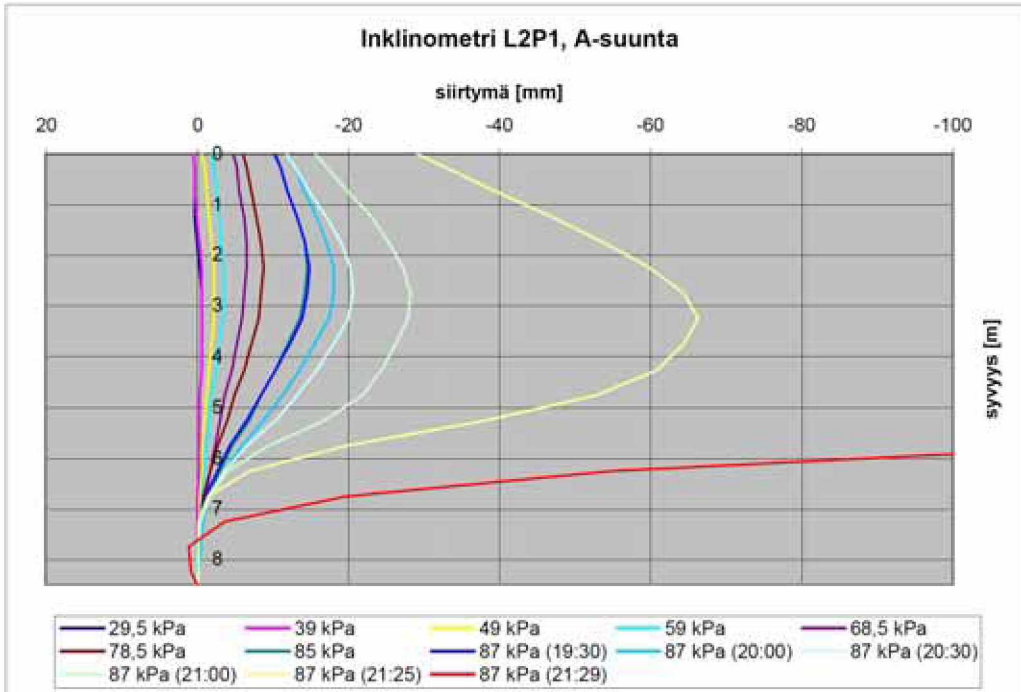
Kuva 57. Inklinometrin L1P1 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.



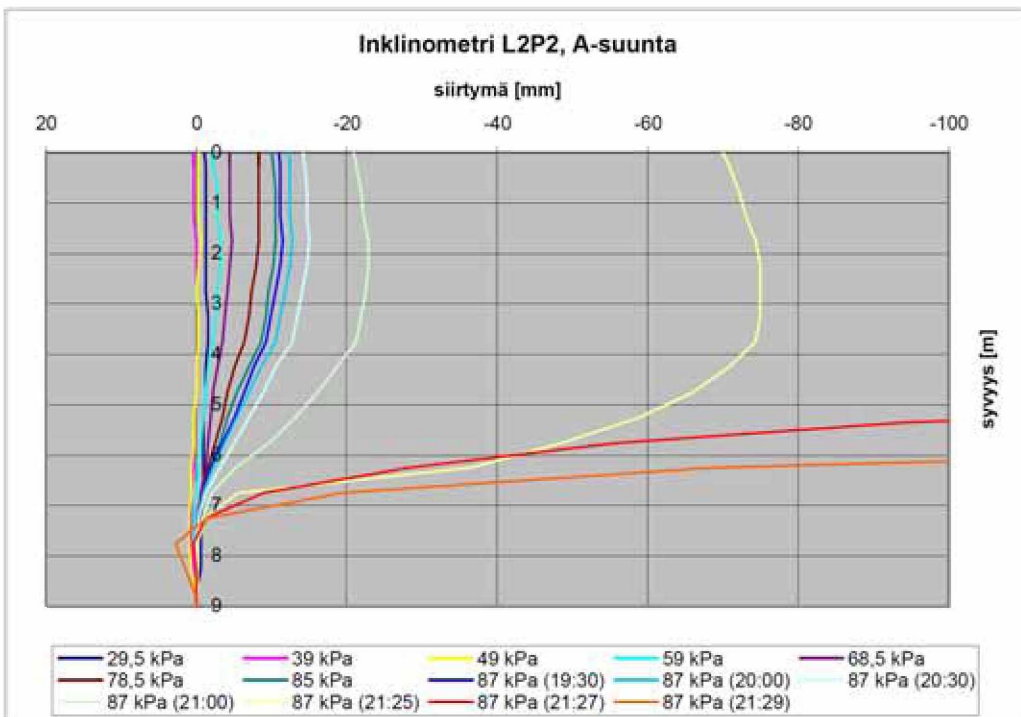
Kuva 58. Inklinometrin L1P2 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.



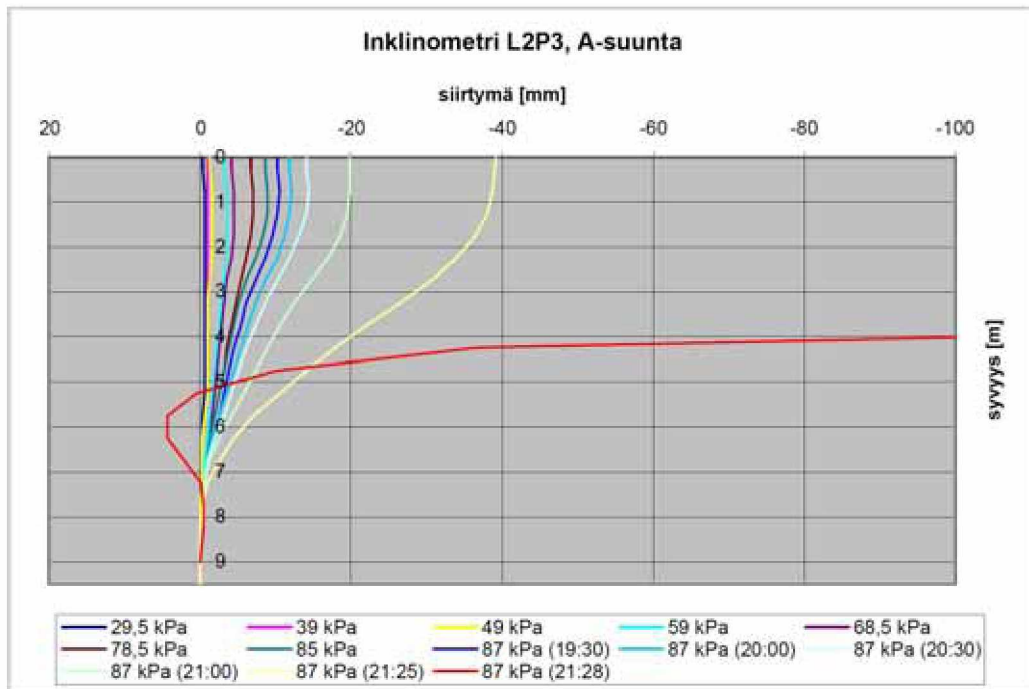
Kuva 59. Inklinometrin L1P3 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.



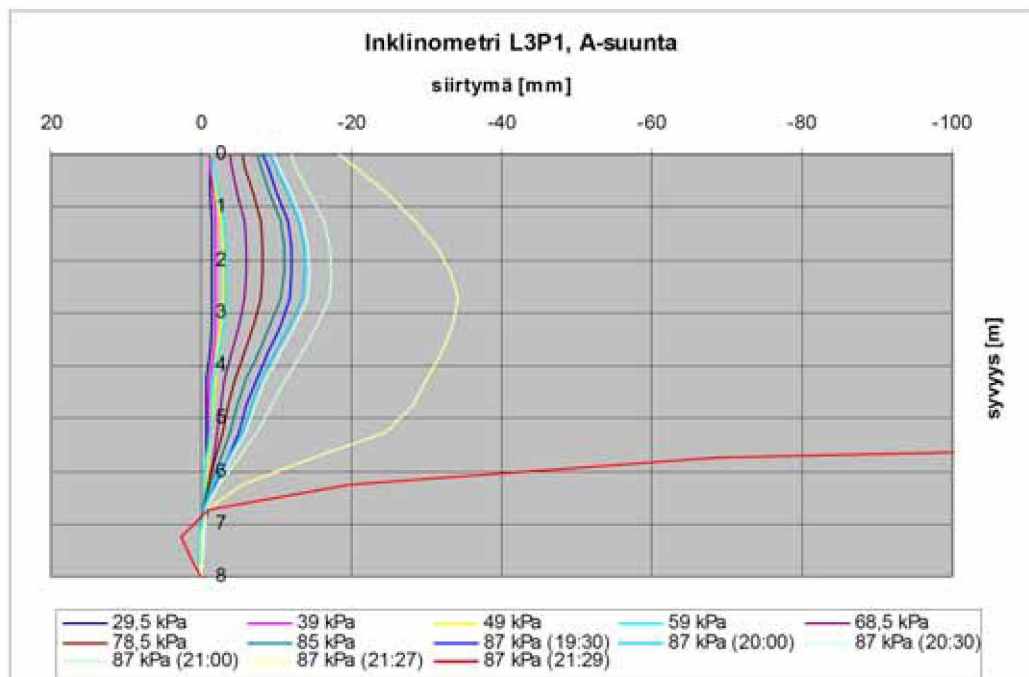
Kuva 60. Inklinometrin L2P1 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.



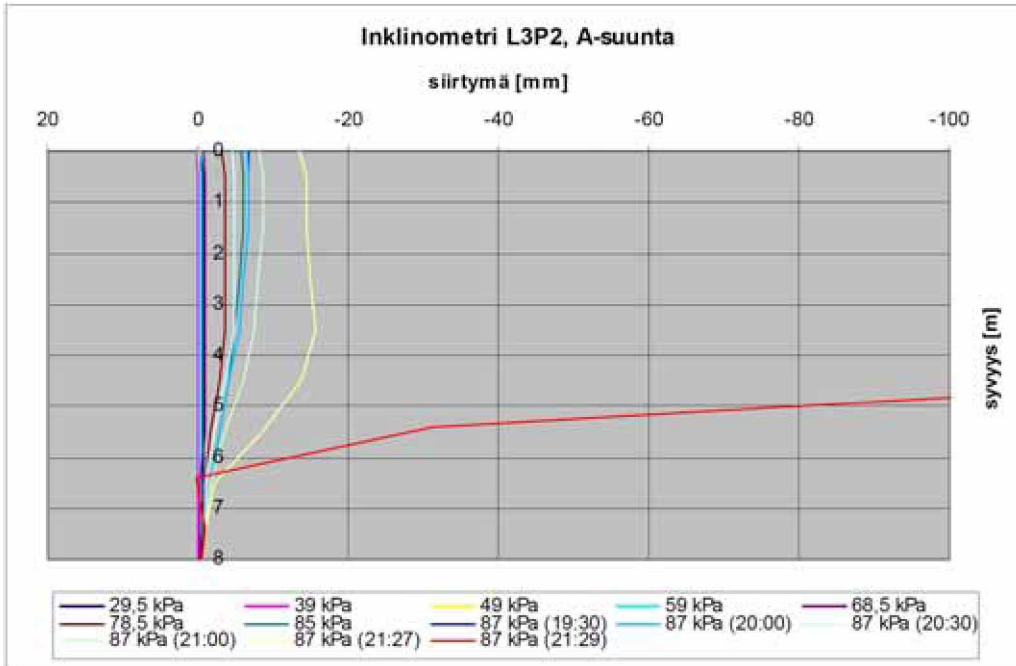
Kuva 61. Inklinometrin L2P2 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.



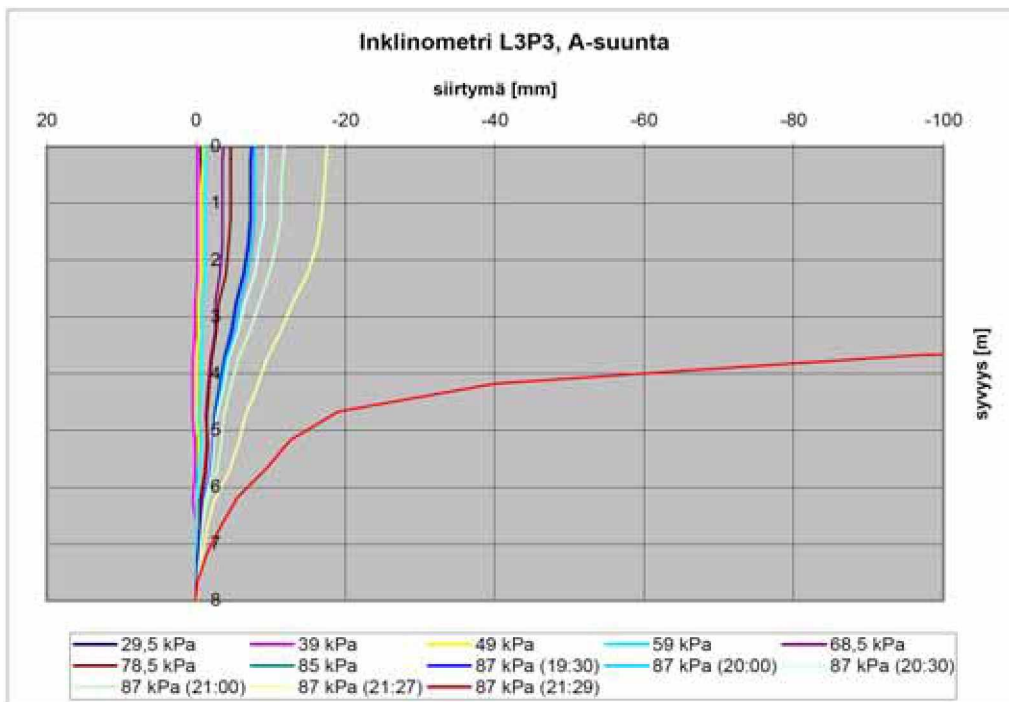
Kuva 62. Inklinometrin L2P3 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.



Kuva 63. Inklinometrin L3P1 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.



Kuva 64. Inklinometrin L3P2 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.



Kuva 65. Inklinometrin L3P3 poikkisuuntainen siirtymä eri kuormilla.

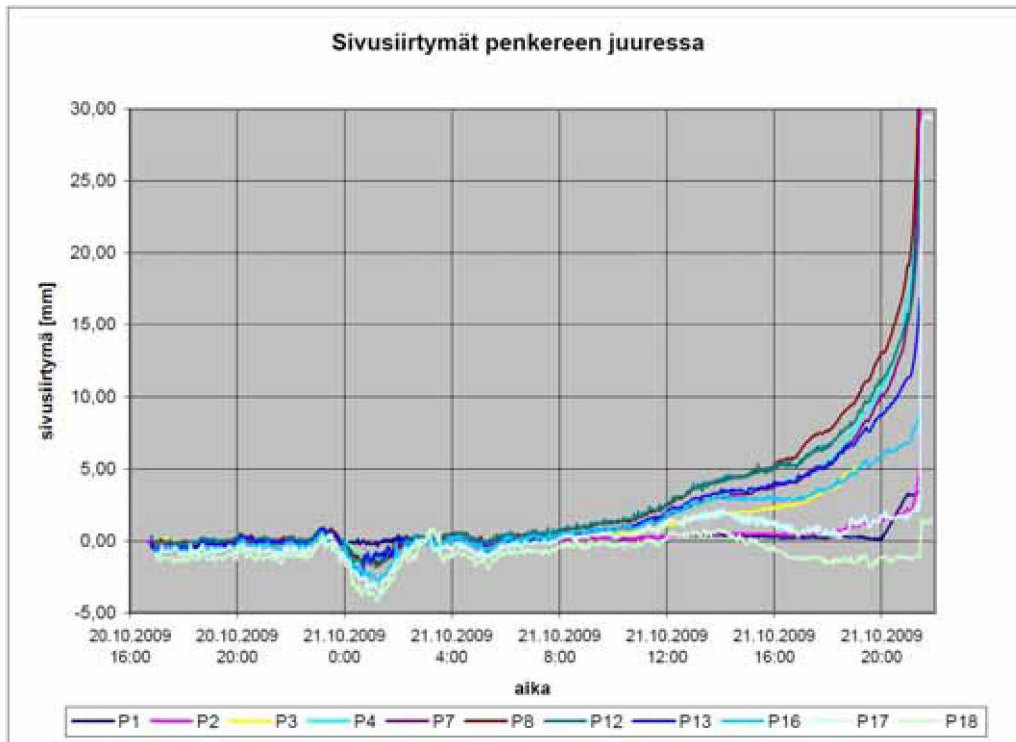
6.3 Takymetrimittaukset

Kuvissa 66...72 on esitetty takymetreillä monitoroitujen prismojen pystysuuntaiset ja rataa nähden poikittaiset liikkeet kokeen aikana. Kuvaajissa pystysiirtymän positiivinen suunta on ylöspäin ja vaakasiirtymän positiivinen suunta on ojaa kohti.

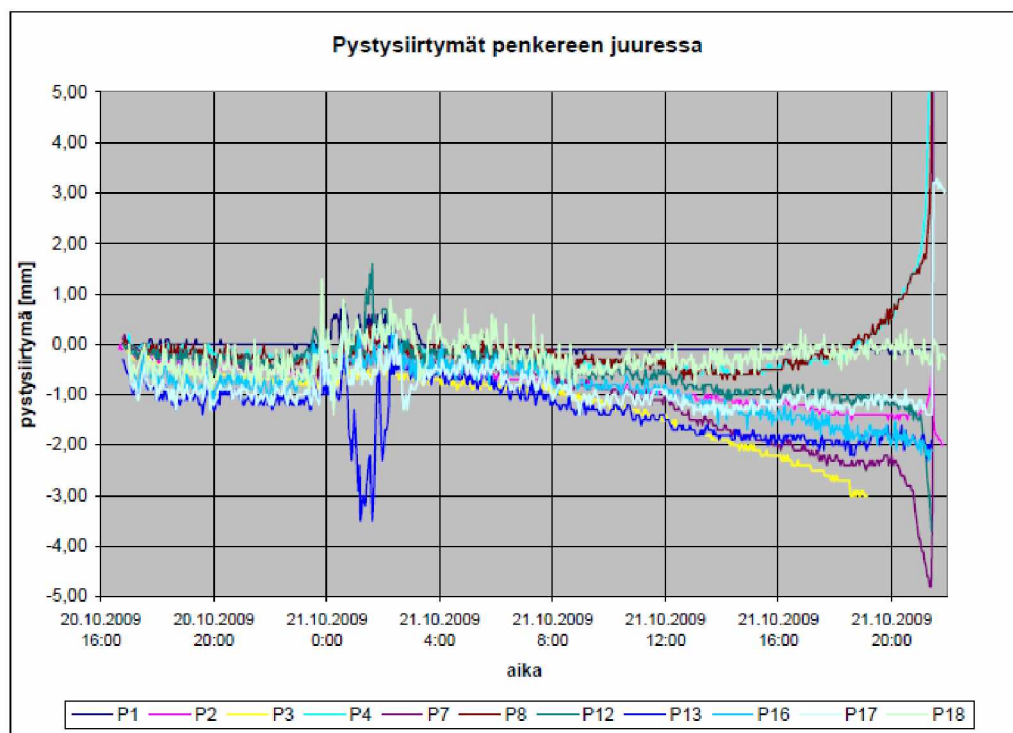
Molemmat takymetrit liikkuvat kokeen aikana huomattavasti, ajoittain jopa yli 1 mm/h rataa nähden poikittaisessa suunnassa. Kokeen aikana liikkumattomiin seinäprismoihin tehtyjen tarkistusmittausten avulla tämän liikkeen aiheuttamia virheitä korjattiin siten, että takymetrit laskivat itselleen uuden vapaan kojeaseman tarkistusmittauksen yhteydessä. Tästä kuitenkin aiheutui alkuperäiseen monitorointitiltaan ”hyppäyksiä” sitä mukaa kun takymetriensä sijaintitieto päivittyi.

Korjattaessa mittausdatasta takymetriensä liikkeen vaikutusta oletettiin, että korjauksen välillä tapahtunut liike oli tasaista (muutakaan ei perustellusti voinut olettaa). Lisäksi voitiin olettaa, että heti uuden asemapisteen laskennan jälkeiset mittausloket olivat varmasti oikein (mittaustarkkuuden rajoissa). Korjauksen ja sitä edeltäneen mittauksen välinen siirtymäero jaettiin tasan kaikkien kyseisen korjauksen ja sitä edeltäneen korjauksen välillä tehdyille mittauksille, joten datassa ei enää ole epärealistisia hyppäyksiä kojeaseman tarkistuksen yhteydessä. Korjaus tehtiin erikseen kaikille siirtymävektoreille (radan suuntainen, kohtisuora ja pystysuora siirtymä). Korjausta ei kuitenkaan tehty automaattisesti kaikille vektoreille kaikissa tarkistuksissa, vaan jos tarkistuksessa tapahtunut siirtymävektorin muutos oli joko hyvin pieni (<0,3 mm) ja/tai sopi muuten suuruutensa tai suuntansa puolesta mitatun prisman liikkeen ”trendiin”, voitiin olettaa takymetrin pysyneen kyseisessä suunnassa ja kyseisellä aikavälillä paikallaan.

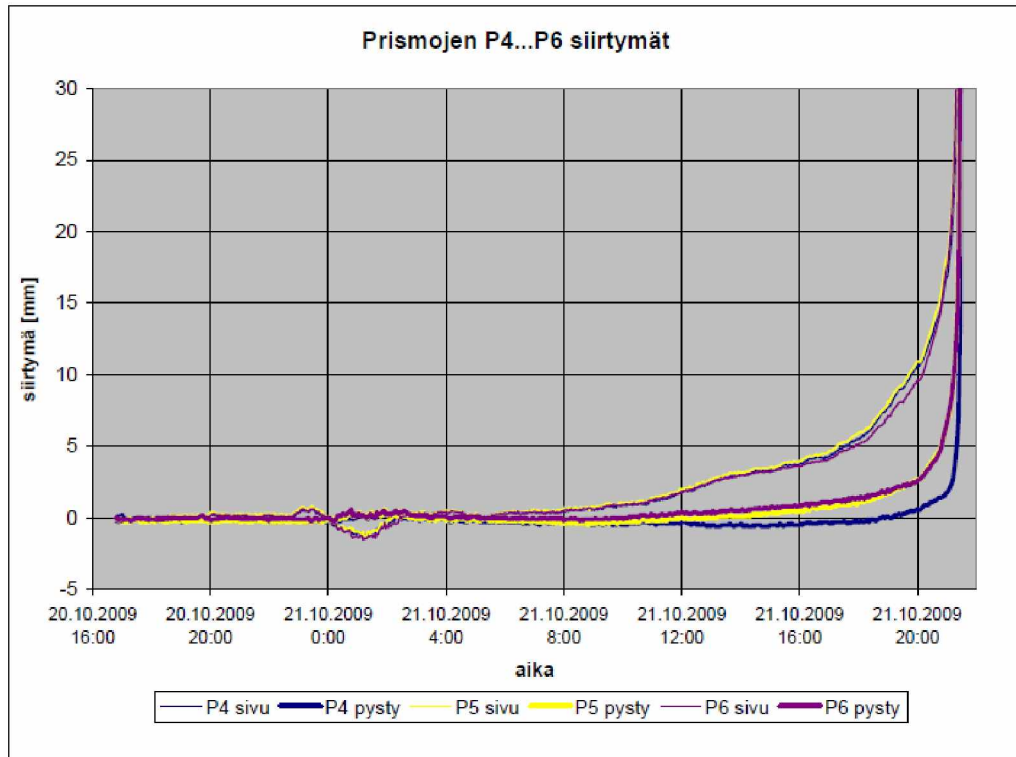
Eräs merkillepantava seikka mittauksissa ovat yöllä 20.–21.10. tapahtuneet palautuneet siirtymät, jotka näkyivät myös painumaletkujen mittauksissa. Näitä siirtymiä on mitattu koko alueella. Tälle ei ole keksitty muuta luontevaa selitystä kuin suunnilleen samaan aikaan tapahtunut nopea lämpötilan lasku muutamalla asteella, joka saattoi aiheuttaa lämpöliikettä takymetreissä ja nesteen lämpöliikettä painumaletkuissa.



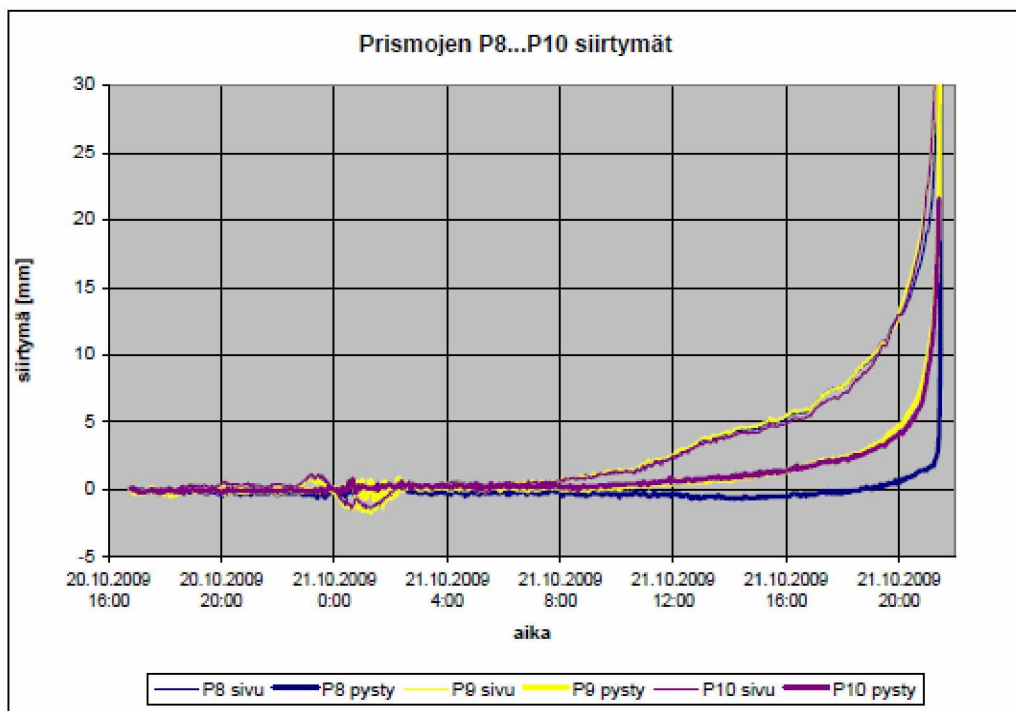
Kuva 66. Sivusiirtymät penkereen juuressa



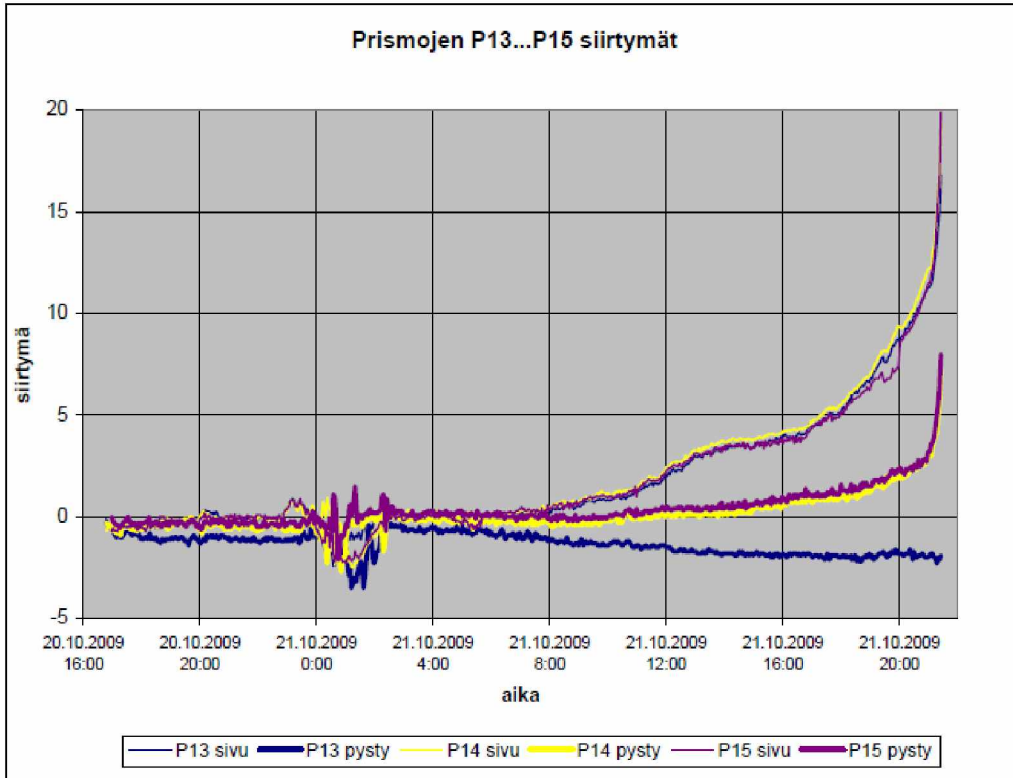
Kuva 67. Pystysiirtymät penkereen juuressa.



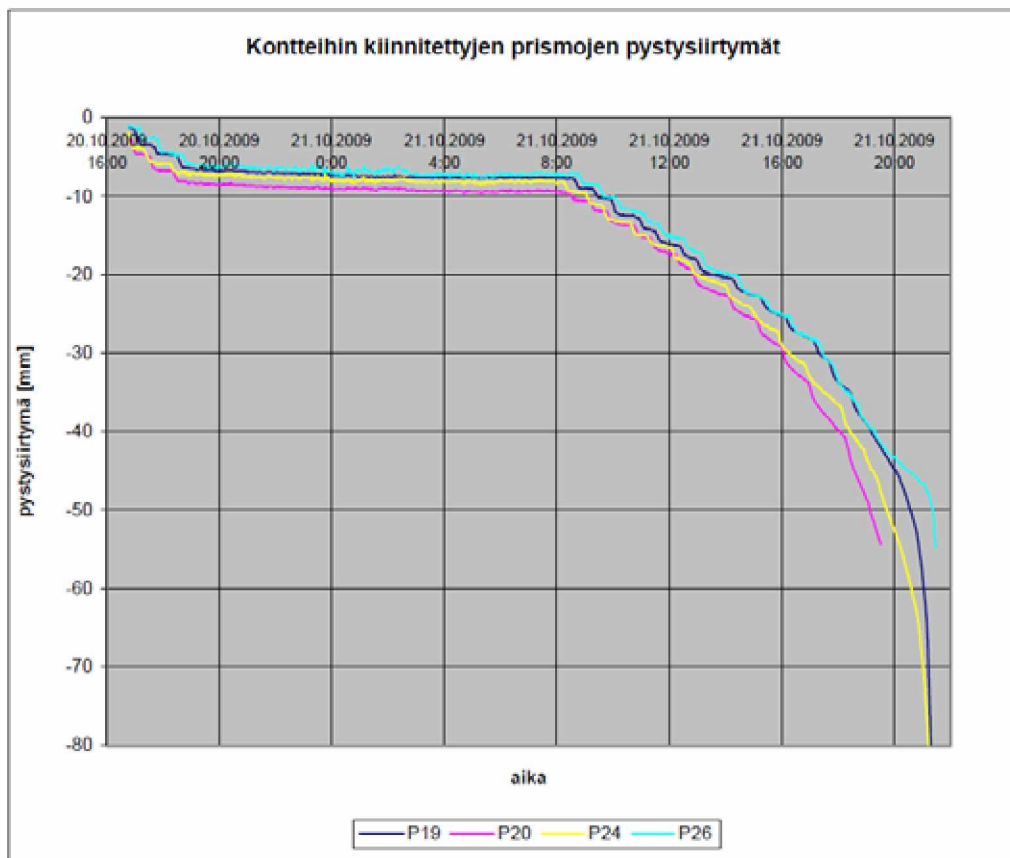
Kuva 68. Prismojen P4...P6 sivu- ja pystysiirtymät



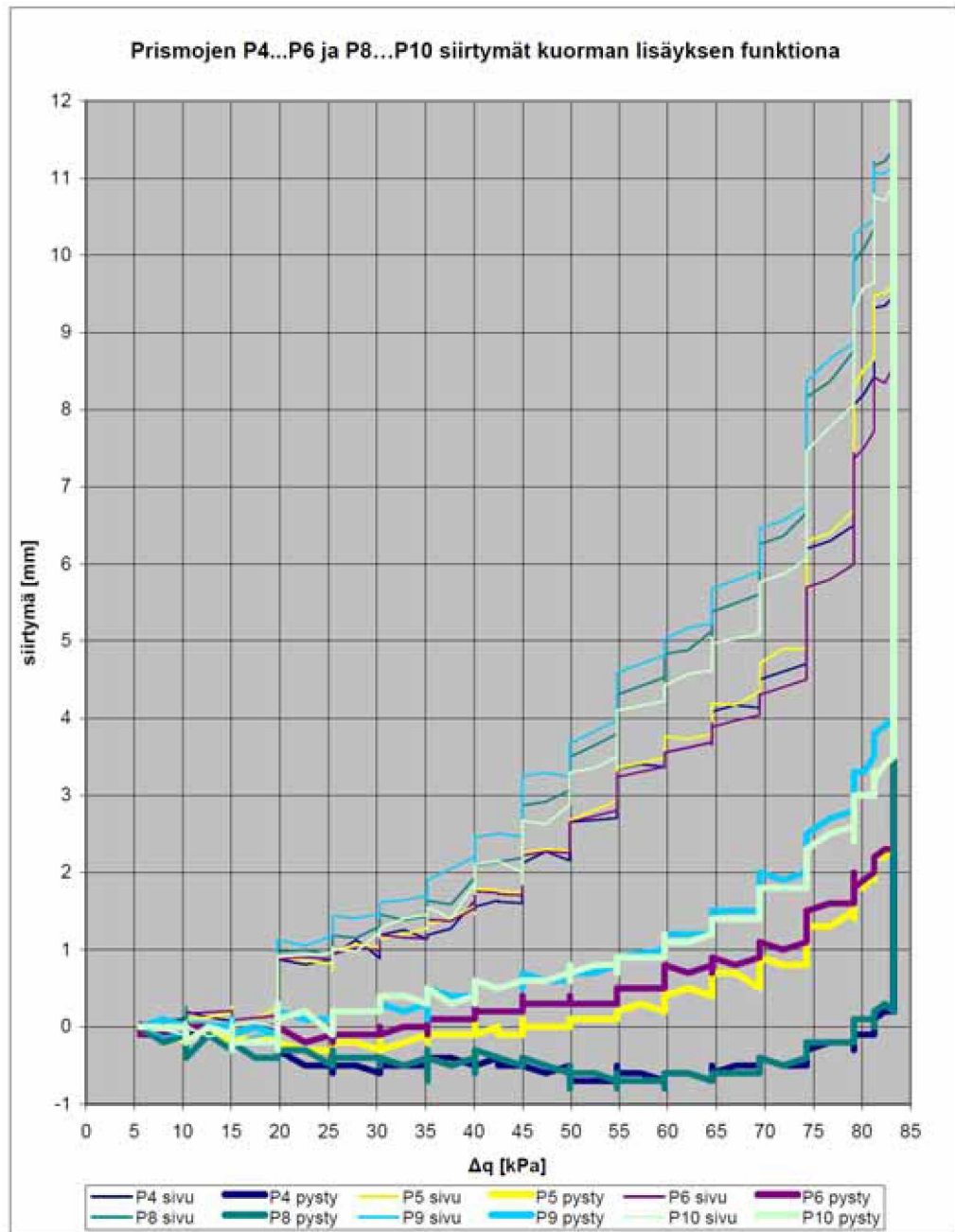
Kuva 69. Prismojen P8...P10 sivu- ja pystysiirtymät



Kuva 70. Prismojen P13...P15 sivu- ja pystysiirtymät



Kuva 71. Kontteihin kiinnitettyjen prismojen pystysiirtymät



Kuva 72. Prismojen P4...P6 ja P8...P10 siirtymät kuorman lisäyksen funktiona

6.4 Painumaletkut

Kuvissa 73...76 on esitetty painumaletkuilla mitatut painumat koealueella. Alkuperäinen data oli mitattu absoluuttisena paineena, yksikkönä Pa. Paine muutettiin vastaamaan millimetrejä öljypatsasta käyttäen valmistajan kyseiselle hydrauliöljylle ilmoittamaa tiheyttä 0,9 kg/l, eli tilavuuspainoa 8,829 kN/m³. Tällöin painekorkeus on

$$h = p / \gamma_{oil} \quad (18)$$

missä

p = mitattu paine [kN/m²]
 γ_{oil} = öljyn tilavuuspaino [kN/m³]

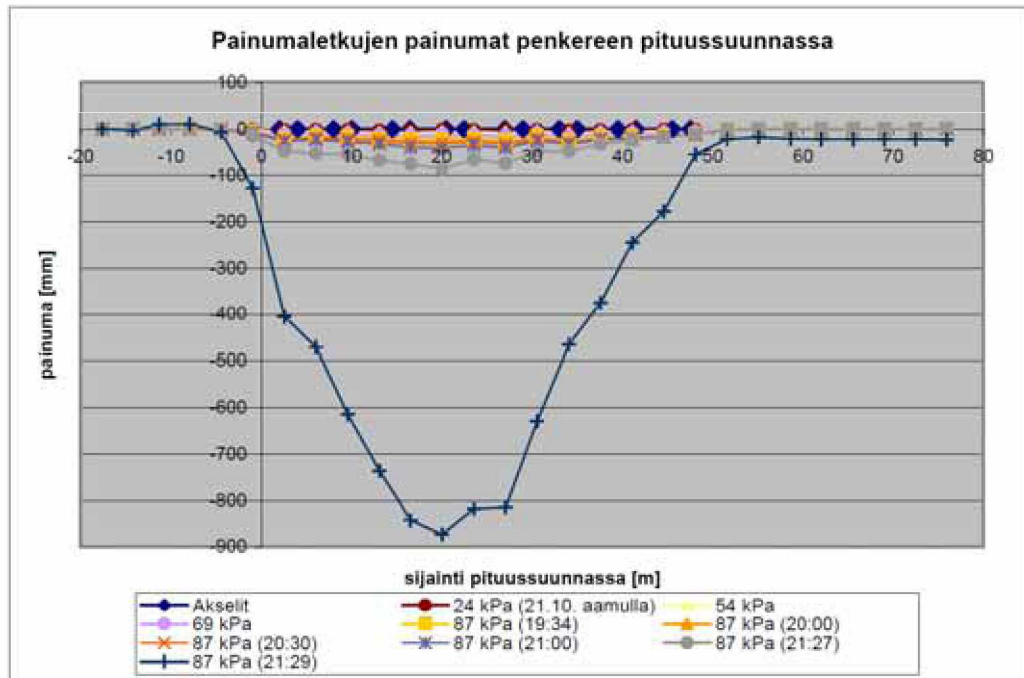
Referenssipisteenä käytettiin anturia 1, joka sijaitsi maassa ensimmäisenä anturina öljysäilöstä koealuetta kohti. Kaikkien muiden antureiden mitatuista paineista vähennettiin samaan aikaan anturin 1 mittaama paine, jotta ilmanpaineen muutokset voitiin poistaa mittaustuloksista. Vertailupainekorkeuksina käytettiin 20.10.2009 klo 15:55 mitattuja arvoja. Esitetyt painuman arvot ovat siis korkeuseroja mainittuun ajanhetkeen nähden.

Kuvaajissa antureiden sijainnit on esitetty koordinaatistossa, jonka origo on penkereen keskilinjalla ensimmäisen vaunun siilon puoleisessa päässä. Akselit kulkevat penkereen suuntaisesti (positiivinen suunta siilosta pois päin) ja sitä vastaan kohisuoraan (positiivinen suunta ojaa kohti).

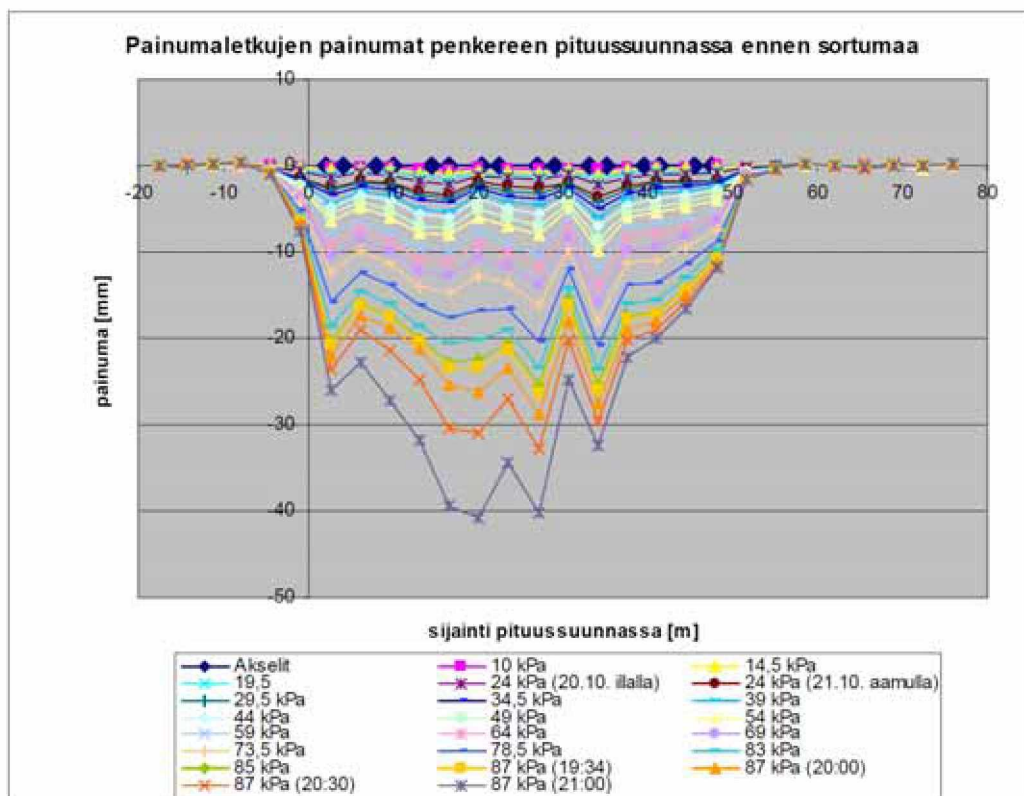
Pituussuuntaista painumaa esittävässä kuvaajissa esitetään vain penkereen pituus-suuntaisen letkun mittaukset. Ne kuvaavat siis tilannetta penkereen ojan puoleisen harjattaitteen alla. Poikkisuuntaissa kuvaajissa puolestaan on samassa poikkileikkauksessa sijaitsevia antureita kaikista kolmesta painumaletkusta (anturit 13, 40...47, 49...53). Oheiset poikkisuuntaisen painuman kuvaajat esittävät koealueen keskellä olevan linjan. Mainittakoon, että kahdessa muussa poikittaisessa linjassa olleet anturit mittasivat hyvin samankaltaisia muodonmuutoksia kuin keskimmaisessä linjassa, mutta näissä muodonmuutosten suuruus kaikissa vaiheissa oli pienempi.

Kuvaajissa esiintyvät kuorman arvot ovat ulkoinen kuorma (sisältäen kontit, palkiston ja hiekan) vaunun 2 kohdalla sillä ajanhetkellä, kun kyseistä kuormaa vastaava kuormauskierros päättyi (poikkeuksena tähän on 24 kPa kuorma, joka on esitetty kuormauksen jälkeen illalla ja seuraavana aamuna juuri ennen seuraavaa kuormauskierrosta). Kuorma reunimmaisten vaunujen kohdalla oli siis hieman pienempi suurimman osan koetta.

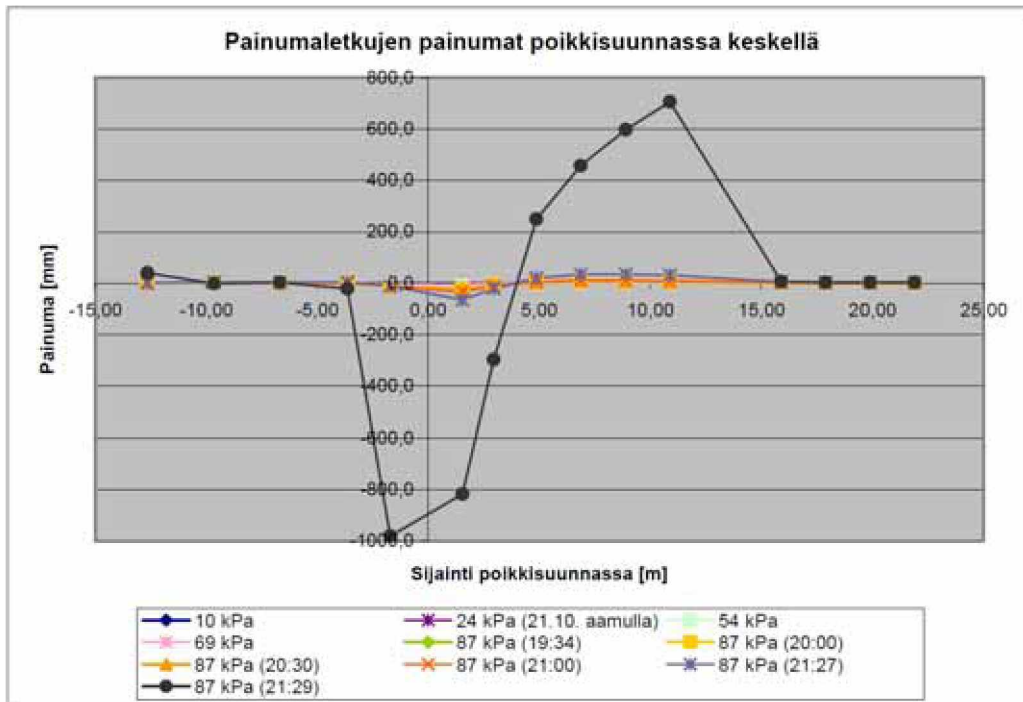
Kuvassa 77 on esitetty penkereen pituussuuntaisen painumaletkun eniten painuneen anturin (nro 12, penkereen suuntainen m-koordinaatti 20,1 m) laskennallisen vaunu-kuorman funktiona. Kuvan painuma-akseli on havainnollisuuden vuoksi katkaistu.



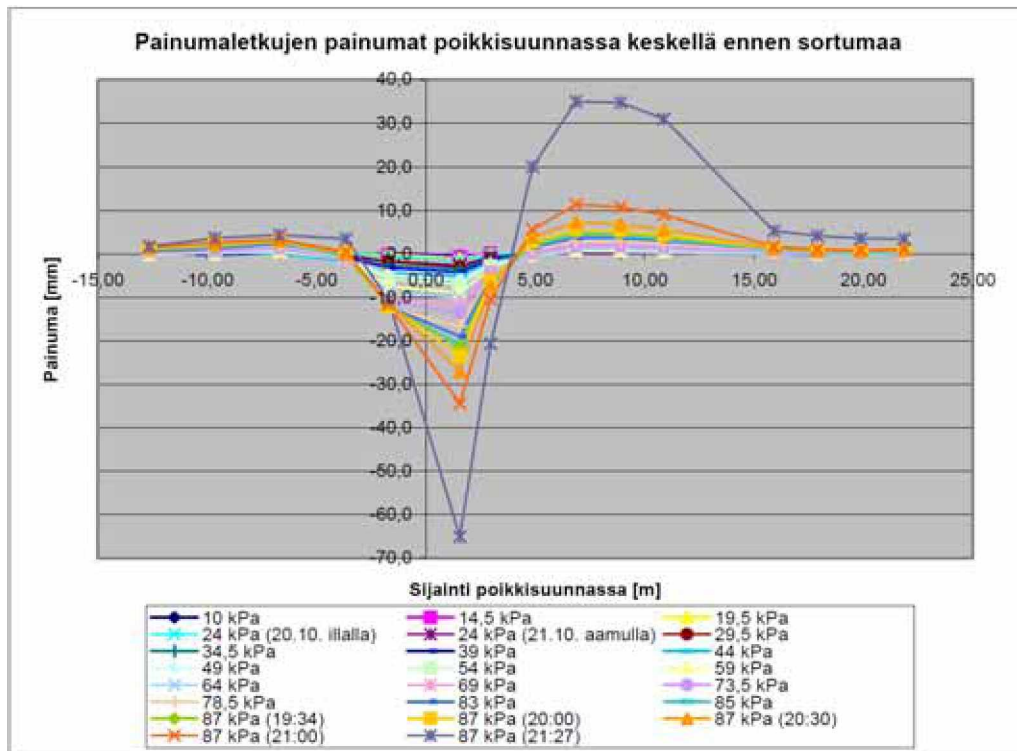
Kuva 73. Painumaletkuilla mitattu painuma eri kuormilla penkereen pituussuunnassa. Sarja "Akselit" kuvaa poikittaisten palkkien sijaintia.



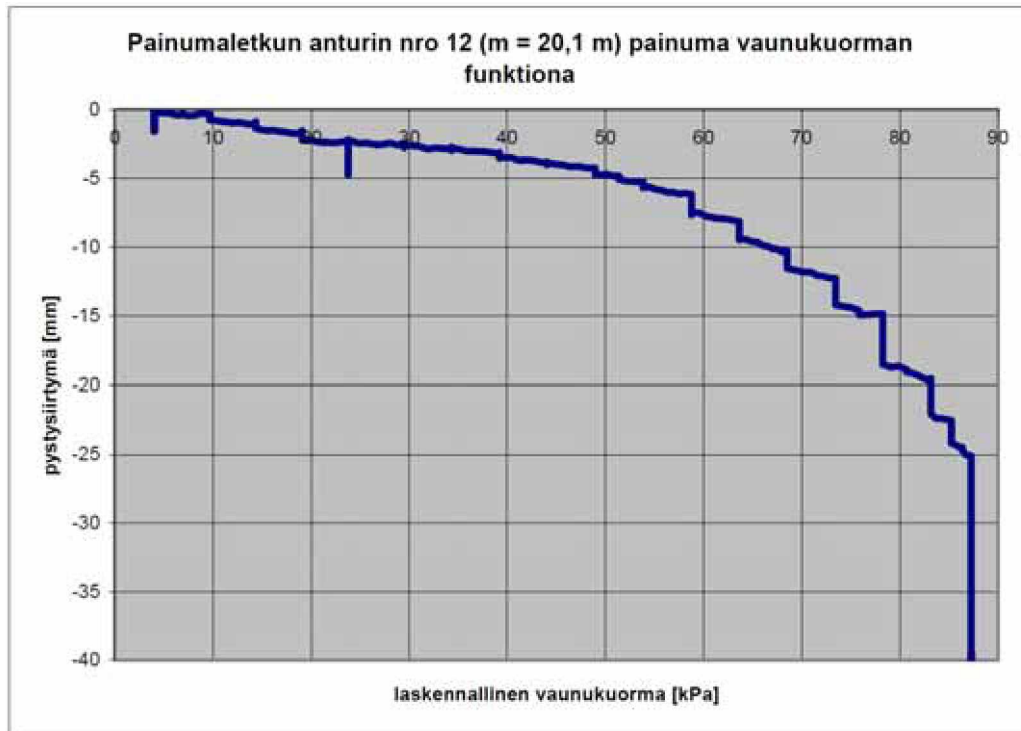
Kuva 74. Painumaletkuilla mitattu painuma eri kuormilla penkereen pituussuunnassa ennen sortumaa.



Kuva 75. Painumaletkuilla mitattu painuma eri kuormilla poikkisuunnassa koelaitteen keskellä. Poikkisuuntaisen sijainnin nollakohta on penkereen keskilinjalla, ojan pohja sijaitsee noin kohdassa +13 m.



Kuva 76. Painumaletkuilla mitattu painuma eri kuormilla poikkisuunnassa koelaitteen keskellä ennen sortumaa.



Kuva 77. Penkereen suuntaisen painumaletkun anturin nro 12 painuma laskennallisen vaunu kuorman (vaunu 2) funktiona.

6.5 Liukupintaputket

Liukupinnan syvyyden mittausputket luodattiin ennen koetta ja koetta seuranneena päivänä. Luotaukseen käytettiin taipuisaa kaapelia, jonka päässä oli noin 50 cm pitkä, halkaisijaltaan 10 mm jäykkä terässauva. Lisäksi putkien ankkurointiin käytettyyn uretaanivaahtoon asennettujen mittauspisteiden sijainnit kartoitettiin samoin ennen koetta ja sen jälkeen. Tähän käytettiin Leica TCRP1205-takymetria.

Taulukossa 4 on esitetty liukupintaputkien luotausten tulokset ja siirtymät. Taulukon tyhjät ruudut johtuvat siitä, että putken pää on ollut esimerkiksi murskeen alle hautautuneena tai sitä ei muuten ole löydetty (koealueella liikuttiiin putkien asentamisen jälkeen kairavaunuilla ja kaivinkoneilla, jolloin osa putkista peittyi niin, että niiden löytäminen vaikeutui). Taulukon rivien värityksellä on helpotettu samoihin poikittaislinjoihin kuuluvien putkien löytämistä.

Putkien yläpäiden siirtymät on laskettu samassa (m, n, z)-koordinaatistossa kuin painumaletkut ja prismat. Tässä koordinaatistossa origo on vaunun 1 päässä, m-akseli on penkereen suuntainen (positiivinen suunta siilosta poispäin) ja n-akseli pengertä vastaan kohtisuorassa (positiivinen suunta ojaan päin). Z-akseli on korkeusakseli. Taitteen z-koordinaatti on laskettu vähentämällä putken kokeen jälkeinen luotimissyvyys yläpään kokeen jälkeisestä z-koordinaatista.

Taulukko 4. Liukupintaputkien luotaustulokset ja siirtymät

Putken tunnus	luodittu syvyys aluksi [m]	luodittu syvyys loppuksi [m]	taitteen korkeus-taso [m]	Δm [m]	Δn [m]	Δz [m]
L1	6,45	6,51	1,40	-0,021	0,009	0,001
L2	6,45	6,48	1,27	0,016	-0,013	0,006
L3	6,35	6,36	1,35	0,151	0,086	0,160
L4	6,4	4,58	3,29	0,015	-0,012	0,006
L5	6,45	4,62	3,14	-0,030	0,066	0,016
L6	6,75	2,76	4,91	-0,041	0,068	0,033
L7	6,5	1,58	6,34	0,003	0,142	0,021
L8	0,8	0,81	7,05	-0,038	0,097	0,064
L9	6,3	3,35	4,42	-0,068	0,149	0,077
L10	6,25	3,51	4,22	-0,106	0,119	0,093
L11	6,1	2,9	4,86	-0,162	0,144	0,100
L12	6,3	2,64	5,27	0,015	0,286	0,036
L13	6,1	2,54	5,33	-0,096	0,387	0,196
L14	0,3	0,55	7,26	-0,250	0,384	0,231
L15	6	1,59	6,34	0,030	0,311	0,096
L16	6	3,05	4,95	-0,084	0,514	0,316
L17	6,3	2,82	5,19	-0,237	0,546	0,384
L18	5,9	1,55	6,40	0,077	0,568	0,114
L19		3,6	4,55	-0,042	0,669	0,389
L20	6,3	3,23	4,87	-0,209	0,696	0,484
L21	5,7	1,42	6,55	0,088	0,643	0,110
L22		2,4	5,75	0,009	0,743	0,324
L23	5,9	4,05	4,16	-0,094	0,790	0,440
L24	6,8	4,46	3,77	-0,091	0,827	0,495
L25	6,25	3	5,09	-0,176	0,836	0,540
L26	5,6	0,5	7,50	0,042	0,690	0,126
L27	6	4,68	3,55	-0,045	0,899	0,488
L28	6,6	2,25	5,74	-0,152	0,985	0,560
L29		2,2				
L30	6,4	3,3	4,98	0,014	0,895	0,519
L31	6,8	3	5,32	-0,114	1,004	0,688
L32		0,95	7,08	0,045	0,632	0,131
L33		4,34	3,85	0,003	0,929	0,501
L34	6,6	2,63	5,67	-0,025	0,980	0,718
L35	5,5	2,04	5,97	-0,006	0,641	0,080
L36	5,6	3,5	4,65	0,008	0,907	0,317
L37	6,8	4,63	3,56	0,068	0,989	0,462
L38	6,2	3,95	4,31	0,093	0,941	0,580
L39	6,2	3,03	5,20	0,094	0,998	0,670
L40	5,3	3,34	4,61	-0,006	0,812	0,078
L41	6,7	1,5	6,65	0,097	0,950	0,401
L42	6,3	2,77	5,39	0,176	0,969	0,605
L43	0,5	0,5	7,50	-0,057	0,822	0,127
L44	6,8	4,4	3,64	0,079	0,881	0,310
L45	6,5	2,73	5,36	0,197	0,894	0,479
L46	5,3	2,9	5,11	-0,081	0,710	0,136
L47	6,8	3,88	4,11	0,045	0,805	0,256
L48	6,9	2,85	5,10	0,238	0,786	0,348
L49	5,1	4,38	3,61	-0,078	0,615	0,140
L50	6,2	4,3	3,71	0,017	0,627	0,206
L51	5,4	2,9	5,07	0,060	0,679	0,218
L52	6,8	3,18	4,73			
L53	6,9	2,75	5,12	0,233	0,680	
L54	0,5	4,28	3,66	-0,096	0,400	0,107
L55	6,3	3,69	4,23	0,057	0,553	0,173

L56	5,8	2,52	5,24	0,199	0,508	0,144
L57	5,8	3,97	4,04	-0,011	0,216	0,085
L58	6,3	3,65	4,27	0,046	0,333	0,107
L59	6,8	0,6	7,07	0,177	0,326	0,086
L60	0,8	0,7	7,25	-0,010	0,106	0,018
L61	5,5	2,85	4,99	0,087	0,174	0,053
L62	6,8	2,57	5,09	0,089	0,147	0,044
L63	4,3	4,55	3,35	0,016	0,024	0,002
L64	5,5		7,85	0,020	0,033	0,012
L65	6,4	6,34	1,43	0,020	0,040	0,012
L66		6,6	1,11	0,073	0,058	0,012
L67	6,7	2,67	5,02	0,074	0,051	0,025
L68	5	5	2,94	0,012	0,040	0,000
L69	6,3	6,3	1,50	0,026	0,019	0,004
L70	6,3	0,7	6,97	0,020	0,017	0,008
L71	0,5	0,5	7,53	0,009	0,009	0,000
L72	6,4	6,4	1,43	0,015	-0,017	0,000
L73	6,6	6,6	1,05	-0,042	0,006	0,000
L74	0,5	0,5	7,57	-0,002	-0,023	-0,003
L75	6,4	6,4	1,45	0,001	0,006	0,000
L76	6,7	6,7	0,97	0,013	0,016	-0,007

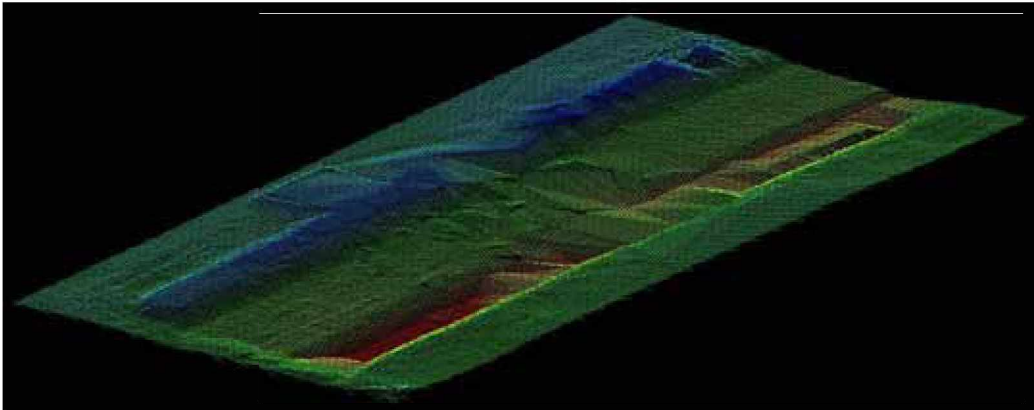
6.6 Laserkeilaukset

Kuormauksen aikana tehtiin yhteensä viisi laserkeilausta (jokaisessa neljä keilauspistettä) ja sortuman jälkeen yksi (kuusi keilauspistettä, kaksi ”uutta” pistettä ojan takana koealueen keskivaiheilla). Koska muilla mittausmenetelmillä havaittiin muodonmuutosten olleen hyvin pieniä kuormauksen loppua ja sortumaa edeltäviä hetkiä lukuun ottamatta, ajan säästämiseksi keilauksista käsiteltiin vain ensimmäinen (alkoi 20.10. klo 16:25), viimeinen sortumaa edeltänyt (alkoi 21.10. klo 17:47) ja sortuman jälkeen (alkoi 22.10 klo 8:26). Näistä kolmesta keilauksesta muodostettiin maastomallit 0,2 m verkolla. Lisäksi viimeisestä keilauksesta muodostettiin maastomalli 0,05 m verkolla.

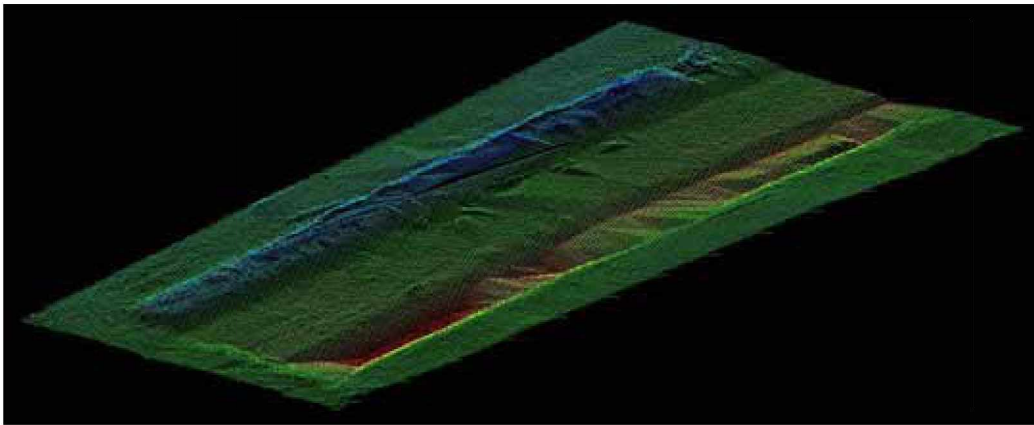
Alun perin laserkeilaimet oli tarkoitus sijoittaa mittalaittekonttien katoille, jolloin näkyvä koealueelle olisi ollut korkeammalta. Konttien epävakauden takia keilauspisteet sijoitettiin kuitenkin maan pinnalle kolmijaloille, minkä toivottiin silti tarjoavan riittävän keilausnäkyvän. Kävi kuitenkin ilmi, että aineistosta muodostetut maastomallit olivat melko puutteellisia ja epätarkkoja. Erityisesti koealueen keskellä sijainneet putket ja kepit jättivät maastomalleihin virheellisiä kumpuja ja epätasaisuuksia johtuen siitä, että keilauksissa ei lopulta saatukaan riittävää peittoa. (Joala 2009) Maastomalleissa on myös huomattavia virheitä ojan kohdalla. Viimeinen maastomalli on huomattavasti muita tarkempi ja vähemmän virheitä sisältävä johtuen juuri useammasta keilauspisteestä.

Maastomallien epämääräisyydestä johtuen niitä ei voitu käyttää vertailemaan eri tilanteiden välillä tapahtuneita siirtymiä niin kuin oli toivottu. Niistä saattoi kuitenkin kriittisellä tarkastelulla, muihin mittauksiin vertaamalla tehdä leikkauskuvat stabiili-teettilaskentaa varten sekä viimeisestä, tiheämmästä maastomallista kartoittaa muodostuneita halkeamia ja muita muodonmuutoksia.

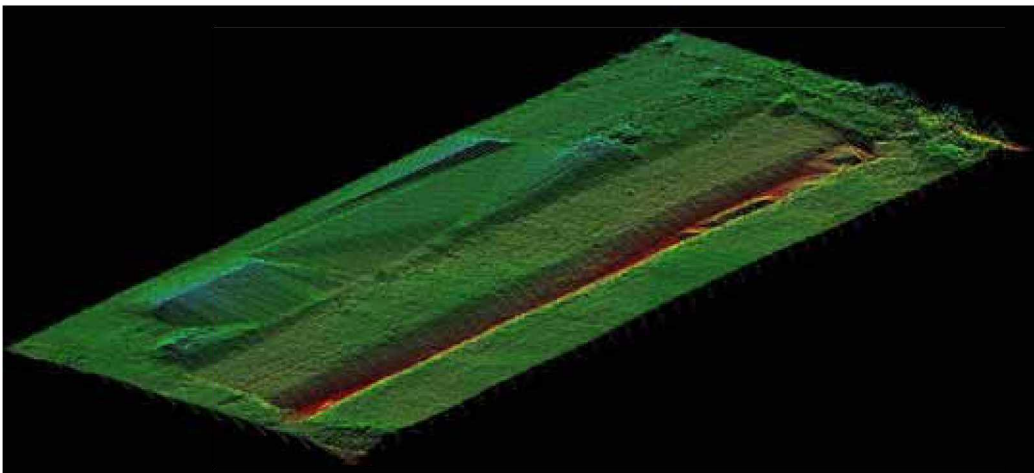
Kuvissa 78...80 on esitetty perspektiivikuvat keilausten perusteella laadituista maastomalleista.



Kuva 78. Kokeen ensimmäinen keilaus.



Kuva 79. Viimeinen sortumaa edeltänyt keilaus.

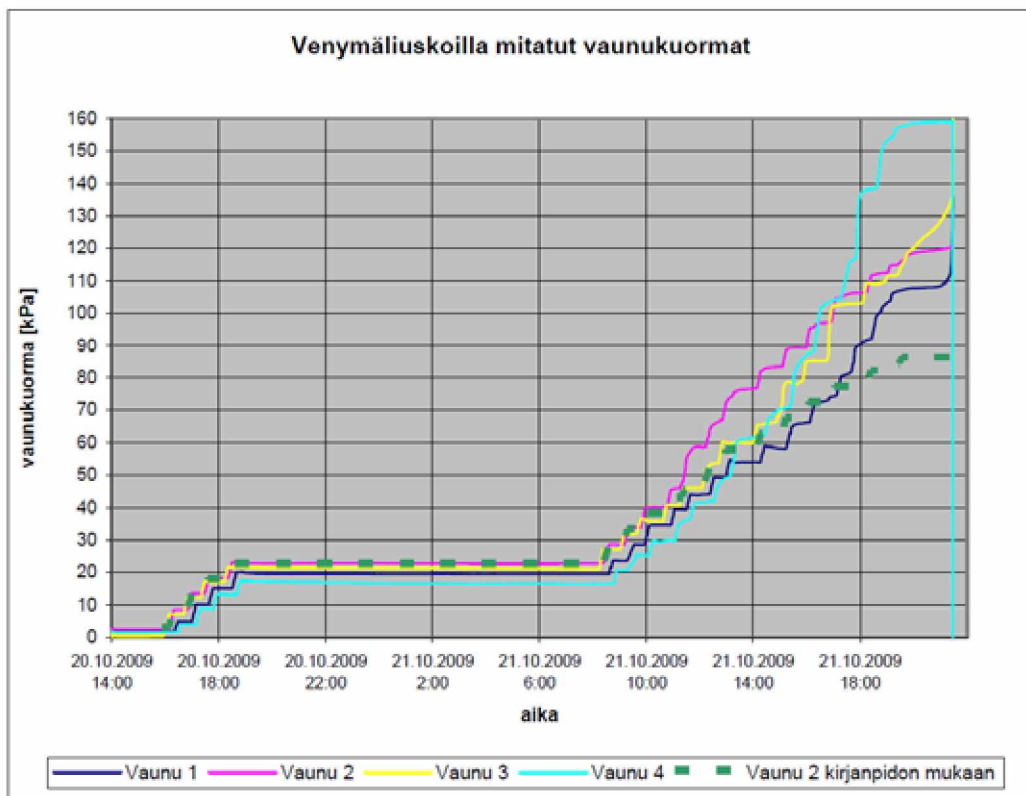


Kuva 80. Sortuman jälkeisenä päivänä tehty keilaus.

6.7 Venymäliuskat

Konttien punnitsemiseen käytettyjen venymäliuskamittausten tuloksia on esitetty kuvassa 81. Kuvaajassa on laskettu yhteen joka vaunun yksittäiset mittaukset (8 kpl/vaunu) ja muunnettu yksiköt alkuperäisistä kilonewtoneista kilopascaleiksi. Mittaukset on kalibroitu niin, että nollakohta vastaa palkistoa ilman kontteja. Vaunu-kuorma sisältää tässä tapauksessa siis kontit ja kuormatun hiekan. Kuvassa on lisäksi vaunun 2 kuormauspöytäkirjojen mukainen kuormitus vastaavasti normalisoituna.

Venymäliuskamittaus toimi hyvin aina keskiviikkoon noin kello 11:20 asti. Tällöin yhdessä vaunun 2 venymäliuskassa tapahtui hyvin nopeasti yli 250 kN kuorman lisäystä vastaava äkkinäinen nousu, joka ei voinut olla todellista muutosta. Pian tämän jälkeen muissakin liuskoissa alkoi tapahtua vastaavia suuria muutoksia. Tämän ajatellaan johtuneen kahden asian yhteisvaikutuksesta: Palkistossa tapahtui epäsymmetrisiä muodonmuutoksia kuormituksen vaikutuksesta ja penkereen muodonmuutosten johdosta. Kun lisäksi kontit oli hitsattu kiinni palkistoon, poikittaisiin palkkeihin muodostui leikkausjännityksen lisäksi normaalijännitystä, joka vääristi tulosta huomattavasti (Laaksonen 2009).

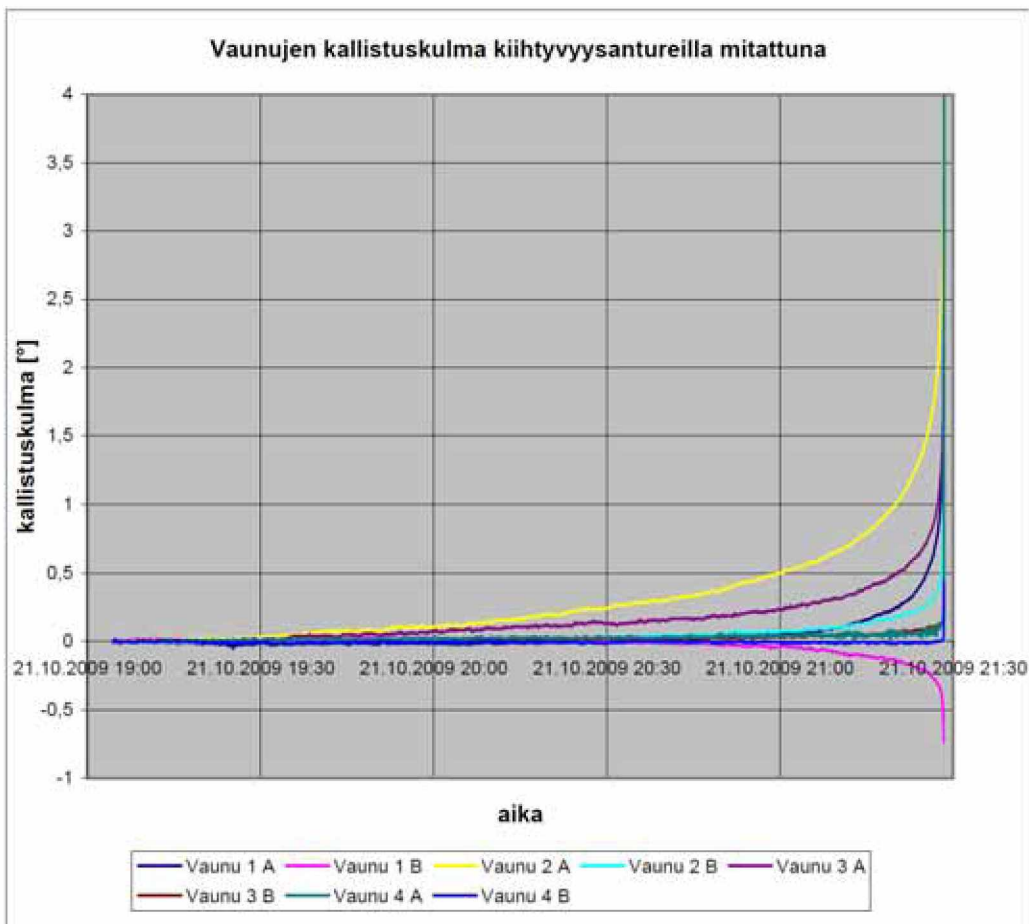


Kuva 81. Vaunu kuormat venymäliuskoilla mitattuina, lisäksi mukana vaunun 2 kuormitus kuormauskirjanpidon mukaan.

6.8 Kallistuskulma-anturit

Nopealla IOtechin Wavebook 516 -loggerilla mitatut vaunujen kallistuskulmat sortumaa edeltäneinä tunteina on esitetty kuvassa 82. Koska anturien mitaamat absoluuttiset kulmat olivat hieman nollasta poikkeavia, mittaustiedoston ensimmäinen mittausta on määritetty nollakohdaksi. Kuvassa on kuvaajat sekä poikkisuuntaisista (A) että pituussuuntaisista (B) kallistuskulma-antureista. Kallistuskulman positiivinen suunta on ojasta pois päin ja siilosta pois päin.

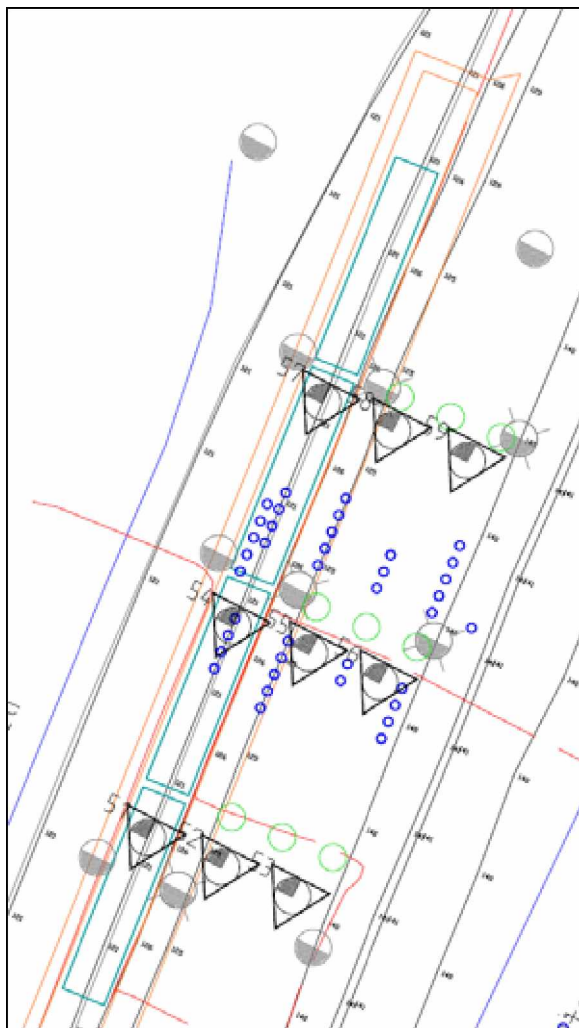
Koealueen keskellä sijainneet vaunut 2 ja 3 (vaunujen numerointi on esitetty kuvassa 17, s. 38) ovat alkaneet kallistua selkeästi muita ennen, noin klo 19:30 alkaen. Tämä on hyvin linjassa muiden mittaushavaintojen kanssa. Varsinainen sortuma käynnistyi ensimmäisenä vaunun 2 kohdalta alueen keskiosassa. Aivan ennen sortumaa vaunun 1 poikittainen kallistuma ”ohitti” vaunun 3 kallistuman. Vaunu 4 kaatui selvästi muiden jälkeen.



Kuva 82. Vaunujen kallistuskulmat ajan funktiona. A-suunta vastaa poikkisuuntaista ja B-suunta pituussuuntaista kallistumaa. Nollatasoksi on valittu hetki 19:04.

6.9 Kokeen jälkeiset CPTu-kairaukset

Kokeen jälkeen päätettiin teettää vielä yksi CPTu-kairauskierros (kuva 83) samalla kalustolla kuin edellinen vastaava tutkimus. Tarkoituksena oli varmentaa liukupinnan sijainti ja selvittää saven sortuman jälkeinen jäännöslujuus. Tutkimuslinjat olivat samat kuin aiemmassa CPTu-kairauksessa, tosin sillä erolla, että penkereen takana olleet pisteet muutettiin penkereen keskilinjan kohdalle. Tutkimus tehtiin joulukuun 2009 alussa.



Kuva 83. Kokeen jälkeinen CPTu-tutkimusohjelma. Laatinut TTY:n tutkija Juho Mansikkamäki. Osa kuvan antureista on virheellisissä paikoissa.

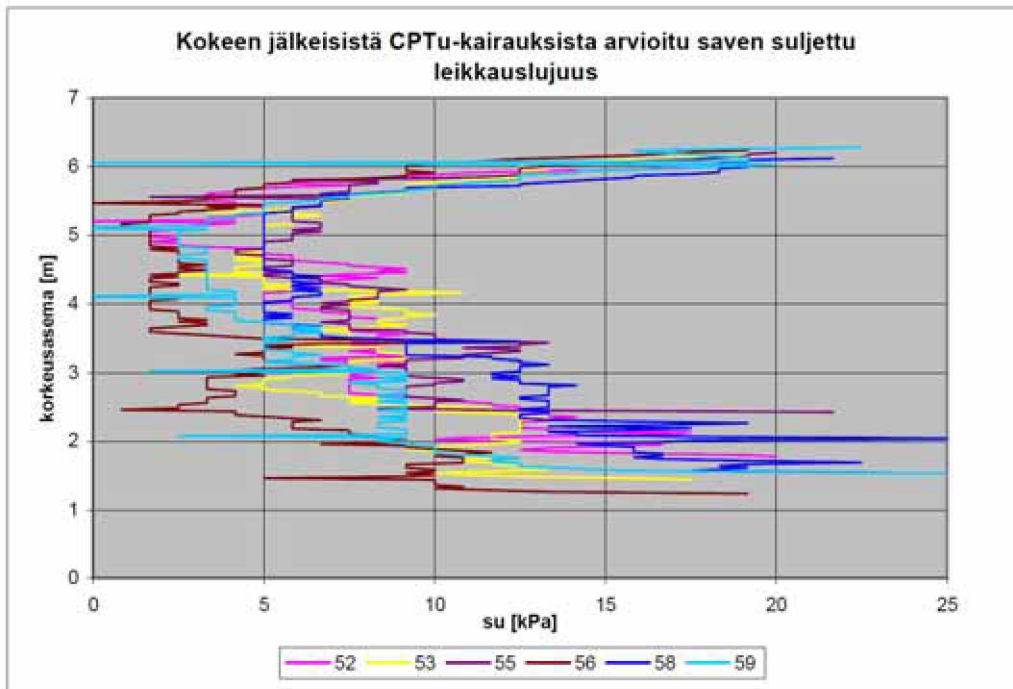
Osa CPTu-kairausdiagrammeista on esitetty liitteessä 6. On huomattava, että sortuman jälkeisistä kairauksista ei voitu laskea saven suljettua leikkauslujuutta kaavan 11 (s. 24) avulla, sillä tällöin saatu leikkauslujuus oli usein jopa negatiivinen. Ilmeisesti kyseinen kaava ei ole enää käyttökelpoinen häiriintyneelle maalle. Suljettua leikkauslujuutta voidaan kuitenkin arvioida karkeasti pelkän kärkivastuksen avulla (kantavuuskaavoihin perustuen):

$$s_u \approx \frac{q_c}{12} \quad (19)$$

missä

s_u = suljettu leikkauslujuus [kPa]

q_c = kärkivastus [kPa]



Kuva 84. Kokeen jälkeisten CPTu-kairauksen perusteella arvioitu suljettu leikkauslujuus savikerroksessa.

Kaavan 19 avulla arvioitu saven suljettu leikkauslujuus ojan ja penkereen välistä on esitetty kuvassa 84. Kairausdiagrammien mukaan koko savikerros on menettänyt leikkauslujuuttaan melko homogeenisesti (koko syvyydeltään). Jäännöslujuus on kaavalla 19 laskettuna yleisesti noin 3–10 kPa syvyydestä riippuen. Ei juuri ole nähtävissä sellaista selkeästi heikompa vyöhykettä, jollaisen olisi voinut kuvitella muodostuneen liukupinnan kohdalle, varsinkaan kun tuloksia verrataan koetta edeltäneeseen tilanteeseen (katso kohta 7.1). Lujuuden gradientti syvyyden suhteen vastaa jotakuinkin koetta edeltänyttä tilannetta. Heikentyneen savikerroksen alapinta on keskimäärin hieman tason +2 alapuolella, mikä vastaa luonnollista maakerrosrajaa.

6.10 Liukupinnan syvyyden ja muodon arviointi

Liukupinnan syvyyden ja muodon arvioinnissa käytettävissä oli useita eri lähteitä: Inklinometrimittaukset, liukupintaputket, huokospainemittaukset, CPTu-kairaukset sekä pintahavainnot.

Liukupinnan rajojen tasosijainnin selvittäminen pinnalla näkyneistä yksityiskohdista oli melko yksinkertaista: Penkereen painuma rajoittui ratapölkkyjen päihin kuormausalueen puolella, joten liukupinnan yläosa alkoi aivan ratapölkkyjen päästä, kuten oli odotettavissa. Ojan pohjalla oli nähtävissä selvät halkeamat siinä, missä liukupinnan passiivipää ulottui maan pinnalle. Liukupinnan ulottuma penkereen pituussuunnassa oli havaittavissa maan pinnalle muodostuneista halkeamista (kuva 85). Myös liukupintaputkista saadut mittaustulokset korreloivat hyvin halkeamien esiintymisen kanssa (katso sivu 112).



Kuva 85. Sorrutuskokeen päätutkija Juho Mansikkamäki ja liukupinnan sijainnista kertovan halkeaman pää.

Kun liukupinnan syvyyttä määritetään inklinometrikuvaajista, on muistettava tietyt epävarmuustekijät: Suurilla siirtymillä inklinometriputken yläpää voi liikkua ylös tai alas, sen alapää voi siirtyä ylöspäin ja lisäksi itse maan pinta nousee sortuman yhteydessä. Sortumassa osa inklinometriputkista nousi ja osa laski. Lisäksi antureiden kallistuskulman ylittäessä mittaussalueen rajan mitattu kulma on todellista pienempi ja näin ollen todelliset pysty- ja sivusiirtymät ovat mitattua suuremmat. Näistä epävarmuustekijöistä johtuen liukupinnan syvyyttä ei välttämättä kannata lukea sortuman jälkeisistä kuvaajista, jos sen kehittyminen on selvästi näkyvissä myös sortumaa edeltäneissä kuvaajissa.

Liukupinta on erotettavissa inklinometrikuvaajista vyöhykkeenä, jossa putken kallistuskulma on suurimmillaan. Tämän vyöhykkeen paksuus kokeen kuvaajissa on jopa kaksi metriä, mutta on luultavaa, että varsinainen liukuvyöhyke ei kuitenkaan ole näin paksu, sillä inklinometriputket ovat saattaneet leikkautua saveen, jolloin ne voivat näyttää liian loivia muodonmuutoksia. Lisäksi esimerkiksi penkereen alla olleen huokospaineanturi H5:n asennusputkeen oli syntynyt kaksi taitetta, joiden etäisyys toisistaan oli noin 50 cm, mikä viittaisi noin puoli metriä paksuun leikkausvyöhykkeeseen. Vyöhykkeen yleinen sijainti on joka tapauksessa nähtävissä kuvaajista. Taulukossa 5 on esitetty kirjoittajan oma tulkinta liukupinnan keskiosan syvyyksistä sortumaa edeltäneeseen maanpintaan nähden inklinometrikuvaajien perusteella sekä vastaavat liukupintaputkien taitteet:

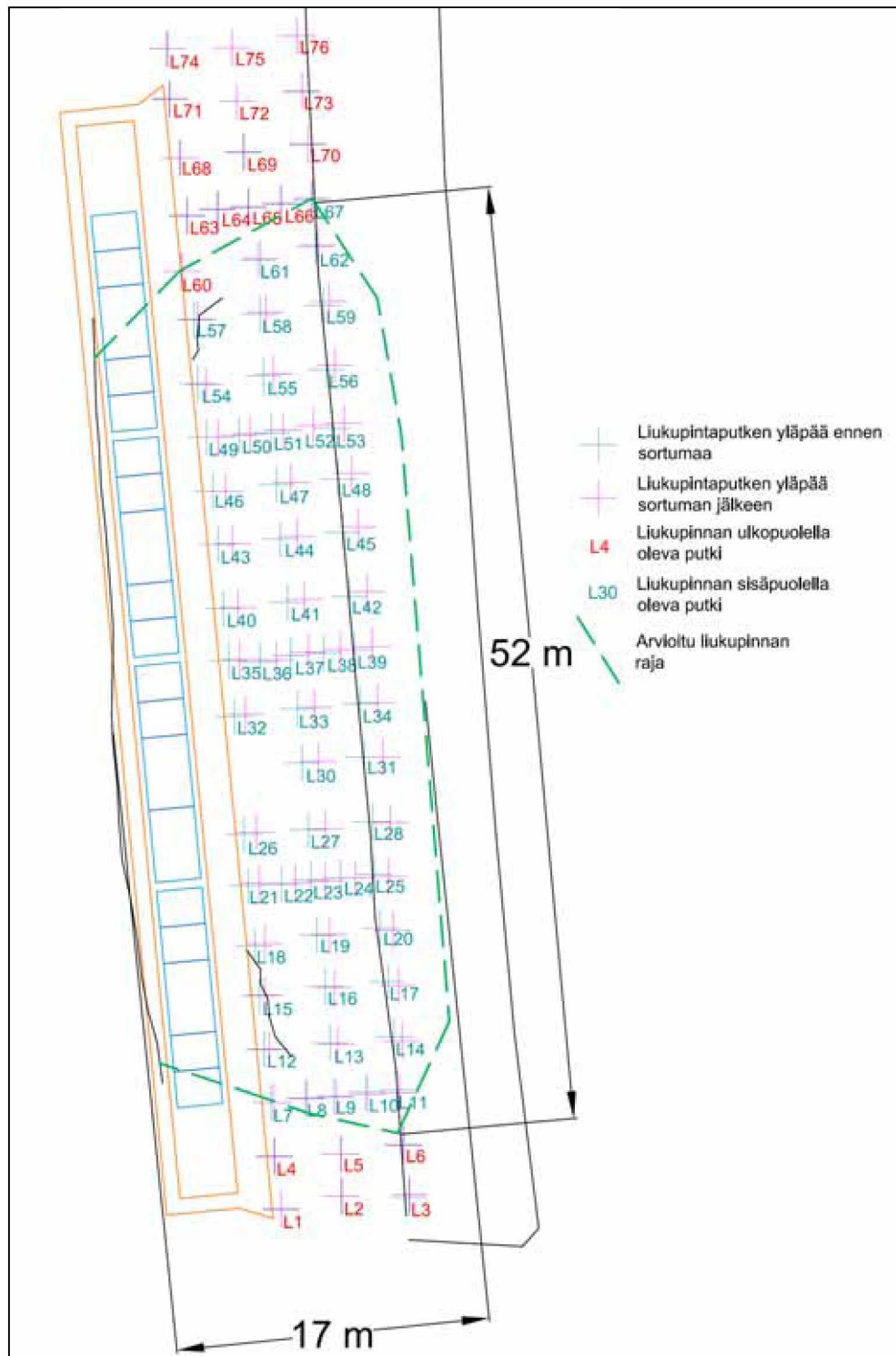
Taulukko 5. Inklinometrikuvaajista arvioidut liukuvyöhykkeen syvyydet ja vastaavista liukupintaputkista taitteet.

Inklinometriputki	Arvioitu liukuvyöhykkeen keskiosan syvyys [m]	Liukupintaputki	Mitattu taitteen syvyys [m]
L1P1	5,5	L21	1,42
L1P2	5,0	L23	4,05
L1P3	3,5	L25	3,0
L2P1	5,25	L35	2,04
L2P2	4,75	L37	4,63
L2P3	3,0	L39	3,03
L3P1	5,5	L49	4,38
L3P2	3,75	L51	2,9
L3P3	2,75	L53	2,75

Liukupinnan mittausputkilla mitattuja syvyyksiä tarkasteltaessa tuli erottaa realistiset mittaukset niistä, joissa putki on taipunut liukupinnan yläpuolelta. Realistisina tuloksina voidaan tässä tapauksessa pitää syvyydeltään noin 1,5–3 m luotauksia ojan reunan vierellä ja 3–5 m luotauksia muualla. Näihinkin tulee silti suhtautua kriittisesti ja verrata niiden todenmukaisuutta muilla menetelmillä saatuihin tuloksiin. Ainakin ”realistisimmat” liukupintaputkien luotaustulokset vastasivat melko hyvin inklinometreilla määritettyä liukuvyöhykettä.

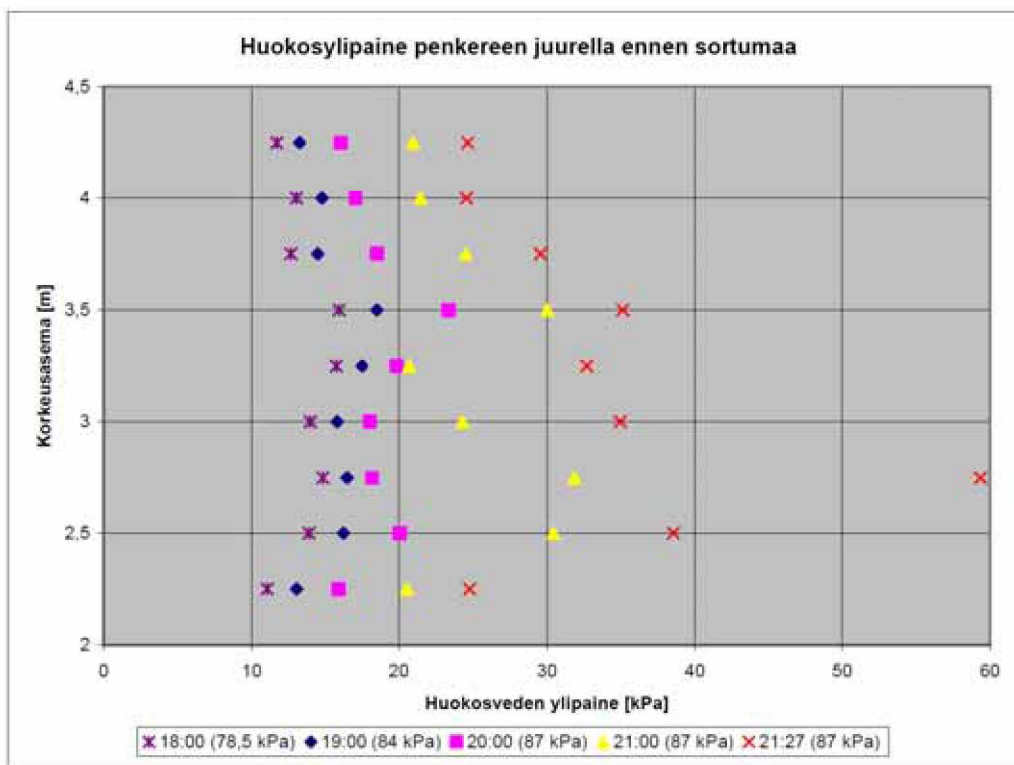
Liukupinnan mittausputkilla saattoi myös arvioida liukupinnan tasosijaintia. Putkien alapäävät olivat kauttaaltaan liukupinnan tasoa syvemmällä. Liukupinnan ulkopuolella olivat tällöin ne putket, joissa ennen koetta ja kokeen jälkeen luodittu syvyys oli sama, eli käytännössä putken kärkeen saakka. Lisäksi on oletettavissa, että ne putket, joiden yläpää ei liikkunut kuin korkeintaan muutamia senttejä, olivat käytännössä liukupinnan ulkopuolella. Näitä havaintoja yhdistelemällä voidaan päätellä, että ainakin liukupintaputket L1...L6, L63...L66 ja L68...L76 jäivät liukupinnan ulkopuolelle. Maan pinnalla esiintyi halkeamia suunnilleen liukupintaputkilla määritetyn sortuma-alueen sisäpuolella, ja alueelle muodostuneiden halkeamien ulottuvuudet ja suunnat antavat osaltaan tietoa liukupinnan ulottuvuuksista.

Kuvassa 86 on esitetty liukupintaputkien yläpäiden tasosijainnit ennen koetta ja sortuman jälkeen. Lisäksi kuvassa on liukupintaputkien ja pinnalle muodostuneiden halkeamien perusteella arvioidut liukupinnan rajat. Kuvaan on myös merkitty penkereen juurelle syntyneen pituussuuntaisen halkeaman päät, jotka kaartuivat ojaa kohti.



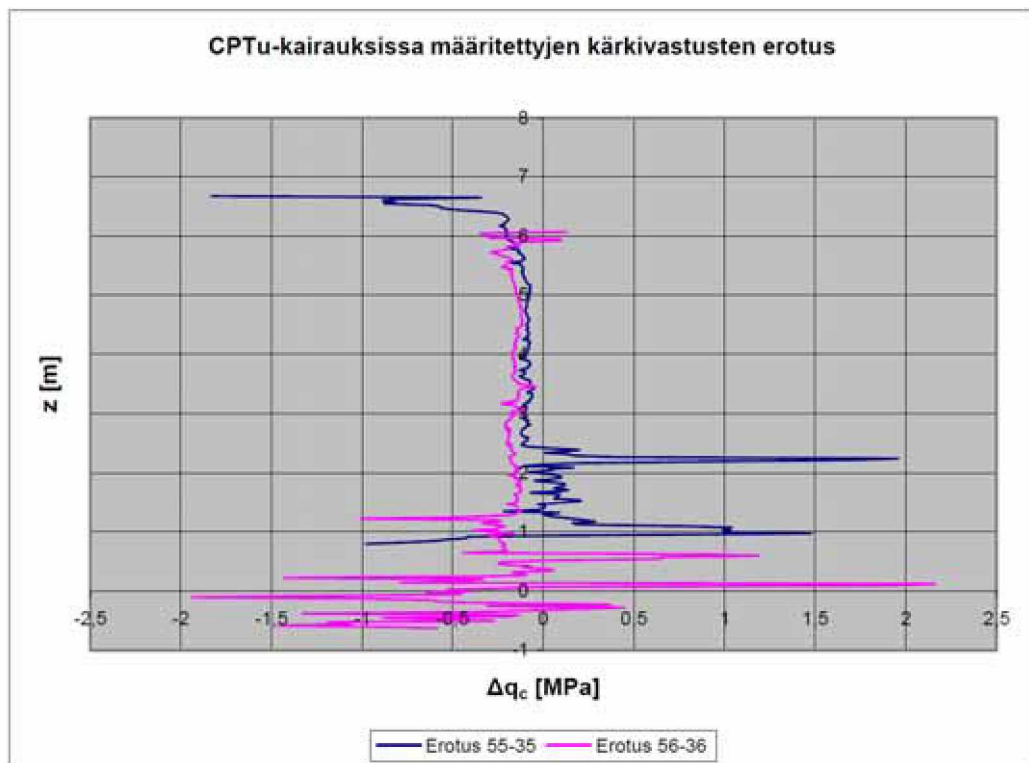
Kuva 86. Liukupintaputkien sijainnit ja liukupinnan arvioidut rajat

Huokospainekuvaajista voidaan havaita joitakin antureita, joiden mittaama huokospaineen kasvu ennen sortumaa oli huomattavan nopeaa. Eräs tällainen anturi oli penkereen juurella, tasolla +2,75 sijainnut huokospaineanturi H16. Kuormituksen loppuvaiheessa (noin kello 20:15 alkaen) kyseisen anturin mittaama huokospaine alkoi kasvaa hyvin jyrkästi, kun tätä ennen anturin mittaama paineen muutos noudatti erittäin täsmällisesti muiden lähistöllä sijainneiden anturien mittaamia muutoksia. Juuri ennen sortumaa anturin H16 mittaama huokospaineen muutos alkutilanteeseen nähden oli lähes 60 kPa, kun muilla lähellä sijainneilla antureilla jäätettiin alle 40 kPa:iin (kuva 87). Lisäksi tasolla +2,5 sijainneen anturin H17 mittaamat paineet kasvoivat myös monia läheisiä antureita nopeammin. Vaikka yksittäisen anturin virheelliset mittaustulokset ovat aina mahdollisia, anturi H16 toimi koko kokeen ajan erittäin säännönmukaisesti, täysin vailla epäilyttäviä piirteitä. Koska ei ole tiedossa mitään syytä epäillä anturin H16 toimivuutta, voidaan olettaa liukupinnan alkaneen kehittyä juuri tällä syvyydellä penkereen juuressa. Anturi H16 sijaitsi lisäksi penkereen pituussuunnassa vaunun 2 kohdalla, josta sortuma lähti liikkeelle.

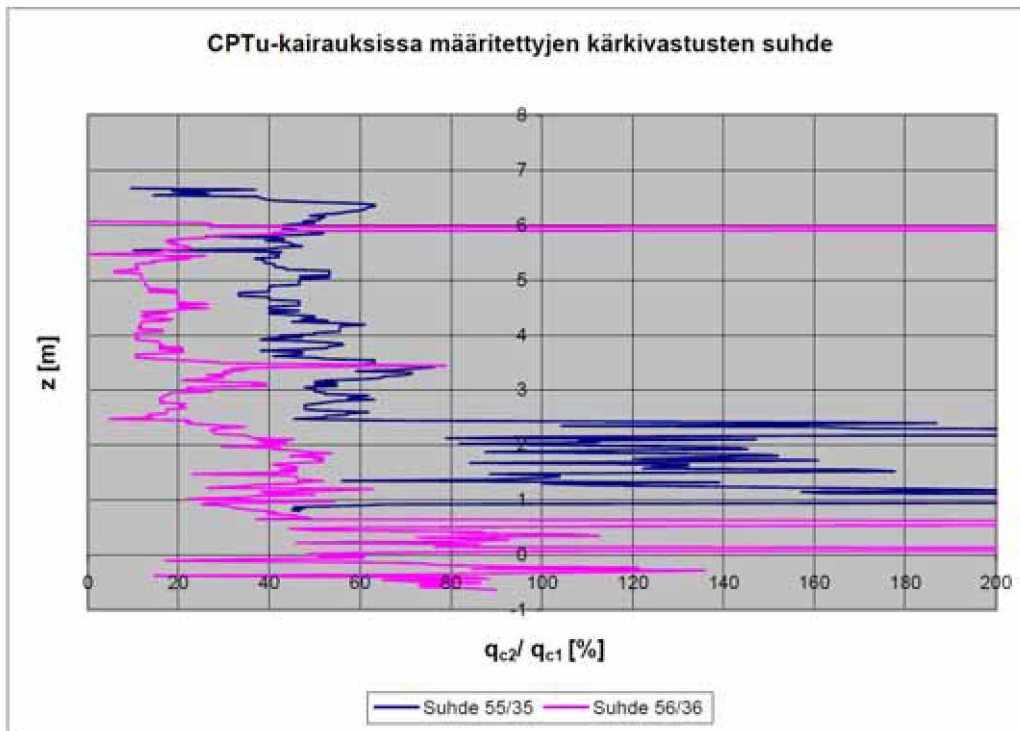


Kuva 87. Huokosveden kokonaisylipaine penkereen juurella eri ajanhetkinä ennen sortumaa. Anturi H16 on korkeustasolla +2,75 ja H17 tasolla +2,5.

Kun verrataan koetta edeltäneitä ja sen jälkeen tehtyjä CPTu-kairauksia, hieman yllättäen liukupintaa ei ole lainkaan havaittavissa. Kuvassa 88 on esimerkkinä koealueen keskellä sijainneiden kairauspisteparien 55–35 ja 56–36 kärkivastusten erotus ja kuvassa 89 vastaava suhde. Kuvaajista nähdään, että kärkivastus (lujuus) savikerroksessa on alentunut kauttaaltaan, eikä huomattavasti ympäristöään enemmän heikentynyt liukupintaa ole nähtävissä. Kuvaajien ”piikeistä ja kuopista” ei voida sanoa mitään varmaa, sillä ne johtunevat lähinnä kairauspisteiden pienten sijaintierojen aiheuttamista eroista maakerrosten korkeustasoissa. Myös muissa pistepareissa (52–32, 53–33, 58–38, 59–39) tulokset noudattavat samaa linjaa. Suurimmat erot kärkivastuksessa ovat karkeammissa maakerroksissa (pehmeän savikerroksen alaraja on nähtävissä parilla 55–35 noin tasolla +2,4 ja parilla 56–36 noin tasolla +1,3). Nähtävästi koko liikkunut savikerros häiriintyi sortumassa kauttaaltaan. Tämä viittaisi Rankinen maanpaineteorian mukaiseen vyöhykemurtoon, jossa saveen muodostuu useita pienempiä liukupintoja ”varsinaisen” liukupinnan lisäksi.



Kuva 88. CPTu-kairauksissa määritettyjen kärkivastusten erotus koealueen keskeltä pistepareista 55–35 ja 56–36. Korkeuskoordinaatti on määritetty pisteiden maanpäällisen korkeusaseman ja havaintosyvyyden erotuksena.



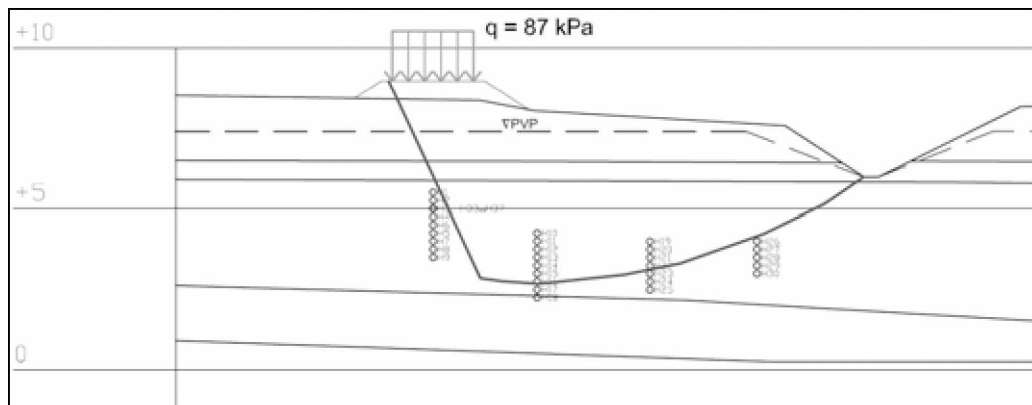
Kuva 89. CPTu-kairauksissa määritettyjen kärkivastusten suhde koalueen keskeltä pistepareista 55-35 ja 56-36.

Liukupinnan syvyyden määrittäminen ei siis ole aivan yksiselitteistä, vaikka sen määrittämiseen olikin useita keinoja. Saattaa myös olla, että todellinen liukupinta ei edes ollut mitenkään selväpiirteinen, vaan leikkausmuodonmuutoksia on voinut tapahtua melko paksulla vyöhykkeellä, jonka rajoja ei voida määrittää tarkasti. Esimerkiksi inklinometreilla määritetty suurimpien muodonmuutosten (suurimpien kallistuskulmien) vyöhyke oli noin 1–2 m paksu.

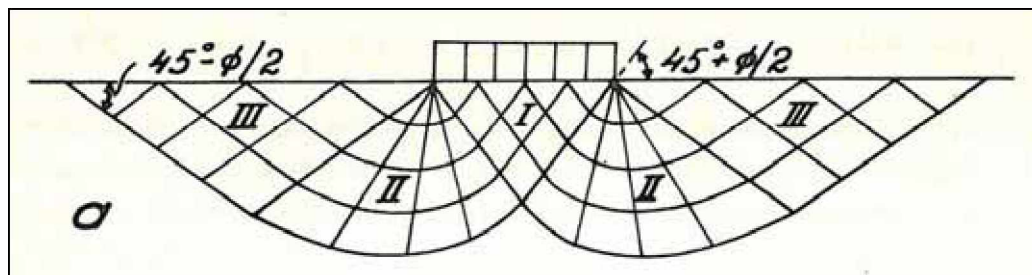
Stabiliteettilaskentaa koskien liukupinnasta voidaan saatujen mittaustulosten ja havaintojen perusteella kuitenkin sanoa seuraavaa:

- liukupinta ei ollut ympyrän muotoinen, vaan ennemminkin kiilamainen (inklinometrit)
- sortuma alkoi kehittyä ensimmäisenä penkereen alla sekä juurella, savikerroksen alarajalla (huokospaineet ja inklinometrit)
- liukupinta ei sijainnut ainakaan inklinometriä ja liukupinnan tarkkailuputkien havaittujen taitteiden yläpuolella
- liukupinta rajoittui luultavimmin syvimmilläänkin (suunnilleen pengerialueen alla ja juurella) pehmeän savikerroksen alareunaan

Kuvassa 90 on hahmotelma liukupinnan arvioidusta muodosta koealueen keskiosassa. Vertailun vuoksi kuvaan on merkitty myös huokospaineanturien sijainnit. Liukupinnan muoto ja CPTu-kairausten tulokset viittaisivat Prandtin kantavuusteorian ja plastisuusteorian mukaiseen murtoon (kuva 91), jossa kuorman alle muodostuu Rankinen aktiivivyöhyke, sivulle leikkausvyöhyke ja liukupinnan passiivipäähän Rankinen passiivivyöhyke (Helenelund 1981 s. 205). Tässä tapauksessa murto tapahtui vain toiselle puolelle epäsymmetrisen geometrian takia.



Kuva 90. Arvioitu liukupinta koealueen keskiosassa.



Kuva 91. Tasaisesti kuormitetun pitkän laatan alla murtohetkellä esiintyvä murto-kuvio Prandtin mukaan. (Helenelund 1981 s. 206)

Liukupinnan mallintaminen stabiliteettilaskennassa oli tässä tapauksessa kannattavinta tehdä siten, että maakerrosgeometria ja maalajiparametrit määritettiin mahdollisimman tarkasti tehtyjen tutkimusten mukaan ja huokospaineet mallinnettiin mittausdataa vastaavina (katso kohta 6.11.1). Liukupinta laskettiin mahdollisuuksien mukaan ilman sen sijainnin rajoittamista, mutta sitä verrattiin tehtyihin havaintoihin. Jos ohjelman laskema vaarallisin liukupinta ei ollut tehtyjen havaintojen kanssa ristiriidassa, voitiin melko turvallisesti pitää tätä ohjelman laskemaa liukupintaa riittävän totuudenmukaisena.

6.11 Stabiliateetin takaisinlaskentaa

Seuraavissa alaluvuissa on esitetty muutamia koetuloksiin perustuvia stabiliateetin takaisinlaskelmia liittyen huokospaineiden mallintamiseen ja liukupinnan päätyvas-
tuksen vaikutusten arviointiin. Laskelmat tehtiin GeoCalc-ohjelmalla. Maalajipara-
metrit valittiin pohjatutkimusten, laboratoriokokeiden ja Troxler-mittausten perusteella.

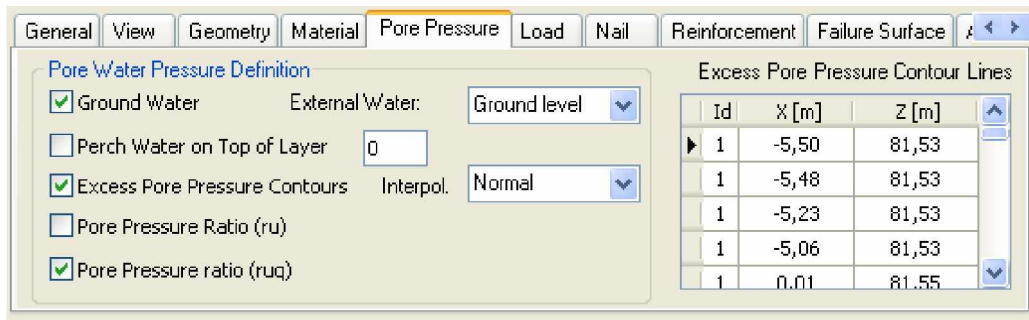
Jos ei erikseen ole mainittu, pehmeässä savikerroksessa on laskelmissa käytetty tehokkaita lujuusparametreja. Laskelmissa käytetyt lujuusparametrit on esitetty taulukossa 6. Syvyyden mukaan muuttuvat lujuusparametrit saavat alkuarvonsa kerroksen yläreunassa ja muuttuvat muutosparametrin mukaisesti siitä suoraan alaspäin (lujuusparametrin muutoksen voisi GeoCalcissa määrittää myös maanpintaan nähden tai maalajirajojen välillä interpoloimalla).

Taulukko 6. Käytetyt lujuusparametrit. Kerroksen "SiSa" suljettua leikkauslujuutta nostettiin laskelmissa tarpeen mukaan liukupinnan pitämiseksi pehmeässä savikerroksessa.

Maakerros	γ [kN/m ³]	c [kPa]	φ' [°]	Δc [kPa/m]	$\Delta \varphi'$ [°/m]
KaM	19,5	0	38,0	0	0
Hk	18,0	0	33,0	0	0
Kk-Sa	16,0	60,0	0	-40,0	0
Sa (teh.)*	15,5	0	24,0	0	0
Sa (su)**	15,5	9	0	1,50	0
SiSa	16,0	18,0	0	20	0
Mr	19,0	0	35,0	0	0
* c' - φ' -laskelmissa käytetyt tehokkaat lujuusparametrit					
** $\varphi=0$ -laskelmissa käytetty suljettu leikkauslujuus					

6.11.1 Huokospaineiden mallintaminen

Stabiliateetin takaisinlaskennassa huokospaineiden mallinnukseen käytetyt parametrit olivat pohjavesi, huokosveden ylipainekäyrät sekä kuorman huokospaineparametri, jota varioitiin (kuva 92).



Kuva 92. GeoCalcin huokospaineasetukset.

Pohjaveden pinta määritettiin huokospaineantureiden mittaustuloksista ennen kuorituksen alkua. Määrittämishetkenä oli 20.10. klo 10. Pohjavedenpinnan korkeusasema voitiin laskea, kun yksittäisen anturin päällä vaikuttaneen vesipatsaan korkeuteen lisättiin anturin korkeusasema:

$$z_w = \frac{P_p}{\gamma_w} + z_p \quad (20)$$

missä

z_w = pohjavedenpinnan korkeusasema [m]

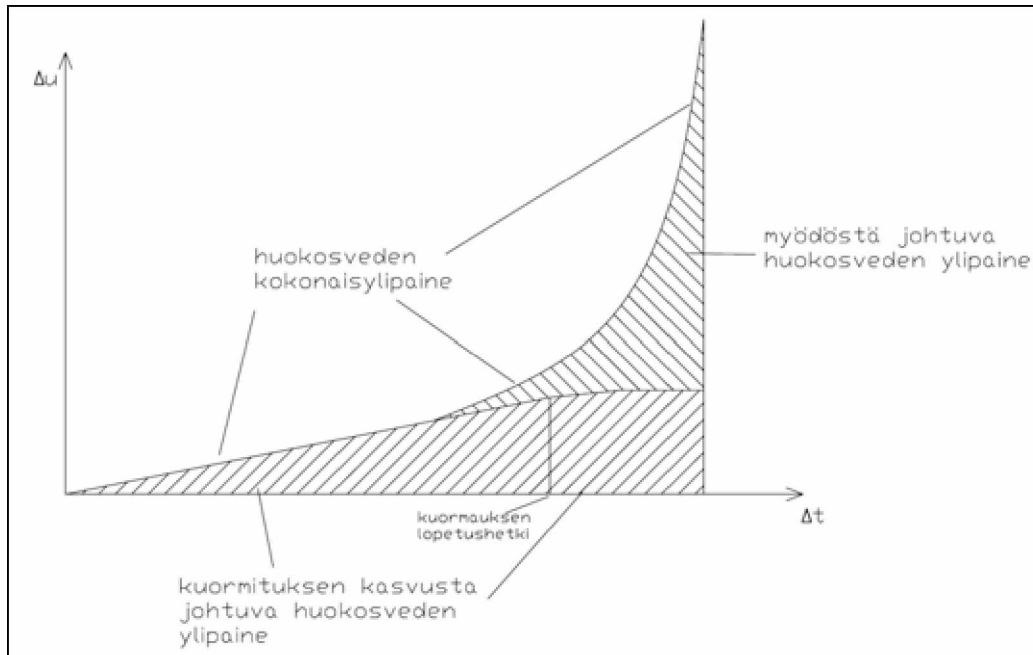
P_p = anturilla mitattu ilmanpainekorjattu huokospaineen arvo [kPa]

γ_w = veden tilavuuspaino 9,81 kN/m³

z_p = anturin korkeusasema [m]

Selkeästi muista poikkeavat tulokset antureista H9, H28 ja H30 sekä varsinaisen koealueen ulkopuolella sijainnut H32 jätettiin huomiotta. Penkereen alla sijainneiden antureiden mittaama pohjavedenpinnan keskiarvo oli +7,59 m (n = 13, keskihajonta 0,32 m) ja muiden anturien keskiarvo +7,38 m (n = 20, keskihajonta 0,28 m). Koska penkereen kohdalla saattoi olla hieman huokosveden ylipainetta penkereestä, palkistosta, konteista sekä penkereen vierellä kulkeneesta kuorma-autoliikenteestä johtuen, laskelmissa päätettiin käyttää vapaalle pohjavedenpinnalle korkeustasoa +7,4 m. Oja mallinnettiin kuivana, mikä vastasi riittävällä tarkkuudella sortumaa edeltänyttä tilannetta.

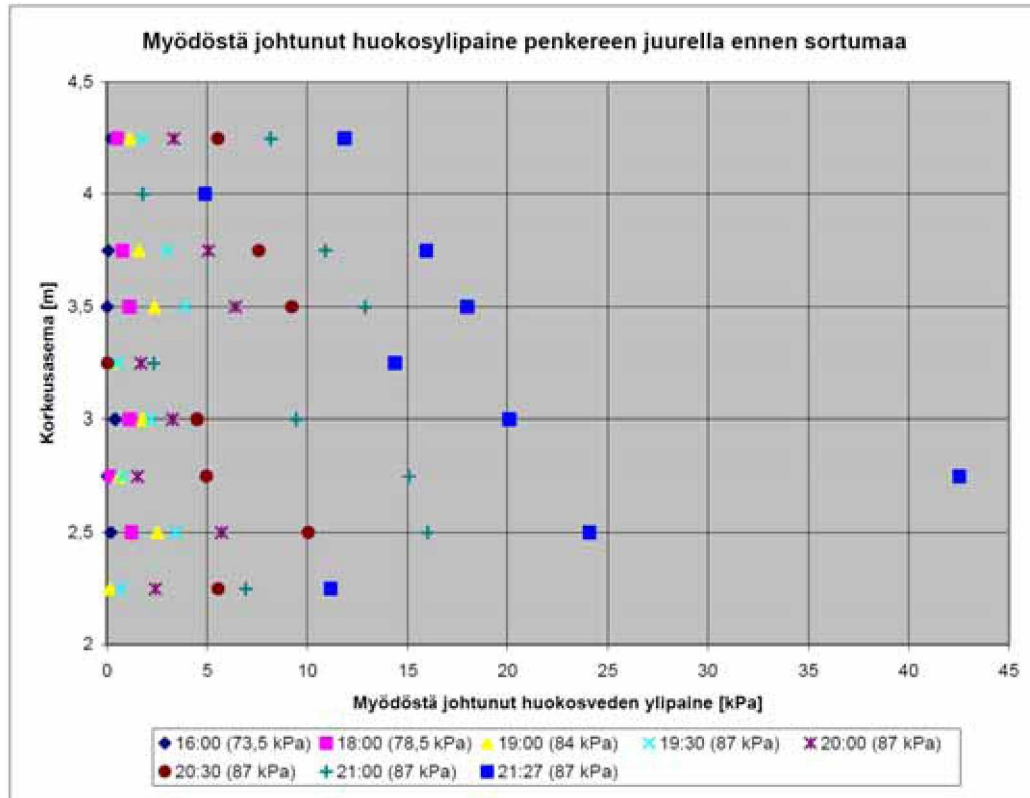
Huokospaineiden mallintamiseen tasa-arvokäyrillä ei suoraan käytetty mitattua huokospaineen kasvua, sillä ohjelmalla voidaan ottaa erikseen huomioon kuorman aiheuttama huokospaineen kasvu suoraan kuorman alla käyttäen parametria r_{uq} . Tämän vuoksi huokosveden ylipainekäyrät yritettiin määrittää erikseen pelkän myödon aiheuttamalle ylipaineelle. Koska kuormaa kasvatettiin melko vakionopeudella, kuorman kasvun aiheuttamaa huokospainetta arvioitiin määrittämällä kulmakerroin huokospaineen kasvulle ajan funktiona. Tämä kulmakerroin määriteltiin sellaiselta aikaväliltä, jolla myötöä ei todennäköisimmin vielä tapahtunut. Ekstrapoloimalla saatua suoraa voitiin arvioida kuorituksen kasvun aiheuttama huokospaineen kasvu niiltäkin hetkiltä, jolloin huokospaine kasvoi myös myödon vaikutuksesta. Laskentatavan periaate on esitetty graafisesti kuvassa 93.



Kuva 93. Laskelmissa käytetty periaate myödöstä johtuneen ja kuormasta johtuneen huokosveden ylipaineen erottamiseksi toisistaan.

Kuormasta johtuneen huokospaineen kulmakerroin k (muotoa kPa/h) määritettiin erikseen jokaiselle anturille ajanhetkien 21.10 klo 10:14 ja 13:15 välisestä keskimääräisestä muutoksesta. Tällä aikavälillä oletettiin huokospaineen kasvun olleen kokonaisuudessaan kuormituksesta johtuvaa. Saatua suoraa ekstrapoloitiin ajanhetkeen 21:10 klo 19:30, jolloin kuormaus lopetettiin. Kokeessa kuormauksessa pidettyjen taukojen aikana huokospaineet jatkoivat kasvua, tosin asympotoottisesti hidastuen. Tätä "viivästynyttä" kuormituksen aiheuttamaa huokospaineen kasvua kuvattiin aikavälillä 19:30–20:30 suoralla, jonka kulmakerroin oli kullekin anturille yksi neljäsosa alkuperäisestä. Kyseinen kulmakertoimen arvo ($k/4$) ja valittu aikaväli olivat lähinnä valistuneita arvauksia. Kello 20:30 eteenpäin aina sortumaan asti oletettiin käytännössä kaiken huokospaineen kasvun johtuneen myödöstä, jolloin suoran kulmakerroin oli nolla. Vähentämällä näiden suorien muodostaman murtoviivan määrittämä kuormasta johtunut ylipaine kokonaisylipaineesta saatiin arvio kunkin anturin mittaamasta myödön aiheuttamasta ylipaineesta.

On selvää, että edellä kuvatulla menetelmällä saadaan vain karkea arvio myödön aiheuttamasta huokosveden ylipaineesta. Arvion tarkkuutta voidaan kuitenkin pitää riittävänä tämän työn puitteissa tehtyihin yksinkertaisiin laskelmiin. Myödön aiheuttaman huokosveden ylipaineen laskemiseen käytettävien menetelmien kehittämiseen tai edes käytettävien parametrien lukuarvojen perustellumpaan valintaan tarvittaisiin lisätutkimuksia, jotka eivät tämän työn puitteissa olleet mahdollisia. Myödön aiheuttaman ylipaineen pystyjakauma eri ajanhetkinä määritettiin erikseen kaikille pituussuuntaisille huokospainelinjoille. Kuvassa 94 on esimerkkinä penkereen juurelta määritetty tilanne eri ajanhetkillä ennen sortumaa (vertaa tätä myös kuvaan 87 (s. 114), jossa on esitetty vastaavat absoluuttiset ylipaineet). Tasa-arvokäyrät piirrettiin GeoCalciin näiden jakaumien perusteella hieman yksinkertaistettuna, sillä tietyistä rajoituksista johtuen käyrien geometriaa ei voitu piirtää aivan mitattua vastaavana.



Kuva 94. Tekstissä kuvatulla tavalla arvioitu myödon aiheuttama huokosveden ylipaine penkereen juurella ennen sortumaa.

Ajan puutteen vuoksi tämän työn puitteissa tehtiin stabiliteettilaskelmia vain koealueen keskeltä, poikkileikkauksen D–D kohdalta (katso kuva 7, s. 25), jonka molemmiin puolin huokospaineanturit sijaitsivat ja jonka läheltä sortuma käynnistyi. Liukupinnan päätyvastus otettiin suuntaa-antavasti huomioon GeoCalcin päätyvastustoiminnolla (katso myös kohta 6.11.2), joka olettaa liukupinnan päädyt pystysuoriksi. Käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 7. Sortuman pituus on määritetty havainnoista luvun 6.10 mukaisesti. Käytetty lepopaine kerroin on arvioitu kolmiakσιαalikokeilla määritetyn saven sisäisen kitkakulman avulla.

Taulukko 7. Laskelmissa käytetyt päätyvastustoiminnon parametrit.

K_0	0,6
Fos	1
Length [m]	50

Laskentamenetelmänä käytettiin pääasiassa Janbun yksinkertaistettua menetelmää vapaamuotoisella liukupinnalla. Syitä valintaan olivat menetelmän hyvä laskentanopeus ja se, että sillä lasketut vaarallisimmat liukupinnat vastasivat sijainniltaan erityäin hyvin kokeessa havaittua liukupintaa jo ilman suuria laskennallisen liukupinnan sijainnille asetettuja rajoituksia. Esimerkiksi ilman tarkkaa liukupinnan sijainnin rajoittamista Morgenstern–Price -menetelmällä lasketut vaarallisimmat liukupinnat sijoittuivat usein ylemmäs ojaluiskassa kuin todellisuudessa tapahtui. GeoCalc ottaa huomioon Janbun yksinkertaistetun menetelmän korjauskertoimen f_0 .

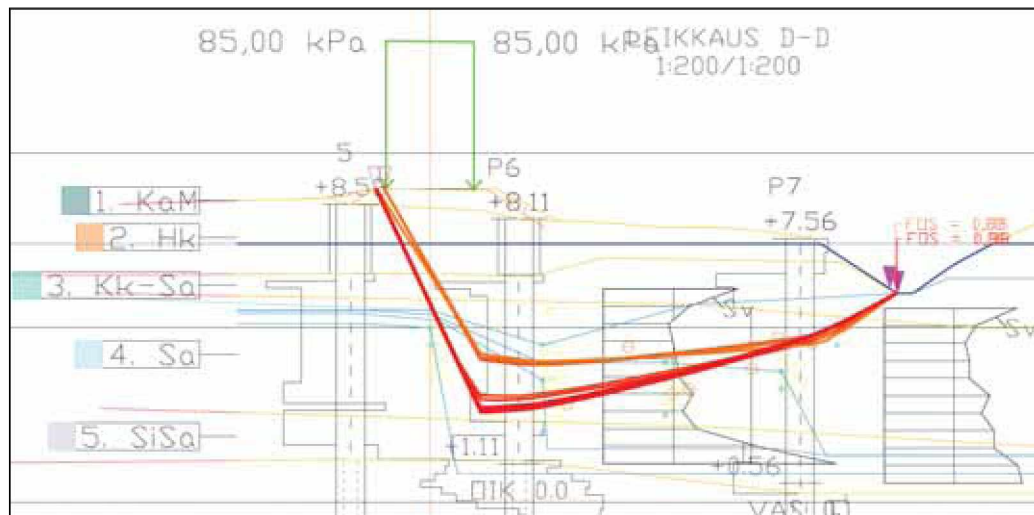
Laskelmissa käytetty liukupinnan päiden sallittu sijainti oli hyvin tarkasti rajattu. Lähtökohtaisesti pyrittiin siihen, että laskelmien liukupinnat olisivat mahdollisimman hyvin linjassa koehavaintojen ja mittausten kanssa tarvitsematta kuitenkaan ohjata niiden sijaintia liian keinotekoisesti. Alustavissa laskelmissa käytettiin melko vapaata liukupinnan rajausta. Ohjelman Janbun yksinkertaistetulla menetelmällä lasketut vaarallisimmat liukupinnat asettuivatkin käytännössä aina aktiivipäästään kuorman taakse ja passiivipäästään ojan pohjan lähempään taitteeseen. Laajalla liukupinnan rajauksella (esimerkiksi passiivipäässä yli 0,5 m aluetta käytettäessä) ohjelmalla oli kuitenkin tiettyjä vaikeuksia todellisen vaarallisimman liukupinnan löytämisessä eräillä huokospaineparametreilla. Esimerkiksi ohjelman löytämän vaarallisimman liukupinnan muoto saattoi tietyillä huokospaineparametreilla olla huomattavan epärealistinen ja/tai laskennallinen kokonaisvarmuus selvästi liian suuri.

Rajaamalla liukupinnan päiden sijainti hyvin tarkasti voitiin varmistaa havaintojen mukaisen ja keskenään vertailukelpoisten liukupintojen löytyminen. Aktiivipäässä liukupinta rajattiin penkereen yläreunan ja ratapölkkyjen päiden väliselle alueelle (videokuvan perusteella liukupinta lähti aivan ratapölkkyjen päästä) ja passiivipäässä ojan pohjan penkereen puoleisesta taitteesta noin 30 cm luiskaa ylöspäin. Vaarallisimman liukupinnan löytämisen varmistamiseksi ojan puoleinen alue jaettiin vielä viiteen osaan, joille kaikille laskettiin erikseen vaarallisin liukupinta. Mainittakoon, että hyvin tarkasta liukupinnan rajauksesta huolimatta ohjelman löytämät vaarallisimmat liukupinnat eivät koskaan sijoittuneet aivan alueiden rajoille, mikä osoittaa alueiden olleen hyvin valittuja ja riittävän laajoja.

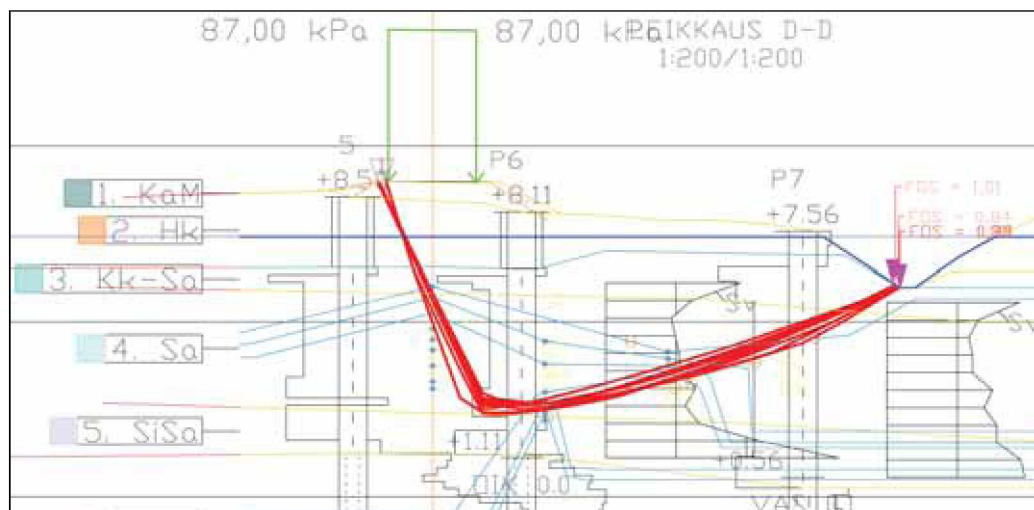
Muut muuttujat pidettiin laskelmissa muuttumattomina lukuun ottamatta kuorman huokospaineparametria r_{uq} , jota varioimalla tutkittiin sen vaikutusta kokonaisvarmuuteen ja lamellien pohjien leikkausvoimiin. Lisäksi tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi alemman, silttisen savikerroksen suljettua leikkauslujuutta kasvatettiin laskelmissa tarpeen mukaan (maksimissaan arvoon 25 kPa), jotta liukupinta pysyisi joka laskelmassa pehmeässä savikerroksessa. Tämä oli tarpeellista lähinnä suurimmilla r_{uq} :n arvoilla (yleisesti noin 0,8...1), joilla liukupinta pyrki kulkemaan alaosaan savisen silttikerroksen kautta. Vaihtoehtoisesti olisi voitu käyttää myös alemmalle savikerrokselle tehokkaita lujuusparametreja ($\varphi' = 27^\circ$, $c = 0$). Tämä olisi kuitenkin vaikeuttanut eri r_{uq} :n arvoilla muodostuneiden leikkausvoimakuvajien vertailua, sillä osa liukupinnoista olisi kulkenut lujuudeltaan erilaisissa maakerroksissa. Lopulta katsottiin parhaaksi pitää laskennallinen liukupinta alaosaan mahdollisuuksien mukaan samassa maakerroksessa, mikä oli myös linjassa inklinometrihavaintojen kanssa.

Myödestä johtuneet huokosveden ylipaineet mallinnettiin tasa-arvokäyrillä ajanhetkille 21.10 klo 21:27 (juuri ennen sortumaa) ja klo 19:00, jolloin huokospaineiden kasvussa alkoi tapahtua ensimmäisiä laadullisia muutoksia. Parametria r_{uq} varioitiin 0,1 yksikön portailta arvosta 1,0 arvoon 0. Lisäksi vertailun vuoksi tehtiin laskelmat pa-

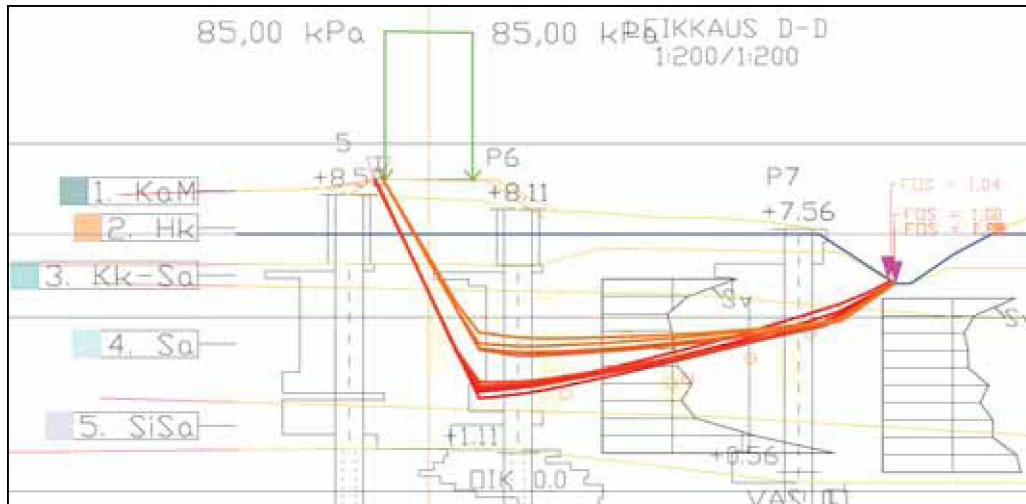
rametrin ruq kanssa ilman myödestä aiheutunutta ylipainetta, sekä ilman parametria r_{uq} käyttäen mitattuja absoluuttisia huokosveden ylipaineita molemmilta ajanhetkiltä. Huokosveden ylipaineiden lisäksi kaikissa laskelmissa otettiin pohjaveden vaikutus huomioon. Lasketut liukupinnat eri parametreilla laskettuina on esitetty kuvissa 95...97. Muita laskelmien tuloksia on esitetty taulukossa 8 (kokonaisvarmuudet eri parametreilla) sekä kuvissa 98 ja 99 (liukupinnalle mobilisoituneet laskennalliset leikkausjännitykset).



Kuva 95. Liukupinnat eri r_{uq} :n arvoilla, huokosveden ylipaine kello 19:00. Selkeästi muita ylempänä olevat liukupinnat on saatu r_{uq} :n arvoilla 0,0...0,3. Kuvassa on lisäksi saman ajanhetken absoluuttisilla huokosylipaineilla laskettu liukupinta (alimpien pintojen joukossa).



Kuva 96. Liukupinnat eri r_{uq} :n arvoilla, huokosveden ylipaine kello 21:27. Kuvassa on lisäksi saman ajanhetken absoluuttisilla huokosylipaineilla laskettu liukupinta.

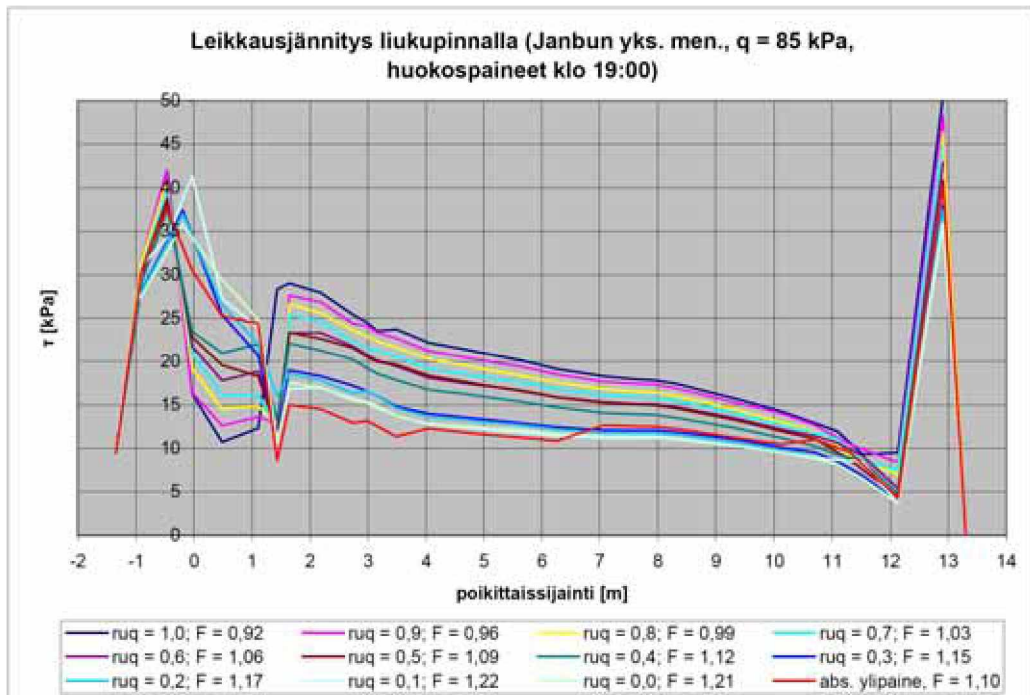


Kuva 97. Liukupinnat eri r_{uq} :n arvoilla, ei myödestä johtunutta huokosveden yli-
painetta. Selkeästi muita ylempänä olevat liukupinnat on saatu r_{uq} :n ar-
voilla 0,0...0,4.

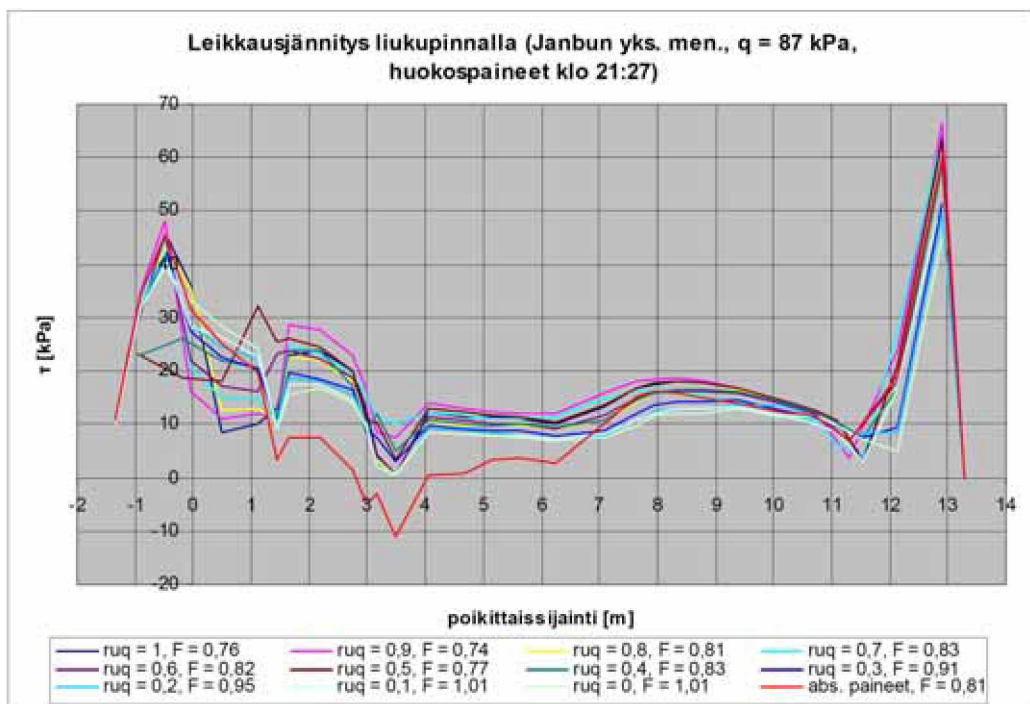
Taulukko 8. Stabiiliteettilaskelmien kokonaisvarmuustuloksia eri huokospainepara-
metreilla.

Janbun yks. men ($c'-\phi'$)	Kokonaisvarmuus F		
	Paineet myödestä klo 21:27 q = 87 kPa	Paineet myödestä klo 19:00 q = 85 kPa	Ei ylipainetta myö- döstä q = 85 kPa
1	0,76	0,92	0,96
0,9	0,74	0,96	1,00
0,8	0,81	0,99	1,04
0,7	0,83	1,03	1,05
0,6	0,82	1,06	1,09
0,5	0,77	1,09	1,12
0,4	0,83	1,12	1,14
0,3	0,91	1,15	1,17
0,2	0,95	1,17	1,19
0,1	1,01	1,22	1,21
0,0	1,01	1,21	1,22
-	0,81*	1,10*	-

*) käytetty kullakin hetkellä vallinneita huokosveden kokonaisylipaineita
(sisältäen sekä kuorman että myödon aiheuttamat osuudet), ei parametria r_{uq}



Kuva 98. Leikkausjännitys liukupinnalla eri r_{uq} :n arvoilla ja absoluuttisilla mitailla ylipaineilla laskettuna ajanhetkellä 21.10. klo 19:00



Kuva 99. Leikkausjännitys liukupinnalla eri r_{uq} :n arvoilla ja absoluuttisilla mitailla ylipaineilla laskettuna ajanhetkellä 21.10. klo 21:27

Leikkausjännityskuvaajiin noin sijaintiin +1,3 muodostuneet terävät kuopat johtuvat luultavimmin laskentaohjelman ominaisuuksista. Tälle kohdalle (liukupinnan taitekohtaan) ohjelma muodosti erittäin kapean lamellin. Kuorman kohdalle muodostuneet kuopat kuvaajissa ovat sen sijaan laskentamenetelmästä johtuvia: Voidaan huomata, että suurilla parametrin r_{uq} arvoilla kuorman alle (sijainti -1,25...1,25 m) muodostui huomattavan pienen leikkausjännityksen (ja sitä kautta leikkauslujuuden) alue, joka näkyy kuoppaana leikkausjännityskuvaajissa. Syy tähän johtuu r_{uq} :n implementoinnista ohjelmassa: Leikkauslujuus määräytyy tehokkaan normaalijännityksen mukaan. Jyrkästi laskevalla liukupinnalla kuormitus aiheuttaa liukupinnan normaalin suuntaisen kokonaisjännityslisäyksen

$$\Delta\sigma_n = q \cdot \cos\alpha \quad (21)$$

missä

- $\Delta\sigma_n$ = kuorman aiheuttama kokonaisjännityslisäys kohtisuorassa liukupintaa vastaan
 q = ulkoinen kuorma
 α = liukupinnan kaltevuuskulma.

Sen sijaan kuorman aiheuttaman huokospaineen kasvussa ei nykyisellään huomioida liukupinnan kaltevuutta. Jos kaltevuuskulman kosinilla kerrotusta pystysuorasta kokonaisjännityslisäyksestä (kokonaisnormaalijännityslisäys) vähennetään täysimääräinen kuorman kasvua vastaava huokospainelisäys (tuloksena laskennallinen tehokas normaalijännitys), Mohr-Coulombin murtokriteerin mukainen laskennallinen leikkauslujuus pienenee kuormituslisäyksen takia. Teoreettista ”ideaalitulannetta”, jossa pystyjännityksen lisäys aiheuttaa vastaavan huokospainelisäyksen ja leikkauslujuus ei muutu, vastasivatkin laskelmissa parhaiten liukupinnan kaltevuuskulman kosinin suuruiset r_{uq} :n arvot noin $r_{uq} = 0,3...0,6$. Liukupinnan kaltevuuskulma kuorman alla vaihteli laskelmissa noin välillä $60^\circ...75^\circ$. Näiden kulmien vastaavat kosinit ovat $0,5...0,26$.

On ilmeistä, että leikkauslujuus kuorman alla kannattaisi laskea ohjelmassa siten, että liukupinnan kaltevuuden vaikutus otettaisiin suoraan huomioon myös kuorman aiheuttamassa huokospainelisäyksen implementoinnissa. Tällöin arvon $r_{uq} = 1$ käyttö olisi huomattavan yksiselitteinen valinta, kun lähtökohtana on leikkauslujuuden muuttumattomuus kuormitettaessa. Jos ohjelma ei ota liukupinnan kaltevuutta huomioon huokospaineiden laskennassa, käyttäjän tulisi valita itse sopiva r_{uq} :n arvo liukupinnan kaltevuuskulman mukaan. Liian suuret r_{uq} :n arvot laskevat ja liian pienet arvot vastaavasti nostavat laskennallista leikkauslujuutta kuorman alla.

Eräs huomionarvoinen seikka laskelmissa on, että kuorman alla ja vieressä (noin poikkitaissijaintiin + 4 m asti) laskennalliset mobilisoituneet leikkausjännitykset ovat juuri ennen sortumaa huomattavasti pienempiä kuin huokospaineiden kiihtyvän kasvun alkaessa kaksi ja puoli tuntia aiemmin. Tämä johtuu sortumaan mennessä tapahtuneesta huomattavasta huokospaineiden kasvusta, joka Mohr-Coulombin murtokriteerin mukaisesti pienensi liukupinnalla käytettävissä ollutta leikkauslujuutta. Kuten lamellimenetelmissä implisiittisesti oletetaan, myös näissä laskelmissa leikkauslujuuden ja leikkausjännityksen suhde vastasi laskettua kokonaisvarmuutta.

Absoluuttisilla huokospainetasoilla (tasa-arvokäyrät) laskennallinen leikkauslujuus ennen sortumaa (kello 21:27) oli jopa negatiivinen kuorman vieressä. Tämäkin johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että ulkoista kuormaa ei jaeta maassa lainkaan (tosin myö-

dön takia leikkauslujuus oli todellisuudessakin hyvin pieni). Liukupinnalle kuorman viereen vaikuttanut pystyjännityksen kasvu jää laskennassa huomioimatta, jolloin huokospaine on jopa suurempi kuin laskennallinen kokonaisjännitys. Tämä vaikutus on hyvä muistaa myös yleisemmin, kun käytetään tasa-arvokäyriä huokosveden ylipaineen määrittämiseen. Laskentatilanteen todenmukaistamiseksi voitaisiin esimerkiksi ajatella kuorman jakamista lamellimenetelmissä tai huokospaineen tasa-arvokäyrille tehtävää kuorman jakamatta jättämisen huomioivaa redusointia, mutta tällöin saattaisi jo olla vaara lamellimenetelmän yksinkertaisuuden ja helppokäyttöisyyden menettämisestä.

Myödestä aiheutuneen huokosveden ylipaineen merkitys laskennalliselle kokonaisvarmuudelle oli laskelmissa merkittävä. Kasvaneet huokospaineet pienentävät maan leikkauslujuutta ja sitä kautta kokonaisvarmuutta. Luonnollisesti myödestä aiheutuvan huokospaineen huomioon ottaminen laskelmissa riippuu tarkasteltavasta tilanteesta eli siitä, kuinka lähellä myötöä ollaan. Joka tapauksessa voidaan sanoa, että ainakin stabiliteetiltaan hyvin heikoilla penkereillä myödestä aiheutuva huokosveden ylipaine on otettava stabiliteettilaskelmissa huomioon, jotta laskennalliset kokonaisvarmuudet eivät olisi liian suuria.

Janbun yksinkertaistetun menetelmän lisäksi tehtiin muutama klo 19:00 tilannetta vastaava laskelma Spencerin menetelmällä (vastaa Morgenstern–Price -menetelmää, jossa $f(x) = 1$). Käytetyt $r_{uq:n}$ arvot vaihtelivat välillä 0,4...0,8. Saadut kokonaisvarmuuden arvot (taulukko 9) olivat hieman Janbun menetelmää suurempia, ja liukupinnat olivat muodoltaan ja sijainniltaan melko yhtäpitäviä Janbun menetelmän kanssa.

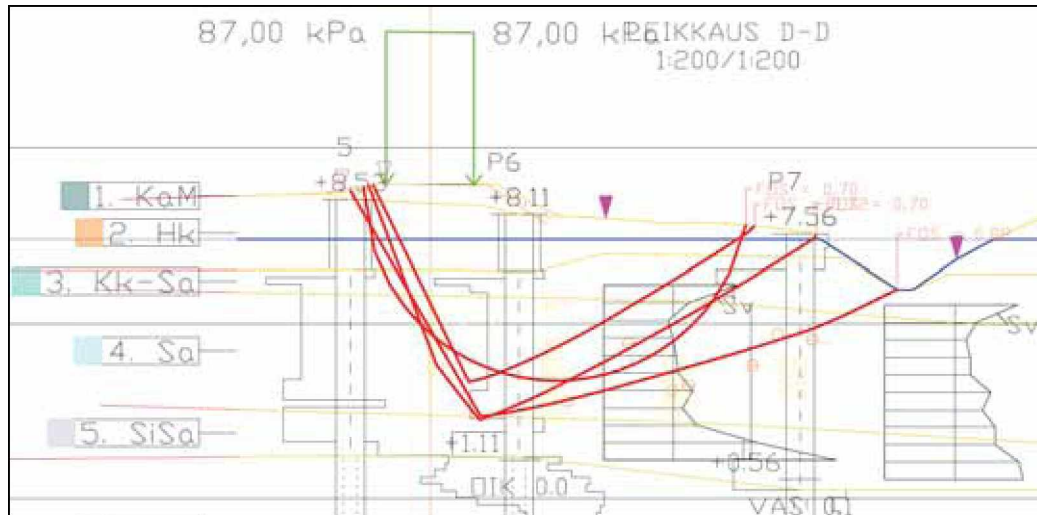
Taulukko 9. Spencerin menetelmällä laskettuja kokonaisvarmuuksia eri parametrin r_{uq} arvoilla.

Spencerin menetelmä (c' - ϕ')	
Paineet myödestä klo 19:00, $q = 85$ kPa	
r_{uq}	Kokonaisvarmuus F
0,8	1,02
0,7	1,07
0,6	1,12
0,5	1,13
0,4	1,18

Vertailun vuoksi tehtiin myös laskelmia suljetulla leikkauslujuudella käyttäen yleisimpiä geoteknisessä suunnittelussa käytettyjä laskentamenetelmiä (Janbun yksinkertaistettu, Spencer, Morgenstern–Price ($f(x) = \sin x$) ja Bishopin yksinkertaistettu menetelmä). Liukupinnan sijainnin rajaaminen oli huomattavasti vapaampaa kuin muissa laskelmissa. Tuloksista (taulukko 10) huomataan, että Janbun yksinkertaistetulla menetelmällä suljetulla leikkauslujuudella saatu kokonaisvarmuus $F = 0,87$ oli jopa yllättävän lähellä vastaavia c' - ϕ' menetelmällä tehtyjen laskelmien kokonaisvarmuuksia (taulukko 8, tilanne klo 21:27). Tämä on sinänsä hyvä tulos, sillä molemmat laskentatavat tarkastelivat nimenomaan murtotilaa, jolloin oikein valituilla lujuusparametreilla voisi olettaa tuloksenkin olevan sama. Muilla laskentamenetelmillä saatu kokonaisvarmuus suljetulla leikkauslujuudella jäi huomattavasti pienemmäksi. Janbun yksinkertaistetulla menetelmällä liukupinta sijoittui tässäkin hyvin havaintoja vastaavaksi, kun taas muiden menetelmien liukupinnat sijoittuivat lähemmäs pengertä (kuva 100).

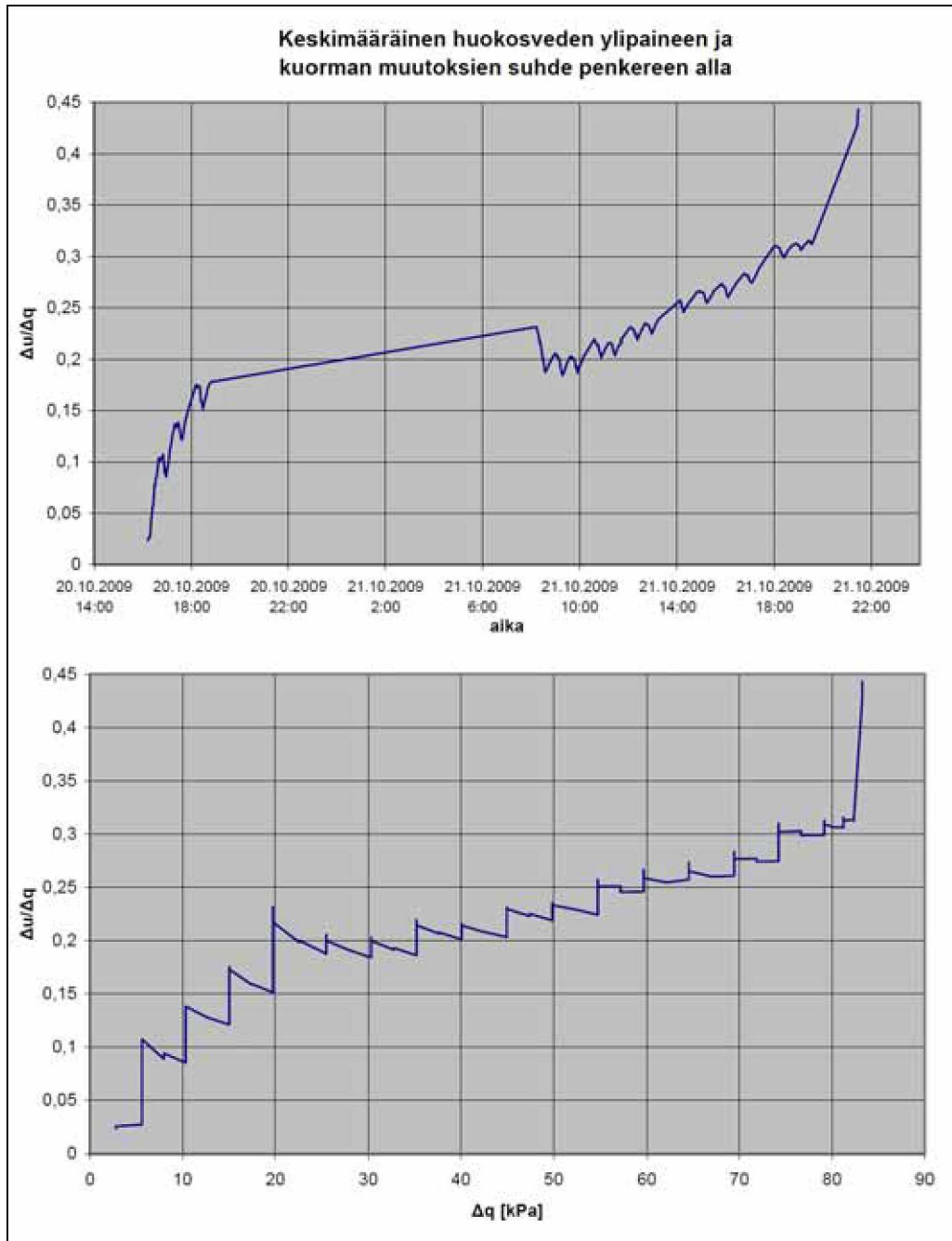
Taulukko 10. Suljetulla leikkauslujuudella eri menetelmillä laskettuja kokonaisvarmuuksia.

Menetelmä ($\phi = 0$, $q = 87$ kPa)	Kokonaisvarmuus F
Janbun yksinkertaistettu, vapaa liukupinta	0,87
Spencer, vapaa liukupinta	0,72
Morgenstern-Price, vapaa liukupinta, $f(x) =$ $\sin x$	0,70
Bishopin yksinkertaistettu, ympyräliukupinta	0,70



Kuva 100. Liukupintoja suljetulla leikkauslujuudella laskettuna. Liukupinnat ovat passiivipäästään (kuvassa oikealla) vasemmalta oikealle luettuna Bishopin yksinkertaistetulla menetelmällä, Spencerin menetelmällä, Morgenstern–Pricen menetelmällä ($f(x) = \sin x$) sekä Janbun yksinkertaistetulla menetelmällä lasketut.

Kokeessa tehtyihin mittauksiin perustuva keskimääräinen huokospaineiden ja ulkoisen kuorman muutoksien suhde penkereen alla (suhteessa konttien kuormauksen alkutilanteeseen) on esitetty kuvassa 101. Tämä suhde oli ennen selkeän myödon alkamista noin alueella 0,2...0,3. Tämä ei kuitenkaan vastaa laskelmissa käytettävää r_{uq} :n arvoa, sillä lamellimenetelmää käyttävät laskentaohjelmat eivät ota kuorman jakautumista lainkaan huomioon (kuormaa ei lamellimenetelmissä jaeta, jolloin myös huokospaineen kasvun tulee olla laskelmissa suoraan kuormaa vastaava, jotta oletus muuttumattomasta leikkauslujuudesta pitäisi paikkansa). Suhdeluvun kasvu noin arvosta 0,2 arvoon 0,3 selittyy huokospaineen kasvun aikariippuvuudella ("viiveellä"), sillä selkeää myötöä ei juuri tapahtunut ennen noin 80 kPa ulkoista kuormaa (noin kello 18:30 eteenpäin), joka vastaa kuvaajassa 76 kPa muutosta.



Kuva 101. Keskimääräinen mitattujen huokosylipaineiden ja kuorman muutoksen suhde penkereen alla. Muutokset on laskettu suhteessa kuormauksen lähtötilanteeseen 20.10. kello 15:55.

Yksinkertaisen, tasaiselle nauhakuormalle tehdyn Boussinesqin teorian mukaisen kuorman jakautumistarkastelun perusteella ulkoinen kuorma vaikutti antureihin penkereen alla niiden syvyydestä riippuen noin kertoimella $0,3 \dots 0,6q$. Tämä ja saadut huokospainemittausten tulokset ovat melko hyvin linjassa sen oletuksen kanssa, että huokospainelisäys on suljetussa tilassa likimain pystysuoran kuormituslisäyksen suuruinen. Oletuksen täydellinen verifiointi vaatisi lisätutkimuksia penkereen alaisesta jännitystilasta.

6.11.2 Liukupinnan päätyvastus ja kuorman jakautuminen

Päätyvastuksen vaikutusta kokonaisvarmuuteen koekohteen stabiileetin laskennassa tutkittiin suuntaa-antavasti varioimalla GeoCalcin päätyvastustoiminnossa (kuva 102) määritettävää sortuman pituutta. Laskelmat tehtiin sekä c' - ϕ' -menetelmällä klo 19:00 ja 21:27 huokospainetasojen mukaisesti ($r_{uq} = 0,6$) että suljetulla leikkauslujuudella. Maakerrosten lujuusparametrit ynnä muut muuttujat pidettiin samoina kuin aiemmissa laskelmissa ja vain sortuman pituuden parametria varioitiin.

End Effect (2D analysis)

KO:	0,6
Fos:	1
Length [m]:	50

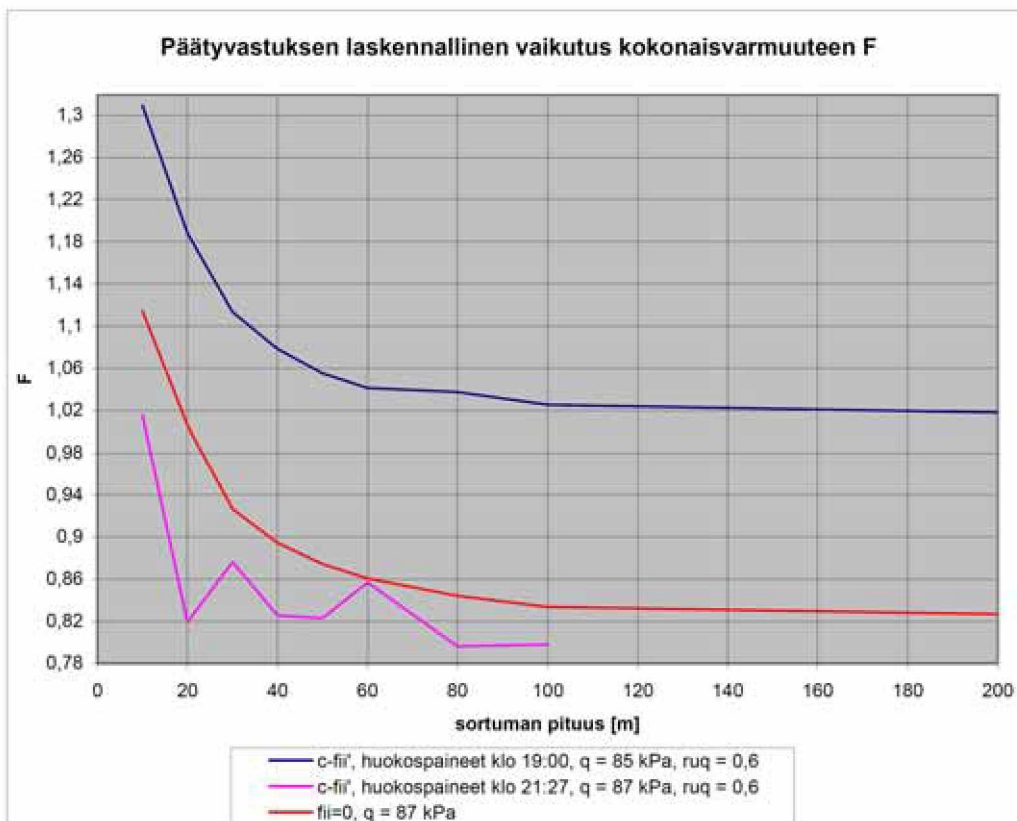
Kuva 102. GeoCalcin päätyvastustoiminto.

Koska GeoCalc mallintaa päätyvastuksen siten, että liikkuvan kappaleen poikkileikkaus on koko pituudeltaan vakio ja sen päädyt leikkautuvat täysin pystysuorassa tasossa, laskennallinen päätyvastuksen vaikutus olisi näin laskettuna luultavasti todellista pienempi. Esimerkiksi kartion muotoisessa päädyssä olisi enemmän leikkautuvaa pinta-alaa kuin tasaaisessa, pystysuorassa päädyssä, mikä johtaisi suhteessa suurempaan päätyvastukseen. Parametri Fos määrittää päätyjen kokonaisvarmuuden. Tämän työn laskelmissa käytettiin arvoa Fos = 1.

Laskelmien tuloksia on esitetty taulukossa 11 ja kuvassa 103. Huomattava seikka on klo 21:27 tilannetta vastaavien laskelmien huomattava epäsäännönmukaisuus. Tämä johtunee ainakin osaksi vaarallisimman liukupinnan sijainnin pienistä eroista eri sortuman pituuksilla, jolloin liukupinta kulki määritettyjen huokospainekäyrien suhteen hieman eri tavoin. Epäsäännönmukaisuus ei siis johdu mistään todellisesta ilmiöstä. Samanlaista variaatiota on havaittavissa myös luvun 6.11 vastaavissa laskelmissa. Yleisesti ottaen sortuman laskennallinen pituus ei kuitenkaan vaikuttanut saatuun liukupinnan muotoon kovinkaan suuresti. Kaikissa laskentatilanteissa voidaan huomata päätyvastuksen vaikutuksen kokonaisvarmuuteen lähestyvän nollaa, kun sortuman pituus ylittää 100 metriä.

Taulukko 11. Päätyvastuksen vaikutus kokonaisvarmuuteen.

Janbun yks. men, vapaa liukupinta	Kokonaisvarmuus F		
	c'- ϕ' , huokospai- neet klo 19:00, ruq = 0,6, q = 85 kPa	c'- ϕ' , huokospai- neet klo 21:27, ruq = 0,6, q = 87 kPa	$\phi=0$, q = 87 kPa
10	1,31	1,02	1,11
20	1,19	0,82	1,01
30	1,11	0,88	0,93
40	1,08	0,83	0,89
50	1,06	0,82	0,87
60	1,04	0,86	0,86
80	1,04	0,80	0,84
100	1,03	0,80	0,83
500	1,00	0,86	0,81
[ei päätyvastusta]	0,99	0,77	0,80

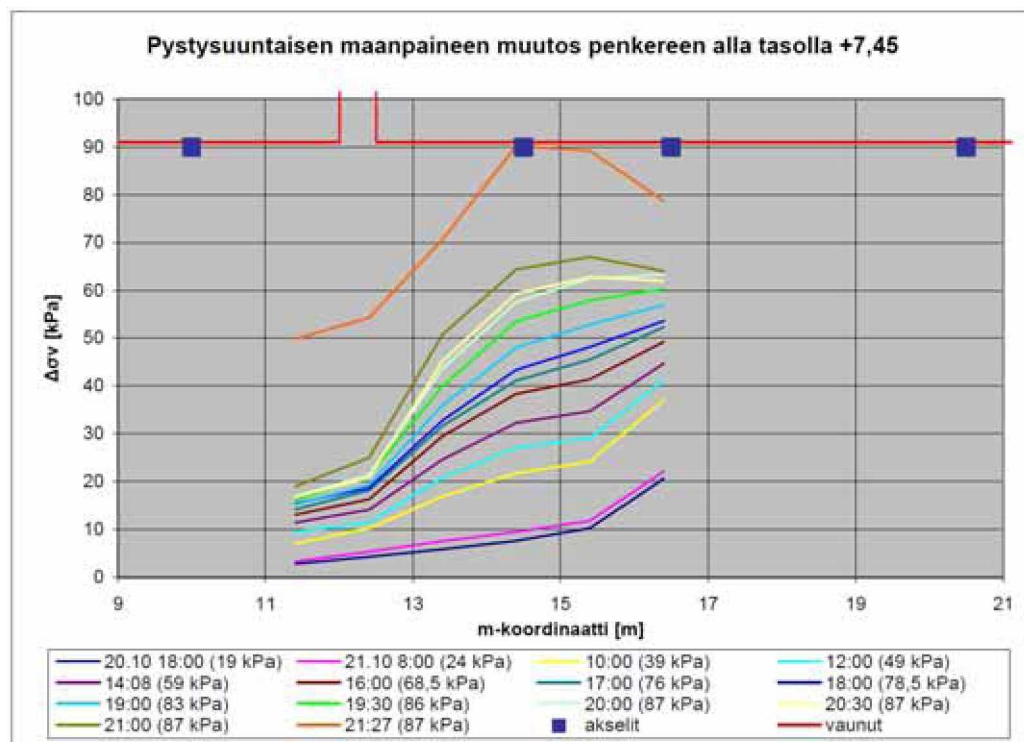


Kuva 103. Päätyvastuksen vaikutus kokonaisvarmuuteen.

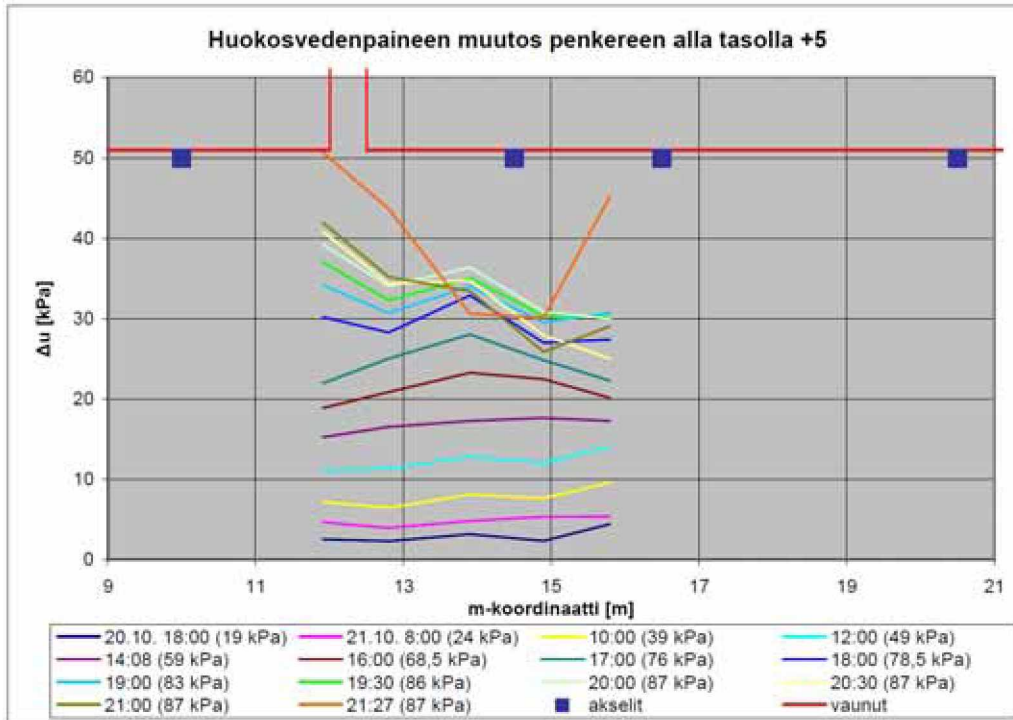
Laskelmien perusteella kokeessa muodostuneen noin 50 metriä pitkän sortuman päätyvastus lisäsi kokonaisvarmuutta noin 6–9 % verrattuna äärettömän pitkään sortumaan. Tätä voidaan jo pitää merkittävänä vaikutuksena. Päätyvastuksen vaikutus on kuitenkin voinut olla jopa suurempi paikallisesti. On selkeästi nähtävissä sekä mittauksista että silmämääräisistä havainnoista, että sortuma alkoi kehittyä ensin alueen keskellä. Tämä antaa syytä olettaa, että sortuma oli alkuvaiheessaan huomattavasti lopullista sortumaa lyhyempi ja päätyvastuksella saattoi olla paikallisesti huomattava vaikutus kokonaisvarmuuteen. Vaikka lopullinen sortuma oli noin 50 metriä pitkä, kuvamateriaalin perusteella sortuma kehittyi ensin noin 20–30 metriä pitkällä alueella vaunun 2 kohdalla ja sen ympäristössä. Laskennallinen kokonaisvarmuus tämän pituiselle sortumalle olisi laskentatavasta riippuen noin 1 tai hieman sen alle juuri ennen sortumaa.

Paikalliseen kokonaisvarmuuteen on saattanut vaikuttaa myös kuorman jakautuminen penkereen pituussuunnassa. Kun tarkastellaan pystysuuntaisen kuormituksen ja huokosveden ylipaineen jakautumista penkereen alla (kuvat 104 ja 105), voidaan huomata joitakin tärkeitä seikkoja:

- Maanpaine vaihteli penkereen alla pituussuunnassa. Ainakin kuivakuoren yläpuolella maanpaine oli telien alla huomattavasti suurempi kuin telien välissä.
- Huokosveden ylipaine tasolla +5 (aivan kuivakuoren alla) oli jakautunut melko tasaisesti penkereen pituussuunnassa. Kuitenkin kokeen alkuvaiheessa huokospaine telin alapuolella oli lievästi suurempi kuin telien välissä, mutta ennen sortumaa huokospaine telien välissä oli kasvanut suhteessa suuremmaksi.



Kuva 104. Pystysuuntaisen maanpaineen muutos penkereen alla tasolla +7,45 (kuivakuoren yläpuolella).



Kuva 105. Huokosvedenpaineen muutos penkereen alapuolella tasolla +5 (kuivakuoren alapuolella).

Vaikka kuivakuori jakoikin ulkoista kuormitusta pituussuunnassa niin, että sen alla pystysuuntaisen maanpaineen jakauma oli luultavasti melko tasainen, erot huokospaineen kehittymisessä viittaavat siihen, että jonkinlaista eroavaisuutta telien alapuolisen ja niiden välisen osan jännitystilän välillä on ollut. Loogisesti voidaan päätellä, että kuivakuoresta huolimatta ulkoinen kuorma kasvatti pystysuuntaisia kokonaisjännityksiä kuivakuoren alla hieman enemmän telien kohdalla kuin telien välissä. Vaikka tutkittu alue oli melko lyhyt ja yksittäisten anturien mahdolliset kalibrointitms. virheet ovat saattaneet vaikuttaa mittauksiin, edellä esitettyjen havaintojen perusteella voidaan päätellä, että kuormituksen jakautumisella penkereen pituussuunnassa on ollut jonkinlaista vaikutusta tehokkaisiin jännityksiin ja paikallisiin kokonaisvarmuuksiin.

Todennäköinen ja havaintojen tukema hypoteesi hitaammalle huokospaineen kasvulle telien alla kuin telien välissä on, että paikallinen kokonaisvarmuus telien alla on ollut pienempi kuin telien välissä ja täten myös siirtymät tietyllä ajanhetkellä suurempia. Sortuman kehittyessä penkereen ja ojan väliset maamassat liikkuivat vaakasuunnassa kohti ojaa, jolloin penkereen alisen, jyrkästi laskevan liukupinnan läheisyydessä vaakasuuntainen maanpaine olisi laskenut maanpaineteorian mukaisen aktiivipaineen kehittyessä. Tämä selittäisi selkeästi mitatun huokospaineen laskun tietyissä antureissa ennen sortumaa. Penkereen reunan alla sijainneella anturilla KT2 ei mitattu lainkaan vaakasuuntaisen maanpaineen laskua, mutta se sijaitsikin selvästi liukupinnasta erillään.

Joka tapauksessa mittauksista voidaan päätellä, että jännitystiloissa ja sitä kautta paikallisessa kokonaisvarmuudessa on ollut penkereen pituussuuntaisia eroja. Asia vaatisi lisää tutkimuksia. Jännitysjakautuman laskennallinen selvittäminen esimerkiksi FEM-laskelmilla olisi sortumamekanismin ymmärtämiseksi erittäin hyödyllistä.

7 Mittalaitteiden toimivuus kokeessa ja niiden soveltuvuus stabiliteetin monitorointiin

Kokeessa saatiin arvokasta tietoa eri mittalaitteiden toiminnasta ja luotettavuudesta stabiliteetin monitoroinnissa. Mittalaitteiden enemmistön voi sanoa antaneen tarkkuudeltaan vähintään riittäviä, monissa tapauksissa erittäin tarkkoja tuloksia. Vaikka erittäin käyttökelpoista dataa saatiin paljon, sen luotettavuutta piti kuitenkin tarkastella kriittisesti. Lähestulkoon jokaisessa mittalaitteessa on myös omat piirteensä, jotka on hyvä ottaa huomioon instrumentoinnin valinnassa ja suunnittelussa. Kaikkien mittausten luotettava toteuttaminen vaatii huomattavaa erityisosaamista, kokemusta ja huolellisuutta.

Yleisesti ottaen mittaukset toimivat varsin hyvin. Tietyissä tapauksissa mittalaitteet eivät aivan täyttäneet niitä odotuksia, joita niihin oli ennen koetta kohdistettu, mutta tämä johtui vähintään yhtä paljon vähäisen käyttökokemuksen aiheuttamasta laitteen ominaisuuksien yliarvioinnista kuin itse mittalaitteista.

Eräs tärkeä esille tullut asia mittausdataa yleensä ajatellen on se, että datan analysoijan ja käsittelijän tulee ensinnäkin tietää edes peruseriaatteet mittalaitteen toiminnasta, ja lisäksi osata etsiä ja mahdollisesti korjata mittauksissa tapahtuneet virheet. Jos dataan luottaa sokeasti ilman kriittistä tarkastelua, mittausten analysoinnissa tehdään helposti pahoja virheitä.

Analogisilla mittalaitteilla (esimerkiksi huokospaine- ja maanpaineanturit) mittauksiin tulee hyvin helposti virhettä ulkoisista häiriöistä ja jännitteen vaihteluista. Tällöin datassa saattaa olla kohinaa tai huomattavan suuria karkeita virheitä (esimerkiksi liitäntöjä käsitellessä aiheutuvista hetkellisistä oikosuluista ja virtapiirin katkeamisista). Karkeat virheet on onneksi yleensä helppo huomata ja poistaa mittausdatasta. Kohinaa voidaan poistaa laitteiden riittävällä maadoituksella ja suojuuksella.

Eräs virhelähde, jota ei välttämättä voida helposti huomata, on lämpötilan vaikutus mittaustuloksiin. Anturi itsessään saattaa olla hyvin lämpötilariippuvainen (joko nolakohta tai kalibroitikerroin muuttuu lämpötilan muuttuessa). Lisäksi lämpötila vaikuttaa kuparikaapelin resistiivisyyteen ja sitä kautta syöttöjännitehäviöihin. Tämän takia myös syöttöjännitettä tulisi mitata koko kokeen ajan ja laskea anturin mittaustulos käyttäen mittauksen kanssa samanhetkistä syöttöjännitettä. Syöttöjännite muuttuu myös lisättäessä tai poistettaessa samaan virtalähteeseen liitettyjä antureita.

QuickBasic-mittausohjelmilla ohjattujen Agilent-loggerien mittaukset katkesivat kokeen aikana muutamaankin otteeseen luultavimmin siitä syystä, että seurantakone yritti lukea mittaustiedostoa verkkolevyltä samaan aikaan kun mittauskone tallensi sinne. Tällöin mittausohjelma kaatui. Vakavin tällainen virhe sattui tiistaina 20.10 illalla, jolloin mittausten pysähtyminen huomattiin vasta seuraavana aamuna. Muut katkot olivat enintään 30 minuutin mittaisia eivätkä käytännössä vaikuttaneet mittausten kokonaisuuden onnistumiseen. Tiedon kirjoitus ja luku oli yritetty synkronoida siten, että ne tapahtuisivat selvästi eri aikaan. Jos jommallakummalla tietokoneella tehtiin joitain toimenpiteitä, luku tai kirjoitus saattoi hieman ”myöhästyä”, jolloin ne sattuivat keskenään liian samanaikaisiksi. Mittauksia pitikin valvoa aika ajoin. Verkkolevyn

käyttö ja mittaus- ja seurantakoneiden erottaminen toisistaan aiheutti siis hieman odottamattomia vaikeuksia, mutta toisaalta näin voitiin ehkäistä mahdolliset sähköisten potentiaalierojen aiheuttamat, paljon vakavammalla tavalla ongelmat. Pidempiaikaisissa kokeissa mittaus- ja lukutaajuutta voitaisiin hyvin hidastaa, jolloin synkronoinnissa on enemmän pelivaraa ja tällaisten ongelmien esiintyminen ei ole kovin todennäköistä.

Digitaalisissa antureissa paljon riippuu anturien omasta toiminnasta (muun muassa anturien ohjelmanpätkien sisältämät kertoimet) ja siinä mahdollisesti esiintyvistä virheistä. Näitä virheitä on kuitenkin hyvin vaikea havaita, jos datan käsittelijä ei itse tiedä anturin toimintaperiaatteita ja ohjelmointia. Systemaattiset mittausvirheet voi tällöin havaita lähinnä vain vertaamalla mittauksia muilla tavoilla saatuihin tuloksiin. Bittivirheet taas ovat eräs vaarallinen mutta usein helposti havaittava virhetyyppi, kuten kävi ilmi tämän kokeen inklinometrimittauksista. Bittivirheidenkin huomaaminen vaatii silti sen, että data käydään huolellisesti läpi poikkeavien tulosten varalta.

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi stabiliteetin monitorointiin soveltuvaksi ajattelavien mittalaitteiden toimintaa ja ominaispiirteitä kokeessa tehtyjen havaintojen perusteella. Mahdollisia mittausmenetelmiä on muitakin (esimerkiksi GPS-mittaukset jne.), mutta tässä asiaa käsitellään ainoastaan sorrutuskokeessa käytettyjen mittausmenetelmien näkökulmasta.

7.1 Huokospaineanturit

Yleisesti ottaen huokospaineanturit toimivat kokeessa erittäin hyvin. Häiriöitä tai kohinaa ei juuri esiintynyt riittävän maadoituksen ansiosta. Suuri enemmistö antureista toimi täysin moitteettomasti. Koepäivien välisenä yönä mittaukset olivat harmillisesti pysähdyksissä, mutta tämä virhe ei kuitenkaan johtunut itse antureista, vaan mittausjärjestelyistä.

Kuorman kasvusta aiheutunut huokospaineen kasvu vastasi ilmeisen hyvin pystyjännityksen kasvua maassa. Kuten oli odotettavissa, suurin huokospaineen kasvu kuormituksen aikana mitattiin penkereen alla. Mitä kauempana sivusuunnassa anturi oli penkereestä, sitä vähäisempää mitattu huokospaineen kasvu oli. Lisäksi huokospaineiden kasvun kiihtyminen alkoi penkereen lähellä aiemmin kuin ojan lähellä, mikä täysin odotetusti indikoi liukupinnan kehittymisen alkaneen penkereen lähellä.

Useilla penkereen alapuolisilla antureilla mitattiin kuormituksen loppuvaiheessa ja sortumaa edeltävinä tunteina huokospaineiden laskua. Liukupinta kulki penkereen alla jyrkässä kulmassa alaspäin. Tälle liukupinnan osalle kehittyikin mitä luultavimmin aktiivipaine ojan puoleisen maaperän liikkeessä ojaa kohti. Lisäksi on mahdollista, että kun liukupinta alkoi kehittyä, yhä suurempi osa kuormasta jakautui liukupinnalle ja sen yläpuoliselle/ojan puoleiselle osalle (liukupinnan ”katkaisema” maakontribuuti ei välitä kuormaa jyrkästi laskevan liukupinnan osan toiselle puolelle ”täydellä teholla”). Tällöin liukupinnan alapuolelle olisi jäänyt pienempi osuus kuormasta. Tämä kaikki vähentäisi huokosveden ylipainetta. Tämä pohdinta on kuitenkin puhtaasti hypoteettista, ja sen todentaminen vaatisi jatkotutkimuksia.

Tärkeä seikka stabiliteetin monitoroinnissa huokospaineisiin perustuen on ”normaalin” kuormituksesta johtuvan huokospaineen kasvun erottaminen myödestä johtuvasta kasvusta. Tämä voi olla erityisen vaikeaa kiskoille pysähtyvän junan tapauksessa,

jolloin ulkoinen kuorma kasvaa täyteen arvoonsa käytännössä välittömästi, mutta huokospaineen kehittymiseen tarvitaan enemmän aikaa. Sen sijaan hieman pidempi-aikaisessa tai vaiheittain kasvavassa kuormituksessa (esimerkiksi uuden maanvaraisen penkereen rakentaminen tai vanhan korottaminen) voidaan mahdollisesti erottaa melko vakiokulmakertoiminen, kuormituksen kasvusta johtuva huokospaineen kasvu ja myödestä johtuva kiihtyvä kasvu.

Huokospaineiden kasvunopeuden äkillistä kiihtymistä myöden vaikutuksesta voidaan pitää selvänä merkinä vaarallisen heikosta penkereen stabiliteetista. Kokeessa tehtyjen havaintojen perusteella ei kuitenkaan kannata luottaa siihen, että myödestä johtuva huokospaineen kasvu olisi välttämättä selkeää, tai että tällaista äkillistä kasvua edes tapahtuisi ennen kuin aivan sortumaa edeltävinä hetkinä. Kokeessa todennäköisenä syynä huokospaineiden pieneen kasvuun tai jopa laskuun penkereen alla sortumaa edeltävinä tunteina oli luultavimmin aktiivipaineen kehittyminen liukupinnalla.

Hyvin nopea ulkoisen kuormituksen kasvu saattaa aiheuttaa aluksi näennäisen alhaisen kuormasta aiheutuvan huokospaineen lisäyksen, sillä kokeessa tehtyjen havaintojen perusteella tiettyä kuormaa vastaava huokospaineen lisäys ei tapahdu aivan välittömästi, vaan pienellä viiveellä. Verrattain nopea kuormitustahti ei antanut huokospaineiden nousta tietyllä kuormitusportaalla niin korkealle kuin olisi ollut ”luonnollisesti” mahdollista. Jos kuormitusportaiden välillä olisi pidetty pidemmät tauot, huokospaineet olisivat nousseet asymptoottisesti tiettyyn kyseistä kuormitustasoa vastaavaan arvoon ennen paineen tasaantumista. Tämä on erityisesti nähtävissä penkereen alla ja juurella sijainneissa antureissa, joiden ajan funktiona piirrettyissä kuvajissa kuormitusportaat ovat selkeästi nähtävissä. Kokeessa käytetty nopea kuormitus vastasi kuitenkin mahdollisimman hyvin ratapenkereiden stabiliteetin mitoitettavaa kuormitustilannetta, kiskoille pysähtynyttä junaa.

Vaikka epäsäännöllisesti muuttuvat huokospaineet penkereen alla vaikeuttavatkin stabiliteetin kvantitatiivista analyysia, stabiliteetin monitorointia ajatellen sekä huokospaineiden äkillistä nousua (myödestä) että laskua (aktiivipaineen kehittymisestä) raskaasti kuormitetun penkereen alla voidaan luultavimmin pitää hyvinä indikaattoreina uhkaavasta sortumasta. Näissä muutoksissa mekanismit ovat keskenään täysin erilaisia, mutta yhtä kaikki molemmat johtuvat heikkoon stabiliteettiin liittyvistä ilmiöistä. Pahimmassa tapauksessa nämä indikaattorit voinevat kumota toisensa niin, että huokospaineen kasvun laadullinen muutos jää huomaamatta, mutta tämä on hyvin epätodennäköistä.

Varsinkin pitkäaikaisessa monitoroinnissa olisi hyvin tärkeää ottaa huomioon ilmanpaineen muutokset, jos huokospaineen mittaukseen käytetään absoluuttiantureita (mittaus tyhjiötä vastaan). Ainakin sorrustuskokeessa käytetyt huokospaineanturit reagoivat hyvin selkeästi ilmanpaineen muutoksiin sen jälkeen, kun anturien asentamisesta aiheutunut ylipaine tasaantui. Lisäksi pohjaveden pinnan muutokset esimerkiksi runsaiden sateiden tai lumen sulamisen vaikutuksesta vaikuttavat suoraan huokospainemittauksiin. Vaikka onkin tärkeää yrittää erottaa tällainen ”luonnollinen” huokospaineen muutos varsinaisista heikon stabiliteetin indikaatioista, sateiden tai lumen sulamisen aiheuttama huokospaineen kasvu on yhtä kaikki vaarallista penkereen stabiliteetille tehokkaiden jännitysten pienenemisen takia, ja se tulisi ottaa huomioon stabiliteettilaskelmissa. Esimerkiksi runsaiden sateiden aiheuttama suuri huokospaineen kasvu voi helposti aiheuttaa sortumia. Tämä mekanismi onkin ollut tärkeässä roolissa useissa maailmalla sattuneissa maanvyörymissä ja luiskien sortumissa.

Edellä esitetyistä muuttujista johtuen huokospainemittaukset eivät yksinään ole kovinkaan hyvä keino varsinaiseen stabiliteetin monitorointiin ainakaan sortuman indikaattoreita tarkkailtaessa. Tieto maassa vallitsevista huokospaineista on kuitenkin äärimmäisen tärkeä stabiliteetin laskennallisessa arvioinnissa, ja huokospainemittauksia onkin syytä käyttää muiden menetelmien täydentäjänä stabiliteetiltaan heikkojen ratapenkereiden monitoroinnissa.

7.2 Inklinometrit

Kokeessa inklinometrit osoittautuivat varsin hyödyllisiksi siirtymien seuraamisessa. Inklinometriä käyttäen lisää se seikka, että niillä voidaan havaita myös syvällä maassa tapahtuvat siirtymät, jotka kehittyvän liukupinnan kohdalla ovat suurempia ja täten helpommin havaittavia kuin maan pinnalla tapahtuvat siirtymät. Lisäksi niillä voidaan jo aikaisessa vaiheessa arvioida kehittyvän liukupinnan sijaintia, mitä tietoa voidaan käyttää hyväksi stabiliteetilaskelmissa korjaustoimenpiteitä suunniteltaessa.

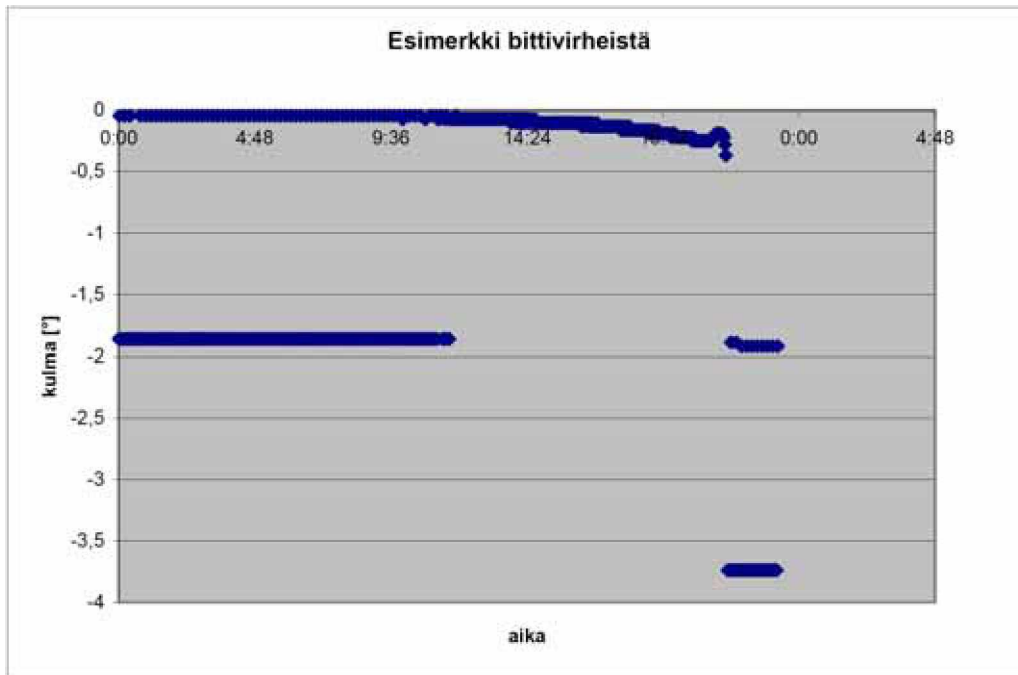
Käytettyä 2–3 minuutin mittausaikaväliä voidaan pitää riittävänä nopean sorruskokeen analyysin tarpeisiin. Kokeen ajanakin, erityisesti sen loppuvaiheissa olisi tosin voinut olla hyödyllistä seurata siirtymiä palvelimelta tiheämmin kuin tiedon siirtoon palvelimelle käytetyllä 11 minuutin aikavälillä. Pitkäaikaisessa monitoroinnissa mittausväli on laitteiden akkujen säästämiseksi huomattavasti harvempi, esimerkiksi kerran vuorokaudessa tai kerran tunnissa. Jos mittauksissa havaitaan huolestuttavaa liikettä, mittausaajuutta voidaan tarpeen mukaan kasvattaa.

Siirtymien absoluuttisten suuruuksien mittaaminen oli kokeessa melko epävarmaa, vaikkakin penkereeseen nähden poikittaisen siirtymän suuruusluokka oli melko lähellä oikeaksi arveltua. Mitattujen siirtymien virheellisyys johtunee suureksi osaksi asennuksesta (anturien kiertosuunnan poikkeama suunnitellusta ja mahdollisesti anturien sivusuuntainen liike maahan porattuun asennusreikään nähden). Erityisesti penkereen pituussuuntaisen B-suunnan siirtymän suuruuden mittaus oli hyvin epävarmaa. Taulukossa 12 on esitetty inklinometriä laskennalliset maanpinnan siirtymät ja kunkin inklinometriputken juuressa olleen prisman vastaavat siirtymät. Prismojen siirtymiä voidaan pitää totuudenmukaisina. Koska todellinen siirtymävektori oli lähes pengertä vastaan kohtisuorassa, pienikin epätarkkuus inklinometriä asennussuunnassa muutti helposti B-suunnan siirtymän mittauksen suuruutta ja suuntaa. Lisäksi eräissä tapauksissa suurilla siirtymillä anturien mittausalue osoittautui liian pieneksi, jolloin anturin todellinen kallistuskulma oli luultavimmin mitattua suurempi.

Taulukko 12. Inklinometrien laskennallisen maanpinnan siirtymän vertailua vastaaviin prismojen siirtymiin. Siirtymien merkit on säilytetty alkuperäisinä. A-siirtymässä suunta ojaa kohti on inklinometreilla negatiivinen ja prismoilla positiivinen. B-siirtymä siilosta poispäin on prismoilla positiivinen.

	A-siirtymä 21.10. klo 21 [mm]	B-siirtymä 21.10. klo 21 [mm]	A-siirtymä sortuman jälkeen [mm]	B-siirtymä sortuman jälkeen [mm]
L1P1	-15,2	6,1	-413,2	246,2
P4	17,8	-1,0	679,5	56,0
L1P2	-19,3	5,9	-629,5	438,8
P5	19,3	-2,9	715,6	-17,3
L1P3	-21,7	-10,7	-805,6	149,2
P6	18,7	-4,8	787,3	-143,4
L2P1	-16,5	13,1	-514,1	338,9
P8	19,1	1,2	846,1	36,3
L2P2	-21,4	5,3	-661,3	215,1
P9	22,5	2,1	942,7	54,0
L2P3	-19,8	11,2	-871,6	558,1
P10	22,7	2,6	979,1	76,7
L3P1	-12,0	3,5	-514,2	51,2
P13	11,3	1,4	553,8	-90,1
L3P2	-8,3	11,5	-508,4	387,3
P14	12,2	2,8	654,7	36,2
L3P3	-11,4	3,2	-642,9	183,4
P15	11,5	4,0	661,5	182,8

Toinen merkittävä virhelähde olivat antureissa esiintyneet bittivirheet (kuva 106), joiden takia joissakin mittauksissa havaittiin todellista suurempia siirtymiä. Anturin määritetyistä kallistussuunnista riippuen virhe olisi voinut olla myös mittaustulosta pienentävä, mikä todellisessa monitorointitilanteessa voisi olla vaarallista. Mittaustulosta suurentava virhe voisi puolestaan aiheuttaa hälytysrajan aiheettoman ylittymisen, mikä olisi vähintään kiusallista.



Kuva 106. Bittivirheitä erässä inklinometrianturissa. Todenmukainen käyrä kulkee ennen sortumaa lähellä nollaa ja sortuman jälkeen noin $-3,7$ asteessa. Mittaustulokset suuruudeltaan $-1,86$ astetta ovat selvästi virheellisiä.

Vaikka bittivirheet ovatkin helposti havaittavissa poikkeavina arvoina kun mittaustulokset piirretään ajan funktiona, ongelmana on se, että usein inklinometrimittauksia seurataan tässäkin työssä käytetyn kaltaisilla kuvaajilla, joissa tiettyjen ajanhetkien tilanteet esitetään erillisillä käyrillä. Tällöin yksittäinen, virheellinen mittausta voi hyvinkin tulla valituksi kuvaajaan, mutta sitä voi olla hyvin vaikea havaita. Tämän takia monitoroinnissa inklinometrimittauksia tulisi mahdollisuuksien mukaan seurata myös ajan funktiona piirretyillä kuvaajilla.

Kokeessa esiintyneet inklinometrioiden ongelmat voitaneen eliminoida kohtuullisen varmasti asennusmenetelmien kehittämällä ja tuotekehityksellä.

7.3 Takymetrimittaukset

Monitorointi takymetreillä osoittautui tekniikaltaan hyvin tarkaksi mittaamenetelmäksi. Mittausten satunnaisepäätarkkuuden ("kohinan") peak-to-peak -amplitudi vaihteli prisman ja takymetrin välisestä etäisyydestä riippuen sekä pysty- että vaakasuunnassa noin välillä $0,2 \dots 0,9$ mm, mitä voidaan pitää erittäin hyvänä tarkkuutena. Mittaustäisyydet vaihtelivat välillä $12 \dots 73$ m.

Käytännössä kaikki ongelmat kokeen takymetrimittauksissa johtuivat koejärjestelyistä. Jälkikäteen voidaan eritellä muutamia virheitä, jotka on jatkossa helppo jättää tekemättä:

- Takymetrit olivat liian lähellä koealuetta (noin 20 m lähimmän vaunun päästä) jolloin ne liikkuivat melko paljon kokeen aikana. Osa takymetrioiden liikkeestä johtui luultavimmin myös jalustojen kallistumisesta (huolellisesti tehdystä pystytyksestä huolimatta), sillä tietyissä orientoinnin korjauksissa taky-

metrien sijaintia piti korjata huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi takymetrejä lähimmät prismat P1 ja P27 olivat voineet liikkua (jalustat olivat näitä prismoja kauempana vaunuista, eikä ole luultavaa, että maaperä niiden kohdalla voisi liikkua prismoja enemmän).

- Penkereen takana sijainneita prismoja mitannut takymetri sijaitisi paikalle jätetyn toisen raiteen kohdalla, jolloin raiteen liike penkereen vierellä saattoi osaltaan välittyä myös takymetrille.
- Referenssiprismojen tarkistusväli oli liian pitkä (1 h). Esimerkiksi 15 minuutin välein tehty uudelleenorientointi olisi parantanut mittausten luotettavuutta huomattavasti juurikaan häiritsemättä itse monitorointia. Syynä jälkikäteen ajateltuna harvalle tarkistusvälille oli se, että takymetriä ei oletettu liikkuvan kovinkaan paljoa.
- Mittauksia ei lopetettu referenssiprismojen tarkistuksella, jolloin sortuman jälkeisten mittausten luotettavuus jäi huonoksi. Luultavasti takymetri liikkui huomattavasti sortuman yhteydessä tärinän ja maan liikkeiden vaikutuksesta. Tätä korjasi kuitenkin koetta seuraavana päivänä erikseen tehty jäljelle jääneiden prismojen kartoitus.

Ehdottomasti paras takymetreillä mitattu sortuman indikaattori oli pengertä vastaan kohtisuora vaakasiirtymä sortuman puolella. Tämä siirtymä oli mitattavissa jo aikaisessa vaiheessa kuormituksen aikana. Ehkä hieman yllättäen vaakasiirtymät kaikilla samoissa kohtisuorissa linjoissa sijaitsevilla prismoilla (P4...P6, P8...P10 ja P13...P15) olivat lähes identtiset (katso kuvat 68...70), mikä osoittaa maamassojen liikkuneen vaakasuorassa ilman mainittavaa kokoonpuristumista ennen sortumaa. Pystysiirtymän kehittyminen kokeen aikana taas oli hieman epämääräisempää. Penkereen juurella ennen sortumaa ei tapahtunut muutamaa millia suurempaa pystysiirtymää. Suurin osa penkereen juuren prismoista painui hieman, paitsi prismat P4 ja P8 (jotka sijaittivat inklinometriä yhteydessä noin 1 m penkereen juuresta) nousivat. Kauempana penkereestä taas prismat nousivat, mutta ennen sortumaa edeltänyttä siirtymien muutosnopeuden kiihtymistä tämäkään siirtymä ei ollut muutamaa millimetriä suurempi.

Penkereen takapuolella olleet prismat eivät antaneet kovin selkeää tietoa sortuman kehitymisestä (pois lukien kontteihin kiinnitetyt prismat, jotka painuivat kokeen aikana huomattavan selkeästi, osin palkistojen muodonmuutosten vaikutuksesta). Siirtymien suuruudet ennen sortumaa jäivät pieniksi (muutama millimetri), ja siirtymien suunnissa ei voinut havaita selkeitä säännönmukaisuuksia. Jos stabiliteetti heikkenisi ajan myötä hitaasti, näin pieniä ja epäsäännönmukaisia heikon stabiliteetin aiheuttamia siirtymiä voisi olla vaikea erottaa muista yleisistä muodonmuutoksista, kuten esimerkiksi konsolidaatiopainuma tai jyrkkäluisvaisen penkereen leviäminen. Koe-kohteen geometria oli kuitenkin huomattavan toispuoleinen. Symmetrisemmän penkereen tapauksessa voisi olettaa tapahtuvan selkeämpiä muodonmuutoksia myös sortumaan nähden vastakkaisella puolella, sillä tällöin sen puoleinen stabiliteetti olisi myös melko heikko. Tämänkin seikan todentaminen vaatisi lisätutkimuksia.

Vaikka huolellisesti toteutettuna takymetrimonitorointi antaakin erinomaista tietoa maan pinnalla tapahtuvista liikkeistä, pitkäaikaisessa ja jatkuvassa ratapenkereen monitoroinnissa ongelmana olisi ainakin laitteiden ja prismojen suojaaminen suomalaisilta sääolosuhteilta (lumi ja jää, linssien vettyminen). Kesällä lämpöväreily heikentää mittaustarkkuutta varsinkin pitkällä matkoilla. Prismat tulee kiinnittää niin hyvin, että esimerkiksi ohi ajavan junan aiheuttama tärinä ei vaikuta niihin. Talvella junista irtoavat jään ja lumen kappaleet voivat myös vaurioittaa prismoja. Lisäksi ilkivalta voi

olla vakava ongelma, sillä rataympäristössä yksittäisiä prismoja ei voida juuri suojata sitä vastaan ilman että mittaus vaikeutuu. Nämä seikat huomioiden takymetrimittaukset soveltunevat jatkuvassa monitoroinnissa lähinnä säännöllisten maastokäyntien yhteyteen. Sen sijaan automaattisen takymetrimonitoroinnin voisi olettaa soveltuvan erinomaisesti tapauksiin, joissa jo epävakaaaksi todetun penkereen monitorointia halutaan tehostaa lyhytaikaisesti korjaavia toimenpiteitä varten. Haittapuolena on silti laitteiden ja muiden järjestelmän osien korkea hankintahinta (pelkkä tarkka robottikymetri maksaa kymmeniä tuhansia euroja).

7.4 Painumaletku

Painumaletkut osoittautuivat erittäin toimiviksi mittalaitteiksi. Mittaukset jatkuivat koko kokeen ajan hyvin luotettavasti, täysin vailla keskeytyksiä. Lähes kaikki yksittäiset anturit toimivat hyvin. Yhdessä poikittaisessa linjassa sijainneen anturin (vaunujen 1 ja 2 välin tasalla, penkereen juurella) mittauksissa oli muutama karkea virhe, mutta nämä virheet olivat niin selkeitä, että ne voitiin hyvin helposti havaita ja poistaa. Uudemman mallisten, 80 mittauksen keskiarvon laskevien anturien kohinaksi kokeessa osoittautui noin 0,2 mm (satunnaisepätarkkuuden peak-to-peak -amplitudi). Vastaavasti vanhan mallisilla, keskiarvoa laskemattomilla antureilla kohina oli pääsääntöisesti alle 1 mm, vaikkakin joukossa oli myös hieman suurempia virhepiikkejä. Painumaletkun etuina stabiliteetin monitoroinnissa voidaankin pitää sen hyvää tarkkuutta, suhteellista edullisuutta ja yksinkertaisuutta sekä kykyä monitoroida tarvittaessa jopa satoja metrejä pitkiä rataosuuksia. Rajoituksena on luonnollisesti se, että painumaletkulla voidaan mitata vain pystysuuntaisia muodonmuutoksia.

Parhaat sortuman indikaattorit saatiin penkereen alla kulkeneesta pituussuuntaisesta letkusta. Penkereen kohdalla mitattu painuma kasvoi selvästi sitä mukaa kun kuormaa lisättiin. Uusien penkereiden pitkäaikaisessa monitoroinnissa varsinaisen konsolidaatiopainuman ja heikosta stabiliteetista johtuvan painuman erottaminen saattaa olla haastavaa. Pääsääntöisesti konsolidaatiopainuman nopeus kuitenkin hidastuu ajan myötä, kun taas heikosta stabiliteetista johtuva painuma kiihtyy ennen sortumaa. Kauempana penkereestä sortuman puolella puolestaan havaittiin samanlaista maan nousua kuin takymetreillä. Tätä voidaan myös pitää hyvänä heikon stabiliteetin indikaattorina, sillä maan nousua ei yleensä tapahdu muiden tekijöiden vaikutuksesta.

Ratapenkereeseen sijoitettava painumaletku on helppo sijoittaa esimerkiksi jätkänpolun kohdalle, kuten esimerkiksi aiemmassa Paimion koeoshteessa tehtiin (Luomala 2009 s. 31). Selkeimmän painumanmittaustuloksen saamiseksi letku olisi paras sijoittaa mahdollisimman lähelle kiskoja. Tällainen asennus olisi helpointa toteuttaa pengertä rakennettaessa tai korjattaessa niin, että letku asennetaan esimerkiksi eristyskerrokseen. Letkun ympärille on tehtävä riittävä alkutäyttö tarpeeksi pienirakeisella materiaalilla sen vaurioitumisen estämiseksi. Lisäksi on huolehdittava, että letkun asennus ei heikennä päällä olevien rakennekerrosten kantavuutta. Asennussyvyyden tulee olla riittävä lämpötilan muutosten ja pinnalta letkuun kohdistuvien kuormitusmuutosten minimoimiseksi.

Jos syytä tai toisesta painumaletkua ei voida asentaa penkereeseen lähelle kiskoja (olemassa olevat kaapeloinnit tai muut vastaavat syyt), kokeessa tehtyjen havaintojen perusteella stabiliteetin monitorointiin tarkoitettu letku olisi hyvä asentaa selvästi penkereestä erilleen. Sorrutuskokeessa mitattu pystysiirtymä lähellä penkereen ala-

reunaa oli pientä ja suunnaltaan vaihtelevaa, mutta noin 1,5...7 m etäisyydellä penkereen alareunasta sortuman puolella tapahtui selvää maan nousua. Sopiva asenusetäisyys riippuu paljolti tapauskohtaisesti vaihtelevasta vaarallisimman liukupinnan geometriasta. Asentamalla painumaletku etäälle penkereestä menetetään kuitenkin kyky mitata pidemmällä aikavälillä myös uuden penkereen konsolidatiopainumaa.

7.5 Laserkeilaukset

Laserkeilauksia voidaan periaatteessa käyttää stabiliteetiltaan heikkojen ratapenkereiden muodonmuutosten seuraamiseen. Kokeessa käytetyn keilaustavan heikkoudeksi osoittautui kuitenkin riittämätön mittaustarkkuus (tai ennemminkin suoranaisten virheellisyys). Kattavan maastomallin luomiseen keilauksissa vaaditaan mitä ilmeisimmin hyvin kattavaa peittoa, mitä muutamalla keilauspisteellä ei ilmeisesti voida saavuttaa. Kokeen keilauspisteiden lukumäärä olisi pitänyt luultavasti vähintään kaksin–kolminkertaistaa ja sijoittaa pisteet myös riittävän korkealle maanpinnan yläpuolelle hyvän näkökulman varmistamiseksi.

Vaihtoehto liikkumattomista pisteistä laserkeilaamiselle olisi liikkuvasta lentokoneesta tai autosta keilaaminen. Tällöin saadaan tarkka maastomalli, sillä keilain liikkuu jatkuvasti eteenpäin samalla kun se skannaa tiettyä rajattua sektoria. Tällöin keilatusta alueesta saadaan todella hyvä, kattava peitto. Pisteiden koordinaatit puolestaan saadaan selville satelliittipaikannuksella ja inertiamittauksella (Salmenperä 2004 s. 29). Menetelmä on siis kokeessa käytettyyn ”staattiseen” keilaukseen verrattuna varsin erilainen niin keilaimen rakenteen kuin muun toteutuksen suhteen. Liikkuvan laserkeilauksen soveltuvuutta stabiliteetin monitorointiin kannattaisi mahdollisesti tutkia lähemmin. Perniön sorrutuskokeeseen se ei silti olisi sopinut, sillä koalueen ympäri ei voinut ajaa autolla (ainakaan ilman erillisen huoltotien rakentamista), kun taas lentokoneesta tai helikopterista tehty keilaus olisi ollut pitkien mittausetäisyyksien takia tätä tarkoitusta varten liian epätarkkaa (ja muutenkin hyvin kallista). Sen sijaan jos monitoroitavan ratapenkereen vierellä kulkee esimerkiksi maantie tai huoltotie, liikkuvasta autosta tehtävä säännöllinen laserkeilaus saattaisi olla eräs vaihtoehto stabiliteetin monitorointiin. Keilaimen voisi myös asentaa suoraan rata-geometrian tarkastusvaunuun, jolloin keilaus voitaisiin suorittaa helposti muun tarkastustoiminnan yhteydessä. Junaan asennettavaa laserkeilainta onkin kaavailtu käytettäväksi tulevan rataluokitusprojektin yhteydessä.

8 Johtopäätökset

8.1 Mittaukset ja monitorointi

Perniön sorrutuskokeella saatiin huomattavan paljon tärkeää tietoa stabiliteettitas-kennan ja stabiliteetin monitorointijärjestelmien kehittämistä varten. Koe sekä vahvisti tiettyjä aiempia oletuksia että herätti kysymyksiä ja tarpeita jatkotutkimuksille. Itse koe ja mittaukset sujuivat kokonaisuutena hyvin. Eri mittaukset tukivat erittäin hyvin toisiaan ja myös antoivat keskenään yhteneviä tuloksia. Samojen suureiden mittaaminen usealla eri menetelmällä antoi ensinnäkin varmuutta tulosten tulkintaan sekä varmisti, että yhden menetelmän mahdollisesti epäonnistuessa toisella saadaan vielä riittäviä tuloksia. Tätä menettelytapaa voidaan suositella käytettäväksi mahdollisuuksien mukaan myös muissa vastaavanlaisissa kokeissa. Suurin koejärjestelyjen virhe oli tarpeeksi tukevien ja korkeiden mittausalustojen puute laserkeilainta ja takymetrejä varten. Tietokoneongelmilta voidaan tuskin koskaan välttyä näin monimutkaisissa ja laajoissa kokeissa, mutta niistä selvittiin osaavan henkilökunnan ansiosta melko vähillä vahingoilla.

Pitkäaikaista monitorointia ajatellen käytetyistä mittaustekniikoista soveltuvimpina voidaan pitää painumaletkua (edullinen, voidaan tarkkailla hyvin pitkiä osuuksia kerralla) sekä tietyn varauksin inklinometrejä (voidaan seurata muodonmuutoksia itse kehittyvällä liukupinnalla maan pinnan liikkeiden lisäksi) ja takymetrimittauksia (erittäin hyvä mittaustarkkuus ainakin suotuisissa olosuhteissa). Inklinometrien ongelmana on mittausten pistemäisyys, mikä tekee laaja-alaisesta monitoroinnista niitä käyttäen kallista ja suuritöistä toteuttaa. Jatkuviissa takymetrimittauksissa ongelmana ovat erityisesti suomalaiset sääolosuhteet.

Stabiliteetin monitorointia ajatellen parhaat alkavan sortuman indikaattorit saatiin painumasta penkereen kohdalla (painumaletkut), maanpinnan noususta penkereen alareunasta ulospäin (painumaletkut sekä takymetrimittaukset) sekä inklinometreilla mitatusta maan sivuttaisliikkeestä. Inklinometrin poikittaisella sijainnilla penkereen ja ojan välillä ei ollut suurta periaatteellista merkitystä sortuman havaitsemisessa, mutta luonnollisesti selvin alkavan sortuman indikaatio saatiin läheltä pengertä. Sijoittamalla monitoroiva inklinometriputki lähelle pengertä voidaan myös varmistua sen sijainnista vaarallisimman liukupinnan sisällä (kokeen kaltaisten pitkien liukupintojen lisäksi poikkisuunnassa lyhyet, penkereen kantavuuden puutteista johtuvat liukupinnat ovat myös mahdollisia).

Koska geometrialtaan symmetrisissä monitorointikohteissa sortuman suuntaa ei välttämättä tiedetä etukäteen, ”yleispätevänä” monitorointisuureena voisi pitää penkereen painumaa. Näin voidaan myös seurata pitkäaikaista konsolidaatiota, vaikkakin heikon stabiliteetin aiheuttaman painuman ja konsolidaatiopainuman erottaminen toisistaan olisi tällöin ensiarvoisen tärkeää.

Hyvänä yhdistelmänä stabiliteetin monitorointiin voisi pitää painumaletkua inklinometreillä täydennettynä, jolloin voidaan havainnoida sekä painumaa että maassa tapahtuvaa sivuttaisliikettä melko luotettavasti sääolosuhteista riippumatta. Lisäksi huokospainemittaukset ovat aivan ratkaisevan tärkeässä asemassa stabiliteetin arvioinnissa. Varsinaisen suomalaisiin olosuhteisiin soveltuvan stabiliteetin monitoroin-

tijärjestelmän kehittäminen vaatisi kuitenkin vielä lisää suunnittelua, testausta ja tuotekehittelyä.

8.2 Stabiliateetilaskenta ja mittaustulokset

Tässä vaiheessa tehtyjen tutkimusten perusteella kokeessa ilmennyt kuormasta aiheutunut huokospainelisäys vastasi jotakuinkin pystyjännitysten kasvua maassa. Huokospaineen kasvu oli vain muutamia kymmeniä prosentteja ulkoisen kuorman kasvusta, mikä selittyy luonnollisesti kuorman jakautumisella maassa, erityisesti kuvakuoren vaikutuksesta.

Lamellimenetelmissä erityisesti jyrkästi kuorman alla laskevilla liukupinnoilla on varottava käyttämästä liian suurta kuorman huokospaineparametri r_{uq} :n arvoa, jotta laskennallinen leikkauslujuus ei laskisi liikaa. Tehtyjen laskelmien perusteella vaikuttaisi siltä, että jos laskentaohjelmassa käytetty r_{uq} :n implementointi ei ota liukupinnan kaltevuutta huomioon, kuorman aiheuttama huokospaine olisi otettava huomioon tapauskohtaisesti noin kertoimella $r_{uq} = 0,3 \dots 0,8$ (liukupinnan kaltevuuskulman kosini kuorman alla), eikä täysimääräisenä niin kuin usein on ollut tapana. Olisikin tärkeää, että laskentaohjelmien käyttäjät olisivat selvillä ohjelman käyttämistä laskentayhtälöistä.

Yksinkertainen ratkaisu r_{uq} :n arvon valinnan helpottamiseksi olisi kuorman aiheuttaman huokospainelisäyksen implementointi laskentaohjelmissa siten, että liukupinnan kaltevuuden vaikutus otettaisiin leikkauslujuuden laskennassa huomioon myös huokospaineelle eikä vain kokonaisnormaalijännitykselle. Tällöin arvolla $r_{uq} = 1$ laskennallinen leikkauslujuus ei muuttuisi kuormituksen vaikutuksesta, mikä on suljetussa tilassa toivottu mallinnustilanne. Tätä kirjoitettaessa (maaliskuu 2010) r_{uq} :n tarkempi implementointi GeoCalciin on työn alla.

Myödon aiheuttama huokosveden ylipaine oli kokeen loppuvaiheessa huomattavan suuri, paikoitellen moninkertainen arvioituun kuormituksesta aiheutuneeseen huokospaineeseen nähden. Jos myödon aiheuttamaa huokospainetta ei oteta c' - ϕ' -laskelmissa lainkaan huomioon (näin on usein laita), saadaan selvästi liian korkeita kokonaisvarmuuden arvoja, kun tarkastellaan stabiliateetiltaan heikkoja (myötötilassa tai sen lähellä olevia) penkereitä. Tätä taustaa vasten suljetun leikkauslujuuden käyttö stabiliateetilaskennassa on hyvin perusteltua ainakin silloin, jos huokospaineita ei kyetä kunnolla mallintamaan c' - ϕ' -laskentaa varten.

Huokospaine voidaan c' - ϕ' -laskennassa periaatteessa mallintaa todellisuutta vastaavasti, mutta kuormaa nykyisellään ei. Kuorman aiheuttama huokospaineen kasvu pitääkin mallintaa ”yhteensopivasti” tämän huomattavan yksinkertaistetun kuorman mallintamistavan kanssa, mikä saattaa vaikeuttaa huokospaineparametrien yksiselitteistä valintaa. Myödoista aiheutuvan huokosylipaineen mallintaminen lamellimenetelmien kuormaoletusten kanssa yhteensopivasti ei myöskään ole helppoa: jos aivan kuormattujen lamellien viereen liukupinnan läheisyyteen mallinnetaan suuri (todellisuutta vastaava) myödoista aiheutuva huokospainelisäys, laskennassa ei kuitenkaan oteta huomioon kuorman aiheuttamaa kokonaisjännityslisäystä ja lamellin pohjan laskennallinen leikkauslujuus voi laskea liiaksi.

Tätä taustaa vasten kuorman todellisen jakauman huomioon ottaminen lamellimenetelmissä saattaisi olla hyödyllistä. Jos ulkoisen kuorman vaikutus liukupinnalla mal-

linnettäisiin todenmukaisena, huokospaineiden mallinnus voisi kokonaisuutena olla huomattavasti yksiselitteisempää erityisesti myödestä aiheutuvan huokospaineen osalta. Kuorma voitaisiin jakaa liukupinnalle esimerkiksi Boussinesqin teorian mukaisesti tai 2:1-menetelmällä. Asian toteutus vaatisi tosin huomattavaa huolellisuutta, jotta se ei tarpeettomasti monimutkaistaisi käytännön laskentaa ja muodostaisi siihen uusia virhelähteitä.

Kokeessa ja sen analyysissä selvästi ilmi tullut kuormitusnopeuden vaikutus leikkauslujuuteen ja sitä kautta murtokuormaan on periaatteessa tunnettu, mutta kuitenkin yleisesti melko vähän huomioitu seikka. Koska huokospaineet kasvavat ajan kuluessa erityisesti saven myötämisenestä johtuen, murtokuorman määritys ei ole lainkaan yksiselitteistä. Lopullinen kuorma oli 87 kPa. Koepenger olisi kuitenkin voinut sortua jo noin 80 kPa kuormalla saven myötämisen käynnistyttyä, mutta lopulliseen murtoon vaadittavan huokospaineen kehittymiseen olisi voinut kulua huomattavan kauan aikaa. Viimeistään noin 85 kPa kuormalla sortuma olisi tapahtunut varmasti, vaikkakin nyt toteutunutta myöhemmin. Yksiselitteistä murtokuormaa ei voida antaa ainakaan hienorakeisilla mailla tapahtuville sortumille. Pienemmällä kuormalla sortuma tapahtuu myöhemmin ja suuremmalla kuormalla ennemmin. Täysin turvassa sortumalta ollaan vain niissä tapauksissa, joissa varmuus sortumaa vastaan on riittävän suuri ja kuorma on niin pieni, että myötöä ei pääse tapahtumaan eivätkä huokospaineet tai muut ominaisuudet muutu epäedulliseen suuntaan millään muullakaan tavalla.

Koska stabiliteettilaskennassa ei yleensä huomioida aikatekijää eikä hetkellistikään laskentatilannetta voida mitenkään saada täysin todellisuutta vastaavaksi etenkin lamellimenetelmissä, ainakaan lamellimenetelmään perustuvien stabiliteettilaskelmien tuloksia ei millään muotoa voi pitää eksakteina. Ainakin nykyisillä laskentamenetelmillä nykyisen kaltaisten suurehkojen varmuuskertoimien ja -lukujen käyttö pohjarakenteiden suunnittelussa on äärimmäisen perusteltua.

Liukupinnan muoto poikkesi kokeessa huomattavan paljon yleisesti laskennassa käytetystä ympyräliukupinnasta. Syynä tälle saattoi olla esimerkiksi huomattavan keskittynyt kuormitus matalalla penkereellä ja suhteellisen ohut pehmeän saven kerros (liukupinta pyrki päättymään kaivettuun ojaan, ja tässä tapauksessa sinne yltävän ympyräliukupinnan olisi täytynyt olla hyvin laakea pysyäkseen tiiviimpien maakerrosten yläpuolella). Joka tapauksessa koe herättää kysymyksiä ympyräliukupinnan käyttökelpoisuudesta penkereiden stabiliteettilaskennassa. Yleisesti suunnittelussa käytetyllä Bishopin menetelmällä lasketut vaarallisimmat liukupinnat olivat hyvin lyhyitä. Tämä johtuu Bishopin menetelmän momenttitasapainon vaatimuksesta, jolloin tasaisella geometrialla saadaan hyvin symmetrisiä liukupintoja. Syvemmillä savikoilla ympyräliukupinnan muodostuminen saattaa olla todennäköisempää kuin koekohteen kaltaisilla matalilla savikoilla, kuten myös suurilla penkereillä, joiden oma paino vaikuttaa niiden stabiliteettiin suhteessa enemmän kuin kokeen tilanteessa.

Etenkin lamellimenetelmään perustuvissa laskelmissa syntyy helposti mielikuva, että murto tapahtuu aina hyvin kapeaa pintaa pitkin, ja että liukupinnan yläpuolinen osa vain ”keikahtaa” pintaa pitkin toiseen asentoon. Kokeessa kuitenkin havaittiin esimerkiksi inklinometreillä, että suurten muodonmuutosten vyöhyke saattoi olla jopa noin 1,5 metriä paksu, mikä on jo suuri osa koko savikerroksen paksuudesta. Tässä epävarmuustekijänä on kuitenkin se, että inklinometriputket saattoivat enemmän tai vähemmän leikkautua saveen, jolloin ne saattavat näyttää todellista loivempia muodonmuutoksia. CPTu-kairauksissa ei havaittu lainkaan selkeästi ympäristöään enemmän heikentynyttä liukupintavyöhykettä, vaan koko pehmeän savikerroksen ha-

vaiettiin menettäneen lujuuttaan melko homogeenisesti. Koko savikerros siis häiriintyi sortumassa huomattavan paljon. Tämä oli tosin tietyllä tasolla pääteltävissä jo liukupinnan muodosta ja maan pinnalla tapahtuneista muodonmuutoksista, mutta havainnot näin laajamittaisesta häiriintymisestä ja erillisen heikkousvyöhykkeen puuttumisesta olivat silti yllättäviä. On hyvinkin mahdollista, että kokeessa tapahtui plastisuusteorian mukainen Rankine-vyöhykemurtuma, jossa maamassaan muodostuu useita liukupintoja. Matalilla penkereillä kuormitustilanne vastaakin melko hyvin erilaisten kantavuusteorioiden oletuksia.

Ympyränmuotoisilla liukupinnoilla voisi olettaa olevan kiilamaista liukupintaa selkeämpi heikkousvyöhyke ja vähemmän muun maamassan häiriintymistä, sillä liikkuva maamassa säilyttäisi alkuperäisen muotonsa kokeessa toteutunutta kiilamaista liukupintaa paremmin. Tehtyjen havaintojen nojalla esimerkiksi sortumaonnettomuuksien jälkeisiä korjaavia toimenpiteitä suunniteltaessa olisi selvästi ottava huomioon lujuuden heikentyminen (jäännöslujuus) koko maamassassa eikä vain oletetulla liukupinnalla.

Laskelmien perusteella päätyvastuksella oli sortumassa usean prosentin kokonaisvarmuutta kasvattava vaikutus. Kun lopullisen sortuman pituus oli noin 50 metriä, päätyvastuksen merkitys olisi lähestynyt nollaa noin 100 m ja sitä pidemmällä sortumilla. Tehdyt laskelmat ovat kuitenkin melko suuntaa-antavia, ja esimerkiksi päätyjen lopullisen muodon vaikutusta päätyvastukseen ei otettu erikseen huomioon. On lisäksi aihetta epäillä, että sortuma lähti liikkeelle lopullista sortumaa lyhyemmästä penkereen osasta, jolloin päätyvastuksen vaikutus on paikallisesti voinut olla suurempikin.

Tehdyt havainnot pystysuuntaisen maanpaineen ja huokosvedenpaineen pituussuuntaisesta jakaumasta penkereen alla antavat aihetta epäillä, että paikallinen varmuus sortumaa vastaan saattaa vaihdella suurestikin telien alla ja niiden välissä. Tämän hypoteesin testaaminen vaatisi kuitenkin lisätutkimuksia koskien erityisesti ulkoisen kuorman kolmiulotteista jakautumista liukupinnalle. Kolmiulotteiset FEM-laskelmat olisivat tässä erittäin hyödyllisiä. Lisäksi on epäselvää, kuinka suuri merkitys tällä oletetulla pituussuuntaisella varmuuden vaihtelulla on koko penkereen kokonaisvarmuuteen.

Lähteet

Azzouz, A. S., Baligh, M. 1983: Loaded Areas on Cohesive Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109 No. 5 May 1983, pp. 724–729. American Society of Civil Engineers, New York.

Baligh, M. M., Azzouz, A. S. 1975: End Effects on Stability of Cohesive Slopes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 101 No. 11, Nov. 1975, pp.1705–1117. American Society of Civil Engineers, New York.

Bishop, A.W. 1955: The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique* 5, No. 1 (1955), pp. 7–17. The Institution of Civil Engineers, London 1966 (reprint)

Duncan, J.M., Wright, S.G. 1980: The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. *Engineering Geology*, Vol 16. (1980), No. 1, July 1980, pp. 5–17. Elsevier Scientific Publishing Company, The Netherlands.

Hartmann, B., E. 1969: Rupture strip for indicating earth movement. US. Patent 3477019, Nov. 4. 1969

Helenelund J. V. 1981: Maarakennusmekaniikka. 7. painos. Otakustantamo, Espoo. 278 s.

Hungr, O. 1987: An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions. *Géotechnique* 37 (1987), No. 1, pp. 113–117. The Institute of Civil Engineers, London.

Hunter, G., Fell, R. 2003: Prediction of impending failure of embankments on soft ground. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 1, Feb. 2003, pp. 209–220. National Research Council of Canada.

Joala, V. 2006: Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Leica Nilomark Oy, Espoo. 7 s. Saatavilla [www-osoitteesta](http://www.osoitteesta) http://www.leica.fi/Geo/Lisatietoa/HDS_Laserkeilaus/pdf/Laserkeilauksenperusteita.pdf [viitattu 26.8.2009].

Joala, V. 2009: Sähköpostikeskustelu Nilomark Oy:n edustajan kanssa. Henkilökohmainen kirjeenvaihto, joulukuu 2009.

Juvankoski, M. 2007: Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiliteettitarkasteluihin. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2007. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2007. 48 s., 29 liites.

Kyowa 2009: BPB-A/BPB-A-T Pore Pressure Transducers. Tuote-esite. Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. Saatavissa [www-osoitteesta](http://www.osoitteesta) <http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/civil/pdf/7-21.pdf> [viitattu 15.12.2009].

La Rochelle, P., Trak, B., Tavenas, F., Roy, M. 1974: Failure of a test embankment on a sensitive Champlain clay deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No. 1, Feb. 1974, pp. 142–164. National Research Council of Canada.

Laaksonen, A. 2005: Liikuntasaumattoman sillan ja maan yhteistoiminta. Diplomityö. Pohja- ja maarakenteet, tutkimusraportti 62. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 157 s., 83 liites.

Laaksonen, A. 2009. Tutkija, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. Henkilökohdalliset keskustelut lokakuussa 2009.

Leica 2009: Leica TM30 Monitoring Sensor. Tuote-esite. Leica Geosystems AG. 8 s.

Leroueil, S., Magnan, J-P., Tavenas, F. 1990: Embankments on soft clays. Ellis Horwood Series in Civil Engineering. Ellis Horwood Ltd, Great Britain. 360 s.

Leroueil, S., Tavenas, F., Trak, B., La Rochelle, P., Roy, M. 1978a: Construction pore pressures in clay foundations under embankments. Part I: the Saint-Alban test fills. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 1, Feb. 1978 pp. 54–65. National Research Council of Canada.

Leroueil, S., Tavenas, F., Mieussens, C. Peignaud, M. 1978b: Construction pore pressures in clay foundations under embankments. Part II: generalized behaviour. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 1, Feb. 1978 pp. 66–82. National Research Council of Canada.

Luomala, H. 2009: Ratapenkereiden monitorointi. Tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. Julkaisematon raportti.

Länsivaara, T. 2009. Professori, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. Diplomityön ohjauskeskustelut.

Mansikkamäki, J. 2009: Olemassa olevien ratapenkereiden stabiliteetin laskenta elementtimenetelmällä. Diplomityö. Maa- ja pohjarakenteet, tutkimusraportti 76. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 145 s., 26 liites.

Novotek 2009: Sähköpostikeskustelu Tokyo Sokki Kenkyujo KPD-200KPA - huokospaineantureiden maahantuojan Novotek Oy:n edustajan kanssa. Henkilökohdallinen kirjeenvaihto, kesäkuu 2009.

Putzmeister 2001: Telebelt TB 105 Telescopic Belt Conveyor. Tuote-esite. Putzmeister America, 2001. Saatavilla www.osoitteesta <http://www.concreteequipmentinc.com/pdf/44-pdf.pdf> [viitattu 17.12.2009].

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M. 2004: Geotekniikka. 20. muuttumaton painos. Otatieto Oy, Helsinki. 301 s., 5 liites.

RHK: Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), osa 11 Radan päällysrakenne, 2.7.2002. Ratahallintokeskus.

RHK: Ratatekniset ohjeet (RATO), Osa 3 Radan rakenne, 16.5.2008. Ratahallintokeskus.

RHK 2005: Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2005. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B 15. 27 s., 6 liites.

RHK 2006: Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta-aineisto. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2006. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 10/2006. 319 s.

Ryhänen 2009: FinMeas Oy:n edustajan Antti Ryhäsen saate Perniön inklinometridataan 16.11.2009. Henkilökohtainen kirjeenvaihto.

Sahi, K. 2009. Yli-insinööri, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. Henkilökohtaiset keskustelut elokuussa 2009.

Salmenperä, H. 2004: Kaukokartoituksen alkeet. Opetusmoniste 1/2004, Geoinformaatiikan laboratorio. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 65 s.

Scandic Container 2009 (www): Käytetyt kontit. Tuote-esittely (internet-sivu). Osoite www.scandiccontainer.fi/kaytetyt-kontit.html [viitattu 7.8.2009]

Tavenas, F., Garneau, R., Blanchet, R., Leroueil, S. 1978: The stability of stage-constructed embankments on soft clays. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 2, May 1978, pp. 283–305. National Research Council of Canada.

Tavenas, F., Trak, B., Leroueil, S. 1980: Remarks on the validity of stability analyses. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, No. 1, Feb. 1980, pp. 61–73. National Research Council of Canada.

Tavenas, F., Leroueil, S. 1980: The behaviour of embankments on clay foundations. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, No. 2, May 1980, pp. 236–260. National Research Council of Canada.

Tielaitos 1994: Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. Tielaitoksen selvityksiä 67/1994, Tielaitos Geokeskus, Helsinki. 50 s., 2 liites.

Törnqvist, J., Juvankoski, M., Tammirinne, M. 2001: CPTU-kairaus. Menetelmäkuvaus TPPT 11. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo. 48 s., 5 liites.

VR Cargo: Hkb-vaunutyyppin mittapiirustus. Internet-sivu. Saatavilla [www-osoitteesta http://www.vrcargo.fi/fin/img/vaunut_pohjapiirrokset/hkb_hkba_hkbar.gif](http://www.vrcargo.fi/fin/img/vaunut_pohjapiirrokset/hkb_hkba_hkbar.gif) [viitattu 30.7.2009].

Wright, D., Hawkes, I. 1982: Detecting and measuring the position of a break in solid formations by measuring the capacitance of an elongated element embedded therein. US. Patent 4348635, Sep. 7.1982

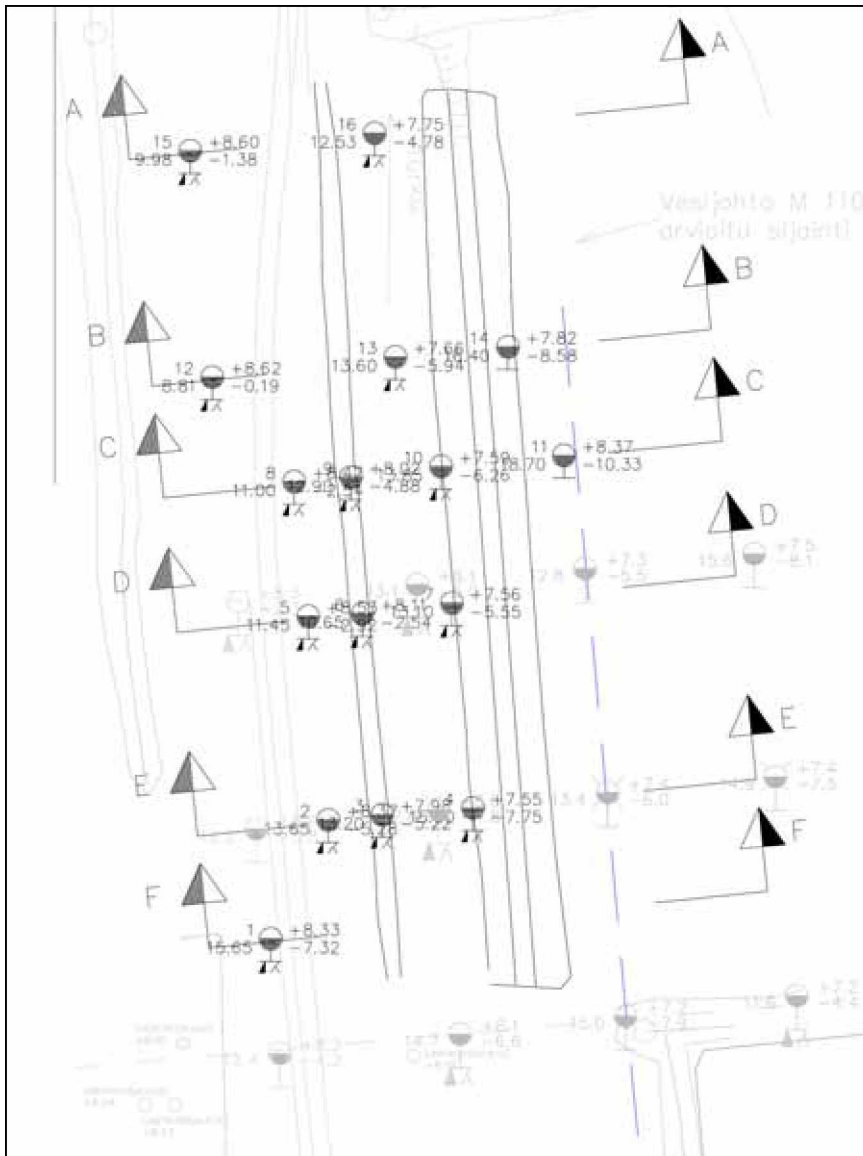
Ylönen, S. 2009. Sähköpostikeskustelu FinMeas Oy:n edustajan Sami Ylösen kanssa. Henkilökohtainen kirjeenvaihto, marraskuu 2009.

Koetta edeltäneitä pohjatutkimustuloksia

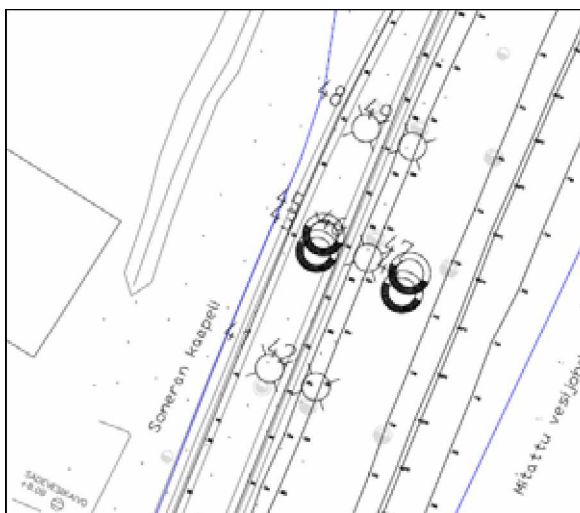
Ohessa on esitetty koetta edeltäneitä pohjatutkimustuloksia. Ensimmäinen pohjatutkimuskierros (paino- ja siipikairauksia sekä näytteenotto yhdestä pisteestä) oli kokeen analyysin kannalta melko vähäarvoinen (se esimerkiksi kohdistui suurelta osalta koealueen eteläpuolelle), joten sivumäärän säästämiseksi sen tuloksia ei esitetä tässä yhteydessä lainkaan.

Toinen pohjatutkimuskierros (kuva 1) tehtiin kesällä 2009. Tähän sisältyi painokairauksia, siipikairauksia pehmeästä savikerroksesta (täyttö ja kuivakuorikerros läpäistiin suojaputkella) sekä näytteenottoa (häiriintyneet näytteet pisteistä 2 ja 8, häiriintymättömät pisteistä 3, 4, 6, 7, 9 ja 10). Lisäksi syyskuussa 2009 tehtiin kuivakuoren lujuuden määrittämiseksi siipikairauksia pienellä siivellä sekä lisänäytteenottoa (kuva 2). Kuvissa 3 ja 4 on leikkauspiirustukset näistä tutkimuksista. Julkaisun tekstiosan kuvissa 9...11, sekä liitteiden kuvissa 5 ja 6 on yhteenvedodiagrammit laboratoriokeiden tärkeimmistä tuloksista. Kolmiakksiaalikoetta tehtiin pisteen 6 näytteistä. Näistä on esitetty esimerkkinä K_o-kokeen leikkaus pisteestä 6 syvyydeltä 4,17–4,34 m (kuva 7). Kaikki laboratoriokeet tehtiin TTY:n geotekniikan laboratoriossa.

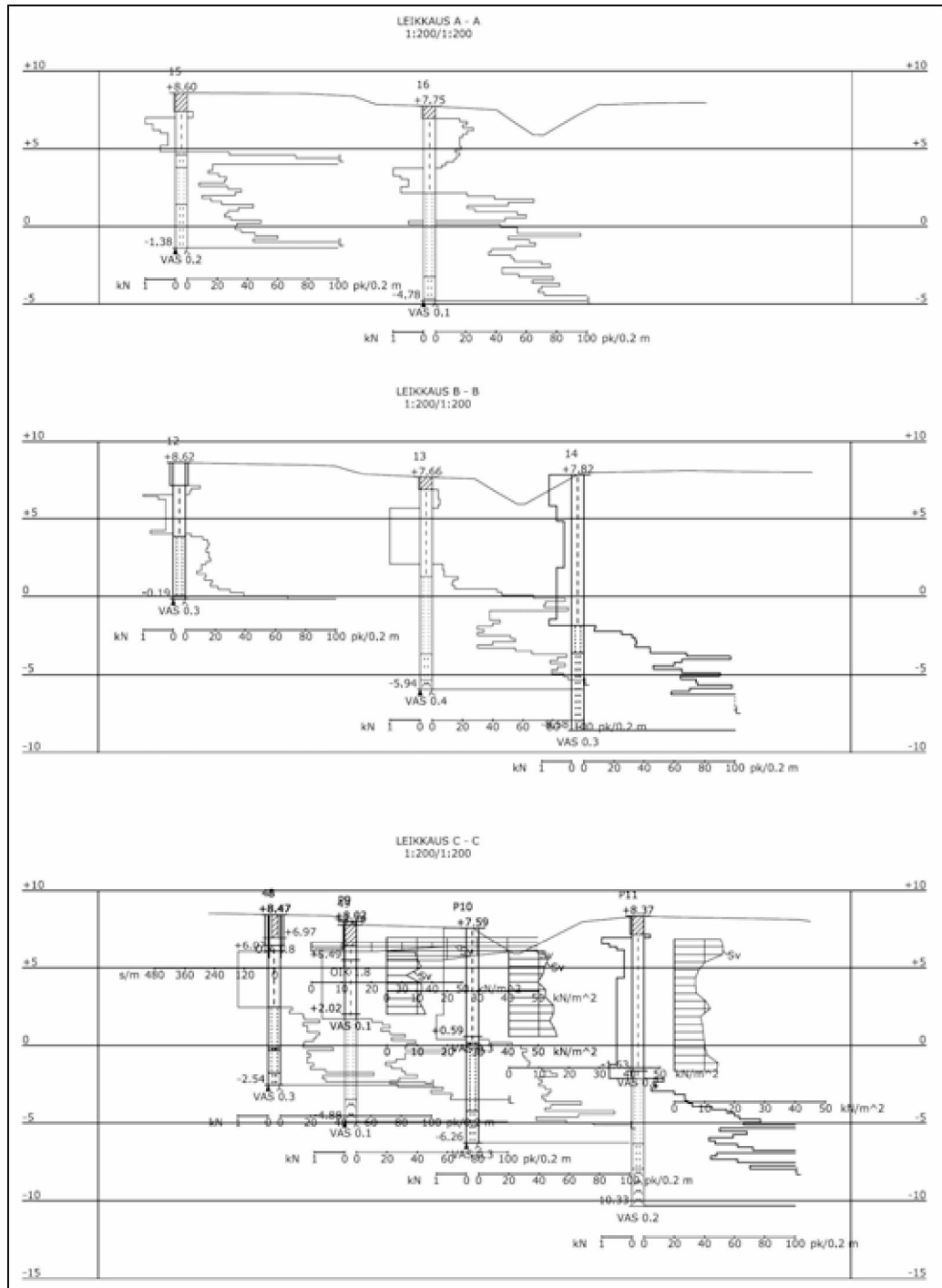
Lokakuussa 2009 tehtiin kymmenen CPTu-kairauksen sarja herkällä huokospainekärjellä. Kairausohjelma on esitetty kuvassa 8. Kairausdiagrammit on esitetty esimerkinomaisesti koealueen keskellä sijainneista pisteistä 34...36 (kuva 9).



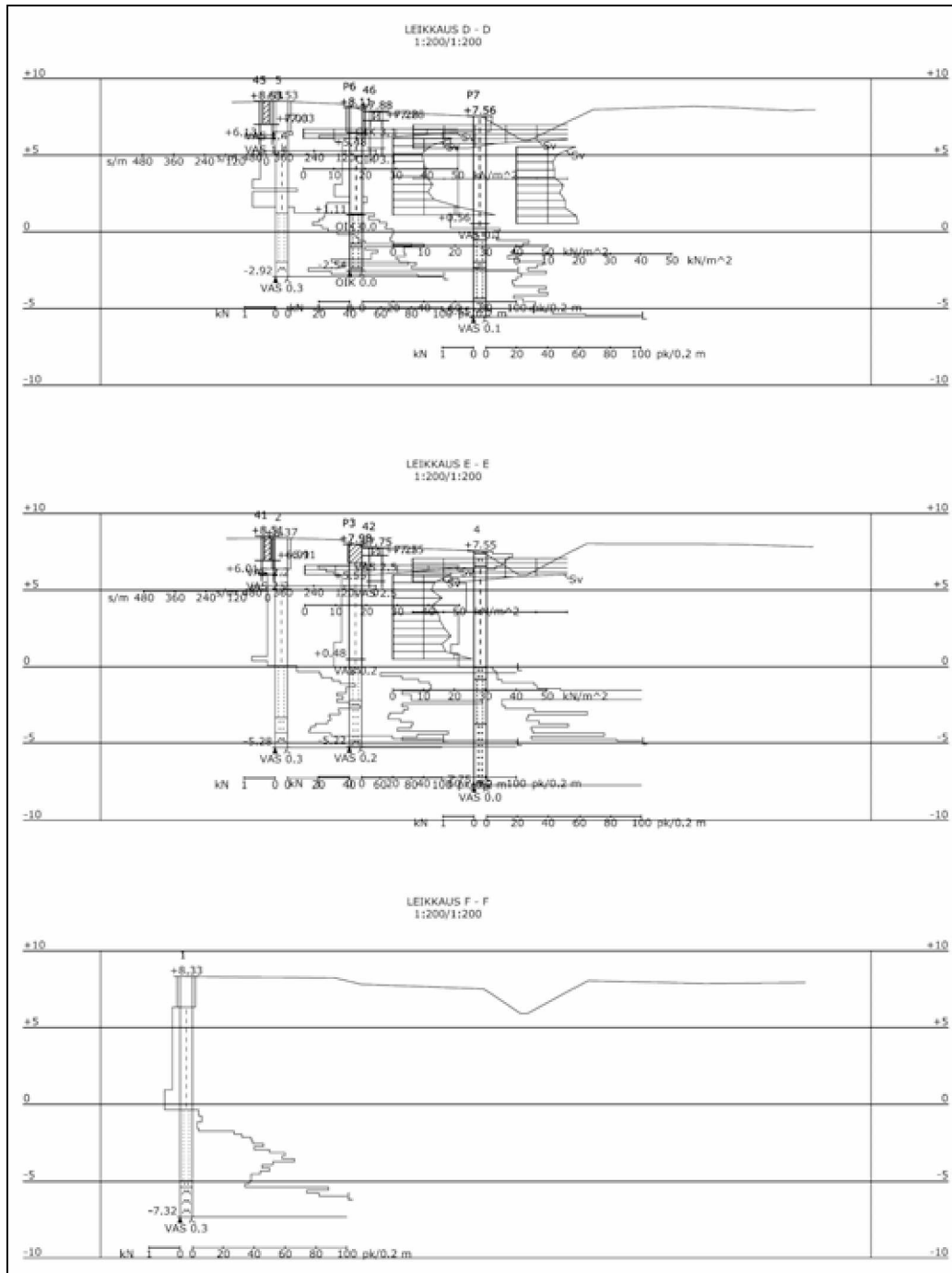
Kuva 1. Toinen pohjatutkimuskierrös. Piirroksen laatinut osittain Ramboll Finland.



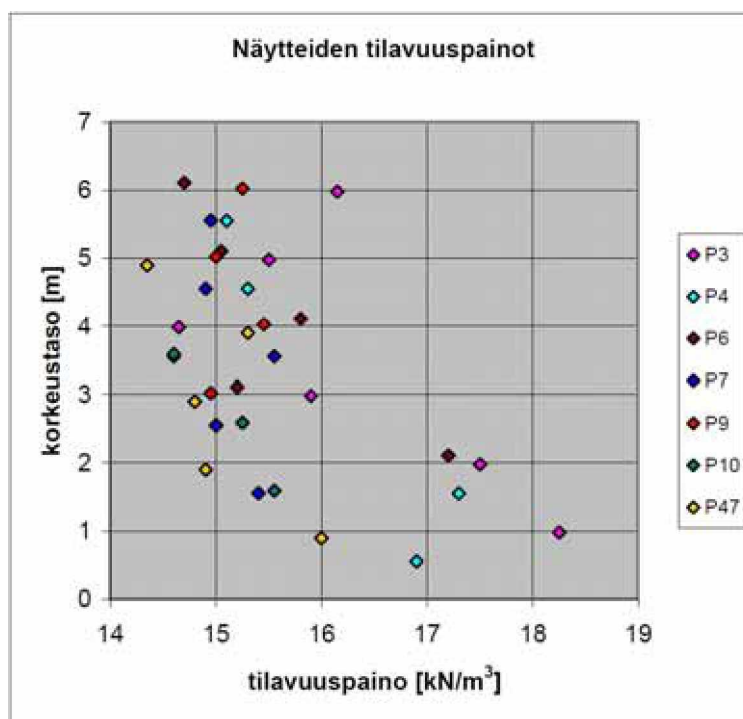
Kuva 2. Kuivakuorta tutkinut siipikairausohjelma. Laatinut TTY:n tutkija Juhu Mansikkamäki.



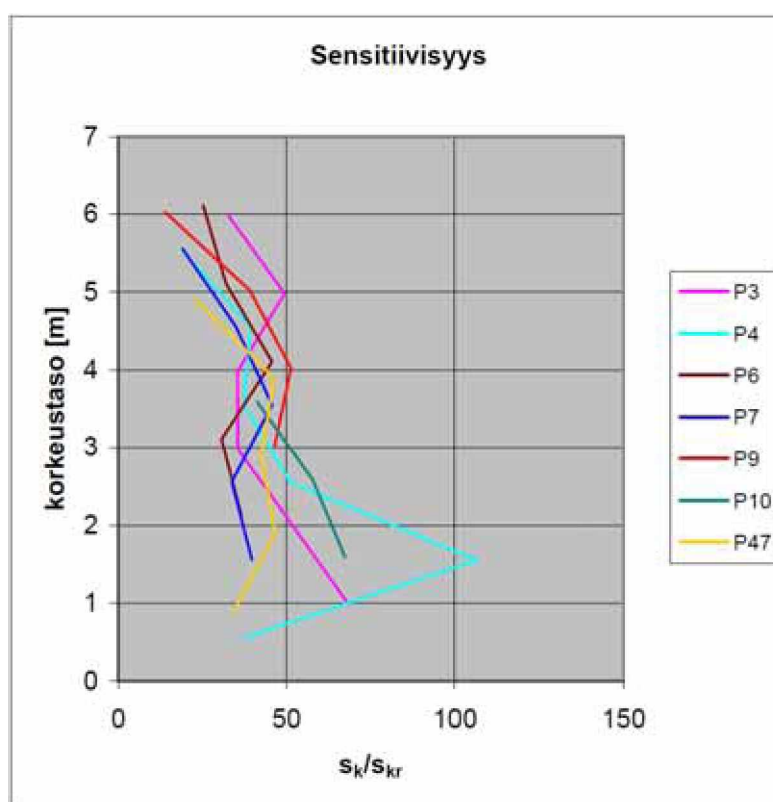
Kuva 3. Leikkaukset A–A...C–C. Mukana painokairaukset sekä siipikairaukset savesta ja kuivakuoresta. Ei mittakaavassa. Piirroksen laatinut Ramboll Finland.



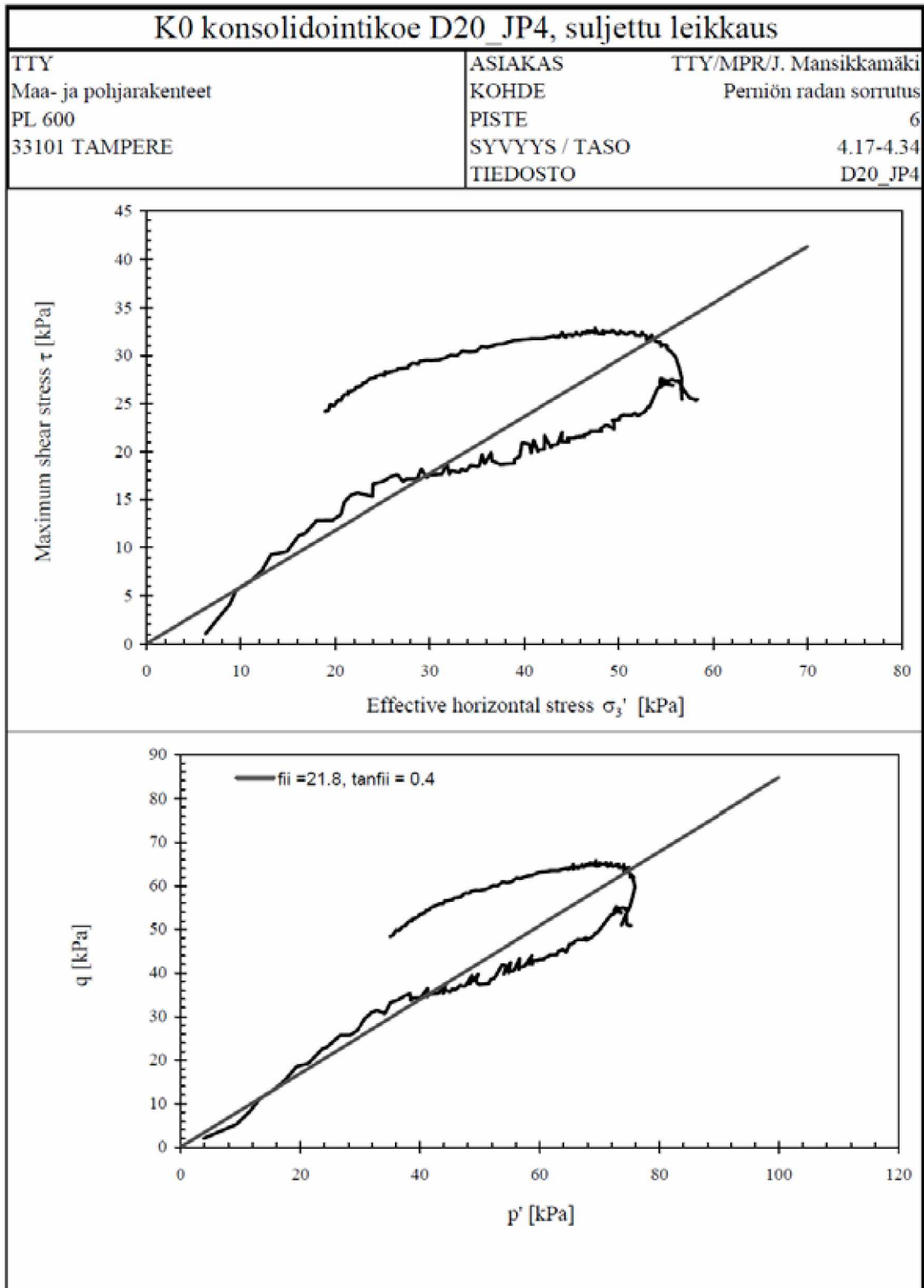
Kuva 4. Leikkaukset D-D...F-F. Mukana painokairaukset sekä siipikairaukset savesta ja kuivakuoresta. Ei mittakaavassa. Piirroksen laatinut Ramboll Finland.



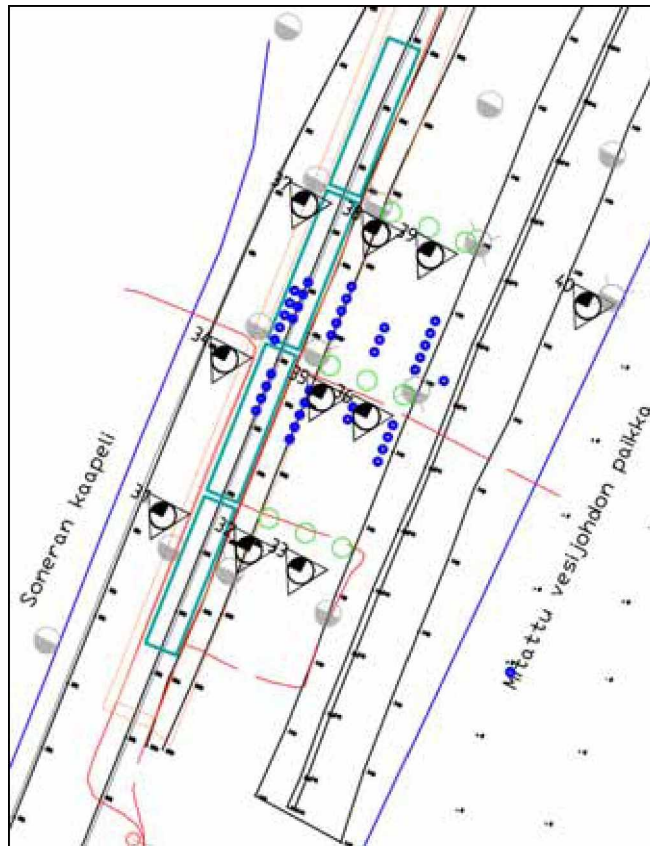
Kuva 5. Näytteistä määritetyt tilavuuspainot. Tilavuuspainoja määritettiin sekä erillisillä kokeilla että ödometrikokeiden yhteydessä. Kuvan arvot ovat näiden määritysten keskiarvoja tietyistä pisteistä ja syvyydestä.



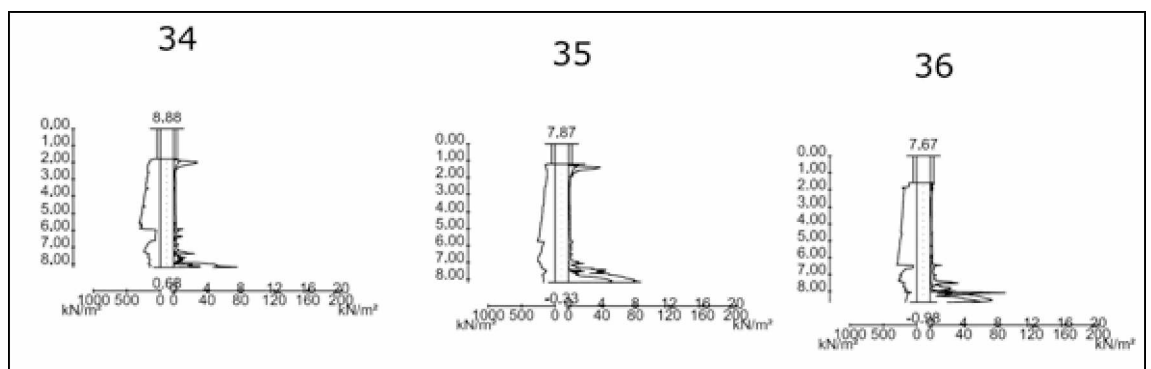
Kuva 6. Näytteiden kartiokokeilla määritetty sensitiivisyys.



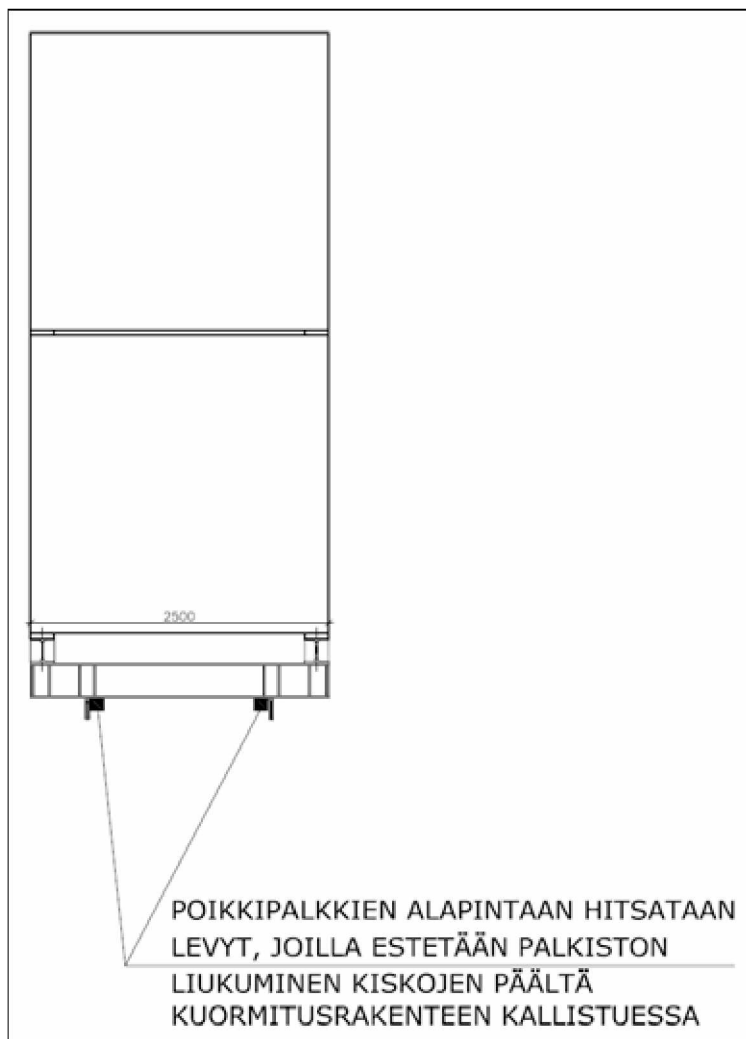
Kuva 7. Pisteestä 6 tehdyn K_0 -kolmiakiaalikokeen (CK_0U) leikkausvaihe.



Kuva 8. Ensimmäisen CPTu-käiräuskerroksen ohjelma, laatinut TTY:n tutkija Juho Mansikkamäki.



Kuva 9. Ensimmäisen CPTu-kierroksen diagrammit pisteistä 34...36. Diagrammit laatinut Destia Oy.



Kuva 2. Palkistojen toteutuspiirustus, päätynäkymä. Laatinut TTY:n tutkija Juho Mansikkamäki.

Huokospaineanturien sijainnit koealueella

Taulukko 1. Huokospaineantureiden sijainnit (m,n,z)-koordinaatistossa

Huokospaineanturin tunnus	m [m]	n [m]	z [m]
H1	30,21	-0,08	5,5
H2	29,13	-0,06	5,25
H3	28,16	-0,05	5
H4	27,15	-0,06	4,75
H5	26,12	0,06	4,25
H6	22,55	-0,10	4,5
H7	21,55	-0,14	4
H8	20,55	-0,19	3,75
H9	19,47	-0,18	3,5
H10	29,00	3,28	4,25
H11	28,01	3,28	4
H12	27,02	3,20	3,75
H13	26,09	3,28	3,5
H14	22,58	3,20	3,25
H15	21,57	3,14	3
H16	20,55	3,13	2,75
H17	19,53	3,08	2,5
H18	18,59	3,14	2,25

Huokospaineanturin tunnus	m [m]	n [m]	z [m]
H19	27,96	6,58	4
H20	26,89	6,62	3,75
H21	25,96	6,68	3,5
H22	22,38	6,69	3,25
H23	21,43	6,62	3
H24	20,44	6,65	2,75
H25	19,40	6,59	2,5
H26	27,08	9,93	4
H27	26,02	9,97	3,75
H28	22,46	10,06	3,5
H29	21,47	9,97	3,25
H30	20,45	10,01	3
H31	26,03	12,29	4,5
H32	-31,48	13,90	4,2
H33	15,76	0,02	5
H34	14,87	0,04	5
H35	13,87	0,02	5
H36	12,81	0,13	5,33
H37	11,87	0,05	5
KT1	33,31	3,38	5,5
KT2	32,02	3,35	4,5
KT3	31,06	3,22	3,5

Troxler-mittaukset

Koalueella tehtiin oheiset Troxler-tiiveysmittaukset tiistaina 20.10.2009 ennen kuormauksen alkua. Kaikissa pisteissä mittaussyvyudet olivat 300 mm ja 150 mm. Oletusasetus Proctor-tiiveydeksi oli 1900.

penkereen eteläpää		
	300 mm	150 mm
wd [g/cm ³]	2,018	1,98
dd [g/cm ³]	1,957	1,921
PR [%]	103	101,1
moist [g/cm ³]	0,061	0,059
moist [%]	3,1	3,1
air void [%]	21,4	22,9
void ratio	0,38	0,406
moist cr	0,083	0,081
dens. cr	0,165	0,779
M count	49	48
D count	351	1661

penkereen pohjoispää		
	300 mm	150 mm
wd [g/cm ³]	2,001	1,974
dd [g/cm ³]	1,931	1,909
PR [%]	101,6	100,5
moist [g/cm ³]	0,07	0,065
moist [%]	3,6	3,4
air void [%]	21,5	22,8
void ratio	0,398	0,414
moist cr	0,092	0,087
dens. cr	0,17	0,785
M count	54	51
D count	362	1675

täyttömaa 2. raiteen vierestä, penkereen eteläpää		
	300 mm	150 mm
wd [g/cm ³]	1,982	1,897
dd [g/cm ³]	1,925	1,84
PR [%]	101,3	96,8
moist [g/cm ³]	0,058	0,058
moist [%]	3	3,1
air void [%]	23	26,1
void ratio	0,403	0,468
moist cr	0,08	0,08
dens. cr	0,176	0,873
M count	47	47
D count	375	1863

Liite 4 / 2 (2)

täyttömaa penkereen ja ojan välistä, penkereen eteläpää		
	300 mm	150 mm
wd [g/cm ³]	2,068	2,166
dd [g/cm ³]	1,821	1,906
PR [%]	95,9	100,3
moist [g/cm ³]	0,247	0,26
moist [%]	13,6	13,6
air void [%]	7,8	3,4
void ratio	0,482	0,416
moist cr	0,26	0,272
dens. cr	0,148	0,598
M count	143	160
D count	315	1276

konttien täyttömateriaali lievästi tiivistettynä		
	300 mm	150 mm
wd [g/cm ³]	1,902	1,855
dd [g/cm ³]	1,845	1,796
PR [%]	97,1	94,5
moist [g/cm ³]	0,058	0,059
moist [%]	3,1	3,3
air void [%]	25,9	27,6
void ratio	0,464	0,504
moist cr	0,08	0,081
dens. cr	0,204	0,927
M count	47	48
D count	436	1977

Inklinometrikuvaajien laskennasta

Inklinometrikuvaajat on piirretty FinMeas Oy:ltä saadun mittausdatan perusteella. Tässä datassa oli esitetty anturien kallistuskulma poikkisuunnassa (jatkossa A-suunta) ja rataan nähden pituussuunnassa (B-suunta). Koska tulokset B-suunnan siirtymästä vaikuttavat virheellisiltä, niiden kuvaajia ei esitetä tässä työssä lainkaan.

Sivusiirtymien laskenta aloitetaan FinMeas Oy:n käyttämän menetelmän mukaan (Ylönen 2009) alimmasta anturista, joka oletetaan sivusuunnassa liikkumattomaksi ($s_0 = 0$). Seuraava laskentapiste on puoli anturiväliä alimman anturin yläpuolella (ei siis seuraavan anturin kohdalla), ja sen sivusiirtymä mitatussa suunnassa on

$$s_1 = \frac{d}{2} \cdot \sin(\theta_1) \quad (1)$$

missä

- s_1 = ensimmäisen anturin sivusiirtymä
- d = anturiväli
- θ_1 = ensimmäisen anturin mitaama kulma halutussa suunnassa

Seuraavien antureiden sivusiirtymä lasketaan vastaavasti:

$$s_i = s_1 + \sum_{i=2}^{n-1} (d \cdot \sin(\theta_i)) , \text{ kun } 1 < i < n \quad (2)$$

$$s_n = s_{n-1} + \frac{d}{2} \cdot \sin(\theta_n) \quad (3)$$

missä

- s_i = laskentapisteen i sivusiirtymä
- n = anturien kokonaismäärä
- d = anturiväli
- θ_i = anturin i mitaama kulma halutussa suunnassa

Viimeinen laskentapiste on siis taas viimeisen anturin kohdalla (maan pinnan tasossa).

Erytisesti suurilla siirtymillä tulee ottaa huomioon siirtymän laskentapisteen korkeusaseman kompensointi: kun inklinometriputki kallistuu pois pystysuorasta asennosta, antureiden korkeusasema muuttuu, sillä kahden anturin välinen etäisyys pysyy jokseenkin samana. Laskentapisteen korkeusaseman kompensointi tehdään laskeamalla jokaisen peräkkäisen laskentapisteen pystyetäisyys kaavalla (Ylönen 2009):

$$h = d \cdot \cos(\theta_A) \cdot \cos(\theta_B) \quad (4)$$

missä

- h = anturivälin pystysuora komponentti
- d = anturivälin nimellisarvo
- θ_A = laskentapisteen yläpuolisen anturin mitaama kulma A-suunnassa
- θ_B = laskentapisteen yläpuolisen anturin mitaama kulma B-suunnassa

Poikkeuksena tähän ovat taas ylin ja alin anturiväli, joissa korjaus lasketaan anturivälin puolikkaasta (verrattavissa sivusiirtymän laskentaperiaatteeseen).

Yksittäisten anturien korkeusaseman kokonaiskompensointi tehdään käyttämällä lähtöpisteenä ylintä, maan pinnan tasolla sijaitsevaa anturia ja laskemalla yhteen peräkkäisten anturien pystysuuntaiset välimatkat (Ylönen 2009). FinMeas laskee korkeusaseman kompensoinnin joka tilanteessa. Käytännössä korkeusaseman kompensointia tarvitaan vasta suurilla siirtymillä (esimerkiksi $\theta > 2,5^\circ$), sillä kosini ja täten myös antureiden pystyettäisyys pienenee pienillä kulmilla hyvin vähän. Suurilla siirtymillä asiassa on kuitenkin merkitystä, esimerkiksi 500 mm anturivälillä ja 30° kulman muutoksella kahden anturin välinen pystyettäisyys pienenee 67 mm alkuperäisestä. Datan käsittelyn helpottamiseksi korkeusaseman kompensointi tehtiin oheisissa kuvaajissa vain sortuman jälkeiselle tilanteelle.

Maanpinta inklinometrien kohdalla nousi sortumassa. Oheisissa kuvaajissa syvyydet on vertailun helpottamiseksi kuitenkin ilmoitettu suhteessa alkuperäiseen, ennen koetta vallinneeseen tilanteeseen.

Oheisissa kuvaajissa on pyritty ottamaan huomioon myös koko inklinometriputken korkeusaseman muutos. Ennen koetta ja kokeen jälkeen tehdyillä kartoitusmittauksilla voitiin saada selville maan pinnalle näkyvän inklinometriputken suojaputken yläpään pystysiirtymä. Laskettaessa anturien korkeusasemaa tulee myös tarkastella putken siirtymän mekanismia. Jos inklinometriputken korkeusasema on sortumassa noussut sivusiirtymistä huolimatta, voidaan olettaa, että putken alapää on noussut maan mukana ylöspäin. Näissä tapauksissa anturien lopullinen korkeuskompensointi voidaan suorittaa lisäämällä putken pään pystysiirtymä aiemmin kuvatulla tavalla kompensoitua anturikorkeuteen, jolloin ylimmän anturin korkeudeksi maan pintaan nähden saadaan mainittu pystysiirtymä.

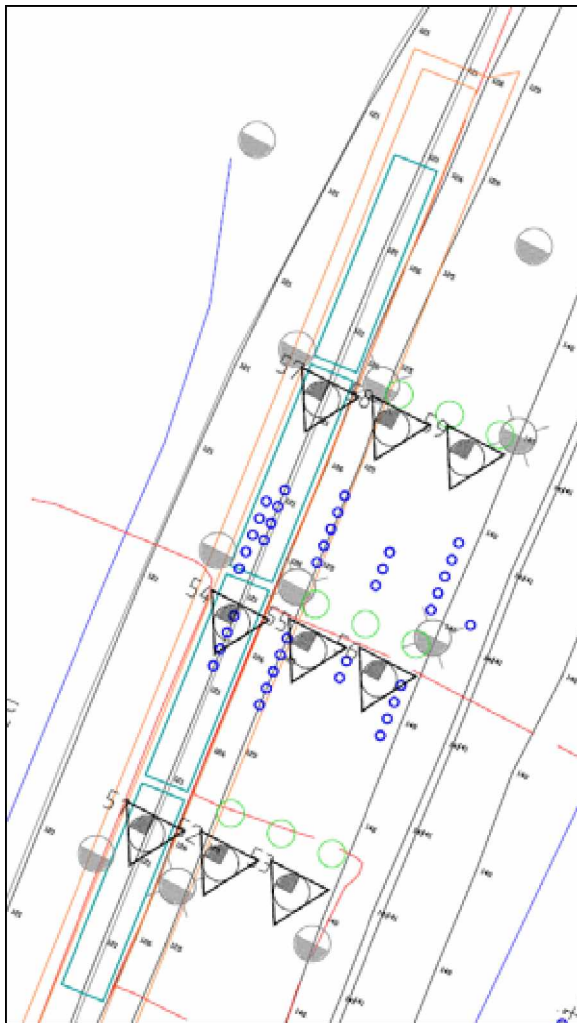
Niissä tapauksissa, joissa putken pään korkeusasema laskee sortumassa huomattavasti, on syytä olettaa, että putken alapää pysyi pystysuunnassa paikallaan tai lähes paikallaan. Näitä putkia olivat L2P1 (yläpään korkeusasema laski 75 cm), L2P2 (45 cm) ja L3P1 (20 cm). Koska kaikki nämä muutokset ovat suurempia kuin koko putken laskennallinen lyheneminen pystysuunnassa (vastaavasti 22 cm, 21 cm ja 9 cm) eikä putken alapään tunkeutuminen syvemmälle tiiviiseen maahan ole lainkaan todennäköistä, näiden putkien anturien korkeusasemakorjaus tehtiin olettamalla ylin anturi sortuman jälkeen putken laskennallisen pystysuuntaisen kokonaislyhenemän verran alkuperäisen maanpinnan tason alapuolelle. Tätä tasoa käytettiin laskennallisen korkeusaseman kompensoinnin lähtöpisteenä, jolloin alimman anturin laskennallinen syvyys (alkuperäisestä maanpinnasta laskettuna) on sama kuin ennen sortumaa. Tällä tavoin laskettuna koko putken antureita korjataan ainakin kvalitatiivisesti oikeaan suuntaan, vaikka korjauksen suuruus on selkeästi virheellinen.

Erot teoreettisen korjauksen ja mitatun pystysiirtymän välillä johtuvat muun muassa anturien rajallisesta mittausalueesta (jotkut anturit kallistuivat enemmän kuin mittausalueen alaraja -28°) ja siitä, että sortumassa maahan nähden tapahtuvan liikkeen mekanismin tarkka arviointi on käytännössä mahdotonta. Näiden seikkojen takia liukupinnan syvyyden arviointia ei kannata tehdä sortuman jälkeiseen kuvaajaan perustuen, vaan sortumaa edeltävän tilanteen perusteella, jos vain mahdollista.

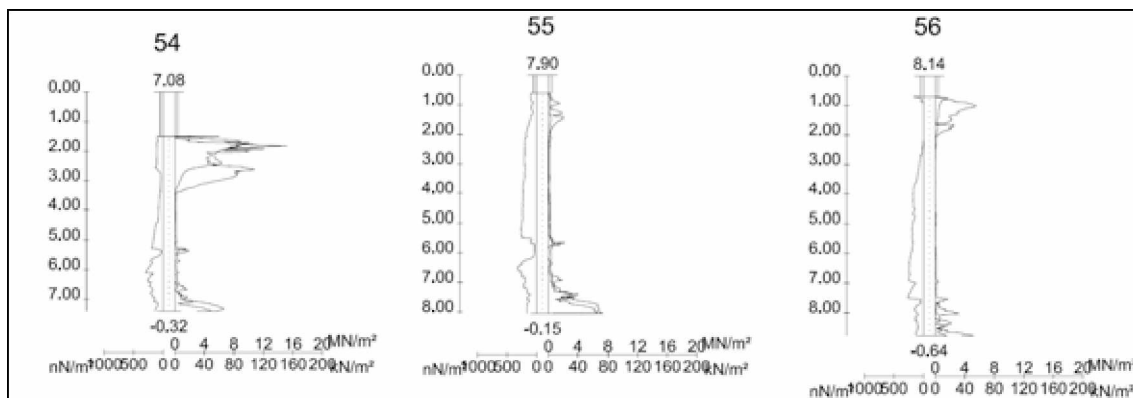
Kokeen jälkeiset CPTu-kairaukset

Sorrutuskokeen jälkeen koalueella tehtiin vielä yksi CPTu-tutkimuskierros joulukuussa 2009 (kuva 1) jäännöslujuuden ja tiukupinnan selvittämiseksi. Kairaukset tehtiin samalla herkällä huokospainekärjellä varustetulla kalustolla kuin koetta edeltänyt tutkimus. Tutkimuspisteet valittiin vastaamaan aiemman kierroksen pisteitä sillä erolla, että penkereen takana sijainneet pisteet jätettiin pois ja korvattiin penkereen kohdalta tehtävillä kairauksilla. Uusilla tutkimuspisteillä oli vähintään yli 1 m sijaintiero vanhoihin pisteisiin tulosten luotettavuuden varmistamiseksi.

Kuvassa 2 on esitetty kokeen keskiosassa sijainneiden pisteiden 54...56 kairausdiagrammit. Pisteet 55 ja 56 olivat lähellä ensimmäisen kierroksen pisteitä 35 ja 36.



Kuva 1. Kokeen jälkeinen CPTu-tutkimusohjelma. Laatinut TTY:n tutkija Juho Mansikkamäki. Osa kuvan antureista on virheellisissä paikoissa.



Kuva 2. Toisen CPTu-kierroksen diagrammit pisteistä 54...56. Diagrammit laatinut Destia Oy.

Liik
enne
vira
sto

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-553-3

www.liikennevirasto.fi