



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEEMU MÄKINEN
INKLINOMETRIMITTAUSTEN KÄYTTÖ STABILITEETIN
ARVIOINNISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Tim Länsivaara

Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Rakennustekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 14. Tammikuuta
2015

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

MÄKINEN, TEEMU: Inklinometrimittausten käyttö stabiliteetin arvioinnissa

Diplomityö, 181 sivua, 3 liitesivua

Tammikuu 2015

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: professori Tim Länsivaara

Avainsanat: Inklinometri, inklinometrimittaus, sivusiirtymä, leikkausmuodonmuutos, raja-arvot, ratapenger, stabiliteetti, turve, pehmeiköt, tehokkaat parametrit

Suomen rataverkko on monin paikoin perustettu aikoinaan luonnontilaisille pehmeiköille 1800 luvun lopun sekä 1900 luvun alun välillä. Rataosuudet ovat tuolloin rakennettu mahdollisimman lyhyen reitin kautta sekä usein tasaisen maaston kohtaan. Näiden hyvin vanhojen rataosuuksien lisäksi tutkimuksessa on mukana turpeelle 1970 luvun vaihteessa rakennettuja rataosuuksia. Tuolloin tehdyillä epäonnistuneilla perustamisvalinnoilla on nykyisin ongelmallisia jälki-seuraamuksia. Nykyisin rataosuuksien perustaminen turpeelle on kielletty.

Edellä mainittujen luonnontilaisten pehmeikköjen kaikkien stabiliteettiongelmiin korjaaminen nopealla aikataululla ei ole mahdollista. Stabiliteettiongelmiin lisäksi kyseisillä pehmeiköillä saattaa usein olla myös muita ongelmia kuten routa, painumat ja kuivatus. RATUS -hankkeessa on selvitetty noin 2700 pehmeikköä, jotka karkean tarkkuuden vakavuuslaskelmien mukaan jakautuvat likimäärin tasan epästabili ($F < 1,3$), seurattava ($F = 1,3 \dots 1,5$) ja stabiili ($F > 1,5$). Liikennevirasto (LiVi) on asettanut 98 ratakohdetta seurantaa vaativista pehmeikkökohteista aktiiviseen inklinometriseurantaan.

RATO3 päivitystä varten on laadittu alustava seurantamittausohje vuonna 2013. Kuitenkin riskitasoluokituksessa sekä vakavuusanalyseissä on kehitettävää ja tämä tutkimus on osa LiVi:n ratapenkereiden stabiliteetin riskiarvioelävitystä (STARI). Tutkimuksen tavoitteena on pyrkiä selvittämään seurannassa olevien penkereiden tilaa vaakasiirtymien perusteella sekä parantamaan ymmärrystä heikkoon vakavuuteen liittyvistä sivusiirtymistä. Tutkimuksen pohjalta myös luodaan LiVi:n julkaisema ohje, jolla päivitetään nykyinen RATO3:n alustava seurantamittausohje. Uusi ohje tullaan julkaisemaan myöhemmin vuoden 2015 aikana.

Tutkimuksen yhdessä kohteessa voitiin todeta olevan sortumaan johtavia siirtymiä ja kaikista noin sadasta kohteesta vain muutamassa oli selvästi stabiliteetista johtuvia siirtymiä. LiVi:n kohteiden lisäksi hyödynnettiin ulkomailla suoritettuja penkereiden sorrutuskokeita sekä Perniön sorrutuskoetta. Näiden pohjalta voitiin luoda konservatiiviset, mutta pätevät raja-arvot todellisen riskitason arvioimiseen. Tutkimuksen perusteella vaarallisia siirtymiä tulee arvioida pehmeillä savilla leikkautuvan kohdan leikkausmuodonmuutoksien perusteella.

Tutkimuksen toinen pääpaino oli turpeen deformaatioiden mallintamisessa FEM -laskentojen avulla sekä turpeen lujuuden arvioiminen vanhojen ratapenkereiden alla. Turvepenkereillä tutkimuksessa ongelmana yleisesti olivatkin sekä poikki- että pituussuuntaiset epätasaisuudet ja pengermateriaalin lakoaminen. Tämä havainnollistuu inklinometrimittauksissa muun muassa ”viihkamaisena” siirtymänä. Turpeen lujuutta vanhojen ratapenkereiden alla on käsitelty vielä työn johtopäätöksissä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

MÄKINEN, TEEMU: Use of inclinometers in evaluation of stability

Master of Science Thesis, 181 pages, 3 Appendix pages

January 2015

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Tim Länsivaara

Keywords: Inclinometer, use of inclinometer, lateral displacement, shear strain, limit values, railway embankments, stability, peat, soft soil, clay, effective parameters

The Finnish railway network has been established mainly on natural state soft soils. The track sections are mainly built in between late 1800s and early 1900s. The railway sections were built through the shortest possible route and often on a flat ground. However there are also railway embankments on peat that were built in early 1970s and with unsuccessful choices back then there are now constant problems. Building new railways on peat soil is forbidden nowadays.

However, putting in order all the problematic stability problems at short notice is not possible. In addition to stability problems in soft ground there are often other problems such as ground frost, settlement and drainage. In the RATUS project there were analyzed approximately 2700 soft soil railway embankments which are in coarse stability analysis divided almost equally in to three categories: unstable ($F < 1,3$), monitored ($F = 1,3 \dots 1,5$) and stable ($F > 1,5$). As a result, the Finnish Transport Agency (FTA) has set 98 railway embankments to be monitored actively with inclinometers.

For the RATO3 update there is already initial follow-up measurement guidelines made in 2013. However, classification of the level of risk and evaluation of stability conditions needs still development and this research is part of FTAs railway embankments stability risk assessment report (STARI). The aim of this research is to determine the state of monitored embankments by studying horizontal displacements and possibly improving the overall understanding of the displacements. On the basis of this research there will be published new instructions to replace the RATO3 follow-up measurement guidelines. The new guidelines will be published later in 2015.

In one of the embankments there were clear indicators in displacements of approaching failure. Also embankment failures in foreign countries were studied and especially horizontal displacements in them. Also Perniö's embankment failure was studied thoroughly. Based on these studies there could be created a conservative but valid limit values in evaluation of the actual level of risk. In the research was found that analyzing shear strains in shear zone is most important thing when analyzing dangerous horizontal displacements.

In the research there was also conducted some FEM calculations of deformations in peat embankments and there were also done some evaluation of shear strength under old railway embankments. However, in peat the problems usually focus around deformations. More about the strength of peat under old railway embankments are shown in the conclusions.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteet yksikössä. Työn tekeminen alkoi keväällä 2014. Työn rahoittajana ja tilaajana toimi Liikennevirasto. Tästä työstä tuli suorastaan massiivinen johtuen tutkittavien kohteiden määrästä sekä pohdinnan taustalle suoritetusta kirjallisuusselvityksestä. Lähtömaterialin tarjoama tieto ei myöskään usein ollut kattavaa, mikä lisäsi haastetta koko tutkimuksen erivaiheissa. Sivumäärää ei yhtään keventänyt projektiin mukaan liitetyt turpeen laboratoriokokeet. Kuitenkin tämän diplomityön inklinometreihin liittyvät johtopäätökset tulevat vielä erikseen esille myöhemmin julkaistavassa seurantamittausohjeessa.

Työn ohjaamisesta haluan esittää kiitokset Juho Mansikkamäelle. Työn rahoittamisesta vastaavasti kiitokset Liikennevirastolle sekä kiitokset myös projektiryhmään kuuluville jäsenille kommentteista ja ohjauksesta. Inklinometrimittauksiin liittyvästä opastamisesta vielä kiitokset Jalle Bäcklundille.

Tampereella 16.1.2015

Teemu Mäkinen

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	2
1.3	Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen toteutus	3
1.4	Tutkimusraportin rakenne	3
2	Ratapenkereiden stabiliteettiin liittyvät elementit.....	4
2.1	Yleistä	4
2.2	Ratarakenne.....	5
2.2.1	Uuden radan osat ja nimitykset.....	5
2.2.2	Ratojen luokitus	5
2.3	Junakuormat	6
2.3.1	Mitoituskuormat vakavuuslaskennassa.....	7
2.3.2	Kuormituksen dynaamisuus.....	8
2.3.3	Junakalusto ja sen kehittyminen	9
2.4	Tarkasteltavat pohjamaat	10
2.4.1	Pehmeiköt yleisesti	10
2.4.2	Kuivakuori	11
2.4.3	Turve.....	12
2.4.3.1	Yleistä.....	12
2.4.3.2	Geotekniset ominaisuudet	13
2.4.3.3	Turpeen tutkimusmenetelmät ja geotekniset parametrit.....	14
2.4.3.4	Lujittuminen	15
2.4.4	Savi	16
2.4.4.1	Yleistä.....	16
2.4.4.2	Sensitiivisyys.....	16
2.4.4.3	Huokosvedenpaine ja suljettu tila.....	16
2.4.4.4	Kimmoplastisuus	18
2.4.4.5	Mohr-Coulombin murtoehto	19
2.4.4.6	Painuminen	20
2.4.4.7	Lujittuminen	22
2.4.4.8	Anisotropia ja destruktuuraatio	22
2.4.4.9	NGI-ADP -menetelmä.....	22
2.4.4.10	Saven tutkimusmenetelmistä.....	24
2.4.5	Silttipitoiset ja liejuiset savet sekä siltti	26
2.5	Vakavuuslaskenta.....	29
2.5.1	Yleistä	29
2.5.2	Maaston geometria ja pohjamaan maalajit	30
2.5.3	Liukupintamenetelmät	31
2.5.3.1	Yleistä.....	31
2.5.3.2	Lamellimenetelmät	32

2.5.4	Elementtimenetelmät	33
2.5.4.1	Yleistä.....	33
2.5.4.2	Plaxis 2D -laskentametodit.....	33
2.5.5	Ratapenkereen stabiliteetin parantaminen	35
3	Inklinometrimittaus	36
3.1	Yleistä	36
3.2	Manuaalinen ja automaattinen inklinometrimittaus.....	37
3.3	Siirtymien määrittäminen ja liikkeen suunta.....	39
3.4	Mittatarkkuus ja virhelähteet.....	41
3.5	Mittausvirheiden havainnointi ja korjaaminen.....	42
3.6	Yhteenvedo yleisimmistä virheistä	46
3.7	Siirtymien nopeus	47
3.8	Siirtymän muoto ja tyypit	48
3.9	Leikkausvyöhyke putkiprofilissa	50
4	Tutkimusaineisto	51
4.1	Tutkimuksessa hyödynnettävät inklinometrit	51
4.1.1	Turvekohteet	51
4.1.2	Turve- & savikohteet	52
4.1.3	Savikohteet.....	52
4.2	Perniön sorrutuskoete.....	54
4.3	Murron stabiili koepenger.....	56
4.4	Ulkomaiset inklinometrimittaukset.....	59
4.4.1	Yleistä tilastointia ulkomaisista kohteista.....	59
4.4.2	Siirtymät penkereen vaiheittainrakentamisessa	60
4.4.3	Brasiliassa suoritettu sorrutuskoete	63
5	Tulokset ja analysointi	64
5.1	Tutkitut kohteet joissa vain vähäistä siirtymää	64
5.2	Tarkemmin analysoidut kohteet.....	65
5.3	Tutkimuskohteiden analysointi	66
5.3.1	Yleistä	66
5.3.2	Tutkittavat kohteet rataosittain	67
5.3.3	Tutkimuskohteet 1: Riihimäki – Tampere – Jyväskylä	69
5.3.3.1	Riihimäki – Tampere.....	69
5.3.3.2	Tampere – Jyväskylä	77
5.3.4	Tutkimuskohteet 2: Tampere – Kokemäki – Rauma	82
5.3.4.1	Tampere – Kokemäki	82
5.3.4.2	Kokemäki – Rauma	99
5.3.4.3	Kokemäki – Pori.....	103
5.3.5	Tutkimuskohteet 3: Tampere – Seinäjoki – Oulu	104
5.3.5.1	Tampere – Seinäjoki.....	104
5.3.5.2	Seinäjoki – Oulu	128
5.3.6	Tutkimuskohteet 4: Muut.....	138

5.4	Yhteenveto ja ehdotus siirtymän raja-arvoista.....	148
6	Johtopäätökset.....	153
6.1	Yhteenveto kohteista.....	153
6.2	Loppupäätelmät.....	156
6.2.1	Inklinometriputken oikeanlainen sijoittaminen ja asennus.....	156
6.2.2	Stabiliteetin arviointi pysty- ja vaakasiirtyminen perusteella uudella penkereellä	157
6.2.3	Kunnossapitotarpeen arviointi inklinometrimittauksista.....	157
6.2.4	Saven ominaisuuksien vaikutus reagointiaikaan	158
6.2.5	Siirtymien raja-arvot pehmeiköillä	160
6.2.6	Turpe.....	161
6.2.6.1	Turpeen laboratoriotutkimukset	161
6.2.6.2	Vastapenkereet ja massastabilointi turpeella.....	164
6.2.6.3	Turpeen suljettu leikkauslujuus vanhan ratapenkereen alla ...	166
6.3	Jatkotutkimusehdotukset.....	170
6.3.1	Myötöpehmenevien paikkojen riskikartta	170
6.3.2	Maatuneisuuden ja pengerkorkeuden avulla määritettävä arvio turpeen lujuudesta	171
6.3.3	Lisätutkimusta vastapenkereiden alta turvekohteissa.....	173
6.3.4	Turvepenkereellä suoritettava koekuormitus.....	173
6.3.5	Turpeella vastapenkereiden rakentaminen irti ratapenkereestä	173
	Lähteet.....	175
	Liite 1: Radan stabiliteetin laskenta olemassa olevat penkereet (RHK B15)	182
	Liite 2: Seurattavat manuaaliset inklinometriputket Suomen ratakartalla	183
	Liite 3: Seurattavat inklinometriputket	184

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Lyhenteet

DSS	Liukupinnan keskiosa (Direct Simple Shear)
ESP	Tehokkaidenjännitysten polku (Effective stress path)
EVP-SCLAY1S	Laajennettu SCLAY1S -materiaalimalli
FEM	Elementtimenetelmät (Finite Element Method)
FOS	Kokonaisvarmuus (Factor of Safety)
LEM	Lamellimenetelmät (Limit Equilibrium Method)
LiVi	Liikennevirasto
LM	Kuormakaavio (Load model)
MC	Mohr-Coulomb –materiaalimalli
MCC	Modified Cam Clay –materiaalimalli
NGI-ADP	Anisotroopinen –materiaalimalli
OCR	Ylikonsolidoitumisaste (overconsolidation ratio)
POP	Esikonsolidaatiojännitys (pre-overburden pressure)
RATO	Ratatekniset ohjeet
RATUS	Ratojen luokitus -projekti
RHK	Ratahallintokeskus (nykyinen Liikennevirasto)
S-CLAY1S	Anisotroopinen –materiaalimalli
SFS-EN	Suomen standardisoimisliiton EN -standardi
SGY	Suomen geoteknillinen yhdistys
SS	Soft Soil –materiaalimalli
STARI	Ratapenkereiden stabiliteetin riskiarvioselvitys
TSP	Kokonaisjännitysten polku (Total stress path)
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto

Merkinnät

C_c	Kokoonpuristuvuuskerroin
C_k	Vedenläpäisevyyden muutosindeksi
C_s	Paisumiskerroin
K_0	Lepopainekerroin
K_i	Junatyypistä riippuva kerroin
M_{sf}	Laskennan varmuus (kokonaisvarmuus)
W_n	Vesipitoisuus
c'	Tehokas koheesio
c_{input}	Käyttäjän antama koheesio
$c_{reduced}$	Ohjelman reduceoima koheesio
s_u	Suljettu leikkauslujuus
u_0	Alkutilanteen huokospaine
v_s	Leikkausaallon nopeus
τ_f	Maan leikkauslujuus

D	Sivusiirtymä
F	Kokonaisvarmuus
L	Mittausväli
n	Rataosan kunnossapitotasosta riippuva kerroin
p	Hydrostaattinen jännitys
R	Pjajvtshenkon maatumisprosentti
u	Huokosvedenpaine
V	Junan liikennöintinopeus rataosalla
w	Vesipitoisuus
x	Vaakapoikkeama
z	Etäisyys maanpinnasta
<i>Li</i>	Hehkutushäviö
<i>M</i>	Kriittisen tilan parametri
<i>V</i>	Tilavuus
<i>e</i>	Huokosluku
<i>p'</i>	Tehokas hydrostaattinen jännitys
<i>q</i>	Deviatorinen jännitys
γ_w	Veden tilavuuspaino
ε_V	Tilavuuden muodonmuutos
ε_k	Kimmainen muodonmuutos
ε_p	Plastinen muodonmuutos
ε	Kokonaismuodonmuutos
σ	Kokonaisjännitys
σ'_1	Tehokas pystysuuntainen jännitys
σ'_2	Tehokas vaakasuuntainen jännitys
σ'_3	Tehokas vaakasuuntainen jännitys
σ'	Tehokas kokonaisjännitys
φ'	Tehokas kitkakulma
φ_{input}	Käyttäjän antama kitkakulma
$\varphi_{reduced}$	Ohjelman reduceoima kitkakulma
φ_v	Sysäyskerroin
ψ	Dilataatiokulma
γ	Leikkausmuodonmuutos
κ	Paisumiskerroin
λ	Kokoonpuristuvuuskerroin
τ_{mob}	Maan mobilisoitunut leikkausjännitys

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomen rataverkko on pääosin rakennettu 1800-luvun lopun ja 1900-luvun alun välillä. Rataverkkoa on sittemmin kunnostettu ja ylläpidetty kasvaneiden kuormien ja junanopeuksien johdosta. Ratojen rakentaminen tuolloin tarkoitti tasaiseen maastoon rakentamista mahdollisimman lyhyen reitin kautta. Käytännössä tämä tarkoitti peltoja ja soiden reuna-alueita. Näille pohjamaille rakentamalla vältyttiin maamassojen leikkauksilta ja täytöiltä. Tuohon aikaan myös vaatimukset rakenteelta ja pohjamaalta olivat aivan eri luokkaa kuin nykyisillä junakuormilla ja -nopeuksilla. Nykyään rataverkon laajuus Suomessa on noin 6000 km.

Käytännössä kaikkien pehmeikkökohteiden stabiliteettiongelmiin korjaaminen ei ole mahdollista nopealla aikataululla. Tämän lisäksi pehmeiköillä on myös muita kunnossapitoon liittyviä ongelmia kuten routa, painumat ja esimerkiksi kuivatus. Tämän johdosta Liikennevirasto (LiVi) on asettanut osan pehmeikkökohteista tarkkailtavaksi siirtymiä mittaavien inklinometreihin. LiVi:n valtakunnallisessa inklinometriseurannassa on tällä hetkellä 98 ratakohdetta. Tämän lisäksi eri hankkeiden vastuulla on muita kohteita, joista osa siirtyy valtakunnalliseen seurantaan myöhemmin. Tämä tutkimus on osa LiVi:n ratapenkereiden stabiliteetin riskiarvioselvitystä (STARI).

RATUS hankkeessa on selvitetty noin 2700 pehmeikköä, jotka karkean tarkkuuden vakavuuslaskelmien mukaan jakautuvat likimäärin tasan epästabiili, seurattava ja stabiili kategorioihin. Kussakin varmuustasoryhmässä on noin 900 kohdetta. Varmuuskertoimet ovat epästabiilille $F < 1,30$, seurattavalle $F = 1,3 \dots 1,5$ sekä stabiilille $F > 1,5$. Arviolta uusia seurattavia kohteita on tulossa satoja ($F = 1,3 \dots 1,5$). Tämän johdosta RATUS -hankkeen toisessa vaiheessa on arviointiin otettu mukaan kehittyneemmät vakavuuden laskenta menetelmät, kuten GeoCalc:n r_u -menetelmä. Kehittyneemmällä laskentamenetelmällä tehtävä yksityiskohtaisempi analyysi voi parantaa laskennallista varmuutta, mutta kategorioista johtuen ei kuitenkaan vähennä seurattavaksi tulevien kohteiden määrää. Erilaisia kehittyneempiä laskentametoodeja on esitelty kappaleessa 2.5.

RATO3 päivitystä varten on laadittu jo alustava seurantamittausohje vuonna 2013 ja määritelty penkereiden riskitasot vaakasiirtymän muutosnopeuden perusteella. Valtakunnallisessa seurannassa olevat kohteet sijoittuvat pääosin RATO3:n alhaisimmalle riskitasolle. Osin tästä johtuen riskitasoluokituksessa tai vakavuusanalyysissä on kehitettävää. Tilannetta monimutkaistaa myös halu kasvattaa junien liikennöintinopeuksia, mikä taas saattaa lisätä esimerkiksi suistumisriskiä nykyisellä rataverkolla.

Turvepenkereillä ongelmana ovatkin epätasaisuudet raideosuuksilla sekä poikkeettua pituussuunnassa. Tutkimuksen turvekohteissa siirtymien syynä yleensä ovat pen-

germateriaalin ”lakoaminen” sekä esimerkiksi vastapenkereiden suuret painumat. Tällöin ei välttämättä ole kyse kehnosta vakavuudesta vaan penkereen pitkäaikaisista deformaatioista. Edellä mainittua ongelmaa voidaan kontrolloida jatkuvalla radan tuennalla, mutta tällöin kohteissa saattaa aiheutua jatkuva tuenta-painuma kierre. Tällöin epätaisilla osuuksilla junanopeuksia nostettaessa suistumisriski kasvaisi.

Turpeen lujuusominaisuudet ovat usein geoteknisessä mielessä tyydyttävät ja siirtymät aiheutuvatkin turpeen vedenläpäisevyys- ja painumaominaisuuksista. Inklinometrimittauksissa tämä havainnollistuu yleensä näkyvimmin kohteissa, joissa on rakennettu vastapenkereitä hiljattain. Kyseisissä kohteissa vastapenkereet ovatkin yleensä painuneet lähes maanpinnan tasolle heti rakentamisen jälkeen. Rakentamisen jälkeisen suuren painuman jälkeen kohteissa vaikuttaa vielä merkittävä sekundaaripainuma. Turvepenkereiden käyttäytymistä on mallinnettu Plaxiksen avulla kappaleen 5 esimerkki-kohteissa. Turpeen suljettua leikkauslujuutta on vastaavasti vielä havainnollistettu vanhan ratapenkereen alla johtopäätöksissä perustuen tutkimuksen yhteydessä tehtyyn laboratorio- ja kirjallisuustutkimukseen.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Seurantamittauksen tehostamiseksi tarvitaan pätevät raja-arvot, joilla voidaan arvioida kohteen todellinen riskitaso penkereen sortumisen suhteen. Tätä pyritään tutkimaan muun muassa leikkausmuodonmuutoksista kertyvinä siirtyminä. Tutkimuksen tavoitteena on, että arviointimenettely soveltuisi ratapenkereille pehmeiköillä. Tutkimuksen käsiteltäviä pohjamaita ovat plastiset sekä liejuiset savet ja eloperäiset turpeet.

Tutkimuksessa tutkitaan olemassa olevaan aineistoon perustuen epästabiilien ratapenkereiden käyttäytymistä pehmeiköillä. Tutkimisen lähtökohtia ovat seuraavat: penkereen painuminen ja tästä syntyvä viuhkamainen siirtymä sekä leikkausvyöhykkeelle keskittyneet siirtymät. Tämän lisäksi pyritään tutkimaan millainen muodonmuutos ja muodonmuutoksen nopeus on kriittinen.

Tutkimuksen lähtötietoina ovat muun muassa aiemmat mittaukset ja poikkileikkaukset ratapenkereistä. Tämän lisäksi hyödynnetään ulkomaisia tutkimuksia ja kirjallisuuslähteitä sekä erinäisiä tietopankkeja kuten mittauskohteiden seurantakortteja. Tutkimuksessa on tavoitteena tarkentaa nykytietoa muun muassa elementtimenetelmää hyödyntäen. Uusia laboratoriotutkimuksia ei tutkimuksen yhteydessä tehdä, mutta laskennassa ja tutkimuksen johtopäätöksissä hyödynnettiin TTY:n laboratoriossa suoritetuista Tampere – Seinäjoki välin turpeen laboratorionkokeita. Laboratorionkokeet olivat kuitenkin toiseen LiVi:n projektiin liittyviä. Laboratorionkokeita myös hieman vertailtiin ulkomailla tehtyihin vastaaviin DSS- ja kolmiakiaalikokeisiin.

Eri maalajeilla niiden ajasta riippuva muodonmuutos sekä stabiliteetti ovat erittäin monimutkaisia. Maan viskoosien ominaisuuksien selvittäminen taas vaatisi runsaasti laboratoriotutkimuksia, aikaa ja resursseja. Stabiliteetin aikariippuvuuden huomioiminen on mahdollista uusimmissa laskentamalleissa mutta siihen sisältyy epävarmuutta.

Tutkimuksessa hyödynnetään TTY:n aikaisempia tutkimuksia ja osaamista. Näistä mainittakoon esimerkiksi Perniön sorrutuskoee, josta on paljon hyödyntämiskelpoista materiaalia. Tutkimuksessa pyritään myös hyödyntämään muiden maiden vastaavia ratapenkereen siirtymään ja sorrutuskokeisiin liittyvää tietoa ja vertailemaan näitä suomalaisiin olosuhteisiin.

Tutkimusta rajoittavat kuitenkin pohjamaaolosuhteet. Kaikkia pohjamaita kattavaa tutkimusta ei ole tarkoitus tehdä vaan keskitytään jo aiemmin mainittuihin maape-raäolosuhteisiin. Raja-arvo tarkastelusta pyritään myös tekemään mahdollisimman tehokas ja yksinkertainen ottaen huomioon käytännön mittaamisen näkökohdat.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutetaan kirjallisuustutkimuksena jonka ohella toteutetaan tilastollista tarkastelua ja tutkittavien kohteiden syvällistä analysointia. Tutkimuksen alussa keskitytään ratarakenteeseen, kuormiin ja pohjamaahan. Tämän lisäksi käsitellään stabiliteettia ja siihen liittyviä elementtejä. Näitä ovat muun muassa eri laskentamenetelmät, stabiliteettia heikentävät ja parantavat tekijät sekä eri pohjamaa-olosuhteet.

Tutkimus koostuu kirjallisuusselvityksen ja materiaaliin perehtymisen lisäksi inklinometridatan kokoamisesta ja analysoinnista. Tutkimuksen lisäksi suoritetaan laskentaosio, jossa hyödynnetään muun muassa Elasto-viskoplastista elementtimenetelmään perustuvaa laskentaa. Tämän lisäksi suoritetaan paljon elementtimenetelmiin perustuvaa painuma- ja stabiliteettilaskentaa. Käytössä on myös GeoCalc:n stabiliteettilaskenta, etenkin kohteissa joissa halutaan päästä nopeasti käsiksi suuntaa antavaan vakavuuteen sekä liukupinnan muotoon. Stabiliteettilaskentojen pääidea on siis liukupinnan muodossa, koska tällöin voidaan siirtymiä vertailla liukupinnan muotoon ja löytää mahdollisia yhteyksiä.

Inklinometridatan analysoinnissa kootaan mitattu siirtymädata ja luokitellaan kohteet pohjamaan mukaan. Tämän jälkeen suoritetaan datan tarkastelu, jossa tutkitaan muun muassa maksimisiirtymiä aikayksikössä, siirtymänopeuden kehittymistä ja siirtymän muotoa sekä leikkausvyöhykkeen siirtymiä. Tämän lisäksi vertaillaan vielä siirtymiä suhteessa laskettuun stabiliteettiin.

1.4 Tutkimusraportin rakenne

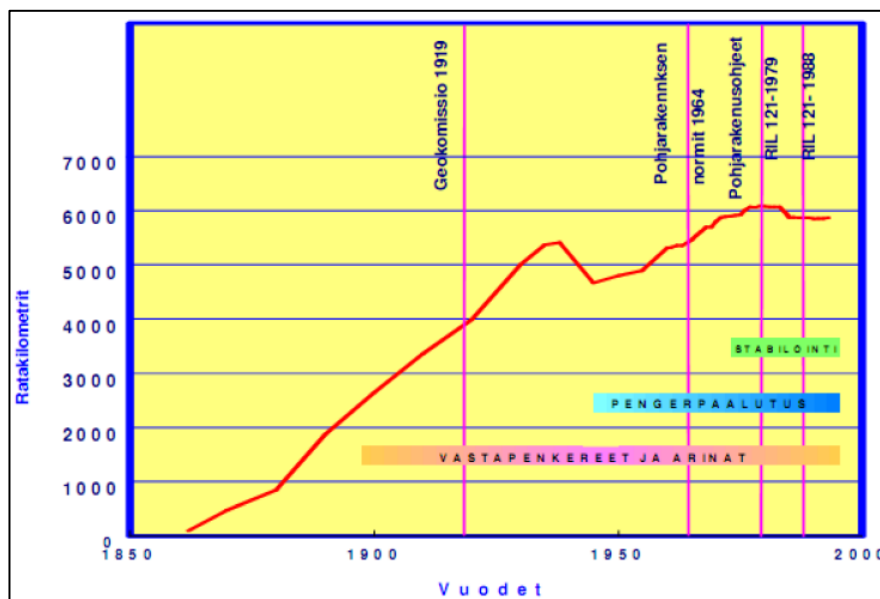
Tutkimus koostuu seuraavista elementeistä:

1. Johdanto
2. Teoria-osuus, joka luo pohjan tutkittaville kohteille
3. Inklinometrimittaukset yleisesti
4. Inklinometrimittausten käsittely ja siirtymien tulkinta
5. Tutkittavien kohteiden lajittelu sekä ulkomaisten mittausten tulkitseminen
6. Lisä-analyysia vaativien kohteiden esittely ja analysointi
7. Johtopäätökset

2 RATAPENKEREIDEN STABILITEETTIIN LIITTYVÄT ELEMENTIT

2.1 Yleistä

Kuvassa 2.1 on havainnollistettu johdannossa esiteltyä Suomen rataverkon kehittymistä ratakilometreinä. Samassa kuvassa on myös esitettyä osittain nykyisin käytössä olevia pohjanvahvistusmenetelmiä. Kaluston kehittyminen on nostanut 2-akselisilla vaunuilla akselipainot noin 8 tonnista nykyiseen noin 25-35 tonniin. Akselipainojen sekä junanopeuksien kehittyminen on aiheuttanut rataverkolle kasvavia vaatimuksia. (Rautateiden verkkoselostus 2015, Tuominen 2010)



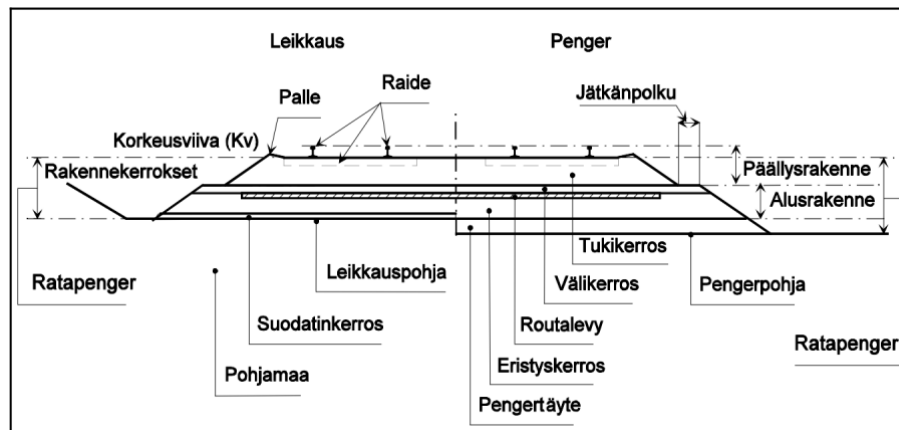
Kuva 2.1. Suomen rataverkon historia ennen vuotta 2000 (Nurmikolu 2011)

Ratapenkereillä mitoitustilanne syntyy siitä, kun juna pysähtyy pehmeikölle pidemmäksi aikaa. Tällöin ei ole kyse nopeasti ohi menevästä junakuormasta vaan pidempikestoisesta ulkoisesta kuormasta. Käytännössä tämän estäminen ei ole mahdollista ja tämän johdosta suunnittelu suoritetaan kohteissa junakuormilla. Pysähtynyt juna saattaa heikolla kohtaa mobilisoida maahan siirtymiä, jotka voivat aiheuttaa hallitsemattoman maan sortumisen. Muita riskitekijöitä ratapenkereillä ovat muun muassa rumpujen tukkeutumisesta, epätasaisista rataosuudesta sekä junanopeuksien ja akselipainojen korotuksesta johtuvat ongelmat. (Savikurki 2010, Rautateiden verkkoselostus 2015)

2.2 Ratarakenne

2.2.1 Uuden radan osat ja nimitykset

Uuden maanvaraisesti perustettavan radan geotekninen ja rakenteellinen mitoitus on suoritettava niin, että pohjamaassa syntyvät painumat ja siirtymät ovat radan turvallisen liikennöinnin kannalta riittävän pienet. Pohjamaan ja rakenteiden muodostaman kokonaisuuden täytyy myös olla riittävä sortumista vastaan. Muita huomioitavia seikkoja ovat muun muassa eroosio, murtuminen ja halkeilu. Kuvassa 2.2 on havainnollistettu uuden ratarakenteen elementtejä. Vanhoilla radoilla taas eri kerrosten erottaminen toisistaan voi olla tulkinnan varaista. (RATO3 2008)



Kuva 2.2. Ratarakenteen tyypillisiä nimityksiä (RATO11 2002)

2.2.2 Ratojen luokitus

Suomessa radat luokitellaan päällysrakenneluokkien mukaan A, B1, B2, C1, C2 ja D. Alusrakenteet luokitellaan vastaavasti 0...4. Päällysrakenneluokat asettavat maksimiarvot kaluston sallituille akselipainoille sekä akselipainoista johtuville nopeuksille. Suomen rataverkon luokittelu pohjautuu päällysrakenneluokkiin. Tämä johtuu historiallisista syistä, kun päällysrakenneluokat olivat vielä aikaisemmin jaoteltu rataluokiksi. Päällysrakenneluokat on esitettyä kuvassa 2.3. Alusrakenteella vastaavasti kontrolloidaan muun muassa routivuutta. Vanhoilla radoilla kyseisiä luokkia ei ole aikoinaan huomioitu. (Tuominen 2010)

Luokat		Päällysrakenne		
Liikennevirasto päällysrakenneluokka	Rataluokka SFS-EN 15528	Kiskot	Ratapölyt	Tukikerros
A	C4	K30, K33	puu	raidesora tai vastaava
B ₁	D4	K43, 54 E1, K60, 60 E1	puu	raidesora tai vastaava
B ₂	D4	K43, K60	puu, betoni	raidesepeli
C ₁	D4 / E4	54 E1	puu, betoni ennen 1987 valmistunut	raidesepeli
C ₂	D4 / E4	54 E1	betoni 1987 ja jälkeen valmistunut	raidesepeli
D	D4 / E4	60 E1	betoni	raidesepeli

Kuva 2.3. Päällysrakenneluokat (Tuominen 2010)

2.3 Junakuormat

Ratapenkereen stabiliteettilaskentaa varten hyödynnetään paikallaan olevan junan nauhakuormia sekä suunniteltavalle kohteelle ominaista sysäyskerrointa. Vastaavasti laskennan arvo saadaan kertomalla junakuorma yhdistelykertoimella sekä junakuorman osavarmuusluvulla. Kuitenkin uusilla radoilla kuormakaavio valitaan eri tavalla kuin vanhoilla radoilla ja tätä on havainnollistettu seuraavassa kappaleessa 2.3.1. Kuormista on käsitelty junan staattista ja dynaamista vaikutusta.

Akselipaino:

Akselipaino kuvaa liikkeessä olevan junakaluston yhden akselin molempien pyörien eli pyöräkerran raiteeseen aiheuttamaa staattista kuormaa. Kuorma rasittaa radan rakenteita ja alapuolista pohjamaata. Suurimmalla osalla rataverkkoa sallitaan akselipaino 225 kN. (Tuominen 2010, Rautateiden verkkoselostus 2015)

Metripaino:

Metripaino kuvaa veturin tai vaunun staattista painoa jaettuna sen metreissä ilmaistulla pituudella. Metripaino havainnollistaa yhden vaunun teliparien kokonaispainoa jaettuna vaunun pituudella. Rataverkolla sallittu kaluston metripaino on 80 kN/m. (Tuominen 2010, Rautateiden verkkoselostus 2015)

Nauhakuorma:

Nauhakuorma kuvaa tasaisesti jakautunutta viivakuormaa. Kuorma muodostuu kaluston akselien kuormituksesta. Nauhakuormaa hyödynnetään stabiliteettilaskennassa. (Tuominen 2010)

Teli ja telipaino:

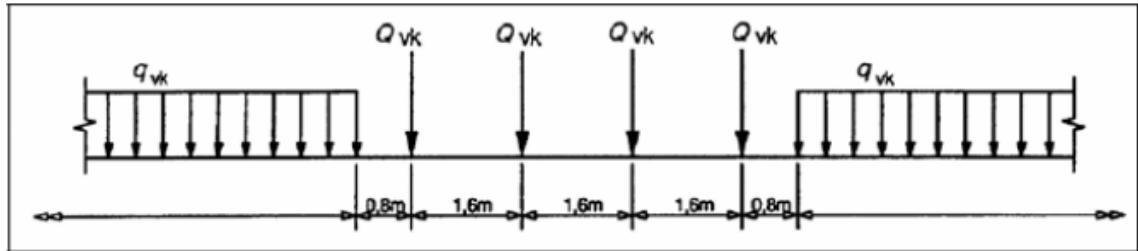
Telillä tarkoitetaan kahta tai useampaa akselia, jotka on rakennettu yhdeksi kokonaisuudeksi sekä liitetty joustavasti kalustoon. Telipaino taas on näiden pyöräkertojen yhteinen staattinen paino. (Tuominen 2010)

Nopeusrajoitukset:

Suomessa suurin käytössä oleva nopeus henkilöjunille on 220 km/h ja tavarajunille 120 km/h. (Rautateiden verkkoselostus 2015)

2.3.1 Mitoituskuormat vakavuuslaskennassa

Geoteknisessä mitoituksessa käytetään RATO:n osaa 3. Kuormituskaaviona käytetään EN-1991-2 mukaista LM71 mallia. Nauhakuorman arvot ovat kuitenkin ristiriidassa uuden SFS-EN 15528 –järjestelmän kanssa. Syynä tähän on Suomessa käytössä olevan kaluston akselien paikat, jotka sijaitsevat kauempana junan päädyistä. Kuvassa 2.4 on esitettyä eurokoodin mukainen kuormakaavio ja taulukossa 2.1 on esitettyä maksimi akselipainot ja nauhakuormat eri rataluokilla. (RATO3 2008)



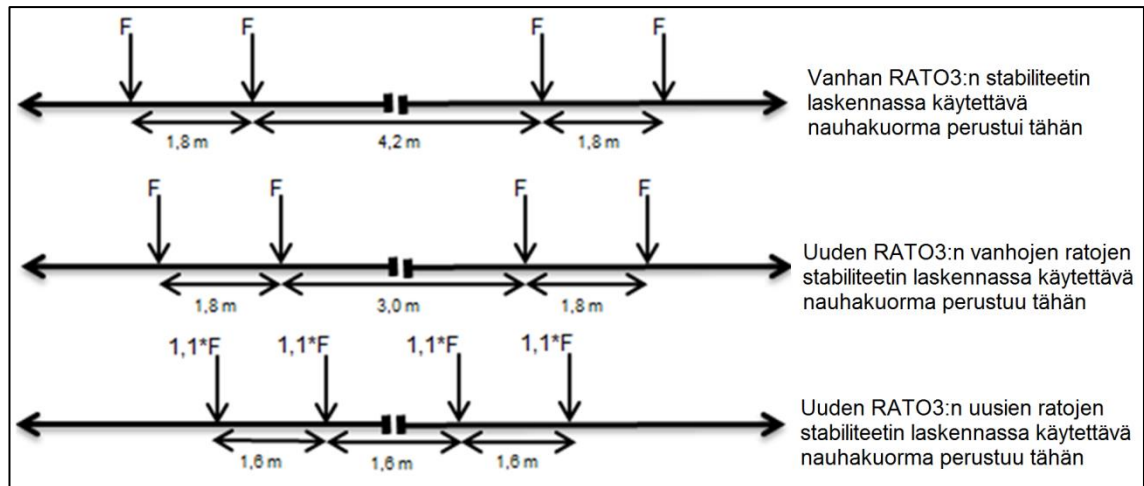
Kuva 2.4. Eurokoodin mukainen kuormakaavio LM71.

Uusilla radoilla suunnittelussa käytetään junakuormia standardin EN 1991-2:n mukaan ja kuvan 2.4 kuormakaaviota LM71. Vanhoilla radoilla käytetään vastaavasti standardin SFS-EN 15528:n mukaista käytäntöä. Tällä käytännöllä kuitenkin ylitetään RATO3:n sallimat kuormat.

Liikennöivä junakalusto pyritään tehokkuuden maksimoimiseksi mitoittamaan SFS-EN 15528 standardin mukaan. Tässä mitoitus menettelyssä akselit sijoitetaan lähemmäksi vaunujen päätyjä. Menettely parantaa vaunun teknisiä ominaisuuksia ja purkulaitteiden sijoittelua. Akselien uudelleen sijoittelu kuitenkin luo lisäkuormia ratarakenteille samoilla akselipainoilla. Tämä luokitus myös ottaa huomioon paremmin koko ratarakenteen kuten alusrakenteen ja pohjamaan. Stabiiliteettiin liittyvien junakuormakaavioiden yleistä kehittymistä on havainnollistettu kuvassa 2.5. (Tuominen 2010, RATO3 2008)

Taulukko 2.1. SFS-EN 15528:n mukaiset junakuormat (Heikkilä 2011)

SFS-EN 15528 rataluokka	Maksimi akselipaino [kN]		2D-stabiiliteetilaskennan nauhakuorma [kN/m]
	2-akselinen teli	3-akselinen teli	
C2	200	160	83
C3	200	160	
C4	200	160	
D2	225	170	98
D3	225	180	
D4	225	180	
D4xL	225	210	101
E4	250	195	
E5	250	200	



Kuva 2.5. Mitoittavien nauhakuormien muuttuminen määräysten muuttuessa. Ylhäältä alaspäin: Nykyisen kaluston telipari, SFS-EN 15528:n mukainen telipari ja LM71:n mukainen telipari. (Heikkilä 2011)

2.3.2 Kuormituksen dynaamisuus

Maanvaraisen penkereen mitoittava tilanne syntyy junan pysähtyessä. Olemassa oleville radoille mainitun tilanteen tapauksessa käytetään apuna sysäyskerrointa. Sysäyskerroin määrittyy liikennöintinopeudesta ja radan kunnossapidon tasosta. Sysäyskerroin laskeaan kaavojen 2.1 ja 2.2 avulla. Kunnossapitoluokat on jaettu kolmeen eri luokkaan: korkea, normaali ja alhainen. Näille luokille on myös määritelty laskentakaavoja varten omat kertoimet väliltä 0,15...0,25. Taulukossa 2.2 on esitetty kuntoluokat ja niiden kertoimet. (RATO3 2008)

$$\varphi_v = 1 + n \left(1 + 0,5 * \frac{V - 60}{K_i} \right), \quad \text{kun } V > 60 \quad (2.1)$$

$$\varphi_v = 1 + n, \quad \text{kun } V \leq 60 \quad (2.2)$$

missä

- φ_v on sysäyskerroin
- n on rataosan kunnossapitotasosta riippuva kerroin (0,15...0,25)
- V on junan liikennöintinopeus rataosalla [km/h]
- K_i on junatyypistä riippuva kerroin (80 tavara- ja 190 matkustajajunilla)

Taulukko 2.2. Kuntoluokat ja niiden kertoimet (RATO3, 2008)

Rataosan kuntoluokka	Kunnossapitotaso	Kerroin n
Korkea kunnossapitotaso	1A, 1AA	0,15
Normaali kunnossapitotaso	1–4	0,20
Alhainen kunnossapitotaso	5–6	0,25

Kuitenkin edellä huomioidun pysähtyneen junan tilanteella ei voida ennustaa nopeiden junien aikaansaamaa pengervärähtelyriskiä. Kun värähtelyriski on ilmeinen, arvioidaan riskiä dynaamisella analyysillä. Analyysiä käytetään, kun henkilöjunien nopeudet ovat suurempia kuin 160 km/h. Jos värähtelyriski on mahdollinen RATO:n ohjeiden mukaan esimerkiksi turve ja savi pehmeiköillä, täytyy tilannetta arvioida suorittamalla raiteen alapuoliselle maakerrokselle mittaus leikkausaallon etenemisestä. Leikkausaallon määrittäminen suoritetaan saville laboratoriotesteillä häiriintymättömästä maanäytteestä tai maastossa suoritettavilla mittauksilla. Savilla, joiden vesipitoisuus on välillä 30...120 %, voidaan leikkausaallon nopeutta kuitenkin arvioida kaavalla 2.3. (RATO3 2008)

$$v_s = 135 - 0,75 * w \quad (2.3)$$

missä

v_s on leikkausaallon nopeus [m/s]
 w on vesipitoisuus [%]

Hienorakeisissa pohjamaissa staattisen kuormituspulssin nopeus vaikuttaa suljetun tilan leikkauslujuuteen. Syklinen kuormitus mahdollistaa huokospaineiden kasvun ja samalla tehokkaat jännitykset pienenevät. Tämä aiheuttaa pohjamaahan suljetun tilan leikkausmuodonmuutoksia, mikä taas aiheuttaa penkereen painumista. Vakavuustarkastelun kannalta tärkeää on huomioida myös junan ohituksen jälkeinen tilanne, jossa kehittyneiden huokospaineiden jakautuminen voi edesauttaa murtomekanismin syntyä. Kuormituksen dynaamisuutta ei kuitenkaan huomioida stabiliteettilaskennassa ja mitoitus suoritetaan pysähtyneellä junakuormalla. (RHK A10/2006)

2.3.3 Junakalusto ja sen kehittyminen

Junan vetovoimakaluston, henkilövaunujen sekä tavaravaunujen akselipainojen ja nopeuksien kehittyminen asettaa myös ratarakenteelle lisää vaatimuksia. Vetolaitteen vaatima tila yhdessä käytössä olleen telirakenteen kanssa on estänyt akselien sijoittamisen vaunujen pätyihin. Tästä johtuen suomalaisissa ja eurooppalaisissa kalustoissa on ollut eroavaisuuksia. (Tuominen 2010)

Kalustotekniikka yhtenäistyy tulevaisuudessa eurooppalaisten ohjeiden suuntaiseksi. Myös rataverkolle sallitaan SFS-EN 15528 standardin mukainen kalusto. Uusien ratojen kohdalla tämä ei aiheuta ongelmaa suunnittelussa. Kasvavat junakuormat kuitenkin vaativat enemmän rakenteilta ja pohjamaalta, mikä asettaa myös stabiliteetille ja varmuudelle lisää vaatimuksia. Heikoilla pohjamailla joudutaan tällöin rajoittamaan uuden kaluston aiheuttamien kuormien vaikutusta. Tämä tapahtuu käytännössä sallittuja akselipainoja ja junanopeuksia rajoittamalla. (Tuominen 2010)

2.4 Tarkasteltavat pohjamaat

2.4.1 Pehmeiköt yleisesti

Pehmeiköt voidaan jakaa eloperäisiin ja plastisiin pohjamaihin. Eloperäiset pohjamaat sisältävät turpeet ja liejut, kun taas plastisiin pohjamaihin kuuluvat savimaalajit. Stabiili- teetin kannalta tärkeimpiä pehmeikköjen ominaisuuksia ovat muun muassa kokoonpu- ristuvuus ja muodonmuutosominaisuudet eli niin sanotut deformaatio-ominaisuudet, lujuusominaisuudet sekä hydrauliset ominaisuudet. Taulukossa 2.3 on jaoteltu maalajien luokitusominaisuuksia sekä geoteknisiä ominaisuuksia. (SGY 2012)

Taulukko 2.3. Tärkeimmät luokitusominaisuudet ja geotekniset ominaisuudet maalajille (SGY 2012)

Luokitusominaisuudet	Geotekniset ominaisuudet
Humuspitoisuus	Kokoonpuristuvuus ja muodonmuutosominaisuudet (Deformaatio-ominaisuudet)
Lajitepitoisuus	Lujuusominaisuudet
Raekokosuhte	Hydrauliset ominaisuudet
Rakeiden pyöristyneisyys ja muoto	Routivuus
Plastisuus	Lämpötekniset ominaisuudet
Tiiviyys	
Vesipitoisuus	
Sensitiivisyys	
Maatuneisuus	

Orgaanista ainesta sisältävät maalajit ovat turpeet, liejut ja humusmaat. Turvetta kuvataan maatuneisuusasteen avulla. Kuituinen turve on raakaturvetta, jota kutsutaan myös maatumattomaksi turpeeksi. Osittain kuituinen turve taas on keskinkertaisesti maatumutta ja amorfinen turve on täysin maatumutta. Liejulla ymmärretään maatumutta kasvi- tai eläinjätettä, kun taas humusmaalla tarkoitetaan multaa. GEO-luokituksessa eloperäisessä maalajissa on yli 20 p-% eloperäistä ainesta. Liejuilla vastaavasti humusta on yli 6 p-%. Savella vastaavasti rakeiden halkaisija on alle 2 µm sekä orgaanista aines- ta alle 2 p-%. Taulukossa 2.4 on esitetty asiaa tarkemmin. (SGY 2012)

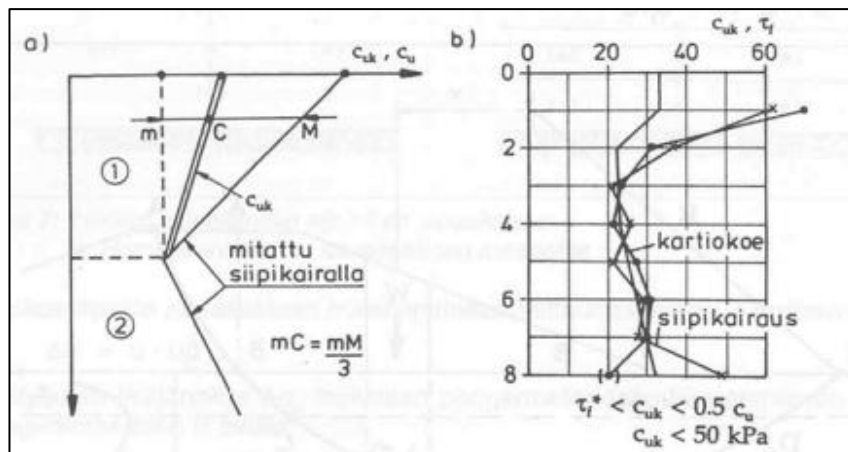
Taulukko 2.4. Orgaanisten maa-ainesten ISO- ja GEO-luokitus (SGY 2012)

ISO	ISO	GEO	GEO	GEO	GEO
Maa-aines	Humuspitoisuus	Maalaji	Humuspitoisuus	Nimitys	Lyhennys
Vähän humuspitoinen	2...6	Savi, Siltti	≤2	savi, siltti	Sa Si
Humus- pitoinen	6...20	Savi	>2...6	liejuinen savi	ljSa
Hyvin humus- pitoinen	>20	Siltti	>2...6	liejuinen siltti	ljSi
		Savi	>6...20	savinen lieju	saLj
		Siltti	>6...20	silttinen lieju	siLj
		lieju	>20	lieju	Lj

2.4.2 Kuivakuori

Heikosti kantavilla pehmeiköillä on usein kuivakuorikerros, joka vaikuttaa muun muassa stabiiliteetilaskelmiin. Kuivakuoren syntyperään vaikuttaa muun muassa hapettuminen, kuivuminen, jäädytys-sulatus sykli ja pohjaveden pinnan vaihtelut. Kuivakuorella on samanlaisia ominaisuuksia kuin ylikonsolidoituneella savella. Kuivakuori sijaitsee myös vakavuuslaskennan kannalta kriittisessä kohtaa rakennekerrosten ja pehmeän maan välissä. Paksulla kuivakuorikerroksella voi olla merkittävä vaikutus kokonaisvarmuuteen. (Leroueil et al. 1990)

Kun kerroksen paksuus on merkittävä, valitaan leikkauslujuuden arvo kuvien 2.6 ja 2.7 mukaisesti pohjatutkimuksista. Kuvissa vasemmalla leikkauslujuus on määritetty geometrisesti redusoimalla siipikairauksen leikkauslujuuden tuloksia. Vastaavasti oikean puoleisessa kuvassa redusointi on suoritettu valitsemalla leikkauslujuuden arvoksi enintään puolet kartiokokeen tai siipikairauksen arvosta, mutta kuitenkin maksimissaan 50 kPa. Kokemusperäisesti kuitenkin tiedetään, että siipikaira ja kartiokoe yliarvioivat leikkauslujuutta kuivakuorisaven kohdalla. Kuitenkin suunnittelussa yleisesti koko kuivakuorikerrokselle käytetään lujutena noin 30 kPa. (Geotekniseen suunnitteluun liittyviä perusteita)



Kuva 2.6. Leikkauslujuuden määrittystapoja kuivakuorelle (Geotekniseen suunnitteluun liittyviä perusteita)



Kuva 2.7. Paksun kuivakuoren lujuden määrittäminen laskelmissa (RHK B15 2005)

2.4.3 Turve

2.4.3.1 Yleistä

Geoteknisessä maalajiluokituksessa turpeeksi luokitellaan maa, joka on muodostunut kasvien ja kasviryhmien jätteistä. Suomessa metsämaan soistuminen on yleisin turpeen syntytyyppi. Turpeessa on yleensä vähintään 75 % orgaanista ainesta. Lieju taas syntyy huuhtoutumalla veden virtauksen mukana ja näin kerrostamalla aikojen kuluessa. Lieju on yleensä lujuudeltaan heikkoa sekä painuu voimakkaasti kuormitettuna sekä kutistuu kuivattuna huomattavasti. Turve ja lieju ovat molemmat eloperäisiä maalajeja. Kerrostuma jossa hallitsevin maalaji on turve, kutsutaan suoksi. (Gardemeister et al. 1974, Carlsten et al. 2014, Iivonen 2008)

Geoteknisessä maalajiluokituksessa turpeet jaetaan raakaturpeisiin, keskinkertaisesti maatumisiin turpeisiin ja maatumisiin turpeisiin. ISO-luokituksessa vastaavasti turpeet jaetaan seuraavasti: kuituinen eli maatumaton, osittain kuituinen eli osittain maaton ja amorfinen eli täysin maaton. Taulukossa 2.5 on esitettyä von Postin luokat. Yleisin maatumisuusluokitus on von Postin kehittämä maatumisasteisiin perustuva. Turve luokitellaan silmämääräisesti tarkastelemalla ja käsin tutkimalla näytettä. Maatumisuusaste osoittaa kuinka paljon kasviraakenteista on muuttunut tunnistamattomaksi amorfiseksi massaksi. (Gardemeister et al. 1974, Uotila 2013, SGY 2012)

Taulukko 2.5. Turpeen maatumisuuden määrittäminen. Kuva on muokattu tutkimukseen lähteestä (Iivonen 2008).

Maatumisaste ja määritteet (Von Post)		Havainnoinnin kriteerit
H1	Täysin maatumaton	Turvetta kädessä puristaessa tulee sormien välistä väriltöntä ja kirkasta vettä. Kasvinosat tunnistettavissa.
H2	Melkein maatumaton	Puristettaessa melkein kirkasta vettä. Kasvinosat lähes muuttumattomia.
H3	Hyvin heikosti maaton	Puristettaessa sameaa vettä. Jäännökset osittain tummuneita.
H4	Heikosti maaton	Puristettaessa hyvin sameaa vettä. Osa jäännöksistä amorfisia.
H5	Jonkin verran maaton	Puristettaessa turve hajoaa osittain puuromaiseksi massaksi ja neste on hyvin sameaa.
H6	Kohtalaisesti maaton	Kasvirakenne epäselvää. Puristettaessa noin kolmasosa aineesta menee sormien lävitse.
H7	Vahvanlaisesti maaton	Kasvirakenne hyvin epäselvästi näkyvää. Pääosin amorfista massaa. Jos vettä erottuu se on hyvin tummaa.
H8	Vahvasti maaton	Puristettaessa 2/3 turveaineesta kulkeutuu sormien lävitse.
H9	Melkein maaton	Kasvirakenteita vaikea erottaa. Puristettaessa lähes koko turve määrä kulkeutuu sormien lävitse.
H10	Täysin maaton	Kasvirakennetta ei voida erottaa. Puristettaessa koko turve määrä kulkeutuu sormien lävitse eikä vapaata vettä erkanne ollenkaan.

Turpeen kehittyminen on hidaskasvuinen prosessi, jossa noin yhden senttimetrin kerrokseen kuluu noin 10 vuotta aikaa. Turpeen kehittyminen vaatii kuitenkin jatkuvaa veden saantia. Turvekerroksen paksuus Suomessa vaihtelee noin yhden ja kolmen metrin välillä. Yli neljän metrin kerrospaksuus on melko harvinainen. (Carlsten et al. 2014, Uotila 2013)

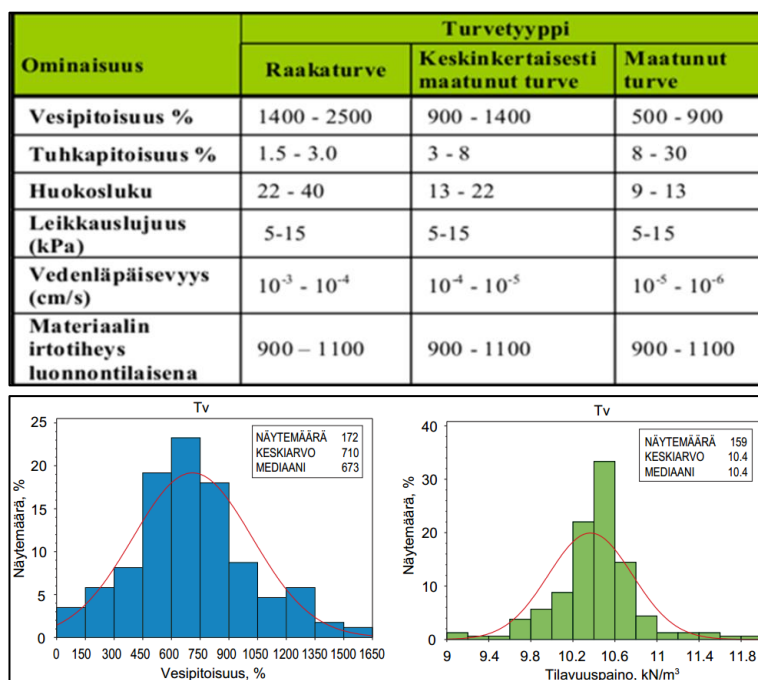
2.4.3.2 Geotekniset ominaisuudet

Turve erottuu muista maalajeista sen korkean vesipitoisuuden ja eloperäisen aineksen vuoksi. Vesipitoisuus pienenee turpeessa maatumisen edetessä. Vesipitoisuuksia verrataan näytteen kuivapainoihin. Raakaturpeilla vesipitoisuus voi olla noin 2500 p-%:n luokkaa, kun taas maatuneilla turpeilla noin 400 p-%:n luokkaa. (Carlsten et al. 2014, Uotila 2013)

Ratapenkereen alla kokoonpuristuneena turpeen vedenläpäisevyys pienenee huomattavasti. Pitkän ajan kuormituksen vaikutuksesta turpeen vedenläpäisevyys voi olla noin luokkaa 10^{-10} m/s. Vastaavasti luonnontilaisena vedenläpäisevyys turpeella voi olla noin 10^{-4} m/s, joka lähestyy jo hiekan tai moreenin arvoja. Maatuneen turpeen ominaisuudet vastaavat jonkin verran saven ominaisuuksia, mutta maatumattoman turpeen ominaisuudet taas vastaavasti kitkamaalajien ominaisuuksia. (Uotila 2013)

Vakavuuslaskennan parametreja varten tarvitaan tieto kuormista sekä vedenläpäisyominaisuuksista, jotta voidaan muodostaa kuva turpeen käyttäytymisestä. Vanhojen ratapenkereiden alla vedenläpäisevyyden lähestyessä saven vastaavia, voidaan myös laskennassa käyttää suljettua leikkauslujuutta. Kuvassa 2.8 on vielä esitettyä luonnontilaisille turpeille tyyppisiä ominaisuuksia. (Carlsten et al. 2014, Uotila 2013, RHK B15 2005)

Turpeen ominaisuudet saattavat myös vaihdella kerrostumien sisällä huomattavasti. Vaihtelua näkyy esimerkiksi maatumattoman ja täysin maatuneen turpeen välillä samassa maakerroksessa. Vaihtelua tapahtuu myös kerroksen pysty- että vaakasuunnassa. Ratapenger on myös usein painunut turpeen konsolidoituessa. Tällöin penkereen alla on usein ohuempi turvekerros kuin penkereen sivuilla. (Carlsten et al. 2014, RHK A 10/2006, Uotila 2013)



Kuva 2.8. Tyypillisiä turvemaan ominaisuuksia (Culloch et al. 2006, Ronkainen 2012)

2.4.3.3 Turpeen tutkimusmenetelmät ja geotekniset parametrit

Turvemaan eri tutkimusmenetelmiä ovat muiden pohjamaiden tapaan maastossa suoritettavat siipikairaukset, näytteenotto menetelmät, maatumus ja laboratoriokokeet. Seuraavassa on luokiteltuna kyseisiä menetelmiä stabiliteetin kannalta. (Uotila 2013)

Turpeen tutkimusmenetelmistä vakavuuslaskennan osalta:

- In-situ eli maastossa tehtävistä tutkimuksista käytetyin on siipikairaus. Siipikairauksen turvekerroksissa liittyy kuitenkin paljon epävarmuustekijöitä johtuen turpeen rakenteesta ja kokoonpuristuvuusominaisuuksista. Siipikairan kiertyminen ei aina aiheuta haluttua leikkausmurtumaa kuituisessa turpeessa. Tällöin arvioitu leikkauslujuuden arvo ei tuota todellista kuvaa eri syvyyksillä turvekerroksessa. Kuitenkin maatumisasteissa ja vähäkuituisissa turpeissa tulokset ovat luotettavimpia. (Uotila 2013)
- Laboratoriossa turpeesta määritetään aina turvetyyppi, maatumisaste ja vesipitoisuus (Uotila 2013). Turpeen leikkauslujuutta voidaan tulkita esimerkiksi rasialeikkauskokeessa ja suljetussa kolmiakiaalikoeksessa. Molemmissa kokeissa kuitenkin on paljon epävarmuutta ja suljetussa kolmiakiaalikoeksessa usein saadaan merkittävästi suurempia lujuuksia kuin vastaavissa rasialeikkauskokeissa. Rasialeikkauskokeessa ongelmana on turpeen leikkaantumisen pakottaminen vaakasuoraan kuituja vastaan ja tällöin murtoa ei saavuteta halutulla tavalla.

Turpeen suljettua leikkauslujuutta voidaan arvioida käyttämällä kokemukseräistä kaavaa 2.4. Kaavassa hyödynnetään Pjajvtshenkon maatumisprosentteina esittämiä arvoja. Pjajvtshenkon maatumisprosentit ja von Postin vastaavat turveluokat on esitettyinä taulukossa 2.7. (RHK B15 2005, Carlsten et al. 2014)

$$s_u = \frac{140}{w} * (100 - 1,1R) \quad (2.4)$$

missä

s_u on suljettu leikkauslujuus [kPa]

w on vesipitoisuus [%]

R on Pjajvtshenkon maatumisprosentti [%]

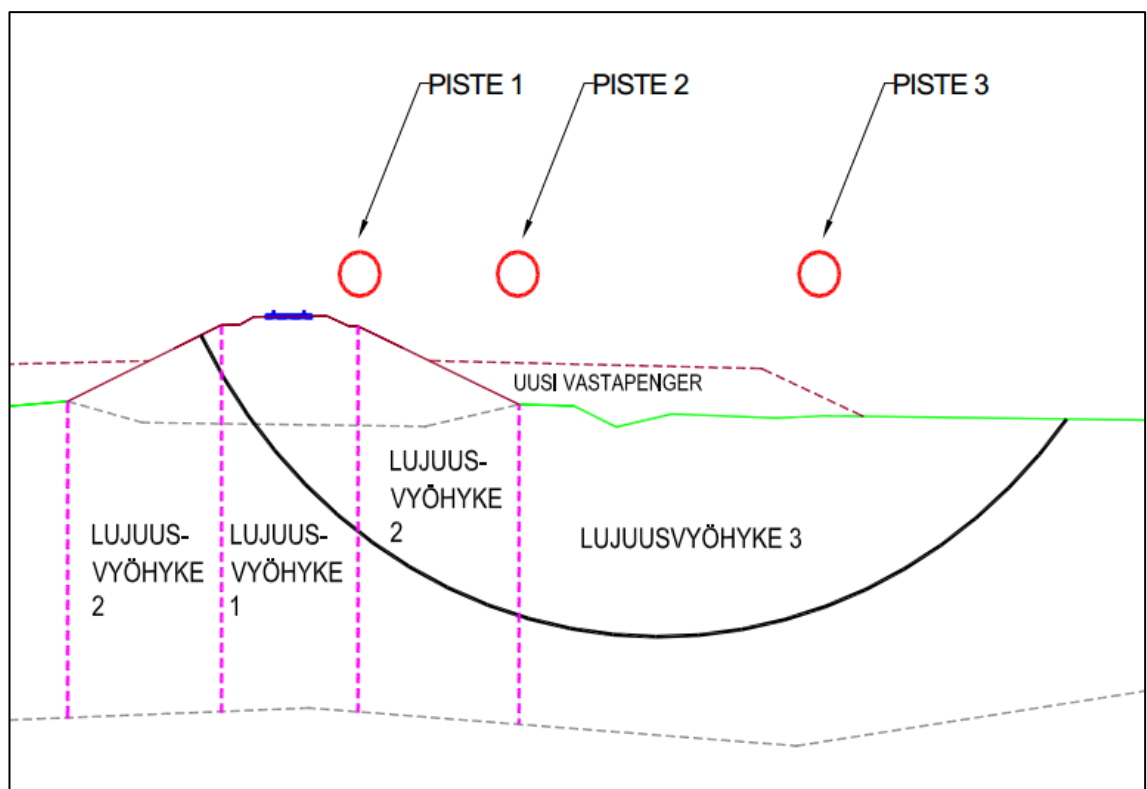
Taulukko 2.6. Von Postin ja Pjajvtshenkon maatumisasteen luokittelu (Uotila 2013)

H (von Post)	R %	Maatuneisuus
1	8	Raakaturve
2	16	
3	24	
4	32	Keskinkertaisesti maatonut turve
5	35	
6	38	
7	41	
8	48	Maatonut turve
9	54	
10	60	

2.4.3.4 Lujittuminen

Turpeella sekä savella voidaan havaita kuormituksesta tapahtuvaa lujittumista. Pitkän ajan tarkastelussa ja etenkin vanhojen penkereiden osalta turpeessa vesipitoisuudet laskevat sekä mahdolliset huokosvedenylipaineet jakautuvat. Toisaalta syklinen junakuormitus mahdollistaa huokosveden paineiden vaihtelua. Vastaavasti konsolidaatio ja sekundaaripainuma havainnollistuu parhaiten korkeimman pengerkorkeuden ja kuormituksen alla. (RHK A10/2006)

Suunnitteluohjeissa (RHK B15) lujittuminen otetaan huomioon jakamalla maakerrokset lujuusvyöhykkeisiin. Kuvassa 2.9 on havainnollistettu vyöhykejako käyttäessä suljettua leikkauslujuutta. Käytännössä lujuus maaperässä kasvaa myös pystysuunnassa alaspäin, mutta turpeella tämän vaikutus on marginaalisen pieni. Vyöhykkeessä 1 käytetään pisteen 1 lujuutta, vyöhykkeellä 2 vastaavasti pisteen 1 ja 2 keskiarvoa ja vyöhykkeellä 3 pisteen 3 lujuutta. Suljettua leikkauslujuutta voidaan arvioida tilanteissa esimerkiksi aiemmin esitettyjen tutkimusmenetelmien tai kaavojen perusteella. (RHK A10/2006, RHK B15 2005)



Kuva 2.9. Maaperän vyöhykkeisiin jako stabiliteettilaskennassa käytettäessä suljettua leikkauslujuutta (RHK B15 2005)

2.4.4 Savi

2.4.4.1 Yleistä

Savet ovat kosteina sitkeitä ja hyvin muovailtavia eli plastisia maalajeja. Savet sisältävät vähintään 30 p-% savilajitetta, savirakeiden halkaisija on alle 2 μm ja sisältää alle 2 p-% orgaanista ainesta. Tuoreen saven väri on yleensä harmaa ja vähän sinertävä. Väri voi myös olla punertava tai sulfidisavilla lähes musta. Kuivattuna savi kuitenkin kutistuu huomattavasti. Kuivan saven lujuusominaisuudet ovat myös huomattavasti suuremmat. Saven ominaisuuksia tutkitaan aikaisemman taulukon 2.3 mukaisesti. Saville tyypillinen ominaisuus on kuitenkin sen plastisuus. Saven plastisuutta voidaan arvioida kierityskooken avulla. Jos savilajitetta on 30...50 p-% on kyseessä laiha savi ja jos savilajitetta on enemmän kuin 50 p-% on kyseessä lihava savi. (SGY 2012, Gardemeister et al. 1974)

Liejuinen savi ja liejuinen siltti sisältävät luonnontilaisena humusta, rauta-alumiini-oksiedeja, sulfideja ja muita epäorgaanisia suoloja. Liejuisten savien väri vaihtelee ruskean, vihertävän harmaan ja mustan väliltä. Tuore liejuinen savi on joustavaa ja hyytelömäistä. Kuivuessaan se myös kutistuu ja kappaleen pinnalla on nähtävissä ruskeita läikkiä. (Gardemeister et al. 1974)

Savien lisäksi hienorakeisiin maalajeihin luokitellaan siltti, jota käsitellään vielä lyhyesti kappaleessa 2.4.5. Savipitoisilla silteillä kuitenkin on saveen verrattavia ominaisuuksia ja esimerkiksi ratapenkereillä saattaa aiheuttaa samoja ongelmia kuin savet. (Gardemeister et al. 1974)

2.4.4.2 Sensitiivisyys

Saven häiriintymisherkkyys eli sensitiivisyys käsittää luonnontilaisen maalajin suljetun leikkauslujuuden ja häirityn saman kerroksen suljetun leikkauslujuuden suhdetta. Sensitiivisyys jaetaan kolmeen luokkaan: vähän sensitiivinen, kohtalaisen sensitiivinen ja hyvin sensitiivinen. Käytännössä hyvin sensitiivisten savien kuljettaminen ja varastointi täysin häiriintymättömänä on hankalaa.

Sensitiivisillä savilla on myös suuri potentiaali huokosylipaineen kehittymiselle kuormituksen ja myötäämisen aikana sekä suuri kokoonpuristuvuus rajatulla jännitysalueella (Viravuori 2013). Vastaavasti tällöin koko liukupinnan muodostuminen on otollisempaa, koska siirtymien kehittyessä saven mobilisoitunut leikkauslujuus tarkasteltavan kohta ympärillä pienenee ja tällöin paikallisen liukupinnan muodostuminen tietyllä kohtaa pohjamaassa on ”helpompaa”.

2.4.4.3 Huokosvedenpaine ja suljettu tila

Avoimessa eli pitkänajan tarkastelussa huokosvesi pääsee poistumaan maaperästä. Tällöin savi kokoonpuristuu sen partikkelien tiivistyessä. Suljetussa tilassa vastaavasti kuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine ei ehdi poistua maaperästä, koska saven vedenläpäisevyys on todella pieni eli noin $10^{-8} \dots 10^{-11}$ m/s. Käytännössä tällöin vedellä kyllästyneen savikerroksen kokonaistilavuuden muutos ε_V on nolla. Tällöin kerroksessa alkaa syntyä merkittäviä huokosvedenylipaineita ja syntyvät muodonmuutokset ovat

leikkausmuodonmuutoksia. Huokosvedenylipainetta muodostuu kuormituslisäyksen, saven myötäämisen ja murtumisen yhteydessä. Huokosvedenpaineella on huomattava vaikutus maan tehokkaisiin jännityksiin ja tätä kautta myös lujuteen. (Leroueil et al. 1990, Alanen 2013)

Tilanteessa jolloin savi on täysin vedellä kyllästynyt voidaan vallitseva huokosvedenpaine tietyllä syvyydellä laskea kaavan 2.5 mukaisesti. Vastaavasti savessa tietyllä syvyydellä oleva tehokas kokonaisjännitys voidaan laskea kaavan 2.6 mukaan. Kaavassa 2.7 on vielä esitettyä huokospaineen muutos kuormituksen alaisena. (Leroueil et al. 1990, Geomekaniikka I)

$$u_0 = \gamma_w * z \quad (2.5)$$

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.6)$$

$$u = u_0 + \Delta u \quad (2.7)$$

missä

u, γ_w	ovat huokosvedenpaine [kPa] ja veden tilavuuspaino [kN/m^3]
z	on etäisyys maanpinnasta [m]
σ, σ'	ovat kokonaisjännitys [kPa] ja tehokas kokonaisjännitys [kPa]
u_0	on alkutilanteen huokospaine [kPa]
Δu	on huokosvedenylipaine [kPa]

Maan ja saven käyttäytymistä varten käytetään yleensä jännitysten osalta invariantteja p' ja q . Näiden käyttöä suositaan, koska ne ovat riippumattomia jännitysava-ruudesta. Invarianttien avulla pystytään havainnollistamaan muun muassa saven murto-tilaa. Kaavoissa 2.8 ja 2.9 on esitetty jännitysvariantit (Cambridgen yliopiston mukainen) sekä kaavassa 2.10 on esitetty tilavuuden muodonmuutoksia kuvastava ε_V . (Leroueil et al. 1990, Laaksonen 2013)

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = p - u \quad (2.8)$$

$$q' = \sigma_1 - \sigma_3 = q \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V} * 100 \% \quad (2.10)$$

missä

p', σ'_1	ovat tehokas hydrostaattinen ja pystysuuntainen jännitys [kPa]
σ'_2, σ'_3	ovat tehokkaita vaakasuuntaisia jännityksiä [kPa]
p, q	ovat hydrostaattinen ja deviatorinen jännitys [kPa]
ε_V, V	ovat tilavuuden muodonmuutos [%] ja tilavuus [m^3]

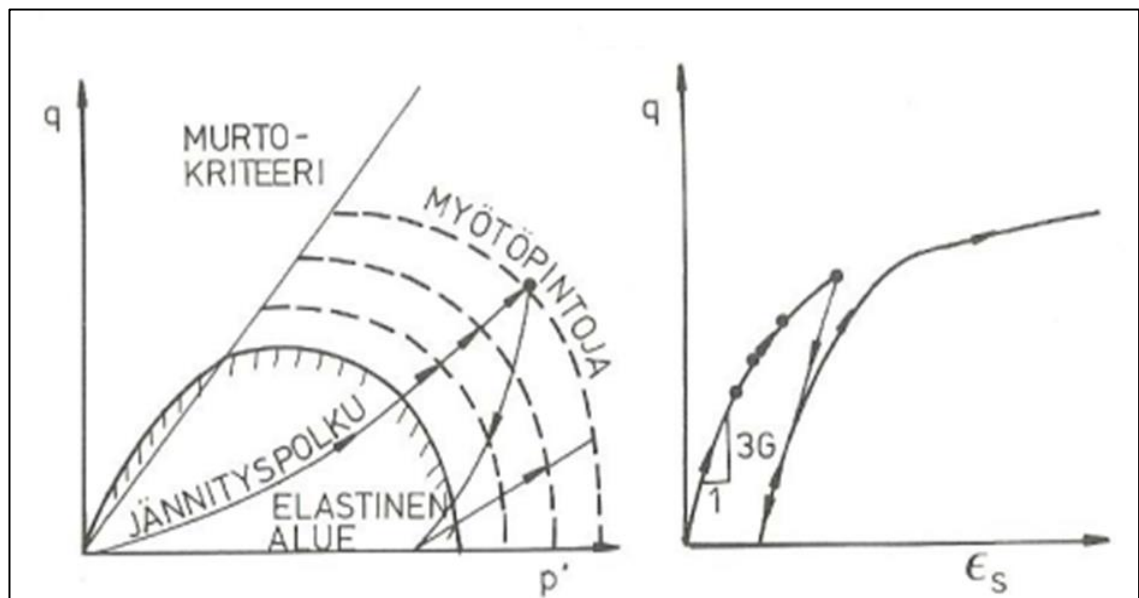
2.4.4.4 Kimmoplastisuus

Kimmoplastisissa malleissa materiaali käyttäytyy kimmoisesti, kunnes se saavuttaa myötörajan. Myötöpinnan sisällä tapahtuvat muutokset ovat palautuvia muodonmuutoksia ja jännitystilän kasvaessa myötörajan yli alkaa materiaalissa tapahtua palautumattomia muodonmuutoksia. Plastiset muodonmuutokset voidaan jakaa kimmoiseen ja plastiiseen osaan kaavan 2.11 mukaan. Plastisia muodonmuutoksia mallinnetaan savilla erilaisten myötöpintojen avulla. Myötöpintaa ja muodonmuutosten syntymistä savessa on havainnollistettu kuvassa 2.10. Tilavuuden pienentyessä tapahtuu myötöpinnan laajentumista. Muodonmuutos kuvaajaa voidaan verrata esimerkiksi saven käyttäytymiseen suljetussa sekä avoimessa kolmiakselikokeessa. (Geomekaniikka II, Salokangas 2008, Wood 1990)

$$\varepsilon = \varepsilon_k + \varepsilon_p \quad (2.11)$$

missä

- ε on kokonaismuodonmuutos
 ε_k on kimmainen muodonmuutos
 ε_p on plastinen muodonmuutos



Kuva 2.10. Maamateriaalin myötöpinnan ja elastisen alueen muuttuminen kuormituksen kasvaessa. Vasemmalla jännityspolun kehittyminen ja oikealla kehittyvät muodonmuutokset (Geomekaniikka II)

2.4.4.5 Mohr-Coulombin murtoehto

Todellisuudessa maan lujuuskäyttäytyminen on erittäin kompleksista. Kokeellisesti voidaan kuitenkin todeta, että maan lujuus kasvaa lineaarisesti suhteessa leikkaustasoon kohdistuvaan tehokkaaseen normaalijännitykseen. Kyseistä murtokriteeriä kutsutaan Mohr-Coulombin murtoehdoksi. Kaavassa 2.12 on esitettyä kyseinen murtoehto tehokkailla parametreilla. Kun Mohr-Coulombin ympyrät koskettavat murtokriteerin suoraa, tällöin mallin mukaan maassa tapahtuu murtuminen. Kuvassa 2.11 on vastaavasti esitetty murtoehto ja Mohrin ympyrä, tehokkailla parametreilla tarkastellessa vasemmallä sekä suljetulla leikkauslujuudella oikealla. (Wood 1990, Lehtonen et al. 2011)

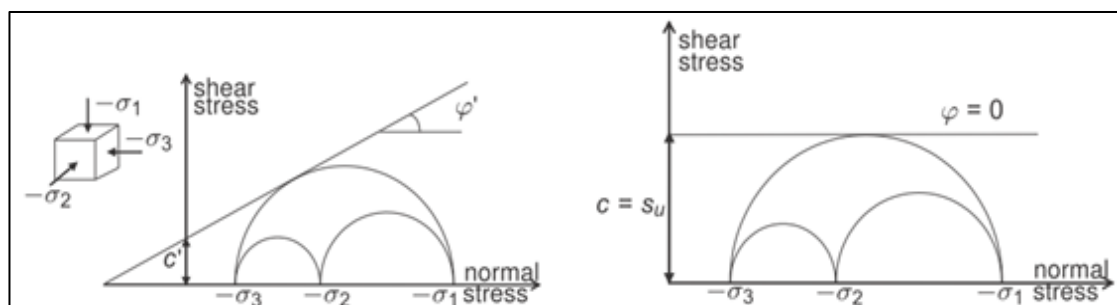
Tehokkailla jännitysparametreilla laskettaessa tarvitaan tieto kehittyvästä huokosvedenpaineesta. Suljetussa tilan lujuutta voidaan kuitenkin riittävällä tarkkuudella mallintaa kaavan 2.13 mukaan. Kyseinen kaava perustuu Trescan murtokriteeriin teoriaan. Suljettua tilan leikkauslujuutta on myös geoteknisessä mitoituksessa yksinkertaisempi käsitellä, koska tällöin ei tarvitse arvioida huokosvedenpaineen kehittymistä. Redusoidun siipikairaustulosten voidaan kuitenkin ajatella kuvaavan riittävän hyvin suljettua leikkauslujuutta. Käytännössä kuitenkin kairausten suljetut leikkauslujuudet olisi hyvä todentaa aikaisempaan kokemukseen perustuen tai laboratoriokokeilla. (Lehtonen et al. 2011, Wood 1990)

$$\tau_f = c' + \sigma' * \tan\varphi' \quad (2.12)$$

$$s_u = \tau_f \geq \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_{mob} \quad (2.13)$$

missä

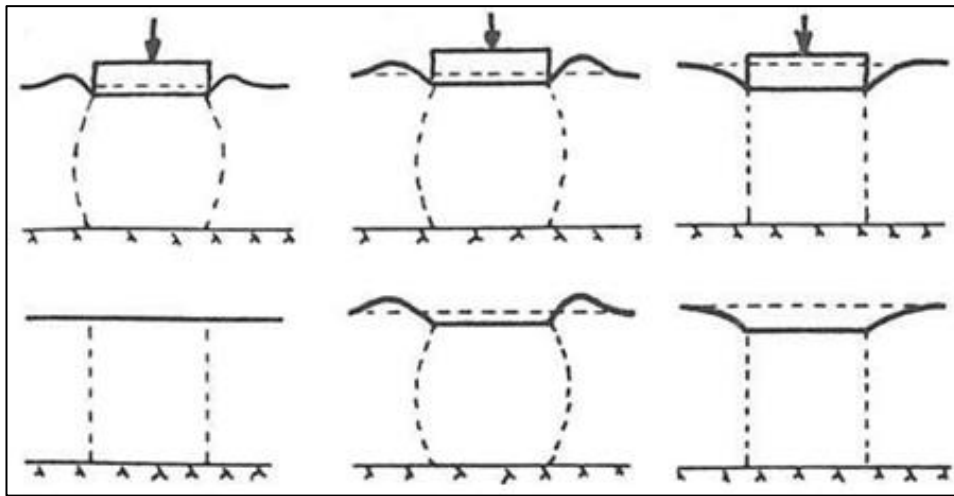
τ_f	on maan leikkauslujuus
τ_{mob}	on maan mobilisoitunut leikkausjännitys
c'	on tehokas koheesio
σ'	on tehokas normaalijännitys leikkaustasossa
φ'	on tehokas kitkakulma
s_u	on suljettu leikkauslujuus
σ_1, σ_3	ovat pääjännityksiä



Kuva 2.11. Maan pääjännitykset ja lujuusparametrit murtotilanteessa (Plaxis Manuals, Material Models 2012)

2.4.4.6 Painuminen

Konsolidaatiossa saveen kertynyt huokosvedenylipaine jakaantuu hiljalleen laajemmalle alueelle. Tällöin maakerroksessa syntyy sekä painumaa että sivusiirtymää. Painuminen voidaan jakaa alkupainumaan, primaaripainumaan, sekundaaripainumaan ja leikkausjännitysten johdosta hitaasti tapahtuvaan painumaan. Painumalajit tapahtuvat osittain samanaikaisesti, joten niiden erottaminen toisistaan ei ole aina yksiselitteistä. Kokoonpuristuvuusominaisuuksia ja näissä syntyviä painumia sekä muodonmuutoksia on havainnollistettu kuvassa 2.12. Kuvassa kuormituksen alla syntyy erityyppisiä pysyviä sekä palautuvia muodonmuutoksia. (Lehtonen et al. 2011, Rantamäki et al. 1979)



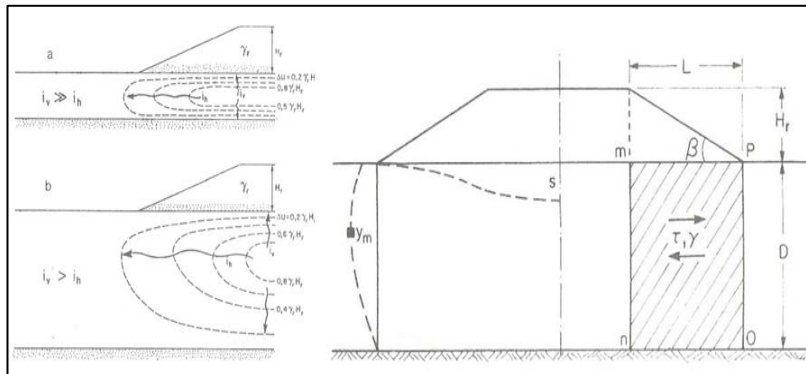
Kuva 2.12. Maakerroksen kokoonpuristumisen lajit. Vasemmalla kimmainen, keskellä plastinen ja oikealla konsolidaatio kokoonpuristuminen. (Rantamäki et al. 1979)

Savikerroksessa kuormitus vaikuttaa aluksi maarakeita ympäröivään huokosveeseen, minkä jälkeen huokosveden paineen jakautuessa kuormitus hiljalleen siirtyy itse maapartikkeleihin. Itse huokosveden paineen jakautumista kutsutaan konsolidaatioksi ja maapartikkeleiden painumaa primaarisiksi konsolidaatiopainumaksi. Konsolidaatio jatkuu kunnes kaikki huokosvedenylipaine on tasaantunut. Huokosvedenpaineiden tasaannuttua voidaan myös hiipuminen havaita. Sekundaaripainumaa kuitenkin tapahtuu jatkuvasti, mutta tässä tilanteessa se on selkeämmin erotettavissa konsolidaatiopainumasta. Tällöin hiipumisessa tapahtuu maarakeiden huokostilan hidasta tiivistymistä ja maarakeiden uudelleen asettautumista. (Korhonen K-H et al. 1993, Rantamäki et al. 1979)

Penkereen rakentaminen tai kuormituksen lisäys aiheuttaa huokosvedenylipainetta, kuten aiemmin on mainittu. Konsolidaatiossa huokospaineiden purkautuessa syntyy tehokkaiden jännitysten kasvamista, mikä aiheuttaa saven deformaatioita. Saven anisotropiasta, penkereen korkeudesta ja -ominaisuuksista johtuen vaakasuuntainen vedenläpäisevyys on yleensä suurempi kuin pystysuuntainen läpäisevyys. Tällöin vaakasuuntainen veden virtaus on dominoivampi. Tämä kaikki vaikuttaa itse konsolidaatio-

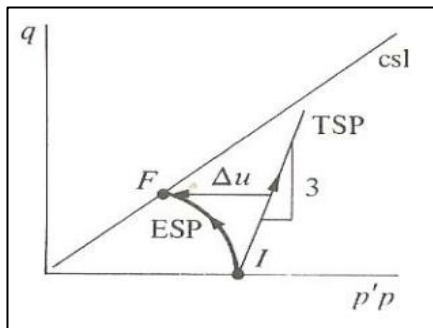
prosessiin, sivusiirtymiin, virumaan, saven lujuusparametreihin eri kohdissa kerrosta ja tätä myötä vakavuuteen. (Leroueil et al. 1990)

Tällöin käytännössä 1-dimensioiset painuman laskentamenetelmät, kuten Terzaghin- ja Janbun–menetelmät, yksinkertaistavat tilanteita, mutta antavat usein riittävän todenmukaisia arvioita painumista. Kuvassa 2.13 vasemmalla on havainnollistettu kuormituksen vaikutusta huokospaineisiin ja vedenvirtaukseen kahdessa erityyppisessä tapauksessa. Ylemmässä kuvassa vertikaalinen veden virtaus on huomattavasti dominoivampi geometriasta johtuen. Oikealla on puolestaan esitettyä pitkäaikaisessa tilanteessa syntyvien painumien ja sivusiirtymisen yhteys. (Leroueil et al. 1990)



Kuva 2.13. Vasemmalla on huokospaineiden jakautuminen kahdessa eri maaperägeometriassa sekä oikealla painuman ja sivusiirtymisen yhteys. (Leroueil et al. 1990)

Konsolidoitumistila voidaan jakaa yleisesti alikonsolidoituneeseen, normaalisti konsolidoituneeseen ja ylikonsolidoituneeseen. Maanäytteen konsolidaatiokuormitusta ja näytteenotto­syvyydessä vallitsevia tehokkaita jännityksiä vertaillaan, kun maanäytteen kuormitus alittaa esikuormituksen, on kyse alikonsolidoituneesta savesta (käytännössä harvoin). Jos kuormitukset ovat yhtä suuret, on kyse normaalikonsolidoituneesta savesta. Vastaavasti kun maanäytteen esikonsolidaatiojännitys ylittää esikuormituksen on kyse ylikonsolidoituneesta savesta. Kuvassa 2.14 on esitettyä normaalikonsolidoituneen saven käyttäytymistä kolmiak­siaaliko­keessa. (Rantamäki et al. 1979)



Kuva 2.14. Tavanomaisen kolmiak­siaaliko­keen käyttäytyminen normaalikonsolidoituneella savella suljetussa tilassa. Kuvassa huokospaineen muutos on tehokkaan jännityspolun ja kokonaisjännityspolun välinen ”polku”. Tilanne kuvastaa hyvin suljetun tilan huokospaineiden muutosta. (Wood 1990)

2.4.4.7 Lujittuminen

Aikaisemmin kappaleessa 2.4.3.4 käsiteltiin lujittumista turpeen osalta. Kyseiset menetelmät soveltuvat myös saven lujittumisen analysointiin käyttäessä suljettua leikkauslujuutta. Normaalikonsolidoituneella savella suljettu leikkauslujuus kasvaa ajan kuluessa kuormitettuna. Käytännössä tämä johtuu kasvaneista tehokkaista jännityksistä huokosvedenpaineiden jakautuessa pohjamaahan. Suomalaisilla savilla suljetun leikkauslujuuden kasvu on yleensä noin 1,0...1,5 kPa metriä kohden alaspäin savikerroksessa.. (Länsvaara 2011, RHK B15 2005)

2.4.4.8 Anisotropia ja destruktuuraatio

Anisotropia otaksutaan tärkeäksi saven lujuuden ominaisuudeksi. Anisotrooppisten vaikutusten huomiotta jättäminen aiheuttaa epätarkkoja laskentoja. Anisotropialle on esitetty useita erilaisia sofistikoituneita malleja. Osa malleista perustuu saven elastoplastiseen käyttäytymiseen ja osa taas myötöpinnan plastisuuteen. Plastista anisotropiaa vastaavasti voidaan mallintaa esimerkiksi S-CLAY1S ja NGI-ADP tyyppisillä materiaalmalleilla. Kyseisissä malleissa saven käyttäytymistä eri suunnissa arvioidaan esimerkiksi puristus- ja vetokokeessa. (Grimstad 2010)

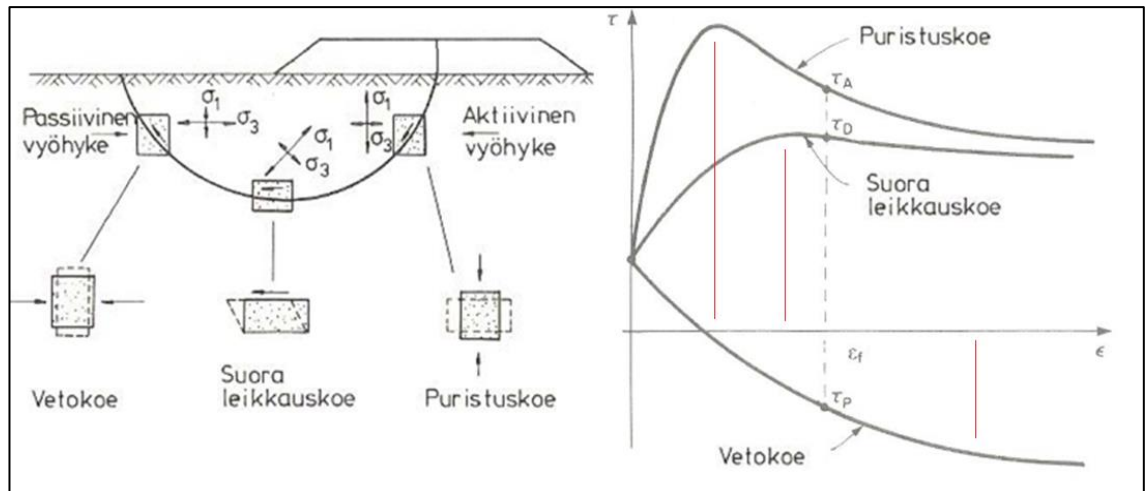
Luonnonmukaiset savet koostuvat maapartikkeleista ja näiden välisistä huokosista. Tällöin saven rakenteen muodostaa suuntautuminen ja sitoutuminen. Kahdella samanlaisella savella voi olla samantyyppinen rakenne, mutta silti ominaisuudet voivat olla erilaisia johtuen esimerkiksi vaikuttavista voimista maapartikkelien välillä. Kuormituksessa vastaavasti savimaalajia yhdessä pitävä struktuuri hajoaa progressiivisesti tilanteessa jota kutsutaan ”destruktuuraatioksi”. Anisotropiaa on havainnollistettu kuvassa 2.15 sekä saven destruktuuraation vaikutusta kuvassa 2.16, missä huippujännityksen jälkeinen käyttäytyminen on havainnollistettu. (Grimstad 2010)

2.4.4.9 NGI-ADP -menetelmä

ADP-menetelmässä maapohjan lujuus oletetaan anisotrooppiseksi ja liukupinta jaetaan murtomekanismin mukaisiin vyöhykkeisiin. Kuvassa 2.15 on vasemmalla vyöhykkeisiin perustuva jako sekä oikealla eri kohdista liukupinnalla valittujen pisteiden jännitysmuodonmuutos -kuvaajat. Kuvasta huomataan, että pienemmillä venymän arvoilla saavutetaan murto aktiivivyöhykkeellä ensimmäisenä. Tällöin passiivi puolella olisi vielä lujuuskapasiteettia käytettävissä, mutta käytännössä sortuminen on jo saavutettu kuvan 2.15 kaltaisella myötöpehmenevällä savella. (RHK A/10 2006)

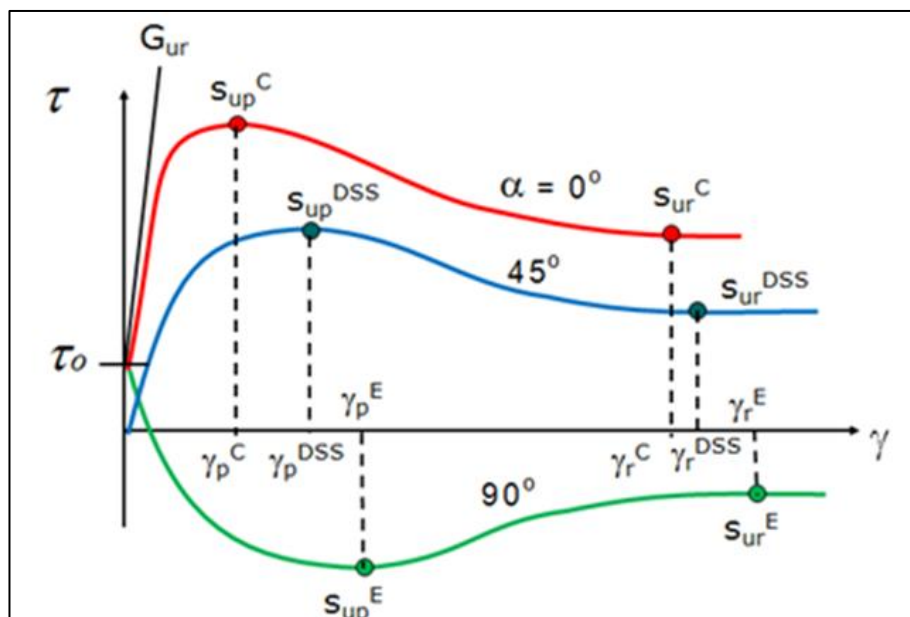
Murtomekanismien lujuuden määrittämisessä käytettäviä laboratoriokokeita ovat seuraavat: (RHK A/10 2006)

- Puristuskoe (aktiivinen vyöhyke), kolmiakiaaliko
- Suora leikkauskoe (DSS)
- Vetokoe (passiivinen vyöhyke), kolmiakiaaliko



Kuva 2.15. Vasemmalla on esitetty murtomekanismit eri liukupinnan osilla sekä oikealla vastaavien murtomekanismien suhde venymään. Murtuminen tapahtuu eri vyöhykeissä eri jännityksillä. (Geomekaniikka II 1990, Lerouiel et al. 1990)

Kuvassa 2.16 on tarkemmin havainnollistettu, miten maan murtuminen eri murtomekanismeilla tapahtuu eri leikkausmuodonmuutoksilla. Tällöin myös suljetun leikkauslujuuden valinnassa pitäisi taten käyttää liukupinnan eri osilla eri tavoin määritettyjä suljettuja leikkauslujuuksia. Kuvassa 2.16 on myös esitetty parametreja, joita tarvitaan esimerkiksi Plaxiksen ADPsoft:lla suoritettavissa elementtilaskelmissa. Suljettuun leikkauslujuuteen näiden seikkojen lisäksi vaikuttavat myös vallitsevat tehokkaat jännitykset, koetapa, kuormitustapa, kuormitusnopeus sekä jännitysmuodonmuutoksen kehittyminen. Edellisten lisäksi erittäin tärkeänä tekijänä kuitenkin on näytteen laatu ja sen häiriintyneisyys. (Länsivaara 2011, RHK A10/2006)



Kuva 2.16. Suljetun leikkauslujuuden maksimiarvot eri laboratoriokokeissa ja niitä seuraava ”pehmeneminen”. Tällainen saven käyttäytyminen on mahdollista mallintaa esimerkiksi Plaxiksen ADPsoft –mallilla. (Lacasse 2013)

2.4.4.10 Saven tutkimusmenetelmistä

Saven tärkeimpiä tutkimusmenetelmiä stabiliteettitarkastelun kannalta on esitelty seuraavassa. Usein suunnittelun sekä tämän tutkimuksen pohjatutkimukset perustuvat pääosin alla esitettyihin menetelmiin. Näiden tutkimusmenetelmien pohjana yleensä suoritetaan kairauksia, joilla selvitetään maan kerrospaksuudet sekä kovan pohjan sijainti.

Siipikairaus:

Siipikairaus on Suomessa yleisesti käytetty kentällä suoritettava maan suljetun leikkauslujuuden määrittäminen menetelmä. Siipikairauksessa halutussa syvyydessä aletaan siipeä pyörittää akselinsa ympäri. Mitattu leikkauslujuuden arvo saadaan vääntömomentin ja siivekkeen dimensioiden avulla. Siipikairauksen leikkauslujuuksia joudutaan redusoi- maan, koska mitattuun arvoon vaikuttaa esimerkiksi maan ansiotrooppisuus, siiven pyö- rimisnopeus ja murtumistavan progressiivisuus. Redusointi voidaan suorittaa saven hie- nousluvun avulla empiirisen kaavan 2.14 ja 2.15 mukaan (Salokangas 2008, RHK B15 2005, Rantamäki et al. 1979). Empiirinen kaava perustuu sortuneista kohteista ympyrä- liukupinnalla takaisinlaskettuihin arvoihin. Redusointi ei siis ole suoraan validi nykyisin paljon käytettävien vapaamuotoisten liukupintojen kanssa.

$$s_u = \mu * s_{u,mitattu} \quad (2.14)$$

$$\mu = \frac{1,5}{1 + \frac{F}{100}} \quad (2.15)$$

missä

s_u	on suljettu leikkauslujuus
μ	on reduktiokerroin
$s_{u,mitattu}$	on siipikairalla mitattu suljetun leikkauslujuuden arvo
F	on hienousluku

CPTU:

CPTU –kairauksessa puristetaan kairatankoa ja sen päässä olevaa kartiokärkeä maahan. Kärkeen kohdistuvia voimia mitataan jännitys-venymäliuska -antureilla. Kairauksen aikana rekisteröidään kärkivastus, vaippakitka, huokospaine ja kairausvyvyys. Maapa- rametrien tulkinta tehdään yleensä sekä CPTU –kairauksen että laboratoriokokeiden perusteella. Kairauksella voidaan arvioida kohtuullisen luotettavasti suljettua leikkaus- lujutta. Muita vähemmän luotettavia arviointeja voidaan suorittaa tehokkaasta kitka- kulmasta ja suhteellisesta tiivyydestä. (SGY 2001)

Ödometri:

Ödometrikokeella tutkitaan pääasiassa saven kokoonpuristumisominaisuuksia. Koe suoritetaan asettamalla näyte ödometirenkaaseen, jolla estetään sivusuuntainen muodonmuutos. Tällöin pystysuoraa kuormitusta lisättäessä tapahtuu vain vertikaalisia muodonmuutoksia. Ödometrikoe tehdään joko portaittaiseen tai portaattoman kuormituslisäykseen perustuvia koemenetelmiä käyttäen. Ödometrikokeen avulla voidaan varmistaa myös, että kolmiakσιαalikokeet suoritetaan oikealla jännitysalueella. Konsolidaatiojännityksen perusteella pystytään myös arvioimaan suljettua leikkauslujuutta, joka usein normaalikonsolidoituneella savella on noin 0,22...0,27 esikonsolidaatiojännityksestä. (RHK B15 2005)

Kolmiakσιαalikoe:

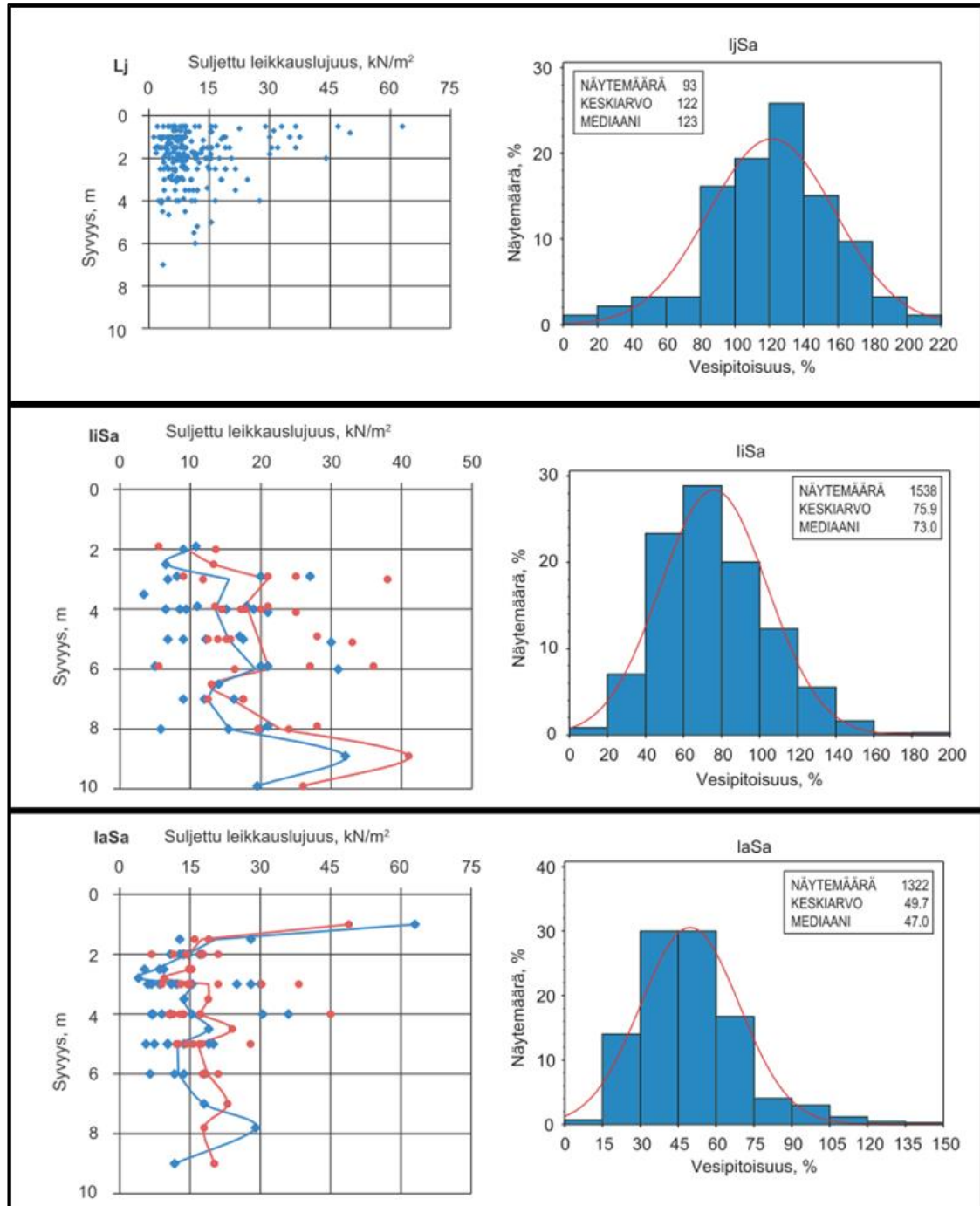
Kolmiakσιαalikokeella saadaan määritettyä tehokkaat lujuusparametrit ja täten voidaan tulkita suljettua leikkauslujuutta. Suljettua leikkauslujuutta arvioidessa koe täytyy kuitenkin tehdä oikealla jännitysalueella. Kolmiakσιαalikokeessa ensin valmistellaan näyte, kyllästetään se konsolidoimalla ja annetaan näytteen asettua haluttuun alkujännitystilaan. Tämän jälkeen suoritetaan leikkaaminen. Koe voidaan suorittaa usealla eri tavalla sekä puristus-, että vetokokeena. Kokeen konsolidointi voidaan tarvittaessa suorittaa joko anisotrooppisesti tai isotrooppisesti. Saven osalta kokeet tehdään pääosin suljettuihin kokeihin häiriintymättömille näytteille. Kitkakulma ja koheesio määritetään yleisesti kolmella eri sellipaineella suoritettavilla kokeilla. (RHK B15 2005)

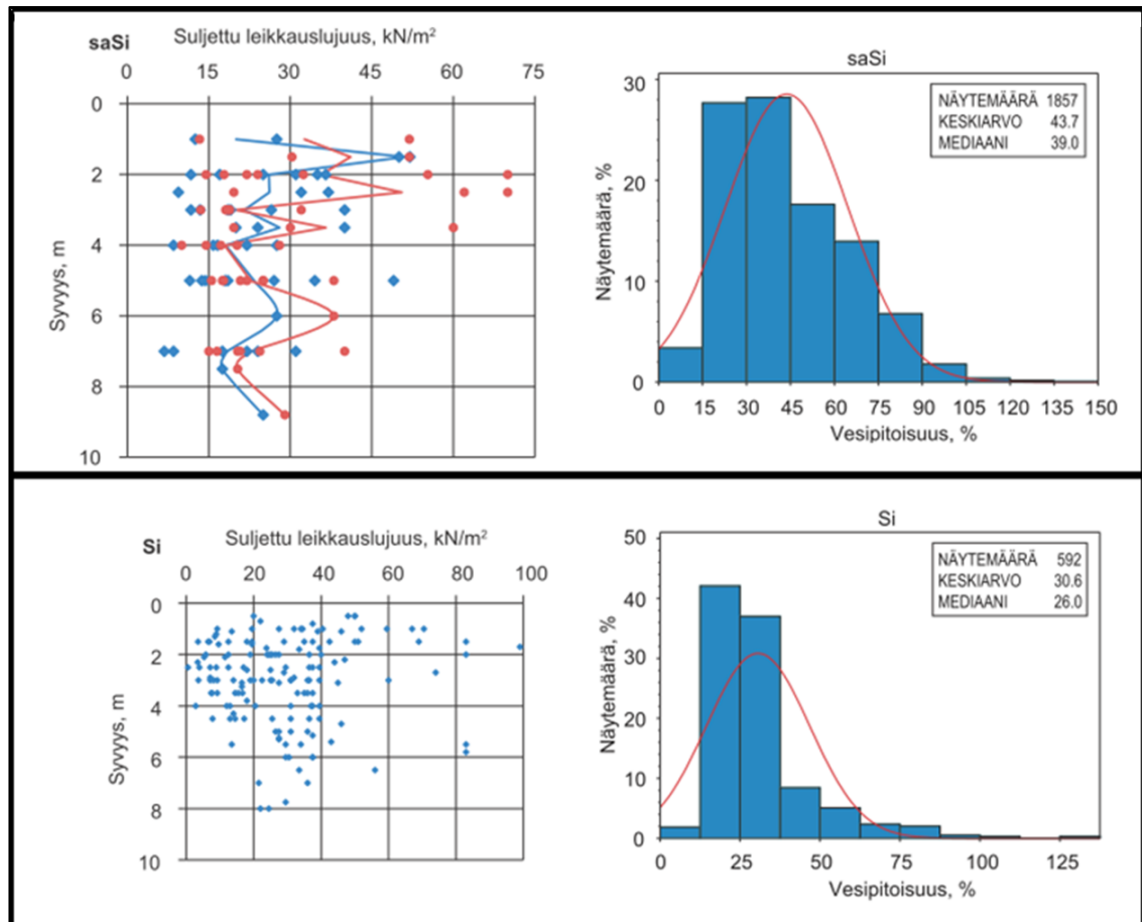
Kartiokoe:

Kartiokokeella voidaan myös määrittää saven suljettu leikkauslujuus. Kartiokoe suoritetaan häiriintymättömälle näytteelle. Kartiokokeessa kartion kärki asetetaan koskettamaan näytteen pintaa ja pudotetaan kartiota näytteeseen. Kartiokoe voidaan myös tehdä vastaavasti häiritylle näytteelle. Kartiokokeella voidaan myös määrittää hienousluku ja sensitiivisyys.

2.4.5 Silttipitoiset ja liejuiset savet sekä siltti

Savipitoisuuksia käsiteltiin jo hieman aiemmin kappaleessa 2.4.4.1, mutta tässä kappaleessa keskitytään vielä lisää liejuisiin saviin, silttipitoisiin saviin sekä siltteihin. Seuraavassa kuvassa 2.17 on esitetty vesipitoisuuden ja suljetun leikkauslujuuden vaihteluvälejä eri maalajeille.





Kuva 2.17. Erityyppisten savien ja silttien vesipitoisuuksien sekä suljettujen leikkauslujuuksien vertailua (Ronkainen 2012)

Ylimpänä kuvassa 2.17 on esiteltyä liejun ominaisuuksia. Yleensä liejuisensa- ven vesipitoisuus kasvaa selvästi muihin saviin verrattuna. Toinen huomattava tekijä on, että lieju on yleensä lähellä maanpintaa, sillä on suurehko vesipitoisuus ja mahdollisesti heikompi leikkauslujuus.

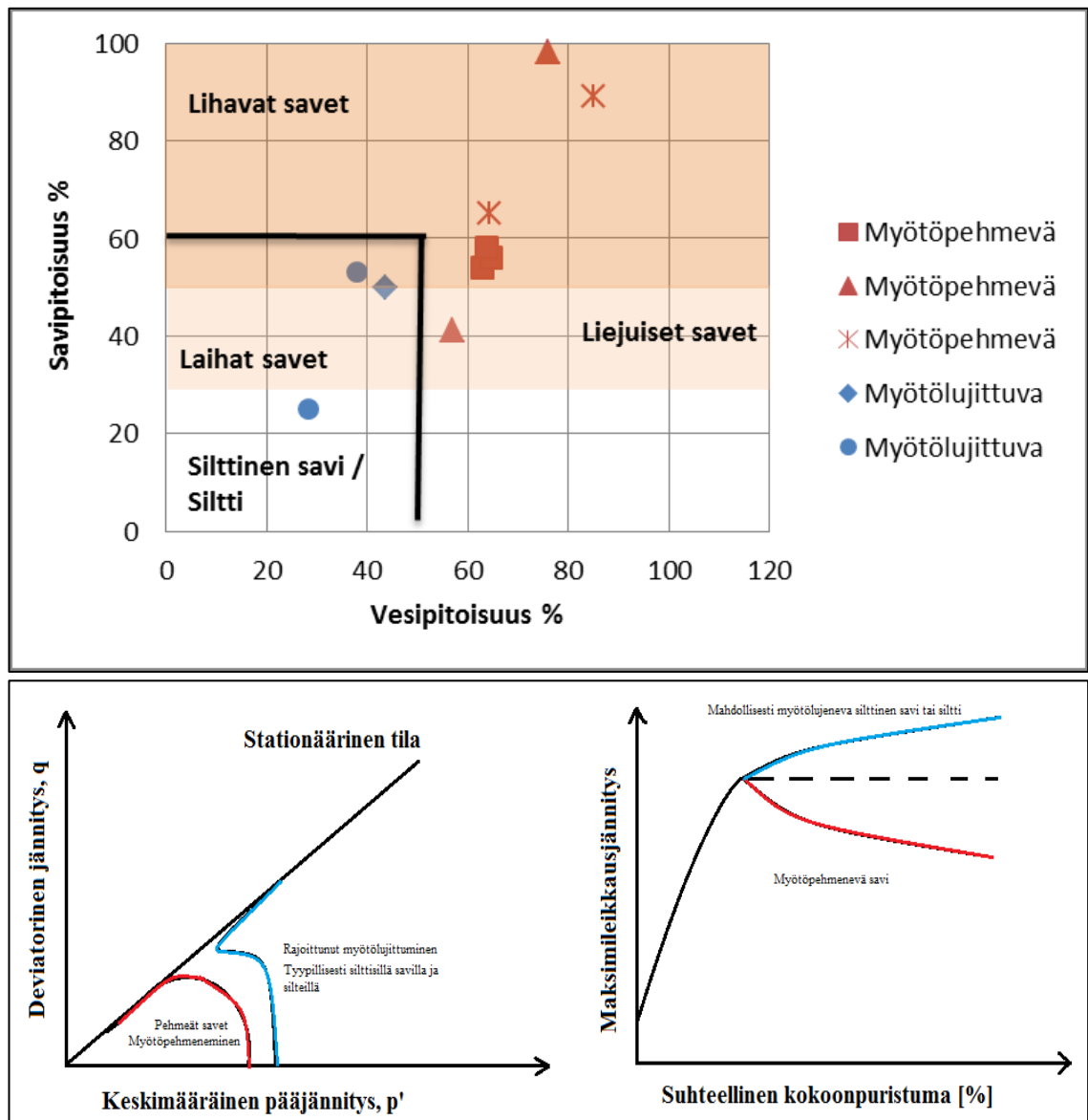
Kuvassa 2.17 seuraavana on laihan ja lihavan saven tyypillisiä vesipitoisuuksia ja leikkauslujuuksia. Laihalla savella vesipitoisuus tässä tyypillisesti on noin 50 % ja suljettu leikkauslujuus karkeasti noin 10-20 kPa välillä. Lihavalla savella vesipitoisuuden keskiarvo kasvaa noin 75 %:iin ja leikkauslujuuden arvot laskevat hieman verrattuna laihoihin saviin. Hajonta on kuitenkin erittäin suuri kuvan datassa.

Kuvassa lopuksi on vielä esitelty savisen siltin ja siltin tyypillisiä ominaisuuksia. Kun vertaillaan savisen siltin vesipitoisuuksia ja suljettuja leikkauslujuuksia huomataan, että vesipitoisuus savisella siltillä keskiarvoisesti on noin 40 %. Suljetussa leikkauslujuudessa kuitenkin on huomattavaa eroa esimerkiksi laihaan saveen vertailtaessa keskimääräisiä tuloksia. Myös hajonta lujuudessa kasvaa. Huomattava trendi on, että vesipitoisuuden laskiessa kasvaa suljettu leikkauslujuus.

Siltillä vesipitoisuuksien mediaani on noin 25 % ja suljettuleikkauslujuus painottuu enemmän 20-50 kPa:n välille. Silttinen maa kuitenkin häiriintyy helpommin siipi-

kairauksen yhteydessä, mikä on omiaan kasvattamaan hajontaa sekä lisäämään 20 kPa tienoille sijoittuvia arvoja.

Kuvassa 2.18 yläpuolella on jaoteltu suomalaisista kohteista suoritettuja saven kolmiakksiaalikohteita. Huomataan, että alle 50 % vesipitoisuuksilla savella alkaa syntyä myötölujittuvaa käyttäytymistä. Tällöin myöskään maa-aineksen savipitoisuus ei usein saa ylittää 60-70 %. Kuvan 2.18 alapuolen esimerkkitaapauksessa nähdään, että pehmeillä savilla lujuus murtotilan saavuttamisen jälkeen putoaa nopeasti. Tämä on havainnollistettu vasemmalla q - p' -koordinaatistossa sekä oikealla suljetussa kolmiakksiaalikohteessa.



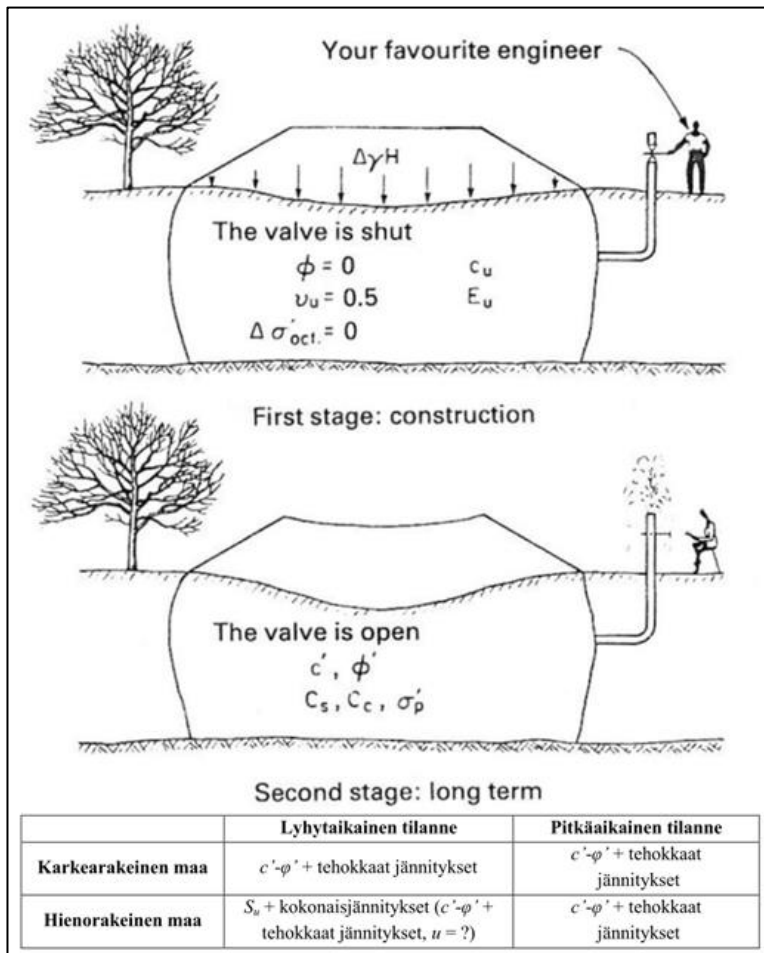
Kuva 2.18. Ylhäällä on kolmiakksiaalikohteista tulkittu saven lujuuden käyttäytymistä (Mansikkamäki) ja alhaalla on vastaavasti havainnollistettu kyseisten pehmeiden savien ja silttisten savien käyttäytymisestä kolmiakksiaalikohteessa

2.5 Vakavuuslaskenta

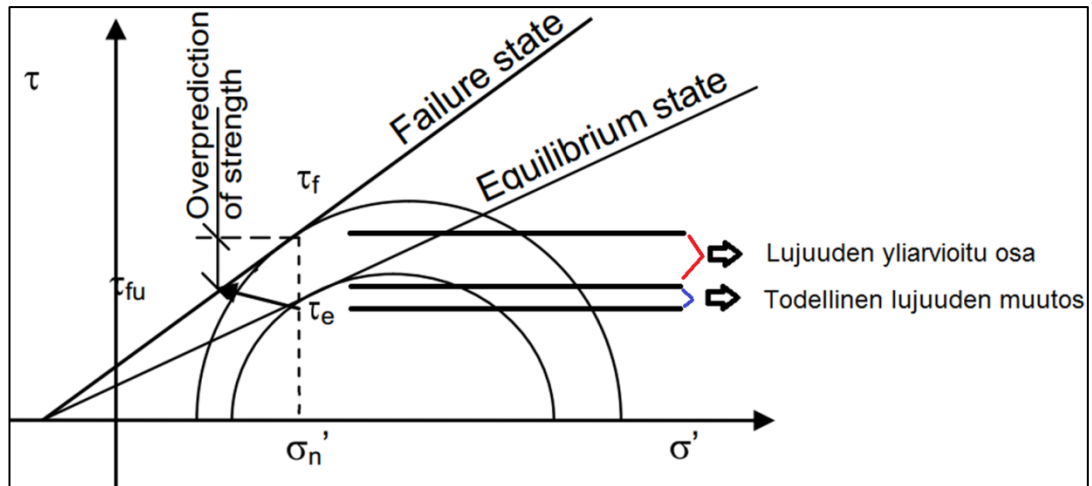
2.5.1 Yleistä

Ratapenkereillä stabiliteetin kannalta kriittisin tilanne syntyy junan pysähtyessään paikalleen. Vastaavasti junan ohittaessa kohteen paine ei ehdi kunnolla kasvamaan hienorakeisissa maalajeissa. Yleisesti stabiliteettilaskennassa hienorakeisilla maalajeilla käytetään lyhyen ajan tarkastelussa lähes poikkeuksetta suljettua leikkauslujuutta. Pitkäaikaisessa tilanteessa vastaavasti käytetään tehokkaita parametreja. (Länsivaara 2011)

Kuvassa 2.19 on jaoteltuna yleisesti käytettyjen parametrien valintaa. Kuvan tilanteessa käsitellään rakentamisesta, mutta vastaavasti voidaan ajatella tilannetta staattisen ulkoisen kuorman vaikuttaessa. Vaihtoehtoisesti lyhyen ajan vakaavuuslaskennan voi suorittaa käyttäen tehokkaita parametreja, mutta tällöin joudutaan huomioimaan huokosvedenpaineen kehittyminen maalajeissa. Laskennan voi suorittaa tällöin esimerkiksi GeoCalc:n r_u' -menetelmällä. Jos huokospainetta ei huomioida, saven lujuutta yliarvioidaan kuvassa 2.20 esitetyllä tavalla. Tällöin lamellimenetelmiä käyttäessä päädytään usein epätodellisen suuriin leikkauslujuuden arvoihin. (Länsivaara 2011)



Kuva 2.19. Stabiliteettilaskennassa yleisesti käytettävät parametrit lyhytaikaiselle ja pitkäaikaiselle tilanteelle (Leroueil 1990, Länsivaara 2011)

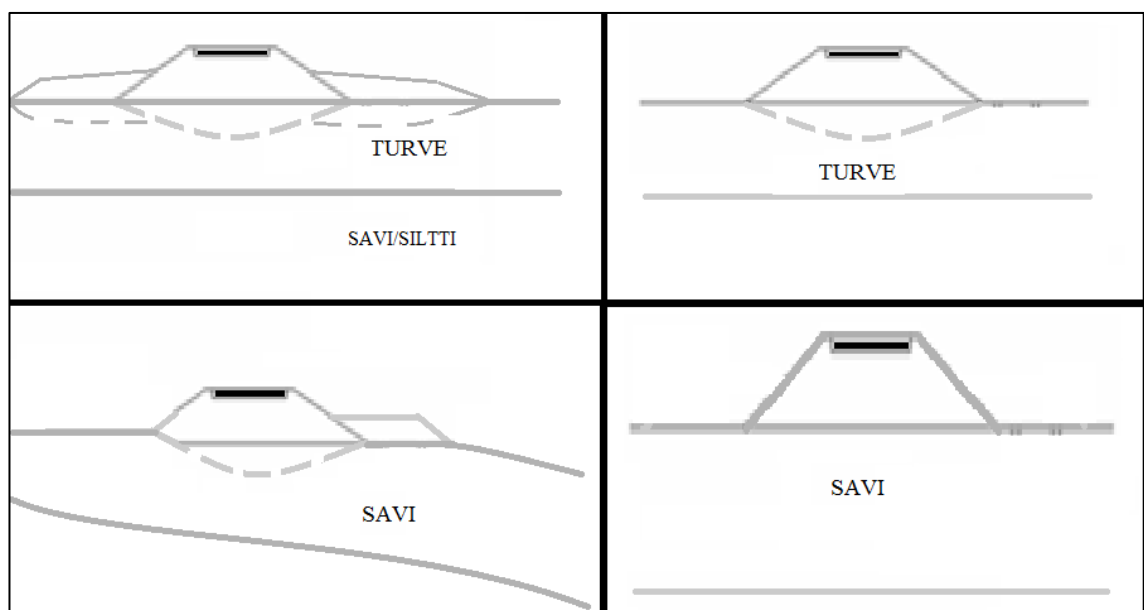


Kuva 2.20. Varmuuden yliarviointi tehokkailla jännityksillä laskettaessa ilman huokosvedenpaineen vaikutusta. Kuvaan on täydennetty tarkennukset. (Länsivaara et al. 2011)

2.5.2 Maaston geometria ja pohjamaan maalajit

Ratapenkereen stabiliteetin kannalta yksi merkitsevä tekijä on kohteen geometria (esimerkiksi ratapenkereen korkeus, maanpinnan kaltevuus sekä ojat ja painanteet). Näiden lisäksi vakavuuteen vaikuttaa pohjamaan maalajit ja maakerrosten kaltevuus, paksuus sekä lujuus. Penkereen sijoittuminen ympäröivään maastoon on merkittävä esimerkiksi liukupinnan muodon ja kuivatuksen kannalta. Tämän lisäksi vastapenkereiden pituus ja korkeus vaikuttaa stabiliteettiin. Vakavuuslaskenta onkin jokaisen kohteen kohdalla uniikki ja tämä heijastuu myös inklinometridatan haasteelliseen tulkitsemiseen.

Kuvassa 2.21 on havainnollistettu neljää erilaista pohjamaatyyppiä. On selvää, että yksittäisistä erityyppisillä pohjamailla sijaitsevista kohteista syntyvä kokonaiskuva on parhaimmillaankin monisäikeinen.



Kuva 2.21. Tyypillisiä pehmeikköjen ongelmapenkereitä (Länsivaara et al. 2014)

2.5.3 Liukupintamenetelmät

2.5.3.1 Yleistä

Liitteessä 1 on esitetty radan stabiliteetilaskennasta kaaviokuva vanhoilla ratapenkereillä. Kaaviokuva on tarkoitettu suunnittelun johdonmukaistamiseksi. Huomioitavaa on, että seurattavat inklinometrikohteet kokonaisvarmuuden osalta ovat 1,3...1,5 väliltä. Tällöin pehmeiköllä suoritetaan sivusiirtymä-, painuma- ja huokospainemittauksia. Kun laskennallinen kokonaisvarmuus on alle 1,3, suoritetaan tarkempia pohjatutkimuksia ja laskelmia sekä vaadittaessa korjaustoimenpiteitä. (RHK B15 2005)

Liukupintamenettelyissä oletetaan lasketulla liukupinnalla tapahtuvan murtuma. Kuormista (ulkoinen kuorma ja maanpaino) aiheutuvat leikkausjännitykset tällöin ylittävät maan leikkauslujuuden. Tällöin murtuminen oletetaan tapahtuvan yhtäaikaaisesti kaikille murtopinnan osille. Liukupinnan lamelleissa voidaan laskea maakappaleeseen kohdistuvia voimia sekä näiden momenteja ja näin laskea vakavuus maapartikkelille. (Lehtonen et al. 2011)

Liukupinnan muoto voi käytännössä olla ympyrän, paraabelin, laattamaisen ja kiilamaisen oloinen sekä näiden yhdistelmä. Lamellimenetelmissä usein kuitenkin oletetaan liukupinta ympyränmuotoiseksi jolloin laskenta yksinkertaistuu. Liukupinnan muotoa todellisuudessa ohjaa kuitenkin esimerkiksi maakerrosten rajat, perustukset ja tukiseinät, kuormitus ja maan ominaisuudet. Laskelmissa yleensä liukupinnan passiivivyöhykkeellä päättyy esimerkiksi ojiin tai muihin vastaaviin taitteisiin. Laskelmissa varmuus sortumaa vastaan määritellään yleensä kaavan 2.16 mukaan. Varmuuskerrointa myös kutsutaan usein nimellä FOS (Factor Of Safety) tai M_{sf} (Safety Factor). Murto tapahtuu, kun varmuus laskee alle ykkösen. (Lehtonen et al. 2011)

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (2.16)$$

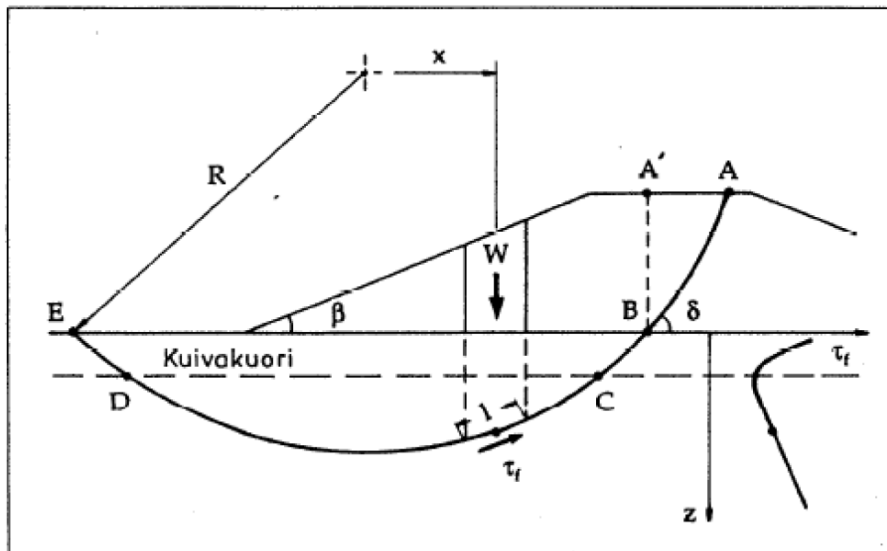
missä

F	on varmuuskerroin
τ_f	on maan leikkauslujuus
τ	on maan leikkausjännitys

Perinteisesti Suomessa on käytetty geoteknisessä mitoituksessa kokonaisvarmuutta. Tällöin laskennassa on käytetty todellisia kuormia ja lujuuksia. Eurokoodi osavarmuusmitoituksen myötä on myös alettu käyttämään lujuuksille ja kuormille osavarmuuslukuja ja tällöin laskentatavassa vaadittu varmuus on $ODF \geq 1$. Vastaavasti vanhoille ratapenkereille vaadittu kokonaisvarmuus on $F \geq 1,5$ ja uusille $F \geq 1,8$.

2.5.3.2 Lamellimenetelmät

Lamellimenetelmät voidaan kokonaisvarmuus laskea tehokkaiden- tai kokonaisjännitysten menetelmällä. Tasapainomenetelmistä yleisimmin käytössä on niin sanotut lamellimenetelmät (LEM), jossa liukupintaa pitkin liikkumaan pyrkivälle maamassalle määritetään tasapainotila. Liukupinnan osat on kuitenkin jaettu pystysuoriin lamellin muotoisiin osiin, joissa tarkastelu suoritetaan. Maan paino sekä ulkoiset kuormat aiheuttavat vaikutuksen, mitä maan lujuus pyrkii vastustamaan. Analyysissa siis pyritään löytämään vaarallisin liukupinta sekä varmuus tälle (eli liukupinta, jolla on pienin leikkauslujuuden ja jännityksen suhde). Laskenta suoritetaan kuvan 2.22 mukaan. (Jaakkonen 2013)



Kuva 2.22. Stabiiliteetin laskenta ympyränmuotoisella liukupinnalla lamellimenetelmän (Tielaitoksen selvityksiä 67/1994)

Lamellimenetelmät voidaan jakaa lamellien välisten tasapainoehtojen määrän mukaan yksinkertaisiin ja tarkkoihin menetelmiin. Tarkoissa menetelmissä kussakin lamellissa toteutuu pysty- sekä vaakavoimatasapainoehdot ja momenttitasapainoehto. Yksinkertaisissa menetelmissä vain osa näistä toteutuu. Tarkkoja menetelmiä ovat muun muassa Spencerin ja Morgenstern-Pricen menetelmät, yksinkertaistettuja menetelmiä ovat vastaavasti Janbun- ja Bishopin yksinkertainen menetelmä. (Jaakkonen 2013)

Lamellimenetelmissä osa voimista on tuntemattomia ja lamellit staattisesti määräämättömiä, jolloin myös tehdään oletuksia muuttujista. Tarkkoja menetelmiä kuitenkin voidaan pitää tästä huolimatta teoreettisesti tarkempina kuin yksinkertaisia, olettaen että menetelmä löytää vaarallisimman liukupinnan. Muita olettamia on esimerkiksi lujuusparametrien riippumattomuus jännitys-muodonmuutoskäyttäytymisestä. Yllä mainituilla lamellimenetelmillä ei voida mallintaa murtumisen progressiivisuutta. (Jaakkonen 2013, Mansikkamäki 2009)

2.5.4 Elementtimenetelmät

2.5.4.1 Yleistä

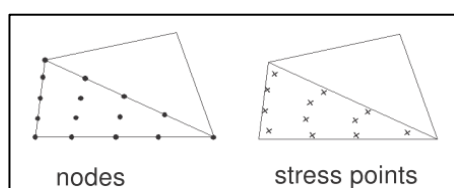
Elementtimenetelmä (FEM) perustuu geometrialtaan monimutkaisten rakenteiden ja materiaalien yksinkertaistamiseen. Idea perustuu numeeriseen laskentamenetelmään, jossa geometria jaetaan osiin ja muodostetaan näin laskentaverkko. Elementtien väliset vuorovaikutukset on puolestaan nykyään ratkaistavissa iteratiivisesti kohtuullisen nopeasti. Elementtimenetelmän etuja verrattuna liukupintamenetelmiin ovat: vaikeiden geometrioiden mallintaminen, monimutkaisten analyysien ratkominen, erilaisten kuormitus-tyyppien (staattinen ja dynaaminen) mallintaminen sekä materiaaliominaisuuksien tehokkaampi mallintaminen. Erittäin suurena etuna FEM –mallinnuksessa on mahdollisuus laskea siirtymiä, joita LEM –malleilla ei pystytä laskemaan. Mallinnus suoritetaan yleensä joko 2D- tai 3D-mallina. Työssä kuitenkin keskitytään vain 2D-mallien sovel-
luksiin. (Mansikkamäki 2009)

Yleisesti elementtimenetelmällä laskettaessa voidaan laskenta jakaa kolmeen eri päävaiheeseen. Aluksi luodaan malli, joka sisältää esimerkiksi materiaaliominaisuudet, laskentaverkon, elementit, raja-arvot ja kuormat, rakenteet tai rakennekerrokset. Tämän jälkeen suoritetaan laskenta, jossa asetetaan alkutilanne, laskentavaiheet ja aika. Lopuksi suoritetaan tulosten analysointi, jossa voidaan tulkita esimerkiksi siirtymien, painumien ja rasitusten suurusluokka. Näistä voidaan tulostaa kuvia, taulukoita sekä kuvaajia. (Jaakkonen 2013)

2.5.4.2 Plaxis 2D -laskentametodit

Tutkimuksen yhteydessä käytetään Plaxis 2D –ohjelmistoa. Ohjelmistoa voidaan käyttää haastavissa geoteknisissä ongelmissa kuten stabiliteetin, painumien, kaivantojen ja perustusten mallintamisessa. Tutkimuksen kannalta merkittävimmät materiaalmallit ovat Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS), S-CLAY1S, Modified Cam Clay (MCC) ja Soft Soil (SS). Mallinnuksessa käytetään nykyisin pääosin 15-solmuisia kolmioelementtejä. Kyseisessä kolmioelementissä on 12 jännityspistettä. (Plaxis Manuals 2012)

Laskennan tarkentamiseksi voidaan kolmioiden suhteellista kokoa pienentää ja näin parantaa tarkkuutta laskentaverkossa. Tällöin käytännössä parannetaan numeerista laskenta tarkkuutta, mutta ei vaikuteta käyttäjän syöttämiin virheisiin. Yksi elementtimenetelmien käytön ongelmista onkin lähtötietojen ja materiaalien puutteelliset arvot ja dimensiot. Kuvassa 2.23 on esitetty solmu- ja jännityspisteet kolmioelementissä. (Plaxis Manuals 2012)



Kuva 2.23. Kolmioelementin solmupisteet sekä jännityspisteet (Plaxis Manuals 2012)

Sofistikoituneiden materiaalimallien käyttäminen vaatii yleensä laboratorioko-keita. Laskennan luonteesta johtuen materiaalien parametreja voidaan muuttaa, suorittaa useita laskuja samasta tilanteesta ja haarukoida tulosta eri malleilla ja parametreilla.

Stabiliteettilaskentaa varten paras käytännön hyöty kuitenkin syntyy, kun halutaan mallintaa huokosvedenpaineiden kehittymistä ja deformaatioita maaperässä. Sofistikoituneilla materiaalimalleilla, jossa myötölujeneminen tai -pehmeneminen huomioi- daan, voidaan maan progressiivista murtumista mallintaa. Kun leikkausjännitys ylittää maan leikkauslujuuden, laskentapisteessä syntyy kohtaan murtuminen. Liukupinnan uskottavuus täytyy kuitenkin käyttäjän tulkita itse. (Mansikkamäki 2009)

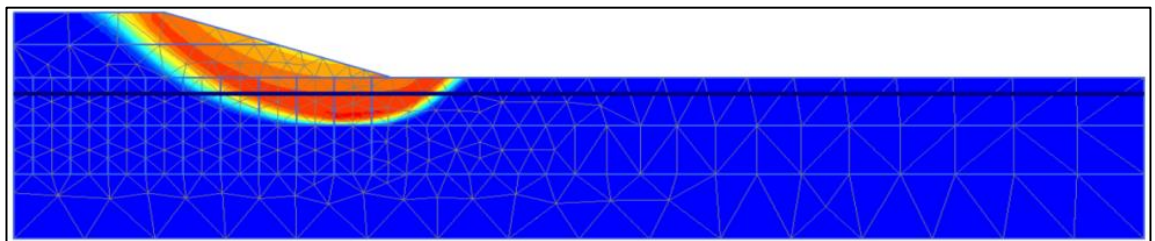
Elementtimenetelmillä voidaan suorittaa rakennusaikaisten vaiheiden mallinta- minen ajan funktiona. Aikatekijä on erityisen tärkeä pehmeillä, joissa vedenlä- päisevyys on huono. Kokonaisvarmuuden laskeminen suoritetaan niin sanotulla var- muus analyysillä, jossa ohjelma laskee asteittain lujuusparametreja kunnes saavutetaan murtuminen. Kokonaisvarmuutta ohjelmassa merkitään kirjaimella M_{sf} (Safety Factor). Kuvassa 2.24 on esitetty Plaxis -laskennan liukupinta sekä esimerkki laskentaverkosta. Laskenta varmuuskertoimien selvittämiseksi suoritetaan ohjelmassa kaavalla 2.17. (Mansikkamäki 2009, Plaxis Manuals 2012)

Käytännössä yllä mainitussa menetelmässä pienennetään tällöin koko mallin maarakenteen lujuutta olettaen, että syntyvällä liukupinnalla olisi sama kokonaisvar- muus joka kohdassa. Tämä johtaa siihen, että menetelmällä saavutetaankin osittain sa- mansuuruisia varmuuksia kuin lamellimenetelmillä vastaavissa laskuissa. Lamellimene- telmissä tosin varmuuskerroin on leikkauslujuuden ja leikkausjännityksen suhde, kun taas elementtimenetelmässä on kyseessä leikkauslujuuksien suhteesta. (Mansikkamäki 2009)

$$F = \Sigma M_{sf} = \frac{\tan\varphi_{input}}{\tan\varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (2.17)$$

missä

F, M_{sf}	on kokonaisvarmuus ja laskennan varmuus
$\varphi_{input}, c_{input}$	ovat käyttäjän antama kitkakulma ja koheesio
$\varphi_{reduced}, c_{reduced}$	ovat ohjelman redusoidut kitkakulma ja koheesio



Kuva 2.24. Plaxis –laskennan liukupinta (Plaxis Manuals 2012)

2.5.5 Ratapenkereen stabiliteetin parantaminen

Tässä kappaleessa on esitelty lyhyesti stabiliteetin parantamiskeinoja. Kyseisiä toimenpiteitä on usein myös suoritettu tutkimuksen kohteissa. Korjaustoimenpiteillä on aina työnaikaisia ja tämän jälkeen syntyviä johdannaisvaikutuksia, mitkä näkyvät muun muassa inklinometridatassa. Vaikutus, kuten painuma, aiheuttaa aiemmin käsiteltyjä sivusiirtymiä, millä taas on vaikutusta inklinometrin lukemiin.

Vastapenkereet:

Vastapenkereitä voidaan käyttää stabiliteetin parantamiseen ja vaikuttaa liukupinnan muotoon sekä sijaintiin. Vastapenkereestä tulee tällöin osa rakennetta ja ideana on että liukupinta muoto kaartuu pidemmälle ja vakavuus paranee. Vastapenkereen rakentamisesta syntyy kuitenkin lisäkuormaa ja huokospaineiden kasvua ratapenkereen viereen. Huonona puolena vastapenkereillä onkin, että ne lisäävät deformaatioita kuten painumia ja sivusiirtymiä. Tämä on huomattavissa etenkin turvekohteissa. Ongelmana turvekohdeissa on myös ulkoisen kuorman vaikutus turpeen vedenläpäisevyys ominaisuuksiin. (RHK B15 2005)

Massanvaihto:

Massanvaihto tehdään joko raiteen alle tai tukimassanvaihtona liikennöitävän radan viereen. Massanvaihto suoritetaan joko kokonaan poistamalla pehmeät massat tai osittain. Tämän tutkimuksen turvekohteissa on myös osittain suoritettuja massanvaihtoja, joilla voi olla oma vaikutus syntyneisiin putkiprofiileihin. (RHK B15 2005)

Massastabilointi:

Massastabilointi soveltuu ratapenkereen stabiliteetin parantamiseen, kun stabilointisyvyys on noin 5-8 metriä (RHK B15 2005). Tutkimuksen yhdessä kohteessa massastabiloinnissa talviolosuhteissa lujuuden kehitys ei ollut halutunlaista ja tästä aiheutui-kin vaarallisia siirtymiä. Massastabiloinnissa yleisestikin ongelmat painottuvat pääosin työnaikaisen lujuuden kehitykseen. Lopputuotteen lujuus voidaan kuitenkin paremmin arvioida myöhemmin suoritettavista näytteistä. Massastabilointi saattaa myös soveltua hieman paremmin kuituisempaan turpeeseen, jossa stabiloitava massa kertyy kuitujen ympärille.

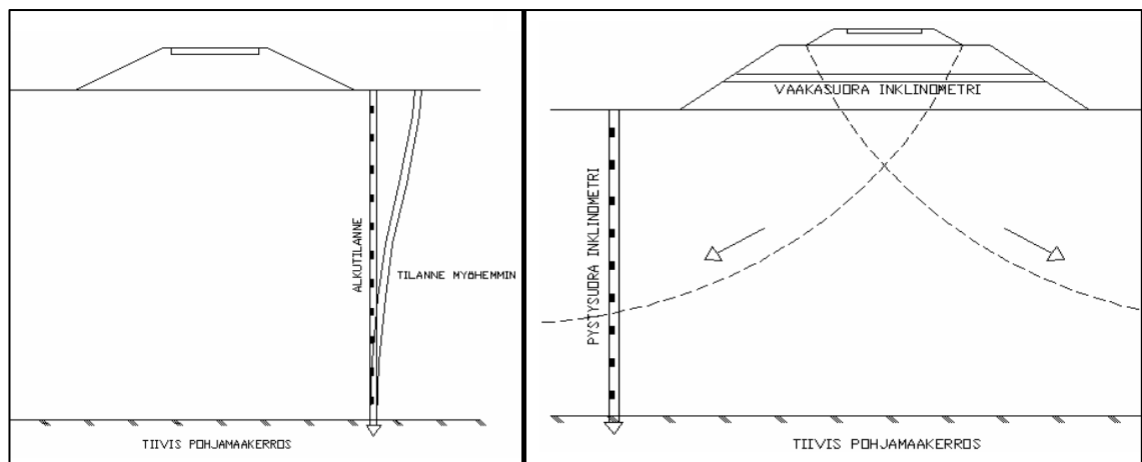
Paalulaatta & Tukiseinä:

Paalulaattoja yleensä käytetään yleensä painumien kontrolloimisessa, mutta ovat myös tehokas keino stabiliteetin parantamiseksi, kun vastapenkereillä tai muilla keinoin ei saavuteta haluttua stabiliteettia. Kaltevassa maastossa vakavuutta ei välttämättä saada riittäväksi ja tällöin voidaan hyödyntää esimerkiksi maahan tai kallioon ankkuroituja tukiseiniä. Tukiseiniä voidaan myös hyödyntää silloin, kun paalutustyöt voivat aiheuttaa sortumavaaran. Paalulaatta ja tukiseinä ovatkin yleisesti kalliimpia, mutta tehokkaampia keinoja vakavuuden parantamiseksi. (RHK B15 2005)

3 INKLINOMETRIMITTAUS

3.1 Yleistä

Inklinometreillä voidaan mitata siirtymiä maaperässä eri syvyyksillä. Mittauksessa voidaan havaita maapohjassa tapahtuvia liikkeitä ja näin seurata kehittyvää liukupintaa. Siirtymänopeutta ja putken kulmanmuutosta taas voidaan vertailla arvioidun liukupinnan kohdalla sekä tehdä arviota tilanteen kehittymisestä. Siirtymien mittaaminen inklinometrillä perustuu kulmien mittaamiseen. Kulmia mitataan putken eri syvyyksillä ja näin tuotetaan koko putken taipumaprofiili. Taipumaprofiili muodostuu sekä penkereen suunnassa, että pengertä kohtisuoraan. Kuvassa 3.1 on havainnollistettu mittausta. Kuvassa vasemmalla on esitetty putken taipumaprofiili ja oikealla on inklinometrinen asennus vaakasuoraan ja pystysuoraan. (Lehtonen 2010, Kolisoja & Brecciaroli 2004)



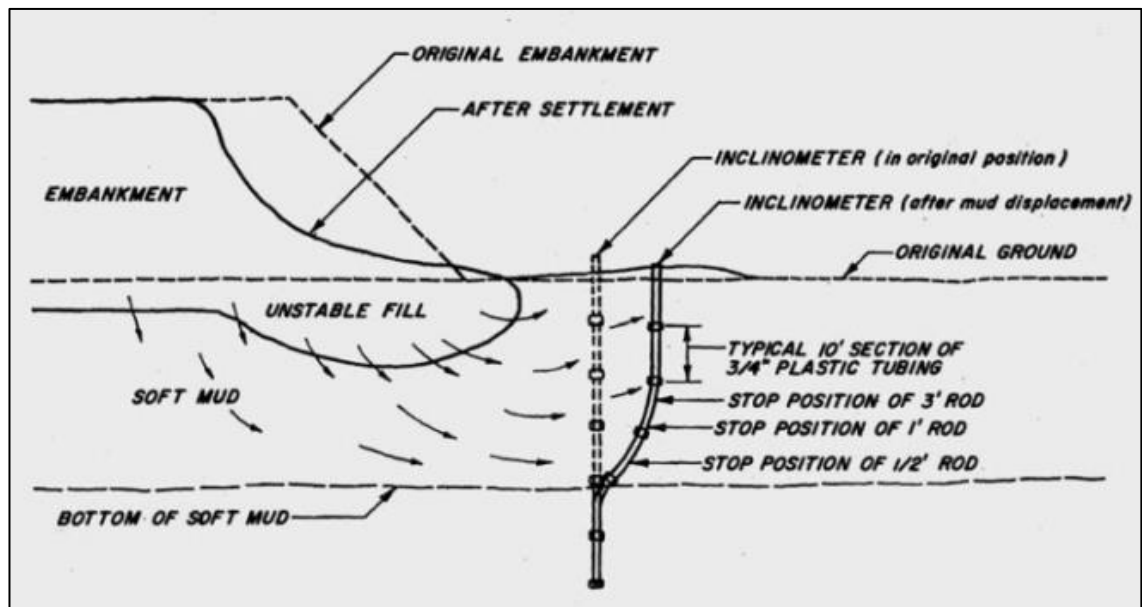
Kuva 3.1. Vasemmalla putken taipumaprofiili ja oikealla putkien läpäisevät liukupinnat (Kolisoja & Brecciaroli 2004)

Kuvan 3.1 mukaisesti inklinometriputki asennetaan pystysuoraan esiporattuun kairausreikään. Putken asennus pitäisi suorittaa tiiviiseen pohjamaan noin 3-6 m ja kalliin asennettuna vähintään noin 1,5-2 m. Kairausreiän sijainti päätetään alustavasti penkereen viereen niin, että liikevyöhykkeet kulkevat sen lävitse. Inklinometriputkia voidaan myös asentaa vaakatasoon. Tässä tutkimuksessa kuitenkin pääpaino on pystysuoraan asennettavilla putkilla. (Kolisoja & Brecciaroli 2004)

Inklinometrimittausten todellinen hyöty syntyy, kun voidaan penkereen ja maapohjan liikkeitä monitoroida ilman kalliita parannustoimenpiteitä. Kuitenkin manuaalisesti kohteita mittaamalla saadaan tietoa vain pistemäisesti tietyn väliajoin ja jokainen mittauskerta kasvattaa kustannuksia. Tällöin siirtymien muutoksien ymmärtäminen muodostuu tärkeäksi kriteeriksi mittausten hyötyä ajatellen. Reaaliaikaisessa mittauksessa voidaan kuitenkin käyttää myös automaattisia inklinometrejä. (Luomala 2009)

3.2 Manuaalinen ja automaattinen inklinometrimittaus

Manuaalisessa mittauksessa inklinometriputki asennetaan kairausreikään ja suoritetaan putken alkuprofiilin mittaus (0-mittaus). Tällöin saadaan putken muoto selville lähtötilanteessa ja myöhemmin suoritettut mittaukset voidaan verrata 0-mittaukseen. Mittaus suoritetaan kuvan 3.3 mukaisen kannettavan laitteiston avulla. Manuaalisissa mittauksissa sondi lasketaan putken pohjaan ja aloitetaan mittaus. Sondia nostetaan ylöspäin puolimetriä kerrallaan ja suoritetaan mittaus (kuvassa 3.2 mittausväli on esitetty eritavalla, mutta logiikka on sama). Sondin kaltevuus mitataan kuvan 3.3 hopeisen tangon kahden voimatasapainoisen servokiihtyvyyssmittarin avulla. Kaltevuuksien avulla saadaan putken uusi muoto selville ja tämän avulla itse siirtymät. (DSIC, Kolisoja & Breciaroli 2004)



Kuva 3.2. Havainnollistava kuva inklinometriputken siirtymistä ja profiilista (Machan & Bennett 2008)

Manuaalisen mittaukseen tarvittavat osat kuvan 3.3 mukaisesti: (DSIC)

- Hopeinen mittapää jolla on hyvä mittatarkkuus, nopeasti käytettävissä sekä hyvä kestoikä
- Musta ohjauskaapeli, joka on helppo käsitellä sekä kestävä. Muita ominaisuuksia kaapelilla on muun muassa joustavuus kylmissä olosuhteissa. Kaapeliin on myös vulkanoitu värillisiä kumimerkkejä syvyyksiä varten.
- Digitaalinen lukemalaite, johon tiedot tallentuvat muistiin ja data voidaan purkaa tietokoneelle käsittelyä varten. Kyseinen valmistaja tarkoittaa laitteen tallentavan 320 putken mittaukset ja akun riittävän kerrallaan 16 tunniksi. Laitteisto mahdollistaa näin mittaukset yhden henkilön suorittamana.
- Hopeinen hihnapyörä, joka voidaan asettaa inklinometriputken yläpäähän. Tällöin anturin operointi helpottuu ja suojellaan ohjauskaapelia kulumiselta.
- Laitteistossa voidaan myös hyödyntää syvien putkien kohdalla kaapelinkelauslaitteita



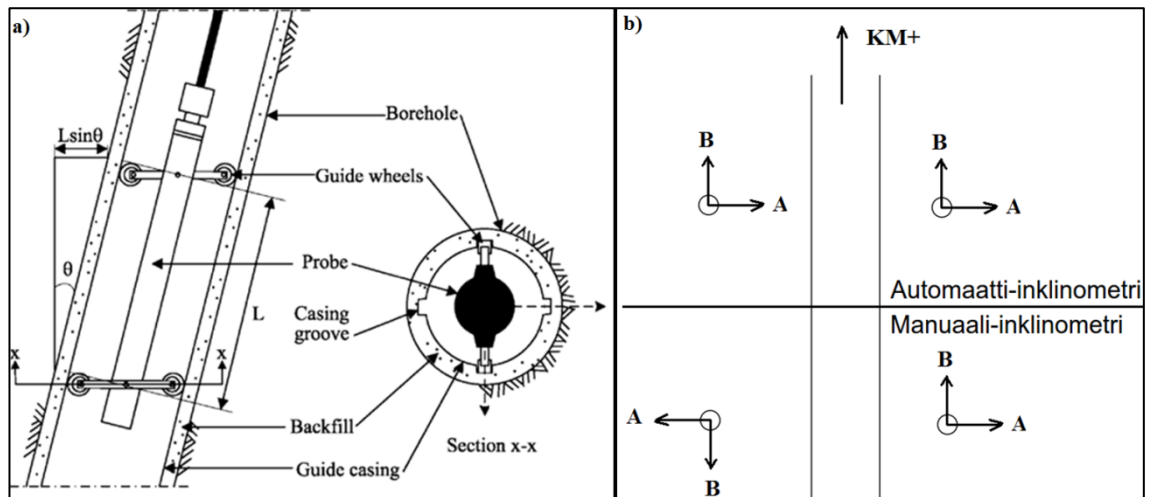
Kuva 3.3. Erään valmistajan manuaalisen inklinometri -mittalaitteistoon kuuluvat osat (DSIC)

Automaattisessa inklinometrissä käytetään useita putken antureita samanaikaisesti. Automaattinen vaihtoehto on pätevä, kun tiedetään tarkasti seurantamittauksia vaativa kohde. Muutaman havaintopisteen rakentaminen automaattisella järjestelmällä on edullisempaa pitkällä aikavälillä jos mittauksia on paljon. Fyysisten tuotteiden lisäksi myös yleensä käytetään verkkopalvelua, josta mittaustuloksia voidaan seurata reaaliajassa ja voidaan asettaa erinäisiä hälytysrajoja liikkeen havaitsemiseksi. (Luomala 2009)

3.3 Siirtymien määrittäminen ja liikkeen suunta

Mittaus putkessa suoritetaan kahdessa eri suunnassa. Tällöin on tehokkainta sijoittaa akselit niin, että suurin osa siirtymistä syntyy toiselle pääakseleista. Ensimmäinen mittaus (0-mittaus) suoritetaan aina putken asentamisen jälkeen. Yhden suunnan mittauksen arvot saadaan kahden mittauksen itseisarvojen keskiarvona. Tällöin mittauksessa anturia on käännetty 180° ja näin saatu yhdelle suunnalle kaksi arvoa eli yhteensä 4 mitausta (A_0 , A_{180} , B_0 ja B_{180}). Tulokset yleensä esitetään suunnissa A-A ja B-B.

Kuvassa 3.4 vasemmalla on havainnollistettu mittapäätä putkessa. Kuvassa oikealla on myös esitetty manuaali- ja automaatti-inklinometrillä yleisesti käytetyt positiiviset mittauksen suunnat. Automaattisessa inklinometrissä radan vasemmalla puolella siirtymät radasta poispäin ovat tällöin negatiivisia ja oikealla puolella positiivisia. Vastaavasti manuaalisessa mittauksessa radasta poispäin siirtymät ovat aina positiivisia. (Tielaitos 2000, Stark & Choi 2007)



Kuva 3.4. Kuvassa vasemmalla on manuaali-inklinometrillä sondi putkessa (Stark & Choi 2007). Oikealla on vastaavasti siirtymien positiiviset mittaussuunnat sekä automaatti- että manuaali-inklinometrillä.

Inklinometri ei suoraan mittaa putken siirtymiä vaan kulmien muutoksia pystysuunnassa. Kohteissa myös oletetaan, että putken alapää on kovassa pohjassa kiinni jolloin se ei pääse liikkumaan sivusuunnassa. Vaakasuuntaisen poikkeama lasketaan kaavojen 3.1 & 3.2 avulla. Vastaavasti siirtymä eli muutos sivusuunnassa määritetään sinifunktiolla kaavojen 3.3 & 3.4 avulla. Kuvassa 3.5 on havainnollistettu edellä mainittua ideaa. (Digitilt Manual 2011)

Kumulatiivinen vaakasiirtymän profiili havainnollistaa tällöin maaperän muodonmuutoksia kyseisessä kohdassa. Inklinometrillä mitattavien kuvaajien avulla pystytään reagoimaan siirtymään leikkausvyöhykkeellä sekä tätä kautta syntyvään mahdolliseen liukupinnan leikkaavaan liikkeeseen. (Stark & Choi 2007)

$$x = L * \sin\theta \quad (3.1)$$

$$\Sigma x = \sum (L_i * \sin\theta_i) \quad (3.2)$$

$$D = L * \Delta \sin\theta \quad (3.3)$$

$$\Sigma D = \sum (L_i * \Delta \sin\theta_i) \quad (3.4)$$

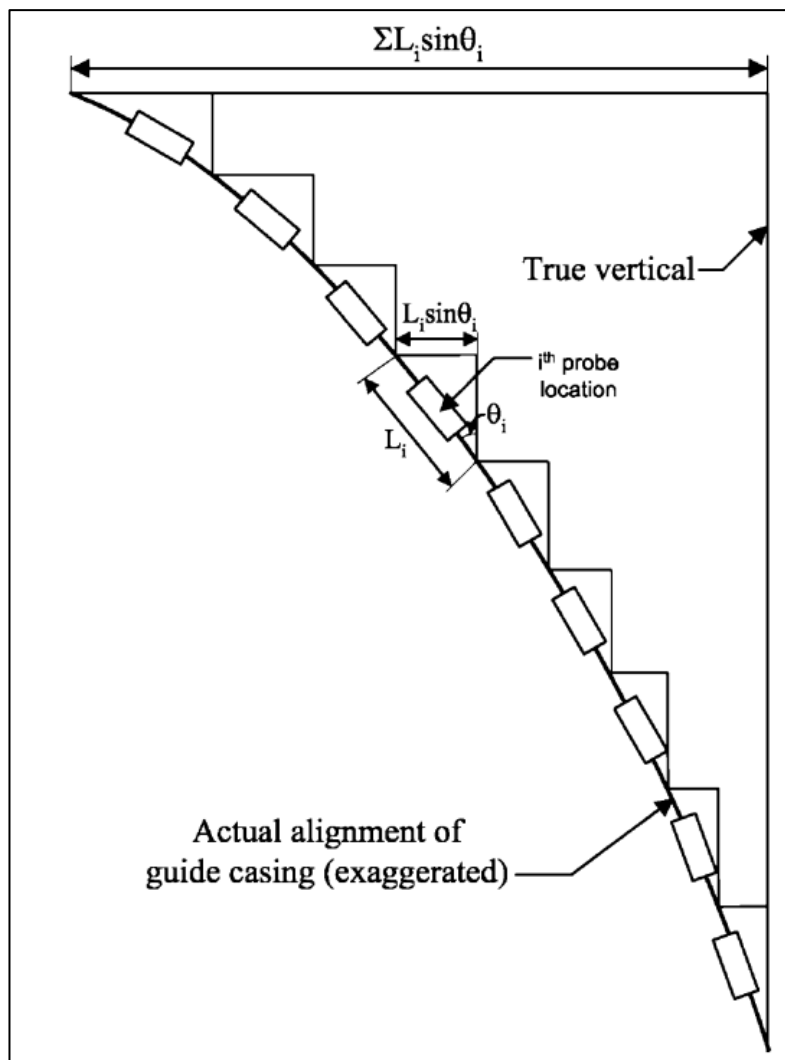
missä

x on vaakapoikkeama [mm]

L on mittausväli [mm]

θ on kulma [°]

D on siirtymä [mm]



Kuva 3.5. Havainnollistava kuva sondin sijainnista putkessa sekä vaakasuuntaisen kokonaispoikkeaman laskemisesta (Stark & Choi 2007)

3.4 Mittatarkkuus ja virhelähteet

Inklinometrien mittatarkkuuksista on esitetty useaa eri vaihtoehtoa lähteestä riippuen. Esimerkiksi Perniön sorrutuskokeessa käytettyjen automaatti-inklinometrien tarkkuus oli noin 0,03 astetta (Lehtonen 2010). Vastaavasti automaattisilla laitteilla tutkimuksen kohteissa on saatu epätodellisia tuloksia, jolloin voidaan olettaa, että laite on rikkoutunut tai epäkunnossa. Tämä asettaa tulosten tarkastelulle enemmän käyttäjäpainotteista tulosten kriittistä tarkastelua. Automaattisten laitteiden toimivuudessa on kuitenkin tapahtunut parannusta viimeisten vuosien aikana.

Manuaalisille mittalaitteille on esitetty vastaavasti erilaisia mittatarkkuuksia. Tarkkuuden on havaittu olevan noin 1-5 mm:n luokkaa 20 metrin matkalla. Pieniä siirtymiä tarkasteltaessa tällä on jo vaikutusta, mutta osassa stabiileissa manuaalisesti mitattavissa kohteissa ei ole siirtymiä juuri lainkaan, jolloin voidaan olettaa että mittalaitteen tarkkuus on tätäkin parempi. Maakerrosten paksuus ja putken syvyys kuitenkin vaikuttaa tarkkuuteen. Paksujen pehmeikköjen kohdalla voidaankin olettaa, että mittaukset ovat epätarkempia. Tällöin mittauksen referenssi piste on kauempana (putken pohjalla) ja pienemmät virheet kumuloituvat enemmän pitkän putken matkalla. Tarkkuuksiin vaikuttavat myös esimerkiksi seuraavat seikat: lämpötilaerot, mittalaitteen jännite-erot, putken eheys ja bittivirheet. (Savikurki 2010, Luomala 2009, Tielaitos 2000)

Virhelähteitä mittauksessa voi syntyä monesta eri syystä. Eri virheillä on usein myös omanlainen ”jälki” datassa. Erilaisia virhelähteitä ovat muun muassa seuraavat: (Machan & Bennett 2008)

- Sondissa mittalaitteen esiasetusvirheet, kulmavirheet, laitteiston yhdistävät osat, sekä mittauspyörät
- Kaapelissa esimerkiksi syvyyden mittaus ja tarkkuus, kaapelin käyttö ja säilytys ominaisuudet sekä ikääntymisestä johtuva venyminen
- Putkessa itse inkliinaatio (esimerkiksi putken jäykkyys ja ehjyys vaikuttaa) sekä putken käyryys

Kun data ei kohtaa olettamusta siirtymistä, niin herää epäily ensimmäisenä datan luotettavuudesta. Kuitenkin ensiarvoisen tärkeää olisi perehtyä yksinkertaisiin datan korjausmetodeihin tai vastaavasti valitsemalla uuden 0-mittauksen referenssiksi seuraaville mittauksille. Sattumanvaraisia virheitä ei pystytä jälkipäin korjaamaan ja tällöin tärkeää onkin putken huolellinen asennus ja mittaussuorite. Vastaavasti systemaattisia virheitä pystytään korjaamaan hieman monimutkaisin keinoin. Seuraavassa kappaleessa on esitetty ideat datan korjaamista varten sekä asennukseen liittyviä ohjeita, jotta datan korjaaminen ylipäättänsä olisi mahdollista.

3.5 Mittausvirheiden havainnointi ja korjaaminen

Virheiden korjaamisen sijaan helpointa on suorittaa kunnollinen 0-mittaus. Jos 0-mittaus on vanha, niin tällöin käytännöllistä on valita joku ensimmäisten mittausten joukosta uudeksi 0-referenssiksi.

Kuitenkin maksullisilla ohjelmilla pystytään systemaattisia virheitä korjaamaan käytännöllisemmin kuin käsin. Ensin täytyy kuitenkin ymmärtää yleisimpien virheiden syyt. Virheen erottaminen ja korjaaminen vaatii kokemusta ja arvostelukykyä. Seuraavassa on esitetty yleisimmät systemaattisesti tapahtuvat mittausvirheet: (Mikkelsen 2003)

- Kalibroitinvirhe eli ”bias-shift”. Tämä on kaikista yleisin systemaattinen virhe. Virheessä on kyse yhden datasetin sensorin kalibrointi-arvon vaihtelusta esimerkiksi A_0 ja A_{180} mittauksen välillä. Kun sondia pidetään täysin pystysuorassa, laite usein näyttää nolasta eroavaa lukemaa, tästä syntyvää virhettä kutsutaan nimellä ”bias-shift error”.
- Rotaatiovirhe on kombinaatio putken kallistuksesta ja akselin linjan siirtymisestä tai mahdollisesti väärin asennetusta putkesta.
- Syvyysasemointivirheet syntyvät putken käyryydestä ja sondin sijainnista pystysuunnassa. Virhettä aiheuttaa muun muassa painumat (putki lyhenee) sekä sondin tarkka syvyysasema eroaa alkuperäisestä.
- Herkkyysoikeama on harvinaisin virhe. Kyseessä on tehdasasetuksen ”K” arvon kalibroinnista uudelleen.

Seuraavassa käsitellään lyhyesti edellisten virheiden korjausmenettelyt ja perusperiaatteet: (Mikkelsen 2003)

- Jokaisella datasetillä on sisäänrakennettu virheen reduktio, koska lukemat otetaan kahteen vastakkaiseen suuntaan (A_0 ja A_{180} sekä B_0 ja B_{180}). Tämä mahdollistaa ylipäätään mittavirheiden kuten ”bias-shift” tunnistamisen. Systemaattiset virheet ovat yleensä hyvin pieniä, mutta kumuloiduessa merkittäviä. Koska virheet ovat systemaattisia, voidaan ne havaita datasta ja suorittaa matemaattiset korjaustoimenpiteet datalle.
- Tärkeää on asentaa inklinometriputki noin 3-6 metriä tiiviiseen pohjamaahan, jossa ei tule siirtymiä. Tämä mahdollistaa ensimmäisten 5-10 lukeman toimivan niin sanottuna kalibroitikohtana muulle datalle. Vastaavasti kallioon putki pitäisi asentaa mahdollisen savikerroksen jälkeen harkinnan mukaan vähintään noin 1-2 metriä. Kun mittausdataa tulkitaan, ja huomataan tällä syvyydellä siirtymiä, niin voidaan alkaa epäilemään putken asennuksesta johtuvaa virhettä.
- Lukemilla syvimällä putkessa on taipumusta systemaattiseen virheeseen, johon tuen esimerkiksi sondin lämpötilasta pohjalla, mahdollisesta putken inkliinaatiosta sekä pohjan etäisyydestä maan pinnalle.

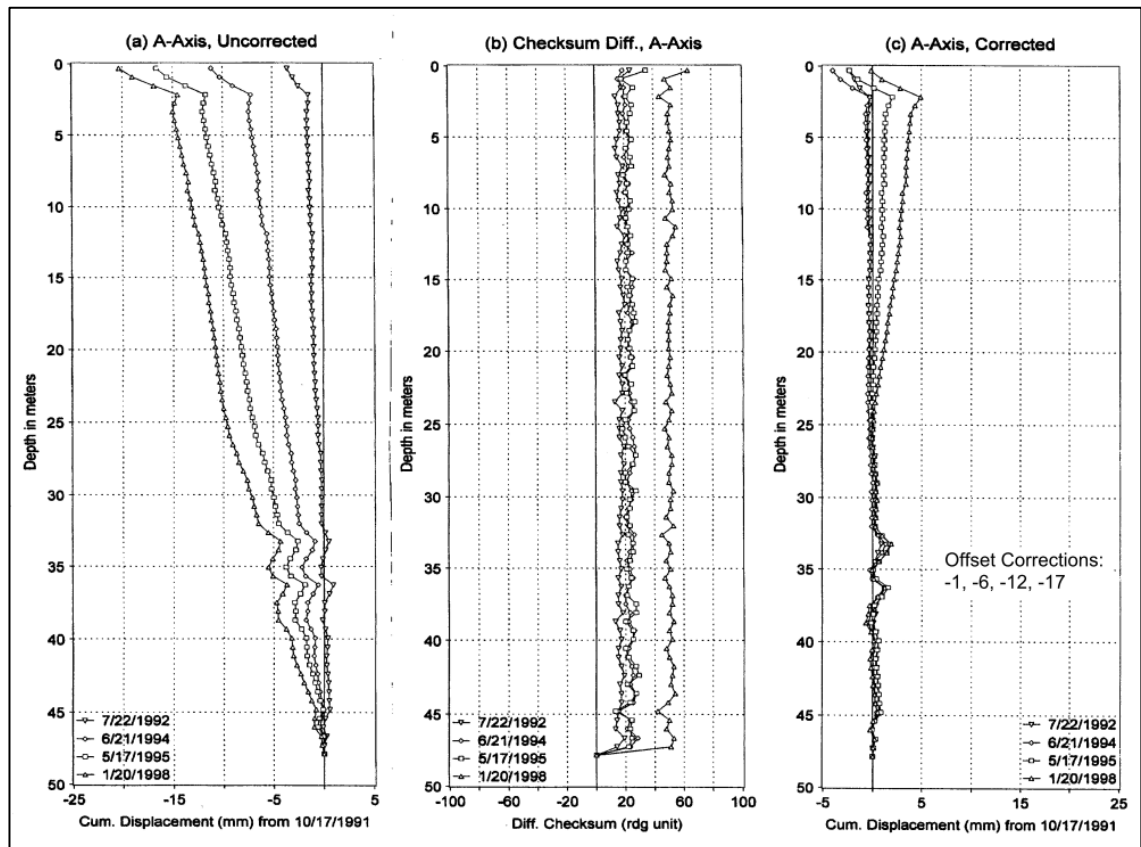
Seuraavassa kuvassa 3.6 on havainnollistettu ”bias-shift” virhettä. Vasemmalla (a) on aluksi mitattu data, keskellä (b) on tarkistesumman erotus sekä oikealla (c) on laskettu korjausehdotus. Koska vasemmalla (a) siirtymät ovat eri suuntaan kun on oletettu, on alettu etsimään syytä tälle. Tämän jälkeen on huomattu että siirtymiä on aivan putken juuresta lähtien. Tämä indikoi selvästi systemaattista virhettä, kun tiedetään putken olevan tiiviissä pohjamaassa usean metrin matkalla. Esimerkissä on myös tehty laskelmat kaavoilla 3.5 ja 3.6. Oikealla (c) kompensoidut korjaukset ovat siis -1, -6, -12 ja -17. Korjauksen jälkeen yläpäässä siirtymiä syntyy noin 5 mm, joka vastasi myös paremmin kohteen oletettua käyttäytymistä. (Mikkelsen 2003)

$$bs = \frac{BSE}{(N * C)} \quad (3.5)$$

$$C = \frac{N}{(2 * K)} \quad (3.6)$$

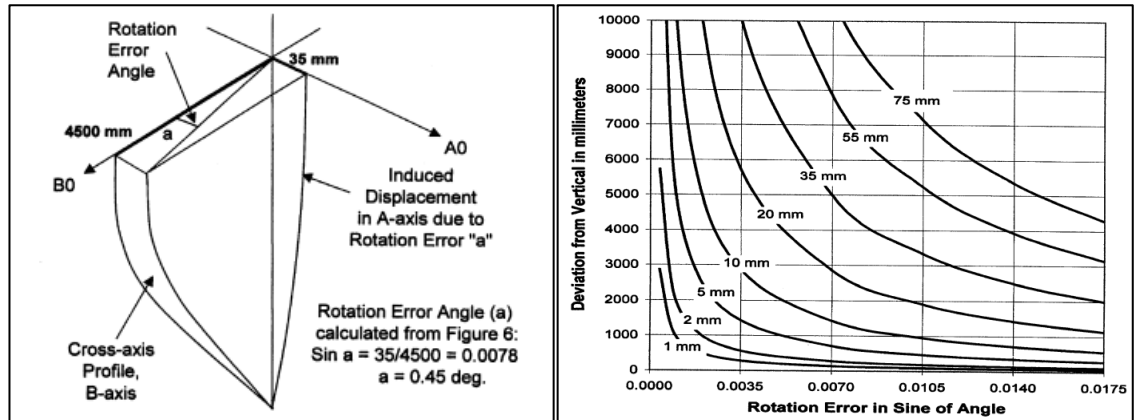
missä

bs	on ”bias-shift” eli korjaus per mittausväli
BSE	on kokonaisvirhe analysoidulla matkalla
N	on mittausvälien lukumäärä
C	on mittauskerroin (0,01 mm puolen metrin mittauksella)
K	on sondin kerroin (25000 metrisessä systeemissä)

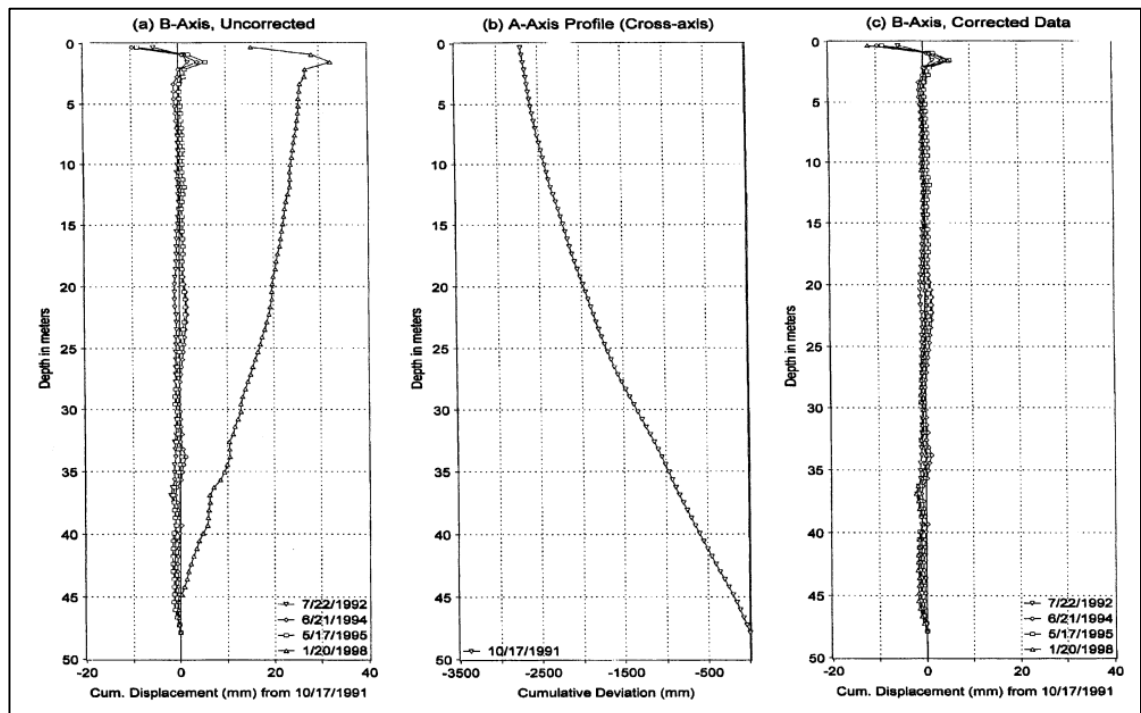


Kuva 3.6. ”Bias-shift” virhetyypin korjaus datasetistä (Mikkelsen 2003)

Kuvissa 3.7 ja 3.8 on esitettyä rotaatiosta johtuvaa virhettä. Kuvassa 3.7 on esitettyä virheellisestä kulman muutoksesta johtuva virhe sekä A ja B -akseleilla. Sama asia on esitetty kuvan 3.8 (a) ja (b) kohdassa. Kulman muutokset aksiaalisesti saattavat aiheuttaa kyseisen virheen. Rotaation korjaintoimeksi saadaan noin 0,01. Laskennan voi suorittaa kuvan 3.7 sinifunktion avulla. Kuvassa 3.8 (c) on vielä havainnollistettu korjattu taipumaprofiili. (Mikkelsen 2003)



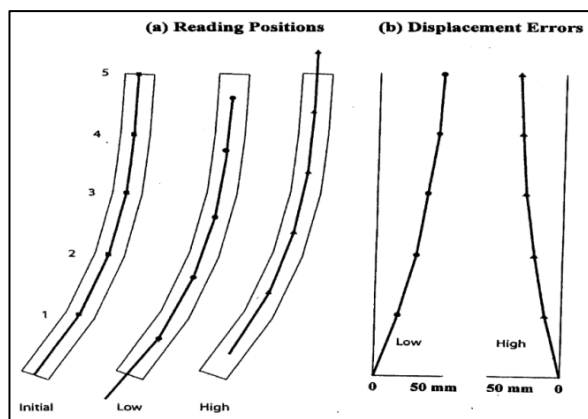
Kuva 3.7. Vasemmalla on virheellinen rotaation arvo ja rotaatio kulman laskemisen sinifunktiolla, sekä oikealla on virheellisillä rotaation arvoilla syntyvä virheen määrä. (Mikkelsen 2003)



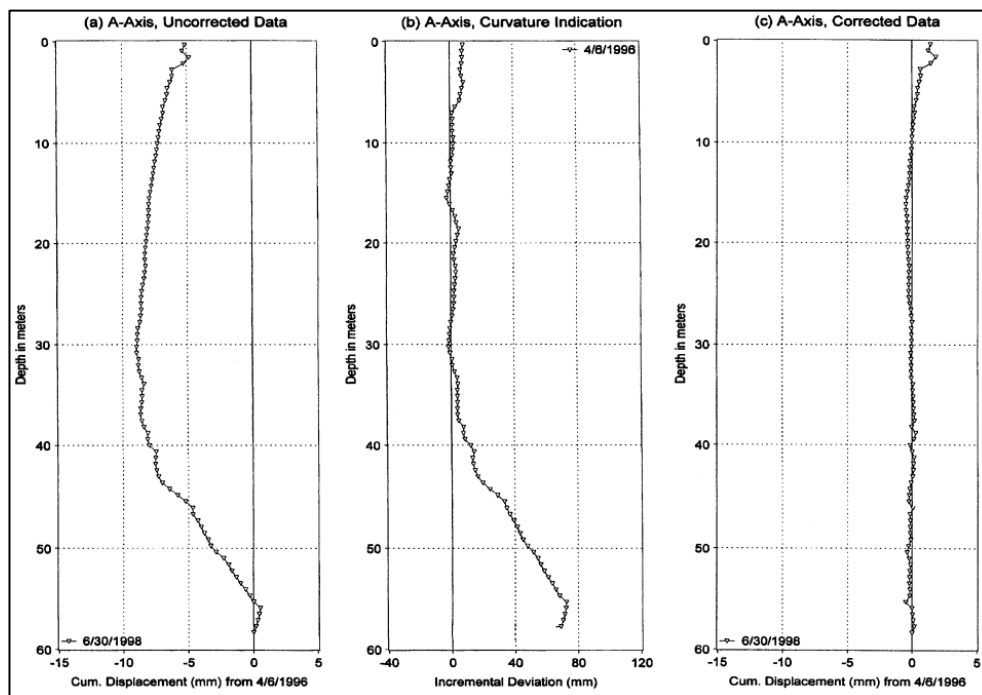
Kuva 3.8. Vasemmalla (a) on rotaatiivirheestä muodostunut siirtymäkuvaaja B-askelilla, keskellä (b) on A-A akselin mittauksen virheellinen deviaatio, ja oikealla (c) on korjattu data (Mikkelsen 2003)

Kuvissa 3.9 ja 3.10 on esitettyä syvyydestä johtuvaa virhettä. Muutokset putken aksiaalisessa pituudessa, kaapelin mitassa tai yläpään referenssimerkinnässä voivat tuottaa kuvan 3.10 esimerkin kaltaisia virheitä. Huomataan että kuvan 3.9 ”low” tyyppisellä mittauksella saataisiin liian suuria siirtymiä ja ”high” tyyppisellä mittauksella liian pieniä arvoja pitkässä taipuneessa putkessa. Kuvassa 3.10 on esitetty esimerkki kaapeli-pituuden vaikutuksesta.

Kohteen oli oletettu pysyvän lähes paikoillaan, jolloin alettiin epäillä mittauksen oikeellisuutta. Lopuksi todettiin, että kaapeli oli mittaus vaiheessa 60 mm lyhempi ja normaalisti kokonaispituus kaapelilla oli 60 metriä. Kuvassa 3.10 vasemmalla on korjaamaton datasetti, keskellä on kasautuva siirtymä ja oikealla on korjattu datasetti. (Mikkelsen 2003)



Kuva 3.9. Taipunut putki, jossa lukema suoritetaan voi tuottaa epärealistisia siirtymiä (Mikkelsen 2003)

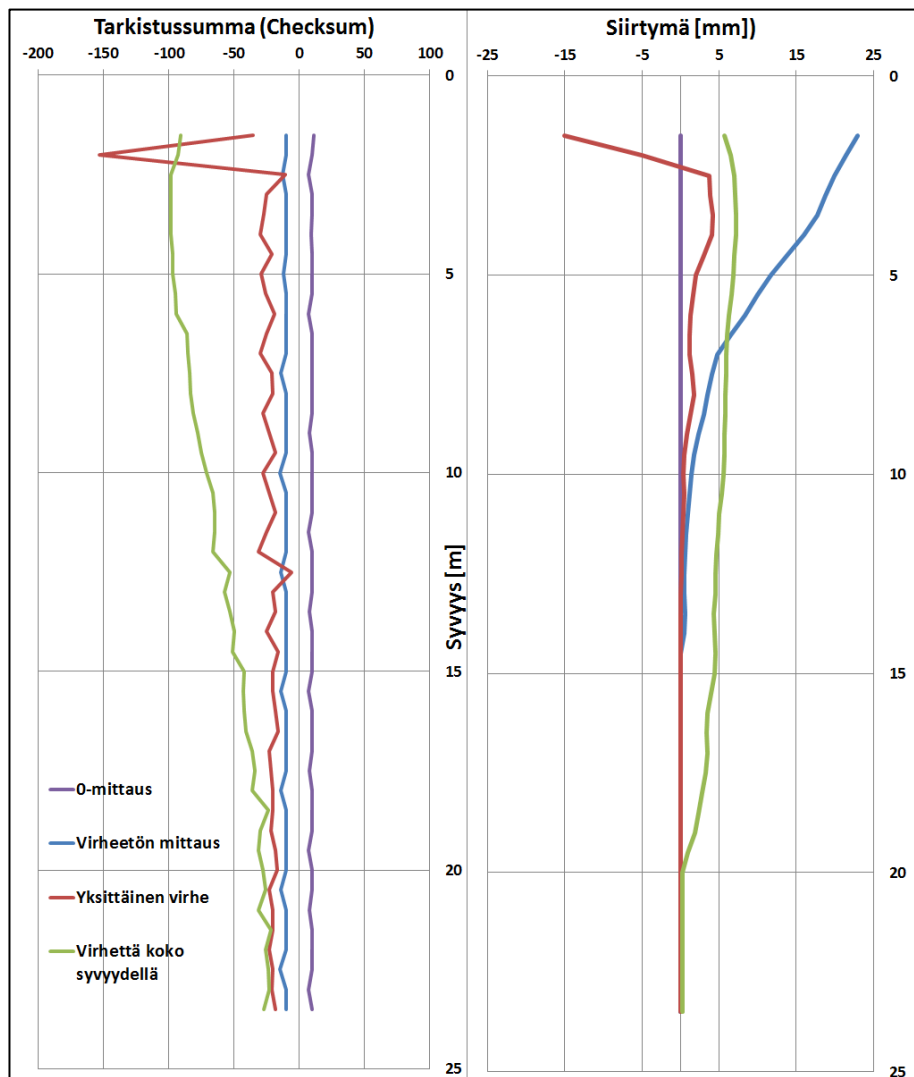


Kuva 3.10. Vasemmalla (a) on kaapelista johtuva virhe ja kohdassa (c) on korjattu profiili (Mikkelsen 2003)

3.6 Yhteenveto yleisimmistä virheistä

Yhteenvetona virheistä on vielä esitettyä seuraava kuva 3.11. Kuvassa vasemmalla on tarkistussumma ja oikealla datasta piirretty siirtymä. Tarkistussummassa violetilla piirrettyä käyrää voidaan pitää alkumittauksena tai vertauskohtana muille. Tällä käyrällä siis tulostuu lähes pystysuora viiva siirtymäkuvaajaan (0-mittaus). Tarkistussummassa sininen käyrä havainnollistaa tyypillistä lähes virheetöntä mittaustulosta. (Mikkelsen 2007)

Kuvassa 3.11 punaisen käyrän tarkistussummassa on selkeä piikki, joka aiheuttaa tuloksissa vääristymän. Tämän takia datojen profiileja tarkasteltaessa ensimmäisenä olisikin hyvä vilkaista yksittäisten mittausten tarkistussumma (Checksum). Kyseiset mittaukset voidaan tällöin jättää pois siirtymäprofiileista tai jos kyseessä on 0-mittaus, niin valitaan kohteelle uusi 0-mittausreferenssi onnistuneesta mittauskerrasta. Vihreä käyrä kuvassa on eräänlainen virhesumma, jossa summakäyrään ei synny piikkiä, vaan summa pienenee syvyyden mukaan putken alapäässä. Tässä tapauksessa virhe taas synnyttää tilanteessa liian suuria siirtymiä profiilin yläpäähän. (Mikkelsen 2007)

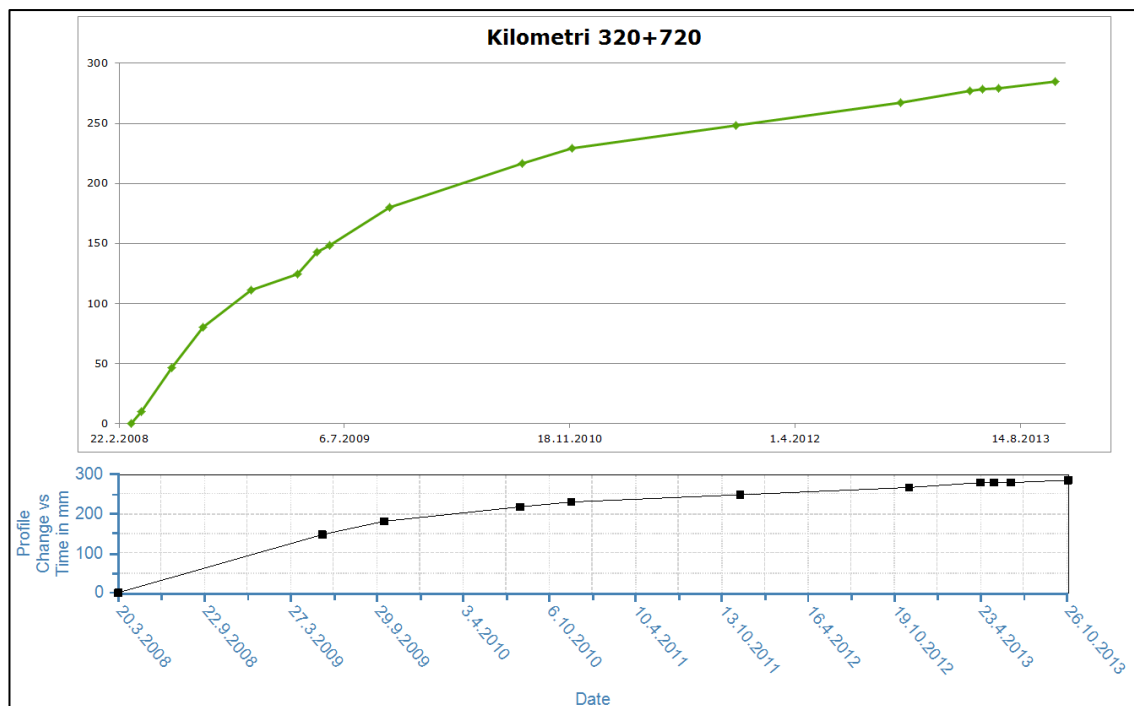


Kuva 3.11. Virheiden havainnollistuminen tarkistussummassa ja siirtymissä

3.7 Siirtymien nopeus

Siirtymän absoluuttista arvoa tärkeämpi on kuitenkin ymmärtää siirtymän nopeus verrattuna aikaan. Muutos voi olla joko hidastuvaa, kiihtyvää tai tasaisesti jatkuvaa. Oli siirtyminen sitten minkäläistä tahansa, pitää huomioon ottaa myös jo kerroksessa syntynyt siirtymä sekä leikkausvyöhykkeessä jäljellä oleva lujuuskapasiteetti. Leikkausvyöhykettä on vielä käsitelty myöhemmin kappaleessa 3.9 ja tutkittavien kohteiden johtopäätöksissä kappaleessa 5.4. Kun leikkausmuodonmuutokset ovat verrattain suuret aikaan nähden, niin esimerkiksi pehmeillä savilla voidaan mahdollinen sortuma saavuttaa hyvinkin pienillä siirtymillä. Kun tutkimuksessa tulkitaan leikkausvyöhykkeiden siirtymiä, niin tämä mainitaan silloin erikseen. Yleensä siirtymät on kuitenkin kohteista esitetty putken yläpäästä.

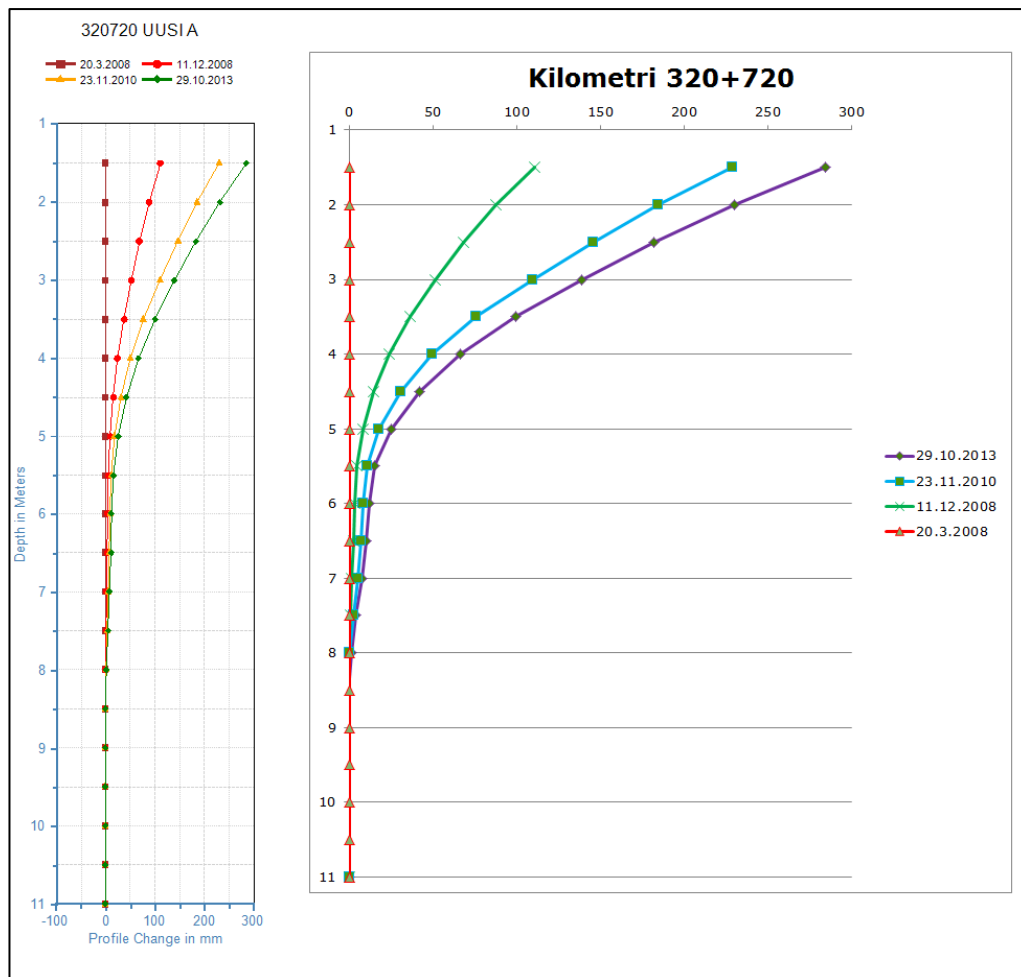
Siirtymän nopeuksia voidaan parhaiten havainnollistaa siirtymänä ajan funktiona kuvan 3.12 tapaan. Tällöin yleensä valitaan piste halutulta syvyydeltä sekä piirretään tästä siirtymä-aika kuvaaja. Huomataan, että kuvaajia tarkasteltaessa skaalaus on erittäin olennaista kohdentaa kunnolla, jolloin käyrän muoto ja kiihtyvyyden tulkinta on havainnollisempi. Nopeuden muutosta voidaan myös tarkastella numeraalisesti, mutta kuvaajat ovat huomattavasti käytännöllisempiä tutkimuksen kuvaajissa. (Stark & Choi 2007)



Kuva 3.12. Ylhäällä on havainnollistava kuva siirtymästä ajan funktiona eräässä painumakohteessa. Samasta kohteesta on piirretty kuvaaja siirtymistä ajan funktiona inklinometridataan soveltuvalla ohjelmalla alapuolella.

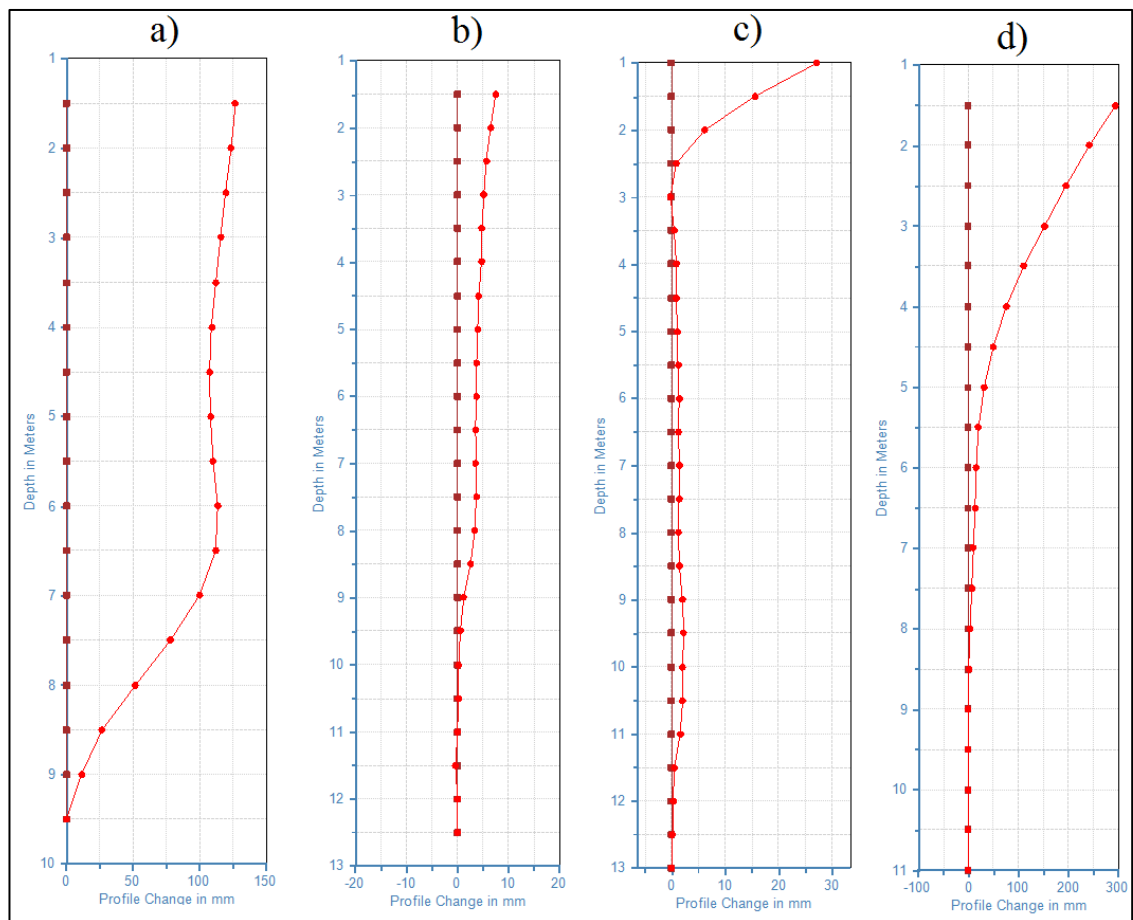
3.8 Siirtymän muoto ja tyypit

Siirtymän erityyppisten muotojen ja siirtymän syvyyden ymmärtäminen on tärkeää tulkitessa stabiliteettia ja kunnossapitoon liittyviä ongelmia. Usein siirtymiä saattavat aiheuttavaa rakentamisen aikaiset työt sekä painumat. Seuraavassa kuvassa 3.13 on esitetty painumista ja pengermateriaalin ”lakoamisesta” aiheutuvaa ”viuhkamaista” siirtymää. Tämän kaltaisessa profiilissa siirtymä syntyy lähellä maanpintaa ja pienenee syvemmällä. Suurilla painumista johtuvilla siirtymillä ongelmana onkin leikkausvyöhykkeellä tapahtuvien siirtymien erottaminen datasta. Käytännössä tällöin muutamien millien liikkeet leikkausvyöhykkeen kohdalla eivät erotu helposti satojen millien putken yläpään liikkeestä. Tällöin leikkautuvan kohdan tulkitsemiseen apuna voidaan manuaalinen inklinometreillä käyttää esimerkiksi kulman muutosta, jota taas voidaan vertailla stabiliteetilaskentojen arvioituihin liukupintoihin.



Kuva 3.13. Havainnollistava kuva ”viuhka” -tyyppisestä siirtymästä, joka johtuu pääosin tässä tilanteessa vastapenkereen painumista. Vasemmalla on erään tietokoneohjelmiston syöttämä tulos sekä oikealla taulukko-ohjelmalla itse skaalattu kuvaaja.

Kuvassa 3.14 on esitetty erityyppisiä inklinometriputkien taipumaprofiileja. Kohdassa (a) on voimakkaasti siirtynyt leikkautuva siirtymävyöhyke alhaalla. Kohdassa (b) on vastaavanlainen siirtymävyöhyke, mutta huomattavasti pienemmällä siirtymillä. Kohdassa (c) on yläpäästä suuresti taipunut putki. Kohdassa (d) on jo aiemmin esitetty viuhkamaisesti siirtynyt putki. Siirtymiä tulkittaessa täytyy putken muoto ottaa huomioon ja huomioida syyt muodon takana. Stabiileittiongelmia tarkasteltaessa kuitenkin huomio painottuu leikkausvyöhykkeen siirtymiin, kuvien (a) ja (b) kaltaisissa tapauksissa. Derivaattojen avulla päästään parhaiten käsiksi jatkossa syntyviin siirtymiin, ellei kohteessa tapahdu jotain nykyisestä tilanteesta poikkeavaa. Derivaatta tulee myös hyödylliseksi, kun käytettävissä on vain muutamia mittauksia.

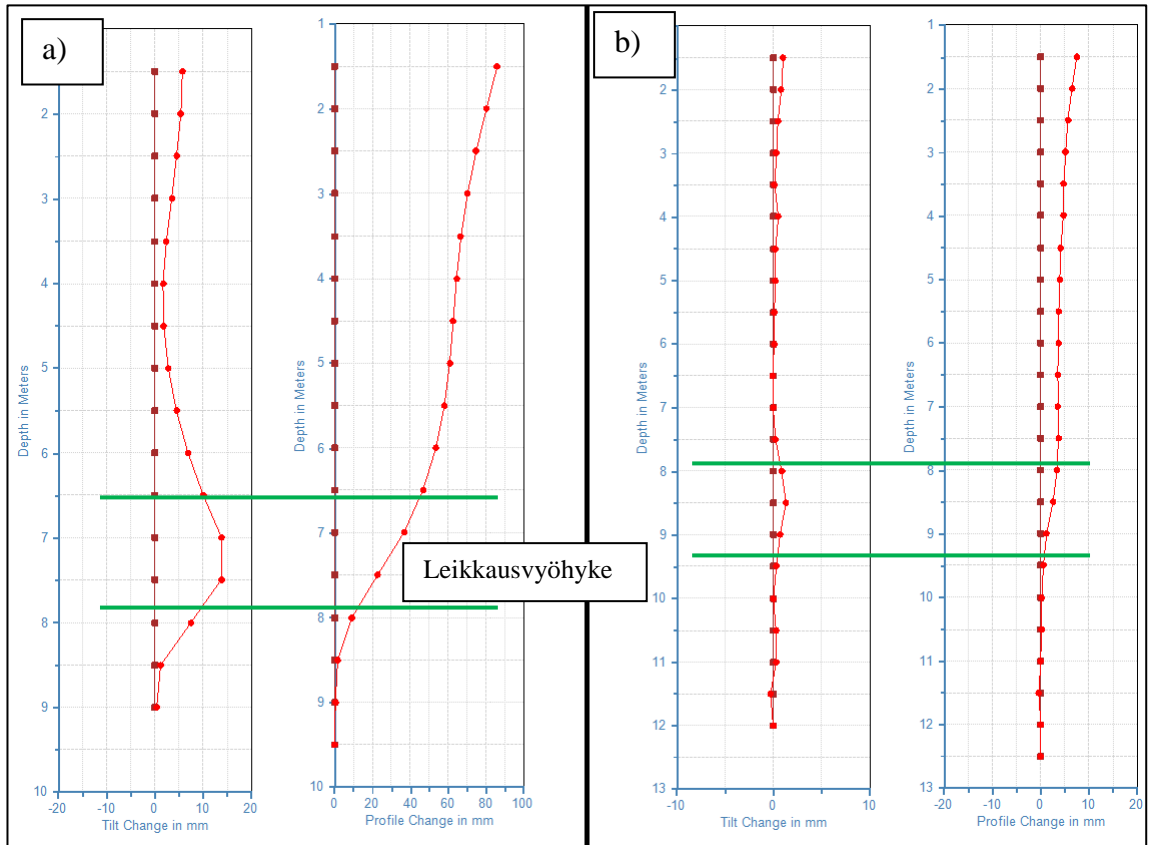


Kuva 3.14. Erityyppisiä inklinometrien muotoja, joita tutkittavassa datassa voidaan havaita. Kohdassa a) on nopeasti kehittynyt leikkausvyöhyke ja siirtynyt maamassa. Kohdassa b) on vastaavanlainen putkiprofiili pienemmällä siirtymillä, tässä on myös leikkausvyöhyke erotettavissa alhaalla. Kohdassa c) on pelkästään yläpäästä voimakkaasti taipunut putki. Kohdassa d) on ”viuhkamaisesti” siirtynyt putki, jossa siirtymät kasvavat merkittävästi lähellä maanpintaa.

3.9 Leikkausvyöhyke putkiprofiilissa

Murtovyöhykkeen eli murtopinnan paksuudella on suuri vaikutus leikkausvenymän paikalliseen maksimiarvoon kuvan 3.15 tapaan. Maan murtumiseen tarvittava muodonmuutos riippuu maalajin ominaisuuksista, ajasta sekä on erilainen liukupinnan eri kohdissa. Inklinometrin sisäputki on erittäin pehmeää ja hyvin taipuvaa, jolloin tällä ei pitäisi suurta merkitystä olla tulkittaessa leikkautuvan kohdan usein merkittävän pieniäkin siirtymiä.

Erilaisia sorrutuskokeiden tuloksia tulkittaessa leikkausvyöhykkeen voi visuaalisesti havaita. Kuitenkin pienemmällä siirtymällä leikkausvyöhykkeen sijaintia eli korkeusasemaa voidaan verrata vaikkapa laskettuun stabiliteettitarkasteluun ja tehdä päätelmiä, ollaanko tekemisissä stabiliteettiin liittyvien ongelmien kanssa vai tapahtuuko penkereessä muita siirtymiä aiheuttavia tekijöitä, kuten esimerkiksi painumat. Leikkausvyöhykkeen sijaintia parhaiten voi kuitenkin tulkita inklinometriputken inkliinaation muutoksesta, johon syntyy leikkausmuodonmuutosten kohdalla ”pullistuma”.



Kuva 3.15. Havainnollistava kuva inklinometriputkessa syntyvästä leikkausvyöhykkeestä. Kohdassa a) vasemmalla on kulmanmuutos ja oikealla siirtymät. Kohdassa b) on esitetty leikkausvyöhyke toisessa putkessa pienemmillä siirtymillä.

4 TUTKIMUSAINEISTO

4.1 Tutkimuksessa hyödynnettävät inklinometrit

Liikennevirastolla on inklinometrejä aktiivisessa seurannassa 98 kappaletta. Liitteessä 2 on esitetty käytössä olevat putket ratakartalla ja liitteessä on 3 on esitetty kohteet taulukossa. Aktiivinen seuranta manuaalisten putkien kohdalla tarkoittaa mittausta joko vuoden tai puolen vuoden välein. Suurin osa tutkimuksen kohteista on manuaalisesti mitattavia vaikka automaattikohteista voidaan mittauksia suorittaa tiheämmin. Liitteen 2 kartasta voidaan havaita, että suurin osa putkista sijaitsee Länsi-Suomessa, jossa myös on eniten ongelmia pehmeikköjen suhteen. Pääosa kohteista on rataosuuksilla Rauma – Tampere - Jyväskylä ja Tampere – Seinäjoki – Oulu. Osassa näissä kohteissa on myös tehty viimeaikaisia rakennustoimia kuten rakennettu vastapenkereitä ja stabiloitu maaperää radan alta ja vierestä. Näiden toimenpiteiden takia myös mittausdatassa on selkeitä indikaattoreita kyseisistä toimenpiteistä.

4.1.1 Turvekohteet

Seuraavassa taulukossa 4.1 on esitetty kaikki aktiivisessa seurannassa olevat turvekohteet. Näillä turvekohteilla on yhteisenä tekijänä viuhkamainen siirtymätyyppi. Tässä pääosin syynä ovat turpeen painumat ja penger materiaalin ”lakoaminen”, mitkä aiheuttavat siirtymää putken yläosiin. Kohteissa myös suoritetaan usein radan tuentaa eikä ratapenger myöskään ole tasainen pituus- ja poikkisuunnassa. Vastapengerkohteissa kyseessä ei yleensä olekaan stabiliteettiongelma vaan deformaatioihin liittyvä kunnosapito-ongelma.

Taulukko 4.1. Tutkimuksen turvekohteet (Hakala)

Turve kohteet (16)														
Pohjamaa			Lääni	RAISU rataosa	Rataosa	Km+m	Kohteen nimi	Sivumitta		Asennettu tai 0-mittaus (pvm/vuosi)	Viimeksi mitattu	Riskiluokka (I-V)	Siirtymän muoto	Viimeisin maksimi siirtymä
kuSa	Savi	Turve							m					
		x	L-S	003	Tpe-Sk	315+920	Tpe-Sk P86	vas	6	9.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	44
		x	L-S	003	Tpe-Sk	316+160	Tpe-Sk P86	vas	6	10.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	49
		x	L-S	003	Tpe-Sk	320+360	Tpe-Sk P90	oik	8	14.5.2007	28.10.2013	II	Viuhka	248
		x	L-S	003	Tpe-Sk	320+425	Tpe-Sk P90	oik	5	10.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	149
		x	L-S	003	Tpe-Sk	320+475	Tpe-Sk P90	vas	5	14.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	94
		x	L-S	003	Tpe-Sk	320+525	Tpe-Sk P90	oik	5	14.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	33
		x	L-S	003	Tpe-Sk	320+545	Tpe-Sk P90	oik	20	14.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	15
		x	L-S	003	Tpe-Sk	320+575	Tpe-Sk P90	vas	5	14.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	59
		x	L-S	003	Tpe-Sk	320+625	Tpe-Sk P90	oik	5	14.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	187
		x	L-S	003	Tpe-Sk	320+720	Tpe-Sk P90	oik	7,5	14.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	285
		x	I-S	005	Kv-Pm	267+596	Kotakorpi, P13	oik	10	19.1.2005	15.6.2012	I / II	Tasaisesti siirtynyt	5
		x	L-S	008	Mtv-Ela	600+740	P112	oik	4	8.12.2006	28.10.2013	I	Viuhka	20
		x	L-S	008	Kua-Tja	675+810		vas		17.6.2013	28.10.2013	I	Ei siirtymää	0
		x	L-S	008	Kua-Tja	675+820		oik		17.6.2013	28.10.2013	I	Ei siirtymää	2
		x	L-S	023	Hpk-Jy	330+740	Perälänsuo	vas	5,2					N/A
		x	L-S	023	Hpk-Jy	330+780	Perälänsuo	vas	5,2					N/A

4.1.2 Turve- & savikohteet

Seuraavassa taulukossa 4.2 on esitettyä turve ja savi kohteet. Kohteissa on usein tasaisella pohjamaan geometrialla noin 3-4 metrin turvekerros savikerrosten päällä. Näille kohteille on myös usein rakennettu vastapenkereitä sekä suoritettu massanvaihtoa ja massastabilointia. Taulukon 4.2 skaala on huomattavasti monimuotoisempi kuin aiemmin esiteltyssä turvetaulukossa 4.1. Taulukkoja ei ole päivitetty tutkimuksen edetessä ja ne ovatkin vain havainnollistuksena kohteiden yleisestä tilasta. Kuitenkin suurin osa taulukkojen siirtymistä johtuvat rakennustoimenpiteistä, mutta huomattavaa on että turpeella nämä siirtymät ovat paljon suurempia. Tässä vaiheessa vielä kohteiden jaottelu on suoritettu kohtuullisen nopeasti ja osaa kohteista tarkastellaankin tarkemmin vasta kappaleessa 5. Myöskään pohjatutkimuksista saatava tieto ei aina ole täysin varmaa, etenkin kun käytettävissä on vain muutamia kairauksia poikkileikkausten mukaisesti.

Taulukko 4.2. Turve- ja savikohteet (Hakala)

Turve ja savi kohteet (25)														
Pohjamaa			Lääni	RAISU rataosa	Rataosa	Km+m	Kohteen nimi	Sivumitta		Asennettu tai 0-mittaus (pvm/vuosi)	Viimeksi mitattu	Riskiluokka (I-V)	Siirtymän muoto	Viimeisin maksimi siirtymä [mm]
kuSa	Savi	Turve							m					
	x	x	L-S	003	Rii-Tpe	104+160	Riihimäki-Tampere	oik	3,1	30.11.2006	28.10.2013	I	Viuhkamainen	25
	x	x	L-S	003	Rii-Tpe	104+260	Riihimäki-Tampere	vas	3,1	30.11.2006	28.10.2013	I	Viuhkamainen	12
	x	x	L-S	003	Rii-Tpe	104+260	Riihimäki-Tampere	oik	3,1	30.11.2006	28.10.2013	I	Viuhkamainen	20
	x	x	L-S	003	Tpe-Sk	330+360	P-Louko P91	vas	7	10.5.2007	28.10.2013	I	Viuhka	76
	x	x	L-S	003	Tpe-Sk	330+600	P-Louko P91	vas	5	10.5.2007	28.10.2013	I	Yläpäässä pientä siirtymää	16
	x	x	L-S	003	Tpe-Sk	330+880	P-Louko P91	vas	5,5	10.5.2007	28.10.2013	I	Viuhkamainen	24
x	x	x	L-S	008	Sk-Rha	420+680	P2	vas	5,5	28.11.2006	28.10.2013	I	Viuhka	15
x	x	x	L-S	008	Sk-Rha	420+900	P3	vas	5,5	29.11.2006	28.10.2013	I	Tasaisesti syvyyden mukaan	89
x	x	x	L-S	008	Rha-Lp	437+100	P19a	vas	3,5	8.12.2006	18.6.2013	I	Viuhkamainen	6
x	x	x	L-S	008	Rha-Lp	438+250	P19b	vas	4,5	8.12.2006	18.6.2013	I	Viuhkamainen	7
x	x	x	L-S	008	Lp-Pnä	462+260	P33	oik	12	2.10.2008	18.6.2013	I	Ylhäällä siirtymiä	13
x	x	x	L-S	008	Lp-Pnä	462+310	P33	vas	12	26.9.2008	18.6.2013	I	Ylhäällä siirtymiä	20
x	x	x	L-S	008	Lp-Pnä	516+500	P67	vas	6	15.8.2011	18.6.2013	I	Ei siirtymiä	1
x	x	x	L-S	008	Lp-Pnä	516+580	P67	vas	6	15.8.2011	18.6.2013	I	Ei siirtymiä	2
x	x	x	L-S	008	Lp-Pnä	516+680	P67	vas	6	15.8.2011	18.6.2013	I	Ei siirtymiä	1
x	x	x	L-S	008	Kua-Tja	680+340		vas		17.6.2013	28.10.2013	I	Ei siirtymiä	2
x	x	x	L-S	008	Kua-Tja	680+340		oik		17.6.2013	28.10.2013	I	Ei siirtymiä	1
x	x	x	L-S	009	Tpe-Ov	205+900	P18	vas	10	15.11.2011	22.11.2013	I	Ylhäällä siirtymiä	5
x	x	x	L-S	009	Ov-Jsk	256+860	P71	oik	10	21.11.2011	22.11.2013	I	Viuhkamainen	14
x	x	x	L-S	066	Ov-Hpk	267+050	Koivionsuo, P19	oik	5			I / IV	Viuhka	110
x	x	x	L-S	066	Ov-Hpk	267+070	Koivionsuo, P19	oik	5			II / V	Viuhka	250
x	x	x	E-S	141	Hy-Kr	96+860	Katinhännänsuo	oik	4	14.2.2014				0
x	x	x	E-S	141	Hy-Kr	96+862	Katinhännänsuo	oik	8	13.2.2014				0
x	x	x	L-S	342	Kki-Rma	306+680	P15	vas	5	1.12.2011	25.11.2013	I	Ei siirtymiä	-3
x	x	x	L-S	342	Kki-Rma	307+480	P15	vas	10	2.12.2011	25.11.2013	I	Ylhäällä siirtymiä	13

4.1.3 Savikohteet

Seuraavassa taulukossa 4.3 on esiteltyä kaikki savikohteet. Savikohteista voidaan sanoa, että suuria siirtymiä sisältäviä kohteita ei ole paljon. Savissa on myös paljon vaihtelua orgaanisista savista silttisiin saviin. Taulukossa 4.4 on vielä esiteltyä lopetetut mittaukset tai tuhoutuneet putket. Näitä kohteita voidaan kuitenkin mahdollisesti hyödyntää tutkimuksessa pohdittaessa siirtymiä eri pohjamailla. Taulukot ovat muokattu lähtöaineistosta tutkimusta varten.

Taulukko 4.3. Savikohteet (Hakala)

Savi kohteet (55)														
Pohjamaa			Lääni	RAISU rataosa	Rataosa	Km+m	Kohteen nimi	Sivumitta		Asennettu tai 0-mittaus (pvm/vuosi)	Viimeksi mitattu	Riskiluokka (I-V)	Siirtymän muoto	Viimeisin maksimi siirtymä [mm]
kuSa	Savi	Turve							m					
			L-S	002	Lih-Kki	216+642	P4	oik	4	29.9.2010	22.11.2013	I	Ei siirtymä	3
x	x		L-S	002	Lih-Kki	218+345	Leukaluut	oik	5,5	4.12.2013		IV / V	Suurta massamaista siirtymää	120
x	x		L-S	002	Lih-Kki	218+400	Leukaluut	oik	3,6	26.11.2012	22.11.2013	I	Ei siirtymä	1
		x	L-S	002	Lih-Kki	220+616	P5a	oik	14,5	18.6.2012	23.11.2013	I	Ei siirtymä	2
		x	L-S	002	Lih-Kki	228+320	P7	oik	11	20.6.2012	23.11.2013	I	Viuhka	6
		x	L-S	002	Lih-Kki	228+750	P7a	oik	10	19.6.2012	23.11.2013	I	Ei siirtymä	4
		x	L-S	002	Lih-Kki	228+900	P7a	vas	6	19.6.2012	23.11.2013	I	Ei siirtymä	1
		x	L-S	002	Lih-Kki	228+950	P7a	vas	8	19.6.2012	23.11.2013	I	Ei siirtymä	2
		x	L-S	002	Lih-Kki	228+980	P7a	vas	10	19.6.2012	23.11.2013	I	Ei siirtymä	1
x	x		L-S	002	Lih-Kki	229+780	P8	vas	10	19.6.2012	23.11.2013	I	Ei siirtymä	0
x	x		L-S	002	Lih-Kki	230+220	P8	vas	9	20.6.2012	23.11.2013	I	Ei siirtymä	1
x	x		L-S	002	Lih-Kki	230+240	P8	oik	11	20.6.2012	23.11.2013	I	Tasaisesti syvyyden mukaan	3
x	x		L-S	002	Lih-Kki	240+060	P15	oik	14	1.6.2000	24.11.2013	I	Pientä siirtymää	6
x	x		L-S	002	Lih-Kki	240+060	P15	vas	7	3.4.2012	24.11.2013	I	Pientä siirtymää	8
		x	L-S	002	Lih-Kki	240+145	P15	oik	7,5	25.6.2012	24.11.2013	I	Ei siirtymä	2
		x	L-S	002	Lih-Kki	240+200	P15	oik	16	1.6.2000	23.11.2013	I	Pientä tasaista siirtymää	16
		x	L-S	002	Lih-Kki	240+202	P15	oik	7	29.3.2012	23.11.2013	I	Ei siirtymä	4
x	x		L-S	002	Lih-Kki	253+260	P21	oik	8	17.11.2011	24.11.2013	I	Keskeltä ja ylhäältä tapinut	3
x	x		L-S	002	Lih-Kki	255+540	P23	vas	5	6.9.2010	24.11.2013	I	Ei siirtymä	1
x	x		L-S	002	Lih-Kki	259+060	P25	vas	5	7.9.2010	24.11.2013	I	Ei siirtymä	3
x	x		L-S	002	Lih-Kki	267+460	P32	vas	5	17.11.2011	24.11.2013	I	Pientä siirtymää ylhäällä	8
x	x		L-S	002	Lih-Kki	268+180	P33	vas	5	3.12.2011	24.11.2013	I	Ei siirtymä	3
x	x		L-S	002	Lih-Kki	269+600	P35	vas	8	3.12.2011	24.11.2013	I	Ei siirtymä	3
x	x		L-S	002	Lih-Kki	270+460	P36	vas	15	3.12.2011	24.11.2013	I	Ei siirtymä	4
		x	L-S	002	Lih-Kki	273+000	P37	vas	5	3.12.2011	24.11.2013	I	Ei siirtymä	2
x	x		L-S	002	Lih-Kki	276+380	P38	vas	15	26.6.2012	24.11.2013	I	Ei siirtymä	1
x	x		L-S	002	Lih-Kki	280+000	P40	oik	6	8.9.2010	25.11.2013	I	Pientä siirtymää keskellä	4
x	x		L-S	002	Lih-Kki	283+237	P41	oik	5,5	27.6.2012	25.11.2013	I	Taipunut yläpäästä	4
x	x		L-S	002	Lih-Kki	283+363	P41	vas	4	27.9.2010	25.11.2013	I	Ei siirtymä	4
x	x		L-S	002	Kki-Harj	290+140	P6	oik	4	28.9.2010	25.11.2013	I	Pientä siirtymää	7
		x	L-S	003	Tpe-Sk	203+000	Tpe-Sk P12	oik	8	16.5.2007	20.5.2013	I	Pientä siirtymää yläpäässä	11
		x	L-S	003	Tpe-Sk	203+040	Tpe-Sk P12	oik	8	16.5.2007	20.5.2013	I	Ei siirtymä	4
x	x		E-S	006	Rii-Kvi	122+592	Tikkakallio	oik	3,1	15.10.2006	27.6.2013	I	Siirtynyt penkereeseen päin	8
x	x		L-S	008	Sk-Rha	429+725	P10	oik	20	11.8.2012	19.6.2013	I	Ei siirtymä	2
x	x		L-S	008	Sk-Rha	429+860	P10	oik	20	11.8.2012	19.6.2013	I	Ei siirtymä	7
x	x		L-S	008	Sk-Rha	430+140	P10	oik	20	11.8.2012	19.6.2013	I	Taipunut yläpäästä	4
x	x		L-S	008	Lp-Pnä	442+460	P22a	vas	6	1.10.2008	18.6.2013	I	Taipunut yläpäästä	17
x	x		L-S	008	Lp-Pnä	453+160	P26	oik	8	30.9.2008	18.6.2013	I	Viuhkamainen	23
x	x		L-S	008	Lp-Pnä	468+840	P35	vas	10	30.9.2008	18.6.2013	I	Ei siirtymä	5
x	x		L-S	008	Lp-Pnä	474+500	P38	vas	8	25.9.2008	18.6.2013	I	Tasaisesti syvyyden mukaan	16
x	x		L-S	008	Lp-Pnä	474+560	P38	vas	8	26.9.2008	18.6.2013	I	Viuhka	68
x	x		L-S	008	Lp-Pnä	480+760	P47	vas	8	25.9.2008	18.6.2013	I	Yläpäästä taipunut	18
x	x		L-S	008	Lp-Pnä	480+940	P47	oik	8	25.9.2008	18.6.2013	I	Ei siirtymä	3
		x	L-S	008	Tja-Lka	702+250	P162	vas	4	14.12.2011	28.10.2013	I	Yläpäästä taipunut	4
x	x		L-S	008	Tja-Lka	704+540	P165	oik	3,5	13.11.2011	28.10.2013	I	Ei siirtymä	3
x	x		L-S	009	Ov-Jsk	229+980	P40	vas			22.11.2013	I	Viuhkamainen	21
x	x		L-S	009	Ov-Jsk	287+200	P96	vas			22.11.2013	I	Ei siirtymä	0
x	x		L-S	342	Kki-Rma	296+680	P6	vas	5	22.10.2012	25.11.2013	I	Ei siirtymä	3
x	x		L-S	342	Kki-Rma	313+000	P20	oik	5	23.10.2012	25.11.2013	I	Ei siirtymä	4
x	x		L-S	342	Kki-Rma	321+320	P29	vas	5	25.10.2012	26.11.2013	I	Ei siirtymä	5
x	x		L-S	342	Kki-Rma	321+775	P30	oik	5,5	26.10.2012	26.11.2013	I	Tasaisesti syvyyden mukaan	9
		x	L-S	342	Kki-Rma	322+320	P31	vas	5	29.10.2012	26.11.2013	I	Ylhäällä siirtymä	8
x	x		L-S	342	Kki-Rma	323+250	P34	oik	5,5	30.12.2012	26.11.2013	I	Ylhäällä siirtymä	5
x	x		L-S	342	Kki-Rma	325+400	P35	vas	5	5.12.2011	25.11.2013	I	Ei siirtymä	1
x	x		L-S	342	Kki-Rma	326+940	P38	vas	5	31.10.2012	26.11.2013	I	Ei siirtymä	2

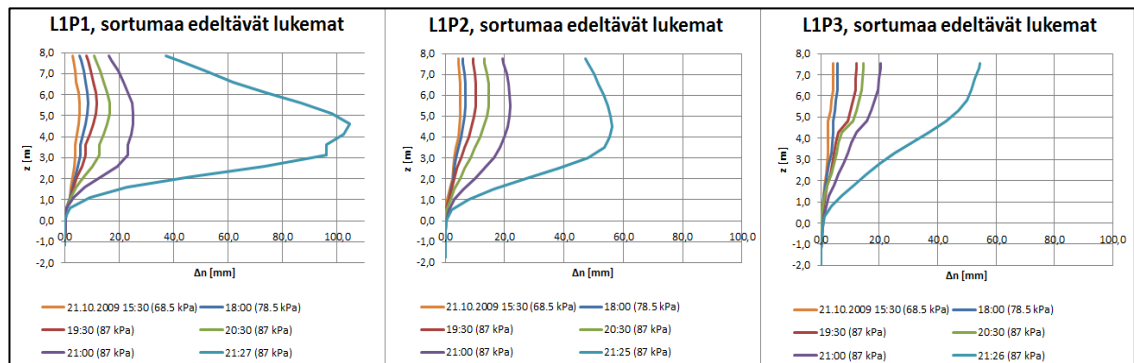
Taulukko 4.4. Lopetetut mittaukset tai tuhoutuneet inklinometriputket (Hakala)

Lopetetut mittaukset tai tuhoutuneet inklinometriputket (Hakala)														
Pohjamaa			Lääni	RAISU rataosa	Rataosa	Km+m	Kohteen nimi	Sivumitta		Asennettu tai 0-mittaus (pvm/vuosi)	Viimeksi mitattu	Riskiluokka (I-V)	Siirtymän muoto	Viimeisin maksimi siirtymä [mm]
KK	Savi	Turve							m					
	x	x	L-S	008	Lp-Pnä	503+380				14.12.2006	19.10.2011	I	Yläpäästä taipunut	15
	x	x	L-S	008	Kua-Tja	699+880				20.12.2006	20.10.2011	I	Yläpäästä taipunut	12
		x	L-S	003	Rii-Tpe	120+899	Hattula	vas	10	11.11.2009	20.5.2013	I	Viuhka	15
		x	L-S	008	Kua-Tja	689+700				20.12.2006	20.10.2011	I	Viuhkamainen	8
x	x		L-S	002	Lih-Kki	283+240	Pehmeikkö 41	vas	5,5	16.8.2012	15.5.2013	I	Ei siirtymä	2
x	x		L-S	003	Rii-Tpe	162+100	Lempäälä	vas	10		20.5.2013	I	Ei siirtymä	4
x	x		L-S	008	Sk-Rha	424+660	Pehmeikkö P7	vas	3,5	4.12.2006	17.10.2011	I	Yläpäästä taipunut	26
		x	L-S	008	Kpi-Kpy	528+640	Pehmeikkö P79	oik	5,5	16.6.2009	8.2.2011	I	Yläpäästä terävästi taipunut	18
		x	L-S	008	Kpi-Kpy	528+650	Pehmeikkö P79	vas	5,5	16.6.2009	8.2.2011	I	Yläpäästä taipunut	11
x	x		L-S	342	Kki-Rma	321+160	P15	vas	5	24.5.2012	25.11.2013	I	Ei siirtymä	0

4.2 Perniön sorrutuskoee

Perniön sorrutuskoosteesta voi lukea lisää Lehtosen LiVi:lle tekemästä julkaisusta (Lehtonen 2010). Tässä tutkimuksessa ei esitellä tarkemmin kyseisen tutkimuksen lähtökoh-
tia ja keskitytään lähinnä inklinometreihin sekä aikatekijöihin. Kuvassa 4.1 on mittalin-
jalta (L1) esitetty kolmen eri inklinometriputken tiedot. Huomioitavaa kuvassa on vaa-
kasiirtymän muoto eri vyöhykkeillä. Liukupinta ja leikkautuva vyöhyke ovat selvästi
havaittavissa kaikista. Passiivivyöhykkeellä liukupinta kulkee kuitenkin lähempänä
maanpintaa kuin aktiivivyöhykkeellä.

Kokeen nopean luonteen takia siirtymien arvoja on vaikea skaalata hitaisiin vuo-
sia kestäneisiin siirtymien arvoihin. Tätä on kuitenkin yritetty arvioida taulukossa 4.5.
Kuvassa 4.1 esitetyt siirtymät ovat syntyneet kohtuullisen suurella kuormalla, joka on
esitetty kuvassa 4.2. Tällöin stabiiliteettilaskelmilla voidaan taas arvioida liukupinnan
sijaintia ja näin tehdä ristitulkintaa datoista myöhemmin tutkittavissa inklinometrikoh-
teissa.



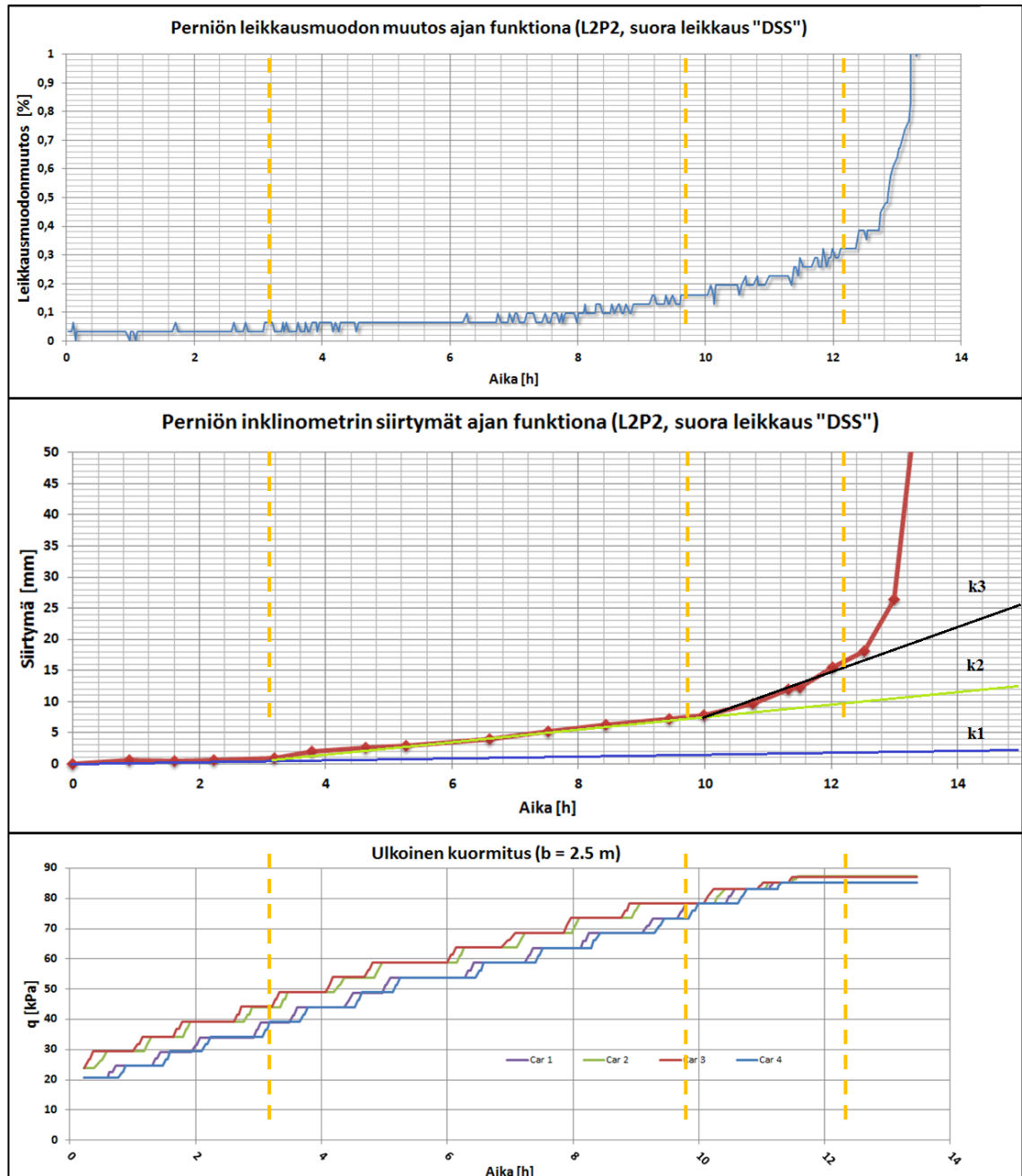
Kuva 4.1. Perniön mittalinjan (L1) inklinometrimittaukset (Lehtonen 2010)

Kuvassa 4.2 on esimerkki L2P2 inklinometrin maksimisiirtymän kehittymistä. Siirtymistä voidaan karkeasti erottaa noin 3-4 eri kulmakerrointa. Päivän 21.10.2009 alussa leikkausvyöhykkeellä syntyy siirtymiä noin 0-0,3 mm ensimmäisten neljän tunnin aikana taulukon 4.5 mukaisesti. Kuitenkin suurin osa tästäkin siirtymästä on vielä laitteiston mittaustarkkuudesta johtuvaa hajontaa. Leikkausvyöhykkeellä siirtymiä muutenkin on erittäin vähän ja ne alkavat kehittyä vasta noin 50-60 kPa:n kuormilla.

Kuitenkin putken maksimi siirtymät kehittyvät nopeammin ja aikaisemmin. Leikkausvyöhykkeellä siirtymät vastaavasti ovat todella pieniä ja tämä myös tulostuu pieninä leikkausmuodonmuutoksina kokeen aikana kuvan 4.2 tapaan. Perniön sorrutuskokeen leikkausmuodonmuutokset suorassa leikkauksessa ovat noin 0,2-0,4 % juuri ennen sortumaa. Tämä tieto toimii lähinnä vertauskohtana päivän mittaiselle pysähtyneen junan tapaukselle pehmeällä savella. Taulukossa 4.5 on yritetty skaalata kohteen mittauksia pidemmälle aikavälille, mutta sorrutuskokeen nopean luonteen takia ne toimivatkin vain havainnollistuksena.

LiVi:n inklinometriputket yleisesti ottaen ovat sijoitettu aktiivivyöhykkeen ja suoran leikkauksen lähimaastoon. Perniössä mitatut leikkausmuodonmuutokset ovat

kuitenkin todella alhaisia verrattuna pidemällä aikavälillä tehtyihin sorrustuskokeisiin. Tämä vahvistaa logiikka siitä, että saven muodonmuutoksen sietokyky on erittäin aikariippuvainen. Perniön saven sensitiivisyys vaihteli noin 30-50 välillä ollen pääosin noin 40 (Lehtonen 2010). Sensitiivisyydellä on suuri merkitys pieniin siirtymän arvoihin ennen sortumaa.



Kuva 4.2. Ylhäällä on leikkausmuodonmuutoksen ajallinen kehittyminen ennen sortumaa 21.10.2009 08:00 alkaen. Keskellä on vastaavasti maksimisiirtymien kehittyminen ajan funktiona (kuvassa kulmakertoimet vain havainnollistuksia, seuraavaan taulukkoon 4.5 arvot on laskettu tarkemmin). Alhaalla on vielä ulkoisen kuormituksen kehitys ajan funktiona (Lehtonen 2010).

Taulukko 4.5. Perniön siirtymien ja leikkausmuodonmuutoksen kehittyminen ajan kuluessa. Taulukossa on esitetty edellisen sivun tapaan siirtymänopeuksia. Siirtymät päivän alussa ovat todella pieniä ja siirtymien tulkitseminen datasta onkin todella haastavaa. Siirtymien kehittyminen pidemmälle aikavälille on skaalattu lineaarisesti.

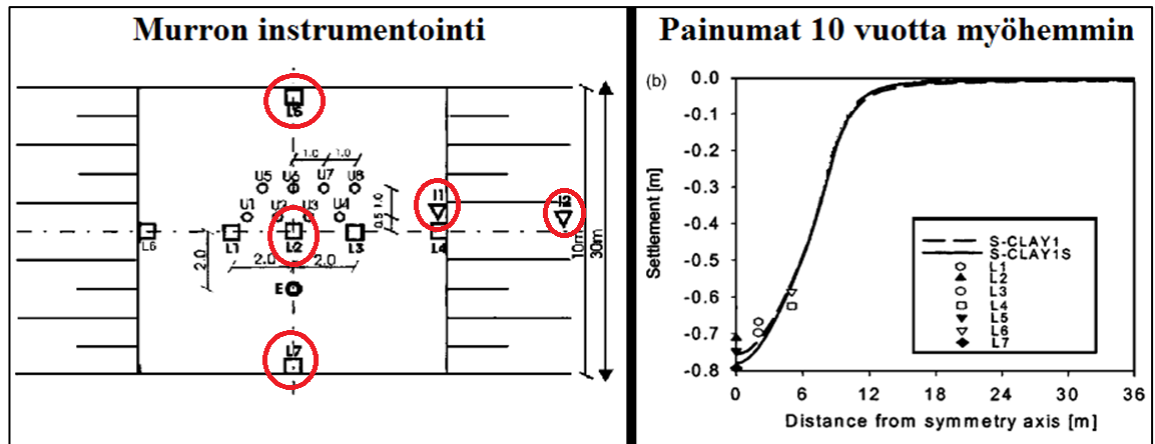
Kuorma q [kPa]	Kulma- kerroin	Aika [h]	Maksimi	Leikkausvyöhykkeellä	Siirtymää/ aikaväli	Leikkausmuodonmuutos	%/aikaväli
~0-40	k1	4	0,2	0,13	mm/h	0,01	%/h
			4	3,0	mm/d	0,3	%/d
			29	21,0	mm/viikko	2,1	%/viikko
			126	90,0	mm/kk	9	%/kk
~30-70	k2	5	0,8	0,16	mm/h	0,02	%/h
			20	3,8	mm/d	0,4	%/d
			138	27	mm/viikko	2,7	%/viikko
			590	115	mm/kk	12	%/kk
~60-80	k3	3	4,9	0,4	mm/h	0,04	%/h
			118	9,6	mm/d	1,0	%/d
			823	67	mm/viikko	7	%/viikko
			3528	288	mm/kk	29	%/kk

4.3 Murron stabiili koepenger

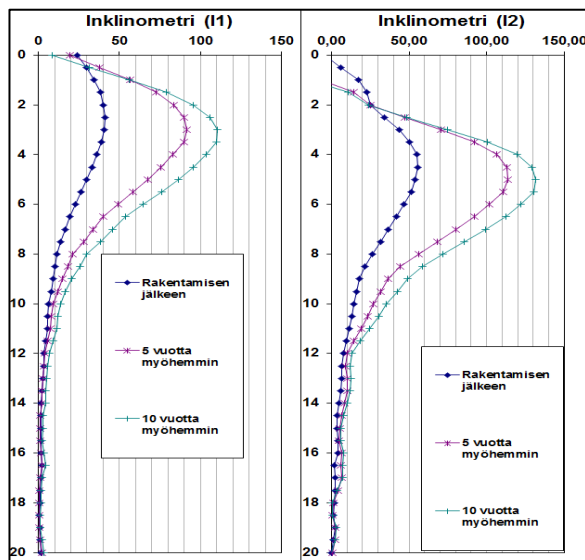
Murron kohde on savelle vuonna 1993 perustettu koepenger. Kohde on tarkoituksen mukaan valittu tutkimukseen, koska sen tiedetään olevan stabiili kohde. Tämän johdosta kohteesta on voitu suorittaa painuman ja sivusiirtymien tarkkailua. Kohteessa on ohut kuivakuori ja tämän alla pehmeää savea/silttiä noin 23 m ja lopuksi moreenia. Kohteen pehmeä maakerros on pääosin silttistä savea tai savista silttiä. Kohteesta on tehty tämän jälkeen useita laboratorio- ja kenttätutkimuksia. Saven suljettuleikkauslujuus vaihtelee noin 10...30 kPa välillä. Murron koepenger on 2 metriä korkea, 30 metriä pitkä sekä 10 metriä leveä. Savikerros on pääosin normaalikonsolidoitunut. (Karstunen et al. 2005)

Kuvassa 4.3 vasemmalla on esitetty testikenttään asennetut mittauslaitteet ja oikealla kohteessa syntyneet painumat 10 vuotta rakentamisen jälkeen. Kuvassa 4.4 vasemmalla on esitetty penkereen päälle asennetun inklinometrin (I1) siirtymät ja oikealla vastaavasti inklinometrin (I2) mitatut siirtymät. Inklinometri (I2) on asennettu penkereen juureen ja vastaa hyvin tämän työn ratapenkereiden viereen asennettuja putkia.

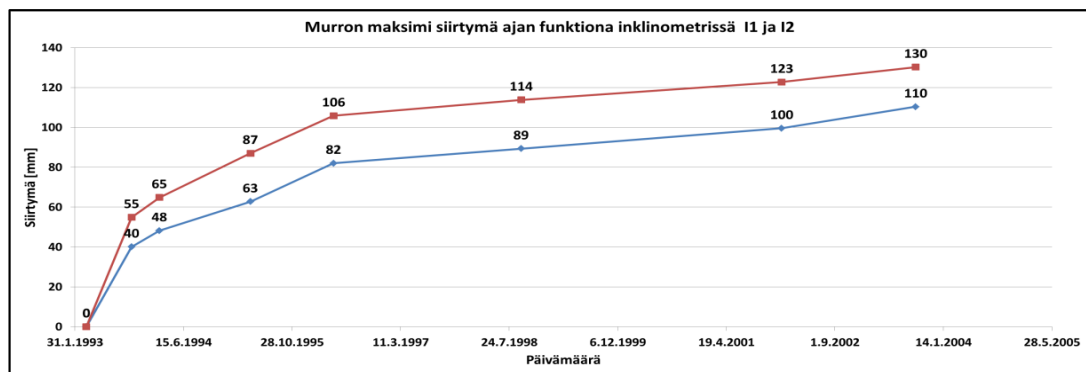
Kymmenessä vuodessa siirtymiä on syntynyt noin 110 mm penkereen vieressä (I1) ja noin 130 mm penkereen reunalla (I2). Leroueil et al. (1990) esittää, että sivusiirtymien suhde painumaan on noin 0,15-kertainen rakentamisen jälkeen. Tämä toteutuu Murron penkereessä kuvan 4.6 mukaan hyvin. Kuvasta myös huomataan, että kehnomilla stabiliteetin arvoilla sivusiirtymien kehittyminen olisi aluksi suurempaa vastaavilla pengerkorkeuksilla. Turvekohteilla vastaavasti sivusiirtymiä saattaa kertyä huomattavasti enemmän johtuen turpeen painuma-ominaisuuksista. Leroueil et al. (1990) esityksen mukaisesti pehmeälle savelle rakennetulla penkereellä, jolla kokonaisvarmuus on hieman alle 1,3, sivusiirtymiä kertyisi yli 100 mm samassa ajassa kuin painumia olisi kertynyt 400 mm heti rakentamisen jälkeen. Tällöin sivusiirtymien suhde painumiin olisi noin 0,4-kertainen ensimmäisen mittausvuoden aikana. (Leroueil et al. 1990)



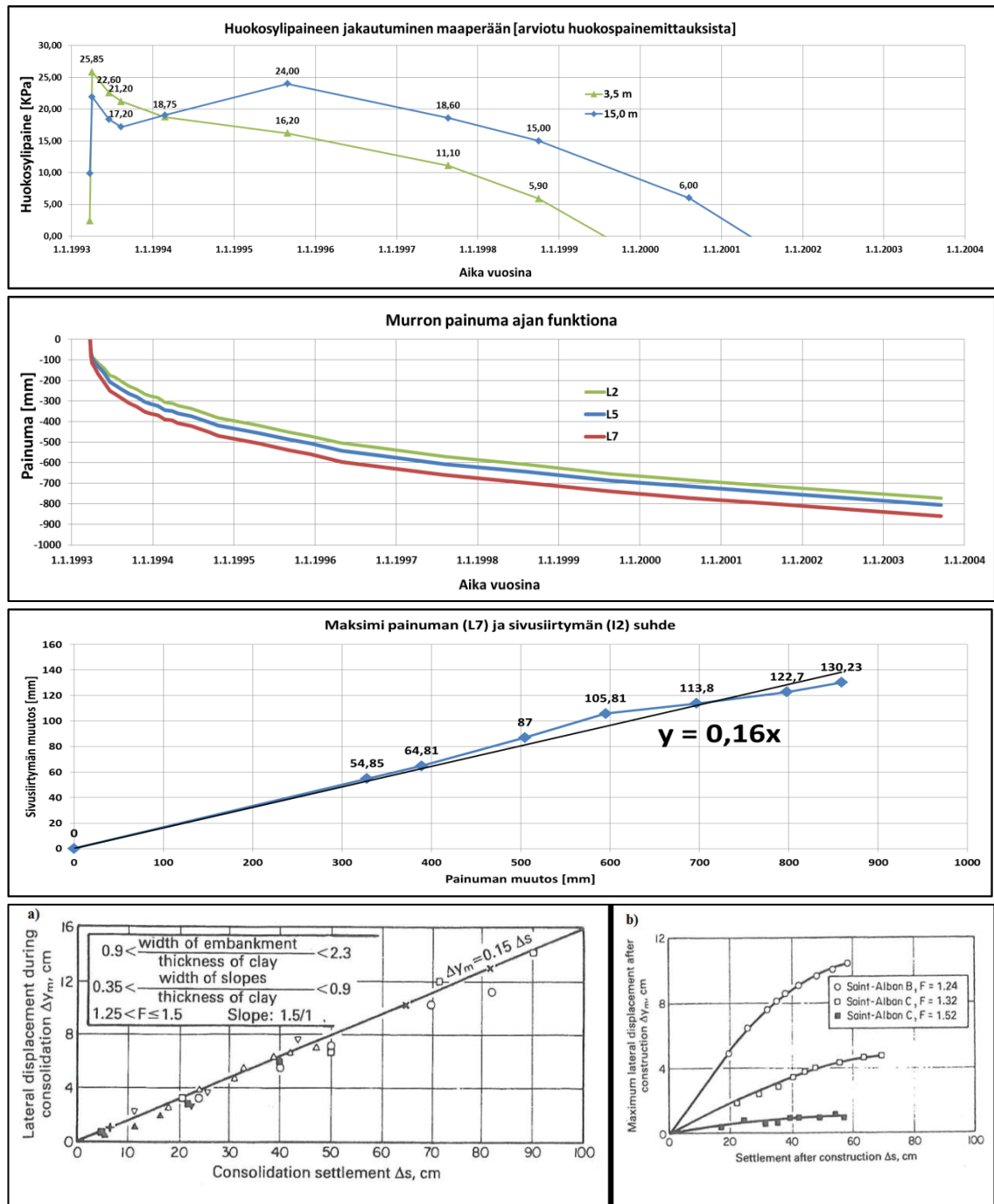
Kuva 4.3. Vasemmalla on kohteen instrumentointi ja oikealla on sekä mitatut että simuloitujen painumat. Kuvaan on ympyröity inklinometrit (I1 & I2) sekä painumalevyt (L2, L5 & L7). (Karstunen et al. 2005)



Kuva 4.4. Vasemmalla sivusiirtymät tien reunasta ja oikealla penkereen reunalta (Koskinen)



Kuva 4.5. Murren inklinometrin siirtymät ajan funktiona (Koskinen). Maksimisiirtymänopeus inklinometrissä (I1) on ensimmäisen vuoden aikana noin 50 mm/vuodessa, seuraavien kahden vuoden aikana noin 15 mm/vuodessa ja lopussa (7 vuoden päästä) noin 3-4 mm/vuodessa.



Kuva 4.6. Ylimpänä on arvio Murron ylihuokosvedenpaineiden jakautumisesta sekä painumat penkereen keskilinjalta (Koskinen). Keskellä on esitetty painuman ja sivusiirtymän suhde. Alhaalla vasemmalla (a) on (Leroueil et al. 1990) esittämä sivusiirtymän ja painuman suhde pehmeillä savilla ja oikealla (b) on eri stabiliteetin arvoilla mitattuja painuman ja sivusiirtymän suhteita.

Heikommilla vakavuuksilla sivusiirtymiä kertyy heti rakentamisen jälkeen huomattavasti enemmän verrattuna painumaan. Kokonaisvarmuuden ollessa noin 1,3-1,5, sivusiirtymiä suhteessa painumaan kertyy noin 0,05-0,15 kertaisesti, kun taas vastaavasti alle 1,3 varmuudella tämä suhdeluku voi olla noin 0,25 tai enemmän. Turpeella suhdeluvut ovat todennäköisesti hieman erisuuret, mutta sama logiikka todennäköisesti

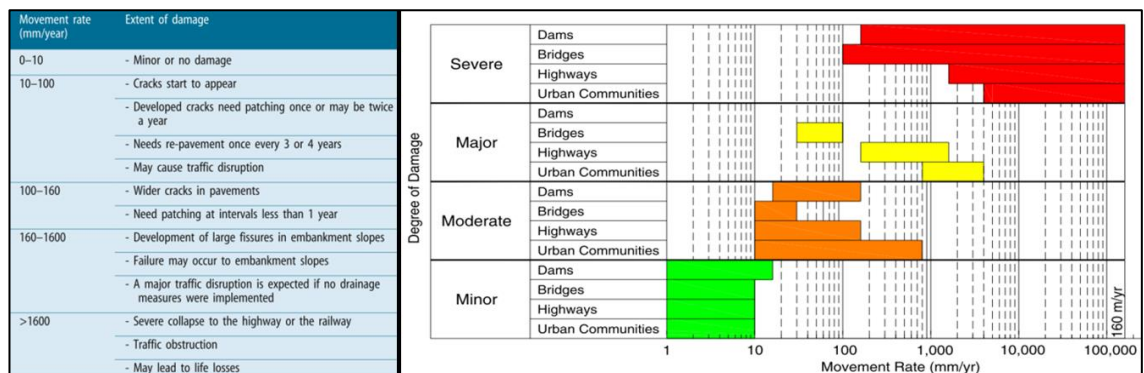
on hyödynnettävissä. Tämän tiedon avulla myös päästään paremmin käsiksi kohteen vakavuuteen, kun putkia on yleensä asennettu samalle kohteelle useampi kuin yksi. Tällöin esimerkiksi vastapengerkohteissa samalla etäisyydellä olevien putkien erisuuruiset viuhkamaiset siirtymät voivat indikoida heikommasta stabiliteetista. Teoriassa vastapenkereet kuitenkin mitoitetaan yli 1,5 varmuuteen. Ongelmana myös on, että putket ovat yleensä penkereen reunalla eivätkä vastapenkereen reunalla.

4.4 Ulkomaiset inlinometrimittaukset

4.4.1 Yleistä tilastointia ulkomaisista kohteista

Ulkomailla on erilaisia sorrutuskohteita suoritettu paljon. Näissä kohteissa yleisesti sorrutus on suoritettu ajallisesti nopeasti, joko päivien tai viikkojen sisällä. Tuloksista kuitenkin voidaan hyödyntää siirtymän muoto sekä ajallinen kehittyminen. Olennaista ovat myös syntyvät leikkausmuodonmuutokset ja leikkausvyöhykkeen siirtymät. Ulkomaisista lähteistä löytyy myös pohdintaa siirtymien muutosnopeudesta esimerkiksi maanvyörymien tulkinnessa erilaisissa pohjamaaolosuhteissa.

Seuraavassa kuvassa 4.7 on esitetty erään tutkimuksen tilastointia siirtymistä ja näiden seurauksista. Kuvan 4.7 lähteessä on käytetty myös muita siirtymien mittaustekniikoita, mutta pääosin inklinometrejä (58% datasta). Kyseisessä tutkimuksessa on maanvyörymien siirtymien pääaiheuttajaksi muodostunut vesisateet. Muita aiheuttajia ovat muun muassa ihmisen toimintaan liittyvät syyt, veden virtaukset ja lumen sulaminen. Seuraavan kuvan arvot eivät toimi pehmeille saville indikaattoreina sortumasta, mutta antavat yleisluontoista kuvaa siirtymien suurusluokasta eri pohjamaaolosuhteissa. Huomattavaa on, että noin 10-100 mm/vuosi siirtymillä kuvan 4.7 tiekohteissa on alkanut syntymään kunnossapitoon liittyviä ongelmia, mikä on hyvin linjassa myös tämän tutkimuksen ratapenger kohteiden kanssa. Näin suurilla siirtymillä kuitenkin leikkausvyöhykkeen osalta oltaisiin jo mahdollisesti sortumassa. (Mansour et al. 2010)



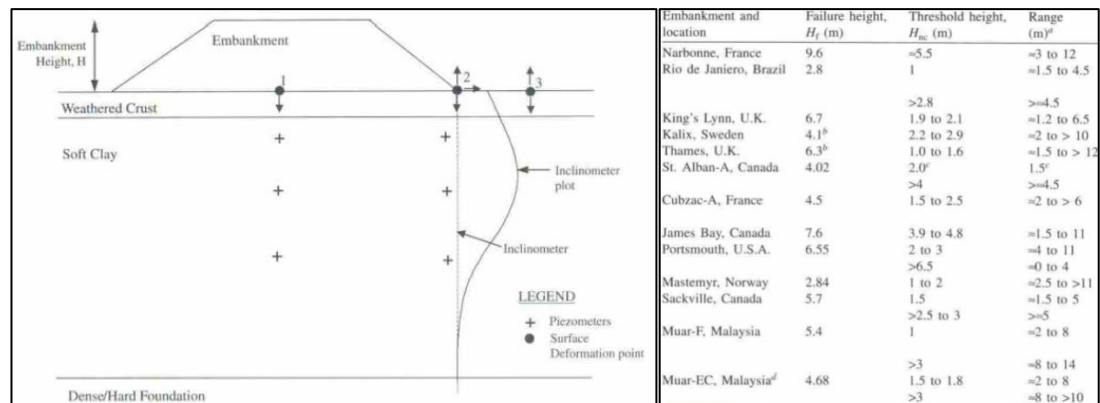
Kuva 4.7. Vasemmalla on esitetty maan siirtymiä (mm/vuosi) ja näitä vastaavat vauriot rakenteissa ja infrastruktuurissa. Oikealla puolestaan on taulukoitu karkeasti edellä mainittua. Huomataan, että noin 10-100 mm/vuosi siirtymillä alkaa syntymään selkeitä kunnossapitoon liittyviä ongelmia. Nämä siirtymät eivät sovellu kuitenkaan leikkausvyöhykkeen siirtymien tarkasteluun. (Mansour et al. 2010)

4.4.2 Siirtymät penkereen vaiheittainrakentamisessa

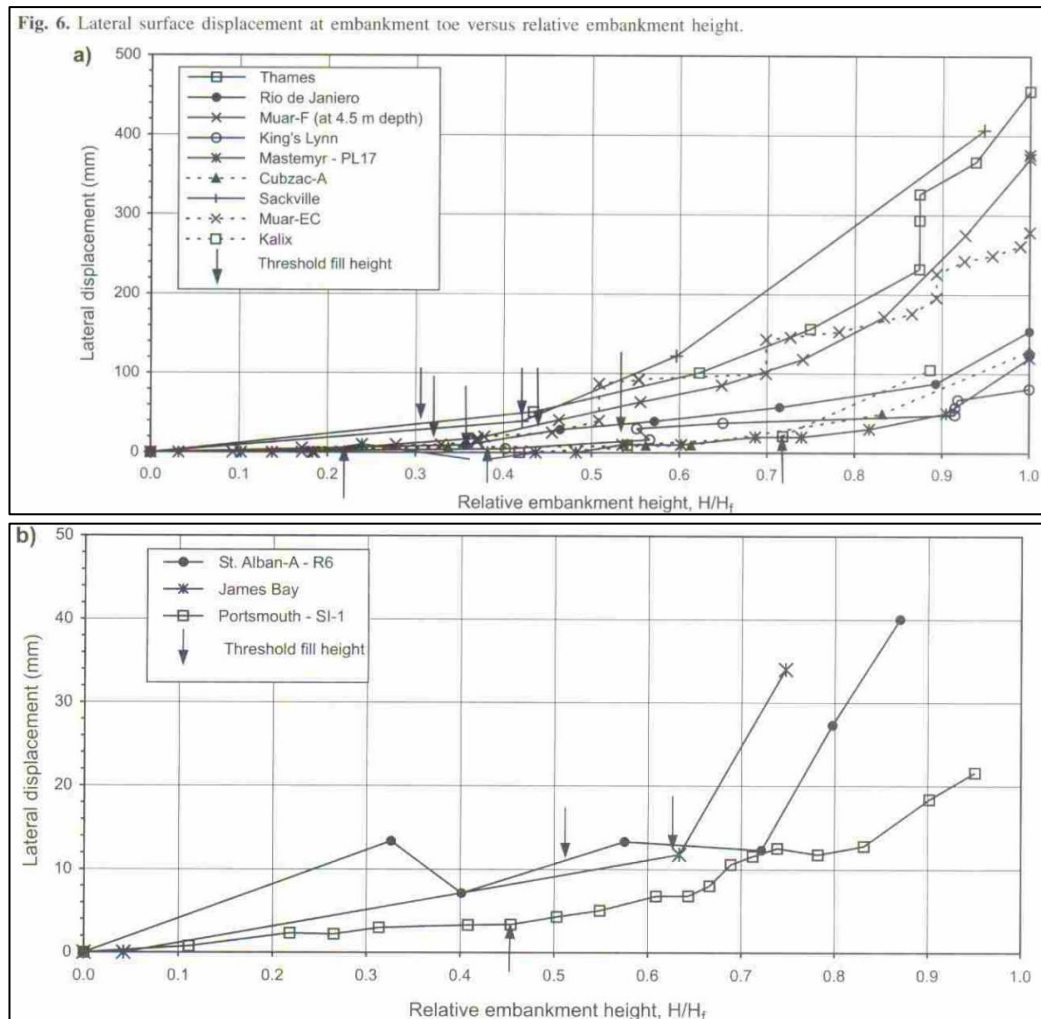
Erilaisten pengerten korkeuksia ja näiden stabiiliteettia sekä käyttäytymistä tutkittiin 13 eri kohteessa. Kaikki kohteet on rakennettu erityyppisille savikoille ja silteille. Kohteissa pengerkorkeutta kasvatettiin progressiivisesti kunnes saavutettiin sortuma. Kohteista mitattiin muitakin asioita kuin siirtymiä, kuten huokosvedenylipaineita ja painumaa. Tässä kuitenkin keskitytään siirtymiin ja pengerkorkeuden yhteyteen. Tutkimuksen penkereet sortuivat noin 2,8 - 9,6 metrin pengerkorkeuksilla. (Hunter & Fell 2003)

Huomattavaa tutkimuksessa oli, että saven tyyppi vaikuttaa sortuman syntymiseen sekä tämä myös on havaittavissa siirtymien suurusluokassa. Etenkin sensitiivisillä ja vähän plastisilla savilla siirtymiä ennen sortumaa ei juuri syntynyt. Esimerkiksi yhdessä kohteista sivusiirtymiä oli kertynyt vain noin 10-15 mm ennen sortumaa. Perniössä vastaavasti maksimisiirtymiä oli noin 20 mm juuri ennen sortumaa. Kuitenkin 11 kohteessa sivusiirtymä toimi hyvänä indikaattorina sortuman kehittymiselle. Kuvassa 4.8 on havainnollistava esimerkki kaikkiin kohteisiin asennetuista instrumenteista ja poikkileikkauksesta. Pengerrysnopeus kohteissa oli noin 0,02-0,1 metriä/päivässä. (Hunter & Fell 2003)

Kuvassa 4.9 keskellä ja alhaalla on esitettyä kohteista pengerkorkeuden kasvatamisen ja siirtymän yhteys. H_f (failure height) tarkoittaa kuvissa sortumakorkeutta. Rakentamisen lopettamisen jälkeen aikaa sortumaan yleisesti oli yhdestä päivästä kuu-kauteen. Tarkasteltaessa tutkimuksen kaikkia siirtymiä, voidaan todeta, että hieman ennen sortumaa (noin 70-90% penkereen sortumakorkeudesta) liikutaan noin 10-200 mm välillä, joista suurin osa välillä 20-100 mm. Tämän jälkeen usein siirtymät kasvavat nopeasti useilla kymmenillä milleillä juuri ennen sortumaa. Kuitenkin jo 30-60 % relativisella pengerkorkeudella voidaan havaita selvää siirtymänopeuden kiihtymistä. Todennäköisesti suuri vaihtelu siirtymien välillä johtuu saven/siltin myötölujittumisominaisuuksista, sensitiivisyydestä sekä myös aikatekijöistä. Toki myös huokosvedenpainneiden kehittymisellä ja pengerkorkeudella on vaikutusta. Leikkautuvan kohdan siirtymiä on myöhemmin arvioitu tutkittavien kohteiden yhteenvetokappaleessa 5.4. (Hunter & Fell 2003)



Kuva 4.8. Kohteiden tyyppileikkaus esimerkki (Hunter & Fell 2003)



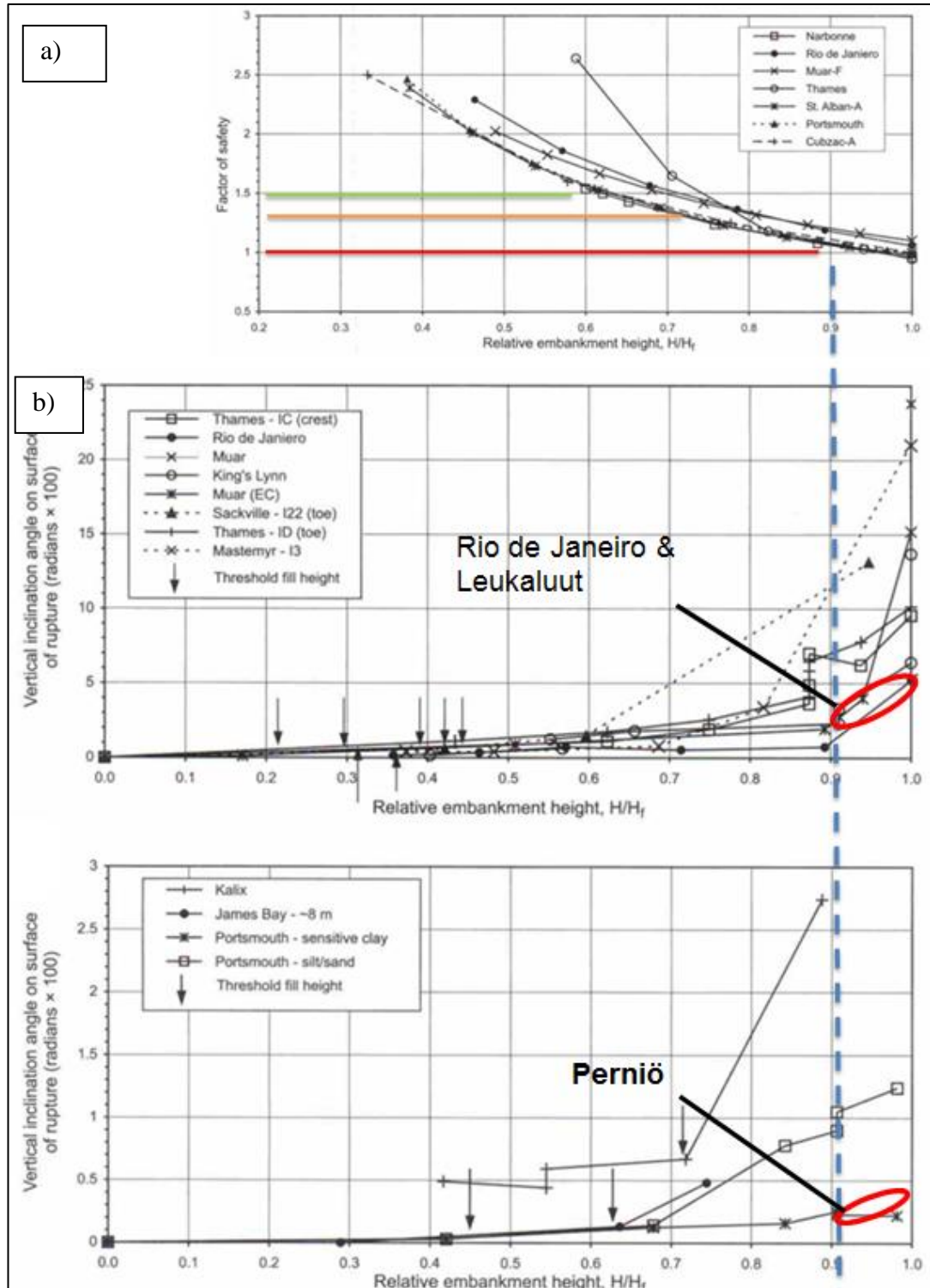
Kuva 4.9. Kohteiden pengerkorkeuden ja siirtymien suhde (Hunter & Fell 2003)

Sivusiirtymistä lähellä maanpintaa penkereen juuressa: (Hunter & Fell 2003)

- Suurimmassa osassa kohteista kynnyskorkeuden saavutettua (H_{nc}) alkoivat sivusiirtymät kehittyä kiihtyvästi. Tämä oli nähtävissä myös vasteena huokospainemittauksissa.
- Huomattava siirtymänopeuden kasvu alkaa noin 70-90 % kohdalla sortumapengerkorkeudesta. Tämä tila on jo selvä indikaattori tulevasta sortumasta. Kuitenkin kun katsotaan kuvaa 4.9, niin on huomattavissa että noin 30-60 % kohdalla on jo kiihtyvää siirtymänopeuden kasvua.
- Tutkimuksen savet käsittävät sensitiivisistä vähän sensitiivisiin sekä vähän plastisista erittäin plastisiin saviin. Ainoastaan yhdessä sorrutuskokeessa siirtymä ei toiminut sortuman indikaattorina.

Seuraavassa kuvassa 4.10 on kohdassa (a) esitetty edellisissä sorrutuskokeissa arvioitua kokonaisvarmuuden kehittymistä pengerkorkeuden suhteen ja kohdassa (b) vielä erikseen kohteissa mitatut leikkausmuodonmuutokset. Kuvasta voidaan arvioida karkeasti, että vasta alle 1,3 kokonaisvarmuuksilla sorrutuskokeissa alkaa muodostua merkittäviä leikkausmuodonmuutoksia. Erittäin sensitiivisillä savilla menettely ei ole yhtä pätevä.

Sorutuskokeissa mitattujen leikkausmuodonmuutosten skaala on todella suuri eli noin 0,2...10 %. Käytännössä tällöin leikkautuvalla vyöhykkeellä tapahtuvia siirtymiä juuri ennen sortumaa on vastaavasti noin 2...100 mm. Kuvaan on vielä erikseen lisätty tämän tutkimuksen kannalta merkittävimmät kohteet.

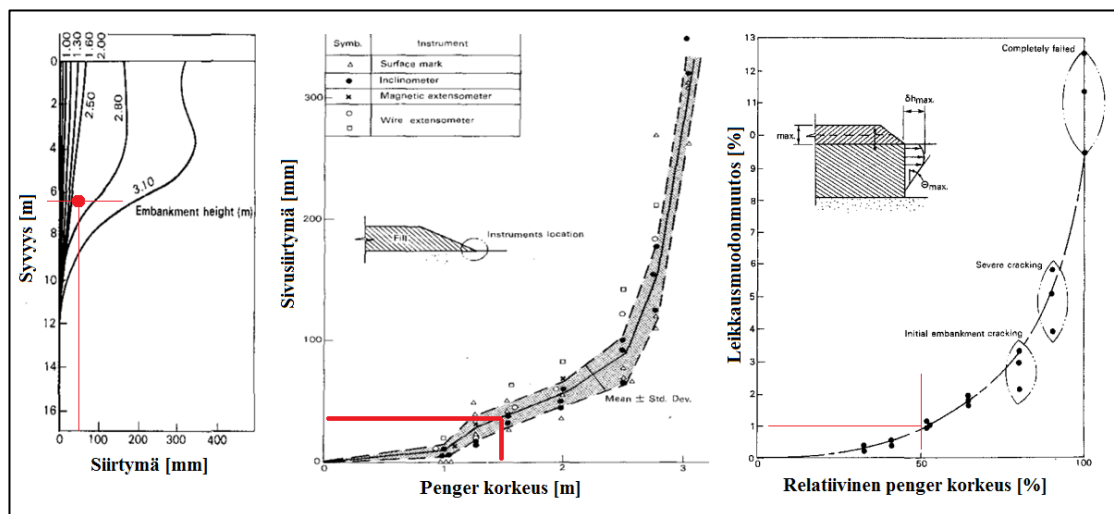


Kuva 4.10. Kokonaisvarmuuden kehittyminen suhteessa pengerkorkeuteen sekä leikkausmuodonmuutoksiin. Leikkausmuodonmuutoksia on käsitelty myöhemmin kappaleessa 5.4. (Hunter & Fell 2003)

4.4.3 Brasiliassa suoritettu sorrutuskoee

Edellisen kappaleen tutkimusten joukosta yhtenä esimerkkinä on Brasiliassa Rio de Janeirossa suoritettu sorrutuskoee. Kohteen penger rakennettiin pehmeälle savelle, jossa suljettu leikkauslujuus oli noin 4-6 kPa kahden metrin syvyydessä ja kasvoi noin 0,5-1 kPa/m. Penger on rakennettu kohtuullisen nopealla tahdilla eli noin 0,1 m/päivässä. Kuitenkin tässäkin kohteessa, kun katsotaan kuvaa 4.11, niin huomataan selvästi useat eri progressiiviset vaiheet siirtymän kehittämisessä. Ongelmana tämän kaltaisissa nopeissa sorrutuskoeeissa on kuitenkin leikkausvyöhykkeen havaitseminen ajoissa. Mielenkiintoiseksi asiaksi nousevatkin leikkausmuodonmuutosten tulkitseminen ja tämän heijastaminen siirtymiin.

Kokeessa yli prosentin leikkausmuodonmuutoksilla siirtymät alkavat kehittyä kiihtyvästi ja todennäköisesti penger alkaa lähestyä sortumaa noin 3 % leikkausmuodonmuutoksilla. Tällöin penkereessä myös alkaa ilmaantua selkeitä indikaattoreita tulevasta sortumasta. Näin suuria muodonmuutoksia ei kuitenkaan voida käyttää inklinoimetriputkien raja-arvoina. Toki kokeessa ongelmana on, että kuormitusta kasvatetaan kokoajan mikä osaltaan vaikuttaa tuloksiin esimerkiksi creepin takia. Kohteen savi oli vähän sensitiivistä ja vaihteli noin $St=2...4$ välillä. Tämä voi myös osaltaan selittää kohteessa pehmeän saven sietokykyä kestävä syntyneet kohtuullisen suuret deformaatiot noin kuukauden mittaisella ajanjaksolla. (Ramalho-Ortigao et al. 1983)



Kuva 4.11. Pengerkorkeuden ja siirtymien suhde. Kuvasta huomattavissa selkeästi siirtymänopeuden derivaatan kasvu eri vaiheissa, samoin kuin Perniössä. Kuvassa punaisilla viivoilla on tarkennettu leikkausvyöhykkeellä tapahtuviin siirtymiin ja leikkausmuodonmuutoksiin. Näillä onkin selkeä korrelaatio ja tätä mahdollisesti voidaan hyödyntää raja-arvoja pohdittaessa. Arvoja on tarkemmin pohdittu tutkittujen kohteiden yhteenvedossa kappaleessa 5.4. (Ramalho-Ortigao et al. 1983)

5 TULOKSET JA ANALYSOINTI

5.1 Tutkitut kohteet joissa vain vähäistä siirtymää

Seuraavassa taulukossa 5.1 on esitettyä putket, joissa on vähäisiä siirtymiä eli alle 10 mm koko mittausa aikana. Tämän lisäksi taulukossa on muutama tuhoutunut putki ja keskeytetty mittaus. Näistä kohteista on kuitenkin valittu muutamia tarkempaan yksityiskohtaiseen tarkasteluun. Valituissa kohteissa esimerkiksi maaperä on kalteva, mittaustulos ei ole luotettava tai kohteen siirtymän derivaatta indikoi siirtymiä tulevaisuudessa. Taulukoiden sivusiirtymätiedot ovat kuitenkin vielä suuntaa antavia.

Taulukko 5.1. Inklinometrikohteet, joissa siirtymiä on alle 10 mm koko käytön aikana

Siirtymän muoto	Rataosa	Km+m	Pohjamaa			Viimeisin maksimi siirtymä [mm]				Derivaatta 1 (Alussa) [mm/a]	Derivaatta 2 (Tämän hetkinen) [mm/a]	Lisäpohtintaa vaativia kohteita	Lisäkommentit		
			kuSa	Savi	Tuete	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013						
Turve kohteet (4)															
Tasaisesti siirtynyt	005	267+596			x				5	5	5	5	x	Kohteen historia osasyntä.	
Ei siirtymiä	008	675+810			x				0	0	0	0			
Ei siirtymiä	008	675+820			x				2	2	2	2			
Viuhkamainen	008	689+700			x	3	3		7	3	4				
Turve ja savi kohteet (9)															
Viuhkamainen	008	437+100			x	x	0	2	2	2	6	2	2		
Viuhkamainen	008	438+250			x	x	3	-1	3	1	7	2	2		
Ei siirtymiä	008	516+500			x	x		3	0	-2	1	6	-2		
Ei siirtymiä	008	516+580			x	x	1	1	0	2	2	2	0		
Ei siirtymiä	008	516+680			x	x	0	1	-1	1	2	-1			
Ei siirtymiä	008	680+340_O			x	x		1	1	1	1	1			
Ei siirtymiä	008	680+340_V			x	x		2	2	2	2	2			
Yhäältä siirtymiä	009	205+900 ITÄ			x	x		5	5	2	2	2			
Ei siirtymiä	342	306+680			x	x		-2	-1	-3	1	1			
Savi kohteet (52)															
Ei siirtymiä	002	216+642			x			2	2	-1	3	2	-1		
Ei siirtymiä	002	218+400			x			1	1	1	1	1	x	Pohdinta poikkeileikkauksen 218+345 yhteydessä.	
Ei siirtymiä	002	220+616			x				2	2	2	2			
Viuhka	002	228+320			x				6	6	5	5			
Ei siirtymiä	002	228+750			x			-1	5	4	11	-5	x	Lisäpohtintaa 228+900-980 yhteydessä.	
Ei siirtymiä	002	228+900			x			0	1	1	3	-2	x	Lisäpohtintaa geometrian takia. Ei siirtymiä	
Ei siirtymiä	002	228+950			x			1	0	2	3	0	x	Lisäpohtintaa geometrian takia. Ei siirtymiä	
Ei siirtymiä	002	228+980			x			0	1	1	1	0	x	Lisäpohtintaa geometrian takia. Ei siirtymiä	
Ei siirtymiä	002	229+780			x	x		0	0	0	0	0			
Ei siirtymiä	002	230+220			x	x		1	1	1	1	1			
Tasaisesti syvyyden mukaan	002	230+240			x	x		3	3	3	3	3			
Pientä siirtymää	002	240+060_O			x	x	4	1	1	0	6	2	0	x	Kohteen 240+200 yhteydessä.
Pientä siirtymää	002	240+060_V			x	x		4	4	8	13	5	x	Kohteen 240+200 yhteydessä.	
Ei siirtymiä	002	240+145			x	x		0	2	2	4	1	x	Kohteen 240+200 yhteydessä.	
Ei siirtymiä	002	240+202			x	x		0	4	4	3	2	x	Kohteen 240+200 yhteydessä.	
Keskeltä ja yhäältä tapinut	002	253+280			x	x		3	3	2	2	2			
Ei siirtymiä	002	255+540			x	x		1	1	0	0	0			
Ei siirtymiä	002	259+060			x	x		3	3	1	1	1			
Pientä siirtymää yhäältä	002	267+460			x	x		8	8	6	4	4	x	Pientä kehittyvää siirtymää.	
Ei siirtymiä	002	268+180			x	x		3	3	2	2	2	x	Virheellinen mittausdata.	
Ei siirtymiä	002	269+600			x	x		3	3	4	1	1			
Ei siirtymiä	002	270+460			x	x		4	4	3	6	6			
Ei siirtymiä	002	273+000			x	x		2	2	1	1	1			
Ei siirtymiä	002	276+380			x	x		1	1	1	1	0			
Pientä siirtymää keskellä	002	280+000			x	x	1	0	2	4	1	2	x	Pientä siirtymää keskellä. Lyhyt pohdinta.	
Taipunut yläpäältä	002	283+237			x	x		4	4	4	4	4			
Ei siirtymiä	002	283+240			x	x		2	2	3	3	3			
Ei siirtymiä	002	283+363			x	x		0	2	2	4	1	2		
Pientä siirtymää	002	290+140			x	x		5	1	1	7	2	2	x	Pientä siirtymää. Lyhyt pohdinta.
Ei siirtymiä	003	162+100			x	x		2	2	-1	4	1	-1		
Pientä siirtymää yläpäällä	003	203+000			x	x	-1	1	1	1	2	4	1	x	Pientä siirtymää. Lyhyt pohdinta.
Ei siirtymiä	003	203+040			x	x	-1	1	1	1	3	0	1	x	Pohdinta 203+000 yhteydessä.
Siirtynyt penkereeseen päin	006	122+592			x	x	3	3	3	1	12	1	1	x	Luisakortumia aikaisemmin.
Ei siirtymiä	008	429+725			x	x		2	2	1	1	1			
Ei siirtymiä	008	429+860			x	x			0	2	1	1			
Taipunut yläpäältä	008	430+140			x	x			4	4	1	1			
Ei siirtymiä	008	468+840			x	x	-3	6	1	1	4	1	0		
Ei siirtymiä	008	480+940			x	x	0	2	1	0	3	0	0		
Yläpäältä terävästi taipunut	008	528+640			x	x	17	8		25	41	8			
Yläpäältä taipunut	008	528+650			x	x	5	6		11	3	3			
Yläpäältä taipunut	008	702+250			x	x		1	3	4	1	0			
Ei siirtymiä	008	704+540			x	x		3	3	2	3	3			
Ei siirtymiä	009	287+200			x	x		0	0	0	0	0			
Ei siirtymiä	342	296+680			x	x		3	3	3	6	6			
Ei siirtymiä	342	313+000			x	x		4	4	3	6	6			
Ei siirtymiä	342	321+160			x	x		-1	-1	0	0	0			
Ei siirtymiä	342	321+320			x	x		5	5	5	3	3			
Tasaisesti syvyyden mukaan	342	321+775			x	x		9	9	9	9	9	x	Pientä kehittyvää siirtymää.	
Yhäältä siirtymiä	342	323+320			x	x		8	8	7	7	7	x	Pientä kehittyvää siirtymää.	
Yhäältä siirtymiä	342	323+250			x	x		5	5	6	6	6	x	Pientä siirtymää yläpäällä.	
Ei siirtymiä	342	325+400			x	x		1	1	0	1	1			
Ei siirtymiä	342	326+940			x	x		2	2	2	4	4			

5.2 Tarkemmin analysoidut kohteet

Taulukossa 5.2 on esitettyä tutkimuskohteet, joissa on merkittäviä siirtymiä. Tähän tarkasteluun on otettu mukaan pääosin kohteet, joissa maksimisiirtymät ylittävät 10-15 mm. Näistä kohteista tehdään sitä tarkempi analyysi, mitä heikommaksi vakavuus on arvioitu.

Taulukkoja 5.1 ja 5.2 vertailtaessa voidaan huomata, että suurin osa datasta ei sisällä juurikaan siirtymiä. Osassa dataa saattaa vielä tällä tasolla tarkasteltuna esiintyä virheitä, joita tarkastellaan analysoinnissa tarkemmin. Näitä virheitä ovat muun muassa oletetusta poikkeava siirtymän suunta sekä se että maaperätiedot eivät välttämättä ole täsmälliset.

Taulukko 5.2. Inklinometrikohteet, joissa siirtymiä on yli 10 mm

Siirtymän muoto	Rataosa	Km+m	Pohjamaa									Maksimi siirtymä [mm]	Derivaatta 1 (Alussa) [mm/a]	Derivaatta 2 (Tämän hetkinen) [mm/a]	Lisäkommentit			
			kuSa	Savi	Tune	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013							
Turve kohteet (12)																		
Viuhka	003	120+899			x				5	3	3	4	15	9	4	Keskeytetty mittauskohde. Viuhkamainen siirtymä turpeella.		
Viuhka	003	315+920			x	1	4	15	6	6	12	44	17	8	Keskinkertaisia siirtymiä. Siirtymät jatkuvat.			
Viuhka	003	316+160			x	6	6	13	19	3	3	49	22	3	Keskinkertaisia siirtymiä. Siirtymät hiipuneet.			
Viuhka	003	320+360			x	96	60	44	22	14	12	248	97	10	Suuria siirtymiä. Siirtymät kuitenkin tasoittuneet, mutta jatkuvat.			
Viuhka	003	320+425			x	37	20	28	16	12	14	127	33	11	Suuria siirtymiä. Siirtymät kuitenkin tasoittuneet, mutta jatkuvat.			
Viuhka	003	320+475			x	18	13	24	12	11	10	87	18	6	Suuria siirtymiä. Siirtymät kuitenkin tasoittuneet, mutta jatkuvat.			
Viuhka	003	320+525			x	9	4	8	4	7	4	35	6	4	Keskinkertaisia siirtymiä. Siirtymät hiipuneet.			
Viuhka	003	320+545			x	3	1	4	0	1	3	12	2	3	Pieniä siirtymiä. Siirtymät jatkuvat.			
Viuhka	003	320+575			x	10	8	8	6	6	7	44	15	7	Keskinkertaisia siirtymiä. Siirtymät jatkuvat.			
Viuhka	003	320+625			x	70	45	34	14	12	12	187	71	10	Suuria siirtymiä. Siirtymät kuitenkin tasoittuneet, mutta jatkuvat.			
Viuhka	003	320+720			x	111	69	49	19	19	17	285	113	14	Suuria siirtymiä. Siirtymät kuitenkin tasoittuneet, mutta jatkuvat.			
Viuhka	008	600+740			x	5	3	3	2	4	3	20	3	3	Pieniä siirtymiä. Siirtymät jatkuvat.			
Turve ja savi kohteet (16)																		
Viuhkamainen	003	104+160			x	x			10	5	5	4	25	15	6	Pieniä siirtymiä. Siirtymät jatkuvat.		
Viuhkamainen	003	104+260			x	x			-2	6	6	2	12	14	4	Pieniä siirtymiä. Siirtymät hiipuneet.		
Yläpäässä pientä siirtymää	003	104+260			x	x				10	7	3	20	6	2	Pieniä siirtymiä. Siirtymät hiipuneet.		
Viuhka	003	330+360			x	x	55	4	7	4	3	3	77	106	2	Suuria siirtymiä. Siirtymät kuitenkin hiipuneet.		
Yläpäässä pientä siirtymää	003	330+600			x	x	-7	5	9	2	2	4	16	3	2	Pientä jatkuvaa siirtymää putken ylhäällä.		
Viuhkamainen	003	330+880			x	x	6	1	8	3	3	4	26	4	3	Pientä jatkuvaa siirtymää.		
Viuhka	008	420+680			x	x	x	-1	2	5	-1	6	5	15	2	3	Pientä viuhkamaisista siirtymää.	
Tasaisesti syvyyden mukaan	008	420+900			x	x	4	2	48	22	6	7	89	46	6	Keskinkertaisia siirtymiä. Siirtymät jatkuvat.		
Ylhäällä siirtymiä	008	462+260			x	x	x	4	-5	5	5	13	2	6	6	Pientä tasaista siirtymistä putken yläpäässä.		
Ylhäällä siirtymiä	008	462+310			x	x	x	-6	14	6	4	2	20	6	3	Pientä hiipuvaa siirtymää putken ylhäällä.		
Yläpäästä taipunut	008	503+380			x	x	2	5	5	3			15	2	2	Pieniä siirtymiä.		
Yläpäästä taipunut	008	699+680			x	x	5	2	4	2			12	2	1	Pieniä siirtymiä.		
Viuhkamainen	009	256+960			x	x				14			14	9	3	Nopeasti kehittyneitä viuhkamaisia siirtymiä.		
Viuhka	066	267+050			x	x						110	110	100	100	Nopeasti kehittyneitä suuria viuhkamaisia siirtymiä.		
Viuhka	066	267+070			x	x						250	250	240	240	Nopeasti kehittyneitä suuria viuhkamaisia siirtymiä.		
Ylhäällä siirtymiä	342	307+480			x	x				3	10	13	8	8	8	Putken yläpäässä pientä kiihtyvää siirtymää.		
Savi kohteet (9)																		
Suurta massamaisista siirtymää	002	218+345			x								120	120	120	1	Suurta vyöhykemäistä siirtymää muutaman kuukauden sisään.	
Yläpäästä taipunut	008	424+660			x	x			-3	26	3	-2	2	26	13	0	Yläpäästä taipunut putki. Siirtymät hiipuneet.	
Taipunut yläpäästä	008	442+460			x	x			8	4	9	2	-7	17	6	-4	Yläpäästä taipunut putki. Siirtymät hiipuneet.	
Viuhkamainen	008	453+160			x	x			4	3	-5	14	4	3	23	4	4	Viuhkamaisesti siirtynyt putki. Siirtymät jatkuvat.
Tasaisesti syvyyden mukaan	008	474+500			x	x			6	2	4	2	2	16	5	2	2	Pientä hidasta siirtymää.
Viuhka	008	474+560			x	x			57	22	-17	2	4	68	47	4	4	Keskinkertaisia siirtymiä. Siirtymät hiipuneet.
Yläpäästä taipunut	008	480+760			x	x			-1	11	6	2	18	5	2	2	2	Yläpäästä taipunut putki. Siirtymät hiipuneet.
Pientä tasaista siirtymää	002	240+200			x					9	4	4	16	4	4	4	4	Aikasempi sortumakohde. Pientä jatkuvaa siirtymää.
Viuhkamainen	009	229+980			x	x				21				21	37	4	4	Nopeasti kehittyneitä viuhkamaisia siirtymiä.

5.3 Tutkimuskohteiden analysointi

5.3.1 Yleistä

Kohteissa on erinäisiä syitä siirtymille. Joissakin kohteissa ei ole siirtymiä lainkaan, mutta heikko maapohja tai ratapenkereen suuri korkeus asettaa kohteen analysoitavaksi. Osassa kohteista mittaustulokset eivät ole oletusten mukaisia ja näin joudutaan pohtimaan mittausten todenmukaisuutta.

Seuraavassa on esitetty syitä analysoinnin taustalle:

- Suuria tai keskisuuria siirtymiä
- Kalteva maapohja ja/tai heikko maapohja
- Aiemmin sortuneet kohteet tai pienet luiskasortumat
- Virheelliset tai epäloogiset mittaukset
- Muista syistä tarkempaa analysointia vaativat kohteet

Seuraavien taulukoiden 5.3, 5.4, 5.5 ja 5.6 arvot on pyritty päivittämään kohteita analysoimalla ja läpikäyden. Mittaukset ovat tutkittavista kohteista suoritettu pääosin ennen 2013 vuotta, mutta analysoinnissa on käytetty 2014 vuoden mittauksia mahdollisuuksien mukaan. Taulukoiden derivaattatarkasteluissa on mitattu aluksi syntyneiden siirtymien kiihtymistä ja lopuksi esitetty vielä arvioita siirtymistä tulevaisuudessa. Tämän tiedon avulla voidaan arvioida muun muassa kohteen mittaustarvetta tulevaisuudessa.

Suurimmassa osassa kohteista voidaan havaita, että siirtymänopeudet ovat aluksi saattaneet olla suuria, mutta hidastuneet tämän jälkeen (esimerkiksi vastapenger kohteet). Kaikkien analysointien poikkileikkauskuvat ja inklinometriputkien sovitteet ovat havainnollistuksia. Poikkileikkaukset ovat yleensä muutaman kairausten yleispiirteisiä ja suuntaa antavia yksinkertaistuksia. Suurimmassa osassa stabiliteettitarkastelut ovat myös vain havainnollistuksia kohteen yleisluonteisesta tilanteesta. Tällöin laskelmista voidaan tarkastella esimerkiksi liukupinnan sijaintia. Tällöin myös saadaan käsitys dimensioista, kuten esimerkiksi penkereen korkeudesta suhteessa vastapenkereisiin ja pohjamaakerroksiin. Vertailua voidaan myös tehdä siirtymien syvyyden ja liukupinta tarkastelujen välillä.

5.3.2 Tutkittavat kohteet rataosittain

Seuraavissa taulukoissa 5.3, 5.4, 5.5 ja 5.6 on esitelty kaikki tarkemmin analysoidut kohteet. Näistä on taulukoituna muun muassa pohjamaa, siirtymät, siirtymien derivaatat, kommentit datojen virheistä sekä laskettu suuntaa antava kokonaisvarmuus.

Tutkimuskohteet ovat jaoteltu rataosuuksin seuraavasti:

Taulukko 5.3. Kohteet Riihimäki – Tampere – Jyväskylä väliltä

Siirtymän muoto	RAISU rataosa	Km+m	Pohjamaa			Siirtymä vuodessa [mm/a]				Viimeisin maksimi siirtymä [mm]	Derivaatta 1 (maksimi/aluksa) [mm/a]	Derivaatta 2 (lopussa/tämän hetkinen) [mm/a]	Daten luotettavuus 0-mittaukseen nähden (A-A akselin suhteen)	FOS (suuntaa antava)
			kuSa	Savi	Turve	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013					
Turve kohteet														
Viuhka	003	120+899			x	5	3	3	4	15	9	3	Tulokset luotettavia.	N/A
Turve ja savi kohteet														
Viuhkamainen	003	104+160		x	x	10	5	5	4	25	15	6	Pientä virhettä. 2010 referenssi ok.	N/A
Yläpäässä pientä siirtymää	003	104+260_O		x	x		10	7	3	20	6	2	Pientä virhettä. 2012 referenssi ok.	1,5
Viuhkamainen	003	104+260_V		x	x	-2	6	6	2	12	14	4	Pientä virhettä. 2012 referenssi ok.	1,8
Viuhkamainen	009	256+860		x	x		14			14	9	3	Tulokset luotettavia.	1,4
Savi kohteet														
Viuhkamainen	009	229+980	x	x			21			21	37	3	Tulokset luotettavia.	1,4
Ei siirtymiä	009	287+200	x	x						0	0	0	Tulokset luotettavia.	1,3

Taulukko 5.4. Kohteet Tampere – Kokemäki – Rauma väliltä

Siirtymän muoto	RAISU rataosa	Km+m	Pohjamaa			Siirtymä vuodessa [mm/a]			Viimeisin maksimi siirtymä [mm]	Derivaatta 1 (maksimi/aluksa) [mm/a]	Derivaatta 2 (lopussa/tämän hetkinen) [mm/a]	Daten luotettavuus 0-mittaukseen nähden (A-A akselin suhteen)	FOS (vain tarkemmat laskelmat)	
			kuSa	Savi	Turve	2010-2011	2011-2012	2012-2013						
Turve ja savi kohteet														
Pientä siirtymää	002	240+060_O	x	x	x	1	1	0	2	2	0	Pientä virhettä.	N/A	
Pientä siirtymää	002	240+060_V	x	x	x		4	4	8	13	2	Tulokset luotettavia.	N/A	
Ei siirtymiä	002	240+145		x	x		0	2	2	4	1	Tulokset luotettavia.	N/A	
Pientä siirtymää, leikkausvyöhyke	002	240+200		x	x	9	4	4	16	4	4	Pientä virhettä. 2011 parempi referenssi.	1,6	
Ei siirtymiä	002	240+202		x	x		0	4	4	3	2	Tulokset luotettavia.	1,6	
Ylhäällä siirtymiä	342	307+480		x	x		3	10	13	9	9	Tulokset luotettavia.	1,6	
Savi kohteet														
Suurta massamaista siirtymää	002	218+345		x				130	130	1200	2	Tulokset luotettavia.	>1,5	
Ei siirtymiä	002	218+400		x				1	1	1	1	Tulokset luotettavia.	>1,5	
Ei siirtymiä	002	228+750		x			-1	5	4	11	2	Tulokset luotettavia.	N/A	
Ei siirtymiä	002	228+900		x	x		0	1	1	3	0	Tulokset luotettavia.	1,5	
Ei siirtymiä	002	228+950		x	x		1	0	2	3	0	Pientä virhettä.	1,5	
Ei siirtymiä	002	228+980		x	x		0	1	1	1	0	Tulokset luotettavia.	1,5	
Pientä siirtymää ylhäällä	002	267+460		x	x			8	8	6	3	Tulokset luotettavia.	N/A	
Ei siirtymiä	002	268+180		x	x			3	3	2	1	Virhettä ylhäällä. 2013 parempi referenssi.	N/A	
Pientä siirtymää keskellä	002	280+000		x	x		1	0	2	4	1	2	Putki vapaana alapäästä.	N/A
Pientä siirtymää	002	290+140		x	x		5	1	1	7	2	2	Virhettä tuloksissa. 2013 parempi referenssi.	N/A
Tasaisesti syvyyden mukaan	342	321+775		x	x			9	9	9	2	Tulokset luotettavia.	N/A	
Ylhäällä siirtymiä	342	322+320		x				8	8	7	2	Tulokset luotettavia.	N/A	

Taulukko 5.5. Kohteet Tampere – Seinäjoki – Oulu väliltä

Siirtymän muoto	RAISU rataosa	Km+m	Pohjamaa			Maksimi siirtymä vuodessa [mm/a]								Maksimi siirtymä [mm]	Derivaatta 1 [mm/a]	Derivaatta 2 [mm/a]	Datan luotettavuus	FOS (Vain tarkemmat laskelmat)
			kuSa	Savi	Turve	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013						
Turve kohteet																		
Viuhka	003	315+920			x		1	4	15	6	6	12	44	17	8	Tulokset luotettavia.	1,4	
Viuhka	003	316+160			x		6	6	13	19	3	3	49	22	3	Tulokset luotettavia.	N/A	
Viuhka	003	320+360			x		96	60	44	22	14	12	248	97	10	Tulokset luotettavia.	N/A	
Viuhka	003	320+425			x	22	37	20	28	16	12	14	149	33	14	Tulokset luotettavia.	N/A	
Viuhkamainen	003	320+475			x	7	18	13	24	12	11	10	94	18	11	Tulokset luotettavia.	N/A	
Ylhäältä taipunut putki	003	320+525			x	-2	9	4	8	4	7	4	33	6	5	Tulokset luotettavia.	N/A	
Ylhäällä siirtymä	003	320+545			x	3	3	1	4	0	1	3	15	2	3	Tulokset luotettavia.	N/A	
Viuhka	003	320+575			x	14	10	8	8	6	6	7	59	15	6	Tulokset luotettavia.	N/A	
Viuhka	003	320+625			x		70	45	34	14	12	12	187	71	12	Tulokset luotettavia.	1,5	
Viuhka	003	320+720			x		111	69	49	19	19	17	285	113	19	Tulokset luotettavia.	N/A	
Viuhka	008	600+740	x		x		5	3	3	2	4	3	20	3	4	Putkea ei ole löyty tarpeeksi syväälle.	N/A	
Turve ja savi kohteet																		
Viuhka	003	330+360	x	x		0	55	4	7	4	3	3	76	106	3	Tulokset luotettavia.	N/A	
Yläpäässä pientä siirtymää	003	330+600	x	x		-7	5	9	2	2	4	4	16	3	4	Tulokset luotettavia. Pientä virhettä.	N/A	
Viuhkamainen	003	330+880	x	x		-1	6	1	8	3	3	4	24	4	4	Tulokset luotettavia. Pientä virhettä.	N/A	
Tasaisesti syvyyden mukaan	008	420+900	x	x			4	2	48	22	6	7	89	46	6	0-mittauksessa merkittävää virhettä.	N/A	
Ylhäällä siirtymä	008	462+260	x	x	x			4	-5	5	5	5	13	2	3	Pientä virhettä. Tulokset ok.	N/A	
Ylhäällä siirtymä	008	462+310	x	x	x			-6	14	6	4	2	20	6	3	Pientä virhettä.	N/A	
Savi kohteet																		
Pientä siirtymää yläpäässä	003	203+000		x		5	0	3	-1	1	1	1	11	4	1	Pientä virhettä yläpäässä.	N/A	
Ei siirtymä	003	203+040		x		-1	1	0	-1	1	1	1	4	0	1	Tulokset luotettavia.	N/A	
Taipunut yläpäästä	008	442+460	x	x				8	4	9	2	-7	17	6	3	Tulokset luotettavia.	N/A	
Viuhkamainen	008	453+160	x	x			4	3	-5	14	4	3	23	4	3	Tulokset luotettavia.	N/A	
Tasaisesti syvyyden mukaan	008	474+500	x	x				6	2	4	2	2	16	5	2	Tulokset luotettavia.	N/A	
Viuhka	008	474+560	x	x				57	22	-17	2	4	68	47	3	Tulokset luotettavia.	N/A	
Yläpäästä taipunut	008	480+760	x	x						-1	11	6	2	18	5	1	Tulokset luotettavia.	N/A

Taulukko 5.6. Muut inklinometrikohteet

Siirtymän muoto	RAISU rataosa	Km+m	Pohjamaa			Maksimi siirtymä vuodessa [mm/a]				Maksimi siirtymä [mm]	Derivaatta 1 [mm/a]	Derivaatta 2 [mm/a]	Datan luotettavuus	FOS	
			kuSa	Savi	Turve	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013						
Turve kohteet															
Ei siirtymä	005	267+596			x				30	5	35	30	5	Uudessa putkessa ei siirtymä.	1,8
Turve ja savi kohteet															
Viuhka / VP asettumassa	066	267+050		x	x				118	118		340	76	Automaattikohde.	1,4
Viuhka / VP asettumassa	066	267+070		x	x				260	250		900	110	Automaattikohde.	1,4
Ei siirtymä	141	96+860		x	x				0	0		0	0	Tulokset luotettavia.	1,6
Ei siirtymä	141	96+862		x	x				1	1		0	1	Tulokset luotettavia.	1,6
Savi kohteet															
Pientä siirtymää yläpäässä	006	122+592	x	x		3	3	3	1	12		1	1	0-mittaus virheellinen. 2008 parempi referenssi.	1,3

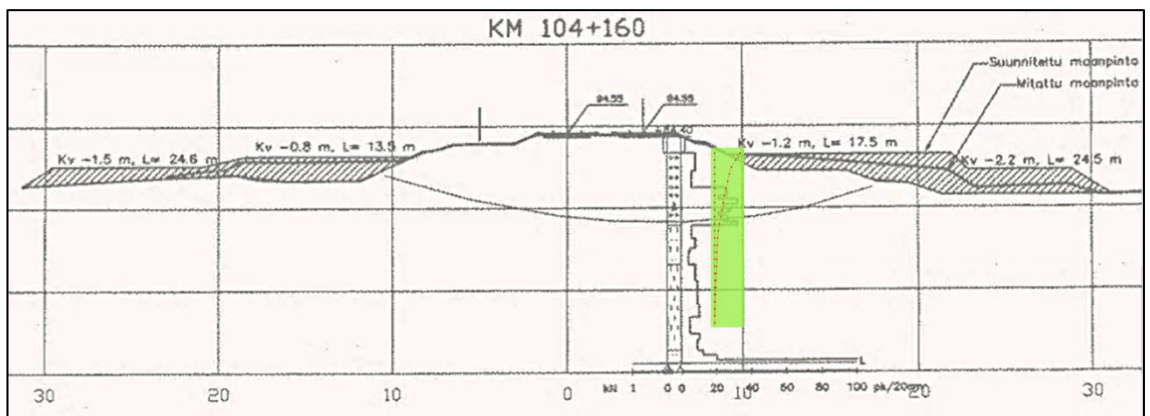
5.3.3 Tutkimuskohteet 1: Riihimäki – Tampere – Jyväskylä

5.3.3.1 Riihimäki – Tampere

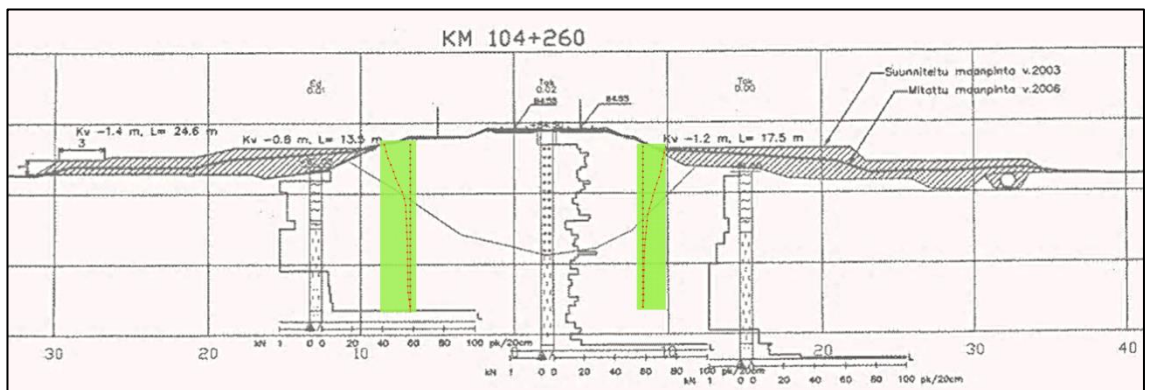
Kilometrit 104+160 & 104+260:

Ratapenger on rakennettu noin 4 m paksun turvekerroksen päälle. Turpeen alla on noin 0,5 m liejua. Kilometrin 104+260 kohdalla on noin 3-7 metriä paksu savikerros turpeen alla. Ratapenger on painunut turpeeseen noin 2 - 5 metriä sekä vastapenkereet ovat painuneet noin 0,5-1 metriä. Kohteessa on kaksi liikennöitävää raidetta, ja tämän lisäksi vanha raide vasemmalla. Kohteessa on myös ollut kunnossapitotarvetta aikaisemmin. Kohteeseen on rakennettu vastapenkereet vuoden 2003 aikana. Kunnossapitäjän tietojen mukaan rata olisi nykyään asettunut. (Seurantakortit)

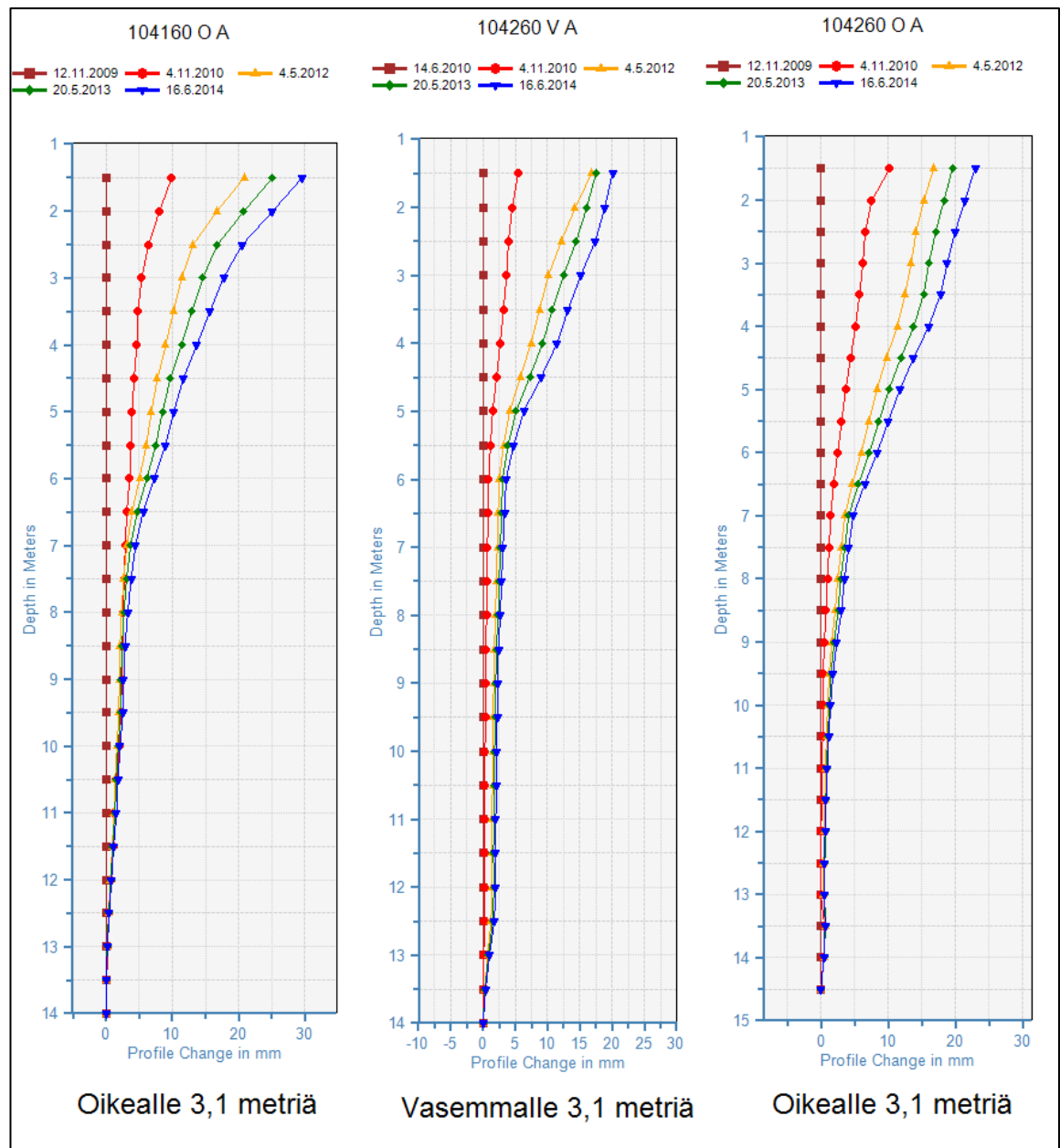
Kuvissa 5.1 ja 5.2 on esitetty poikkileikkaukset inklinometrien kohdalta. Kuvassa 5.11 on stabiiliteetilaskenta putkien kohdalta, jossa FOS ja Msf oikealle noin 1,4-1,5. Kuvassa 5.3 on esitetty inklinometridata ja kuvassa 5.4 on siirtymät ajan funktiona. Siirtymät ovat turvealueilla sijaitseville vastapengerkohteille tyypillisiä viuhkamaisia siirtymiä. Siirtymänopeus on nykyisin molempiin suuntiin noin 3-4 mm/vuodessa.



Kuva 5.1. Poikkileikkaus kilometrin 104+160 kohdalta (Geo-piirustukset)



Kuva 5.2. Poikkileikkaus kilometrin 104+260 kohdalta (Geo-piirustukset)

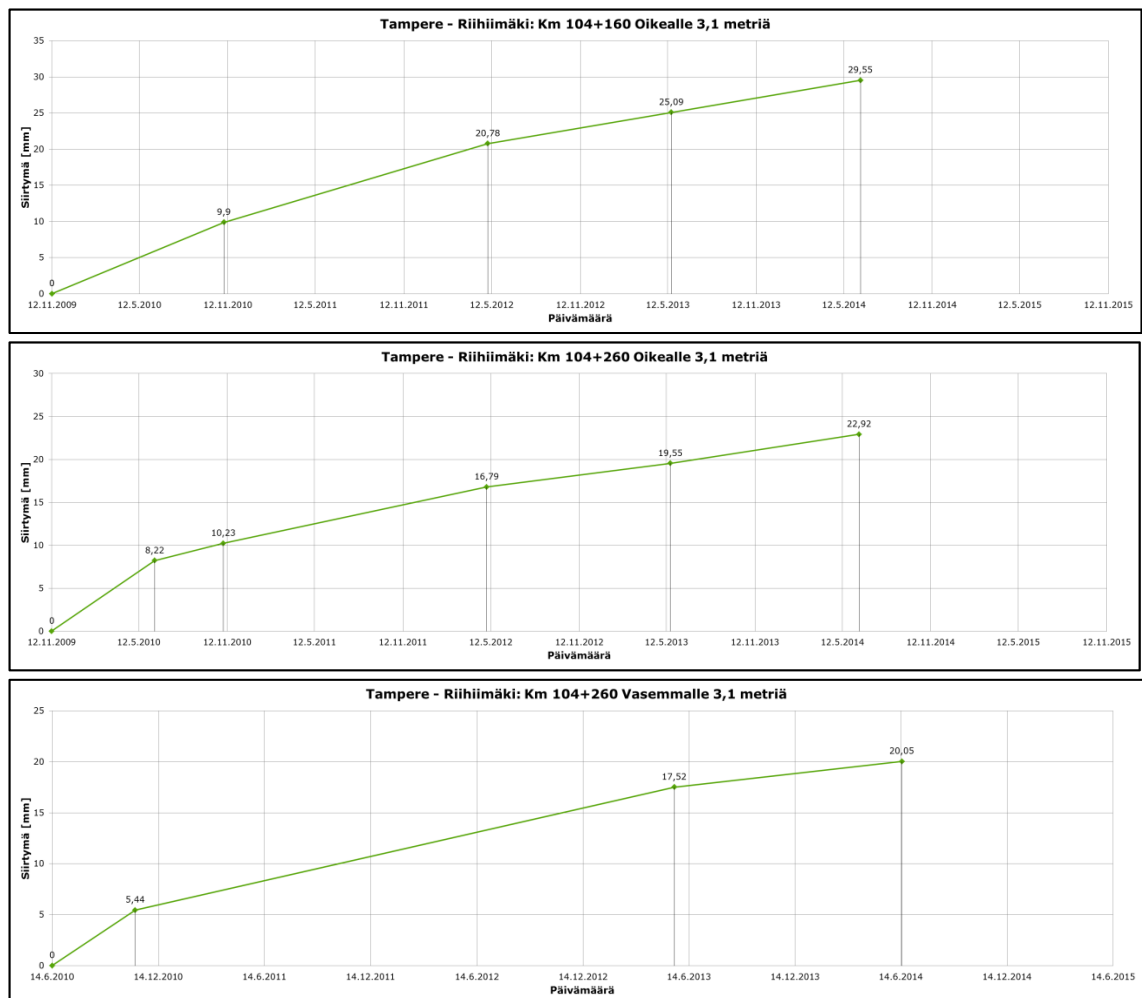


Kuva 5.3. Inklinometrimittausten viuhkamainen siirtymä turvepenkereellä. Siirtymät ovat noin 20-30 mm ja siirtymänopeus noin 3-4 mm/vuodessa.

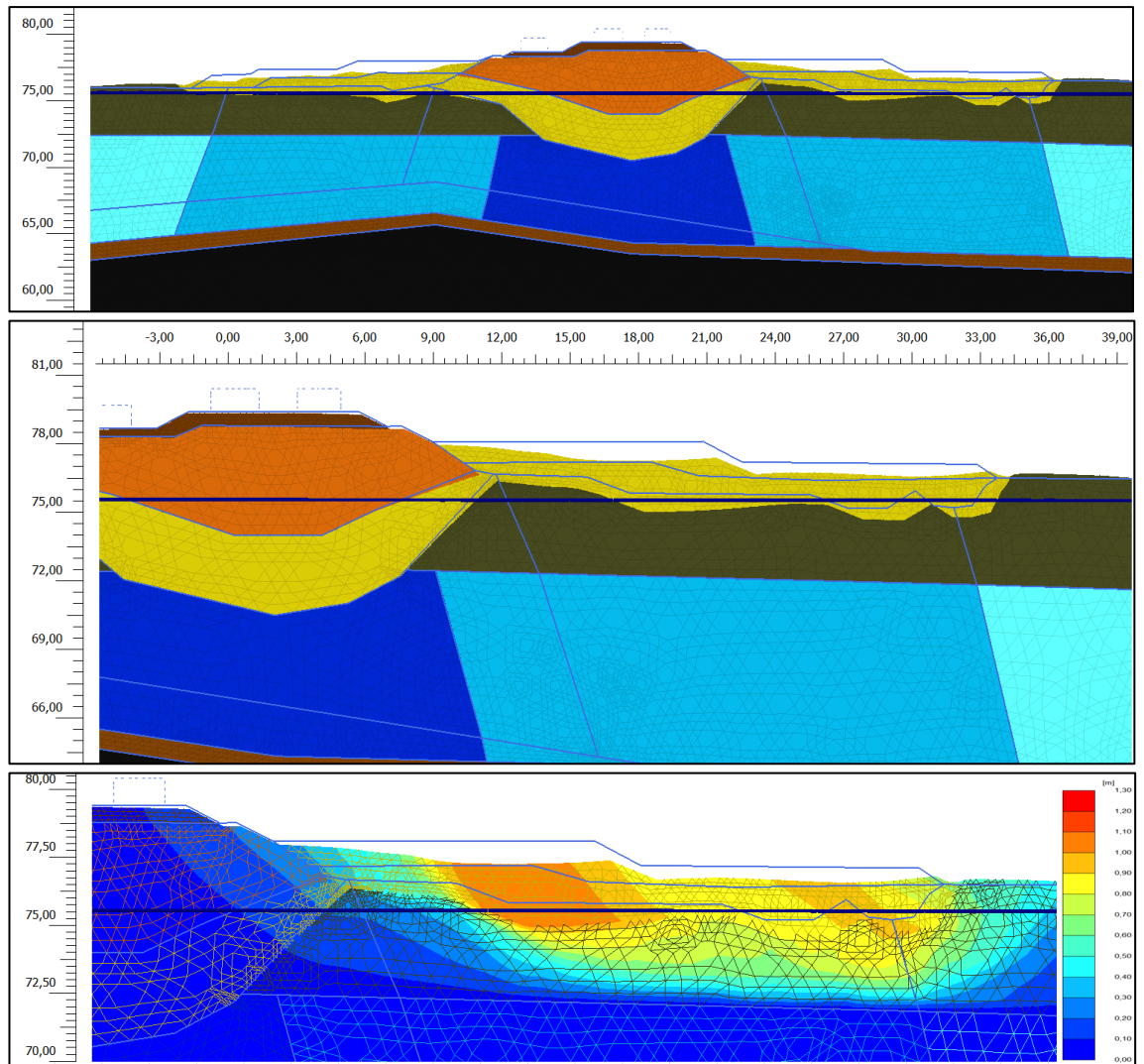
1. Kilometrillä 104+160 on kuvan 5.3 mukaisesti viuhkamainen siirtymä radasta oikealle pois päin. Siirtymä on noin 30 mm ja sitä on kertynyt noin 4 mm kahtena edellisessä mittausvuonna putken yläpäässä. Siirtymän kehitys jatkuu derivaatasta päätellen noin 4 mm/vuodessa.
2. Kilometrillä 104+260 vasemmalla ja oikealle siirtymiä on noin 20 mm. Oletettavia siirtymiä jatkossa noin 3 mm/vuodessa molempiin suuntiin. Mittaukset on suoritettu vuosien 2009–2014 välillä.

Vakavuus kohdalla on todennäköisesti parantunut vuosien aikana saven ja turpeen lujittuessa penkereen sekä vastapenkereiden alla. Siirtymät kohteessa aiheutuvat pääosin painumista, mitä on simuloitu Plaxiksella seuraavilla sivuilla. Kohteiden ensimmäisissä mittauksissa on tarkistussummassa jonkin verran virhettä. Tämän johdosta vasemmalle onkin alkumittauksena käytetty vuoden 2010 mittausta. Siirtymänopeus on yhtä suuri radan molemmin puolin kilometrin 104+260 kohdalla.

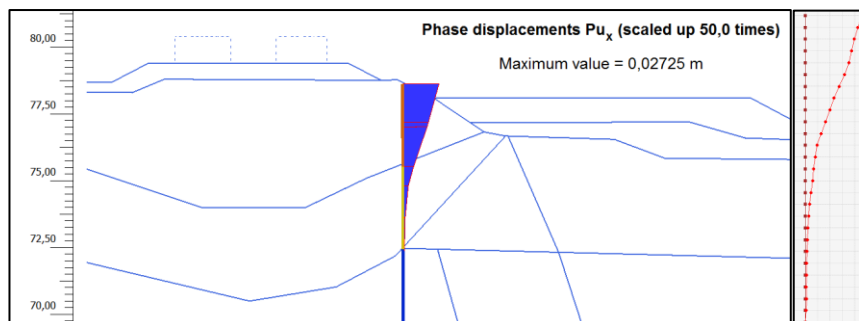
Turpeen mallinnuksessa on käytetty alun perin MCC:tä, jonka arvot ovat esitetty myöhemmin taulukossa 5.7. Kuitenkin kuvat ovat valittu hieman sofistikoituneemmasta SS –mallinnuksesta. Laskennassa turpeen MCC arvot perustuvat muutama vuosiin tehtyihin tutkimuksiin maailmalla (Hayashi et al. 2014, Badv & Sayadian 2011). Siirtymämallinnus osoittautuu yllättävän kelvolliseksi huomioiden, että kohteesta ei ole hyödynnetty ollenkaan laboratoriokokeita. Vesipitoisuudet laskentaan ovat vastaavasti arvioitu kaikista tämän tutkimuksen turvekohteista sekä turvekappaleen avulla.



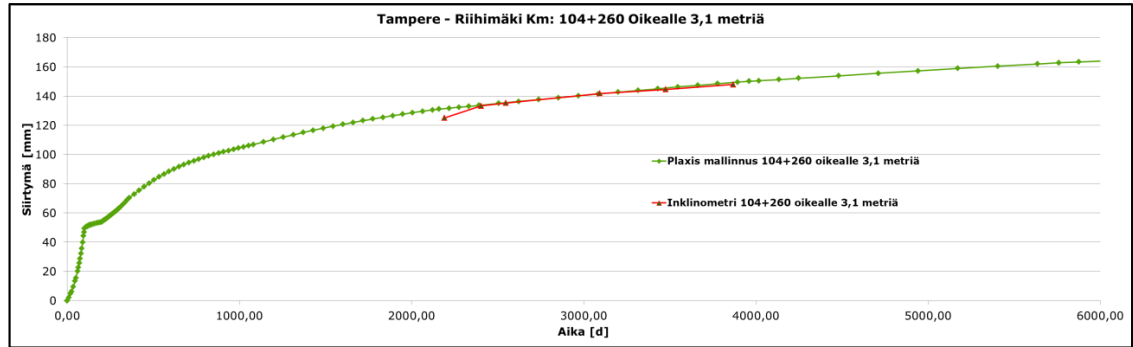
Kuva 5.4. Siirtymät ajan funktiona kilometrien 104+160 ja 104+260 kohdalta. Siirtymänopeus noin 3-4 mm/vuodessa lähellä maanpintaa.



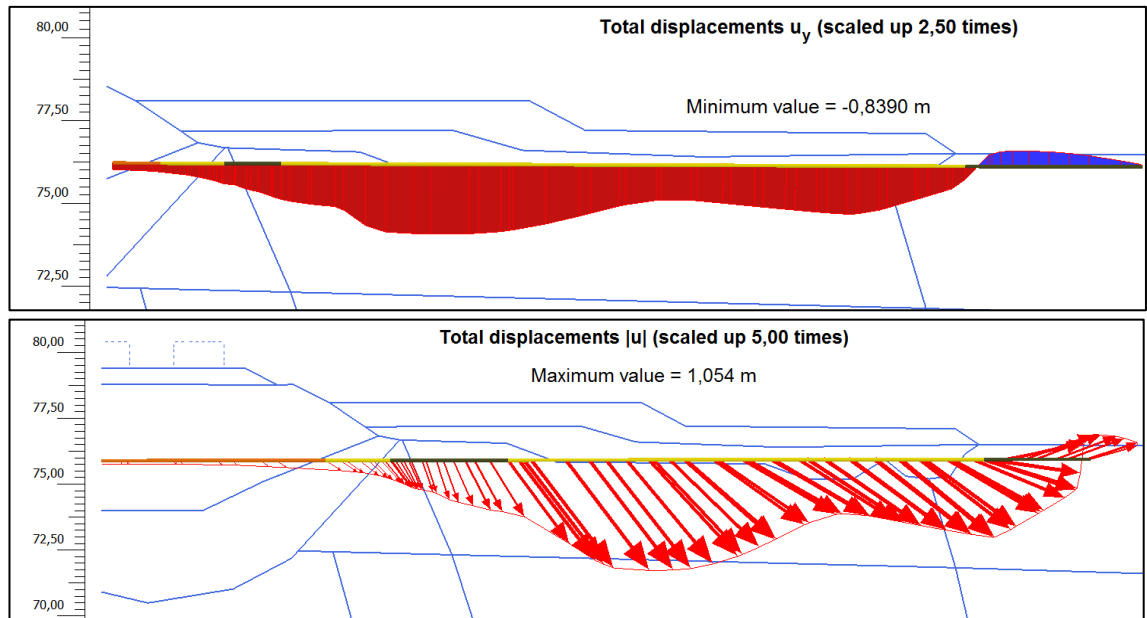
Kuva 5.5. Ylhäällä ja keskellä on kohteen painuneet vastapenkereet noin vuoden 2014 kohdalta. Alhaalla on vastaavasti tarkennus oikean puolen vastapenkereestä ja sen deformaatioista. Huomataan, että rakentamisen jälkeen deformaatioilla on myös ollut vaikutusta oikeanpuoleiseen raiteeseen. Kuvat ovat tutkimuksen myöhemmin suoritettua SS-simuloinnista.



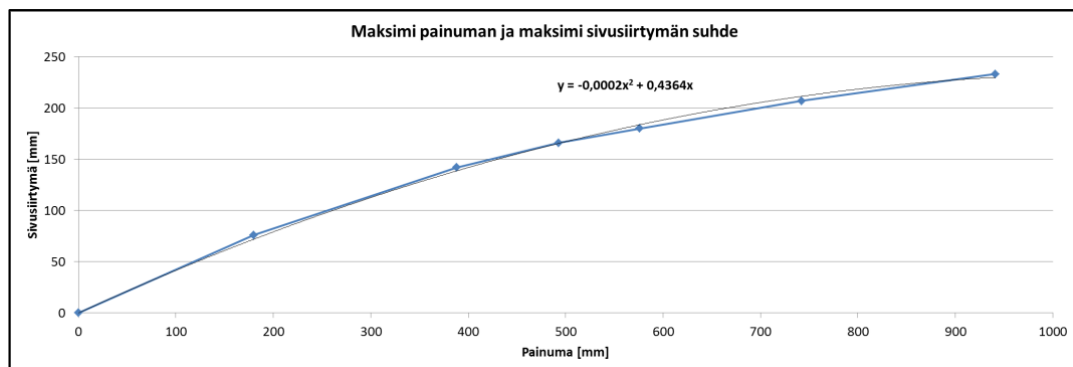
Kuva 5.6. Sivusiirtymät penkereen vierestä noin vuosien 2009-2014 väliltä (yhteensä noin 30 mm). Simuloidut sivusiirtymät vuonna 2014 ovat yhteensä noin 170 mm ja siirtymänopeus simuloinnissa noin 3 mm/vuodessa oikealle. Simuloinnin arvio sivusiirtymästä viiden vuoden päästä on noin 2 mm/vuodessa.



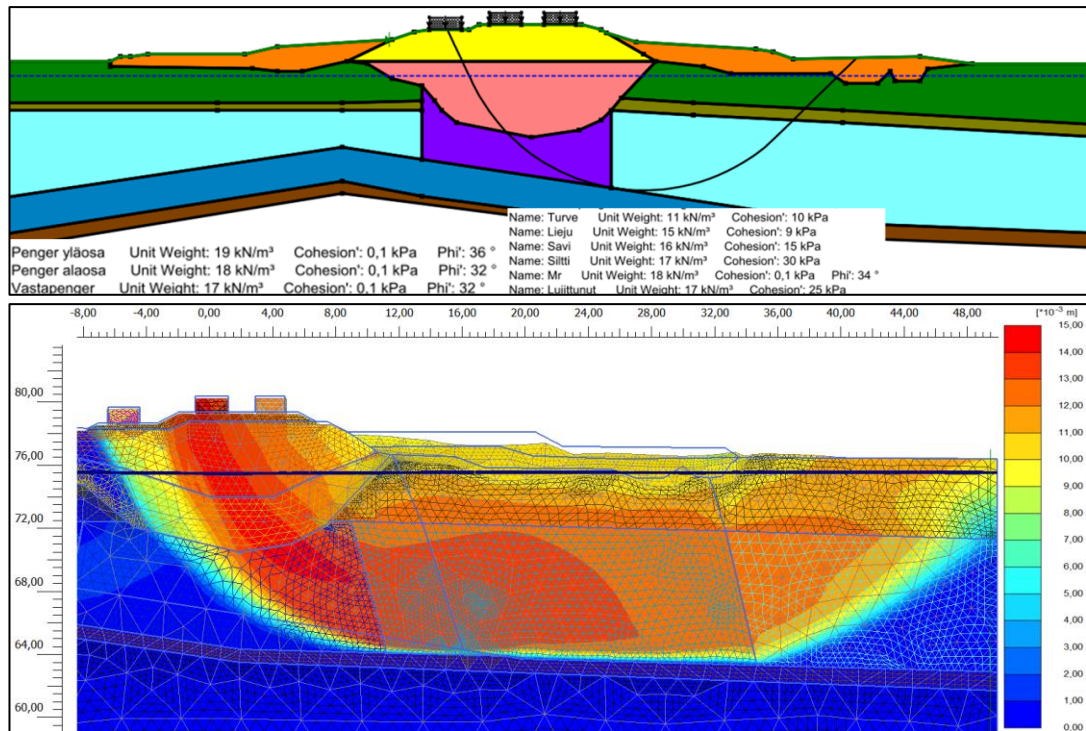
Kuva 5.7. Siirtymä-aika kuvaaja. Tällä hetkellä aikajanalla ollaan noin 4000 päivän kohdalla. Siirtymänopeus noin 3 mm/vuodessa oikealle ja 5 vuoden päästä noin 2 mm/vuodessa. Inklinometrimitauksiin on lisätty 130 mm siirtymiä, jolloin siirtymät kulkevat lähes samalla käyrällä.



Kuva 5.8. Plaxis –mallituksen oikean vastapenkereen painumat tällä hetkellä. Suurimmat painumat ovat noin 800 mm. Kuvat ovat myöhemmin suoritetusta kehittyneemmästä Soft Soil –simuloinnista.



Kuva 5.9. Plaxis –mallituksen maksimipainuman ja -sivusiirtymän suhde MCC –simuloinnista.



Kuva 5.10. Ylhäällä on havainnollistava GeoCalc –laskenta, jossa FOS on vasemmalle 1,8 ja oikealle 1,4 (RATUS). Alhaalla on puolestaan taulukon 5.7 turpeen MCC arvoista muunnettu SS –laskenta, jossa M_{sf} on noin 1,4 oikealle. Liukupinta kuitenkin kulkee saven lävitse ja saven arvot ovat samat kuin GeoCalc –laskennassa.

Taulukko 5.7. Laskennan turpeen parametrit. Taulukon vesipitoisuus sekä hehketushäviö ovat laskennan lähtötietoja ja loput arvot ovat arvioitu seuraavan sivun valistuneiden arvausten mukaisesti. Savi on mallinnettu Mohr-Coulomb:n avulla ja sen arvot on arvioitu GeoCalc –laskennan mukaisesti.

MCC					
	Vesipitoisuus	lambda	kappa	Huokosluku	Tilavuuspaino
	W_n [%]	λ	κ	e_0	γ_{sat}
Penkereen alla:	225	1,0	0,1	4,4	10,2
VP alla:	450	2,0	0,2	8,0	10,2
Reunoilla:	1000	4,3	0,4	16,8	10,2
	Hehketushäviö	Koheesio	Tehokas kitkakulma	Ved.läp.	Ved.läp. Muutosindeksi
	L_i [%]	c	ϕ'	k_0 ($k_x=k_y$) [m/s]	C_k
Penkereen alla:	90	1	40	1E-09	1,6
VP alla:	90	1	40	1E-08	3,0
Reunoilla:	90	1	40	1E-08	3,0

Taulukkoa 5.7 tarkasteltaessa aluksi näyttäisi, että lujuus olisi merkittävän suuri penkereen reunoilla, mutta käytännössä reunoilla turvekerroksessa tehokkaat jännitykset ovat pienet ja ongelmana onkin hieman lujuuden aliarviointi reunoilla. Pitkäaikaisia deformaatioita mallinnettaessa turpeen vedenläpäisevyys, lepopainekerroin K_0 sekä ylikonsolidoitumisaste nousevat merkittävimmiten tekijöiksi laskennassa. Kyseisiä tekijöitä on pohdittu lisää Tampere – Seinäjoki välin turvekohteissa. Laskennan parametrit osittain myös poikkeavat hieman seuraavan sivun kaavoista.

Plaxis -laskennassa käytetyt parametrit ovat pääosin valistuneita arvioita, jotka pohjautuvat tutkijoiden turpeelle suorittamiin laboratorionkokeisiin. Tämän pohjalta on voitu luoda uskottava yhteenvedo arvioiduista parametreista simulointia varten seuraavien lähtötietojen perusteella: (Hayashi et al. 2014, Badv & Sayadian 2011)

- Turpeen vesipitoisuuden yhteys kokoonpuristuvuuskertoimeen (kaava 5.1).
- Kokoonpuristuvuuskerroin vastaavasti on yhteydessä paisuntakertoimeen (kaava 5.2). Näiden avulla myös saadaan laskennan vastaavat lambda- ja kappa-arvot (kaavat 5.3 & 5.4)
- Vesipitoisuudesta voidaan havaita yhteys huokoslukuun (kaava 5.5).
- Tilavuuspainoa voidaan arvioida pääasiassa laboratorionkokeilla, mutta tässä mallinnuksessa on käytetty arvoa $10,2 \text{ kN/m}^3$.
- Hehkutushäviöön päästään käsiksi vesipitoisuuden avulla. Hehkutushäviön ja vesipitoisuuksien yhtenäisyyksiä on taulukoitu turpeeseen liittyvässä tutkimuksessa (Huat B. et al. 2014).
- Hehkutushäviön avulla voidaan tulkita tehokasta kitkakulmaa ja vedenläpäisevyyden muutoskerrointa (kaavat 5.6 ja 5.7).
- Kitkakulman avulla voidaan arvioida turvekerroksen alkujännitystilaa Jakyn teorioiden mukaisesti (kaavat 5.8 & 5.9).
- Vedenläpäisevyyteen arvioinnissa on hyödynnetty tutkimuksen turvekappaleessa esitettyjä arvoja ja laskennassa on käytetty 10^{-9} m/s . Laskennassa on kuitenkin käytetty liian pieniä vedenläpäisevyyksiä, jotta turpeen sekundaaripainuman luonne saataisiin paremmin simuloitua.

$$C_c = 0,01 * W_n \quad (5.1)$$

$$C_s = 0,1 * C_c \quad (5.2)$$

$$\lambda = \frac{C_c}{2,3} \quad (5.3)$$

$$\kappa = \frac{C_s}{2,3} \quad (5.4)$$

$$e_0 = 0,016 * W_n + 0,819 \quad (5.5)$$

$$\varphi' = 0,19 * Li + 32 \quad (5.6)$$

$$C_k = 0,024 * Li + 0,8 \quad (5.7)$$

$$K_{0NC} = 1 - \sin\varphi' \quad (5.8)$$

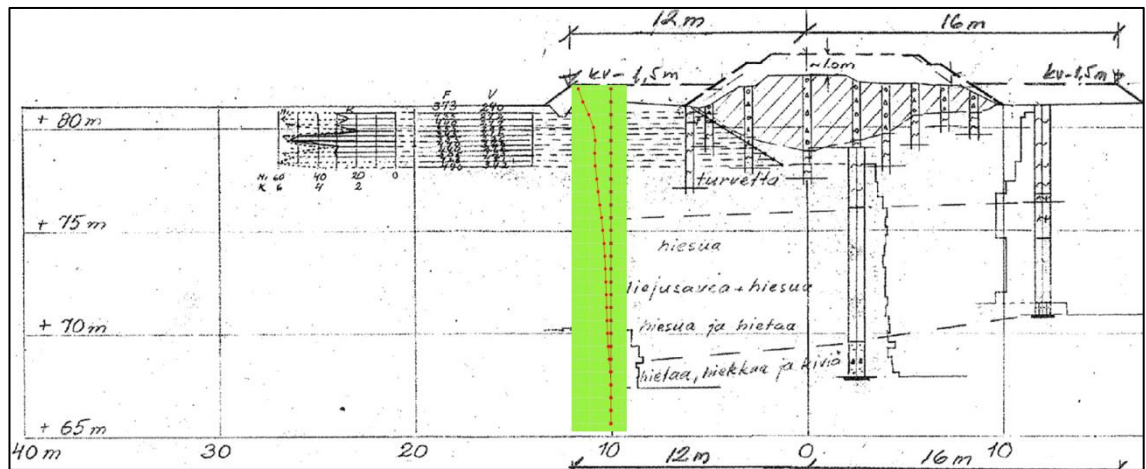
$$M = \frac{6 * \sin\varphi'}{3 - \sin\varphi'} \quad (5.9)$$

missä

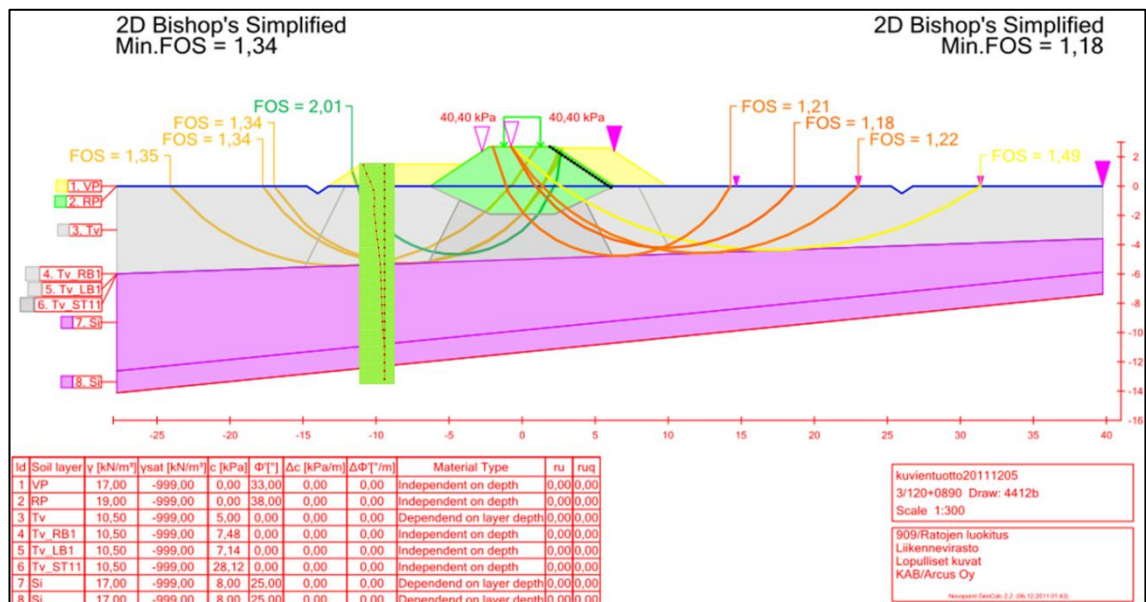
W_n	on vesipitoisuus [%]
C_c, λ	ovat kokoonpuristuvuuskertoimet
C_s, κ	ovat paisumiskertoimet
e_0	on huokosluku
φ', Li	ovat tehokas kitkakulma [°] ja hehkutushäviö [%]
K_{0NC}, M	ovat lepopainekerroin ja kriittisen tilan parametri
C_k	on vedenläpäisevyyden muutosindeksi

Kilometri 120+899 (Hattula):

Kohteen mittaus on keskeytetty. Viuhkamaista siirtymää kohteessa on ollut noin 15 mm ja siirtymiä on kertynyt noin 3 mm/vuodessa. Kohteen ratapenger on rakennettu turpeen päälle ja turvekerroksen paksuus on noin 4 metriä. Tämän alla on vielä noin 5 metriä liejuista savea ja savista silttiä. Kohteessa on vastapenkeret ja ratapenger on painunut turpeeseen. Kuvassa 5.11 on esitetty poikkileikkaus ja putken taipumaprofiili. Vastapenkeret ja pengeri aiheuttavat painumaa, joka osittain vaikuttaa putken hitaaseen liikkeeseen. Kuvassa 5.12 on laskettu kohteesta karkea stabiliteettilaskelma, jossa FOS vasemmalle noin 1,3. Leikkausvyöhykkeen kohdalla siirtymiä on noin 2 mm/vuodessa ja osa näistäkin johtuu pääosin pengermateriaalin lakoamisesta.



Kuva 5.11. Poikkileikkaus kilometrin 120+890 kohdalta (Geo-piirustukset)



Kuva 5.12. Havainnollistava GeoCalc -laskenta, jossa FOS vasemmalle noin 1,35. (RATUS)

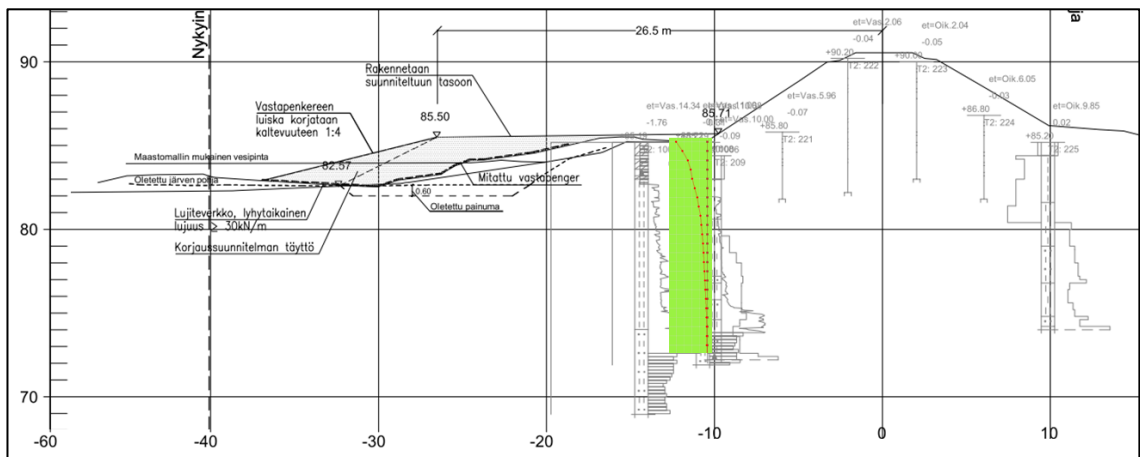
5.3.3.2 Tampere – Jyväskylä

Kilometri 229+980 (Pehmeikkö 40):

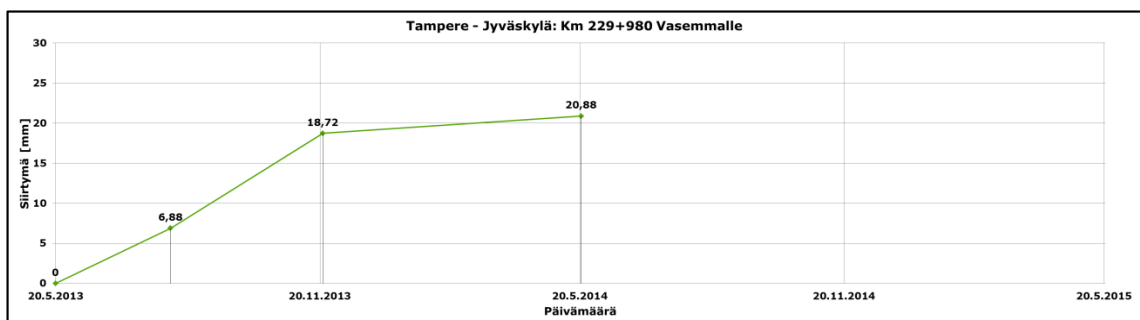
Ratapenkereen vasemmalle puolelle on tehty louheesta vastapenger, joka ulottuu järveen sekä oikealla puolella kulkee tie. Ratapenger on suhteellisen korkea eli noin 5-8 m ja on aikoinaan rakennettu suurikokoisten kivien päälle. Penger on lisäksi painunut noin metrin kuivakuorisaveen. Kuivakuorikerroksen alla on savea tai siltistä savea. Kuvassa 5.13 on kohteesta poikkileikkaus ja putken taipumakuvaaja. (Seurantakortit)

Kohteessa on suoritettu vasemmalla olevaan vastapenkereeseen parannustoimenpiteitä vuonna 2011 kuvan 5.13 mukaisesti. Vastapenkereen osittaisen sortuman jälkeen kohteeseen on asennettu inklinometriputki. Siirtymiä kohteessa on noin 9 kuukauden ajanjaksolla kertynyt 20 mm. Tämän jälkeen mittaukset on lopetettu, sekä aloitettu uudestaan vuonna 2013.

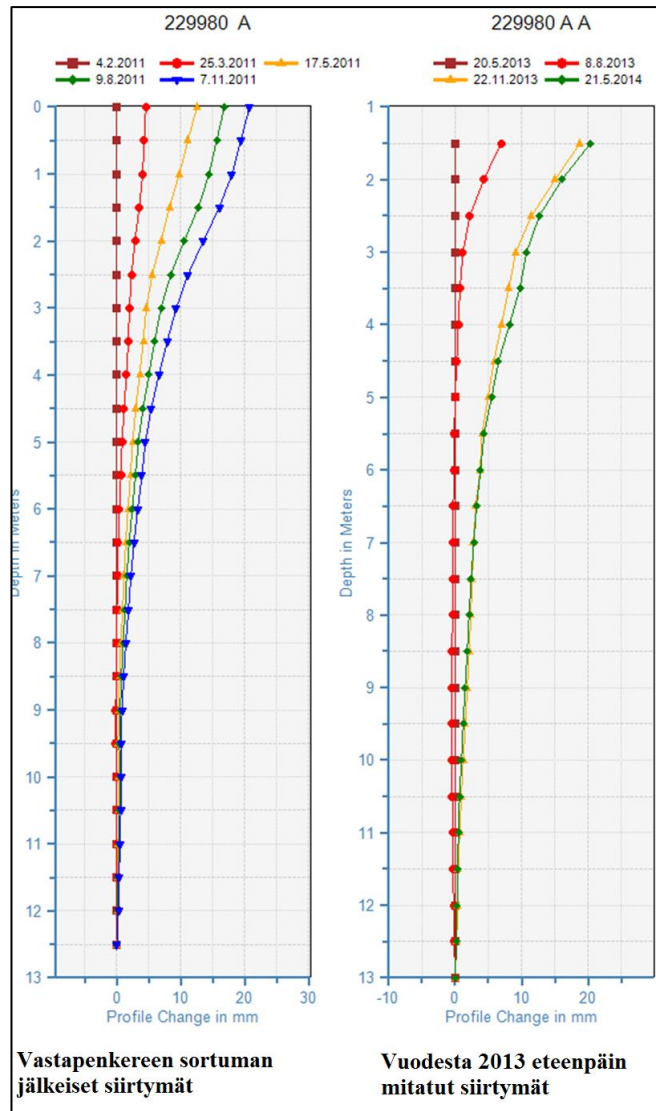
Siirtymiä järveen päin on vielä korjaustoimenpiteiden jälkeen 2013-2014 vajaan vuoden aikana kertynyt noin 20 mm, jotka on esitetty kuvassa 5.15. Siirtymä on tosin hiipunut viimeisen puolen vuoden aikana ja lähes pysähtynyt viimeisessä mittauksessa vuoden 2014 lopulta. Kuvassa 5.14 on siirtymä-aika kuvaaja kohteesta.



Kuva 5.13. Poikkileikkaus ja putken taipumaprofiili vuosilta 2013-2014. Vasemmalla puolella on järvi johon louhepenger on rakennettu. Putki on aivan penkereen juuressa. (Seurantakortit)

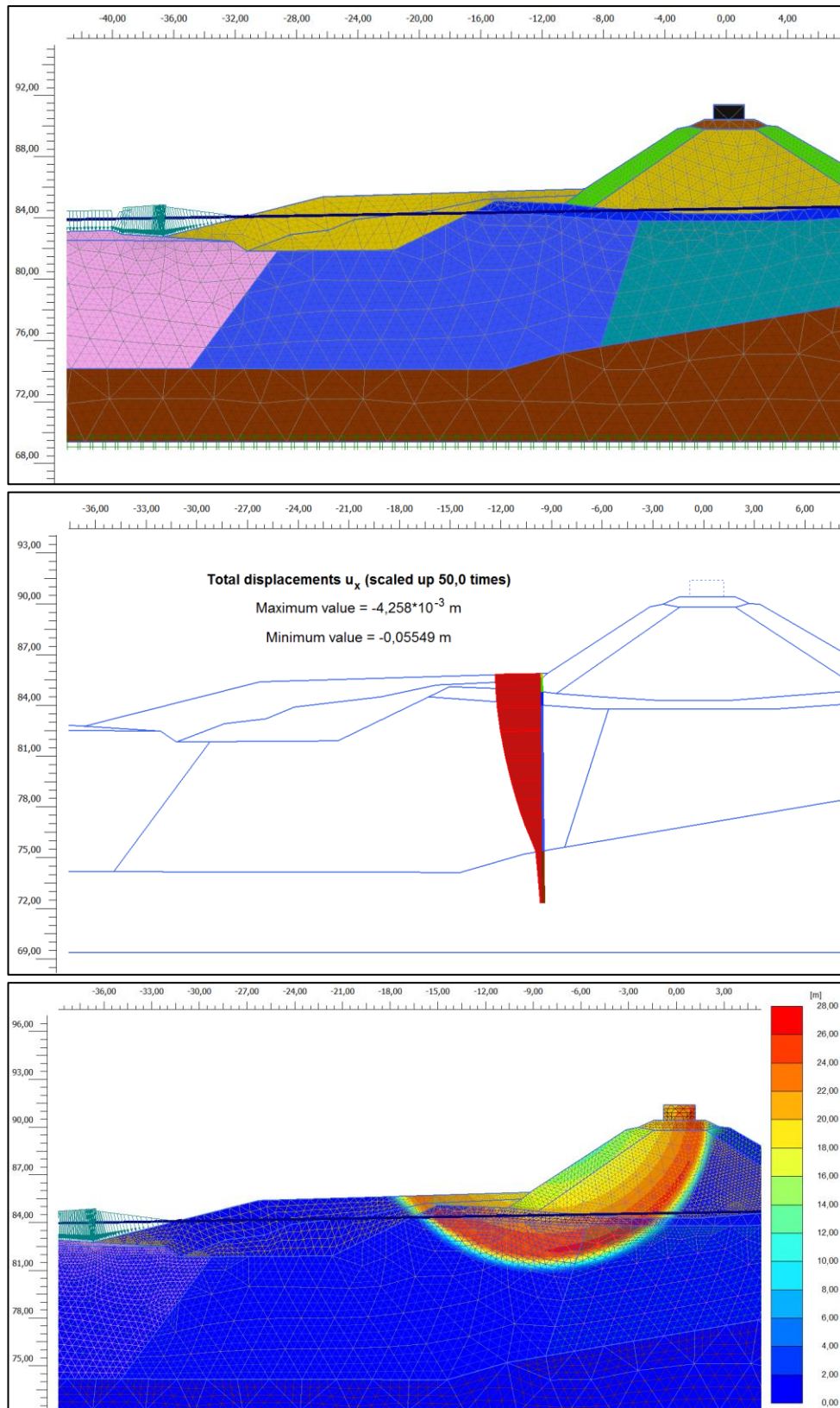


Kuva 5.14. Siirtymä-aika kuvaaja. Kohteessa on ollut puolivuotta nopeaa siirtymää putken asettumisesta, jonka jälkeen siirtymä on tasaantunut nopeuteen 4 mm/vuodessa. Vastapenger kohteeseen on rakennettu vuoden 2011 aikana.



Kuva 5.15. Vasemmalla työnaikaiset siirtymät ja oikealla rakentamisen jälkeiset siirtymät. Kahden viimeisen mittauksen aikana ovat siirtymät hiipuneet nopeuteen 3-4 mm/vuodessa.

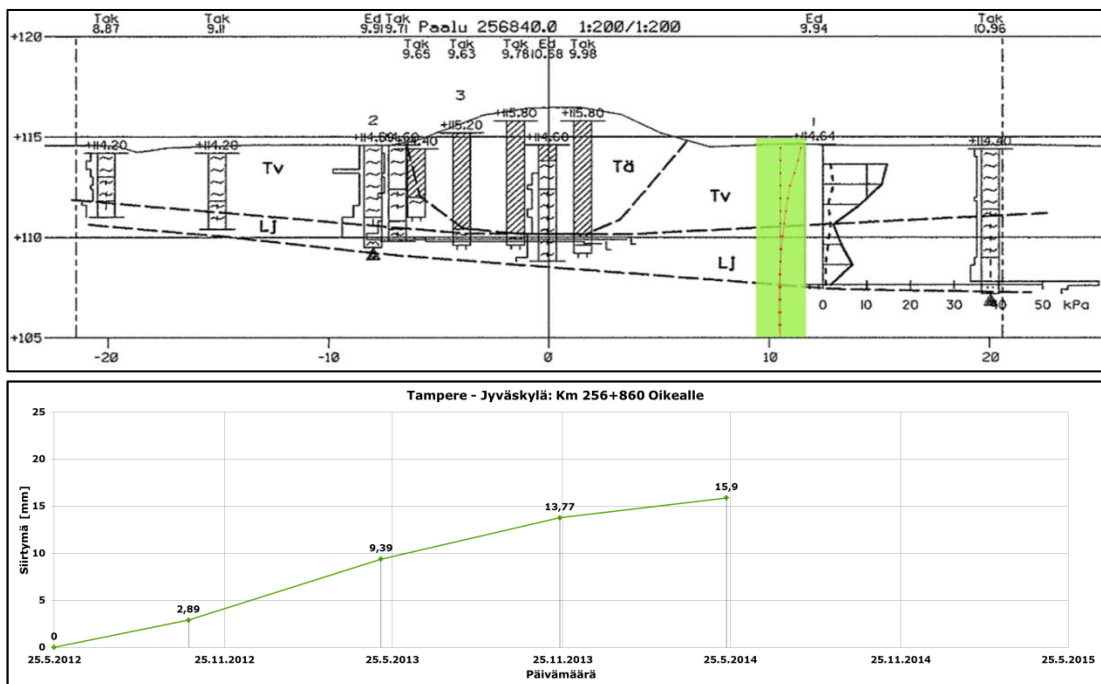
Kuvassa 5.16 on stabiliteettilaskenta kohteesta, jossa M_{sf} on noin 1,4 junakuormalla ja ilman junakuormaa noin 1,6. Käytännössä vakavuus voi olla tätäkin suurempi johtuen silttisestä pohjamaasta. Lähtötietoina kohteesta oli vain muutama kairaus. Yläpuolen kuvasta 5.15 huomataan että kohteessa on hieman viuhkamainen siirtymä sekä vastapenkereen rakentamisen aikana, että vielä vuosi rakentamisen jälkeen. Tämä on linjassa ymmärryksen kanssa, että vastapenkereet aiheuttavat lisää painumia kohteessa ja tätä myötä sivusiirtymiä. Työnaikaisissa siirtymissä derivaatta oli lopussa noin 16 mm/vuosi putken yläpäässä. Vuosien 2013-2014 välillä siirtymä on jatkunut samalla nopeudella aluksi, mutta on viimeisten kuukausien aikana kuitenkin hiipunut ja pysähtynyt viimeisessä mittauksessa vuoden 2014 lopussa. Tarkistussummassa on myös hieman virhettä rakentamisen aikaisissa mittauksissa vuodelta 2011.



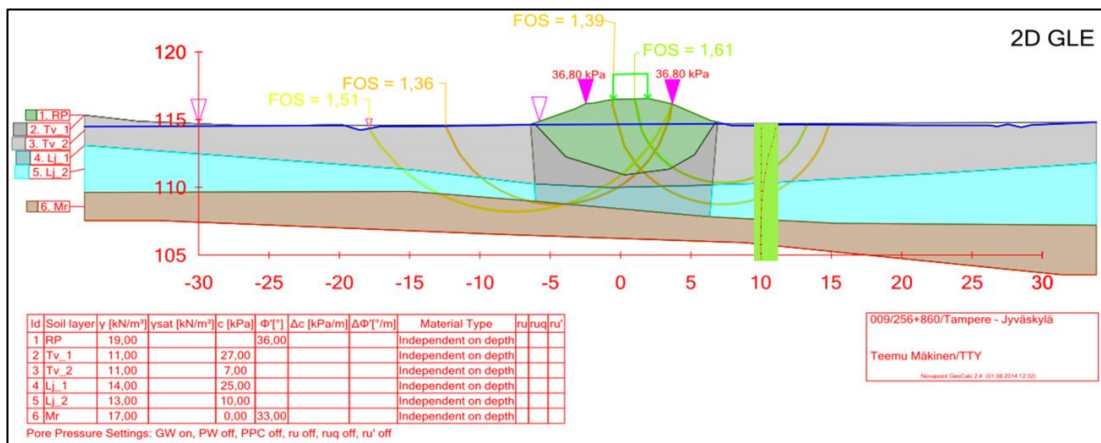
Kuva 5.16. Ylhäällä on laskentaverkko, keskellä on yksinkertaisen Mohr-Coulomb:n laskennan kertyvät siirtymät vastapenkereen rakentamisesta (50 mm) ja alhaalla on junakuormalla syntyvä liukupinta. Plaxis –laskelman M_{sf} on noin 1,4 ja ilman juna-kuormaa noin 1,6.

Kilometri 256+860 (Pehmeikkö 71):

Kohteessa ratapenger on painunut lähes kokonaan turvekerroksen pohjalle. Reunoilla turvekerroksen paksuus on noin 3-4 metriä sekä turpeen alla on ohut kerros liejua. Kohteessa on viuhkamainen putken taipuma ja maan pinnalla siirtymää on noin 3 mm/vuodessa. Siirtymiä yhteensä on mitattu 14 mm ja mittauksia on suoritettu vuosilta 2012-2014. Derivaatta kuvassa 5.17 indikoi vielä lisää siirtymiä kohteessa. Kuvassa 5.17 yläpuolella on esitetty poikkileikkaus sekä alapuolella on siirtymä-aika kuvaaja. Kohteessa ei näytä olevan merkittäviä vastapenkereitä. Oletettavasti penger hieman laakoa turpeeseen sivusuunnassa. Kuvassa 5.18 on stabiliteettilaskenta kohteesta, jossa FOS oikealle putken suuntaan on noin 1,4.



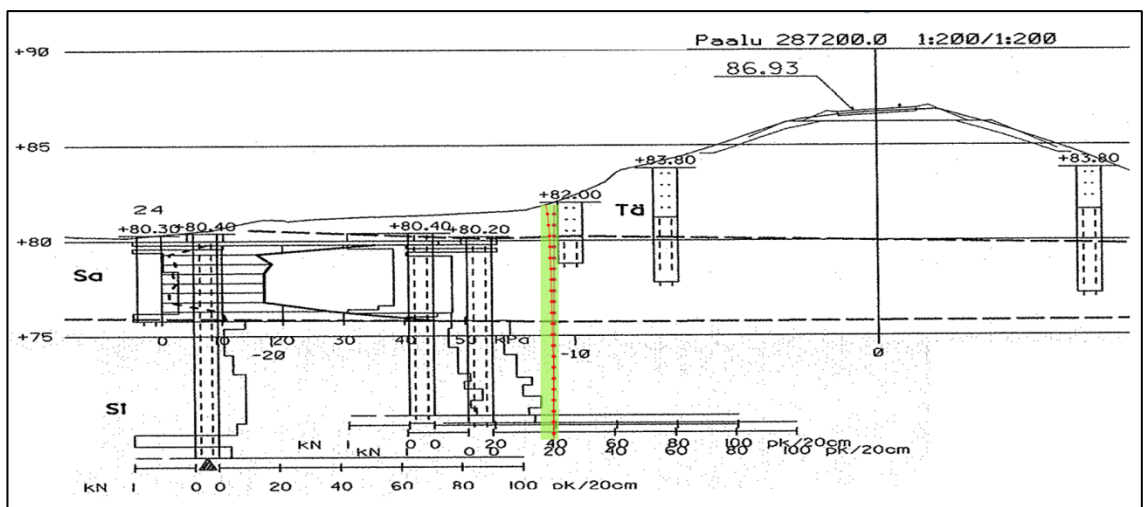
Kuva 5.17. Yläpuolella on poikkileikkaus ja putken taipumaprofiili kohteesta. Alapuolella on siirtymä-aika kuvaaja. Siirtymiä on nykyään noin 3 mm/vuodessa. (Geopiiirustukset)



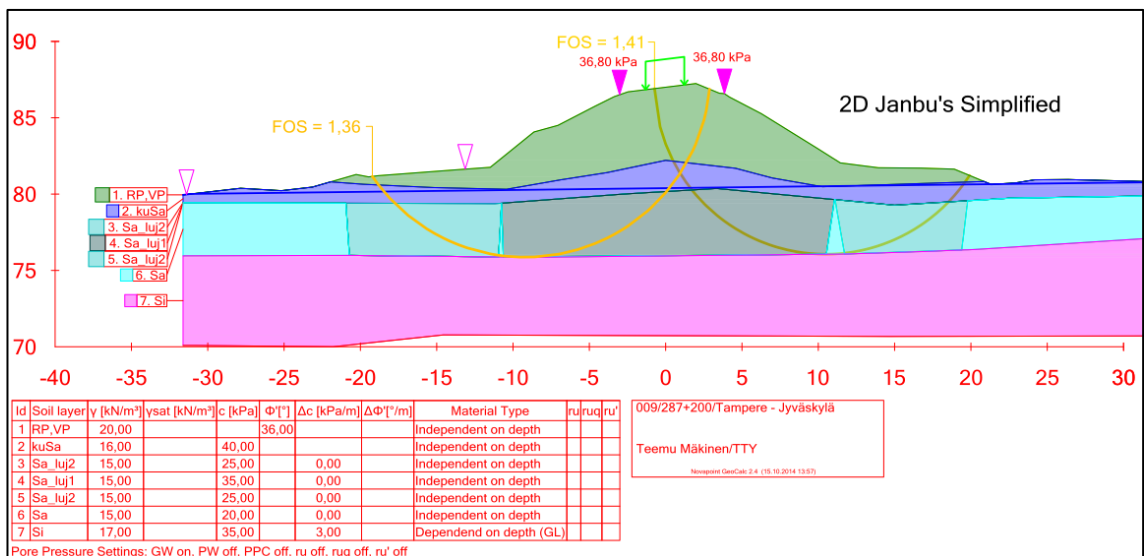
Kuva 5.18. Havainnollistava Geocalc –laskenta kohteesta, jossa FOS oikealle noin 1,4

Kilometri 287+200 (Pehmeikkö 96):

Kohteessa on noin 4-8 metriä korkea ratapenger. Kohteen matalat vastapenkeret on rakennettu vuonna 1973. Penger on painunut saveen hieman ja kohteen inklinometrissä ei ole juurikaan siirtymiä. Riskinä tilanteessa on etenkin jyrkän pengerluiskan takia pienimuotoiset luiskasortumat, mutta kuitenkin mittausdatassa ei ole liikettä havainnointu. Kuvassa 5.19 on poikkileikkaus ja taipumaprofiili sekä kuvassa 5.20 on stabiliteettilaskenta kohteesta, jossa FOS vasemmalle on noin 1,4. Hienorakeinen maalaji kohdalla on poikkileikkauksen kairausten perusteella silttiä, mutta yläosiin on myös arvioitu savikerros. Tällöin voidaan arvioida, että siipikairan käyttäytyminen hieman silttisessä materiaalissa ei ole välttämättä haluttua. Tällöin on mahdollista, että materiaaliominaisuudet kohteessa lähestyvätkin kitkamaan ominaisuuksia. (Seurantakortit)



Kuva 5.19. Poikkileikkaus kilometrin 287+200 kohdalta (Seurantakortit)



Kuva 5.20. GeoCalc –laskenta kilometrin 287+200 kohdalta, jossa FOS vasemmalle ja oikealle noin 1,4.

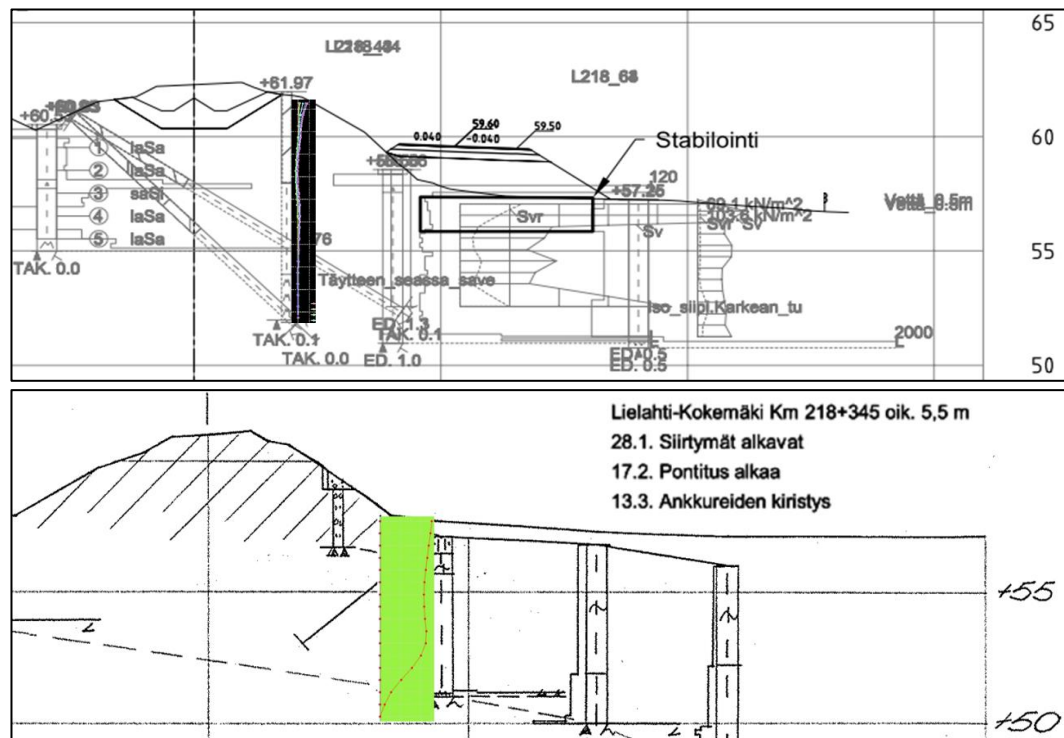
5.3.4 Tutkimuskohteet 2: Tampere – Kokemäki – Rauma

5.3.4.1 Tampere – Kokemäki

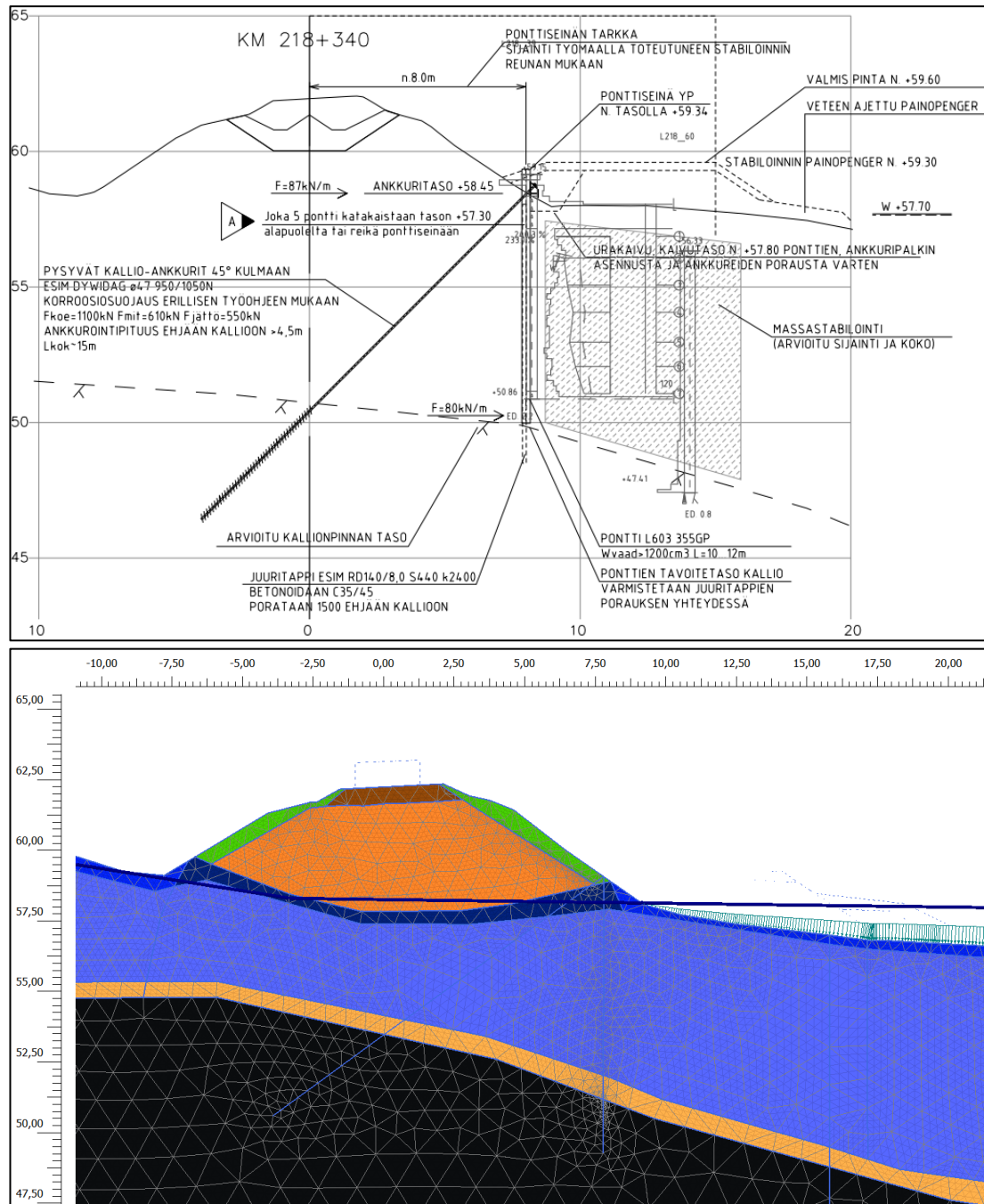
Kilometrit 218+345 & 218+400 (Leukaluut):

Kohteessa ratapenkereen oikealla puolella on järvi sekä ratapenger on rakennettu sivukaltevan pohjamaan päälle. Penger materiaalia on painunut noin metrin verran saveen. Savikerroksen paksuus on noin 8 m sekä tämän alla on ohut moreenikerros ja lopuksi kallio. Alkuperäinen vastapenger on pengerrytetty järveen vuonna 1960. Kohteeseen on suoritettu vuoden 2014 alussa massastabilointi kuvan 5.22 mukaan. Massastabilointi on suunniteltu kohteeseen rakennettavan uuden tiepenkereen alle. Kohteeseen on kuitenkin jouduttu asentamaan tukiseinä stabiloinnin aikana syntyneen kiihtyvän sivusiirtymän johdosta. (Seurantakortit)

Kuvassa 5.21 on havainnollistettu stabiloinnissa syntyneitä äkillisiä siirtymiä. Putken yläpäässä siirtymiä on kertynyt noin 80 mm kuukauden aikana sekä leikkautuvalla vyöhykkeellä noin 27 mm. Äkillisten siirtymien johdosta kohteeseen on jouduttu rakentamaan tukiseinä kuvan 5.22 tapaan. Kilometrin 218+345 kohdalla merkittäviä siirtymiä ponttiseinän rakentamisen jälkeen ei ole mitattu. Stabiloinnin aikaiset mittaukset on suoritettu tammi-helmikuussa 2014.



Kuva 5.21. Ylhäällä on alkuperäinen rakentamissuunnitelma. Keskellä on esitetty ankkureiden kiristämiseen mennessä kertyneet sivusiirtymät, sekä alhaalla on putken yläpään siirtymä-aika kuvaaja kohteesta. (Geo-piirustukset)

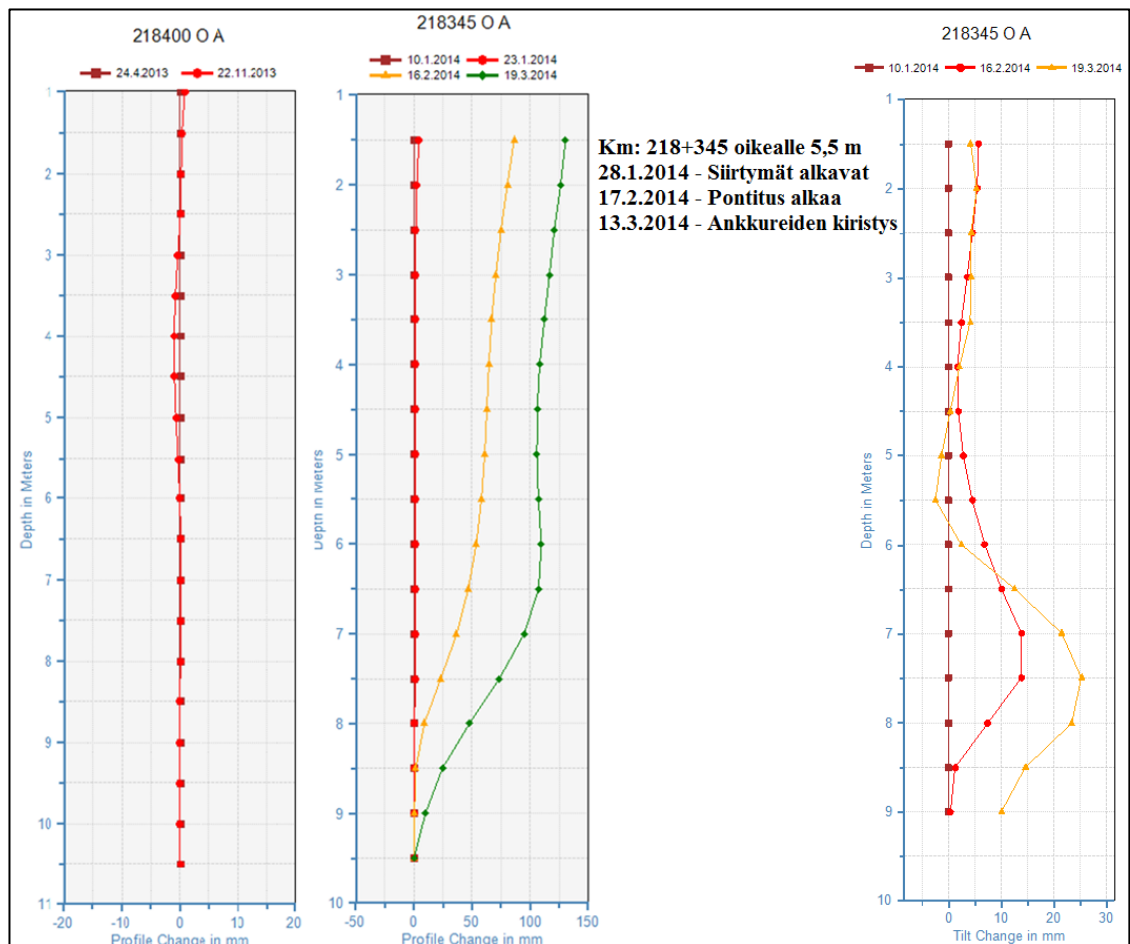


Kuva 5.22. Yläpuolella rakennussuunnitelma ponttiseinää varten sekä alapuolella SS laskennan alkutilanteen geometria (Geo-piirustukset)

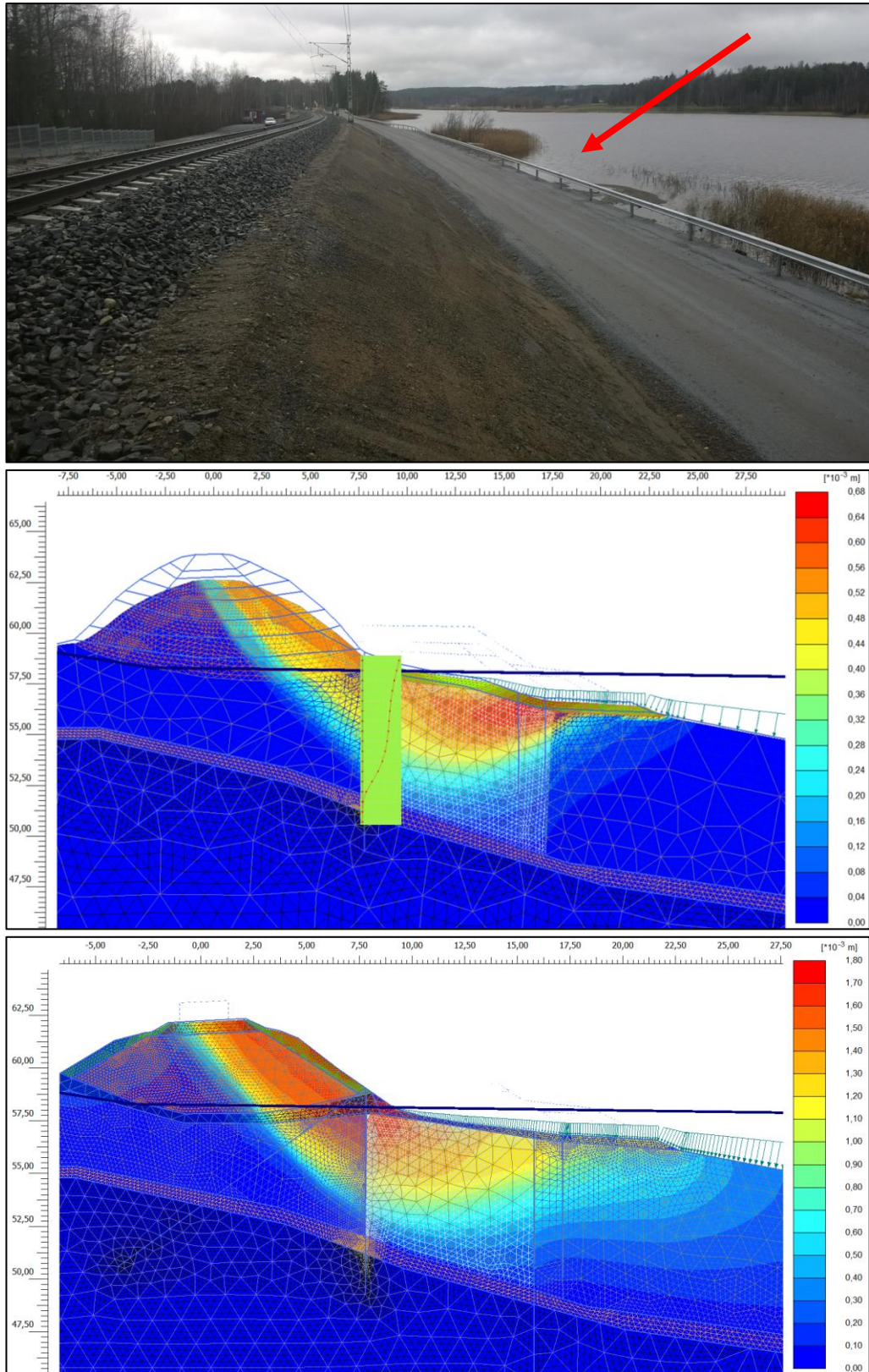
Tilanteessa on vaikea arvioida stabiloinnin lopullista vaikutusta maaperään, mutta massastabilointi on suoritettu talviolosuhteissa, jossa massan sekoittuminen on tapahtunut kylmässä. Tällöin lujuuden kehittyminen on saattanut olla merkittävän hidasta. Lisätietojen perusteella pohjamaahan olisi päässyt kylmää vettä sekoituksen yhteydessä. Tällöin voidaan arvioida saven suljetun leikkauslujuuden tippuneen hetkellisesti noin 1-3 kPa luokkaan. Penkereen käyttäytymisen perusteella savi olisi hieman siltistä tai vähintään laihaa savea. Kuitenkin laboratoriokokeet penkereen vierestä viittaisivat enemmän lihavaan ja sensitiiviseen saveen.

Kuitenkin kohteen savi on mahdollistanut saven lähes 3 % leikkausmuodonmuutokset ennen pontitusta. Leikkausmuodonmuutoksista on kerrottu enemmän kappaleessa 3.9 sekä yhteenvetokappaleessa 5.4. Kuvassa 5.24 on mallinnettu Plaxiksella kohteen siirtymiä asettamalla penkereen viereen kuviteltu massastabiloitu alue. Malli ennustaa, että ennen pontitusta pengeri on ollut erittäin lähellä liukupintasortumaa.

Tilanteessa on myös saattanut vaikuttaa kohtuullisen lähellä maanpintaa sijainnut kallio, jota pitkin savi on voinut liukua. Toki myös oikean puolen järvi on mahdollistanut saven liikkumisen heikompaan suuntaan. Saven liikkeelle on tällöin ollut otollista pohjamaan viettäminen järven suuntaan. On myös mahdollista, että stabilointi ei ole ulottunut aivan savikerroksen pohjaan saakka, mikä on voinut edesauttaa saven leikkaantumista. Kuitenkin maan häiritseminen oikealla puolella rataa aiheutti alkaneet siirtymät ja tätä voidaankin vertailla muihin rata-alueisiin. Tällöin yllättävät olosuhteen muutokset ratapenkereen ympärillä voisivat laukaista vastaavanlaisen tilanteen.



Kuva 5.23. Vasemmalla siirtymät rakentamista ennen 218+400 kohdalta, keskellä stabiloinnin ja pontituksen aikaiset siirtymät sekä oikealla kulman muutos josta havainnollistuu leikkausvyöhykkeen sijainti näkyvästi (noin 7,5 metrin kohdalla eli 6 metrin syvyydellä maanpinnasta). Virhettä mittauksessa aiheuttaa kuitenkin putken erkaneminen pohjasta pontituksen aloitushetken jälkeen 16.2.2014. Putken irtoaminen kallion pinnasta tällöin vääristää loppuhetkien siirtymiä.



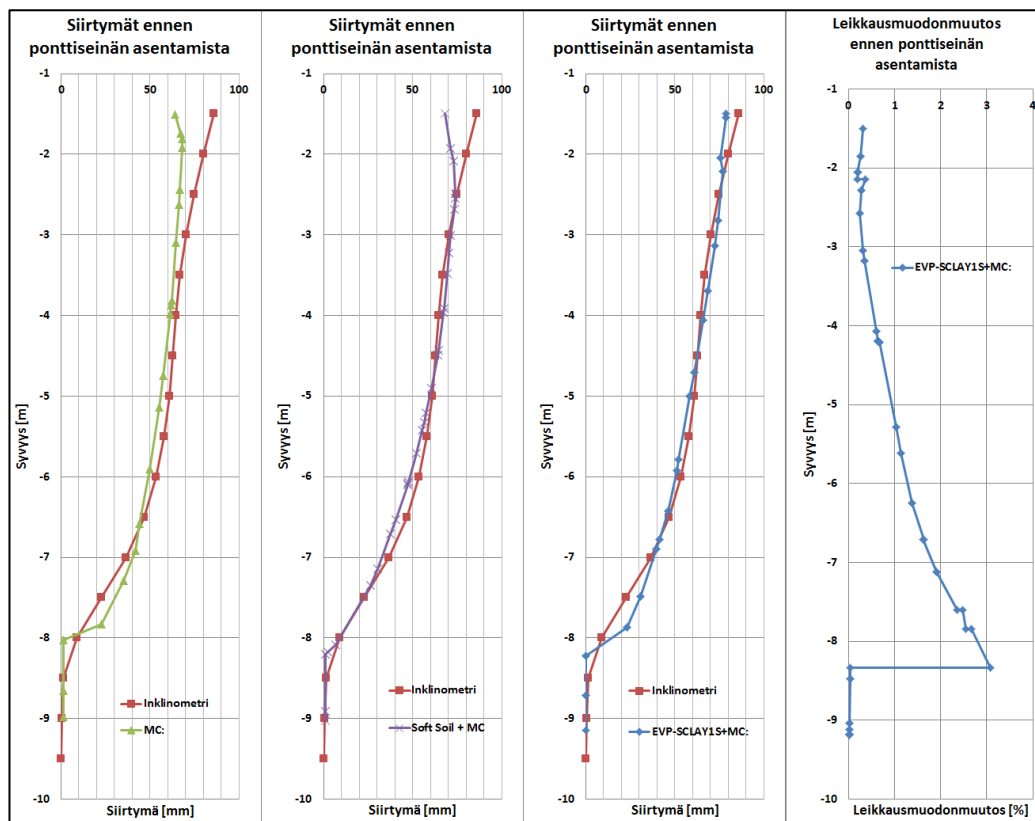
Kuva 5.24. Ylhäällä on peilikuvaksi käännetty valokuva valmiiksi rakennetusta kohteesta (Bäcklund). Keskellä on Plaxis –simuloinnin pengerrakennettu EVP-SCLAYIS saven päälle vaiheittain. Stabiilituusosuus on mallinnettu MC:llä ja kuvien kehittyvät liukupinnat ovat ajalta ennen pontituksen aloittamista. Alhaalla on vielä SS+MC –mallinnuksen kehittyvä liukupinta.

Taulukko 5.8. Plaxis -laskentojen mitatut siirtymät ja parametrit. Kaikki laskennat ovat olleet lähes sortumapisteessä simuloinnin lopussa. Alapuolella on esitetty Plaxis -laskennoissa käytetyt parametrit. Stabiloidulle savelle on käytetty MC-mallia ja suljetuna leikkauslujuutena arvoa 2 kPa.

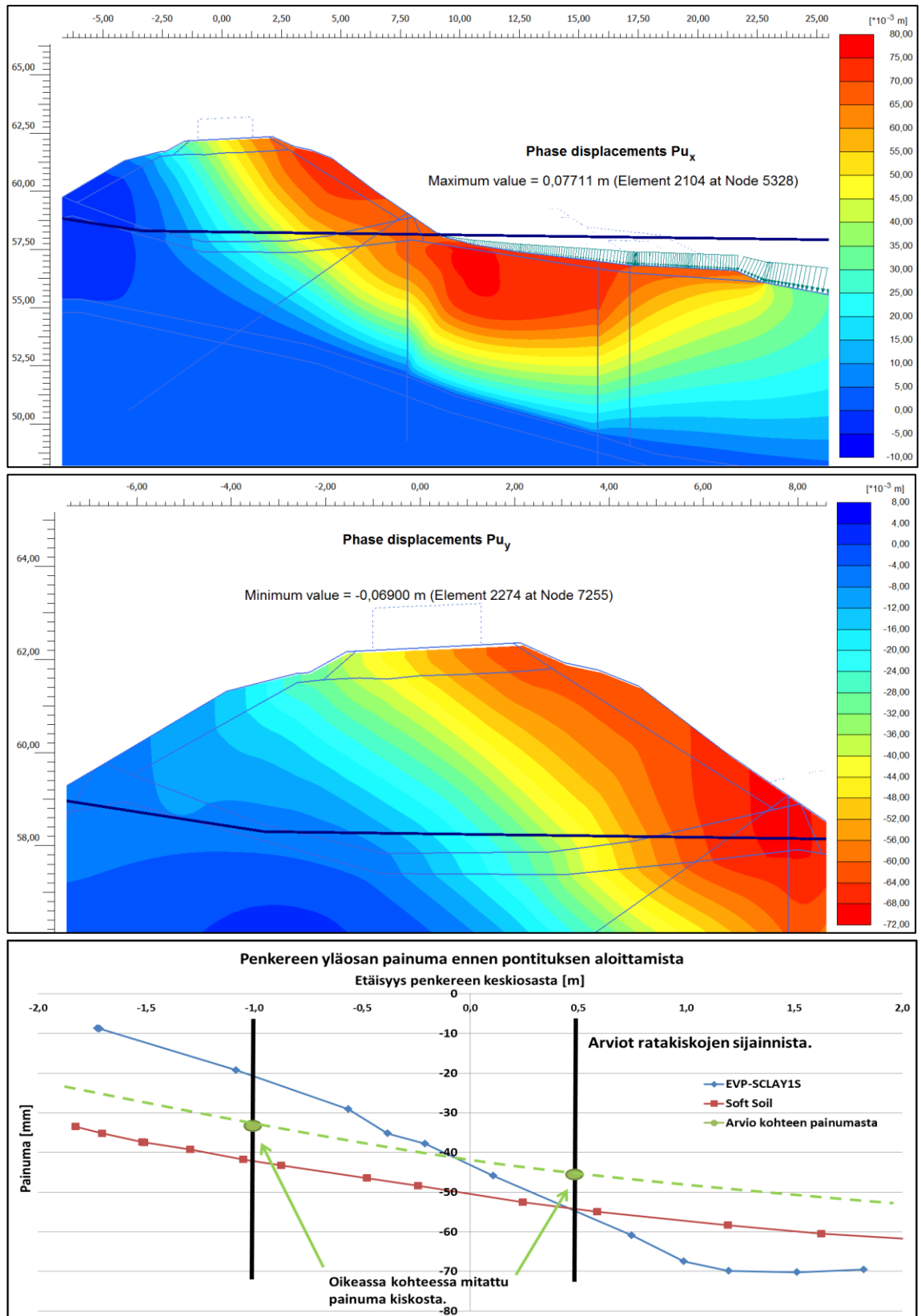
Malli	Aika	Leikkautuvan vyöhykkeen siirtymä:		Maksimi siirtymä	Leikkausmuodonmuutos
	[d]	[mm]		[mm]	[%]
Inklinometri	24	27		86	2,7
Soft Soil + MC	40	27		73	2,7
MC	40	30		68	3,0
EVP-SCLAY1S+MC	40	30		79	3,0

Malli	γ	e	λ	κ	M	c'	φ'	ψ	$k_x=k_y$	C_k
	kN/m ³					kN/m ²	ast.	ast.	m/day	
Soft Soil + MC	16	1,5	0,13 (λ^*)	0,013 (κ^*)	1,5	1	28	4	0,01	
MC	16	1,5				10-30			0,01	
EVP-SCLAY1S+MC	16	1,5	0,13	0,013	1,07		~27		0,009	0,75
	ν'	OCR	N^*	μ^*	α_0	ω	ω_d	χ_0	ξ	ξ_d
	0,2	1	8	5,00E-06	0,24	18,9	0,48	10	14	0,18

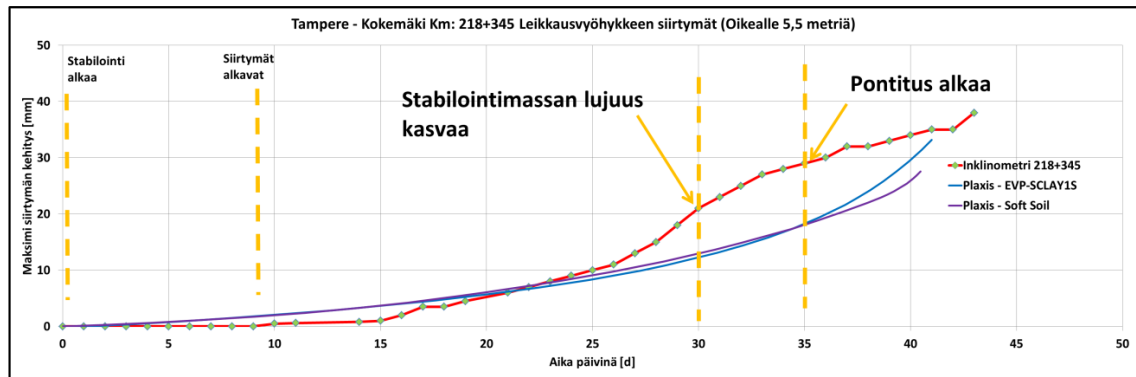
Täyttö (HS)	γ	E_{50}	E_{oed}	E_{ur}	power (m)	c'	ϕ'	ψ	$k_x=k_y$
		19	2,00E+04	2,00E+04	6,00E+04	0,5	1	35	5



Kuva 5.25. Plaxisen ja inklinometrin siirtymät. Huomataan, että EVP-SCLAY1S+MC:n tuottamat siirtymät ovat hyvin lähellä todellisia siirtymiä simuloinnin lopussa. Leikkautuvan vyöhykkeen kohdalla siirtymiä on ollut vajaat 27 mm 20 päivän aikana. Näin suurilla siirtymillä leikkausmuodonmuutos kolmen viikon aikana on ollut noin 2,7%. Geometriasta arvioituna inklinometriputki ei ole sijainnut täysin suoran leikkauksen kohdalla, vaan hieman aktiiviyökkellä lähempänä raidetta.



Kuva 5.26. Ylhäällä on penkereen sivusiirtymät SS simuloinnissa, keskellä on vastavasti penkereen yläosan painuma ja alhaalla on vielä esitetty todellinen painuma oikeassa kohteessa kiskosta mitattuna. Laskenta on suoritettu kohdalta ennen pontituksen aloittamista. EVP-SCLAY1S mallinnuksessa penkereen yläosa ei ole täysin geometria vastaava ja tästä johtuen painumaprofilikin on erilainen.



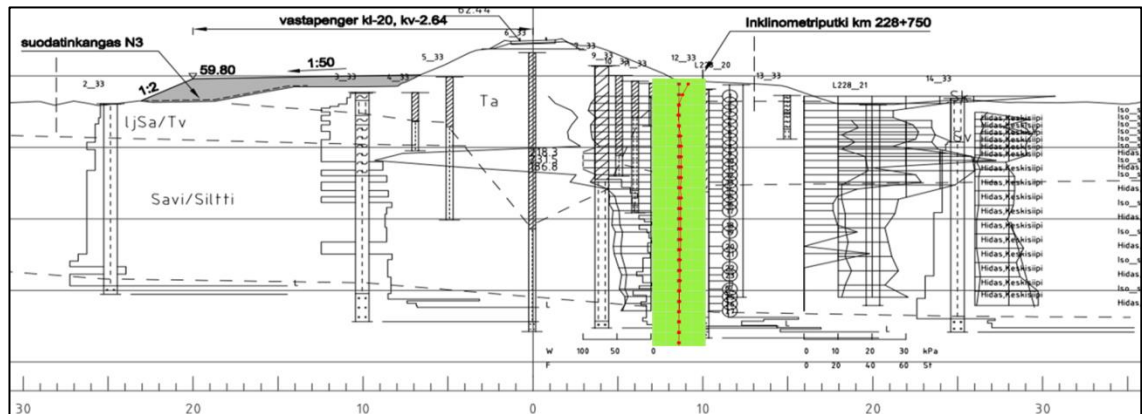
Kuva 5.27. Siirtymä-aika kuvaaja. Siirtymät on mitattu leikkausvyöhykkeen kohdalta. Kuvassa punaisella on inklinometrimitausten siirtymät sekä sinisellä on EVP-SCLAY1S+MC ja violetillä SS+MC siirtymien kehittyminen Plaxis -simuloinnissa. Kuvasta voidaan huomata, että stabiloinnin käyttäytymistä ei voida simuloinnissa yksinkertaisesti mallintaa yhtä tehokkaasti. Siirtymiä on vielä myöhemmin pohdittu yhteenveto kappaleessa 5.4.

Kuvassa 5.27 on esitetty leikkausvyöhykkeen siirtymät. Tällä kohtaa siirtyminen ei ole ollut lineaarista ja muistuttaa penkereiden sorrutuskokeissa muodostuneita kiihtyviä siirtymiä. Kuvassa siirtymät alkavat noin 9 päivän kohdalta ja noin 30 päivän kohdalla saavutetaan 2 % leikkausmuodonmuutokset eli noin 20 mm siirtymiä. Viimeisen 5 päivän aikana ennen stabilointimassan lujittumista huomataan vielä selkeä eksponentiaalisesti kiihtyvä siirtymä. Tällöin leikkausmuodonmuutos kasvaa 1% viiden päivän mittaisella ajanjaksolla. Näin suurella muutosnopeudella voisi olettaa, että hyvin pehmeä ja sensitiivinen savipenger olisi jo sortunut ottaen huomioon aiemmat deformaatiot kohteessa.

Penkereen alta ei ollut suoritettu laboratorioskokeita, mutta penkereen käyttäytyminen viittaa siihen, että saven ominaisuudet olisivat penkereen alla erilaiset kuin reunalla lähellä järveä suoritetuissa kartiokokeissa. Kartiokokeissa sensitiivisyys oli noin $St=20$ lähellä maanpintaa ja lähempänä kalliota noin $St=50$. Suljettu leikkauslujuus vastaavasti lähellä arvioitua liukupintaa oli noin $S_u=10$ kPa. Kyseisen kohteen siirtymiä käsitellään vielä lisää yhteenveto kappaleessa 5.4.

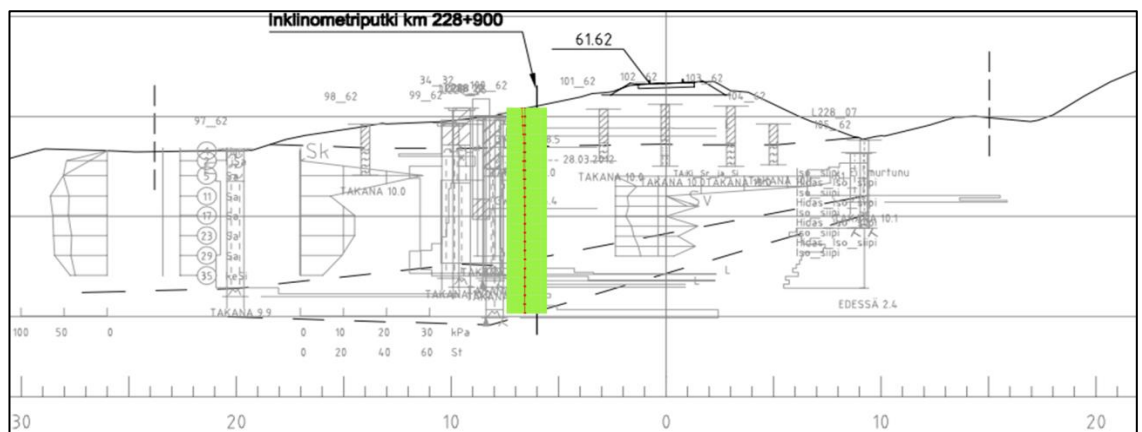
Kilometrit 228+750, 228+900, 228+950 & 228+980 (Pehmeikkö 7a):

Kilometrillä 228+750 kohteessa on noin 4-6 metrin korkuinen ratapenger rakennettu liejuisen saven ja saven varaan sekä täyttömateriaalia on painunut noin 2-3 metriä. Siirtymiä kohteessa ei ole juurikaan rekisteröity, mutta kohteessa on ollut osittainen sortuma noin kilometrin 228+700 kohdalla. Poikkileikkauksen kuvan 5.28 mukaisesti kohteeseen on rakennettu vastapenger vasemmalle puolelle sekä oikealla puolella on lyhyt vastapenger, johon putki on asennettu. (Seurantakortit)

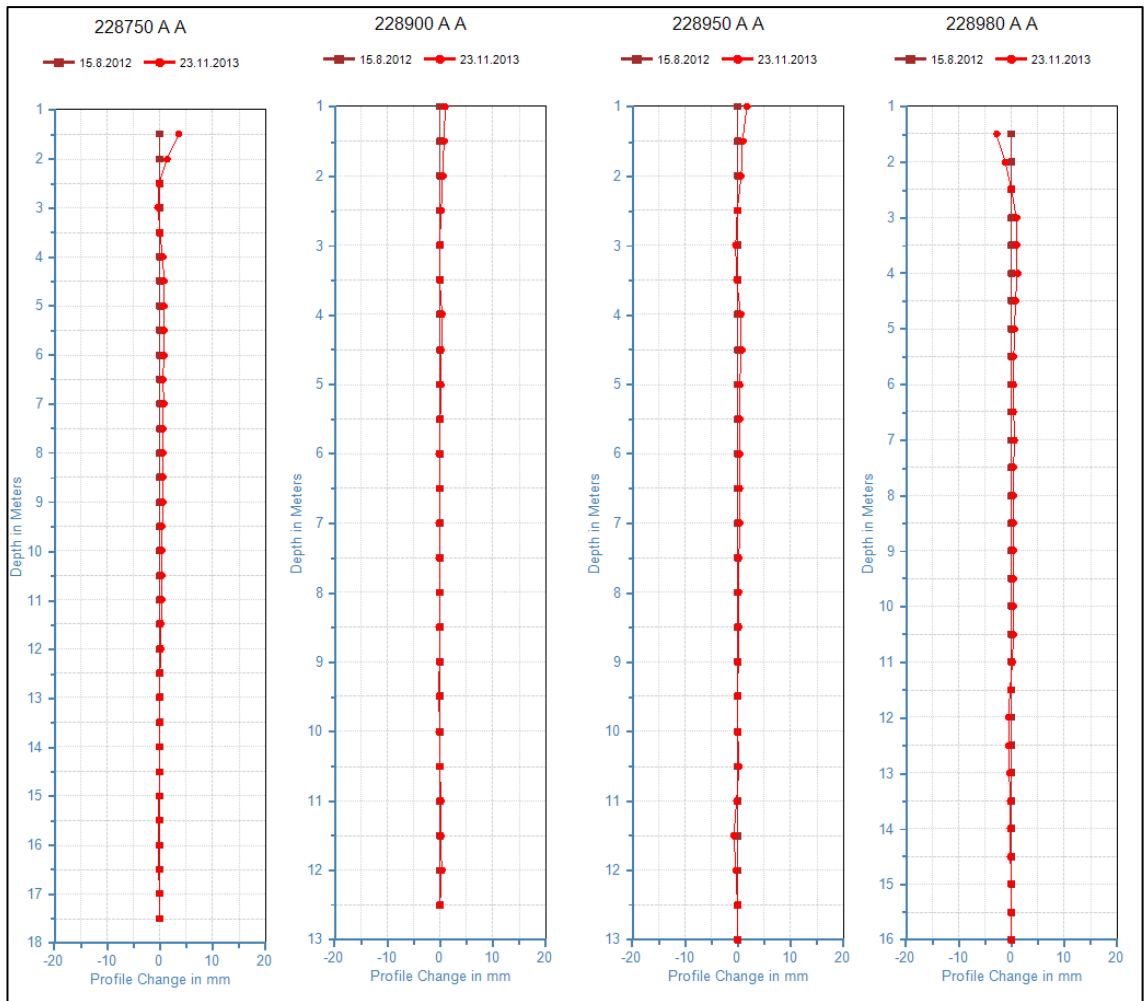


Kuva 5.28. Poikkileikkaus kilometrin 228+750 kohdalta (Seurantakortit)

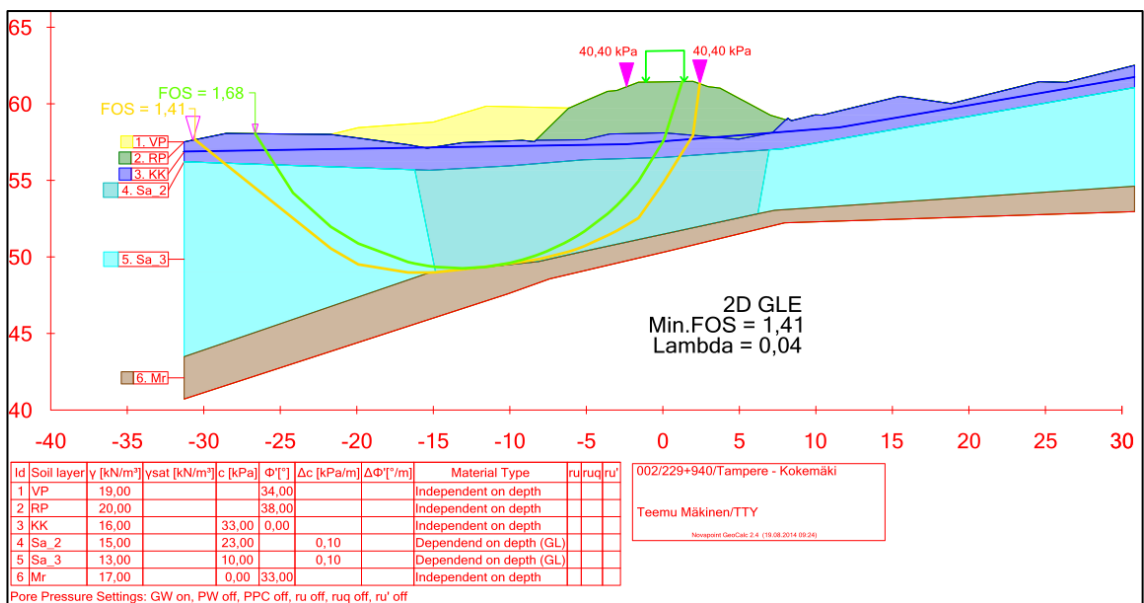
Kilometreillä 228+900, 228+950 ja 228+980 on vastaavasti ratapenger kaltevasa rinteessä. Kohteessa on kunnostettu vastapengertä vuoden 2012 aikana. Penkereen korkeus on noin 3-5 metriä ja se on painunut liejuiseen saveen ja saveen. Penkereen alapuolisen savikerroksen paksuus on noin 5-8 metriä. Kuvassa 5.29 on poikkileikkaus kilometrin 228+900 kohdalta. Inklinometriputket on asennettu penkereen vasemmalle puolelle, ja oletetusti siirtymiä kertyisi vasemmalle pois ratapenkereestä. Putkissa kuvan 5.30 mukaisesti kohteessa on vain yläpäässä pientä taipumaa. Kohteissa ei ole siirtymiä, mutta kohteen kaltevan pohjamaan ja geometrian takia kilometrin 228+900 kohdilta on vielä stabiilitilaskenta kuvassa 5.31, jossa FOS vasemmalle on noin 1,4. Siirtymien kiihtyessä ja penkereen sortuessa savi oletettavasti lähtisi kokonaan pohjalta asti liikkeelle liukuen moreenia ja kalliota pitkin.



Kuva 5.29. Poikkileikkaus kilometrin 228+900 kohdalta (Seurantakortit)



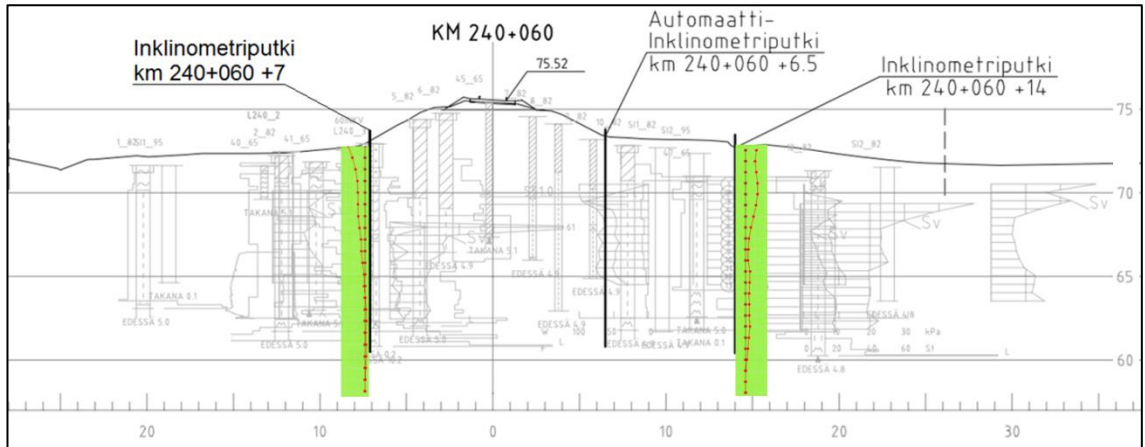
Kuva 5.30. Siirtymät kilometrien 228+750, 228+900, 228+950 ja 228+980 kohdilta



Kuva 5.31. Havainnollistava Geocalc –laskenta kohteesta, jossa FOS vasemmalle on noin 1,4.

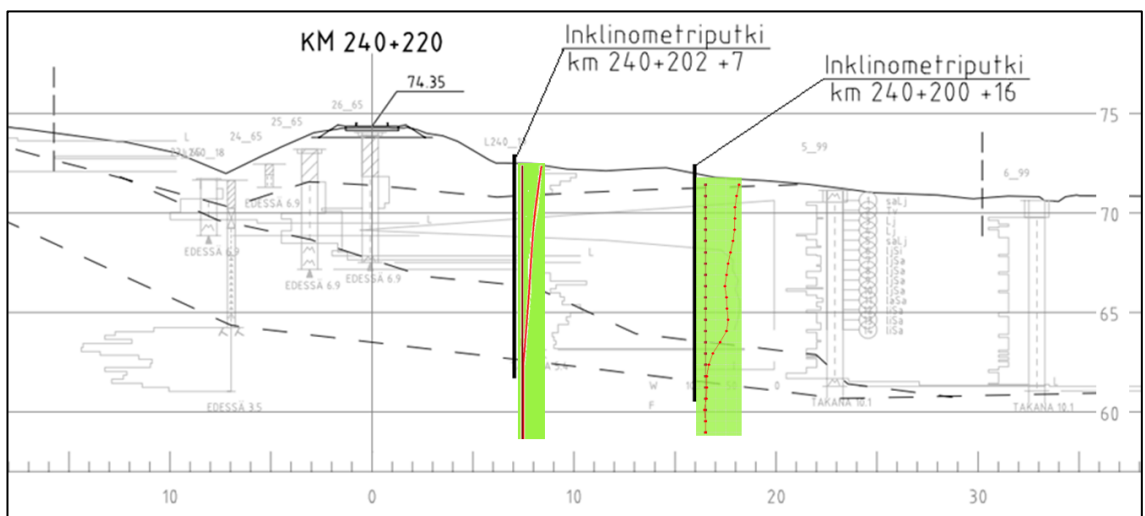
Kilometrit 240+060, 240+145, 240+200 & 240+202 (Pehmeikkö 15):

Kilometrin 240+060 kohdalla penger on tasaisessa maastossa ja rakennettu saveen vaaraan. Kohdalla on ohut kuivakuorikerros ja ratapenger on painunut saveen noin 1-2 metriä. Kohdalta on poikkileikkaus ja putkiprofiilit kuvassa 5.32. Siirtymä oikealle on lähes pysähtynyt ja vasemmalle siirtymiä on noin 1 mm/vuodessa. Putkessa oikealle on hie-man virhettä 0-mittauksessa.

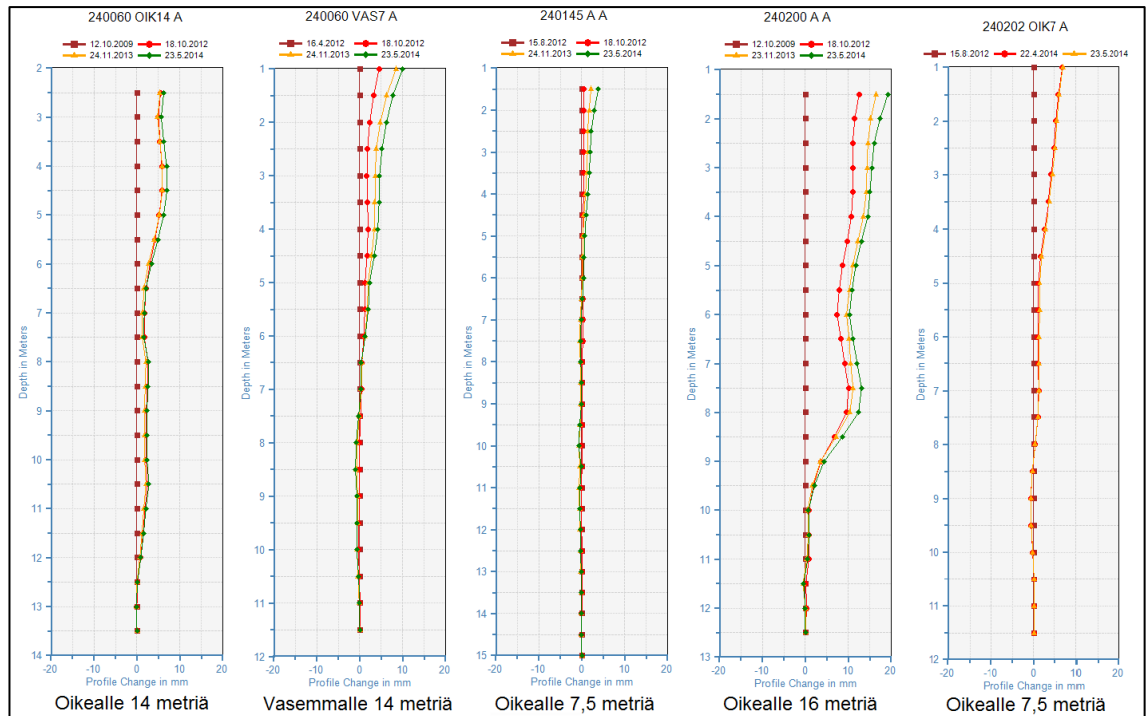


Kuva 5.32. Poikkileikkaus kilometrin 240+060 kohdalta (Seurantakoritit)

Kilometrien 240+145, 240+200 ja 240+202 kohdalla ratapenger on sivukaltevassa maastossa ja pohjaolosuhteet viettävät oikealle päin kuvan 5.33 mukaisesti. Penkereen korkeus kohdalla on noin 2-5 metriä. Kilometrien 240+040...340 välillä rata-penkereessä on myös kevytsorarakenne. Kohteessa on noin 2-10 metriä liejusta savea sekä savea. Aivan kilometrin 240+200 poikkileikkauskuvan oikealla reunalla saattaa myös olla turvetta. Oikealle puolelle on rakennettu pitkähkö ja matala vastapenger. Alueella on ollut sortumat vuosina 1965, 1999 ja 2000. (Seurantakoritit)



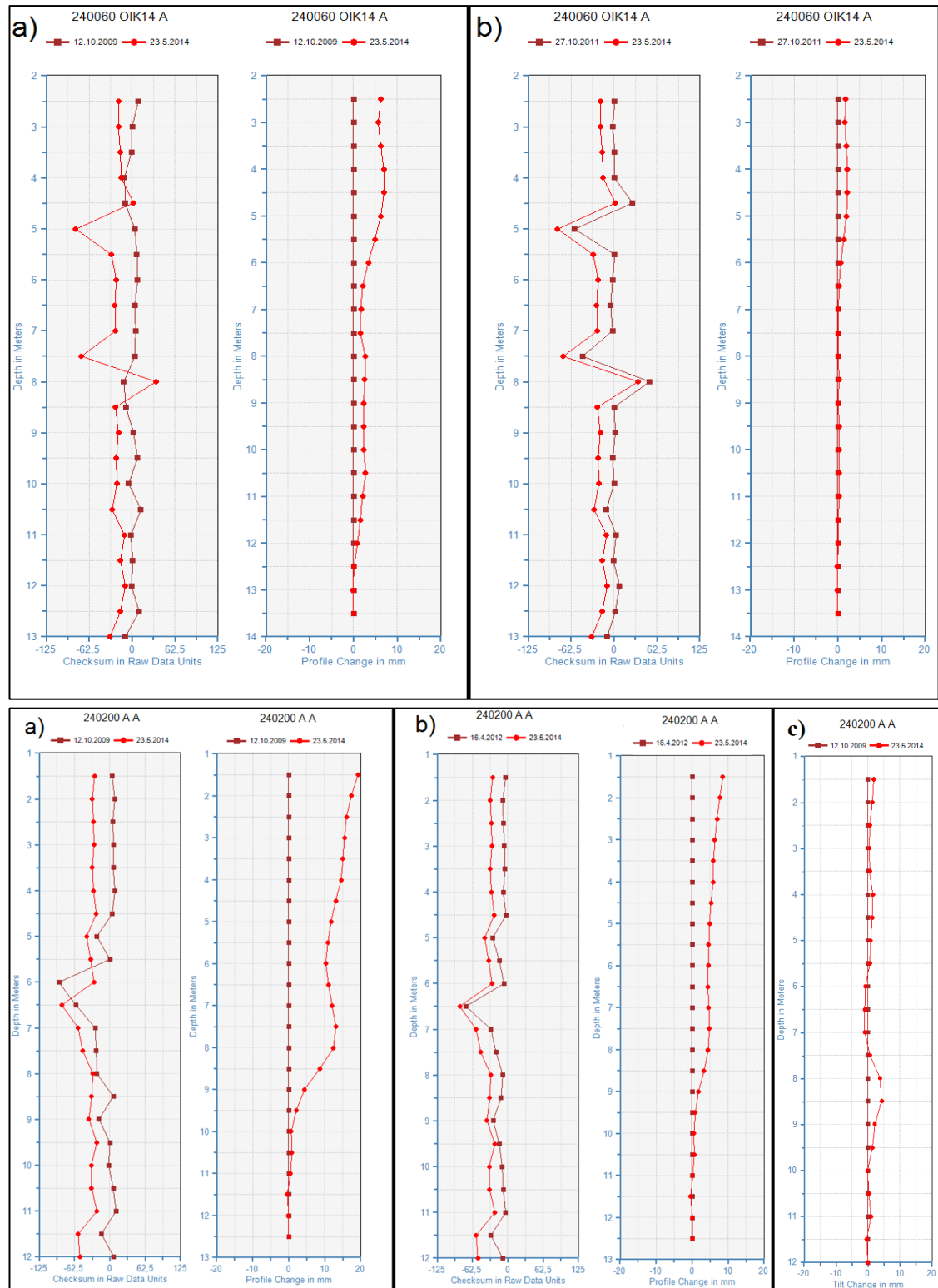
Kuva 5.33. Poikkileikkaus kilometrin 240+200 kohdalta (Seurantakoritit)



Kuva 5.34. Kohteen kaikki manuaaliset inklinometrit. Virhettä on putkissa 240+060 oikealle 14 metriä ja 240+200 oikealle 16 metriä. Kilometrin 240+060 inklinometriputket oikealle ja vasemmalle ovat asennettu väärin ja akselit niissä ovat pielessä 45 astetta ja 30 astetta. Siirtymiin tällä on vaikutusta maksimissaan 5 mm. Kuviin korjausta ei ole tehty ohjelmistolisenssin umpeuduttua.

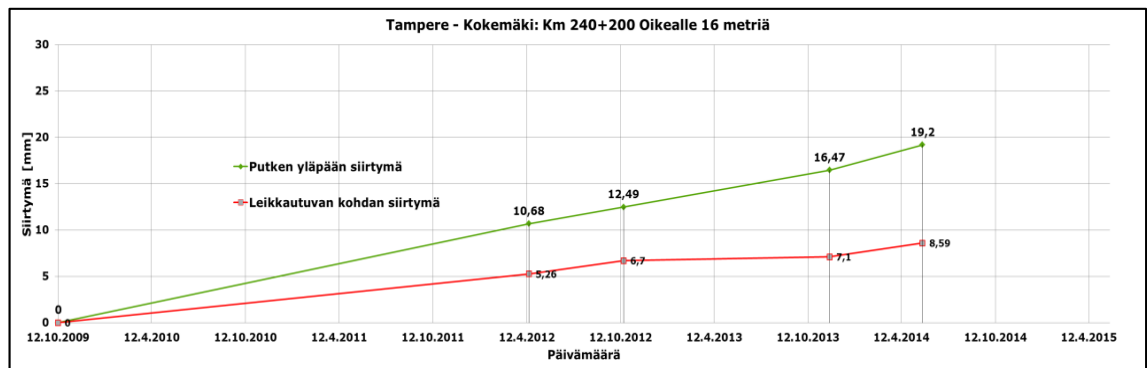
Suurin osa inklinometriputkista on oikealla puolella. Mielenkiintoisin putkista on kilometrin 240+200 kohdalla. Datasta kuvan 5.34 mukaan voidaan huomata, että savi on siirtymässä massamaisesti oikealle. Kuvissa 5.37 ja 5.39 on sovitettu kyseinen data stabiliteettilaskelmiin. Huomataan, että arvioidun liukupinnan kohdalla on selvä leikkausvyöhyke. Yksi syy tälle voi olla vastapenkereen painuman aiheuttamat siirtymät. Kuitenkaan automaattiputkessa kilometrin 240+202 kohdalla lähempänä ratapengertä ei ole vastaavanlaista vyöhykettä uudemmissa mittauksissa. Automaatti-inklinometrin mittaukset ovat kuitenkin uudemmat ja vain vajaan puolen vuoden ajalta.

Kuvassa 5.35 on havainnollistettu kohteessa olevaa virheellistä dataa. Kilometrin 240+060 kohdalla on käytetty vanhaa ennen 2010 vuonna suoritettua 0-mittausta ja oikealla vastaavasti uudempaa mittausta vuodelta 2011. Inklinometri mittauskalusto on uusittu vuoden 2010 aikana, jolla voi olla vaikutusta asiaan. Kuitenkin virheellisen mittauksen seurauksena syntyy profiiliin tässä tapauksessa muutamien millien virhettä. Kilometrin 240+200 kohdalla on myös havaittavissa samankaltaista virhettä. Tämä virheellisyys vaikuttaa myös putken profiiliin. Joka tapauksessa siirtymien muutosnopeutta voidaan tulkita normaalisti, koska viimevuosien mittaukset ovat kunnossa. Virheellisyttä on myös tutkimuksen muissa putkissa ja ne käsitellään aina tarkemmin, kun kohteita tarkastellaan.



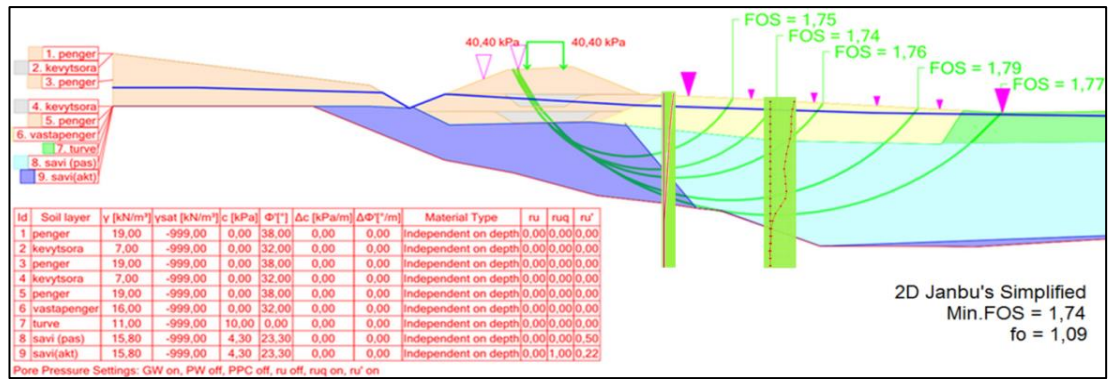
Kuva 5.35. Havainnollistus kohteen datasetin virheistä. Ylhäällä (a) on käytetty referenssinä 0-mittausa vuodelta 12.10.2009 ja oikealla (b) on käytetty referenssinä 0-mittauksena 27.10.2011. Vasemmanpuoleiset kuvaajat ovat siis putkien tarkistussummia (Checksum). Tässä tietenkin menetetään osa mittausvuosista ja siirtymistä, mutta tulevat tulokset paranevat. Alhaalla on vastaavasti samanlainen ongelma korjattuna (a) ja (b) kohdissa. Kohdassa (c) vastaavasti on putken inkliinaation muutos, josta voidaan havaita leikkautuva vyöhyke tehokkaasti.

Siirtymät ovat pieniä viimeaikaisissa mittauksissa. Siirtymä kilometrin 240+200 kohdalla putken yläpäässä on noin 4 mm/vuodessa ja leikkautuvalla kohdalla noin 1 mm/vuodessa. Kuvassa 5.36 on esitetty putken siirtymä-aika kuvaaja. Derivaatta tällä kohtaa indikoi tasaisesti jatkuvia siirtymiä. Muissa inklinometreissä siirtymät ovat noin 1-2 mm/vuodessa. Sortumariski on vähäinen näin pienillä siirtymillä, mutta kiihtyvä leikkautuva siirtymä kauempana penkereestä voisi aiheuttaa myös mahdollisen liukupintasortuman. Kohteessa ei ole raportoitu olevan poikkeavaa kunnossapidon tarvetta. Siirtymän muoto sekä sivukalteva pohjamaa ovat hieman vastaavat, kuin aikaisemman kilometrin 218+345 (Leukaluut) kohteessa. (Seurantakortit)

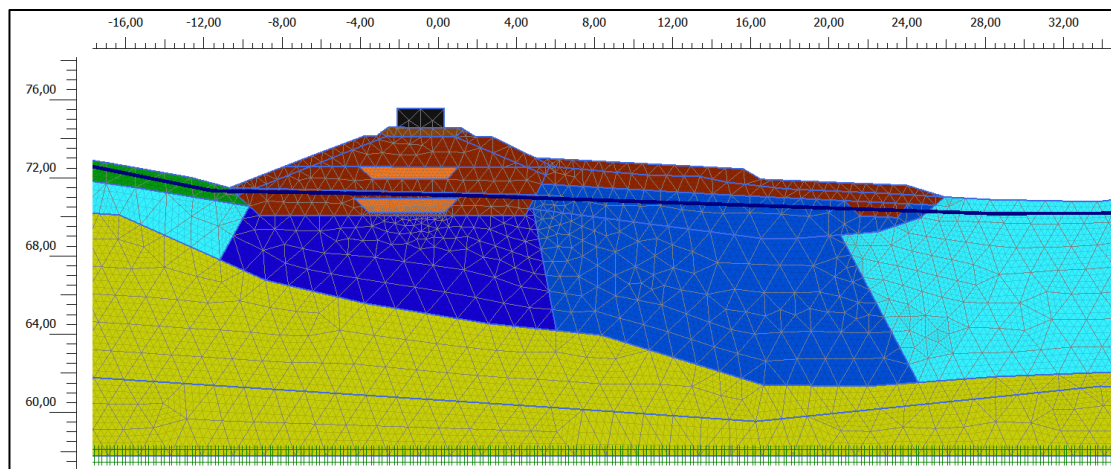


Kuva 5.36. Maksimisiirtymien kehitys kilometrin 240+200 kohdalta 16 metriä oikealle. Siirtymiä on noin 4 mm/vuodessa putken yläpäässä ja leikkautuvalla kohdalla siirtymiä on ollut noin 1 mm/vuodessa.

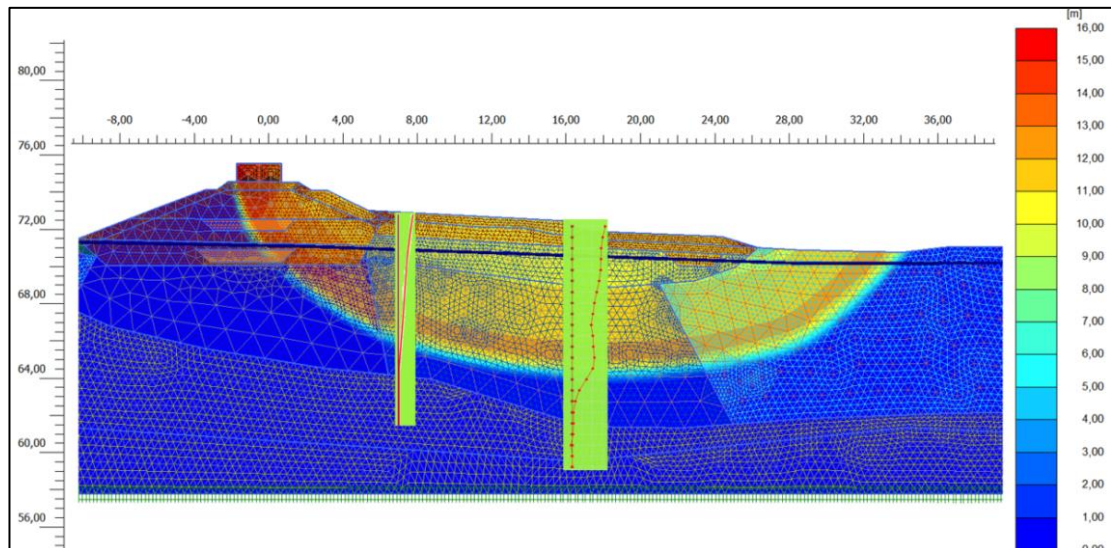
Kohteesta on laskettu muutama stabiliteettilaskenta kuvissa 5.37 ja 5.39. Kuvat ovat yksinkertaistuksia kohteesta, mutta mielenkiintoinen havainto voidaan tehdä, kun putken profiili ja stabiliteettitarkastelu yhdistetään. Huomataan, että jos siirtymä alkaisikin kiihtyä, niin siirtymän muoto voisi mahdollistaa liukupintasortuman syntymisen. Leikkausvyöhykettä ei ole kuitenkaan yhtä selvästi esillä automaattiputken profiilissa. Kuitenkaan automaattiputken mittauksia kohteesta ei ollut käytävissä yhtä kattavasti eli vain noin puolen vuoden ajalta. Stabiliteettilaskelmissa FOS on noin 1,6-1,7 oikealle.



Kuva 5.37. Havainnollistava GeoCalc –laskenta kohteesta, jossa FOS oikealle noin 1,7. (RATUS)



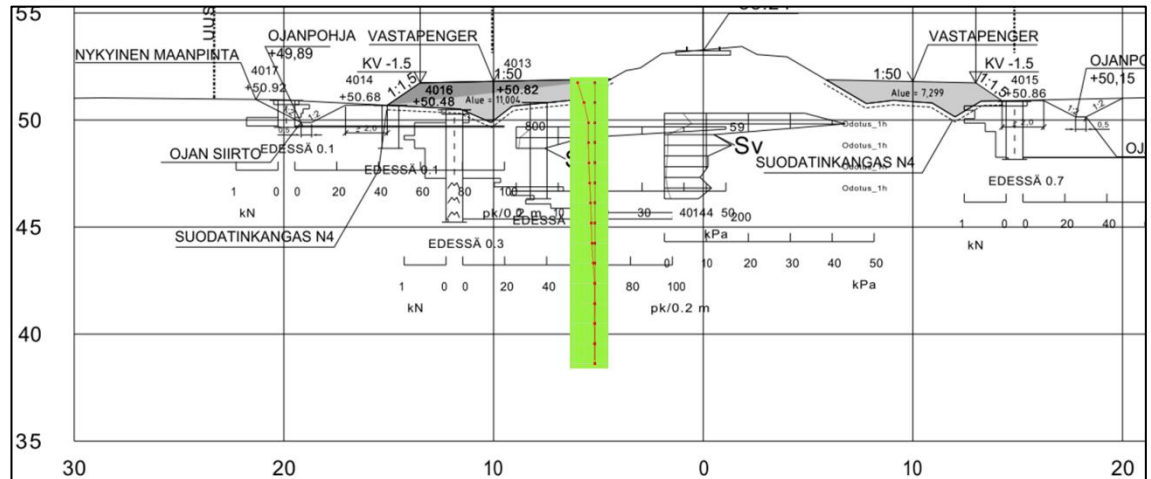
Kuva 5.38. Plaxisen laskentaverkko.



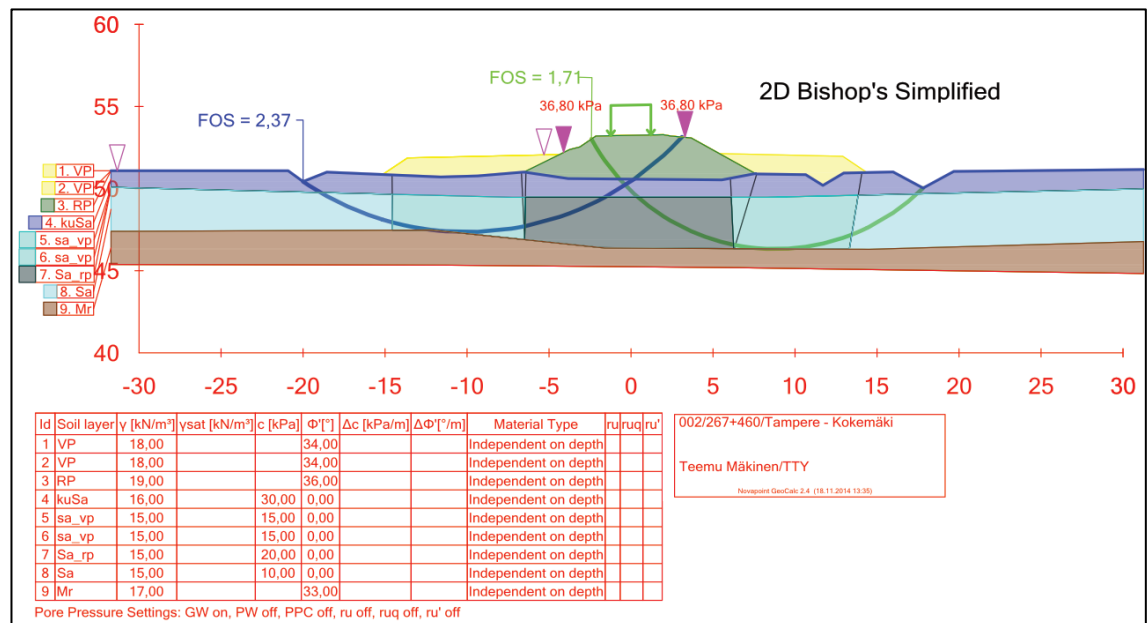
Kuva 5.39. Stabiilitteetilaskenta kohteesta Plaxisella, jossa M_{sf} noin 1,6 oikealle. Laskenta on suoritettu savien osalta MC:llä. Tässäkin liukupinta kulkee vastapenkereen alla olevan putken leikkautuvan vyöhykkeen lävitse. Siirtymät kuitenkin todennäköisesti johtuvat vastapenkereen asettumisesta. Automaatti-inklinometrissä ei ole puolen vuoden mittauksien ajalta kuitenkaan oletetun liukupinnan kohdalla juurikaan siirtymiä.

Kilometri 267+460 (Pehmeikkö 32):

Kohteessa on matala ratapenger, jonka alla on ohut kuivakuori sekä noin 2-4 metrin savikerros. Kohteeseen on suunniteltu ja rakennettu vastapengeret kuvan 5.40 mukaisesti. Kohteen molemmilla puolilla on peltoa. Datassa ei ole juurikaan siirtymiä, mutta putken yläpuolella on pientä taipumaa noin 7 mm vuoden 2013 aikana. Vuonna 2014 siirtymä on kuitenkin liikahtanut takaisin päin. Mittausten perusteella kohteessa on oletettavissa muutamien millien siirtymää jatkossakin. Kuvassa 5.41 on vielä laskettu kohteesta havainnollistava stabiiliteetilaskenta.



Kuva 5.40. Poikkileikkaus ja taipumaprofiili kohteesta (Geo-piirustukset)



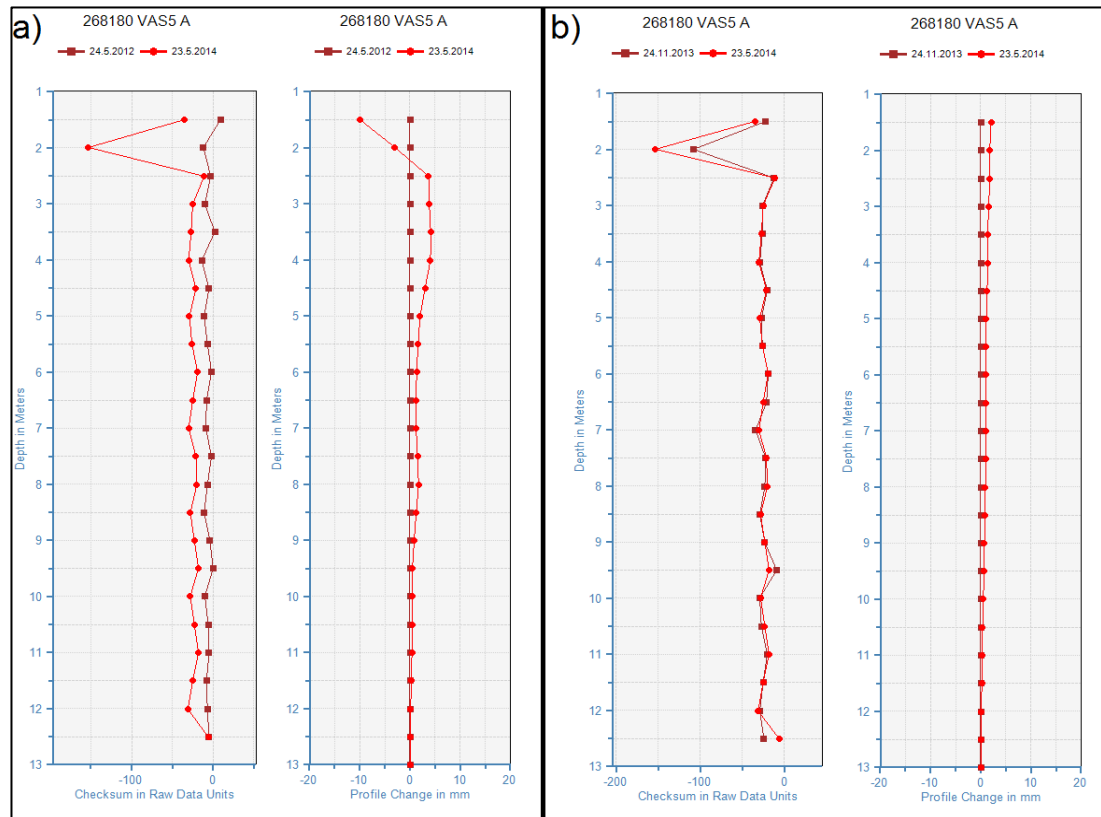
Kuva 5.41. Havainnollistava GeoCalc –laskenta kohteesta, jossa FOS on vasemmalle noin 2,3 ja oikealle noin 1,7.

Kilometri 268+180 (Pehmeikkö 33):

Kohteessa on aiemman kilometrin 267+460 tapaan samantyyppinen matala ratapenger samankaltaisissa pohjamaaolosuhteissa. Alueella on myös vastapenkereet. Erona kilometrin 267+560 kohtaan on, että pohjamaa viettää loivasti vasemmalle. Parametrisoidun stabiliteettilaskennan mukaan kohdalla FOS on noin 1,5 (RATUS).

Kohteessa on kuitenkin aluksi katsottuna erikoinen siirtymäkuvaaja kuvan 5.42 mukaisesti. Datan tarkistussummaa tarkasteltaessa huomataan, että 0-mittaus on virheelinen. Virheellisyys voidaan havaita yläpäässä olevassa erossa tarkistussummassa. Vastaavasti, kun 0-mittaus referenssiksi valitaan vuoden 2013 mittaus, huomataan että tarkistussummassa ero kapenee ja kyseinen virhe pienenee. Kyseistä virhettä on paljon muissakin tutkimuksen mittauksissa, mutta tässä virheen havainnollistaminen tulee hyvin esille asiaan perehtymättömille henkilöille.

Tarkistussummassa ero virheellisellä kohdalla on noin 1 metrin syvyydellä noin 150 data yksikköä. Tästä syntyy kuvaajaan noin 15 mm taipuma negatiiviseen suuntaan. Tämä on jo erittäin suuri virhe, kun se suhteutetaan putken muuhun yläpäähän siirtymään, joka on noin 2 mm/vuodessa. Näin suuren virheen syntyminen asettaa tällöin datan tulkitsijalle enemmän haastetta putkiprofiileja tarkasteltaessa. Ensisijaisesti kuitenkin täytyisi varmistaa, että maastosta tullut data olisi hyvälaatuista. Virhettä tosin voi myös syntyä putken epätäydellisyyksistä, jolloin vastuu on lopulta profiilien tulkitsijalla.

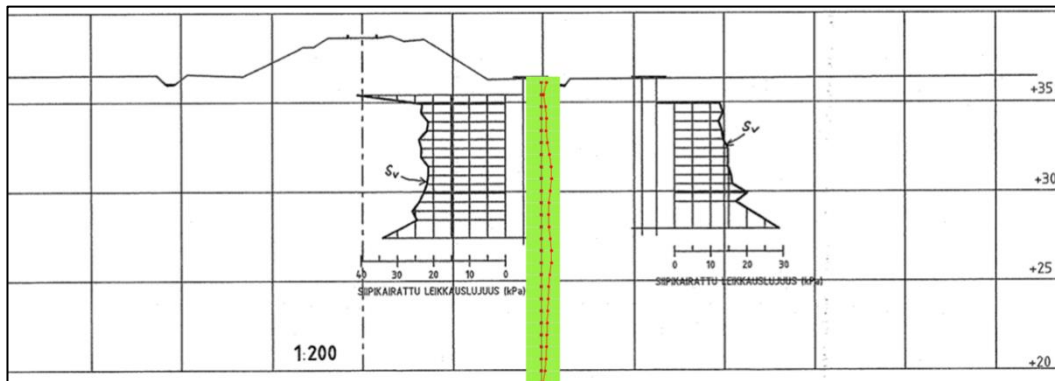


Kuva 5.42. Putken yläpäässä (a) systemaattisesta virheestä syntyvä noin -15 mm siirtymä sekä hieman parempi 0-mittaus referenssi on vuodelta 2013 (b). Tarkistussummassa tämä on arvoltaan noin 150 yksikön verran.

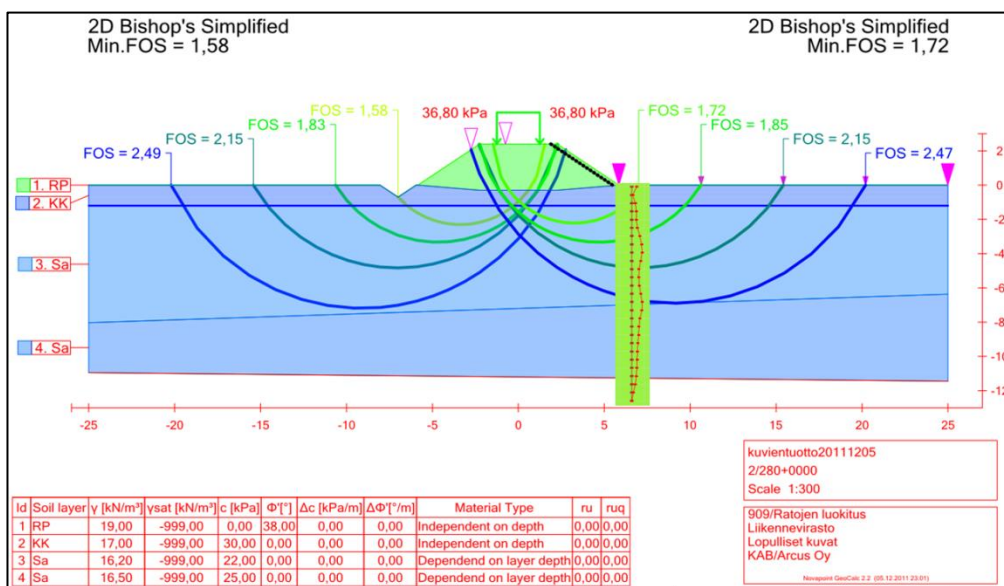
Kilometri 280+000 (Pehmeikkö 40):

Kohteessa on matala ratapenger savikolla. Ratapenkereen alla on ohut kuivakuorikerros ja tämän alla on noin 10-14 metriä savea. Kohteessa ei ole merkittäviä vastapenkereitä ja siirtymiä on kertynyt noin 5 mm kolmen vuoden mittausten aikana. Virhettä on syntynyt osittain putken asennussyvyydestä, koska putki on alapäästä vapaana eikä sitä ole asennettu tarpeeksi syväälle kovaan pohjaan. Siirtymät myös todennäköisesti keskittyisivät enemmän yläpäähän, mutta nyt siirtymiä on jo aivan putken pohjalta lähtien.

Laskennallinen stabiliteetti kohdassa on hyvä, mutta muutama mahdollinen liukupinta kuitenkin kulkee putken keskellä olevien leikkausvyöhykkeitä muistuttavien siirtymien lävitse (FOS liukupinnalla yli 2). Siirtymät voivat myös mahdollisesti johtua penkereen painumasta. Siirtymiä vuosittain on nykyään noin 1-2 mm/vuodessa. Kuvassa 5.43 on poikkileikkaus kohteesta ja kuvassa 5.44 stabiliteetilaskenta. Saven suljettu leikkauslujuus penkereen lähetyvillä on kairausten mukaan noin 20-30 kPa ja reunoilla noin 10-20 kPa.



Kuva 5.43. Poikkileikkaus, siipikairaukset ja virheellinen taipumaprofili kohteesta (Geo-piirustukset)



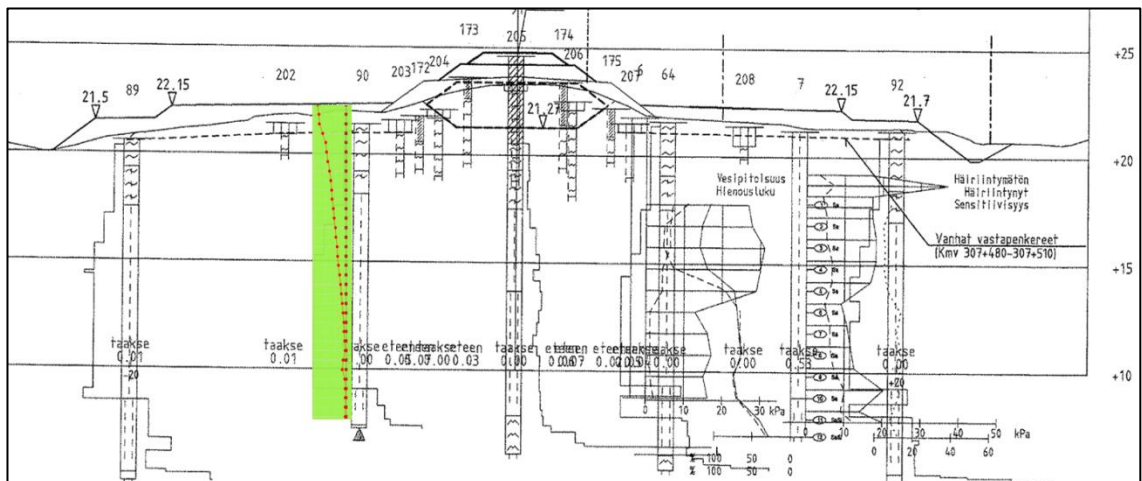
Kuva 5.44. Havainnollistava GeoCalc –laskenta ja virheellinen taipumaprofili (RATU)

5.3.4.2 Kokemäki – Rauma

Kilometri 307+480 (Pehmeikkö 15):

Kohteessa on rakennettu korkeahko ratapenger turpeen varaan. Penger on uponnut noin 1-2 m turpeeseen ja turvekerroksen paksuus penkereen alla on noin 3-4 metriä. Tämän alla on noin 3-9 metrin savikerros. Kohteessa on pitkät ja matalat vastapenkereet. Poikkileikkauksen mukaan penkereeseen olisi rakennettu kevytsorakerros. Penger oletettavasti myös lakoaa hieman turpeeseen ja syrjäyttää turvetta. Vastapenkereiden painuminen voidaan havaita inklinometriputken profiilissa kuvan 5.45 mukaisesti. Siirtymän muoto on viuhkamainen.

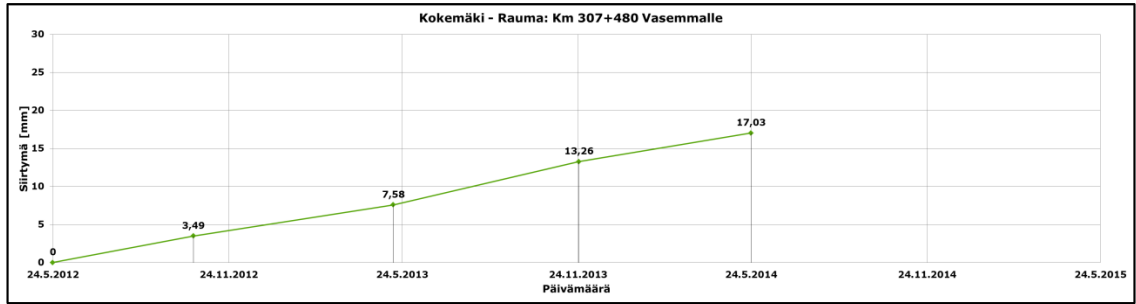
Kohteesta on mittauksia vain muutaman vuoden ajalta. Lähellä maanpintaa siirtymän maksimiarvo on noin 17 mm ja siirtymän ajallinen kehittyminen (putken yläpäässä) on esitetty kuvassa 5.45 ja taulukossa 5.9. Derivaatta indikoi siirtymien jatkuvan progressiivisesti vastapenkereiden asettuessa. Seuraavan vuoden aikana siirtymiä kertyisi karkeasti noin 8-10 mm putken yläpäässä. Laskennallinen FOS vasemmalle on noin 1,6, mutta laskenta on kuitenkin kohtuullisen epätarkka. Tilannetta kohentaa huomattavasti maan lujittuminen vastapenkereiden alla. Pitkään jatkuva tasainen viuhkamainen siirtymä aiheuttaisi lähinnä kohteen kunnossapitoon liittyviä ongelmia.



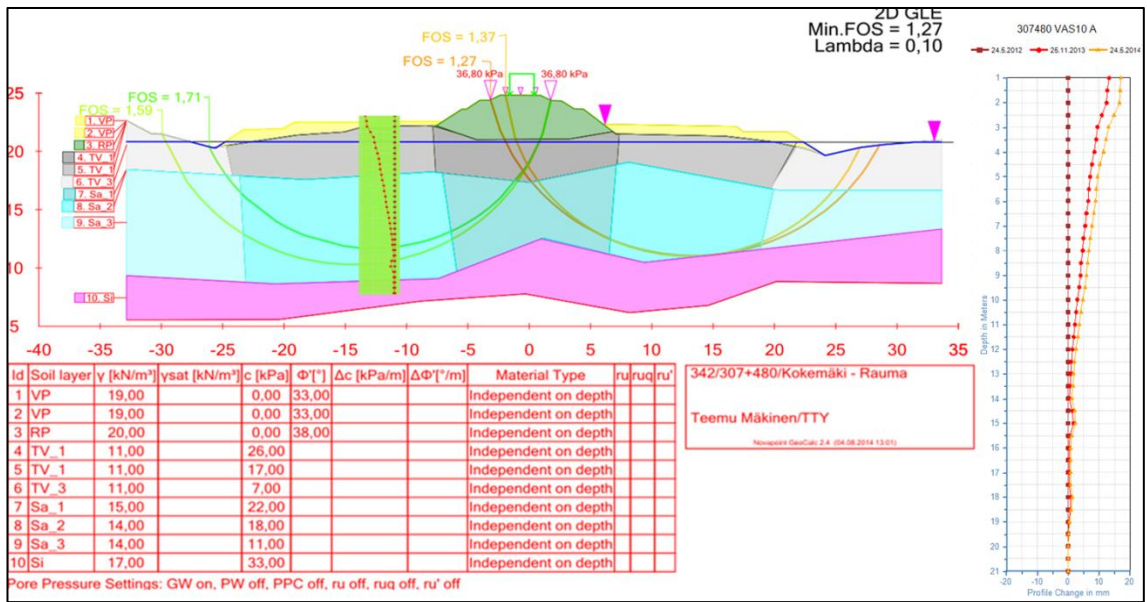
Kuva 5.45. Poikkileikkaus ja siirtymät kilometrin 307+480 kohdalta (Geo-piirustukset)

Taulukko 5.9. Siirtymien kehittyminen lähellä maanpintaa kahden vuoden aikana

Päivämäärä	Kulunut aika	Siirtymä	Siirtymää päivässä	Siirtymää vuodessa
	[d]	[mm]	[mm/d]	[mm/a]
24.5.2012	0	0		
18.10.2012	147	3,49	0,024	8,7
15.5.2013	356	7,58	0,021	7,8
25.11.2013	550	13,26	0,024	8,8
24.5.2014	730	17,03	0,023	8,5



Kuva 5.46. Suurin siirtymä ajan funktiona kilometrin 307+480 kohdalta. Siirtymiä noin 8-10 mm/vuodessa lähellä maanpintaa.

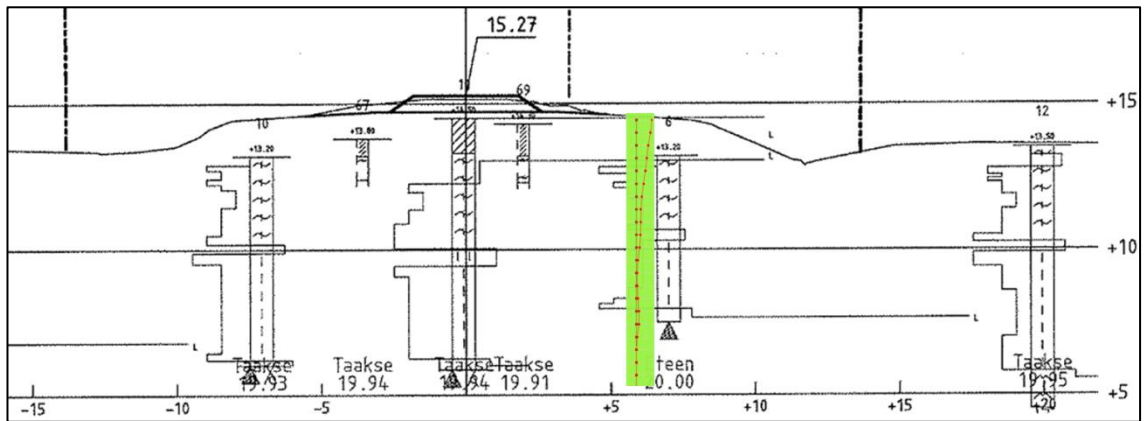


Kuva 5.47. Suuntaa antava stabiileettilaskenta kilometrin 307+480 kohdalta, jossa FOS vasemmalle noin 1,6 ja oikealle noin 1,3. Lähtötiedot kohteesta ovat kuitenkin puutteelliset. Oletetun liukupinnan kohdalla siirtymiä on noin 0,5 mm/vuodessa.

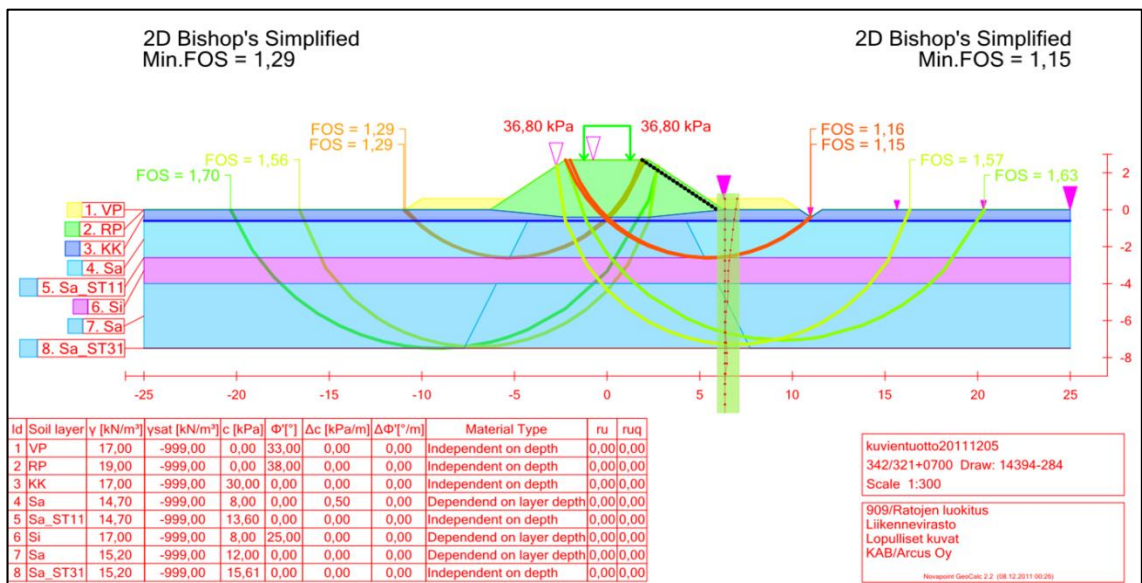
Kilometri 321+775 (Pehmeikkö 30):

Kohteessa matala ratapenger on rakennettu liejuisen saven varaan. Liejuinen savikerros on noin 2-4 metriä paksu, jonka alla on ohut silttikerros ja tämän alla lisää savea on noin 4 metriä. Ratapenger lyhyine vastapenkereineen on noin 2 metriä korkea. Kuvassa 5.48 on poikkileikkaus kohteesta ja kuvassa 5.49 stabiliteettilaskenta.

Siirtymiä on kertynyt putken yläpäässä vuoden 2013 aikana noin 9 mm, jonka jälkeen siirtymät ovat lähes pysähtyneet. Siirtymän muoto on hieman viuhkamainen. Ratapenkereen painuminen saattaa aiheuttaa lakoamista ja siirtymiä putkessa. Siirtymä on lähes pysähtynyt kahden viime mittauksen välillä, mutta silti jotain siirtymiä kohteesta on oletettavissa jatkossakin. Stabiliateettilaskenta on epätarkka, mutta auttaa hahmottamaan tilannetta paremmin. Oletetun leikkaavanvyöhykkeen kohdalla ei ole juuri-kaan siirtymiä viime mittauksissa.



Kuva 5.48. Poikkileikkaus kilometrin 321+800 kohdalta ja putkiprofiili kilometrin 321+775 kohdalta (Geo-piirustukset)

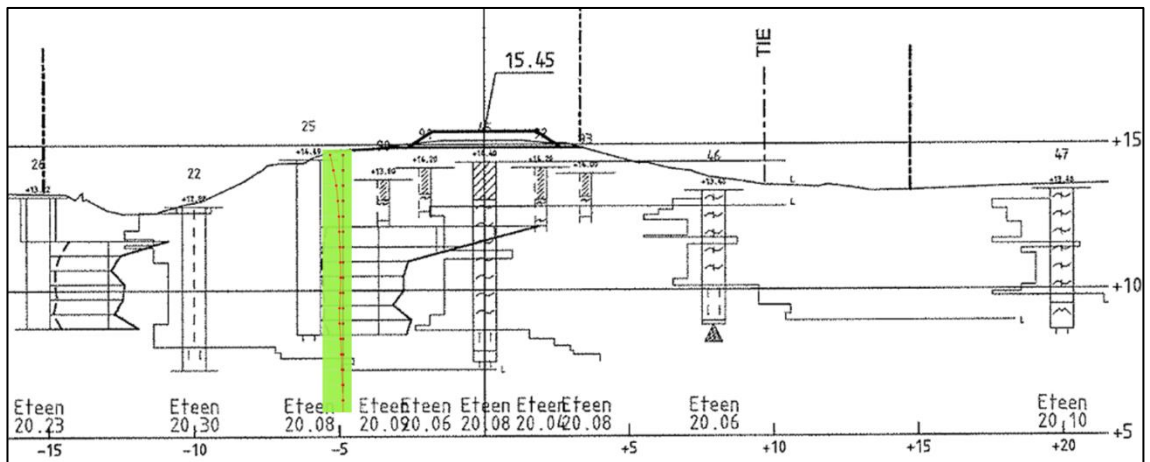


Kuva 5.49. Havainnollistava Geocalc -laskenta kilometrin 321+700 kohdalta, jossa FOS oikealle noin 1,2. (RATUS)

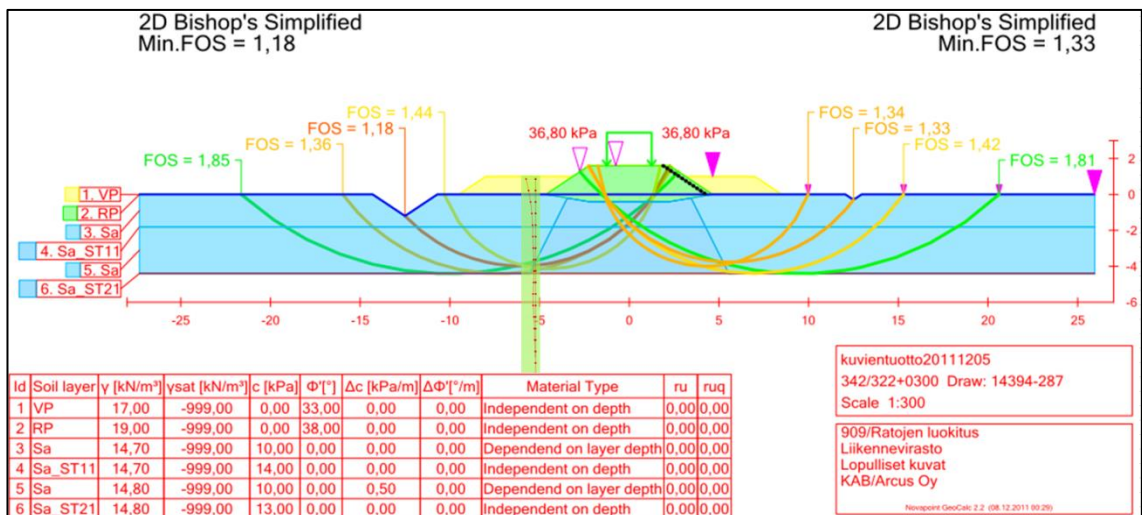
Kilometri 322+320 (Pehmeikkö 31):

Kohteessa on noin 1,5 metriä korkea ratapenger ja lyhyet vastapenkerreet. Ratapenger on rakennettu liejuisen saveen päälle kuvan 5.50 mukaisesti. Liejuista savea ja savea penkereen alla on noin 3-5 metriä sekä tämän alla silttiä. Penger on hieman uponnut saveen. Penkereen oikealla puolella kulkee kapea soratie ja vasemmalla puolella on peltoa.

Suurimmat siirtymät kohteessa ovat noin 8 mm vuoden 2013 aikana. Vuonna 2014 siirtymä on kilometrin 321+775 tapaan pysähtynyt. Siirtymät ovat pääosin putken yläpäässä. Vaikka siirtymä on kahden viimeisen mittauksen aikana lähes pysähtynyt, on kohteessa odotettavissa muutamia millejä siirtymiä tulevaisuudessa. Siirtymiä ei ole havaittavissa oletetun liukupinnan kohdalla.



Kuva 5.50. Poikkileikkaus kilometrin 322+300 kohdalta ja inklinometridata kilometrin 322+320 kohdalta (Geo-piirustukset)



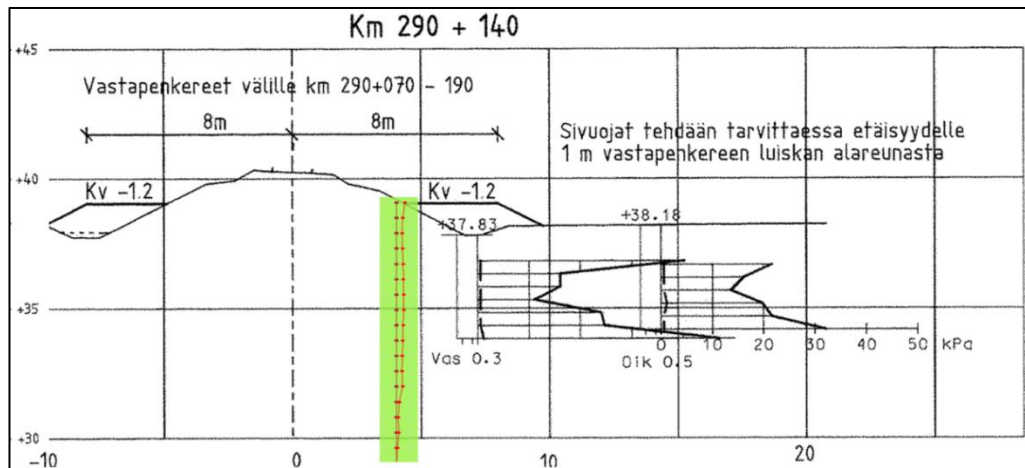
Kuva 5.51. Havainnollistava GeoCalc –laskelma kilometrin 322+300 kohdalta, jossa FOS vasemmalle noin 1,2. (RATUS)

5.3.4.3 Kokemäki – Pori

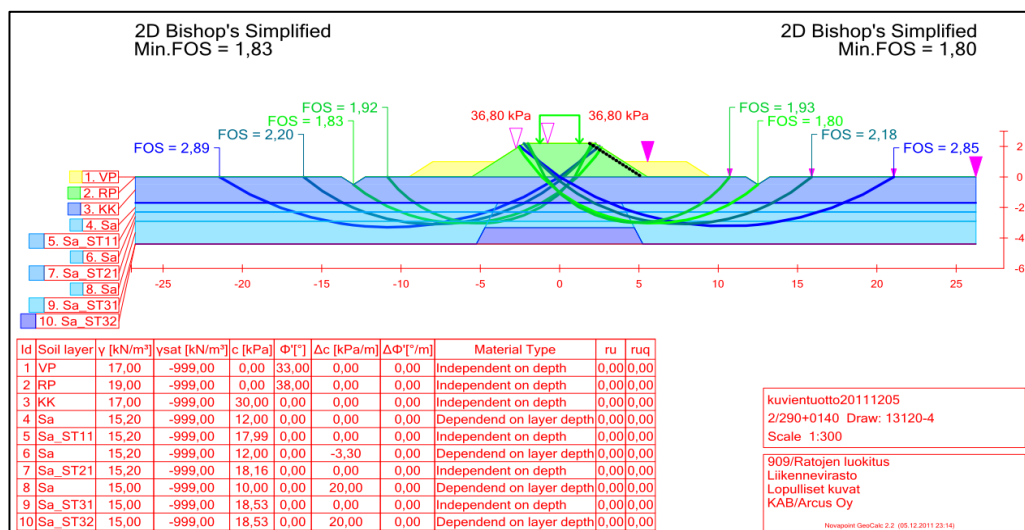
Kilometri 290+140 (Pehmeikkö 6):

Kohteen ratapenger sijaitsee Kokemäki – Pori välisellä rataosuudella. Ratapenkereen alla on ohut kuivakuorisavi, joka on noin 1,5 metriä paksu. Kerroksen alla on noin 2-4 metriä savea. Kohteessa on matalat ja lyhyet vastapenkereet. Siirtymädatassa on pientä virhettä ja siirtymää on aivan putken alapäässä, josta se on osittain vapaana. Siirtymää kohteessa on vain noin 10 mm kolmen vuoden mittauksen ajalta.

Kohteen putkea ei ole asennettu tarpeeksi syvälle sekä 0-mittauksessa on virhettä. Kohteessa kuitenkin paremman referenssin saa vuoden 2011 mittauksesta. Siirtymät ovat pääosin syntyneet parin ensimmäisen vuoden aikana ja hiipuneet lähes täysin sen jälkeen. Putken taipumaprofiili ja poikkileikkaus on esitetty kuvassa 5.52 sekä kuvassa 5.53 on stabiiliteettilaskenta kohteesta. Siipikairausten mukaan kohteessa olisi ohuen kuivakuorikerroksen jälkeen pehmeämpää savea, jonka lujuus kuitenkin kasvaa nopeasti.



Kuva 5.52. Poikkileikkaus ja putken siirtymäprofiili kohteesta (Geo-piirustukset)



Kuva 5.53. Havainnollistava GeoCalc –laskenta kohteesta, jossa FOS oikealle 1,8. (RATUS)

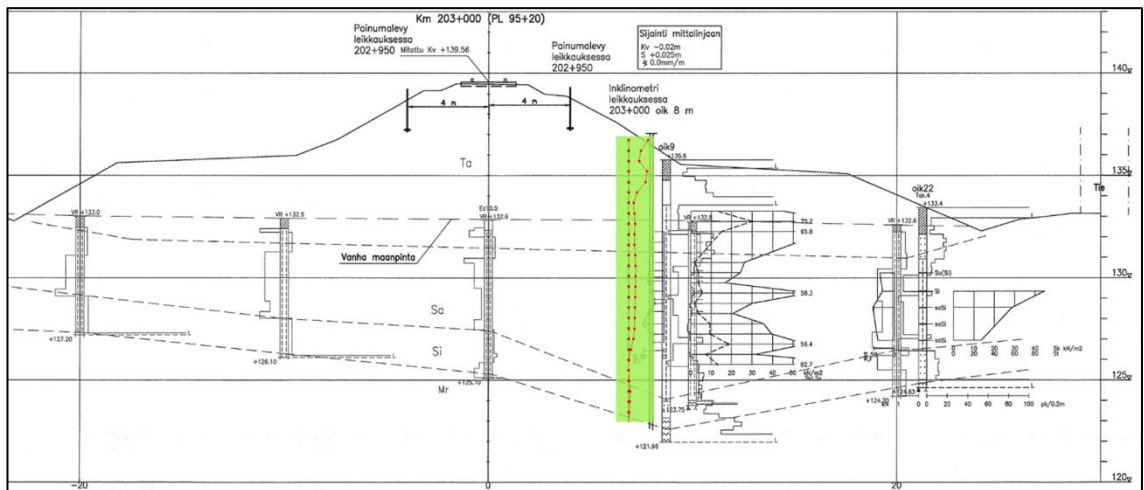
5.3.5 Tutkimuskohteet 3: Tampere – Seinäjoki – Oulu

5.3.5.1 Tampere – Seinäjoki

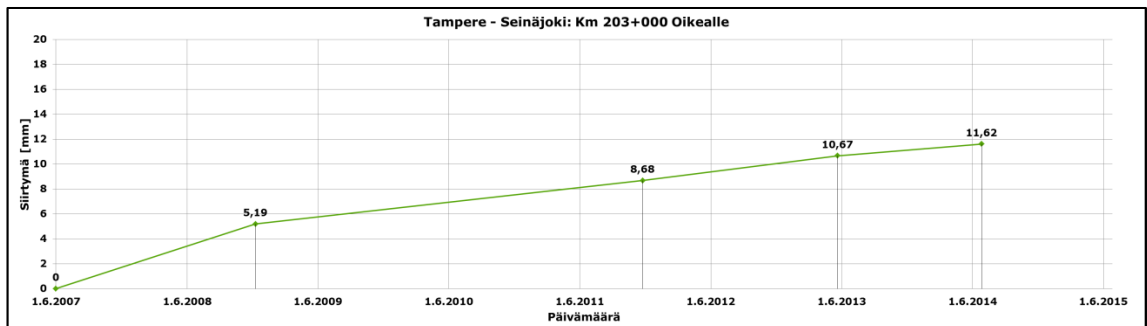
Kilometrit 203+000 & 203+040 (Pehmeikkö 12):

Kohteessa on rakennettu korkea ratapenger saven varaan. Korkeutta penkereellä on noin 4-5 metriä ja tämän alla on ohut kuivakuorikerros. Savikerroksen paksuus kohdalla on noin 5-9 m ja se on huomattavan kerroksellista. Kohteessa on noin 1-2 metriä korkeat vastapenkereet sekä oikealla puolella kulkee huoltotie. Kuvissa 5.54 ja 5.56 on esitetty kohteista poikkileikkaukset ja putkien taipumaprofiilit. Kuvassa 5.55 on vielä kilometrin 203+000 kohdalta siirtymä-aika kuvaaja ja kuvassa 5.57 on havainnollistava stabiili-teetilaskenta kohteesta.

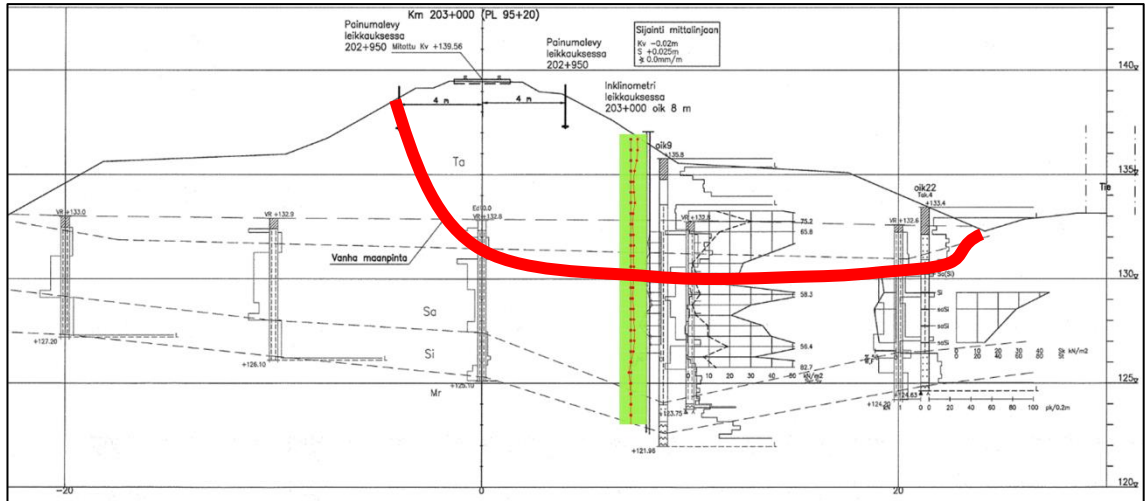
Siirtymiä on penkereen juuressa suurimmillaan noin 11 milliiä. Siirtymät ovat kehittyneet noin 5 vuoden mittauksen aikana. Siirtymänopeus on noin 1 mm/vuodessa lähellä maanpintaa. Tämä voi johtua vastapenkereiden ja penkereen maltillisesta asettumisesta. Siirtymiä ei kuitenkaan ole havaittavissa arvioitujen liukupintojen läheisyydessä. Savikerros on kohteessa myös osittain siltistä kairausten perusteella.



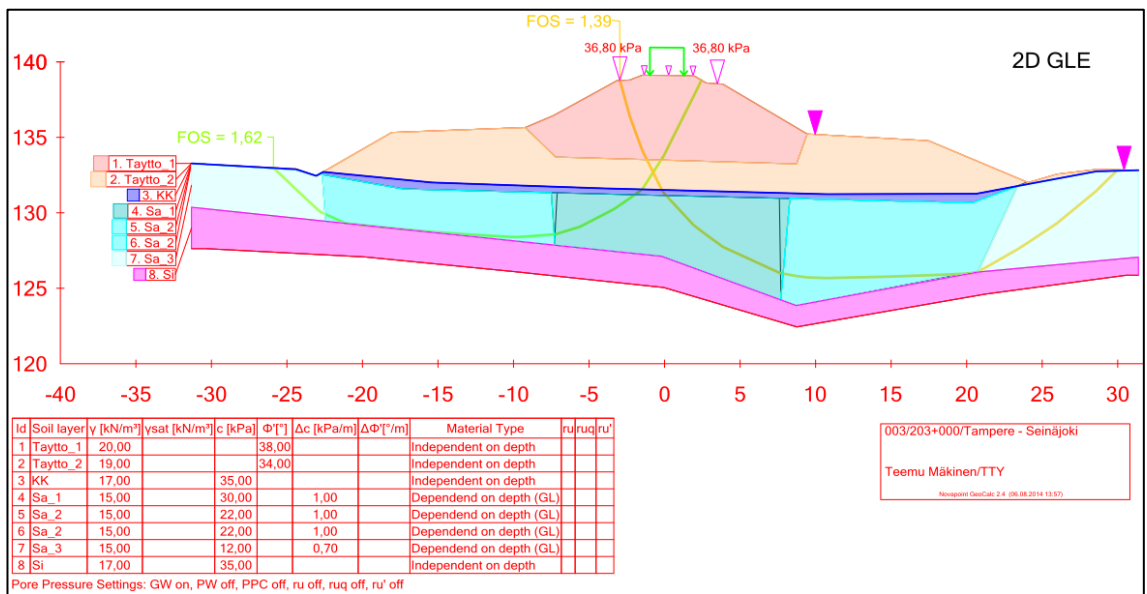
Kuva 5.54. Poikkileikkaus ja taipumaprofiili 203+000 kohdalta (Geo-piirustukset)



Kuva 5.55. Siirtymä-aika kuvaaja kilometrin 203+000 kohdalta, oikealle noin 8 metriä. Siirtymiä tulevaisuudessa arviolta noin 1-2 mm/vuodessa.



Kuva 5.56. Poikkileikkaus ja taipumaprofili 203+040 kohdalta. Siipikairauksen perusteella pohjamaa vaikuttaa kerrokselliselta ja kuvaan on yritetty havainnollistaa mahdollista liukupintaa näiden lävitse. Siirtymämittausten perusteella ei ongelmia kohteessa näyttäisi olevan. (Geo-piirustukset)



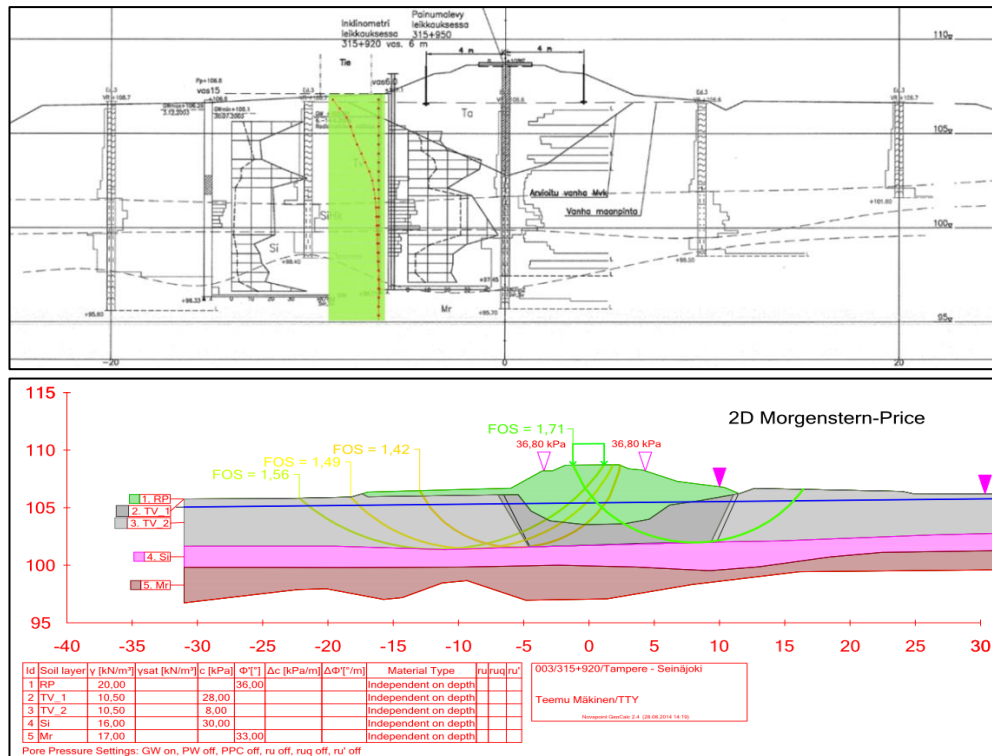
Kuva 5.57. Havainnollistava GeoCalc –laskenta kohteesta, jossa FOS vasemmalle on noin 1,6 ja oikealle noin 1,4. Kohteessa kuitenkin savikerros on kairausten mukaan erittäin kerroksellista ja mahdollisesti osittain siltistä.

Kilometrit 315+920 & 316+160 (Pehmeikkö 86):

Kohteessa on noin 2-5 metriä korkea pengerturpeella. Kohteessa on vielä havaittavissa matalat vastapenkereet. Kohdetta noin kilometri ennen on suoritettu molemmin puolin massastabilointia, mutta inklinometriputkien kohdalla stabilointi on jätetty tekemättä. Penger on painunut turpeeseen noin 1-4 metriä ja turvekerroksen paksuus kohdalla on noin 3-4 metriä. Penkereen vasemmalla puolella on huoltotie kuvan 5.58 tapaan (kuva otettu Tampereen suuntaan). Kilometrin 315+920 kohdalla siirtymiä on yhteensä noin 45 mm ja kilometrin 316+160 kohdalla noin 52 mm. Kuvassa 5.59 on poikkileikkaus alueelta sekä siihen sovitettu taipumaprofiili.



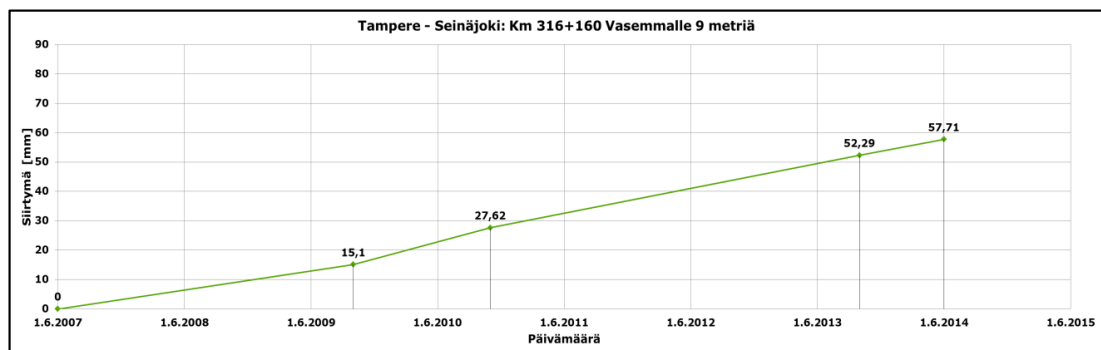
Kuva 5.58. Valokuvat kohteesta noin kilometrin 316 kohdalta (Bäcklund)



Kuva 5.59. Ylhäällä poikkileikkaus kohteesta ja alhaalla havainnollistava GeoCalc –laskenta, jossa FOS on vasemmalle noin 1,4 ja oikealle noin 1,7.

Kohdalla derivaatta indikoisi lisää siirtymiä noin 8 mm/vuodessa (lähellä maanpintaa) kuvan 5.60 tapaan. Siirtymiä aiheuttavatkin todennäköisesti vanha ratapenkereen sekä vastapenkereiden painuminen sekä pengermateriaalin lakoaminen. Tämä voi myös aiheuttaa poikki- ja pituussuunnassa pengerkorkeuden epätasaisuutta. Siirtymän suuruusluokkaa ei voida suoraan vertailla myöhemmin esitellyn kilometrin 320 kohteisiin, koska tässä ei ole rakennettu uusia vastapenkereitä ennen mittausten aloittamista. Kohteissa on kuitenkin lähes yhtä paksut turvekerrokset.

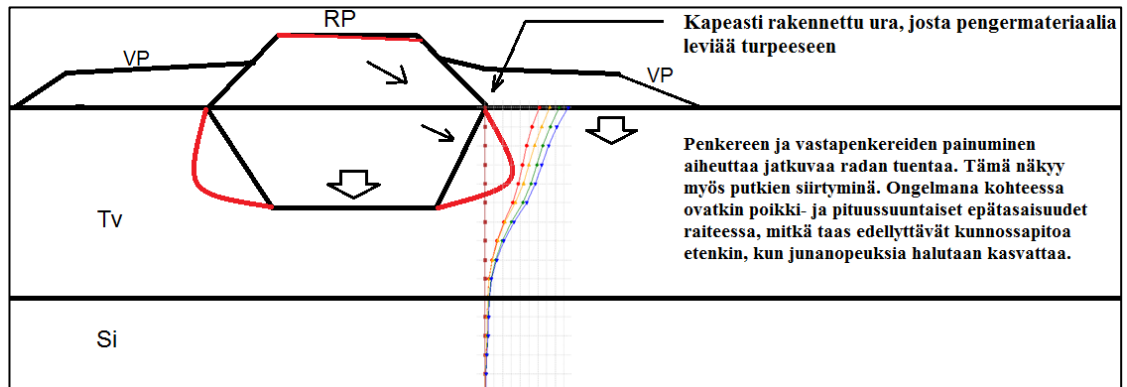
Kohteesta on myös tehty stabiiliteettilaskenta, joka on esitetty kuvassa 5.59. Laskelmassa liukupinta kulkee aivan turvekerroksen pohjalta. Varsinaisia leikkaavanvyöhykkeen siirtymiä on vaikea erottaa painumasta johtuvasta lakoamisesta. Turvepenkereen käyttäytymistä on vielä tutkittu lisää kilometrin 320 kohdalla.



Kuva 5.60. Siirtymien ajallinen kehittyminen kilometrin 316+160 kohdalla, jossa siirtymiä on noin 8 mm/vuodessa

Kilometrin 320 putket, joita on yhteensä 8 kappaletta (Pehmeikkö 90):

Kohteessa on rakennettu ratapenger suolle turpeen päälle. Työt on aloitettu kaivamalla kohdalle kapea ura ja suorittamalla pengertäminen vaiheittain. Tällöin penkereen on haluttu leviävän uraa leveämmälle alueelle tukevasti. Sen sijaan penkereen reunat eivät ole kuitenkaan levinneet halutulla tavalla vaan ovat jättäneet teräväkulmaiset reunat kuvan 5.61 mukaisesti. Turvekerroksen paksuus kohteissa vaihtelee noin 3-5 m väliltä. Kohteesta radan vierestä otettu valokuva on esitetty kuvassa 5.62.

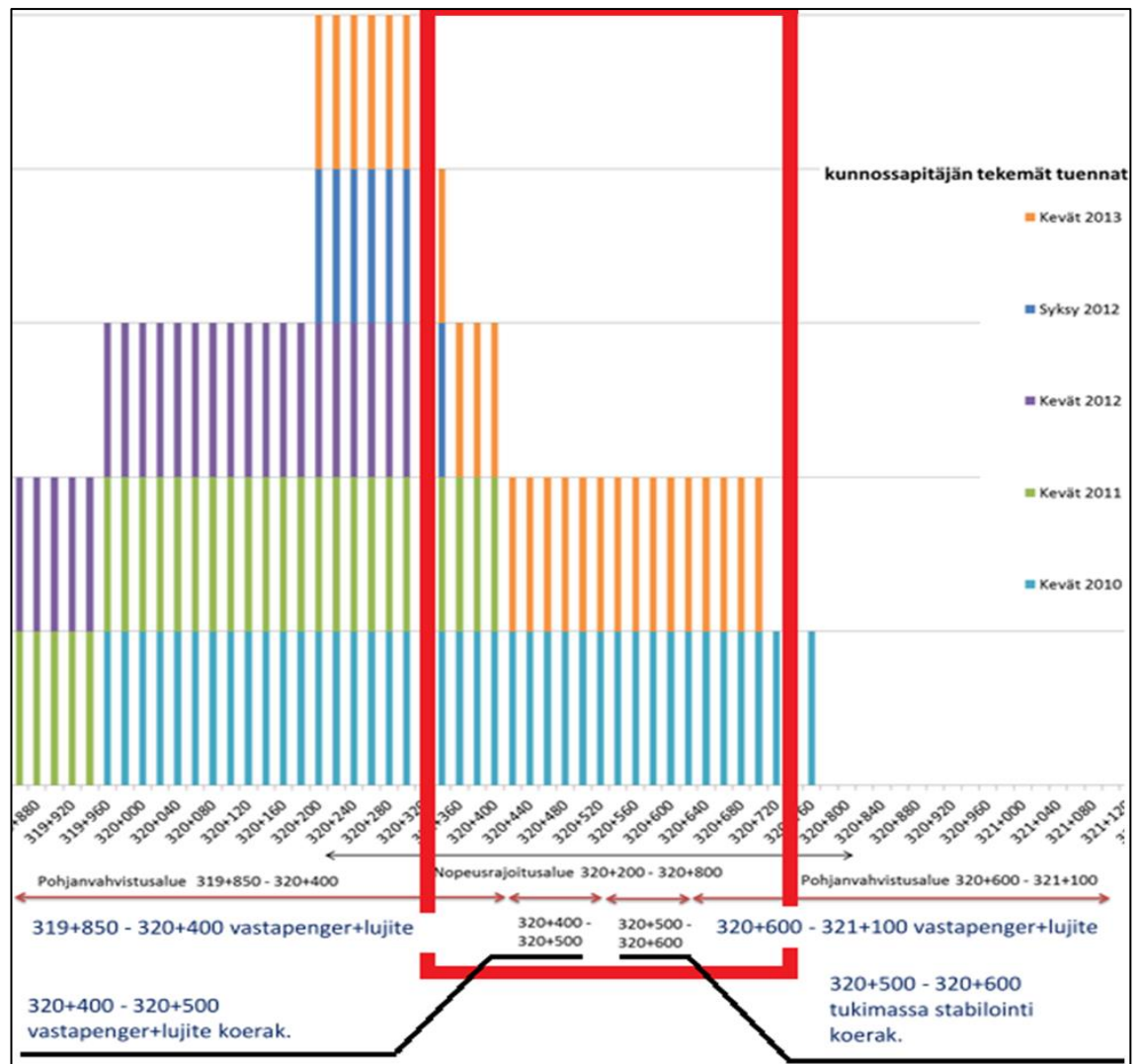


Kuva 5.61. Havainnollistava kuva turvepenkereen lakoamisesta ja painumien vaikutuksesta putken profiiliin.



Kuva 5.62. Valokuva radan vierestä (Bäcklund). Vasemmalla näkyy huoltotie ja lähes luonnollisen ympäröivän maanpinnan tasolle painunut vastapenger. Vasemmalla vastapenkereessä voidaan myös havaita kohteen inklinometriputki.

Kohteessa on raportoitu olevan suurta kunnossapidon tarvetta kuvan 5.63 mukaisesti. Ongelmana kohteessa ovatkin erilaiset raiteen epätasaisuudet, joista syntyisi junanopeuksia kasvatettaessa mahdollisesti lisää ongelmia. Pituussuuntainen vaihtelu radan korkeusasemassa voi muodostaa ongelmallisia ”notkahduksia” rataprofiiliin. Pientä vaihtelua sivusiirtymissä on myös poikkisuunnassa.



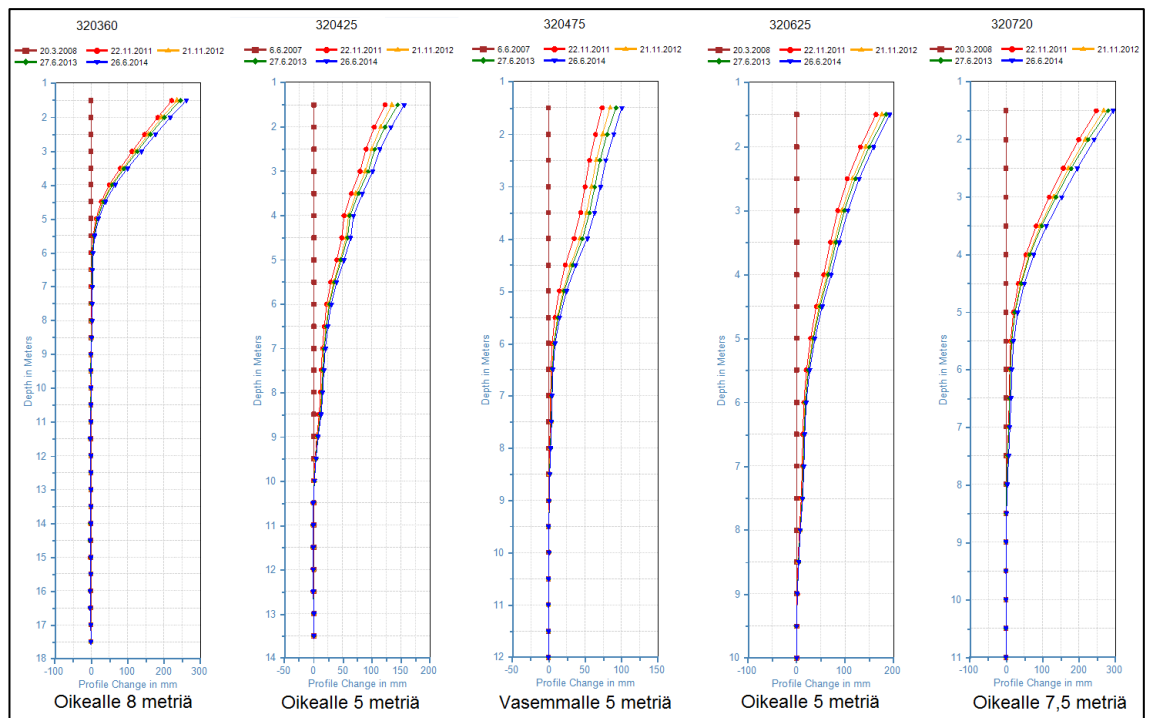
Kuva 5.63. Kohteiden kunnossapidontarve (punaisella rajattu alue) sekä aikaisemmat rakennustoimenpiteet eri kilometriluvuilla. (Seurantakortit, Hakala 2014)

Kohteeseen on vuosien 2004 ja 2005 välillä rakennettu vastapenkereet, jotka ovat aiheuttaneet painumista sekä turpeen lujittumista vastapenkereiden alla. Kuitenkin kasvavat ulkoiset kuormat myös pienentävät turpeen vedenläpäisevyyttä alkuperäisestä. Tämä heikentää vastapengerryksestä syntyneiden huokospaineiden jakautumista maaperässä. Tällöin turpeessa taas aiheutuu myöhemmin jatkuvia deformaatioita. Käytännössä kohteessa vastapenkereiden rakentaminen siis parantaa stabiliteettia, mutta aiheuttaa ratapenkereeseen johdannaisvaikutuksena deformaatioita. Kuitenkin datasta kuvissa 5.64 ja 5.65 voidaan havaita, että massastabiloidulla kohdalla siirtymät ovat huomattavasti pienempiä.

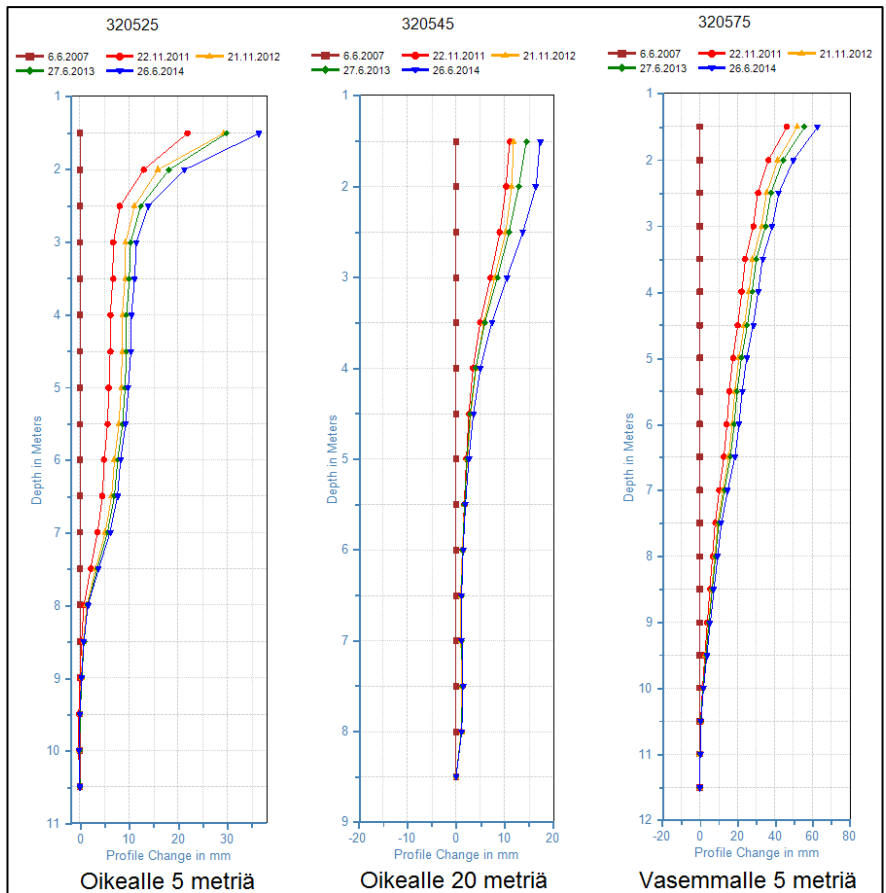
Kuvassa 5.63 on esiteltyä eri kilometrilukujen korjaustoimenpiteet, sekä kohdat joissa on ollut eniten kunnossapidon tarvetta. Inklinometrikohteista eniten kunnossapidon tarvetta on ollut noin kilometrin 320+360 kohdalla. Kuvissa 5.64 ja 5.65 on esitetty kaikki kohteen inklinometrimittaukset viimeisten 4 vuoden ajalta. Huomataan, että noin 5 metrin päästä radan keskijanjasta syntyvät vaakasiirtymän muodot muistuttavat toisi-

aan. Suurusluokka siirtymällä 5 metrin päässä on noin 100 – 200 mm ja vastaavasti noin 8 metrin päässä 250 – 300 mm (lähellä maanpintaa). Tämä käytännössä tarkoittaa, että vastapenkereiden painuminen eri kohdissa radan leveysuunnassa on erisuuruista ja muodostaa hieman erilaisen taipumaprofiilin.

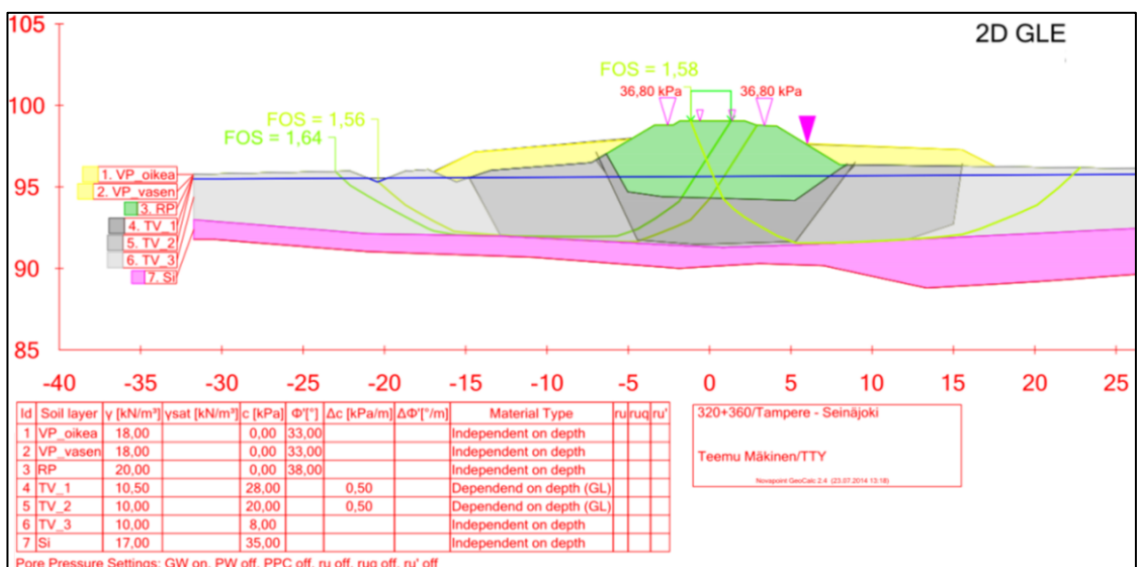
Käytännössä kauempana ratapenkereestä siirtymä on lähes kokonaan vastapenkereestä johtuvaa painumaa ja lähempänä pengertä alkaa näkyä itse pengermateriaalin lakoamisen vaikutus. Huomattavaa on myös, että massastabiloidulla alueella siirtymät ovat lähellä maanpintaa noin 50-200 mm pienempiä. Siirtymäprofiileista on myös vaikea erottaa varsinaista leikkaavaa vyöhykettä, ja kohteissa todennäköisesti turpeella onkin kohtuullisen hyvät lujuusominaisuudet ratapenkereen alapuolella. Ongelmat kohteessa johtuvatkin pääosin turpeen painumaominaisuuksista ja kuormituksesta aiheutu- neesta erittäin pienestä vedenläpäisevyyden arvoista. Myös mitä paksumpi turvekerros kohdalla on, niin sitä suurempi sekundaaripainuma kohdalla vaikuttaa. Tätä koko penkereen ja turpeen yhteistoimintaa on mallinnettu myöhemmin Plaxiksen avulla. Kuvassa 5.74 on yksinkertainen GeoCalc stabiliteettilaskenta kohteesta, jossa FOS vasemmalle ja oikealle on noin 1,5-1,6. Vastapenkereet kohteessa painuivat turpeeseen noin metrin verran ensimmäisten kuukausien aikana rakentamisesta.



Kuva 5.64. Inklinometriputkien siirtymät vastapengerkohteista viimeisten 4 vuoden ajalta. Siirtymät noin 5 metrin päässä noin 100-200 mm ja 8 metrin päässä noin 300 mm. Siirtymien muutosnopeus on noin 10-20 mm/vuodessa.



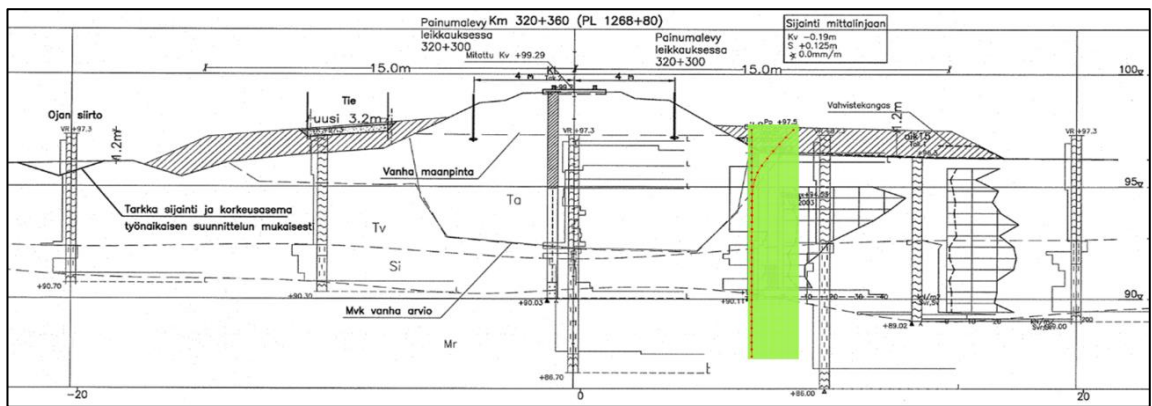
Kuva 5.65. Inklinometrien siirtymät massastabiloidulta alueelta. Siirtymät ovat huomattavasti pienempiä kuin vastaavilla putkilla vastapenger alueilla. Siirtymänopeus tällä kohtaa noin 5-6 mm/vuodessa. Aluksi näyttäisi, että putkissa olisi siirtymiä enemmän alempana pohjamaassa, mutta tämä johtuu lähinnä siirtymien skaalauksesta. Putket eivät alueella kuitenkaan taivu yhtä voimakkaasti yläpäästä, kuten vastapengerkohteissa.



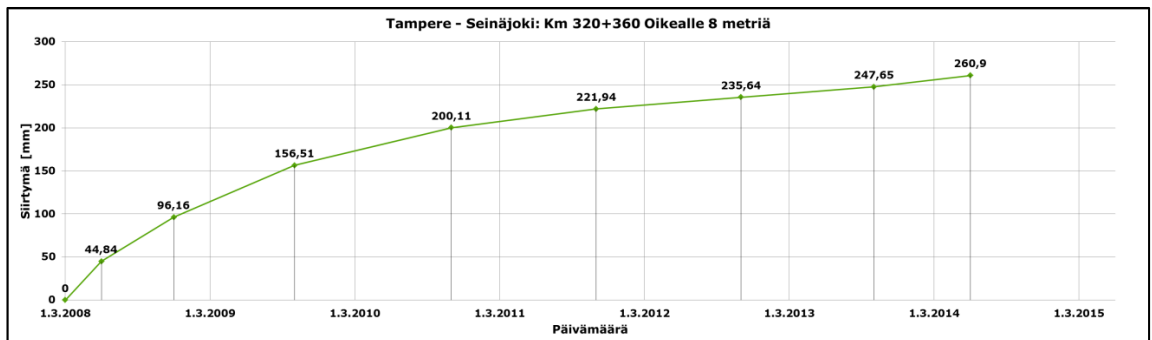
Kuva 5.74. Stabiilitetilaskelma kilometrin 320+360 kohdalta, jossa FOS vasemmalle ja oikealle noin 1,6.

Kilometri 320+360:

- Kunnossapitäjän suorittamat tuennat keväällä 2010, 2011, 2013 sekä syksyllä 2012.
- Putki on alueella, missä on rakennettu vastapenger ja penkereen alla on käytetty lujitekangasta.
- Mittauksia on tehty 7 vuoden ajan vuosien 2007 ja 2014 välillä.
- Putken siirtymä radasta pois päin on noin 250 mm ja pituussuunnassa noin 25 mm.
- Viimeisten 3 vuoden aikana siirtymiä on ollut 30 mm eli noin 10mm/vuosi.
- Kuvassa 5.66 on poikkileikkaus kohteesta ja kuvassa 5.67 on siirtymä ajan funktiona.
- Siirtymät ovat pääosin putken yläpäässä noin 4 metrin matkalla. Tämä indikoisi, että siirtymät johtuvat vastapengerin painumista.



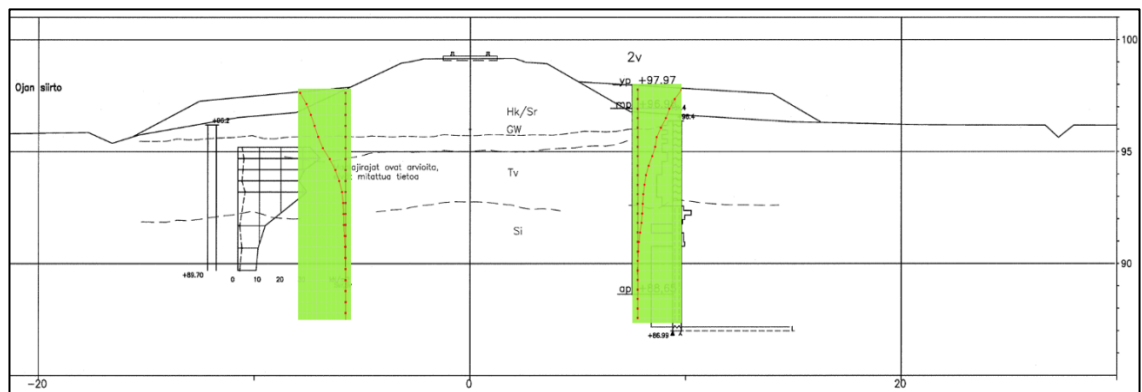
Kuva 5.66. Poikkileikkaus kilometrin 320+360 kohdalta



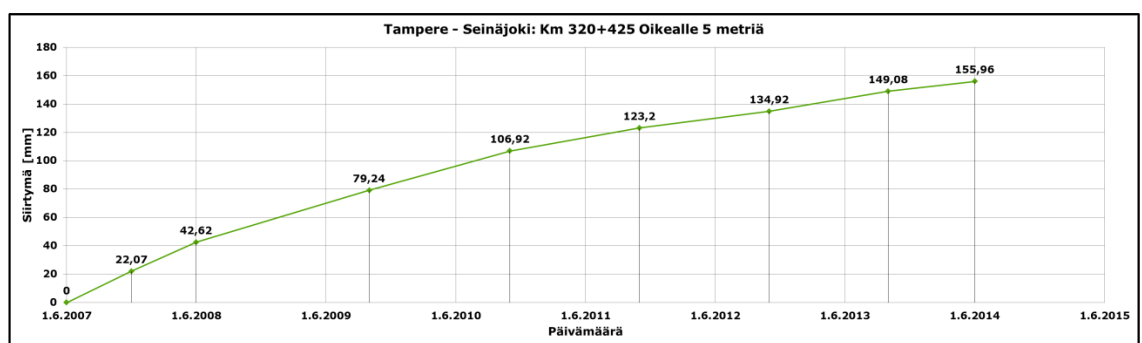
Kuva 5.67. Siirtymä ajan funktiona kilometrin 320+360 kohdalta. Siirtymiä oikealle noin 10 mm/vuodessa.

Kilometri 320+425 & 320+475:

- Kohteessa on vastapenger sekä lujitekoerakenne.
- Kunnossapitäjän suorittamat tuennat keväällä 2010 ja 2013.
- Kuvassa 5.68 on poikkileikkaus alueelta ja kuvassa 5.69 on kilometrin 320+425 siirtymä-aika kuvaaja.
- Tällä kohdalla siirtymät ulottuvat syvemmälle noin 5-7 metrin syvyyteen. Siirtymää lähellä maanpintaa on noin 150 mm oikealle ja 100 mm vasemmalle. Radan pituus-suunnassa siirtymät ovat noin 10-30 mm.
- Siirtymien ulottuminen syvemmälle lähempänä ratapengertä indikoi pengermateriaalin lakoamista sivusuunnassa turpeeseen. Siirtymiä vasemmalle on oletettavissa noin 11 mm/vuodessa ja oikealle 14 mm/vuodessa.
- Todennäköisesti kohdalla ongelmia näkyy kunnossapidossa myös jatkossa. Etenkin, kun siirtymiä kertyy lisää tasaisesti. Siirtymänopeus kohdalla on kuitenkin hidastunut vuosien aikana.



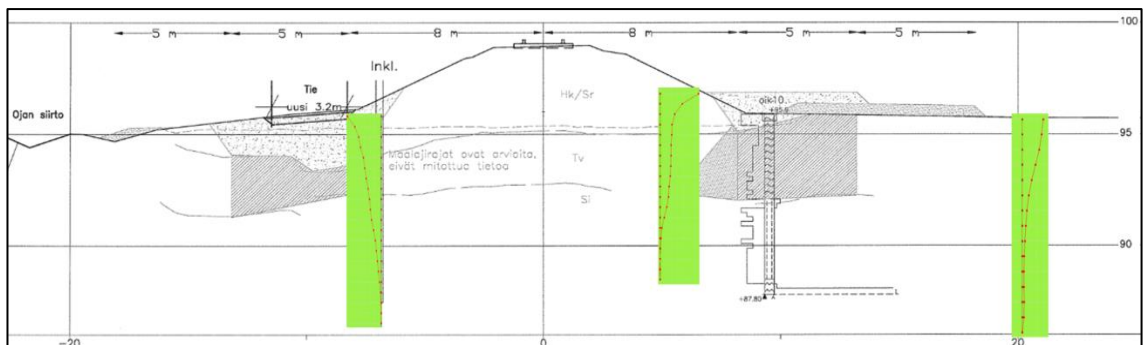
Kuva 5.68. Poikkileikkaus kilometrin 320+420 kohdalta ja taipumaprofiilit kilometrien 320+425 ja 320+475 kohdalta (Geo-piirustukset)



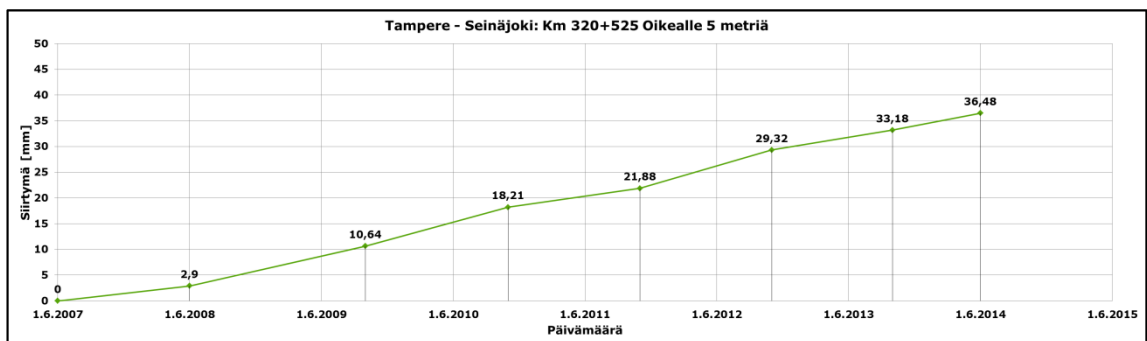
Kuva 5.69. Siirtymä ajan funktiona kilometrin 320+425 kohdalta. Siirtymä oikealle noin 14 mm/vuodessa. Siirtymä-aika kuvaaja vasemmalle kilometrin 320+475 kohdalla muistuttaa yllä olevaa kuvaajaa. Erona on, että siirtymiä syntyy noin 11 mm/vuodessa vasemmalle.

Kilometrit 320+525, 320+545 & 320+575:

- Kohteessa on tukimassastabilointi koerakenteena.
- Kunnossapitäjän suorittamat tuennat keväällä 2010 ja 2013.
- Kuvassa 5.70 on poikkileikkaus alueelta ja kuvassa 5.71 on kilometrin 320+525 siirtymä-aika kuvaaja.
- Siirtymät kohteessa ulottuvat noin 5-10 metrin syvyyteen. Tällä osuudella kuitenkin siirtymät ja siirtymänopeus ovat paljon pienempiä kuin aikaisemmassa kohdassa. Tällöin pituussuunnassa noin 100 metrin matkalla tapahtuu huomattavasti pienempää ja hitaampaa penkereen liikettä (putket samalla etäisyydellä radasta eli noin 5 metrin päässä).
- Siirtymiä oikealle (5 metrin päässä) on noin 35 mm ja vasemmalle (5 metrin päässä) noin 60 mm. Siirtymänopeus oikealle on noin 5 mm/vuodessa ja vasemmalle 6 mm/vuodessa.
- Alueella suoritettu massastabilointi kuvan 5.70 mukaan on selvästi pienentänyt siirtymiä ja siirtymänopeutta verrattaessa esimerkiksi kilometrien 320+400 ja 320+600 vastapenger- ja lujitekohteisiin. Stabilointi on suunnitelmassa merkitty myös penkereen alle, mutta todellisuudessa penkereen alla olevaan kokoonpuristuneeseen turpeeseen ei ole pystytty stabilointi ainetta sekoittamaan kunnolla.



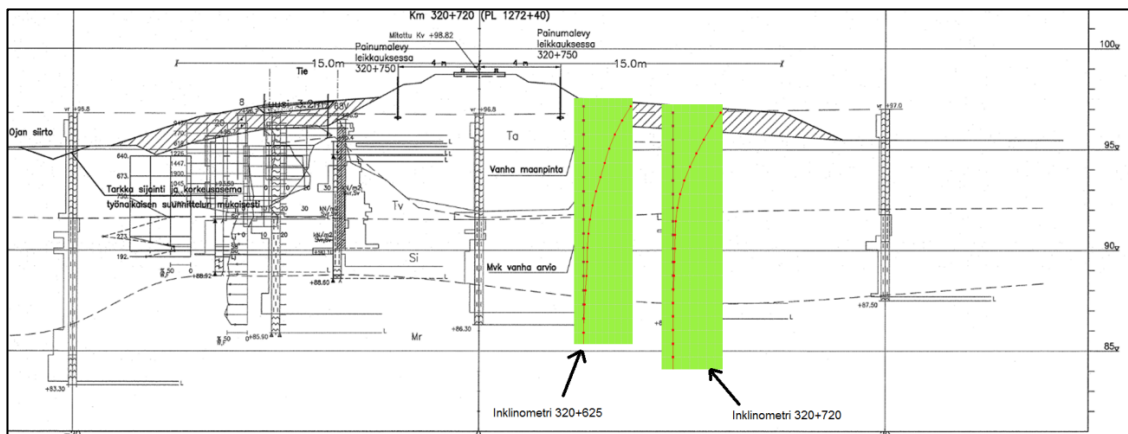
Kuva 5.70. Poikkileikkaus kilometrin 320+580 kohdalta. Taipumaprofiilit massastabiloidulta alueelta 320+500-320+600. Harmaalla merkatut alueet ovat stabiloitavia alueita. (Geo-piirustukset)



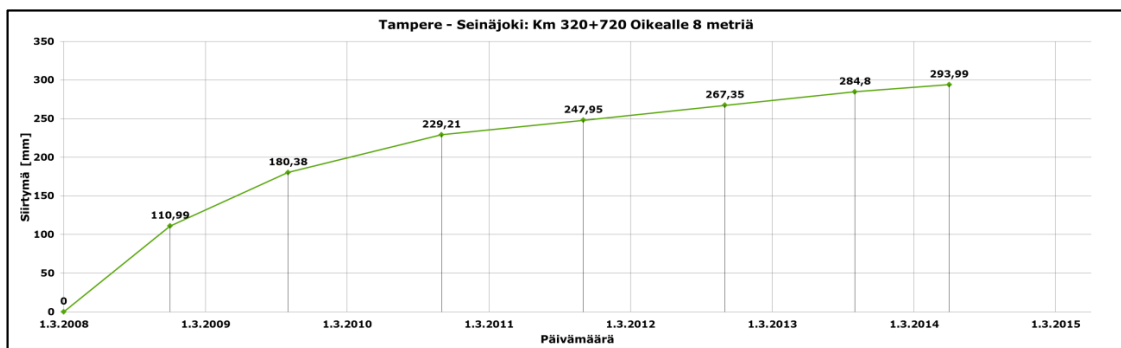
Kuva 5.71. Siirtymä ajan funktiona kilometrin 320+525 kohdalta. Siirtymiä oikealle noin 5 mm/vuodessa. Siirtymiä on kertynyt huomattavasti vähemmän kuin vastaavalla vastapengeralueella. Kuitenkin alueella siirtymät jatkuvat varsin tasaisesti.

Kilometrit 320+625 & 320+720:

- Kohteessa on rakennettu vastapenger ja lujite rakenne.
- Kunnossapitäjän suorittamat tuennat kilometrin 320+625 kohdalla keväällä 2010 ja 2013, mutta kilometrin 320+720 kohdalla vain keväällä 2010.
- Kuvassa 5.72 on poikkileikkaus alueelta ja kuvassa 5.73 on siirtymä-aika kuvaaja kilometrin 320+720 kohdalta.
- Kilometrin 320+625 kohdalla siirtymiä oikealle on noin 200 mm (5 metrin päässä) ja 320+720 kohdalla noin 300 mm (8 metrin päässä). Siirtymänopeudet kohdissa ovat noin 12 mm/vuodessa ja 19 mm/vuodessa. Myös radan pituussuunnassa siirtymiä on noin 100 mm.
- Kilometrin 320+720 putki on hieman kauempana ratapenkereestä ja vastapenkereen painuminen aiheuttaa putkeen lisää taipumaa kohdalla. Hieman lähempänä pengertä eli noin 5 metrin päässä keskilinjasta siirtymänopeus on huomattavasti pienempi lähempänä maanpintaa. Tämä vahvistaa päätelmää vastapenkereiden aiheuttavan siirtymiä ja tällöin vastapenkereen keskellä syntyy suurempaa taipumista. Tätä on myöhemmin yritetty myös mallintaa Plaxiksen avulla.

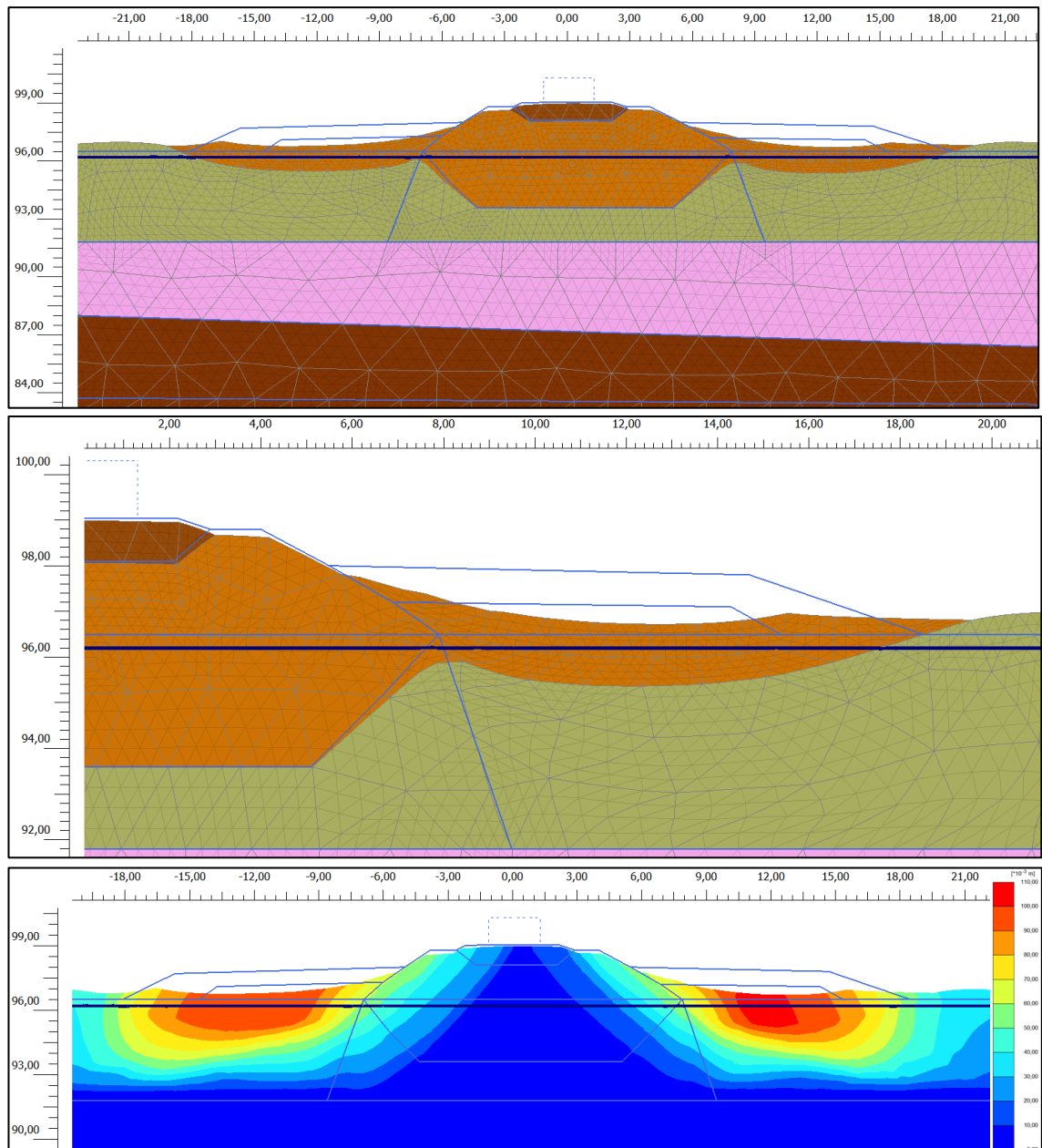


Kuva 5.72. Poikkileikkaus kilometrin 320+720 kohdalta. Taipumaprofiilit kilometrien 320+625 ja 320+720 kohdalta. (Geo-piirustukset)

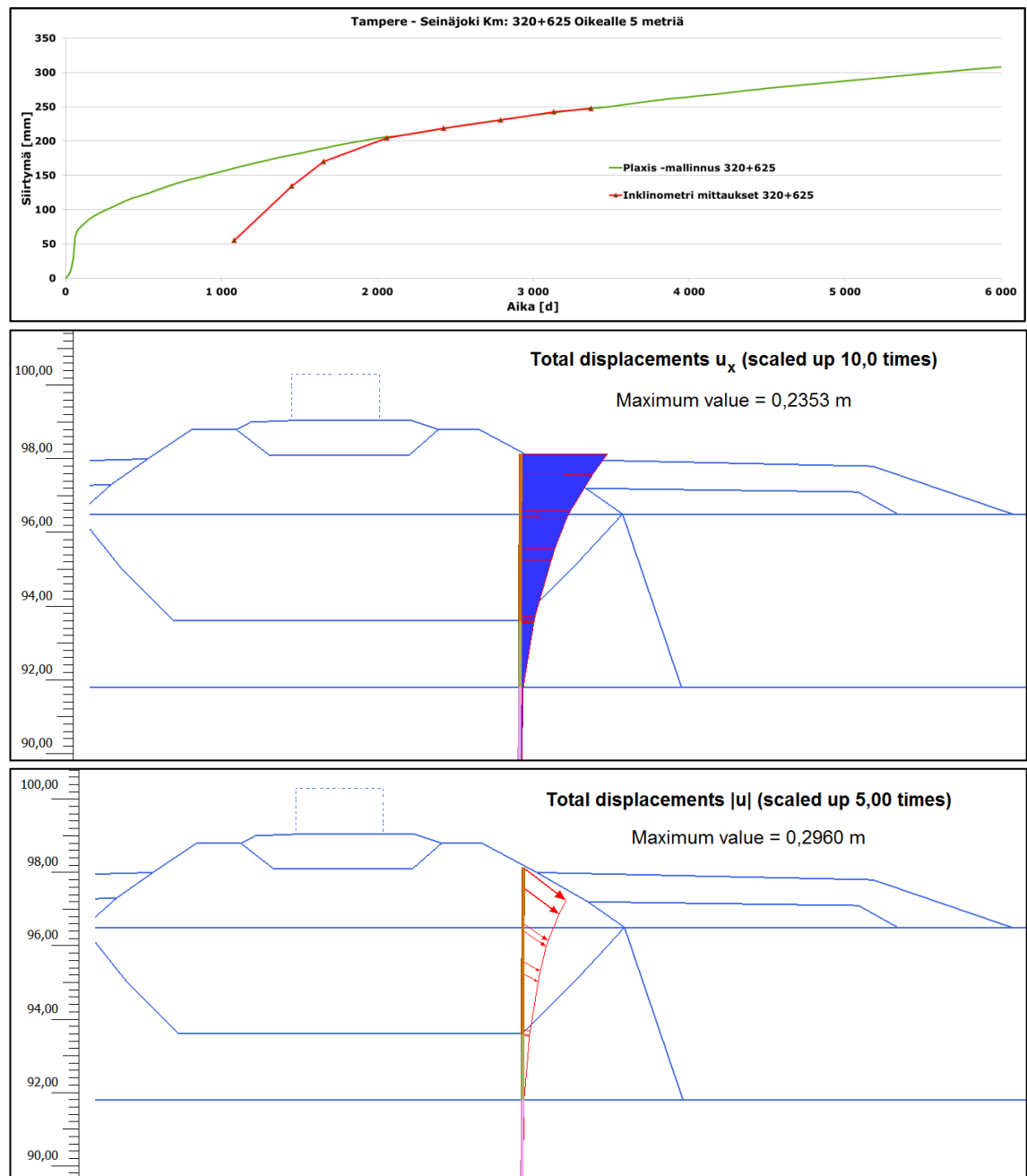


Kuva 5.73. Siirtymä-aika kuvaaja kilometrin 320+720 kohdalta. Siirtymää oikealle 19 mm/vuodessa. Vastaavasti kilometrin 320+625 kohdalla noin 12 mm/vuodessa. Lähempänä vastapenkereen keskiosaa olevassa putkessa siis tapahtuu suurempaa taipumaa suuremmasta painumasta johtuen.

Suurista siirtymistä johtuen kuitenkin turpeen käyttämistä on mallinnettu Plaxiksen MCC ja SS -malleilla. Kuvista voidaan havaita, että geometria muuttuu rajusti vastapenkereiden painuessa turpeeseen. Tällä on vaikutusta muun muassa turpeen ominaisuuksiin ja itse stabiliteetilaskentaa. Turvetta ratapenkereen alla on vielä myöhemmin pohdittu tutkimuksen johtopäätöksissä kappaleessa 6.



Kuva 5.75. Ylhäällä ja keskellä on Plaxis –mallinnus penkereen muodonmuutoksista vuoden 2014 kohdalta. Vastapenkereet mallinnuksessa ovat painuneet lähes maanpinnan tasolle. Alhaalla on vielä vastapenkereiden deformaatiot vuosien 2010-2014 väliltä. Itse ratapenkereen kunnossapitoa ei ole laskentaan mallinnettu, mutta kuvasta voidaan huomata, että viimevuosien aikana vastapenkereet ovat vaikuttaneet itse ratapenkereen deformaatioihin. Vaikutus on ollut kuitenkin merkittävästi suurempi heti rakentamistömenpiteiden jälkeen, mikä on kiihdyttänyt varsinaista kunnossapidon tarvetta.

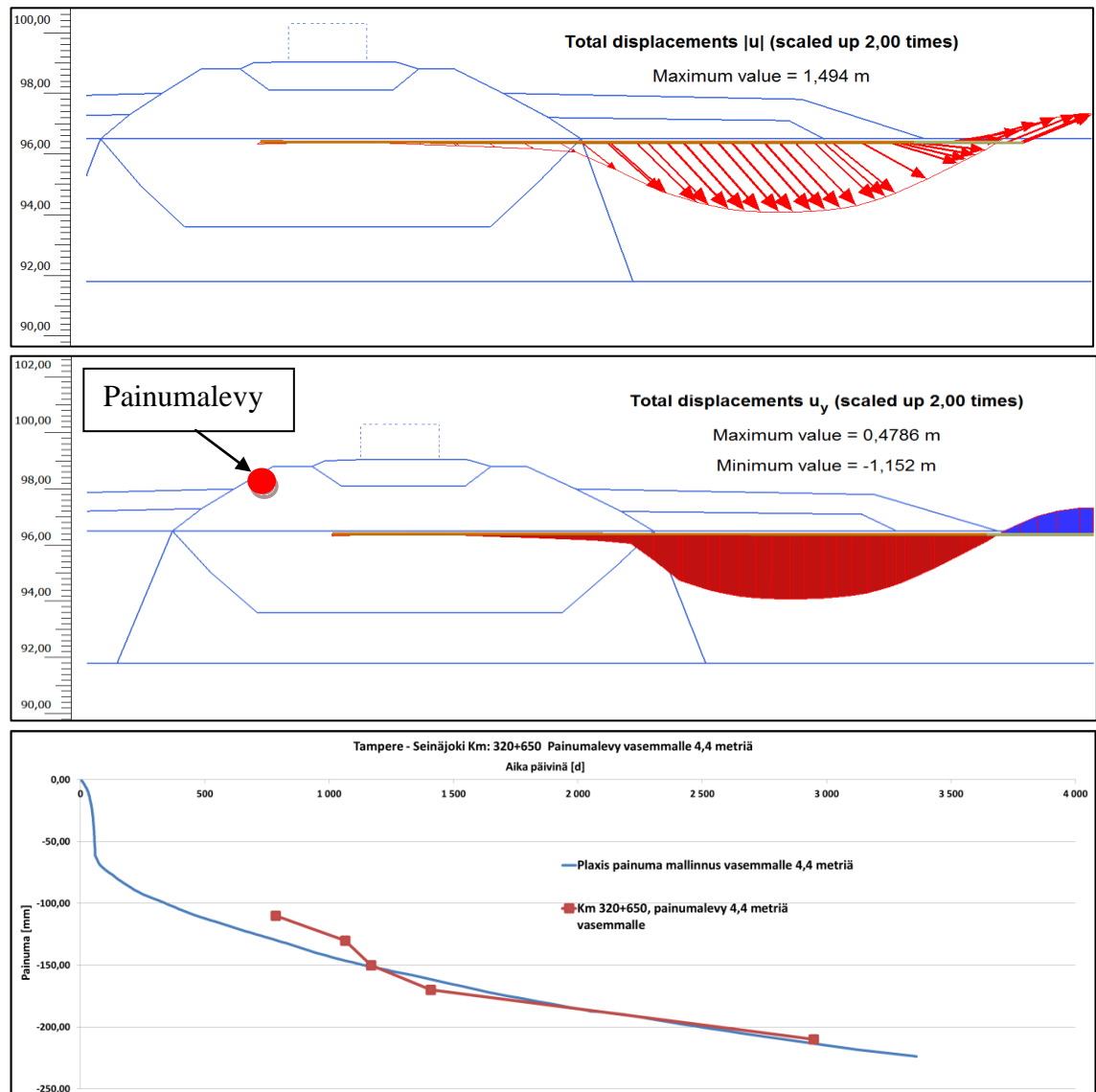


Kuva 5.76. Ylhäällä on Plaxis -simuloinnin siirtymä-aika kuvaaja noin 5 metrin päästä raiteesta. Keskellä on Plaxiksen kaikki vaakasiirtymät vastapenkereiden rakentamisen jälkeen (5 metriä raiteesta oikealle) ja alhaalla on kaikki siirtymät penkereen vierestä. Oikeassa kohteessa inclinometrimitaukset on aloitettu 2-3 vuotta vastapenkereiden rakentamisen jälkeen.

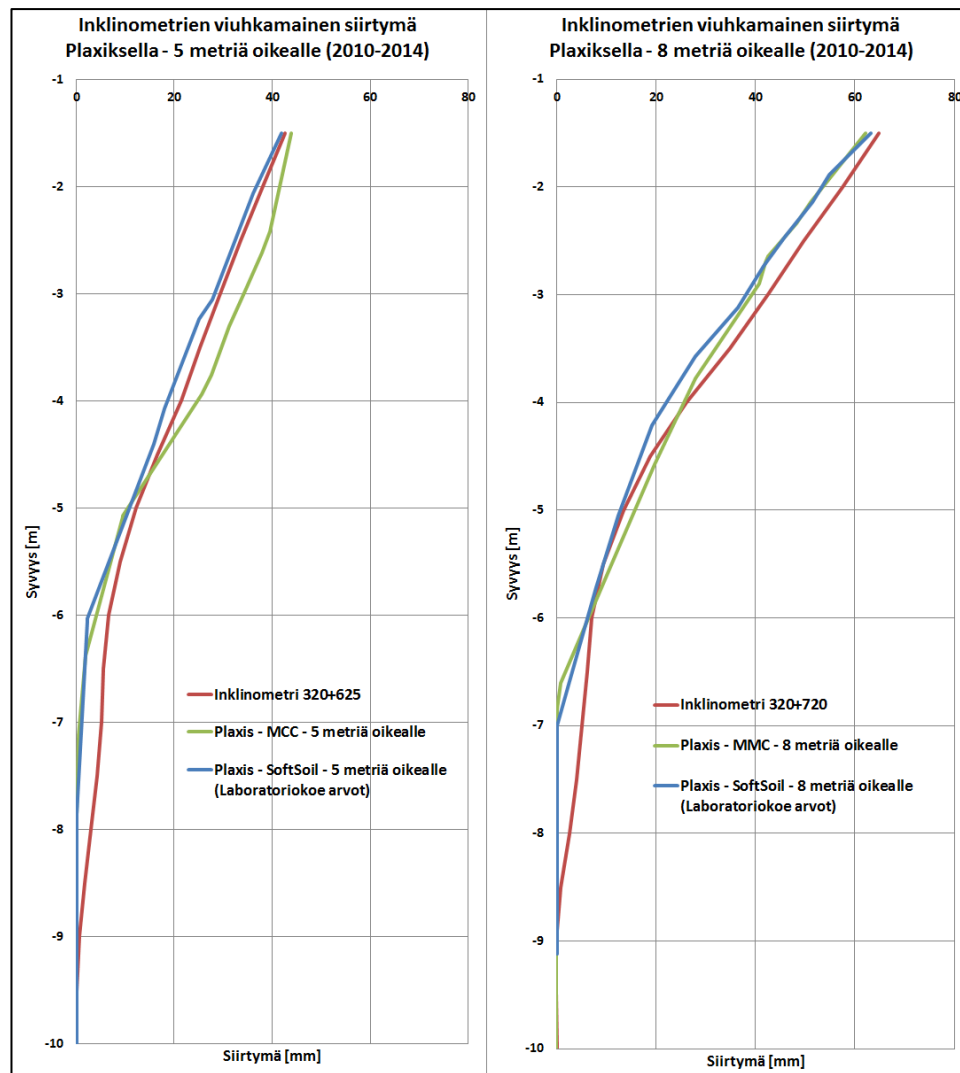
Yhteensä sivusiirtymiä simuloinnissa kertyisi noin 400-600 mm pienemmillä vedenläpäisevyyden arvoilla (5 metriä keskilinjasta oikealle). Kyseisessä simuloinnissa ollaan noin vuoden 2014 kohdalla ja sivusiirtymiä on kertynyt vasta 230 mm. Kuvan 5.76 ylhäällä on kyseessä on vuonna 2004-2005 rakennettujen vastapenkereiden jälkeiset siirtymät. Vastapenkereistä johtuva painuma aiheuttaa vielä monien vuosien jälkeen siirtymää maanpinnana tasolla. Takaisinlaskennan perusteella noin vuonna 2020 siirty-

miä kertyisi vajaat 7 mm/vuodessa. Kuvan 5.76 inklinometrasiirtymiin on lisätty 40 mm, jotta siirtymät saadaan samaan ”vaiheeseen” ja kulkemaan samalla käyrällä.

Seuraavassa kuvassa 5.77 on esitetty mallinnuksen painumat vuoden 2014 kohdalta. Tuloksista voidaan myös havaita, että 8 metrin päästä radan keskilinjasta, missä painuma on voimakkainta, myös sivusiirtymiä syntyy huomattavasti enemmän. Edellä mainittuja mallinnusten sivusiirtymiä on vertailtu kuvassa 5.78.

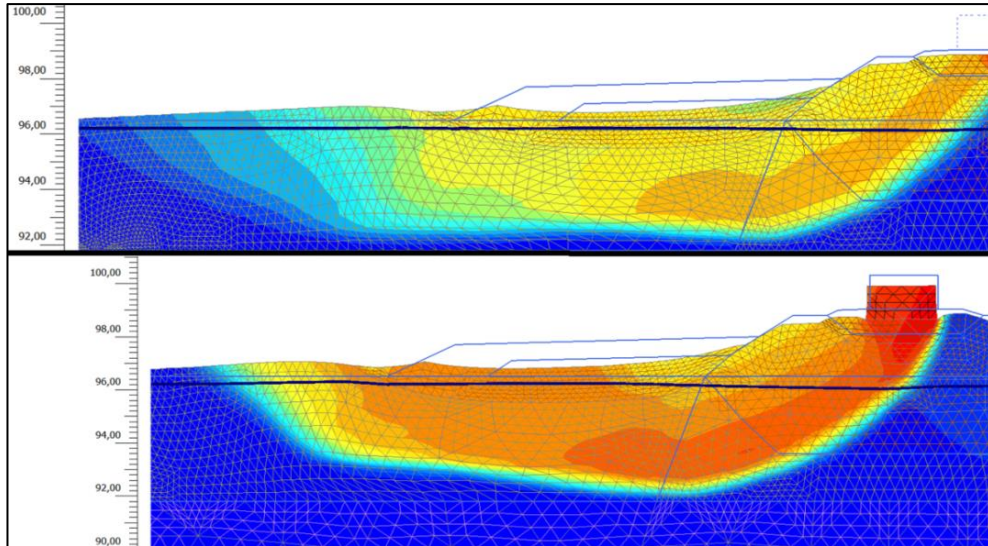


Kuva 5.77. Ylhäällä on simuloinnin kaikki vastapenkereen siirtymät (noin 1,5 metriä) ja keskellä on esitetty painumat. Alhaalla on kilometriltä 320+650 mitatut painumat sekä Plaxis mallinnuksen painumat. Mitatut painumat on yritetty arvioida alkamaan oikeassa vaiheessa käyrällä.



Kuva 5.78. Plaxiksen –mallinnuksen viuhkamaiset siirtymät 5 ja 8 metrin päässä. Siirtymät on valittu aikaväliltä 2010-2014, koska kuten huomataan aiemmasta siirtymäaika kuvaajasta 5.76, putkien asettumisessa on ollut paljon kiihtyvää siirtymää alussa, joka ei taas vastaa mallinnuksen tilannetta.

Simuloinnin sivusiirtymät jatkuvat pitkään vastapenkereiden rakentamisen jälkeen. Kuvassa 5.78 on esitettyä 2010-2014 vuosien väliltä mallinnetut siirtymät. Plaxis –laskennan kitkakulman ja K_0 -alkutilanteen arvioiminen kuitenkin vaikuttaa todella paljon sivusiirtymiin (Hayashi et al. 2012). K_0 alkutilannetta on laskentoihin hieman varioitu ja lopulliset arviot löytyvät taulukosta 5.10. Tähän kun lisätään vielä laskentatavasta ja geometriasta yms. johtuvat virheet voidaan todeta, että kokonaisvarmuus olisi arviolta noin 1,4-1,7 junakuormalla. Kokonaisvarmuus laskentojen eri vaiheissa kuitenkin kasvaa vuosien mittaan, kun huokosvedenylipaineet jakautuvat maaperässä. Huokosvedenylipaineet laskennassa ovat kuitenkin ylisuuret johtuen käytetystä vedenläpäisevyyden arviosta. Ylisuurilla huokosvedenpaineilla saadaan deformaatio käyttäytyminen simuloitua paremmin, koska laskennassa ei turpeen sekundaaripainumaa ole huomioitu. Huokosvedenpaineet tilanteesta on esitetty myöhemmin kuvassa 5.81.



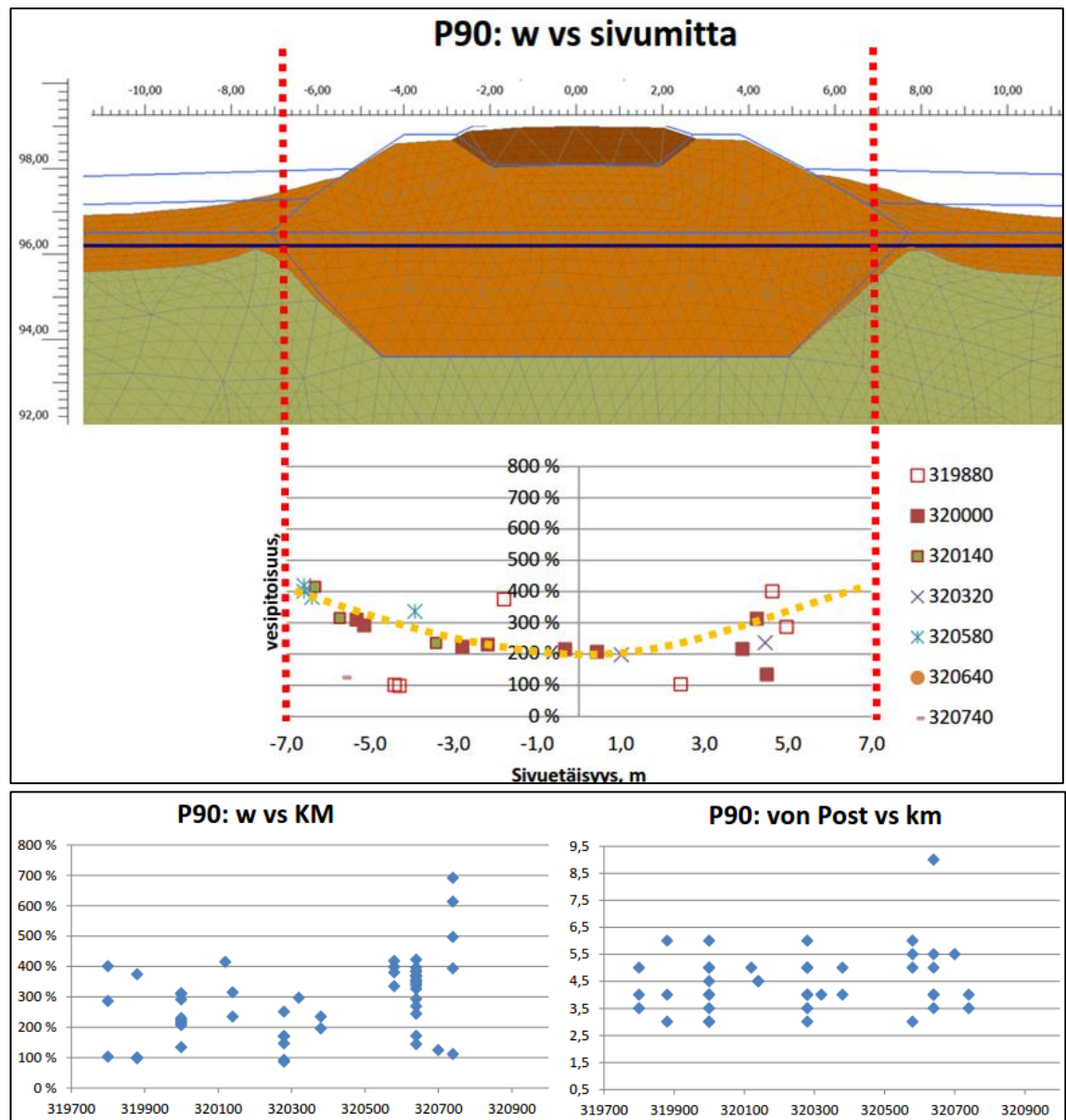
Kuva 5.79. Plaxis stabiliteetilaskenta Soft Soil:lla. Kohteessa Msf ilman junakuormaa on noin 1,8 sekä junakuormalla noin 1,5. Mallinnuksessa ei ole kuitenkaan kunnossapitoa huomioitu ja tukikerroksen paksuuden on kuitenkin raportoitu kasvaneen noin 0,5 m. Turpeen lujuuksia on myöhemmin pohdittu vanhojen ratapenkereiden alla tutkimuksen johtopäätöksissä.

Taulukko 5.10. Turpeen parametrit Plaxis laskennassa. Soft Soil:n parametrit on arvioitu tehdyistä laboratoriokokeista sekä perustuen aikaisempiin kokemuksiin Riihimäki – Tampere välin kohteesta. Alhaalla on vielä perustelu OCR:n käyttämiseksi laskennassa. Kuvan perusteella olisi aiheellisempää käyttää POP:a, mutta tällöin laskennassa helposti yliarvioidaan jännityksiä lähempänä maanpintaa. Ei myöskään tiedetä kuinka paljon vedenpinta vaihtelee sekä kuinka paksu humuskerros kohdalla on. Mallinnuksessa OCR:llä ja K_0 alkutilannetta varioimalla saadaan siirtymät paremmin mallinnettua kuin arvioiduilla POP:n arvoilla.

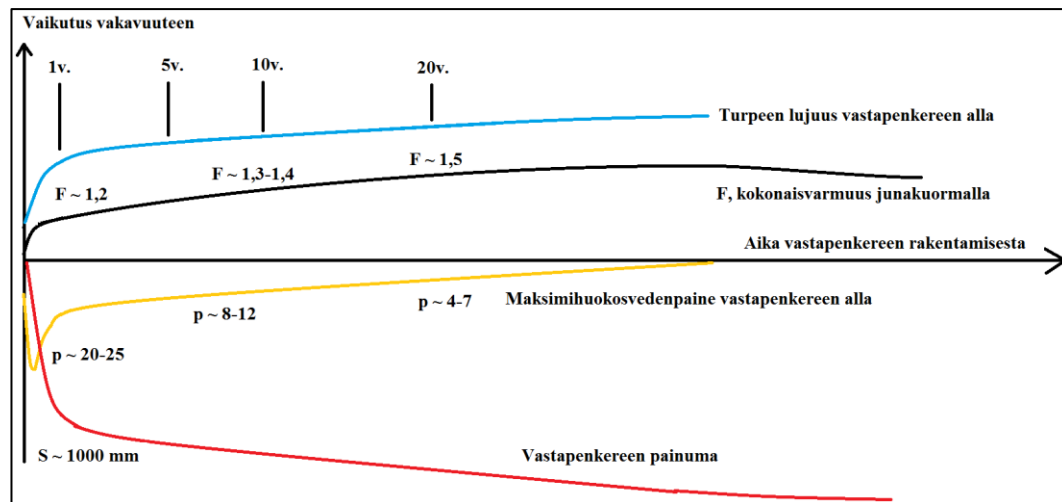
Deformaatiolaskenta:													
Soft Soil													
	y_sat	v	λ^*	κ^*	e0	c	ϕ'	K0(NC)	K0(OC)	M	OCR	k(x=y)	Ck
Turvekerros	10	0,22	0,210	0,021	9,0	1	41	0,44	0,54	1,8	1,7	1E-09	1,6
Stabiliteetilaskenta:													
Soft Soil													
	y_sat	v	λ^*	κ^*	e0	c	ϕ'	K0(NC)	K0(OC)	M	OCR	k(x=y)	Ck
Penkereen alla:	10	0,22	0,170	0,017	4,0	1	56	0,28		2,5	1	1E-09	1,5
Penkereen reunoilla:	10	0,22	0,210	0,021	9,0	1	41	0,35	0,39	2,2	1,7	1E-07	3,0

Maalaji:	Tilavuuspaino	Vedenpinnan vaihteluväli
Humusmaa	15 kN/m ³	0,2 metriä
		0-0,2 metriä
Turve	10,5 kN/m ³	

Tehokas jännitys σ' [kPa]	
Syvyys [m]	
0	0
-0,2	~1,5
-0,4	~3,0
-0,6	~4,5
-0,8	~6,0
-1,0	~7,5
-1,2	~9,0
-1,4	~10,5
-1,6	~12,0
-1,8	~13,5
-2,0	~15,0
-2,2	~16,5
-2,4	~18,0
-2,6	~19,5
-2,8	~21,0
-3,0	~22,5



Kuva 5.80. Ylhäällä on esitetty laboratorioissa arvioitujen vesipitoisuuksien sijoittuminen penkereen alapuolelle. Kuvasta voidaan huomata heikko trendi, jossa vesipitoisuus kasvaa penkereen reunoille siirryttäessä. Tällöin voidaan myös olettaa, että kitkakulma lähempänä penkereen keskilinjaa on suurempi ja näin myös penkereen alapuolella jäljellä olevan turpeen suljettu leikkauslujuus. Alapuolella on vielä esitetty arvioidut vesipitoisuudet ja maatuneisuusasteet penkereen alapuolelta otetuista näytteistä. Vesipitoisuus vaihtelee noin 100-400 % välillä ja maatuneisuusaste (H) noin 3-6 välillä.



Kuva 5.81. Havainnollistus edellisten sivujen mallinnuksista samassa kuvassa. Käytännössä Plaxiksella vakavuuden mallintaminen heti vastapenkereiden rakentamisen jälkeen on vaikeaa, koska huokosylipaineet ovat korkealla ja penkereen reunoilla tapahtuu suuria deformaatioita (penger esimerkiksi painuu lähes metrin 3kk aikana). Toisaalta myös vakavuus on heikoimmillaan tällöin suurista huokosylipaineista johtuen.

Konsolidaatio:

Turvetta kuormitettaessa vedenläpäisevyys pienenee nopeasti ja aika-painuman konsolidaatiokerroin muuttuu jopa satakertaisesti (RHK A10/2006). Kohteessa turpeen vedenläpäisevyysominaisuudet tulevatkin ratkaisevaksi parametriksi deformaatioita mallinnettaessa. Deformaatiolaskennassa turpeen vedenläpäisevyysarvoksi on arvioitu alussa noin 10^{-9} m/s ja muutosarvona (Ck) 1,6. Tällöin aliarvioidaan alkutilanteen vedenläpäisevyyttä, mutta saadaan paremmin nykytilanteen deformaatiot simuloitua. Rakentamisen aikaisia sekä heti rakentamisen jälkeisiä suuria deformaatioita turpeella voidaan myös mallintaa varioimalla jäykkyysparametreja.

Turpeella primäärinen konsolidaatio tapahtuu nopeasti noin alle vuoden kuluessa rakennusvaiheen päättymisestä ja tämän jälkeen jatkuu sekundaarinen kokoonpuristuminen lähes lineaarisesti $\log(t)$ -asteikoilla. Kuitenkin merkittäviä huokosylipaineita on havaittu vielä kauan primaarisen konsolidaation päättymisen jälkeen. Kyseiset ylipaineet pysyvät suhteellisen vakiona huomattavan pitkiä aikoja. Tällöin Terzaghin konsolidaatioteorian pätemisedellytykset eivät ole voimassa turpeella. Turve on harvoin täysin veden kyllästämä johtuen siinä olevista kaasuista. (RHK A10/2006)

Edellä mainittua sekundaaripainumaa ja huokosvedenpaineiden jakautumista maaperään ei tässä simuloinnissa pystytä mallintamaan samalla tavalla ja deformaatiot laskennassa ”aiheutetaan” muodostuneilla huokosylipaineilla ja näin alun suurien deformaatioiden jälkeen käytännössä laskennassa primaarisella konsolidaatiolla eli vedenläpäisevyys ja muodonmuutos parametreja varioimalla.

Vastapenkereet:

Laskennassa vastapenger materiaalin tuottamat huokospaineet vapautuvat turpeessa todella hitaasti ja aiheuttavat jatkuvaa pientä deformaatiota. Todellisuudessa turpeen vesipitoisuus myös laskee kuormituksen vaikutuksesta. Vastaavasti turpeen lujuus kasvaa huokospaineiden jakautuessa. Pitkä-aikaista vedenläpäisevyyden muutosindeksiä ei ole kuitenkaan arvioitu tehdyistä laboratoriokokeista. Itse ratapenger on rakennettu vaiheittain 1970-luvulla, mutta mallinnus on aloitettu noin 2005 vuoden kohdalta vastapenkeiden rakentamisen kohdalta. Käytännössä kaikkien vaiheiden mallintaminen ja parametrien varioiminen veisi todella paljon aikaa. Tällöin lähtötilanteen arvioiminen olisi haastavampaa. Kohteesta ollaan kuitenkin ottamassa myös luonnontilaisia näytteitä, mutta niiden tuloksia ei tämän tutkimuksen puitteissa ehditä hyödyntämään.

Kuvan 5.75 ylimmäisestä kohdasta huomataan, että vastapenkereet ovat osittain painuneet lähes ympäröivän maanpinnan tasolle. Tämä kuvastaa hyvin myös yleisesti turpeille rakennettuja vastapengerkohteita. Vastapenkeiden rakentamisen jälkeen noin 1-5 vuoden aikana ne ovat sulautuneet hyvin maastoon ja niitä on kauempaa vaikea erottaa.

Lujuusominaisuudet:

Alkutilanteena on käytetty suunnitelmien poikkileikkauksista arvioitua ratapengertä sekä tähän mallinnettu suunnitellut vastapenkereet. Turpeella mallintamisen luonne on kuitenkin erittäin deformaatiopainotteinen eikä tyypillisillä stationäärisillä GeoCalc – laskennoilla kyetä mitenkään pureutumaan vastaavanlaisiin käyttäytymiseen. Toinen selvä etu on turpeella käytettävä kitkakulma sekä K_0 -alkutilanteen arvioimiseen aktiivipuolella. Tällöin ei tarvitse ajatella tilannetta suljetun leikkauslujuuden avulla, jonka suuruus voi vaihdella todella paljon kuormituksen vaihdellessa. Tällöin lujuus lasketaan tulee tehokkaiden pystyjännitysten avulla eri kohdalla penkereen alla.

Taulukossa 5.11 on vielä esitettyä kohteessa käytetyt laskennan parametrit. Kyseisen taulukon alla on kuva perusteluista käyttää OCR:n arvoja turpeelle. Käytännössä tässä ajatellaan, että turvekerroksen päällä on ohut humuskerros ja vuodenaikojen vaihtelusta johtuen vedenpinta saattaa vaihdella noin 0...0,4 metriä. Vedenpinnan vaihtelua alueella saattaa myös aiheuttaa kohteen lähellä oleva turvetuotanto alue (Bäcklund). Tällöin todella kevyt turve saattaa ylikonsolidoitua pienilläkin vedenpinnan vaihteluilla (Hayashi et al. 2012). Deformaatiolaskennan parametrit ovat esitetty taulukossa 5.10. Parametrit ovat arvioitu turpeelle suoritettujen kolmiaksaali- ja rasialeikkaukokeiden perusteella sekä aikaisemman Riihimäki - Tampere välin kohteen perusteella. Tilannetta kuitenkin monimutkaistaa K_0 -alkutilanteen arvioiminen. Alkutilanteen variointia turpeella on tutkittu aiemmin esimerkiksi Japanissa (Hayashi et al. 2012).

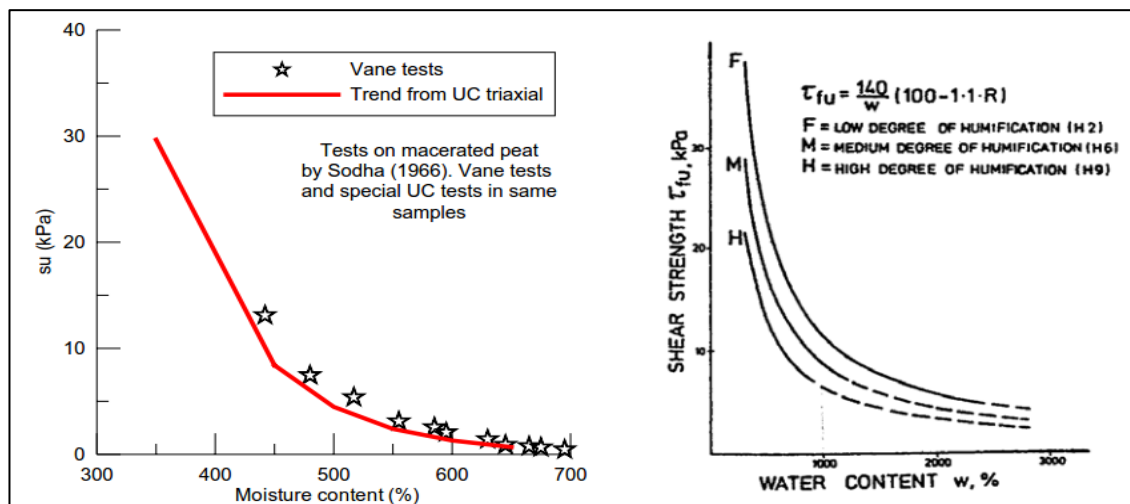
Penkereen alta ja reunalta laboratoriokokeista karkeasti esitettyä voidaan mainita turpeen kitkakulman olevan kolmiaksaalikokeessa noin 40-60 asteen luokkaa riippuen ajatellusta vaarallisesta muodonmuutostasosta (5-10 %). Vastaavasti rasialeikkaukokeissa ei voitu murtoa havaita ja näytteet dilatoivat voimakkaasti. Tietty taitepis-

te oli kuitenkin havaittavissa noin 2 mm sivusiirtymän kohdalla, mitä voitiin pitää leikkauslujuuden määrittämisen perustana.

Kolmiakσιαalikokeissa toisessa sarjassa turpeessa ei maksimileikkausjännitystä saavutettu ollenkaan ja näyte dilatoi 15 % suhteelliseen kokoonpuristumaan asti. Tällöin voidaan olettaa kokeessa näytteen yrittävän leikkautua dominoivia kuituja vastaan.

Ulkomailla on raportoitu samantyyppisiä tuloksia sekä muodonmuutostasoja vastaavissa kolmiakσιαali- ja rasialeikkauskokeissa. Kokeet ovat kuitenkin pääosin tehty luonnontilaisille näytteille, mutta selvä trendi tuloksilla on huomattu. Ulkomailla DSS kokeessa tehdyissä näytteissä voitiin mitata noin 31-34 asteen kitkakulman arvoja, rasialeikkauskokeessa noin 40 asteen ja kolmiakσιαalikokeessa noin 48-60 asteen kitkakulmia. Kirjallisuusselvityksessä myös havaittiin trendi kokeiden välillä seuraavasti (Long 2005):

- ϕ' (kolmiakσιαalikoe) > ϕ' (rasialeikkauskoe) > ϕ' (DSS) > ϕ' (rengasleikkauskoe).
- Kolmiakσιαalikokeen kitkakulmien arvioitiin olevan osittain liian suuria ja DSS kokeen vastaavasti osittain liian pieniä. DSS -laitteistolla on kuitenkin voitu arvioida turpeen suljettua leikkauslujuutta hyvin esimerkiksi Alankomaissa suoritettussa sorrutuskokeessa (Zwanenburg). Kyseisen tutkimuksen puitteissa olisi erittäin perusteltua kokeilla DSS -laitteiston soveltumista suomalaisilla turpeilla.
- Anisotropialla eli kuitujen vaikutuksella on suuri merkitys kokeiden tuloksiin. Alapuolella kuvassa 5.82 vasemmalla on vielä esitetty keinotekoisien turvenäytteiden ja siipikairan vertailua sekä oikealla vastaavasti Carlstenin (2000) esittämä suljetun leikkauslujuuden ja vesipitoisuuden yhteys. Kuitujen vaikutus myös selittää suljetussa kolmiakσιαalikokeessa saatuja todella suuria kitkakulman arvoja.



Kuva 5.82. Vesipitoisuuden ja suljetun leikkauslujuuden yhteys. Vasemmalla (Sodha 1966) esittämä yhteys keinotekoisien turvenäytteen laboratorioskokeiden ja siipikairan välillä sekä oikealla Carlsten (2000) esittämä empirinen yhteys. (Long 2005)

Yhteenveto simuloinnista:

Simuloinnin huokosylipaineet ovat oikeassa kohteessa todennäköisesti pienemmät tilanteessa ja laskennan arvot perustuvat takaisinlaskentaan, jossa deformaatiot saadaan sopimaan kohteen vastaaviin. Kaiken tämän mallinnuksen pohjalta on kuvassa 5.81 esitetty yhteenveto eri elementeistä. Yhteenvetona voidaan sanoa, että turpeen lujuus kehittyy hyvin tehokkaasti ensimmäisten vuosien aikana, kun suurin osa huokospaineista jakautuu pohjamaassa. Tällöin kuitenkin samaan aikaan vastapenkereet painuvat maanpinnan tasolle sekä tehokas tilavuuspaino pienenee vastapenkereiden painuessa vedenpinnan alapuolelle. Tällöin hyöty kumoutuu osittain. Kuitenkin mallinnuksen kokonaisvarmuus nousee kohteessa useiden vuosien jälkeen noin 1,5-1,7 tasolle junakuormalla mitoitettuna (melko konservatiivisilla turpeen lujuuden arvoilla mitoitettuna).

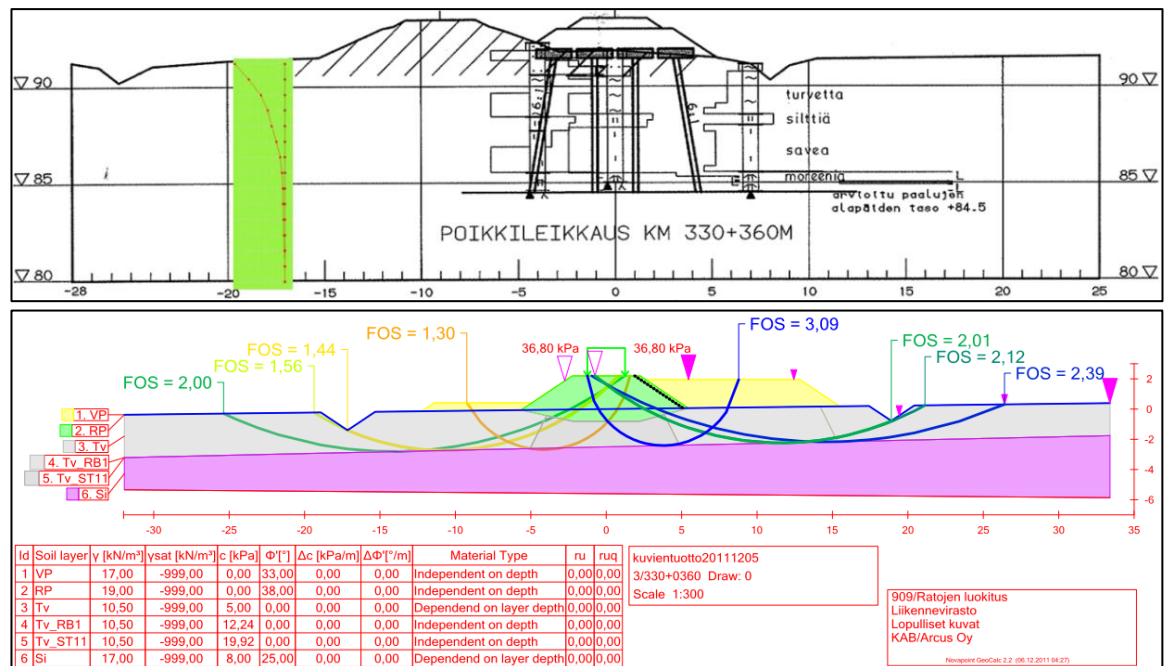
Ongelmia kuitenkin mallinnuksessa on vielä useita, kuten tehokkaan kitkakulman arvioiminen. Kuormitettuna kuituisessa turpeessa kitkakulma voi olla jopa 40-60 astetta riippuen mitä muodonmuutostasoa halutaan pitää turvallisena. Käytännössä aktiivipuolella turpeen lujuuden mobilisoituessa tapahtuisi enemmän nopea painuma kuin dramaattinen sortuma.

Toisaalta myös pohjamaa pitäisi jakaa vedenläpäisevyys vyöhykkeisiin sekä selvittää vedenläpäisevyys ja -läpäisevyyden muutosindeksi tarkemmin. Tällä on kuitenkin osittain pieni vaikutus, koska turpeen primaari- ja sekundaaripainumakäyttäytymistä ei voida kuitenkaan tavanomaisilla keinoin täydellisesti mallintaa. Käytännössä vedenläpäisevyys vaakasuunnassa myös saattaa olla huomattavasti suurempi kuin pystysuunnassa johtuen kuitujen suuntauksesta. Laboratoriokokeista kuitenkin saatiin arviota pystysuuntaisesta vedenläpäisevyydestä, joka pystysuunnassa vuoden 2014 kohdalla oli noin $10^{-9} \dots^{-11}$ m/s ratapenkereen alla ja reunassa. Turpeen lujuuden osalta on vielä tarkempaa pohdintaa johtopäätökset kappaleessa 6.

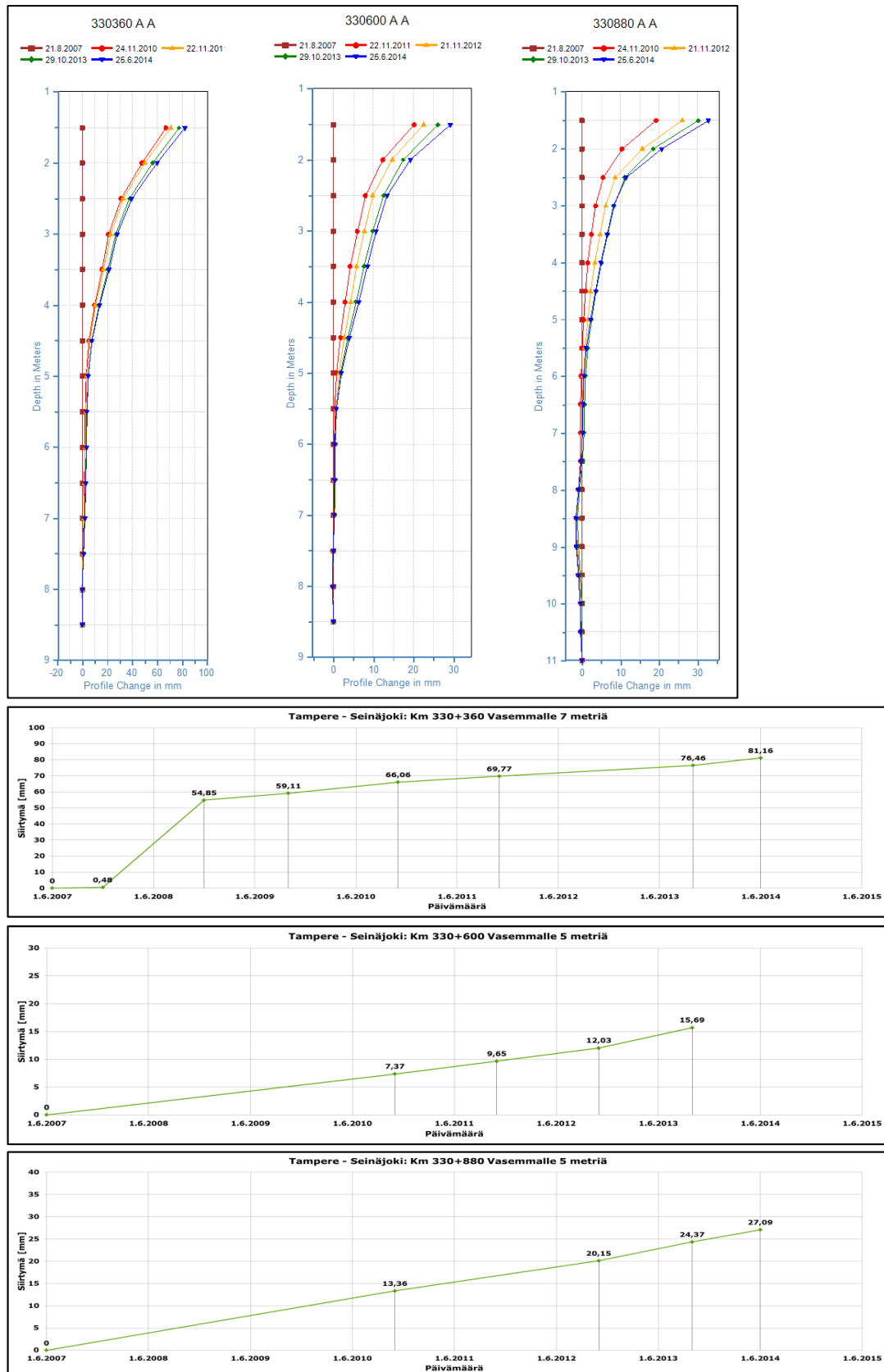
Kilometrit 330+360 & 330+600 & 330+880 (Pehmeikkö 91):

Ratapenger on noin 2-3 metriä korkea ja rakennettu turvekerroksen varaan. Turvekerroksen paksuus on noin 2-4 metriä ja tämän alla on noin kaksi metriä savea ja silttiä. Kohteessa on kaksi raidetta. Vasemman puoleinen raide on rakennettu massanvaihtoa käyttäen ja oikean puoleinen raide paaluhattujen varaan kuvan 5.83 mukaisesti. Vasemman radan vasemmalla puolella kulkee huoltotie. Siirtymät ovat kohteissa pieniä, mutta kuitenkin tasaisesti progressiivisia. Kuvan 5.83 suunnitelman mukaisesti kohteen oikeanpuoleisen radan alle on rakennettu paalulaatta vuosien 2013-2014 vaihteessa. Paalutuksella ei ole ollut merkittävää vaikutusta putkien siirtymiin.

1. Kilometrin 330+360 kohdalla inklinometrissa siirtymää on yhteensä noin 75 mm ja se on viuhkamaisen muotoinen. Kohteen siirtymät ovat kuitenkin syntyneet alussa nopeasti ja hidastuneet nykyiseen 4 mm/vuodessa.
2. Kilometrillä 330+600 siirtymiä on noin 3-4 mm/vuodessa ja yhteensä noin 15 mm.
3. Kilometrillä 330+880 siirtymiä on noin 25 mm ja tässäkin kertymää on vuodessa noin 3-4 mm/vuodessa.



Kuva 5.83. Yläpuolella on kilometrin 330+360 kohdalta poikkileikkaus. Alhaalla on havainnollistava GeoCalc -laskenta kilometrin 330+360 kohdalta. (Geo-piirustukset, RATUS)



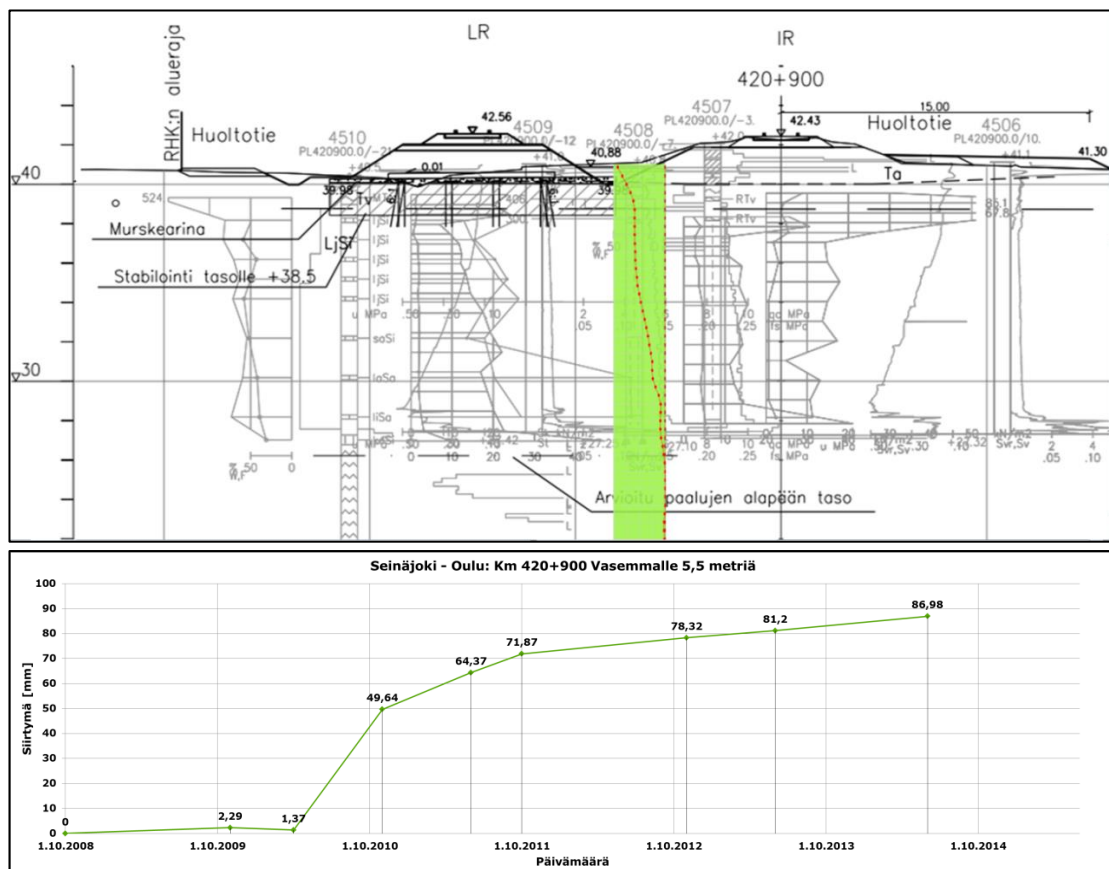
Kuva 5.84. Ylhäällä on inklinometrimittaukset ja alhaalla kohteiden inklinometreistä piirretyt siirtymä-aika kuvaajat. Kohteessa siirtymät ovat olleet noin 3-4 mm/vuodessa lähellä maanpintaa. Ylimmässä kuvaajassa putken alussa on ollut asettumisesta johtuvaa nopeaa viuhkamaista siirtymää.

5.3.5.2 Seinäjoki – Oulu

Kilometri 420+900 (Pehmeikkö 3):

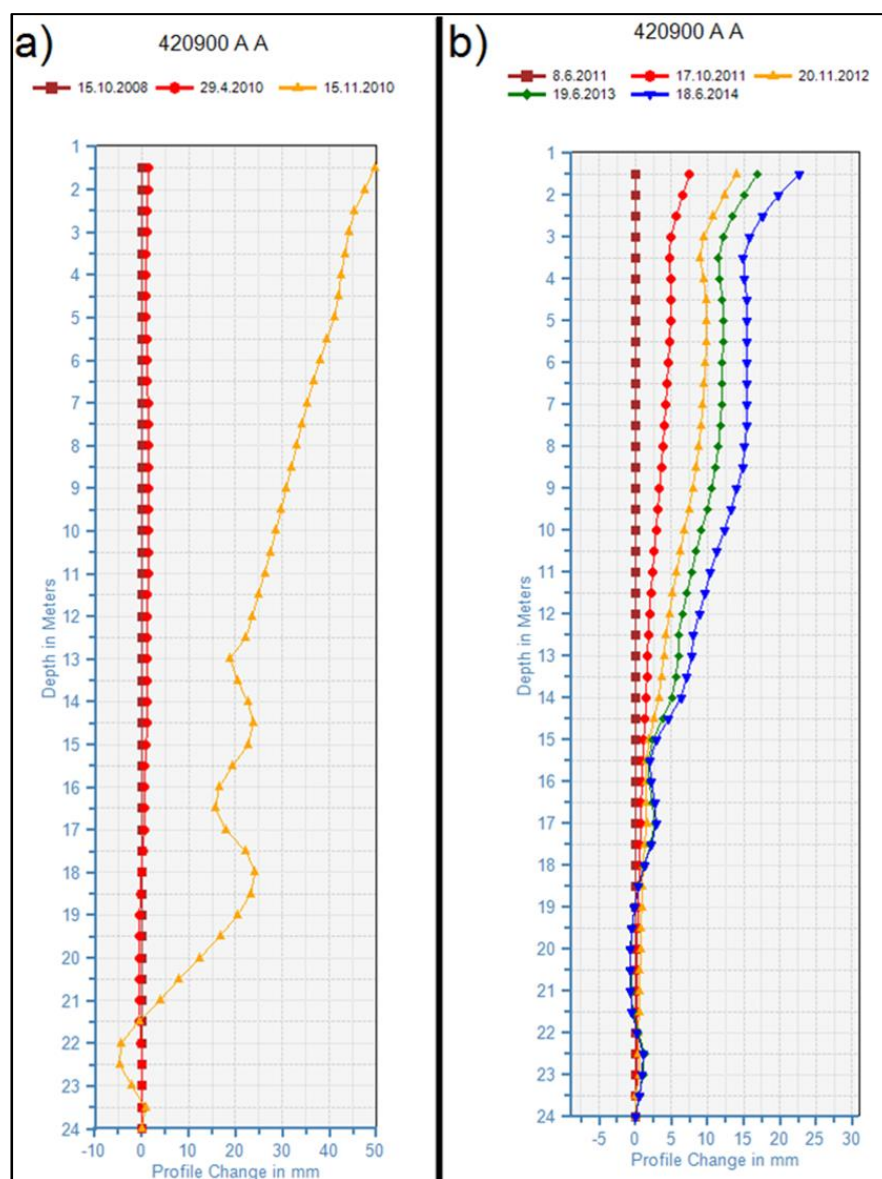
Kohde sijaitsee Seinäjoella ja kohteessa on noin 1,5-3 metriä korkeat ratapenkerheet turpeen päällä. Turvekerros on ohut ja tämän alla on noin 2-4 metriä savea. Inklinometriputki sijaitsee vanhan radan vasemmalla puolella. Kuitenkin kohteeseen on rakennettu uusi ratapenger vanhan radan vasemmalle puolelle vuoden 2010 aikana. Tällöin putki on jäänyt kahden radan väliin kuvan 5.85 mukaisesti. Uusi rata on rakennettu paalulaa-talle suunnitelmien mukaan. Kohteen siirtymät ovat 2010 vuoden aikana selitettävissä paalutustöillä. (Seurantakortit)

Kohteen 0-mittaus vuodelta 2006 on virheellinen. Kuvassa 5.86 on vasemmalla esitetty kohteen paalutuksen aikaiset siirtymät käyttäen referenssinä vuoden 2008 mittausta. Uuden radan paalutustöistä syntyneitä siirtymiä on kertynyt noin 50 mm puolen vuoden aikana. On huomattavaa, että siirtymät ovat syntyneet paalutustyömaan suuntaan. Siirtymän muoto kylläkin indikoi vaarallisen kaltaista sortumaan mahdollisesti johtavaa vyöhykettä. Siirtymänopeutta paalutuksen aikana leikkautuvalla vyöhykkeellä on vaikea arvioida, koska ei tiedetä tarkkaan siirtymien ja paalutustyön aloitushetkeä ja aikataulua.



Kuva 5.85. Ylhäällä on poikkileikkaus ja putken taipumaprofiili rakennustöiden jälkeen. Alhaalla on siirtymä-aika kuvaaja. Rakennustyömaan aikaiset siirtymät erottuvat selkeästi. Nykyään siirtymää on noin 5-6 mm/vuodessa lähellä maanpintaa.

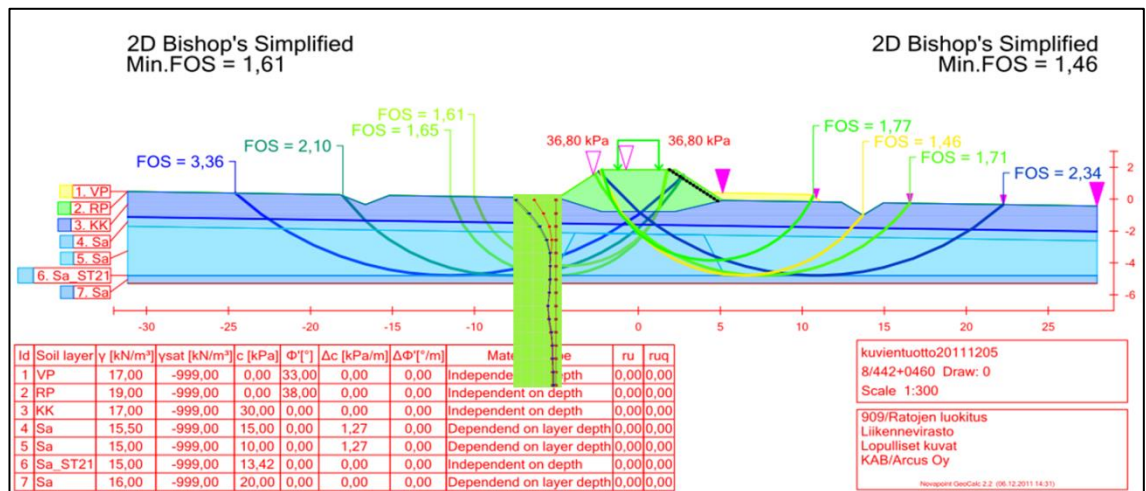
Kohteessa siirtymiä uuden radan rakentamisen jälkeen on syntynyt noin 5-6 mm/vuodessa lähellä maanpintaa kuvan 5.86 mukaisesti. Kohdan (b) siirtymäprofiilissa on käytetty referenssinä vuoden 2011 mittausa, jotta viimeisen 4 vuoden mittaukset havainnollistuisivat paremmin. Nykyisin siirtymistä voi aiheutua vaikutuksia sekä vanhalle radalle että uudelle radalle. Vanhan radan alla savi liikkuu hieman häirittyyn maaperään päin ja vastaavasti uudella radalla paaluihin kohdistuu siirtymästä aiheutuvaa maanpainetta ja taivutusmomenttia. Leikkausvyöhykkeellä noin 15 metrin syvyydessä kohteessa siirtymiä on syntynyt noin 1,5 mm/vuodessa. Paalutustöiden aikaisia leikkausvyöhykkeen siirtymiä ei voi tarkasti arvioida, mutta kyseisen rakentamisen aikaisen puolen vuoden aikajaksolla leikkausvyöhykkeellä siirtymiä on syntynyt noin 20 mm puolessa vuodessa.



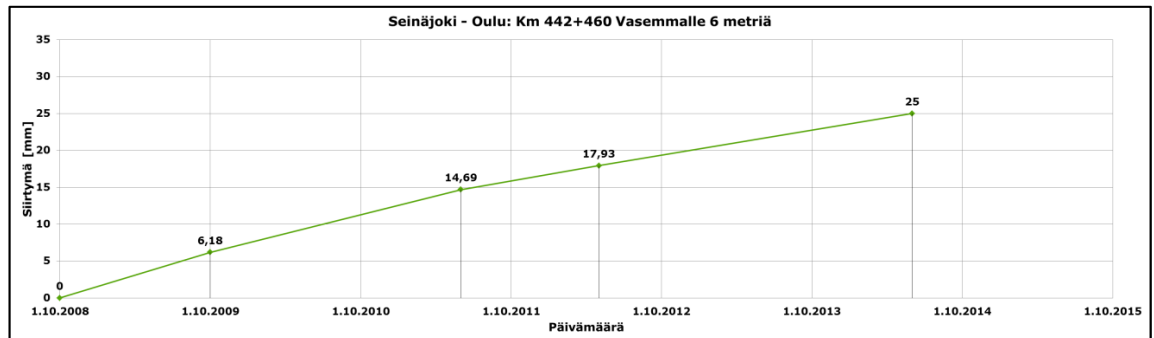
Kuva 5.86. Kohteen siirtymät (a) uuden radan paalutustöiden aikana (noin 50 mm) ja (b) rakentamisen jälkeen. Siirtymiä nykyään noin 5-6 mm/vuodessa putken yläpäässä ja leikkautuvalla vyöhykkeellä siirtymiä noin 1 mm/vuodessa.

Kilometri 442+460 (Pehmeikkö 22a):

Kohteessa on noin 1,5-2 metriä korkea pengerrus savella. Savikerroksen paksuus on noin 4 metriä. Aivan ratapenkereen alla on kuitenkin ohut kuivakuorikerros. Oikealle puolelle on tuotu lisää vastapengertäyttöä sekä siirretty ojaa kauemmaksi. Kohde on alueella, jossa on nostettu junanopeuksia. Kuvassa 5.86 on esitetty kohteesta stabiiliteetilaskenta ja putken taipumaprofiili. Kohteessa siirtymiä on yhteensä noin 20 mm ja ne ovat kertyneet viiden vuoden mittauksen aikana. Lisää siirtymiä syntyy nykyään noin 3 mm/vuodessa lähellä maanpintaa. Kuvassa 5.88 on vielä esiteltyä siirtymä-aika kuvaaja. Siirtymiä ei kuitenkaan oletettujen liukupintojen kohdalla ole merkittävästi.



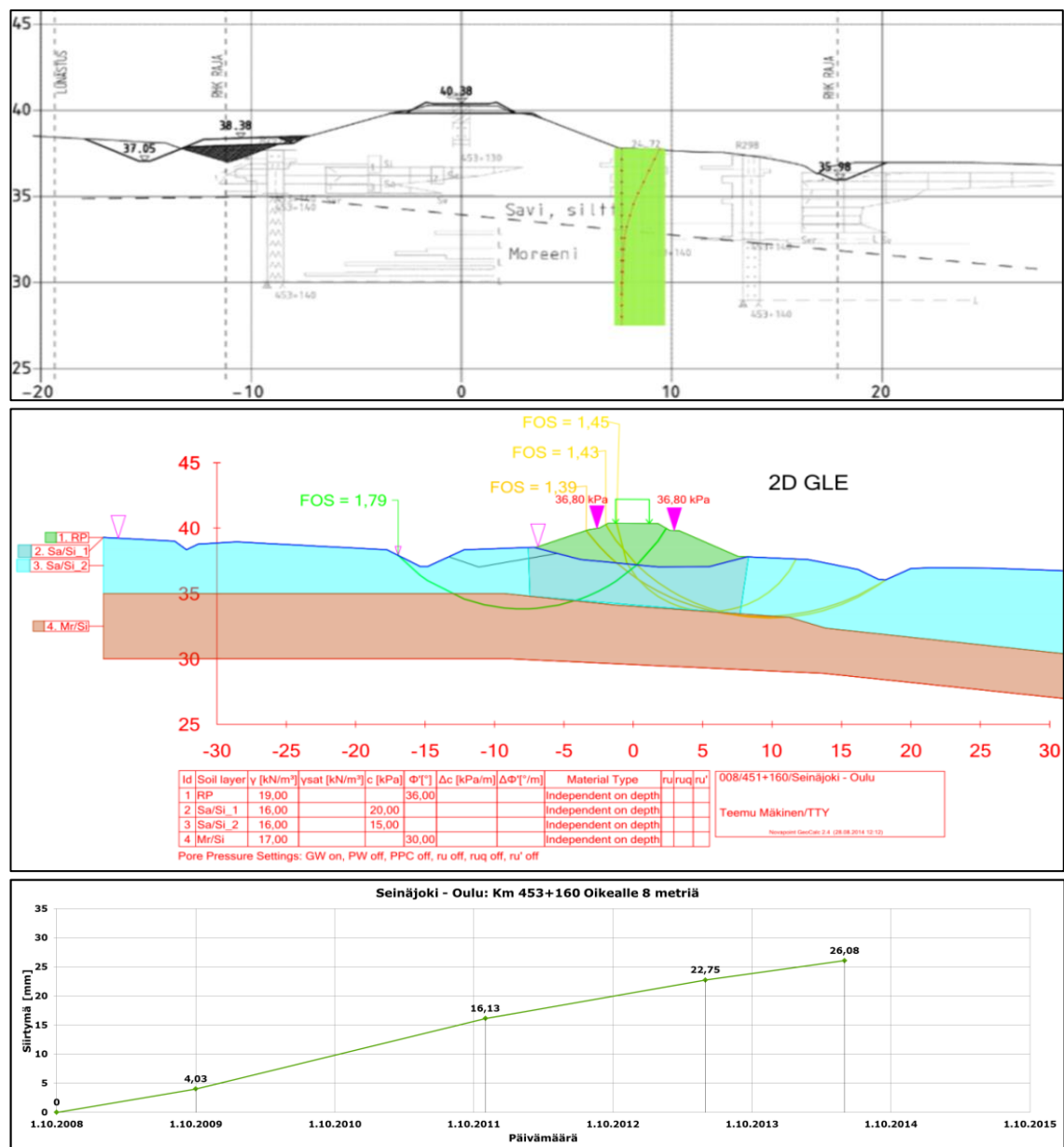
Kuva 5.87. Havainnollistava GeoCalc –laskenta kohteesta, jossa FOS vasemmalle noin 1,6. (RATUS)



Kuva 5.88. Siirtymä-aika kuvaaja, jossa siirtymiä nykyään noin 3 mm/vuodessa.

Kilometri 453+160 (Pehmeikkö 26):

Kohteessa on noin 1,5-2 metriä korkea ratapenger savikolla. Savikerroksen paksuus on noin 3-5 metriä. Kuvassa 5.89 ylhäällä on poikkileikkaus ja putken taipumaprofiili sekä keskellä stabiliteettilaskenta. Vasemman puoleista ojaa on siirretty kauemmaksi ja vanhan ojan päälle tuotu täyttömateriaalia. Pohjamaa on hieman sivukalteva oikealle. Siirtymää yhteensä on noin 25 mm ja mittauksia suoritettu 5 vuoden ajan. Siirtymä-aika kuvaajasta voidaan todeta, että siirtymiä syntyy kohteessa todennäköisesti jatkossakin noin 3 mm/vuodessa. Siirtymät ovat suurimmat putken yläpäässä ja todennäköisesti suurin osa siirtymistä johtuu painumista. Siirtymien muoto on viuhkamainen ja liukupinnan kohdalla siirtymiä on noin 1 mm/vuodessa. Oletettu liukupinta myös kulkee leikkautuvan vyöhykkeen lävitse ja laskennan FOS on noin 1,4 oikealle.



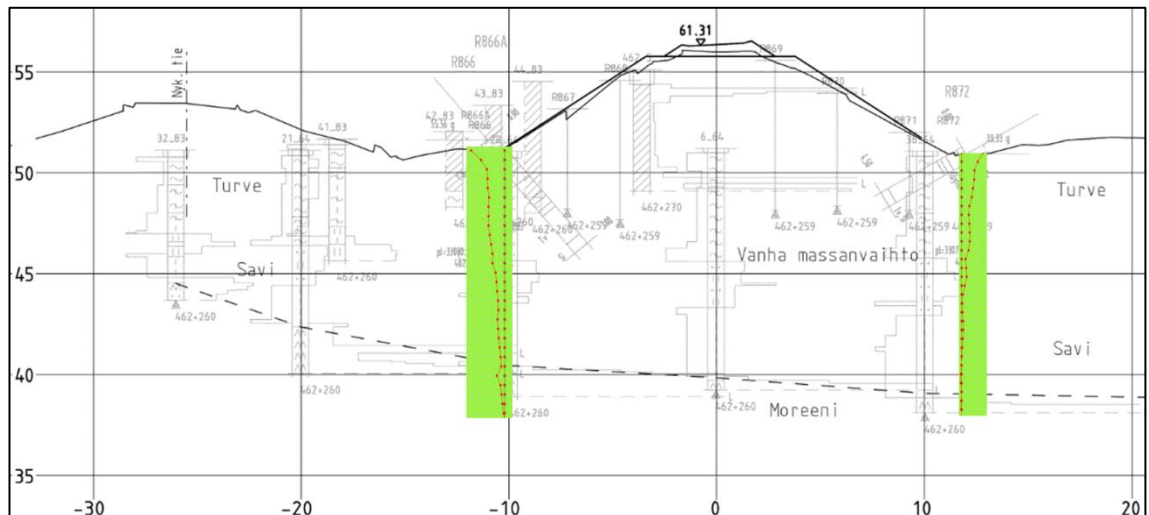
Kuva 5.89. Ylhäällä on poikkileikkaus, keskellä vakavuuslaskenta ja alhaalla siirtymä-aika kuvaaja. Siirtymiä nykyään noin 3 mm/vuodessa lähellä maanpintaa.

Kilometri 462+260 & 462+310 (Pehmeikkö 33):

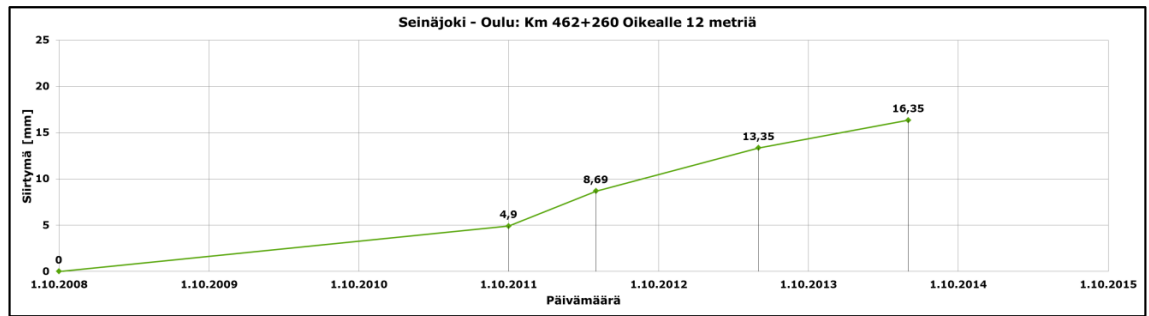
Kohteessa on noin 6 metriä korkea ratapenger turpeen päällä. Turvekerros on noin 3-5 metriä paksu ja tämän alla on 2-5 metrin savikerros. Kuvassa 5.90 on poikkileikkaus alueelta. Kohteessa ratapenkereen alle on tehty massanvaihto. Kuitenkin uusien pohjatutkimuksien perusteella massanvaihto olisi jäänyt hieman kapeaksi. Siirtymät todennäköisesti johtuvat penkereen lakoamisesta turpeeseen.

Kuvissa 5.91 ja 5.92 on putkien siirtymä-aika kuvaajat. Siirtymiä oikealle km 462+260 kohdalla on noin 14 mm ja vasemmalle km 462+310 kohdalla noin 20 mm. Siirtymänopeus oikealle ja vasemmalle on noin 3 mm/vuodessa. Putken profiilissa on kuitenkin merkittävää virhettä. Tämä näkyy muun muassa 2014 vuoden mittauksissa, jossa putken yläpäässä on tarkistussummassa noin 90 yksikön verran eroa. Tästä syntyy putkeen noin 10 mm epätodellinen taipuma penkereeseen päin. Siirtymää voidaan kuitenkin suhteuttaa muun putken siirtymän avulla.

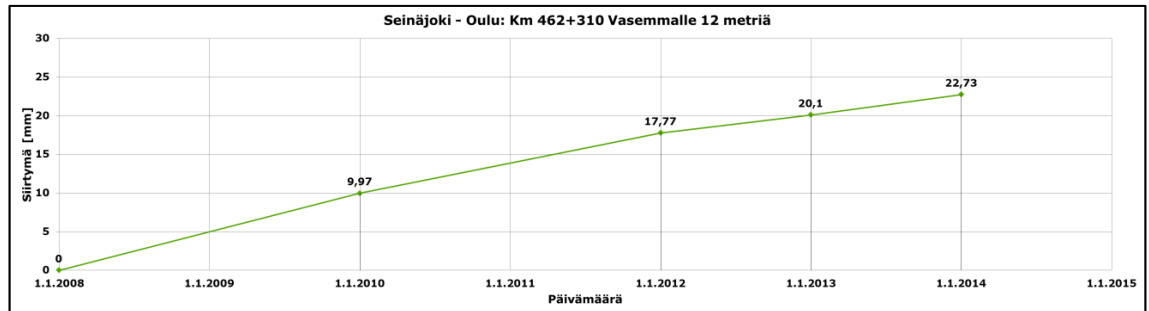
Kohteesta on tehty stabiiliteetilaskenta ilman oletettua massanvaihtoa. Laskettu vakavuus vasemmalle 1,3 ja oikealle on noin 1,4. Laskentaa voisi tarkentaa lisäämällä oletetun massanvaihdon ja tarkentamalla maaparametritietoja. Kohdan poikkileikkauksissa ei ollut käytettävissä siipikairauksia ja turpeen vesipitoisuus vaihteli 100 ja 900 %:n välillä. Leikkautuvalla vyöhykkeellä (noin 6 metrin syvyydellä) oikealle on kuitenkin siirtymiä ollut muutamia millijä. Vastaavasti vasemmalle myös samalla syvyydellä on ollut pientä liikettä, kuitenkin viime mittauksissa siirtymä on tällä syvyydellä lähes pysähtynyt.



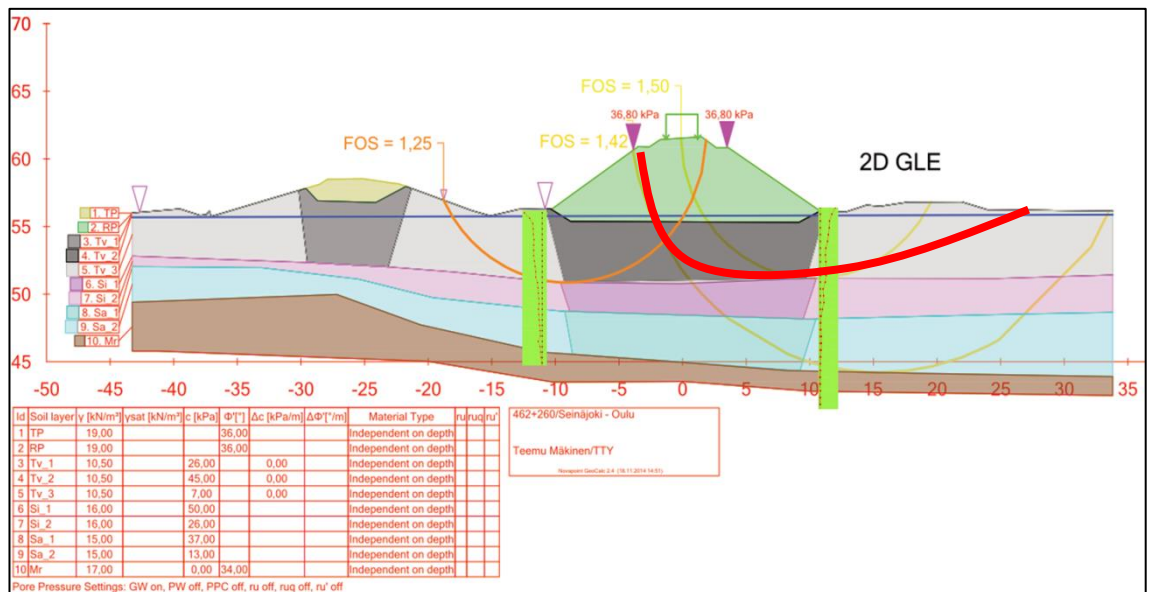
Kuva 5.90. Poikkileikkaus kohteesta ja molempien putkien siirtymät



Kuva 5.91. Siirtymä aika kuvaaja oikealle. Siirtymiä on noin 3 mm/vuodessa.



Kuva 5.92. Siirtymä-aika kuvaaja vasemmalle. Siirtymiä on vasemmalle noin 3 mm/vuodessa lähellä maan pintaa.



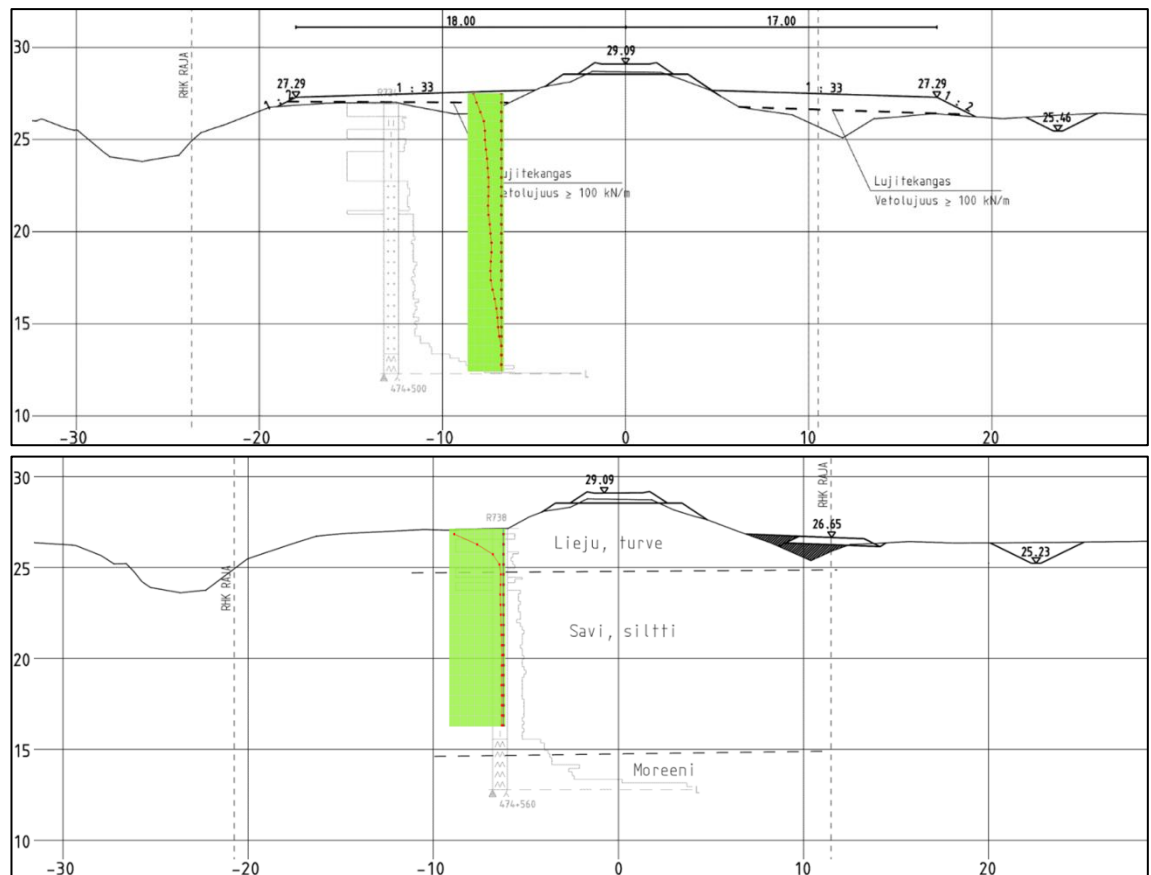
Kuva 5.93. Havainnollistava GeoCalc -laskenta ilman suunniteltua massanvaihtoa, jossa FOS on vasemmalle noin 1,3 ja oikealle noin 1,4. Siirtymä laskettujen liukupintojen kohdilla on ollut vähäistä. Kuvaan on myös lisäksi piirretty arvioitu liukupinta oikealle.

Kilometri 474+500 & 474+560 (Pehmeikkö 38):

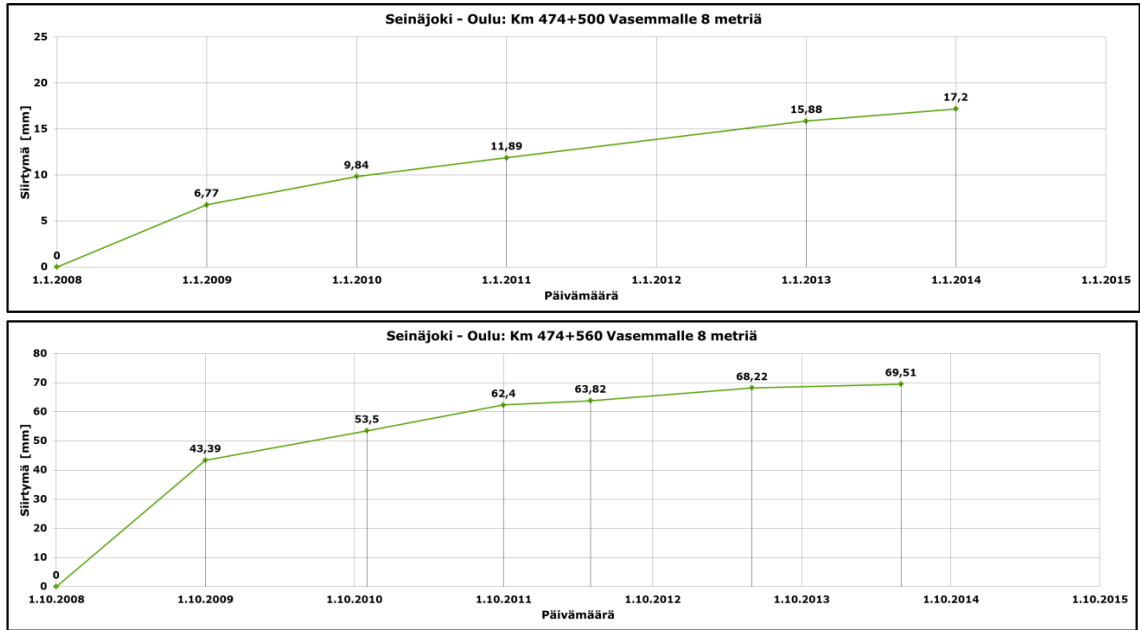
Kohteessa on noin 2-3 metriä korkea ratapenger rakennettu liejuisen saven varaan. Kilometrin 474+500 kohdalla molemmin puolin rataa on vastapenkereitä kunnostettu ja asennettu lujitekankaat. Kilometrin 474+560 kohdalla oikealla puolella rataa kulkee huoltotie ja ojan kohtaa on siirretty pois päin radasta noin 10 metriä kuvan 5.94 mukaisesti. Liejukerroksen alapuolella on noin 10 metriä paksu savi- ja silttikerros.

Molemmat putket ovat radan vasemmalla puolella. Siirtymiä radasta pois päin km 474+500 kohdalla on yhteensä noin 16 mm ja km 474+560 kohdalla 68 mm aivan maan pinnalla. Siirtymä-aika kuvaajat on esitetty kuvassa 5.95. Siirtymiä km 474+500 kohdalla on odotettavissa jatkossa noin 2 mm/vuodessa ja km 474+560 kohdalla noin 3 mm/vuodessa.

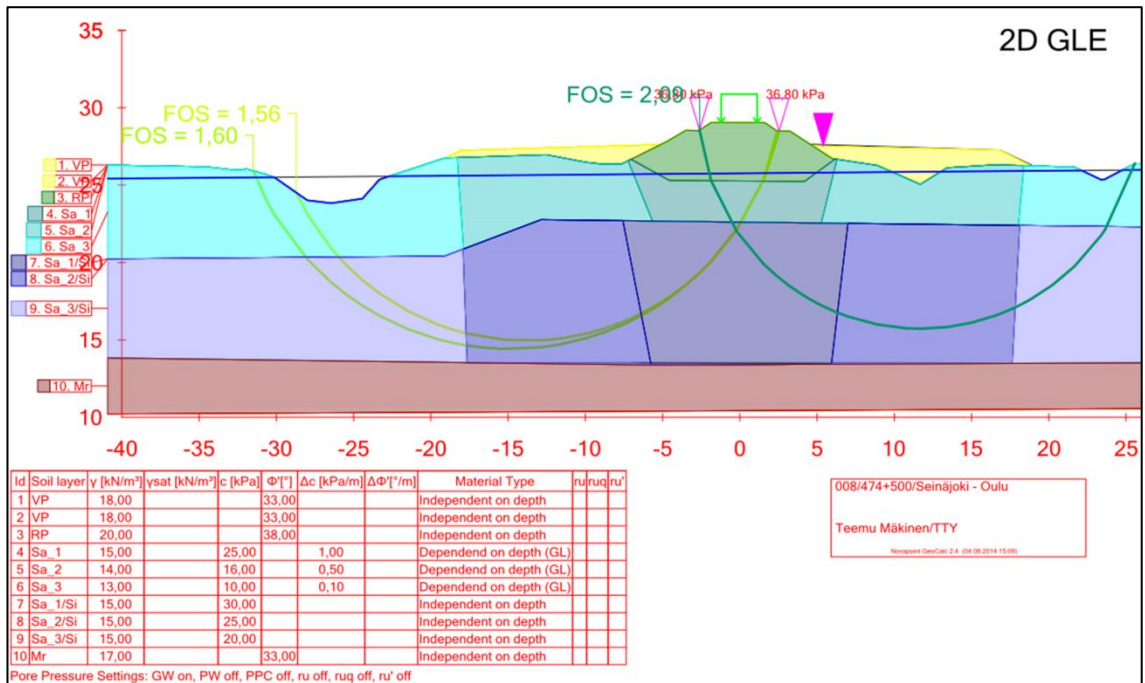
Kohdan 474+500 siirtymät ovat kohtuullisen pieniä ja lähes koko pehmeikön matkalla, kun taas kilometrin 474+560 kohdalla siirtymät ovat pääosin liejukerroksessa ja indikoi enemmänkin hidasta pengermateriaalin lakoamista. Kilometrin 474+500 kohdan siirtymät vastaavasti ovat osittain vastapenkereen painumasta johtuvia. Kohdalta on vielä laskettu stabiliteettilaskenta kuvassa 5.96. Vakavuuslaskentaan ei kuitenkaan ollut käytettävissä edes siipikairauksia.



Kuva 5.94. Poikkileikkaukset kilometrien 474+500 kohdalta yläpuolella ja 474+560 kohdalta alapuolella (Geo-piirustukset)



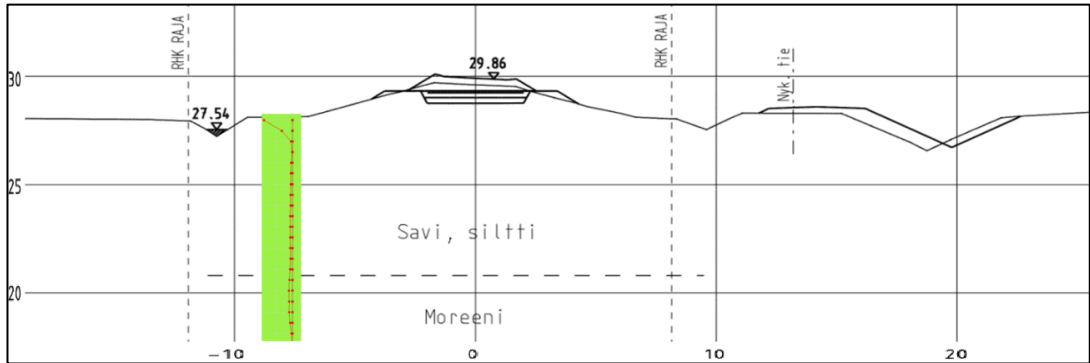
Kuva 5.95. Kohteen siirtymä-aika kuvaajat. Siirtymää putkien yläpäässä kilometrin 474+500 kohdalla 2 mm/vuodessa ja kilometrin 474+560 kohdalla 3 mm/vuodessa.



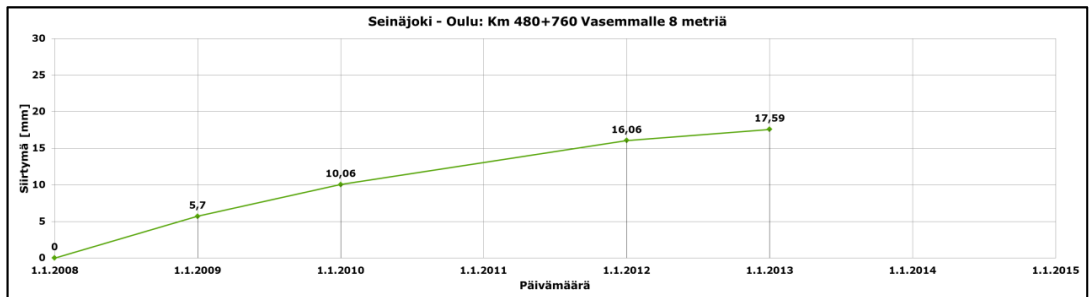
Kuva 5.96. Havainnollistava GeoCalc –laskelma kilometrin 474+500 kohdalta. Laskelman FOS vasemmalle on noin 1,5 ja oikealle 2. Kuitenkin lähtötiedot kohteesta ovat puutteelliset.

Kilometri 480+760 (Pehmeikkö 47):

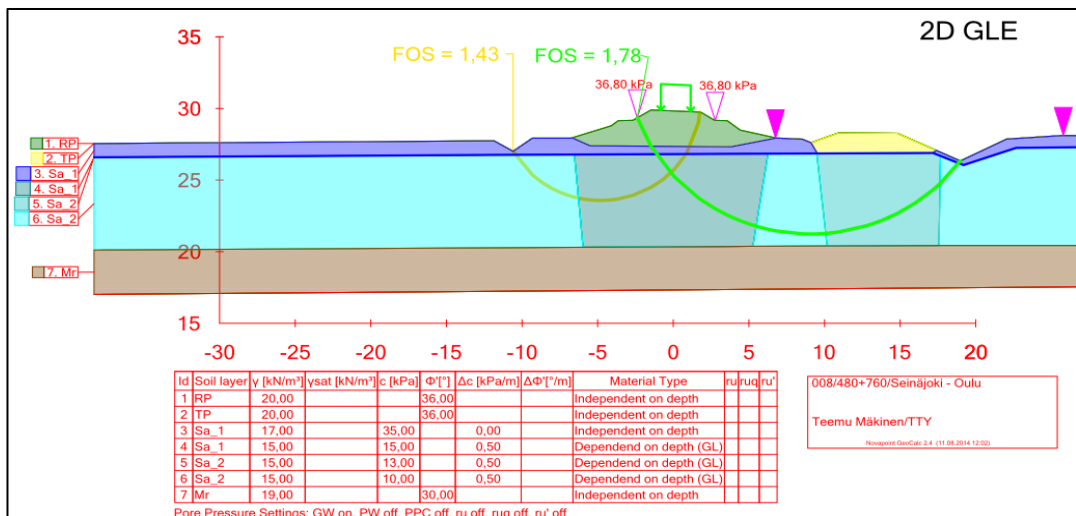
Kohteessa on noin 2 metriä korkea ratapenger savikolla. Savi ja silttikerroksen paksuus on noin 8 metriä kuvan 5.97 mukaisesti. Ratapenger on hieman painunut ohueen kuiva-kuorikerrokseen. Putki sijaitsee 8 metriä vasemmalla keskilinjasta. Siirtymiä kohteessa on noin 18 mm viiden vuoden mittauksen ajalta. Siirtymien kehittymisestä on kuva 5.98 ja siirtymiä on odotettavissa noin 1-2 mm/vuodessa. Siirtymät ovat pääosin lähellä maanpintaa. Kohteesta on karkea stabiiliteettilaskenta kuvassa 5.99, jossa FOS vasemmalle on noin 1,4.



Kuva 5.97. Poikkileikkaus ja putken profiili kohteesta (Geo-piirustukset)



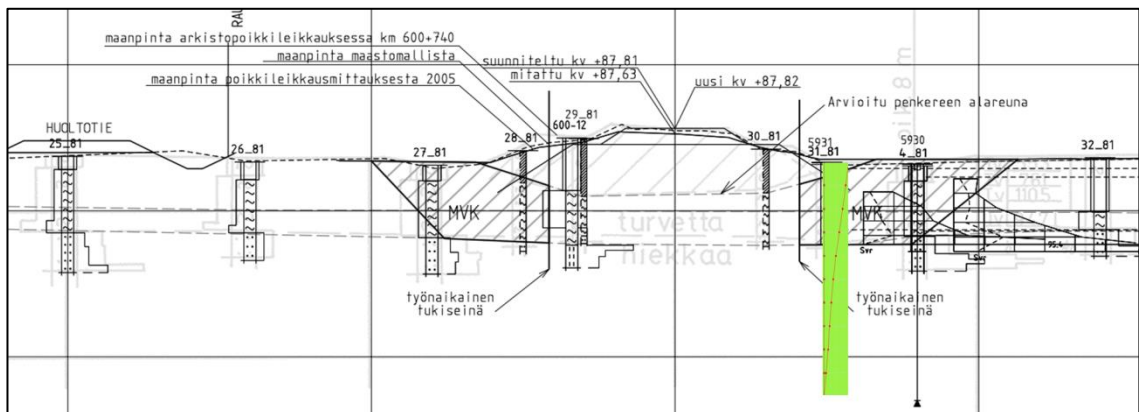
Kuva 5.98. Siirtymä-aika kuvaaja. Siirtymää nykyisin noin 1 mm/vuodessa.



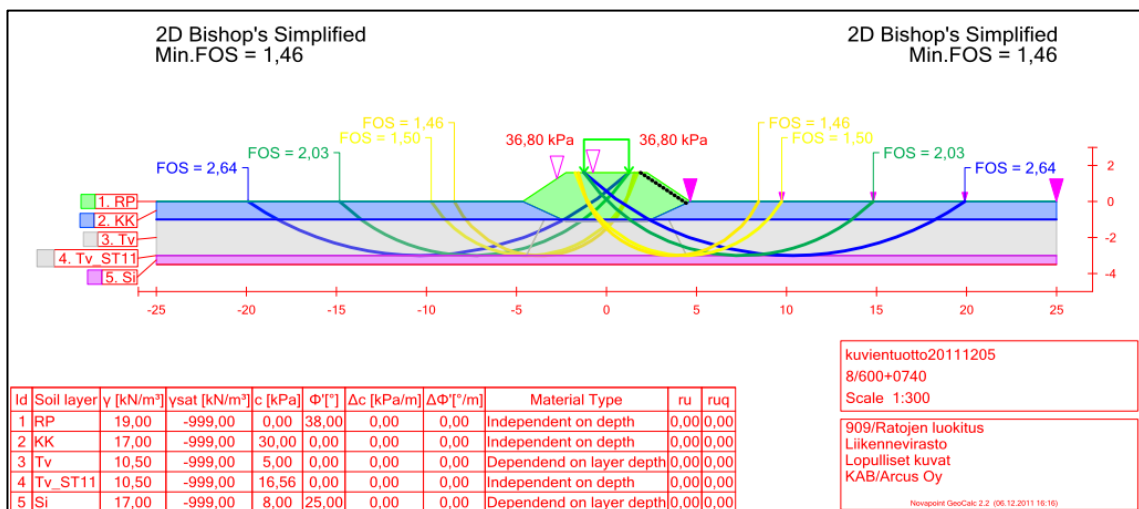
Kuva 5.99. Havainnollistava GeoCalc –laskenta, jossa FOS on vasemmalle 1,4 ja oikealle 1,8. Lähtötiedot kohteesta ovat kuitenkin vähäiset.

Kilometri 600+740 (Pehmeikkö 112):

Kohteessa on noin 1,5 metriä korkea ratapenger turpeen päällä. Turvekerroksen paksuus kohdalla on noin 1-3 metriä ja tämän alla hiekkaa. Ratapenger on osittain uponnut turpeeseen. Putki on noin 4 metriä oikealla puolella raidetta. Siirtymiä kohteessa on noin 20 mm, mutta putkea ei ole asennettu tarpeeksi syvälle kovaan pohjaan, joten tulokset eivät ole todenmukaisia. Kohteessa on myös tiedossa ainakin uuden raiteen rakentaminen. Huoltotie kulkee vasemmalla kuvan 5.100 mukaisesti. Putken muoto on viuhka-mainen ja vapaana alhaalta. Putki siirtyy mittausten perusteella noin 4 mm/vuodessa. Kuvassa 5.101 on havainnollistava rakennustoimia edeltävä vakavuuslaskenta.



Kuva 5.100. Poikkileikkaus ja putken taipumaprofiili (Geo-piirustukset)



Kuva 5.101. Havainnollistava GeoCalc –laskenta, jossa FOS on vasemmalle noin 1,5 ja oikealle noin 1,5 (RATUS)

5.3.6 Tutkimuskohteet 4: Muut

Orivesi – Haapamäki:

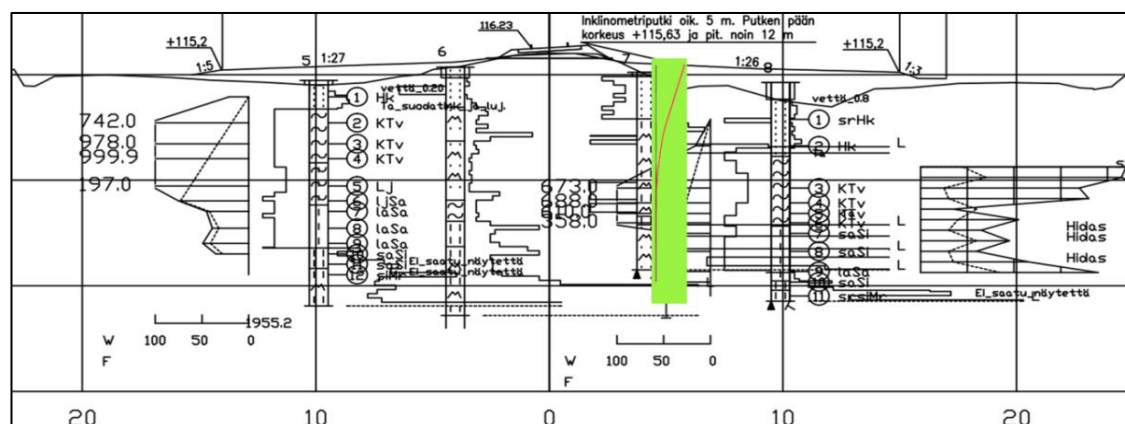
Kilometri 267+050 & 267+070 (Koivionsuo, Pehmeikkö 19):

Kohteessa on noin 1,5-3 metriä korkea ratapenger. Ratapenger on poikkileikkauksen mukaan rakennettu turpeen varaan, mutta kuitenkin pengermateriaalia on sekoittunut alapuolisiin kerroksiin poikkileikkauksen 5.102 mukaisesti. Turpeen alla on vielä lisäksi savea ja silttiä. Penger on myös uponnut turpeeseen noin 1-4 metriä ja vanhojen vastapenkereiden hiekkaa on kohteen reunoilla noin 1-2 metrin paksuudelta.

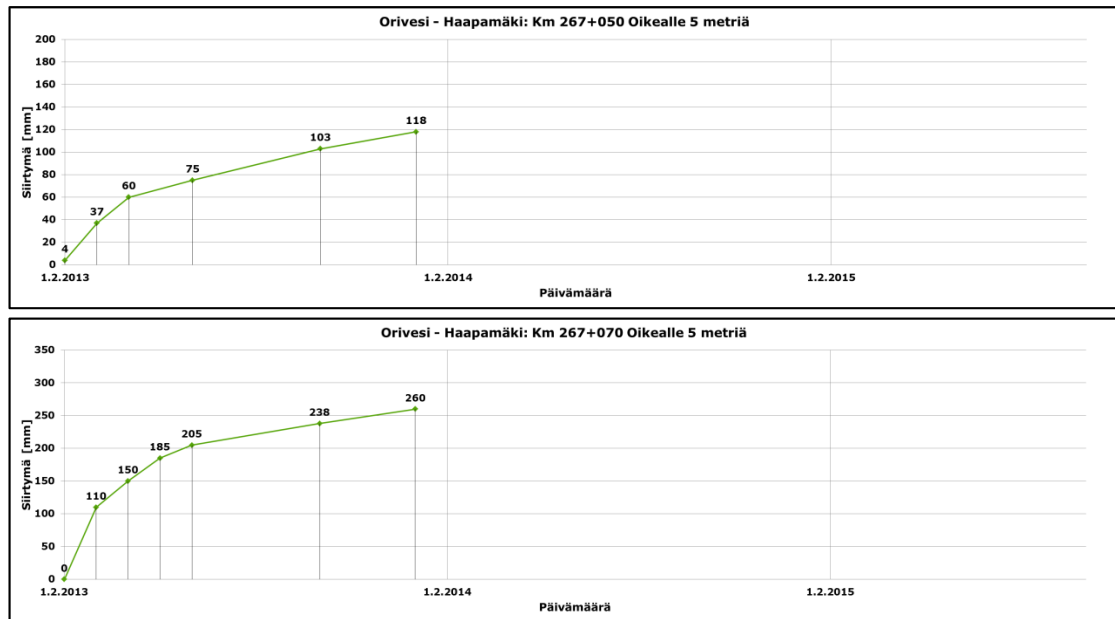
Turpeen vesipitoisuus penkereen juuren alla vasemmalla on noin 900 % ja oikealla noin 700 % poikkileikkauksen mukaan. Vanhojen uponneiden vastapenkereiden päälle on vuonna 2013 rakennettu uudet vastapenkereet. Putket ovat oikean puoleisen vastapenkereen kohdalla. Koska vanhat vastapenkereet ovat uponneet turpeeseen lähes täysin, on todennäköistä, että uudetkin vastapenkereet painuvat turpeeseen ainakin osittain. Tämä voidaan jo nykyisillä mittauksilla havaita inklinometrimittauksista suurena viuhkamaisena siirtymänä, joka johtuu vastapenkereiden nopeasta painumasta.

Kuvassa 5.104 on ensimmäisten kuukausien mittaukset heti rakentamisen jälkeen. Alun nopea kiihtyvä siirtyminen on linjassa Tampere - Seinäjoki km 320 rataosuuden Plaxis -simuloinnin kanssa. Siirtymä oli kiihtyvää heti simuloidun rakentamisen loputtua. Rakentamisen jälkeen siirtymänopeus on tasoittunut. Siirtymä-aika kuvaajat muistuttavat km 320 kaltaisia turpeella olevia vastapengerkohteita. Siirtymänopeus lähellä maanpintaa on kilometrin 276+070 kohdalla nykyäänkin vielä noin 100 mm/vuodessa ja kilometrin 267+050 kohdalla noin 80 mm/vuodessa.

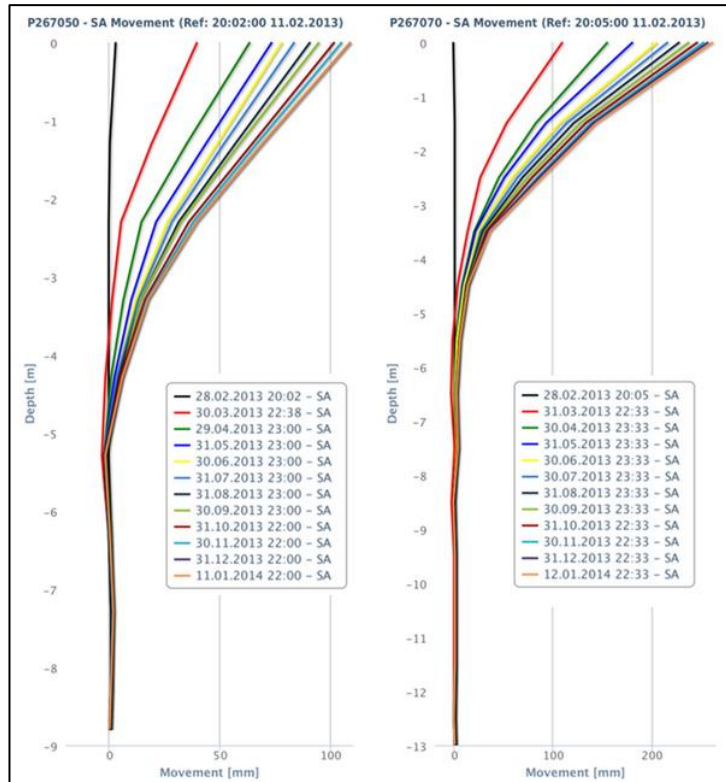
Stabiliteetilaskentojen avulla FOS ja Msf on noin 1,4 oikealle. Plaxis laskentaan maakerroksia on yritetty hieman tarkentaa. Lähtötiedoissa on epävarmuutta, koska ratapenkereen alla on paljon sekoittunutta pengermateriaalia sekä turvetta. Kohteessa vakavuus kuitenkin paranee hieman vastapenkereiden asettuessa ja lujittaessa turvetta. Tällöin mahdollisesti ongelmaksi muodostuukin kohteessa kunnossapidon tarve aikaisempien turvekohteiden tapaan.



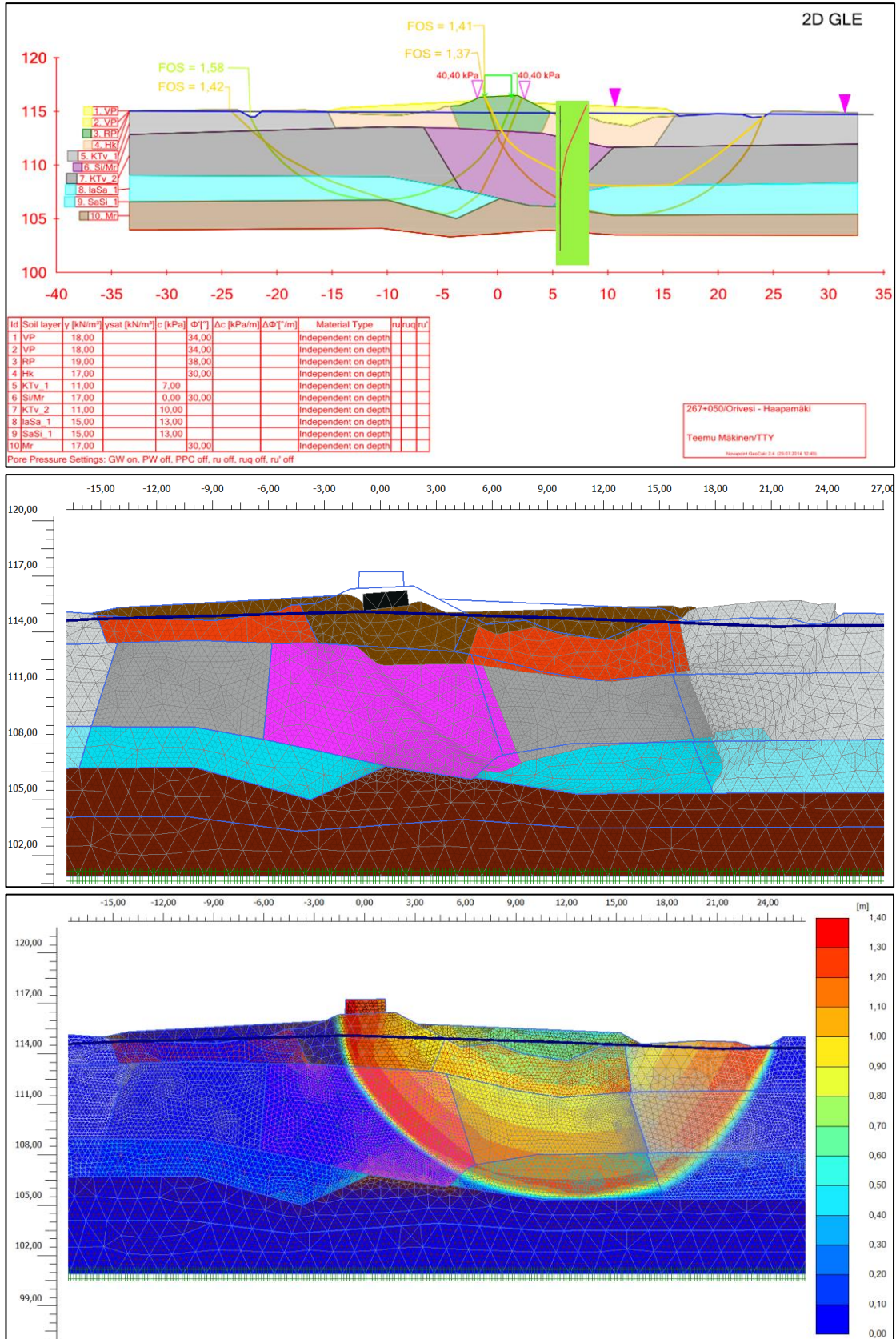
Kuva 5.102. Poikkileikkaus ja havainnollistava taipumaprofiili kohteesta (Geopiirustukset)



Kuva 5.013. Siirtymä-aika kuvaajat kohteesta. Siirtymät jatkuvat tasaisena noin 80-100 mm/vuodessa. Kyseessä on vielä vastapenkereiden asettumista. On mahdollista, että kilometrin 267+070 kohdalla vakavuus on hieman heikompi, koska vastapenkereestä johtuvia siirtymiä on kertynyt paljon enemmän samassa ajassa. Teoriaa tämän pohjalle on esitetty aiemmin kappaleessa 4.3. Painumatietoja ei kuitenkaan kohdalta ole käytettävissä, josta voisi tarkempaa vertailua suorittaa.



Kuva 5.104. Automaatti-inklinometrien siirtymät kohteesta. Siirtymänopeus vielä vuosi rakentamisen jälkeen 267+050 kohdalla on noin 80 mm/vuodessa ja 267+070 kohdalla 100 mm/vuodessa. (Seurantakortit)

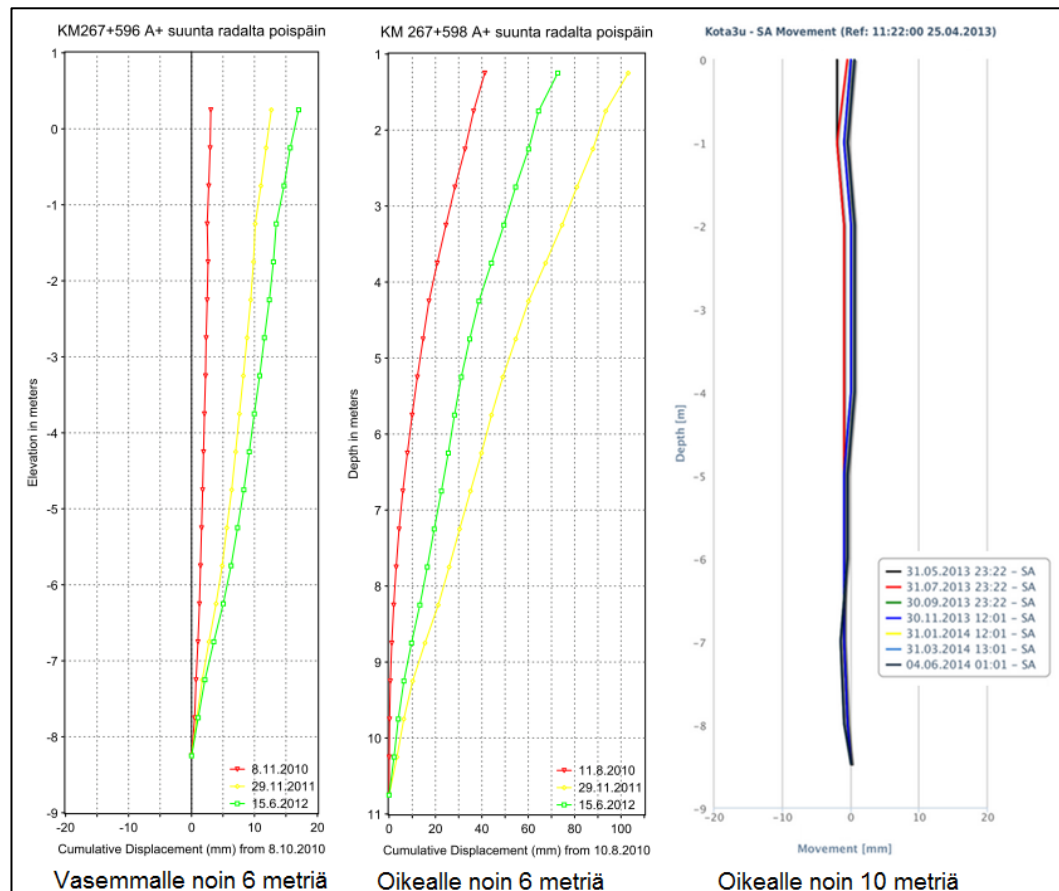


Kuva 5.105. Ylhäällä havainnollistava GeoCalc –laskenta kohteesta, jossa FOS on oi-kealle noin 1,4. Keskellä on Plaxis –laskennan liukupinta sortuma ja alhaalla liukupin- nan muoto. Tässä laskelmassa Msf on vastaavasti noin 1,4, kuitenkin hieman paranne- tuilla parametreilla ja geometrialla laskettuna.

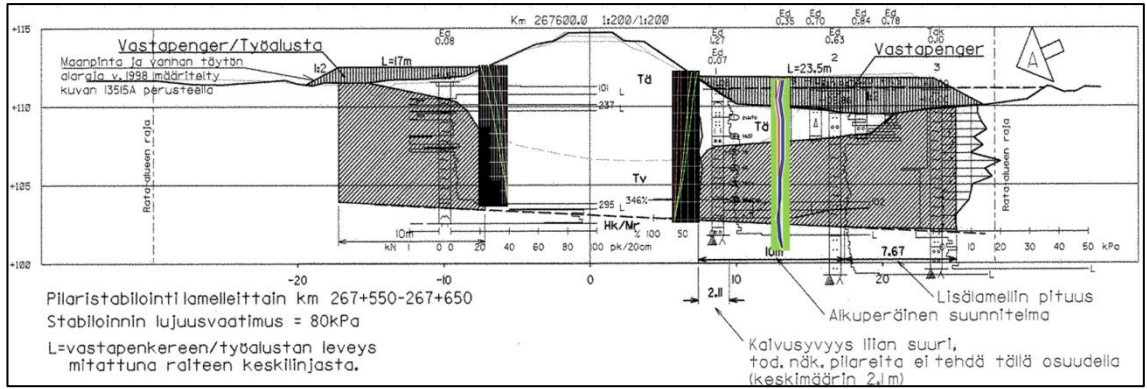
Kouvola – Pieksämäki:**Kilometri 267+596 (Kotakorpi, Pehmeikkö 13):**

Kohteessa on noin 2-5 metriä korkea ratapenger. Täyttömateriaalia on kuitenkin painunut ja levinnyt alapuoliseen turpeeseen noin 2-3 metriä. Turvekerroksen paksuus penkereen alla ja reunoilla vaihtelee kolmen ja kuuden metrin välillä. Turpeen alla on moreenia. Penkereen reunoilla on suoritettu pilaristabilointia sekä kohteen molemmin puolin on rakennettu vastapenkereet vuonna 2004 stabiloinnin päälle. Penkereen alla ei stabilointia ole suoritettu. Kohteesta on kuva 5.107 automaatti-inklinometrinen asennuspöytäkirjasta sekä kuvan yläpuolella on poikkileikkaus kohteesta. Kuvasta voidaan havaita, että vastapenkereet ovat hieman painuneet turpeeseen.

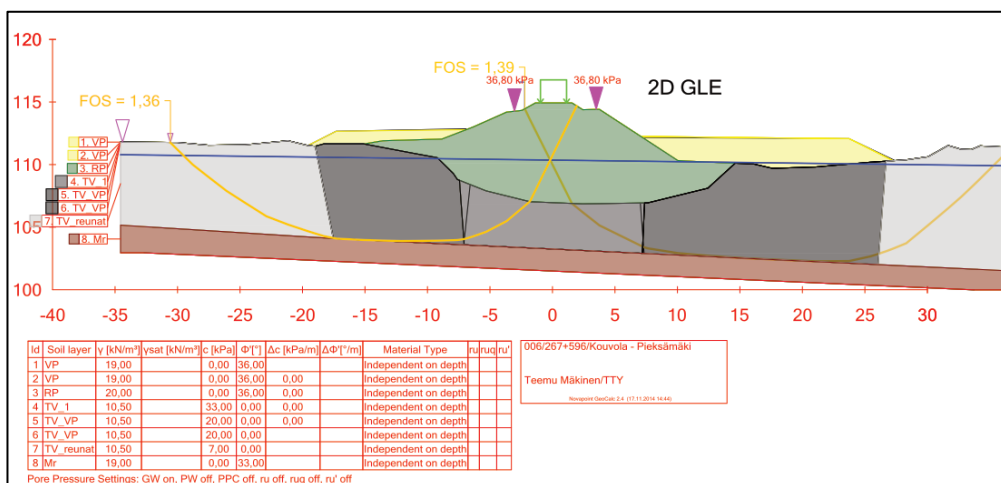
Vanhoissa putkissa kuvan 5.106 mukaan on ollut siirtymiä ennen vuotta 2012. Tulosten oikeellisuutta ei pystytä selvittämään lähtötietojen puuttuessa, mutta putkia ei selkeästikään ole asennettu tarpeeksi syväälle kovaan pohjaan. Putkissa voi myös olla virhettä muistakin syistä. Mitattuja siirtymiä on ollut noin 10 mm/vuodessa vasemmalle ja noin 30 mm/vuodessa oikealle. Uudessa automaatti-inklinometrissa siirtymiä on vain epämääräisesti noin 5 mm/vuodessa. Tämän automaatti-inklinometrinen siirtymät ovat kuitenkin vain vuoden ajalta. Todennäköisesti kuitenkin siirtymät ovat hiipuneet vastapenkereiden asettuessa. (Seurantakortit)



Kuva 5.106. Vasemmalla ja keskellä on vanhat kohteessa suoritettut manuaaliset mittaukset, näiden tulosten luotettavuus on kehno. Oikealla on puolestaan uuden automaatti-inklinometrinen mittaukset, jossa ei ole rekisteröity merkittäviä siirtymiä. (Seurantakortit)



Kuva 5.107. Ylhäällä poikkileikkaus, sekä vanhat inklinometrimitaukset. Uusi putki on oikealla, jossa ei ole merkittäviä siirtymiä. Alhaalla on valokuva kohteesta (Asennuspöytäkirja).



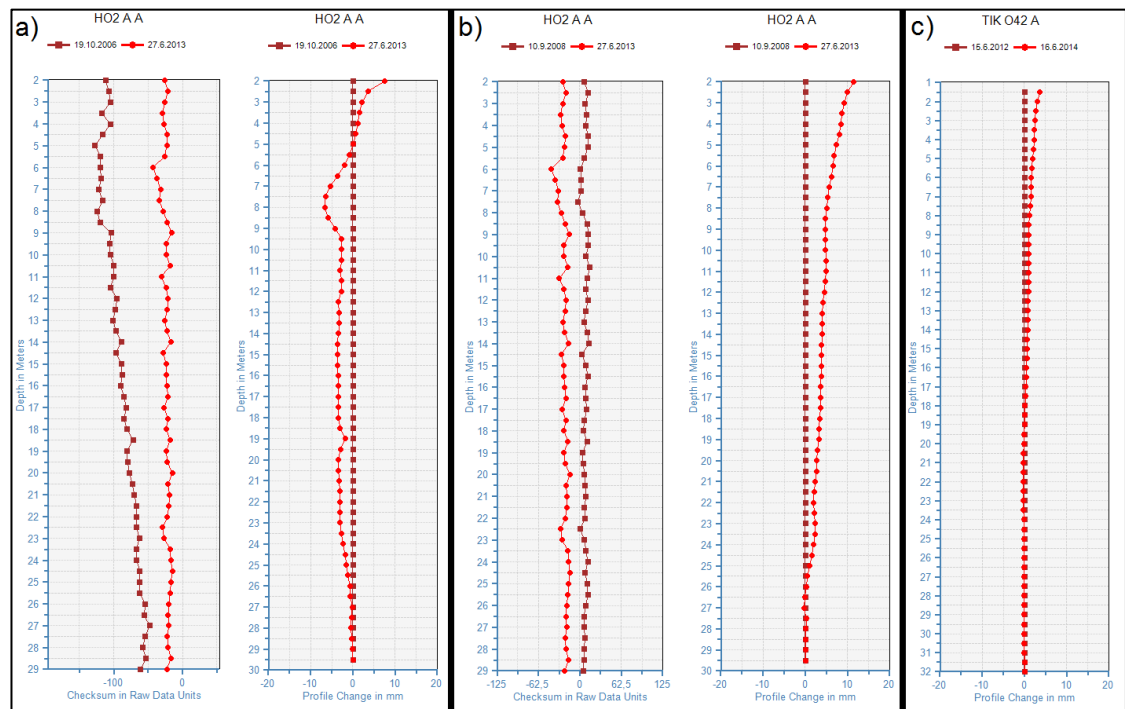
Kuva 5.108. Havainnollistava GeoCalc –laskenta ilman suunnitelmassa esitettyjä stabilointeja. Kohteesta otetusta kuvasta huomataan, vastapenkereet ovat osittain painuneet turpeeseen ja laskennan geometria ei tällöin vastaa todellisuutta. Laskennan FOS vastapenkereillä on noin 1,4 ilman arvioitua tukistabilointia.

Riihimäki – Lahti:**Kilometri 122+592 (Tikkakallio):**

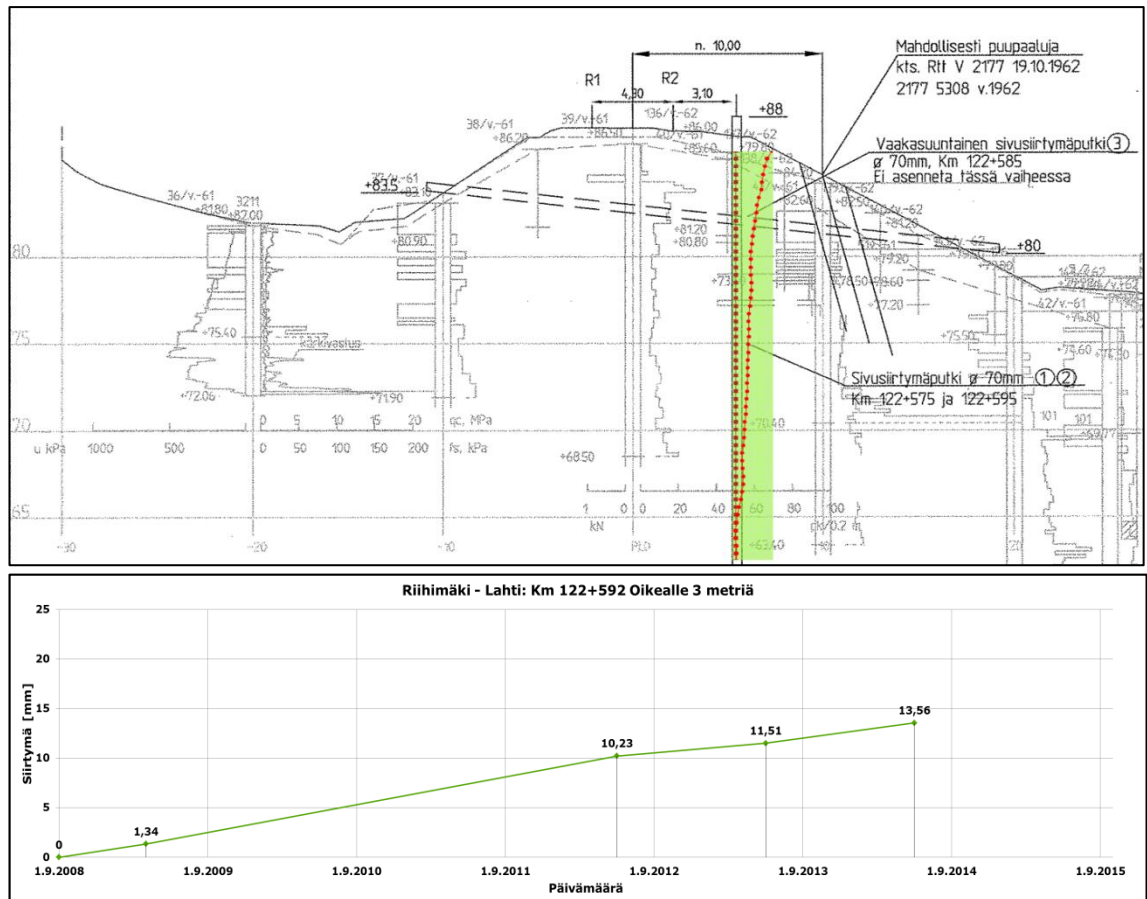
Kohteessa on korkea ratapenger savikolla. Penkereen korkeus on noin 5-7 metriä. Penkereen alla on ohut kuivakuorikerros ja tämän alla on noin 4 - 10 metriä savea ja savista silttiä. Pohjamaa on kalteva ja viettää oikealle päin. Savikerrosten paksuus on myös suurempi oikealla puolella johon geometria viettää vahvasti.

Kohteessa on suoritettu 0-mittaus vuonna 2006. Mittaus on kuitenkin suoritettu sen aikaisella kalustolla ja on mahdollista, että mittausprosessissa on erinäisistä syistä virhettä. Virheellisyyttä näkyy myös myöhemmin 2007 ja 2008 vuonna mitatuissa datoissa. Kuitenkin 2008 vuonna on suoritettu myös onnistunut mittaus, johon vanhan putken tietoja voidaan vertailla. Myöhemmin kohteeseen on myös asennettu uusi inklinometriputki vuonna 2012 vanhojen epäloogisten tulosten johdosta. Vanhan putken mittaamista olisi kuitenkin voitu jatkaa hyödyntäen esimerkiksi vuoden 2008 referenssiä. Kohteessa on myös asennettuna kaksi automaatti-inklinometriä.

Siirtymiä vanhan putken yläpäässä on noin 10 mm ja siirtymiä on kertynyt noin 2-3 mm/vuodessa. Uudessa putkessa siirtymiä kahden vuoden ajalta on noin 4 mm ja siirtymänopeus noin 1-2 mm/vuodessa. Kohteesta on esitetty mitattu data kuvassa 5.109 ja poikkileikkaus sekä siirtymä-aika kuvaaja kuvassa 5.110. Kohteessa on raportoitu tapahtuvan pieniä luiskasortumia ja riskinä mainittu rumpujen tukkeutuminen rankkasateista (Seurantakortit).

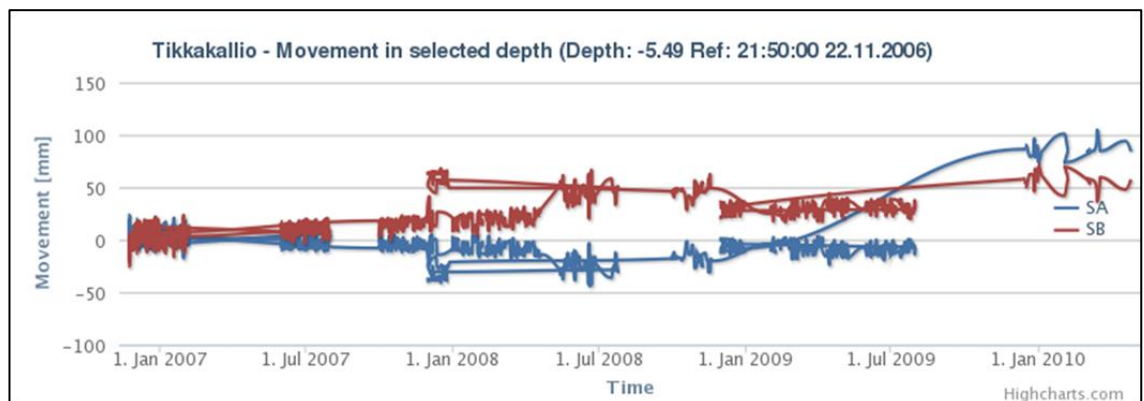


Kuva 5.109. Kohdassa (a) on virheellinen 0-mittaus vuodelta 2006. Kohdassa (b) on käyttökelpoinen referenssi mittaus vuodelta 2008 ja kohdassa (c) on uuden putken mitatut siirtymät.



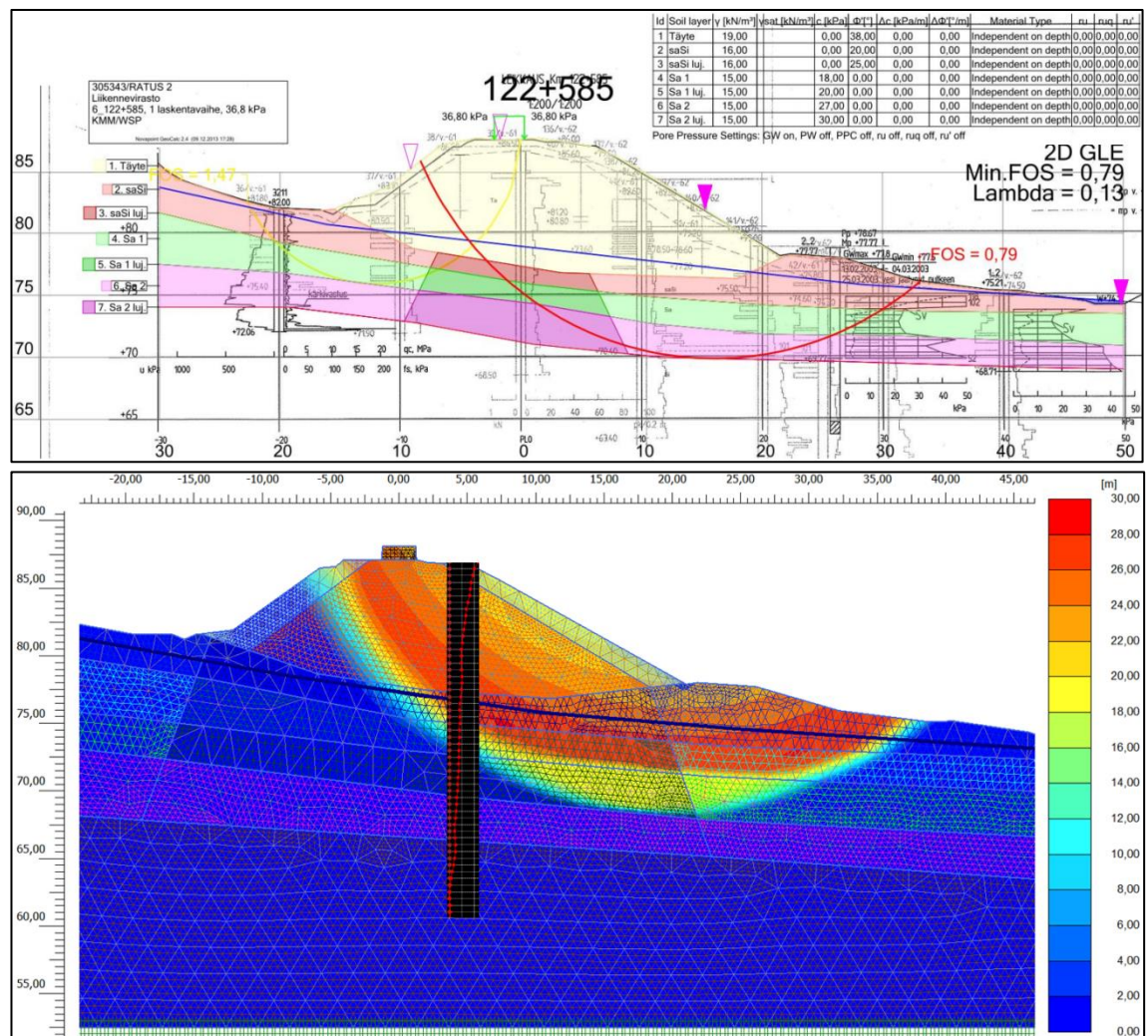
Kuva 5.110. Ylhäällä on poikkileikkaus kohteesta sekä siirtymäprofiili ja alhaalla siirtymä-aika kuvaaja. Siirtymiä nykyään noin 1-2 mm/vuodessa putken yläpäässä. Siirtymä-aika kuvaajaan on lisätty uuden putken yläpään siirtymät 2013 ja 2014 vuosilta.

Kohteeseen on myös asennettu automaatti-inklinometri vuonna 2006. Automaatti-inklinometrin luotettavuus on puutteellinen. Kuvassa 5.111 on esitetty automaatti-inklinometrin siirtymä-aika kuvaaja.



Kuva 5.111. Esitys kohteen vanhasta automaatti-inklinometrin siirtymä-aika kuvaajasta (Seurantakortit)

Kohteesta on stabiileettilaskenta kuvassa 5.112. Savi on kuitenkin arviolta siltistä tai hiekkapitoista. Ratkaisevaa onkin kohteessa tämän heikoimman kerroksen lujuusominaisuudet. Kuitenkin savi penkereen alla on todennäköisesti hyvin lujittunut pengerkuormasta. Heikoimmankin savikerroksen suljettu leikkauslujuus reunalla on noin 20 kPa siipikairausten perusteella. Tämän alla olevassa silttikerroksessa lujuus kuitenkin reuna-alueillakin on jo lähellä 40 kPa. Tosin siipikairaus ei ole luotettava leikkauslujuuden määrittäminen silttisessä tai hiekkaisessa materiaalissa. Näiden lähtötietojen avulla Plaxis laskennan Msf junakuormalla on noin 1,3 ja ilman junakuormaa noin 1,5. Plaxis laskennassa on käytetty eri arvoja kuin kuvan 5.112 GeoCalc laskennassa. Uudessa inklinometriputkessa ei ole siirtymiä oletetun liukupinnan kohdalla.

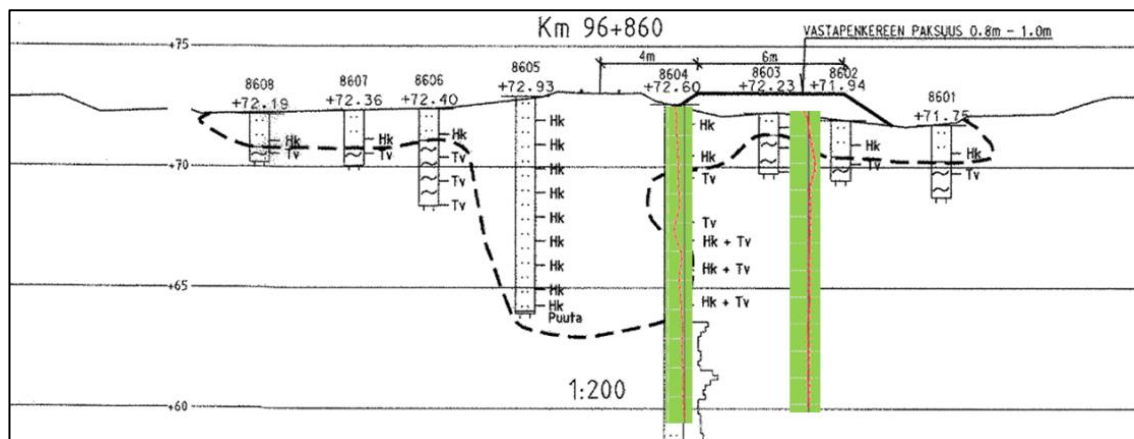


Kuva 5.112. Ylhäällä GeoCalc –laskenta kohteesta (RATUS) ja alhaalla Plaxis –laskenta. Ylemmässä FOS on oikealle noin 0,8 ja alhaalla Msf noin 1,3. Kohdalla savi tai siltinen savi kuitenkin on todennäköisesti hyvin lujittunut penkereen kuormituksesta.

Hyvinkää – Karjaa:

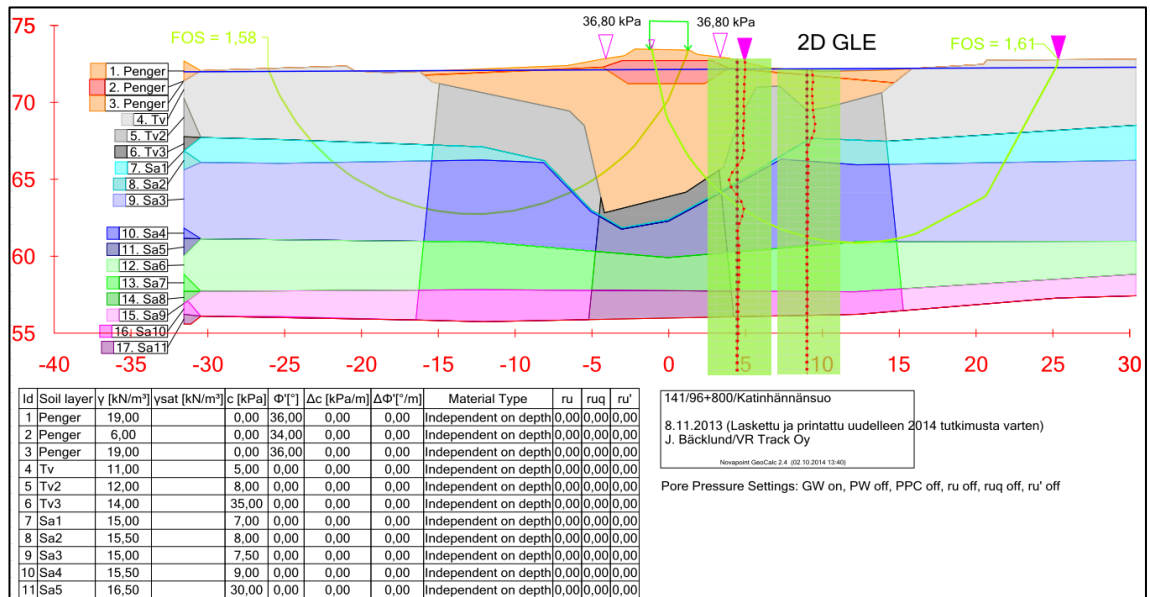
Kilometrit 96+860 & 96+862 (Katinhännänsuo):

Kohteessa on noin 0,5 – 1 metriä korkea ratapenger (ympäröivästä maanpinnasta tarkasteltuna). Penger materiaalia on painunut penkereen alle noin 9 – 10 metrin syvyydelle sekä reunoilla on vanhaa vastapenger materiaalia muutaman metrin verran. Kohteeseen on myös tehty kevennyskerros sekä uusi vastapenger oikealle. Kohteeseen on todennäköisesti rakennettu jonkinlainen hirsiarina aikoinaan, koska pohjatutkimuksissa on kairauksissa myös puuta. Poikkileikkauksessa on suunniteltu vastapenger oikealla, mutta kuten huomataan kuvasta 5.113, se on jo täysin painunut maanpinnan tasolle. Turvekerros kohteessa vaihtelee noin 2-4 metrin välillä ja turpeen alla on vielä savea. Kohteessa on myös merkittävä lammikko oikealla puolella (kuvassa 5.113 vasemmalla puolella, koska kuva on otettu Hyvinkään suuntaan).



Kuva 5.113. Ylhäällä on havainnollistava poikkileikkaus (Geo-piirustukset) ja alhaalla kuva kohteesta (Bäcklund). Alemmassa kuvassa vastapenkereet ovat selvästi painuneet ympäröivän maanpinnan tasolle.

Kohteessa on aiemmin raportoitu merkittäviä siirtymiä. Putket ovat kuitenkin tuhoutuneet ja kohteessa on kaksi uutta putkea kilometreillä 96+860 ja 96+862. Kohteen historian takia uudet putket on asennettu ja puolen vuoden mittauksen aikana kohteessa ei ole havaittavissa merkittäviä siirtymiä. Kohteesta on myös tehty stabiliteettilaskenta kuvassa 5.114. Kohteessa siirtymät ovat syntyneet todennäköisesti vastapenkereen ja penkereen asettumisesta sekä pengermateriaalin leviämisestä turpeeseen. (Seurantakortit)



Kuva 5.114. Havainnollistava GeoCalc –laskenta kohteesta (Bäcklund), jossa FOS vasemmalle on noin 1,6 ja oikealle putken suuntaan noin 1,6. Putkiprofiileja tarkasteltaessa voidaan huomata turvekerroksessa pientä liikehdintää. Liikehdintää on myös turpeen, hiekan ja saven rajapinnassa suoraan ratapenkereen alla. Aivan lasketun liukupinnan kohdalla on ollut viimemittausten välillä noin yhden millin siirtymä kahden kuukauden aikana, mutta tämä todennäköisesti johtuu materiaalin sekoittumisesta alhaalla penkereessä, koska toisessa putkessa ei ole vastaavaa liikettä ollut.

5.4 Yhteenveto ja ehdotus siirtymän raja-arvoista

Tässä tutkimuksessa sortumaan johtavien sivusiirtymien tulkinnassa parhaaksi työkaluksi osoittautui leikkausmuodonmuutoksien avulla suoritettava tulkinta. Tutkimuksessa on pyritty arvioimaan kullekin maalajityypille leikkausmuodonmuutoksen sietokyky ja sitä vastaavat vaakasiirtymät. Tarkasteluissa oletetaan, että inklinometriputket sijaitsevat leikkausvyöhykkeellä (DSS) tai sen läheisyydessä.

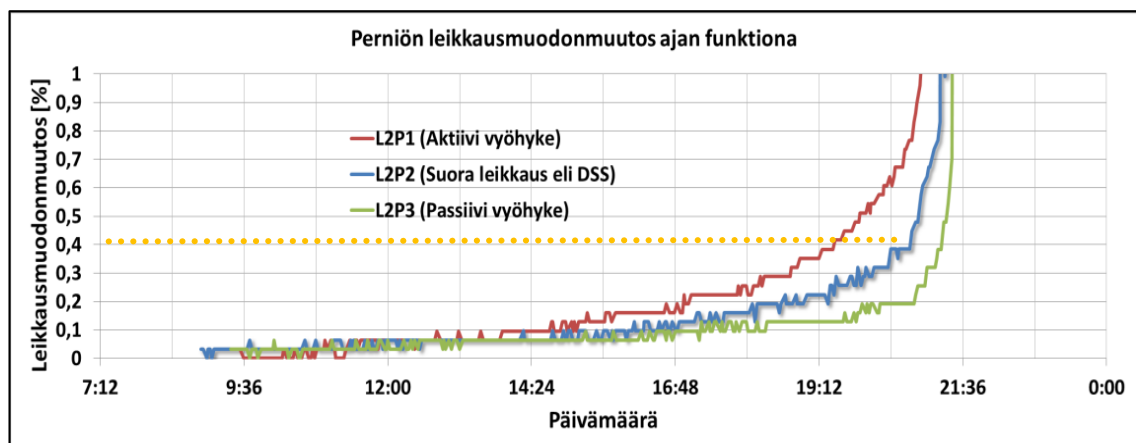
Leikkausmuodonmuutoksien ja siirtymien arvioinnissa on pääasiassa käytetty Perniön sorrutuskoetta, ratavälin Tampere – Kokemäki km 218+345 kohdetta sekä Rio de Janeirossa suoritettua penkereen sorrutuskoetta. Perniön sorrutuskokeessa saven on todettu olevan myötöpehmenevää ja sensitiivistä. Vastaavasti km 218+345 kohdalla voidaan todeta maalajin järven vierestä otetun näytteen mukaan sensitiivistä (noin $S_t=20-50$) ja mahdollisesti lihavaa savea. Toisaalta itse penkereen käyttäytyminen viittaisi osittain hieman myötölujittuvaan käyttäytymiseen ja silttisempään saveen. Inklinometriputki erkanee pohjasta pontituksen aloittamisen jälkeen, jolla on myös vaikutusta sen jälkeisiin siirtymämittauksiin.

Seuraavassa kaavassa 5.10 on esitetty leikkausmuodonmuutoksen laskeminen. Kuvassa 5.115 on esitetty Perniön leikkausmuodonmuutos ajan funktiona ja kuvassa 5.116 on esitetty vastaavasti km 218+345 kohdalta siirtymien kehittyminen. Erittäin lähellä sortumaa ollaan hetkellä, kun leikkausmuodonmuutos saavuttaa noin 2,7 % 20 päivän kohdalla siirtymien alkamisesta. Tällöin leikkausmuodonmuutoksen kasvu on ollut prosentin viiden päivän aikana. Kohteen geometriasta pääteltynä inklinometriputki ei ole ollut täysin suoran leikkauksen kohdalla vaan lähempänä ratapengertä.

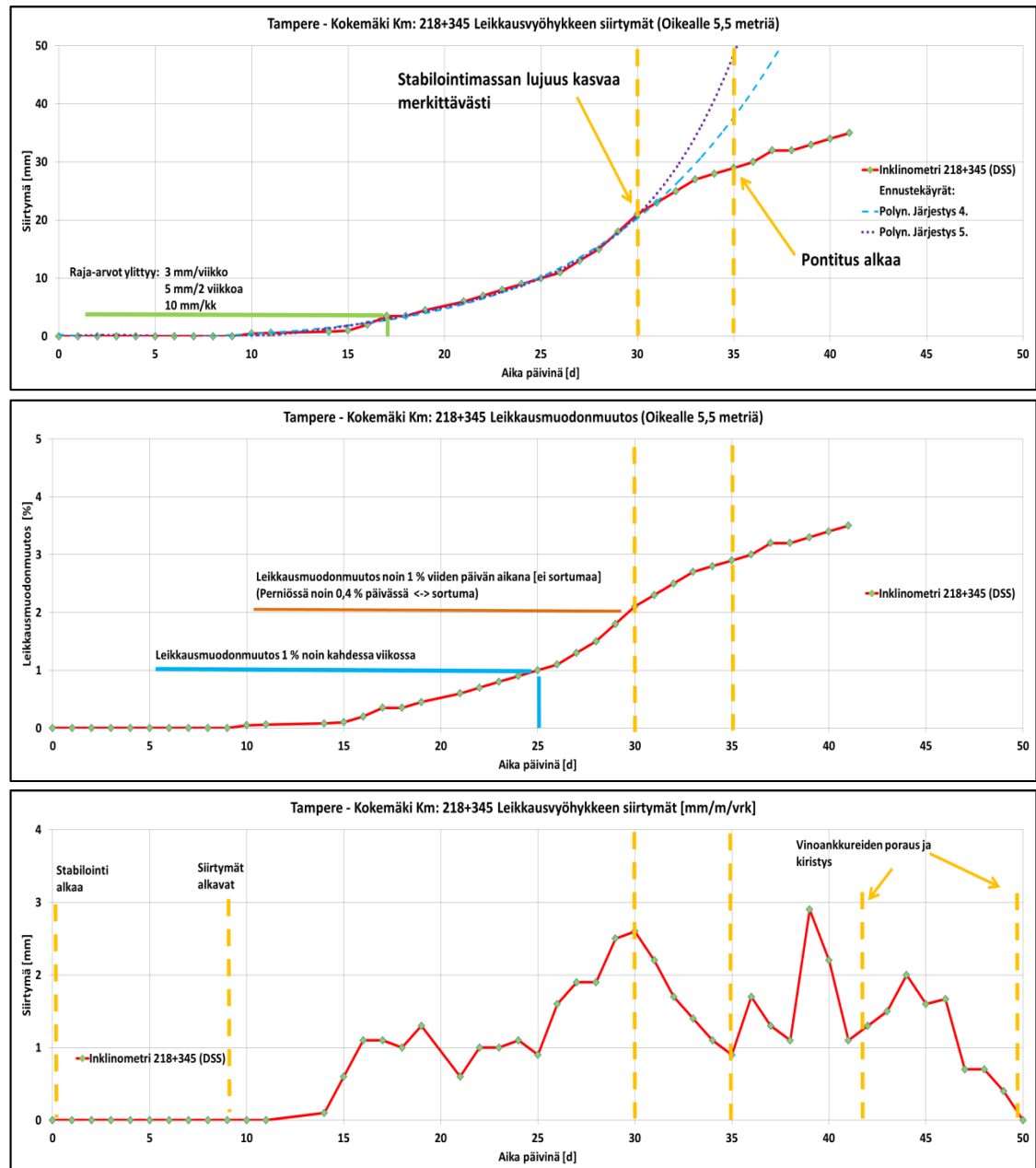
$$\gamma = \frac{\Delta d}{\Delta z} * 100\% \quad (5.10)$$

missä

- γ on leikkausmuodonmuutos [%]
- d on siirtymä [mm]
- z on siirtyvän vyöhykkeen korkeus [mm]

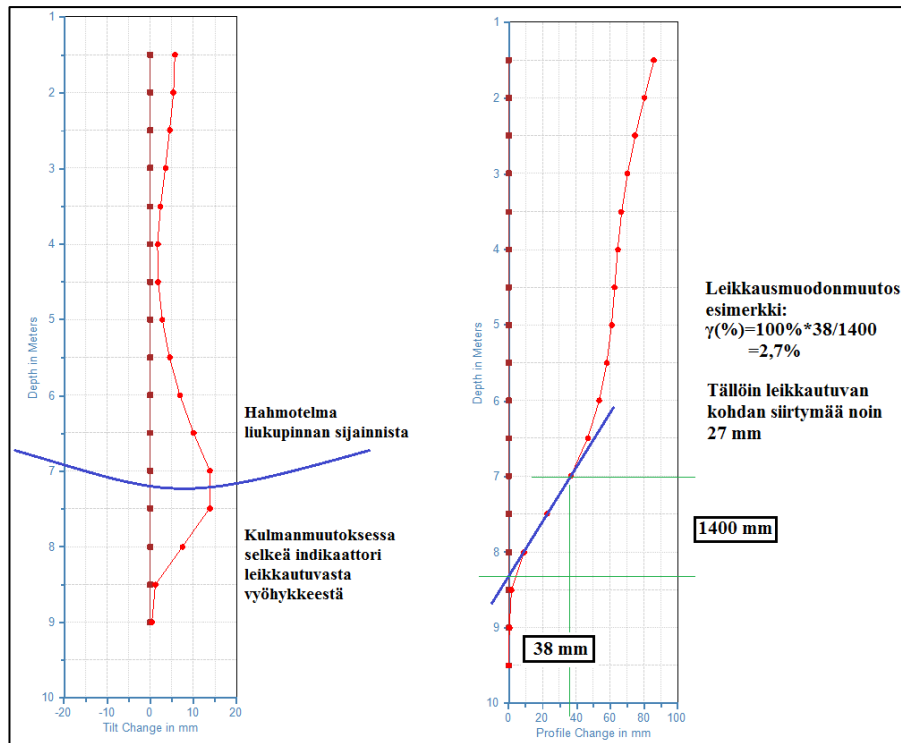


Kuva 5.115. Perniön leikkausmuodonmuutoksien kehitys päivän 21.10.2009 aikana

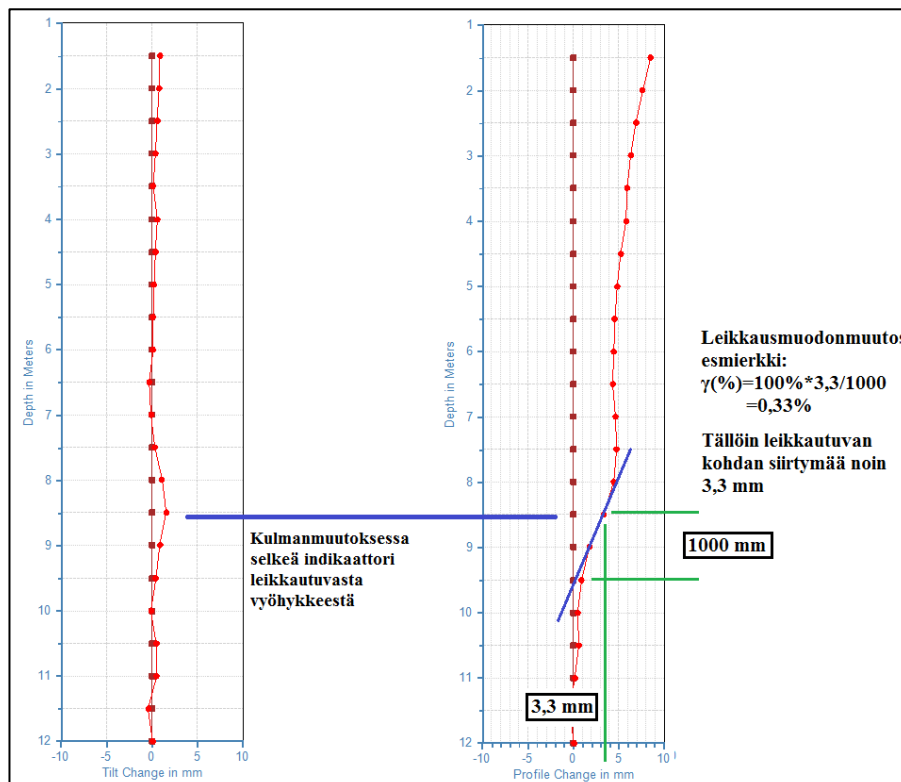


Kuva 5.116. Ylhäällä on rataosuuden Tampere – Kokemäki km 218+345 siirtymien kehittyminen ajan funktiona. Kuvassa on esitetty lisäksi taulukon 5.11 raja-arvojen ylityminen sekä ennustekäyrät siirtymistä ilman stabilointimassan lujuuden kehittymistä. Stabilointi on aloitettu nollakohdasta sekä siirtymät alkavat noin 10 päivän kohdalta. Keskellä on vielä esitetty erikseen leikkausmuodonmuutokset sekä alhaalla siirtymät mm/m/vrk.

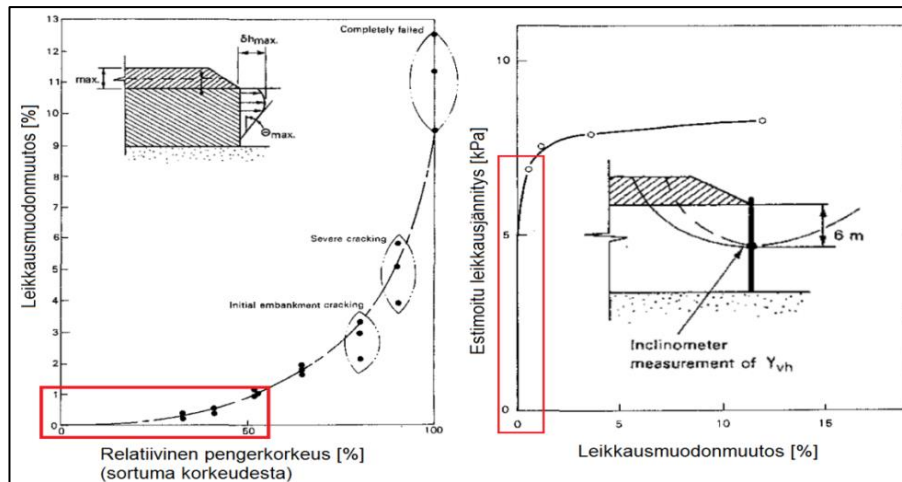
Kuvissa 5.117 ja 5.118 on havainnollistettu leikkausmuodonmuutoksien laske-
mista siirtymien avulla. Käytännössä näitä absoluuttisia arvoja täytyisi vertailla edelli-
siin mittauksiin ja laskea muutos mittauksen aikavälille. Leikkautuvaa kohtaa taas voi-
daan tulkita kulman muutoksista. Suurin siirtymän muutos on kohdassa, jossa inkli-
nometriputken kulma muuttuu rajuimmin. Käytännössä leikkausmuodonmuutos voitaisiin
laskea myös suoraan inklinometriputken inkliinaation avulla.



Kuva 5.117. Havainnollistava esimerkki leikkautuvan kohdan leikkausmuodonmuutosten laskemisesta sekä leikkautuvan kohdan siirtymistä. Tässä esimerkissä ei ole huomioitu aikaisempia mittauksia eikä aikatekijää ole huomioitu. Esimerkissä on vain laskettu kyseisen mittauksen arvot.



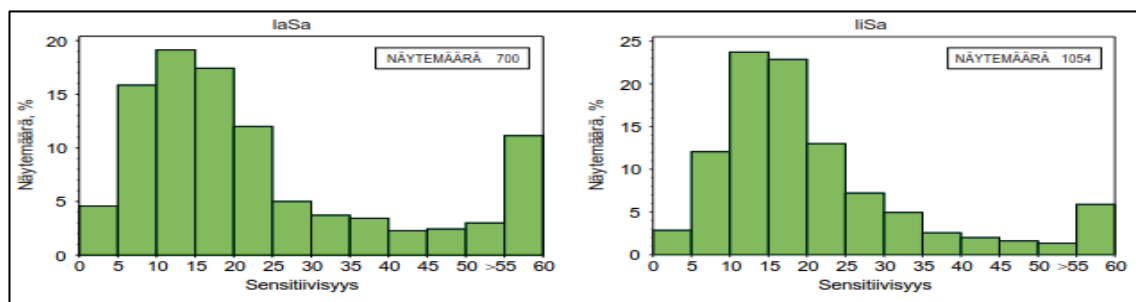
Kuva 5.118. Toinen havainnollistava esimerkki pienemmillä siirtymän arvoilla. Tässäkään ei ole huomioitu aikatekijöitä vaan laskettu pelkän yksittäisen mittauksen arvot.



Kuva 5.119. Rio de Janeirossa suoritettu penkereen sorrutuskoee. Kyseinen sorrutus on suoritettu noin kuukauden aikana ja pengerrys on suoritettu noin 0,1 m/päivässä (3 metrin korkeuteen). Yli 1 % leikkausmuodonmuutoksilla kuormituksen kasvaessa voidaan huomata selkeitä indikaattoreita tulevasta sortumasta. Huomataan myös, että mobilisoitunut leikkausjännitys saavuttaa maksimin tietyllä syvyydellä. (Ramalho-Ortigao et al. 1983)

Rio de Janeirossa suoritettussa sorrutuskokeessa kuvassa 5.119 sensitiivisyys vaihteli vain noin 2-4 välillä (hyvin alhainen). Savi kuitenkin oli pehmeää ja suljettu leikkauslujuus lähellä maanpintaa merkittävän alhainen. Tämä osittain selittää kokeessa syntyneet hyvin suuret leikkausmuodonmuutokset ennen sortumaa. Käytännössä tällöin liikkeelle lähteneessä häiriintyneessä savessa voidaan suljetusta leikkauslujuudesta mobilisoida suuri osa eri liukupinnan kohdissa pidemmällä aikavälillä. Kuitenkin jos savi on häiriintymisherkkää, niin joudutaan taulukossa käyttämään lähempänä alarajaa olevia siirtymiä. Tällöin käytännössä reagointiaika sortuman estämiseksi on lyhyempi ja mittausvälin pitää olla tiheämpi.

Inklinometrimittauksista tulostetaan yleensä siirtymät millimetreinä, mikä on seuraava taulukko 5.11. Taulukon perustana ovat edellä esitellyt kohteet. Ongelmana kuitenkin jaottelussa on savien erilainen käyttäytyminen. Aikaisemmin mainitun myötöpehmenevän ja -lujittuvan käyttäytymisen lisäksi tilanteeseen vaikuttaa myös muut saven ominaisuudet. Erityisenä tekijänä näistä voidaan mainita saven sensitiivisyys. Kuvassa 5.120 on vielä esitetty sensitiivisyyksiä suomalaisilla savilla.



Kuva 5.120. Suomalaisen savien sensitiivisyyksiä (Ronkainen 2012)

Taulukko 5.11. Taulukko siirtymien kriittisille raja-arvoille pehmeiköillä.

Maalajityyppi:	Leikkausvyöhykkeen leikkautuvan kohdan vaakasiirtymä [mm/m]					Leikkausvyöhykkeen leikkausmuodonmuutos [%]			
	Päivässä	Viikossa	Kahdessa viikossa	Kuukaudessa		Päivässä	Viikossa	Kahdessa viikossa	Kuukaudessa
Sensitiiviset savet [Sensitiivisyys yli 10 ja vesipitoisuus yli 50%]									
Lieju	1	1...3	2...5	3...8		0,1	0,1...0,3	0,2...0,5	0,3...0,8
Savi	1	1...3	2...5	4...8		0,1	0,1...0,3	0,2...0,5	0,4...0,8
Vähän sensitiiviset savet [Sensitiivisyys alle 10]									
Savi	1	1...3	2...5	4...10		0,1	0,1...0,3	0,2...0,5	0,4...1,0
Turve									
Turve	1	1...3	2...5	5...10		0,1	0,1...0,3	0,2...0,5	0,5...1,0
Dilatoivat materiaalit [vesipitoisuus alle 50 %]									
Silttinen savi	1	1...4	2...8	4...15		0,1	0,1...0,4	0,2...0,8	0,4...1,5
Savinen siltti	1	1...4	2...8	4...15		0,1	0,1...0,4	0,2...0,8	0,4...1,5
Siltti	1	2...5	2...8	5...20		0,1	0,2...0,5	0,2...0,8	0,5...2,0

Taulukon 5.11 logiikasta:

1. Taulukon arvoista käyttökelpoisimmat ovat viikosta kuukauteen kehittyvät arviot siirtymistä.
2. Siirtymät eivät voi jatkua useita kuukausia seuraavien arvojen puitteissa vaan arvot ovat tarkoitettu kuukauden sisällä tapahtuvaan arviointiin tilanteen kriittisyydestä.
3. Siirtymät mitataan leikkausvyöhykkeen leikkautuvalta kohdalta aikaisempien kuvien 5.117 ja 5.118 mukaisesti. Leikkausvyöhykkeen laskennallisena pituutena olisi hyvä käyttää metrin pituista matkaa. Jos leikkausvyöhyke on kovin pitkä, täytyy leikkautuva kohta päätellä inklinometriputken suurimman kulmanmuutoksen avulla.
4. Siirtymän ylittäessä taulukon alimman arvon, täytyy mittausväliä tihentää sekä aloittaa jatkotoimenpiteiden suunnittelu
5. Esitettyjen arvojen ylittäminen vaatii aina toimenpiteitä.
6. Kun siirtymät osuvat taulukon raja-arvojen väliin, tulkinassa voidaan varmistua mahdollisesta sortumariskistä, etenkin jos kyseessä on kiihtyvä liike.
7. Siirtymän lähestyessä raja-arvojen yläpäättä tai ylittäessä arvot, tietyllä syvyydellä muodostuvat leikkausmuodonmuutokset lähestyvät vaarallisia lukemia ja voidaan olla varmoja lähestyvistä sortumasta. Tällöin ei yleensä enää ehditä suunnitelmallisiin vahvistustoimenpiteisiin vaan kyse on lähinnä hätätyöstä tai pahimmassa tapauksessa junaliikenteen pysäyttämistä.
8. Leikkausmuodonmuutokset ja täten siirtymät leikkausvyöhykkeellä ovat voimakkaasti riippuvaisia maalajin lujuusominaisuuksista (esimerkiksi myötöpehmeneminen tai –lujittuminen sekä sensitiivisyys).
9. Siirtymiä interpoloidessa pidemmälle aikavälille täytyy huomioida, että sortuman lähestyessä siirtymät eivät enää ole tasaisesti vaan eksponentiaalisesti kiihtyviä.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Yhteenveto kohteista

Taulukossa 6.1 on esitetty kaikkien savikohteiden yhteenveto. Savikohteiden osalta voidaan sanoa, että stabiliteettia ajatellen merkittäviä siirtymiä on syntynyt vain Lielähti - Kokemäki km 218+345-400 välillä, jossa pengser on todennäköisesti ollut erittäin lähellä sortumaa. Kyseistä kohdetta onkin tämän takia hyödynnetty siirtymien raja-arvoja pohdittaessa. Tarkempi tarkastelu kohteesta löytyy tutkimuksen kappaleista 5.3.4.1 ja 5.4.

Toinen erityisen mielenkiintoinen kohde on saman rataosuuden km 240+200 kohdalla oleva manuaali-inklinometri. Manuaali-inklinometrissa noin 16 metrin päässä radan keskilinjasta oikealle on selvä leikkautuvavyöhyke noin 7 metrin syvyydellä. Kuitenkin lähempänä rataa käytössä olevasta automaatti-inklinometrin datasta ei ole vyöhykettä havaittavissa käytössä olevilla tiedoilla. Kohteen mittauksia kannattaa jatkossakin suorittaa etenkin, kun tutkimuksen muissa kohteissa ei ole mitään vastaavaa hitaasti liikkeessä olevaa savikohdetta. Putken siirtymä on tällä hetkellä noin 4 mm/vuodessa yläpäässä ja leikkausvyöhykkeellä noin 1 mm/vuodessa. Kohteen tarkempi esittely löytyy kappaleesta 5.3.4.1.

Poikkileikkausten, joissa turvekerroksen alla on merkittävä savikerros, yhteenveto on esitetty taulukossa 6.2 sekä lisäksi turvekohteiden yhteenveto on esitetty taulukossa 6.3. Turvekohteissa yleisesti voidaan todeta olevan suuremmat deformaatiot. Etenkin vastapengerkohteissa verrattuna savikkojen vastaaviin voidaan huomata selvä ero siirtymien suuruksissa sekä siirtymänopeuksissa. Turvekohteiden siirtymät ovatkin usein selitettävissä turpeen muodonmuutosominaisuuksilla.

Turvekohteita myös mallinnettiin Plaxiksen avulla Riihimäki – Tampere välin ja Tampere - Seinäjoki välin kohteissa. Mallinnuksessa voitiin havaita, että turpeen parametreista siirtymien kannalta merkittävimmiksi osoittautuivat K_0 lepopainekertoimen oikeanlainen variointi sekä vedenläpäisevyyden mallintaminen ajan kuluessa. Kyseisillä parametreilla on usein suurin vaikutus painumiin ja sivusiirtymiin. Mallinnuksessa onkin pyritty simuloimaan mainittujen parametrien avulla turpeelle tyypillistä sekundaari-painumaa. Turpeella on merkittävän suuri kitkakulma, jolloin penkereen ja vastapenkerien alla turve lujittuu tehokkaasti kokoonpuristuessaan ja pystyjännityksen kasvaessa. Tutkimuksen esimerkkikohteessa voitiin vastapenkereet rakentamalla aiheuttaa tuenta-painumakierre radalla useiksi vuosiksi.

Tutkimuksen manuaalisissa inklinometrimittauksissa oli huomattavia mittaus- ja asennusvirheitä, joita tuli esille tutkimuksen eri vaiheissa. Virhelähteitä olivat muun muassa aikaisemmin vanhalla kalustolla suoritettut mittaukset sekä väärin asennetut putket. Mainittuja virheitä kuitenkin pystyttiin karsimaan valitsemalla parempia 0-mittaus

referenssejä mittausten joukosta. Osassa putkista A ja B -suuntia ei myöskään ollut asennettu suorakulmaan radan pituussuuntaan nähden.

Automaatti-inclinometrien tuloksissa oli paljon vaihtelua. Etenkin uudemmat putket toimivat paremmin, mutta vanhoissa putkissa oli havaittu ongelmia, jotka tulostuvat epäloogisina siirtyminä ja putkiprofiileina. Nykyään vastaavanlaisia ongelmia on raportoitu olevan vähemmän.

Taulukko 6.1. Yhteenvedo savikohteiden siirtymistä

Pohjamaa			Rataosa	Km+m VAS/OIK	Kommentit siirtymistä ja putken muodosta	Viimeisin siirtymä nopeus [mm/vuosi]
kuSa	Savi	Turve				
Savi kohteet (55)						
	x		002 Lih-Kki	216+642_O		0
x	x		002 Lih-Kki	218+345_O		1
x	x		002 Lih-Kki	218+400_O	Ei siirtymä	1
	x		002 Lih-Kki	220+616_O		1
	x		002 Lih-Kki	228+320_O	Yläpäässä pientä liikettä	3
	x		002 Lih-Kki	228+750_O		2
	x		002 Lih-Kki	228+900_V		0
	x		002 Lih-Kki	228+950_V		1
	x		002 Lih-Kki	228+980_V	Ei siirtymä	0
x	x		002 Lih-Kki	229+780_V		1
x	x		002 Lih-Kki	230+220_V		1
x	x		002 Lih-Kki	230+240_O	Pientä liikettä	2
x	x		002 Lih-Kki	240+060_V		2
x	x		002 Lih-Kki	240+060_O	Ei siirtymä	1
	x		002 Lih-Kki	240+145_O		1
	x		002 Lih-Kki	240+200_O	Leikkautuva vyöhyke noin 7,5 m kohdalla, jossa siirtymä noin	4
	x		002 Lih-Kki	240+202_O	1-2 mm/vuodessa	0
x	x		002 Lih-Kki	253+260_O		2
x	x		002 Lih-Kki	255+540_V		0
x	x		002 Lih-Kki	259+060_V		1
x	x		002 Lih-Kki	267+460_V		2
x	x		002 Lih-Kki	268+180_V	Ei merkittäviä siirtymä	2
x	x		002 Lih-Kki	269+600_V		1
x	x		002 Lih-Kki	270+460_V		1
	x		002 Lih-Kki	273+000_V		0
x	x		002 Lih-Kki	276+380_V		0
x	x		002 Lih-Kki	280+000_O	Pientä liikettä putken keskellä	2
x	x		002 Lih-Kki	283+237_O		1
x	x		002 Lih-Kki	283+363_V	Ei merkittäviä siirtymä	1
x	x		002 Kki-Harj	290+140_O	Ei siirtymä	1
	x		003 Tpe-Sk	203+000_O	Ei siirtymä	1
	x		003 Tpe-Sk	203+040_O		0
x	x		006 Rii-Kvi	122+592_O	Pientä siirtymä yläpäässä	1
x	x		008 Sk-Rha	429+725_O		0
x	x		008 Sk-Rha	429+860_O	Ei merkittäviä siirtymä	0
x	x		008 Sk-Rha	430+140_O		2
x	x		008 Lp-Pnä	442+460_V	Yläpäässä pientä liikettä	3
x	x		008 Lp-Pnä	453+160_O	Viuhkamainen siirtymä	4
x	x		008 Lp-Pnä	468+840_V	Ei siirtymä	0
x	x		008 Lp-Pnä	474+500_V	Viuhkamainen siirtymä, vastapenkereen asettumista	2
x	x		008 Lp-Pnä	474+560_V	Yläpäästä taipunut putki	3
x	x		008 Lp-Pnä	480+760_V	Yläpäästä taipunut putki	1
x	x		008 Lp-Pnä	480+940_O	Ei siirtymä	0
	x		008 Tja-Lka	702+250_V	Ei merkittäviä siirtymä	0
x	x		008 Tja-Lka	704+540_O		0
x	x		009 Ov-Jsk	229+980_V	Vastapenkereen asettumista	3
x	x		009 Ov-Jsk	287+200_V	Ei siirtymä	1
x	x		342 Kki-Rma	296+680_V	Ei siirtymä	1
x	x		342 Kki-Rma	313+000_O		4
x	x		342 Kki-Rma	321+320_V		4
x	x		342 Kki-Rma	321+775_O		1
	x		342 Kki-Rma	322+320_V	Yläpäässä pientä liikettä	1
x	x		342 Kki-Rma	323+250_O		2
x	x		342 Kki-Rma	325+400_V		2
x	x		342 Kki-Rma	326+940_V		1

Taulukko 6.2. Yhteenvedo turvekohteiden siirtymistä. Siirtymien osalta taulukossa punaisella (yli 10 mm/vuodessa) ja keltaisella (yli 5 mm/vuodessa) on esitetty mahdollisesti jatkossa kunnossapitoa vaativat kohteet.

Pohjamaa			Rataosa	Km+m VAS/OIK	Kommentit siirtymistä ja putken muodosta	Viimeisin siirtymä nopeus [mm/vuosi]
kuSa	Savi	Turve				
Turve kohteet (16)						
		x	003 Tpe-Sk	315+920_V	Viuhkamainen siirtymä	8
		x	003 Tpe-Sk	316+160_V		8
		x	003 Tpe-Sk	320+360_O	Vastapenkereiden asettumista. Viuhkamainen siirtymä. Merkittävää kunnossapidontarvetta	10
		x	003 Tpe-Sk	320+425_O		14
		x	003 Tpe-Sk	320+475_V		11
		x	003 Tpe-Sk	320+525_O	Massastabiloitu alue. Pienemmät siirtymät ja pienempi siirtymänopeus.	5
		x	003 Tpe-Sk	320+545_O		3
		x	003 Tpe-Sk	320+575_V		6
		x	003 Tpe-Sk	320+625_O	Vastapenkereiden asettumista ja viuhkamaista siirtymää.	12
		x	003 Tpe-Sk	320+720_O		19
		x	005 Kv-Pm	267+596_O	Ei siirtymä	1
		x	008 Mtv-Ela	600+740_O	Viuhkamainen siirtymä	4
		x	008 Kua-Tja	675+810_V	Ei siirtymä	1
		x	008 Kua-Tja	675+820_O		2
		x	023 Hpk-Jy	330+740_V	Automaattikohde. Viuhkamainen siirtymä	3
		x	023 Hpk-Jy	330+780_V		3

Taulukko 6.3. Yhteenvedo turve- ja savikohteiden siirtymistä

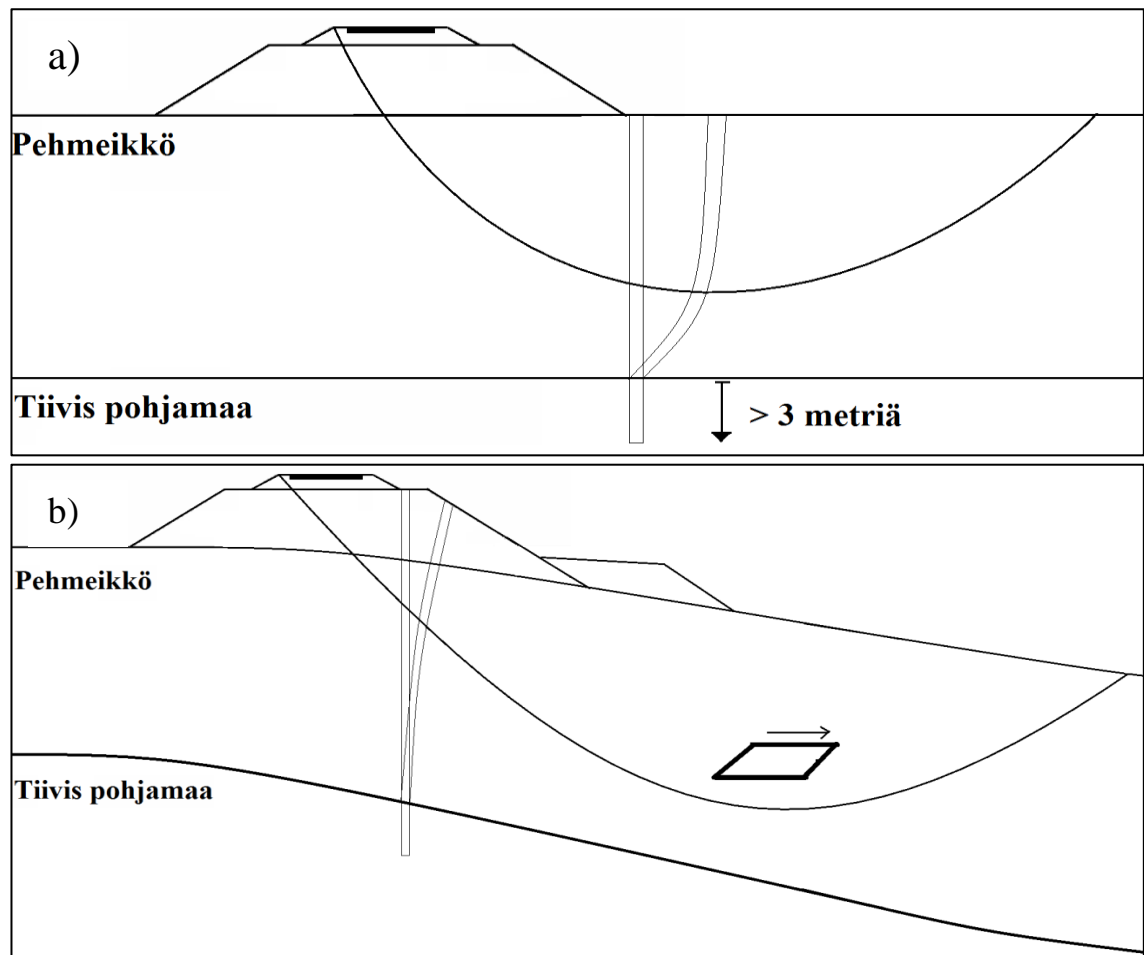
Pohjamaa			Rataosa	Km+m VAS/OIK	Kommentit siirtymistä ja putken muodosta	Viimeisin siirtymä nopeus [mm/vuosi]
kuSa	Savi	Turve				
Turve ja savi kohteet (25)						
	x	x	003 Rii-Tpe	104+160_O	Viuhkamainen siirtymä	4
	x	x	003 Rii-Tpe	104+260_V		3
	x	x	003 Rii-Tpe	104+260_O		3
	x	x	003 Tpe-Sk	330+360_V	Viuhkamainen siirtymä	4
	x	x	003 Tpe-Sk	330+600_V		4
	x	x	003 Tpe-Sk	330+880_V		4
x	x	x	008 Sk-Rha	420+680_V	Uuden ratapenkereen asettumista. Leikkautuva vyöhyke noin 13 m kohdalla. Uuden radan alla paalulaatta.	2
	x	x	008 Sk-Rha	420+900_V		2
	x	x	008 Rha-Lp	437+100_V	Ei merkittäviä siirtymä	2
	x	x	008 Rha-Lp	438+250_V		2
x	x	x	008 Lp-Pnä	462+260_O	Leikkautuva vyöhyke noin 5,5 m kohdalla, jossa pientä liikettä	3
x	x	x	008 Lp-Pnä	462+310_V		3
	x	x	008 Lp-Pnä	516+500_V	Ei siirtymä	0
	x	x	008 Lp-Pnä	516+580_V		0
	x	x	008 Lp-Pnä	516+680_V		0
	x	x	008 Kua-Tja	680+340_V	Uusi putki, yläpäässä siirtymää	3
	x	x	008 Kua-Tja	680+340_O		4
	x	x	009 Tpe-Ov	205+900_V	Yläpäässä pientä liikettä	1
	x	x	009 Ov-Jsk	256+860_O	Hidastuvaa viuhkamaista siirtymää	3
	x	x	066 Ov-Hpk	267+050_O	Uuden vastapenkereen asettumista. Viuhkamainen siirtymä	80
	x	x	066 Ov-Hpk	267+070_O		100
	x	x	141 Hy-Kr	96+860_O	Uusi putki, pientä liikettä	2
	x	x	141 Hy-Kr	96+862_O		2
	x	x	342 Kki-Rma	306+680_V	Ei siirtymä	0
	x	x	342 Kki-Rma	307+480_V	Vastapenkereen asettumista	9

Tutkimuksen kannalta erittäin hyödyllistä tietoa saatiin myös Perniön sorrutuskokeesta, Murron stabiilista koepenkerestä sekä maailmalla suoritetuista sorrutuskokeista. Kappaleessa 5.4 esitellyt raja-arvot perustuvatkin pääosin edellä mainittuihin mittauksiin sekä tämän lisäksi hyödynnettiin tutkimuskohteista Lielähti - Kokemäki km 218+345 kohdetta.

6.2 Loppupäätelmät

6.2.1 Inklinometriputken oikeanlainen sijoittaminen ja asennus

Kuvan 6.1 mukaisesti inklinometriputki asennetaan pystysuoraan esiporattuun kairausreikään. Putken asennus pitäisi suorittaa tiiviiseen pohjamaahan noin 3-6 metriä, jolloin vältetään putken alapään liikkeiden aiheuttamalta virheelliseltä mittausdataalta. Jos pehmeiden maakerrosten alla ei ole riittävän paksulta tiiviitä maakerroksia, pitää putki asentaa kallioon niin syväälle, että yllä esitetty vaatimus täyttyy. Inklinometriputki pitäisi asentaa penkereen viereen niin, että arvioidun liukupinnan leikkautuva vyöhyke kulki sen lävitse. Tällä on merkitystä silloin, kun siirtymiä tulkitaan putken leikkautuvassa kohdassa. Jos inklinometriputki on asennettu kauas liukupinnan suorasta leikkauksesta, niin tällöin mitatut siirtymät ovat myös erisuuruisia ja taulukon 5.11 ohjeet eivät ole enää voimassa. Raja-arvot ovat esitetty kuvan 6.1a kaltaisella leikkautuvalla vyöhykkeellä tapahtuvalle siirtymälle.



Kuva 6.1. Putken sijainnin merkitys esitettyihin raja-arvoihin vertailtaessa. Kohdassa a) mitataan suoralla leikkauksella tapahtuvia siirtymiä, ja b) vastaavasti aktiivivyöhykkeen siirtymiä. Raja-arvomenettely on kuitenkin arvioitu pääosin suorassa leikkauksessa tapahtuville siirtymille ja muodonmuutoksille. Aktiivivyöhykkeellä kriittiset muodonmuutokset ovat esitettyä pienempiä.

6.2.2 Stabiiliteetin arviointi pysty- ja vaakasiirtyminen perusteella uudella penkereellä

Heikommilla kokonaisvarmuuksilla sivusiirtymiä kertyy heti penkereen rakentamisen jälkeen huomattavasti enemmän verrattuna painumaan. Kokonaisvarmuuden ollessa noin 1,3-1,5, sivusiirtymiä suhteessa painumaan kertyy noin 0,05-0,15 kertaisesti, kun taas vastaavasti alle 1,3 varmuudella tämä suhdeluku voi olla noin 0,25 tai enemmän. Menettely on tarkoitettu lähinnä pehmeille saviille ja turpeella suhdeluvut ovat todennäköisesti hieman erisuuruiset, mutta sama logiikka on hyödynnettävissä.

Joskus vastapengerkohteissa putkia on saatettu asentaa työnaikaiseen käyttöön useampia ja tällöin vastapenkereen reunoille asennettavista putkista olisi mahdollista tehdä vastaavaa vertailua. Tällöin olisi mielenkiintoista tehdä vertailua vastaavan teorian hyödyntämisessä vastapengerkohteiden sivusiirtymien yhteyttä stabiiliteettiin. Teoriassa vastapenkereet kuitenkin mitoitetaan vähintään 1,5 kokonaisvarmuuteen ja kohteet eivät ole enää vertailtavissa tavanomaisiin pengerkohteisiin. Inklinometriputket myös ovat usein penkereen reunalla eikä vastapenkereen reunalla.

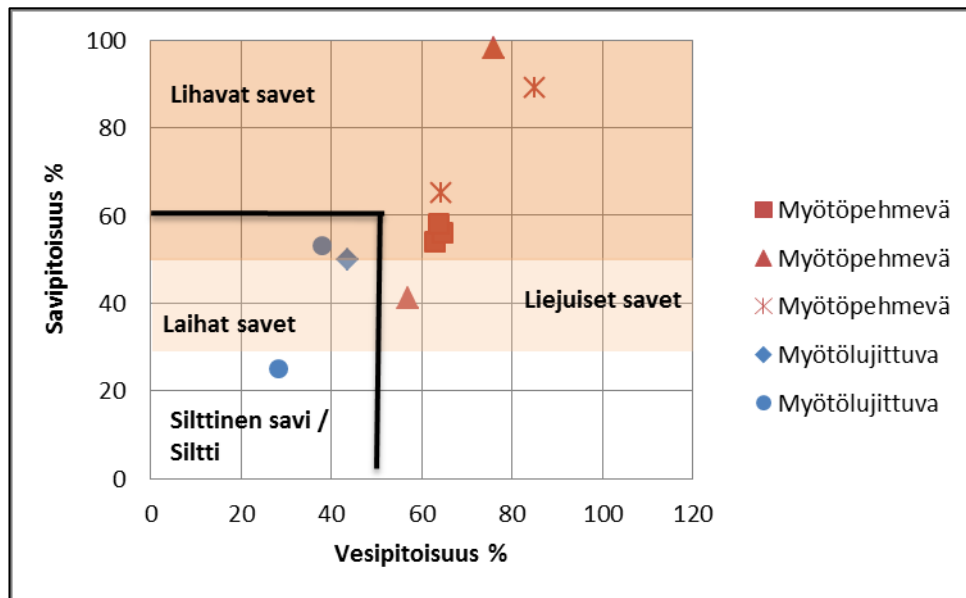
6.2.3 Kunnossapitotarpeen arviointi inklinometrimittauksista

Ulkomailla useissa eri kohteissa sivusiirtymä mittauksissa voitiin havaita, että tiekohteissa alkoi syntyä tienpinnassa reikiintymistä ja halkeilua noin yli 10 mm/vuosi sivusiirtymillä. Tämä on linjassa tutkimuksen Tampere – Seinäjoki välin km 320 kohteisiin, joissa siirtymää vuosittain on noin 10 – 20 mm ja näissä kohteissa on ollut viime vuosina selvää kunnossapidon tarvetta. Muita mahdollisia kunnossapidon kohteita tämän siirtymäarvioin perusteella olisi saman rataosuuden km 315 kohteissa, joissa siirtymää on noin 8 mm/vuodessa. Näiden lisäksi kunnossapitoa vastaavasti olisi odotettavissa Orivesi - Haapamäki km 267+050-070 (80-100 mm/vuodessa) kohteessa sekä Kokemäki – Rauma km 307+480 (8 mm/vuodessa) kohteessa.

6.2.4 Saven ominaisuuksien vaikutus reagointiin

Siirtymiä tarkasteltaessa saven ominaisuuksista täytyy ensimmäisenä ja tärkeimpänä mainita sensitiivisyys ja plastisuus. Kun savi on erittäin sensitiivistä ja omaa pienin plastisuuden, niin tällöin ennen sortumaa tapahtuvat pystysuuntaiset sekä sivusuuntaiset siirtymät ovat olleet pieniä vaiheittain pengerrettyissä sorruskokeissa. Kuitenkin näissäkin erittäin sensitiivisille saville tehdyissä pengerkokeissa voitiin sivusiirtymästä tehdä havaintoja tulevasta sortumasta. (Hunter & Fell 2003)

Vähän sensitiivisillä savilla voidaan havaita, että sortumismekanismi kehittyi suhteellisesti hitaammin. Tällöin paikallisesti syntyvällä liukupinnan osalla, kehittyvä kuormitus ympäröivään alueeseen on ”pienempi”. Tällöin vaaditaan suurempia siirtymiä, jotta sortuminen tapahtuisi koko liukupinnalla sekä saven sietokyky siirtymiä vastaan on suurempi. (Hunter & Fell 2003)



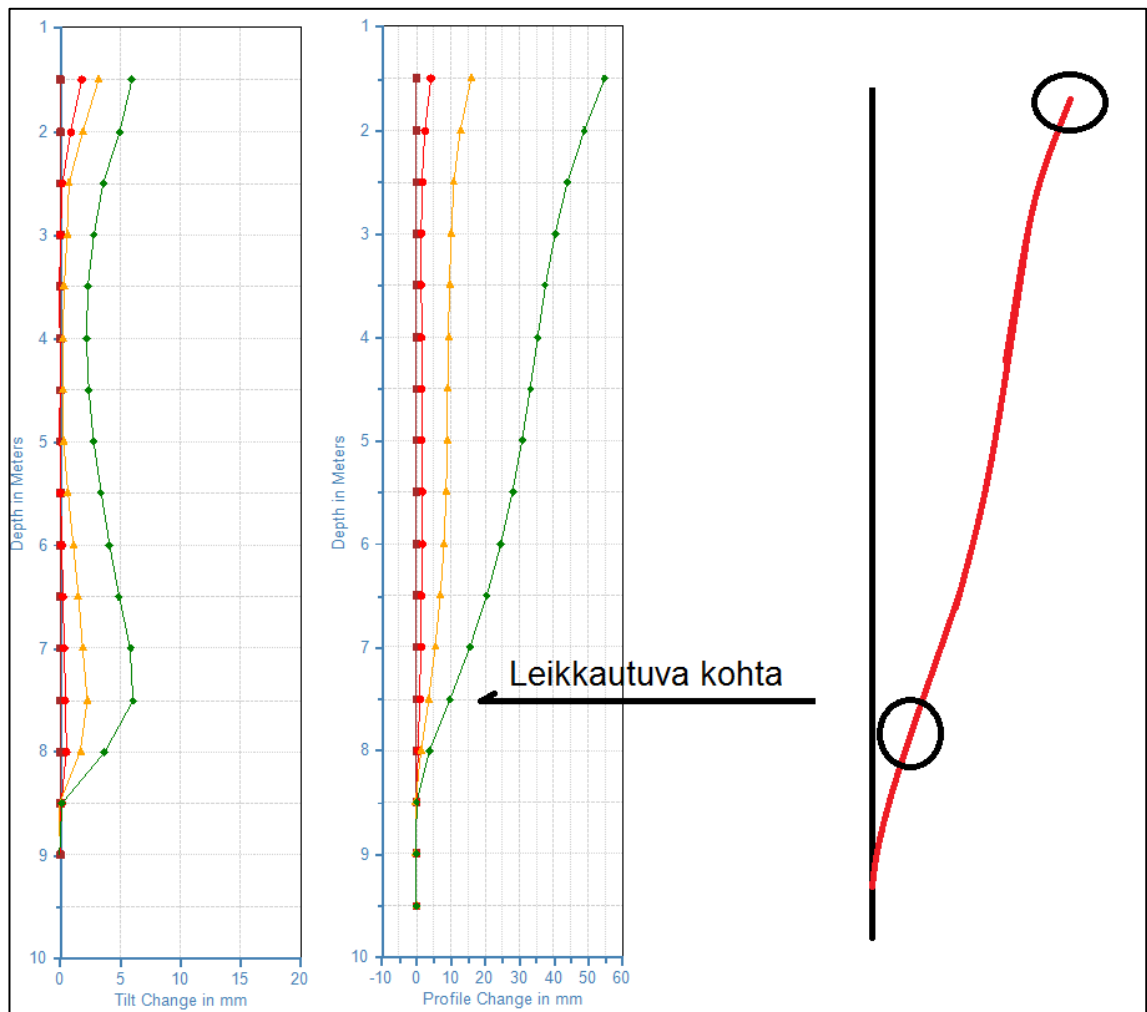
Kuva 6.2. Saven vesipitoisuuden ja savipitoisuuden yhteys lujuuskäyttäytymiseen (Mansikkamäki)

Saven muitakin ominaisuuksia voidaan kuitenkin hyödyntää, kun halutaan vertailla siirtymän raja-arvoja. On havaittu että kun saven vesipitoisuus on alle 50 % ja savipitoisuus alle 60 %, niin savessa alkaa näkyä myötölujittuvaa murtolujuuden jälkeistä käyttäytymistä suljetussa kolmiaksaalikokeessa. Kuvassa 6.2 on jaottelua havainnollistettu paremmin sekä aikaisemmin kappaleessa 2.4.5. Kuvaan on koottu vajaan 20 suomalaisen saven suljetun kolmiaksaalikokeen käyttäytyminen. Myötölujittuvaksi on merkitty savi, joka murtolujuuden saavutettuaan pystyy kestäämään vielä lisää muodonmuutoksia ilman lujuuden alenemaa tai lujuus voi jopa hieman kasvaa.

Inklinometrimittauksissa tämä tarkoittaa useiden prosenttien leikkausmuodonmuutoksia ja jopa kymmenien millien siirtymiä kuukauden aikana. Tällöin savi voi olla todennäköisemmin vähemmän sensitiivistä ja saven lujuus voi mobilisoitua koko liuku-

pinnan matkalla. Näin ollen hieman laihemman tai silttisemmän saven seuraamukset ovat vähemmän vakavia, kun siirtymät jäävät pienemmiksi.

Kuitenkin pehmeiden saven tapauksissa leikkausmuodonmuutokset taulukon 5.11 mukaisesti eivät saisi ylittää kuukauden mittaisella ajanjaksolla 0,4...1,0 %. Siirtyminä tämä tarkoittaa noin 4...10 mm metrin mittaisella matkalla. Tällöin viikon mittaisella ajanjaksolla leikkausmuodonmuutokset ovat tätäkin pienempiä. Inklinometriputki on kuitenkin aina siirtynyt jostain kohtaa, yleensä yläosastaan, enemmän kuin leikkautuvasta kohdasta ja siirtymiin reagoiminen on tällöin tehokkaampaa kuvan 6.3 logiikan mukaisesti.



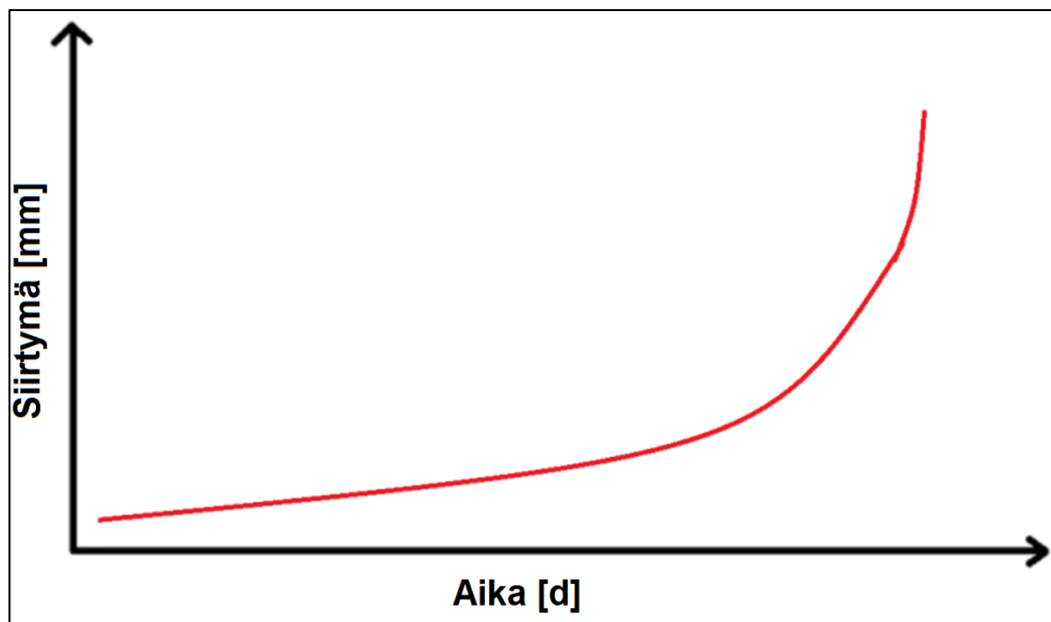
Kuva 6.3. Inklinometriputken siirtymät ovat usein merkittävästi suuremmat jossain toisessa kohtaa kuin leikkautuvalla kohdalla, mikä parantaa putkiprofiileja tarkasteltaessa reagointi-aikaa.

6.2.5 Siirtymien raja-arvot pehmeiköillä

Seuraavassa taulukossa 6.4 on esitetty siirtymien raja-arvot inklinometrimittauksille. Taulukko on esitetty aikaisemmin kappaleessa 5.4 ja tarkempi esittely taulukon logiikalle ja perusteluille on kyseisessä kappaleessa. Siirtymien mittaamisen aikajänteenä on tehokkainta käyttää noin viikon mittaista aikajaksoa. Tällöin esimerkiksi jos penkereen reuna-alueilla tapahtuu yllättävä lujuuden aleneminen, niin siihen keritään mahdollisesti reagoimaan. Reagointi-aika on voimakkaasti riippuvainen saven sensitiivisyydestä sekä lujuusominaisuuksista. Siirtymien ollessa kiihtyvää, voidaan mahdollisesta tulevasta sortumasta varmistua. Tämän kaltaista siirtymää on vielä havainnollistettu kuvassa 6.4. Toki joskus siirtymät saattavat kiihtyä kohteissa useiksi päiviksi ja pysähtyä tämän jälkeen, mutta tällöin kohteesta tulisi vaarallinen ja sille jouduttaisiin tekemään penkereen tukevia toimenpiteitä myöhemmin joka tapauksessa.

Taulukko 6.4. Raja-arvot siirtymille leikkausvyöhykkeellä

Maalajityyppi:	Leikkausvyöhykkeen leikkautuvan kohdan vaakasiirtymä [mm/m]				Leikkausvyöhykkeen leikkausmuodonmuutos [%]			
	Päivässä	Viikossa	Kahdessa viikossa	Kuukaudessa	Päivässä	Viikossa	Kahdessa viikossa	Kuukaudessa
Sensitiiviset savet [Sensitiivisyys yli 10 ja vesipitoisuus yli 50%]								
Lieju	1	1...3	2...5	3...8	0,1	0,1...0,3	0,2...0,5	0,3...0,8
Savi	1	1...3	2...5	4...8	0,1	0,1...0,3	0,2...0,5	0,4...0,8
Vähän sensitiiviset savet [Sensitiivisyys alle 10]								
Savi	1	1...3	2...5	4...10	0,1	0,1...0,3	0,2...0,5	0,4...1,0
Turve								
Turve	1	1...3	2...5	5...10	0,1	0,1...0,3	0,2...0,5	0,5...1,0
Dilatoivat materiaalit [vesipitoisuus alle 50 %]								
Silttinen savi	1	1...4	2...8	4...15	0,1	0,1...0,4	0,2...0,8	0,4...1,5
Savinen siltti	1	1...4	2...8	4...15	0,1	0,1...0,4	0,2...0,8	0,4...1,5
Siltti	1	2...5	2...8	5...20	0,1	0,2...0,5	0,2...0,8	0,5...2,0



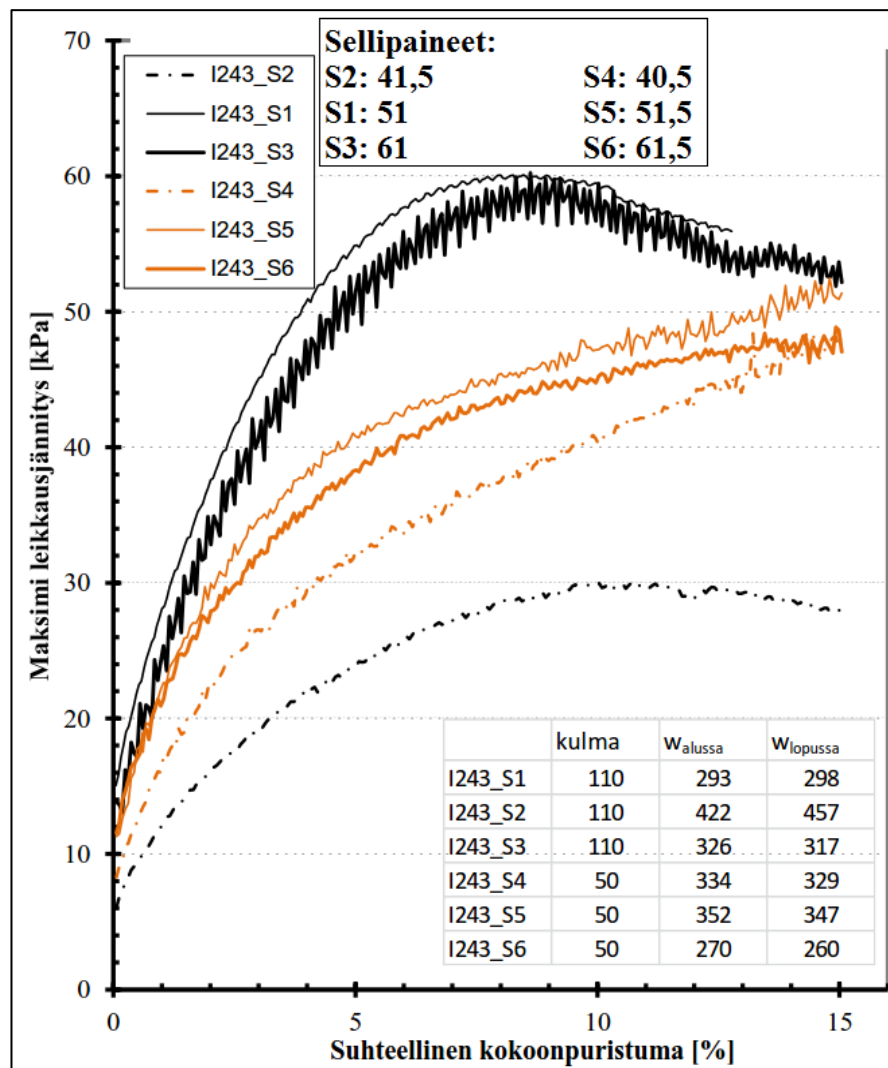
Kuva 6.4. Tyypillinen siirtymän kiihtyvä ajallinen kehittyminen useissa sortumakokeissa leikkautuvassa kohdassa

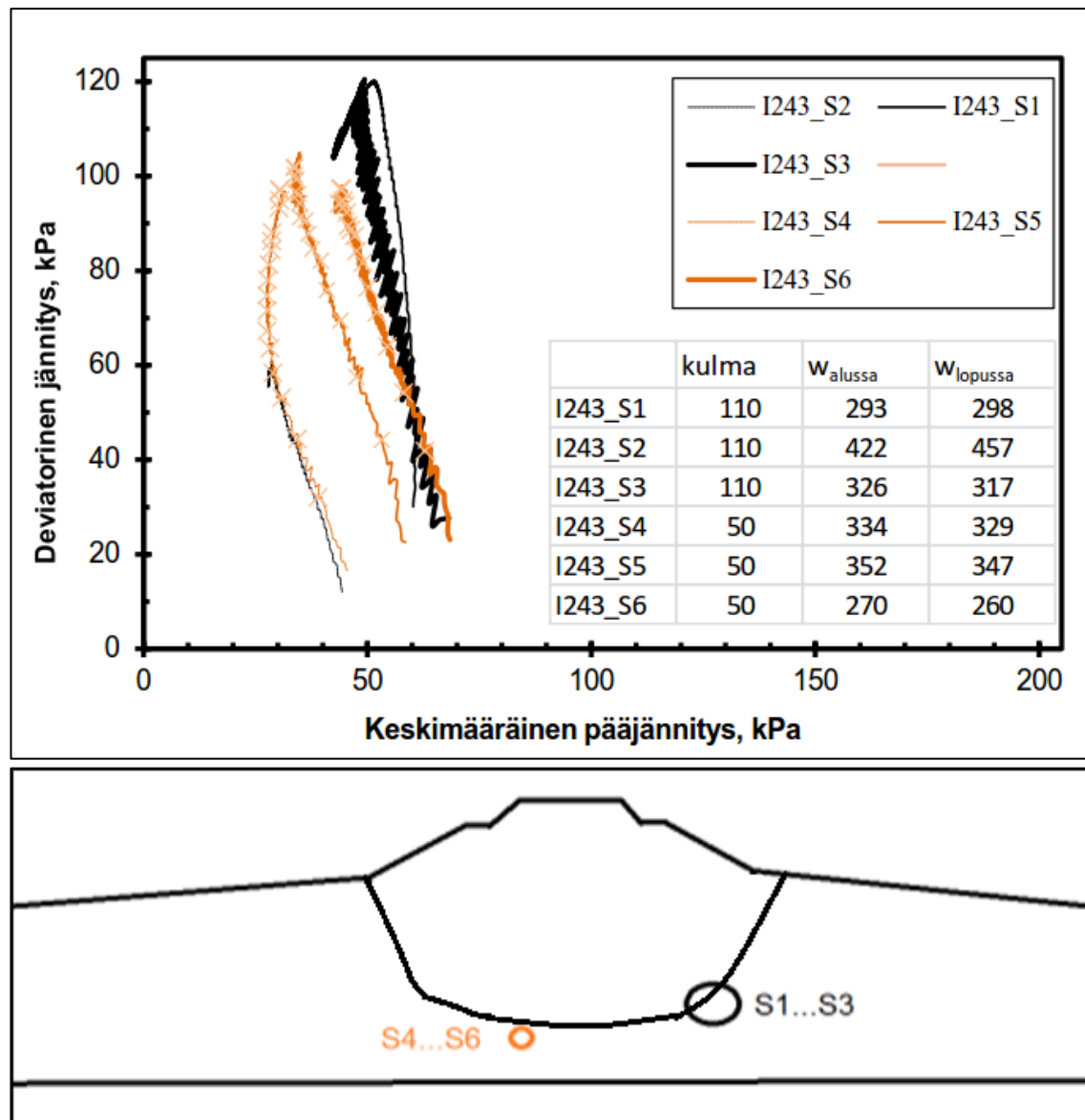
6.2.6 Turve

6.2.6.1 Turpeen laborioriotutkimukset

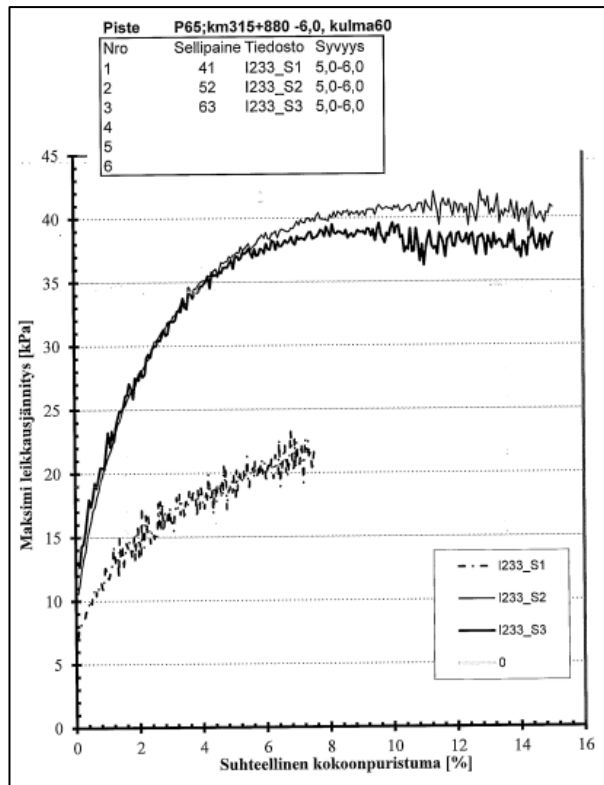
Turpeen aiheuttamat ongelmat tutkimuksen inklinometriputkissa ovat yleisesti ottaen kunnossapitoon liittyviä, sillä turpeessa deformaatiot ovat paljon suurempia kuin vastaavilla savikohteilla. Tämä osaltaan asettaa haasteita turpeen siirtymiä tulkittaessa erilaisissa tapauksissa. Suuret deformaatiot turpeella johtuvat sen painuma- ja vedenläpäisevyysominaisuuksista alkutilanteessa. Ominaisuudet taas ovat kytköksissä turpeen käyttäytymiseen kuormitettuna. Kuitenkin kuormitettuna turpeen vedenläpäisevyys pienenee huomattavasti.

Turpeen lujuusominaisuuksissa on huomattavissa kokoonpuristettaessa sen oma-laatuinen luonne. Turpeessa aktiivivyöhykkeellä (lähellä DSS vyöhykettä) murtolujuus saavutetaan noin 8-10 prosentin suhteellisella kokoonpuristumalla isotrooppisista suljetussa kolmiaksaalikokeessa. Kuitenkin näytteissä aivan penkereen alta murtoa ei saavuteta ja näyte dilatoi voimakkaasti 15 % suhteelliseen kokoonpuristumaan asti. Kuvissa 6.5 ja 6.6 on esitetty asiasta havainnollistavat kuvat.





Kuva 6.5. Esitys Tampere – Seinäjoki välin kilometrin 320 kolmiakselikokeista. Huomattavaa on, että penkereen vierestä otetuissa näytteissä suuremmilla sellipaineilla turpeen lujuus kasvaa merkittävän suureksi. Lujuuden kasvu sellipaineen kasvuun verrattuna on eksponentiaalista sekä vaatisi eri sellipaineilla tehtävää lisätutkimusta. Toki näytteessä S2 on suurempi vesipitoisuus, mutta ero S1 ja S3 näytteisiin on todella merkittävä 10-20 kPa sellipaineen muutoksella. Penkereen alta otetuista näytteistä S4...S6 tällaista ilmiötä ei ole havaittu. Näytteiden maatuneisuusaste kaikissa näytteissä oli H4.



Kuva 6.6. Esitys Tampere – Seinäjoki välin kilometrin 315+880 suljetuista kolmiaksiaalikoikeista. Kuvasta voidaan huomata sama trendi kuin aiemmassa kuvassa 6.5. Lujuuksien kasvu on eksponentiaalista nostettaessa sellipainetta 10-20 kPa kokeessa. Toki tutkittujen näytteiden välillä on eroa, mutta samantyyppinen trendi on huomattavissa. Tämän alueen kokeissa murto saavutetaan kuvan 6.5 tapaan noin 8-10 % suhteellisella kokoonpuristumalla. Näytteiden maatuneisuusaste on H4 ja vesipitoisuus vaihteli 350-380 % välillä.

Näiden kokeiden perusteella turvepenkereessä tapahtuisi aktiivipuolen sortuessa enemmänkin nopea painuma. Kuitenkin tämän nopeahkon kokoonpuristuman jälkiseurauksia on vaikea arvioida ilman todellisessa kohteessa suoritettua koejärjestelyä. Perinteisellä rasialeikkauskokeella ei myöskään pystytä kovin hyvin arvioimaan sivusuuntaisten liikkeiden vaikutusta kuituisessa turpeessa, koska siirtymien kasvaessa turpeen lujuus vain kasvaa kokeessa ja selkeää murtoa on vaikea erottaa. Tämän johdosta turpeen suljettua leikkauslujuutta onkin pyritty tulkitsemaan myöhemmin tehokkaiden pystyjännitysten avulla. Seuraavassa on vielä esitettyä yhteenvetoa turpeen lujuusominaisuuksista tämän tutkimuksen Tampere – Seinäjoki välin kohteesta:

1. Penkereen alla kokoonpuristuneena turpeen lujuus kasvaa merkittävän suureksi suljetussa kolmiaksiaalikoikeessa. Suuri lujuus kuitenkin saavutetaan vasta merkittävän suurilla muodonmuutoksilla. Huomattavaa on myös, että pienemmillä sellipaineilla lujudet jäävät huomattavasti pienemmiksi ja kuvan 6.5 perusteella voidaankin mainita, että turpeen lujuus näyttäisi kasvavan eksponentiaalisesti sellipaineen kasvaessa. Tämän tiedon perusteella olisi hyvä suorittaa kyseisiä laboratoriokokeita etenkin pienemmillä sellipaineilla vaikkapa turvenäytteille vastapenkereen alta.

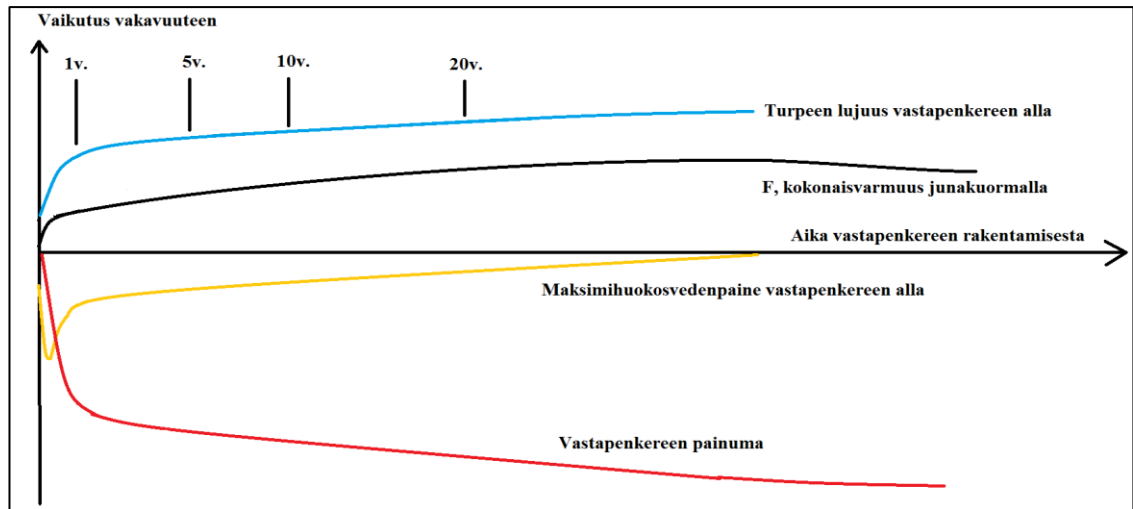
2. Suorassa leikkauksessa tavanomaisella rasialeikkauskokeella ei kyetä arvioimaan kohteen turpeen käyttäytymistä tarpeeksi hyvin. Käytännössä kokeessa vaakasiirtymien kasvaessa lujuus kasvaa todella suureksi. Ulkomailla DSS –laitteistolla on taas saatu pienempiä kitkakulman arvoja kuin vastaavissa rasialeikkauskokeissa (Long 2005) ja Hollannissa on pystytty DSS –laitteistolla arvioimaan suljettua leikkauslujuutta todenmukaisesti luonnontilaiselle turpeelle suoritettussa sorrutuskokeessa.
3. Passiivivyöhykkeellä turpeen lujuus on erittäin alhainen, sillä tehokas pystyjännitys on hyvin lähellä nollaa. Vastaavia alhaisia jännityksiä on mahdotonta simuloida kolmiaksiaalikoikeilla.

6.2.6.2 Vastapenkereet ja massastabilointi turpeella

Turpeella murtolujuudet aktiivipuolella ovat kohtuullisen suuret ja ongelmaksi tulevatkin nopeasti kehittyvät muodonmuutokset. Tällöin todennäköisesti suurempi uhka junaturvallisuudelle syntyy itse muodonmuutoksista kuin varsinaisesta sortumasta. Turvekohteissa stabiiliteettilaskentaa oleellisempaa voisikin olla muodonmuutoslaskenta ja turvallisen nopean kokoonpuristuman ymmärtäminen.

Turpe lujittuu tehokkaasti kuormituksen alaisena, sillä turpeen kitkakulma on merkittävän suuri (mahdollisesti noin 40...60 etenkin kuituisessa turpeessa). Kuitenkin turpeen jäykkyys on hyvin pieni, mikä mahdollistaa suuren kokoonpuristuman ennen kuin suuremmat lujuudet saavutetaan. Tämän tutkimuksen rataosan Tampere – Seinäjoki km 320 sijoittuva ratapenger on rakennettu kapeaan, turpeeseen aurattuun uraan. Tätä turvekohteesta voitiin tehdä seuraavia havaintoja:

1. Vastapengerten rakentaminen nostaa huokospaineita pohjamaassa ja lisää ratapenkereen deformaatioita pitkäksi ajaksi.
2. Merkittävä osa vakavuuden parantumisesta tapahtuu vasta huokosylipaineiden jakautuessa maaperään. Huokosylipaineiden jakautuminen on taas yhteydessä turpeen vedenläpäisevyyteen, joka voi vaihdella kohteesta riippuen.
3. Turpeen vedenläpäisevyys pienenee ulkoisesta kuormituksesta, jolloin huokosylipaineiden jakautuminen pohjamaahan hidastuu alkutilanteesta entisestään.
4. Vastapenkereen tehokkuus heikkenee etenkin heti rakentamisen jälkeen tapahtuvan merkittävän suuren painuman myötä. Tämän johdosta suuri osa vastapenger materiaalista painuu pohjavedenpinnan alapuolelle ja tehokastilavuuspaino pienenee huomattavasti ja osa vastapenkereen hyödystä menetetään.
5. Vastapengerten rakentaminen kiihdyttää itse ratapenkereen tuenta-painuma kiertä ja mahdollisesti uusissa kohteissa laukaisee kierteen uudelleen alkavaksi. Tämä taas nostaa kunnossapidon tarvetta useiksi vuosiksi vastapenkereiden rakentamisen jälkeen.
6. Vastaavasti myös suistumisriski kasvaa, kun deformaatiot voivat tapahtua yllättävinä tapahtumasarjoina, joissa vastapenger ensin painuu. Tämä taas pakottaa pengermateriaalia liikkeelle kapeaan uraan rakennetulla uralla sekä tämän jälkeen itse raiteen alta lähtee materiaalia liikkeelle.



Kuva 6.7. Arvio kokonaisvarmuuden kehittymisestä tutkimuksen vastapengerkohteessa turpeella

Kuvassa 6.7 on vielä esitettyä edellisiä asioita kokonaisvarmuuden kannalta tarkasteltuna. Vastapenkereen rakentamisen jälkeen huokosylipaineet kasvavat merkittävän suuriksi ja vastapenger painuu turpeeseen merkittävän paljon ensimmäisten kuukausien aikana. Tällöin myös rakentamisen jälkeinen kokonaisvarmuus on pienimmillään, koska vastapenkereiden alla on huomattavasti huokosylipaineita ja vastapenkereet ovat jo osittain painuneet vedenpinnan alle (olettaen, että vedenpinta on hyvin lähellä maanpintaa). Turpeen lujuus kuitenkin kasvaa tehokkaasti vastapenkereen ulkoisesta kuormituksesta suuren kitkakulmansa ansiosta. Tällöin turve kokoonpuristuu tiiviiksi massaksi ja sen vedenläpäisevyys pienenee merkittävästi. Ajan kuluessa kuitenkin huokosylipaineet jakautuvat maaperään ja kokonaisvarmuus kasvaa.

Tämän johdosta turvepenkereillä stabiliteetin kannalta merkittäväksi tuleekin tieto aikaisemmista vastapenkereistä ja niiden korkeuksista. Turpeen osalta lyhyillä ja matalilla vastapenkereillä kasvatetaan kevyessä turpeessa merkittävästi pystyjännityksiä, näin konsolidaation myötä turve myös lujittuu tehokkaasti pienellä jännityksen lisäyksellä. Seuraavissa kuvissa 6.8, 6.9 ja 6.10 on havainnollistettu asiaa. Tällöin oleellista stabiliteetin parantamisen osalta onkin selvittää aluksi aikaisempien vastapenkereiden korkeus ja leveys.

Vastapenkereiden paksuuden selvitettyä voidaan arvioida suorassa leikkauksessa olevan turpeen lujittumista. Suoran leikkauksen (DSS) alueen lujuus kasvaa merkittävästi tehokkaan pystyjännityksen kasvaessa vastapenkereiden alla. Kuitenkin ilman mallinnettuja vastapenkereitäkin lujuus ratapenkereen alla on merkittävän suuri suuren kitkakulman ja tehokkaan pystyjännityksen ansiosta. Passiivipuolen erittäin alhaisella lujuudella ei ole tällöin enää suurta merkitystä, kun kohteen aikaisemmat vastapenkereet ulottuvat tarpeeksi penkereen reunoille.

Aktiivipuolen suuren lujuuden mobilisoituminen vaatii jo aiemmin kolmiakσιαalikokeiden yhteydessä mainitun merkittävän suuren kokoonpuristuman. Käytännössä

tällöin pitäisi selvittää, kuinka sortuminen tapahtuu turpeella. Aiheutuuko kohteessa vain äkillinen painuminen vai laaja sortuma?

Massastabiloidulla alueella kilometrillä 320 voitiin kuitenkin havaita, että penkereen reunoilla siirtymät ja siirtymänopeus olivat huomattavasti pienemmät verrattaessa vastapengerkohteisiin. Massastabiloinnilla oli kuitenkin aiheutettu toisessa turvekohdeessa siirtymiä erilaisen pohjamaan geometrian takia. Massastabiloinnissa on omat heikkoutensa, kuten esimerkiksi työnaikaiset ongelmat lujuuden kanssa sekä massansekoittumiseen liittyvät ongelmat.

6.2.6.3 Turpeen suljettu leikkauslujuus vanhan ratapenkereen alla

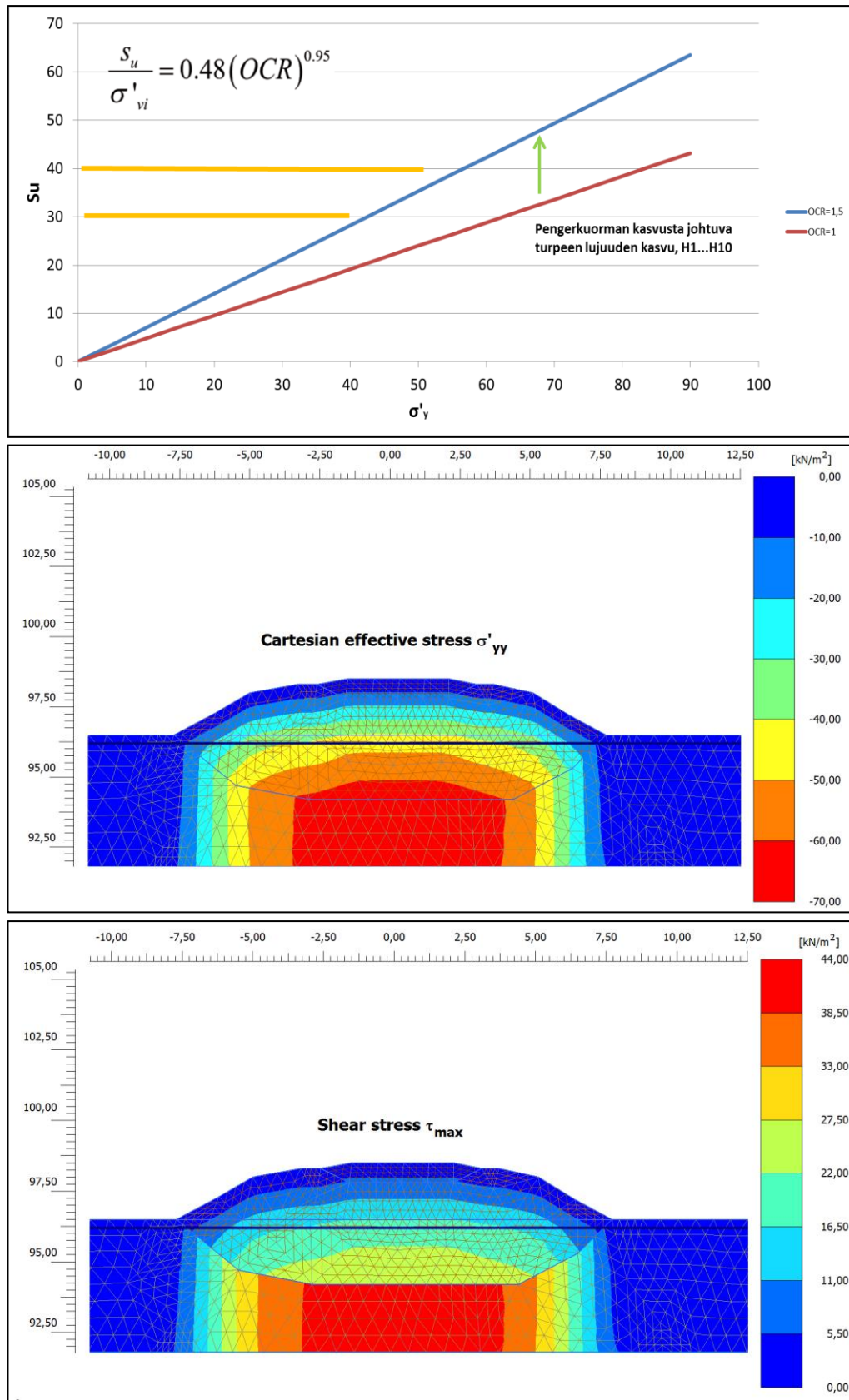
Aikaisemmin esitettyjen laboratorikokeiden perusteella turpeella olisi hyödyllisempää lujuuden arvioinnissa käyttää tehokkaita jännityksiä, koska kohteen laboratorikokeiden ja siipikirausten perusteella turpeen lujuutta oli vaikea arvioida tarkasti. Kuvissa 6.8, 6.9 ja 6.10 on havainnollistettu laskettuja tehokkaita pystyjännityksiä sekä maksimileikkausjännityksiä turvepenkereellä kolmessa eri tapauksessa. Ensimmäisessä kuvassa 6.8 on turvepenger ilman simuloituja vastapenkereitä ja kuvassa 6.9 on vastaavasti lyhyillä vastapenkereillä sekä kuvassa 6.10 vielä korotetulla pengerkorkeudella esitettynä.

Lujuus kasvaa penkereen alla aktiivipuolella merkittävän suureksi tällöin kuvan 6.10 tapauksessa. Lujuus myös kasvaa erityisesti arvioidussa liukupinnan suorassa leikkauksessa. Tässä esimerkissä havainnollistuu hyvin kokoonpuristuneen turpeen luonne. Kuvassa 6.8 ylhäällä on vielä esitetty erikseen Hollannissa suoritetuissa DSS – laitteistossa kokeille kokemusperäisesti määritetty kaava 6.1 (Zwanenburg). Esitetyn kaavan sekä tutkimuksen laboratorikokeiden perusteella on tällöin pyritty esittämään vielä kuvissa lujuuksia erilaisten vanhojen ratapenkereiden alla. Tässä oletetaan kuitenkin, että vanhan ratapenkereen alla turpeessa olisi kuitujen takia lujuutta kasvattava vaikutus, etenkin maatuneisuusasteen H1-H5 turpeilla. Tällöin ei ole kyse välttämättä ylikonsolidoitumisesta vaan kuitujen kokoonpuristuneena yhteen ”liimautumisesta”.

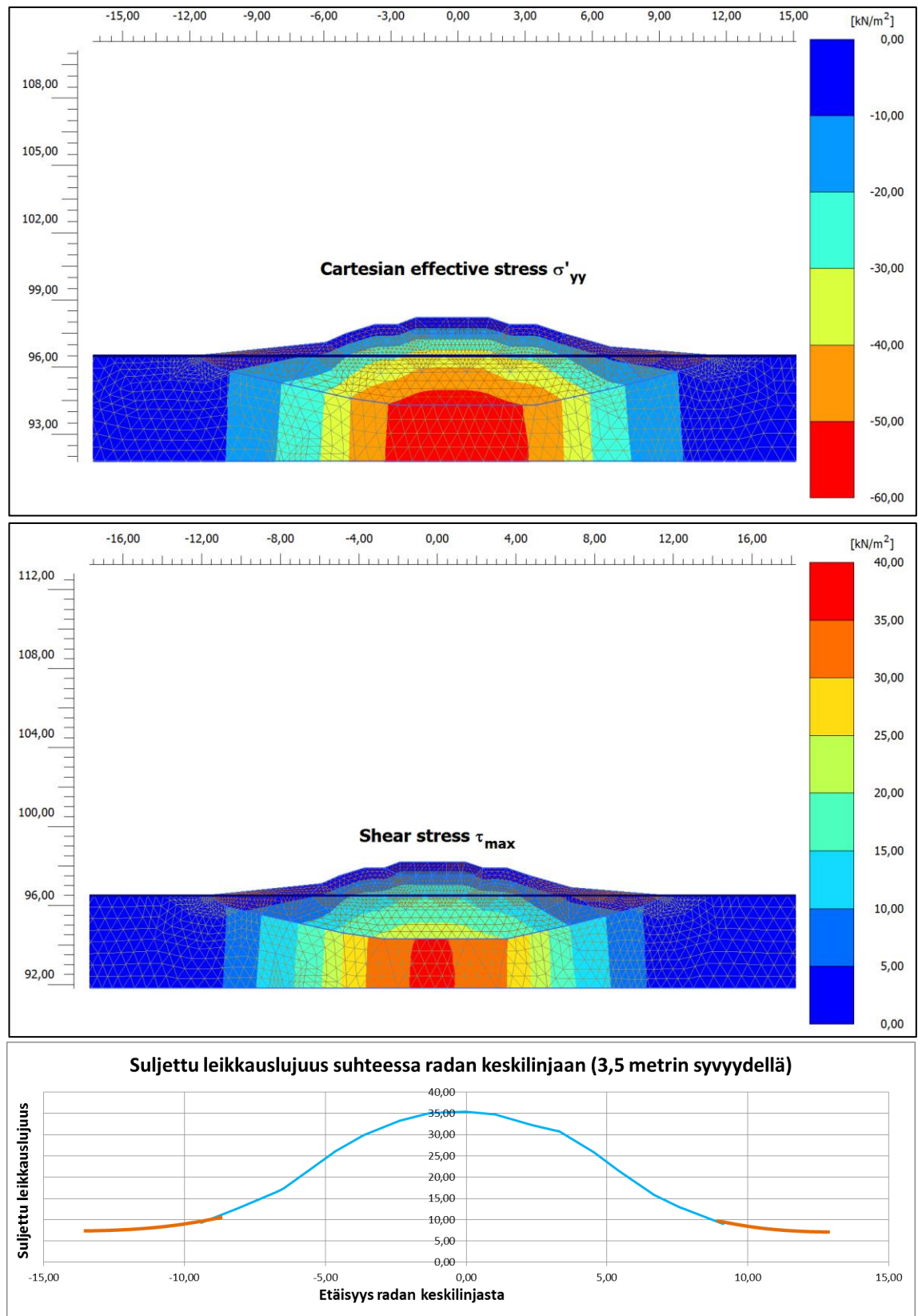
$$S_u = 0,48 * \sigma'_y * OCR^{0,95} \quad (6.1)$$

missä

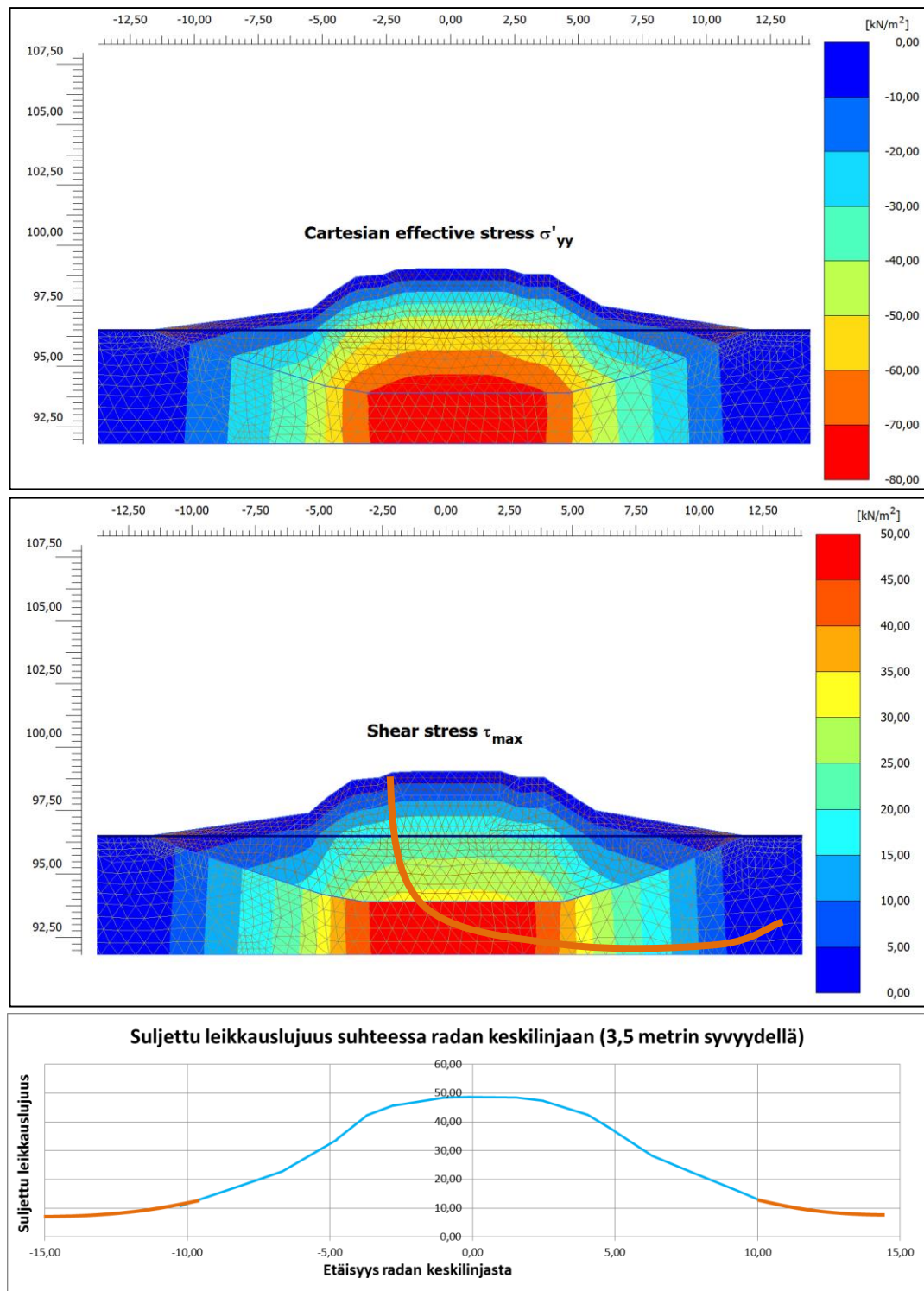
S_u	on suljettu leikkauslujuus
σ'_y	on tehokas pystyjännitys
OCR	on ylikonsolidoitumisaste



Kuva 6.8. Ylhäällä on esitetty Hollannissa kokemukseräisesti määritetty kaava pystyjännityksen ja S_u :n välille (Zwanenburg). Keskellä ja alhaalla on esitetty tilanne painuneen turvepenkereen alla. Näissä kuvissa oletetaan, ettei penkereen reunoilla ei ole ollenkaan rakennettu vastapenkereitä.



Kuva 6.9. Havainnollistus turvepenkereen tehokkaista pystyjännityksistä sekä maksimi-leikkausjännityksistä. Tähän kuvaan on edellisen kuvan lisäksi mallinnettu lyhyet ja hieman painuneet vastapenkereet. Tässä esimerkissä pengerkorkeus on noin 3,5 metriä, josta noin kaksi metriä vedenpinnan alapuolella.

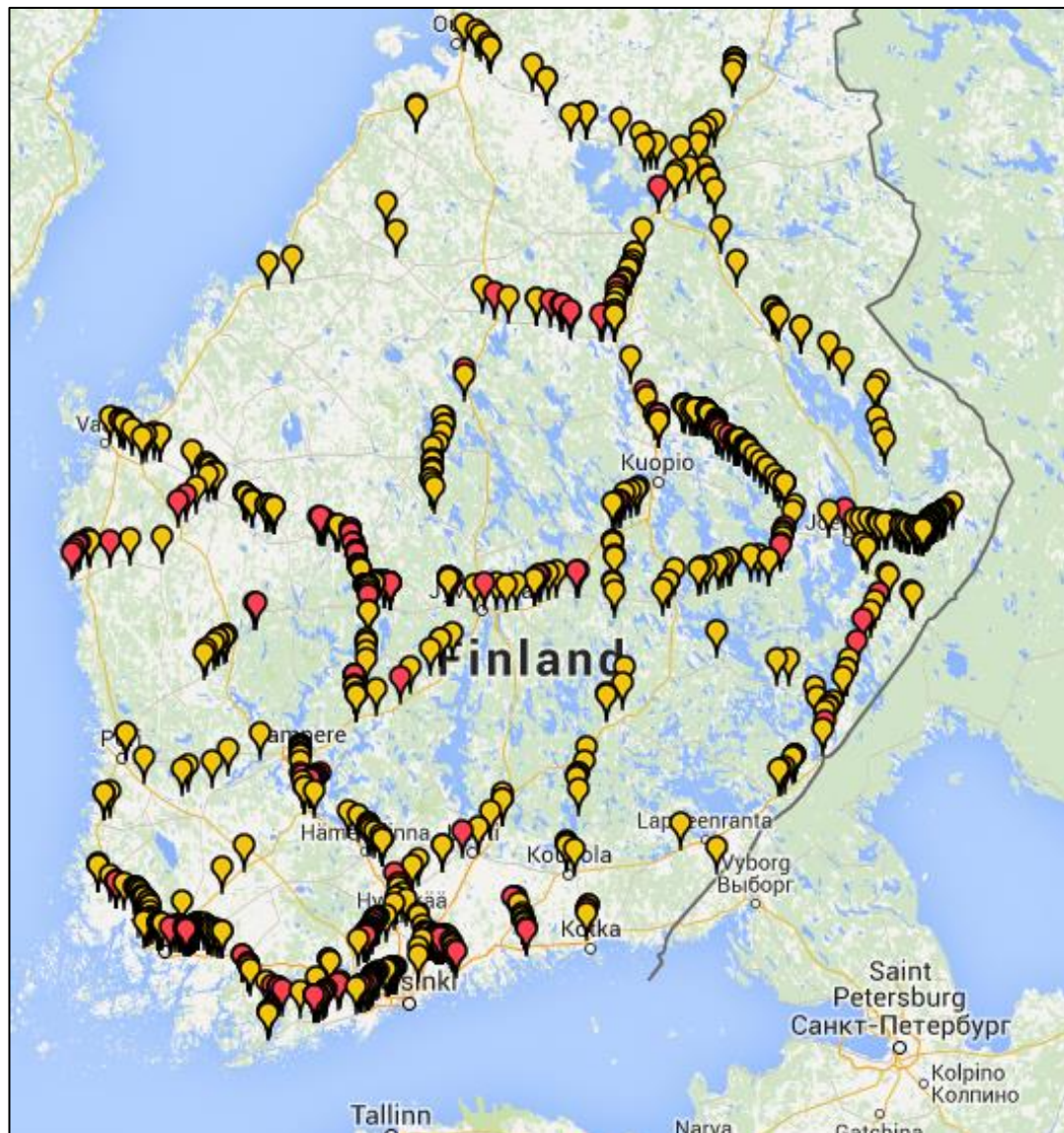


Kuva 6.10. Havainnollistus painuneen turvepenkereen maksimileikkausjännityksistä korkealla penkereellä. Näin suurilla pystykuormilla olisi aikaisempien laboratoriotekojen perusteella syytä käyttää penkereen alla yli 60 asteen kitkakulmia. Kuvaan on vielä havainnollistettu oletettu liukupinta. Merkittävästi kokoonpuristuneen ja lujittuneen turvepenkereen liukupinnan muodostuminen olisi tässä tapauksessa epätodennäköistä. Tilanteessa on myös todennäköistä, että kuitujen dominoiva vaikutus kasvaa pystyjännityksen kasvaessa etenkin turpeilla, joiden maatuneisuusaste on H1...H5.

6.3 Jatkotutkimusehdotukset

6.3.1 Myötöpehmenevien paikkojen riskikartta

RATUS kohteita kokonaisvarmuuden mukaan jaoteltuna on rataverkolla 146 kohdetta, joiden kokonaisvarmuus on alle 1,0 ja 670 kohdetta, joiden kokonaisvarmuus on välillä 1,0...1,3 (RATUS 2014). Kuvassa 6.11 on esitetty kohteita Suomen rataverkolla. Pehmeikkötietoja analysoimalla voitaisiin luoda suuntaa antava riskikartta Suomen rataverkosta jaottelemalla kohteet kategorioihin. Kategorioihin luokittelu mahdollistaa esimerkiksi inklinometrien sijoittamisen paremmin sekä kohteiden korjausjärjestyksen priorisoinnissa. Kategorioita voi myös täydentää jatkossa tarpeen mukaan esimerkiksi penkerkorkeustietojen avulla sekä muiden kriittisyyttä kasvattavien tai pienentävien seikkojen perusteella.



Kuva 6.11. Havainnollistava kuva Suomen rataverkon RATUS kohteista, punaisella on merkitty $F < 1,0$ ja keltaisella $F < 1,3$. (RATUS, Google)

Ehdotettu alustava luokittelu:

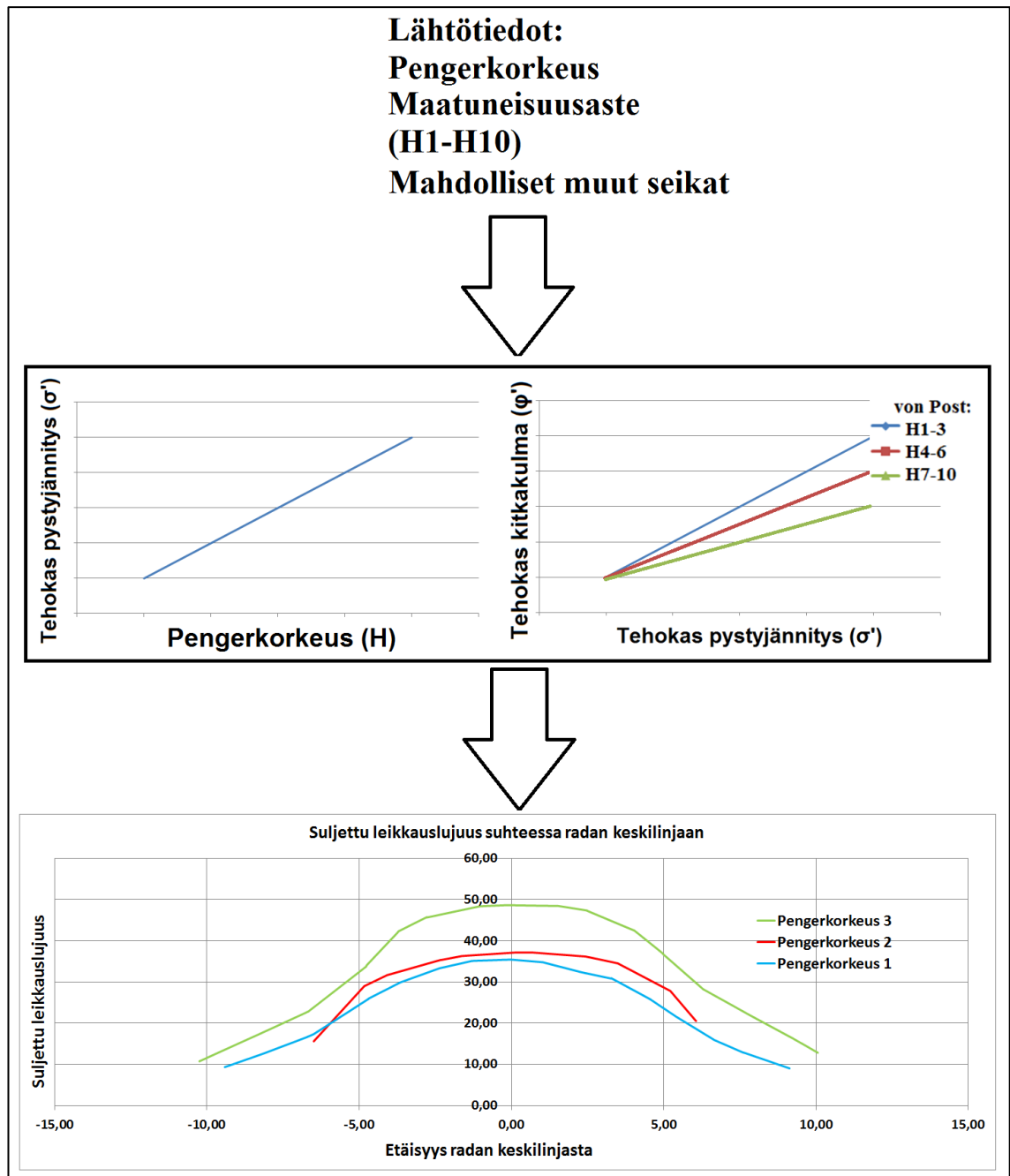
1. Sensitiiviset, myötöpehmenevät pohjamaat
 - A. Sensitiiviset sekä myötöpehmenevät savet ovat riskialttiimpia äkillisille ja dramaattisille sortumille.
 - B. Tällaisten kohteiden mittaaminen inklinometrein voi olla haasteellisempaa, koska reagointiaika lyhenee.
 - C. Erittäin sensitiivisiä savia löytyy muun muassa rannikkojen läheisyydestä, kuten esimerkiksi Rantaradan pehmeiköiltä.
2. Vähän sensitiiviset, mahdollisesti myötöpehmenevät pohjamaat
 - A. Näiden kohteiden korjaaminen ei ole yhtä kiireistä sekä kohteiden savilla sietokyky deformaatioita vastaan on parempi.
 - B. Tämän kategorian kohteisiin voidaan hyödyntää inklinometrimittausta ja hyödyntää aikaisemmin esitettyä raja-arvotaulukkoa 6.4.
 - C. Turpeen osalta lujuuden määrittelyssä tarvitaan käytännössä lisätutkimusta, mutta turpeen kitkakulmat ovat voimakkaasti riippuvaisia pengerkuormasta edeltävän kappaleen mukaisesti.
3. Todennäköisesti lievästi dilatoivat pohjamaat
 - A. Tämä kategoria käsittää savet joiden vesipitoisuus on alle 50 % ja savipitoisuus alle 60 %. Liejuisten savien kohdalla kategorisointi jouduttaisiin arvioimaan muilla tavoin.
 - B. Tämän kategorian mittaaminen inklinometriä avulla on jo paljon varmempaa. Toisaalta näissä kohteissa myös sortumariski putoaa huomattavasti, koska koko liukupinnan muodostama sortuma vaatii huomattavasti dramaattisemmat deformaatiot tai mahdollisen lujuuden äkillisen alenemisen.

6.3.2 Maatuneisuuden ja pengerkorkeuden avulla määritettävä arvio turpeen lujuudesta

Turpeen osalta mahdollinen jatkotutkittava asia voisi olla turpeen maatuneisuusasteen ja vesipitoisuuden yhteys turpeen lujuuteen aktiivipuolella. Tämä arvio suoritettaisiin erilaisilla pengerkorkeuksilla eri maatuneisuusasteen turpeissa. Vesipitoisuus laskee myös lujuutta kuormituksen vaikutuksesta ja tällä on näin vaikutusta itse turpeen partikkelien kitkakulmaan sekä kuitujen yhteen ”liimautumiseen” kokoonpuristuneena. Kevyellä turpeella maatuneisuudella on vaikutusta aktiivipuolen lujuuteen ja tätä kautta itse kohteen kokonaisvarmuuteen. Käytännössä on mahdollista, että raakaturpeilla lujuus kuormitettuna voi olla suurempi kuin vastaavasti lähes täysin maatuneilla turpeilla. Maatuneisuusaste turpeella kuitenkin saattaa vaihdella samalla alueella paljon, mutta samalla voidaan myös tutkia, kuinka paljon asialla itse asiassa on vaikutusta lujuuteen.

Myöhemmin tämä menettely voitaisiin yhdistää aiempaan paikkojen riskikartoitukseen, kun turpeen lujuudesta ymmärretään enemmän. Tällöin kohteet, joissa mahdolliset turpeen kitkakulmat ovat merkittävän suuret, saavat pienemmän prioriteetin tarkastelussa. Osassa kohteissa voidaan myös mahdollisesti todeta kokonaisvarmuuden olevan

sen verran hyvä, ettei tarkkailua tarvita ($F > 1,5$). Kuvassa 6.12 on havainnollistettu menetelyn logiikkaa, jossa lähtötietojen maatuneisuusasteen ja pengerkorkeuden avulla voidaan päätellä kitkakulmaa sekä suljettua leikkauslujuutta. Turpeella syntyvää muodonmuutos käyttäytymistä kuormitettuna pitää lisäksi tutkia myöhemmin, jotta voidaan ymmärtää sortumismekanismi paremmin.



Kuva 6.12. Havainnollistus lujuusparametrien määrittämisestä turpeella maatuneisuusasteen ja pengerkorkeuden avulla. Muita mahdollisesti tutkittavia elementtejä on esimerkiksi vesipitoisuus.

6.3.3 Lisätutkimusta vastapenkereiden alta turvekohteissa

Ratapenkereen alta otetuille laboratorionkokeille kolmiakiaalikohteissa saatiin merkittävän suurin kitkakulman tai vastaavasti suljetun leikkauslujuuden arvoja. Tämän johdosta olisi perusteltua suorittaa myös vastapenkereiden alta otetuille näytteille vastaavia kolmiakiaalikohteita pienemmillä sellipaineilla.

Laboratorio- ja kenttäkokeiden suorittaminen kokoonpuristuneelle turpeelle korkean penkereen alta näyttää tuottavan vaihtelevia arvioita turpeen lujuudesta. Tällöin lujuuden arvioiminen korkeille penkereille olisi käytännöllisempää tulkita esimerkiksi tehokkaiden jännitysten avulla. Vastaavasti vastapenkereiden alla sekä luonnontilaisena lujuuden määrittäminen voi kenttätutkimusten ja laboratorionkokeiden avulla olla mahdollista maaperässä, jossa leikkaantumisen tapahtuu helpommin.

6.3.4 Turvepenkereellä suoritettava koekuormitus

Turvepenkereillä on rekisteröity hyvin vähän tapahtuneita penkereen sortumia (Mansikkamäki). Käytännössä on mahdollista, että sortumat eivät ole tapahtuneet yhtä draaatisesti kuin vastaavilla savipenkereillä. Turpeen merkittävän suuren kitkakulman ansiosta on mahdollista, että sortuma ei pääse usein turpeella tapahtumaan vaan tilanteessa syntyy pienimuotoinen äkillinen painuma, jonka seurauksena turve kokoonpuristuu entisestään ja kuidut asettuvat vielä tiiviimmin yhteen sekä lujuus kasvaa. Tällöin mahdollisesti sortumaan johtavia deformaatioita reuna-alueilla ei vastaavasti pääse syntymään.

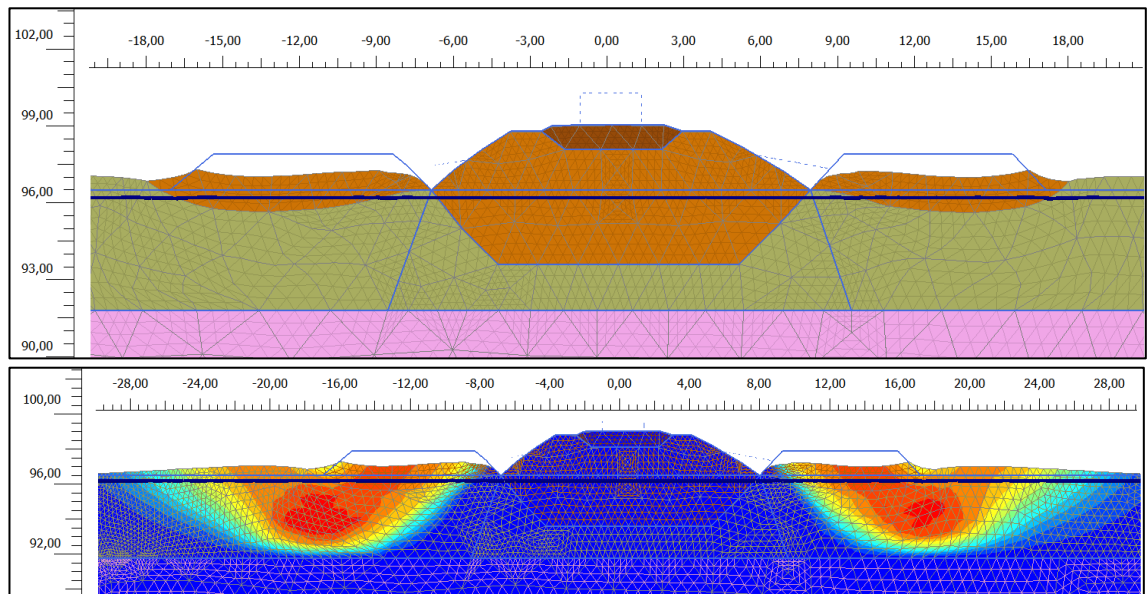
Turvepenkereet ovat usein hieman korkeampia ja leveämpiä kuin vastaavat savipenkereet. Tämä johtuu käytännössä turpeessa tapahtuneesta konsolidaatiosta ja materiaalin leviämisen ympäröivään maaperään, mikä on pakottanut penkereiden progressiiviseen korottamiseen. Tällöin myös turve on alueella lujittunut tehokkaammin kuin vastaavilla savipenkereillä. Turvealueet ovat myös pääosin tasaisella maaston geometrialla, jossa ei toispuoleisesta vaakapaineesta synny lisäkuormitusta ongelmatilanteissa. Koska turpeen sortumismekanismia ei tunnetta kovin hyvin, olisi perusteltua suorittaa jonkinlainen lyhytaikainen koekuormitus. Koekuormana käytettäisiin siirrettävää kuormaa, joka voidaan tarvittaessa poistaa alueelta. Ennen koetta tietenkin suoritettaisiin kohteesta kattavasti laboratorionkokeita ja kokeen aikana erinäisiä mittauksia kuten sivusiirtymä, painuma ja huokosvedenpaine.

6.3.5 Turpeella vastapenkereiden rakentaminen irti ratapenkereestä

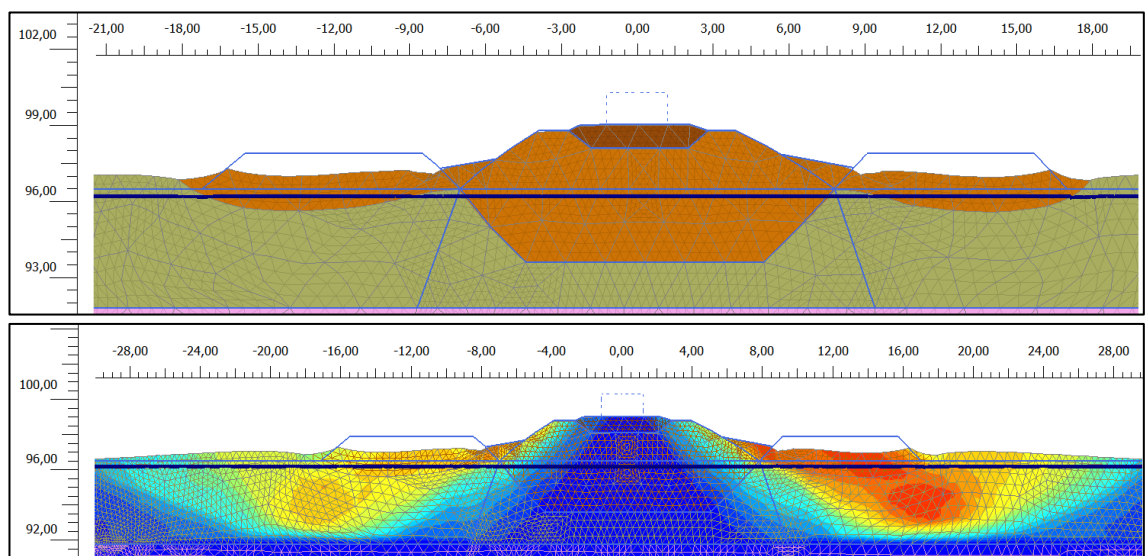
Yhtenä keinona ratapenkereiden ongelmalliseen kunnossapitoon vastapengerkohteissa voisi olla vastapenkereiden rakentaminen irralleen itse ratapenkereestä. Tällöin deformaatioiden vaikutus aiheuttaa raiteissa mahdollisimman vähän painumaa ja saadaan reuna-alueiden turvetta lujitettua sekä parannettua kokonaisvarmuutta. Kuvassa 6.13 on esitetty kuva edellä mainitusta. Tällöin menetetään vastapenkereiden ratapenkereiden helmoja tukeva vaikutus, mutta saavutetaan mahdollisesti kustannussäästöjä rakentami-

sen jälkeisestä kunnossapidosta. Ongelmia tilanteessa voi kuitenkin tulla kuivatuksen hoitamisessa kuvan 6.13 kaltaisessa tapauksessa.

Kuvassa 6.14 on vastaavasti kahdessa vaiheessa rakennettavat vastapenkereet. Tällöin vastapenkereen ja ratapenkereen väliin jäävä alue täytetään viimeisenä, jolloin itse ratapenkereessä sekä raiteen alla syntyvät deformaatiot olisivat mahdollisimman pienet.



Kuva 6.13. Vastapenkereiden rakentaminen irti ratapenkereestä (vaihe 1)



Kuva 6.14. Vastapenkereiden rakentaminen irti ratapenkereestä (vaihe 2). Kuvan tapaan rakentamalla vastapenkereet aluksi kauemmaksi ratapenkereestä voidaan mahdollisesti vähentää myöhempää kunnossapidon tarvetta ja raiteen alapuolella syntyviä deformaatioita. Toisaalta vastapenkereet voidaan myös rakentaa kokonaan irti ratapenkereestä (vaiheen 1 kaltaisesti), mutta tällöin joudutaan kuivatus miettimään uusiksi.

LÄHTEET

Abramson, L et al. 2002. Slope stability and stabilization methods. New York, Yhdysvallat. John Wiley & Sons, Inc. 712 s. ISBN 0-471-38493-3.

Alanen, J. 2013. Pohjaveden alenemisesta aiheutuvien painumien mallintaminen pehmeikkökohteissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Espoo. Viitattu [05.05.2014]. Saatavissa: http://civil.aalto.fi/fi/research/geoengineering/soil/theses/masters/d_janika_alanen.pdf

Badv, K. & Sayadian T. 2011. Physical and geotechnical properties of Urmia peat. 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference. Viitattu [17.09.2014]. Saatavissa: <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper1004.pdf>

Brinkgreve, R.B.J. Engin E. & Swolfs W.M. 2012. Plaxis Manuals. Viitattu [15.05.2014]. Saatavissa: <http://www.plaxis.nl/plaxis2d/manuals/>

Bäcklund, J. Inklinometrikohteisiin liittyvä lisämateriaali.

Carlsten, P. Munro, R. Pyhähuhta, M. Sigursteinsson, H. & Zweifel, G. Roadex E-learning. Kurssi 3, Turpeen päälle rakennetut tiet. Viitattu [22.04.2014]. Saatavissa: <http://www.roadex.org/elearning/index.php/e-learning/fi/e-learning-fi>

Culloch, M. & Munro, R. 2006. Turpeesta aiheutuvien ongelmien hallinta vähäliikenteisillä teillä, tiivistelmä. Viitattu [22.04.2014]. Saatavissa: http://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/01/Roads-on-Peat_Finnish.pdf

Digitilt Classic Inclinometer System (DCIS). Inklinometrimittauslaitteisto. Viitattu [23.05.2014]. Saatavissa: <http://www.slopeindicator.com/instruments/inclin-digitilt-classic.html>

Digitilt Inclinometer Probe. 2011. Bias-Shift Errors. Viitattu [28.05.2014]. Saatavissa: <http://www.slopeindicator.com/pdf/documents/course%20material/bias-shift%20error.pdf>

Digitilt Inclinometer Probe. 2011. Digitilt Inclinometer Probe Manual, 11/2011. Durham Geo-Enterprises. Viitattu [28.05.2014]. Saatavissa: <http://www.slopeindicator.com/pdf/manuals/digitilt-probe.pdf>

Gardemeister, R. Korhonen, K-H. & Tammirinne, R. Geotekninen maaluokitus. 1974. VTT, Espoo. Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 14. 31 s. Viitattu [25.04.2014]. Saatavissa: <http://www.getunderground.fi/getfile.ashx?cid=104241&cc=3&refid=3>

Geo-piirustukset. Ratapiirustusarkisto. Palvelun tuottamisesta vastaa VR Track Oy. Lisätietoja:

http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/aineistopalvelut/asiakirja_piirustusarkisto/Ratapiirustusarkisto

Geotekniseen suunnitteluun liittyviä perusteita, luento 2. Rak-50.3133 Pohjarakentaminen ja pohjanvahvistus. Aalto-yliopisto, Espoo. 27 s. Viitattu [24.04.2014]. Saatavissa: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-50.3133/luennot/Rak-50_3133_luento2.pdf

Grimstad, G. Degago Abate, S. Nordal, S. Karstunen M. 2010. Modeling creep and rate effects in structured anisotropic soft clays. Tutkimusraportti, Acta Geotechnica. 13 s.

Hakala, S. 2014. Tampere-Seinäjoki. Nopeuden 200 km/h noston estävät pehmeiköt ja geometriakohteet Geo- ja ratatekninen selvitys nopeuden noston esteiden poistamiseksi. Raportti.

Hakala, S. Inklinometrikohteisiin liittyvä lisämateriaali.

Hayashi, H. Nishimoto, S. & Yamanashi T. 2014. Deformation method of input parameters for elasto-plastic FE analysis of peat ground. Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2014) – editors: Hicks, Brinkgreve & Rohe.

Hayashi, H. Yamazoe, N. Mitachi, T. Tanaka & H. Nishimoto, S. 2012. Coefficient of earth pressure at rest for normally and overconsolidated peat ground in Hokkaido area. The Japanese Geotechnical Society. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080612000352>

Heikkilä, J. Kalliainen, A. Mäkelä, E. Lilja, H. & Salo, P. 2011. NCCI 7 ja RATO3, koulutustilaisuus. Liikennevirasto. Luentokalvot. [ZIP] Viitattu [22.04.2014]. Saatavissa: <http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/BE540E6E973C26F4E040B40A1A011B28>

Heikkilä, J. Kivikoski, H. & Törnqvist, J. 2008. Ratatekniset ohjeet, osa 3, koulutustilaisuus. Viitattu [22.04.2014]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rato_3_koulutusaineisto.pdf

Huat, B. Prasad, A. Asadi, A & Kazemian, S. 2014. Geotechnics of Organic Soils and Peat. Taylor & Francis Group, London, UK. 250 s.

Hunter, G & Fell, R. 2003. Prediction of impending failure of embankments on soft ground. Canadian Geotechnical Journal. 10s.

Iivonen, S. 2008. Ympäristö turpeet ja niiden käyttö. Ruralia-instituutti, Helsinki. 64 s. Viitattu [28.04.2014]. Saatavissa:

<http://www.helsinki.fi/ruralia/julkaisut/pdf/Raportteja32.pdf>

Inklinometrien seurantakortit. Inklinometrit 2014. Seurantakorteista vastaa VR Track Oy. Saatavissa: <http://ratadata.fi/>

ISO-maaluokituksen soveltamisohje Suomessa. 2012. Suomen geoteknillinen yhdistys (SGY). 25 s. Viitattu [24.04.2014]. Saatavissa:

<http://www.getunderground.fi/getfile.ashx?cid=104241&cc=3&refid=1>

Jaakkonen, J. 2013. Osavarmuus- ja kokonaisvarmuusmenettelyn vaikutus vanhojen kriittisten ratapenkereiden laskennalliseen varmuustasoon. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Espoo. Viitattu [15.05.2014]. Saatavissa:

http://civil.aalto.fi/fi/research/geoengineering/soil/theses/masters/d_juha_jaakkonen.pdf

Karstunen, M. Krenn, H. Wheeler, S.J. Koskinen, M & Zentar, R. 2005. Effect of Anisotropy and Destructuration on the Behavior of Murro Test Embankment. Viitattu [4.7.2014]. Saatavissa: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-50.3149/lisatty7742/Rak-50_3149_karstunen_et_al._2005_.2005_.pdf

Kolisoja, P. & Brecciaroli, F. 2004. Stabiilitteiltään kriittiset ratapenkereet. Ratahallintokeskus, Helsinki. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 8/2004. 107 s. Viitattu [23.05.2014]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_2004-a8_stabiilitteiltaan_kriittiset_web.pdf

Korhonen K-H et al. 1985. RIL 157-1 Geomekaniikka 1. Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki. 479 s. ISBN 951-758-086-X.

Korhonen K-H et al. 1990. RIL-157-2 Geomekaniikka 2. Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki, 422 s.

Korhonen, K-H. Lojander, M & Karstunen, M. 1993. Pehmeikölle maan varaan rakennettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat. Geokeskus, Helsinki. Viitattu [14.05.2014]. Saatavissa:

http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/0807_pehmeikkopenkereen_geotekniset_laskelmat.pdf

Koskinen, M. Murrin mittauksiin liittyvä lisämateriaali.

Laaksonen, S. 2014. Saven muodonmuutosominaisuuksien määrittämenetelmien ja – laitteiston kehittäminen. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Espoo. Viitattu [05.05.2014]. Saatavissa:

http://civil.aalto.fi/research/geoengineering/soil/theses/masters/d_samuli_laaksonen.pdf

Lacasse S. 2013. Protecting society from landslides – the role of geotechnical engineering. 8th Terzaghi oration. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris. Viitattu [12.05.2014]. Saatavissa:

<http://www.geotech-fr.org/sites/default/files/congres/cimsg/15.pdf>

Lehtonen, V. 2010. Ratapenkereen sorrutuskokeen instrumentointi ja analysointi. Liikennevirasto, Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2010. 150 s. Viitattu [23.05.2014]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2010-25_ratapenkereen_sorrutuskokeen_web.pdf

Lehtonen, V. Mansikkamäki, J & Repo, T. 2011. MPR-5010 Maamekaniikka, TTY. Luentokalvot.

Leroueil, S. Magnan, J-P. & Tavenas, F. 1990. Embankments on soft clays. Ellis Horwood Limited, England. 360 s.

Long, M. 2005. Review of peat strength, peat characterization and constitutive modeling of peat with reference to landslides. Studia Geotechnica et Mechanica. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10197/4898>

Luomala, H. 2009. Ratapenkereiden monitorointi. Liikennevirasto, Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. 85 s. Viitattu [23.05.2014]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2010-22_ratapenkereiden_monitorointi_web.pdf

Länsivaara, T. 2011. Stabiliateetilaskenta osa 1 & 2. Luentokalvot, TTY. Osa 1 13s. & Osa 2 32.s.

Länsivaara, T. Lehtonen, V & Mansikkamäki, J. 2011. Failure induced pore pressure, experimental and analysis. TTY, Tampere. Pan-Am CGS Geotechnical conference paper.

Länsivaara, T. Mansikkamäki, J. Hakala, S. Mäkelä, E. & Panu, T. 2014. Ratapenkereiden stabiileetin riskiarvioselvitys (STARI). STARI, 1.kokousmuistio.

Machan, G. & Bennett, V. 2008. Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects. Transportation research circular E-C129. Transportation Research Board, Washington D.C. 92s. Viitattu [23.05.2014]. Saatavissa: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec129.pdf>

Mansikkamäki, J. 2009. Olemassa olevien ratapenkereiden stabiliteetin laskenta elementtimenetelmällä. RHK A9/2009, Helsinki. Viitattu [15.05.2014]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/idcprod/groups/public/@1912/@web/@p/documents/liit/p041264.pdf>

Mansour, M. Morgenstern, N & Martin D. 2010. Expected damage from displacement of slow-moving slides. Viitattu [4.7.2014]. Saatavissa: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10346-010-0227-7>

Mikkelsen, P.E. 2003. Advances in Inclinometer Data Analysis. Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM 2003, Oslo, Norja. Saatavissa: <http://www.slopeindicator.com/pdf/papers/advances-in-data-analysis.pdf>

Mikkelsen, P.E. 2007. Inclinometer Data & Recognition of System Errors. Saatavilla: <http://www.slopeindicator.com/pdf/papers/mikkelsen-inclinometer-errors.pdf>

Nurmikolu, A. 2011. Routa ratarakenteissa. Rak-50.4101 Georakentamisen jatkokurssi. Aalto-yliopisto, Espoo. Viitattu [05.05.2014]. Saatavissa: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-50.4101/materiaali/Rak-50_4101_antti_nurmikolu-routa_ratarakenteissa.pdf

Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. 2005. Ratahallintokeskuksen julkaisu B 15 (RHK B15). Ratahallintokeskus, Helsinki. 39 s. Viitattu [23.04.2014]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_b15_radn_stabiliteetin_laskenta.pdf

Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. 2006. Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta aineisto. Ratahallintokeskuksen julkaisu A10/2006, Helsinki. Viitattu [22.04.2014]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_2006-a10_radn_stabiliteetin_1_web.pdf

Ramalho-Ortigao, J.A. ASCE, M & Werneck, M. Lacerda, W. 1983. Embankment Failure on Clay near Rio de Janeiro. Viitattu [13.8.2014]. Saatavissa: <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281983%29109%3A11%281460%29>

Rantamäki, M. Jääskeläinen, R & Tammirinne, M. 1979. Geotekniikka. Otatieto, Helsinki. 22. painos. 307 s.

Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RATO). 2002. Osa 11 Radan päällysrakenne. 119 s. Viitattu [16.04.2014] Saatavissa:

http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rato_11_radan_paallysrakenne.pdf

Ratatekniset ohjeet (RATO). 1995. Osa 1 Yleiset perusteet. Helsinki, Ratahallintokeskus. 8 s. Viitattu [16.04.2014] Saatavissa:

http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rato_1_yleiset_perusteet.pdf

Ratatekniset ohjeet (RATO). 2008. Osa 3 Radan rakenne. Helsinki, Ratahallintokeskus. 89 s. Viitattu [16.04.2014]. Saatavissa:

http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rato_3_radan_rakenne.pdf

Ratatietopalvelin – Routakorjaukset / Pehmeikköjen stabiliteetti / Seurantamittaukset. 2014. Viitattu vuoden 2014 aikana. Katseltavissa: <http://ratadata.fi/>

RATUS – Ratojen luokitus. Maanvaraisten pehmeikköjen stabiliteetin selvitys EN-luokituksen mukaisilla kuormilla. Viitattu vuoden 2014 aikana. Katseltavissa:

<http://www.ratus.fi/ratus/>

Rautateiden verkkoselostus 2015. 2013. Liikenneviraston väylätietoja. Helsinki, Liikennevirasto. 170 s. Viitattu [17.04.2014]. Saatavissa:

http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lv_2013-02_rautateiden_verkkoselostus_2015_web.pdf

Ronkainen, N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristö 2/2012. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Viitattu [22.04.2014]. Saatavissa:

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf?sequence=1

Salokangas, J-P. 2008. Ratapenkereen mallinnus ja vakavuuden vertailulaskelmat. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Espoo. Viitattu [06.05.2014]. Saatavissa:

http://civil.aalto.fi/fi/research/geoengineering/soil/theses/masters/d_jukka-pekka_salokangas.pdf

Savikurki, S. 2010. Ratapenkereen stabiliteettiin liittyvät seurantamittaukset ja niiden prosessointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 40/2010. Liikennevirasto, Helsinki. Viitattu [22.04.2014]. Saatavissa:

http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2010-40_ratapenkereen_stabiliteettiin_web.pdf

SGY. 2001. Kairausopas VI. CPTU/Puristinheijarikairaus. Puristin-heijarikairaus.

Stark, T. & Choi, H. 2007. Slope inclinometers for landslides. Springer-Verlag 2008. 12 s. Research paper. Viitattu [23.05.2014]. Saatavissa: <http://tstark.net/wp-content/uploads/2012/10/JP64.pdf>

Tielaitoksen selvityksiä 67/1994. 1994. Maanvarainen tiepenger savikolla. Tielaitos, Helsinki. Viitattu [15.05.2014]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/tiepenger_savikolla.pdf

Tielaitos. 2000. Tierakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset TYLT: Yleiset perusteet – Leikkaukset, kaivannot ja avo-ojarakenteet – Penger- ja kerrosrakenteet. –Lisäykset ja muutokset vuonna 2000. TIEL 2210014-2000. Helsinki. 62 s. Viitattu [23.05.2014]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/lisaykset_yleiset_2000-4000.pdf

Tuominen, A. 2010. Rataverkon luokittelun vertailu kantavuuden mukaan. Helsinki, Liikennevirasto. 72 s. Viitattu [17.04.2014]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2010-21_rataverkon_luokittelun_web.pdf

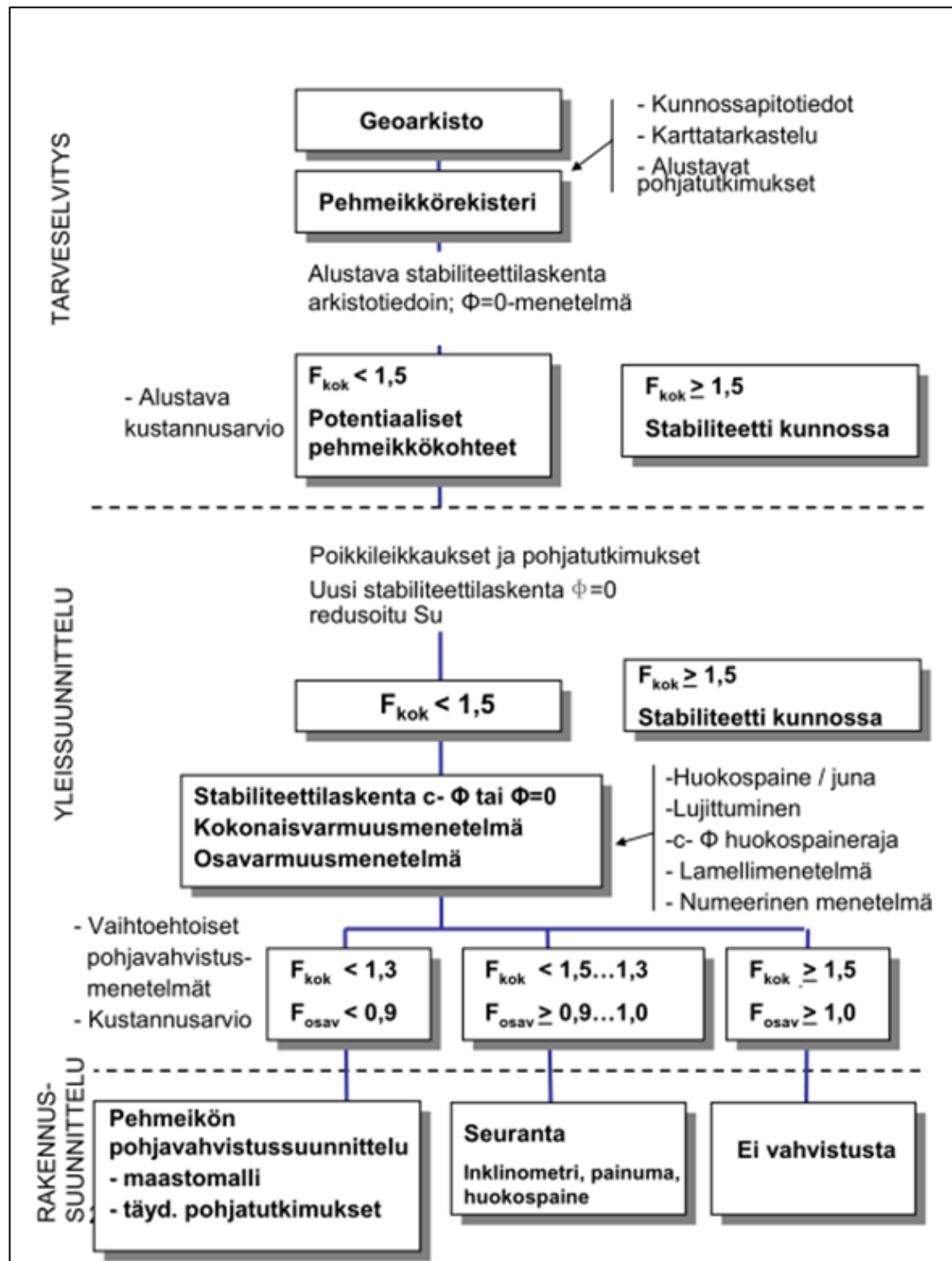
Uotila, A. 2013. Maanvaraisen ratapenkereen toimivuus turvepohjamaalla. Diplomityö, Tampere. TTY. Viitattu [22.04.2014]. Saatavissa: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22034/uotila.pdf>

Viravuori, M. 2013. Saven mekaaninen käyttäytyminen Petikon pehmeiköllä. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Espoo. Viitattu [05.05.2014]. Saatavissa: http://civil.aalto.fi/fi/research/geoengineering/soil/theses/masters/d_matti_viravuori.pdf

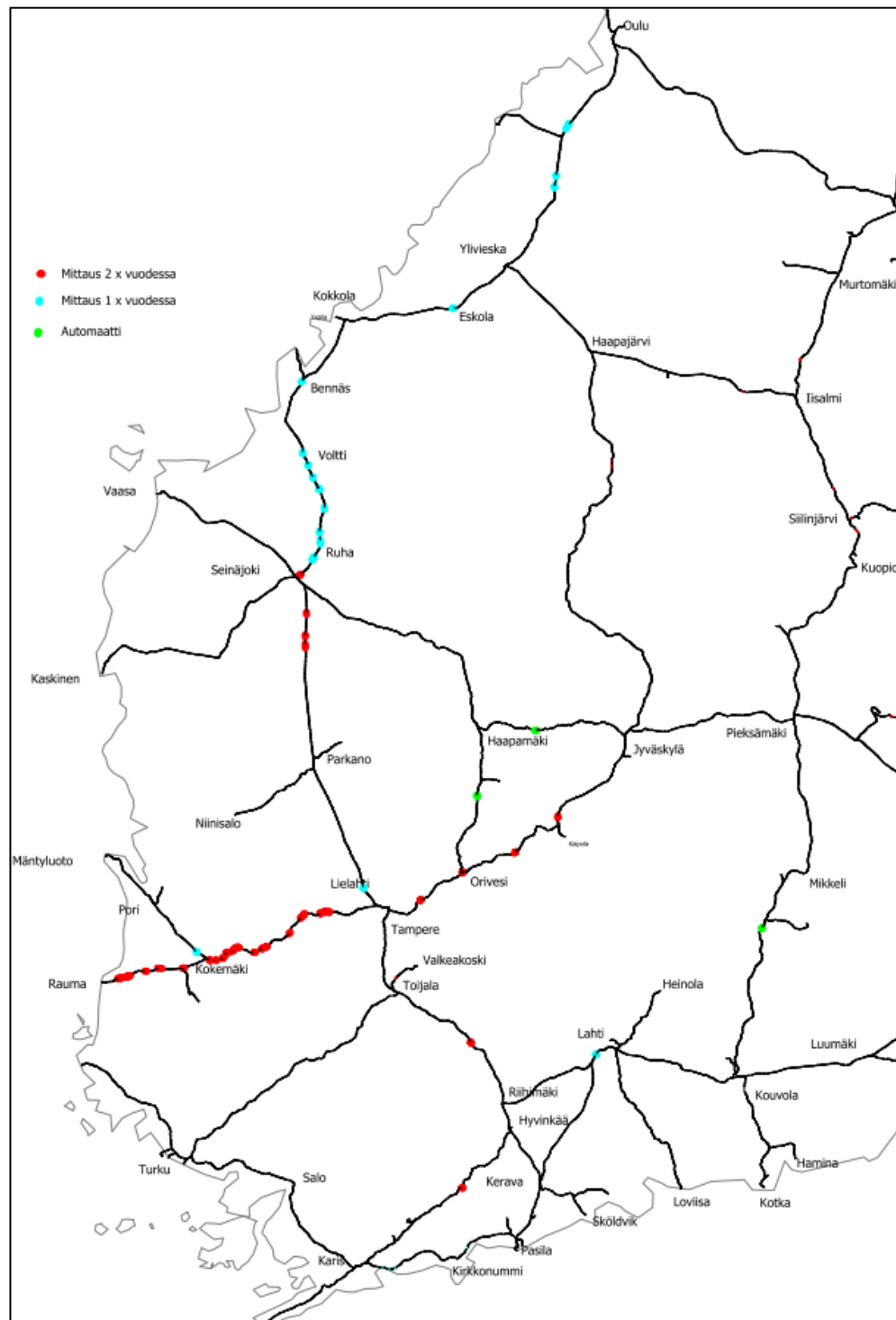
Wood, D.M. 1990. Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics. New York, Yhdysvallat. Cambridge university press. 462 s. ISBN 0-521-33782-8.

Zwanenburg, C. Strength of embankments on peat. Luentokalvot. Saatavissa: <http://www.ntnu.edu/documents/11435961/401058585/07+Strength+of+embankments+on+peat.+Cor+Zwanenburg.pdf/c9cc4630-b285-42c8-81f0-00b4445ecbb7>

LIITE 1: RADAN STABILITEETIN LASKENTA OLEMASSA OLEVAT PENKEREET (RHK B15)



LIITE 2: SEURATTAVAT MANUAALISET INKLINOMETRIPUTKET SUOMEN RATAKARTALLA



LIITE 3: SEURATTAVAT INKLINOMETRIPUTKET

Pohjamaa			RAIS U rataosa	Rataosa	Km+m	Kohteen nimi	Sivumitta		Riskiluokka (I-V)	Siirtymän muoto	Viimeisin maksimi siirtymä [mm]
kuSa	Savi	Turve						m			
Turve kohteet (16)											
	x		003	Tpe-Sk	315+920	Tpe-Sk P86	vas	6	I	Vuuhka	44
	x		003	Tpe-Sk	316+160	Tpe-Sk P86	vas	6	I	Vuuhka	49
	x		003	Tpe-Sk	320+360	Tpe-Sk P90	oik	8	II	Vuuhka	248
	x		003	Tpe-Sk	320+425	Tpe-Sk P90	oik	5	I	Vuuhka	149
	x		003	Tpe-Sk	320+475	Tpe-Sk P90	vas	5	I	Vuuhka	94
	x		003	Tpe-Sk	320+525	Tpe-Sk P90	oik	5	I	Vuuhka	33
	x		003	Tpe-Sk	320+545	Tpe-Sk P90	oik	20	I	Vuuhka	15
	x		003	Tpe-Sk	320+575	Tpe-Sk P90	vas	5	I	Vuuhka	59
	x		003	Tpe-Sk	320+625	Tpe-Sk P90	oik	5	I	Vuuhka	187
	x		003	Tpe-Sk	320+720	Tpe-Sk P90	oik	7,5	I	Vuuhka	285
	x		005	Kv-Fm	267+596	Kotakorpi, P13	oik	10	I/II	Tasaisesti siirtynyt	5
	x		008	Mv-Ela	600+740	P112	oik	4	I	Vuuhka	20
	x		008	Kua-Tja	675+810		vas		I	Ei siirtymä	0
	x		008	Kua-Tja	675+820		oik		I	Ei siirtymä	2
	x		023	Hpk-Jy	330+740	Perälänsuo	vas	5,2			N/A
	x		023	Hpk-Jy	330+780	Perälänsuo	vas	5,2			N/A
Turve ja savi kohteet (25)											
	x	x	003	Ri-Tpe	104+160	Rähimäki-Tampere	oik	3,1	I	Vuuhkamainen	25
	x	x	003	Ri-Tpe	104+260	Rähimäki-Tampere	vas	3,1	I	Vuuhkamainen	12
	x	x	003	Ri-Tpe	104+260	Rähimäki-Tampere	oik	3,1	I	Vuuhkamainen	20
	x	x	003	Tpe-Sk	330+360	P-Louko P91	vas	7	I	Vuuhka	76
	x	x	003	Tpe-Sk	330+600	P-Louko P91	vas	5	I	Yläpäässä pieniä siirtymää	16
	x	x	003	Tpe-Sk	330+980	P-Louko P91	vas	5,5	I	Vuuhkamainen	24
	x	x	008	Sk-Rha	420+680	P2	vas	5,5	I	Vuuhka	15
	x	x	008	Sk-Rha	420+900	P3	vas	5,5	I	Tasaisesti syvyyden mukaan	89
	x	x	008	Rha-Lp	437+100	P19a	vas	3,5	I	Vuuhkamainen	6
	x	x	008	Rha-Lp	438+250	P19b	vas	4,5	I	Vuuhkamainen	7
	x	x	008	Lp-Pnä	462+260	P33	oik	12	I	Ylhäällä siirtymä	13
	x	x	008	Lp-Pnä	462+310	P33	vas	12	I	Ylhäällä siirtymä	20
	x	x	008	Lp-Pnä	516+500	P67	vas	6	I	Ei siirtymä	1
	x	x	008	Lp-Pnä	516+580	P67	vas	6	I	Ei siirtymä	2
	x	x	008	Lp-Pnä	516+680	P67	vas	6	I	Ei siirtymä	1
	x	x	008	Kua-Tja	680+340		vas		I	Ei siirtymä	2
	x	x	008	Kua-Tja	680+340		oik		I	Ei siirtymä	1
	x	x	009	Tpe-Ov	205+900	P18	vas	10	I	Ylhäällä siirtymä	5
	x	x	009	Ov-Jsk	256+860	P71	oik	10	I	Vuuhkamainen	14
	x	x	066	Ov-Hpk	267+950	Kotivionsuo, P19	oik	5	I/IV	Vuuhka	110
	x	x	066	Ov-Hpk	267+070	Kotivionsuo, P19	oik	5	I/V	Vuuhka	250
	x	x	141	Hy-Kr	96+860	Katinhännänsuo	oik	4	I/V	Vuuhka	0
	x	x	141	Hy-Kr	96+862	Katinhännänsuo	oik	8			0
	x	x	342	Kki-Rma	306+680	P15	vas	5	I	Ei siirtymä	-3
	x	x	342	Kki-Rma	307+480	P15	vas	10	I	Ylhäällä siirtymä	13
Savi kohteet (55)											
	x	x	002	Lih-Kki	216+642	P4	oik	4	I	Ei siirtymä	3
	x	x	002	Lih-Kki	218+345	Leukalaut	oik	5,5	N / V	Suurta massaista siirtymää	120
	x	x	002	Lih-Kki	218+400	Leukalaut	oik	3,6	I	Ei siirtymä	1
	x	x	002	Lih-Kki	220+616	P5a	oik	14,5	I	Ei siirtymä	2
	x	x	002	Lih-Kki	228+320	P7	oik	11	I	Vuuhka	4
	x	x	002	Lih-Kki	228+750	P7a	oik	10	I	Ei siirtymä	6
	x	x	002	Lih-Kki	228+900	P7a	vas	6	I	Ei siirtymä	1
	x	x	002	Lih-Kki	228+950	P7a	vas	8	I	Ei siirtymä	2
	x	x	002	Lih-Kki	228+980	P7a	vas	10	I	Ei siirtymä	1
	x	x	002	Lih-Kki	229+780	P8	vas	10	I	Ei siirtymä	0
	x	x	002	Lih-Kki	230+220	P8	vas	9	I	Ei siirtymä	1
	x	x	002	Lih-Kki	230+240	P8	oik	11	I	Tasaisesti syvyyden mukaan	3
	x	x	002	Lih-Kki	240+060	P15	oik	14	I	Pentä siirtymää	6
	x	x	002	Lih-Kki	240+060	P15	vas	7	I	Pentä siirtymää	6
	x	x	002	Lih-Kki	240+145	P15	oik	7,5	I	Ei siirtymä	2
	x	x	002	Lih-Kki	240+200	P15	oik	16	I	Pentä tasaisista siirtymää	16
	x	x	002	Lih-Kki	240+202	P15	oik	7	I	Ei siirtymä	4
	x	x	002	Lih-Kki	253+260	P21	oik	8	I	Keskeltä ja ylhäältä tapinut	3
	x	x	002	Lih-Kki	255+540	P23	vas	5	I	Ei siirtymä	1
	x	x	002	Lih-Kki	259+060	P25	vas	5	I	Ei siirtymä	3
	x	x	002	Lih-Kki	267+460	P32	vas	5	I	Pentä siirtymää ylhäältä	8
	x	x	002	Lih-Kki	268+180	P33	vas	5	I	Ei siirtymä	3
	x	x	002	Lih-Kki	269+600	P35	vas	8	I	Ei siirtymä	3
	x	x	002	Lih-Kki	270+460	P36	vas	15	I	Ei siirtymä	4
	x	x	002	Lih-Kki	273+000	P37	vas	5	I	Ei siirtymä	2
	x	x	002	Lih-Kki	276+380	P38	vas	15	I	Ei siirtymä	1
	x	x	002	Lih-Kki	280+000	P40	oik	6	I	Pentä siirtymää keskeltä	4
	x	x	002	Lih-Kki	283+237	P41	oik	5,5	I	Tapinut yläpäästä	4
	x	x	002	Lih-Kki	283+363	P41	vas	4	I	Ei siirtymä	4
	x	x	002	Kki-Harj	290+140	P6	oik	4	I	Pentä siirtymää	7
	x	x	003	Tpe-Sk	203+000	Tpe-Sk P12	oik	8	I	Pentä siirtymää yläpäässä	11
	x	x	003	Tpe-Sk	203+040	Tpe-Sk P12	oik	8	I	Ei siirtymä	4
	x	x	006	Ra-Kvl	122+592	Tikkakallio	oik	3,1	I	Siirtynyt penkereeseen päin	8
	x	x	008	Sk-Rha	429+725	P10	oik	20	I	Ei siirtymä	2
	x	x	008	Sk-Rha	429+860	P10	oik	20	I	Ei siirtymä	7
	x	x	008	Sk-Rha	430+140	P10	oik	20	I	Tapinut yläpäästä	4
	x	x	008	Lp-Pnä	442+460	P22a	vas	6	I	Tapinut yläpäästä	17
	x	x	008	Lp-Pnä	453+160	P26	oik	8	I	Vuuhkamainen	23
	x	x	008	Lp-Pnä	466+940	P35	vas	10	I	Ei siirtymä	5
	x	x	008	Lp-Pnä	474+590	P38	vas	8	I	Tasaisesti syvyyden mukaan	16
	x	x	008	Lp-Pnä	474+560	P38	vas	8	I	Vuuhka	68
	x	x	008	Lp-Pnä	480+760	P47	vas	8	I	Yläpäästä tapinut	18
	x	x	008	Lp-Pnä	480+940	P47	oik	8	I	Ei siirtymä	3
	x	x	008	Tja-Lka	702+250	P162	vas	4	I	Yläpäästä tapinut	4
	x	x	008	Tja-Lka	704+540	P165	oik	3,5	I	Ei siirtymä	3
	x	x	009	Ov-Jsk	229+980	P40	vas		I	Vuuhkamainen	21
	x	x	009	Ov-Jsk	287+200	P96	vas		I	Ei siirtymä	0
	x	x	342	Kki-Rma	296+680	P6	vas	5	I	Ei siirtymä	3
	x	x	342	Kki-Rma	313+000	P20	oik	5	I	Ei siirtymä	4
	x	x	342	Kki-Rma	321+320	P29	vas	5	I	Ei siirtymä	5
	x	x	342	Kki-Rma	321+775	P30	oik	5,5	I	Tasaisesti syvyyden mukaan	9
	x	x	342	Kki-Rma	322+320	P31	vas	5	I	Ylhäällä siirtymä	8
	x	x	342	Kki-Rma	323+250	P34	oik	5,5	I	Ylhäällä siirtymä	5
	x	x	342	Kki-Rma	325+400	P35	vas	5	I	Ei siirtymä	1
	x	x	342	Kki-Rma	326+940	P38	vas	5	I	Ei siirtymä	2