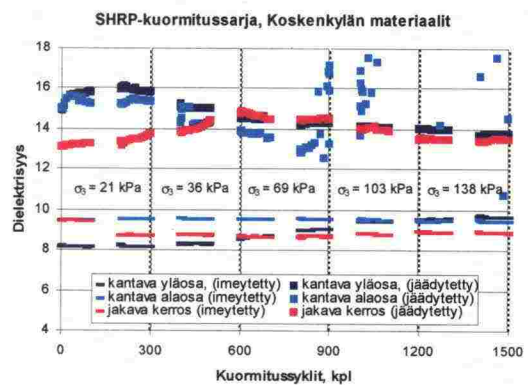
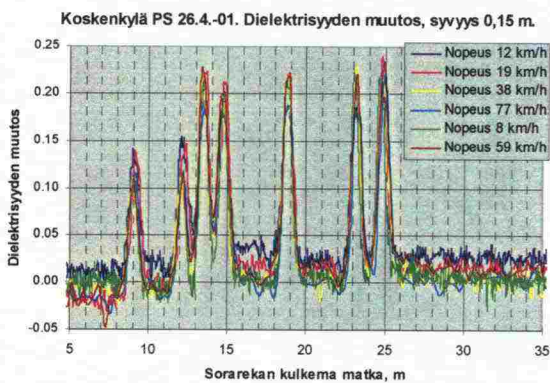
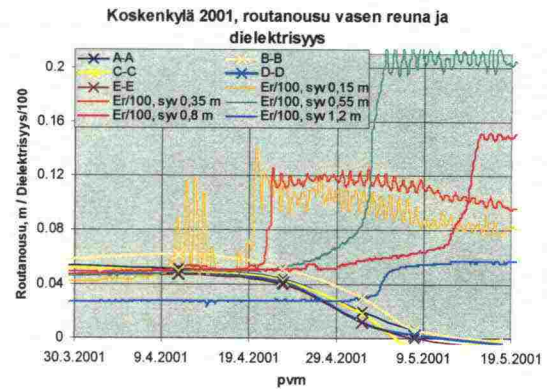
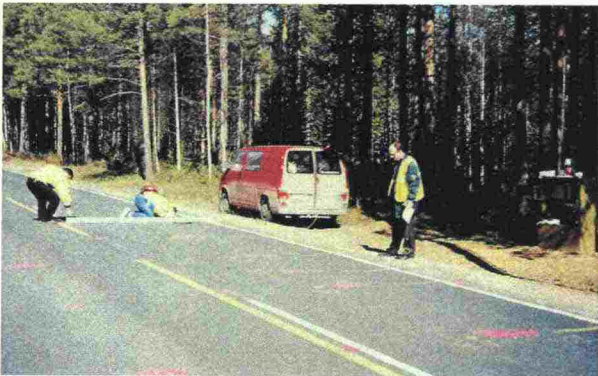


Nuutti Vuorimies, Pauli Kolisoja ja Timo Saarenketo

Rovaniemen Koskenkylän Percoaseman tutkimukset 2001

Tiehallinnon selvityksiä 9/2002



Nuutti Vuorimies, Pauli Kolisoja ja Timo Saarenketo

Rovaniemen Koskenkylän Percoaseman tutkimukset 2001

Tiehallinnon selvityksiä 9/2002

ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-870-X
TIEH 3200743

Rovaniemen Painatuskeskus Oy
Rovaniemi 2002

Julkaisua myy/saatavana:
Tiehallinto, julkaisumyynti
Telefaksi 0204 22 2652
S-posti julkaisumyynti@Tiehallinto.fi
www.Tiehallinto.fi/julk2.htm

Tiehallinto
LAPIN TIEPIIRI
Hallituskatu 1-3
PL 194
96101 ROVANIEMI
Puhelinvaihte 0204 2211

Asiasanat: Dielektrisyys, routanousu ja sulaminen, sitomattomat kerrokset, tutkimusmenetelmät

Aiheluokka: 32, 56

TIIVISTELMÄ

Percoasema on reaaliaikainen tierakenteiden kosteus- ja kantavuustilaa seuraava mittausjärjestelmä. Percoasemalla voidaan mitata kerrosten dielektrisyttä, sähkönjohtokykyä sekä lämpötilaa. Dielektrisyys kuvaa materiaalin huokostilassa olevan vapaan veden määrää ja siten sen alttiutta dynaamisista kuormituksista johtuvan huokosvedenpaineen kohoamiseen ja lopulta tierakenteen pysyville muodonmuutoksille.

Rovaniemen Koskenkylän Percoasemalla on seurattu raskaan liikenteen vaikutuksesta urautuneen tierakenteen kerrosten ominaisuuksien muutoksia muutaman vuoden aikana. Lisäksi kahtena keväänä roudan sulamispehmenemisen aikana mitattiin sorarekan pyöräkuormien aiheuttamia muutoksia kerrosten dielektrisyteen ja sähkönjohtavuuteen. Percoaseman kohdalla ja sen lähiympäristössä tehtiin lisäksi routanousu-, ura- ja kantavuusmittauksia.

Tutkimuksen yhteydessä tehdyissä laboratoriokeikeissa simuloitiin ensisijaisesti aseman kohdalta tierakenteesta otettujen materiaalien vuodenaikaiskäyttäytymistä syklisellä kolmiakksiaalikoelaitteistolla. Näytteen kuormitukset tehtiin ensin näytteen kuivuttua yläpinnan kautta kaksi viikkoa noin +45 °C lämpötilassa. Sen jälkeen näytteen imettyä vettä viikon ajan pohjan kautta ja viimeiseksi näytteeseen kohdistetun jäädytys-sulatussyklin jälkeen. Kuormitusvaiheet simuloivat materiaalin ominaisuuksia kesällä, syksyllä ja keväällä roudan sulamispehmenemisen aikana. Kuormituksen aikana näytteen sisällä olevasta anturista mitattiin dielektrisyttä ja sähkönjohtavuutta.

Tutkimus osoittaa, että Percoaseman mittausten perusteella voidaan luotettavasti seurata roudan sulamispehmenemisen etenemistä ja ennakoida keli-rikon kannalta pahinta ajankohtaa. Mahdollisten painorajoitusten asettaminen voidaan tällöin ajoittaa tarkasti siten, että estetään tien vaurioituminen palautumattomien muodonmuutosten johdosta ja minimoidaan tien käyttäjille aiheutuvat haitat.

Keywords: Dielectricity, frost-heave and thawing, unbound layers, research methods

SUMMARY

The Percostation is a real-time measurement system, which utilizes dielectricity, electric conductivity and layer temperature measurements, to monitor the moisture level and bearing capacity of a road structure. Generally, dielectric value represents the volume of free water in a material, which correlates to the propensity for the pore water pressure of a material to increase under a dynamic load, which in turn directly relates to the potential for permanent deformation of a road structure.

The first Percostation was installed in Koskenkylä, a district of Rovaniemi, in April 1999. Since then the Percostation has been monitoring electrical property changes of the road structure layers. In a series of experiments, conducted over 2 years during the spring thaw, changes in dielectric value and electric conductivity were measured as a gravel truck crossed the Percostation sensors. In addition, rut depth, frost heave and falling weight deflections were measured at the site.

In conjunction with the Percostation measurements, the materials used in the road structure at Koskenkylä were tested in the laboratory at the Tampere University of Technology. The main purpose of the laboratory tests was to simulate the seasonal behaviour of road materials of the Percostation site using a variety preparation methods and a cyclic loading triaxial apparatus. These loading states simulated properties of materials during summer, autumn and spring thawing. Dielectricity and electrical conductivity of specimens were measured during loadings.

The research proved that the Percostation is a reliable system for monitoring thaw softening of road structure materials and anticipating the most critical periods of the thawing period. Using this type of information, weight limits could be set and closure time can be optimised by shortening it to just the most critical periods thus avoiding permanent deformation and at the same time minimizing inconvenience to road users.

ESIPUHE

Tämä tutkimus on jatkoa aiemmalle tutkimukselle, jonka tulokset on esitetty Timo Saarenkedon kirjoittamassa tutkimusraportissa Percoaseman tutkimukset 1999-2001 Mt 9241 Koskenkylä, Rovaniemen maalaiskunta. Tutkimuksilla on pyritty kelirikon mittausjärjestelmän avulla lisäämään tietoa ilmiöistä, jotka tapahtuvat tierakenteessa jäätymis-sulamisprosessin aikana. Erityisesti kiinnostuksen kohteena tutkimuksissa on ollut Percoaseman soveltuvuus kelirikon kriittisimmän ajankohdan ennustamiseen. Lisäksi tutkimuksen keskeistä aluetta oli tiellä liikkuvan sorarekan aiheuttamien muutosten mittaaminen Percoasemalla eri kerroksissa.

Tutkimuksen tilaajana on Lapin tiepiiri. Tutkimustyön projektissa ovat tehneet Roadscanners Oy, TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorio ja Tieliikelaitoksen konsultointi Oulusta. Percoaseman mittaukset on tehty pääosin Roadscanners Oy:n toimesta. Laboratoriokokeet on tehty pääosin TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa Tampereella. Tutkimusraportin kirjoittamisesta on vastannut Nuutti Vuorimies yhteistyössä Pauli Kolisojan ja Timo Saarenkedon kanssa.

Projektin johtoryhmään ovat kuuluneet Kalevi Luiro Lapin tiepiiristä, Kari Narva ja Seppo Ylitapio Tieliikelaitoksen konsultoinnista, Timo Saarenketo Roadscanners Oy:stä sekä Pauli Kolisoja ja Nuutti Vuorimies TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriosta.

Rovaniemi, helmikuu 2002

Tiehallinto
Lapin tiepiiri

Sisältö

1	JOHDANTO	9
2	KOSKENKYLÄN KOEASEMA	10
2.1	Tierakenne ja pohjamaa	10
2.2	Anturien ja tutkimuspisteiden sijainti	10
3	SUORITETUT TUTKIMUKSET	11
4	KOSKENKYLÄN PERCOASEMAN TUTKIMUSTULOKSET KEVÄÄLTÄ 2001	12
4.1	Dielektrisyyden, sähkönjohtavuuden ja lämpötilan vuodenaikaisvaihtelut	12
4.2	Routanousumittaukset	16
4.3	Uramittaukset	18
4.4	Kantavuusmittaukset	19
4.5	Dynaamisten pyöräkuormien vaikutusten mittaus keväällä 2001	23
4.5.1	Pyöräkuormien vaikutus dielektrisyyteen	23
4.5.2	Pyöräkuormien vaikutus sähkönjohtavuuteen	29
5	LABORATORIOTUTKIMUKSET	32
5.1	Näyttemateriaalit	32
5.2	Tube Suction -kokeet	32
5.3	Vuodenaikaisvaihtelua simuloivat laboratorioskokeet	33
5.3.1	Koemenetelmä	33
5.3.2	Näytteistä tehdyt mittaukset kuormitusten välissä	34
5.3.3	SHRP-kuormitussarjojen tulokset	36
5.3.4	Pitkän kuormitussarjan tulokset	41
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	43
6.1	Percoaseman pitkäaikaiset seurantamittaukset	43
6.2	Dynaamisten pyöräkuormien vaikutusten mittaukset	45
6.3	Laboratoriotutkimukset	46
7	KIRJALLISUUSVIITTEET	47
8	LIITTEET	48

1 JOHDANTO

Tämä tutkimus on jatkoa aiemmalle tutkimukselle, jonka tulokset on esitetty "Percoaseman tutkimukset 1999-2001 Mt 9241 Koskenkylä, Rovaniemen maalaiskunta" (Saarenketo 2001). Tutkimuksilla on pyritty kelirikon mittausjärjestelmän avulla lisäämään tietoa ilmiöistä, joita tapahtuu tierakenteessa jäätymis-sulamisprosessin aikana.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli jatkaa mittauksia Koskenkylään sijoitetulla Percoasemalla sekä tutkia tierakenteen materiaalien käyttäytymistä laboratoriokokeilla kolmella Percoaseman kohdalla otetulla materiaalilla. Percoasemalla mitattiin dielektrisyyttä ja sähkönjohtavuutta talvi ja kevät 2001. Lisäksi dynaamisen kuormituksen aiheuttamia muutoksia kerrosten dielektrisyyteen ja sähkönjohtavuuteen mitattiin Percoasemalla kolmella eri kerralla roudan sulamispehmenemisen edetessä sekä TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa vuodenaikaiskäyttäytymistä simuloivalla koesarjalla.

Tämä tutkimusraportti on pyritty tekemään esitystavaltaan yhdenmuotoiseksi aikaisemman raportin kanssa, jolloin niitä olisi helpompi lukea rinnakkain ja saada tutkimuksista selkeä kuva pitemmältä aikaväliltä.

Lisäksi tutkimus täydentää osaltaan julkaisussa "Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet" (Saarenketo et al. 2000) esitettyä tutkimuskokonaisuutta, jossa on esitelty vuodenaikaisvaihtelua simuloiva laboratoriokoemenetelmä sekä tien kantavan kerroksen materiaalien dielektrisyyteen ja sähkönjohtavuuteen liittyviä tutkimustuloksia vuosilta 1997-2000. Tärkeimmät tulokset mainitusta tutkimuskokonaisuudesta on julkaistu myös tiivistelmänä Tiehallinnon julkaisusarjassa (Saarenketo et al. 2001).

Tässä raportissa ei ole toistettu aikaisemmassa tutkimusraportissa olevaa teoriaosuutta eikä tietoja Percoaseman toimintaperiaatteista ja sijainnista.

2 KOSKENKYLÄN KOEASEMA

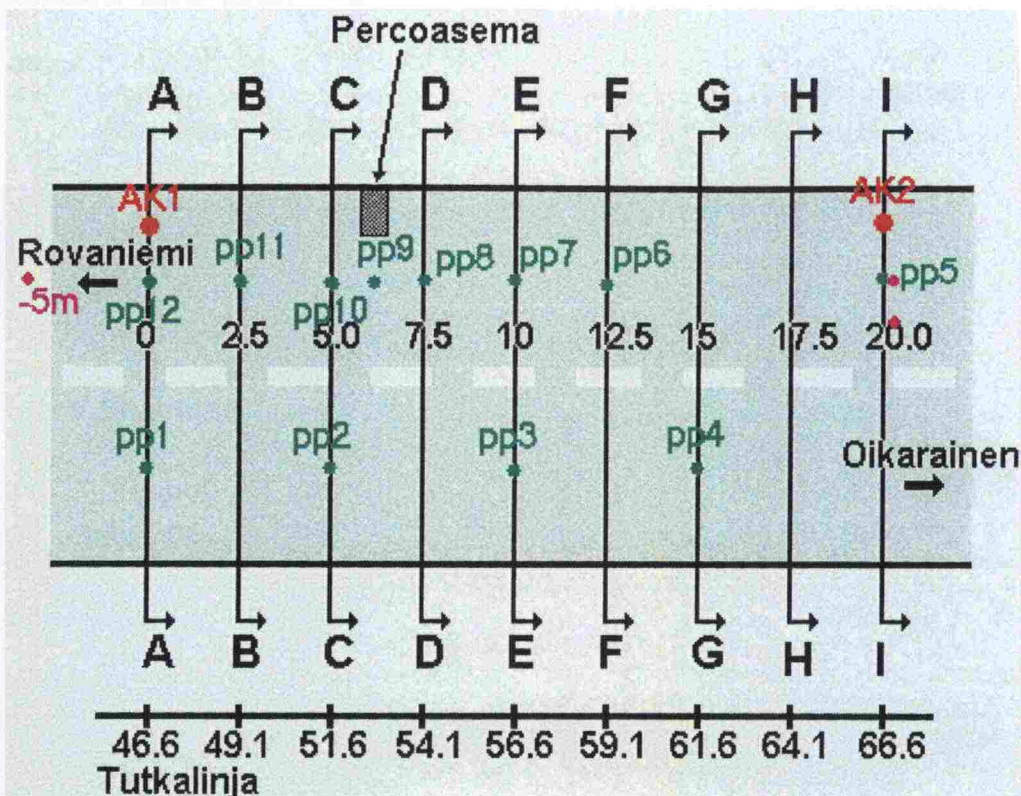
2.1 Tierakenne ja pohjamaa

Aikaisempien tutkimusten perusteella oli Percoaseman alueelta laadittu seuraava malli tierakenteesta antureiden kohdalla (Saarenketo 2001):

1. Päälyste: 0 - (75) 80 mm, pinnassa 36 mm kulutuskerros.
2. Kantava kerros 80 - 450 mm, pinnassa tasaumurskettä 0-36 mm ja alempana karkeaa 0-55 mm murskettä.
3. Jakava kerros 450 - 650 mm, materiaali erittäin hienoinespitoista.
4. Pohjamaan pintaosa 650 (700) - 900 mm hienorakeista silttiä.
5. Pohjamaan keskiosa 900 - 1400 mm vaihtelee kerroksellisesti hienosta hiekasta silttiseen hiekkaan.
6. Pohjamaan alaosa 1400 - 2500 mm hienoa tai keskirakeista hiekkaa.

2.2 Anturien ja tutkimuspisteiden sijainti

Kuvassa 1 on esitetty kaaviokuva Percoaseman anturien ja pudotuspainolaitteen tutkimuspisteiden sijainnista aseman ympäristössä (Saarenketo 2001). Kaksi anturia oli rikkoutunut 0,55 ja 0,80 m syvyyksiltä kesällä 2000 rajun ukkosen aikana. Niiden tilalle asennettiin syksyllä uudet anturit, joilla pystyttiin dielektrisyuden ja sähkönjohtavuuden lisäksi mittaamaan myös maan lämpötilaa erillisellä Percometrillä.



Kuva 1. Tutkimuslinjat Percoaseman sijaintipaikalla. Anturien paikka on esitetty tummana laatikkona ja pudotuspainolaitteen mittauspäikat vihreinä pisteinä (Saarenketo 2001).

3 SUORITETUT TUTKIMUKSET

Percoaseman mittaustietojen seuraamista ja keräämistä jatkettiin vuodenvaihteesta 2000-2001 kesään 2001 Roadscanners Oy:n, Lapin tiepiirin, Tieliikelaitoksen konsultoinnin ja TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion yhteistyönä.

Seurantaohjelmassa Roadscanners Oy teki routavaaituksia talvella kuukauden välein ja tihennettynä viikon välein sulamiskauden alettua sekä uramittauksia niin ikään viikon välein sulamiskauden aikana. Kantavuusmittaukset teki Tieliikelaitoksen konsultointi KUAB -pudotuspainolaitteella viikon välein sulamiskauden alettua aina kesäkuun loppuun asti. Nämä mittaukset tehtiin samoissa poikkileikkauksissa ja pisteissä kuin edellisenä vuonna.

Huhtikuun 2001 lopussa sekä toukokuun alkupuoliskolla tehtiin Percoasemalla Roadscanners Oy:n ja TTKK:n yhteistyönä kuormitustestejä, joissa mitattiin anturien yliajavan 60 tonnin painoisen sorarekan pyöräkuormien vaikutusta tien rakennekerrosten dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvoihin. Mittauksia tehtiin useilla eri nopeuksilla 5 – 80 km/h välillä.

Alkukesällä 2001 Roadscanners Oy ja Tieliikelaitoksen konsultointi ottivat tien rakennekerroksista kolmelta syvyydeltä näytteitä laboratoriotutkimuksia varten. Näytteet otettiin ajosuunnassa anturien ylittämisen jälkeen eli antureista Rovaniemen suuntaan. Tieliikelaitoksen konsultointi teki materiaaleille Oulussa Tube Suction -kokeet minkä lisäksi TTKK:lla materiaaleille tehtiin vuodenaikaiskäyttäytymistä simuloiva koesarja, jossa mitattiin näytteiden dielektrisyttä ja sähkönjohtokykyä koesarjan eri vaiheissa sekä määritettiin dynaamisella kolmiakksiaalikoelaitteistolla niiden muodonmuutosominaisuuksia.

4 KOSKENKYLÄN PERCOASEMAN TUTKIMUSTULOKSET KEVÄÄLTÄ 2001

4.1 Dielektrisyyden, sähkönjohtavuuden ja lämpötilan vuoden- aikaisvaihtelut

Kuvassa 2 on esitetty Koskenkylän Percoaseman kevään 2001 sulamisvaiheen mittaustulokset ja kuvassa 3 on esitetty 0,55 ja 0,80 metrin syvyydessä olleiden antureiden lämpötilamittaukset, joita pyrittiin tekemään kerrosten sulamisvaiheessa kerran vuorokaudessa. Kevään ensimmäinen merkki alkoi näkyä lähimpänä pintaa olevan anturin mittaustuloksissa 10.4., jolloin 0,15 metrin syvyydessä olevan anturin mitatut dielektrisyydet nousivat päivisin ja laskivat yöllä vuorokauden lämpötilavaihtelun mukaan. Arvot pysyivät kuitenkin alhaisina 15.-18.4., jonka jälkeen kerrokselle mitattiin kevään suurin dielektrisyyssarvo 14. Tämän jälkeen dielektrisyyden pieneni hitaasti heinäkuussa mitattuun arvoon 7. Sähkönjohtokyky nousi 17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 19. huhtikuuta, mutta lyhyen pienenemisen jälkeen se suureni toukokuun alussa lähelle 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, jonka lähetyvillä kerroksen sähkönjohtokyky pysytteli koko alkukauden.

Kantavan kerroksen alaosassa 0,35 metrin syvyydessä sulaminen alkoi 20.4. ja se tapahtui nopeasti mitatun dielektrisyyden saavuttaessa seuraavana päivänä kevään suurimman arvonsa 12,5 ja sähkönjohtavuuden noustessa samana päivänä yli 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kahta viikkoa myöhemmin dielektrisyyden alkoi pienentyä ollen 18. toukokuuta jälkeen alle kymmenen. Sähkönjohtavuus puolestaan nousi 6. toukokuuta mennessä lähelle 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pysyen siinä muutaman vuorokauden ajan, jonka jälkeen arvot pienenevät ollen alkukesällä 20 ja 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ välillä.

Jakavassa kerroksessa 0,55 m syvyydessä dielektrisyyden ja sähkönjohtavuuden nousivat hitaasti 21.4. alkaen ja lämpötila nousi samaan aikaan lähelle $-1\text{ }^\circ\text{C}$. Muutamassa vuorokaudessa 2. toukokuuta alkaen mitatut arvot nousivat nopeasti, jolloin dielektrisyyden kaksinkertaistui arvoon 20 ja sähkönjohtavuus nousi kymmenestä 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sekä kerroksesta mitattu lämpötila kohosi yli $0\text{ }^\circ\text{C}$. Kerroksen dielektrisyyden pysyi alkukesälläkin lähellä arvoa 20. Sen sijaan sähkönjohtavuus suureni vielä koko alkukauden ollen yli 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ heinäkuun puolivälissä. Tämä sähkönjohtavuuden kasvu johtunee suurimmaksi osaksi kerroksen lämpötilan kohoamisesta.

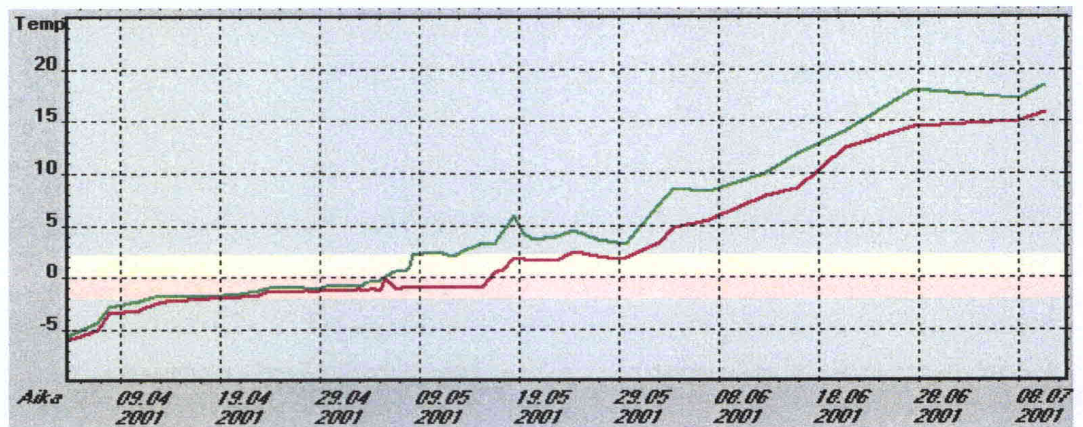
Pohjamaan pintaosaan 0,80 m syvyyteen sijoitetusta anturista mitatut arvot nousivat hitaasti 25.4. alkaen, jolloin lämpötilan mitattiin olleen aamupäivällä hieman alle $-1\text{ }^\circ\text{C}$. Kerros sulii todennäköisesti kunnolla 11. - 15.5., jolloin dielektrisyyden nousi seitsemästä arvoon 15 ja sähkönjohtavuus nelinkertaistui yhdeksästä lähes 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sekä lämpötila nousi ollen 16.5. aamupäivällä jo $+0,5\text{ }^\circ\text{C}$. Dielektrisyyden pysyi arvon 15 tuntumassa kesäkuun loppupuolelle asti, jonka jälkeen se hieman pieneni. Sähkönjohtavuus pysyi lähellä 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ kesäkuun alkuun asti. Kesäkuun alusta kerroksen lämpötila nousi tasaisesti $+3\text{ }^\circ\text{C}$ kesäkuun lopun arvoon $+15\text{ }^\circ\text{C}$, jolloin myös sähkönjohtavuus nousi kuun alussa olleesta 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arvoon 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Syvimmälle 1,2 metriin sijoitetun anturin ympäristö sulii todennäköisesti toukokuun alussa vuorokauden aikana, jolloin dielektrisyyden nousi arvoon 6 ja

sähkönjohtavuus arvoon 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Arvot pysyivät koko tarkkailujakson ajan heinäkuun loppupuolelle asti saman suuruisina. Huomattavaa on, että sulaminen tapahtui aiemmin 1,2 metrin kuin 0,8 metrin syvyydellä, joka todistaa roudan sulamisen tapahtuvan sekä alhaalta ja ylhäältä päin.

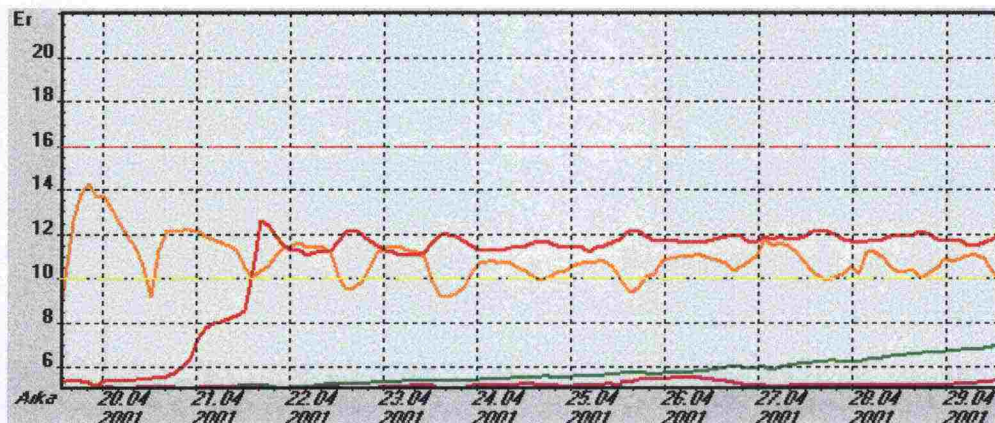


Kuva 2. Koskenkylän Percoasemalla mitatut dielektrisyydet (ylhällä) ja sähkönjohtavuudet (alhaalla) keväältä 2001. Antureita kuvaavat värit ovat seuraavat; 0,15 m oranssi, 0,35 m punainen, 0,55 m vihreä, 0,80 m violetti ja 1,2 m sininen.

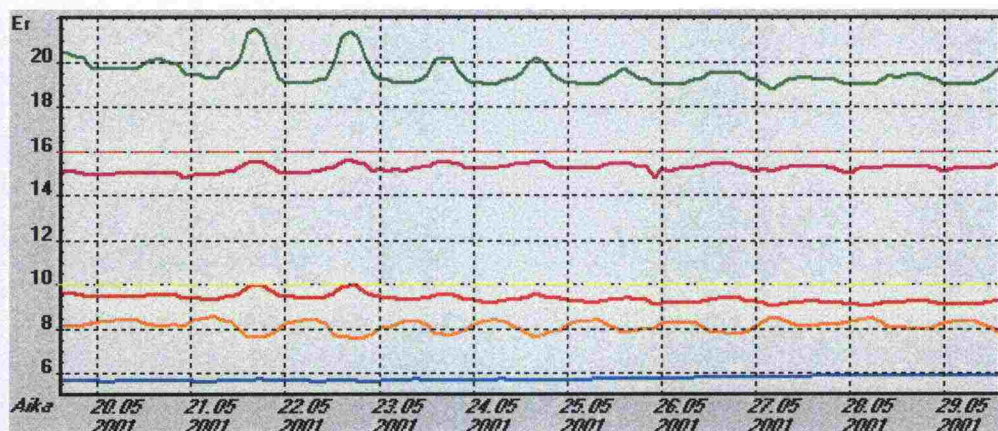


Kuva 3. Koskenkylän Percoasemalla keväällä 2001 antureista mitatut lämpötilat 0,55 (vihreä) ja 0,80 (violetti) metrin syvyydestä.

Kuvassa 4 on esitetty Percoaseman mittaustulokset tarkemmin huhtikuun loppupuolelta 2001. Kantavassa kerroksessa dielektrisyys muuttuu vuorokauden ajan vaihteluiden mukaan. Kuvasta 4 nähdään, että kantavan kerroksen yläosan ja alaosan dielektrisyys muutos on eri suuntainen vuorokauden eri aikoina. Aamupäivällä kantavan kerroksen yläosassa dielektrisyysarvo pienenee lämpötilan noustessa ja kerroksen kuivuessa. Lämpötilan kohotessa päivän aikana kantavan kerroksen alaosassa lämpötila nousee ja sulattaa alempana olevaa rakennetta, josta vapautuva kosteus siirtyy ylöspäin nostaten kerroksen dielektrisyttä. Lämpötilan laskiessa illalla ja yöllä hienoaainespitoisemmasta kantavan kerroksen yläosasta ei enää haihdu kosteutta vaan siihen sitoutuu alemmaa nouseva kosteus, jolloin kantavan kerroksen yläosan dielektrisyys kasvaa ja alempana sulamisen loputtua dielektrisyys pienenee. Yön aikana materiaalit saavuttavat kosteuden suhteen keskinäisen tasapainoaseman kerrosten välillä. Tasapaino kosteuden suhteen riippuu materiaalien termodynaamisista imupaineominaisuuksista, johon vaikuttaa muun muassa lämpötila.



Kuva 4. Koskenkylän Percoasemalla mitatut dielektrisyydet huhtikuun lopulla 2001. Antureita kuvaavat värit ovat seuraavat; 0,15 m oranssi, 0,35 m punainen, 0,55 m vihreä, 0,80 m violetti ja 1,2 m sininen.

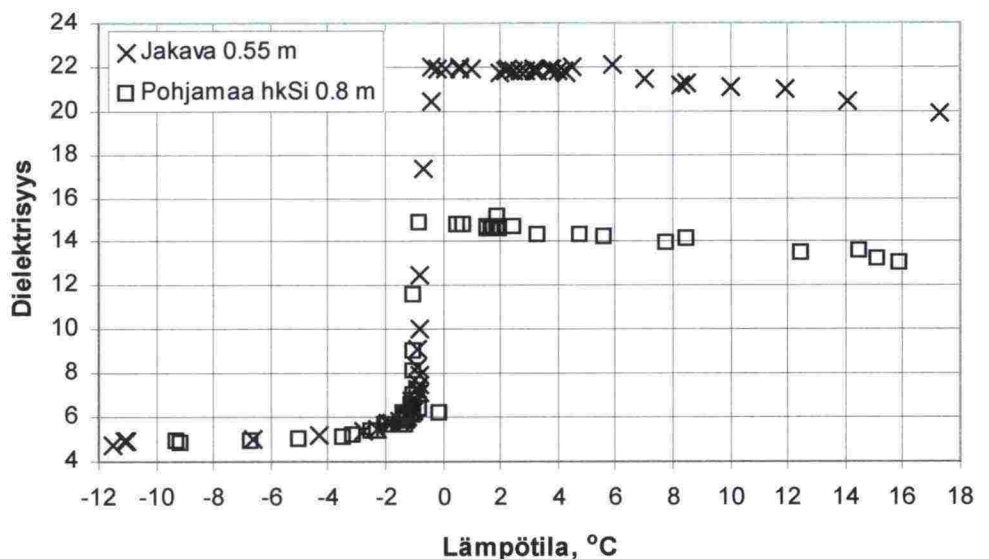


Kuva 5. Koskenkylän Percoasemalla mitatut dielektrisyydet toukokuun lopulla 2001. Antureita kuvaavat värit ovat seuraavat; 0,15 m oranssi, 0,35 m punainen, 0,55 m vihreä, 0,80 m violetti ja 1,2 m sininen.

Kuvassa 5 on esitetty Percoaseman dielektrisyysien mittaustulokset toukokuun lopulla. Sama vuorokausivaihtelu näkyy nyt myös kahdessa muussa kerroksessa sekä erityisesti lämpimien päivien vaikutus vaihtelun suuruuteen alemmissa kerroksissa. Toukokuun lopulla tierakenne on jo sulanut, mutta lämpötilan nouseminen haihduttaa vapaata vettä ja saa veden liikkumaan tierakenteessa lämpötilavaihtelujen mukaan. Kantavan kerroksen yläosassa dielektrisyys pienenee samalla kun dielektrisyys kasvaa muissa kerroksissa.

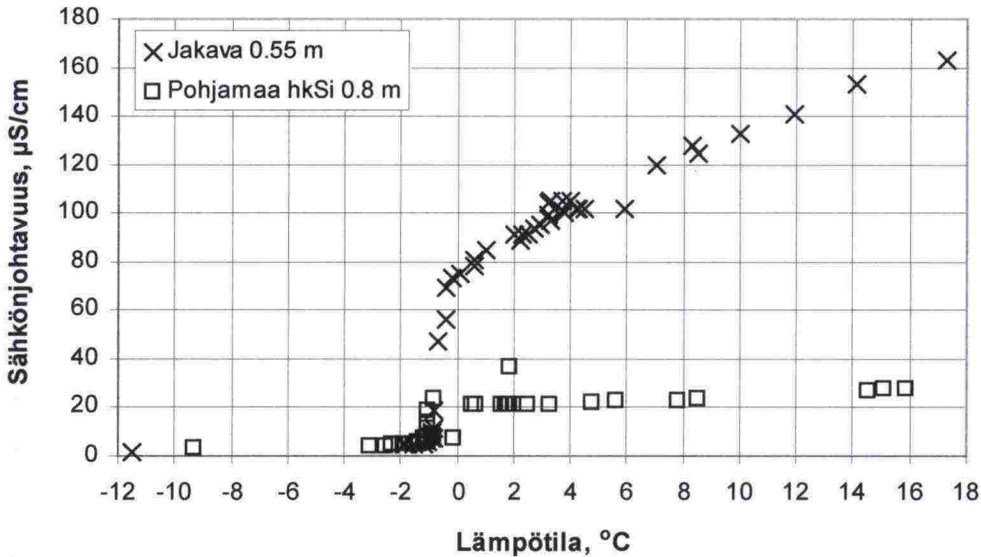
Kuvassa 6 on tarkasteltu dielektrisyiden ja lämpötilan välistä riippuvuutta keväällä 2001 mitattuna Percometrillä 0,55 ja 0,80 m syvyydellä sijaitsevista antureista. Kerroksen sulaminen näyttää tapahtuvan pääosin -1 ja $-0,5$ °C välillä, vaikka dielektrisyysarvojen pieni kohoaminen näyttää alkavan lähellä -2 °C. Ilmiö näytti olevan samankaltainen kuin syksyllä 2000 kerrosten jäätyessä ja dielektrisyiden alentuessa $-0,5$ ja $-1,5$ °C välillä, vaikka tapahtuikin toisesta suunnasta maan sulaessa (Saarenketo 2001). Keväällä 2001 kyseisissä kerroksissa mitatut dielektrisyidet olivat hieman suurempia kuin kerrosten jäätyessä edellisenä syksynä. Kuvassa 7 nähdään vastaavan ilmiön tapahtuvan myös sähkönjohtavuuden suhteen. Myös sähkönjohtavuuden suurenemisen rajalämpötilana kyseisissä kerroksissa näyttäisi olevan noin -1 °C. Mitattaessa Percoaseman kautta sähkönjohtavuutta 0,80 m syvyydessä olevasta anturista saatiin samoina päivinä suurempia arvoja kuin Percometrillä mitattuna. Tällöin Percoaseman kautta mitattua sähkönjohtavuutta tarkasteltaessa sähkönjohtavuus kasvaisi syvyydellä 0,80 saman tapaisesti lämpötilan noustessa kuin syvyydellä 0,55 m vaikkakin selvästi loivemmin. Ero johtunee anturin virheellisestä kalibroituksesta.

Koskenkylän Percoasema, kevät 2001



Kuva 6. Koskenkylän Percoaseman 0,55 ja 0,80 metrin syvyydessä olevien anturien dielektrisyysien ja lämpötilojen suhde keväällä 2001 Percometrillä mitattuna.

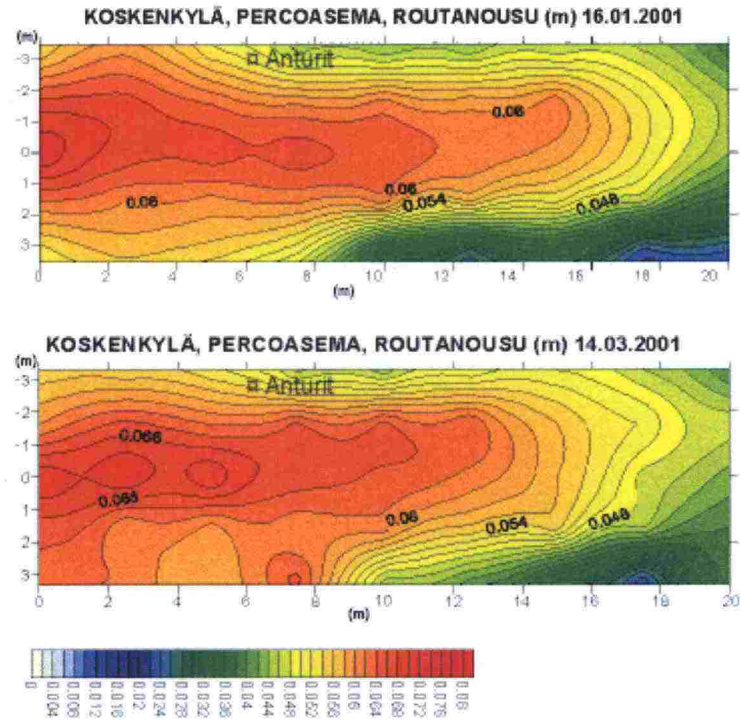
Koskenkylän Percoasema, kevät 2001



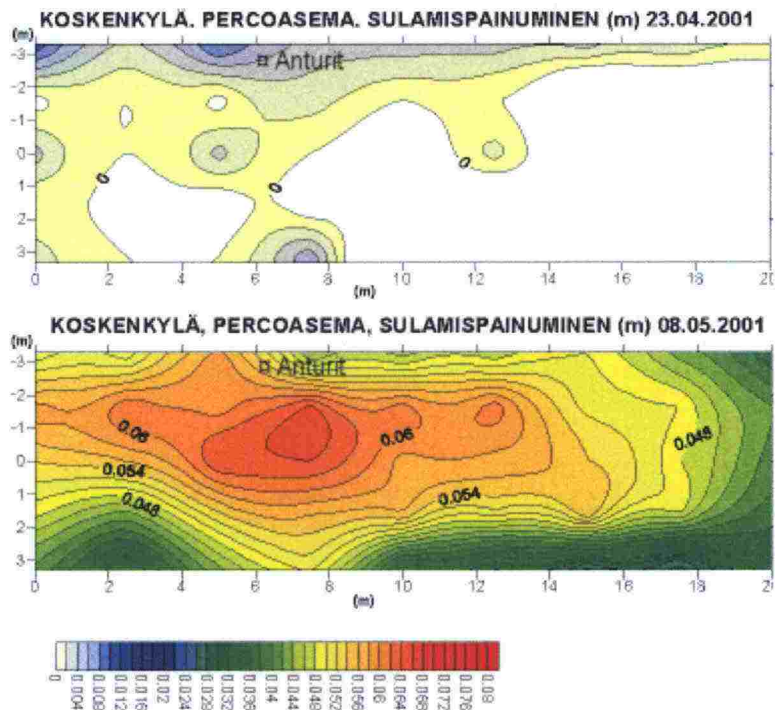
Kuva 7. Koskenkylän Percoaseman 0,55 ja 0,80 metrin syvyydessä olevien anturien sähkönjohtavuuksien ja lämpötilojen suhde keväällä 2001 Percometrillä mitattuna.

4.2 Routanousumittaukset

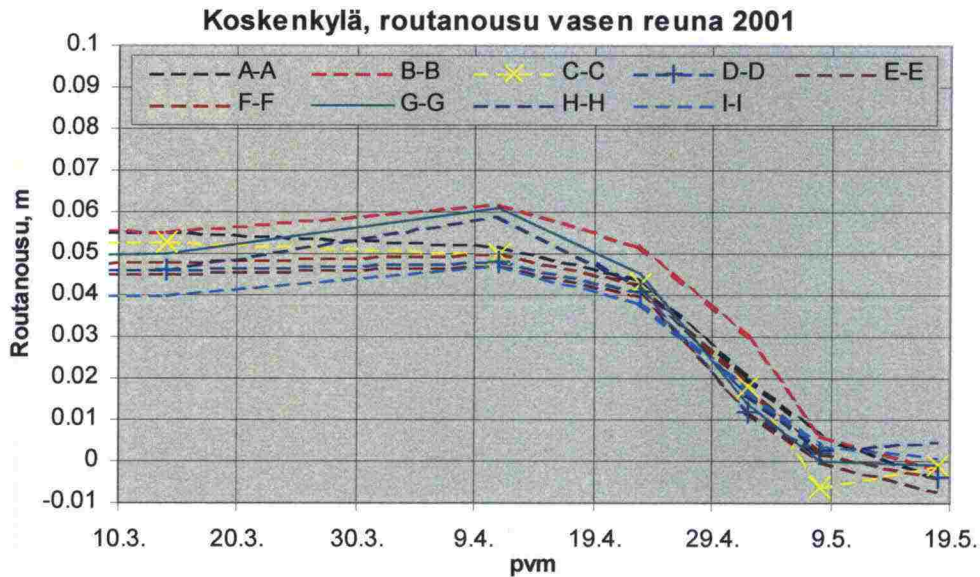
Kuvassa 8 on esitetty routanousujen samanarvonkartat talvelta 2001. Routanousut näyttävät olevan vuonna 2001 samaa suuruusluokkaa kuin vuotta aiemmin. Kuvasta nähdään lisäksi routanousun muodostuneen käytännössä tammikuun puoliväliin mennessä. Kuvan 9 sulamispainuminen samanarvonkartat osoittavat roudan sulamisen tapahtuneen 23.4. - 8.5.2001, jolloin pohjamaa oli vielä jäässä. Kuvista 8 ja 9 nähdään routanousun ja sulamispainuman olleen suurinta poikkileikkausten keskikohtalla. Liitteessä 1 on esitetty vastaavat samanarvonkartat useammalta mittauspäivältä. Routanousut olivat pienimmät leikkausten I-I (20 m) ja G-G (15 m) välissä, erityisesti niiden oikeassa reunassa. Kuva 10 näyttää routanousun pienenemisen alkaneen leikkausten C-C (5 m) ja D-D (7,5 m) välissä kunnolla 18.4. ja päättyneen 9.5.. Kuvasta 2 havaitaan, että samanaikaisesti alkoi lopullinen dielektrisyysarvojen nousu kantavassa kerroksessa 0,15 m syvyydessä ja kahta päivää myöhemmin 0,35 m syvyydessä. Koska jakavassa kerroksessa 0,55 m syvyydellä dielektrisyys nousi voimakkaasti toukokuun alussa saavuttaen huipun 4. toukokuuta ja vastaavasti pohjamaan pintaosassa dielektrisyys nousi vasta 12.5. on ilmeistä, että routanousu on tapahtunut pääosin kantavassa ja jakavassa kerroksessa. Tätä tukee myös se, että sulamispainuminen tapahtui, kun jakava kerros suli pohjamaan pintaosan ollessa edelleen jäässä.



Kuva 8. Koskenkylän Percoasemalla 16.1. ja 14.3.2001 mitattujen routanousujen samanarvonkartat. Kohta 0 metriä vastaa leikkausta A-A.



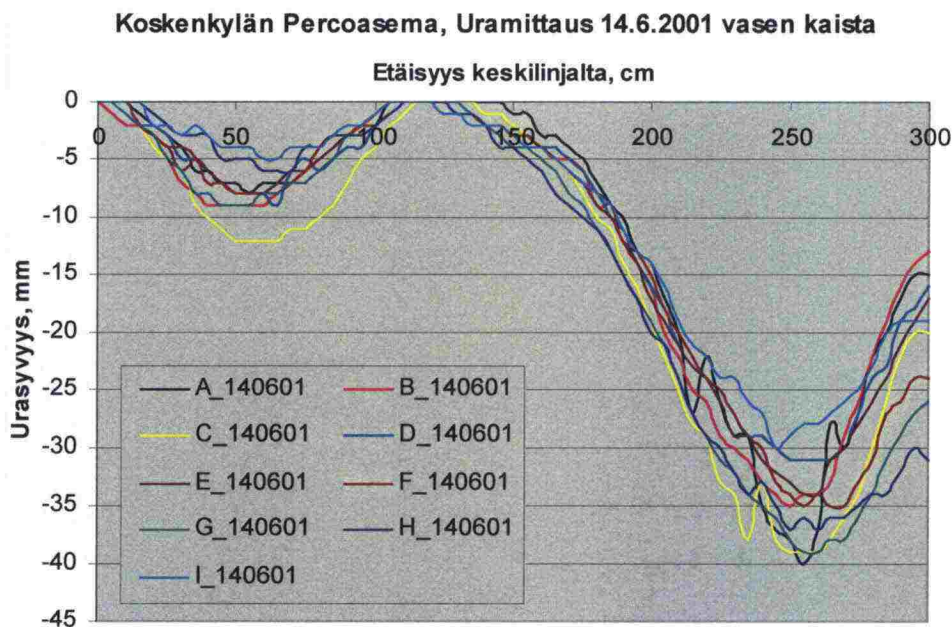
Kuva 9. Kevään 2001 sulamispainumien samanarvonkartat Koskenkylän Percoasemalla 23.4. ja 8.5.. Sulamispainumat on laskettu talven 2000-2001 suurimmista routanousuarvoista ennen sulamisen alkamista. Kohta 0 metriä vastaa leikkausta A-A.



Kuva 10. Koskenkylän Percoaseman kohdalla tien vasemmalla reunalla mitatut routanousut keväällä 2001. Rastit ilmaisevat mittauspäivät.

4.3 Uramittaukset

Kuvassa 11 on esitetty Koskenkylän Percoaseman luona mitatut urasyvytydet 14.6.2001. Urasyvytydet ovat edellisvuoden 26.5.2000 mittaukseen nähden kasvaneet reunimmaisella uralla noin 5 mm. Syvimmät ulkourat olivat edelleen leikkauksissa C-C, G-G ja H-H sekä leikkauksessa A-A, pienimmän urasyvyyden ollessa leikkauksessa I-I.



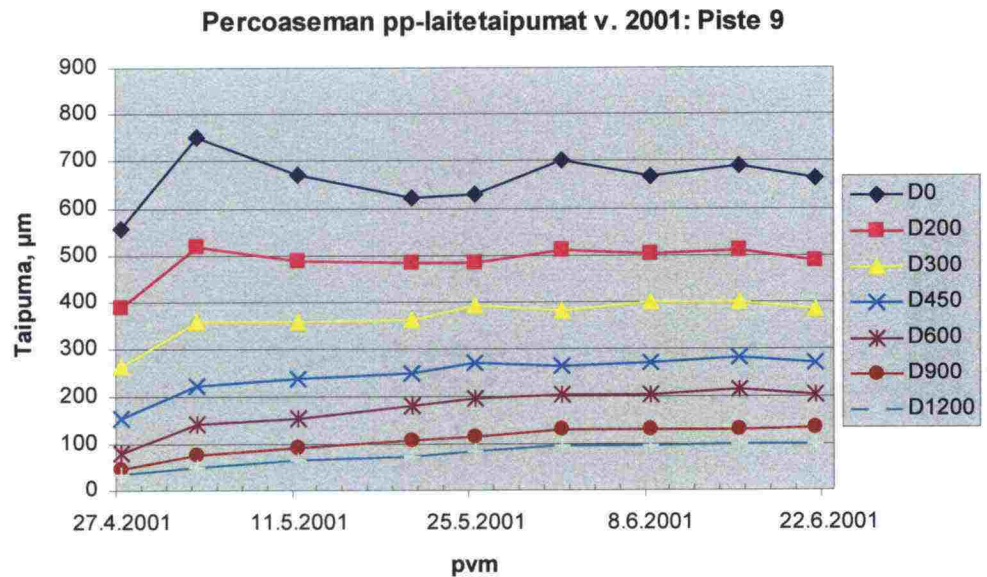
Kuva 11. Koskenkylän Percoaseman vasemmalta kaistalta 14.6.2001 oikolaudalla mitatut urasyvytydet eri leikkauksista.

4.4 Kantavuusmittaukset

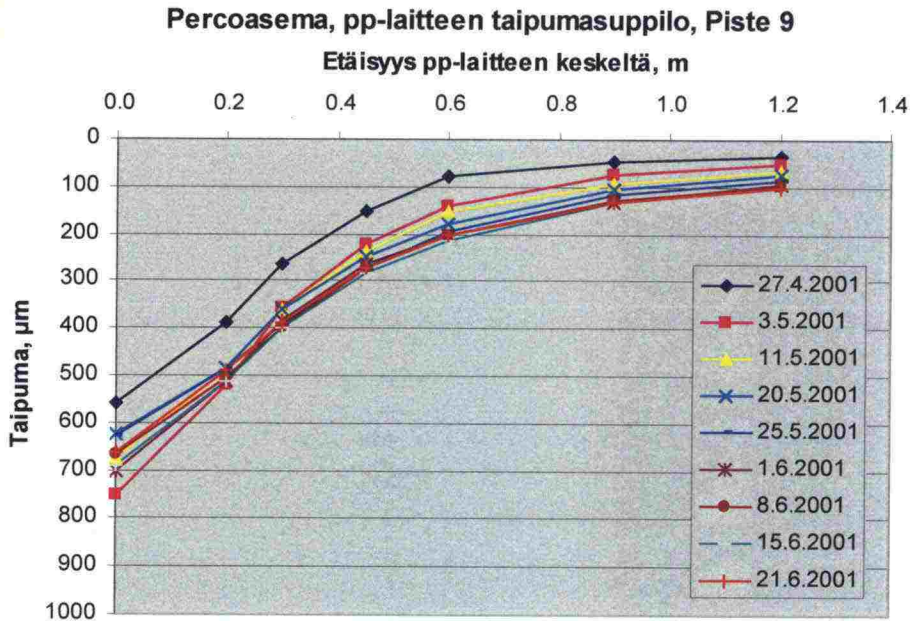
Kuvassa 12 on esitetty pudotuspainolaitteella tehtyjen mittausten taipuma-arvot Percoaseman sondien kohdalla olevassa pisteessä 9 keväällä 2001. Kuva osoittaa, että taipuma-arvot kasvoivat ensimmäisestä mittauskerrasta 27.4.2001 roudan sulaessa tiestä. Suurimmat D0, D200 ja D300 taipumat mitattiin 3.5., jonka jälkeen näiden kohtien taipumat pysyivät samassa suuruusluokassa. Sen sijaan D450 ja sitä etäämpänä olevien kohtien taipumat kasvoivat vielä 3.5. jälkeen tasaisesti kesäkuun puoliväliin asti.

Kuvassa 13 on esitetty pisteessä 9 pudotuspainolaitteella tehtyjen mittausten taipumasuppilot keväällä 2001. Kuvasta nähdään, että päällysrakenteen yläosan kantavuus oli heikoimmillaan 3.5. tehdyssä mittauksessa päällysrakenteen alaosan ollessa vielä pääosaltaan jäätyneenä. Taipumasuppilot eivät juurikaan muuttuneet 20.5. tehdyn mittauksen jälkeen. Taipumasuppilosta nähdään lisäksi, että tiessä on ollut keväällä 2001 kantava alusrakenne, mutta heikohko päällysrakenteen yläosa.

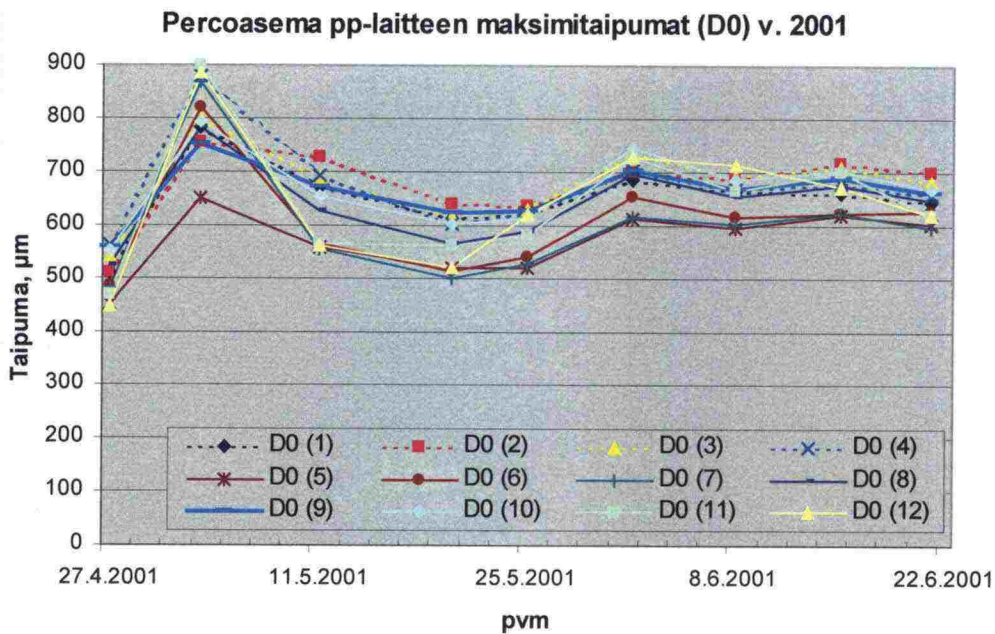
Kuva 14 osoittaa, että maksimitaipumat olivat huipussaan 3.5. tien kummallakin ajoradalla. Toinen pienempi huippu maksimitaipumissa oli 1.6., jolloin aurinkoisen mittauspäivän johdosta mittaushetkellä asfaltin lämpötila oli noin 30 °C. Muilla mittauseroilla asfaltin lämpötila oli 10 – 20 °C. Maksimitaipumat pysyivät keväällä 2000 kauemmin korkeina ja keskimäärin korkeampina verrattuna kevääseen 2001.



Kuva 12. KUAB pudotuspainolaitteella mitatut taipumat Koskenkylän Percoaseman pisteessä 9, joka sijaitsee juuri mittausantureiden kohdalla.



Kuva 13. Pudotuspainolaitteella mitatut taipumasuppilot Koskenkylän Percoaseman pisteessä 9.

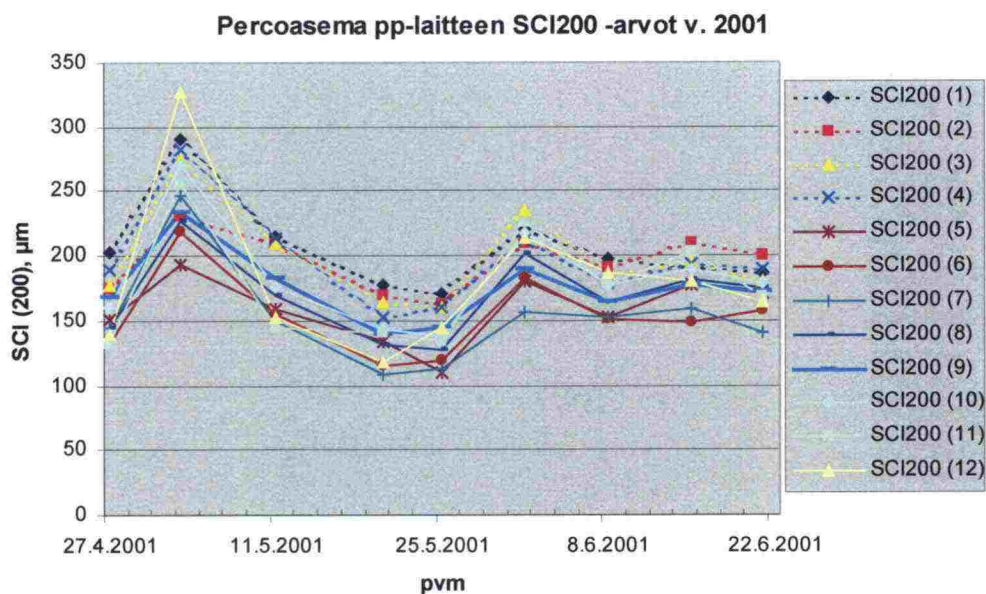


Kuva 14. Pudotuspainolaitteen D0-taipumat mittauspisteissä 1-12 Koskenkylän Percoasemalla. Katkoviivalla esitetyt pisteet kuvaavat oikean kaistan mittauspisteitä.

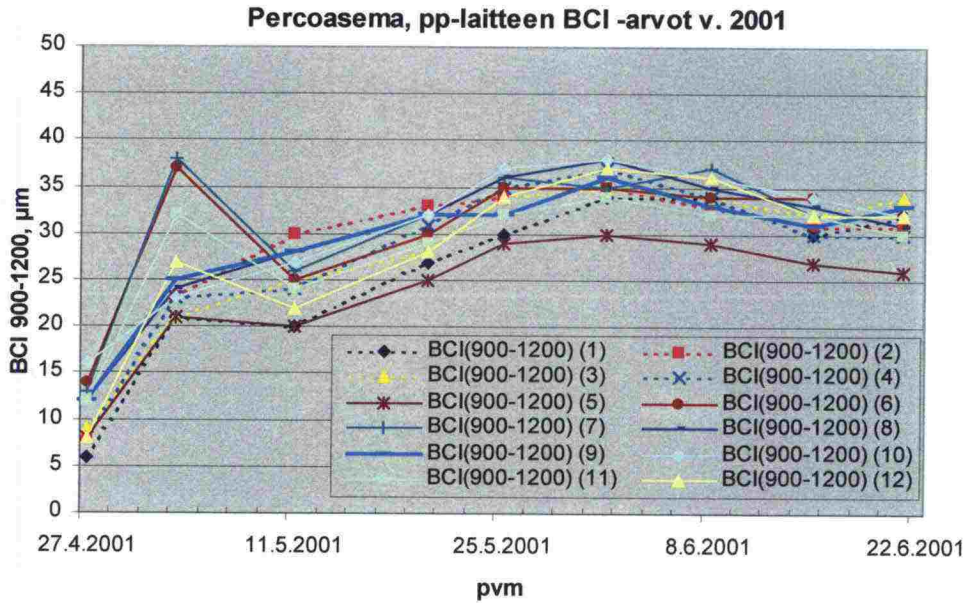
Kuvassa 15 on esitetty pintakantavuutta kuvaavia Surface Curvature Index (SCI200) tunnuslukuja eli D0 ja D200 välistä taipumaeroa. Katkoviivalla kuvatut pisteet (1-4) ovat oikeanpuoleisen kaistan arvoja ja osoittavat kevyemmällä kuormituksella olleen ajoradan SCI200-arvojen olevan hieman suurempia kuin vasemman ajoradan arvojen. 11.5. alkaen arvot olivat pääsääntöisesti 150 ja 200 välillä. Kummallakin kaistalla mitatut arvot olivat kuitenkin pienempiä kuin edellisenä keväänä mitatut arvot.

Kuva 16 osoittaa alusrakenteen sulamispehmenemisen tapahtuneen kesäkuun alkuun mennessä Base Curvature Index (BCI) tunnusluvun perusteella. Kuva osoittaisi varjoisemman katkoviivalla kuvattujen oikeanpuoleisen kaistan alusrakenteen sulaneen hieman myöhemmin kuin vasemmanpuoleisen kaistan. Kaistojen välillä ei ole eroa BCI -tunnusluvun absoluuttisten arvojen perusteella.

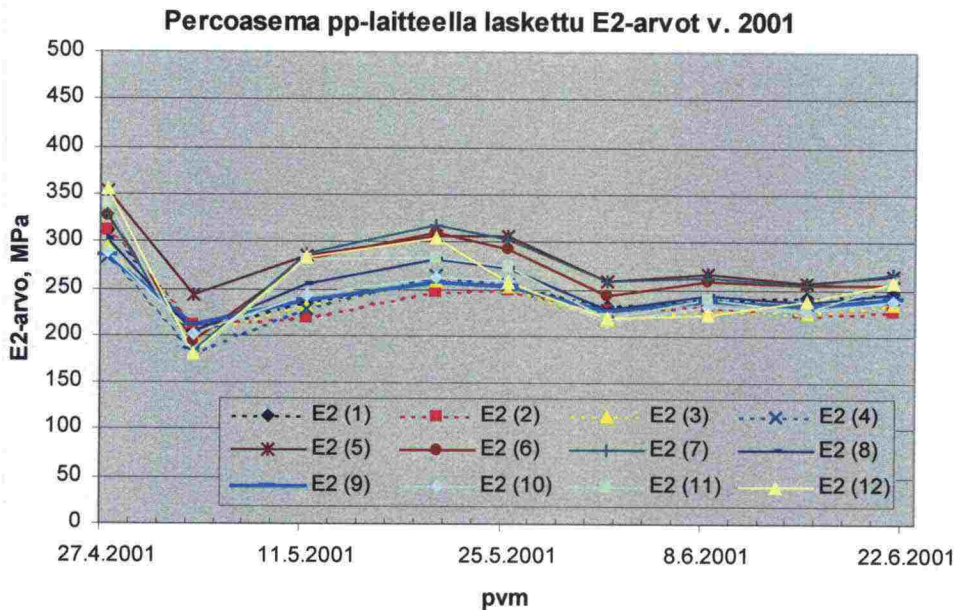
Kuvassa 17 on esitetty pudotuspainolaitteella tehdyistä mittauksista lasketut E2-arvot. Kuva osoittaa jäätyneellä maalla olleen vielä vaikutusta ensimmäisen mittauskerran aikana mitattuihin E2-arvoihin. Pienimmillään arvot olivat toukokuun alussa ollen kuitenkin keskimäärin 250 MPa toukokuun puolivälistä lähtien. Keskimäärin vasemmalla kaistalla E2-arvot olivat suurempia, mikä johtunee vasemman kaistan kerrosten tiivistymisestä raskaamman kuormituksen alla.



Kuva 15. Pudotuspainolaitteen SCI200-arvot mittauspisteissä 1-12 Koskenkylän Percoasemalla. Katkoviivalla esitetyt pisteet kuvaavat oikean kaistan mittauspisteitä. Piste 9 sijaitsee antureiden kohdalla.



Kuva 16. Pudotuspainolaitteen BCI (900-1200)-arvot mittauspisteissä 1-12 Koskenkylän Percoasemalla. Katkoviivalla esitetyt pisteet kuvaavat oikean kaistan mittauspisteitä. Piste 9 sijaitsee antureiden kohdalla.



Kuva 17. Pudotuspainomittausten perusteella lasketut E2-arvot mittauspisteissä 1-12 Koskenkylän Percoasemalla. Katkoviivalla esitetyt pisteet kuvaavat oikean kaistan mittauspisteitä. Piste 9 sijaitsee antureiden kohdalla.

4.5 Dynaamisten pyöräkuormien vaikutusten mittaus keväällä 2001

4.5.1 Pyöräkuormien vaikutus dielektrisyyteen

Pyöräkuormien vaikutusta tierakenteen sähköisiin ominaisuuksiin mitattiin Rovaniemen Koskenkylän Percoasemalla 26.4., 8.5. ja 18.5.2001. Ensimmäisellä kerralla vain tierakenteen kantava kerros oli sulanut, jolloin mitattiin ylimpien kerrosten käyttäytymistä. Toisella kerralla mielenkiinto kohdistui jakavan kerroksen käyttäytymiseen sen ollessa kevään kriittisimmässä tilassa. Viimeisellä mittauskerralla oli tarkoitus tutkia erityisesti pohjamaan käyttäytymistä heti sulamisen jälkeen.

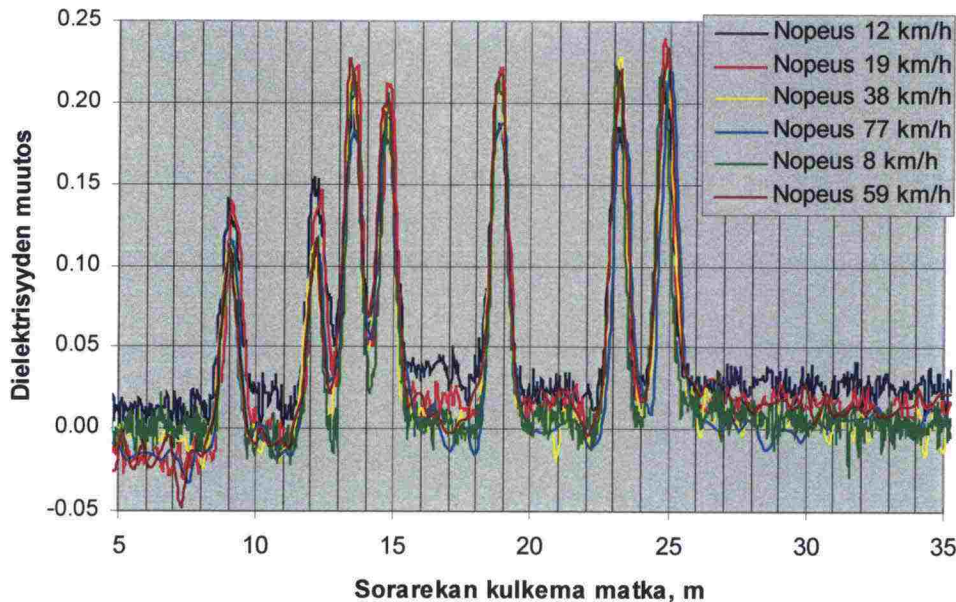
Kuvassa 18 on mittauksissa käytetty 60 tn sorarekka. Lisäksi tiellä liikkui myös muita sorarekkoja. Mittauksissa sorarekan pientareen puoleiset renkaat kulkivat anturien yli. Ylityskertojen välinen aika oli noin 10 minuuttia, joka kului sorarekan käännöksiin. Dielektrisyyttä voitiin mitata kahdesta anturista samaan aikaan, kun toisen anturin signaali mitattiin Percoaseman ja toisen Percometrin kautta. Percometrin kautta mitattiin 0,55 ja 0,80 m syvyyksillä olleiden antureiden signaalit, koska siinä oli valmiudet vain kyseisten anturien mittaamiseen. Siten samaan aikaan voitiin mitata dielektrisyydet syvyyksiltä 0,15 ja 0,55 m tai 0,35 ja 0,80 m. Ensimmäisellä mittauskerralla 26.4. mitattiin kuitenkin vain Percoaseman kautta yhtä anturia kerrallaan. Muutaman kerran mittaukset tehtiin myös Percoaseman kautta, jotta tulosten samankaltaisuus 0,55 ja 0,80 m syvyyksillä saatiin varmistettua. Dielektrisyydet mitattiin yleensä aamupäivän aikana.

Kuvassa 19 on esitetty 60 tn sorarekan aiheuttamat muutokset dielektrisyyteen kantavassa kerroksessa 0,15 m syvyydessä 26.4.. Sorarekan ylitysnopeudet on esitetty selitteessä ylitysjärjestyksessä. Ylitysnopeudella ei ollut selkeää vaikutusta dielektrisyyden muutoksen suuruuteen kantavassa kerroksessa. Renkaan ylitettyä anturin dielektrisyyden palautui nopeasti lähtötasolle muutoksen ollessa 0,2 yksikön suuruinen painavimpien renkaiden kohdalla.



Kuva 18. Koskenkylän mittauksissa käytetty 60 tonnin sorarekka.

Koskenkylä PS 26.4.-01. Dielektrisyiden muutos, syvyys 0,15 m.

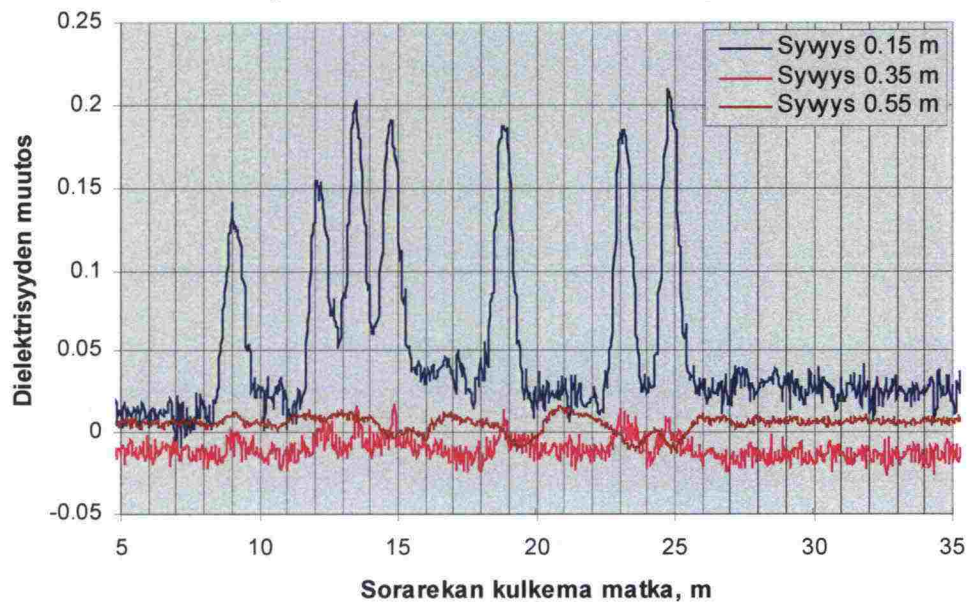


Kuva 19. Sorarekan (60 tn) aiheuttama muutos kantavan kerroksen dielektrisyteen syvyydellä 0,15 m erilaisilla nopeuksilla. Nopeusselitykset ovat ylitysten mukaisessa järjestyksessä. Kantavan kerroksen dielektrisyys oli mittausten alkaessa 11,3.

Kuvassa 20 on esitetty kolmelta eri syvyydeltä 26.6.2001 mitatut dielektrisydet sorarekan nopeuden ollessa noin 10 km/h. Kantavassa kerroksessa 0,35 m syvyydessä mitattu dielektrisyys ei juuri muuttunut sorarekan ajaessa yli, vaikka kyseisellä syvyydellä oli hieman suurempi dielektrisyiden lähtötaso kuin ylempänä. Syynä tähän lienee se, että renkaan ylityksestä syvemmälle aiheutuva kuormituslisäys on pienempi, koska renkaan välittämä kuorma ehtii jakautua laajemmalle alueelle. Jakavassa kerroksessa sorarekan ylitys näyttäisi aiheuttavan lähinnä päinvastaisen vaikutuksen dielektrisyiden pienentyessä renkaan ylittäessä anturin. Ilmiö todennettiin vain kyseisenä mittauspäivänä jakavan kerroksen sulamisvaiheen alkupuolella dielektrisyysarvon ollessa hitaassa nousussa. Käytettävissä olevan tutkimusaineiston pohjalta ilmiölle on vaikea antaa varmaa selitystä. Huomionarvoista mittaussajakohdan olosuhteissa on kuitenkin se, että mittaushetkellä 0,55 m syvyydessä oleva anturi oli suhteellisen lähellä tierakenteen sulanutta yläosaa, mutta kuitenkin vielä jäässä olevan jakavan kerroksen sisällä. Tällöin yli menneen sorarekan pyöräkuormista aiheutuneet taipumat ja vetojäännitykset ovat saattaneet aiheuttaa jäätyneen kerroksen yläosaan vetoalkeamia, jotka anturiin asti ulottuessaan voivat aiheuttaa dielektrisyiden hetkellisen alenemisen.

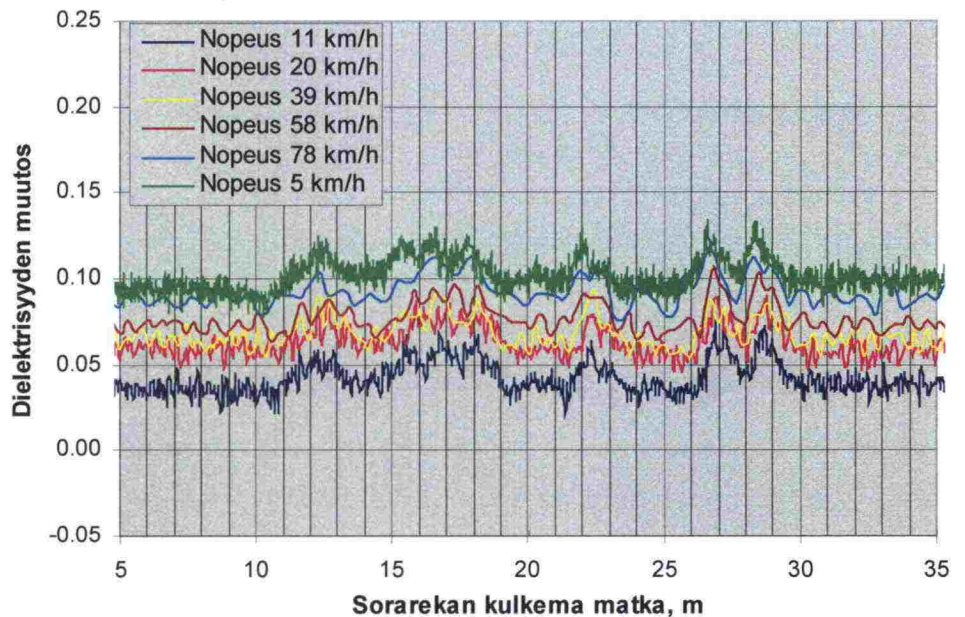
Toinen mittauskerta Koskenkylässä tehtiin 8.5., jolloin oli erittäin lämmin ja aurinkoinen päivä. Ilman lämpötila nousi jopa yli +20 °C. Pohjamaan pintaosa 0,80 m syvyydellä oli kuitenkin vielä jäässä. Kantava kerros oli kuivempi ja pyöräkuormien aiheuttamat muutokset olivat pienempiä kuin aiemmin, varsinkin 0,15 m syvyydessä. Kuvassa 21 on esitetty 0,35 m syvyydestä mitatut dielektrisyiden muutokset. Päivän kuluessa kerroksen dielektrisyys nousi arvosta 11,3 arvoon 11,6, mikä suuntaus näkyy myös kuvassa 21.

Koskenkylä PS 26.4.-01. Kuorma-auton nopeus 10 km/h.



Kuva 20. Sorarekan aiheuttamat muutokset dielektrisyteen eri syvyyksillä. Syvyyksillä 0,15m, 0,35 m ja 0,55 m dielektrisyysarvot olivat 11,3, 11,7 ja 5,9.

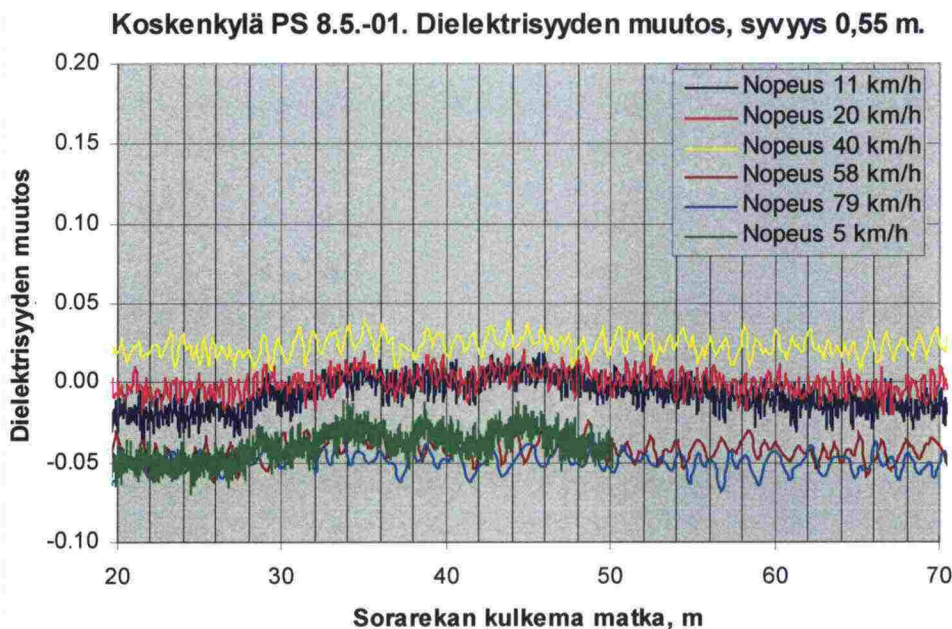
Koskenkylä PS 8.5.-01. Dielektrisyden muutos, syvyys 0,35 m.



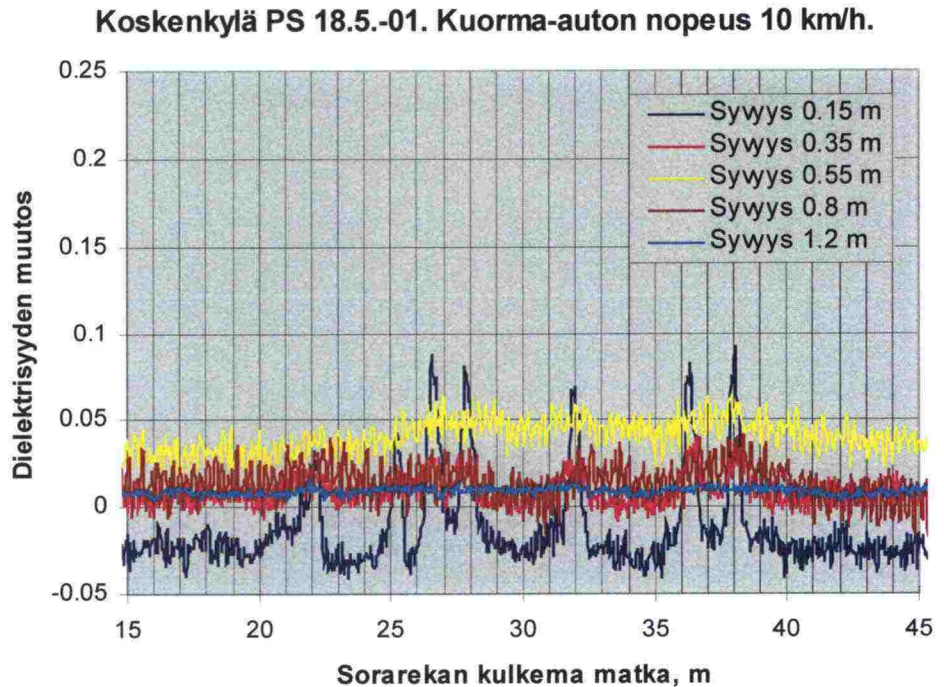
Kuva 21. Sorarekan (60 tn) aiheuttama muutos kantavan kerroksen dielektrisyteen syvyydellä 0,35 m erilaisilla nopeuksilla. Nopeusselitykset ovat ylitysten mukaisessa järjestyksessä. Kantavan kerroksen dielektrisyys oli mittausten alkaessa 11,4.

Kuvassa 22 on esitetty jakavan kerroksen dielektrisyyden muuttuminen sorarekan ajaessa 0,55 m syvyydessä olevan anturin yli. Kuvasta nähdään, että dielektrisyyden muutos ei muutu kun sorarekan nopeus oli suurempi kuin 40 km/h, mutta nopeuden ollessa alle 20 km/h dielektrisyyden muutos näyttää hieman kasvavan kumulatiivisesti renkaiden ylittäessä anturin kohdan, mutta palautuvan lähtötasolle sorarekan mentyä ohi.

Dielektrisyyksiä mitattiin vielä kolmas kerta 18.5., jolloin mittaustulokset olivat saman kaltaisia kuin edellisellä kerralla. Kuvassa 23 on esitetty noin 10 km/h vauhdilla kulkeneen sorarekan aiheuttamat muutokset dielektrisyyteen eri syvyyksillä. Kantavan kerroksen dielektrisyyden muutokset olivat edelleen aiempaa pienempiä. Jakavassa kerroksessa mitatut dielektrisyyden muutokset ovat samaa suuruusluokkaa kuin kymmenen päivää aiemmin. Pohjamaan yläosassa 0,80 metrin syvyydessä mitatut dielektrisyyden arvot muuttuivat hieman sorarekan ylittäessä anturin hitailla nopeuksilla. Pohjamaassa 1,2 metrin syvyydessä ei havaittu dielektrisyyden arvojen muuttuneen sorarekan ylityksen aikana.



Kuva 22. Sorarekan (60 tn) aiheuttama muutos jakavan kerroksen dielektrisyyden syvyydellä 0,55 m eri nopeuksilla. Nopeusselitykset ovat ylitusten mukaisessa järjestyksessä. Kerroksen dielektrisyyden mittauksen alkaessa 22.

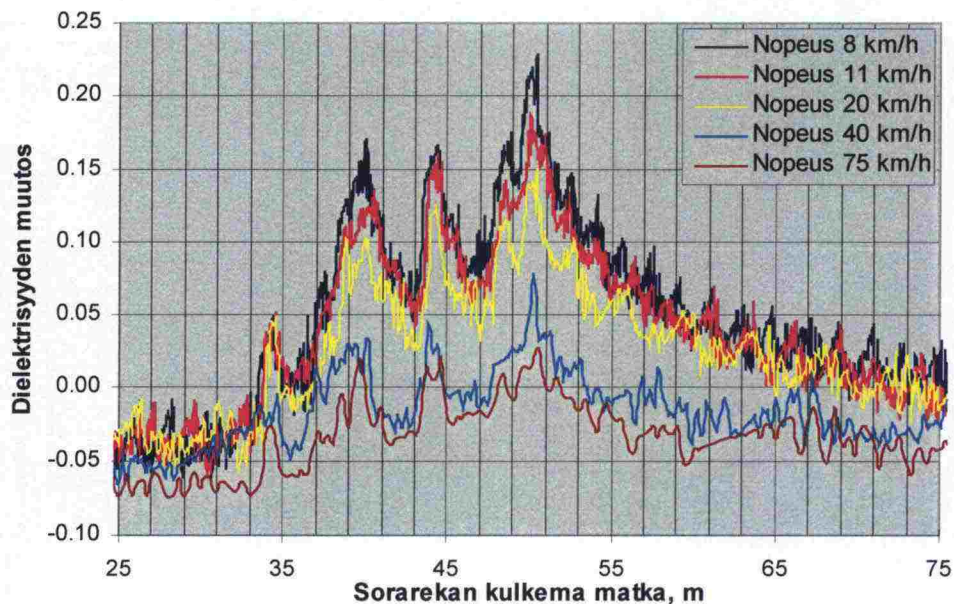


Kuva 23. Sorarekan (60 tn) aiheuttamat muutokset dielektrisyyteen eri syvyyksillä. Syvyyksillä 0,15 m, 0,35 m, 0,55 m, 0,80 ja 1,2 m dielektrisyyden arvot olivat 8,6, 9,9, 21,0, 15,1 ja 5,7.

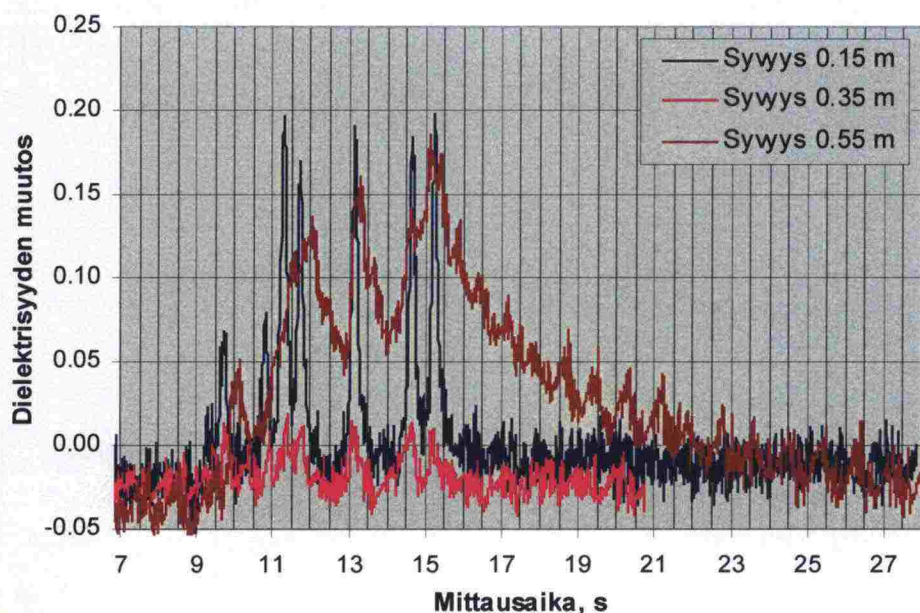
Verrattaessa kevään 2001 mittaustuloksia edellisen kevään 11.5.2000 mittauskertaan huomattiin kantavan kerrosten tulosten olleen hyvin samankaltaisia. Esimerkiksi syvyydellä 0,15 metriä 11.5.2000 dielektrisyyden muutokset olivat suuruudeltaan 26,4. ja 8,5. tehtyjen mittausten välistä. Sen sijaan jakavasta kerroksesta saaduissa mittaustuloksissa oli eroa. Kuvassa 24 on esitetty 11.5.2000 mitatut dielektrisyyden muutokset syvyydeltä 0,55 m. Kuvista 22 ja 24 nähdään sorarekan aiheuttaneen huomattavasti suuremman muutoksen keväällä 2000 vaikka kerroksesta mitattu dielektrisyyden oli vain 2,5 yksikköä suurempi kuin keväällä 2001. Harmittavasti 0,55 m syvyydellä oleva anturi ei ollut keväällä 2001 sama kuin edellisenä vuonna. Tämän takia uuden anturin ympäristö ei välttämättä ole yhtä tiivis kuin aiemman anturin, jolloin anturin ympäristöön ei ehkä synny yhtä helposti mittaustuloksissa näkyvää huokosvedenpainetta.

Tarkasteltaessa pyöräkuormien vaikutusta dielektrisyyteen kuvista 19-24 huomataan, että jakavassa kerroksessa sorarekan ylitysnopeudella on vaikutusta mitattuun dielektrisyyden muutokseen. Kuvissa 22 ja 24 nähdään, että sorarekan ajaessa yli 40 km/h mitatut dielektrisyyksien muutokset ovat selvästi pienempiä kuin alle 20 km/h ajettaessa.

Kuvassa 25 on esitetty vielä 11.5.2000 mitatut dielektrisyyden muutokset eri kerroksissa sorarekan ajaessa niiden yli noin 10 km/h nopeudella tarkasteltuna mittausajan suhteen. Kuvassa nähdään dielektrisyyden muutoksen palautumisen lähtötasolle kestäneen noin 10 sekuntia jakavassa kerroksessa, mikä on yli kymmenen kertaa kauemmin kuin kantavassa kerroksessa palautumiseen tarvittava aika.

Koskenkylä PS 11.5.-00. Dielektrisyiden muutos, syvyys 0,55 m.


Kuva 24. Sorarekan (60 tn) aiheuttama muutos jakavan kerroksen dielektrisyteen syvyydellä 0,55 m eri nopeuksilla 11.5.2000. Nopeusselitykset ovat ylitysten mukaisessa järjestyksessä. Kerroksen dielektrisyys oli mittausten alkaessa 24,5.

Koskenkylä PS 11.5.-00. Kuorma-auton nopeus 10 km/h.


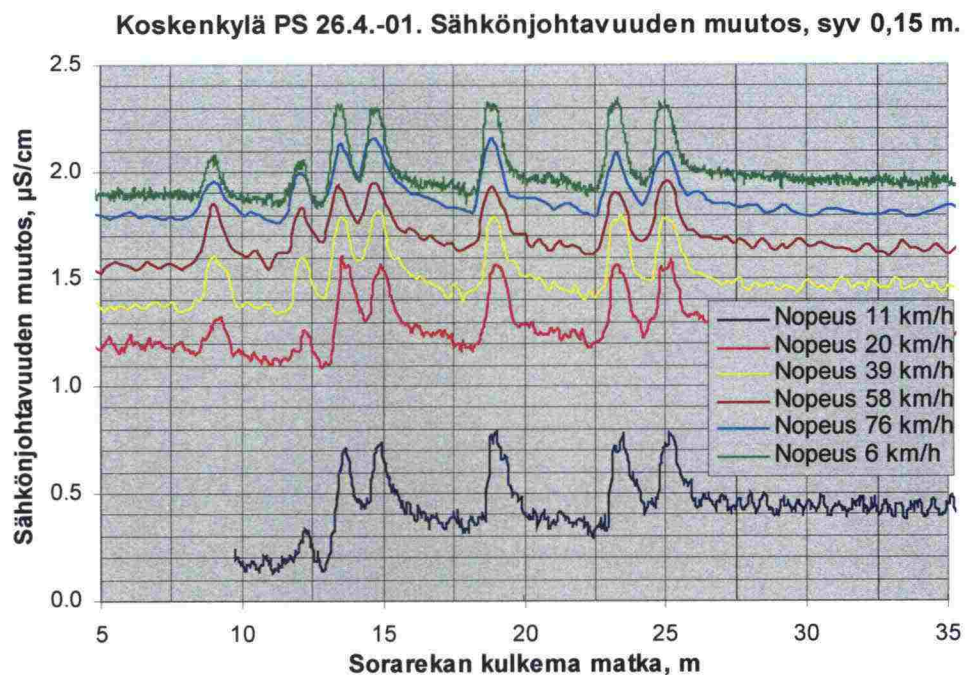
Kuva 25. Sorarekan (60 tn) aiheuttama muutos eri kerrosten mitattuihin dielektrisyysiin noin 10 km/h nopeuksilla 11.5.2000.

4.5.2 Pyöräkuormien vaikutus sähkönjohtavuuteen

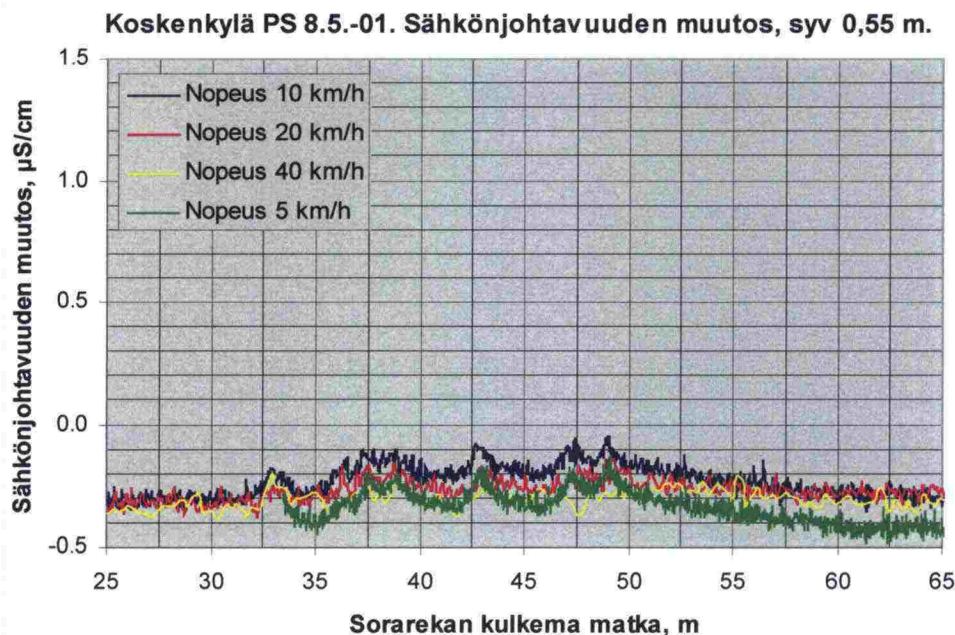
Vuonna 2001 Koskenkylässä mitattiin kerroksista dielektrisyyksien lisäksi ensimmäisen kerran myös sähkönjohtavuutta sorarekan ajaessa antureiden yli. Sähkönjohtavuudet mitattiin yhdestä anturista kerrallaan yleensä puolenpäivän jälkeen.

Kuvassa 26 on esitetty 0,15 m syvyydessä mitatut sähkönjohtavuuden muutokset 60 tn sorarekan ajaessa mittauskohdan yli eri nopeuksilla. Mittausten perusteella sähkönjohtavuus nousi sorarekan ylityskertojen lisääntyessä, jokaisen sorarekan ylityksen jälkeen. Päivän aikana sähkönjohtavuus nousi 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, joka johtunee sorarekkojen ylityksistä johtuvasta kolloidien irtoamisesta kantavan kerroksen mineraalipartikkeleiden raerungosta sekä kerrosten lämpenemisestä. Ensimmäisen ja toisen tallennetun mittauksen välillä oli yksi tallentumaton sorarekan ylitys 20 km/h nopeudella, josta johtuu sähkönjohtavuuden suurempi harppaus mittausten välillä. Syvemmältä kantavasta kerroksesta ei mitattu selkeitä sähkönjohtavuuden muutoksia sorarekan ylityksillä vaikka sähkönjohtavuus 0,35 m syvyydellä olikin 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Toisella mittauskerralla 8.5.2001 saatiin ylimmästä kerroksesta samanlaiset mittaustulokset kuin ensimmäisellä kerralla sähkönjohtavuuden noustessa päivän aikana 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, joka johtunee suurimmalta osaltaan erittäin lämpimän ja aurinkoisen päivän aiheuttamasta lämpötilan noususta kyseisessä kerroksessa. Kantavassa kerroksessa 0,35 m syvyydessä pyörien ylitysten vaikutus oli vähäinen. Kuvasta 27 nähdään, että sorarekan ylityksen vaikutus 0,55 m syvyydessä jakavassa kerroksessa mitattuun sähkönjohtavuuteen on pieni. Sähkönjohtavuus ei palaudu pyörien välillä takaisin lähtötasolle, mutta palautuu pian lähtötasolle sorarekan ohitettua mittauskohdan.



Kuva 26. Sorarekan (60 tn) aiheuttama sähkönjohtavuuden muutos kantavassa kerroksessa syvyydessä 0,15 m eri nopeuksilla. Nopeudet ovat ylitysten mukaisessa järjestyksessä. Kerroksen sähkönjohtavuus oli mittausten alkaessa noin 12 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

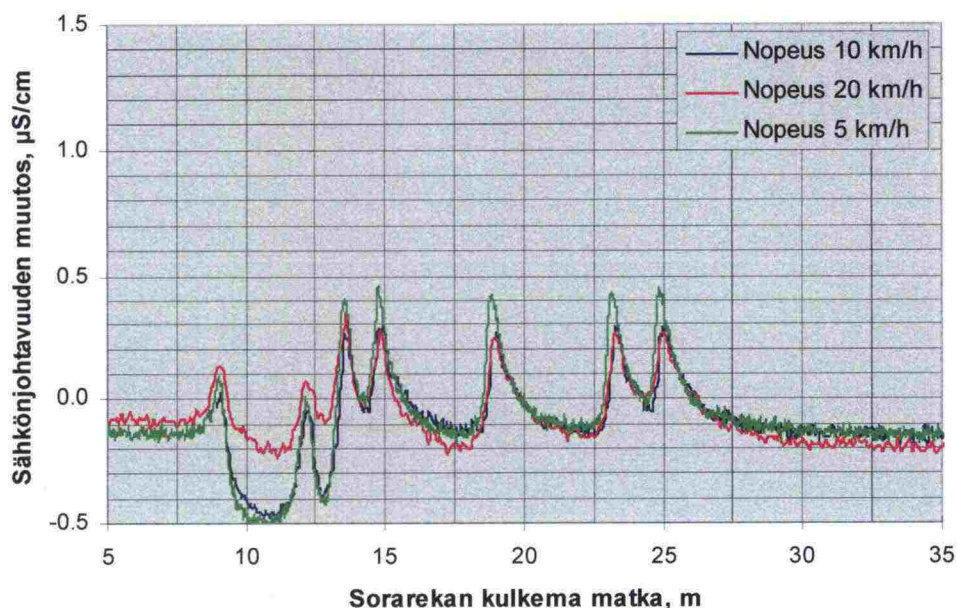


Kuva 27. Sorarekan (60 tn) aiheuttama muutos jakavan kerroksen sähkönjohtavuuteen syvyydellä 0,55 m eri nopeuksilla. Nopeusselitykset ovat ylitysten mukaisessa järjestyksessä. Kerroksen sähkönjohtavuus oli mittausten alkaessa $75 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Kuvissa 28 ja 29 on esitetty kolmannella mittauskerralla todettujen sähkönjohtavuuden muutoksia rakennekerroksissa. Ylimmällä mittaustasolla hitailla nopeuksilla sähkönjohtavuuden muutos oli hieman erilainen kuin aiemmin. Ensimmäisen pyörän ylityksen jälkeen sähkönjohtavuus nousi hieman, minkä jälkeen se pieneni selkeästi, mutta useamman pyörän ylityksen jälkeen käyttäytyminen oli hyvin saman kaltaista kuin aiemminkin. Syvemmillä mittaustasoilla sähkönjohtavuuden muutokset olivat pieniä.

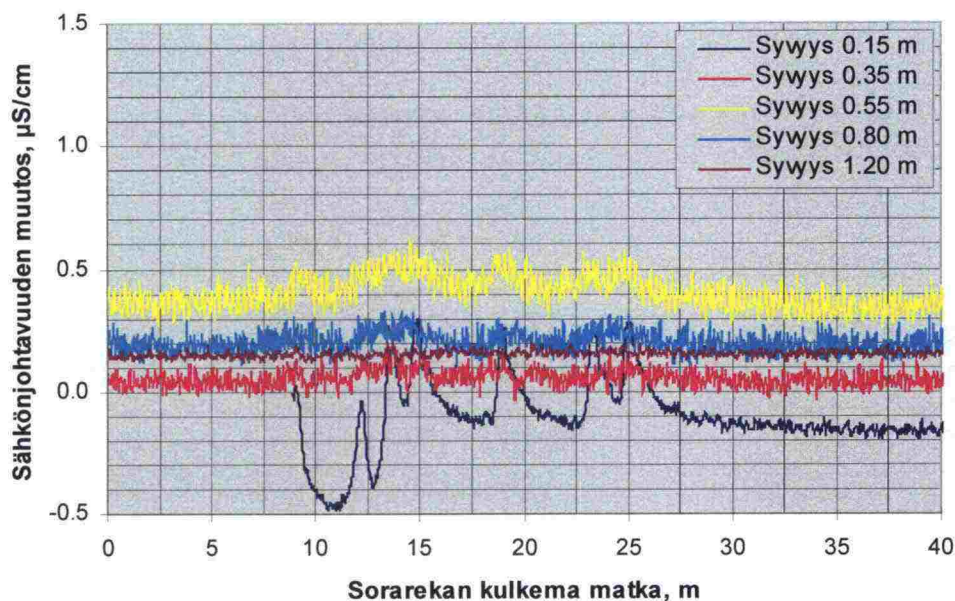
Kuvan 28 hitailla ylitysnopeuksilla 0,15 metrin syvyydessä esiintyvä sähkönjohtavuuden hetkellinen alenema oli muista mitatuista tuloksista poikkeava eikä ilmiölle ole tässä vaiheessa mahdollista antaa varmaa selitystä. Koska käytetty anturi on hyvin herkkä sähkönjohtavuuden mittauksessa, pienetkin muutokset anturin ja maarakenteiden välisessä kontaktissa näkyvät mitatussa sähkönjohtavuuden arvossa. Sorarekan etupyörät sekä ensimmäisen telin ensimmäisen akselin pyörät olivat yksittäispyöriä. Muut pyörät olivat paripyöriä. Koska yksittäispyörän ja paripyörien kautta tierakenteeseen välittyvien kuormien vaikutusalueen laajuus ja kuormitusresultantin paikka tien sivusuunnassa on erilainen, ovat myös yksittäis- ja paripyörien aiheuttamat maarakeiden liikkeet mittausanturin välittömässä läheisyydessä ovat mitä ilmeisimmin erilaisia. Ilmiön voimistuminen ajoneuvon nopeuden pienentyessä ja sulamisen edetessä saattaisi selittyä sillä, että kuorman vaikutusajan kasvaessa ja pohjamaan sulettua pyöräkuorman aiheuttaman tiepinnan taipuma on suurempi ja laaja-alaisempi, jolloin myös anturin läheisyydessä tapahtuvat partikkelien liikkeet voivat kasvaa. Lisäksi kantavan kerroksen kuivuuksella ilman osuus lisääntyy huokostilavuudessa, jolloin maarakeiden ja anturin kontaktin merkitys kasvaa.

Koskenkylä PS 18.5.-01 Sähkönjohtavuuden muutos, syv 0,15 m.



Kuva 28. Sorarekan (60 tn) aiheuttama sähkönjohtavuuden muutos syvyydellä 0,15 m eri nopeuksilla. Nopeudet ovat ylitysten mukaisessa järjestyksessä. Kerroksen sähkönjohtavuus oli mittausten alkaessa $15 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Koskenkylä PS 18.5.-01. Kuorma-auton nopeus 10 km/h.



Kuva 29. Sorarekan aiheuttamat muutokset sähkönjohtavuuteen eri syvyyksillä. Sähkönjohtokyvyt olivat eri syvyyksillä seuraavat; 0,15 m 15; 0,35 m 27; 0,55 m 94; 0,80 m 36 ja 1,2 m $6 \mu\text{S}/\text{cm}$.

5 LABORATORIOTUTKIMUKSET

5.1 Näyttemateriaalit

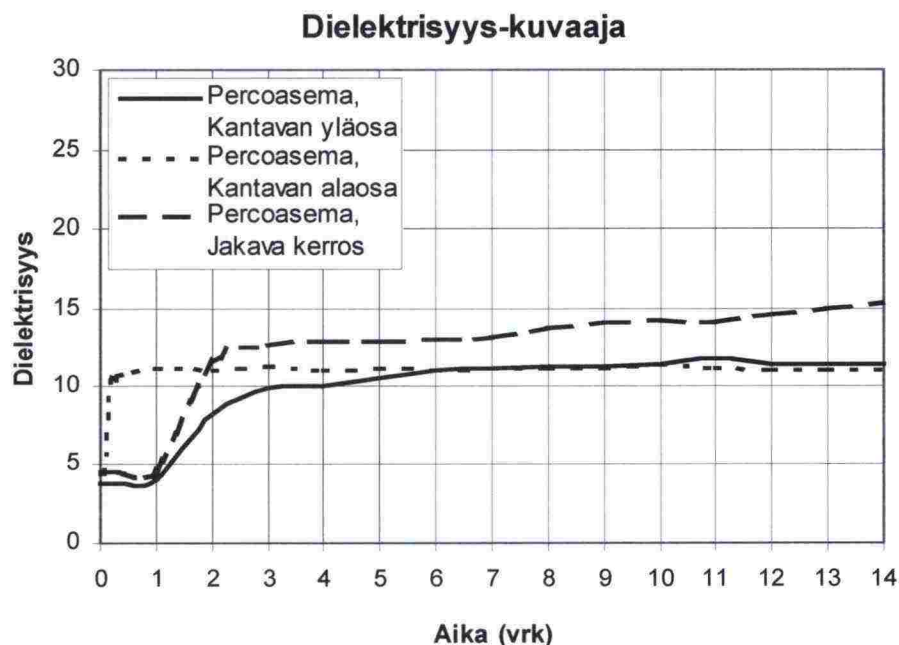
Roadscanners Oy yhdessä Tieliikelaitoksen konsultoinnin kanssa huolehtivat näytteiden ottamisesta Koskenkylän Percoaseman tierakenteesta laboratoriotutkimuksia varten. Tässä raportissa kolmelta eri syvyydeltä otetut näytteet on nimetty ylimmästä lukien seuraavasti; kantavan yläosa, kantavan alaosa ja jakava kerros. Kerrosrajat eivät ole olleet kovin selkeät tiessä, joten pientä sekoittumista on saattanut tapahtua kerrosten välillä tiessä ja näytteiden oton yhteydessä. Laboratoriokokeissa materiaalin maksimiraekona käytettiin 18 mm. Tästä johtuen kantavan kerrosten materiaalien laboratoriokoenäytteiden rakeisuudet eivät vastaa tierakenteessa olevia rakeisuuksia vaan niissä on selkeästi suuremmat hienoainespitoisuudet. Liitteessä 2 on esitetty tierakenteesta otettujen näytteiden sekä Tube Suction -kokeissa ja dynaamisissa kolmiakσιαalikokeissa testattujen näytteiden rakeisuudet.

5.2 Tube Suction -kokeet

Kuvassa 30 on esitetty Tieliikelaitoksen konsultoinnin Oulussa tekemien Tube Suction -kokeiden (Ylitapio 1997) dielektrisyyskuvaajat. Kokeissa materiaalin suurin raekoko oli 18 mm, joten kantavan kerroksen materiaaleissa suurempien rakeiden poistaminen nosti niiden hienoainespitoisuutta. Kokeen perusteella kantava kerroskin saattaa olla ongelmallinen dielektrisyysien ollessa yli 10. Jakavan kerroksen materiaalin dielektrisyys lähestyessä arvoa 15 ja ollessa edelleen suurenemassa 14 vuorokauden kuluttua kokeen alkamisesta voidaan olettaa kerroksessa olevan kantavuusongelmia. Kokeessa jakavan kerroksen dielektrisyys nousi suhteellisen hitaasti. Tämä tarkoittaa kerroksen imevän vettä suhteellisen hitaasti, mikä pienentänee routanousujen suuruutta mikäli lämpötila laskee syksyllä nopeasti.

Verrattaessa koetuloksia Koskenkylässä tierakenteesta mitattuihin dielektrisyysarvoihin huomataan niiden olevan pienempiä kuin keväällä ja suurempia kuin syksyllä mitatut arvot. Koska tierakenteessa mitattiin keväisin suurempia dielektrisyysarvoja kuin Tube Suction -kokeessa voidaan olettaa tierakenteessa olevan suurempi volumetrinen vesipitoisuus routanousujen jäljiltä. Tältä osin Tube Suction -kokeet tuottivat odotetun kaltaisia tuloksia.

Sen sijaan Tube Suction -kokeissa mitatut suurimmat sähkönjohtavuudet olivat huomattavasti suurempia kuin Percoasemalla mitatut arvot. Tube Suction -kokeessa kantavan kerroksen suurimmat sähkönjohtavuudet olivat noin 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kun Percoasemalla oli tierakenteesta suurimmillaan mitattu kantavan kerroksen yläosassa 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ja alaosassa 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Jakavassa kerroksessa oli vastaavasti Tube Suction -kokeen suurin arvo yli 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kun se on tierakenteessa ollut suurimmillaan 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Syynä on todennäköisesti suurempi hienoainespitoisuus, josta johtuen kolloidien osuus huokosvedessä saattaa olla suurempi kuin tierakenteessa.



Kuva 30. Koskenkylän tierakenteesta otettujen näytteiden Tube Suction -kokeiden dielektrisyys-kuvaajat.

5.3 Vuodenaikaisvaihtelua simuloivat laboratorikokeet

5.3.1 Koemenetelmä

TTKK:lla tehdyissä laboratorikokeissa oli tarkoitus simuloida tiemateriaalien käyttäytymistä eri tilanteissa vuodenaikojen mukaan. Kokeissa materiaalin suurin raekoko rajattiin 18 mm näytteen halkaisija ollessa 200 mm ja korkeuden noin 400 mm. Näytteen läpikäymät vaiheet on kuvattu tarkemmin lähteessä (Saarenketo et al. 2000). Tiivistettynä ne olivat seuraavat;

- Näytteen tiivistäminen 5 % vesipitoisuudessa neljässä kerroksessa, jolloin näytteen puolivälin yläpuolelle noin 220 mm korkeuteen asennettiin dielektrisyttä ja sähkönjohtavuutta mittaava anturi.
- Kun näyte oli saatu kumiin sisään ja tuettu, kumiin tehtiin viilto anturin liittimen esiin kaivamiseksi. Lopuksi kumi paikattiin liittimen ympäriltä kumi-paikoilla sekä tiivistettiin joustavalla tiivistysaineella.
- Näyte asetettiin yläpää avoimena kahdeksi viikoksi 40 – 45 °C lämpötilassa olevaan uuniin. Tänä aikana näytteen painoa sekä sähkönjohtavuutta ja dielektrisyttä mitattiin useamman kerran.
- Kahden viikon kuivumisen jälkeen näyte kuormitettiin SHRP P-46:n mukaisesti (AASHTO 1992) materiaalin resilient -moduulin määrittämistä varten.
- Seuraavaksi näytteen annettiin imeä vettä reilun viikon ajan näytteen alaosan ollessa 3-4 cm korkeudelta vedellä kyllästyneenä. Näytteen dielektrisyttä ja sähkönjohtavuutta mitattiin samoihin aikoihin. Lopuksi näyte punnittiin.

- Kostean näytteen resiliient –moduuli määritettiin SHRP P-46:n mukaisesti.
- Näyte altistettiin jäädytys-sulatussyklille, jossa mitattiin noin kahden viikon ajan näytteen routanousua. Näyte punnittiin ja asetettiin kuormitusjalustalle sulamaan. Sulamisen aikana vedelle annettiin mahdollisuus poistua ainoastaan näytteen yläpäässä olleen kuormitushatun kautta.
- Näyte kuormitettiin SHRP P-46:n mukaisesti ilman esikuormitusta resiliient -moduulin määrittystä varten. Kokeen aikana vedelle annettiin mahdollisuus poistua ainoastaan näytteen yläpäässä olleen kuormitushatun kautta.
- Näyte altistettiin pitkälle enintään 100 000 syklin kuormitussarjalle 50 kPa sellipaineessa deviatorisen pystyjännityksen ollessa 300 kPa.

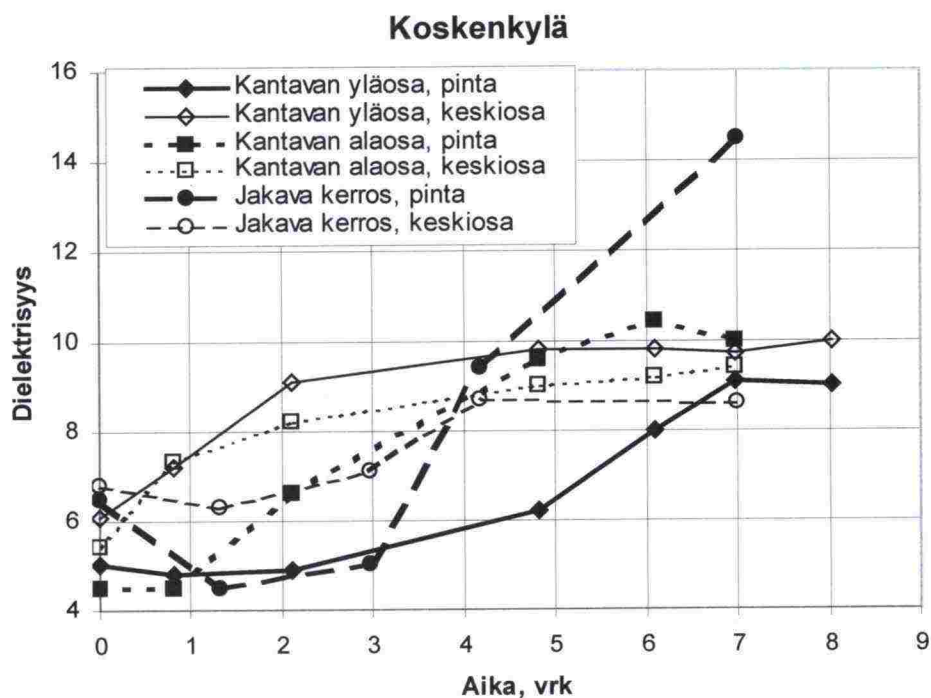
5.3.2 Näytteistä tehdyt mittaukset kuormitusten välissä

Kahden viikon kuivatuksen aikana näytteiden pinnalta mitatut dielektrisyydet pienenevät kymmenestä lähelle neljää. Näytteiden vesipitoisuudet putosivat vastaavasti sullonnassa käytetystä 5 % lähelle 1 % kantavan kerroksen materiaaleilla ja 2 % jakavan kerroksen materiaalilla. Näytteen keskiosassa olleesta anturista ei tehty mittauksia kantavan kerroksen materiaalilla mittauslaitteen ollessa muualla käytössä. Myöskään kuivan näytteen SHRP P-46 kuormitussarjan aikana ei näytteen keskiosasta mitattu sähköisiä suureita.

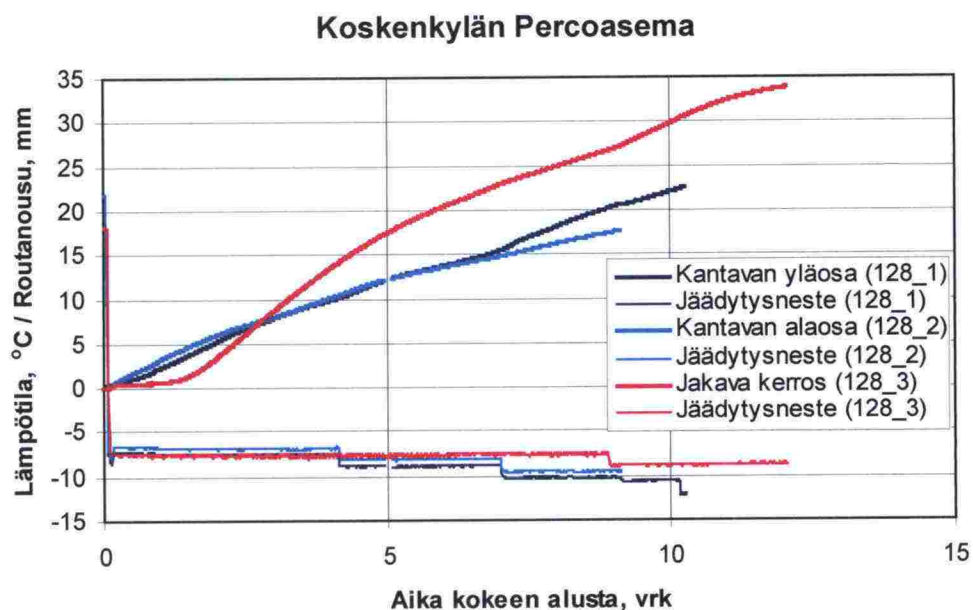
Kuvassa 31 on esitetty näytteiden dielektrisyyksien muutokset näytteiden ollessa imeytysvaiheessa. Näytteiden korkeudesta johtuen pinnasta mitatut dielektrisyydet ovat nousseet selvästi myöhemmin kuin keskiosasta mitatut. Arvot jäivät hieman alhaisimmiksi kuin Tube Suction –kokeissa, mutta materiaalit käyttäytyivät samantapaisesti kuin Tube Suction –kokeissa. Tosin jakavan kerroksen näytteen sisäosasta mitattu dielektrisyyden arvo jäi huomattavasti alhaisemmaksi viimeisessä mittauksessa. Imeytyksen aikana näytteiden vesipitoisuudet nousivat 3,6 – 3,8 prosenttiyksikköä.

Jäädytysvaiheen lopussa kantavan kerroksen näytteiden vesipitoisuus oli yli 8 % ja jakavan kerroksen näytteen lähes 10 %. Kun kantavan kerroksen alaosan näyte oli sulanut huomattiin näytteestä poistuneen vettä näytteen sisälle asennetun anturin liittimen kautta. Kun näyte oli purettu kokeiden jälkeen huomattiin johdossa lähellä liittintä noin 10 mm pitkä viilto, josta vesi oli päässyt johtoon ja sitä kautta pois. Myös näytteen yläkautta poistui vettä lähes 200 g ennen SHRP-kuormitussarjaa. Kantavan kerroksen yläosan näytteestä oli poistunut vettä kuormitusjalustan ja näytekumin välistä sulamisen aikana sekä näytteen kuormitushatun kautta lähes 400 g ennen SHRP-kuormitussarjaa. Jakavan kerroksen näytteestä poistui vettä ennen SHRP-kuormitussarjan aloittamista yli 350 g.

Jäädytyksen aikana kantavan kerroksen materiaaleissa tapahtui huomattavaa routanousua. Routanousu oli lähes 20 mm yhdeksän vuorokauden kulluttua jäädytyksen aloittamisesta. Kuvassa 32 on esitetty näytteiden routanousut sekä näytteen yläpäässä olleen jäädytyshatun mitatut lämpötilat ajan suhteen. Sulamisen jälkeen näytteiden korkeus ei palautunut alkuperäiselle tasolle vaan näytteet jäivät alkuperäistä löyhemmiksi. Kantavan kerroksen materiaalien routanousut olivat samanlaiset ja ne alkoivat välittömästi jäädytyshatun kylmettyä alle 0 °C. Jakavan kerroksen materiaalilla routanousu alkoi vasta kahden vuorokauden kulluttua routakokeen aloittamisesta, jonka jälkeen routanousu oli nopeampaa kuin kantavan kerroksen materiaaleilla.



Kuva 31. Koskenkylän näytteistä mitatut dielektrisyydet imeytysvaiheen aikana. Keskiosa on mitattu näytteeseen asennetun anturin kautta ja pinta on mitattu pinta-anturilla näytteen pinnalta.



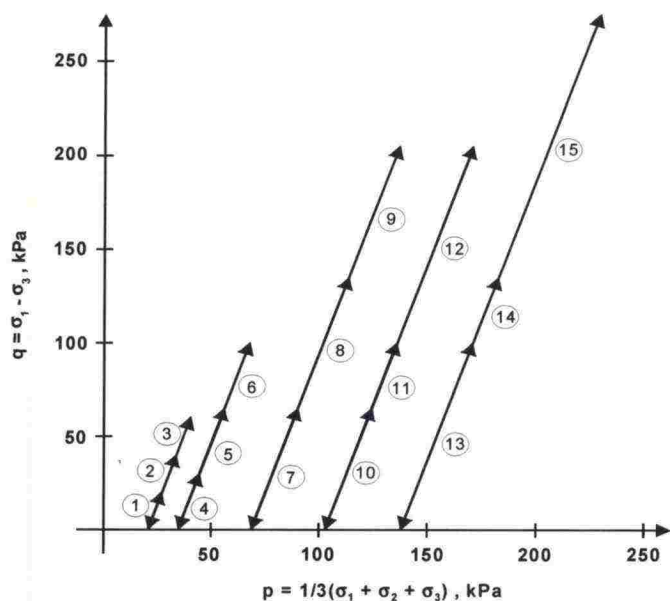
Kuva 32. Koskenkylän näytteiden routanousujen eteneminen jäädytysvaiheessa sekä jäädytysnesteiden lämpötilat ajan suhteen.

5.3.3 SHRP-kuormitussarjojen tulokset

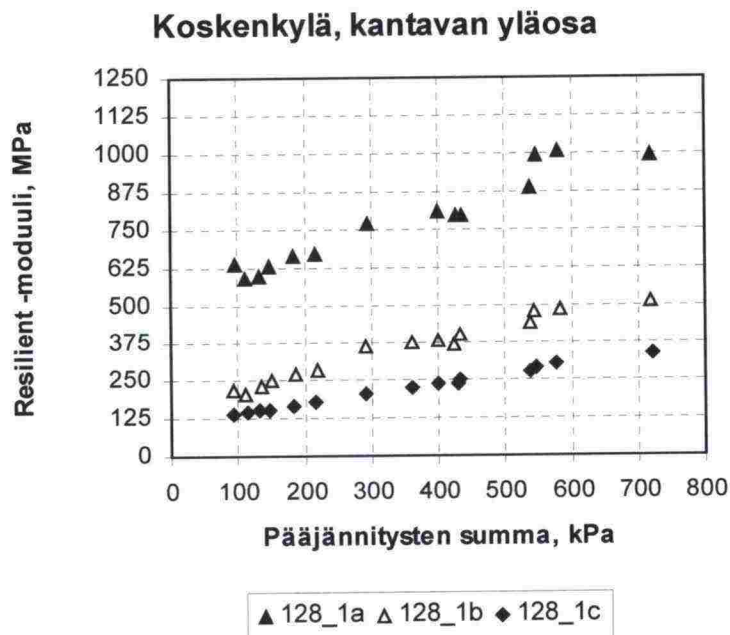
SHRP-kuormitussarjassa käytettyjen kuormituspulssien jännityspolut on esitetty kuvassa 33 kuormitusjärjestyksessä. Kutakin sellipaineen ja aksiaalisen kuormituksen yhdistelmää vastaava kuormituspulssi on toistettu koesarjassa 100 kertaa. Yhden kuormituspulssin kesto oli 0,1 sekuntia, jota seurasi 0,9 sekunnin tauko ennen seuraavaa kuormituspulssia.

Kuvissa 34-36 on esitetty Koskenkylän kolmen materiaalin mitatut resilient – moduulit määritettynä eri vaiheissa. Moduuliarvot olivat vielä kosteilla näytteillä suhteellisen hyvät materiaalien vesipitoisuuksien ollessa 5 % lähetyvillä. Jäädytys-sulatussyklin jälkeisen SHRP-koesarjan alussa kantavan kerroksen ylä- ja alaosan näytteiden vesipitoisuudet olivat hieman yli 7 % ja lopussa noin 6,5 %, kun ne jakavan kerroksen materiaalilla olivat noin prosenttiyksikköä suuremmat. Koesarjan aikana näytteet tiivistyivät, mikä näkyi vesipitoisuuden pienenemisenä lähes kyllästyneissä näytteissä.

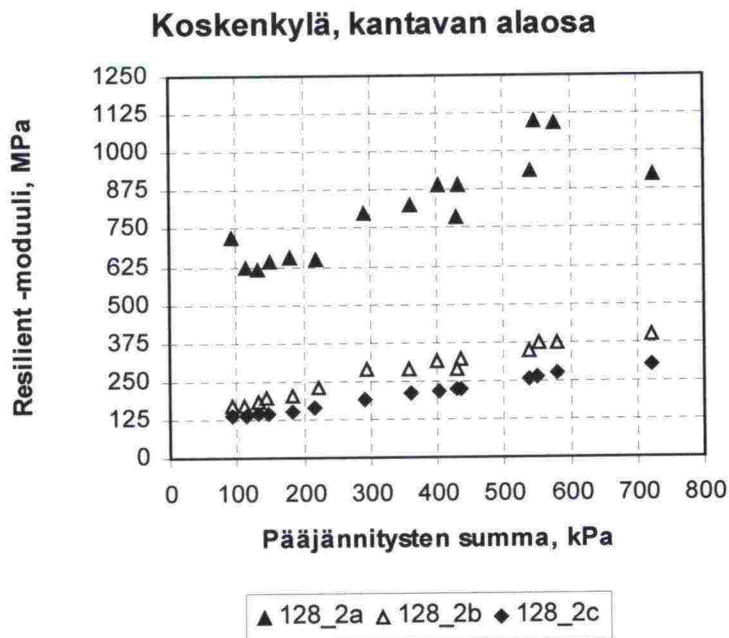
Kuvassa 37 on esitetty SHRP-kuormitussarjan aikana näytteisiin syntyneet pysyvät aksiaaliset muodonmuutokset. Pysyvät muodonmuutokset olivat jäädytys-sulatussyklin jälkeisissä SHRP-kuormitussarjoissa erittäin suuria. Kantavan kerroksen materiaaleissa suurin osa pysyvistä aksiaalisista muodonmuutoksista syntyi kolmen ensimmäisen pulssisarjan aikana. Jakavan kerroksen materiaalilla suuria pysyviä muodonmuutoksia syntyi vielä myöhemmissäkin pulssisarjoissa.



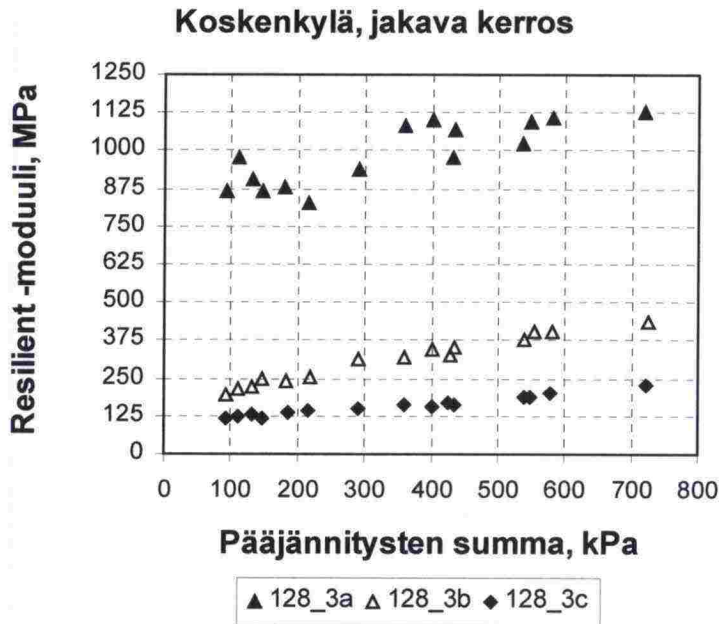
Kuva 33. SHRP protocol P46:n mukaista kuormitustapaa vastaavat kuormitus-pulssisarjat pq -jännitystasossa. Aksiaalisten kuormituspulssien lisäksi vaikuttavaa pystysuuntaista kontaktijännitystä $\sigma_{1 \text{ contact}} = 0,1 \cdot \sigma_3$ ei ole kuvassa otettu huomioon (AASHTO 1992).



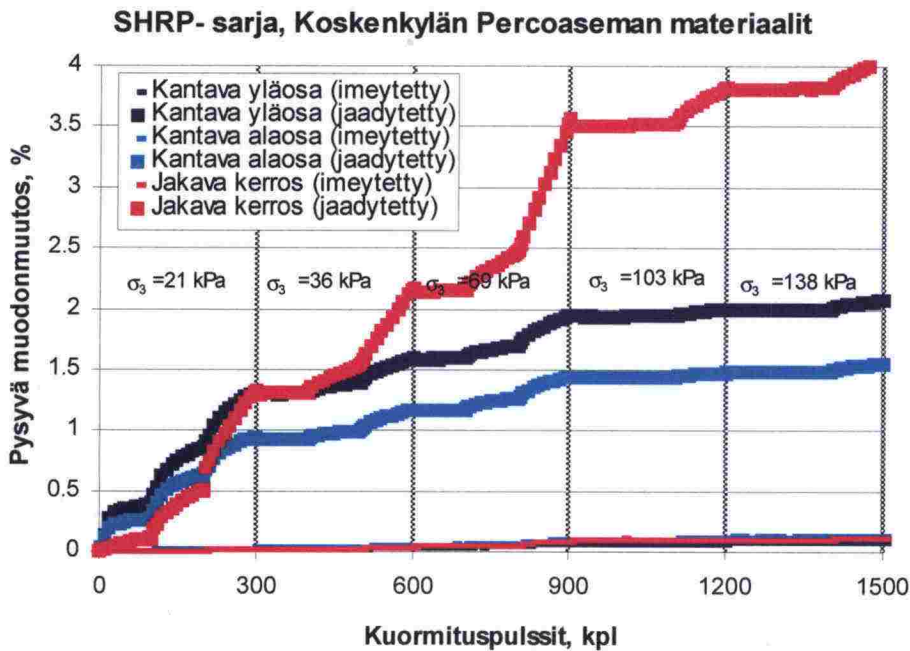
Kuva 34. Koskenkylän kantavan kerroksen yläosa, syklisen kolmiaksaaliko-
 keen tulokset. Kuiva näyte (a), kostea näyte (b) ja jäädytys-
 sulatussyklin jälkeen (c).



Kuva 35. Koskenkylän kantavan kerroksen alaosa, syklisen kolmiaksaaliko-
 keen tulokset. Kuiva näyte (a), kostea näyte (b) ja jäädytys-
 sulatussyklin jälkeen (c).



Kuva 36. Koskenkylän jakava kerros, syklisen kolmiaksaalikokeen tulokset. Kuiva näyte (a), kostea näyte (b) ja jäädytys-sulatussyklin jälkeen (c).



Kuva 37. Koskenkylän materiaaleista tehtyjen näytteiden pysyvät muodonmuutokset SHRP -kuormitussarjan aikana eri kuormitustasoilla.

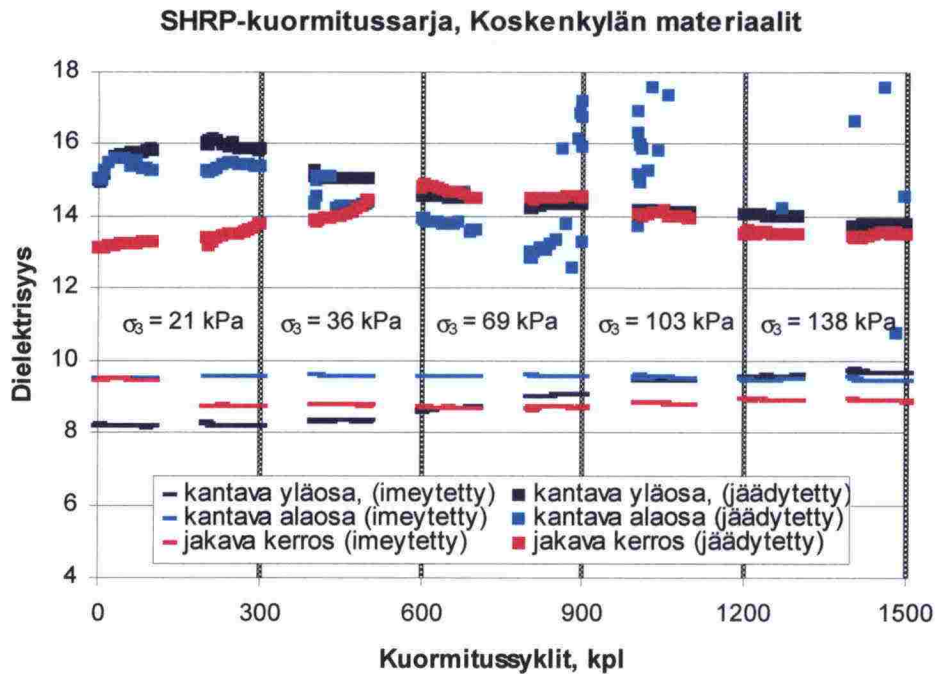
SHRP-kuormitussarjojen aikana näytteen keskikorkeudelta olevasta anturista mitattiin dielektrisyttä ja sähkönjohtavuutta vuorotellen 100 kuormitus-syklin jaksoissa. Tämä vuorottelu oli luontevaa, koska kuormitustaso muuttui aina 100 syklin jälkeen ja näytteessä olevasta anturista ei voitu mitata kuin yhtä suuretta kerrallaan. Mittauksissa ei havaittu yksittäisen kuormituspuls-sin aiheuttamaa dielektrisyden tai sähkönjohtavuuden muutosta.

Kuvassa 38 on esitetty kantavan ja jakavan kerrosten materiaaleista tehtyjen näytteiden dielektrisyksien muutokset SHRP-kuormitussarjojen aikana. Pääpiirteisesti materiaalit käyttäytyvät saman suuntaisesti. Imeytyksen jäl-keisessä kuormituksessa dielektrisyys kohosi hiljalleen kantavan kerroksen yläosan näytteen tiivistyessä ja sitä kautta kyllästysasteen noustessa. Kan-tavan kerroksen alaosan materiaalista tehdyn näytteen dielektrisyys ei muuttunut imeytyksen jälkeisessä kuormituksessa. Jakavan kerroksen näytteessä dielektrisyys sen sijaan hieman pieneni kuormitussarjan alku-puolella, mutta kohosi myöhemmin hieman jääden kuitenkin lähtötasoa pie-nemmäksi.

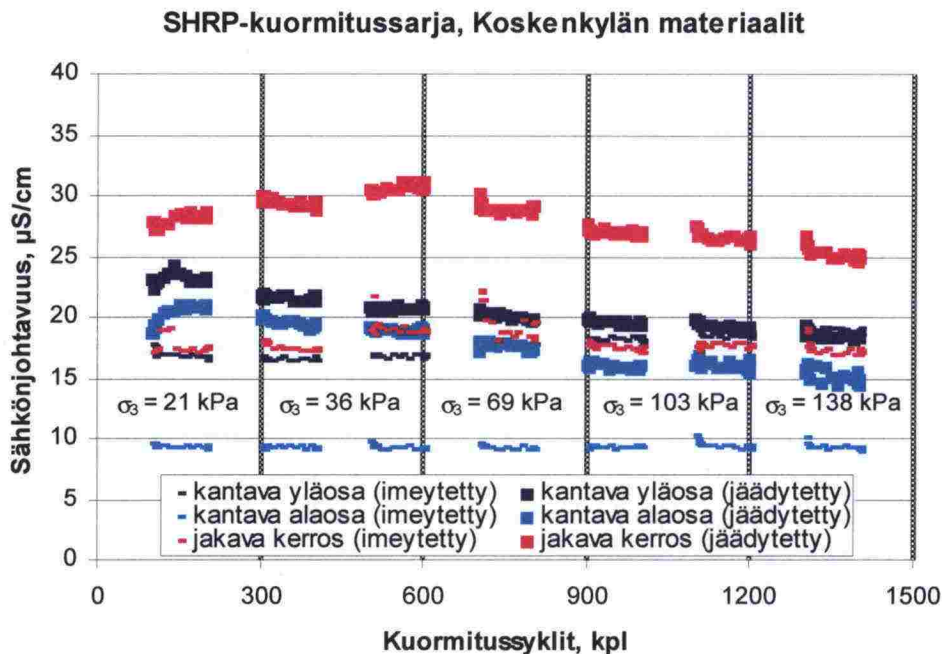
Kantavan kerroksen näytteillä jäädytys-sulatussyklin jälkeisessä kuormituk-sessa dielektrisyys pieneni alun nousun jälkeen veden päästessä poistu-maan näytteen yläosan kautta ja sitä kautta vesipitoisuuden näytteessä pie-nentyessä. Kantavan kerroksen alaosan näytteen loppuosan mittaustulokset eivät ole kuitenkaan luotettavia mittausturinin johtoon päässeen veden se-koittaessa dielektrisyden mittauksen lopullisesti 800 kuormitussyklin jäl-keen, mikä myös näkyy hyvin kuvassa 38. Jakavan kerroksen materiaalilla suurin dielektrisyysarvo saavutettiin vasta kuormituksen puolivälissä, joka johtuneen jakavan kerroksen materiaalin suuremmasta hienoainespitoisuu-desta, jonka vuoksi se päästää veden poistumaan näytteestä kantavan ker-roksen materiaaleja hitaammin. Toisaalta pysyvät muodonmuutokset kas-voivat voimakkaasti jakavan kerroksen näytteessä ja dielektrisyys kääntyy laskuun pysyvien muodonmuutosten kasvun pienentyessä selkeästi.

Kuvassa 39 esitettyjen näytteiden sähkönjohtavuuksien muutokset tapahtu-vat samankaltaisesti kuin dielektrisyysarvojen muutokset. Kantavan kerrok-sen yläosan sähkönjohtavuus suureni imeytyksen jälkeisessä kuormitussar-jassa. Jäädytys-sulatussyklin jälkeisessä kuormitussarjassa sähkönjohta-vuus suureni alussa ja muutaman sadan kuormitussyklin jälkeen se pieneni. Kantavan kerroksen alaosan sähkönjohtavuus pysyi imeytyksen jälkeisessä kuormituksessa samassa tasossa, mutta jäädytys-sulatussyklin jälkeisessä kuormitussarjassa se alussa suureni pienentyen muutaman sadan kuormi-tussyklin jälkeen. Jakavan kerroksen materiaalissa imeytyksen jälkeisen kuormitussarjan alkupuolella sähkönjohtavuus nousi hitaasti, mutta palautui loppupuolella lähelle lähtötasoa. Jäädytys-sulatussyklin jälkeisessä kuormi-tussarjassa jakavan kerroksen materiaalin sähkönjohtavuus nousee selvästi kauemmin kuin kantavan kerroksen materiaaleissa. Sähkönjohtavuuden pieneneminen jäädytys-sulatussyklin jälkeisissä kuormitussarjoissa johtuneen veden poistumisesta ja sitä kautta tapahtuvasta kolloidien vähenemisestä näytteissä.

Kuvista 37 – 39 nähdään näytteiden keskikorkeudelta mitattujen dielektri-syys- ja sähkönjohtavuusarvojen pienenevän pysyvien aksiaalisten muo-donmuutosten kasvun pienentymisen jälkeen.



Kuva 38. Koskenkylän materiaaleista tehtyjen näytteiden dielektrisyyden muutokset SHRP-kuormitussarjan aikana eri kuormitustasoilla näytteen keskikorkeudelta mitattuna.



Kuva 39. Koskenkylän materiaaleista tehtyjen näytteiden sähkönjohtavuuden muutokset SHRP-kuormitussarjan aikana eri kuormitustasoilla näytteen keskikorkeudelta mitattuna.

Kantavan kerroksen materiaalien laboratoriossa tehdyt sähköisten ominaisuuksien mittaukset vastasivat suhteellisen hyvin Percoasemalla havaittua käyttäytymistä. Sen sijaan jakavan kerroksen materiaalilla saadut sähköisten ominaisuuksien arvot olivat selvästi alhaisempia verrattuna Percoasemalla tehtyihin mittauksiin. Tähän on todennäköisenä syynä kolloidien väheneminen näytteestä poistuneen huokosveden mukana.

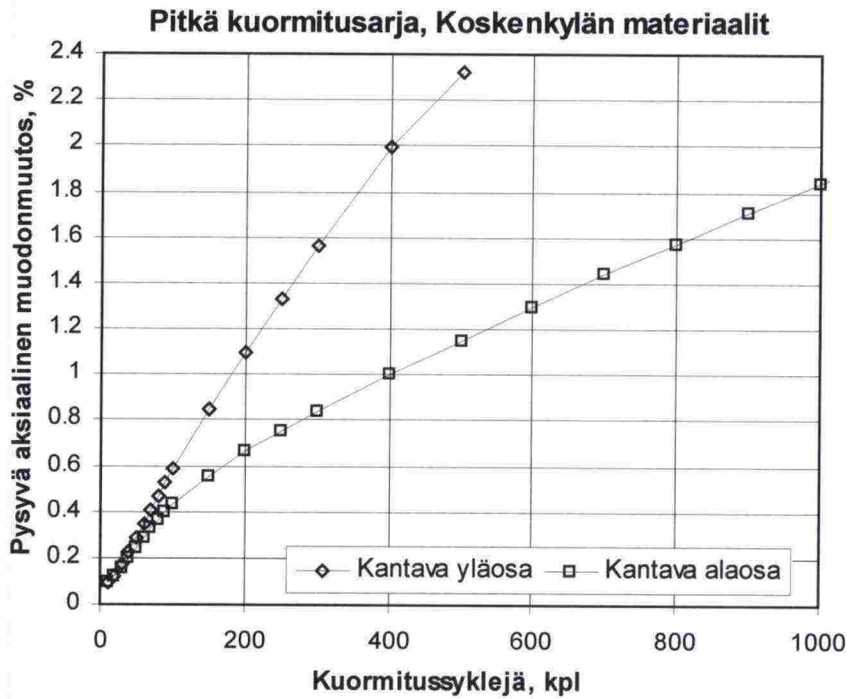
Laboratoriossa määritettyjen resilient -moduulien sekä kuormitussarjan aikaisten dielektrisyyssarvojen perusteella myös Koskenkylän kantavan kerroksen materiaaleista varsinkin alaosassa kantavuus saattaa pettää mikäli vesipitoisuus rakenteessa nousee suureksi. Tosin kantavan kerroksen alaosassa vesi liikkuu nopeasti, joka estää huokosveden ylipaineen nopean suurenemisen kantavassa kerroksessa kuormitustaajuuden ollessa harvahkoa. Lisäksi tierakenteessa materiaali on kantavassa kerroksessa selvästi karkeampaa kuin koemateriaali, kuten liitteen 1 rakeisuuskäyristä voidaan nähdä, jolloin sen kuormituskestävyys pitäisi olla tierakenteessa laboratoriokoeolosuhteita parempi.

5.3.4 Pitkän kuormitussarjan tulokset

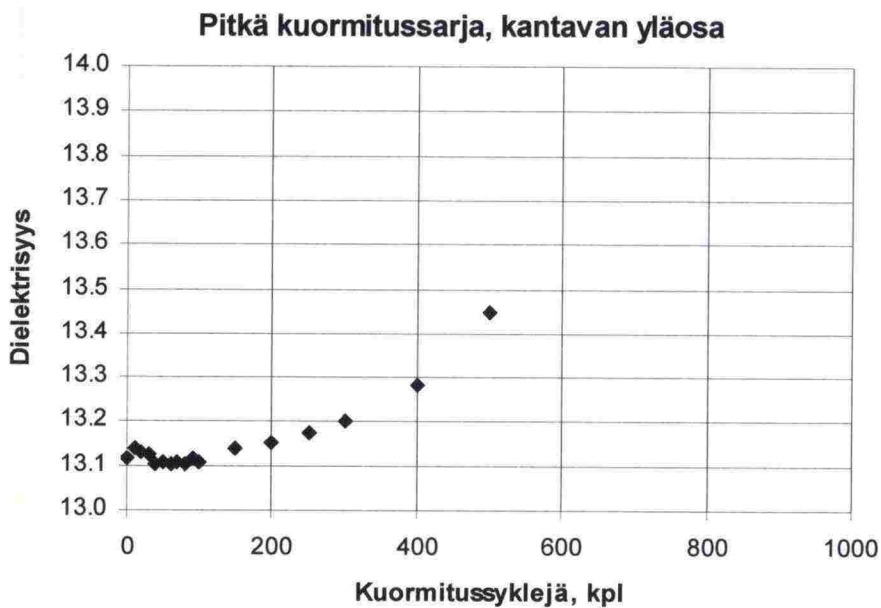
Kantavan kerroksen materiaalit menettivät heti kantavuutensa pitkän kuormitussarjan alussa ja suurten muodonmuutosten vuoksi kokeet keskeytettiin tuhannen kuormituspulssin paikkeilla. Kuvassa 40 on esitetty pitkistä kuormitussarjoista mitatut pysyvät aksiaaliset muodonmuutokset sellipaineen ja deviatorisen jännityksen ollessa 50 kPa ja 300 kPa. Jakavan kerroksen materiaalilla pitkässä kuormitussarjassa mitattiin vain muutama sykli, koska näytteen muodonmuutokset olivat jo erittäin suuria SHRP -kuormitussarjan aikana.

Kuvassa 41 on esitetty dielektrisyyden muuttuminen pitkässä kuormitussarjassa kantavan kerroksen yläosan näytteessä. Dielektrisyys suureni näytteen murtuessa, vaikka SHRP -kuormitussarjan aikana se oli pienentynyt. Kantavan kerroksen alaosan näytteestä yritettiin mitata sähkönjohtavuutta pitkässä kuormitussarjassa, koska dielektrisyyden mittausta ei toiminut jo aikaisemmassa kuormitussarjan aikana anturin johtoon tunkeutuneen veden takia. Mitatuissa sähkönjohtavuuksissa oli hieman hajontaa, mutta keskimäärin sähkönjohtavuus pysyi kuormituksen aikana suhteellisen lähellä pitkän kuormitussarjan alkutilannetta.

Jakavan kerroksen materiaalille tehtiin pitkää kuormitussarjaa vain muutama kuormitus sykli, koska näytteen muodonmuutokset SHRP -kuormitussarjan jälkeen olivat erittäin suuret. Mitatuissa sykleissä dielektrisyyssarvo oli 13,0.



Kuva 40. Koskenkylän kantavan kerroksen näytteistä mitatut pysyvät aksiaaliset muodonmuutokset pitkässä kuormitussarjassa. Deviatorinen jännitys oli 300 kPa ja sellipaine oli 50 kPa.



Kuva 41. Kantavan kerroksen yläosan materiaalissa pitkässä kuormitussarjassa mitatut dielektrisyydet. Deviatorinen jännitys oli 300 kPa ja sellipaine oli 50 kPa.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Percoaseman pitkäaikaiset seurantamittaukset

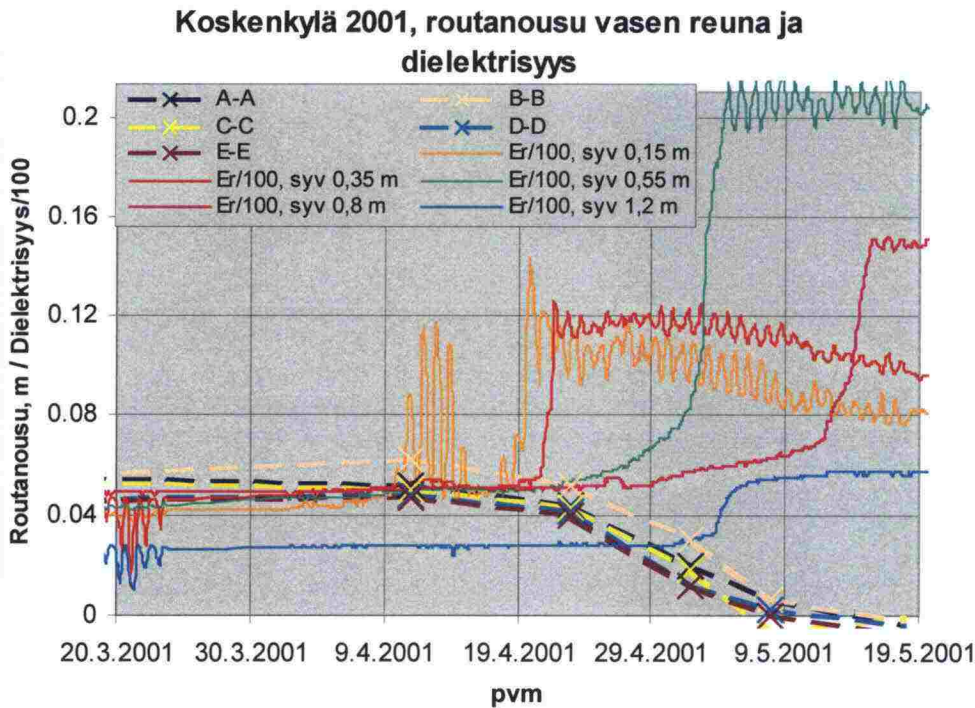
Saadut mittaustulokset Koskenkylän Percoasemalla edustavat vuoden 2000 tapaan leutoa talvea ja erityisesti helppoa kevättä kelirikon kannalta. Mittaustulokset vahvistavat aikaisemman tutkimusraportin tuloksia.

Mittaustulokset osoittavat routanousujen muodostuvan erityisesti korkean dielektrisyuden omaavassa jakavassa kerroksessa, mutta myös hieman kantavassa kerroksessa ja pohjamaassa. Tätä tukee kuva 42, joka osoittaa routanousujen palautumisen tapahtuvan pääasiassa samanaikaisesti jakavan kerroksen dielektrisyysarvon nousun kanssa. Lisäksi tutkimustulokset osoittavat routanousujen palautumisen ehtineen tapahtua lähes kokonaan ennen kuin dielektrisyysarvot alkoivat kohota jakavan kerroksen alapuolisissa kerroksissa.

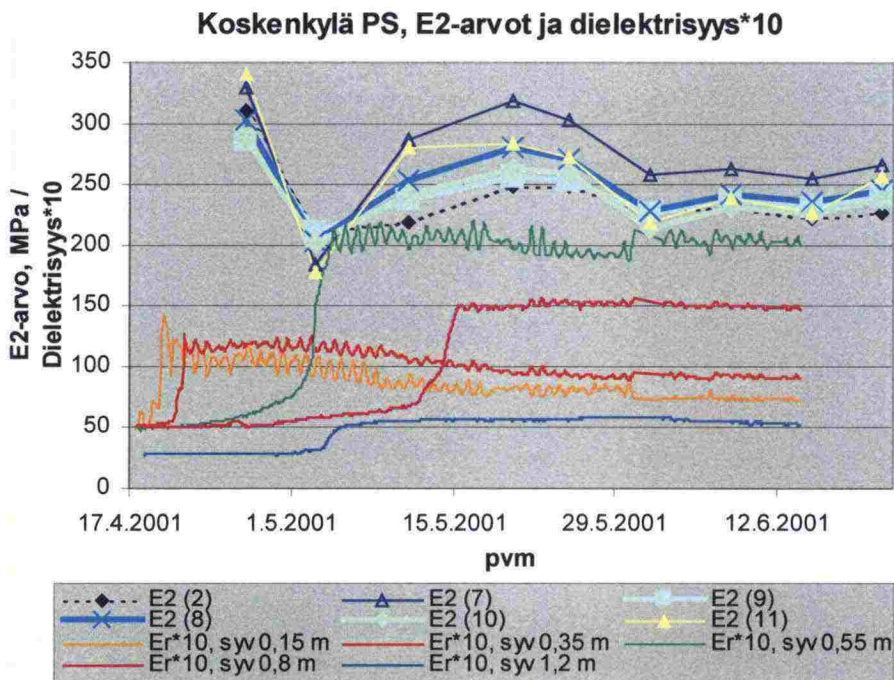
Kuvat 43 ja 44 osoittavat, että pudotuspainolaitteella mitatut suurimmat SCI-arvot samoin kuin mittaustuloksista lasketut pienimmät E2-arvot mitattiin samanaikaisesti jakavan kerroksen dielektrisyuden voimakkaan nousun kanssa.

Sulamispehmenemisestä johtuvat painumat näyttivät alkaneen kun jakavasta kerroksesta mitattu lämpötila oli alle $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sekä käytännössä päättyneen lämpötilan ollessa $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kuvat 6 ja 7 osoittavat kyseisellä lämpötila-alueella mitattujen dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvojen nousevan voimakkaasti, mikä osoittaa dielektrisyuden ja sähkönjohtavuuden mittausten ilmaisevan hyvin maan jäätyminen ja sulamisen etenemistä.

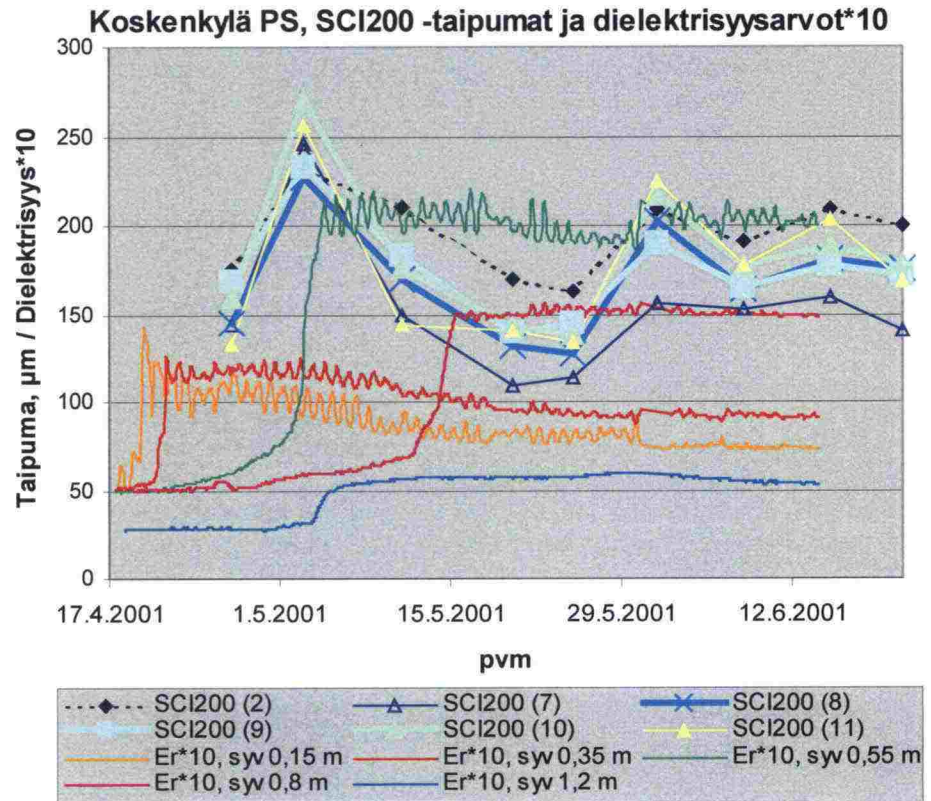
Tutkimus osoittaa, että Percoaseman mittausten perusteella voidaan luotettavasti seurata roudan sulamispehmenemisen etenemistä ja ennakoida kelirikon kannalta pahinta ajankohtaa, jolloin voidaan tarvittaessa asettaa painorajoituksia estämään palautumattomien muodonmuutosten syntymistä siihen.



Kuva 42. Percoasemalla mitatut dielektrisyydet ja sen läheisyydessä sijaitsevien tien poikkileikkausten routanousut. Routanousumittausten ajankohdat on merkitty rastilla. Skaalauksen vuoksi dielektrisyydsarvot on jaettu sadalla.



Kuva 43. Percoasemalla mitatut dielektrisyydsarvot kymmenkertaisina ja pudotuspainolaitteen mittaustuloksista lasketut E2-arvot. Pisteet 8, 9 ja 10 sijaitsevat lähimpinä antureita. Pudotuspainolaittemittausten ajankohdat on merkitty symboleilla.



Kuva 44. Percoasemalla mitatut dielektrisyysarvot kymmenkertaisina ja pudotuspainolaitteella mitatut SCI-arvot. Pisteet 8, 9 ja 10 sijaitsevat lähimpinä antureita. Pudotuspainolaitemittausten ajankohdat on merkitty symboleilla.

6.2 Dynaamisten pyöräkuormien vaikutusten mittaukset

Percoaseman kautta voidaan hyvin mitata pyöräkuormien vaikutusta kerrosten dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvoihin. Koskenkylän Percoaseman kohdalla jakavasta kerroksesta mitattujen sorarekan ylitysten johdosta kohonneiden dielektrisyysarvojen palautuminen lähtötasolle oli selvästi muita kerroksia hitaampaa (kuvat 24 ja 25). Tämän voidaan olettaa ilmentävän nimen omaan mittauskohteen jakavan kerroksen alttiutta pysyville muodonmuutoksille mittausajankohtana.

Kuormitusajan eli sorarekan nopeuden merkitys dielektrisyiden muutoksen oli kantavan kerroksen materiaalissa vähäinen, mutta jakavassa kerroksessa merkittävä. Jakavassa kerroksessa sorarekan suuremmilla nopeuksilla mitattiin pienempiä dielektrisyiden muutoksia (kuvat 19,22 ja 24), mikä viittaisi korkean dielektrisyiden omaavassa materiaalissa dielektrisyiden kasvun riippuvan kuormitusajasta.

6.3 Laboratoriotutkimukset

Vuodenaikaisvaihtelua simuloiva koesarja osoitti jakavan kerroksen materiaalin olevan erittäin routivaa. Myös kantavan kerroksen materiaalit routivat, mutta laboratoriotutkimuksissa niiden hienoainespitoisuudet olivat suurempia kuin tierakenteessa.

Vuodenaikaisvaihtelua simuloivassa koesarjassa Koskenkylän materiaalien dielektrisyys ja sähkönjohtavuudet nousivat selvästi korkeammalle tasolle jäädytys-sulatussyklin jälkeen verrattuna imeytyksen jälkeiseen tilaan. Tämä vastasi suhteellisen hyvin Koskenkylän Percoasemalla havaittua käyttäytymistä.

Laboratoriotutkimukset osoittivat Koskenkylän jakavassa kerroksessa dielektrisyysmuutosten tapahtuvan hitaammin kuin kantavan kerroksen materiaaleissa. Jakavassa kerroksessa vedenläpäisevyyskerroin lienee suhteellisen pieni, jolloin siinä kuormituksesta syntyvän huokosvedenylipaineen purkautuminen kestää suhteellisen pitkän ajan.

Jäädytys-sulatussyklin jälkeisessä SHRP-kuormitussarjassa mitatut resilienssi-moduulit jäivät suhteellisen alhaisiksi erityisesti jakavan kerroksen materiaaleilla, mikä osoittaa kantavuusongelmien olevan mahdollisia talven jälkeen. Rakeisuudeltaan kantavan kerroksen näytteet olivat kuitenkin laboratoriotutkimuksissa jonkin verran erilaisia kuin tierakenteessa.

Erityisesti SHRP -kuormitussarja osoitti jakavan kerroksen materiaalin olevan hyvin altis pysyville muodonmuutoksille roudan sulamisen aikana. Merkittävät pysyvät muodonmuutokset saattavat syntyä jo muutamien kuormitussykliä aikana.

7 KIRJALLISUUSVIITTEET

AASHTO T 294-92 I. Interim method of test for resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils – SHRP protocol P46. AASHTO 1992.

Saarenketo, Timo: Percoaseman tutkimukset 1999-2001 Mt 9241, Koskenkylä, Rovaniemen maalaiskunta. Tutkimusraportti 2001. 57 s. + 4 liites.

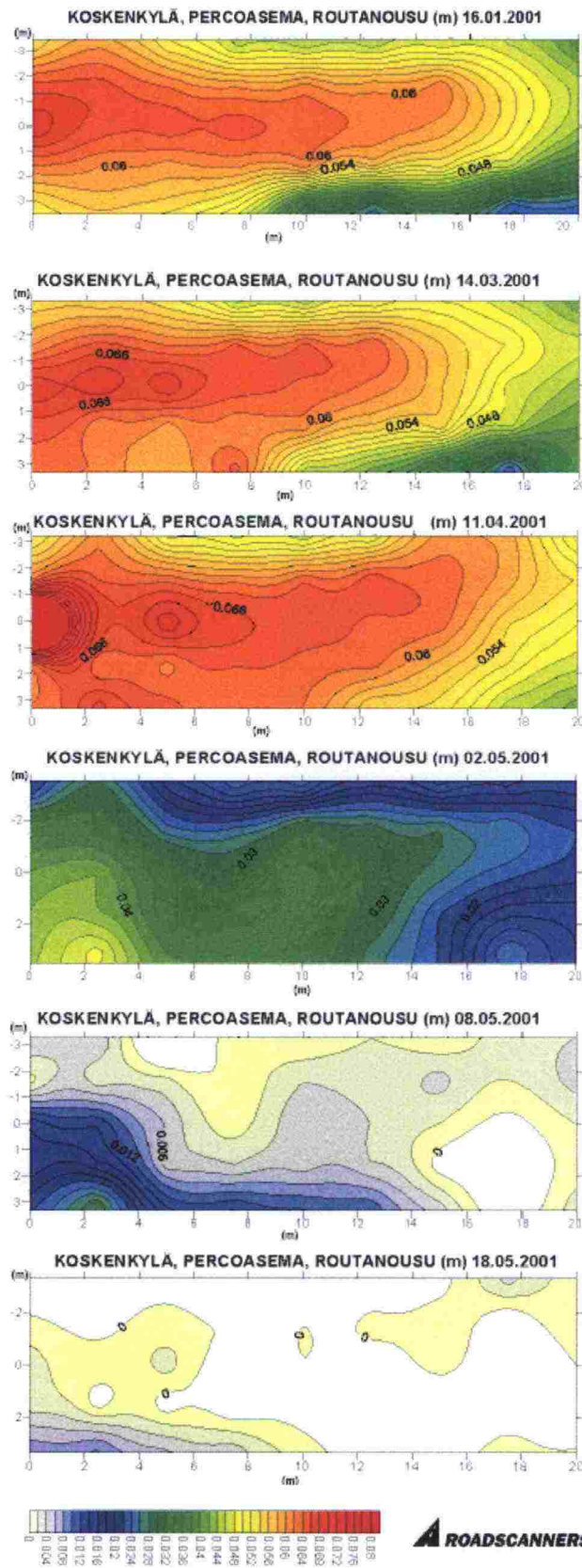
Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Yliheikkilä, T. ja Ylitapio, S.: Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet: osat I & II. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laboratorio, julkaisu 51, 2000. 113 s. + 57 liites.

Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N. ja Ylitapio, S.: Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet. Tiehallinnon selvityksiä 9/2001. 20 s.

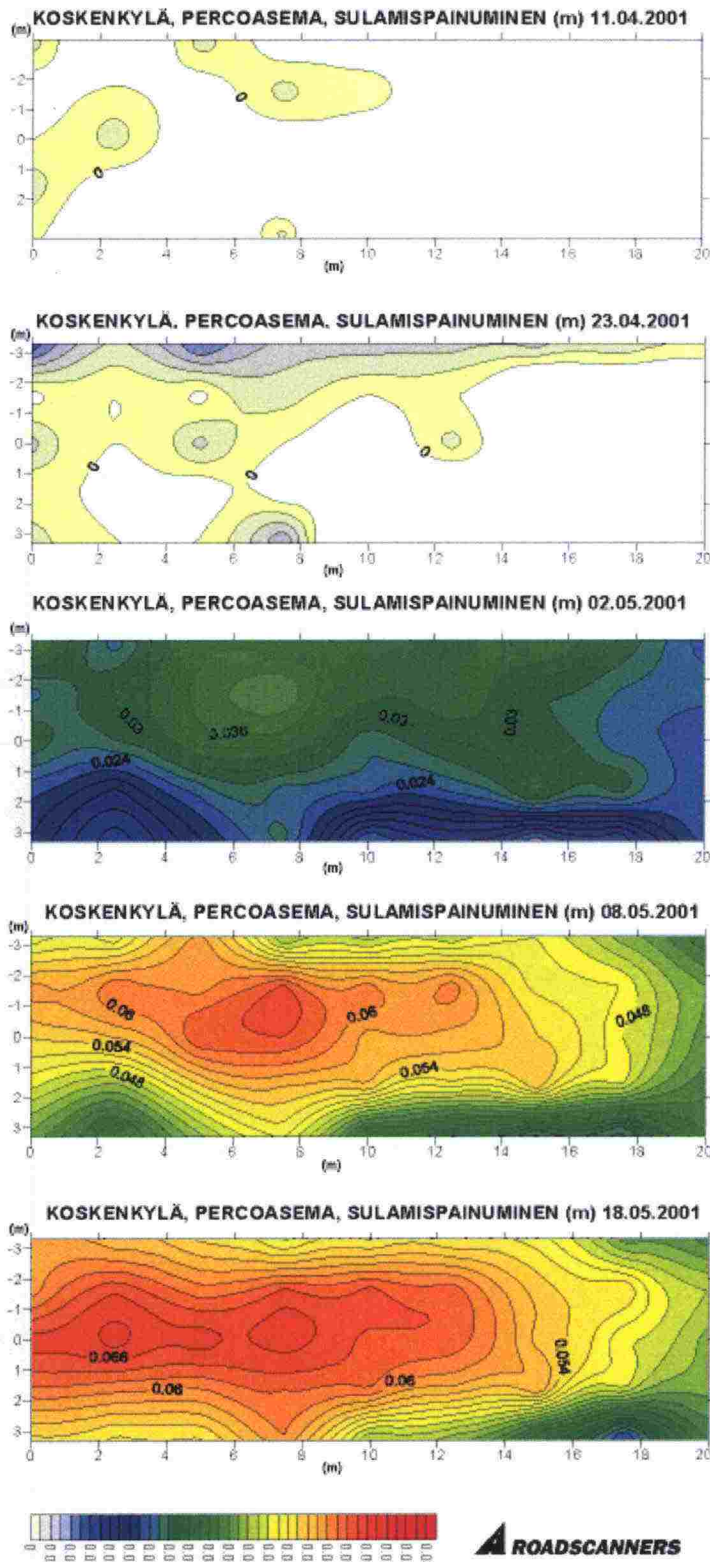
Ylitapio, Seppo: TS-testin käyttö sitomattomien ja bitumilla sidottujen murskeiden laadun arvioinnissa. Insinööriyö. Rovaniemen teknillinen oppilaitos. 1997. 37 s.

8 LIITTEET

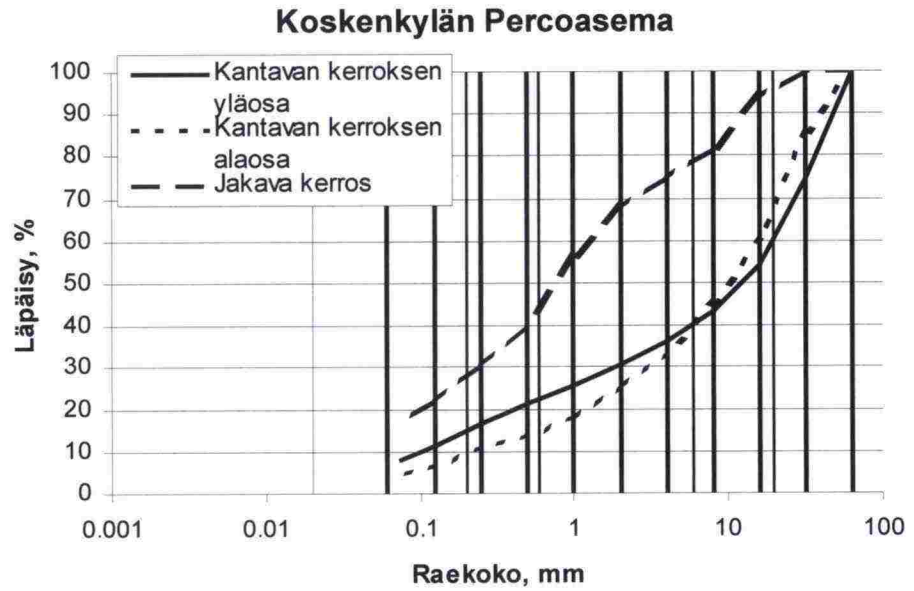
- Liite 1. Rovaniemen Koskenkylän Percoasemalla mitatut routanousut ja sulamispainumat keväällä 2001.
- Liite 2. Rovaniemen Koskenkylän Percoaseman materiaalien rakeisuudet.



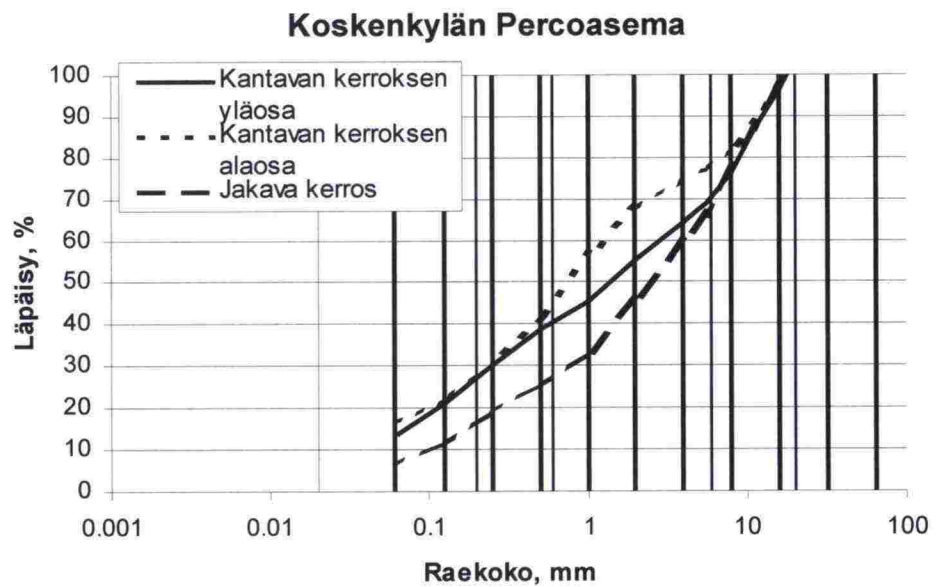
Kuva 1. Rovaniemen Koskenkylän Percoasemalla mitatut routanousut talvella 2001.



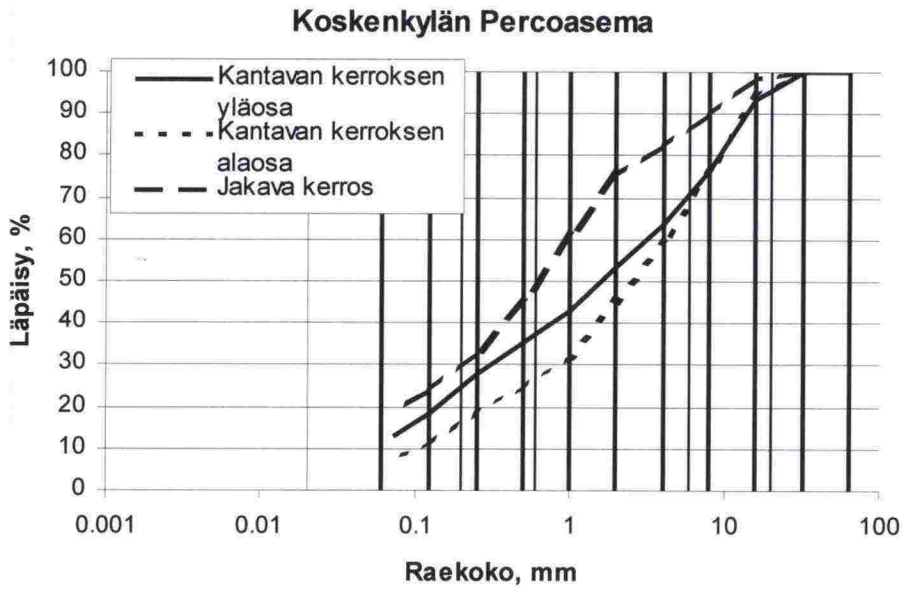
Kuva 2. Rovaniemen Koskenkylän Percoasemalla mitatut sulamispainumat talvella 2001.



Kuva 1. Koskenkylän Percoasemalta otettujen näytteiden alkuperäiset rakeisuuskäyrät.



Kuva 2. Koskenkylän Percoasemalta otetuista materiaaleista tehtyjen Tube Suction -näytteiden rakeisuuskäyrät.



Kuva 3. Koskenkylän Percoaseman materiaalilla tehtyjen dynaamisten kolmiakσιαalikoenäytteiden rakeisuuskäyrät.