

YMPÄRISTÖN-  
SUOJELU

Jyrki Hämäläinen, Juhani Gustafsson,  
Pasi Hellstén ja Taina Nystén

# Natriumkloridin vaikutus mineraalisten luiskasuojausten vedenläpäisevyyteen





Jyrki Hämäläinen, Juhani Gustafsson,  
Pasi Hellstén ja Taina Nystén

# Natriumkloridin vaikutus mineraalisten luiskasuojausten vedenläpäisevyyteen

HELSINKI 2005

Julkaisu on saatavana myös Internetistä  
[www.ymparisto.fi/julkaisut](http://www.ymparisto.fi/julkaisut)

ISBN 952-11-2012-6  
ISBN 952-11-2013-4 (PDF)  
ISSN 1238-7312

Kannen kuva: Jyrki Hämäläinen  
Taitto: Ritva Koskinen

Paino: Edita Prima Oy, Helsinki 2005

# Sisällys

<b>Alkusanat</b> .....	<b>5</b>
<b>I Johdanto</b> .....	<b>6</b>
1.1 Liukkaudentorjunnasta .....	6
2.2 Kloridit liukkaudentorjunnassa.....	6
2.3 Luiskasuojauksen rakentaminen Suomessa.....	7
<b>2 Tieluiskien kloridisuojaus</b> .....	<b>10</b>
2.1 Kloridisuojauksen tarve .....	10
2.2 Luiskasuojauksrakenteet .....	10
2.3 Luonnonmaalajit tiivistysrakenteissa .....	12
2.4 Bentoniittirakenteet.....	13
2.5 Keinotekoiset eristeet.....	14
2.6 Luiskasuojauksen toiminnalliset vaatimukset .....	14
<b>3 Suolan kulkeutuminen luiskasuojauksessa</b> .....	<b>16</b>
3.1. Johdanto.....	16
3.2 Natriumkloridin fysikaaliskemialliset ominaisuudet ja käyttäytyminen....	16
3.3 Kyllästyneen tilan advektio .....	18
3.4 Osittain kyllästyneen tilan advektio .....	18
3.5 Huokosalipaine, matriisi- ja osmoottinen potentiaali .....	20
3.6 Suolan konvektiomassavirta.....	23
3.7 Tiivistyskerroksen hydrauliseen johtavuuteen vaikuttavia tekijöitä.....	23
3.7.1 Mineraalisen tiivistysmateriaalin ominaisuudet.....	23
3.7.1.1 Yleistä .....	23
3.7.1.2 Luonnonmaalajeista rakennetut tiivistysrakenteet.....	24
3.7.1.3 Bentoniittimatot .....	24
3.7.1.4 Maabentoniittiseokset.....	29
3.7.2 Huokosnesteem kemian vaikutus.....	29
3.7.3 Koejärjestelyjen vaikutus saatavaan hydrauliseen johtavuuteen .....	31
3.8 Diffuusiovirtaus .....	32
3.9 Yhdistetty advektiodiffuusiokulkeutuminen.....	34
3.10 Sorptio .....	35
3.11 Kemiallinen osmoosi.....	35
<b>4 Koejärjestelyt</b> .....	<b>36</b>
4.1 Johdanto .....	36
4.2 CUR-selli.....	36
4.3 Koekappaleiden rakentaminen .....	37
4.4 Vedenläpäisevyyden mittaaminen .....	38
4.5 Koejärjestelyn soveltamisesta muihin tutkimuksiin .....	39
<b>5 Tutkittavat materiaalit</b> .....	<b>40</b>
5.1 Natriumbentoniittimatto .....	40
5.2 Aktivoidusta bentoniitista valmistettu matto.....	40
5.3 Kalsiumbentoniittimatto .....	40
5.4 Friedland -savi .....	40
5.5 Murskebentoniitti .....	41
5.6 Moreenibentoniitti.....	41
5.7 Kivituhkabentoniitti.....	42
5.8 Suomalainen savi .....	42

<b>6 Tulokset .....</b>	<b>43</b>
6.1 Natriumbentoniittimatto .....	43
6.1.1 Tulokset.....	43
6.1.2 Huomioita mittauksista .....	45
6.2 Aktivoidusta bentoniitista valmistettu matto.....	45
6.2.1 Tulokset.....	45
6.2.2 Huomioita mittauksista .....	47
6.3 Kalsiumbentoniittimatto .....	47
6.3.1 Tulokset.....	47
6.3.2 Huomioita mittauksista .....	48
6.4 Friedland -savi .....	49
6.4.1 Tulokset.....	49
6.5 Murskebentoniitti 90/10 .....	50
6.5.1 Tulokset.....	50
6.6 Moreenibentoniitti.....	51
6.6.1 Tulokset.....	51
6.7 Kivituhkabentoniitti.....	53
6.7.1 Tulokset.....	53
6.8 Suomalainen savi .....	54
6.8.1 Ensimmäinen vaihe .....	54
6.8.2 Toinen vaihe – uudet koekappaleet.....	56
<b>7 Tulosten tarkastelua .....</b>	<b>58</b>
7.1 Bentoniittimatot .....	58
7.2 Maabentoniitit .....	59
7.3 Muut savet.....	61
7.4 Kommentteja käytetystä koemenetelmästä .....	62
<b>8 Yhteenveto .....</b>	<b>64</b>
<b>Viitteet.....</b>	<b>66</b>
<b>Liite 1. Näytteiden mittaustulokset.....</b>	<b>68</b>
<b>Liite 2. Näytteiden tiedot.....</b>	<b>74</b>
<b>Kuvailulehdet.....</b>	<b>75</b>

# Alkusanat

Ensimmäiset teiden luiskasuojaukset rakennettiin Suomessa 1960-luvulla. 1980-luvulta lähtien pyrittiin rakenteilla pidättämään myös suolaisen veden imeytymistä pohjaveteen. Suojauksissa käytettyjä materiaaleja ovat olleet tiiviit luonnonmaat, muovikalvot, maabentoniitit ja bentoniittimatot. Nykyisten (Pohjaveden suojaus tien kohdalla, TIEH 2100028-04) vuonna 2004 julkaistujen laatuvaatimusten mukaan käytetään vaativissa suojauskohteissa yhdistelmärakenteita. Laadukkaista materiaaleista ja pitkäjänteisestä suunnittelutyöstä huolimatta rakennetut suojaukset eivät ole aina toimineet odotetulla tavalla. Teiden pohjavesisuojausten kestoikä ei ole mitoitettu ja suojausten rakentajilta ei myöskään ole vaadittu rakenteiden pitkäaikaiskeston takuuaikaa. Suojausmateriaalien valmistajat ovat ilmoittaneet eri suojausmateriaalien vedenjohtokyvystä puhtaana veden läpäisevyyden tietoja, mutta tiedot puuttuvat suolaisen veden läpäisevyydestä todellisissa Suomen maaperä- ja ilmasto-olosuhteissa. Ulkomaisten materiaalitutkimusten sekä Tiehallinnon ja ympäristöhallinnon valtakunnallisen pohjaveden kloridiseurannan perusteella epäiltiin bentoniittirakenteiden pitkäaikaista kykyä estää kloridin kulkeutumista pohjaveteen.

SYKEssä 2002 aloitetun RASVAT-projektin (Rasitusten vaikutus pohjavesisuojausmateriaalien toimivuuteen) tarkoituksena oli tutkia rasituksen vaikutusta pohjavesisuojausmateriaalien toimivuuteen ja mineraalisten tiivistysrakenteiden pitkäaikaiskestävyyteen. Tässä julkaisussa esitetään eri vahvuisten NaCl-konsentraatioiden (0,01M, 0,05M, 0,2M ja 1M) vaikutuksia tiivistysmateriaalien kestävyysyteen yhden vuoden tarkastelujaksolla. Jatkossa tulisi tutkia tiivistemateriaalien muiden rasitustekijöiden kuten kuivumisen ja ioninvaihdon yhteisvaikutuksia laboratoriossa. Lisäksi luotettavan tiivistemateriaalien pitkäaikaiskestävyyden arvioinnin edellytyksenä on myös seurata maasto-olosuhteissa suojausten toimivuutta rakennuskohteiden todellisissa maaperä-, ilmasto- ja liikenteen aiheuttamissa rasisolosuhteissa.

SYKEN yhteistyökumppaneita projektissa ovat olleet Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy, Posiva Oy, Tiehallinto ja Tieliikelaitos ja ympäristöministeriö. Tutkimuksen tukiryhmän jäseninä ovat olleet Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy:stä Martti Keppo; Posiva Oy:stä Johanna Hansen; Saanio & Riekkola Oy:stä Paula Keto; Tiehallinnosta Kari Lehtonen; Tieliikelaitoksesta Pasi Virtanen ja Jorma Immonen; ympäristöministeriöstä Tapani Suomela sekä SYKEstä Taina Nystén ja Jyrki Hämäläinen, joka viimeisteli julkaisua vuodesta 2003 lähtien Etelä-Savon ympäristökeskuksessa. Tukiryhmän asiantuntijat ovat seuranneet ja arvioineet tutkimuksen edistymistä sekä tehneet ehdotuksia tutkimussuunnitelmaan. Yhteistyökumppaneilta saatu rahoitus on ollut edellytys projektitutkijoiden palkkaukseen, kemiallisten analyysien ostoon ja koejärjestelyjen toteuttamiseen.

Tämän julkaisun suunnittelusta ja toteutuksesta vastasi suurimmalta osin projektin päätutkija DI Jyrki Hämäläinen ja luvun 1 sisällöstä FM Juhani Gustafsson, FM Pasi Hellstén ja projektin vastuullinen johtaja FT Taina Nystén. Lisäksi julkaisun tiivistelmän käännösten kieliasun muokkauksessa ovat auttaneet FM Carita Nybom ja PhD Anna-Liisa Kivimäki. Julkaisun taiton on toteuttanut julkaisusihiteeri Ritva Koskinen. Tämän julkaisun ovat referoineet Minna Leppänen ja virallisina referoijina professori Raimo Uusinoka ja professori Pauli Kolisoja Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Esitän kaikille tutkimuksen osallistuneille kiitokset.

Helsingissä elokuussa 2005

Erikoistutkija Taina Nystén  
RASVAT -tutkimuksen vastuullinen johtaja

# Johdanto

## 1.1 Liukkaudentorjunnasta

Liukkaudentorjunnalla tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla estetään liukkauden syn-ty tai poistetaan liukkautta parantamalla tienpinnan kitkaa joko kemiallisesti tai mekaanisesti. Teillä, jotka tulee pitää paljaana jäältä ja lumesta, käytetään pääasi-assa vuorisuolaa eli natriumkloridia, jota levitetään tielle rakeisena, kostutettuna tai liuksena. Liukkaudentorjuntaan käytetään harvemmin myös kalsiumkloridia ( $\text{CaCl}_2$ ), mutta vain liuosmuotoisena. Liukkaudentorjunnan perusedellytyksiä on suolauksen oikea ajoitus, jonka arviointiin käytetään tiesääjärjestelmän tietoja ja maastohavaintoja.

## 2.2 Kloridit liukkaudentorjunnassa

Suolan käyttömäärät olivat vähäisiä aina 1970-luvun puoleenväliin (kuva 1). Tä-män jälkeen käyttömäärät kasvoivat hitaasti aina vuoteen 1987 asti, jolloin tienpi-don tavoitteeksi tuli, että pääteiden pinnat tulee olla jäältä vapaana ympäri vuoden (mm. Yli-Kuivila at al., 1993). Uusien tienpidon vaatimusten sekä leutojen talvien johdosta suolankäyttömäärät kasvoivat huomattavasti aina 1990-luvun alkuvuosiin asti. Suolan käyttömäärän huippuvuosi saavutettiin 1990, jolloin käytettiin yhteen-sä 157 000 tonnia suolaa ( $\text{NaCl}$ ) liukkauden torjuntaan. Tiesuolauksen pohjavesille aiheuttaman riskin tiedostamisen jälkeen suolan vuotuisia käyttömääriä on pyritty vähentämään 1990-luvulta alkaen koko maassa. Keskimääräinen tiesuolan käyttö Suomessa vuosina 2000-2004 oli 81 400 tonnia. Liikenneministeriö on asettanut ta-voitteen tiesuolan vuosittaisen käyttömäärän vähentämiseksi. (Tiehallinto 2001)

Suomessa oli vuoden 2004 alussa suolattavia teitä (talvihoitoluokat Is ja I) yh-teensä noin 6 400 kilometriä. Suolan käyttömäärät kyseiseen hoitoluokkiin kuu-luvilla teillä vaihtelee 6,0 - 19,4 t/km. Talvihoitoluokkaan Ib (hiekoitus ja suolaus) kuuluvaa tietä oli yhteensä 10 300 kilometriä ja niillä käytetään suolaa vuodessa noin 2 t/km. Vedenhankintaa varten tärkeillä, luokkaan I kuuluvilla pohjavesialu-eilla on suolattavia teitä (talvihoitoluokat Is ja I) yhteensä 650 kilometriä, luokkaan Ib kuuluvia teitä 890 kilometriä. Luokkiin II ja III kuuluvia teitä on tärkeillä pohja-vesialueilla yhteensä 2840 kilometriä (Tiehallinto, 2004).

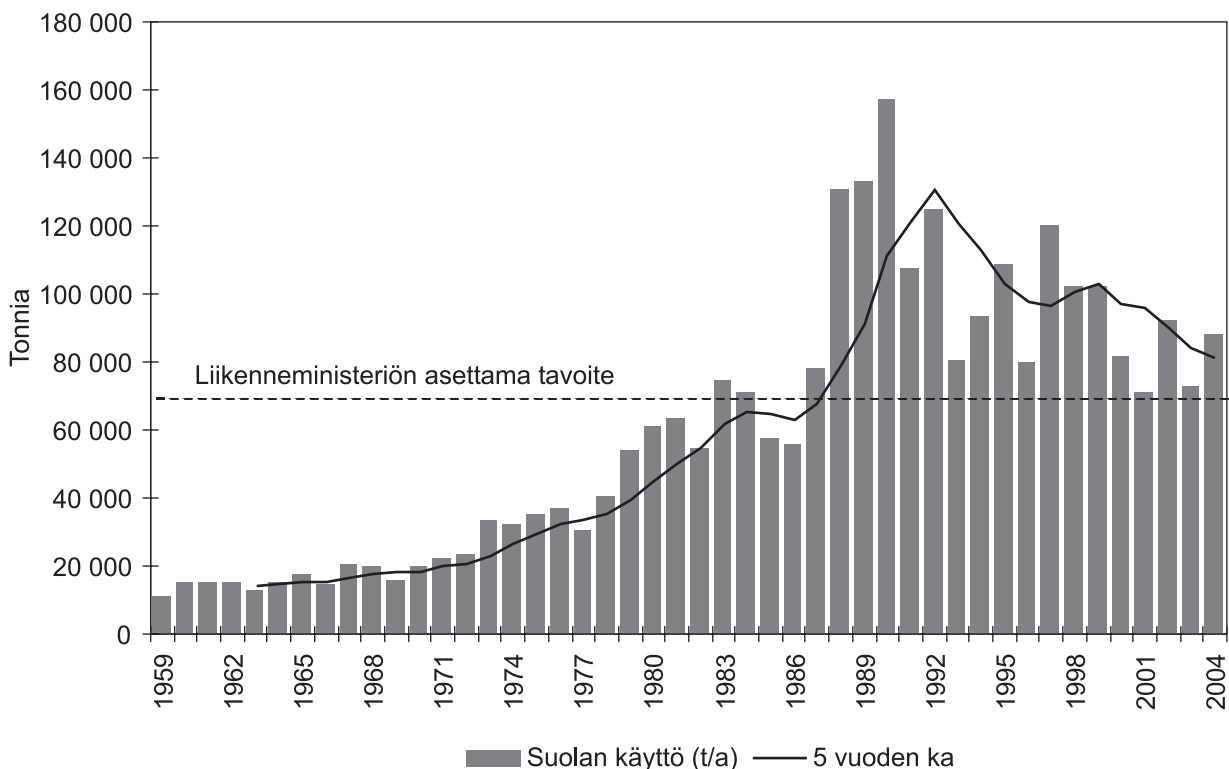
Vuonna 2003 liukkaudentorjuntaan käytettiin suolaa Suomessa yhteensä 73 100 tonnia. Liuossuolan osuus kokonaismäärästä oli 16%:a. Kokonaissuolan käyt-tömäärästä kalsiumkloridia käytettiin talvella liukkaudentorjuntaan 10 %:a eli noin 7 500 tonnia. Lisäksi kesällä koko maassa käytettiin pölynsidontaan sorateil-lä kalsiumkloridia yhteensä 26 000 tonnia.

Kalsiumkloridin ( $\text{CaCl}_2$ ) osuus talvisuolan kokonaismäärästä vaihteli eri tie-piireissä. Vuonna 2000 prosentuaalisesti eniten kokonaissuolamäärästä kalsiumk-loridia käytettiin Keski-Suomen ja Oulun tiepiireissä (14%) ja vähiten Savo-Karja-lan tiepiirissä (3%). Määrällisesti eniten sitä käytettiin Hämeen tiepiirissä yhteen-sä noin 1 490 tonnia ja vähiten Lapin tiepiirissä noin 45 tonnia.

Kalsium- ja natriumkloridilla ei ole merkittävää tehoeroa Suomen olosuhteis-sa. Kalsiumkloridi pitää tien kauemmin kosteana, minkä seurauksena kalsiumklo-ridilla on suurempi rapauttava vaikutus. Tämän vuoksi esim. Ruotsissa ei käyte-tä kalsiumkloridia talvisuolauksessa. Tiehallinnon ohjeiden mukaan kalsiumklo-



ridia saa käyttää ainoastaan liuksena pieninä annoksina ja rakeisen natriumkloridin kostutukseen. Käytetty kalsiumkloridiliuos on 32-prosenttista.



Kuva 1. Suolan käyttö (tonnia/vuosi) liikkautentorjunnassa yleisillä teillä. Vuodesta 2001 eteenpäin vuosittainen suolan käyttö lasketaan sopimuskausittain (lokakuu-syyskuu, edeltävä talvikausi), ei kalenterivuositain. (Lähde: Tiehallinto 2004). Liikenne- ja viestintäministeriö asetti vuonna 2001 tavoitteeksi vuosittaisen tiesuolankäyttömäärän vähentämisen 70 000 tonniin vuoteen 2004 mennessä.

### 2.3 Luiskasuojauksen rakentaminen Suomessa

Teiden luiskasuojauksia on Suomessa rakennettu yksittäistapauksina aina 1960-luvulta lähtien. Pohjavesisuojausten tarkoituksena on estää suolapitoisten sulamisvesien sekä muiden haitallisten ja vahingollisten aineiden kulkeutuminen pohjavesiin esimerkiksi säiliöauto-onnettomuuden yhteydessä.

Tiehallinto on antanut ohjeen pohjaveden suojaamisesta teiden kohdalla jo vuonna 1991, jolloin suojaustasot ja suojaustasojen nimitykset olivat:

- a) Erittäin vaativa suojaus (lähisuojausvyöhyke);
- b) Vaativa suojaus (kaukosuojavyöhyke);
- c) Perussuojaus (muualla osalla pohjavesialuetta ja pohjavesialueet, joille ei ole suunniteltu ottamaa);
- d) Kevytuojaus (vain vanhoilla teillä).

Edellä mainituilla suojaustasoilla käytettiin suojaustekniikkana vuoden 1991 ohjeen mukaan:

- a) Erikoismaatiiviste (rakeisuus- ja vedenläpäisevyysvaatimus,  $k < 5 \cdot 10^{-8}$ ) paksuudeltaan 0,7 m tai maatiiviste (rakeisuus- ja tiiviysvaatimus) paksuudeltaan 0,4 m + muovikalvo;
- b) Erikoismaatiiviste 0,5 m tai maatiiviste 0,7 m;
- c) Maatiiviste 0,5 m tai maatiiviste 0,3 m + muovitettu kuitukangas tai maatiiviste 0,3 m + 0,3 mm rakennusmuovi;
- d) 0,3 m maatiivistettä.

Bentoniittimattoa käytettiin pientareella ja erityisen vaativissa kohteissa maatiivisteiden lisänä. Bitumoitua ja muovitettua kuitukangasta voitiin käyttää pientareella.

Pohjaveden suojaus tien kohdalla –ohjeesta julkaistiin uusi painos vuonna 1993, jonka jälkeen mm. bentoniittimattoa voitiin yksinään käyttää tiivistysrakenteena myös muualla kuin pientareella ja bentoniittimaa (paikallisen maa-aineksen ja bentoniitin seos; tässä tutkimuksessa käytetään termiä maabentoniitti) tuli maatiivisteiden vaihtoehdoksi. Lisäksi ohjeessa annettiin rajoituksia bitumoidun kuitukankaan käytöstä.

Penger- ja kerrosrakenteista (TYLT, tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset) julkaistiin vuonna 1994 rakennusohje, jossa esitettiin mm. pohjaveden suojauksissa käytettävien materiaalien laatuvaatimukset ja rakentamishjeet.

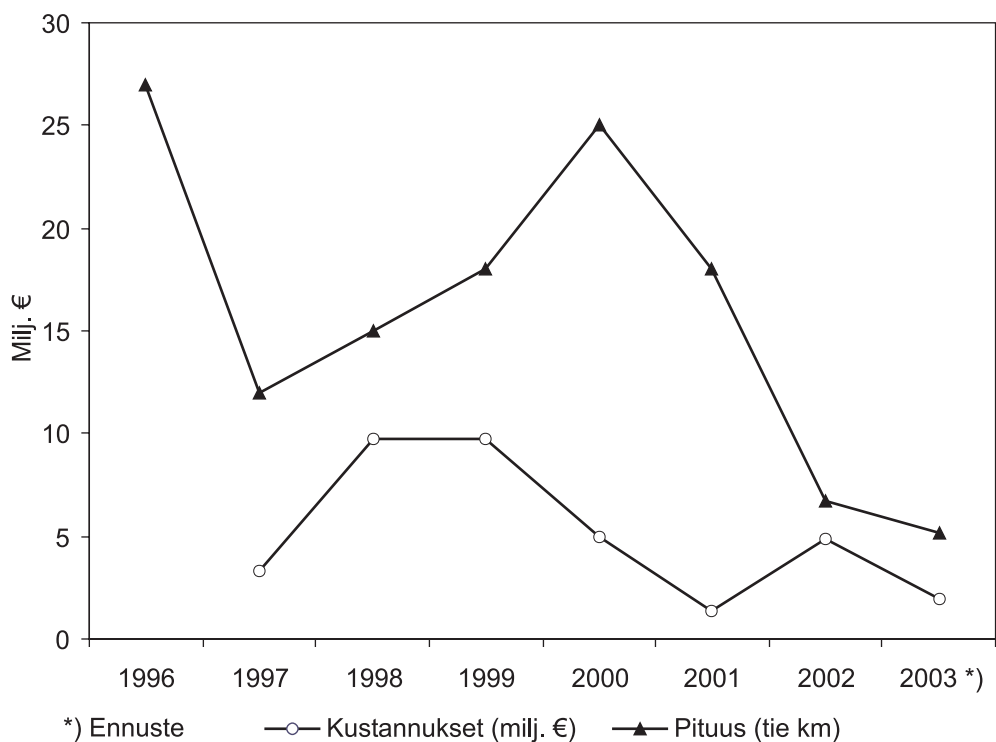
Vuonna 1997 päivitettiin pohjaveden suojaus tien kohdalla- ja TYLT -ohjeita. Kesän 1998 pohjavedensuojaustoissa ei enää hyväksytty maatiivisteiden käyttöä kloridisuojausena. Bentoniittimaalle ja –matolle asetettiin myös entistä tiukemmat laatuvaatimukset. Tiivistysrakenteen pinta tuli kuivattavaa ja tarvittaessa bentoniittimatto ja muovikalvo suojata. Lisäksi AB-päällysteelle asetettiin läpäisyvaatimus, ja alle 0,5 % viettokaltevuuksilla tuli erittäin vaativassa ja vaativassa suojauksessa käyttää ojan pohjalla bentoniittimaton tai –maan päällä vähintään 1,0 mm paksuista muovikalvoa.

Vuonna 2000 julkaistiin luonnokset: ”Pohjaveden suojaus tien kohdalla” ja ”Pohjaveden suojausrakenteet”, jotka ovat tällä hetkellä voimassa olevat suunnittelu- ja rakentamishjeet. Vuoden 2000 ohjeissa suojaustasoina ovat: vaativa kloridisuojaus, kloridisuojaus ja onnettomuussuojaus. Kloridisuojauksissa on tämän ohjeen mukaan aina asennettava ojan pohjalla mineraalisen tiivistysrakenteen lisäksi myös muovikalvo. Maatiivisteiden ja muovikalvon muodostama yhdistelmä rakenne hyväksytään kloridisuojauksiin, mutta maatiivisteelle asetetaan aiempaa tiukempi läpäisyvaatimus. Lisäksi tiivistysmateriaalit tulee suojata entistä paremmin reikiintymiseltä.

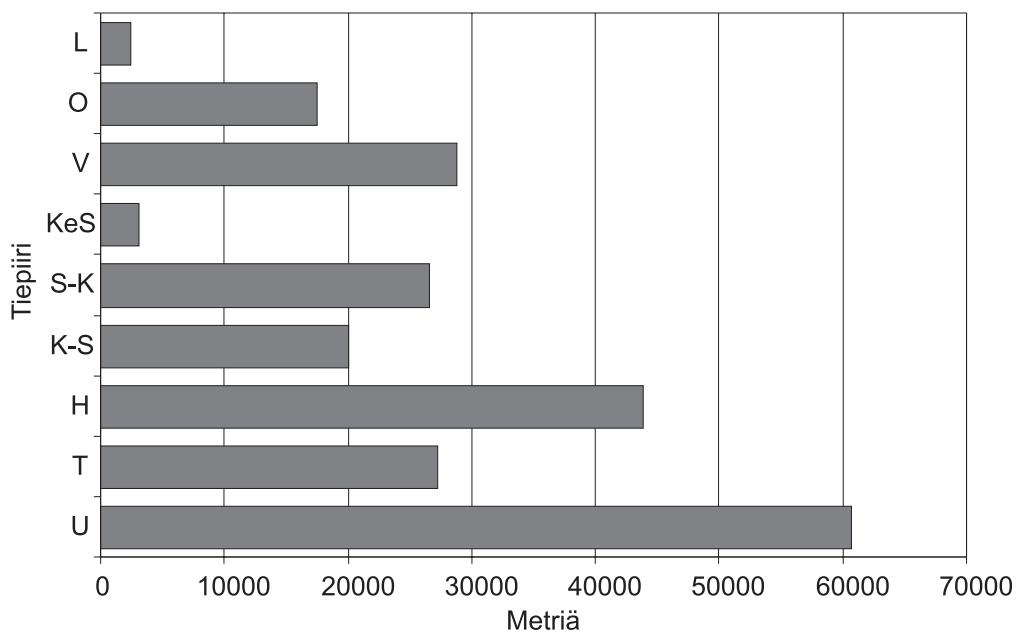
Ennen vuotta 1997 tehdyissä suojauksissa oli pääpaino onnettomuussuojauksessa. Vuodesta 1998 alkaen on pyritty suojaamaan myös pohjavettä tiesuolauksen vaikutuksilta. Vuoden 2000 ohjeistossa vaaditaan kloridisuojauksissa yhdistelmä rakenne, jolloin tiivistysrakenteen läpäisevä vesimäärä on aiempaa pienempi. Vastavasti kloridien heikentävä vaikutus tiivistysrakenteen vedenläpäisevyyteen pienee.

Tietoa rakennetuista pohjavesisuojauksista on tallennettu mm. tiehallinnon ylläpitämään tierekisteriin. Suomessa on rekisterin mukaan (marraskuu 2004) rakennettu yhteensä noin 230 kilometriä pohjavesisuojauksia. Suojauksia on viime vuosikymmenen aikana rakennettu noin 5-27 km vuodessa (kuva 2). Suojaukset sijaitsevat pääosin vedenhankintaa varten tärkeillä pohjavesialueilla ja erityisesti suojauksia on rakennettu vedenottamoiden vaikutusalueille. Nykyisin pyritään suojaukset ulottamaan mahdollisuuksien mukaan koko pohjavesialueella kulkevan tien pituudelle. Suojauksia on eniten Uudenmaan (n. 61 km), Hämeen (n. 44 km) ja Vaasan (n.29 km) tiepiirien alueella, vähiten suojattuja tieosuuksia oli Keski-Suomen (n. 3 km) ja Lapin (n. 2,5 km) tiepiirien alueilla (kuva 3).

Pohjavesisuojauksia, joissa on käytetty bentoniittimattoja tai maabentoniittia (min. 15 cm kerros), on rakennettu Suomessa yhteensä noin 122 kilometriä. Eniten edellä mainitulla tavalla suojattuja teitä on Uudenmaan (n. 41 km), Vaasan (n. 25 km) ja Turun (n. 22 km) tiepiirien alueella. Pelkästään bentoniittimattolla suojattuja teitä on eniten Uudenmaan tiepiirin alueella, noin 37 kilometrin matkalla. Tiivistyskalvoa tai yhdistelmä rakennetta on käytetty pohjavesisuojausena yhteensä noin 38 kilometrillä. Eniten tiivistyskalvoa on suojauksissa käytetty Hämeen tiepiirin alueella noin 16 km matkalla. Maatiivistettä on käytetty suojauksissa yhteensä noin 56 km matkalla. Maatiivistettä on eniten Savo-Karjalan tiepiirin alueella, yhteensä lähes 24 km. Noin 10% kaikista suojauksista on sellaisia, joiden rakenteesta ei löydy tietoa tai sitä ei ole vielä selvitetty.



Kuva 2. Rakennettujen pohjavesisuojausten pituus ja kustannukset vuosina 1996-2003 (Tiehallinto 2001).



Kuva 3. Rakennetut suojaukset tiepiireittäin (L = Lappi, O = Oulu, V = Vaasa, KeS = Keski-Suomi, S-K = Savo-Karjala, K-S = Kaakkois-Suomi, H = Häme, T = Turku ja U = Uusimaa).

# 2

## Tieluiskien kloridisuojaus

### 2.1 Kloridisuojauksen tarve

Yleisimmin Suomen maanteillä käytettävä liukkaudentorjuntasuola on natriumkloridi, mutta paikallisesti käytetään myös kalsiumkloridia. Kloridi heikentää pohjaveteen kulkeutuessaan veden laatua. Sosiaali- ja terveysministeriön Talousvesi-asetuksen (461/2000) mukaan talousvetenä käytettävän (pohja-) veden kloridipitoisuuden suositusarvo on alle 250 mg/l. Vesijohtomateriaalien syöpymisen ehkäisemiseksi kloridipitoisuuden tulisi kuitenkin olla alle 25 mg/l.

EU:n vesipuitedirektiivin (2000/60/EY) mukaan on ihmistoiminnasta johtuvat merkitykselliset ja pysyvät pohjaveden lika-aineiden nousevat muutossuunnat käännettävä laskeviksi vuoteen 2015 mennessä. Suolattujen tiealueiden vaikutuspiirissä sijaitsevien pohjavesiesiintymien kloridipitoisuuden on havaittu monin paikoin kohonneen. Rakennettujen luiskasuojauksen ei ole voitu yksiselitteisesti osoittaa kääntäneen kloridikonsentraatioiden trendejä laskeviksi.

Liukkaudentorjunnan lisäksi muita pohjaveden pilaantumisvaaraa aiheuttavia tekijöitä ovat huoltoasemat sekä vaarallisten aineiden kuljetuksessa sattuvat onnettomuudet. Näissä tapauksissa riskiä aiheuttavia aineita ovat polttoainehiilivedyt ja niiden lisäaineet (MTBE) sekä erilaiset kuljetettavat kemikaalit. Näitä vastaan rakennettavat suojausrakenteet tulee suunnitella kyseisten aineiden kulkeutumismomenteilla silmällä pitäen. Pohjaveden onnettomuussuojauksessa voidaan osittain soveltaa samoja periaatteita kuin kloridisuojauksessa. Onnettomuustapauksessa vapautuvia kemikaaleja ei yleensä voida vapaasti johtaa ympäristön pintavesistöihin, vaan ne on saatava pidättymään maahan, lumeen tai vastaavaan väliaineeseen, joka kaivetaan ja kuljetetaan käsiteltäväksi muualle.

Kloridin sekä onnettomuustapauksissa kemikaalien ja polttonesteiden kulkeutumista pohjaveteen pyritään estämään rakentamalla luiskasuojauksia. Luiskasuojauksen toiminnallisena tavoitteena on johtaa vesi pois pohjaveden muodostumisalueelta sekä pidättää haitta-aineita. Pääosa rakennetuista luiskasuojauksista on erilaisia mineraalisia tiivisterakenteita eli savi-, moreeni-, maabentoniittitai bentoniittimattorakenteita. Mineraaliset tiivisteet eivät ole täysin läpäisemättömiä vaan niissä tapahtuu veden ja siihen liuenneiden aineiden virtausta paine-, konsentraatio- ja lämpötilagradienttien ajamana. Tässä tutkimuksessa keskitytään natriumkloridin kulkeutumiseen mineraalisten tiivistysrakenteiden läpi. Kokeellisesti selvitetään natriumkloridin vaikutusta mineraalisten tiivisteiden hydrauliseen johtavuuteen.

### 2.2 Luiskasuojauksrakenteet

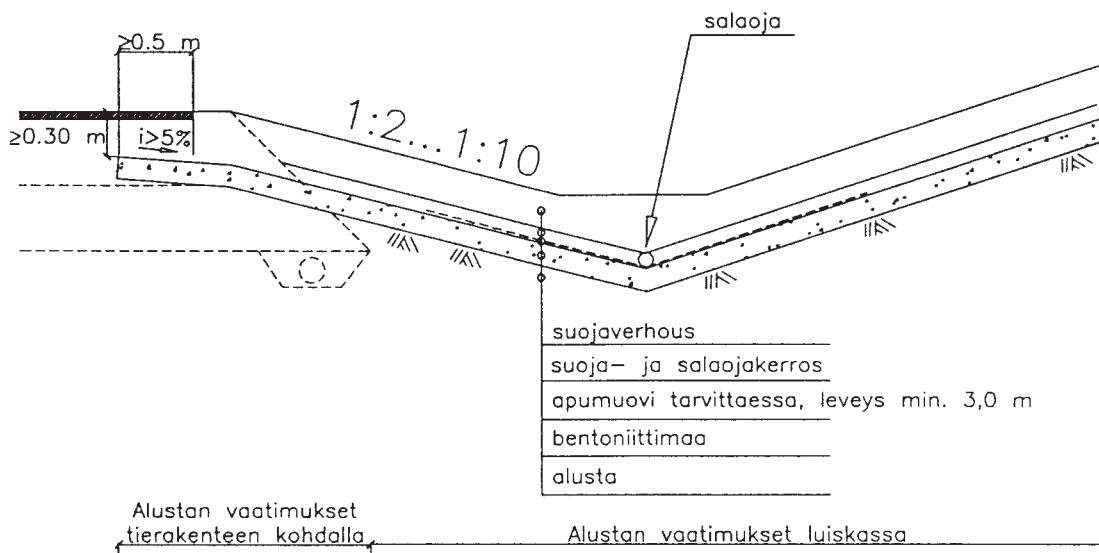
Luiskasuojauksrakenteen koostuu alustasta, tiivistyskerroksesta, salaojakerroksesta ja suojakerroksesta (kuva 4). Tiivistyskerroksen hydraulinen johtavuus määrää yhdessä hydraulisen painekorkeuden kanssa rakenteen läpäisevän vesimäärän suuruuden. Suojauksrakenteen toimintaan vaikuttavat lisäksi tiivistyskerroksen liittäminen tierakenteeseen sekä tiivistyskerroksen läpiviennit. Tiivistyskerros voi olla mineraalinen, keinotekoinen tai molemmista koostuva yhdistelmä rakenne. Mi-

neraalisiin tiivistysmateriaaleihin luetaan luonnonmaat, bentoniittirakenteet sekä mineraaliset teollisuuden sivutuotteet. keinotekoisia eristeitä ovat erilaiset muovit sekä bitumipohjaiset tuotteet, kuten tiivisasfaltit. Bentoniittirakenteita ovat maabentoniittiseokset sekä bentoniittimatot.

Luiskasuojaukselle on ominaista kuivatus- ja suojakerrosten ohuus. Tämän vuoksi tiivistyskerrokseen kohdistuva kuormituspaine on alhainen, vain alle 10 kPa. Lisäksi luiskasuojauksen rakenne altistuu voimakkaasti ilmastorasituksille, joita ovat kuivuminen sekä jäätyminen. Jäätymisen estämiseksi tulisi tiivistyskerros sijoittaa ns. roudattomaan syvyyteen, mutta tämä ei tierakenteessa useinkaan ole mahdollista. Kuivumisen estämiseksi tulisi tiivistyskerroksen alla ja päällä olla vettä hyvin pidättävä kerros ja päällä lisäksi karkearakeinen kuivatuskerros, joka estää veden kapillaarisen nousun pois tiivistyskerroksesta.

Alustan painumat ja routiminen voivat vaurioittaa sekä tiivistys- että salaojakerrosta. Alustan kuivatustila vaikuttaa tiivisteen kuivumisherkkyyteen sekä koko rakenteen läpi tapahtuvaan diffuusiomassavirtaan. Mineraalisen tiivisteen alapuolinen kapillaarikatko rajoittaa suolan diffuusiokulkeutumista, mutta estää samalla tiivistettä saamasta alustasta lisävettä kuivana kautena, mikä voi johtaa tiivisteen kuivumiseen ja halkeiluun. Myös tiivisteen pinnan jäätymisen seurauksena voi olla tiivistyskerroksen alemman osan kuivuminen. Kuivumishalkeamat eivät sulkeudu tehokkaasti, kun pintakuorma on alhainen. Kasvien juuret imevät vettä maakerroksista, myös tiivistyskerroksista, sekä muodostavat rakenteisiin reikiä. Kasvien juurten tunkeutumista voidaan estää karkealla kuivatuskerroksen materiaalilla sekä muovi- tai metallikalvoilla (folio).

Luiskasuojauksen vesipitoisuus on harvoin staattinen. Rakenne saa vettä saateena, lumen sulamisesta ja kondenssivetenä. Veden hävikkiä taas aiheutuu horisontaalisesta kuivatuksesta, haihtumisesta, jota kasvillisuus kiihdyttää, sekä vertikaalisesta kuivumisesta, jonka aiheuttavat painovoimainen ja matriisipotentialinen veden liikkuminen.



Kuva 4. Luiskasuojauksen tyyppipoikkileikkaus /Tiehallinto/.

Kuivatuskerros kerää ojaan tulevan veden ja johtaa sen poistoviemärin kautta pois pohjaveden muodostumisalueelta. Kuivatuskerroksen vedenjohtavuus yhdessä pituuskaltevuuden kanssa vaikuttaa veden viipymään sekä painekorkeuteen tiivisteen päällä. Kuivatuskerroksen paksuus tulisi mitoittaa kerroksen maksimivirtaaman mukaan.

Suojakerros suojaa tiivistyskerrosta mekaanisilta ja ilmaston aiheuttamilta rasituksilta. Sen pintaosa toimii lisäksi kasvukerroksena nurmetukselle, joka suojaa kerrosta eroosiolta. Suojakerrokseen käytetään yleisesti paikallista maa-ainesta, jonka rakeisuus, vedenläpäisevyys ja vedenpidätyskyky vaihtelevat suuresti. Suojakerroksen paksuuden tulisi olla riittävä estämään tiivisteen kuivuminen ja joissain tapauksissa myös jäätyminen. Roudan tunkeutumissyvyyttä on Suomessa selvitetty paljonkin ja aiheeseen on olemassa hyvät mitoitusohjeet (Pohjarakennusohjeet, RIL). Sen sijaan maan kuivumispotentiaalia on selvitetty heikosti. Kaatopaikkojen pintarakenteista on saatu käytännön kokemuksia, joiden perusteella esim. Pohjois-Saksassa ei 1 m suojakerros riitä estämään mineraalisen pintatiivisteen kuivumista. Suomesta vastaavat selvitykset puuttuvat.

### **2.3 Luonnonmaalajit tiivistysrakenteissa**

Tiivistysrakenteita on perinteisesti rakennettu hienoainespitoista luonnonmaata käyttäen. Tähän rakeisuudeltaan soveltuvia maalajeja ovat savet, saviset siltit sekä runsaasti hienoainesta sisältävät moreenit. Luonnonmaasta tehty tiivistysrakente sietää hyvin mekaanisia rasituksia sekä yleensä myös alusrakenteen painumista (poikkeuksena jäykkärunkoiset murske- ja kivituhkabentoniitit). Rakente ei myöskään rikkoudu herkästi onnettomuuksien yhteydessä, ja mahdolliset vauriot on helppo havaita ja korjata. Rakentamiseen voidaan usein käyttää paikallisia materiaaleja, mikä tekee maatiivisteestä taloudellisesti edullisen vaihtoehdon.

Suomalaisten moreenien ja savien hienoaines sisältää vain vähän paisuvia mineraaleja. Natriumkloridi voi kasvattaa suomalaisesta savesta tehdyn tiivistysrakenteen vedenläpäisevyyttä, mutta ei samassa määrin kuin bentoniittirakenteissa. Öljytuotteiden läpäisevyyteen vaikuttavat rakenteen vesikyllästysaste ja orgaanisen aineksen määrä. Vedellä kyllästynyt rakenne läpäisee öljytuotteita heikosti ja orgaaninen aines pidättää niitä tehokkaasti. Kuiva ja halkeillut rakenne ei estä öljytuotteiden kulkeutumista.

Laboratorio-oloissa voidaan luonnonmaalla saavuttaa riittävän alhaisia vedenläpäisevyysarvoja (esim.  $<10^{-9}$  m/s). Maasto-olosuhteissa voi tilanne olla aivan toinen. Luonnonmaat tulisi tiivistää lähellä optimivesipitoisuuttaan ja mieluiten hieman optimia kosteampana. Luonnonmaalajien vesipitoisuuden hallinta on käytännössä vaikeaa ja kallista, vaatien usein kuivatusta sekä tehokasta homogenisointia. Lisäksi tiivistystulos jää luiskissa ja ojien pohjilla usein heikoksi. Tuloksena on tiivistysrakente, jonka kuivatilavuuspaino voi olla 80 - 90% maksimikuivatilavuuspainosta, jolloin materiaalin vedenläpäisevyys on helposti kaksi dekadia laboratoriossa määritettyä arvoa suurempi (eli  $> 10^{-7}$  m/s). Tällainen kerros ei estä advektiovirtausta suojausrakenteen läpi riittävän tehokkaasti. Luonnonmaasta rakennetun tiivistyskerroksen teho paranee huomattavasti, kun sitä täydennetään tiivistyskalvolla.

Luonnonmaat tulisi tiivistää useana kerroksena ja kerrosten väliset rajapinnat tulisi karhentaa parhaan mahdollisen tartunnan varmistamiseksi. Tällöin saumojen ja yksittäisten epähomogeenisten kohtien vaikutus rakenteen läpäisevyyteen vähenee. Tiivistyskerroksen paksuus riippuu materiaalin vedenläpäisevyyskertoimesta (ns. k-arvo), laadun vaihtelusta, raekoosta ja tiivistyskalustosta. Luonnonmaasta rakennetut tiivistyskerrokset tulee suojata riittävän paksuilla suojaker-

roksilla estämään kerroksen routiminen ja kuivuminen. Tarvittavaan suojakerroksen paksuuteen vaikuttavat alueen pakkasmäärä ja suojamaan laatu.

## 2.4 Bentoniittirakenteet

Sekoittamalla maahan bentoniittisavea saadaan maan vedenläpäisevyyttä pienennettyä. Bentoniittia voidaan käyttää myös sellaisenaan, bentoniittimattojen muodossa. Bentoniittisaven eristyskyky perustuu saven paisumiseen ja dispergoitumiseen sen sitoessa vettä kidepinnoilleen. Saven paisuminen pienentää maan huokoisuutta ja alentaa sen hydraulista johtavuutta. Bentoniitin hydraulinen johtavuus riippuu bentoniitin laadusta, läpäisynesteen ominaisuuksista ja mittauksen aikana vallitsevasta jännityksestä. Bentoniittimattojen valmistajien ilmoittamat indeksiarvot ( määritetty noin 35 kPa vallitsevassa jännityksessä) natrium- ja natriumaktiiviselle kalsiumbentoniitille ovat välillä  $10^{-10}$  -  $10^{-11}$  m/s. Maabentoniittiseoksien k-arvoon vaikuttavat runkoaineen rakeisuus, käytettävän bentoniitin laatu ja määrä sekä sekoitus- ja tiivistystyön onnistuminen.

Bentoniitti on herkkää huokosveden kemiallisille muutoksille. Huokosvedessä esiintyvät suolat aiheuttavat savipartikkeleja ympäröivien vesifilmien ohentumista vähentäen bentoniitin paisumista. Tämä kasvattaa bentoniittirakenteen hydraulista johtavuutta, mikäli vallitseva jännitys ei riitä tiivistämään savea samanaikaisesti. Tieympäristössä voi bentoniittirakenteeseen päästä kemikaaleja, joiden dielektrisyys on alhainen, kuten polttonesteitä. Bentoniitti paisuu jonkin verran väkevässäkin suolaliuoksessa, mutta ei lainkaan polttonesteessä. Mikäli bentoniittirakenne on kuormitushetkellä kostea ja halkeilematon, ei polttoneste läpäise sitä (Shan ja Lai, 2002). Kuiva tai halkeillut rakenne ei rajoita polttonesteiden kulkeutumista.

Pitkään jatkuva kuivuminen voi aiheuttaa bentoniittirakenteisiin halkeamia. Halkeamissa veden virtausnopeus kasvaa, mikä voi aiheuttaa bentoniitin kulkeutumista pois tiivistysrakenteesta. Bentoniitti on lisäksi herkkä kidepintojen ioninvaihtoreaktioille. Kun bentoniitin natrium korvautuu kalsiumilla tai magnesiumilla, kasvaa bentoniitin vedenläpäisevyys noin yhdellä dekadilla. Mikäli ioninvaihtoon yhdistyy kuivuminen, ei muuttunut bentoniitti pysty enää korjaamaan halkeamia tehokkaasti ja rakenne voi menettää eristävyytensä. Bentoniittirakenteella suojatulla alueella ei tulisi käyttää liukkaudentorjuntaan kalsiumkloridiliuosta tai sellaisia peittomaita, jotka sisältävät liukoista kalsiumia tai magnesiumia.

Suojauksia rakennettaessa maabentoniitit sekoitetaan pakkosekoittajalla ja tiivistetään lähellä optimivesipitoisuuttaan. Läpäisevien saumakohtien eliminoimiseksi tulisi tiivistäminen tehdä vähintään kahdessa kerroksessa ja kerrosten välinen rajapinta karhentaa.

Bentoniittimatot asennetaan tasaisen alustan päälle ja saumataan limittämällä bentoniittijauhetta käyttäen. Maton kestävyuden kannalta on tärkeää, että sen alapuolisissa kerroksissa ei ole pistemäisiä kivisärmiä tai onkaloita, jotka voivat aiheuttaa bentoniittikerroksen ohentumista tai siirtymistä. Bentoniittimatot tulee peittää riittävän paksulla maakerroksella ennen bentoniitin hydratoitumista. Bentoniittirakenteet kestävät hyvin pakkasta ja mekaanisia rasituksia. Bentoniittimattoilla on jonkin verran muodonmuutoskestävyyttä (riippuu maton laadusta) ja ne korjaavat itse pienehköjä reikiä.

Bentoniitti sitoo tiivistysrakenteeseen vettä, joten kloridi pääsee siirtymään bentoniittirakenteessa diffuusiolla. Mikäli kloridikuormitus on pysyvä, kyllästyy bentoniittirakenne ennen pitkää suolavedellä, jolloin huokosveden ioniväkevyyden kasvu lisää rakenteen vedenjohtavuutta. Rakenteen muutokset voivat osittain palautua suolattoman veden syrjäyttäessä suolaisen, mutta savipartikkelien flokkautuminen voi jäädä pysyväksi tilanteeksi, jolloin suuret huokokset eivät enää tuk-

keudu. Runkoaineen suuri hienoainespitoisuus ja alhainen huokoisuus vähentävät muutosten aiheuttamaa maabentoniitin vedenjohtavuuden kasvua.

## 2.5 Keinotekoiset eristeet

Teoriassa tehokkain ratkaisu kloridiliuoksen eristämiseen on käyttää keinotekoisia eristeitä eli erilaisia tiivistyskalvoja tai bitumipohjaisia tuotteita. Ehjä keinotekoinen eriste estää veden advektiovirtauksen täysin ja hidastaa kloridin diffuusiiovirtauksen merkityksettömän alhaiseksi. Jotkut orgaaniset kemikaalit voivat kuitenkin läpäistä tiivistyskalvot diffuusiolla hyvinkin nopeasti. Asfalttirakenteiden suuremman kerrospaksuuden ansiosta on orgaanisten aineiden diffuusiokulkeutuminen niissä merkittävästi kalvoja hitaampaa. Kuitenkin pitkäaikainen öljyhiihivetyjen, etenkin dieselöljyn, liuottava vaikutus voi kasvattaa myös asfalttirakenteiden läpäisevyyttä. Natriumkloridi ei vaikuta keinotekoisien eristeiden vedenläpäisevyyteen.

Yleisimmin käytetyt kalvolajit ovat polyvinyylidikloridi (PVC), polyeteeni (PE) ja polypropeeni (PP). Tiivistyskalvoja on suositeltavaa käyttää yhdessä mineraalisen tiivisteiden kanssa, jolloin kalvon reikiintymisen vaikutus kulkeutumiseen jää vähäisemmäksi. Ilman alapuolista mineraalitiivistettä saattaa yksikin ojan pohjalla oleva reikä pilata tiivisteiden toiminnan laajalta suojausalueelta. Kalvon ja mineraalisen tiivisteiden välinen kontakti on saatava mahdollisimman kiinteäksi. Lisäksi on varmistettava kalvon ja mineraalisen tiivisteiden välinen riittävä kitkakulma. Myös tiivisasfaltilla ja valuasfaltilla on mahdollista päästä hyvin suureen vesitiiviuteen.

## 2.6 Luiskasuojauksen toiminnalliset vaatimukset

Luiskasuojauksen tehtävänä on estää kloridin ja onnettomuustapauksessa kemikaalien kulkeutuminen tiivistyskerroksen läpi maahan ja sitä kautta pohjaveeseen. Kloridin kulkeutuminen tapahtuu veden välityksellä konvektiivisesti ja diffuusiivisesti. Konvektio tarkoittaa kulkeutumista veden kuljettamana painegradientin suuntaan ja diffuusio kulkeutumista molekyyli- tai ionimuodossa konsentraatiogradientin suuntaan. Advektio ja diffuusio voivat vaikuttaa samanaikaisesti eri suuntiin. Diffuusion merkitys kloridin massavirtaan korostuu ohuista ja huonosti läpäiseviä rakenteita, kuten bentoniittimattoja, käytettäessä. Diffuusiolla on merkitystä itse tiivistyskerroksen huokosveden kloridikonsentraation kasvuun, vaikka konvektiovirtausta ei tiivistyskerroksen läpi tapahtuisikaan.

Kloridipitoisen veden viipymän tieluiskassa ja sivuujassa tulee olla mahdollisimman lyhyt. Konvektiokulkeutumisen rajoittamiseksi tulee luiskat ja ojat rakentaa huonosti vettä läpäisevästä materiaalista ja veden painekorkeus ojassa pitää mahdollisimman alhaisena. Diffuusiokulkeutumisen rajoittamiseksi tulee vähentää kloridipitoisen veden ja sohjon lammikoitumista ja padottumista ojiin sekä varastoitumista maakerroksiin. Veden viipymään ojassa vaikuttavat pituuskaltevuus, kuivatusalueen pituus, suojakerroksen hydraulinen johtavuus sekä purkuojan tai -putken maksimivirtaama. Samat tekijät vaikuttavat myös tiivistyskerroksen päälle muodostuvaan painekorkeuteen.

Luiskasuojauksen merkittävimmät rasisitustekijät ovat onnettomuuskuormat ja erilaiset läpiviennit sekä jäätyminen ja kuivuminen. Onnettomuudet ja läpivientien vuodot ovat paikallisia vauriotekijöitä, joiden seuraukset voidaan korjata pienin kustannuksin. Jäätyminen ja kuivuminen vaikuttavat kaikkialla rakenteissa, ja niiden taloudelliset vaikutukset voivat olla edellisiä merkittävämpiä. Kuivumisen on havaittu heikentävän bentoniittirakenteiden toimintaa etenkin,



jos siihen yhdistyy bentoniitin ioninvaihto (Lin ym. 2000). Liiallinen vettäminen voi heikentää luiskasuojusrakenteen stabiliteettia aiheuttaen paikallisia sortumia luiskissa. Tiivistysrakenteen kloridikuormitus ei saisi kasvattaa tiivistyskerroksen läpäisevyyttä yli sallitun tason.

Yleensä mineraalisen tiivistyskerroksen hydraulisen johtavuuden sallittuna maksimiarvona pidetään arvoa  $k = 10^{-9}$  m/s. Rakenteen läpäisevyyden ollessa tätä alhaisempi, kasvaa diffuusion merkitys aineiden kulkeutumisessa konvektiota suuremmaksi. Tapauskohtaisesti tarvittavaa tiivistyskerroksen k-arvoa voidaan arvioida paikallisen riskitason sekä tien geometrian ja kuivatusolojen perusteella. Lopullisesti luiskasuojusrakenteen tehokkuus selviää vasta sen käytön aikana, sillä useimpia rasiustekijöitä on lähes mahdotonta ennakoita.

# 3

## Suolan kulkeutuminen luiskasuojauksessa

### 3.1 Johdanto

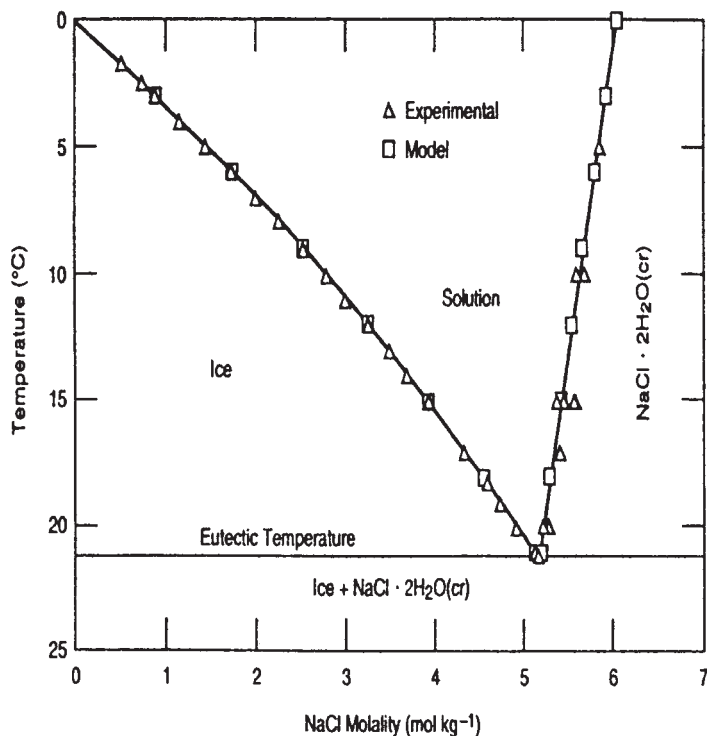
Seuraavassa esitellään kulkeutumismallinnusta. Tarkoituksena ei ole laatia yleispätevää laskentamallia vaan esitellä kulkeutumiseen vaikuttavia tekijöitä. Kloridisuojauksen toimivuutta on viime kädessä arvioitava suojattavan pohjavesialueen veden kloridipitoisuuden kehityksen pohjalta. Mikäli saatavilla on riittävästi lähtötietoja kohteen geologiasta ja hydrologiasta, voidaan rakenteen toimintaa mallintaa hyvinkin tarkasti. Yleisemmässä tarkastelussa voidaan jättää huomiotta sadannan, maaperäominaisuuksien ja pohjaveden pinnan tason ajalliset ja paikalliset vaihtelut. Tällöin voidaan yksinkertaistetuilla malleillakin saada riittävän edustavia tuloksia eri suojausratkaisujen vertailuun. Tällainen yleinen tarkastelu ei kuitenkaan palvele rakenteiden tapauskohtaista mitoitamista.

### 3.2 Natriumkloridin fysikaaliskemialliset ominaisuudet ja käyttäytyminen

Natriumkloridi liukenee veteen ja alentaa sen jäätymispistettä. Kuvassa 5 on esitetty natriumkloridin ja jään tasapainokuvaaja. Oletetaan, että suolan konsentraatio vedessä tien pinnalla on aluksi 1 mol/kg. Konsentraatio pysyy muuttumattomana, kunnes lämpötila laskee  $-3,3^{\circ}\text{C}$ :hen, jolloin alkaa kiteytyä jäätä ja jäljelle jäävän liuoksen konsentraatio kasvaa. Lämpötilan edelleen laskiessa tilanne seuraa tasapainokäyrää aina lämpötilaan  $-21,2^{\circ}\text{C}$  asti, jolloin natriumkloridiliuos kiteytyy konsentraatiossa 5,17 mol/kg. Kalsiumkloridilla lopullinen kiteytyminen tapahtuu vasta lämpötilassa  $-50,4^{\circ}\text{C}$ .

Tieltä liukkauden torjunnassa käytetty kloridi kulkeutuu auraslumen ja veden mukana sivuojiin. Osa voi kulkeutua myös suoraan päällysteen läpi tien rakennekerrokseen ja edelleen pohjavesivyöhykkeeseen. Ojassa suolapitoinen vesi kulkeutuu hitaasti painovoiman vaikutuksesta ojan pohjalle ja kohti poistoviemäriä. Suolapitoisen veden viipymä ojassa voi talvella olla merkittävästi pidempi kuin puhtaan veden viipymä kesällä mm. lumesta ja jäädä johtuen. Suolapitoisuuden kasvu lisää veden viskositeettia, mikä myös kasvattaa viipymää. On mahdollista, että tiivistyskerroksen päällä on väkevää suolaliuosta koko talvikauden. Lumen sulassa ja vesisateiden seurauksena ojassa oleva suola huuhtoutuu pois kuivatusalueelta. Sulamisvaiheen kesto vaihtelee maantieteellisesti ja vuosittain.

Suolan kulkeutumista tiivistyskerroksen läpi ohjaavat sekä painovoimagradi-entti (advektiovirtaus) sekä kemiallisen potentiaaligradi-entti (diffuusiovirtaus). Molemmat kulkeutumismuodot vaativat väliaineekseen vettä. Advektiovirtaus tapahtuu, mikäli hydraulinen paine tiivistyskerroksen yläpuolella on suurempi kuin sen alapuolella. Luiskasuojaukset rakennetaan yleensä paikkoihin, joissa pohjaveden pinta on syvällä ja pintamaa osittain kyllästynyt, joten advektiovirtaus tapahtuu aina, kun tiivistyskerroksen päällä on vapaata vettä. Diffuusiovirtaus tapahtuu, mikäli suolakonsentraatio tiivistyskerroksen eri puolilla vaihtelee. Diffuusiovirtaus voi tapahtua molempiin suuntiin ja advektiosta huolimatta. Suolakonsentraatioiden ero tiivistyskerroksen eri puolilla voi aiheuttaa myös veden



Kuva 5. Jään ja natriumkloridin tasapainokuvaaja. Temperature = lämpötila; molality = liuoksen väkevyys; ice = jää; solution = liuos; eutectic temperature = eutektinen lämpötila.

osmoottista kulkeutumista väkevemmän suolakonsentraation suuntaan. Yleensä advektio dominoi kulkeutumista, kun tiivistyskerroksen hydraulinen johtavuus on  $\geq 10^{-9}$  m/s. Diffuusio on dominoiva, kun hydraulinen johtavuus on  $\leq 10^{-11}$  m/s.

Epäorgaaniset aineet, kuten kloridi ja metallit, eivät läpäise tiivistyskalvoja diffusiivisesti. Näiden aineiden kulkeutuminen kalvon läpi edellyttää kalvossa olevaa reikää, jonka läpi voi tapahtua veden virtausta. Useat orgaaniset aineet liukenevat muoveihin, jolloin virtausta voi tapahtua diffusiivisesti. Orgaaniset nesteet kulkeutuvat tietysti myös advektiivisesti reikien kautta. Lisäksi orgaaniset nesteet liukenevat jossain määrin myös veteen, joten ne voivat kulkeutua myös konvektiivisesti.

Jäätymisen ja sulamisen vaikuttavat aineiden kulkeutumiseen maassa. Jäätymässä ja jäätyneessä maassa aineiden kulkeutumista ohjaavat konsentraatio-, lämpötila- sekä hydrostaattiset gradientit. Diffuusio kuljettaa aineita korkean konsentraation alueilta alhaisemman konsentraation suuntaan. Lämpötilagradientin merkitys aineiden kulkeutumiseen maassa on yleensä vähäinen. Sen sijaan jäätymisen aiheuttama osmoottinen gradientti ajaa veden mukana myös liuenneita aineita jäätymisrintamaan. Aineiden jakautumiseen vaikuttaa merkittävästi jäätymisnopeus, vesipitoisuus, maan rakenne sekä aika. (Marion,1995)

Qiu et al (1988) osoittivat, että märässä hiekassa liennut suola kulkeutui suulaan alueeseen. Sen sijaan siltissä ja savessa suola kulkeutui jäätymisrintamaan. Toistuvien jäätymis-sulamissykliensä seurauksena voi maan pinnalle tuleva suola kulkeutua syvemmälle maahan ja jäätymisvaiheessa eri suuntaan kuin vesi. (Yong et al. 1973)

Jäätyneessäkin maassa on aina maapartikkelien pinnalla ohut kerros jäätymättömpää vettä, jossa voi tapahtua kulkeutumista. Lähteen (Perfect ym. 1991) mukaan maan hydraulinen johtavuus laskee arvosta  $10^{-8}$  m/s arvoon  $10^{-12}$  –  $10^{-14}$  m/s lämpötilan laskiessa 0°C:stä -1°C:hen. Tätä alemmissa lämpötiloissa johtavuus säilyi käytännössä muuttumattomana.

Yhteenvetona voidaan todeta, että maassa oleva kloridi rikastuu sulaan faasiin ja kulkeutuu syvemmälle maahan jäätymisen edetessä. Jäätyneen maan päälle tuleva kloridi voi kulkeutua maahan partikkelien pinnoilla olevia jäätymättö-

miä vesifilmejä pitkin, mutta kulkeutumisenopeus on hyvin alhainen. Kloridin kulkeutumista jäätyneeseen tiivistyskerrokseen kontrolloi diffuusio. Väkevä kloridikonentraatio tiivisteeseen päällä johtaa ohuen tiivistysrakenteen nopeaan kyllästymiseen kloridilla.

### 3.3 Kyllästyneen tilan advektio

Veden virtaus maassa voidaan jakaa kyllästyneen ja osittain kyllästyneen tilan virtaukseen. Kyllästyneen tilan yksidimensionaalista virtausta kuvataan Darcyn lain avulla:

$$q = ki = -k \frac{\partial h}{\partial x} = \theta v \quad (1)$$

missä  $k$  on hydraulinen johtavuus [ $\text{ms}^{-1}$ ],  $i$  on hydraulinen gradientti [-],  $h$  on painekorkeus,  $x$  on maakerroksen paksuus veden kulkusuunnassa,  $\theta$  on tilavuusvesipitoisuus ja  $v$  on veden todellinen keskimääräinen virtausnopeus [ $\text{ms}^{-1}$ ]. Darcyn laki on voimassa, kun virtaus on laminaarista. Hydrauliseen johtavuuteen vaikuttavat sekä maan että läpäisevän nesteen ominaisuudet. Virtaamalle  $q$  voidaan kirjoittaa:

$$q = KiA \frac{\gamma}{\mu} \quad (2)$$

missä  $K$  on ominaisjohtavuus,  $A$  on virtausala,  $\gamma$  on nesteen tiheys ja  $\mu$  viskositeetti. Liuenneiden aineiden konsentraatio ja lämpötila vaikuttavat sekä nesteen tiheyteen että viskositeettiin. Ominaisjohtavuuden  $K$  ja hydraulisen johtavuuden  $k$  välillä on yhteys  $k = K^* \gamma / \mu$ . Huokoisen väliaineen hydrauliselle johtavuudelle on esitetty Kozeny-Karmanin yhtälö:

$$k = \frac{1}{k_0 T^2 S_0^2} \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1+e} \quad (3)$$

missä  $k_0$  on huokosten muotokerroin,  $T$  on virtauskanavien tortuositeetti,  $S_0$  on maan ominaispinta-ala ja  $e$  maan huokosluku. Mikäli virtausta maassa käsitellään kuin virtausta erikokoisista kapillaariputkista koostuvassa systeemissä, voidaan kirjoittaa (Lambe ja Whitman, 1969):

$$k = CD_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1+e} S^3 \quad (4)$$

missä  $C$  on muotokerroin,  $D_s$  on partikkelien tehokas läpimitta ja  $S$  kyllästysaste. Yhtälöt 3 ja 4 kuvaavat koheesiottomia maalajeja kohtuullisen hyvin. Savien kohdalla niitä ei voi käyttää (Mitchell, 1993). Kaavat sopivat paremminkin eri hydrauliseen johtavuuteen vaikuttavien tekijöiden kvalitatiiviseen arviointiin.

### 3.4 Osittain kyllästyneen tilan advektio

Osittain kyllästyneessä tilassa ei maan tai tiivisteeseen  $k$ -arvo ole vakio, vaan pienenee maan vesipitoisuuden alentuessa. Matemaattisissa tarkasteluissa voidaan ottaa huomioon gravitaatiopotentiaali, matriisipotentiaali sekä kemiallisosmoottinen potentiaali. Veden kulkeutumista yksidimensionaalisessa tapauksessa voidaan kuvata vaihtoehtoisesti kahdella termillä,  $k$  tai  $D$ :

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

$$q = D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

missä  $\theta$  on maan tilavuusvesipitoisuus,  $\psi$  on maan matriisipotentiali ja  $D$  on diffusiivisuus.  $D(\theta)$ :aa käytetään, sillä matriisipotentialigradientin mittaaminen on vaikeaa ja jotkin virtausyhtälöt on helpompi ratkaista sen avulla. Diffusiivisuus  $D$  ei välttämättä tarkoita samaa kuin vesihöyryn diffuusio. Kulkeutumiskaava (5) kuvaa veden massavirtaa aikayksikössä yksikköpinta-alan läpi, mutta ei kerro mitään veden todellisesta virtausnopeudesta huokosissa. Tehokkaan huokostilavuuden pienentyessä maan vesipitoisuuden laskiessa voi todellinen virtausnopeus, ja siten liuenneiden aineiden läpäisy nopeus, jopa kasvaa täysin kyllästyneeseen tilaan verrattuna.

Mikäli maassa ei tapahdu juurikaan tilavuuden muutoksia tai esiinny paisumispainetta, voidaan veden kulkeutumista kuvata samoilla kaavoilla kuin lämmön siirtymistä. Hydraulisen gradientin sijaan käytetään matriisipotentialin gradienttia ja kirjoitetaan Darcyn laki muotoon:

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (6)$$

Negatiivinen etumerkki aiheutuu siitä, että virtaus tapahtuu pienenevän potentiaalilin suuntaan. Massatasapaino vaatii, että veden virtaus vastaa vesipitoisuuden muutosnopeutta, eli:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7)$$

missä  $t$  on aika. Yksidimensionaalinen osittain kyllästyneen tilan virtausyhtälö on muotoa:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (8)$$

Diffusiivisuuden  $D$  avulla yhtälö voidaan kirjoittaa muodossa:

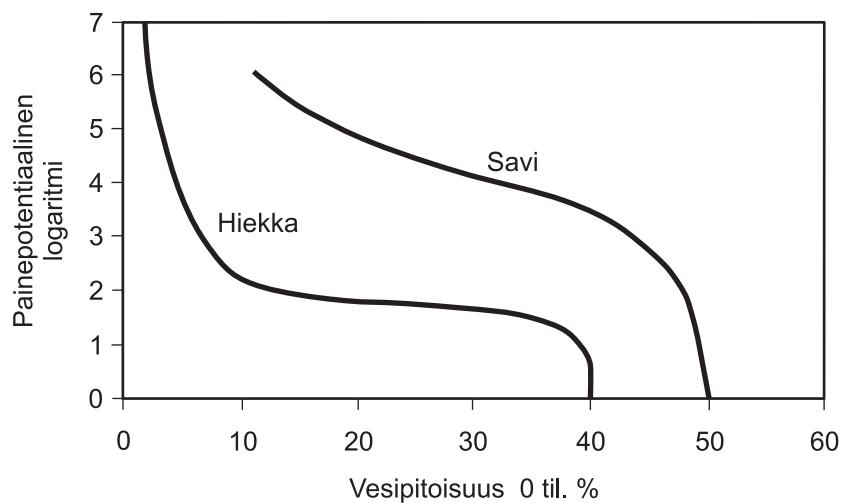
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (9)$$

Tämä yhtälö olettaa virtauksen olevan horisontaalista ja matriisipotentialin riippuvan vain tilavuusvesipitoisuudesta. Infiltraation tapauksessa virtausyhtälö saa muodon:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial k}{\partial z} \quad (10)$$

### 3.5 Huokosalipaine, matriisi- ja osmoottinen potentiaali

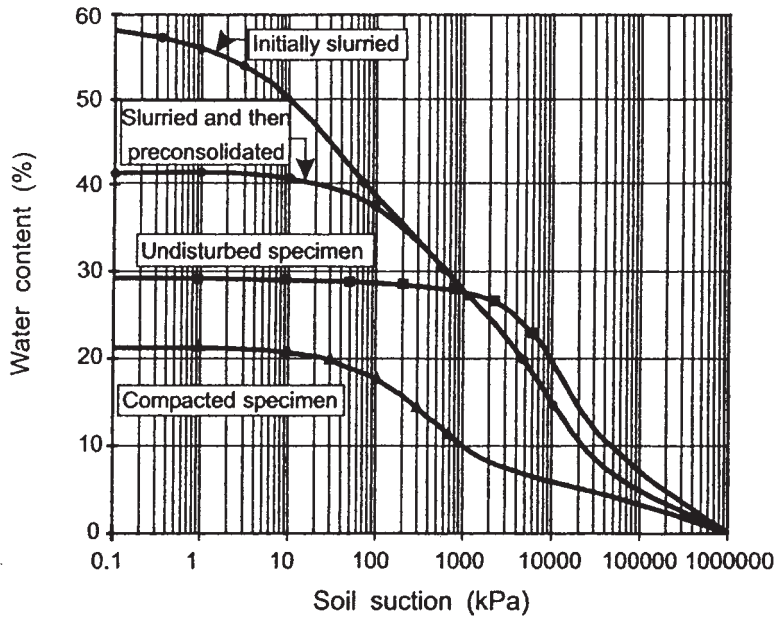
Maassa olevan veden energia muodostuu gravitaatiopotentiaalista, matriisipotentiaalista sekä kemiallisosmoottisesta potentiaalista. Matriisipotentiaali on seurausta maa-aineksen ja veden välisestä pintavoimista ja kemiallisosmoottinen potentiaali huokosnesteeseen liuenneista aineista. Osmoottisen potentiaalin erottaminen matriisipotentiaalista on käytännön tilanteissa vaikeaa. Osittain kyllästyneen maan huokosveden energia on negatiivista. Geotekniikassa tätä kutsutaan huokosalipaineeksi (suction). Mittaamalla näytteen vesipitoisuus eri huokosalipaineissa, voidaan piirtää maalajin vedenpidätyskuvaaja, eli pF-käyrä (kuva 6). pF-luku saadaan ottamalla 10-kantainen logaritmi huokosalipainetta vastaavasta vesipatsaan korkeudesta senttimetreinä ilmaistuna, eli  $-1 \text{ bar} = -10 \text{ m} = -1000 \text{ cm} = \text{pF } 3$ .



Kuva 6. Maalajien pF -käyriä.

Huokosalipaineen merkitys tiivistysrakenteessa on, että vettä kulkeutuu rakenteen eri kerrosten välillä korkeammasta potentiaalista alhaisemman potentiaaliseen suuntaan. Erilaisilla materiaaleilla on matriisipotentiaali erisuuri samalla vesipitoisuudella, joten veden kulkeutumissuuntaa ei voi suoraan päätellä niiden vesipitoisuuksista. Esimerkiksi jos kuvan 6 mukaisesta savesta rakennetaan tiiviste saman kuvan mukaisen hiekan päälle tilavuusvesipitoisuudessa 30%, imee savi vettä hiekasta, mikäli hiekan tilavuusvesipitoisuus on yli 5%. Mikäli taas hiekan tilavuusvesipitoisuus on  $<5\%$ , kuivattaa hiekka savitiivistettä. Veden kulkeutuminen matriisipotentiaalilla ajamana vaatii kapillaarisen yhteyden olemassaolon. Siten esimerkiksi luiskasuojauksen tiivistyskerroksen kuivumista voidaan ehkäistä käyttämällä tiivisteen ja pintamaan välillä riittävän karkearakeista kerrosta.

Näytteen valmistustapa vaikuttaa merkittävästi savipitoisen näytteen vedenpidätyskäyrän muotoon. Kuvassa 7 on esitetty samasta savesta valmistetun häiriintymättömän (undisturbed specimen), Proctor-menetelmällä tiivistetyn (compacted specimen), lietetyn (initially slurried) sekä lietteestä esikonsolidoidun (slurried and then preconsolidated) näytteen vedenpidätyskuvaajat (Fredlund, 2000).



Kuva 7. Eri tavoin valmistetun savinäytteen vedenpidätyskuvaajat (Fredlund, 2000). Water content = vesipitoisuus ja soil suction = huokosalipaine; muut selitykset tekstissä.

Maalajien vedenpidätyskäyrän (pF-) matemaattiseksi kuvaamiseksi on kehitetty useita yhtälöitä. Tunnetuin näistä on van Genuchtenin (1980) yhtälö:

$$w = \frac{w_s}{\left(1 + \left(\frac{\Psi}{a_{vg}}\right)^{n_{vg}}\right)^{m_{vg}}} \quad (11)$$

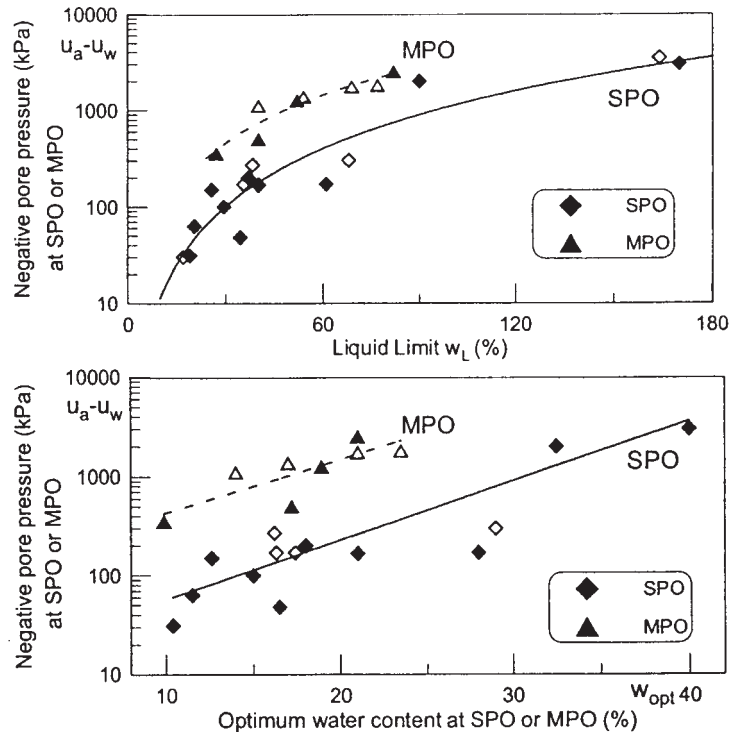
missä  $w$  on vesipitoisuus,  $w_s$  on kyllästyneen tilan vesipitoisuus,  $\Psi$  on huokosalipaine,  $a_{vg}$ ,  $n_{vg}$  ja  $m_{vg}$  ovat käyräsovitusparametreja. Vesipitoisuudet on kaavassa 11 esitetty massayksiköissä.

Mineraalinen tiivistysrakenne on yleensä vain osittain kyllästynyt, joten sen huokosvedenpaine on negatiivinen ( $pF > 0$ ). Erityisesti tämä pätee bentoniittimattoihin, jotka täytyy valmistajien ohjeiden mukaisesti asentaa ilmakeivinä ( $w = 10-20$  m-%). Fleureau et al (2002) ovat koonneet standardi Proctor -menetelmällä optimivesipitoisuudessa tiivistettyjen maalajien ja -seosten huokosalipaineen arvoja. He ovat myös esittäneet korrelaatioita sekä standardi- (SPO) että parannetulla (MPO) Proctor -menetelmällä sullottujen maalajien huokosalipaineen ja juoksurajan tai optimivesipitoisuuden välillä (kuva 8).

Suomalaiset maa-ainekset ovat paisumattomia ja ne asennetaan yleensä lähellä optimivesipitoisuuttaan. Niiden matriisipotentiali on tällöin alhainen, noin 1-2, ja ne ovat toimintakunnossa heti asennuksen jälkeen. Asennuksen jälkeen mineraaliset tiivistyskerrokset alkavat joko kyllästyä imemällä vettä ympäröivistä kerroksista tai kuivua luovuttamalla vettä ympäröiviin kerroksiin. Kyllästyminen tai kuivuminen riippuu ala- ja yläpuolisten maakerrosten matriisipotentialista, sadannasta, haihdunnasta, lämpötilasta sekä ilmanpaineesta.

Mikäli paisumattomasta maalajista rakennettu tiivistyskerros kuivuu liikaa voi se halkeilla, mikä voi kasvattaa rakenteen vedenläpäisevyyttä useita dekadeja. Paisumattomien materiaalien kuivumishalkeamat eivät tukkeudu materiaalin uudelleen kastuessa. Natriumbentoniitti kykenee paisumalla sulkemaan kuivumishalkeamia, mutta tämä tapahtuu yhtä hitaasti kuin varsinainen hydratoituminenkin. Mikäli bentoniitissa tapahtuu natriumionien vaihtuminen kalsiumiin tai muihin kaksi- tai kolmevalenssisiin kationeihin, pienenee bentoniitin paisumis-

potentiaali eivätkä halkeamat enää korjaudu. Bentonitiin nopea hydratoituminen asentamisen jälkeen tulee varmistaa. Kaikkien materiaalien kuivumisen estämiseen tulee kiinnittää nykyistä suurempaa huomiota. Lisäksi olisi syytä tutkia erilaisen matriisipotentiaalin omaavien asennusaluksien merkitystä tiivisteiden pitkäaikaiskestävyyteen.



Kuva 8. Sullotun maan huokosalipaineen ja juoksurajan sekä optimivesipitoisuuden väliset korrelaatiot (Fleureau ym. 2002). Negative pore pressure = huokosalipaine; liquid limit = juoksuraja ja optimum water content = optimivesipitoisuus.

Natriumbentoniitti voi toimia puoliläpäisevänä kalvona (Malusis ja Shackelford, 2002). Tämä tarkoittaa sitä, että natriumbentoniitti voi pidättää veteen liuenneita ioneja samalla kun se päästää veden läpi. Tätä pidätyskykyä kuvataan osmoottisella tehokkuudella,  $\omega$ . Osmoottisen tehokkuuden arvo voi vaihdella välillä 0 (ei lainkaan pidätystä) – 1 (täysi pidätys). Osmoottinen tehokkuus pienenee bentoniittin huokoisuuden kasvaessa ja veden ioniväkevyyden kasvaessa. Vastavasti osmoottinen tehokkuus kasvaa vallitsevan jännityksen kasvaessa. Malusis ja Shackelford (2002) määrittivät diffuusiokokeella natriumbentoniitin osmoottiseksi tehokkuudeksi 0,08 - 0,69 veden kaliumkloridikonsentraation vaihdeltaessa vastaavasti välillä 0,047 M - 0,0039 M. Kemper ja Rollins (1966) määrittivät natriumbentoniitin osmoottista tehokkuutta natrium- ja kalsiumkloridin suhteen eri huokoisuuksissa (taulukko 1).

Taulukko 1. Natriumbentoniitin osmoottinen tehokkuus NaCl:n ja CaCl<sub>2</sub>:n suhteen (Kemper ja Rollins, 1966).

suola	huokoisuus	konsentraatio (M), kun	
		$\omega = 0$	$\omega = 1$
NaCl	0,8	0,142	$1,8 \cdot 10^{-3}$
	0,84	0,088	$6,2 \cdot 10^{-4}$
	0,91	0,047	$3 \cdot 10^{-4}$
CaCl <sub>2</sub>	0,8	0,019	$1,6 \cdot 10^{-5}$
	0,84	0,017	$5,1 \cdot 10^{-6}$
	0,91	0,014	$3,7 \cdot 10^{-9}$



Kun puoliläpäisevän kalvon eri puolilla vallitseva veden ioniväkevyys on erilainen, pyrkii vesi siirtymään alhaisemman konsentraation puolelta laimentamaan korkeampaa konsentraatiota. Tästä on seurauksena kalvoon kohdistuva paine-ero. Malusis ja Shackelford (2002) määrittivät paine-eroksi diffuusiokokeessa 28 kPa, kun kaliumkloridin konsentraatioero natriumbentoniittikalvon eri puolilla oli 0,02 M. Natriumkloridin osalta ei ole julkaistu vastaavia paine-eromääritysten tuloksia. Paine-erolla voi olla merkitystä luiskasuojusrakenteessa, jossa tiivistyskerroksen peittomaakerroksista aiheutuva kuormitus on alhainen, luokkaa 10-15 kPa.

### 3.6 Suolan konvektiomassavirta

Kun vedessä on suolaa konsentraationa  $c$ , saadaan kyllästyneessä tilassa olevan tiivistyskerroksen läpi yksikköajassa kulkeutuva suolamäärä  $f$  kaavalla:

$$f = v_a c = nvc \quad (12)$$

missä  $v_a$  on Darcyn nopeus,  $c$  on veden suolakonsentraatio,  $n$  on tiivistyskerroksen huokoisuus ja  $v$  on veden todellinen virtausnopeus. Koska virtausnopeus sekä konsentraatio voivat muuttua ajan funktiona, lasketaan ajassa  $t$  kulkeutuva suolan massamäärä integroimalla:

$$m_a = A_0 \int_0^t nvc dt \quad (13)$$

missä  $A_0$  on tiivistyskerroksen pinta-ala.

## 3.7 Tiivistyskerroksen hydrauliseen johtavuuteen vaikuttavia tekijöitä

### 3.7.1 Mineraalisen tiivistysmateriaalin ominaisuudet

#### 3.7.1.1 Yleistä

Hydrauliseen johtavuuteen vaikuttavia maan ominaisuuksia ovat raekokojakauma, huokoisuus, mineraalikoostumus, rakenne sekä kyllästysaste. Mitä pienempiä ovat maan rakeet, sitä pienempiä ovat yleensä myös huokokset ja sitä alhaisempi johtavuus. Hienorakeisilla maalajeilla määräytyy hydraulinen johtavuus pääasiassa maan rakenteen mukaan. Dispergoituneen rakenteen johtavuus on flokkuloitunutta rakennetta alhaisempi huokosluvun pysyessä vakiona. Saven tiivistäminen optimia kosteampana edistää dispergoituneen rakenteen syntymistä. Leikkaava tiivistäminen aikaansaa suuntautuneemman rakenteen ja pienemmän keskimääräisen huokoskoon.

Tiivistystyön kasvattaminen alentaa huokoisuutta. Huokosluku kuvastaa maan jännityshistoriaa tai vallitsevaa jännitystilaa. Erityisen tärkeää on eliminoida suurten ja jatkuvien huokosten jääminen tiivisteeseen. Tämä onnistuu helpoimmin, kun tiivistettävä materiaali on hieman optimivesipitoisuuttaan kosteammaa. Rakennustyön tuloksena tulee olla yhtenäinen ja homogeeninen kerros, jolla on alhainen hydraulinen johtavuus. Kerrokseen ei saa jäädä halkeamia tai lajittuneita kohtia. Tiivistettävien kerrosten välisen tartunnan tulee olla riittävän hyvä, ettei kerrosten välisiä sivuttaisvirtauksia esiinny. Mikäli rakennettuun kerrokseen jää halkeamia tai lajittuneita, korkean hydraulisen johtavuuden alueita, vir-

taus keskittyy niihin eikä itse tiivistysmateriaalin alhaisella hydraulisella johtavuudella ole mitään merkitystä.

Materiaalien hydraulinen johtavuus määritetään laboratoriossa kyllästyneessä tilassa. Hydraulinen johtavuus yleensä alenee kyllästysasteen laskiessa. Mikäli kuivuminen aiheuttaa maan rakenteen muutoksia esim. halkeilua tai bentoniitin kutistumista, ei edellinen päde.

### 3.7.1.2 Luonnonmaalajeista rakennetut tiivistysrakenteet

Kansainvälisessä kirjallisuudessa kutsutaan yleisesti kaikkia mineraalisia tiivisteitä savitiivisteiksi (clay liners). Tiivistyskerrokseen käytettävän maa-aineksen tulee sisältää saviainesta, ja saviaineksen määrä, ominaisuudet ja käyttäytyminen pitkälti määräävät tiivistyskerroksen hydrauliset ominaisuudet. Tässä käsitellään pelkästään luonnonmaalajeista rakennettavia tiivistysrakenteita. Maabentoniittiseoksia käsitellään kappaleessa 3.7.1.4.

Savien ja kemikaalien vuorovaikutuksesta on julkaistu useita tutkimuksia. Mitchellin ja Madsenin (1987) mukaan: 1) vaikutukset maan hydrauliseen johtavuuteen voidaan ymmärtää saven rakenteen muutosten kautta; 2) muutokset ovat sitä voimakkaampia, mitä suurempi on saven vesipitoisuus; 3) epäorgaaniset aineet vaikuttavat saven hydrauliseen johtavuuteen muuttamalla savipartikkelien kaksoiskerrosten paksuutta, pinta- ja reunavarauksia sekä pH:ta; sekä 4) orgaanisten kemikaalien vaikutukset riippuvat vesiliukoisuudesta, dielektrisyydestä, polaaraisuudesta sekä konsentraatiosta. Testimenetelmällä on hyvin suuri vaikutus saatuihin hydraulisen johtavuuden arvoihin. Edustavimpia tuloksia pitäisi saada menetelmällä, jossa jännitystila vastaa kenttäolosuhteita ja vaakasuuntaiset muodonmuutokset johtavat halkeamien syntymiseen.

Kaoliniitti on karkearakeisin savimineraali ja se on täysin paisumatonta. Illiitti ja kloriitti ovat tätä hienorakeisempia ja heikosti paisuvia tai paisumattomia. Hienorakeisin ja paisuvin savimineraali on montmorilloniitti eli smektiitti, josta kaupallisessa tarkoituksessa käytetään nimeä bentoniitti. Bentoniitin vaihtuvien kationien koostumus määrää saven paisumisominaisuudet. Suomalaiset savet ovat mineraalikoostumukseltaan lähinnä illiittisiä.

Suomalaisten moreenien hienoaines sisältää pääasiassa hienoksi jauhautuneita kivilajien mineraaleja ja vain vähän varsinaisia savimineraaleja (Soveri ja Hyyppä, 1966), joten sen pitäisi olla kemiallisesti stabiilia. Moreenien hienoaines (<0,063 mm) ja savespitoisuus (< 0,002 mm) vaihtelevat alueellisesti ja paikallisestikin paljon.

Luonnonmaalajista rakennetun tiivistyskerroksen tehokkuuteen vaikuttavat rakennustyön onnistuminen, saviaineksen kemialliset reaktiot läpäisevän nesteen kanssa sekä rasitusolot, joista merkittävimmät ovat ilmastorasitukset, vallitseva jännitystila sekä tiivisten ja alustan muodonmuutokset. Tällaiset tiivistysrakenteet sietävät alhaisella kuormituksella yleensä heikosti jäätymistä, kuivumista ja alustan muodonmuutoksia. Kaikki edellä mainitut rasitukset voivat aiheuttaa tiivistyskerroksen halkeilua, joka on palautumatonta

### 3.7.1.3 Bentoniittimatot

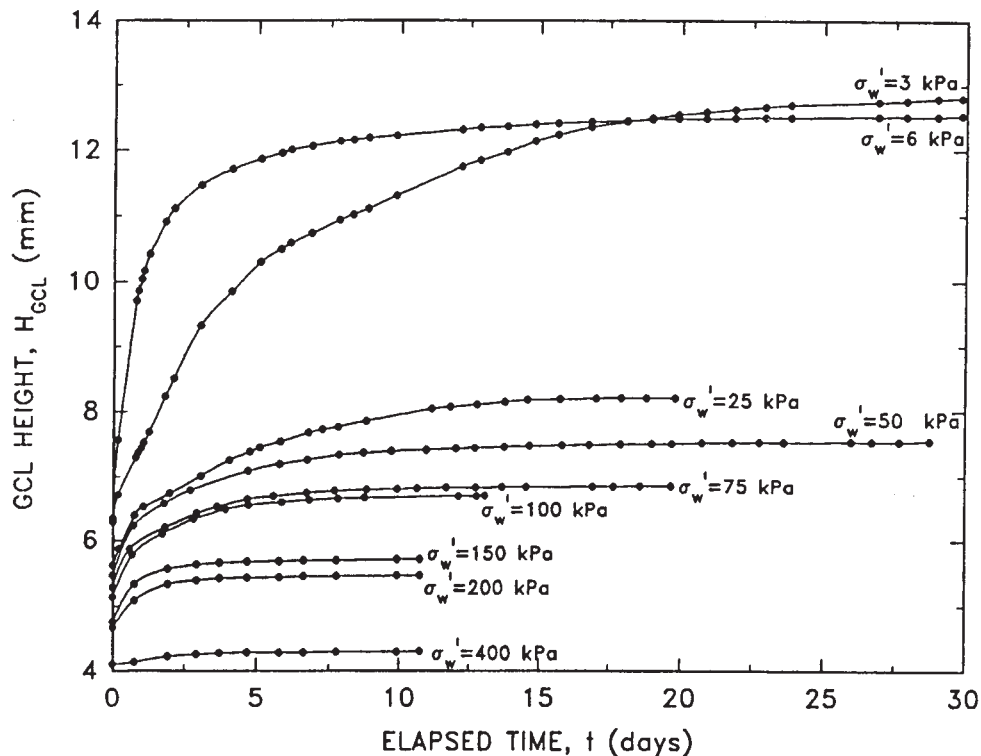
Markkinoilla on saatavilla suuri joukko erilaisia bentoniittimattoja. Merkittävimmät erot näiden välillä ovat bentoniitin koostumus (Na-Ca-natriumaktivoitu kalsiumbentoniitti), bentoniitin raekoko (jauhe-rakeinen), tukikankaiden tyyppi (polymeerilaatu, kudottu-kutomaton) sekä maton sidontamenetelmä. Joissain tuotteissa on lisäksi kiinteänä osana polyeteeni- tai PVC-kalvo.

Bentoniittimatton hydrauliseen johtavuuteen vaikuttavat bentoniitin laatu ja määrä, hydratoitumisolosuhteet, läpäisevän nesteen laatu sekä vallitseva jännitystila. Tukikankaat sekä sidontatapa vaikuttavat lähinnä maton mekaaniisiin ominai-

suuksiin, mutta neulasidonta parantaa myös maton hydraulista toimintaa etenkin alhaisella kuormituspainella. Bentoniiattia on natriumbentoniittimatoissa yleisimmin 3500-5000 g/m<sup>2</sup> (w=0%) ja kalsiumbentoniittimatoissa enemmän. Tehdasvalmisteisena tuotteena mattojen bentoniittipitoisuus ja sen jakautuminen vaihtelevat hyvin vähän.

Mikäli bentoniittimattoja käytetään eristämään puhtaan veden sijaan aggressiivisempia nesteitä, tulee suunnittelussa ottaa huomioon näiden vaikutus bentoniitin ja koko rakenteen hydrauliseen johtavuuteen. Useat tutkijat ovat käsitelleet raporteissaan bentoniittimattojen hydraulista johtavuutta ja kemikaalien sekä olosuhteiden vaikutusta johtavuuteen. Laajan yhteenvedon selvityksistä on esittänyt Rowe (1998).

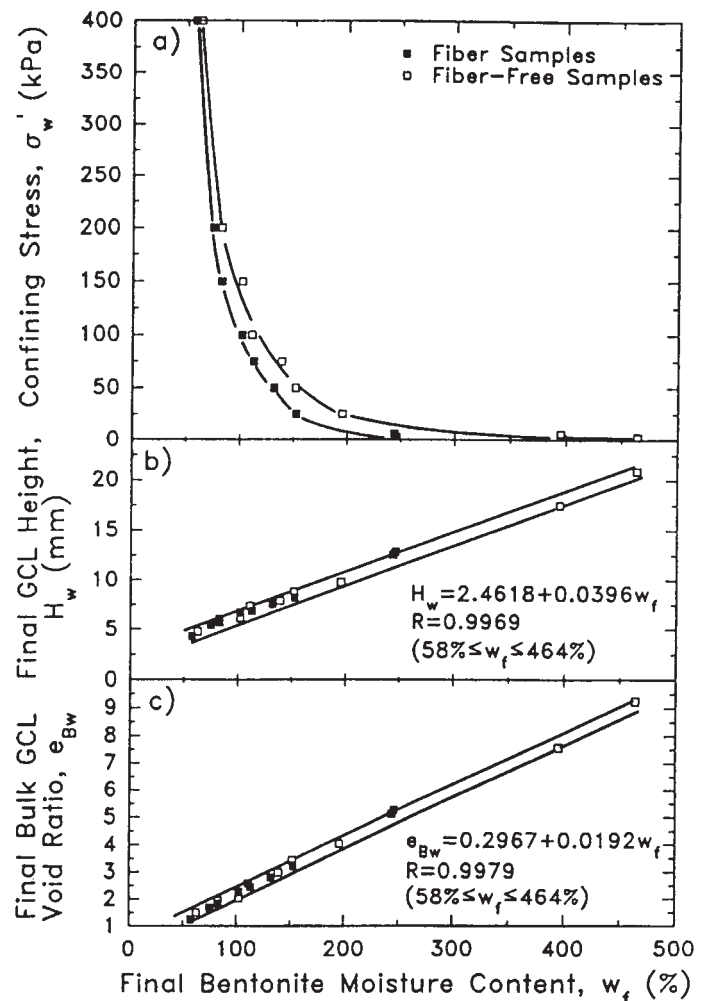
Hydrataatio-olosuhteet sekä läpäisyn aikana vallitseva jännitystila vaikuttavat voimakkaasti bentoniittimaton hydrauliseen johtavuuteen. Bentoniiitin hydrataation aikana vallitseva jännitys sekä hydrataationesteen laatu vaikuttavat bentoniitin paisumiseen ja saavuttamaan huokoslukuun (kuva 9, Petrov ym. 1997). Petrovin ym. (1997) testaama bentoniittimatto sisälsi jauhemaista natriumbentoniittia 3500 g/m<sup>2</sup>.



Kuva 9. Natriumbentoniittimaton paisuminen tislatussa vedessä eri jännitystiloiissa (Petrov ym. 1997). GCL height = maton paksuus; elapsed time = paisumiseen kulunut aika (päiviä);  $\sigma_w'$  = hydrataation aikana vallitseva jännitys.

Bentoniitin täydellinen hydratoituminen voi kestää 5-20 vrk. Alhaisella kuormituksella (6 kPa) suurin osa hydrataatiosta ja paisumisesta tapahtuu 5 vrk:n aikana (kuva 9) ja bentoniittimaton paksuus on noin 12 mm hydratoituneena kun se alussa on noin 6 mm. Bentoniiitin hydrataatioaika voi olla kriittinen tekijä maton toiminnan kannalta tilanteissa, joissa kemiallinen tai hydraulinen kuormitus kohdistuvat mattoon nopeasti asentamisen jälkeen, tai mikäli matto pääsee kuivumaan käytön aikana. Daniel ym. (1993) osoittivat, että toimiakseen tehokkaana eristeenä bentoniitin vesipitoisuuden tulee olla vähintään 100%, kun siihen kohdistuu haitallisen kemikaalin kuormitus.

Kuva 10. Natriumbentoniittimaton huokosluvun (final bulk GCL void ratio), paksuuden (final GCL height), jännitystilän (confining stress) ja vesipitoisuuden (final bentonite moisture content) välinen yhteys. (Petrov ym. 1997). Fiber samples = matto; Fiber-free samples = pelkkä bentoniitti.

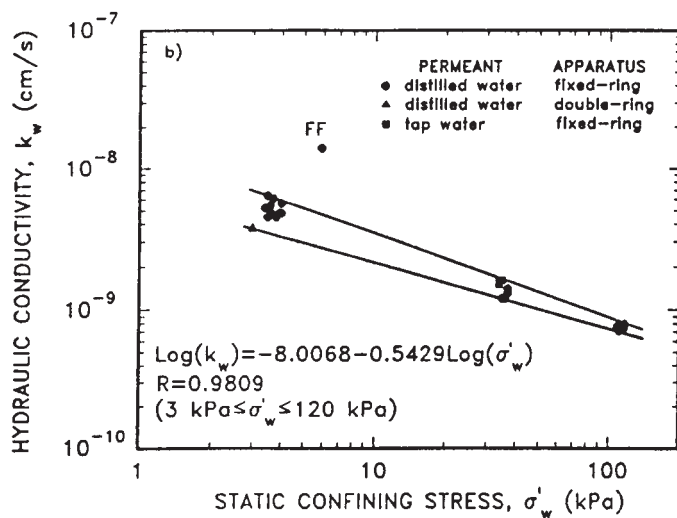
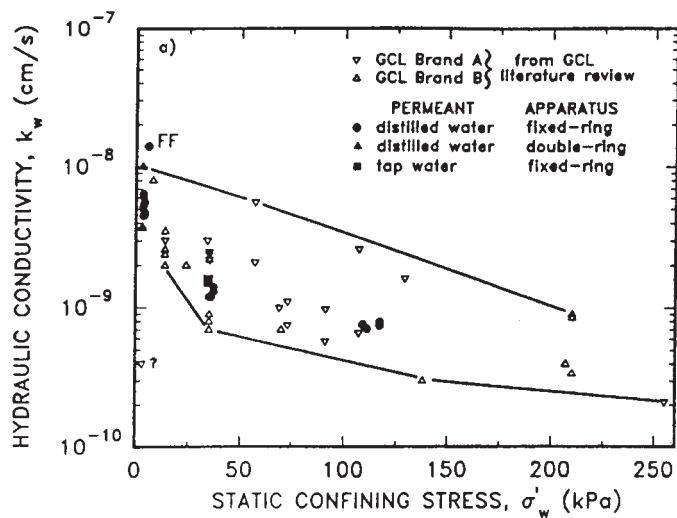


Yhteys bentoniittimaton hydrataation aikaisen jännitystilän, vesipitoisuuden, paksuuden sekä huokosluvun välillä on esitetty kuvassa 10 (Petrov ym. 1997). Luiskasuojausta vastaavassa jännitystilassa täysin hydratoituneen natriumbentoniittimaton vesipitoisuus on kuvan 10 mukaan noin 250% ja huokosluku noin 5. Vallitseva jännitystila vaikuttaa bentoniittimaton hydrauliseen johtavuuteen bentoniitin huokosluvun kautta. Korkeampi jännitystila aiheuttaa alhaisemman huokosluvun ja alhaisemman hydraulisen johtavuuden (kuva 11, Petrov ym. 1997).

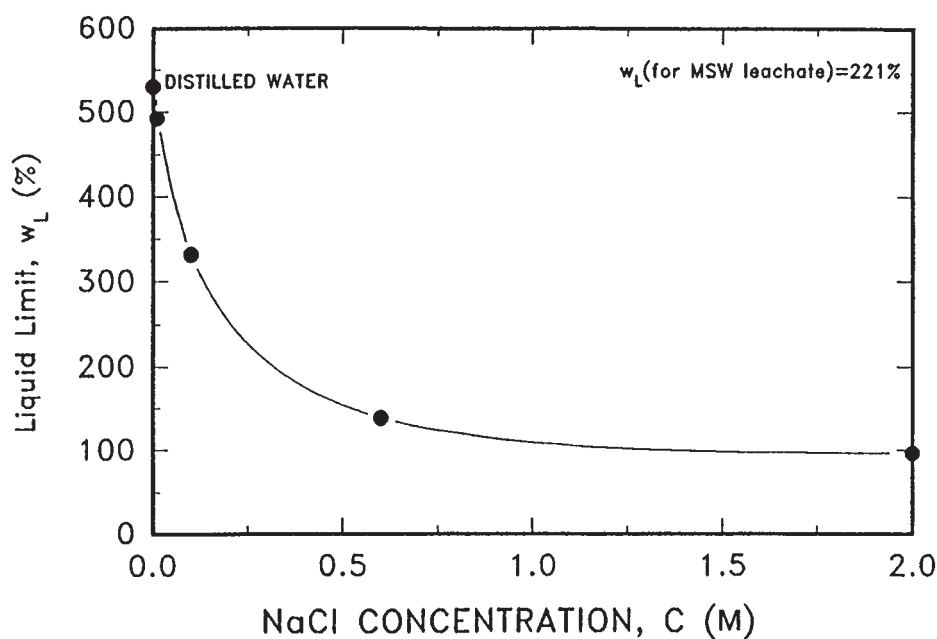
Bentoniittimaton k-arvo luiskasuojausta vastaavassa jännitystilassa on kuvan 11 mukaan luokkaa  $2-6 \cdot 10^{-11}$  m/s. Bentonitiin neulasidonta estää bentoniittia paisumasta maksimaaliseen huokoisuutensa ja parantaa bentoniittimattojen tehokkuutta etenkin alhaisilla suojaerospaksuuksilla kuten luiskasuojausrakenteissa.

Petrov ja Rowe (1997) selvittivät natriumbentoniitin huokosveden natriumkloridikonsentraation vaikutusta bentoniitin juoksurajaan, joka on suoraan verrannollinen bentoniitin hydratoitumiseen ja paisumiseen (kuva 12). Huokosveden suolapitoisuuden kasvu vähentää voimakkaasti bentoniitin paisumista.

Jo ym. (2001) selvittivät erivalenssisten metallien kloridiliuosten vaikutuksia natriumbentoniitin paisumiseen (kuva 13) ja hydrauliseen johtavuuteen (kuva 14). Testeissä käytetty matto oli neulasidottu ja sisälsi rakeista natriumbentoniittia  $4900 \text{ g/m}^2$ . Paisuminen selvitettiin käyttäen standardikoetta ja hydraulinen johtavuus joustavaseinäisellä menetelmällä 20 kPa:n vallitsevassa jännityksessä (ASTM D5890).

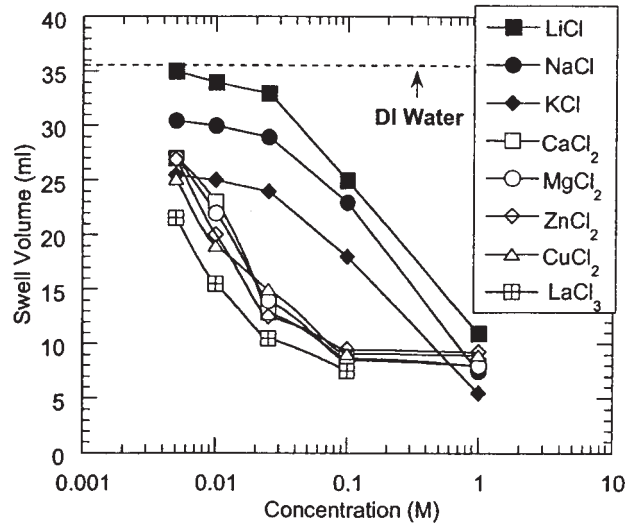


Kuva 11. Natriumbentoniittimattojen hydraulinen johtavuus (hydraulic conductivity) tislatulle (distilled) ja vesijohtovedelle (tap water) eri jännitystiloissa (static confining stress) määritettyinä erilaisilla menetelmillä. (Petrov ym. 1997). Huomaa yksikkö cm/s. Apparatus = laitteisto; fixed ring = jäykkäseinäinen selli; double-ring = kaksoisrengasselli. FF = pelkkä bentoniitti.

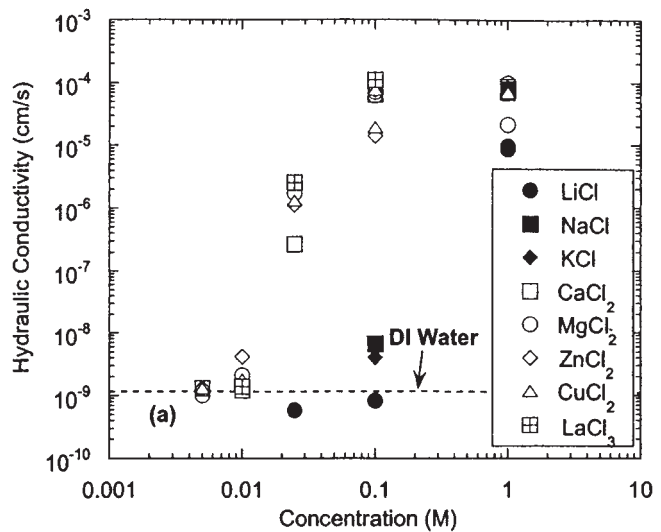


Kuva 12. Huokosveden natriumkloridikonsentraation (NaCl concentration) vaikutus natriumbentoniitin juoksurajaan (Liquid limit). (Petrov ja Rowe, 1997).

Kuva 13. Natriumbentoniitin paisuminen eri metallikloridien eri vahvuisilla vesiliuosilla (Jo ym. 2001). Vertailuarvona tislattu vesi (DI water). Swell volume = paisuminen; concentration = konsentraatio.



Kuva 14. Natriumbentoniitin hydraulinen johtavuus (hydraulic conductivity) eri metallikloridien eri vahvuisilla vesiliuosilla (Jo ym. 2001). Vertailuarvona tislattu vesi (DI water).



Kaikki huokosveteen liuenneet suolat heikentävät bentoniitin paisumiskykyä. Vaikutuksen voimakkuus riippuu sekä konsentraatiosta että kationin valenssista. Luiskasuojusrakenteen kannalta on kiinnostavaa verrata natrium- ja kalsiumkloridin vaikutusten eroa. Veden suolakonsentraation ollessa 0,01M kalsiumkloridi heikentää bentoniitin paisumista 25% natriumkloridiin verrattuna. Konsentraatiolla 1M ei natrium- ja kalsiumkloridin vaikutusten välillä ole suurta eroa. Näiden välisellä konsentraatioalueella kalsiumkloridi heikentää bentoniitin paisumista merkittävästi natriumkloridia enemmän.

Jo konsentraatiolla 0,025M kasvattivat kaksi- ja kolmivalenssisten metallien kloridiliuokset natriumbentoniitin hydraulista johtavuutta merkittävästi. Yksivalenssisten kationien kloridit kasvattivat bentoniittimaton hydraulista johtavuutta merkittävästi vasta konsentraationa 1M.

Jäätyminen ja sulaminen eivät heikennä neulasidotun bentoniittimaton hydraulista johtavuutta (Tammirinne ym. 1999). Maton neulasidonta mitätöi bentoniitin sulamisvaiheessa alenevan leikkauslujuuden vaikutukset stabiilettiin. Bentoniittimatto kykenee korjaamaan itse pieniä reikiä, joita siihen voi syntyä esim. läpivienneistä. Bentoniittimatto sietää luonnonmaalajeista rakennettuja tiivistyskerroksia paremmin kuivumisrasitusta. Osittain tämä on seurausta bentoniitin muita maalajeja suuremmasta matriisipotentiaalista ja osittain suuremmasta deformaatiokyvystä. Bentoniitin kuivuaessa voi syntyä halkeamia, mutta nämä sulkeu-

tuvat bentoniitin uudelleen hydratoituessa. Mikäli kuivumiseen yhdistyy ioninvaihto, menettää bentoniitti suuren osan paisumiskapasiteetistaan, ja halkeamat voivat jäädä pysyviksi.

#### 3.7.1.4 Maabentoniittiseokset

Seoksia, joilla on alhainen hydraulinen johtavuus, voidaan valmistaa sekoittamalla paikallisia maa-aineksia ja bentoniittijauhetta. Maabentoniittiseosten hyvinä puolina pidetään alhaista kuivumiskutistumaa ja hyvää jäätymisen kestoa (Studds ym. 1998). Suomessa yleisimmin käytetty seossavi on natriumaktivoitu kalsiumbentoniitti. Maabentoniittiseokset sekoitetaan pakkosekoittajalla ja tiivistetään optimivesipitoisuutta kosteampina.

Suhteistuneen runkoaineoksen yhteydessä käytetään bentoniittia yleensä 5-10 p-% ja lajittuneen runkoaineoksen yhteydessä 10-15 p-% runkoaineoksen kuivapainosta, jotta saavutetaan riittävän alhainen k-arvo ( $10^{-9}$  m/s). Maabentoniitin bentoniittipitoisuus on valittava siten, että bentoniitti paisuessaan todellisen suotoveden kanssa ja todellisessa jännitystilassa täyttää kokonaan maa-aineoksen huokostilavuuden. Maabentoniittiseoksen mitoittamista ovat käsitelleet esim. Studds ym. (1998) ja Mollins ym. (1996).

Bentoniitin määrä seoksessa vaikuttaa voimakkaasti maabentoniittirakenteen hintaan. Bentoniitin määrä tulee optimoida toimintaolosuhteiden vaatimusten mukaan. Seoksen bentoniittimäärän minimoimista puolustavat kustannusten lisäksi seuraavat seikat: a) kun karkeat maarakeet ovat kontaktissa, ei tapahdu makroskooppista kuivumiskutistumaa; b) seoksen mekaaninen stabiliteetti paranee, kun karkeat rakeet ovat ainakin osaksi kontaktissa toisiinsa. Bentoniitin määrän minimoimista vastaan ovat: a) seoksen muodonmuutoskyky heikkenee, kun runkoaineoksen osuus kasvaa; b) veden sisältämät liuenneet ionit voi vähentää bentoniitin paisumista, ja c) erittäin alhainen bentoniittipitoisuus voi aiheuttaa seoksen epähomogeenisuutta. Kompromissi edellyttää, että runkoaines kantaa osan kuormasta, ja että bentoniitilla on paisuntakapasiteettia reservissä kemiallisen kuormituksen varalta (Mollins ym. 1996).

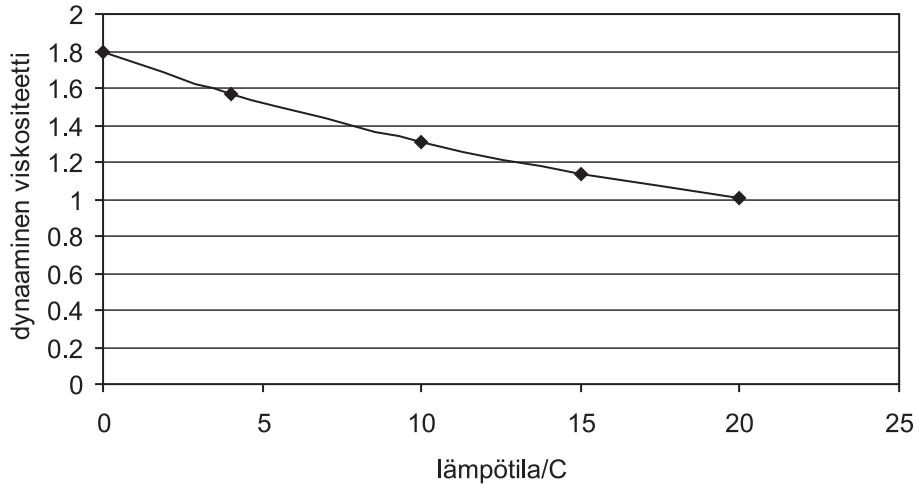
Jäätymisen vaikutuksesta maabentoniittien vedenläpäisevyyteen on olemassa osittain ristiriitaisia havaintoja (Tammirinne ym. 1999). Kun jäätymisen aikana ei ole saatavilla lisävettä (suljettu koejärjestely), ei maabentoniitin vedenläpäisevyys yleensä kasva. Kun lisävettä on saatavilla (avoin koejärjestely), maabentoniitin vedenläpäisevyys aluksi kasvaa, mutta alentuu myöhemmin bentoniitin hydratoituessa uudelleen. Seoksen bentoniittimäärä vaikuttaa sen jäätymisenkestävyyteen kaikilla runkoaineeksilla. Jäätymisherkissä olosuhteissa, kuten luiskasuojauksissa, tulisi maabentoniitin bentoniittimäärä optimoida jäätymiskestävyyden perusteella.

Samat tekijät, jotka vaikuttavat bentoniitin paisumiseen bentoniittimatoissa, vaikuttavat myös maabentoniiteihin. Kiinteän raerungon vuoksi voivat kemikaalien ja kuivumisen aiheuttamat muutokset olla maabentoniiteissa merkittävämpiä kuin bentoniittimatoissa, sillä huokosia täyttävän saven kutistuessa ei maamatriisi kykene seuraamaan kutistumista ja syntyy paljon virtaukselle avointa huokostilaa. Mitä enemmän runkoaineuksessa on kemiallisesti inerttiä, kutistumatonta hienoaainesta, sitä vähemmän kemikaalit vaikuttavat koko seoksen hydrauliseen johtavuuteen. Karkea, jäykkä maamatriisi estää makroskooppisten kuivumishalkeamien syntymisen maabentoniittirakenteeseen, mutta ei sisäisen huokostilavuuden kasvua bentoniitin kuivuessa.

#### 3.7.2 Huokosnesteem kemian vaikutus

Mineraalisen tiivistysmateriaalin hydraulinen johtavuus määritetään laboratorioissa useimmiten tislattulla tai vesijohtovedellä. Mikäli todellisen läpäisynesteen vis-

kositeetti ja ominaispaino eroavat veden vastaavista, on sillä vaikutusta nesteen läpäsyrnopeuteen veteen verrattuna. Aleneva viskositeetti ja kasvava ominaispaino nopeuttavat läpäisyä. Läpäsyrnesteen lämpötilan muutokset vaikuttavat myös sen hydraulisiin ominaisuuksiin (kuva 15). Taulukossa 2 on esitetty suolapitoisuuden ja lämpötilan yhteisvaikutus veden viskositeettiin (RIL 124). Havaitaan veden viskositeetin kasvavan merkittävästi sen lämpötilan laskiessa. Suolapitoisuuden kasvulla on vähäisempi vaikutus veden viskositeettiin.



Kuva 15. Lämpötilan vaikutus veden viskositeettiin (RIL 124).

Taulukko 2. Suolapitoisuuden  $s$  ja lämpötilan  $t$  yhteisvaikutus veden kinemaattiseen viskositeettiin (RIL 124).

$t$ (°C)	$s = 0\%$	$s = 1\%$	$s = 3,5\%$
0	1,79	1,82	1,89
5	1,52	1,55	1,61
10	1,31	1,34	1,39
15	1,14	1,17	1,22
20	1,01	1,03	1,09

Huokosnesteiden kemialliset ominaisuudet voivat vaikuttaa savien sähköisten kaksoiskerrosten paksuuteen ja muuttaa savien rakennetta. Tällaisia kemiallisia tekijöitä ovat nesteen elektrolyyttipitoisuus sekä kationien valenssi. Sähköisen kaksoiskerroksen muutoksia selitetään yleensä Gouy-Chapmanin yhtälöllä (Mitchell, 1993), jonka mukaan kaksoiskerroksen paksuus,  $t$ , saadaan:

$$t = \left( \frac{DKT}{8\pi n_0 \varepsilon^2 v^2} \right)^{0,5} \quad (14)$$

missä  $D$  on nesteen dielektrinen vakio,  $K$  on Boltzmanin vakio,  $T$  on lämpötila (K),  $n_0$  on elektrolyyttikonsentraatio,  $\varepsilon$  on elektronin varaus ja  $v$  on kationin valenssi.

Saven sähköisen kaksoiskerroksen ohentuminen lisää vapaan veden määrää ja kasvattaa rakenteen tehokasta huokoisuutta. Pienempi kaksoiskerroksen paksuus lisää partikkelien välisiä voimia, ja tästä voi aiheutua rakenteen flokkautumista ja tehokkaan huokoskoon kasvua. Näistä on seurauksena hydraulisen johtavuuden kasvu. Rakenteen flokkautuminen jää yleensä pysyväksi. Rakenteeseen kohdistuva tehokas jännitys kemiallisen kuormituksen aikana vaikuttaa muutoksiin savien rakenteessa sekä hydraulisessa johtavuudessa. Osmoottinen konsolidoi-



tuminen voi joissain tapauksissa pienentää plastisen saven huokoisuutta ja johtavuutta.

Kaoliniitti ja illiitti ovat paisumattomia ja epäaktiivisia savimineraaleja, eivätkä huokosnesteessä olevat kemikaalit juurikaan vaikuta niiden rakenteeseen tai hydrauliseen johtavuuteen. Sen sijaan huokosnesteeseen suolakonsentraatio vaikuttaa voimakkaasti montmorilloniittien (bentoniitti) paisumiskykyyn ja hydrauliseen johtavuuteen. Havaittavat muutokset saven ominaisuuksissa ovat suurempia lietteissä kuin tiivistetyissä rakenteissa.

Ioninvaihto vaikuttaa bentoniitin rakenteeseen muuttamalla savipartikkelien välisiä voimia. Vaihtuvien kationien sidosvoima kasvaa järjestyksessä  $Na < Li < K < Rb < Cs < Mg < Ca < Ba < Cu < Al < Fe < Th$  (Mitchell, 1993). Lähes kaikki huokosnesteessä esiintyvät vaihtuvat kationit voivat vaihtua natriumin tilalle. Kationinvaihto on tasapainoreaktio ja siihen vaikuttavat kilpailevien ionien konsentraatio, lämpötila sekä saven rakenne. Smektiiteillä kationinvaihtoreaktiot etenevät muita savimineraaleja hitaammin. Maalajin suuri kationinvaihtokapasiteetti (CEC) kuvaa suurta savipitoisuutta ja herkkyyttä elektrolyyttien aiheuttamalle rakenteen muuttumiselle. Joissain oloissa ja maalajeissa myös anionit voivat osallistua vaihtoreaktioihin.

Huokosnesteeseen pH:n muutokset voivat myös vaikuttaa saven rakenteeseen ja johtavuuteen. Alkaaliset liuokset dispergoivat ja happamat flokkuloivat savia. pH:n merkitys on suurin kaoliniitilla, mutta vähäisempi illiiteillä ja montmorilloniiteilla. Hyvin alhaisessa tai korkeassa pH:ssa voivat savimineraalit liueta. pH:n muuttuessa voivat huokosnesteessä olevat liuenneet aineet saostua tukkimaan saven huokosia tai päinvastoin liueta savipinnoilta huokosnesteeseen.

Mikäli on odotettavissa, että saven huokosvesi tulee käytön aikana muuttumaan suolaiseksi, ja tämä tulee kasvattamaan rakenteen läpäisevyyttä, on mahdollista tiivistää alkuperäinen rakenne suolavettä käyttäen, jolloin läpäisevyyden muutokset jäävät vähäisiksi (Huag ym. 1988).

### 3.7.3 Koejärjestelyjen vaikutus saatavaan hydrauliseen johtavuuteen

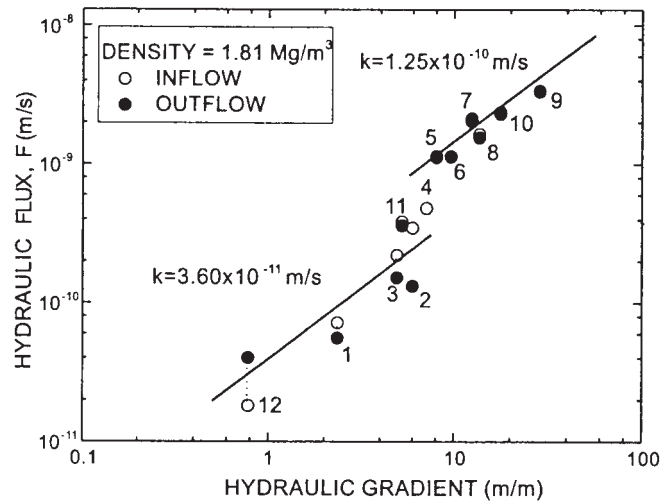
Hydraulisen johtavuuden määrittämiseen laboratoriossa on käytössä periaatteessa kolme erilaista laitteistoa: joustavaseinäinen selli, kiinteäseinäinen selli sekä ödometri-laite, joka on periaatteessa myös kiinteäseinäinen selli. Petrov ym. (1997) mukaan kaikilla koemenetelmillä saadaan bentoniittimatolla samanlaisia tuloksia, mikäli testiolosuhteet ovat vastaavat.

Kiinteäseinäisen koejärjestelyn heikkoutena on mahdollisuus reunavuotoihin koekappaleen kutistuessa. Kaksoiskehällä varustettu kiinteäseinäinen selli on kiinteäseinäisen koejärjestelyn eräs versio, jolla reunavuotojen vaikutusta koetuloksiin voidaan estää. Ödometrilaitteistossa voidaan reunavuodot ehkäistä käyttämällä suurta kuormituspainetta. Tulokset eivät ole kuitenkaan sovellettavissa alhaisempiin kuormitusolosuhteisiin. Luotettavin tapa reunavuotojen eliminoimiseen on pehmeäseinäisen koejärjestelyn käyttö, jossa membraanikumi puristetaan koekappaleen pintaan vähintään 25 kPa:n tehokkaalla paineella. Tämä tehokas paine aiheuttaa näytteiden konsolidoitumista, joten tulokset eivät vastaa alhaisemman tehokkaan jännityksen käyttötilaa.

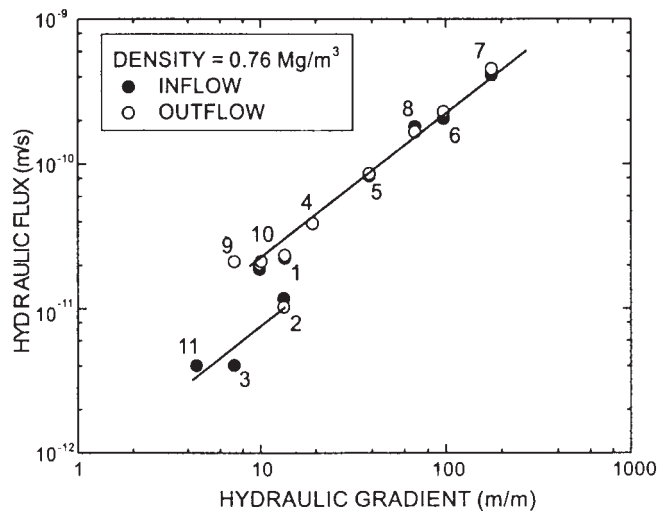
Yleensä laboratoriossa tehtävät läpäisevyyskokeet suoritetaan gradientilla noin 30 ja bentoniittimatoilla gradienteilla  $< 100$ . Käytännössä näin suuret gradientit ovat tieluiskissa harvinaisia. Dixon ym. (1999) määrittivät illiitin, natriumbentoniitin sekä hiekkabentoniittiseoksen (50:50) hydraulisen johtavuuden useilla tiiviyssasteilla ja hydraulisilla gradienteilla. Heidän tulostensa perusteella hydraulinen gradientti vaikutti illiitin hydrauliseen johtavuuteen lukuun ottamatta hyvin suuria tiheyksiä (kuva 16). K-arvo kasvaa noin gradientin ollessa noin 10. Bentoniitilla sekä hiekkabentoniitilla havaittiin vastaava ilmiö vain alhaisilla tiheyksillä (kuva 17). Tämän ns. kynnsgradientin alapuolella ei Darcyn laki ole voimassa.

Erilaisille tiivistysmateriaaleille on vakiintunut käytännöksi määrittää edustava k-arvo tietyissä vakio-olosuhteissa. Arvioitaessa materiaalin käyttäytymistä todellisessa rakenteessa ja todellisissa kuormitusolosuhteissa tulisi läpäisevyyskokeissa simuloida mahdollisimman tarkkaan todellisia olosuhteita. Todellisissa käyttöolosuhteissaan, jossa gradientit ovat yleensä alhaisia, toimivat mineraaliset tiivistysrakenteet todennäköisesti suunniteltua paremmin.

Kuva 16. Illiitin johtavuuden muutos gradientilla noin 10 (Dixon ym. 1999). Hydraulic flux = Darcyn nopeus,  $k$ ; hydraulic gradient = hydraulinen gradientti; density = saven tiheys; inflow = virtaus sisään; out flow = virtaus ulos.



Kuva 17. Bentoniitin ja hiekkabentoniitin hydraulinen johtavuus löyhässä tilassa (Dixon ym. 1999). Selitykset samat kuin edellisessä kuvassa.



### 3.8 Diffuusiovirtaus

Diffuusiossa aine, esim. suola, kulkeutuu molekyyli muodossa kemiallisen potentiaal (konsentraatio-) gradientin vaikutuksesta alhaisemman potentiaal suuntaan. Diffuusio tapahtuu väliaineen, esim. veden tai ilman välityksellä. Vedessä tapahtuva diffuusio edellyttää kulkeutuvan aineen vesiliukoisuutta ja ilmassa tapahtuva haihtuvuutta. Diffuusiolla kulkeutuvaa massavirtaa kuvaa kaava:

$$f = -nD_e \frac{\partial c}{\partial z} \quad (15)$$

missä  $n$  on tehokas huokoisuus,  $D_e$  on tehokas diffuusiokerroin ja  $\partial c/\partial z$  on vallitseva konsentraatiogradientti. Negatiivinen etumerkki kuvaa kulkeutumista alhaisemman konsentraation suuntaan. Ajassa  $t$  kulkeutunut kokonaismassa  $m_d$  saadaan integroimalla:

$$m_d = A_0 \int_0^t -nD_e \frac{\partial c}{\partial z} dt \quad (16)$$

Luiskasuojauksen tapauksessa on väliaineena vesi ja suola kulkeutuu veteen liuenneena. Maan kyllästysasteen laskiessa pienenee myös tehokas huokospinta-ala, jossa diffuusiokulkeutumista voi tapahtua, ja kulkeutuminen hidastuu. Kun karkea maalaji kuivuu riittävästi, ei sen vesifaasi muodosta enää yhtenäistä verkostoa ja vesifaasissa tapahtuva diffuusio loppuu kokonaan. Haihtuvat yhdisteet voivat kulkeutua myös kaasumaisena huokosilmassa, ja niiden kulkeutumisen mallintaminen edellyttää sekä vesi- että kaasufaasin ottamisen huomioon.

Seuraavien kaavojen avulla voidaan laskea osittain kyllästyneen tilan tehokas diffuusiokerroin,  $D_\theta^*$  (Rowe ja Badv, 1996):

$$D_\theta^* = \frac{\theta - \theta_{\min}}{n - \theta_{\min}} D^* \quad (17)$$

$$D_e = \frac{\theta}{\theta_{\text{ref}}} D_{e(\text{ref})} \quad (18)$$

$$D(\theta) = D_0 a \exp(b\theta) \quad (19)$$

missä  $\theta_{\min}$  on tilavuusvesipitoisuus, jossa maalajissa ei esiinny yhtenäistä vesivaippaa,  $\theta_{\text{ref}}$  on kyllästysvesipitoisuus,  $D^*$ ,  $D_{e(\text{ref})}$  ja  $D_0$  ovat kyllästyneen maan tehokas diffuusiokerroin, ja  $a$  sekä  $b$  käyräsovitusparametreja. Erittäin alhaisilla vesipitoisuuksilla mekaanisen dispersion merkitys kasvaa diffuusioon verrattuna (Rowe ja Badv, 1996).

Taulukkoon 3 on koottu joidenkin epäorgaanisten ionien ja molekyylien diffuusiokertoimia vapaassa vedessä, 25°C:ssä äärettömän laimeassa liuoksessa, ja taulukkoon 4 konsentraation vaikutus natrium- ja kalsiumkloridin diffuusiokertoimeen vapaassa vedessä (Shackelford ja Rowe, 1998).

Natriumkloridin vapaan veden diffuusiokertoimen minimi esiintyy välillä 0,5M-1M ja kalsiumkloridin välillä 0,05M-0,5M. Ehjän HDPE-membraanin diffuusiokerroin on viisi dekadia alhaisempi kuin mineraalisilla tiivistysrakenteilla. Epäorgaanisten aineiden diffuusiota, kuten advektiotakin, voi ehjässä membraanissa käytännössä tapahtua ainoastaan reikien vaikutusalueella.

Taulukko 3. Epäorgaanisten ionien diffuusiokertoimia,  $D_0$ , vapaassa vedessä.

ioni	$D_0$ ( $\times 10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)
Cl	20,3
Na <sup>+</sup>	13,3
Ca <sup>2+</sup>	7,92
K <sup>+</sup>	19,6
Mg <sup>2+</sup>	7,05
NaCl	16,1
CaCl <sub>2</sub>	13,4

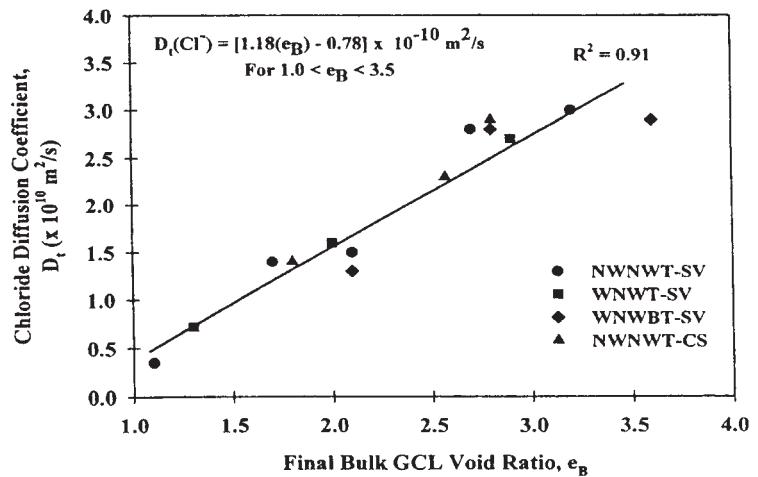
Taulukko 4. Konsentraation, C(M), vaikutus natrium- ja kalsiumkloridin diffuusiokertoimeen.

	Diffuusiokerroin, $D_0$ ( $\times 10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)				
C (M)	0	0,05	0,5	1	2
NaCl	16,1	15,1	14,7	14,8	15,2
CaCl <sub>2</sub>	13,4	11,2	11,4	12	13,1

Erot eri maalajien diffuusiokertoimissa aiheutuvat tehokkaan huokoisuuden eroista. Kuormituspaine vaikuttaa bentoniittimattojen huokoisuuteen ja siten myös diffuusiokertoimeen. Myös muut bentoniitin tehokkaaseen huokoisuuteen vaikuttavat tekijät vaikuttavat suoraan sen diffuusiokertoimeen. Lake ja Rowe (2000) selvittivät bentoniittimaton huokoisuuden vaikutusta natriumin ja kloridin diffuusiokertoimiin (kuva 18).

Laboratoriossa saatuja diffuusiotuloksia ei voi suoraan käyttää kentällä tapahtuvan diffuusiokulkeutumisen arviointiin, sillä koejärjestelyssä on matto täysin kylälästyneessä tilassa ja molemmilta puoliltaan kosketuksissa veteen. Luiskasuojauksessa on matto harvoin täysin kyllästyneenä ja sen alapuolen vesipitoisuus on yleensä alhainen.

Kuva 18. Bentoniittimaton huokoisuuden (Final Bulk GCL Void Ratio) vaikutus kloridin diffuusioon (Chloride Diffusion Coefficient), (Lake ja Rowe, 2000).



### 3.9 Yhdistetty advektiodiffuusiokulkeutuminen

Usein advektio ja diffuusio vaikuttavat yhtä aikaa. Tällöin massavirran perusyhtälö ilman sorptiota ja hajoamistermejä on muotoa:

$$J = qc - \theta D_e \frac{\partial c}{\partial z} \quad (20)$$

missä J on kokonaismassavirta, q advektiovirta, c on konsentraatio,  $\theta$  on tilavuusvesipitoisuus ja  $D_e$  on tehokas diffuusiokerroin. Pinta-alan  $A_0$  läpi aikayksikössä t kulkeutunut massamäärä m saadaan integroimalla:

$$m = A_0 \int_0^t \left( qc - \theta D_e \frac{\partial c}{\partial z} \right) dt \quad (21)$$

Advektiovirran, q, suunta on luiskasuojaurakenteessa yleensä aina alaspäin, eli positiivinen. Diffuusion suunta voi vaihdella konsentraatiogradientin suunnasta

riippuen. Usein diffuusio ja mekaaninen dispersio yhdistetään termiksi  $D$ . Tiivistysrakenteissa ovat virtausnopeudet kuitenkin niin alhaisia, että mekaaninen dispersio voidaan jättää kokonaan huomiotta. Tiivistyskerroksen alapuolisissa kerroksissa voi mekaanisella dispersiolla jälleen olla merkitystä kulkeutumiseen.

### 3.10 Sorptio

Sorptioprosessit voivat pidättää kulkeutuvia aineita tiivisteeseen tai maaperään. Pidättymisen aiheuttamaa aineen kulkeutumisen hidastumista kuvataan hidastuskertoimella,  $R$ :

$$R = 1 + \frac{\rho_d}{n} K_d \quad (22)$$

missä  $\rho_d$  on maan kuivatiheys,  $n$  huokoisuus ja  $K_d$  jakautumiskerroin. Ioninvaihtoa voidaan pitää myös sorptioprosessina. Natriumkloridin natrium voi korvata maan Ca- ja Mg -ioneja, ja päinvastoin. Kloridi ei pidäty ioninvaihdossa. Tarkasteltaessa tiesuolan massavirtaa suojausrakenteissa voidaan sorptioprosessit jättää huomiotta. Onnettomuussuojauksien suunnittelussa voidaan sorptioprosesseja hyödyntää.

### 3.11 Kemiallinen osmoosi

Kun otetaan huomioon sekä advektion, diffuusion että osmoosin vaikutukset suolan massavirtaan, voidaan virtausyhtälö kirjoittaa muotoon (Malusis ja Shackelford, 2004):

$$J = J_a + J_\pi + J_d = (1 - \omega) q_h C + q_\pi C + nD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (23)$$

missä  $J_a$  on advektiomassavirta,  $J_\pi$  kemiallisosmoottinen massavirta,  $J_d$  diffuusio-massavirta,  $q_h$  on advektiovirtaus,  $q_\pi$  kemiallisosmoottinen nestevirta,  $\omega$  on osmoottinen tehokkuus,  $C$  konsentraatio,  $n$  huokoisuus ja  $D$  diffuusiokerroin. Osmoottisen tehokkuuden arvo on välillä 0 – 1.

Kemiallisosmoottinen nestevirta tarkoittaa vesimäärää, joka kulkeutuu puoliläpäisevän kalvon läpi kohti korkeampaa suolakonsentraatiota (suunta päinvas-tainen kuin suolan diffuusiolla). Tälle vesimäärälle  $q_\pi$  voidaan kirjoittaa:

$$q_\pi = k_\pi i_\pi = \frac{\omega k_h}{\rho_w g} \frac{\partial \pi}{\partial x} \quad (24)$$

missä  $k_\pi$  on kemiallisosmoottinen johtavuuskerroin ( $= \omega k_h$ ),  $k_h$  hydraulisesta paineesta aiheutuva johtavuuskerroin,  $i_\pi$  kemiallisosmoottinen gradientti,  $\rho_w$  veden tiheys,  $g$  maan vetovoiman kiihtyvyys, ja  $\pi$  kemiallisosmoottinen paine. Laimeilla liuksilla (<1 M) on kemiallisosmoottinen paine verrannollinen konsentraatioon van't Hoffin lain mukaisesti (Malusis ja Shackelford, 2004):

$$\pi = RT \sum C_i \quad (25)$$

missä  $R$  on yleinen kaasuvakio (8,314 J/mol K),  $T$  absoluuttinen lämpötila ja  $C_i$  liuoksen kunkin ionin konsentraatio.

# 4

## Koejärjestelyt

### 4.1 Johdanto

Kokeissa käytettiin jäykkäseinäistä kaksoisrengasselliä, jossa kaksoiskehärakenteen avulla eliminoidaan reunavuotojen vaikutukset. Tämä koemenetelmä valittiin, koska sen avulla on mahdollista simuloida luiskasuojusrakenteessa vallitsevaa alhaista kuormituspainetta pehmeäseinäistä koejärjestelyä paremmin. Koekappaleen suurempi pinta-ala tuo paremmin esille eri materiaalien herkkyyttä makrotason epähomogeenisuuksille tiivistettäessä. Koekappaleet rakennettiin tiivistetyn suodatinhiekan päälle. Savien yhteydessä käytettiin koekappaleen ylä- ja alapinnoilla suodatinkankaita. Vedenläpäisevyys määritettiin vakiopainemenetelmällä. Vertailun vuoksi osasta materiaaleja määritettiin vedenläpäisevyys puhtaalla vedellä myös pehmeäseinäisellä koejärjestelyllä (ASTM D 5084).

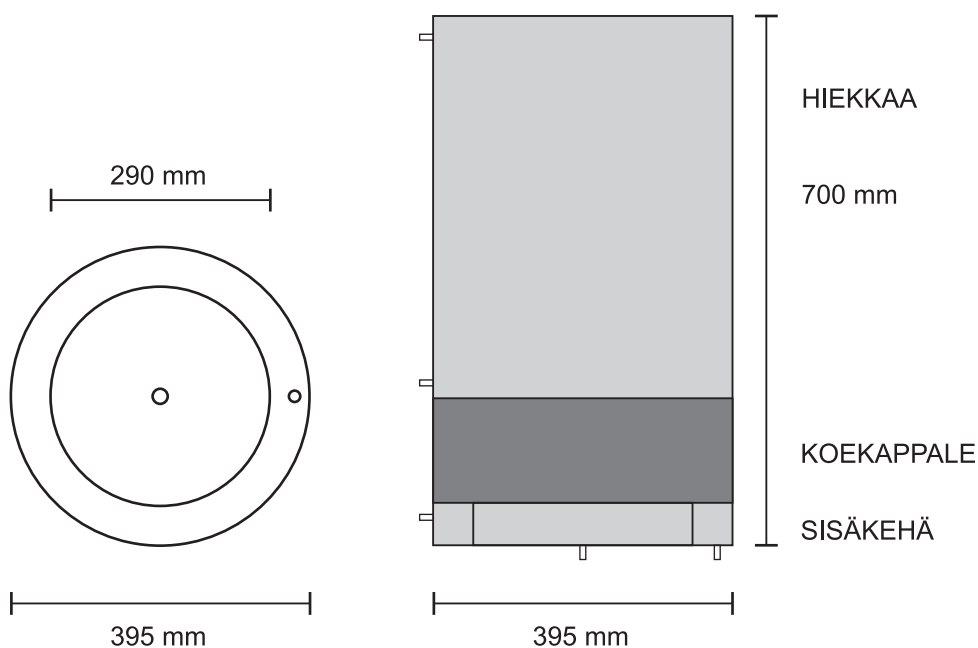
### 4.2 CUR-selli

Kaksoisrengasselli koostuu kahdesta sisäkkäisestä sylinteristä, joista sisemmän seinämä on matala. Molemmat sylinterit on liitetty tiiviisti pohjalevyyn. Tätä tutkimusta varten sellit valmistettiin polyeteenimuovista ja niiden ulkosylinterin korkeus oli 700 mm ja sisähalkaisija 395 mm sekä sisäsylinterin korkeus 50 mm ja sisähalkaisija 290 mm (kuva 20). Sellit varustettiin suljettavilla kansilla, joiden tiivistämiseen käytettiin neopreenitiivisteitä. Pohjalevyn, kannen sekä ulkosylinterin materiaalivahvuus oli 20 mm sekä sisäsylinterin 10 mm.

Sellin pohjassa on kaksi reikää poistoventtiileitä varten, toinen sisäkehän ja toinen ulkokehän alueella. Varsinainen läpäisevän vesimäärän mittaustapahtuu sisäkehältä. Kun ulkokehän venttiili pidetään auki, ei sisäkehälle kohdistu hydraulista painetta ulkokehän alueelta, ja sivuttaisvirtaukset eliminoiduvat. Ulkosylinterin seinässä on kolme venttiilinreikää painekorkeuden mittaamista sekä veden syöttämistä varten. Alin reikä on hieman koekappaleen alapinnan alapuolella, seuraava koekappaleen yläpinnan yläpuolella ja ylin reikä lähellä sylinterin yläreunaa (kuva 19). Kansi on mahdollista varustaa venttiilillä paineistusta varten.



Kuva 19. Mittaussellin pohja. Venttiilien reiät peitetty suodatinkankaalla.



Kuva 20. CUR -sellin kaaviokuva.

### 4.3 Koekappaleiden rakentaminen

Savista, lukuun ottamatta bentoniittijauheita, sekä runkoaineista määritettiin laboratorioissa rakeisuudet ja vesipitoisuudet. Maabentoniittiseoksista määritettiin optimivesipitoisuus sekä maksimikuivatilavuuspaino kiertotiivistyslaitteella (ICT). Suomalaisesta savesta määritettiin kiertotiivistyslaitteella maksimitilavuuspaino luonnontilaisessa vesipitoisuudessa, joka oli selvästi optimivesipitoisuutta korkeampi.

CUR -sellin pohjalle tiivistettiin kostea suodatinhiekkaa sisäkehän reunan tasalle asti. Koekappaleet rakennettiin suodatinhiekan päälle. Venttiilireikien sisäpuolille teipattiin suodatinkankaan palat reikien tukkeutumisen estämiseksi. Koekappale tiivistettiin pudottamalla raskasta Proctor –vasaraa halkaisijaltaan 200 mm olevan teräslevyn päälle, jota siirrettiin aina noin viiden pudotuksen jälkeen. Tiivistämisessä pyrittiin tiettyyn tiiviysasteeseen tai kuivatilavuuspainoon, joten tiivistystyömäärä eri materiaalien välillä vaihteli. Koekappaleiden korkeudet mitattiin sellin yläreunan tasosta. Koekappaleiden ominaisuudet on esitetty liitteenä olevassa taulukossa.

Testatuista bentoniittimatoista leikattiin ensin reunoista pois 100 mm kaistaleet, minkä jälkeen leikattiin noin 500x500 mm kokoiset koekappaleet ja asetettiin ne suodatinhiekan päälle. Koekappaleiden reunat käännettiin ylös sellin reunalle ja tuettiin kiinni selliin kiristettävällä teräsannalla.

Maabentoniittiseokset valmistettiin siten, että ensin sekoitettiin toimituskosteudessa olevaan runkoaineeseen bentoniitti (2 min) ja tämän jälkeen lisättiin optimivesipitoisuuden saavuttamiseksi tarvittava lisävesi. Veden lisäämisen jälkeen sekoitusta jatkettiin noin 5 min.

Savikoekappaleiden yhteydessä käytettiin kappaleen ala- ja yläpuolilla suodatinkangasta, joka estää hiekkaa painumasta savikerrokseen.

Sellit sijoitettiin vakiolämpöiseen (+21°C) huoneeseen. Koekappaleiden päälle levitettiin kevyesti tiivistämällä 0,5 m suodatinhiekkaa, minkä jälkeen niiden päälle lisättiin ensimmäinen erä vesijohtovettä. Suodatinhiekan aiheuttama vertikaalijännitys oli noin 6 kPa. Vettä lisättiin kyllästysvaiheessa 8 litran erissä, ja kaik-

kien näytteiden päällä oli maksimissaan 20 cm vesipaine. Kyllästämisen edetessä vesipainetta nostettiin tarpeen mukaan. Kyllästämistä jatkettiin noin yksi kuukausi ennen varsinaisten mittausten aloittamista. Useimmilla testatuilla materiaaleilla ei kuukauden kyllästysaika alhaisella gradientilla ollut riittävä näytteiden täyteen hydratoitumiseen, mikä havaittiin hydraulisen johtavuuden selvinä muutoksina mittauksen edetessä. Tällä on useita mahdollisia vaikutuksia todellisten suojausrakenteiden toimivuuteen.

#### 4.4 Vedenläpäisevyyden mittaaminen

Koekappaleiden vedenläpäisevyys määritettiin punnitsemalla sisäkehän alueelta aikayksikössä läpi tuleva vesimäärä. Paine-ero koekappaleen eri puolilla määritettiin mittaamalla yläpuolisen vesipinnan korkeusasema koekappaleen alapinnan tasoon nähden. Reunakehän kuivatusventtiilit pidettiin aluksi mittausten aikana suljettuna, koska reunavuodot havaittiin monilla näytteillä suuriksi. Reunaventtiilit avattiin toisen suolataso mittausten loppupuolella ja pidettiin avoinna mittausten loppuun asti. Reunavuotojen vaikutusta vähennettiin kierrättämällä sivuventtiilin kuivatusvettä pumpulla takaisin selliin. Näin saatiin gradientti pysymään lähempänä vakiota mittausten aikana. Sekä sisä- että ulkokehän vapaa kuivatustila vastaa luiskasuojauksen todellista toimintatilaa, joten koejärjestely simuloi tältäkin osin rakenteen todellista toimintaa normaalisti käytettyä pehmeäseinäistä koejärjestelyä paremmin.

Vedenläpäisevyys määritettiin käyttäen ensin vesijohtovettä ja tämän jälkeen natriumkloridiliuosta neljänä eri vahvuisena konsentraationa. Vesijohtovedestä ei poistettu ilmaa. Käytetyt konsentraatiot olivat 0.01 M, 0.05 M, 0.2 M ja 1 M. Konsentraatio 0.1 M vastaa eräiden yhdyskuntajätteen kaatopaikkojen suotovesien liuenneiden suolojen pitoisuutta (Petrov and Rowe, 1997). Meriveden suolapitoisuus on noin 0.6 M (35,1 g/l).

Laskenta suoritettiin vakio painemenetelmällä:

$$k = \frac{Ql}{Ah} \quad (26)$$

ja

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (27)$$

ja

$$h = \frac{H_1 + H_2}{2} \quad (28)$$

missä k on hydraulinen johtavuus (m/s);  
 Q on ajassa  $\Delta t$  koekappaleen läpi virrannut vesimäärä (m<sup>3</sup>);  
 l on koekappaleen paksuus (m);  
 A on sisäkehän pinta-ala (m<sup>2</sup>);  
 h on keskimääräinen painekorkeus mittauksen aikana (m);  
 H<sub>1</sub> on painekorkeus mittauksen alussa (m);  
 H<sub>2</sub> on painekorkeus mittauksen lopussa (m).



## 4.5 Koejärjestelyn soveltamisesta muihin tutkimuksiin

Käytettyä kaksoisrengasselliä on mahdollista soveltaa moniin erilaisiin koejärjestelyihin. Koekappaleet voidaan tarvittaessa kyllästä takapainetta käyttäen, mutta tämä kasvattaa näytteisiin kohdistuvaa tehokasta jännitystä, mitä haluttiin tässä tutkimuksessa välttää. Mittaukset voidaan suorittaa myös siten, että koekappaleen alapuolinen suodatinhiekkä pidetään koko ajan vedellä kyllästyneenä. Tällöin kasvaa diffuusion merkitys suolan massavirtaan ja osmoottinen gradientti voi aiheuttaa virhettä k-arvoihin. Määritettäessä vedenläpäisevyyttä standardin ASTM D5084 mukaisesti on vallitseva jännitys 35 kPa ja koekappaleet kyllästetään takapainetta käyttäen ennen koetta.

Mikäli reunakehää ei kuivateta vapaasti, kasvaa ohivirtauksen vaara sisäkehän ja koekappaleen välistä. Sellejä voidaan valmistaa helposti eri kokoisiksi, jolloin voidaan simuloida erilaisia todellisia kuormitustilanteita. Koekappaleen pinta-alan kasvattaminen parantaa mahdollisuuksia tutkia rakentamisvaiheessa syntyviä makrotason epähomogeenisuuksia. Mineraalisten tiivisteiden kuivumishalkeilun vaaran selvittämiseen koejärjestely ei sovellu, sillä koekappaleen vaakasuuntaisia muodonmuutoksia ei voida estää.

# 5

## Tutkittavat materiaalit

### 5.1 Natriumbentoniittimatto

Tässä tutkimuksessa testattu natriumbentoniittimatto oli neulasidottu ja sisälsi rakeista Wyoming –natriumbentoniittia  $3500 \text{ g/m}^2$  ( $w=0\%$ ). Toinen maton kuitukan-kaista oli kudottu ja toinen kutomaton. Maton k-arvoksi on määritetty kolmiaksi-aalisella koejärjestelyllä 35 kPa:n tehokkaassa jännityksessä  $3,7 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$  ja  $1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$  (Geokeskus Oy, 2001). Maton paksuus ilma-kuivana on noin 6 mm. Koejärjes-telyssä sen paksuudeksi on oletettu 10 mm, sillä koekappaleen paksuuden ja sen muutosten tarkka mittaaminen ei ole tässä koejärjestelyssä mahdollista. Suojahie-kan näytteeseen kohdistama kuormitus noin 6,6 kPa.

Petrov ym. (1997, b) määrittivät vastaavan tyyppisen maton hydratoituneeksi (tislattu vesi) paksuudeksi 6 kPa:n kuorman alaisena 12 mm. Bentoniitin vesipitoi-suus täysin hydratoituneena oli 244% ja huokosluku 5,12. Maton neulasidonta es-tää bentoniitin paisumisen täyteen huokoisuuteensa. Neulasidonta parantaa ben-toniitin hydraulista toimintaa juuri alhaisella kuormituksella ( Petrov ym.,1997).

### 5.2 Aktivoidusta bentoniitista valmistettu matto

Aktivoidusta bentoniitista valmistettu matto oli neulasidottu ja se sisälsi rakeista, natriumaktivoitua kalsiumbentoniittia  $3500 \text{ g/m}^2$  ( $w=0\%$ ). Toinen maton kuitukan-kaista oli kudottu ja toinen kutomaton. Kuivan maton paksuus ilma-kuivana oli 5,3 mm. Maton paksuudeksi mittausten aikana on oletettu 10 mm. Suojahiekan näyt-teeseen kohdistama kuormitus oli noin 6,6 kPa ja huokoisuus noin 0,5.

### 5.3 Kalsiumbentoniittimatto

Kalsiumbentoniittimatto sisälsi  $8000 \text{ g/m}^2$  ( $w=0\%$ ) jauhemaista kalsiumbentoniit-tia kahden paksun kutomattoman kuitukankaan väliin neulasidottuna. Maton paksuudeksi mittausten aikana oletettiin 14 mm.

### 5.4 Friedland -savi

Friedland -savi on Saksasta, Friedlandin maakunnasta peräisin olevaa seoshilas-avea. Savi koostuu paisuvahilaisista montmorillonitista ja kiille-/montmorillonii-tikerroksista (45%), kvartsista (24 %), maasälvästä (5 %), kiilteestä (13 %), kloriitista (11 %) ja karbonaatista (2 %). Saven kemiallinen koostumus on keskimäärin:  $\text{SiO}_2$  57 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  18 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  5.5 %,  $\text{MgO}$  2 %,  $\text{CaO}$  0%,  $\text{Na}_2\text{O}$  0,9 %,  $\text{K}_2\text{O}$  3,1 %.

Savi oli jauhettu ja ilma-kuivattu. Testissä käytetyn materiaalin raekokoja-kauma kuivaseulonnalla määritettynä oli taulukon 5 mukainen (valmistajan il-moitus, Durtec GmbH).

Taulukko 5. Jauhetun ja ilmakeivatun Friedland -saven rakeisuus.

Fraktio, mm	Prosenttiosuus
2-8	20.0
1-2	20.4
0.1-1	42.4
<0.1	17.2
Yhteensä	100

Valmistajan mukaan Friedland-saven optimivesipitoisuus on 23 %. Saven maksimi kuivairtoteiheys pysyy lähes muuttumattomana (hieman alle 1800 kg/m<sup>3</sup>) vesipitoisuuden vaihdellessa 7-21% välillä.

SYKEN laboratoriossa määritettiin saven kiintotiheydeksi 2,7 g/cm<sup>3</sup>, vesipitoisuudeksi 7,4% ja hehkutushäviöksi 2,3%. Kieritysräjäksi määritettiin 30,2%, juoksurajaksi 91,9% ja plastisuusluvuksi siten 61,7%. Näytteen savespitoisuudeksi (<0,006 mm) määritettiin Sedigraph –laitteella 68%. Ero kuivaseulonnan ja Sedigraph –laitteen tuloksissa aiheutuu siitä, että kuivattu savi muodostaa kovia paakkuja, jotka eivät hajoa seulottaessa, mutta liettyvät tehokkaasti Sedigraph –laitteen ajoliuokseen

Friedland -savi tiivistettiin kahdessa kerroksessa 90%:n suhteelliseen tiiviyteen ( $\rho_d = 1620 \text{ kg/m}^3$ ) vesipitoisuudessa 18% materiaalin toimittajan ohjeiden mukaisesti. Kerrosten välinen rajapinta karhennettiin. Molempien koekappaleiden kokonaispaksuus oli 25 mm.

## 5.5 Murskebentoniitti

Murskebentoniitin runkoaineeksi käytettiin murskattua Hästholmenin tonaliittia, jonka maksimiraekoko oli 16 mm ja hienoainespitoisuus 2% (<0,063 mm). Bentoniittina käytettiin natriumaktivoitua kalsiumbentoniittia (AC200) ja sitä lisättiin seokseen 10% runkoaineen kuivapainosta. Seoksen optimivesipitoisuudeksi määritettiin 10% ja maksimikuivairtoteheydeksi 1997 kg/m<sup>3</sup>.

Koekappaleet rakennettiin 28.3.2002. Massa sekoitettiin Contesta Oy:n laboratoriossa pakkosekoittajalla, josta se kuljetettiin SYKEN laboratorioon suljetussa astiassa. Koekappaleet tiivistettiin 85%:n suhteelliseen tiiviyteen kahdessa kerroksessa ja kerrosten välinen rajapinta karhennettiin. Molempien koekappaleiden kuiva-tilavuuspaino oli 17,64 kN/m<sup>3</sup>, mikä vastaa 84%:n suhteellista tiiviyttä. Koekappaleen 3 paksuus oli 50 mm ja koekappaleen 11 vastaavasti 75 mm.

## 5.6 Moreenibentoniitti

Moreenibentoniitin runkoaineeksi käytettiin hiekkamoreenia, jonka hienoainespitoisuus oli 20,5 – 27,3 % ja savespitoisuus 1,7 – 3,7 %. Kiintotiheydeksi määritettiin 2,7 g/cm<sup>3</sup> ja humuspitoisuudeksi 1,1%. Bentoniittina seoksessa käytettiin natriumaktivoitua kalsiumbentoniittia (AC200) ja sitä lisättiin seokseen 4% runkoaineen kuivapainosta. Seoksen optimivesipitoisuudeksi määritettiin 8% ja maksimi kuivairtoteheydeksi 2118 kg/m<sup>3</sup>. Maksimitiiviyteen sullotun (ICT –laite) koekappaleen vedenläpäisevyydeksi määritettiin joustavaseinämäisellä koejärjestelyllä 3\*10<sup>-11</sup> m/s.

Moreenibentoniitti sekoitettiin SYKEN laboratoriossa Hobart –sekoittimella. Koekappaleet valmistettiin 12.4.2002. Koekappaleet sullottiin optimivesipitoisuudessaan 90%:n tiiviysasteeseen kahdessa kerroksessa ja kerrosten välinen rajapinta karhennettiin. Koekappaleiden korkeudeksi tuli 100 mm.

## 5.7 Kivituhkabentoniitti

Kivituhkabentoniitin runkoaineena käytettiin 0-4 mm kivituhkaa, joka rakeisuudeltaan voitiin luokitella hiekkaiseksi soramoreeniksi (hkSrMr). Hienoainespitoisuus oli 6,2% ja humuspitoisuus 0,7%. Kiviaineksen kiintotiheys oli 2,9 g/cm<sup>3</sup>. Bentoniittina käytettiin natriumaktivoitua kalsiumbentoniittia (AC200) ja sitä lisättiin seokseen 4% runkoaineen kuivapainosta. Seoksen optimivesipitoisuudeksi määritettiin 10,5% ja maksimikuivairtoteheydeksi 2135 kg/m<sup>3</sup>.

Koekappaleiden rakentaminen tapahtui 11.4.2002. Massa sekoitettiin Lohja Ruduksen laboratoriossa Konalassa, josta se kuljetettiin välittömästi SYKEN laboratorioon peitetyissä astioissa. Koekappaleet sullottiin optimivesipitoisuudessa kahdessa kerroksessa 90%:n tiiviysasteeseen. Kerrosten välinen rajapinta karhennettiin. Koekappaleiden korkeudeksi tuli 100 mm.

## 5.8 Suomalainen savi

Tieliikelaitos toimitti kokeisiin savea Luumäeltä. Toimittajan tekemän maalajiluokituksen mukaan materiaali oli savista silttiä, jonka savespitoisuus oli noin 30%. Hienoaineksen raekokomääritys oli tehty areometrillä. Humuspitoisuudeksi oli määritetty 0,6%. Saven optimivesipitoisuudeksi oli määritetty 17,4% ja maksimikuivairtoteheydeksi 1741 kg/m<sup>3</sup>. Toimittaja oli määrittänyt 95%:n tiiviysasteeseen sullotun koekappaleen vedenläpäisevyydeksi 5\*10<sup>-11</sup> m/s.

SYKEN laboratoriossa määritettiin saven kiintotiheydeksi 2,7 g/cm<sup>3</sup>, vesipitoisuudeksi 22,5 – 29 % (4 näytettä eri astioista) ja humuspitoisuudeksi 0,04%. Rakeisuusmäärityksen mukaan maalaji luokiteltiin laihaksi saveksi savespitoisuuden ollessa 43,1 – 46,5 %. Hienoaineksen raekokomääritys tehtiin Sedigraph –laitteella. Vesipitoisuudessa 26% saavutettavaksi maksimi-irtoteheydeksi määritettiin ICT –laitteella 1509 kg/m<sup>3</sup>. Tiheyteen 1332 kg/m<sup>3</sup> sullotun (ICT –laite) koekappaleen k-arvoksi määritettiin joustavaseinämäisellä koejärjestelyllä 1,3\*10<sup>-8</sup> m/s.

Erot materiaalintoimittajan ja SYKEN laboratorion tuloksissa aiheutuvat siitä, että SYKEN laboratoriossa ei savea kuivattu optimivesipitoisuuteensa ennen koekappaleiden rakentamista (toimittajan ohje). Optimia korkeampi vesipitoisuutta esti savea tiivistymästä riittävästi, minkä seurauksena oli merkittävästi korkeampi k-arvo.

Savesta valmistettiin kaksi koekappaletta sullomalla vesipitoisuudessa 26% (optimia kosteampi) neljänä kerroksena. Tavoitteena oli sulloa kappaleet tiiviysasteeseen 90%, mutta saven korkea vesipitoisuus rajoitti tiivistymistä, ja näytteiden lopulliseksi kuivatilavuuspainoksi jäi 14,3 kN/m<sup>3</sup>, mikä vastasi tiiviysastetta 82%. Koekappaleiden paksuudet olivat 187 mm ja 140 mm.

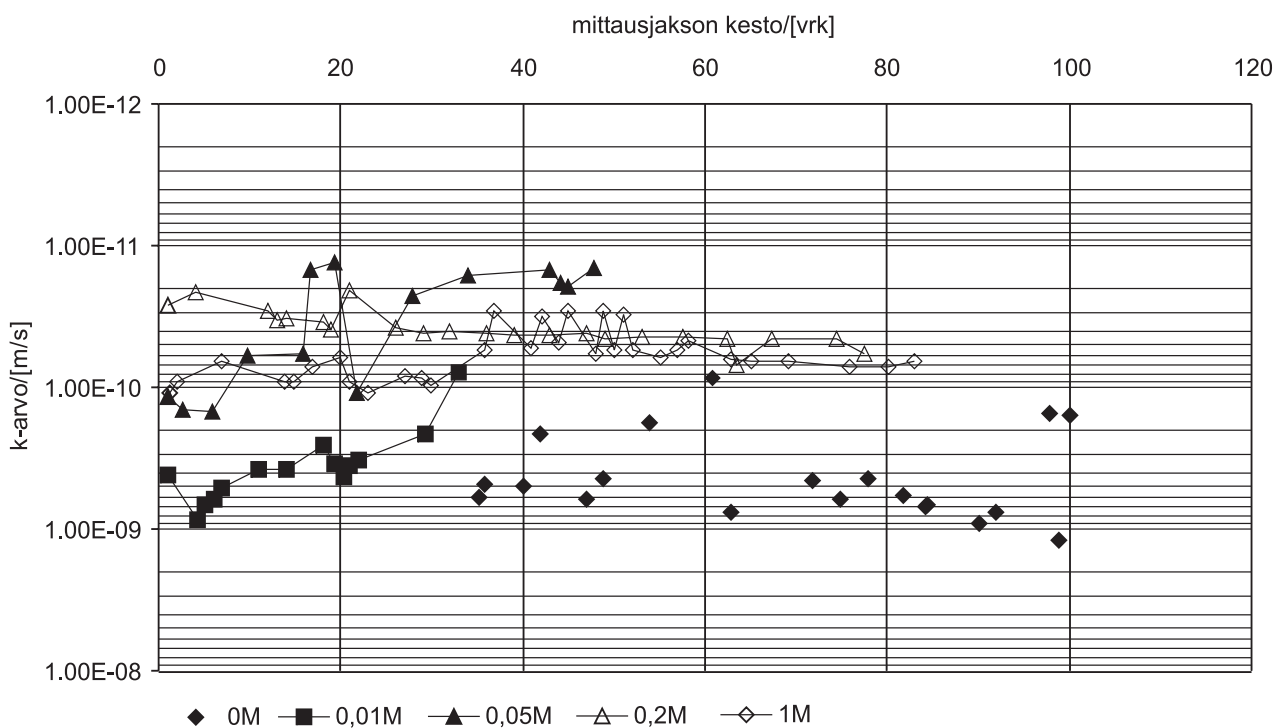
0,05 M suolaliuksella tehtyjen mittausten jälkeen savikoekappaleet kaivettiin ylös selleistä, homogenisoitiin ja kuivattiin sekoittajan avulla vesipitoisuuteen 22%. Näistä sullottiin uudet koekappaleet kolmessa kerroksessa tiiviysasteeseen 92% ja kappaleiden korkeuksiksi tuli 115 mm. Koekappaleita kyllästettiin ensin vesijohtovedellä ja sen jälkeen 1 M suolaliuksella.

## Tulokset

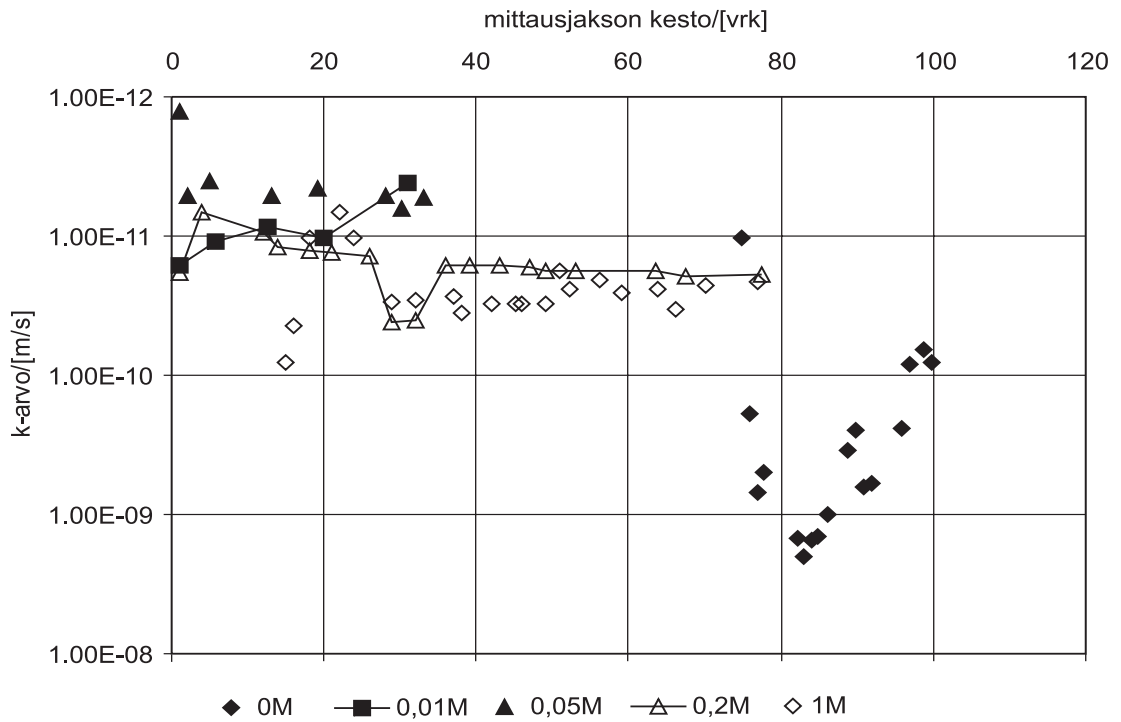
### 6.1 Natriumbentoniittimatto

#### 6.1.1 Tulokset

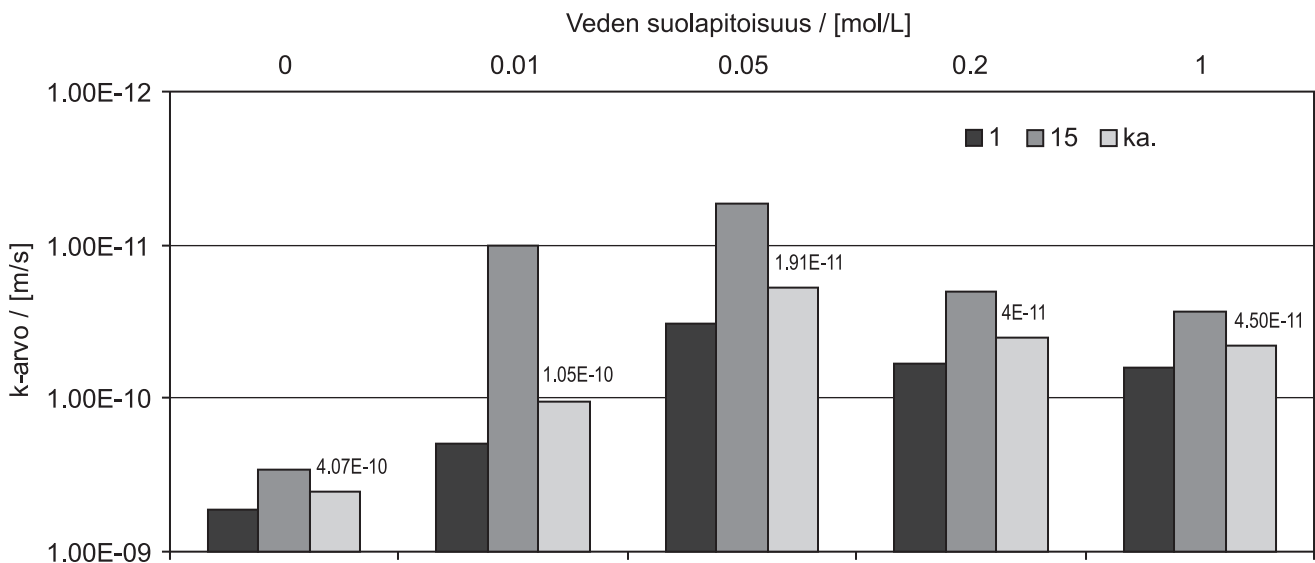
Koekappaleen 1 mittaustulokset eri läpäisyneesteillä on esitetty kuvassa 21 ja koekappaleen 15 kuvassa 22. Yhteenveto molempien koekappaleiden lopullisista läpäisevyyksistä eri natriumkloridikonsentraatioilla sekä näistä lasketut keskiarvot on esitetty kuvassa 23.



Kuva 21. Koekappaleen 1 (natriumbentoniittimatto) mittaustulokset.



Kuva 22. Koekappaleen 15 (natriumbentoniittimatto) mittaustulokset.



Kuva 23. Yhteenveto Wyoming –Na-bentoniitista valmistetun maton tuloksista. Ka. tarkoittaa tulosten keskiarvoa.

Koekappaleen 1 k-arvoksi määritettiin vesijohtovedellä  $5,3 \cdot 10^{-10}$  m/s ja kappaleeseen kohdistunut suurin tehokas jännitys oli 7 kPa. K-arvoksi 0,01 M natriumkloridiliuoksella määritettiin  $2,9 \cdot 10^{-10}$  m/s, 0,05 M –liuoksella  $1,8 \cdot 10^{-11}$  m/s, 0,2 M –liuoksella  $4,8 \cdot 10^{-11}$  m/s ja 1 M –liuoksella  $5,5 \cdot 10^{-11}$  m/s.

Koekappaleen 15 k-arvoksi määritettiin vesijohtovedellä  $2,9 \cdot 10^{-10}$  m/s ja kappaleeseen kohdistunut suurin tehokas jännitys oli 16 kPa. K-arvoksi 0,01 M natriumkloridiliuoksella määritettiin  $1 \cdot 10^{-11}$  m/s, 0,05 M –liuoksella  $5,3 \cdot 10^{-12}$  m/s, 0,2 M –liuoksella  $1,7 \cdot 10^{-11}$  m/s ja 1 M –liuoksella  $2 \cdot 10^{-11}$  m/s.

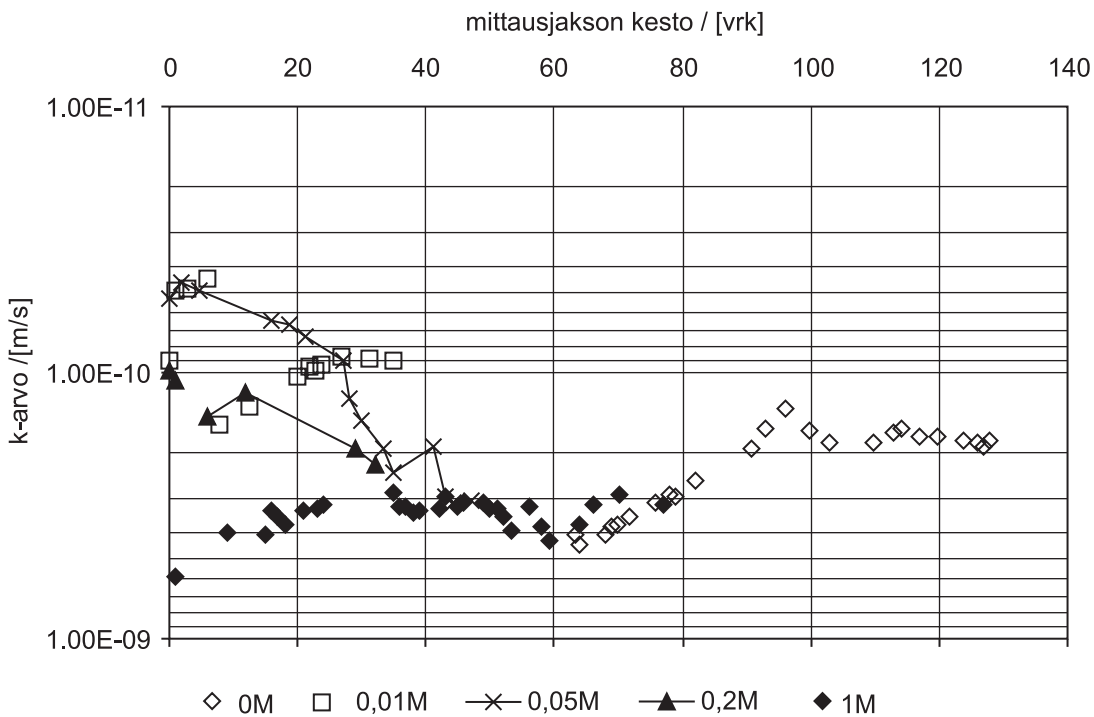
## 6.1.2 Huomioita mittauksista

Kyllästysvaiheessa koekappaleen läpäisyyttä vesimäärää ei mitattu. Sellien reunaosien venttiilit pidettiin suurten reunavuotojen takia suljettuina vesijohtovedellä sekä 0,01 M –liuoksella mitattaessa. Koekappaleessa 1 on voinut esiintyä oikovirtauksia vesijohtovedellä mitattaessa, mutta sähkönjohtavuuden kehittymisestä 0,01 M –liuoksella mitattaessa voidaan arvioida, että oikovirtaukset olivat ainakin tässä koevaiheessa vähäisiä. Mittaukset 0,01 M –liuoksella lopetettiin ilmeisesti liian aikaisin kemiallisen tasapainon saavuttamisen kannalta.

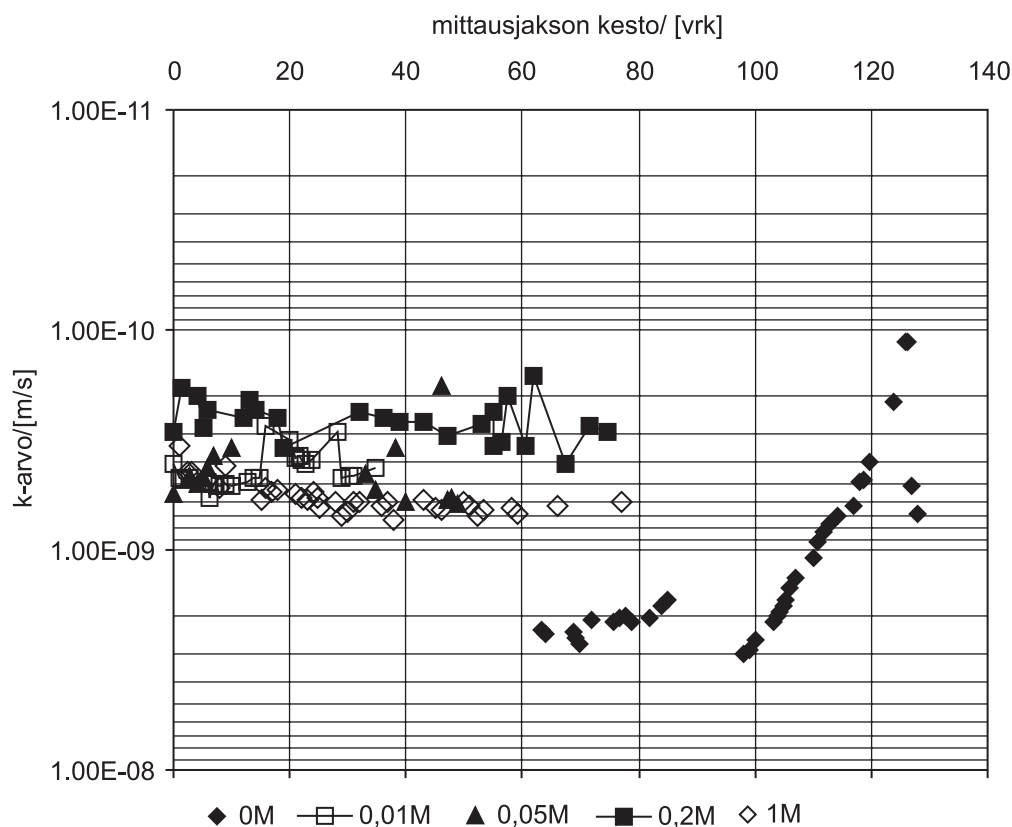
## 6.2 Aktivoitusta bentoniitista valmistettu matto

### 6.2.1 Tulokset

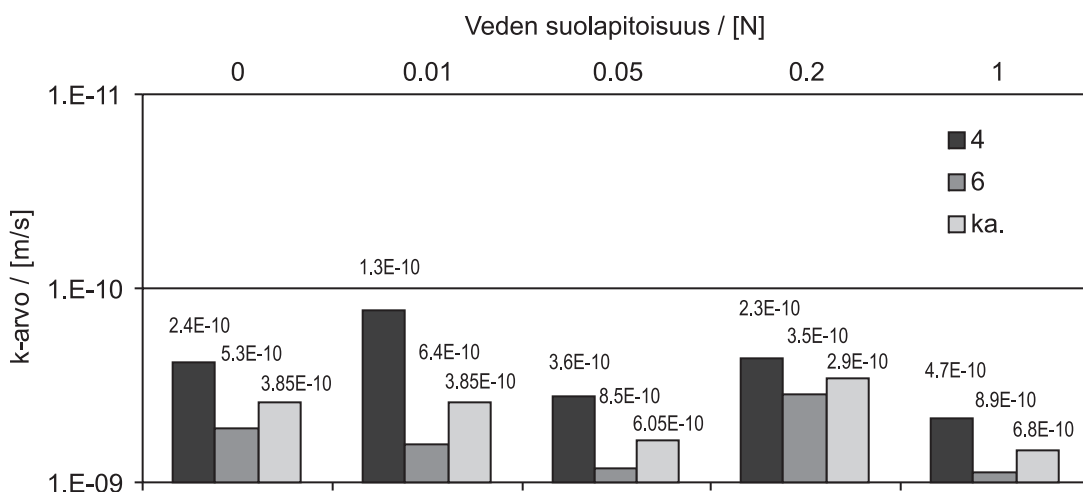
Koekappaleen 4 mittaustulokset eri läpäisynesteillä on esitetty kuvassa 24, koekappaleen 6 tulokset kuvassa 25 ja yhteenveto tuloksista kuvassa 26.



Kuva 24. Koekappaleen 4 (aktivoitu bentoniittimatto) tulokset.



Kuva 25. Koekappaleen 6 (aktivoitu bentoniittimatto) tulokset.



Kuva 26. Yhteenveto aktivoidun bentoniittimaton koetuloksista.

Koekappaleen 4 k-arvoksi vesijohtovedellä määritettiin  $2,4 \cdot 10^{-10}$  m/s ja kappaleen 6  $5,3 \cdot 10^{-10}$  m/s. Koekappaleen 4 k-arvoksi 0,01 M natriumkloridiliuoksella määritettiin  $1,3 \cdot 10^{-10}$  m/s ja kappaleen 6  $6,4 \cdot 10^{-10}$  m/s. Koekappaleen 4 k-arvoksi 0,05 M natriumkloridiliuoksella määritettiin  $3,6 \cdot 10^{-10}$  m/s ja kappaleen 6  $8,5 \cdot 10^{-10}$  m/s. Koekappaleen 4 k-arvoksi 0,2 M natriumkloridiliuoksella määritettiin  $2,3 \cdot 10^{-10}$  m/s ja kappaleen 6  $3,5 \cdot 10^{-10}$  m/s. Koekappaleen 4 k-arvoksi 1 M natriumkloridiliuoksella määritettiin  $4,7 \cdot 10^{-10}$  m/s ja kappaleen 6  $8,9 \cdot 10^{-10}$  m/s.



## 6.2.2 Huomioita mittauksista

Ohuenkin bentoniittimaton täydellinen kyllästyminen kyseisissä koeolosuhteissa kestää kauan. Ennen bentoniitin kyllästymistä voivat maton läpäisevät vesimäärät olla suuria. Koekappaleen 6 k-arvoksi mitattiin alussa noin  $3 \cdot 10^{-9}$  m/s ja lopussa noin  $5,3 \cdot 10^{-10}$  m/s. Koekappaleen 4 suurin tehokas jännitys oli 8,3 kPa ja kappaleen 6 9,1 kPa.

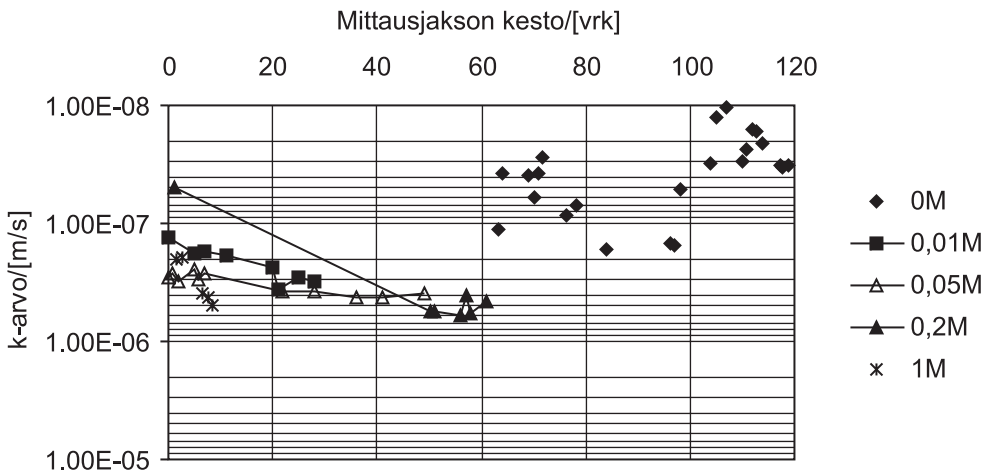
Suurien reunavuotojen vuoksi pidettiin sellien sivuventtiilit suljettuina vesijohtovedellä, 0,01 M sekä 0,05 M suolaliuoksilla mitattaessa. 0,2 M ja 1 M suolaliuoksilla mitattaessa pidettiin sivuventtiilit auki, mutta reunalta läpi tullutta vettä kierrätettiin pumpulla näytteen yläpuolelle, jolloin hydraulinen gradientti pysyi vakiona.

0,01 M suolaliuoksella molempien koekappaleiden ulos tulevan veden sähköjohtavuus kehittyi tasaisesti, mikä viittaa vaakavirtausten vähäiseen merkitykseen (kts. liitteet). Mittauksia olisi ollut syytä jatkaa tällä suolapitoisuudella hieinan pidempään, jotta huokosvesi olisi saavuttanut varmasti kemiallisen tasapainon syöttöveden kanssa. Sähköjohtavuuden hitaasta kasvusta voidaan päätellä, että vaakavirtauksia ei esiintynyt 0,05 M suolaliuoksella mitattaessa merkittävästi. 0,2 M suolaliuoksella olisi mittauksia ollut syytä jatkaa kauemmin koekappaleiden kemiallisen tasapainon varmistamiseksi.

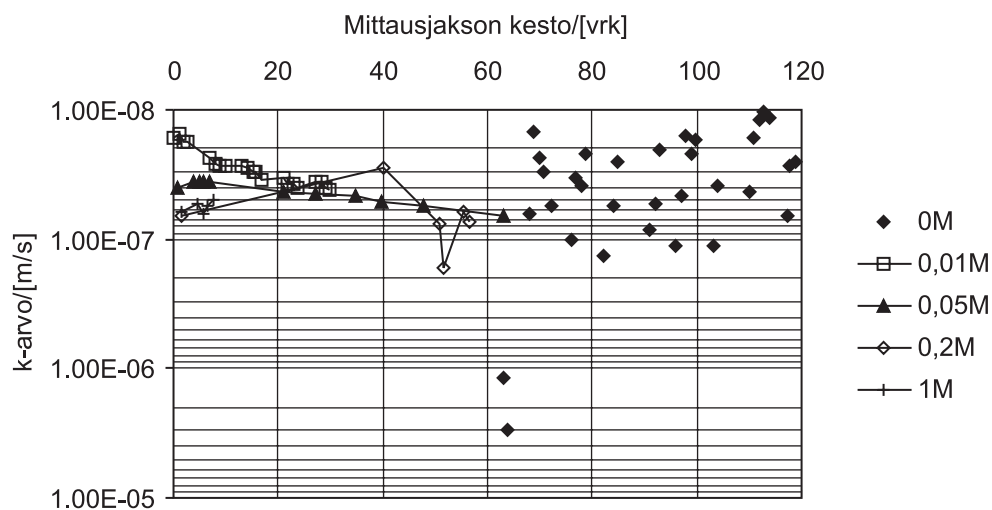
## 6.3 Kalsiumbentoniittimatto

### 6.3.1 Tulokset

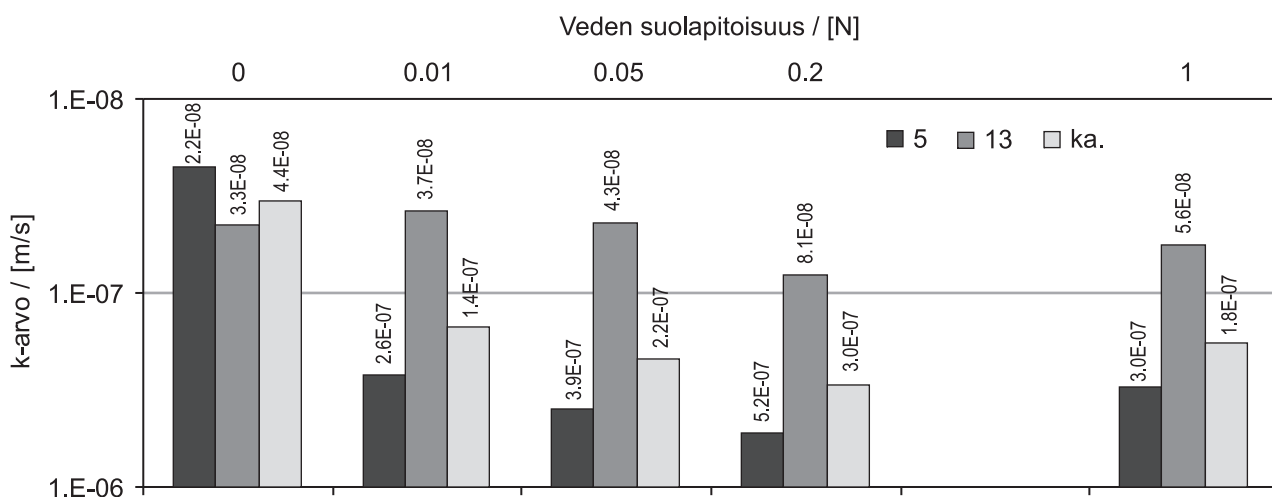
Koekappaleen 5 mittaustulokset eri läpäisyneesteillä on esitetty kuvassa 27, kappaleen 13 tulokset kuvassa 28 ja yhteenvedo kalsiumbentoniittimaton tuloksista kuvassa 29.



Kuva 27. Koekappaleen 5 (kalsiumbentoniittimatto) tulokset.



Kuva 28. Koekappaleen 13 (kalsiumbentoniittimatto) tulokset.



Kuva 29. Yhteenveto kalsiumbentoniittimaton tuloksista.

Koekappaleen 5 k-arvoksi vesijohtovedellä määritettiin  $2,2 \cdot 10^{-8}$  m/s ja kappaleen 13  $4,4 \cdot 10^{-8}$  m/s. 0,01 M natriumkloridiliuoksella oli kappaleen 5 k-arvo  $2,6 \cdot 10^{-7}$  m/s ja kappaleen 13  $3,7 \cdot 10^{-8}$  m/s. 0,05 M natriumkloridiliuoksella oli kappaleen 5 k-arvo  $4 \cdot 10^{-7}$  m/s ja kappaleen 13  $4,4 \cdot 10^{-8}$  m/s. 0,2 M natriumkloridiliuoksella oli kappaleen 5 k-arvo  $5,2 \cdot 10^{-7}$  m/s ja kappaleen 13  $8,1 \cdot 10^{-8}$  m/s. 1 M natriumkloridiliuoksella oli kappaleen 5 k-arvo  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s ja kappaleen 13  $5,7 \cdot 10^{-8}$  m/s.

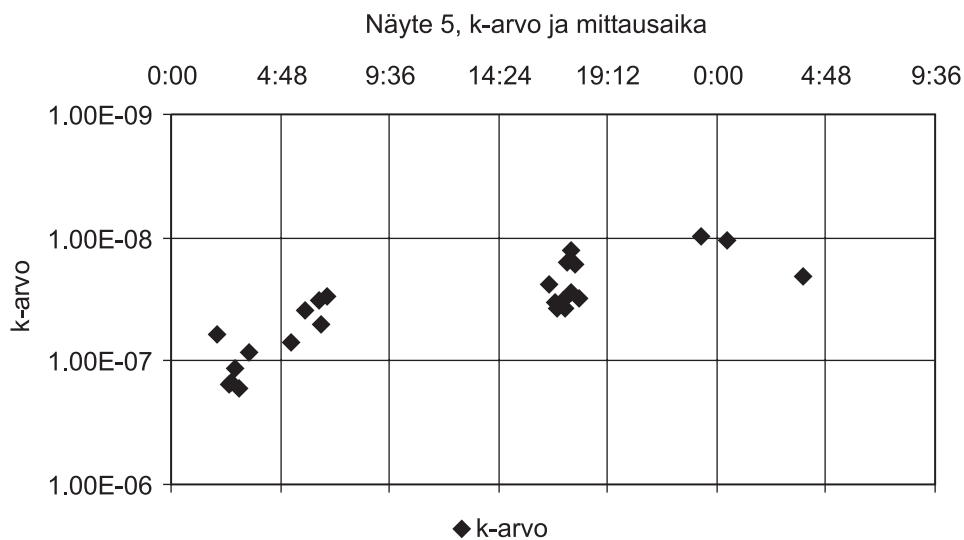
### 6.3.2 Huomioita mittauksista

Ennen riittävää kyllästymistä ja paisumista oli kalsiumbentoniitin vedenläpäisevyys nopeaa. Suurten reunavuotojen vuoksi sivuventtiilit pidettiin suljettuina vesijohtovedellä, 0,01 M sekä 0,05 M –liuoksilla mitattaessa. Tämän jälkeen venttiilit pidettiin mittausten aikana auki ja vettä kierrätettiin pumpuilla koekappaleiden yläpuolelle.

Suuri ero rinnakkaisten välillä 0,01 M –liuoksella mitattaessa viittaisi siihen, että näytteessä 5 oli tapahtunut sivuttaisvirtausta. Tähän viittaisi myös sähköjohdavuuden näytettä 13 nopeampi kohoaminen (kts. liitteet). Molemmilla koekappa-

leilla havaittu sähkönjohtavuuden nopea nousu 0,05 M –liuoksilla mitattaessa voi viitata joko vaakavirtausten esiintymiseen tai bentoniitin halkeiluun. 0,2 M suolaliuoksella ulos tulevan veden sähkönjohtavuus nousi syöttöveden tasolle muutamassa vuorokaudessa molemmissa näytteissä, mikä viittaa bentoniitin halkeiluun. 1 M suolaliuoksella läpi tulevan veden sähkönjohtavuus kasvoi jälleen heti kyllästämisen aloituksen jälkeen, mikä viittaa bentoniitissa oleviin halkeamiin.

Nopean läpäisyn vuoksi pyrittiin mittauksia suorittamaan useita päivän aikana. Yleensä k-arvo aleni toistojen edetessä. Varsinaiseksi tulokseksi pyrittiin valitsemaan kunkin mittauspäivän edustavin tulos. Edustavuutta arvioitiin myös mittauksen keston mukaan. Mittauksen kestolla havaittiin olevan selvä merkitys saatavan k-arvon suhteen (kuva 30). Pidempi mittausaika antoi tulokseksi alhaisemman k-arvon, koska bentoniitti ilmeisesti paisui mittauksen edetessä. Mittausten väleillä bentoniitti pääsi ilmeisesti kuivumaan.



Kuva 30. Mittausajan ja k-arvon riippuvuus koekappaleella 5 vesijohtovedellä.

## 6.4 Friedland -savi

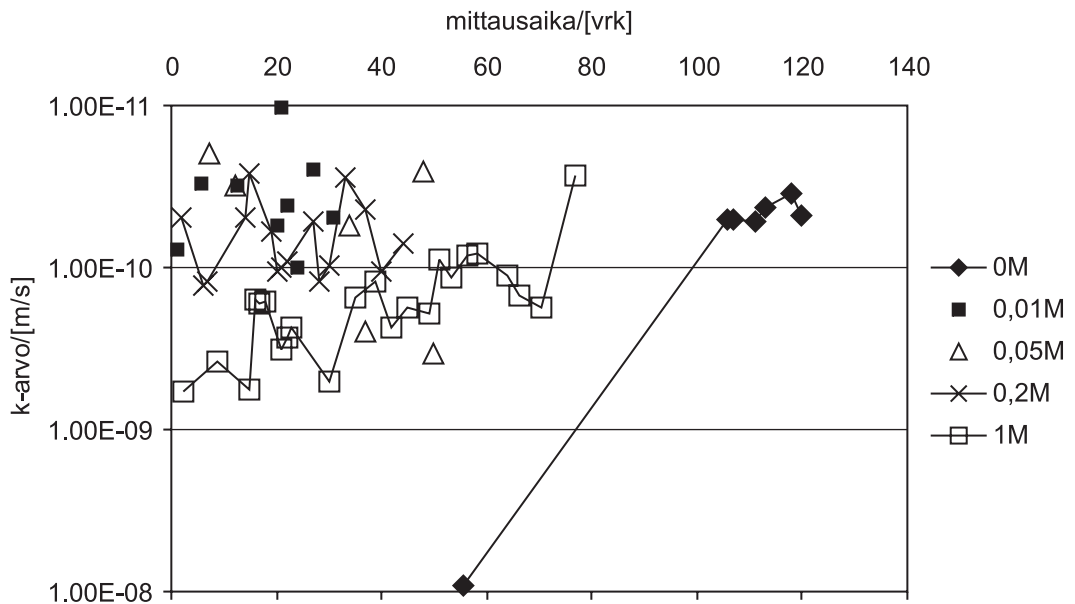
### 6.4.1 Tulokset

Koekappaleen 8 mittaus tulokset eri läpäisynesteillä on esitetty kuvassa 31. Koekappaleen 8 k-arvot eri veden suolapitoisuuksilla on esitetty kuvassa 32. Koekappaleessa 10 oli halkeama, minkä vuoksi sen läpäisevyys oli merkittävästi suurempi eikä sen tuloksia esitetä tässä. Sellien alasivuventtiilit pidettiin suurten reunavuotojen vuoksi suljettuina vesijohtovedellä sekä 0,01 M –liuoksella mitattaessa.

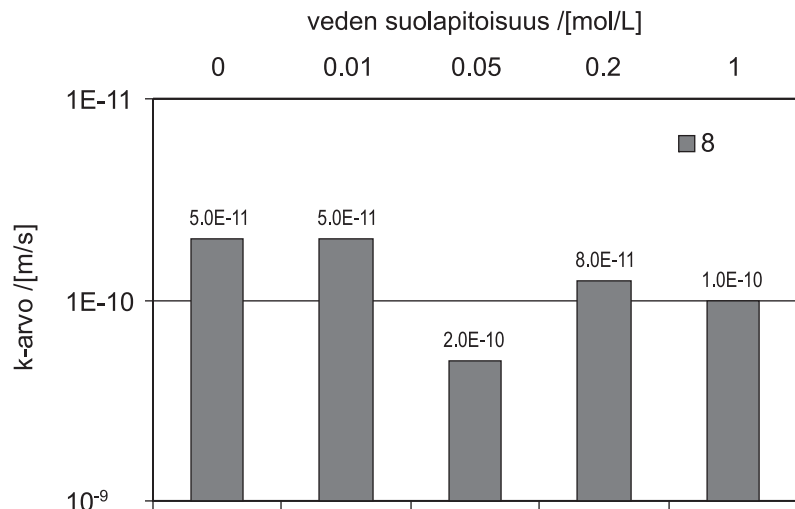
Koekappaleen 8 k-arvoksi vesijohtovedellä määritettiin  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s. Keskimääräinen hydraulinen gradientti oli 92 ja tehokas jännitys 27,2 kPa. 0,01 M suolaliuoksella k-arvoksi määritettiin  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s. Ulos tulevan veden sähkönjohtavuuden havaittiin olevan huomattavasti syöttöveden sähkönjohtavuutta korkeampi. Tämä aiheutui Friedland –saven sisältämistä liukoisista suoloista. Koekappaleen mitaamista olisi pitänyt jatkaa pidemmän aikaa, jotta ulos tulevan veden suolapitoisuus olisi laskenut syöttöveden tasolle.

0,05 M suolaliuoksella k-arvoksi laskettiin neljän viimeisen mittauksen keskiarvona  $2 \cdot 10^{-10}$  m/s. Mittaus tulosten vähyydestä ja suuresta hajonnasta johtuen on tulos hyvin epävarma. 0,2 M suolaliuoksella k-arvoksi laskettiin kaikkien mitausten keskiarvona  $8 \cdot 10^{-11}$  m/s. Mittausta olisi ollut syytä jatkaa vielä jonkin ai-

kaa, sillä ulos tulevan veden sähkönjohtavuus oli vielä kasvussa. Myös k-arvotusten hajonta oli varsin suurta. 1 M suolaliuoksella k-arvoksi laskettiin 13 viimeisen mittauksen keskiarvona  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s. Mittauksia olisi ollut syytä jatkaa kauemmin 1 M suolaliuoksella.



Kuva 31. Koekappaleen 8 (Friedland –savi) tulokset.



Kuva 32. Yhteenveto Friedland –saven tuloksista.

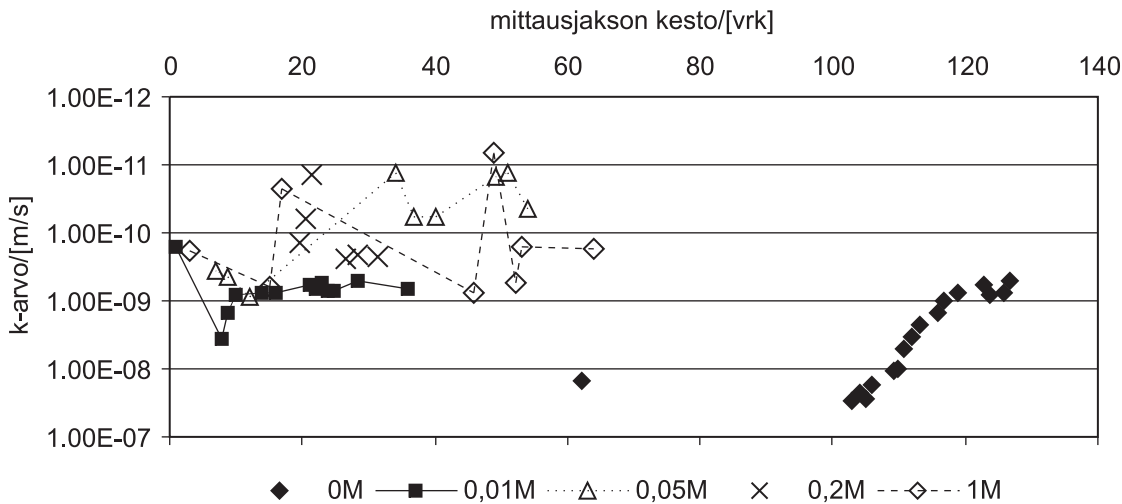
## 6.5 Murskebetoniiti 90/10

### 6.5.1 Tulokset

Koekappaleen 11 mittaustulokset eri läpäisynesteillä on esitetty kuvassa 33. Koekappaleessa 3 oli ilmeisesti halkeama, minkä vuoksi sen läpäisevyys oli merkittävästi suurempi, eikä sen tuloksia esitetä tässä. Sellin alasivuventtiili pidettiin mittausten aikana suljettuna vesijohtovedellä sekä 0,01 M suolaliuoksella mitattaessa.

Koekappaleen 11 k-arvoksi vesijohtovedellä laskettiin  $7 \cdot 10^{-10}$  m/s. Suurin tehokas jännitys mittausten aikana oli 15,8 kPa. 0,01 M suolaliuoksella k-arvoksi määritettiin  $7 \cdot 10^{-10}$  m/s. Sähkönjohtavuusmittausten tuloksista päätellen oli 0,01

M suolatasolla (ja luultavasti myös vesijohtovedellä) tapahtunut sivuttaisvirtauksia (kts. liitteet). 0,05 M –liuoksella oli k-arvo kuuden viimeisen mittauksen keskiarvona  $3 \cdot 10^{-11}$  m/s. Mittauksia olisi tullut jatkaa kauemmin luotettavampien tulosten saamiseksi. Sellin sivuventtiilin avaamisella oli merkittävä vaikutus koekappaleen k-arvoon, mikä indikoi koekappaleen alitse tapahtunutta oikovirtausta aiemmissa mittausvaiheissa. Näytteestä 11 saatiin sivuventtiilin avaamisen jälkeen ulos niin pieniä vesimääriä, että sähkönjohtavuuden mittaaminen ei ollut mahdollista. 0,2 M liuoksella viimeinen mitattu k-arvotulos oli  $2 \cdot 10^{-10}$  m/s. Tämä arvo on todennäköisesti todellista k-arvoa selvästi korkeampi, sillä tämän jälkeen 40 vrk aikana ei näytteestä saatu ulos mitattavaa vesimäärää. 1 M liuoksella oli koekappaleen viimeinen mitattu k-arvo  $1,7 \cdot 10^{-10}$  m/s. Tämän jälkeen mittausta jatkettiin vielä 21 vrk ilman tulosta.



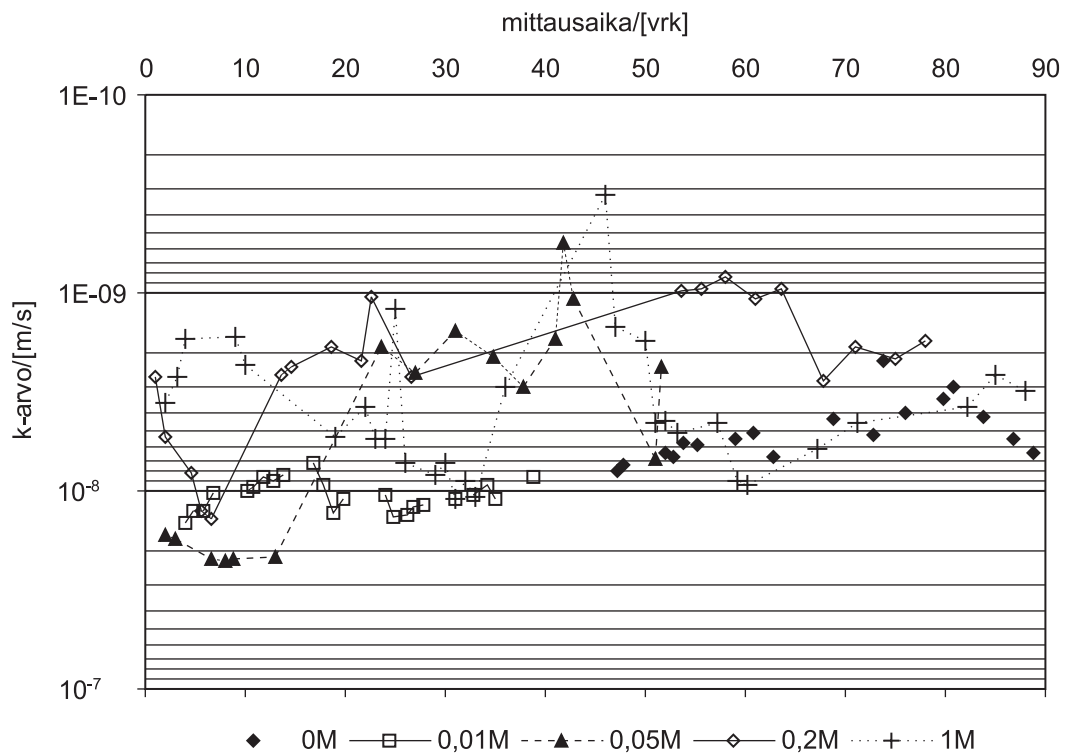
Kuva 33. Koekappaleen I I (murskebentoniitti 90/10) tulokset veden eri suolapitoisuuksilla.

## 6.6 Moreenibentoniitti

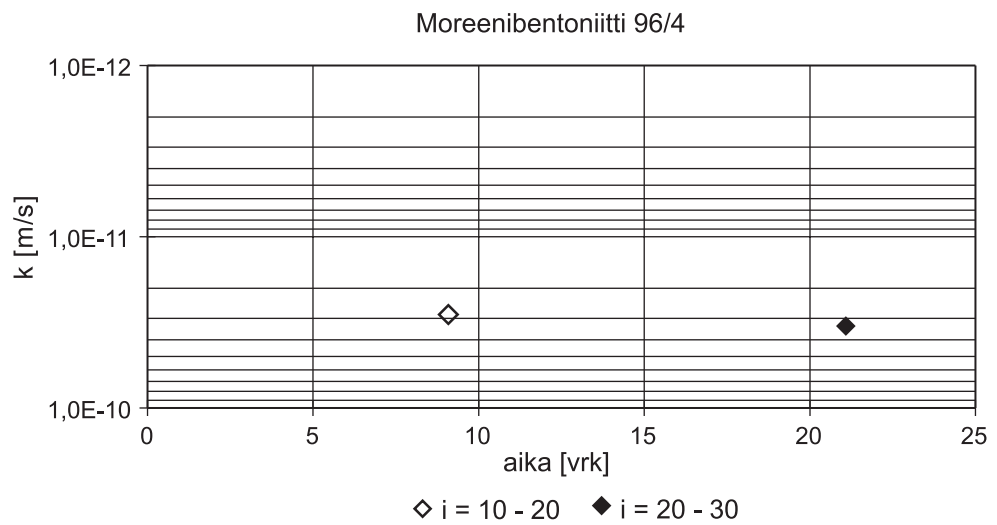
### 6.6.1 Tulokset

Koekappaleen 9 mittaustulokset eri läpäisyneesteillä on esitetty kuvassa 34. Rinnakkaisessa koekappaleessa oli oikovirtauksia aiheuttaneita halkeamia, ja sen tuloksia ei esitetä tässä. Kuvassa 36 on esitetty arvioidut k-arvot eri konsentraatioilla. Kuvassa 35 on esitetty ICT –laitteella maksimitiiviteensä sullotun ( $\chi_d = 21,1$  kN/m<sup>3</sup>, huokoisuus 21%) vastaavan moreenibentoniitin k-arvomittauksien tulokset pehmeäseinäisellä koejärjestelyllä ja vesijohtovedellä määritettynä. K-arvoksi saatiin tällä menetelmällä  $3 \cdot 10^{-11}$  m/s.

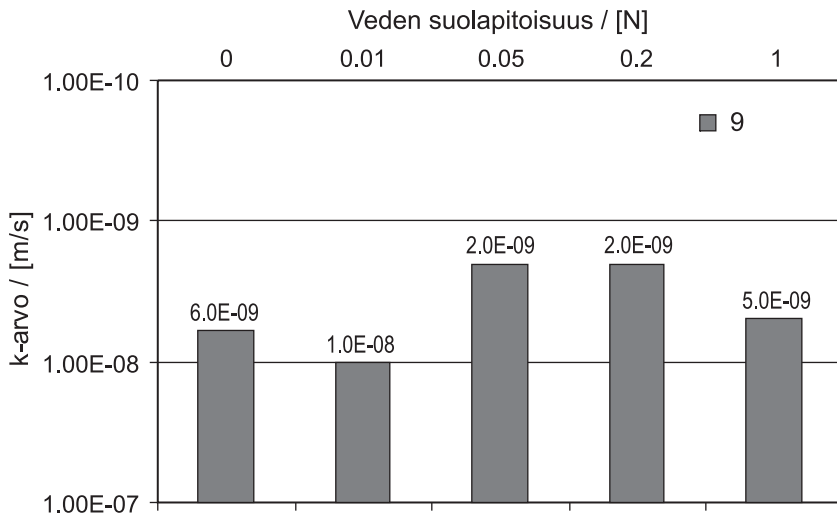
CUR –sellillä saatiin koekappaleen 9 k-arvoksi vesijohtovedellä  $6 \cdot 10^{-9}$  m/s, 0,01 M liuoksella  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s, 0,05 M liuoksella  $2 \cdot 10^{-9}$  m/s, 0,2 M liuoksella  $2 \cdot 10^{-9}$  m/s ja 1 M liuoksella  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s. Sellin alasivuventtiili pidettiin suljettuna vesijohtovedellä ja 0,01 M liuoksella mitattaessa. Alasivuventtiilin avaaminen 0,05 M liuoksella mitattaessa vaikutti koekappaleen k-arvoon, mikä tarkoittaa sitä, että aiemmissa mittauksissa oli tapahtunut oikovirtauksia näytteiden ali ja saadut tulokset ovat liian korkeita. 0,2 M liuoksella olisi mittauksia ollut syytä jatkaa kauemmin lopullisen k-arvon varmistumiseksi. 1 M liuoksella tehdyt sähkönjohtavuusmittaukset ovat epäluotettavia mittalaitteen virtalähteen heikkenemisen vuoksi.



Kuva 34. Koekappaleen 9 (moreenibentoniitti) tulokset.



Kuva 35. Moreenibentoniitin k-arvo pehmeäseinäisellä kojärjestelyllä.

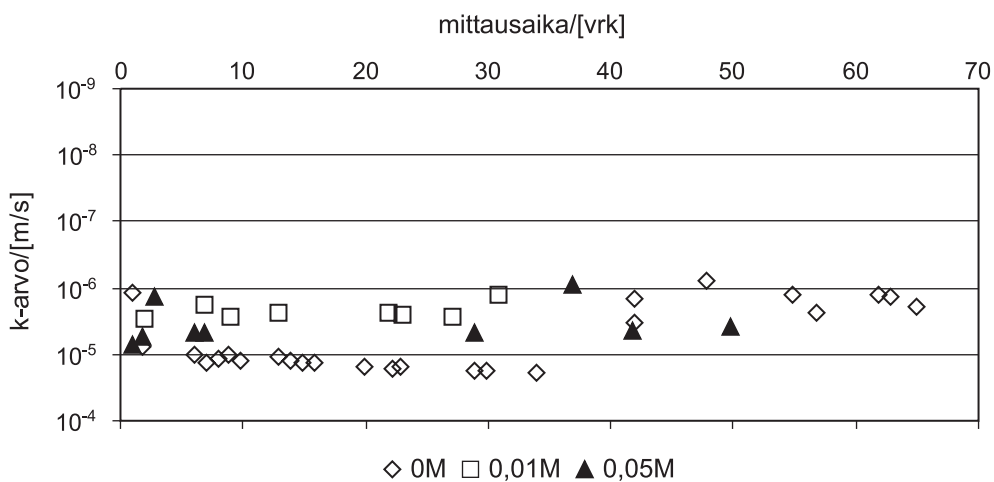


Kuva 36. Yhteenveto moreenibentoniitin tuloksista.

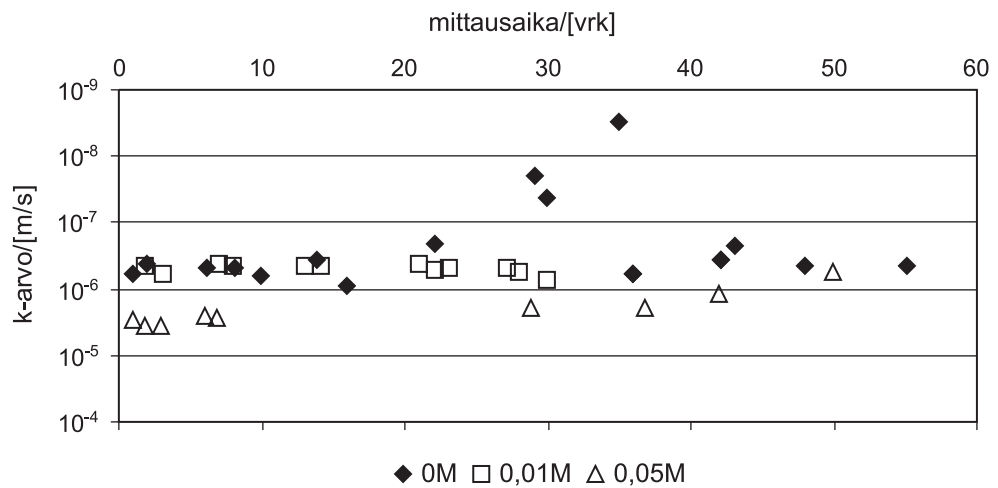
## 6.7 Kivituhkabentoniitti

### 6.7.1 Tulokset

Koekappaleen 7 mittaus tulokset eri läpäisyneesteillä on esitetty kuvassa 37 ja koekappaleen 9 kuvassa 38. Sellien alasuiventtiilit pidettiin suljettuina suurten reunavuotojen vuoksi. Koekappaleen 7 k-arvoksi määritettiin vesijohtovedellä  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s, 0,01 M suolaliuoksella  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s ja 0,05 M suolaliuoksella  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s. Koekappaleen 12 k-arvoksi määritettiin vesijohtovedellä  $4 \cdot 10^{-7}$  m/s, 0,01 M suolaliuoksella  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s ja 0,05 M suolaliuoksella  $9 \cdot 10^{-7}$  m/s.



Kuva 37. Koekappaleen 7 (kivituhkabentoniitti) k-arvotulokset.



Kuva 38. Koekappaleen 12(kivituhkabentoniitti) k-arvotulokset.

Molemmissa koekappaleissa ulos tulevan veden sähkönjohtavuus nousi heti syöttöveden tasolle, mikä indikoi kappaleissa olevia oikovirtauskanavia. Kanavat olivat joko halkeamia tai epähomogeenisia kohtia, joissa bentoniittia oli liian vähän. Tämä koekappaleiden näytteiden korkeisiin k-arvoihin johti päätökseen lopettaa kappaleiden koestaminen 0,05 M suolaliuoksen jälkeen.

Kyseisen seoksen bentoniittipitoisuus runkoaineksen huokostilavuuteen nähden oli ilmeisesti liian alhainen. Näytteiden tiiviysaste oli 90%. Koekappaleiden suuri läpäisevyys on toisaalta voinut olla seurausta niiden tiivistämisestä liian alhaisessa vesipitoisuudessa, jolloin niihin on voinut muodostua pystyhalkeamia. Mittausten jälkeen, näytteitä purettaessa ei halkeamia kylläkään ollut silmin havaittavissa. Veden suolapitoisuuden kasvu vaikutti hieman k-arvoihin.

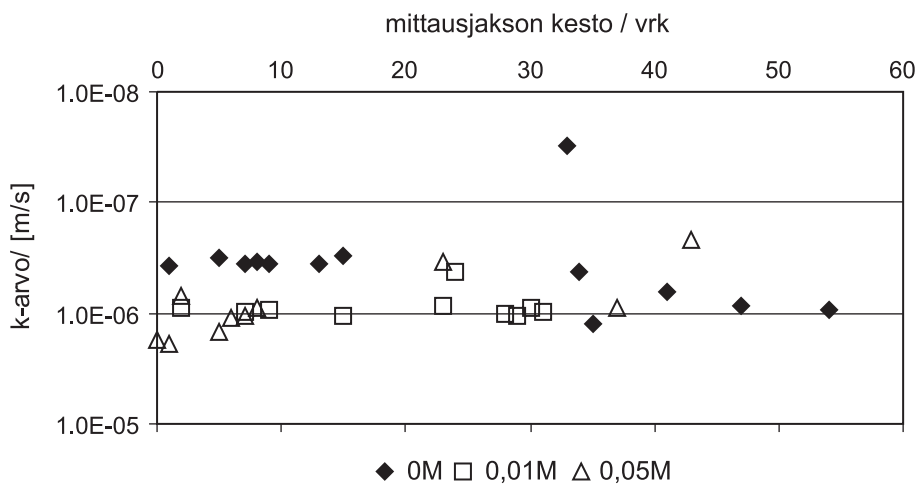
## 6.8 Suomalainen savi

### 6.8.1 Ensimmäinen vaihe

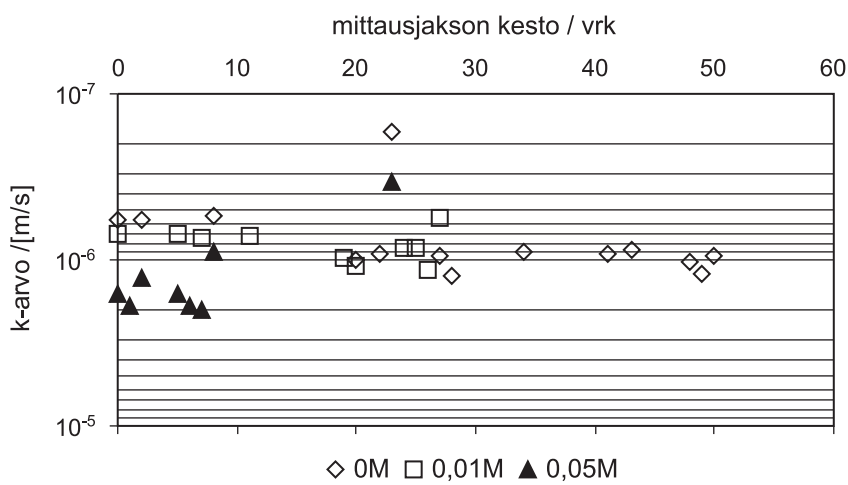
Koekappaleiden tiiviysasteeksi saatiin sullomalla 82% ja kappaleet olivat sullonnan jälkeen täysin vedellä kyllästyneitä, mikä esti suuremman tiiviysasteen saavuttamisen. Koekappaleen 2 mittausjaksot kestivät vesijohtovedellä 54 vrk, 0,01 M suolaliuoksella 31 vrk ja 0,05 M suolaliuoksella 43 vrk. Koekappaleen 14 mittausjaksot kestivät vesijohtovedellä 50 vrk, 0,01 M suolaliuoksella 27 vrk ja 0,05 M suolaliuoksella 23 vrk. Koekappaleen 2 k-arvoksi vesijohtovedellä määritettiin  $8 \cdot 10^{-7}$  m/s, 0,01 M suolaliuoksella  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s ja 0,05 M suolaliuoksella  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s (kuva 39). Koekappaleen 14 k-arvoksi vesijohtovedellä määritettiin  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s, 0,1 M suolaliuoksella  $9 \cdot 10^{-7}$  m/s ja 0,05 M suolaliuoksella  $3 \cdot 10^{-7}$  m/s (kuva 40).

Sellien alasuiventtiilit pidettiin suljettuina mitattaessa vesijohtovedellä ja 0,01 M suolaliuoksella, mutta avattiin 0,05 M suolaliuoksella mitattaessa. Sivuventtiilien avaaminen alensi k-arvoja jonkin verran molemmilla näytteillä, mutta mittauksia ei tehty riittävästi luotettavan trendin löytämiseksi. Kappaleiden läpi tulevan veden sähkönjohtavuus kasvoi sivuventtiilien avaamisen jälkeen nopeasti syöttöveden tasolle, mikä on merkki halkeamien tai makrohuokosten kautta tapahtuvista oikovirtauksista. Oli ilmeistä, että näytteiden tiiviysaste oli riittämätön suojausrakennekäyttöä ajatellen ja näytteiden koestaminen lopetettiin.

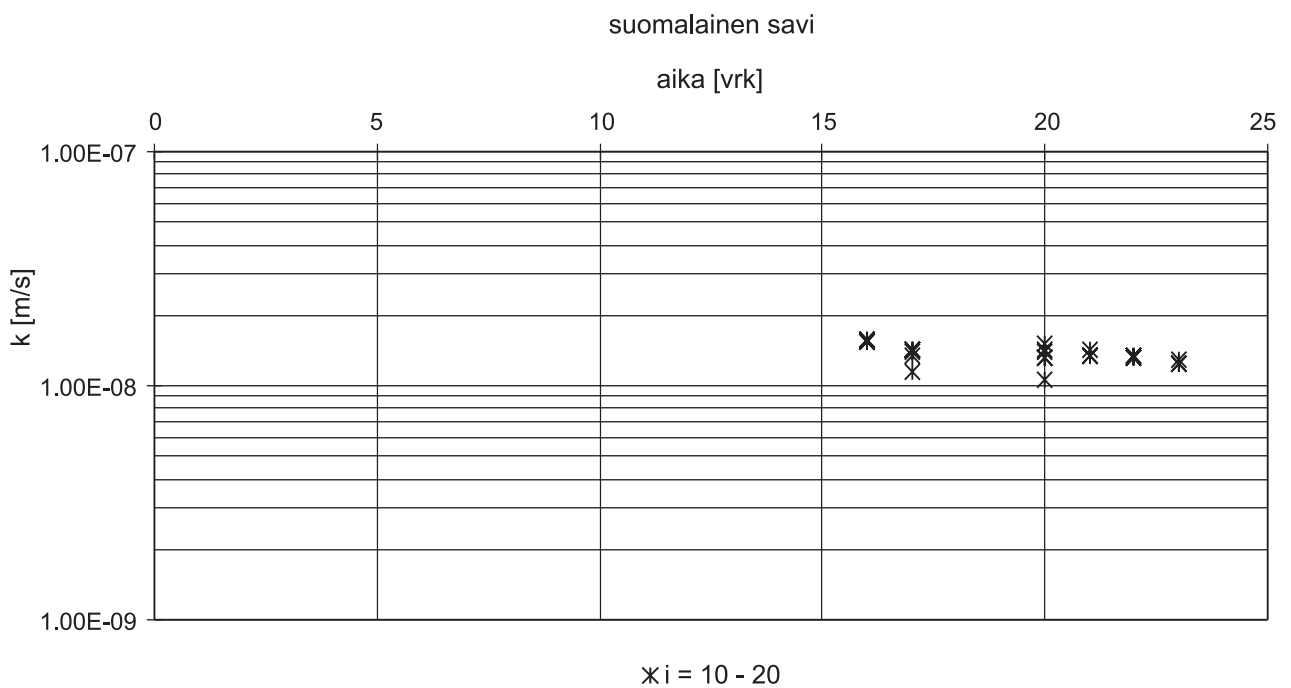




Kuva 39. Koekappaleen 2 (suomalainen savi) k-arvot.



Kuva 40. Koekappaleen 14 (suomalainen savi) k-arvot.



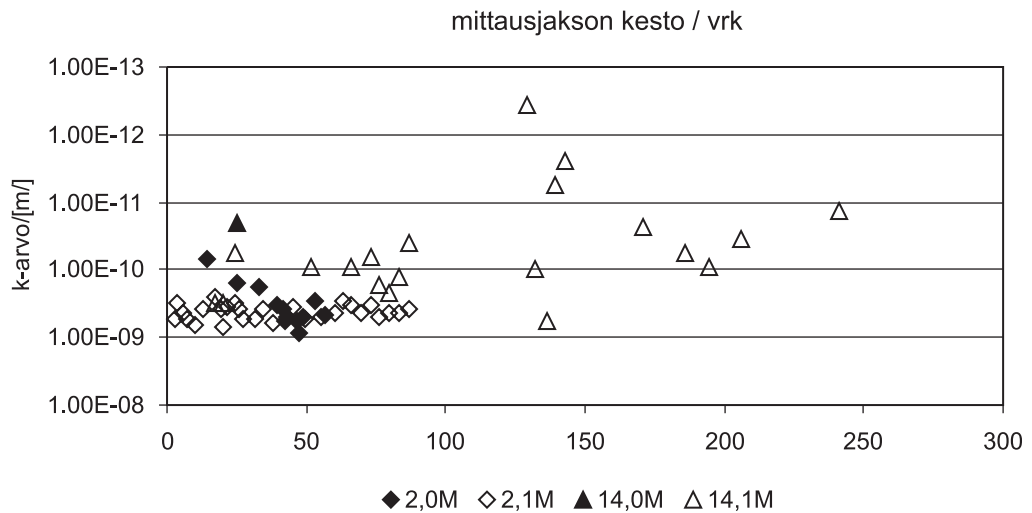
Kuva 41. Suomalaisen saven k-arvo pöyhmeäseinäisellä koejärjestelyllä.

Pehmeäseinäisellä koejärjestelyllä mitattiin suomalaisen saven k-arvoksi vesijohtovedelle noin  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s (kuva 41). Tehokas jännitys kokeen aikana oli 25 kPa ja hydraulinen gradientti  $>10$ . Tämän kappaleen todellinen tiiviysaste oli 88,3%.

### 6.8.2 Toinen vaihe – uudet koekappaleet

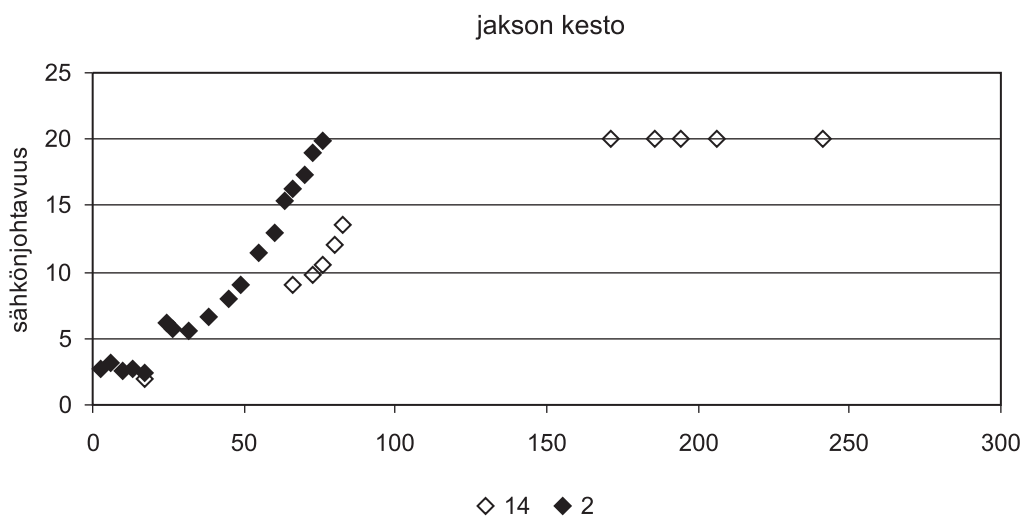
0,05 M suolaliuksella kyllästetystä, hieman kuivatusta savesta sullottiin uudet koekappaleet, joiden tiiviysasteeksi saatiin 92%. Mittausta vesijohtovedellä jatkettiin noin 60 vrk. Sellien alasuventtiilit pidettiin mittausten aikana avoinna. Koekappaleesta 14 saatiin koko seurantajakson aikana vain yksi mittaustulos,  $k = 2 \cdot 10^{-11}$  m/s. Koekappaleen 2 k-arvo kasvoi alussa kyllästymisen edetessä ja vakiintui tasolle  $5 \cdot 10^{-10}$  m/s. Koekappaleen 2 koko mittausajalta laskettu keskimääräinen k-arvo oli  $4 \cdot 10^{-10}$  m/s.

1 M suolaliuksella mittausjakson pituus oli näytteellä 2 n. 100 vrk ja näytteellä 14 n. 250 vrk. Sellien alasuventtiilit pidettiin avoinna. Koekappaleen 2 k-arvoksi määritettiin  $4,2 \cdot 10^{-10}$  m/s ja koekappaleen 14 lopulliseksi arvoksi  $3,4 \cdot 10^{-11}$  m/s. Koekappaleen 14 koko mittausajalta laskettu keskimääräinen k-arvo oli  $6,2 \cdot 10^{-11}$  m/s. Sähkönjohtavuuskäyristä (kuva 43) voidaan päätellä näytteiden olleen varsin homogeenisia.



Kuva 42. Suomalaisen saven uusien näytteiden k-arvot.

Koekappaleen 2 tulosten perusteella ei 1 M natriumkloridi vaikuttanut juurikaan saven k-arvoon. Koekappaleen 14 osalta on natriumkloridin merkitystä vaikeampi arvioida vesijohtovedellä tehtyjen mittausten vähäisen määrän sekä 1 M –mittausten suuren hajonnan vuoksi.



Kuva 43. Suomalaisen saven uusien näytteiden läpäisevän veden sähkönjohtavuus 1 M suolaliuoksella.

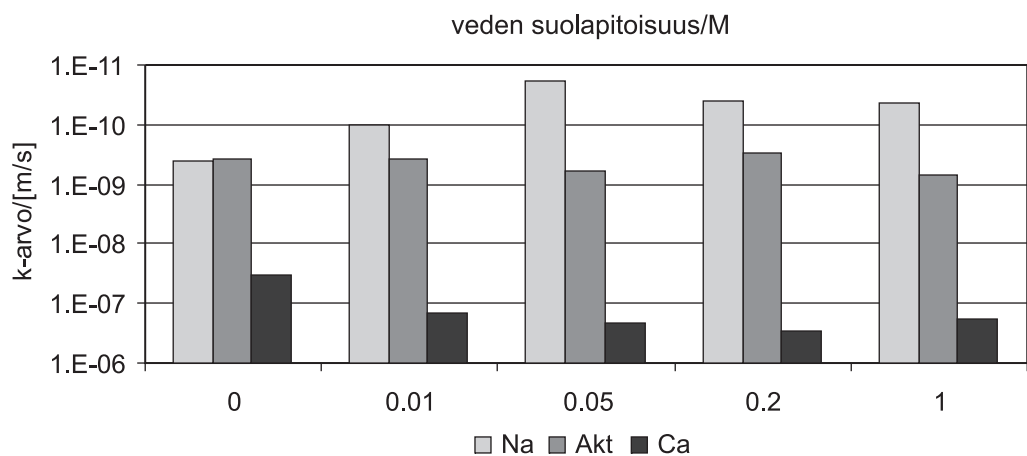
Samaisesta 0,05 M suolaliuoksella kyllästetystä, hieman kuivatusta savesta rakennettiin kiertotiivistysmenetelmällä kaksi koekappaletta testattavaksi pehmeäseinäisellä koejärjestelyllä. Näytteiden tiiveysasteet olivat alkuperäisen saven maksimikuivatilavuuspainoon nähden 106% ja 108%, mikä tarkoittaa sitä, että suolainen huokosvesi tehosti saven tiivistymistä keskimäärin 7%. Näytteiden k-arvoiksi vesijohtovedelle määritettiin  $3,5 \cdot 10^{-10}$  m/s ja  $5,0 \cdot 10^{-10}$  m/s. Varsinainen mittaaminen kesti noin 15 vrk. Nämä tulokset vastaavat hyvin koekappaleen 2 vakiintuneita k-arvoja.

# 7

## Tulosten tarkastelua

### 7.1 Bentoniittimatot

Kuvassa 44 on esitetty eri bentoniittimatoille määritetyt tulokset. Vaakavirtaukset koekappaleen alta ovat voineet vaikuttaa kalsiumbentoniittimaton koekappaleiden tuloksiin ainakin vesijohtovedellä ja 0.01M suolaliuoksella mitattaessa. Vaakavirtauksilla ei ilmeisesti ollut merkittävää vaikutusta kahden muun bentoniittimaton koekappaleiden tuloksiin.

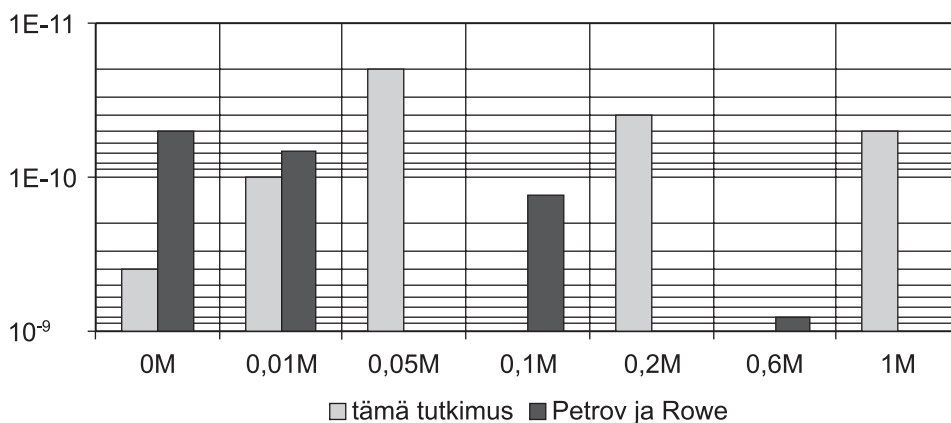


Kuva 44. Bentoniittimattojen tulosten yhteenveto.

Kalsiumbentoniittimaton soveltuvuus käytettäväksi luiskasuojauksissa vaikuttaa heikolta. K-arvo jäi alhaisella kuormituspainella liian korkeaksi. Toisaalta vaakavirtaukset ovat voineet vaikuttaa tuloksiin laimeilla suolaliuoksilla. Väkevillä suolaliuoksilla muodostui näytteisiin melko varmasti bentoniitin kutistumisesta aiheutuneita halkeamia.

Suolattomalla vedellä sekä aidosta natriumbentoniitista että aktivoitusta bentoniitista valmistettujen mattojen k-arvot olivat samaa suuruusluokkaa. Natriumbentoniittimaton k-arvo laski noin dekadilla, kun veden suolapitoisuus nousi arvoon 0,05 M. Veden suolapitoisuuden noustessa edelleen natriumbentoniittimaton k-arvo kasvoi hieman, mutta oli väkevimmälläkin liuoksella (1 M) alhaisempi kuin suolattomalla vedellä. Kokeiden perusteella natriumkloridi tehostaa natriumbentoniittimaton hydraulista toimivuutta. Aktivoitulla bentoniitilla ei havaittu selvää vastaavaa trendiä, toisaalta veden natriumkloridikonsentraation kasvu ei myöskään merkittävästi heikentänyt maton ominaisuuksia.

Natriumkloridiliuoksen vaikutusta natriumbentoniittimattojen hydrauliseen johtavuuteen ovat selvittäneet ainakin Petrov ja Rowe (1997) sekä Petrov ym. (1997). Molemmissa raporteissa esitellään samojen koesarjojen tuloksia. Kokeet tehtiin käyttäen jäykkäseinäistä koejärjestelyä ja näytteet kyllästettiin takapaineen avulla joko tislattulla vedellä tai läpäisykokeessa käytettävällä suolaliuoksella. Tämän kokeen tuloksia voidaan vertailla Petrovin ja Rowen (1997) kuormitettuna tislattulla vedellä kyllästetyillä näytteillä tehokkaalla jännityksellä 3-4 kPa saamiin tuloksiin (kuva 45).



Kuva 45. Saatujen tulosten vertailua Petrovin ja Rowen (1997) tuloksiin.

Petrovin ja Rowen (1997) tuloksissa havaitaan vesijohtovedellä saatu selvästi alhaisempi k-arvo sekä k-arvon nopeampi kasvu veden suolapitoisuuden kasvaessa. K-arvojen ero väkeville suolaliuksilla on merkittävä. Ero vesijohtoveden tuloksissa voi selittyä bentoniitin kyllästysasteen eroista (Petrov ja Rowe kyllästäivät näytteet takapaineella ennen koestusta) tai tässä koejärjestelyssä tapahtuneilla sivuttaisvirtauksilla alkuvaiheessa. Ero väkevien suolaliuosten tuloksissa voi olla seurausta kasvaneista seinämävuodoista Petrovin ja Rowen (1997) koejärjestelyssä, sillä Petrov ja Rowe käyttivät kokeissaan jäykkäseinäistä koejärjestelyä (ödometri). Erojen syitä tulisi selvittää vielä tarkemmin.

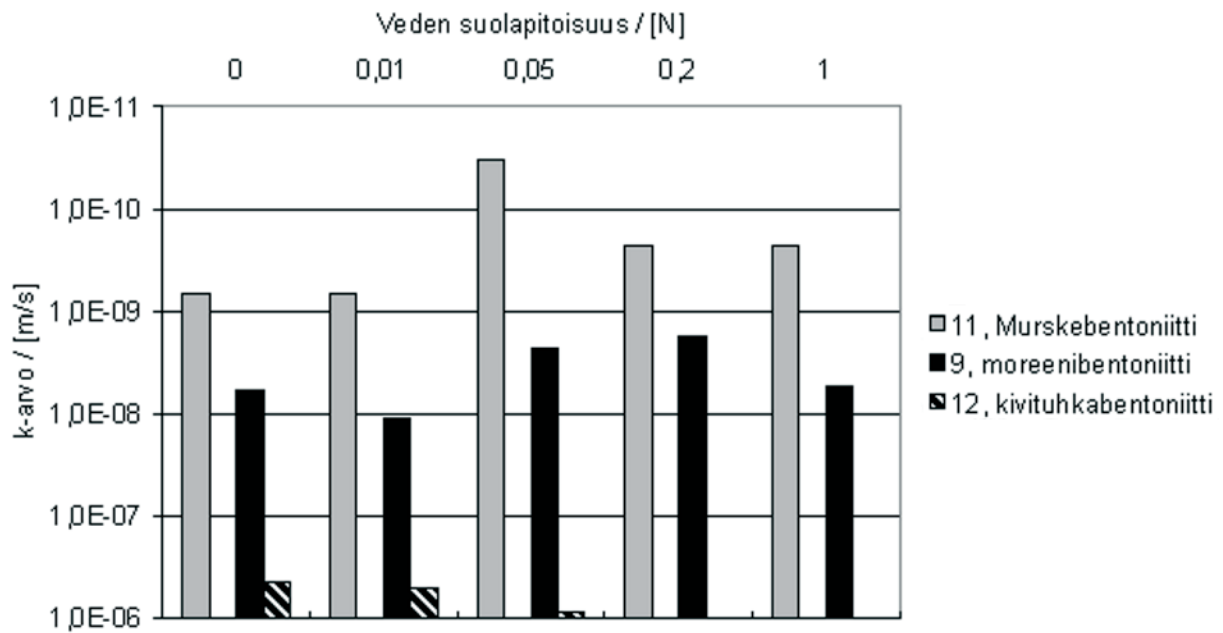
Sähköisen kaksoiskerroksen teorian (DDL) mukaan huokosnesteeseen elektrolyyttikonsentraation kasvaessa savipartikkelien paisuminen vähenee ja ne alkavat muodostaa tiiviitä partikkelikasauksia, klustereita, joiden väleihin jää makrohuokosia. Makrohuokosten lisääntyminen ja koon kasvu aiheuttaa saven hydraulisen johtavuuden kasvua. Kalsiumbentoniitin tulokset ovat teorian mukaisia, mutta natrium- ja natriumaktivoitun bentoniitin tulokset eivät.

Natriumbentoniitin kyky toimia alhaisilla konsentraatioilla puoliläpäisevänä kalvona on tunnettua. Kun Na- ja Cl- ionien pääsy bentoniittikerroksen läpi estyy, pyrkii vettä siirtymään sekä matosta että maton alapuolelta maton yläpuolelle laimentamaan NaCl-konsentraatiota. Tämä osmoottinen veden kulkeutuminen vähentää mitattavaa maton läpäisevää vesimäärää ja lisää mattoon kohdistuvaa tehokasta jännitystä. Bentoniittimatto voi siis tiivistyä suolakuormituksen seurauksena kahdella tavalla: tehokkaan jännityksen kasvun aiheuttama konsolidoituminen ja osmoottisesta veden poistumisesta aiheutuva konsolidoituminen. Tehokkaan jännityksen kasvu voi vaikuttaa ainoastaan varsin laimeilla konsentraatioilla, NaCl:n tapauksessa <0,1M. Osmoottinen veden imeytyminen pois bentoniitista vaikuttaa kaikilla konsentraatioilla.

Konsolidoitumisen seurauksena bentoniitin huokoisuus ilmeisesti pieneni enemmän kuin sähköisen kaksoiskerroksen ohentuminen huokoisuutta kasvatti. Ilmiöiden yhteisvaikutuksena oli läpäisevyyden aleneminen kaikilla natriumkloridiliuksilla. Tulosten perusteella suurin vaikutus konsolidoitumisella on veden natriumkloridikonsentraatiolla n. 0,05 M.

## 7.2 Maabentoniitit

Kuvassa 46 on eri maabentoniittiseoksien läpäisevyydet eri konsentraatioilla. Kokeiden alkuosan oikovirtaukset sekä loppuosan vähäiset mittaustulokset tekevät murskebentoniitin tuloksista hyvin epäluotettavia. Väkeville suolaliuksilla murskebentoniittinäyte 11 tiivistyi kunkin mittauksen edetessä ja viimeiset mitatut k-arvot ovat todennäköisesti liian korkeita. Toisaalta hydraulisen gradientin seurauksena saattoi bentoniittia kulkeutua näytteessä.



Kuva 46. Maabentoniittien tulosten yhteenveto.

Oikovirtauksista johtuen moreenibentoniitin vesijohtovedellä ja 0,01 M liuoksella saadut tulokset ovat todellista korkeampia. Todellinen k-arvo vesijohtovedellä on todennäköisesti ollut alhaisempi kuin  $10^{-9}$  m/s. Maksimitiiviydessä olleen koekappaleen k-arvoksi ilmattomalla vesijohtovedellä määritettiin pehmeäseinäisellä koejärjestelyllä  $3 \cdot 10^{-11}$  m/s, mikä oli hyvin lähellä natriumbentoniittimattojen arvoja.

Sekä moreeniin (luonnonmaalaji) että kivituhkaan (hienorakeinen murske) lisättiin bentoniittia 4 % kiviaineksen kuivapainosta ja molemmat sullottiin 90% suhteelliseen tiiviyteen. Kivituhkabentoniitin kuivatilavuuspaino oli 18,86 kN/m<sup>3</sup> ja moreenibentoniitin 18,70 kN/m<sup>3</sup>. Kivituhkabentoniitin k-arvo oli puhtaalla vedellä noin kaksi dekadia korkeampi kuin moreenibentoniitin ja 0,05 M suolaliuoksella oli k-arvojen ero vieläkin suurempi. Murskebentoniitissa (runkoaines 0-16 mm mursketta) käytettiin bentoniittia selvästi moreenia ja kivituhkaa suurempi määrä, eli 10 % runkoaineksen kuivapainosta. Tuloksena olikin jo 85% tiiviydas- teessa rakenne, jonka k-arvo oli  $<10^{-9}$  m/s.

Suuremmilla natriumkloridikonsentraatioilla murskebentoniitti tiivistyi mit- tausten aikana, ja usein läpäisy loppui täysin. Myös moreenibentoniitti tiivistyi jonkin verran veden natriumkloridikonsentraation kasvaessa. Tiivistyminen on voinut olla seurausta seoksen osmoottisesta konsolidoitumisesta tai bentoniitin kulkeutumisesta näytteessä. Käytetyssä koejärjestelyssä ei voitu seurata koekappa- leen korkeuden muutoksia, joten osmoottisen konsolidoitumisen vaikutusta maa- bentoniittiseoksiin ei voida luotettavasti arvioida.

Ero moreeni- ja kivituhkabentoniittien välillä on todennäköisesti seurausta eroista runkoainesten huokosrakenteesta. Kivituhkaan jää helposti makrohuoko- sia, joiden täyttäminen bentoniitilla vaatisi suurempaa bentoniittimäärää ja tehok- kaampaa tiivistystyötä. Kivituhkan jäykempi raerunko voi myös rajoittaa kivituh- kabentoniitin osmoottista tiivistymistä.

Moreenibentoniitin k-arvo maksimitiiviydessä pehmeäseinäisellä koejärjeste- llyllä vesijohtovedellä määritettynä oli  $<10^{-10}$  m/s. CUR- koejärjestelyllä k-arvo oli vastaavasti  $10^{-8}$  m/s. Veden suolapitoisuuden lisääntyessä k-arvo laski ollen alhai- simmillaan noin  $10^{-9}$  m/s. Suuriin eroihin standardisoiduissa koejärjestelyissä voi- vat vaikuttaa myös koetekniset ongelmat, esim. sellien poikkeavan suuresta koko

ja tiivistämistyön vaikeus. CUR -sellin sisäkehän reunat olivat tasaiset, mikä on voinut aiheuttaa näytteisiin halkeamia tiivistettäessä.

Maabentoniittiseosten läpäisevyyteen vaikuttavat runkoaineuksen ominaisuudet, bentoniitin määrä sekä tiivistystyö. Maabentoniittiseoksen teoreettinen bentoniitin minimimäärä saadaan, kun seoksessa on sellainen määrä bentoniittia, että se täysin kyllästyneenä tapauskohtaisella suotovedellä juuri ja juuri täyttää koko runkoaineuksen huokostilavuuden. Seoksen teoreettinen k-arvo on tällöin sama kuin vapaasti kyllästyneen bentoniitin. Kun bentoniittia on edellä mainittua enemmän, on seoksella paisuntapainetta. Kun tällainen seos kuormitetaan, jäävät bentoniitin huokoisuus sekä seoksen k-arvo alhaisemmiksi. Pienelläkin maabentoniitin bentoniittipitoisuudella voidaan päästä riittävän alhaisiin k-arvoihin, kun runkoaineuksen huokoisuus on alhainen ja sekoitus- ja tiivistystyö ovat tehokkaita. Pienillä näytteillä laboratoriomittakaavassa tämä on helppoa, mutta maasto-olosuhteissa tilanne on usein toinen. Suurien CUR -koekappaleissa k-arvot 90%: tiivysasteessa olivat 2-3 kertaluokkaa korkeampia kuin 100% tiivysasteeseen sullotujen, pienten kolmiakσιαalinäytteiden k-arvot. Rinnakkaisten CUR -koekappaleiden välillä esiintyi merkittävää hajontaa.

Todellisissa luiskasuojauskohteissa on tiivysaste 90% usein käytännöllinen maksimi, joten luotettavan tiivisteiden rakentaminen vaatisi selvästi suurempaa bentoniittipitoisuutta, myös hyvällä runkoaineuksella. Kokemuksien mukaan (M.Keppo, Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy) voidaan kentällä päästä yli 90% tiivysasteisiin, mikäli runkoaineuksen rakeisuus on sopiva ja massa tiivistetään 3-5% optimia kosteampana.

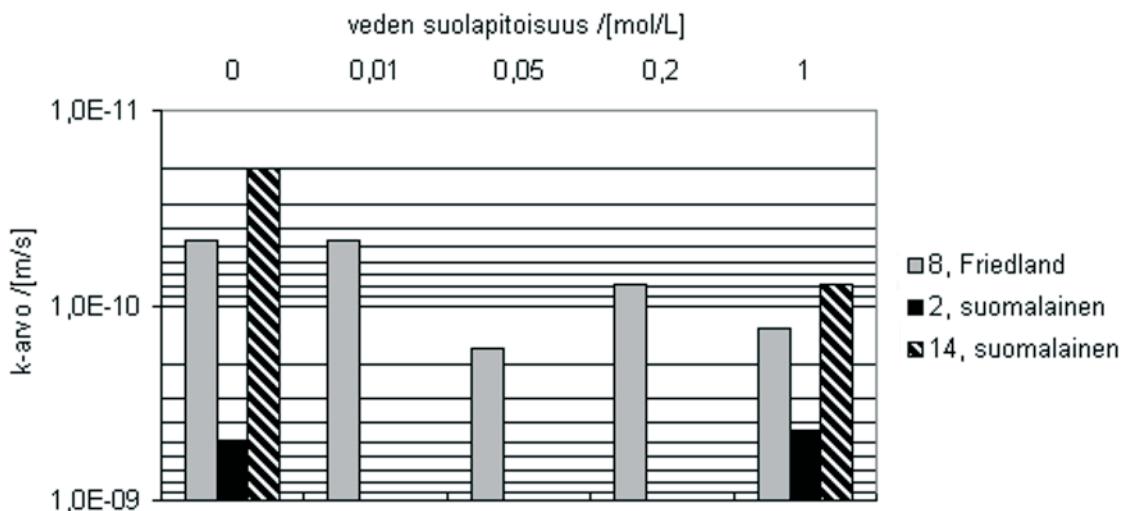
Mikäli luiskasuojausrakenteen tiivistyskerroksen k-arvon sallittuna maksimina pidetään  $10^{-9}$  m/s, on maabentoniiteilla vaikeaa päästä realistisissa 90% tiivysasteissa riittävään tiivyyteen ilman suuria bentoniittimääriä. Esimerkiksi 5% bentoniittia 0,3 m kerroksessa tarkoittaa 29 kg bentoniittitarvetta yhdelle neliömetrille. Bentoniittimatoilla saavutetaan sama tai alhaisempi läpäisevyys jo bentoniittimäärällä 3,5 – 4,5 kg/neliometri. Bentoniittimatoissa tuotteen sisäinen laadunvaihtelu on myös maabentoniitteja vähäisempää. Maabentoniittirakenteen kerrospaksuuden käytännöllinen minimi on noin 150 mm. Joissain tapauksissa voi suurempi kerrospaksuus bentoniittimattoon nähden tarjota etua rakenteen toimintavarmuuden kannalta.

Mikäli maabentoniittiseoksia suunnitellaan käytettäväksi luiskasuojauksessa, tulisi seokseen tarvittava bentoniittimäärä määrittää kloridipitoisella vedellä testaamalla. Ennen kuin suojauskohteissa esiintyvistä kloridin maksimikonsentraatioista on käytettävissä luotettavia seurantatuloksia, tulisi esikokeissa käyttää 0,1 M natriumkloridiliuosta.

## 7.3 Muut savet

Kuvassa 47 on esitetty suomalaisen ja Friedland -saven tulokset. Oikovirtauksien vaikutuksia Friedland -saven koetuloksiin on mahdotonta arvioida. Suomalaisella savella ei ilmeisesti ilmennyt oikovirtauksia.

Friedland -savi on suolaista huokosvettä sisältävä seoshilasavi, jonka savimineraleista osa on paisuvia. Friedland -saven k-arvo kasvoi lievästi läpäisynesteen natriumkloridikonsentraation kasvaessa. 0,05 M -tason tulos poikkeaa trendistä todennäköisesti mittaustulosten suuren hajonnan vuoksi. Saven alkuperäistä huokosnesteiden suolapitoisuutta ei tunnettu. Savesta on todennäköisesti kokeen alkuvaiheessa huuhdottu pois huomattavasti liukoisia suoloja, ja saven rakenne on muuttunut. Mikäli Friedland -savi olisi testattu pelkästään väkevillä, 0,2 M ja 1 M, suolaliuoksilla, olisivat vedenläpäisevyystulokset voineet olla erilaisia.



Kuva 47. Savien tulosten yhteenveto.

Suomalaisella savella saatiin sekä hyviä että huonoja tuloksia. Kun saven vesipitoisuus oli liian korkea, se ei tiivistynyt riittävästi ja läpäisevyys jäi liian korkeaksi ollen luokkaa  $10^{-6}$  m/s. Kolmiaksaalikoelajärjestelyllä määritettiin k-arvoksi samassa vesipitoisuudessa  $10^{-8}$  m/s. Kun 0,05 M suolaliuoksella kyllästetystä ja hieman kuivatusta savesta rakennettiin uudet tiiviimmät koekappaleet, päästiin jo alle  $10^{-9}$  m/s k-arvoon puhtaalla vedellä määritettynä ( $5 \cdot 10^{-10}$  m/s). Väkevä suolaliuos (1 M) ei kasvattanut suomalaisen saven vedenläpäisevyyttä. Toisaalta koekappaleiden kesto-aika on voinut olla liian lyhyt lopullisten kemiallisten vaikutusten havaitsemiseksi.

Suomalaisen saven soveltuvuuteen tiivistysrakennekäyttöön vaikuttaa oleellisesti saven vesipitoisuus rakentamishetkellä. Optimivesipitoisuudessaan tai hieman sitä kosteampana on savesta mahdollista rakentaa hyvin tiiviitä kerroksia sopivalla tiivistyskalustolla. Liian kosteana savi ei tiivisty riittävästi ja saven huokokset jäävät liian suuriksi, jotta se toimisi tehokkaasti tiivisteenä. Mikäli saven päälle tulee pysyvä kuormitus, savi konsolidoituu ajan kuluessa ja sen k-arvo alenee. Luiskasuojauksen alhaisella kuormitustasolla ei tiivistymistä käytännössä tapahdu. Läpäisevän veden suolapitoisuus ei näyttäisi kasvattavan valmiin savikerroksen vedenläpäisevyyteen.

Suomalaisen saven käyttöä luiskasuojausmateriaalina vaikeuttaa sen herkkyys jäätyksen ja kuivumisen aiheuttamille vaurioille. Suojauksia rakennettaessa tulee savitiiviste sijoittaa roudattomaan syvyyteen ja estää saven liiallinen kuivuminen käytön aikana.

## 7.4 Kommentteja käytetystä koemenetelmästä

Käytetty koelajärjestely erosi tavanomaisesta hydraulisen johtavuuden määrittämismenetelmästä eli pehmeäseinäisestä koelajärjestelystä (ASTM D5084). Tässä tutkimuksessa näytteitä ei takapaineistettu ja näytteiden alareuna oli vapaasti kuivattava. Tehokkaan jännityksen ja kuivatustilan osalta käytetyn koelajärjestelyn voi katsoa vastaavan hyvin luiskasuojauksen todellisia mekaanisia ja hydraulisia toimintatiloja. Tässä koesarjassa ei yritetty simuloida mekaanisten tai ympäristörasitusten vaikutusta rakenteiden läpäisevyyteen.

Käytetty jäykkäseinäinen kaksoisrengasselli ei antanut suomalaisen saven tapauksessa oleellisesti erilaisia tuloksia kuin pehmeäseinäinen koelajärjestely, mikäli molempien koekappaleet oli rakennettu samassa vesipitoisuudessa samaan kui-



vatilavuuspainoon. Saven kyllästyneen tilan hydraulisen johtavuuden määrittämiseen ei jäykkäseinäistä kaksoisrengassella kannata sen vaatiman ajan ja työ määrän vuoksi käyttää. Sen sijaan saven mahdollista kuivumista tai kutistumista aiheuttavien rasitusten vaikutuksen tutkimisessa voi kyseinen koemenetelmä olla hyödyllinen.

Bentoniittimattojen osalta tässä tutkimuksessa määritetyt k-arvotulokset poikkeavat kirjallisuudessa dokumentoiduista muilla koejärjestelyillä saaduista tuloksista. Vesijohtovedellä tehtyjen kokeiden tulokset jäivät noin dekadin korkeammiksi kuin yleensä raportoidut arvot. Toisaalta väkevillä natriumkloridiliuoksilla tehtyjen kokeiden tulokset olivat merkittävästi muiden tutkimusten tuloksia alhaisempia. Maabentoniittien osalta tulokset olivat epäluotettavia oikovirtausten takia. Kokeisiin valitun kivituhkabentoniitin bentoniittimäärä oli liian alhainen tai näytteet tiivistettiin liian kuivana.

Koejärjestelyn voidaan katsoa soveltuvan mineraalisten tiivisteiden hydraulisen johtavuuden määrittämiseen, mikäli menetelmään liittyvät virhemahdollisuudet eliminoidaan. Tehokkaan jännityksen kasvattaminen onnistuu sellin korkeutta lisäämällä. Sellin, ja samalla koekappaleen, läpimittaa kasvattamalla saadaan aiempaa paremmin esille erilaisten seosten maasto-olosuhteissa tapahtuvan tiivistämisen epävarmuustekijät. Mikäli sellit halutaan paineistaa, on ne syytä rakentaa polyteeniä lujemmasta ja jäykemmästä materiaalista. Tässä kokeessa käytetyllä vapaasti kuivattuvan pohjan reunaehdolla on laitteistolla määritettävä käytännöllinen alhaisin k-arvo luokkaa  $10^{-11}$  m/s.

Näytteiden valmistelussa tulee kiinnittää erityistä huomiota koekappaleen ali tapahtuvan vaakavirtauksen eliminoimiseen. Koesellin sisäkehä tulee puhdistaa huolellisesti ennen koekappaleen rakentamista. Sisäkehän päälle ei saa asentaa suodatinkangasta. Sisäkehän ohentaminen helpottaisi kiinteän kontaktin syntymistä kehän ja massakoekappaleen välillä, mutta voi toisaalta johtaa ohuen koekappaleen leikkautumiseen. Näytteiden tehokas tiivistäminen vaatii Proctor –vasaraa suurempia voimia etenkin tutkittaessa maabentoniittiseoksia. Sellin valmistaminen HDPE –muovia jäykemmästä materiaalista voi myös helpottaa näytteiden tiivistämistä. Seinämävuotojen vaikutusta voidaan ehkäistä kierrättämällä sivukehäältä tulevaa vettä pumpulla koekappaleen päälle tai yläsäiliöön.

Läpäisevän vesimäärän mittaaminen byretillä parantaisi mittaustarkkuutta, mutta edellyttäisi sisäkehän pitämistä vedellä kyllästyneenä mittausten aikana. Sellin sisäkehä olisi syytä varustaa toisella venttiilillä, jolloin kokeiden välillä olisi mahdollista huuhdella mahdollisesti saostuvat aineet pois suodatinhiekkasta.

# 8

## Yhteenveto

Tämän tutkimuksen perusteella on veden natriumkloridipitoisuudella vähäinen vaikutus tutkittujen mineraalisten tiivistysmateriaalien hydrauliseen johtavuuteen. Selvimmin hydraulinen johtavuus muuttui natriumkloridin vaikutuksesta maabentoniittiseoksilla ja aidosta natriumbentoniitista valmistetulla matolla.

Natriumbentoniittimatolla hydraulinen johtavuus aleni, kun veden NaCl –konsentraatio kasvoi nollost 0,2M:ään. Väkevimmälläkin suolaliuoksella (1M) hydraulinen johtavuus oli alhaisempi kuin vesijohtovedellä. Aktivoidusta kalsiumbentoniitista valmistetun bentoniittimaton hydraulinen johtavuus oli vesijohtovedellä samaa luokkaa kuin natriumbentoniittimatolla, mutta aktivoidun bentoniitin johtavuus ei muuttunut merkittävästi veden NaCl –konsentraation kasvaessa. Puhtaasta kalsiumbentoniitista valmistettu matto ei sovellu luiskasuojaukseen liian suuren läpäisevyytensä vuoksi.

Kivituhkabentoniitilla, jossa oli 4% bentoniittia, ei päästy vaatimusten mukaiseen hydrauliseen johtavuuteen. Moreenibentoniitin, jossa oli 4% bentoniittia, hydraulinen johtavuus NaCl –liuoksilla oli noin  $10^{-9}$  m/s, mitä voidaan yleensä pitää riittävänä luiskasuojauksikäytössä. Murskebentoniitin, jossa oli 10% bentoniittia, hydraulinen johtavuus oli vesijohtovedellä  $<10^{-9}$  m/s ja se aleni selvästi veden NaCl –konsentraation kasvaessa.

Suomalaisen saven tiivistyvyys on hyvin herkkä vesipitoisuudelle. Optimivesipitoisuudessa maksimitiiviyteen sulotulle savelle oli määritetty pehmeäseinäisellä koejärjestelyllä k-arvoksi noin  $10^{-11}$  m/s. Tiiviyssasteeseen 88% sulotun koekappaleen johtavuudeksi määritettiin pehmeäseinäisellä koejärjestelyllä noin  $10^{-8}$  m/s. CUR –näytteiden suhteellinen tiiviyys oli 82% ja johtavuus luokkaa  $10^{-6}$  m/s. Mikäli suomalainen savi saadaan tiivistettyä riittävään tiiviyteen, ei sen k-arvo muutu merkittävästi veden NaCl –konsentraation kasvaessa.

Työmaalla tapahtuvassa massan sekoittamisessa ja tiivistämisessä on epävarmuustekijöitä. Tasalaatuinen mineraalinen luiskasuojaurakenne voidaan luotettavimmin rakentaa bentoniittimattoja käyttäen. Muovikalvon käyttäminen yhdessä mineraalisen tiivisteiden kanssa parantaa aina suojauksen tehokkuutta.

Bentoniittimattorakenteiden suunnittelussa on huomioitava rakenteen ohuus, mikä tekee sen herkäksi mekaanisille rasituksille. Suurin riskitekijä natriumbentoniittimaton pitkäaikaiskestävyyden kannalta on ioninvaihto. Mikäli natriumbentoniitti muuttuu ioninvaihdon seurauksena kalsiumbentoniitiksi (esimerkiksi Ca-kloridisuolauksen johdosta), pienenee sen paisumiskapasiteetti noin neljäsosaan alkuperäisestä, eivätkä kuivumishalkeamat enää välttämättä korjautu alhaisella kuormituspaineella, ja matto menettää eristyskykynsä. Tämä vauriomuoto edellyttää alhaisen pintakuorman, kuivumishalkeilun ja ioninvaihdon yhteisvaikutusta. Maton sisältämän bentoniitin määrällä ja laadulla on merkitystä veden NaCl –konsentraation kasvaessa. Aitoa Wyoming –natriumbentoniittia sisältäneen maton hydraulinen johtavuus veden natriumkloridikonsentraatioilla 0,05 M-0,2 M oli noin kymmenesosa aktivoitua kalsiumbentoniittia sisältäneen maton arvosta. Jauhemainen bentoniitti toimii rakeista tehokkaammin etenkin alhaisella kuormituspaineella.

CUR –selli soveltuu hydraulisen johtavuuden määrittämiseen, kun materiaalin k-arvo on välillä  $10^{-7}$  –  $10^{-11}$  m/s. Kyseisellä koejärjestelyllä voidaan pehmeäseinäistä koejärjestelyä paremmin jäljitellä käytännön olosuhteita. Reunavuodot

vaikeuttavat mittausta ja koejärjestelyissä on varauduttava pitämään painekorkeus tasaisena esim. pumppaamalla. Tässä tutkimuksessa näytteet tiivistettiin pudottamalla Proctor –vasaraa (4,5 kg) halkaisijaltaan 200 mm olevan teräslevyn päälle. Menetelmällä päästiin useimmilla materiaaleilla noin 90% tiiviysasteeseen. Tätä korkeammat tavoitetiiviydet vaativat tehokkaampaa tiivistyskalustoa, esim. täryvasaraa.

Luiskasuojusrakenteessa tiivistemateriaalien pitkäaikaiskestävyyteen vaikuttavat monet käytännössä vallitsevat rasitustekijät. Toimivien tiivistysratkaisujen varmistamiseksi olisi jatkossa tutkittava myös näiden rasitustekijöiden vaikutuksia:

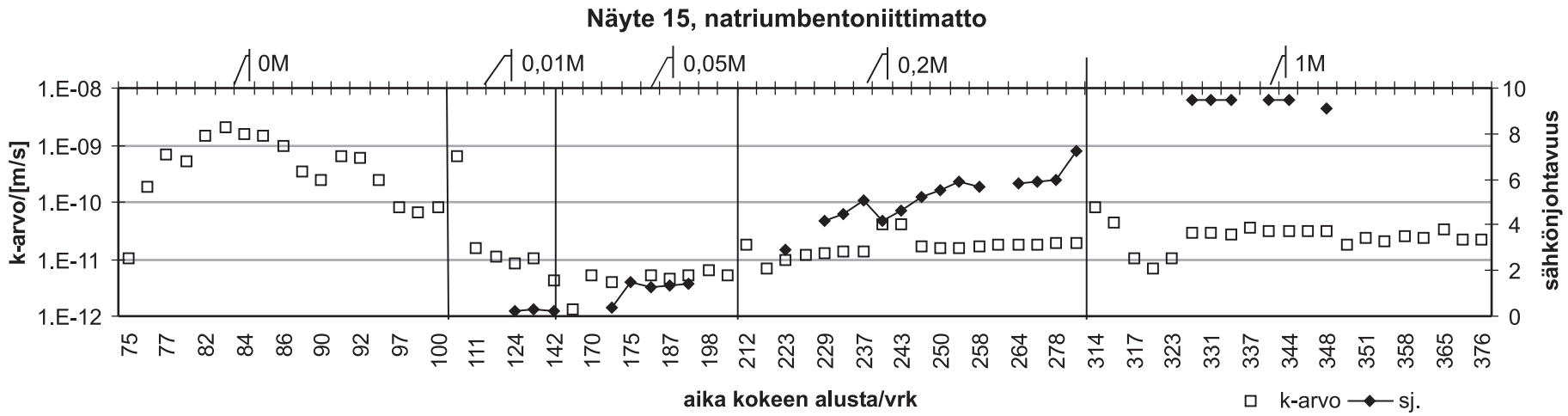
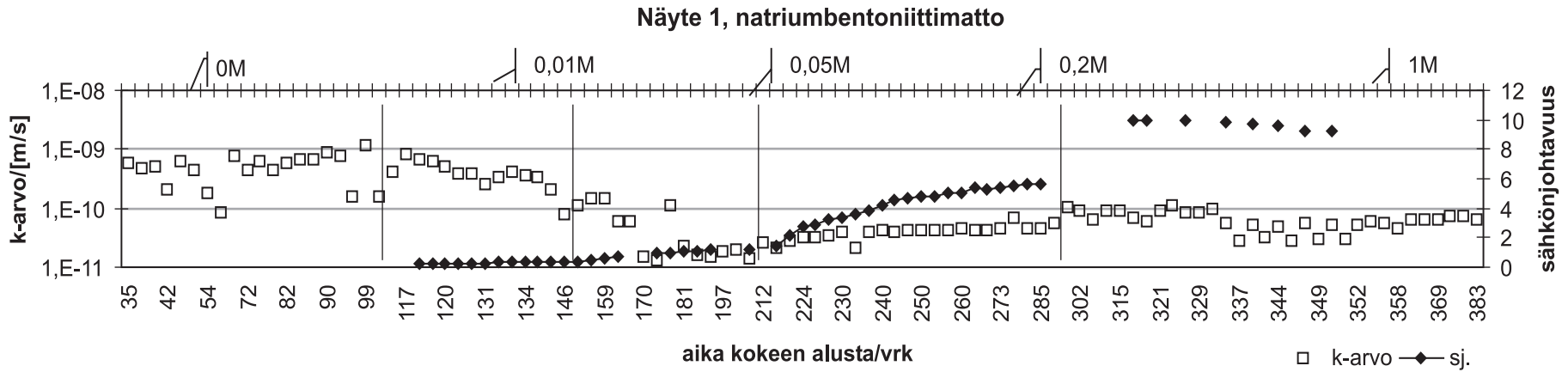
- kalsiumkloridin vaikutus ioninvaihtoon ja läpäisevyyteen;
- tiivistysrakenteen vesipitoisuuden vaihtelu;
- toistuvan kuivumisen, kastumisen ja suolarasituksen yhteisvaikutus;
- pakkasrasituksen vaikutus tiiviystason säilymiseen;
- tiivistysmateriaalin toimivuus tierakenteessa dynaamisen kuormituksen alaisena;
- diffuusion merkitys suolan kulkeutumiseen erilaisissa olosuhteissa ja tämän vaikutus tarvittavaan tiivisteiden kerrospaksuuteen.

Koska tässä tutkimuksessa mukana olleita materiaaleja on käytetty todellisissa suojauskohteissa, olisi jatkossa tärkeää seurata olemassa olevien rakenteiden toimintaa. Saatavia tietoja voidaan käyttää tarvittavien tutkimusten suunnitteluun. Luiskasuojusrakenteiden valintaa ja mitoitusta tulee kehittää ottamaan paremmin huomioon eritasoiset suojausvaatimukset sekä paikalliset olosuhteet.

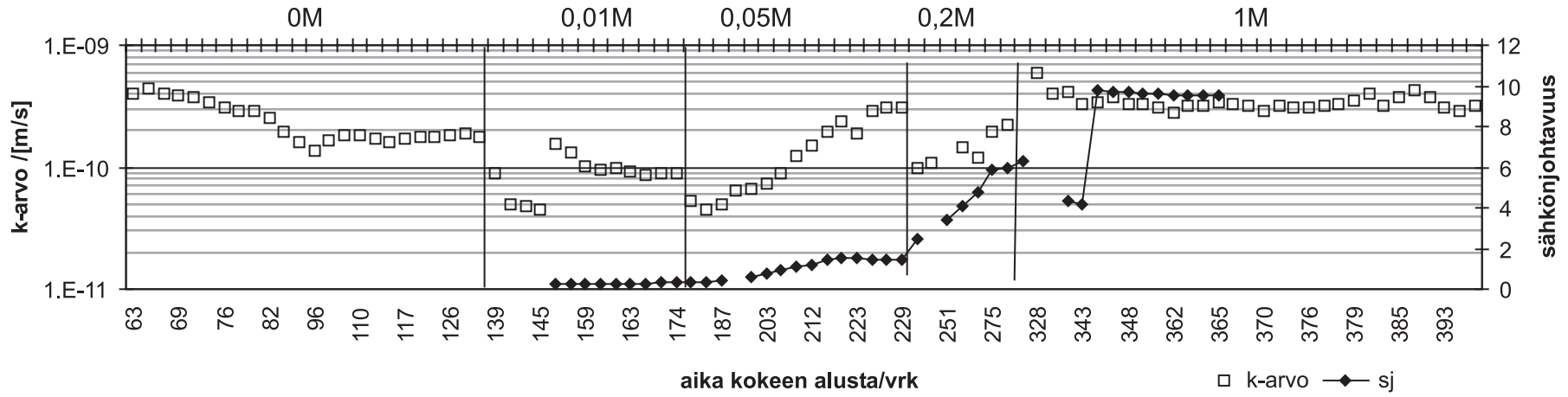
# Viitteet

- Brown K.W. and Thomas J.C. 1998. A comparison of the convective and diffusive flux of organic contaminants through landfill liner systems. *Waste Manage Res.* 1998: 16: 3: 296-301.
- Daniel D.E., Shan H.Y., and Anderson J.D. (1993). Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of a geosynthetic clay liner. *Proc. Geosynthetics '93, IFAI*, pp. 1483-1496.
- Dixon D.A., Graham J. and Gray M.N. 1999. Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. *Can. Geotech. J.* 36:815-825.
- Fleureau J.-M., Verbrugge J.-C., Huergo P.J., Correia A.G. and Kheirbek-Saoud S. 2002. Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Canadian Geotech. J.* 39: 1341-1357.
- Fredlund D.G., 2000. The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Can. geotech. J.* 37: 963-986.
- Geokeskus Oy, 2001. Julkaisematon tutkimuslöstus vuonna 2001 SYKelle tehdyistä määrittäyksistä. (Julkaistaan vuonna 2005).
- Grubb D.G. ja Condo D.P. 2002. Road salt migration across a stormwater detention basin liner. *Environmental geotechnics (4<sup>th</sup> ICEG)*, de Mello & Almeida (eds). Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Huag M.D., Barbour S.L. and Longval P. 1988. Design and construction of prehydrated sand-bentonite liner to contain brine. *Can. J. of Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 955-963.
- Jo H.Y., Katsumi T., Benson C.H., and Edil T.B. 2001. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, July 2001, pp.557-567.
- Lambe T.W. ja Whitman R.V., 1969. *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons.
- Lin L.-C. and Benson C. H., 2000. Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* / January 2000.
- Malusis M.A., and Shackelford C.D. 2002. Chemico-osmotic efficiency of a geosynthetic clay liner. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* / February 2002/.
- Malusis M.A., and Shackelford C.D. 2004. Predicting solute flux through a clay membrane barrier. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* / May 2004/.
- Marion G.M. 1995. Freeze-thaw processes and soil chemistry. Special report 95-12. US Army Corps of Engineers. Cold regions research & engineering laboratory.
- Mitchell J.K. *Fundamentals of soil behaviour*, John Wiley & Sons, 1993.
- Mitchell J.K. and Madsen F.T., 1987. Chemical effects on clay hydraulic conductivity. *Geotechnical practice for waste disposal '87*. Woods R.D. (ed.) ASCE Geotechnical special publication No. 13.
- Mollins L.H., Stewart D.I. and Cousens T.W. 1996. Predicting the properties of bentonite-sand mixtures. *Clay minerals* 31, 243-252.
- Perfect E., Groenevelt P.H., and Kay B.D. (1991). Transport phenomena in frozen porous media. In *Transport Processes in Porous Media*. Kluwer Academic Publishers.
- Petrov R.J. and Rove R.K. 1997. Geosynthetic clay liner compatibility by hydraulic conductivity testing: Factors impacting performance. *Can. Geotech. J.*, Vol. 34, No. 6.
- Petrov R.J., Rove R.K. and Qiugley R.M. 1997. Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. *J. of Geotech. And Geoenv. Engin., ASCE*, Vol. 123(8), pp. 683-695.
- Qiu G., Sheng W., Huang C., and Zheng K. 1998. Direction of ion migration during cooling and freezing processes. In *Proceedings 5<sup>th</sup> international conference of permafrost*. Tapir publishers, vol. 1, pp. 442-447.
- RIL 124. Vesihuolto. 1981. Suomen rakennusinsinöörien liitto.
- Rowe R.K. 1998. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. *Sixth Int. Conf. on Geosynthetics*.
- Rowe R.K. ja Badv K. 1996. Diffusion controlled and advective-diffusive contaminant migration through unsaturated coarse sand and fine gravel. *J. of Geotech. Engin., ASCE*, 122(12): 965-975.
- Rowe R.K. and Weaver T.R. 1997. Contaminant transport in groundwater. *Proc. of GeoEnvironment 97*, Bouazza, Kodikara & Parker (eds.). 1997 Balkema.
- Ruhl J.L. ja Daniel D.E. (1997) Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. *J. of Geotech. and Geoenv. Engin., ASCE*, 123(4), pp. 369-380.

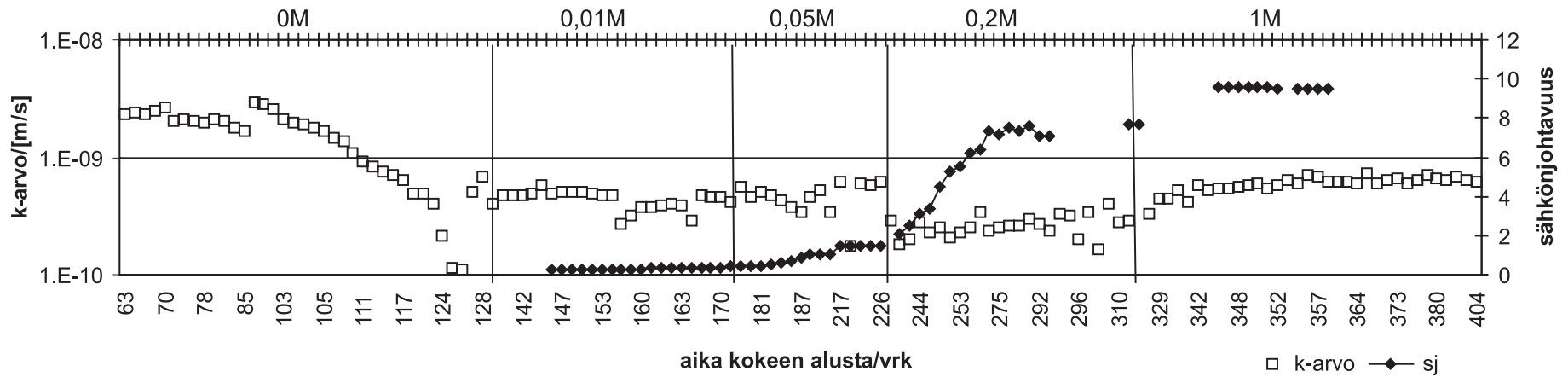
- Shackelford C.D., 1990. Transit-time design of earthen barriers. *Engineering Geology*, 29:79-94.
- Shackelford C.D. ja Rowe R.K., 1998. Contaminant transport modeling. *Environmental Geotechnics*, Vol. 3, pp. 939-956. Sêco e Pinto (ed.). Balkema, ISBN 90 5809 006 X.
- Shan H.-Y., ja Lai Y.-J. 2002. Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and geomembranes* 20 (2002) 19-38.
- Sharma H.D. and Lewis S.P. Waste containment systems, waste stabilization and landfills. Design and evaluation. John Wiley & Sons, 1994.
- Soveri U. & Hyyppä J.M.J. (1966). On the mineralogy of fine fractions of some finnish glacial tills. Helsinki.
- Studds P.G., Stewart D.I., Cousens T.W., 1998. The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures. *Clay Mineralogy* 33, 651-660.
- Tammirinne M., Juvankoski M., Leppänen M., Kaartokallio A., Ruohonen K., ja Virtanen P., 1999. Mineraalisten pohjavesisuojausten pitkäaikaistoimivuus. VTT Yhdyskuntatekniikka, tutkimusraportti 510.
- Tiehallinto 2001. Ympäristöraportti 2001, ISBN 951-726-889-0
- Tiehallinto 2004. Pohjaveden suojaus tien kohdalla, TIEH 2100028-04.
- van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. of America J.*, 44: 892-898.
- Yli-Kuivila, J., Kivimäki, A-L. & Kinnunen, T. 1993. Tiesuolaus ja pohjavedet. Nykytilan selvitys. Tielaitoksen selvityksiä 49/1993. 67 s. ISSN 0788-3722. ISBN 951-47-7691-7.
- Yong R.N., Osler J.C. and Janiga P.V. 1973. Some aspects of surficial salt treatment for attenuation of frost heaving. In *Permafrost: The North American contribution to the 2<sup>nd</sup> international conference of permafrost*. National academy of sciences, pp. 426-432.
- Yong R.N., Mohamed A.M.O., and Warkentin B.P. Principles of contaminant transport in soils. Elsevier, 1996.



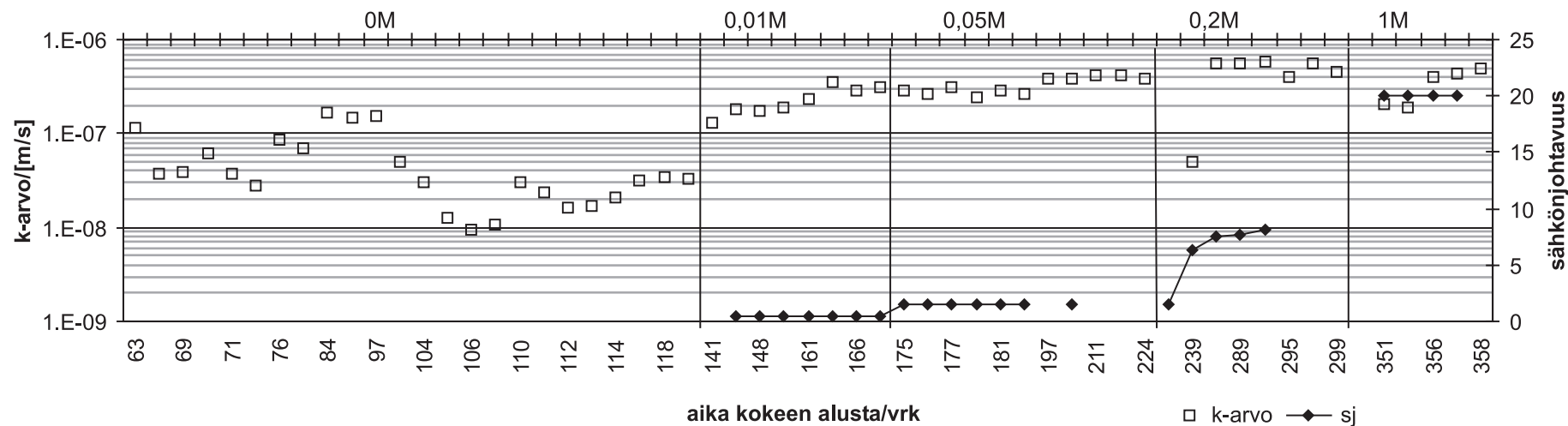
Näyte 4, matto aktivoidusta bentoniitista



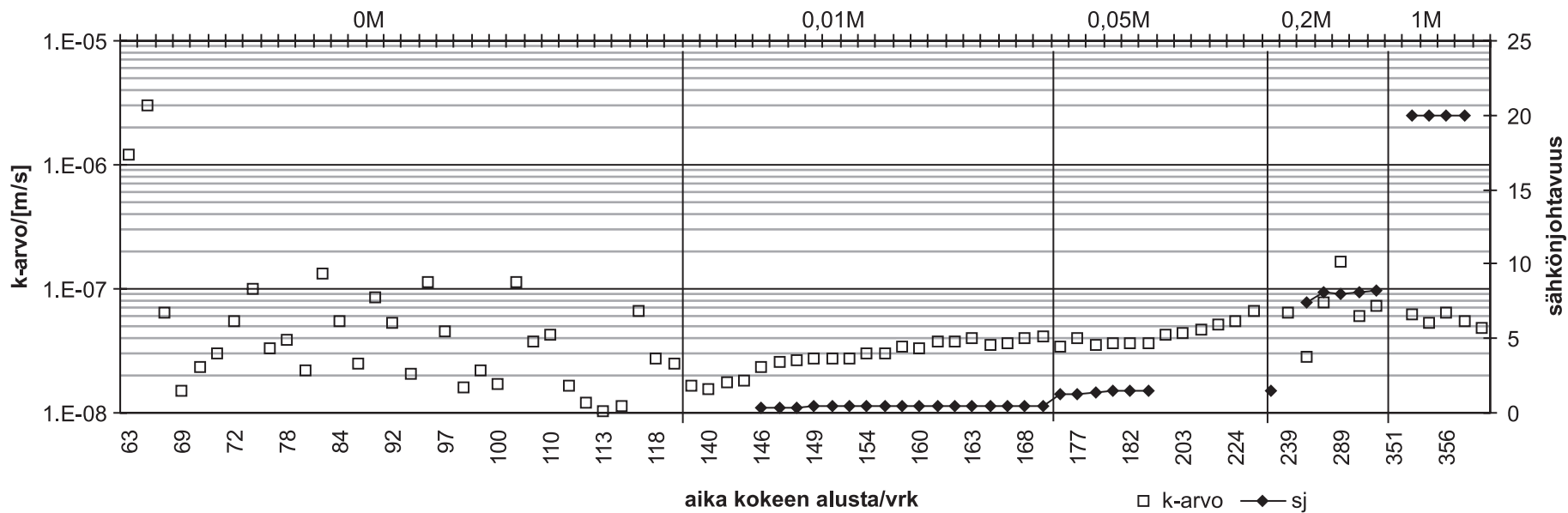
Näyte 6, matto aktivoidusta bentoniitista



Näyte 5, kalsiumbentoniittimatto

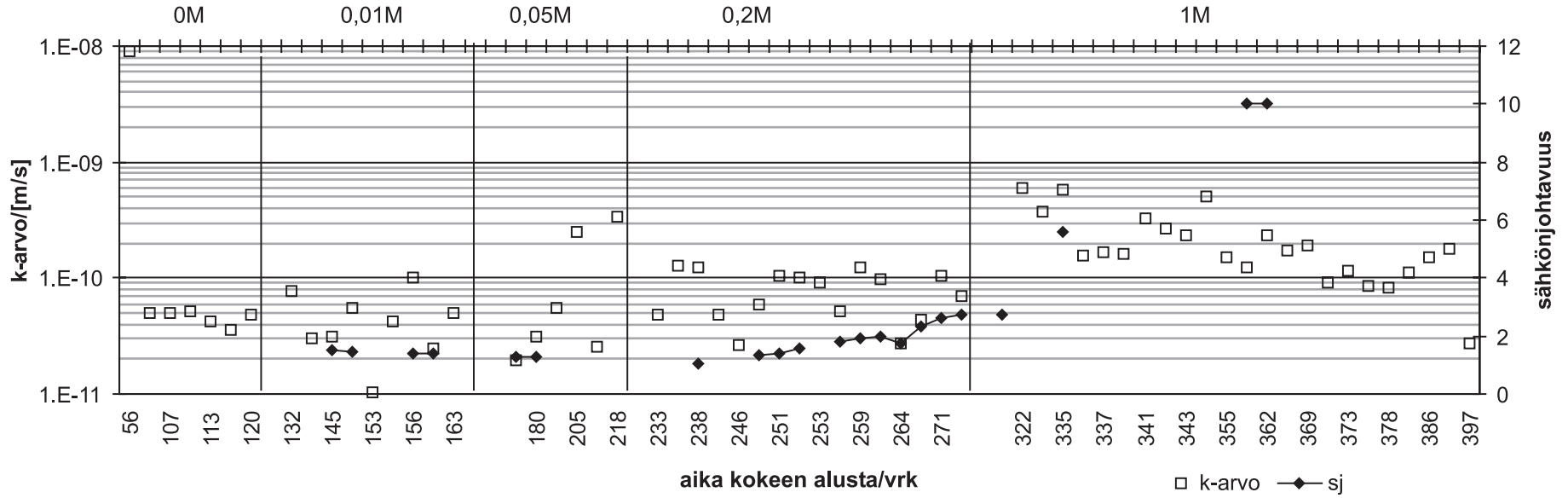


Näyte 13, kalsiumbentoniittimatto

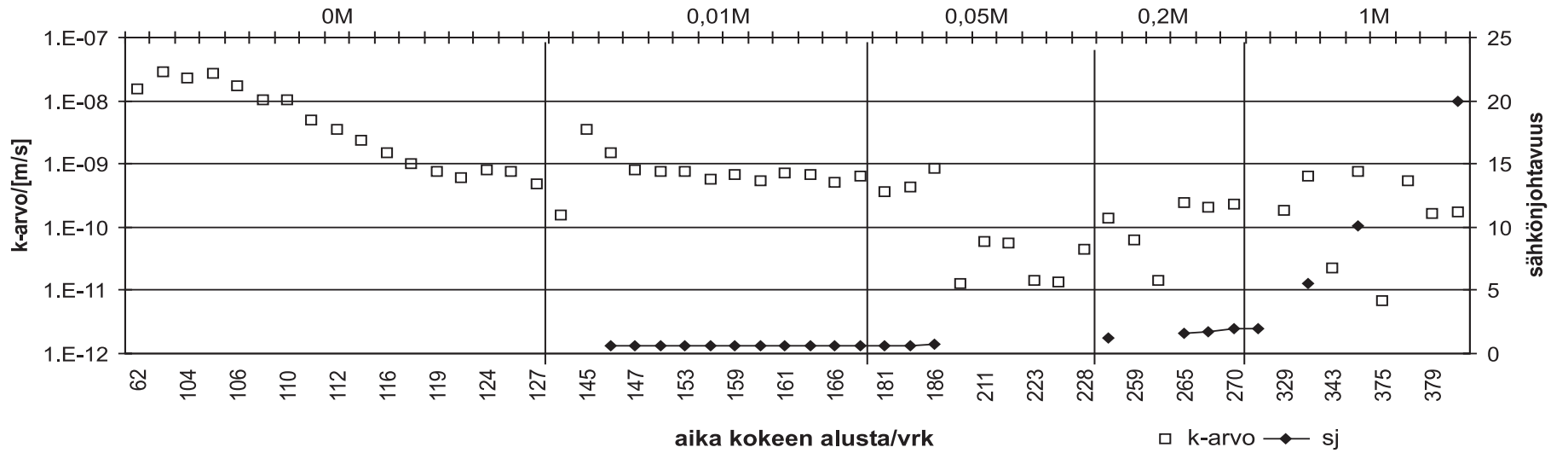




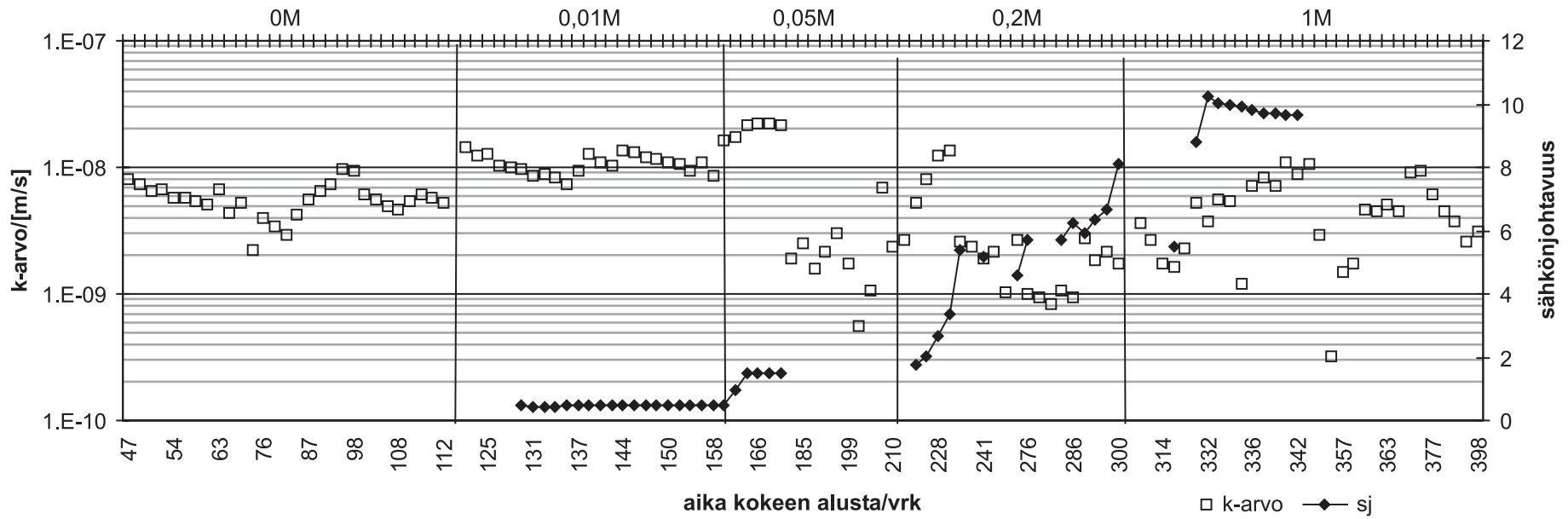
Näyte 8, Friedland -savi



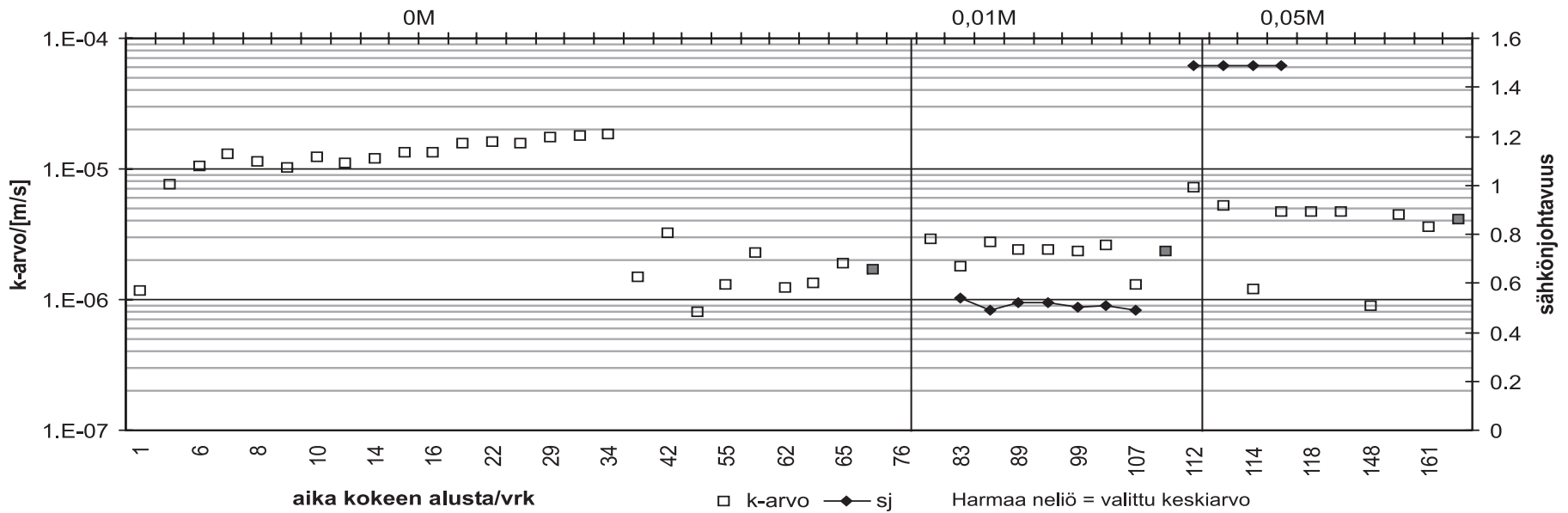
Näyte 11, murskebetoniitti 10%



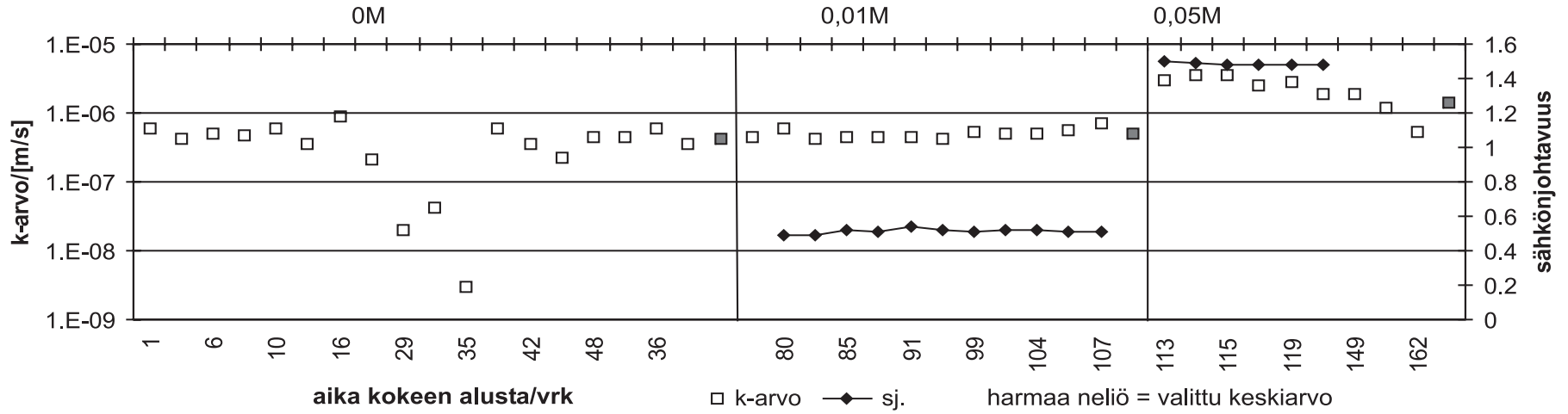
Näyte 9, moreenibentoniitti 4%



Näyte 7, kivituhkabentoniitti 4%



Näyte 12, kivituhkabentoniitti 4%



SELLI NRO	8	10	3	11	7	12	9	18	2	14	2	14	1	15	5	13	4	6	SELLI NRO		
MATERIAALI	Friedland -savi	Friedland -savi	Murskebentonitiitti	Murskebentonitiitti	kivituhkabentonitiitti	kivituhkabentonitiitti	moreenibentonitiitti	moreenibentonitiitti	suomal. savi	suomal. savi	suomal. savi	suomal. savi	Na-bent.	Na-bent.	Ca-bent.	Ca-bent.	Akt. bent.	Akt. bent.	MATERIAALI		
KIINTOTIHEYS [g/cm <sup>3</sup> ]	2.7	2.7	2.65	2.65	2.86	2.86	2.7	2.7	2.61	2.61	2.61	2.61	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	KIINTOTIHEYS [g/cm <sup>3</sup> ]		
MAX. KUIVATIL.PAINO [kN/m <sup>3</sup> ]	17.66	17.66	20.70	20.70	20.95	20.95	20.78	20.78	14.80	14.80	14.80	14.80							MAX. KUIVATIL.PAINO [kN/m <sup>3</sup> ]		
VESIPITOISUUS [%]	7.4	7.4	0	0	4.5	4.5	3.9	3.9	25.7	25.7	22.1	22.1	10	10	10	10	25.7	25.7	VESIPITOISUUS [%]		
HALUTTU VESIPITOISUUS [%]	18	18	10	10	10	10	8	8	25.7	25.7	22.1	22.1							HALUTTU VESIPITOISUUS [%]		
HALUTTU TIIVIYSASTE [%]	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90							HALUTTU TIIVIYSASTE [%]		
NÄYTTEEN HALKAISIJA D [mm]	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	395	NÄYTTEEN HALKAISIJA D [mm]		
NÄYTTEEN KORKEUS H [mm]	25	25	50	70	100	100	100	100	187	140	115	115	10	10	20	20	10	10	NÄYTTEEN KORKEUS H [mm]		
BENTONIITTIMÄÄRÄ [%]	0	0	10	10	4	4	4	4	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	BENTONIITTIMÄÄRÄ [%]		
KERROSMÄÄRÄ	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	3	3	1	1	1	1	1	1	KERROSMÄÄRÄ		
NÄYTTEEN TILAVUUS [dm <sup>3</sup> ]	3.06	3.06	6.12	8.57	12.25	12.25	12.25	12.25	22.90	17.15	14.09	14.09	1.22	1.22	2.45	2.45	1.22	1.22	NÄYTTEEN TILAVUUS [dm <sup>3</sup> ]		
KUIVA MASSAMÄÄRÄ [g]	4960.4	4960.4	11011.9	15416.7	23540.8	23540.8	23349.8	23349.8	33260.5	24945.4	22953.4	22953.4	556.7	556.7	890.8	890.8	341.0	341.0	KUIVA MASSAMÄÄRÄ [g]		
LUONNONKOSTEA MASSAMÄÄRÄ [g]	5327.5	5327.5	11011.9	15416.7	24600.1	24600.1	24260.4	24260.4	41808.5	31356.4	28026.1	28026.1	612.4	612.4	979.8	979.8	428.7	428.7	LUONNONKOSTEA MASSAMÄÄRÄ [g]		
VETTÄ LISÄTTÄVÄ [g]	525.8	525.8	1101.2	1541.7	1294.7	1294.7	957.3	957.3	0.0	0.0	0.0	0.0							VETTÄ LISÄTTÄVÄ [g]		
									17.4	17.4	17.4	17.4									
Märkätiheys [g/dm <sup>3</sup> ]	1911.6	1911.6	1978.0	1978.0	2114.2	2114.2	2058.9	2058.9	1825.4	1828.7	1989.8	1989.8	500.0	500.0	400.0	400.0	350.0	350.0	Märkätiheys [g/dm <sup>3</sup> ]		
Kuivatiheys [g/dm <sup>3</sup> ]	1620.0	1620.0	1798.2	1798.2	1922.0	1922.0	1906.4	1906.4	1452.2	1454.8	1629.6	1629.6	454.5	454.5	363.6	363.6	278.4	278.4	Kuivatiheys [g/dm <sup>3</sup> ]		
Märkätilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]	18.75	18.75	19.40	19.40	20.74	20.74	20.20	20.20	17.91	17.94	19.52	19.52	4.91	4.91	3.92	3.92	3.43	3.43	Märkätilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]		
Kuivatilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]	15.89	15.89	17.64	17.64	18.86	18.86	18.70	18.70	14.25	14.27	15.99	15.99	4.46	4.46	3.57	3.57	2.73	2.73	Kuivatilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]		
huokoisuus	0.4	0.4	0.32	0.32	0.33	0.33	0.29	0.29	0.44	0.44	0.38	0.38	0.83	0.83	0.87	0.87	0.90	0.90	huokoisuus		
huokosluku	0.67	0.67	0.47	0.47	0.49	0.49	0.42	0.42	0.80	0.79	0.60	0.60	4.94	4.94	6.43	6.43	8.70	8.70	huokosluku		
todellinen tiiviysaste [%]	90	90	85	85	90	90	90	90	82	82	92	92							todellinen tiiviysaste [%]		
k-arvo vesijohtovedellä	4.6E-11	3.1E-08	7.4E-08	6.8E-10	1.5E-06	4.3E-07	6.0E-09	2.2E-07	1.0E-06	1.1E-06	4.9E-10	2.0E-11	5.3E-10	2.9E-10	2.2E-08	4.4E-08	1.7E-10	3.8E-10	k-arvo vesijohtovedellä		
k-arvo 0,01M suolavedellä	4.7E-11	7.8E-08	6.6E-08	6.7E-10	2.3E-06	4.9E-07	1.1E-08	1.1E-07	9.9E-07	1.0E-06			2.9E-10	1.0E-11	2.6E-07	3.7E-08	9.4E-11	4.5E-10	k-arvo 0,01M suolavedellä		
k-arvo 0,05M suolavedellä	1.7E-10	2.6E-09	2.1E-09	1.4E-10	3.4E-06	9.6E-07	2.3E-09	4.3E-08	4.8E-07	3.4E-07			3.3E-11	5.3E-12	4.0E-07	4.4E-08	2.5E-10	6.0E-10	k-arvo 0,05M suolavedellä		
k-arvo 0,2M suolavedellä	7.8E-11			2.2E-10			1.7E-09						4.8E-11	1.7E-11	5.2E-07	7.2E-08	1.7E-10	2.8E-10	k-arvo 0,2M suolavedellä		
k-arvo 1M suolavedellä	1.3E-10			2.9E-10			5.3E-09						4.4E-10	8.0E-11	6.3E-11	2.7E-11	2.9E-07	6.3E-08	3.3E-10	6.4E-10	k-arvo 1M suolavedellä

# Kuvailulehti

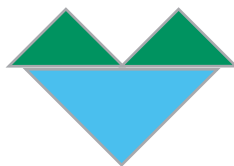
Julkaisija	Suomen ympäristökeskus (SYKE)	Julkaisu-aika Elokuu 2005
Tekijä(t)	Jyrki Hämäläinen, Juhani Gustafsson, Pasi Hellstén ja Taina Nystén	
Julkaisun nimi	Natriumkloridin vaikutus mineraalisten luiskansuojauksen vedenläpäisevyyteen	
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut	Julkaisu on saatavana myös Internetistä <a href="http://www.ymparisto.fi/julkaisut">www.ymparisto.fi/julkaisut</a>	
Tiivistelmä	<p>Tutkimuksessa on selvitetty alhaisen vallitsevan jännityksen sekä natriumkloridin vaikutusta mineraalisten tiivistysmateriaalien vedenläpäisevyyteen. Koejärjestelyissä pyrittiin simuloimaan teiden luiskasuojauksen olosuhteita jäykkäseinäisen kaksirengassellin avulla (ns. CUR -selli). Läpäisynesteenä käytettiin vesijohtovettä sekä neljää eri vahvuista natriumkloridiliuosta. Mittausjaksojen pituudet kullakin natriumkloridiliuoksella vaihtelivat välillä 30 – 250 vrk. Näytteiden kemiallisen fasapainon toteutumista seurattiin mittaamalla ulos tulevan veden sähkönjohtavuutta. Osalle materiaaleista määritettiin hydraulinen johtavuus myös pehmeäseinäisellä koejärjestelyllä.</p> <p>Paisumattoman luonnonsaven vedenläpäisevyys ei muutu läpäisyveden NaCl -konsentraation kasvaessa. Luonnonsaven tiivistyvyys ja saavutettava vedenläpäisevyysarvo riippuvat voimakkaasti saven työnaikaisesta vesipitoisuudesta. Sopiva tiivistysvesipitoisuusalue on kapea. Luonnonsavitiivistet tulee aina suojata jäätymiseltä ja kuivumiselta.</p> <p>Maabentoniittiseoksia käytettäessä tulee bentoniittimäärän mitoituksessa ottaa huomioon bentoniitin paisumiskyvyn heikkeneminen suolavedessä. Rakenne tulee tiivistää optimivesipitoisuutta kosteampana ja suojata kuivumiselta.</p> <p>Maasto-olosuhteissa tapahtuvaan massojen sekoittamiseen ja tiivistämiseen liittyy aina riskitekijöitä, jotka voivat johtaa rakenteen laadun paikalliseen vaihteluun. Bentoniittimattoja käytettäessä ovat kyseiset riskitekijät vähäisempiä. Bentoniittimattot eivät vaurioidu jäätymisen tai kuivumisen seurauksena, mutta vaurioituvat kuivumisen ja ioninvaihdon vaikuttaessa samanaikaisesti.</p> <p>Tutkimuksen mukaan bentoniittimattot toimivat hyvin natriumkloridista huolimatta. Käytetyssä koejärjestelyssä natriumkloridi jopa alensi natriumbentoniitin hydraulista johtavuutta. Aktivoidun bentoniitin hydraulinen johtavuus oli lähes vakio koko testatulla natriumkloridin konsentraatio-alueella. Tuloksia voidaan selittää joko osmoottisesta paineesta tai veden poistumisesta johtuvalla bentoniitin konsolidoitumisella.</p> <p>Bentoniittimattojen mittaustulokset erosivat kirjallisuudessa raportoiduista arvoista. Eroja voidaan selittää käytettyjen koejärjestelyjen eroilla. Kirjallisuudessa raportoidut kokeet on pääsääntöisesti tehty käyttäen yksinkertaista jäykkäseinäistä selliä tai kolmiakσιαalilaitteistoa. Tässä tutkimuksessa käytetyn kaksirengassellin merkittävin etu kolmiakσιαalilaitteistoon nähden on mahdollisuus käyttää alhaista tehokasta jännitystä ja yksinkertaiseen jäykkäseinäiseen laitteistoon nähden mahdollisuus eliminoida vuodot sellin reunalla. Lisäksi tässä tutkimuksessa näytteen alapuolinen hiekka oli kokeiden aikana kyllästymättömässä tilassa.</p>	
Asiasanat	vedenläpäisevyys, mineraalinen tiiviste, bentoniitti, bentoniittimatto, tiesuola, kloridi, talvikunnossapito, tiet, ympäristövaikutukset, veden laatu, pohjavesi	
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristö 775	
Julkaisun teema	Ympäristönsuojelu	
Projektihankkeen nimi ja projektinumero	A06038	
Rahoittaja/ toimeksiantaja	Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy, Posiva Oy, Tiehallinto, Tieliikelaitos ja ympäristöministeriö	
Projektiryhmään kuuluvat organisaatiot		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-2012-6
	Sivuja 77	Kieli Suomi
	Luottamuksellisuus Julkinen	Hinta 13 e
Julkaisun myynti/ jakaja	Edita Publishing Oy, PL 800, 00043 Edita, vaihde 020 450 00 Asiakaspalvelu: puh. 020 450 05, telefax 020 450 2380 Sähköposti: <a href="mailto:asiakaspalvelu@edita.fi">asiakaspalvelu@edita.fi</a> , <a href="http://www.edita.fi/netmarket">www.edita.fi/netmarket</a>	
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus, PL 140, 00251 Helsinki	
Painopaikka ja -aika	Edita Prima Oy, Helsinki 2005	

# Presentationsblad

Utgivare	Finlands miljöcentral (SYKE)	Datum Augusti 2005	
Författare	Jyrki Hämäläinen, Juhani Gustafsson, Pasi Hellstén och Taina Nystén		
Publikationens titel	Effekten av natriumklorid på vattenpermeabiliteten hos minerala grundvattenskydd av vägslänter		
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt	Publikationen finns tillgänglig också på internet <a href="http://www.ymparisto.fi/julkaisut">www.ymparisto.fi/julkaisut</a>		
Sammandrag	<p>I undersökningen utreddes effekten av en rådande låg spänning samt natriumklorid på vattenpermeabiliteten hos minerala tätskiktmaterial. I experimentförhållandena försökte man simulera förhållandena i grundvattenskydd av vägslänter med hjälp av en dubbelringcell med stela väggar (sk. CUR-cell). Som experimentvätska användes kranvatten och fyra natriumklorid-lösningar av olika styrka. Mätningstiderna för varje natriumkloridlösning varierade mellan 30 och 250 dygn. Hur proven erhöi sin kemiska balans följdes upp genom att mäta det utgående vattnets elkonduktivitet. För en del av materialen bestämdes konduktiviteten också med mjukväggiga celler.</p> <p>Vattenpermeabiliteten hos osvullbar naturlera ändras inte när experimentvätskans NaCl-koncentration ökar. Hur låg permeabilitet man erhåller med ett dylikt material beror på lerans vattenhalt. Det lämpliga kompakteringsvattenkvotsområdet är smalt. Grundvattenskydd av naturlera skall alltid skyddas för frysning och uttorkning. När man använder sandbentonit skall man vid dimensioneringen av bentonitmängden ta i beaktande att bentoniten förlorar svällningsförmåga i saltvatten. Sandbentoniten skall kompakteras under högre än optimal vattenkvot och skyddas för uttorkning.</p> <p>När massor blandas och sammanpressas i terrängförhållanden uppkommer alltid riskfaktorer som kan leda till en lokal variation i texturen. När man använder bentonitmattor är ifrågavarande risker mindre. Bentonitmattorna tar ingen skada av frysning eller torkning, men skadas om torkning och jonväxling sker samtidigt.</p> <p>Enligt undersökningen fungerar bentonitmattorna bra trots natriumkloriden. Natriumkloriden till och med sänkte natriumbentonitens hydrauliska ledningsförmåga. Den hydrauliska ledningsförmågan hos aktiverad bentonit var nästan konstant med alla koncentrationer av natriumklorid. Resultaten förklarar av att bentoniten pressas samman av det osmotiska trycket som saltkoncentrationen medför.</p> <p>Bentonitmattornas mättningsresultat skiljde sig från värdena i litteraturen. Skillnaderna kan förklaras med olika experimentuppsättning. De i litteraturen rapporterade experimenten har till största delen gjorts med treaxialapparat eller med apparatur med stela väggar.</p>		
Nyckelord	permeabilitet, mineral tätskiktmaterial, bentonit, bentonitmatt, vägsalt, klorid, vinterunderhållning, väg, naturpåverkan, vattenkvalitet, grundvatten		
Publikationsserie och nummer	Miljön i Finland 775		
Publikationens tema	Miljövärd		
Projektets namn och nummer	A06038		
Finansär/ uppgångsgivare	Lohja Rudus Ab, Miljöministeriet, Posiva Ab, Vägaffarsverket och Vägförvaltningen		
Organisationer i projektgruppen			
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-2012-6	ISBN 952-11-2013-4 (PDF)
	Sidantal 77	Språk Finska	
	Offentlighet Offentlig	Pris 13 e	
Beställningar/ distribution	Edita Publishing Ab, PB 800, FIN-00043 Edita, Finland, växel 020 450 00 Postförsäljningen: Telefon +358 20 450 05, telefax +358 20 450 2380 Internet: <a href="http://www.edita.fi/netmarket">www.edita.fi/netmarket</a>		
Förläggare	Finlands miljöcentral, PB 140, 00251 Helsingfors, Finland		
Tryckeri/ tryckningsort och -år	Edita Prima Ab, Helsingfors 2005		

# Documentation page

Publisher	Finnish Environment Institute (SYKE)	Date	August 2005
Author(s)	Jyrki Hämäläinen, Juhani Gustafsson, Pasi Hellstén and Taina Nystén		
Title of publication	Sodium chloride and the permeability of mineral barriers used to protect ground water from highway runoff		
Parts of publication/ other project publications	This publication is also available in the Internet <a href="http://www.ymparisto.fi/julkaisut">www.ymparisto.fi/julkaisut</a>		
Abstract	<p>The effect of sodium chloride and a low confining stress on the permeability of mineral barriers was investigated. A fixed double-ring cell (Dutch CUR -cell) was used to simulate the real groundwater protection structures used alongside highways in Finland. Tap water and 0.01M, 0.05M, 0.2M and 1M sodium chloride were used as a permeant. The experiments with one permeant lasted from 30 to 250 days. Electrical conductivity was measured from the out-flowing water to confirm the geochemical equilibrium. The hydraulic conductivity of selected materials was determined also using flexible wall method (ASTM D 5084).</p> <p>The water permeability of non-swelling illitic clay did not change along increasing sodium chloride concentration. However, the permeability was very sensitive to the initial water content of a natural clay at the time of compaction. The optimal water content with low variation has to be used to achieve a recommended low permeability value. Moreover, natural clay barriers should always be protected from freezing and desiccation.</p> <p>The reducing swelling of bentonite when moistened with salt water should be taken into consideration when soil bentonite mixtures are used. Soil bentonite should be compacted slightly wet of optimum. Soil bentonite needs to be protected from desiccation.</p> <p>When materials are mixed and compacted in real field conditions there is always a risk of nonconsistency. One means to avoid variation in the quality is to use geosynthetic clay liners (GCL). GCLs are resistant to freezing and desiccation, while simultaneous desiccation and ion exchange reactions can damage the self healing capacity of bentonite.</p> <p>Sodium chloride solutions did not have any major harmful on the permeability of GCLs with sodium or activated bentonite. In the experiments with sodium bentonite and sodium chloride the permeability of sodium bentonite even decreased after sodium chloride addition. The permeability of activated bentonite remained constant with all sodium chloride concentrations tested probably due to osmotic pressure or water migration by chemical osmosis.</p> <p>GCL results differed from the results published earlier. Most of the former studies have been conducted using the fixed ring or flexible wall apparatus. With the fixed double-ring cell used in our experiments a very small confining pressure can be used and preferential flow paths along cell walls can be avoided. Moreover, in our setup the sand below a sample was kept unsaturated throughout the experiments.</p>		
Keywords	water permeability, mineral liner, bentonite, GCL (Geosynthetic Clay Liner), chloride, road salt, roads, winter maintenance, environmental impacts, ground water		
Publication series and number	The Finnish Environment 775		
Theme of publication	Environmental protection		
Project name and number, if any	A06038		
Financier/ commissioner	Finnish Road Administration, Finnish Road Enterprise, Lohja Rudus Ltd, Ministry of the Environment and Posiva Ltd		
Project organization			
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-2012-6	ISBN 952-11-2013-4 (PDF)
	No. of pages 77	Language Finnish	
	Restrictions Public	Price 13 e	
For sale at/ distributor	Edita Publishing Ltd., P.O.Box 800, 00043 Edita Finland, Phone +358 20 450 00 Mail orders: Phone +358 20 450 05, telefax +358 20 450 2380 Internet: <a href="http://www.edita.fi/netmarket">www.edita.fi/netmarket</a>		
Financier of publication	Finnish Environment Institute, P.O.Box 140, FIN-00251 Helsinki, Finland		
Printing place and year	Edita Prima Ltd., Helsinki 2005		



## YMPÄRISTÖN- SUOJELU

### Natriumkloridin vaikutus mineraalisten luiskasuojausten vedenläpäisevyyteen

Valtaosa Suomen teiden pohjavesisuojauksista on rakennettu käyttäen mineraalisia tiivistysrakenteita. Viime aikoina on etenkin bentoniittimattojen käyttö lisääntynyt. Liukkaudentorjuntaan käytetään Suomen maanteillä pääosin natriumkloridia, mutta myös jonkin verran kalsiumkloridia. Aiempien tutkimustulosten perusteella epäiltiin bentoniittirakenteiden pitkäaikaista kykyä estää kloridin kulkeutumista, koska huokosveden elektrolyyttikonsentraatio vaikuttaa bentoniitin paisumisominaisuuksiin.

Tässä tutkimuksessa testattiin suomalaista illiittistä savea, saksalaista seoshilasavea, moreeni-, kivituhka- ja murskebentoniittiseosta sekä kolme erilaista bentoniittimattoa, joissa edustettuina olivat kalsiumbentoniitti, aktivoitu kalsiumbentoniitti ja natriumbentoniitti. Läpäisevyyksikokeissa käytettiin vesijohtovettä sekä neljää eri väkevystä natriumkloridiliuosta: 0,01M, 0,05M, 0,2M ja 1M. Natriumkloridista huolimatta osa testatuista tiivistysmateriaaleista toimi hyvin pitkäaikaisissa pilotmittakaavan rasituskokeissa.

Koejärjestelyissä haluttiin jäljitellä mahdollisimman tarkasti luiskasuojausrakenteen mekaanisia toimintaolosuhteita. Mineraalisten tiivistysrakenteiden vedenläpäisevyyden testaamiseen laboratoriossa on aiemmin käytetty yleisimmin joustavaseinäistä koejärjestelyä, jäykkäseinäistä koejärjestelyä (ödometri) ja harvoin kaksoisrengasselliä. Tässä tutkimuksessa käytettiin kaksoisrengasselliä, koska haluttiin jäljitellä todellisia erittäin alhaisia kuormituspaineita sekä välttää mahdollisen koekappaleiden kutistumisen aiheuttamat seinämävuodot.

Julkaisu on saatavissa myös Internetistä:

[www.ymparisto.fi/julkaisut](http://www.ymparisto.fi/julkaisut)

ISBN 952-11-2012-6

ISBN 952-11-2013-4 (PDF)

ISSN 1238-7312

Edita Publishing Oy

PL 800, 00043 EDITA, vaihde 020 450 00

Asiakaspalvelu:

puhelin 020 450 05, faksi 020 450 2380

Edita-kirjakauppa Helsingissä:

Annankatu 44, puhelin 020 450 2566