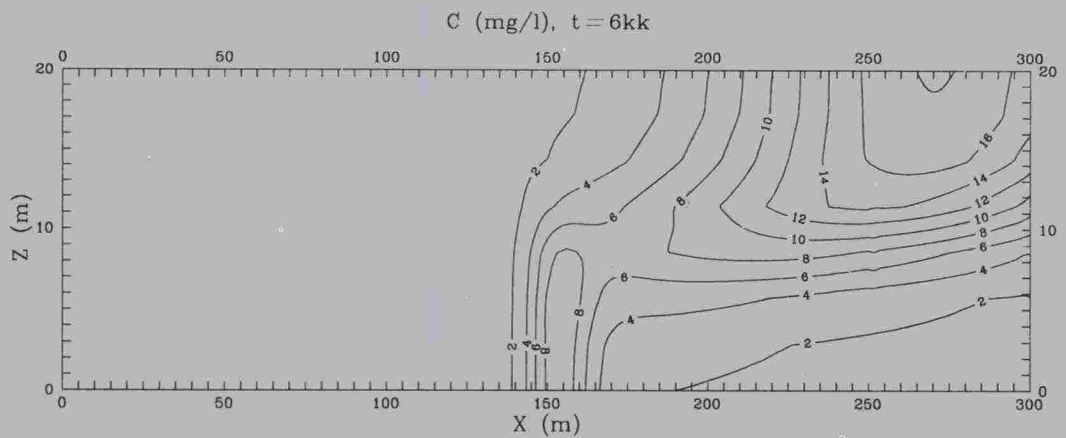
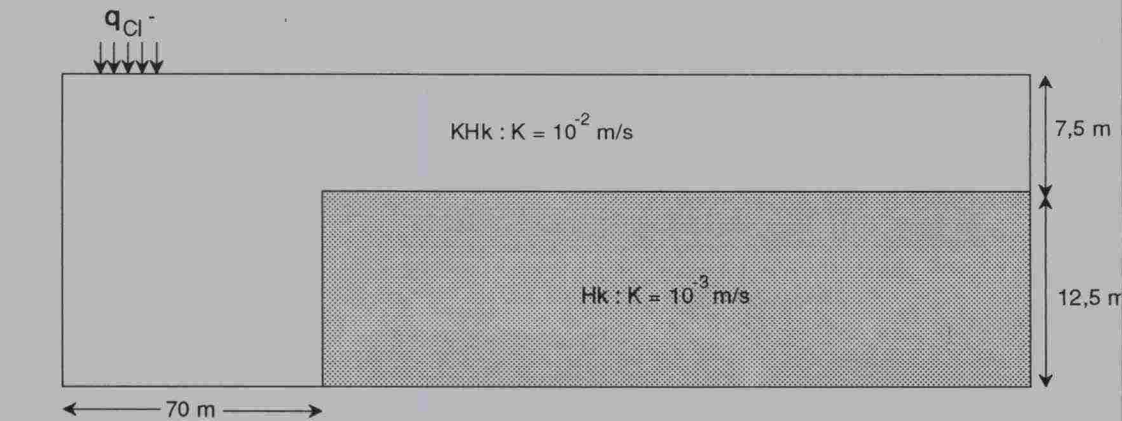


Tiesuolan pohjavesivaikutukset - kulkeutumismekanismien moni-ilmiö- mallinnus



Tielaitoksen selvityksiä
65/1993

Terhi Kling, Auli Niemi, Veijo Pirhonen

**Tiesuolan pohjavesivaikutukset -
kulkeutumismekanismien moni-ilmiö-
mallinnus**

Tielaitos
Keskushallinto

Helsinki 1993

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-8114-7
TIEL 3200190
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1993

Julkaisua myy:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotemyynti
Telefax (90) 1487 2652

Tielaitos
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

Asiasanat: tiesuola, pohjavesi, kulkeutuminen, kytketty malli, geokemiallinen malli

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa tarkastellaan tiesuolan kulkeutumista pohjavedessä yleisellä tasolla. Tavoitteena on saada suuruusluokkatietoa leviämiseen vaikuttavien osatekijöiden (advektio, dispersio, tiheysvaikutus, ioninvaihto) merkittävydestä erilaisissa olosuhteissa. Tarkasteluihin käytetään monipuolisia matemaattisia malleja, joilla voidaan arvioida eri ilmiöiden vaikutuksia mahdollisimman realistisesti. Tuloksia voidaan käyttää apuna paikkakohtaisia tutkimuksia suunniteltaessa ja tutkimusten tuloksia tulkittaessa, sekä yhdessä muiden rinnakkaisten tutkimusten kanssa arvioitaessa suolauksen pitkäaikaisvaikutuksia.

Suolan etenemisnopeuksia erilaisissa tyyppimaalajeissa arvioitiin kirjallisuudessa esitettyjen, aiempiin suomalaisiin ja ulkomaisiin tutkimuksiin perustuvien maaperän ominaisuuksien avulla. Eri ominaisuuksien, kuten maaperän ominaisvedenjohtavuuden, huokoisuuden ja dispersiivisyyden, suhteellista merkitystä suolan kulkeutumiseen arvioitiin muuttamalla yhtä ominaisuutta kerrallaan kyseeseen tulevissa vaihtelurajoissa. Oleellisesti suolan etenemiseen vaikuttaa maaperän ominaisvedenjohtavuus. Huokoisuuden vaikutus kulkeutumiseen on huomattavasti vähäisempi. Dispersiivisyys ei vaikuta pitoisuusmaksimin etenemisnopeuteen, mutta vaikuttaa sen suuruuteen sekä siihen, kuinka laajalla alueella pitoisuudet nousevat. Samaa lähestymistapaa sovellettiin pohjaveden pinnan kaltevuuden ja suolauksen jaksollisuuden vaikutusten arviointiin.

Pohjavesien suolaantumisen kannalta ongelmallisin on tilanne, jossa tie seuraa harjujaksoa. Tällöin pohjavesialueeseen kohdistuva suolakuormitus on suhteellisesti suurempi kuin tien kulkiessa muodostuman poikki. Tilanteiden vertaamiseksi suolan leviämistä simuloitiin esimerkkiharjumuodostumassa. Tien kulkiessa harjun suuntaisesti simuloitujen pitoisuuksien olivat korkeimmillaan harjun alavirran puoleisessa päässä yli kymmenkertaiset verrattuna tilanteeseen, jossa tie kulkee harjun pokki.

Veden tiheyden kasvu suolapitoisuuden seurauksena saattaa joissakin tilanteissa aiheuttaa suolapitoisen veden painumista pohjavesimuodostumassa. Painumisen esiintymistä tutkittiin simuloimalla suolan käyttäytymistä 24 erilaisessa virtaustilanteessa. Painumisen havaittiin olevan todennäköisintä hyvin vettä johtavissa maalajeissa, kun pohjaveden pinnan kaltevuus on hyvin pieni. Kun pohjaveden pinnan kaltevuus kasvaa, kasvavat myös virtausnopeudet, eikä painumista tapahdu. Huonommin vettä johtavissa maalajeissa painumisen mahdollisuus pienenee syvyysuuntaisen vedenjohtavuuden pienentyessä, mutta kasvaa toisaalta virtauksen hidastuessa. Tien ollessa virtauksen

suuntainen painumisen mahdollisuus kasvaa sitä suuremmaksi, mitä pitemmän matkan tie kulkee pohjavesimuodostuman imeytymisalueella. Mahdollisia tiheysvaikutuksia tarkasteltiin myös Salpausselkään kuuluvan Joutsenonkankaan pohjavesimuodostuman poikkileikkauksessa.

Maaperän kerroksellisuuden vaikutusta tutkittiin simuloimalla suolan kulkeutumista erilaisissa tyyppipoikkileikkauksissa. Kun maakerrosten vedenjohtavuudet poikkeavat toisistaan, ovat myös kloridin etenemisnopeudet näissä maakerroksissa erilaiset. Suurin osa kloridista kulkeutuu parhaiten vettä johtavissa kerroksissa, mutta nämä kerrokset myös puhdistuvat nopeammin. Kerroksellisuus aiheuttaa siis erilaisten suolapitoisuuksien esiintymistä eri syvyyksillä. Esimerkiksi syvemmällä pohjavesimuodostumassa esiintyvä korkeampi suolapitoisuus voi tämän perusteella aiheutua maaperän kerroksellisuudesta.

Tiesuola (NaCl) koostuu kahdesta kemiallisesti erilaisesta komponentista. Kloridi on käytännössä reagoimaton, kun taas osa natriumista pidättyy maaperään ioninvaihdon seurauksena. Natriumin ja kloridin erilaisen geokemiallisen käyttäytymisen simuloimiseksi sovellettiin tarkasteluun myös kytkettyä geohydrokemiallista mallinnusta. Natriumin pidättyminen voitiin havaita tuloksissa lyhyellä aikavälillä. Lähestymistapaa voidaan käyttää mm. monilähdetapausten arvioimisessa. Luotettavien tulosten saaminen edellyttää kuitenkin hyviä tietoja maaperän mineraalikoostumuksesta ja pohjaveden kemiallisesta koostumuksesta.

Keywords: road salt, groundwater, transport, coupled model, geochemical model

SUMMARY

In this study, the potential groundwater contamination due to salt from highway de-icing is studied by means of numerical modeling. The objective is to understand the magnitude of subprocesses affecting the spreading of contamination, namely advection, dispersion, density effects and ion exchange. In the simulations soil parameters are varied in the range encountered in the Finnish groundwater formations, but site-specific studies are not carried out. In order to get a realistic description of the various interacting phenomena, coupled models are used that take into account 1) coupling between transport and flow (density dependent transport) and 2) coupling between geochemical equilibria and transport (coupled geohydrochemical models).

Average linear velocities for the contaminant are determined for various examples of soil types based on parameter values documented in the literature. Other factors affecting contamination spread are evaluated through sensitivity studies by systematically varying the different formation parameters. The advection velocity is most sensitive to formation permeability as this may vary by orders of magnitude. The effect of porosity is much smaller. Dispersivity does not affect the velocity by which the concentration maximum advances, but has an effect both on concentrations observed and on the areal spread of the contaminant. Effects of hydraulic gradient, seasonal variation of road salting and salt infiltration rate are also estimated.

It has been proposed that increased salt concentrations may increase the density of water enough to cause it to sink and be deposited on the bottom of the aquifer. This possibility was studied by means of density dependent transport modeling, by simulating the salt transport in different flow scenarios. Essential parameters which were systematically varied were the hydraulic gradient and formation permeability. The risk was found to be highest with high permeabilities and small hydraulic gradients. With increasing gradients the velocities increase and sinking no longer occurs. With low permeabilities the risk is reduced due to lower vertical permeabilities but increased due to lower horizontal flow velocities. The density effects were also studied in a vertical cross-section of the Joutsenonkangas aquifer in the Salpausselkä terminal moraine.

In case of salt pollution from highways the situation is most critical when the road follows rather than runs across an esker formation. A comparison simulation was carried out to estimate quantitatively this effect in a typical

formation were found to be even ten times higher than for a road crossing the esker formation.

The effect of vertical heterogeneity was studied by simulating salt transport in different vertical cross-sections. The results demonstrate the effect of permeability contrasts on the transport process. Flow velocities differ with different permeabilities. While most of the chloride is transported in the high permeability layers, these layers are also cleaned faster, and different concentrations can be observed at different depths depending on the time of observation. For example, higher concentrations in the lower parts of the aquifer are not necessarily due to sinking of the denser saline water, but they can also be due to vertical permeability contrasts.

Road salt (NaCl) has two chemically different components. Chloride is practically non-reactive, but part of the sodium may be absorbed in the soil due to ion exchange. To simulate the difference in behavior of the two components, a coupled geohydrochemical model was used. This approach can also be used in multi-source-evaluations where several potential pollutants exist. However, to get reliable results good knowledge about the mineral composition of the soil and chemical composition of the groundwater are essential.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on osa vuonna 1992 käynnistettyä tutkimusohjelmaa tiesuolan pitkäaikaisten pohjavesivaikutusten selvittämiseksi. Tutkimus toteutetaan tielaitoksen, vesi- ja ympäristöhallituksen sekä Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen yhteistyönä. Tavoitteena on saada kvantitatiivista tietoa suolan käytön strategioiden pohjaksi. Tutkimusohjelma tuottaa myös tietoa ja toimintatapoja, joilla kohdekohtaisesti voidaan arvioida suolan vaikutuksia pohjavesiin.

Tutkimusohjelma jakaantuu kahteen osaan, kahden todellisen kohteen mallintamiseen (VYH) ja erilaisten puoliteoreettisten tyyppitilanteiden simulointeihin (VTT). Ohjelman sisältämien osatutkimusten tulokset ja niistä tehtävät johtopäätökset tullaan kokoamaan erilliseen loppuraporttiin.

Tässä raportissa esitetään tutkimusohjelman simulointiosuuden ensimmäisen vaiheen tulokset. Seuraavassa vv. -93-94 toteutettavassa jatko-osassa tarkasteluja laajennetaan edustavien tyyppipohjavesimuodostumien tarkasteluun.

Tutkimus on tehty tielaitoksen toimeksiannosta ja rahoittamana VTT:n Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratoriossa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus on rahoittanut projektia siinä sovellettujen numeeristen mallien käyttöönoton osalta.

Tutkija Terhi Kling ja erikoistutkija Auli Niemi ovat vastanneet projektin fysikaalishydrologisista mallinnustutkimuksista ja erikoistutkija Veijo Pirhonen sen geokemiaan liittyvistä osista. Tielaitoksen puolelta projektin yhteyshenkilöinä ovat toimineet DI Olli Penttinen ja DI Anne Leppänen. Vesi- ja ympäristöhallituksen yhteyshenkilönä on toiminut fil.tri. Esa Rönkä. VTT:n yhteyshenkilönä on toiminut erikoistutkija Auli Niemi.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	14
2	SUOLAN KULKEUTUMISEN PERUSMEKANISMIT	14
3	LASKENTAMALLIT	16
3.1	Kytetty mallinnus	16
3.2	Käytetyt virtaus- ja kulkeutumismallit (HST2D ja HST3D)	16
3.3	Käytetty geohydrokemiaallinen malli (PHREEQM-2D)	16
4	SUOLAPITOISUUDELTAAN VAIHTELEVAN POHJAVEDEN VIRTAAUKSEN MALLINNUS - AIKAISEMMAAT KANSAINVÄLISEET TUTKIMUKSET	17
5	ERI MALLINNUSLÄHESTYMISTAPOJEN VERTAILU	19
5.1	Esimerkkitapaus: Suolapulssin eteneminen vedellä kyllästyneessä hiekassa	19
5.2	Analyttinen ja numeerinen ratkaisu pulssin etenemisnopeudelle	20
5.3	Syvyyskomponentin huomioonottamisen merkitys	22
5.4	Viskositeetti- ja tiheysriippuvuuden merkitys	24
6	SUOLAPULSSIN ETENEMINEN ERI MAALAJEISSA	26
7	ERI PARAMETRIEN JA REUNAehtoJEN VAIKUTUS SUOLAN KULKEUTUMISEEN	28
7.1	Maaperän ominaisvedenjohtavuuden vaikutus	28
7.2	Maaperän huokoisuuden vaikutus	29
7.3	Dispersiivisyyden vaikutus	30
7.4	Hydraulisen gradientin vaikutus	31
7.5	Suolauksen jaksollisuuden ja suolan imeytymisnopeuden vaikutus	32
8	MAAPERÄN KERROKSELLISUUDEN VAIKUTUS SUOLAN KULKEUTUMISEEN	33
9	KALLIOKYNNYKSEN VAIKUTUS KULKEUTUMISEEN	40
10	SUOLAPITOISEN VEDEN PAINUMINEN POHJAVESIMUODOSTUMASSA	43
10.1	Lähestymistapa ja simuloinnit	43
10.2	Johtopäätökset	44
11	TIEN SIJAINNIN VAIKUTUS KLOORIDIN KULKEUTUMISEEN HARJUSSA OLEVASSA POHJAVESIMUODOSTUMASSA	46

11.1	Konseptuaalinen malli	46
11.2	Tie kulkee harjun suuntaisesti	47
11.3	Tie kulkee harjun poikki	48
12	KLORIDIN KULKEUTUMISEN SIMULOINTI JOUTSENONKANKAAN POHJAVESIMUODOSTUMAN POIKKILEIKKAUKSESSA	49
12.1	Mallinnettava kohde	49
12.2	Käytetty konseptuaalinen ja numeerinen malli	51
12.3	Simuloinnit	52
12.4	Johtopäätökset	54
13	GEOKEMIALLINEN MALLINNUS	55
13.1	Yleistä	55
13.2	Ioninvaihto ja sen mallintaminen	56
13.3	Yhdistetyn mallin soveltuvuus tiesuolatarkasteluun	58
13.4	Sovellutus Joutsenonkankaan aineistolla	63
	13.4.1 Lähtötiedot, konseptuaalinen malli ja reunaehdot	63
	13.4.2 Tulokset	63
	13.4.3 Johtopäätökset	67
14	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	67
14.1	Taustaa	67
14.2	Simulointien tulokset	68
15	KIRJALLISUUSLUETTELO	72
16	LIITTEET	74

LIITE 1: Yhtälöiden kytkennässä käytetyt fysikaaliset riippuvuudet

LIITE 2: Painumissimulointien tulokset

LIITE 3: Harjun helma-alue: Simuloinneissa käytetyt harjuveden ja suolaa sisältävän sadeveden kemialliset koostumukset

LIITE 4: Joutsenonkangas: Simuloinneissa käytetyt pohjaveden ja suolaa sisältävän sadeveden kemialliset koostumukset

POHJAVEDEN VIRTAAUKSEN JA LIUENNEEN AINEEN KULKEUTUMISEN MALLINNUKSEEN LIITTYVIÄ MÄÄRITELMIÄ (Airaksinen 1978, Freeze & Cherry 1979, de Marsily 1986)

Analyttinen malli. Mallinnettavaa ilmiötä kuvataan matemaattisilla yhtälöillä, jotka ratkaistaan tarkasti eli analyttisesti.

Anisotrooppinen. Huokoinen väliaine on anisotrooppinen, mikäli jokin sen ominaisuus, esim. vedenjohtavuus, on suunnasta riippuvainen.

Diffuusio. Ioni- ja molekyylitaso kineettisestä aktiviteetista aiheutuva aineen leviäminen pitoisuusgradientin suuntaan eli korkeamman pitoisuuden pisteestä alemman pitoisuuden pisteeseen.

Dispersio. Liuoksen ja liuenneen aineen hajaantumista nesteeseen virratessa huokoisessa väliaineessa. Dispersio koostuu diffuusiosta ja mikrokooppisten virtausnopeuksien eroista huokosissa eli mekaanisesta dispersiosta.

Gradientti. Fysikaalisen suureen muutos pituusyksikköä kohti. Esimerkiksi hydraulinen gradientti dh/dx ja pitoisuusgradientti dC/dx .

Heterogeeninen. Huokoinen väliaine on heterogeeninen, mikäli jokin väliaineen ominaisuus on riippuvainen sijainnista.

Homogeeninen. Huokoinen väliaine on homogeeninen, mikäli väliaineen ominaisuudet eivät riipu sijainnista.

Huokoinen väliaine on kiinteä aine, jossa on toisiinsa yhteydessä olevia huokosia.

Huokoisuus on huokostilan suhde huokoisesta väliaineesta kokonaistilavuuteen.

Hydraulinen gradientti. Hydraulisen korkeuden gradientti.

Hydraulinen korkeus. Huokoisessa väliaineesta olevan veden potentiaali, joka riippuu tarkastelupisteen korkeusasemasta (asemakorkeus) ja veden paineesta (paine korkeus).

Isotrooppinen. Huokoinen väliaine on isotrooppinen jonkin ominaisuuden, esim. vedenjohtavuuden, suhteen, mikäli tämä ominaisuus ei ole suunnasta riippuvainen.

Konseptuaalinen malli. Todellisesta luonnossa vallitsevasta tilanteesta tehty yksinkertaistettu kuvaus.

Kytetty malli. Malliyhtälöt, esimerkiksi pohjaveden virtausta ja liuenneen aineen kulkeutumista kuvaavat yhtälöt ratkaistaan aika-askel kerrallaan siten, että kummankin vaikutus toisen parametriarvoihin huomioidaan.

Numeerinen malli. Mallinnettavaa ilmiötä kuvataan matemaattisilla yhtälöillä, jotka ratkaistaan likimääräisesti numeerisia menetelmiä käyttäen.

Simuloida. Jäljitellä numeerisen mallinnuksen keinoin jotakin esim. luonnossa esiintyvää prosessia.

Tehokas huokoisuus on virtaukseen osallistuvan huokostilan suhde väliaineen kokonaistilavuuteen.

SYMBOLILUETTELO

α_l	pitkittäissuuntainen dispersiivisyys [m]
α_t	poikittäissuuntainen dispersiivisyys [m]
B_p, B_T, B_w	parametreja, joilla kuvataan nesteen tiheyden riippuvuutta paineesta, lämpötilasta ja liuenneen aineen massa-osuudesta
B_o, B_l	parametreja, joilla kuvataan nesteen viskositeetin riippuvuutta lämpötilasta ja liuenneen aineen massaosuudesta
c	kokoonpuristuvuus [1/Pa]
c_α	huokoisen väliaineen kokoonpuristuvuus [1/Pa]
c_β	nesteen kokoonpuristuvuus [1/Pa]
C	pitoisuus [mg/l]
D_l	Dispersiokerroin suunnassa l [m^2/s] ($D_l = \alpha_l \bar{v} + D^*$)
D^*	Diffuusiokerroin [m^2/s]
g	vapaan putoamisliikkeen kiihtyvyys [m/s^2]
h	hydraulinen korkeus [m]
dh/dx	hydraulinen gradientti suunnassa x
k	ominaisvedenjohtavuus [m^2]
K	vedenjohtavuus [m/s]
μ	viskositeetti [kg/ms]
n	tehokas huokoisuus [%]
n_x, n_y, n_z	solmupisteiden määrät suunnissa x, y ja z
p	paine [Pa]
q'	lähdetermi
q_{ci}	imeytyvä suolamäärä [kg/vuosi]
ρ	nesteen tiheys [kg/m^3]
t	aika [s, kk]
Δt	aika-askel [s, kk]
T	lämpötila [$^{\circ}C$]
\bar{v}	pohjaveden keskimääräinen virtausnopeus [m/s]
w	liuenneen aineen massaosuus liuoksessa [kg/kg]
x, y, z	paikan koordinaatit [m]
Δx	matka [m]

1 JOHDANTO

Tutkimuksessa tarkastellaan tiesuolan kulkeutumisen mekanismeja sekä kulkeutumiseen vaikuttavien osatekijöiden eli advektion, dispersion, tiheysvai-
kutusten ja ioninvaihdon suuruusluokkaa ja aikaskaaloja erilaisissa
perustapauksissa, maaperäoloissa ja suolaustilanteissa. Tarkasteluihin sovel-
letaan monipuolisia uuden sukupolven kytkettyjä moni-ilmiömalleja, joilla eri
tekijöiden vaikutuksia voidaan simuloida mahdollisimman realistisesti.

Tavoitteena on saada perustietoa eri prosessien keskinäisestä merkittävyys-
destä. Työ koostuu kahdesta vaiheesta: Tässä raportoitavassa osassa
mallinnustarkastelut tehdään suomen olosuhteita kuvaavilla parametriarvoilla
ja erilaisissa tyyppipoikkileikkauksissa. Seuraavassa vaiheessa (vv. -93-94)
samaa lähestymistapaa sovelletaan suomalaisia pohjavesimuodostumia
mahdollisimman edustavasti kuvaavien esimerkkimuodostumien simulointiin.

2 SUOLAN KULKEUTUMISEN PERUSMEKANISMIT

Pohjaveteen liuennut aine kulkeutuu virtaavan veden mukana (**advektio**) ja
leviää samalla eri suuntiin (**dispersio**), jolloin liuos laimenee. Lisäksi kulkeutu-
van aineen määrään vaikuttavat erilaiset **kemialliset reaktiot**.

Advektio tapahtuu pohjaveden keskimääräisellä virtausnopeudella, joka riip-
puu **vedenjohtavuudesta K**, **hydraulisesta gradientista dh/dx** ja maaperän
tehokkaasta virtaukseen osallistuvasta **huokoisuudesta n**. Vedenjohtavuus
riippuu sekä maaperän ominaisuuksista (**ominaisvedenjohtavuus k**), että
virtaavan veden ominaisuuksista: **tiheydestä ρ** ja **viskositeetista μ** . Gra-
dientilla tarkoitetaan pohjaveden pinnan kaltevuutta tai laajemmin ns. hyd-
raulisen korkeuden muutosta eri suunnissa. Gradientti muodostuu kulloisenkin
virtaustilanteen mukaan, maaperän ja virtaavan veden ominaisuuksien, sekä
virtauksen reunaehtojen (imeytyminen, purkautuminen ym.) perusteella.

Hydrodynaamisen dispersion vaikutuksesta liuennut aine leviää sekä virtauk-
sen suunnassa että sivuille päin yhä laajemmalle alueelle. Virtauksen suun-
nassa tapahtuva ns. **pitkittäinen dispersio** on yleensä selvästi voimakkaam-
paa kuin sivuille päin tapahtuva ns. **poikittainen dispersio**. (Freeze & Cherry
1979). Dispersio-ilmiö esiintyy myös ominaisuuksiltaan erilaisten pohjavesien
kohdatessa toisensa. Tällöin raja-alueelle muodostuu muutosvyöhyke, jossa
ominaisuuksien erot pyrkivät tasoittumaan. Dispersio aiheutuu sekä mekaani-
sesta sekoittumisesta (**mekaaninen dispersio**) että molekyylien **diffuusios-
ta**. Mekaaninen dispersio johtuu virtausnopeuden epätasaisesta jakautumi-
sesta maaperän huokosissa. Diffuusio on kemiallisista potentiaalieroista joh-
tuvaa aineiden sekoittumista (Airaksinen 1978). Yleensä pohjaveden saastumis-
tapauksissa mekaaninen dispersio on pääasiallinen dispersiomekanismi, mutta
hyvin alhaisilla virtausnopeuksilla ja pitkän aikavälin tarkasteluissa (esim.
ydinjätteen loppusijoituksen yhteydessä; Freeze & Cherry 1979) diffuusio
saattaa tulla merkittäväksi.

Tiesuolan (NaCl) kulkeutumista tutkittaessa tarkastellaan kahta kemiallisesti erilaista komponenttia, natriumia ja kloridia. Näistä kloridi voidaan olettaa reagoimattomaksi, mutta natrium osallistuu **ioninvaihtoon**, jolloin osa siitä pidättyy maaperään. Ioninvaihdon suuruusluokka riippuu maaperän ioninvaihtokapasiteetista, joka on suurin orgaanista ainetta sisältävissä maalojissa ja lihavassa savessa ja alhaisempi lajittuneissa karkeissa maalajoissa kuten hiekassa ja sorassa.

Pohjaveden virtausta ja liuenneen aineen kulkeutumista mallinnettaessa edellämainittuja ilmiöitä kuvataan matemaattisesti ns. virtaus- ja kulkeutumisyhtälöillä, jotka ratkaistaan joko analyyttisesti tai numeerisesti tietokoneohjelmilla. Virtauksen perusyhtälö kolmessa dimensiossa on (Freeze & Cherry 1979):

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = \rho g(c_\alpha + nc_\beta) \frac{\partial h}{\partial t} + q' \quad (1)$$

ja aineen kulkeutumisyhtälö (Freeze & Cherry 1979):

$$\begin{aligned} & [\frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(D_z \frac{\partial C}{\partial z})] \\ & - [\frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}_y C) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}_z C)] = \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

Yhtälön 2 vasemman puolen kolme ensimmäistä termiä kuvaavat dispersion avulla tapahtuvaa leviämistä ja kolme seuraavaa termiä virtauksen mukana tapahtuvaa leviämistä.

Kulkeutuvan aineen pitoisuuden ollessa riittävän korkea, vaikuttaa se myös veden virtausominaisuuksiin: tiheyteen ja viskositeettiin. Tiesuolan tapauksessa vaikutus viskositeettiin on vähäinen, mutta tiheyden kasvu suolapitoisuuden seurauksena saattaa joissakin tilanteissa vaikuttaa kulkeutumiseen. Suolapitoinen vesi saattaa esim. painua pohjavesimuodostuman pohjalle (Soveri 1991).

Virtausyhtälöä 1 vastaava tasapainoyhtälö tiheydestä ja viskositeetista riippuvalle virtaukselle on (Kipp 1987):

$$\nabla \cdot \rho \frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g) = \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} + \rho q' \quad (3)$$

Kulkeutumisyhtälöä 2 vastaava tasapainoyhtälö tiheydestä ja viskositeetista riippuvalle kulkeutumiselle on (Kipp 1987):

$$\nabla \cdot n\rho D \nabla w - \nabla \cdot n\rho \bar{v} w = \frac{\partial(n\rho w)}{\partial t} \quad (4)$$

3 LASKENTAMALLIT

3.1 Kytetty mallinnus

Aineen kulkeutumisiongelman ratkaiseminen pohjavesimuodostumassa tarkoittaa virtaus- ja kulkeutumisyhtälöiden ratkaisemista käsillä olevaa ongelmaa kuvaavilla reunaehdoilla ja muodostumaa kuvaavilla parametriarvoilla. Käytännössä tämä tehdään erilaisten numeeristen menetelmien avulla tietokoneohjelmilla. Yleisimmin käytetty lähestymistapa on ratkaista ensin pohjaveden virtausta kuvaava yhtälö (yhtälö 1), minkä jälkeen kulkeutumista kuvaava yhtälö (yhtälö 2) ratkaistaan tästä ratkaistuilla virtausnopeuksilla.

Mikäli yhtälöiden ratkaisut ovat voimakkaasti toisistaan riippuvaisia siten, että myös kulkeutuvan aineen pitoisuusjakautuma vaikuttaa virtausyhtälön parametreihin (esim. yhtälöt 3 ja 4), joudutaan yhtälöt ratkaisemaan kytketysti (coupled solution). Tällöin sekä virtaus-, että kulkeutumisyhtälö ratkaistaan aika-askel kerrallaan, ja kummankin vaikutus toisen parametriarvoihin huomioidaan. Käytännössä tämä edellyttää iteraatiotekniikoiden käyttöä, eli kullakin aika-askeleella yhtälöjä ratkaistaan vuorotellen kunnes yhtälöt toteutuvat samanaikaisesti halutulla tarkkuudella.

3.2 Käytetyt virtaus- ja kulkeutumismallit (HST2D ja HST3D)

Tiesuolan pohjavesivaikutuksiin liittyvien tutkimusten yhteydessä on esitetty mahdollisuus raskaamman suolapitoisen veden painumisesta muodostuman pohjalle. Tiheysvaikutuksen huomioonottaminen edellyttää juuri edellä esitetyn kytketyn ratkaisumenetelmän käyttöä. HST2D- ja HST3D-malleilla (Kipp 1987) voidaan simuloida kyllästynyttä pohjaveden virtausta ja liuenneen aineen kulkeutumista kaksi- (HST2D) ja kolmiulotteisessa (HST3D) tapauksessa. Ohjelmissa käytetään ns. 'finite-difference'-menetelmää. Yhtälöiden kytkentään käytetyt matemaattiset riippuvuudet on esitetty liitteessä 1. HST3D-ohjelmaa on käytetty suurimmassa osassa tämän raportin simulointeja.

3.3 Käytetty geohydrokemiaallinen malli (PHREEQM-2D)

Lisäksi sovellamme kytkettyä geohydrokemiaallista mallinnusta ohjelmalla PHREEQM-2D (Willemsen 1992). Kytetty geohydrokemiaallinen mallinnus sisältää

kulkeutumislaskennan ja siihen kytketyn geokemiallisen tasapainolaskennan. Perinteisessä aineen kulkeutumismallinnuksessa geokemia sisällytetään kulkeutumisytälöihin aineen pitoisuuteen verrannollisena reaktioterminä. Kytkeytyessä geohydrokemiallisessa mallinnuksessa sen sijaan lasketaan veden mukana kulkeutuvien komponenttien (esimerkiksi Na^+ ja Cl^-) kemiallinen tasapaino ympäröivän mineorologisen koostumuksen kanssa kullakin aika-asteleella kytketyksi kulkeutumisytälön kanssa.

PHREEQM-2D (Willemsen 1992) mallissa HST2D-kulkeutumismalli on kytketty geokemiallisen PHREEQE-mallin kanssa. PHREEQE-mallin avulla voidaan määrittää pH, redox-potentiaali, massan kulkeutuminen reaktion etenemisen funktiona sekä liuoksen koostumus tasapainossa useiden faasien läsnäollessa.

4 SUOLAPITOISUDELTAAN VAIHTELEVAN POHJAVEDEN VIRTAUKSEN MALLINNUS - AIKAISEMMAT KANSAINVÄLISET TUTKIMUKSET

Pohjavedet luokitellaan kokonaissuolapitoisuuden perusteella taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Pohjavesien luokittelu kokonaissuolapitoisuuden perusteella (Freeze & Cherry 1979).

Luokka	Kokonaissuolapitoisuus (mg/l tai g/m ³)
Makea vesi (Fresh water)	0-1000
Murtovesi (Brackish water)	1000 - 10 000
Suolainen vesi (Saline water)	10 000 - 100 000
Erittäin suolainen vesi (Brine water)	yli 100 000

Rannikkoalueiden virtaussysteemeissä esiintyvää makean ja suolaisen tai murtoveden vuorovaikutusta on tutkittu hyvin paljon. Meren pohjan alla on merivettä sisältävä vesimuodostuma, jolloin kevyemmän makean veden ja painavamman meriveden välille syntyy muutoskerros, jossa sekoittuneen veden tiheys muuttuu vähitellen makean veden tiheydestä meriveden tiheydeksi (Bear 1960). Jos muutoskerros on kapea verrattuna koko tutkittavan alueen mittasuhteisiin voidaan nesteiden välillä kuvitella olevan tarkka rajapinta. Rajapinnan oletetaan yleensä noudattavan ns. Ghyben-Herzbergin arviota, jonka mukaan suolapitoisen ja makean veden rajapinnan asema määräytyy tiheyseron ja makean pohjaveden pinnankorkeuden perusteella (Bear 1979). Lähestymistapa yksinkertaistaa tarkastelua ja on yleisesti käytetty.

Jos makean veden muodostumasta pumpataan vettä, sen hydraulinen korkeus alenee, ja rajapinta siirtyy sisämaahan päin. Tätä kutsutaan meriveden tunkeutumiseksi (sea water intrusion). Samalla muutoskerros levenee. Mikä tahansa muutos makean veden alueella aiheuttaa muutoskauden, jonka aikana virtaus on muuttuvaa ja rajapinta liikkuu kohti uutta tasapainoasemaansa. Sisämaassa, jossa suolaisen pohjaveden rajapinta on syvällä, pumppaus kaivosta makean veden alueelta aiheuttaa ns. kartioitumista (interface upconing), jolloin rajapinta kohoaa kohti kaivoa. Tähän voidaan soveltaa Muskat:n arviota, jolloin alempi (raskaampi) neste oletetaan liikkumattomaksi ja rajapinta toimii läpäisemättömänä reunana. (Bear 1988)

Tarkan rajapinnan oletukseen perustuen on kehitetty paljon analyyttisiä ja numeerisia malleja. Mallit eivät kuitenkaan päde hydrodynaamisen dispersion ollessa voimakas. Tällöin on käytetty vaihtoehtoista lähestymistapaa, jossa virtauskenttä ratkaistaan ottamalla huomioon vallitsevan suolapitoisuuden vaikutus veden virtausominaisuuksiin eli tiheyteen ja viskositeettiin. Tiheydestä ja viskositeetista riippuvaan virtaukseen perustuvaa numeerista mallinnusta on sovellettu mm. Havaijilla sijaitsevan Oahun alueen virtausten ja kulkeutumisten simulointiin (Souza & Voss 1987).

Vastaavan tyyppisiä lähestymistapoja on käytetty myös ydinjätteiden loppusijoitustutkimusten yhteydessä syvissä porakaivoissa havaittujen suolaisen ja makean pohjaveden rajapintojen tarkasteluun. Ruotsissa Finnsjö:n alueella on monissa porareississä havaittu suolaista pohjavettä jo 100 m:n syvyydellä, kun muualla 700 m:n syvyydeltäkään sitä ei ole löytynyt. Tässä vettä pidetään suolaisena, jos se sisältää suolaa yli 300 mg/l. Ilmiön selittämiseksi on kehitetty tarkan rajapinnan oletukseen perustuva konseptuaalinen malli (Ahlbom 1991). Alue on myös mallinnettu numeerisesti sekä kaksiulotteisella poikkileikkausmallilla (Svensson 1991a), että kolmiulotteisella mallilla (Svensson 1991b). Suomessa on ydinjätteen loppusijoituspaikkatutkimusten yhteydessä tutkittu suolapitoisuudeltaan vaihtelevan pohjaveden virtauksen simulointia PHOENIX-ohjelmistolla (Laitinen & Taivassalo 1992).

Pohjaveden kloridipitoisuuden kasvua teollisuuden jätevesien vaikutuksesta on mallinnettu liuenneen aineen kulkeutumismalleilla, joissa veden tiheys ja viskositeetti oletetaan pitoisuudesta riippumattomiksi vakioiksi. Konikow (1977) on soveltanut kaksiulotteista alueellista mallia pohjaveden saastumisongelmaan Rocky Mountain Arsenalissa, Coloradossa, jossa kloridia sisältäviä teollisuuden jätevesiä on 30 vuoden ajan laskettu lammikoihin, joista ne ovat imeytyneet alapuolella olevaan vesimuodostumaan. Lammikoiden kloridipitoisuudet ovat olleet 150-4000 mg/l. Suomessa kloridin kulkeutumista pohjavedessä ovat mallintaneet mm. Ahlberg & Soveri (1988, 1989)

Samantyyppistä lähestymistapaa on sovellettu myös voimakkaan kastelun aiheuttaman pohjaveden suolaantumisen mallintamiseen. Helweg & Labadie (1977) ovat soveltaneet yhdistettyä simulointi- ja optimointimallia pohjaveden suolapitoisuuden hallitsemiseksi voimakkaan kastelun alaisilla alueilla. Käytetyt simulointimallit ovat kehittäneet Konikow & Bredehoeft (1974) ja se on periaatteeltaan samantyyppinen kuin teollisuuden jätevesien yhteydessä käy-

tetty lähestymistapa. Esimerkkitapauksessa korkeimmat suolapitoisuudet olivat 2500 mg/l.

Kallion suolamuodostumista vapautuneen suolan kulkeutumista tutkittaessa pitoisuudet ovat hyvin korkeita. Suolamuodostumien kanssa kosketuksissa olevissa vesimuodostumissa on havaittu jopa yli 1200 kg/m³ pitoisuuksia (Hassanizadeh & Leijnse 1988). Tällaisissa systeemeissä myös suolaisuusgradientit ovat suuria, mikä asettaa omat vaatimuksensa käytetyille menetelmille. Tarkasteltavat pitoisuudet ovat niin paljon korkeampia kuin tiesuolojen yhteydessä havaitut pitoisuudet ettei näitä lähestymistapoja tässä yhteydessä tarkemmin esitellä.

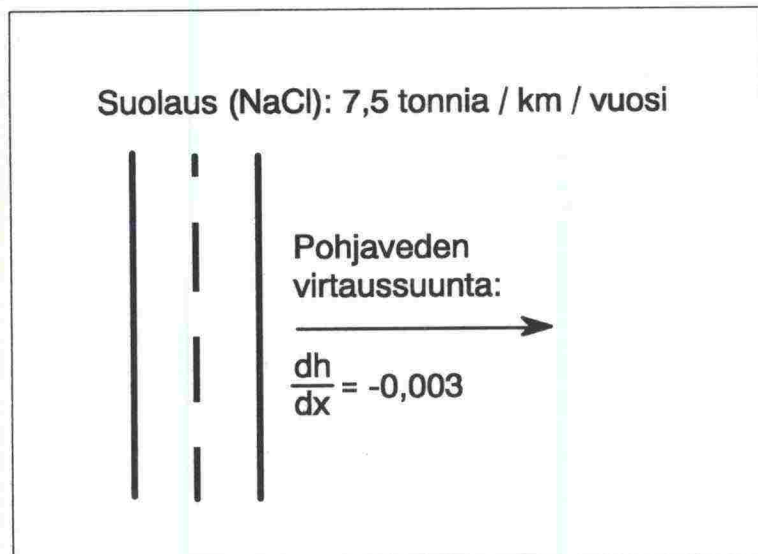
Suomessa suolattujen tieosuuksien lähellä havaitut suolapitoisuudet ovat yleensä olleet alle 300 mg/l, mutta yksittäisissä tapauksissa on havaittu jopa lukema 1700 mg/l (Soveri 1991). Arvot vaihtelevat siis välillä, jolle on sovellettu sekä tiheydestä riippumatonta mallinnusta, että tiheydestä riippuvan virtauksen mallinnusta. Tyypiltään tiesuolan leviäminen muistuttaa eniten teollisuuden jätevesien aiheuttamaa pohjaveden saastumista, jolloin aineen leviämisen tarkasteluun on käytetty kaksiulotteisia alueellisia malleja, joissa veden tiheys ja viskositeetti oletetaan vakioiksi. Mikäli halutaan tarkastella erityisesti suolapitoisen veden painumista ja kerääntymistä vesimuodostuman pohjalle (Soveri 1991), on käytettävä malleja joissa syvyyskomponentti ja tiheysriippuvuus huomioidaan.

5 ERI MALLINNUSLÄHESTYMISTAPOJEN VERTAILU

Ensimmäisen simulointisarjan tavoitteena on saada käsitystä mallien numeerisesta tarkkuudesta ja toimivuudesta kyseeseen tulevilla olosuhteilla. Ongelmaa käsiteltiin ratkaisemalla sama esimerkkitapaus usealla eri ratkaisumenetelmällä etenemällä yksinkertaisimmasta analyyttisestä ratkaisusta monimutkaisempiin aina tiheysriippuvuuden huomioiviin numeerisiin ratkaisumenetelmiin asti.

5.1 Esimerkkitapaus: Suolapulssin eteneminen vedellä kyllästyneessä hiekassa

Esimerkkitapauksena tarkastellaan kuvitteellista tilannetta (kuva 1), jossa tie kulkee veden virtaukseen nähden poikittain, ja tielle levitetään suolaa (NaCl) 7,5 tonnia/km vuodessa. Kloridin taustapitoisuus pohjavedessä on 1,5 mg/l. Suolan oletetaan imeytyvän pohjaveteen kevätkuukauden aikana yhden kuukauden kuluessa. Pohjaveden pinta laskee virtauksen suunnassa kilometrin matkalla 3 m. Maaperä on hiekkaa, jonka ominaisuuksia kuvataan taulukon 2 mukaisilla parametreilla.



Kuva 1. Esimerkkitapaus

Taulukko 2. Esimerkkitapauksen parametriarvot (Airaksinen 1978; Freeze & Cherry 1979)

Ominaisvedenjohtavuus	$k = 10^{-10} \text{ m}^2$
Vedenjohtavuus	$K \approx 6,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
Tehokas huokoisuus	$n = 30 \%$
Dispersiivisyys	$\alpha_1 = 1 \text{ m}$ $\alpha_2 = 0,5 \text{ m}$
Kokoonpuristuvuus	$c = 10^{-8} \text{ 1/Pa}$

5.2 Analyttinen ja numeerinen ratkaisu pulssin etenemisnopeudelle

Arvioidaan suolapulssin etenemistä yhden vuoden aikana. Käytetään arviointiin sekä analyttistä ratkaisua, että vertailun vuoksi samoin oletuksien rakennettua numeerista mallia.

Maksimipitoisuus sijaitsee liuenneen aineen massakeskipisteessä, joka etenee suuntaan x pohjaveden keskimääräisellä virtausnopeudella (Freeze & Cherry 1979):

$$\bar{v} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dx} \quad (5)$$

Etenemä Δx ajassa Δt voidaan tällöin laskea seuraavasti:

$$\Delta x_{\Delta t} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dx} \cdot \Delta t \quad (6)$$

Esimerkitapauksen parametriarvoilla (taulukko 2, kuva 1) etenemäksi yhdessä vuodessa saadaan

$$\Delta x_{12kk} = 205m$$

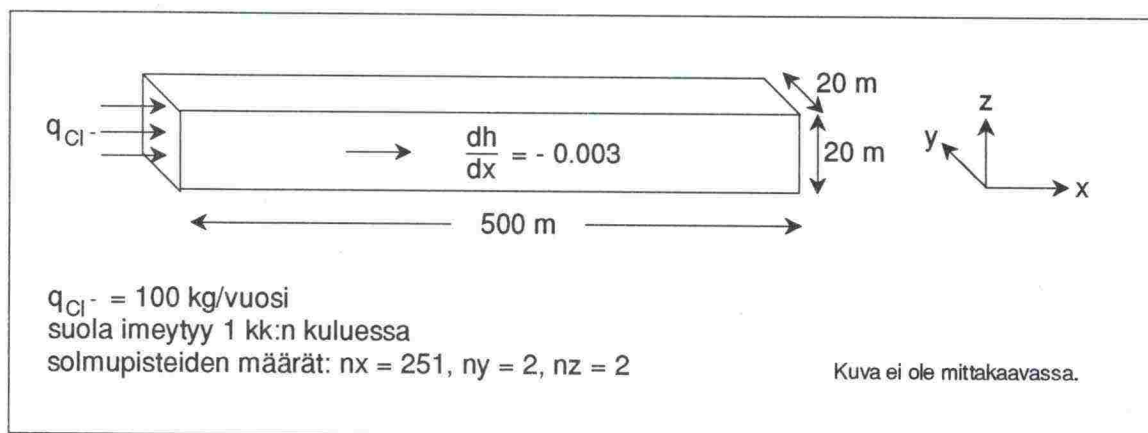
Jos halutaan arvioida etenemää tapauksessa, jossa suolan imeytyminen kestää kuukauden, voidaan pitoisuusmaksimin sijaintia vuoden kuluttua imeytymisen alkamisesta approksimoida vastaavasti:

$$\Delta x_{(12kk-0,5kk)} = 196m$$

Vertailun vuoksi sama ongelma ratkaistiin numeerisesti HST3D-ohjelmalla. Koska vedenjohtavuus K riippuu veden tiheydestä ja viskositeetista, jotka riippuvat suolapitoisuudesta, on maaperän ominaisuuksia kuvattava vedenjohtavuuden K sijaan ominaisvedenjohtavuudella k . Vedenjohtavuuden ja ominaisvedenjohtavuuden välinen riippuvuus on seuraava:

$$K = \frac{kp\rho}{\mu} \quad (7)$$

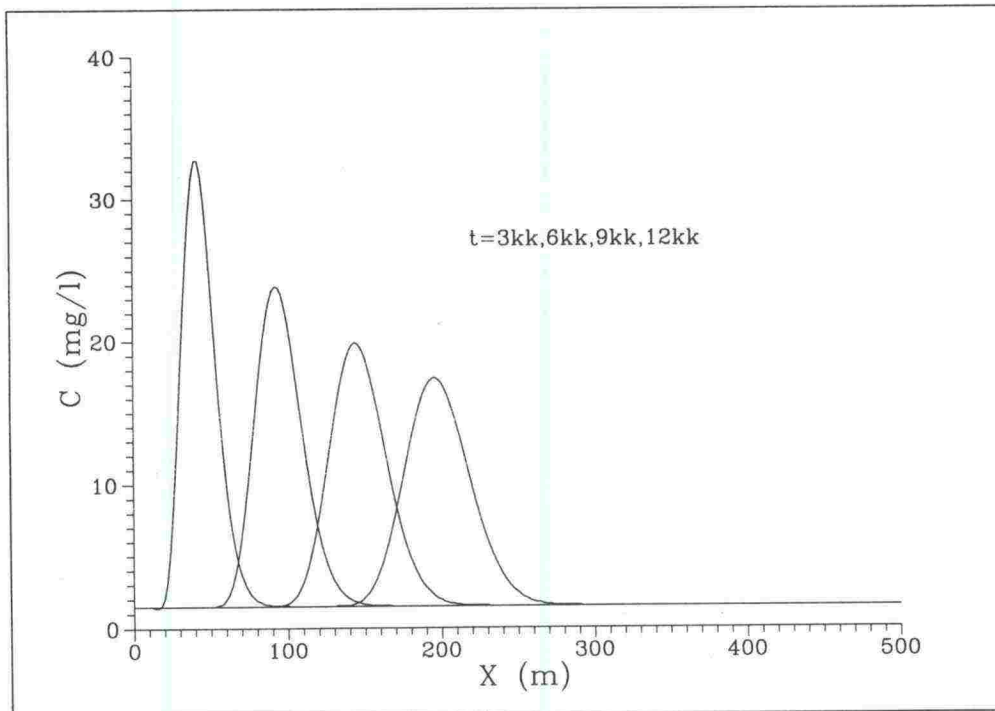
Yksiulotteista virtausta ja kulkeutumista kuvaava malli (kuva 2) kuvaa myös kaksi- tai kolmiulotteista vyöhykkeittäistä kulkeutumista, jolloin virtausta ja kulkeutumista tapahtuu vain x -suunnassa, ja parametrien ja muuttujien arvot y - ja z -suunnissa ovat vakioita. 20 m matkalle tuleva kloridiannos on n. 100 kg vuodessa.



Kuva 2. Esimerkitapauksen yksiulotteinen malli.

Tuloksista (kuva 3) nähdään kuinka pulssi etenee virtauksen mukana ja leviää dispersion vaikutuksesta, jolloin pitoisuusmaksimi samalla pienenee. Pitoisuusmaksimin sijainti vuoden kuluttua suolauksen aloittamisesta on $x = 196 \text{ m}$, mikä

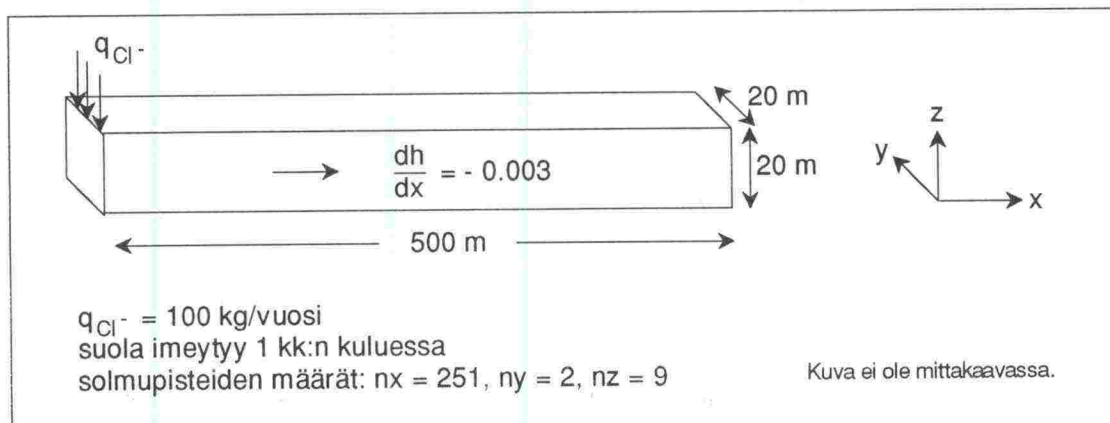
on yhtäpitävä analyttisellä mallilla ajalle $t = (12\text{kk} - 0,5\text{kk})$ lasketun arvon kanssa.



Kuva 3. Simuloitu kloridipitoisuus C (mg/l) 3, 6, 9 ja 12 kk:n kuluttua kloridin imeytymisen alkamishetkestä ($t=0$)

5.3 Syvyyskomponentin huomioonottamisen merkitys

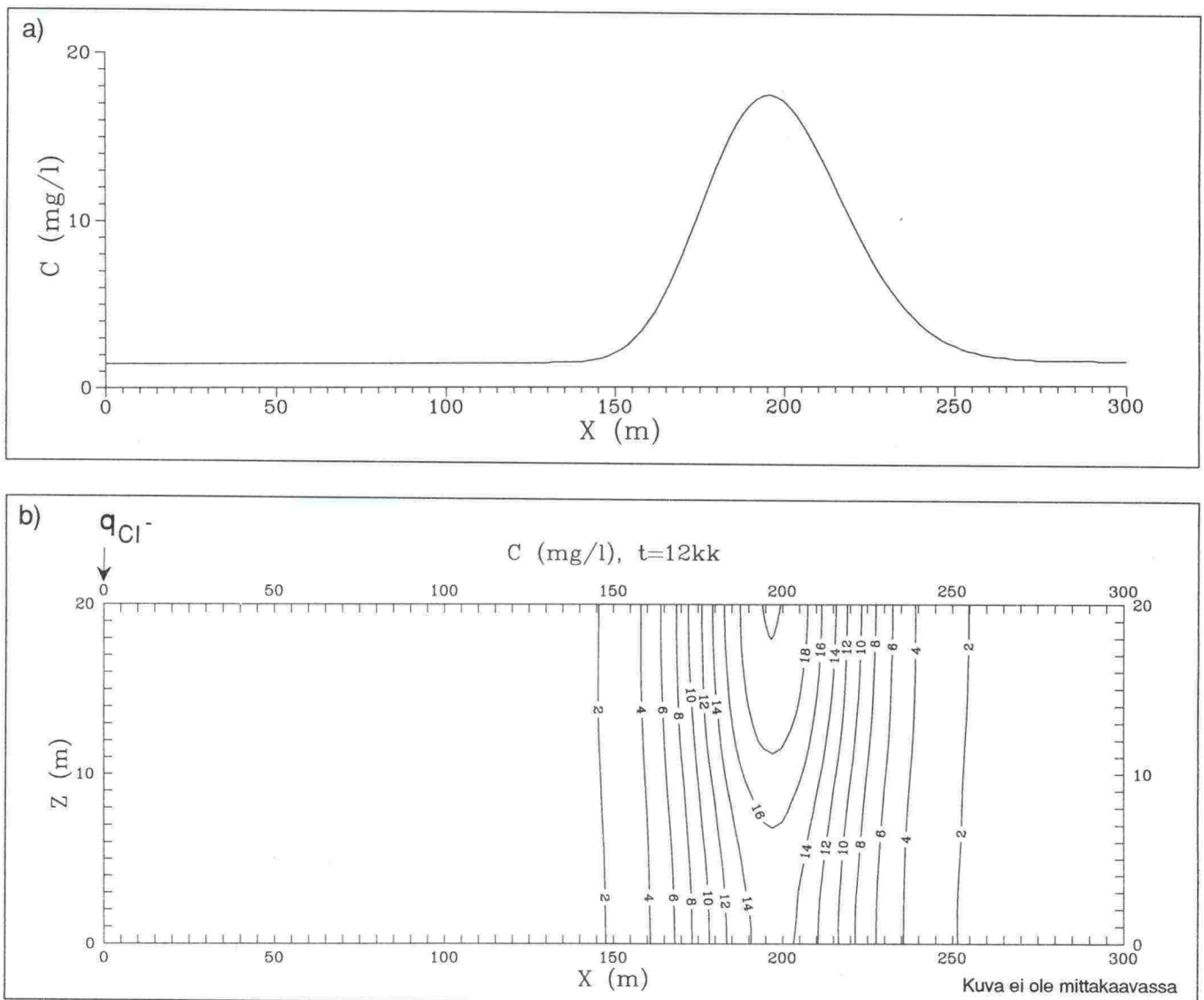
Pohjavesimuodostuman paksuus on yleensä pieni alueen pinta-alaan nähden. Tämän vuoksi laajaa alueellista pohjavesivirtausta kuvataan yleensä kaksiulotteisilla malleilla, joissa syvyyssuuntaisia virtauksia tai muodostuman kerroksellisuutta ei huomioida. Kolmiulotteisia malleja käytetään kuvaamaan tilanteita, joissa syvyyskomponentilla on oleellinen merkitys. Seuraavassa laskentaesimerkissä arvioidaan syvyyskomponentin z huomioonottamisen vaikutusta laskentatulokseen. Edellä esitetty yksiulotteinen ongelma ratkaistiin kaksiulotteisesti kuvan 4 esittämällä tavalla.



Kuva 4. Esimerkkitapauksen kaksiulotteinen malli.

Tulokset on esitetty kuvassa 5 yhdessä yksiulotteisella mallilla vastaavalla ajanhetkellä saadun tuloksen kanssa. Tuloksista havaitaan, että esimerkkitapauksessa kulkeutuminen on kaksiulotteisessakin tapauksessakin lähes vaakasuuntaista. Pitoisuudet eivät siis syvyysuunnassa juuri vaihtele. Pitoisuusjakauma kaksiulotteisen mallin keskiosassa ($z = 10$ m) on hyvin samanlainen kuin yksiulotteisella mallilla simuloitu jakauma.

Jos tulosta laajennetaan kaksi- ja kolmiulotteisten mallien väliseen vertailuun, voidaan todeta, että kaksiulotteinen alueellinen mallinnus olisi esimerkkitapauksessa perusteltua ja riittävää. Mikäli halutaan mallintaa pohjavesimuodostumassa esiintyviä syvyysuuntaisia virtauksia, kerroksellisuuden vaikutuksia tai suolapitoisen veden painumista, voidaan alueellisen kaksiulotteisen mallinnuksen lisäksi mallintaa kulkeutumista edustavissa poikkileikkauksissa tai soveltaa kolmiulotteista mallinnusta.

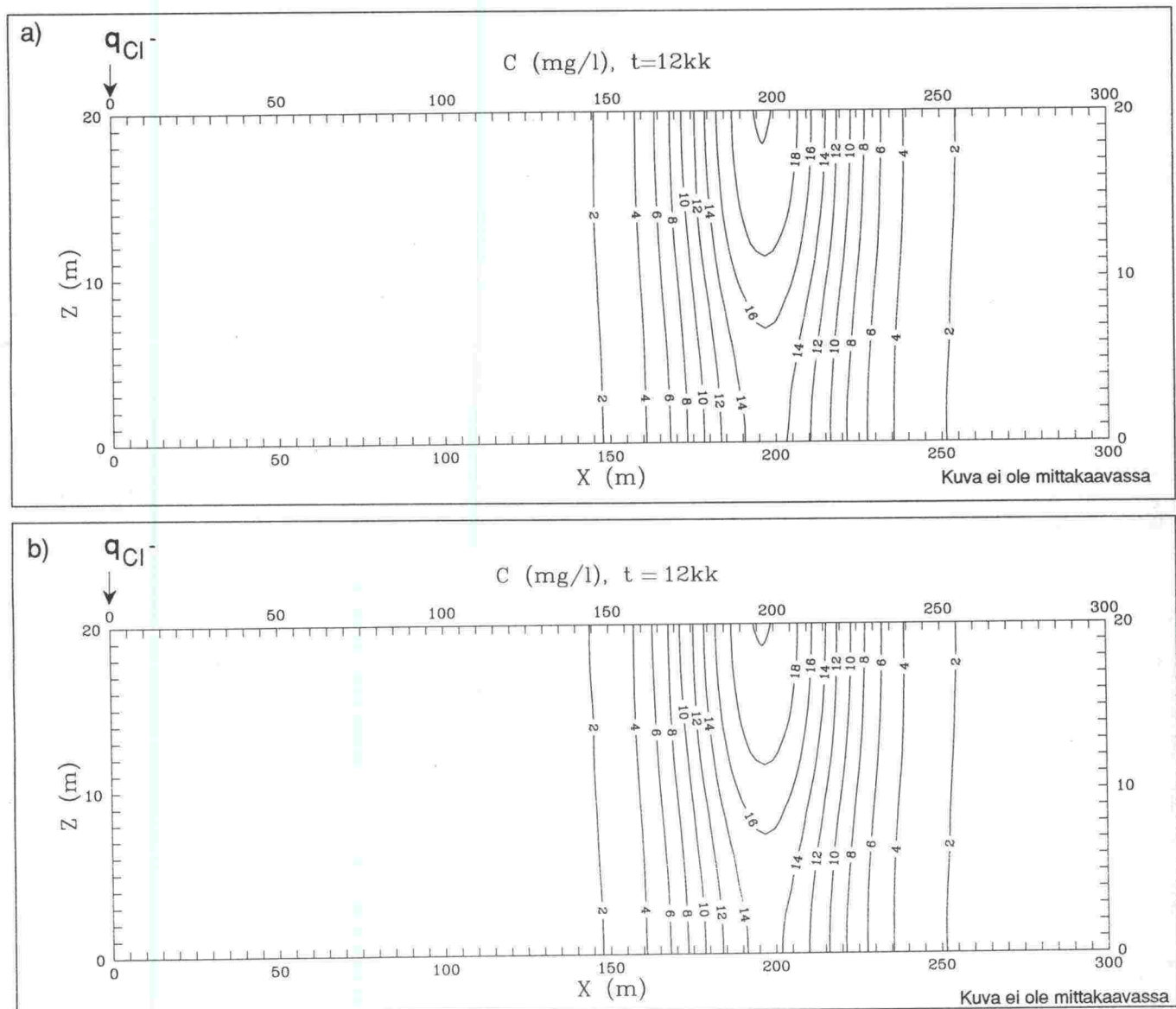


Kuva 5. Simuloitu kloridipitoisuus C (mg/l) vuoden kuluttua ($t = 12$ kk) kloridin imeytymisen alkamishetkestä ($t=0$) a) kun syvyyttä ei huomioida b) kun syvyys z huomioidaan.

5.4 Viskositeetti- ja tiheysriippuvuuden merkitys

Veden kohonnut suolapitoisuus vaikuttaa periaatteessa kahteen virtausparametriin nimittäin veden viskositeettiin ja tiheyteen. Vaikutus viskositeettiin on vähäinen ja jätetään tässä tarkastelussa huomiotta. Veden tiheyden kasvu suolapitoisuuden seurauksena saattaa sen sijaan joissakin tilanteissa vaikuttaa kulkeutumiseen. Tiheysvaikutuksen huomioiminen edellyttää monimutkaisempien laskentaohjelmien käyttöä. Seuraavalla esimerkkisimuloinnilla haluttiin arvioida, millaisissa tapauksissa tiheysriippuvuuden huomioonottaminen on tarpeen ja milloin menetelmällä ei saavuteta lisätarkkuutta.

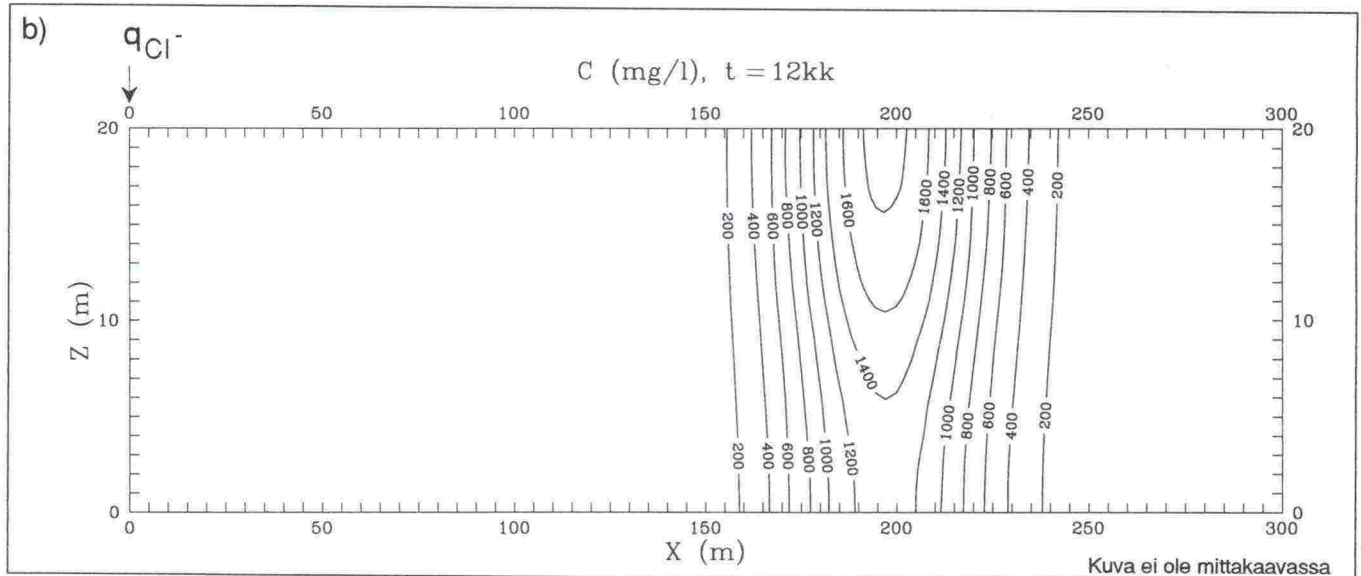
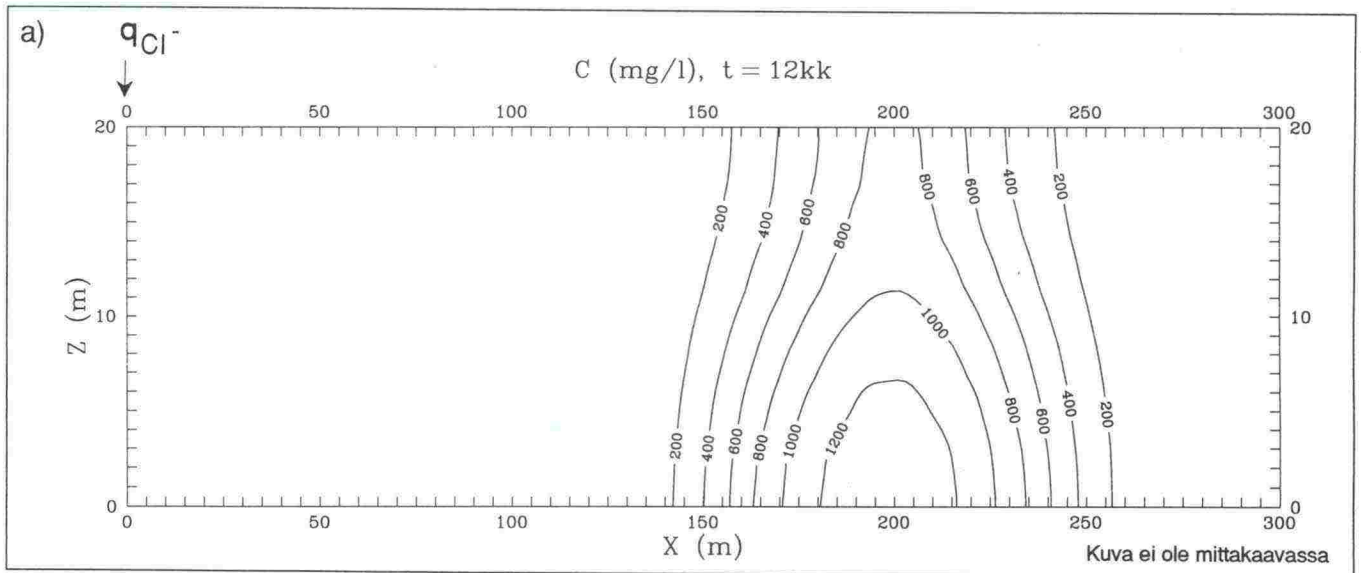
Simuloidaan taas kuvan 4 esittämää kaksiulotteista tilannetta. Suoritetaan kaksi simulointia: a) veden tiheyden oletetaan riippuvan suolapitoisuudesta b) veden tiheys oletetaan vakioksi



Kuva 6. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma suolaukselle 7,5 t/km³/v, kun a) veden tiheys riippuu suolapitoisuudesta b) veden tiheys oletetaan vakioksi

Molemmat simuloinnit suoritetaan HST3D-ohjelmalla, mutta jälkimmäisessä tapauksessa tiheys määritellään suolapitoisuudesta riippumattomaksi vakioksi. Kuvan 6 tuloksista havaitaan, ettei simuloitujen pitoisuusjakaumien välillä ole oleellista eroa.

Simuloidaan seuraavaksi tapausta, jossa imeytyvä suolamäärä on 100-kertainen (750 t/km/v) edelliseen suolaukseen verrattuna. Simuloidut jakaumat on esitetty kuvassa 7. Kuvasta 7a havaitaan suolan painuneen pohjavesimuodostuman pohjalle, mistä se edelleen leviää pohjavesimuodostumaan. Kuvasta 7b nähdään, että tiheysriippuvuuden huomioimatta jättäminen ei ole oleellisesti vaikuttanut pitoisuusmaksimin vaakasuuntaiseen etenemisnopeuteen. Pitoisuusjakauma poikkeaa kuitenkin kytketyllä mallilla lasketusta jakaumasta, koska painumisilmiötä ei ole pystytty huomioimaan.



Kuva 7. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma 100-kertaiselle suolaukselle 750 t/km/v kun a) veden tiheys riippuu suolapitoisuudesta b) veden tiheys oletetaan vakioksi

Tulosten perusteella voidaan todeta, että haluttaessa mallintaa vain suolan alueellista leviämistä, voidaan tiheys olettaa vakioksi. Mikäli halutaan mallintaa suolan leviämistä syvyysuunnassa, on tiheysriippuvuuden huomioivan mallin käyttö suositeltavaa ja painumistapauksessa välttämätöntä. Painumista ja sen esiintymistä tarkastellaan lähemmin luvussa 10.

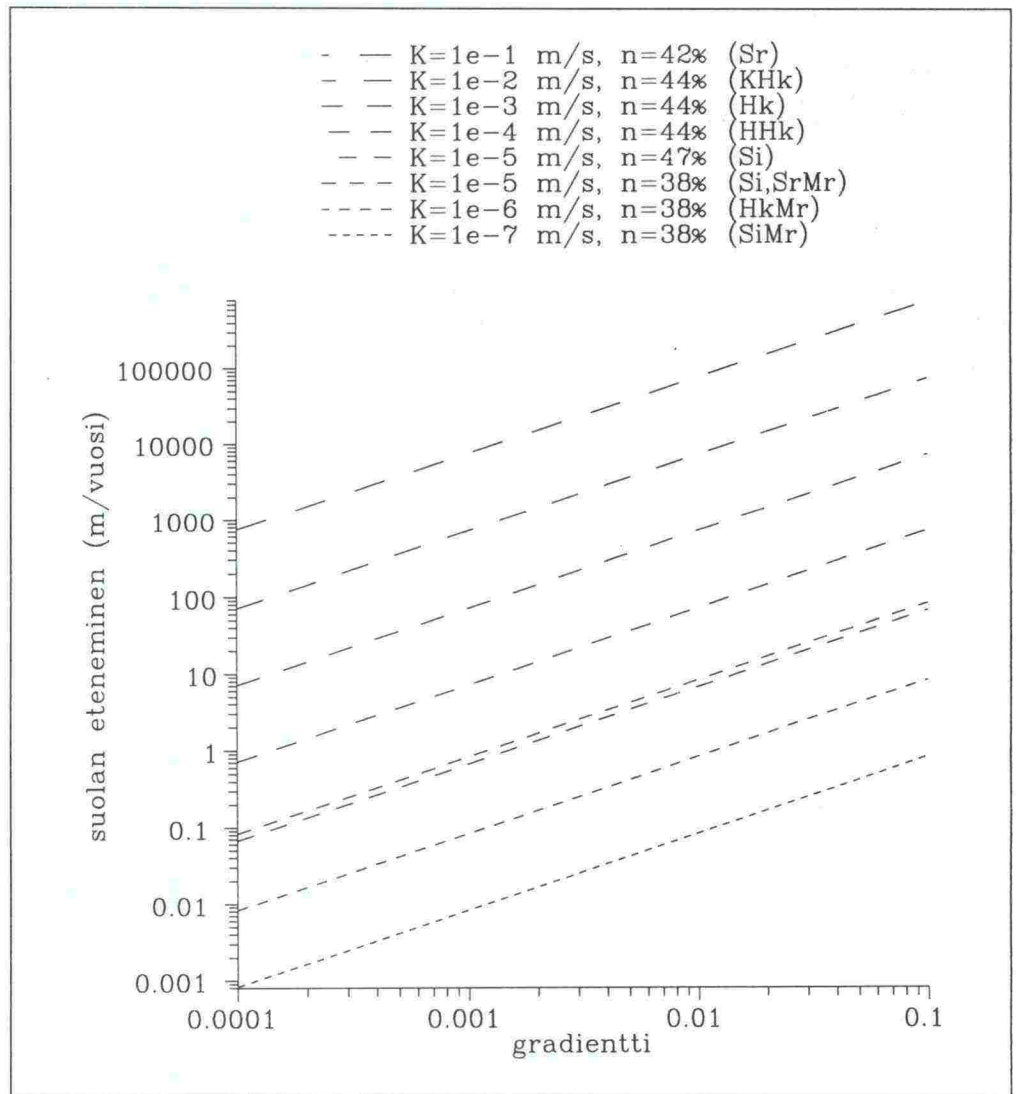
6 SUOLAPULSSIN ETENEMINEN ERI MAALAJEISSA

Suolapulssin etenemistä erilaisissa 'tyyppimaalajeissa' arvioitiin yhtälön (5) avulla. Taulukkoon 3 on koottu kirjallisuudessa esitettyjä arvoja Suomessa esiintyvien maalajien vedenjohtavuuksille ja huokoisuuksille. Taulukon arvoista nähdään, että saman maalajin vedenjohtavuudet vaihtelevat useita suuruusluokkia. Virtausnopeuksissa ja matkoissa (yhtälöt 5 ja 6) tämä merkitsee myös suuruusluokkien eroja. Taulukon vedenjohtavuusarvoja voidaankin pitää vain suuntaa antavina ja eri maalajien välisiä eroja havainnollistavina. Paikkakohtaiset virtausmatka-arviot edellyttävät myös paikkakohtaisia vedenjohtavuusmittauksia.

Taulukko 3. Suomessa esiintyvien maalajien ominaisuudet.

Maalaji	Vedenjohtavuus (m/s) (Airaksinen 1978)	Vedenjohtavuus (m/s) (Freeze & Cherry 1979)	Huokoisuus (%) (Korhonen 1963; Kauranne ym. 1972)	Huokoisuus (%) (Freeze & Cherry 1979)
Soramoreeni	$10^{-5} - 10^{-7}$		23 - 52	
Hiekkamoreeni	$10^{-6} - 10^{-8}$			
Silttimoreeni	$10^{-7} - 10^{-9}$			
Savimoreeni	$10^{-8} - 10^{-10}$			
Sora	$10^{-1} - 10^{-3}$	$1 - 10^{-3}$	33 - 50	25 - 40
Karkea hiekka	$10^{-2} - 10^{-4}$			
Hiekka	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-2} - 10^{-6}$	38 - 50	25 - 50
Hieno hiekka	$10^{-4} - 10^{-6}$			
Siltti	$10^{-5} - 10^{-9}$	$10^{-5} - 10^{-9}$	38 - 55	35 - 50
Savi	$10^{-9} - 10^{-11}$	$10^{-9} >$	50 - 78	40 - 70

Epävarmuudet huokoisuudessa eivät aiheuta suuruusluokkaeroja virtausnopeus ja -matka-arvioissa. Täsmällisiä laskentoja tehtäessä tulisi kaavassa 5 soveltaa ns. tehokasta huokoisuutta (de Marsily 1986), joka on kokonaishuokoisuutta pienempi, koska siihen sisällytetään ainoastaan virtaukseen osallistuva huokostila. Korostunein ero kokonaishuokoisuuden ja tehokkaan huokoisuuden välillä on rakoilleen kallion tapauksessa, jossa vettä johtavat, toisiinsa hydraulisessa yhteydessä olevat raot muodostavat vain pienen osan kallion kokonaishuokoisuudesta. Huokoisten maalajien tapauksessa ero on pieni lukuunottamatta erittäin hienorakeisia maalajeja kuten savi, joissa osa vedestä sitoutuu adheesion vaikutuksesta hiukkasten pinnoille (Bear, 1972).



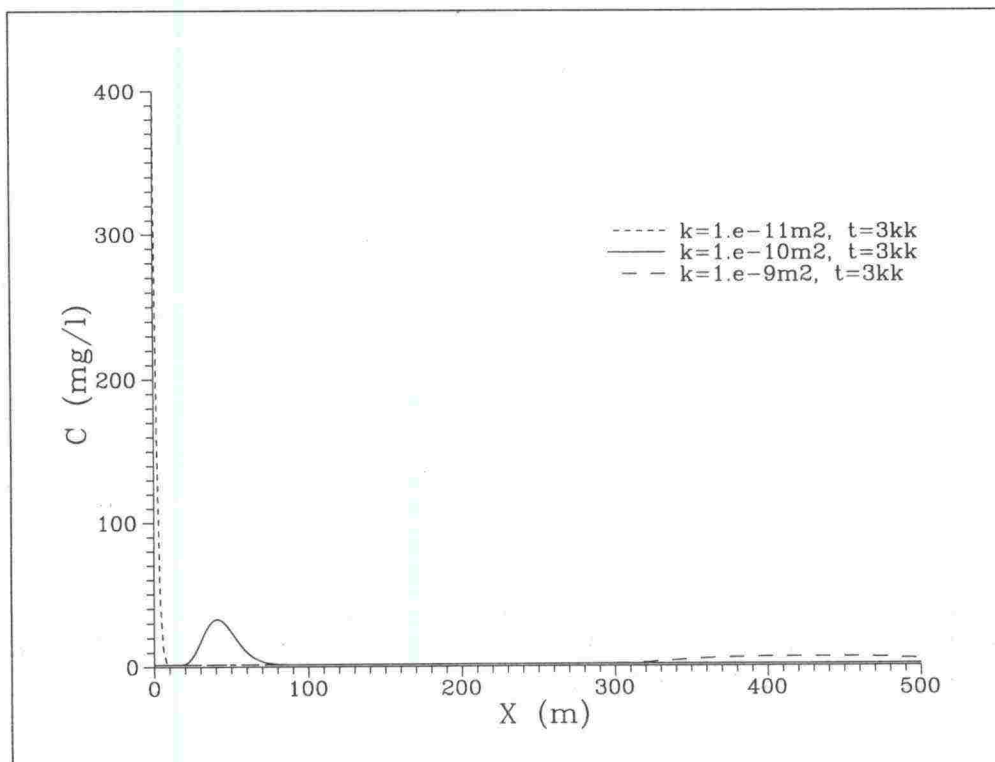
Kuva 8. Suolapulssin etenemisnopeus erilaisissa maaperäolosuhteissa. Su-
 luissa esitetyt maalajit ovat viitteellisiä, koska samalla maalajilla voi olla hyvin
 erilaisia ominaisuuksia (vrt. taulukko 3.).

Taulukon 3 arvoilla ja kaavan 5 avulla laskettiin suolapulssin etenemisnopeus eri maalajeissa erilaisilla pohjavedenpinnan gradienteilla dh/dx . Maalajin vedenjohtavuudeksi valittiin leviämistä edistävä vaihteluvälin yläraja. Maalajin tehokkaaksi huokoisuudeksi valittiin vaihteluvälin keskipiste. Suuren huokoisuuden omaavilla maalajeilla on yleensä myös hyvä vedenjohtavuus (Freeze & Cherry). Tähänkin poikkeuksena on savi, jossa suuresta huokoisuudesta riippumatta on pieni vedenjohtavuus (vrt. adheesio). Tuloksista (kuva 8) havaitaan vedenjohtavuuden oleellinen vaikutus kulkeutumiseen. Huokoisuuden vaikutusta arvioitiin siltissä, jolle käytettiin kahta erilaista tehokkaan huokoisuuden arvoa: 38 % ja 47 %. Tulosten perusteella laskuissa käytettävän huokoisuusarvon vaikutus on vähäinen.

7 ERI PARAMETRIEN JA REUNAehtojen VAIKUTUS KULKEUTUMISEEN

Seuraavissa simuloinneissa tutkitaan eri parametrien ja reunaehtojen vaikutusta yksiulotteiseen kulkeutumiseen muuttamalla yhtä ominaisuutta kerrallaan ja pitämällä muiden ominaisuuksien arvot vakioina. Perustapauksena, jonka suhteen ominaisuuksia vaihdellaan, käytetään kappaleen 5.1 esimerkkitausta.

7.1 Maaperän ominaisvedenjohtavuuden vaikutus



Kuva 9. Kloridipulssin eteneminen kolmessa ominaisvedenjohtavuudeltaan erilaisessa maaperässä.

Kuten jo aiemmin todettiin, ominaisvedenjohtavuuden vaikutus kulkeutumiseen on oleellinen. Tilanteen havainnollistamiseksi simuloitiin kulkeutumista kolmessa ominaisvedenjohtavuudeltaan erilaisessa maaperässä:

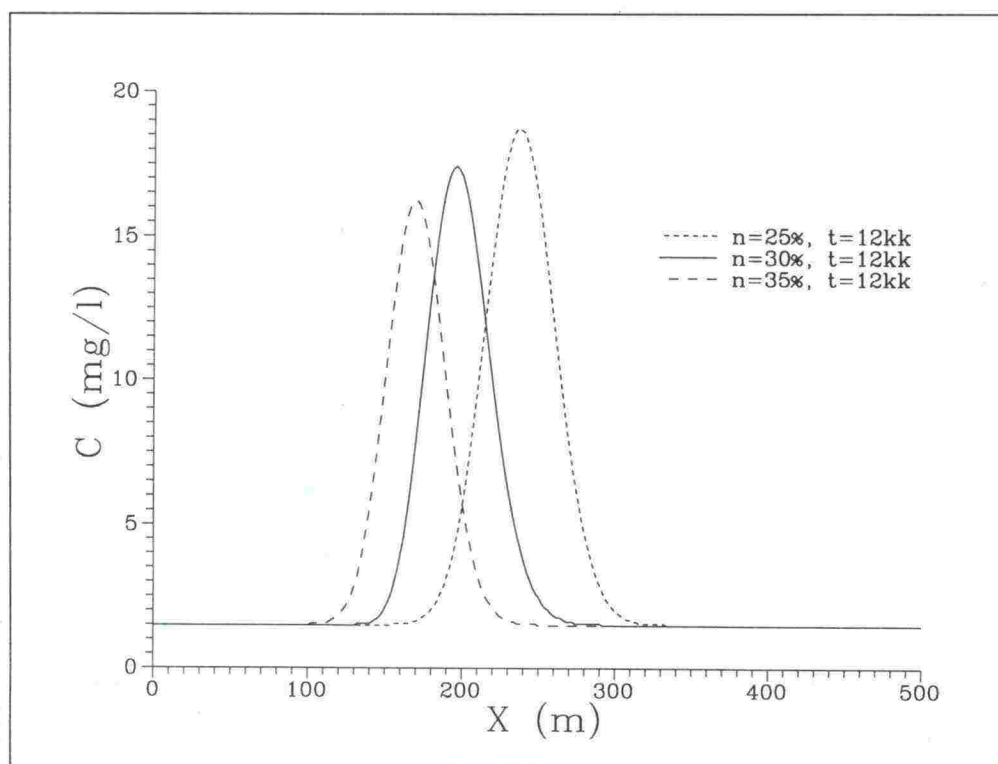
- a) $k = 10^{-11} \text{ m}^2$ ($K \approx 6,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)
- b) $k = 10^{-10} \text{ m}^2$ ($K \approx 6,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)
- c) $k = 10^{-9} \text{ m}^2$ ($K \approx 6,5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)

Tuloksista (kuva 9) havaitaan odotettavissa oleva suuruusluokkaero pulssin kulkemassa matkassa, joka kolmessa kuukaudessa on ollut n. 4, 40 tai 400 metriä. Koska dispersio on suoraan verrannollinen pulssin etenemisnopeuteen ($D_1 = \alpha_1 \bar{v} + D'$), ovat myös pitoisuusmaksimit ja -jakaumat hyvin erilaiset eri tapauksissa.

7.2 Maaperän huokoisuuden vaikutus

Huokoisuuden vaikutusta arvioitiin simuloimalla kloridin kulkeutumista kolmessa huokoisuudeltaan erilaisessa maaperässä. Simuloinneissa käytetyt tehokkaat huokoisuuden arvot olivat:

- a) $n = 25 \%$
- b) $n = 30 \%$
- c) $n = 35 \%$



Kuva 10. Kloridin kulkeutuminen erilaisissa huokoisuusolosuhteissa.

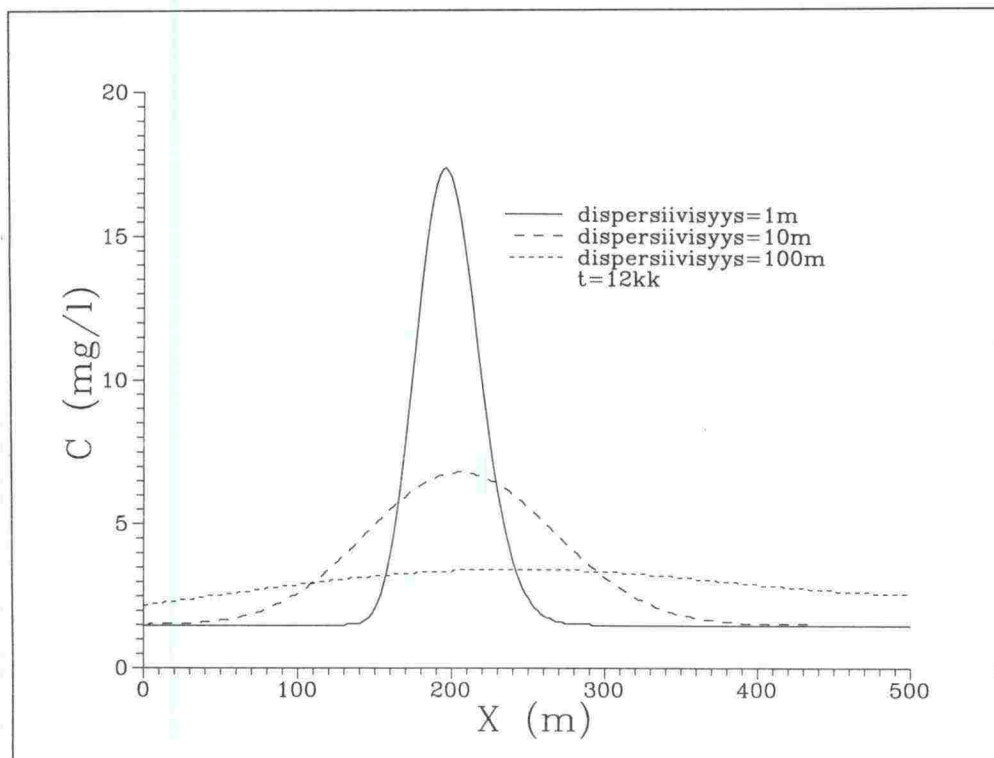
Simuloinnin tuloksista (kuva 10) nähdään, että pienempi tehokas huokoisuus aiheuttaa suuremmat kloridipitoisuudet. Kloridi myös etenee nopeammin keskimääräisen virtausnopeuden kasvaessa. Huokoisuuden vaikutus kulkeutumiseen on kuitenkin huomattavasti vähäisempi kuin vedenjohtavuuden, ja etenemät ovat keskenään samaa suuruusluokkaa.

7.3 Dispersiivisyyden vaikutus

Homogeeniselle hiekalle laboratorio-olosuhteissa mitattuna pitkittäinen dispersiivisyys on senttimetrien suuruusluokkaa. Kentällä se vaihtelee metristä satoihin metreihin maaperän heterogeenisuudesta johtuen. Poikittainen dispersiivisyys on vähäisempää ollen 1/100 - 1/5 pitkittäisestä dispersiivisyydestä (de Marsily 1986). Simuloitaessa leviämistä laajoilla alueilla hiekkaisessa maaperässä käytetään yleensä suuria dispersiivisyyksien arvoja, esim. $\alpha_1 = 100$ m ja $\alpha_1 = 50$ m (Freeze & Cherry 1979; Pinder 1973; Konikow & Bredehoeft 1974; Robertson 1974).

Dispersiivisyyden vaikutuksen arvioimiseksi simuloitiin kloridin kulkeutumista erilaisissa dispersio-olosuhteissa. Simuloidut tapaukset olivat:

- a) $\alpha_1 = 1$ m
- b) $\alpha_1 = 10$ m
- c) $\alpha_1 = 100$ m



Kuva 11. Dispersiivisyyden vaikutus kloridin kulkeutumiseen.

Poikittaisella dispersiivisyydellä ei vyöhykkeittäisen kulkeutumisen tapauksessa ole merkitystä. Simuloinnin tuloksista (kuva 11) nähdään, että dispersiivisyyden ollessa hyvin suuri, pitoisuusmaksimit ovat pieniä ja vuodenaikaisvaihtelu vähäistä. Toisaalta kohonneita kloridi pitoisuuksia voi esiintyä hyvinkin kaukana varsinaiseen pulssin etenemiseen verrattuna

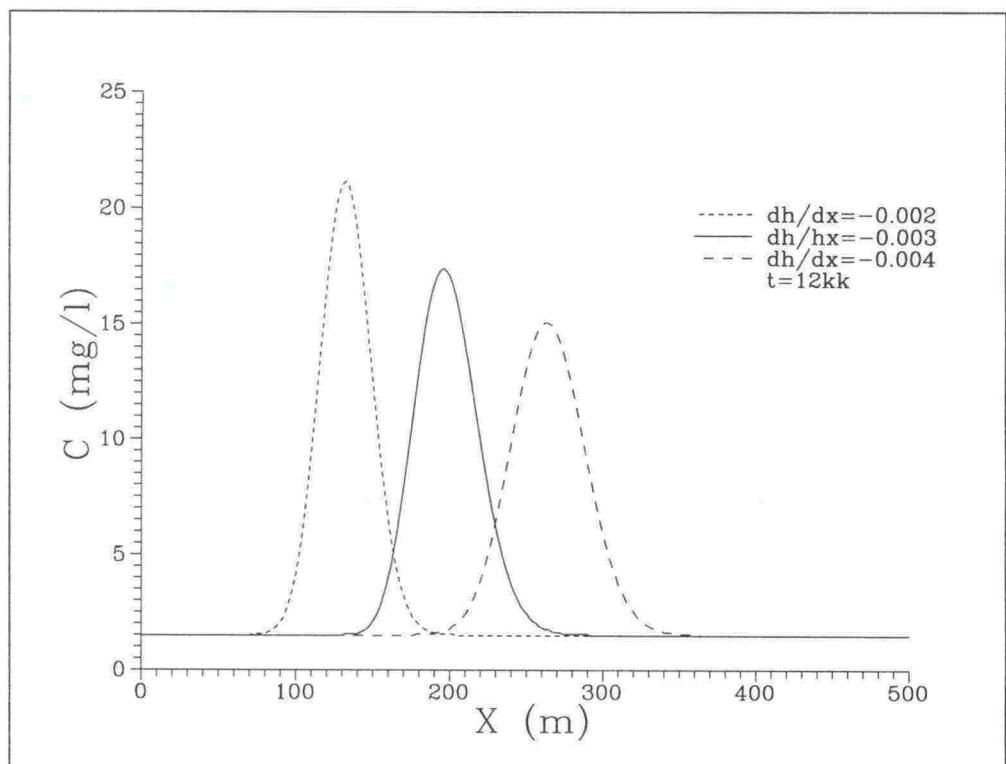
Dispersiivisyyden asianmukainen määrittäminen tietyllä pohjavesialueella edellyttää kenttämittauksia: kentällä tehtäviä merkkiainekokeita ja niiden analyttistä tai numeerista tulkintaa.

7.4 Hydraulisen gradientin vaikutus

Hydraulinen gradientti muodostuu kulloisenkin virtaustilanteen mukaan ja määräytyy maaperän ja virtaavan veden ominaisuuksien, sekä virtauksen reunaehtojen (imeytyminen, purkautuminen ym.) perusteella eikä varsinaisesti ole mikään itsenäinen suure. Gradientti on kuitenkin suhteellisen helppo mitata ja sen vuoksi sitä käsitellään tässä tarkastelussa erillisenä itsenäisenä ominaisuutena. Gradientin vaikutusta kulkeutumiseen simuloitiin kolmessa eri virtaustilanteessa:

- a) $dh/dx = -0,002$
- b) $dh/dx = -0,003$
- c) $dh/dx = -0,004$

Simuloinnin tuloksista (kuva 12) nähdään, että pulssin etenemisnopeus ja etenemä ovat suoraan verrannollisia gradienttiin.



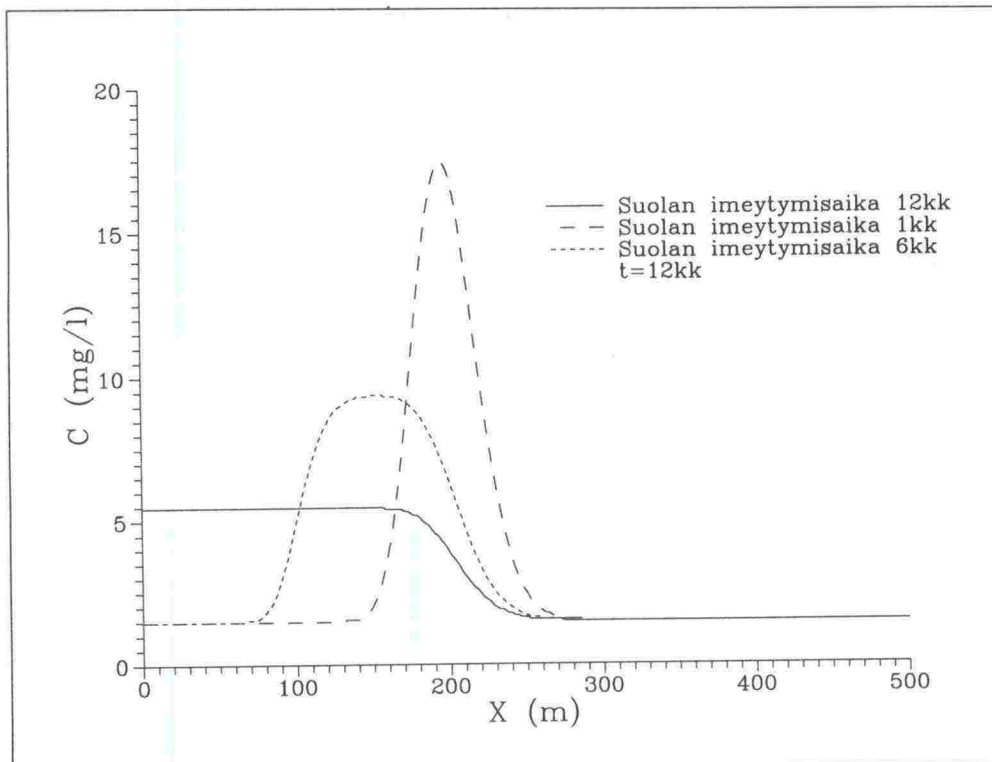
Kuva 12. Gradientin vaikutus kloridin kulkeutumiseen.

7.5 Suolauksen jaksollisuuden ja suolan imeytymisnopeuden vaikutus

Simuloidaan kloridin kulkeutumista vuoden aikana, kun suola imeytyy:

- tasaisesti vuoden aikana
- 1 kk:n kuluessa
- 6 kk:n kuluessa

Vuoden aikana imeytyvä suolamäärä on kaikissa tapauksissa sama. Simuloitu pitoisuusjakauma vuoden kuluttua suolan imeytymisen alkamisesta kaikissa kolmessa tapauksessa on esitetty kuvassa 13. Kuvasta nähdään pitoisuusjakaumien erilainen muoto sekä maksimipitoisuuden erilainen sijainti eri tapauksissa (vrt. kappale 5.2). Jos suola imeytyisi tasaisesti vuoden aikana, ei vuodenaikaisvaihtelua esiintyisi lainkaan.



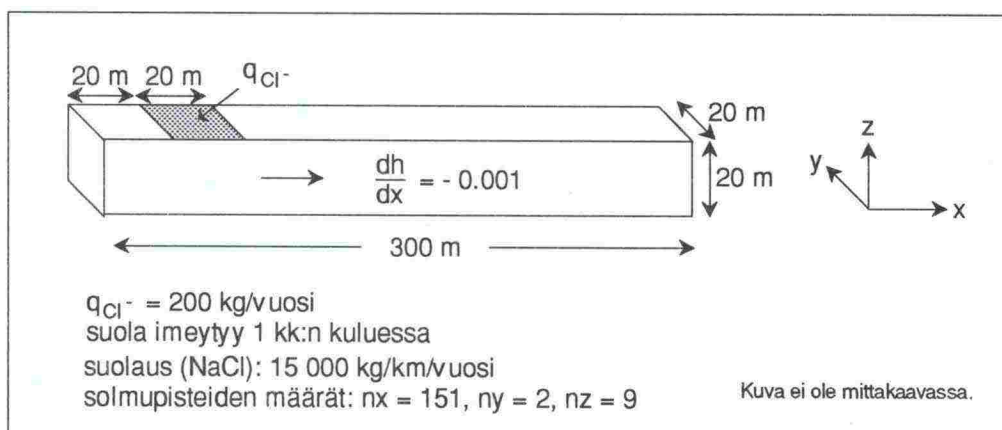
Kuva 13. Simuloitu Cl-pitoisuusjakauma kolmessa erilaisessa suolan imeytymistilanteessa. Imeytynyt suolamäärä on kaikissa tapauksissa sama.

8 MAAPERÄN KERROKSELLISUUDEN VAIKUTUS KULKEUTUMISEEN

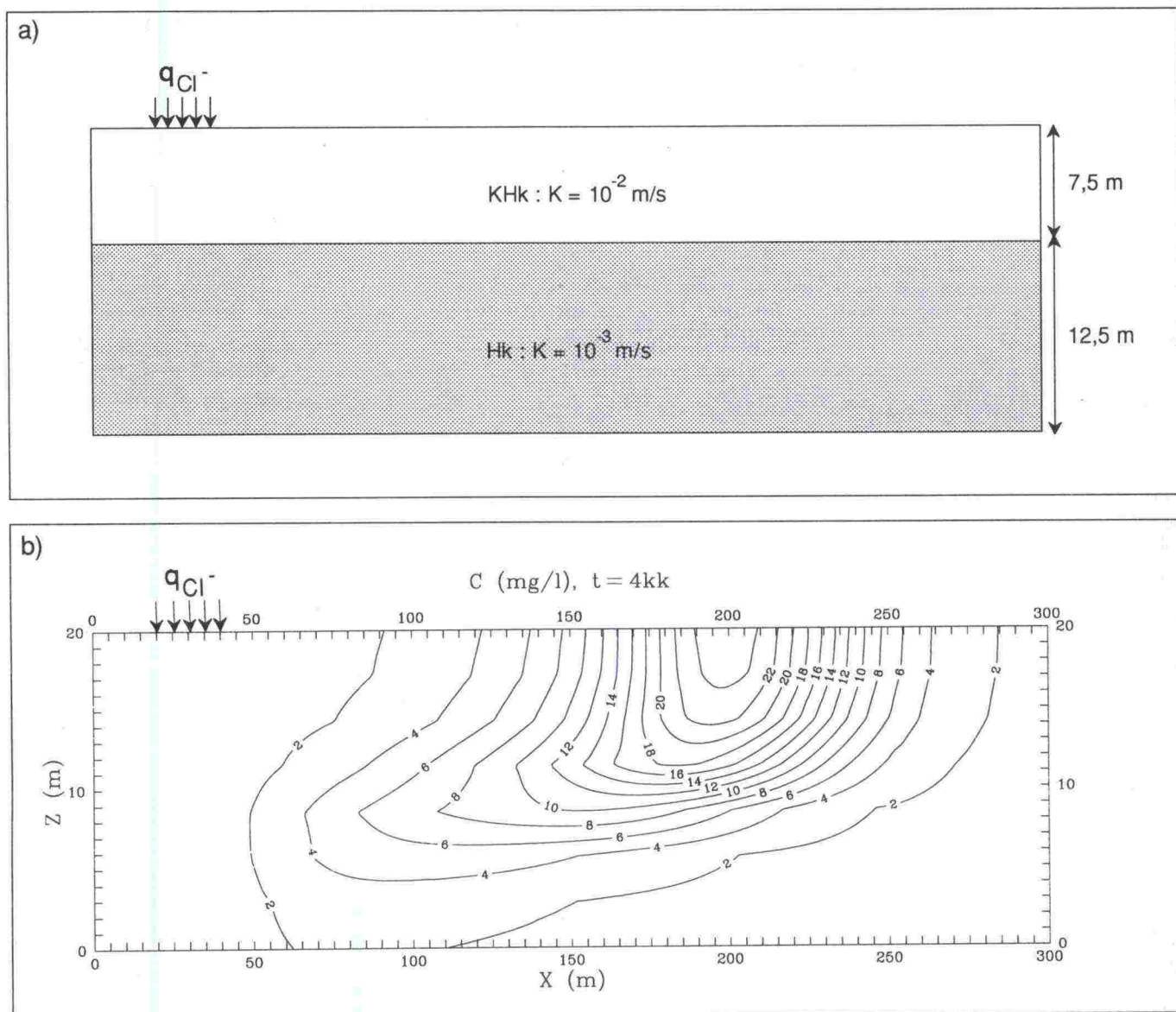
Maaperän kerroksellisuuden vaikutusta kulkeutumiseen tutkittiin simuloimalla suolan kulkeutumista kuudessa erilaisessa poikkileikkauksessa. Käytetty konseptuaalinen malli on esitetty kuvassa 14 ja parametriarvot taulukossa 4. Malli kuvaa tilannetta, jossa tie kulkee virtaussuuntaan nähden poikittain, tielle levitetään suolaa (NaCl) 15 tonnia/km vuodessa ja suola imeytyy vesi-muodostumaan kevätvalunnan aikana 1 kk kuluessa. Simulointi aloitetaan hetkestä, jolloin suolan imeytyminen alkaa, ja simulointia jatketaan kunnes kloridin käyttäytyminen kyseisessä tilanteessa voidaan selvästi erottaa. Tarkemmat mallit kerroksellisuudesta sekä simulointien tulokset on esitetty kuvissa 15 - 20.

Taulukko 4. Maaperän ominaisuudet

Ominaisvedenjohtavuus	$k = 1,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 - 1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2$
Vedenjohtavuus	$K \approx 10^{-3} \text{ m/s} - 10^{-1} \text{ m/s}$
Tehokas huokoisuus	$n = 44 \%$
Dispersiivisyys	$\alpha_l = 1 \text{ m}$ $\alpha_t = 0,5 \text{ m}$
Kokoonpuristuvuus	$c = 10^{-8} \text{ 1/Pa}$

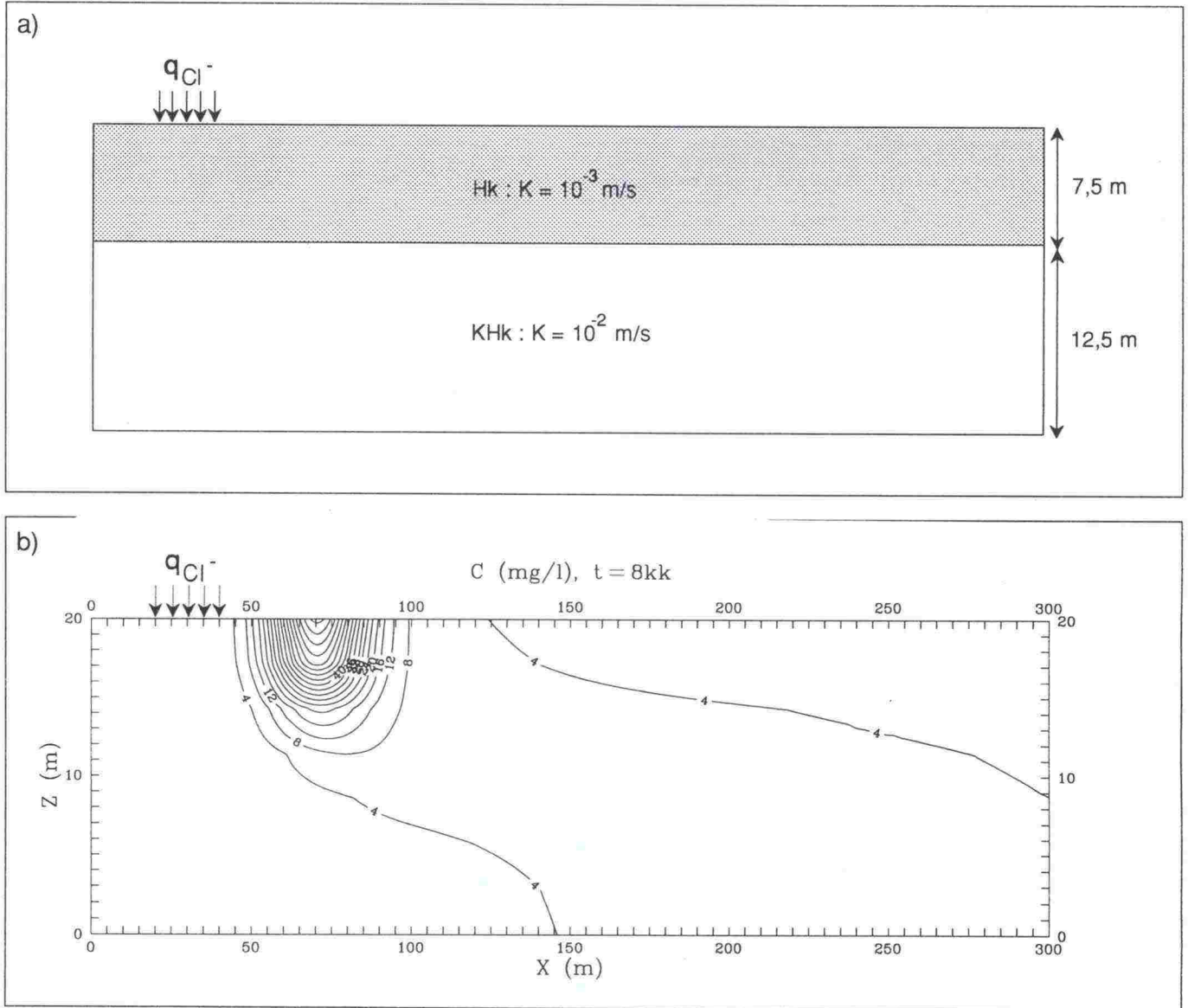


Kuva 14. Kerroksellisuuden vaikutuksen tutkimiseen käytetty konseptuaalinen malli.

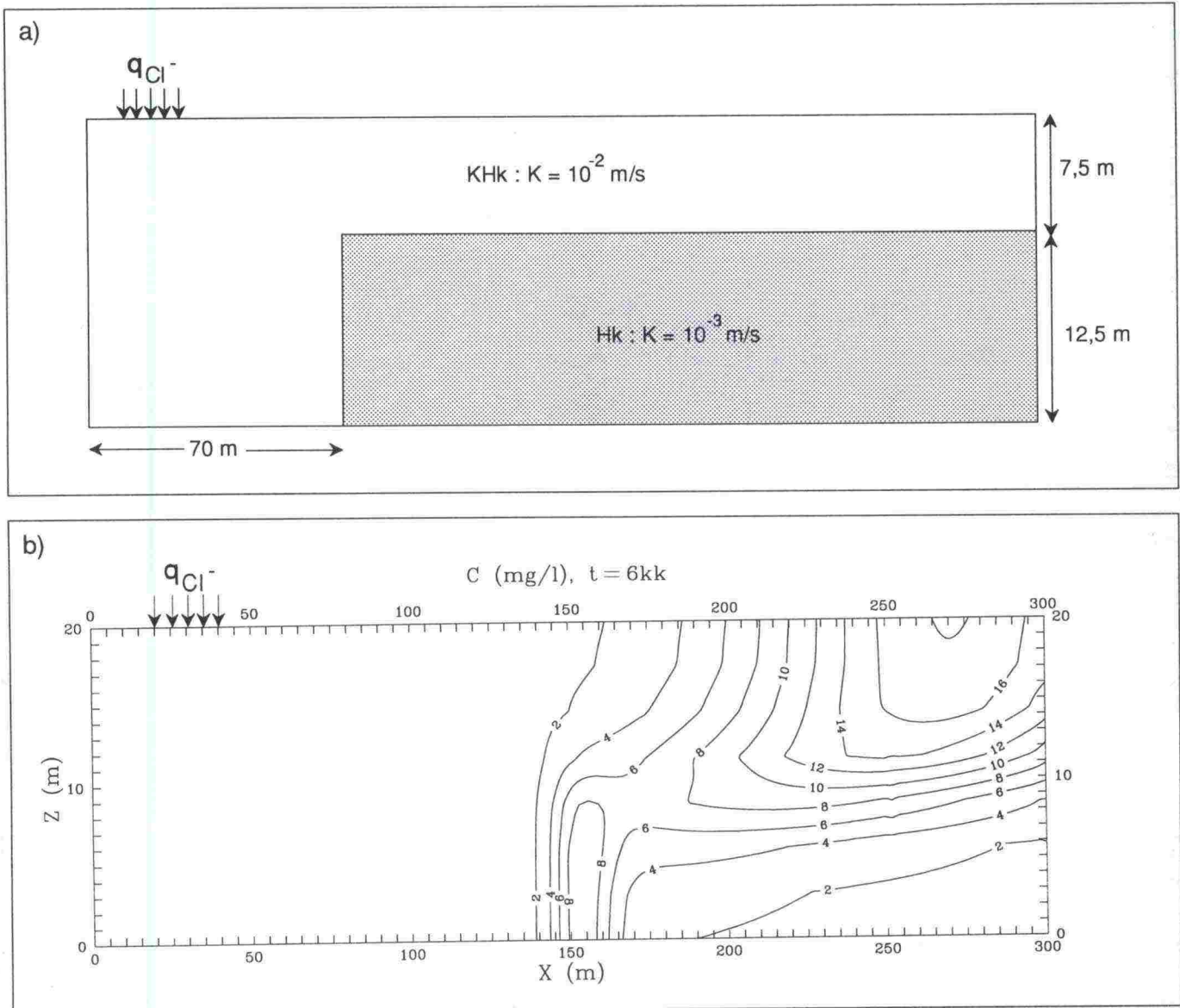


Kuva ei ole mittakaavassa

Kuva 15. Tapaus 1: a) Virtauksen suuntainen poikkileikkaus tilanteesta b) Simuloitu kloridipitoisuusjakauma 4 kk:n kuluttua suolan imeytymisen alkamishetkestä

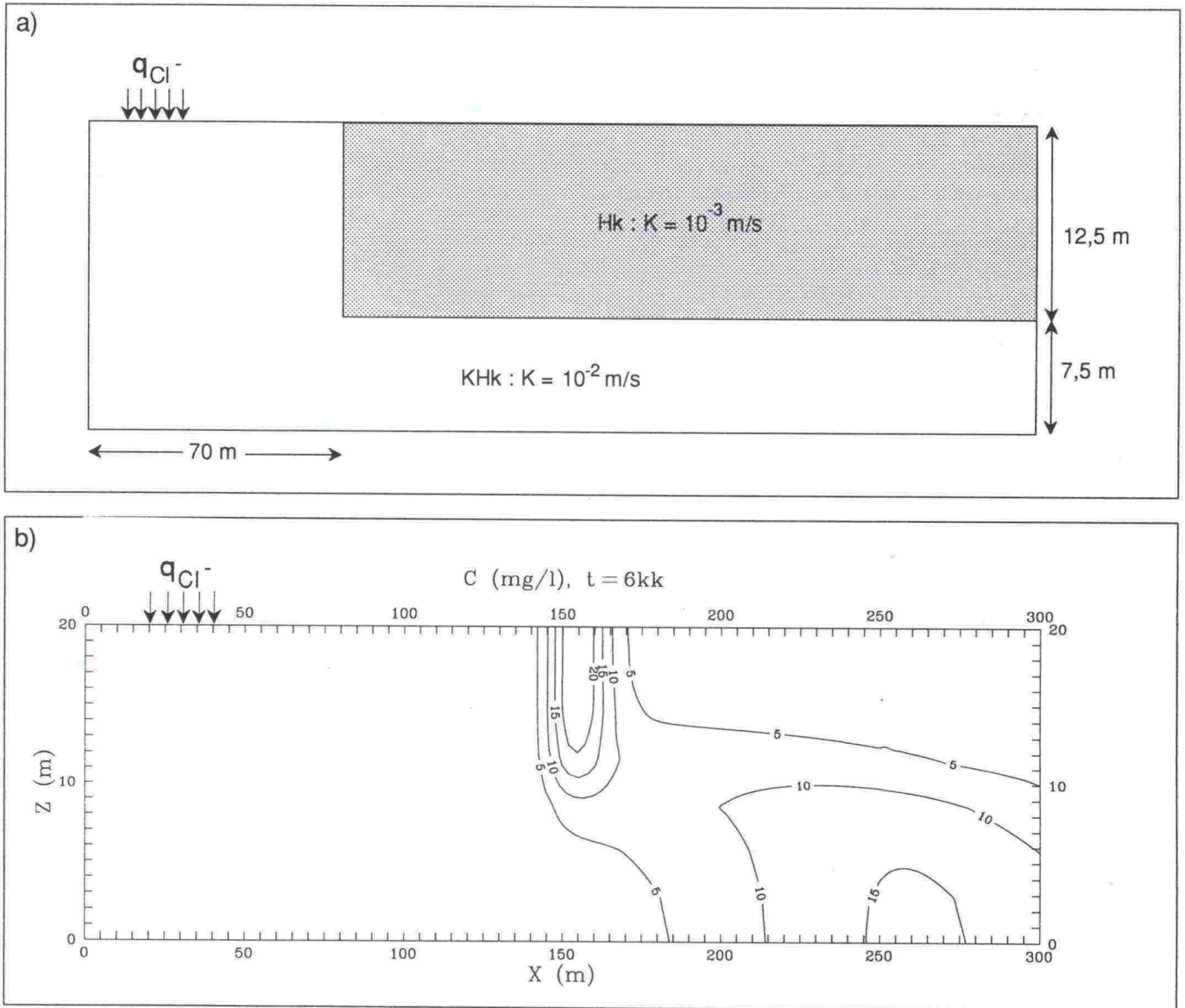


Kuva 16. Tapaus 2: a) Virtauksen suuntainen poikkileikkaus tilanteesta b) Simuloitu kloridipitoisuusjakauma 8 kk:n kuluttua suolan imeytymisen alkamishetkestä.



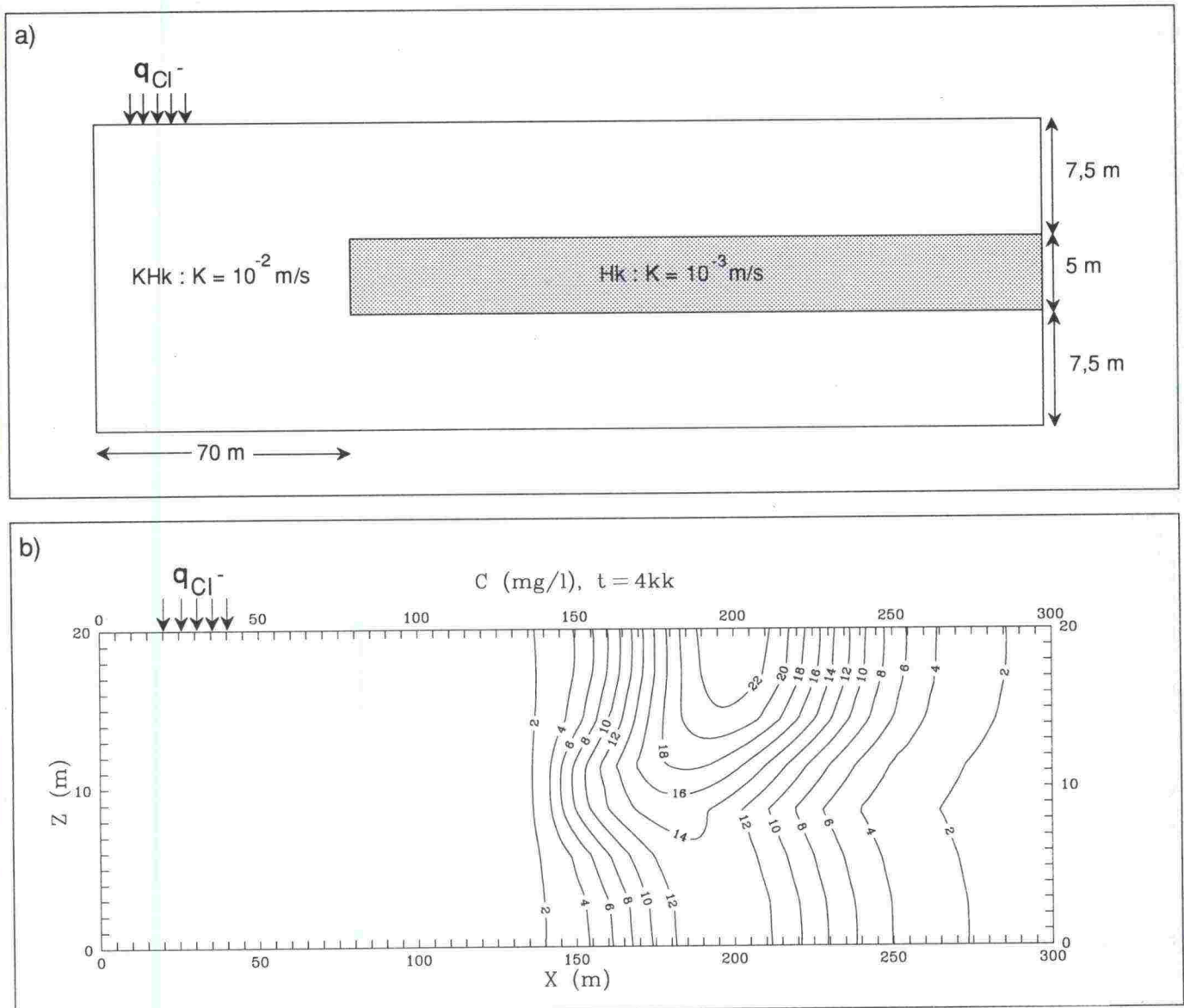
Kuva ei ole mittakaavassa

Kuva 17. Tapaus 3: a) Virtauksen suuntainen poikkileikkaus tilanteesta b) Simuloitu kloridipitoisuusjakauma 6 kk:n kuluttua suolan imeytymisen alkamishetkestä.



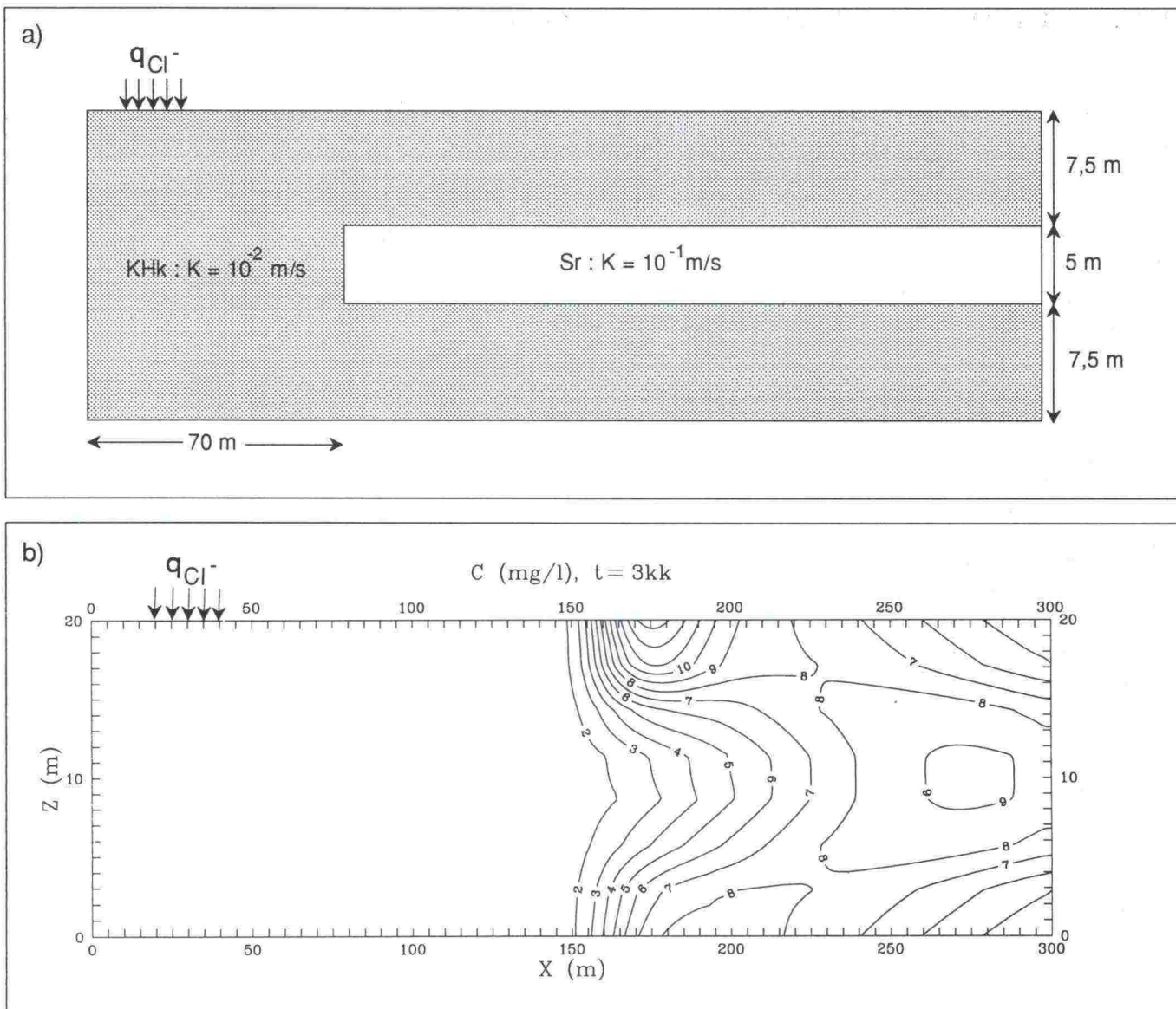
Kuva ei ole mittakaavassa

Kuva 18. Tapaus 4: a) Virtauksen suuntainen poikkileikkaus tilanteesta b) Simuloitu kloridipitoisuusjakauma 6 kk:n kuluttua suolan imeytymisen alkamishetkestä.



Kuva 19. Tapaus 5: a) Virtauksen suuntainen poikkileikkaus tilanteesta b) Simuloitu kloridipitoisuusjakauma 4 kk:n kuluttua suolan imeytymisen alkamishetkestä.

Kuva ei ole mittakaavassa



Kuva ei ole mittakaavassa

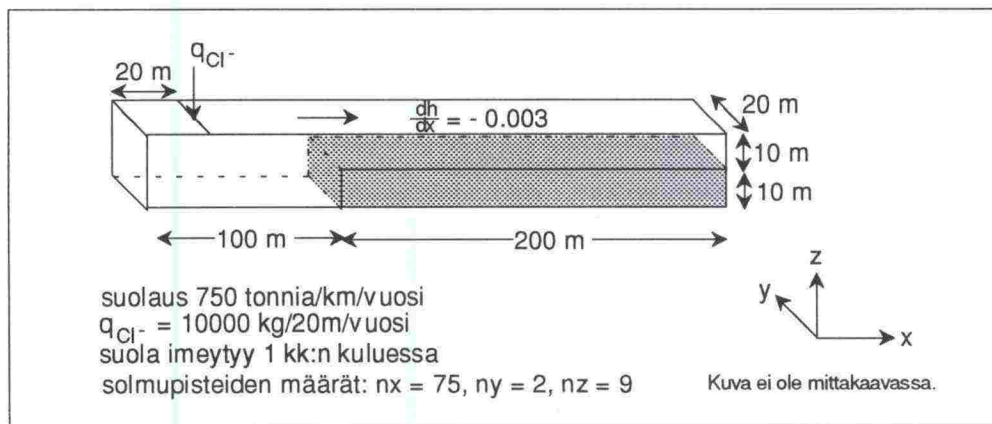
Kuva 20. Tapaus 6: a) Virtauksen suuntainen poikkileikkaus tilanteesta b) Simuloitu kloridipitoisuusjakauma 3 kk:n kuluttua suolan imeytymisen alkamishetkestä.

Edellä esitettyjen simulointien avulla voidaan arvioida kloridin kulkeutumista erilaisissa kerroksellisuustilanteissa. Simuloituja tapauksia voidaan soveltaa myös muiden maalajien välisiin kerroksellisuustilanteisiin, kun muistetaan, että mitä jyrkempiä vedenjohtavuuserot ovat, sitä voimakkaampi on myös kerroksellisuuden vaikutus.

Maaperän kerroksellisuus aiheuttaa erilaisten kloridipitoisuuksien esiintymistä eri syvyyksillä. Kun eri maakerrosten vedenjohtavuudet ovat erilaiset, myös kloridin etenemisnopeudet näissä maakerroksissa poikkeavat toisistaan. Suurin osa kloridista kulkeutuu parhaiten vettä johtavissa kerroksissa, mutta nämä kerrokset myös puhdistuvat nopeammin kuin huonosti vettä johtavat kerrokset. Esimerkiksi tiheydeltään raskaamman veden painumiselta vaikuttava pohjalla esiintyvä korkeampi suolapitoisuus voi siis johtua myös kerroksellisuudesta (esimerkiksi kuva 18).

9 KALLIOKYNNYKSEN VAIKUTUS KULKEUTUMISEEN

Jyrkästi kohoava kalliokynnyks on potentiaalinen suolaisemman veden kertymistä aiheuttava tilanne. Ilmiön tarkastelemiseksi simuloitiin tapausta, jossa kallion pinta kohoaa voimakkaasti virtauksen suunnassa. Konseptuaalinen malli tilanteesta on esitetty kuvassa 21, ja simuloinneissa käytetyt parametriarvot taulukossa 5. Koska kalliokynnyksen vaikutusta haluttiin arvioida nimenomaan tilanteessa, jossa suolapitoinen vesi painuu pohjavesimuodostuman pohjalle, oli simuloinnissa injektoitu kloridimäärä noin satakertainen 'normaalisuolauksen' (7,5 tonnia/km vuodessa) aiheuttamaan kloridimäärään verrattuna.

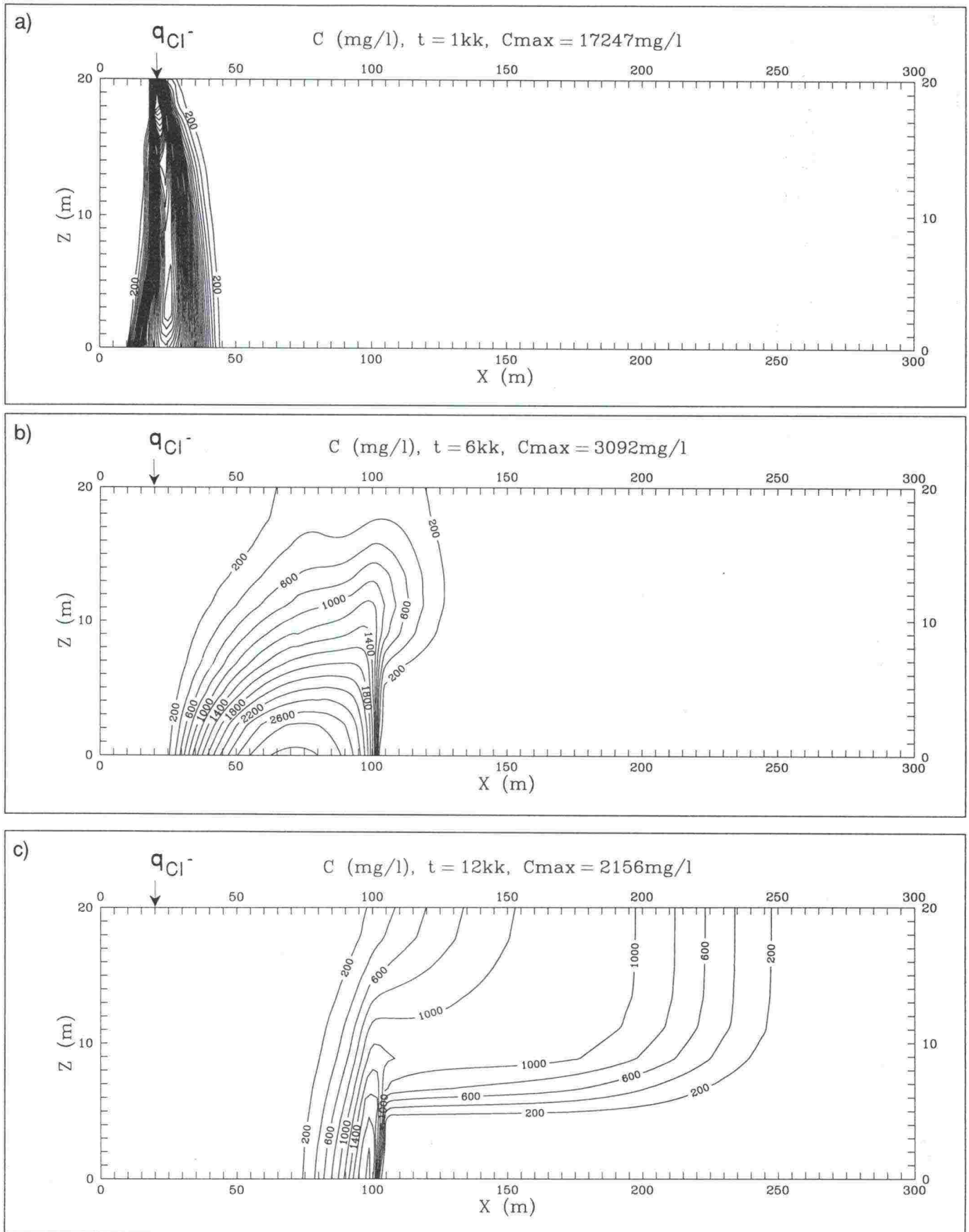


Kuva 21. Konseptuaalinen malli tilanteesta, jossa pohjavesimuodostuman pohjalle painunut suolapitoinen vesi kohtaa jyrkän kalliokynnyksen.

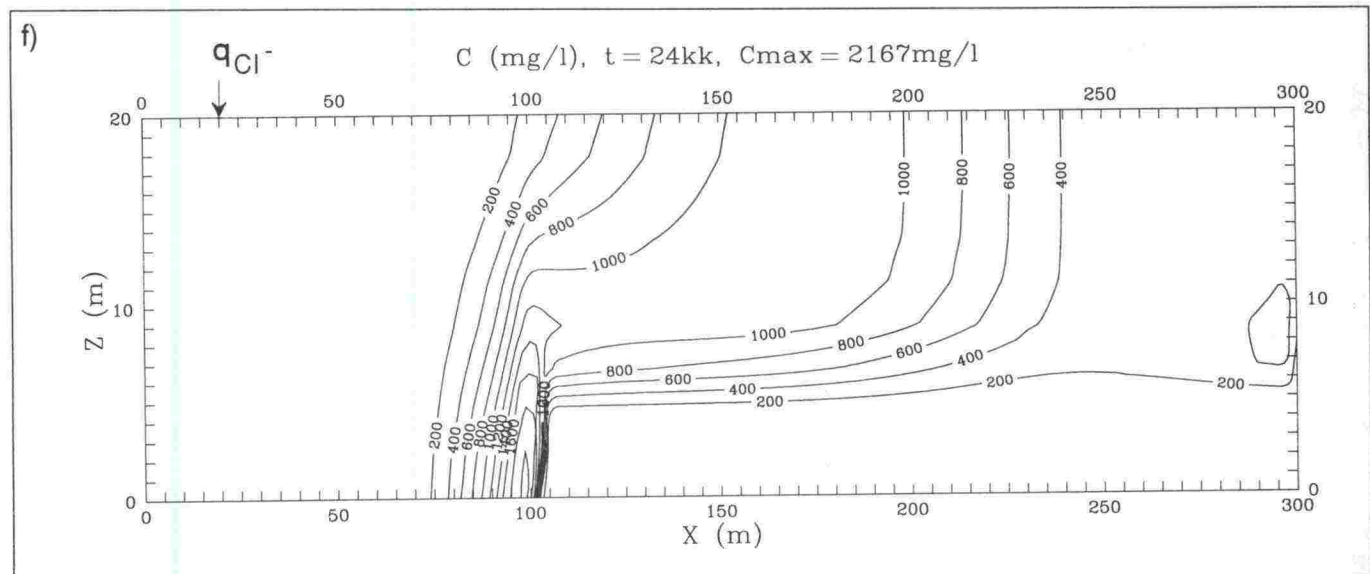
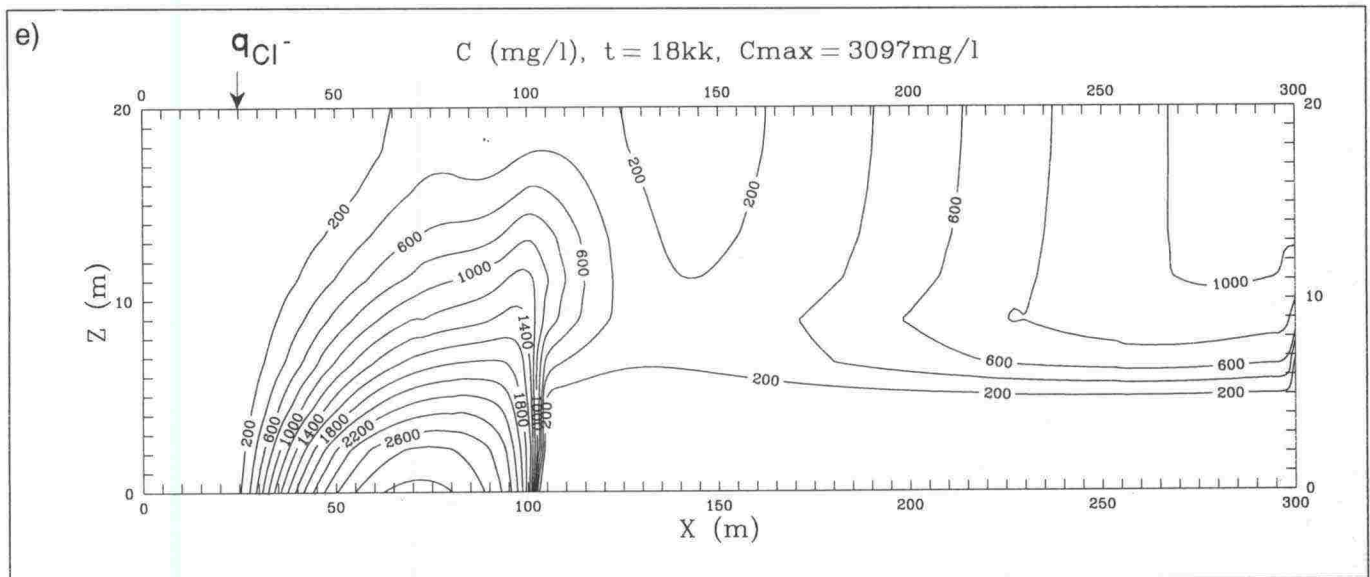
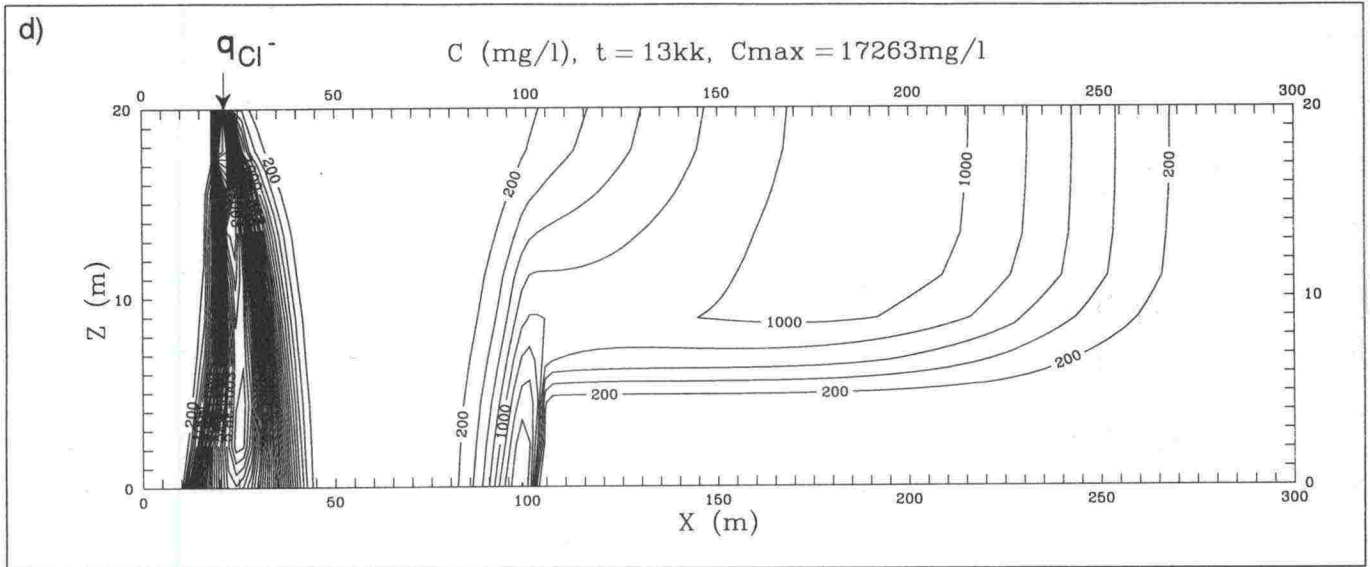
Taulukko 5. Parametriarvot.

Ominaisvedenjohtavuus	hiekkä: $k = 10^{-10} \text{ m}^2$ kallio: $k = 10^{-20} \text{ m}^2$
Vedenjohtavuus	hiekkä: $K \approx 6,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ kallio: $K \approx 6,5 \times 10^{-14} \text{ m/s}$
Tehokas huokoisuus	hiekkä: $n = 30 \%$ kallio: $n = 5 \%$
Dispersiivisyys	$a_l = 1 \text{ m}, \alpha_l = 0,5 \text{ m}$
Kokoonpuristuvuus	hiekkä: $c = 10^{-8} \text{ 1/Pa}$ kallio: $c = 10^{-10} \text{ 1/Pa}$

Simuloinnin tulokset on esitetty kuvissa 22 a-f. Kuvista nähdään, kuinka suolapitoinen vesi painuu pohjavesimuodostuman pohjalle, ja kuinka osa siitä aluksi kerääntyy kalliokynnyksen juureen. Suola poistuu kuitenkin vuoden aikana kynnyksen yli. Seuraavan vuoden suola-annoksen saapuessa eivät pitoisuudet ole oleellisesti suurempia ($C_{\text{max}} = 2167 \text{ mg/l}$) kuin ensimmäisenä vuotena ($C_{\text{max}} = 2156 \text{ mg/l}$). Näissä olosuhteissa kalliokynnyks siis hidastaa suolan etenemistä, mutta ei aiheuta varsinaista kerääntymistä kalliokynnyksen juurelle. Yleispäteviä arvioita suolan kertymisestä ei simuloinnin perusteella voida tehdä, mutta tulosta voidaan käyttää paikkakohtaisten arvioiden tukena.



Kuva 22. Simuloitu kloridipitoisuus virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa ajanhetkillä a) $t = 1\text{kk}$, b) $t = 6\text{kk}$, c) $t = 12\text{kk}$ d) $t = 13\text{kk}$, e) $t = 18\text{kk}$, f) $t = 24\text{kk}$



10 SUOLAPITOISEN VEDEN PAINUMINEN POHJAVESIMUODOSTUMASSA

10.1 Lähestymistapa ja simuloinnit

Tiesuolatutkimusten yhteydessä on esitetty ajatuksia painavamman suolapitoisen veden mahdollisesta painumisesta ja kerääntymisestä pohjavesimuodostuman pohjalle (Soveri 1991). Ilmiötä tutkittiin simuloimalla suolan kulkeutumista kuudessa erilaisessa maalajissa, neljällä erilaisella pohjavedenpinnan gradientilla. Tarkasteltavat maalajit on esitetty taulukossa 6 ja eri virtaustilanteet taulukossa 7. Tapaukset valittiin samoin kuin tutkittaessa suolan etenemisnopeuksia eri maalajeissa (luku 6). Tilannetta kuvaava konseptuaalinen malli on sama kuin tutkittaessa maaperän kerroksellisuuden vaikutusta kulkeutumiseen (kuva 14).

Taulukko 6. Painumissimuloinneissa käytetyt maalajit. Suluissa esitetyt maalajit ovat viitteellisiä, koska saman maalajin ominaisvedenjohtavuudet vaihtelevat suuresti (vrt. taulukko 3.).

Maalaji	Ominaisvedenjohtavuus k (m)	Vedenjohtavuus K (m/s)	Tehokas huokoisuus n (%)
Maalaji 1 (Sr)	$1,5 \times 10^{-8}$	$\approx 10^{-1}$	42
Maalaji 2 (KaHk)	$1,5 \times 10^{-9}$	$\approx 10^{-2}$	44
Maalaji 3 (Hk)	$1,5 \times 10^{-10}$	$\approx 10^{-3}$	44
Maalaji 4 (HiHk)	$1,5 \times 10^{-11}$	$\approx 10^{-4}$	44
Maalaji 5 (Si)	$1,5 \times 10^{-12}$	$\approx 10^{-5}$	47
Maalaji 6 (HkMr)	$1,5 \times 10^{-13}$	$\approx 10^{-6}$	38

Taulukko 7. Eri virtaustilanteet ja niitä vastaavat keskimääräiset virtausnopeudet \bar{v} (m/s) yhden numeron tarkkuudella.

	$dh/dx = -0,0001$	$dh/dx = -0,001$	$dh/dx = -0,01$	$dh/dx = -0,1$
$K \approx 10^{-1} \text{ m/s}$	2×10^{-5}	2×10^{-4}	2×10^{-3}	2×10^{-2}
$K \approx 10^{-2} \text{ m/s}$	2×10^{-6}	2×10^{-5}	2×10^{-4}	2×10^{-3}
$K \approx 10^{-3} \text{ m/s}$	2×10^{-7}	2×10^{-6}	2×10^{-5}	2×10^{-4}
$K \approx 10^{-4} \text{ m/s}$	2×10^{-8}	2×10^{-7}	2×10^{-6}	2×10^{-5}
$K \approx 10^{-5} \text{ m/s}$	2×10^{-9}	2×10^{-8}	2×10^{-7}	2×10^{-6}
$K \approx 10^{-6} \text{ m/s}$	2×10^{-10}	2×10^{-9}	2×10^{-8}	2×10^{-7}

Lähestymistavaksi valittiin 'riskikartoitus', jossa simuloitiin erilaisia maalaji-gradientti-yhdistelmiä. Simulointien olosuhteet valittiin siten, että painuminen olisi mahdollisimman todennäköistä. Tällaisia painumistodennäköisyyttä lisääviä oletuksia olivat:

- Tiesuolaa levitetään runsaasti (15 t/km vuodessa).
- Kaikki suola imeytyy pohjaveteen.
- Suola imeytyy maaperään välittömästi tien läheisyydessä 20 m leveällä alueella.
- Suola imeytyy pohjaveteen kevätkäynnin aikana 1 kk kuluessa.
- Dispersio on vähäistä, $\alpha_1 = 1$ m, $\alpha_2 = 0,5$ m.
- Kerroksellisuutta ei esiinny (homogeenisuus) ja vedenjohtavuus on joka suunnassa sama (isotrooppisuus).

Tuloksia tulkittaessa voidaan tällöin uskoa, että mikäli simuloitussa tapauksessa painumista ei tapahdu, ei sitä tapahdu luonnossakaan kyseisissä maaperä- ja virtausolosuhteissa. Jos taas painumista näyttää simuloinnin perusteella tapahtuvan, on tapaus tutkittava tarkemmin, sillä todellisessa tapauksessa monet seikat saattavat heikentää painumistodennäköisyyttä. Tällaisia painumista ehkäiseviä seikkoja ovat mm.

- Tiesuolaa levitetään vähemmän kuin 15 t/km/vuosi, tai osa suolasta poistuu pintavalunnan mukana tai ojien tai viemäroinnin kautta.
- Suola leviää pintavalunnan vaikutuksesta laajemmalle alueelle ennen imeytymistään maaperään.
- Imeytyminen jakautuu pitemmälle aikavälille kuin 1kk.
- Dispersio saattaa luonnonolosuhteissa olla hyvinkin voimakasta, jopa $\alpha_1 = 100$ m, $\alpha_2 = 50$ m (Freeze & Cherry 1979).
- Maaperän kerroksellisuus aiheuttaa anisotrooppisuuden, jolloin vedenjohtavuus saattaa syvyysuunnassa olla esim. vain 1/100 vaakasuunnasta vedenjohtavuudesta (Freeze & Cherry 1979).

Simulointien tulokset on esitetty liitteessä 2. Taulukossa 7 on havainnollisuuden vuoksi esitetty näiden gradienttien ja vedenjohtavuuksien aiheuttamat keskimääräiset virtausnopeudet kaavalla 5 laskettuna yhden numeron tarkkuudella. Huokoisuuden vaikutus virtausnopeuteen on suhteellisen vähäinen. Aikaisempien tulosten (esim. luku 6) perusteella oletettiin, ettei huokoisuudella ole oleellista vaikutusta painumiseen.

10.2 Johtopäätökset

Simulointien tulokset on koottu taulukkoon 8. Taulukosta nähdään, kuinka painumisen todennäköisyys kasvaa pohjavedenpinnan gradientin pienentyessä. Pohjaveden pinta seuraa yleensä loivasti maanpinnan muotoja ja pohjavedenpinnan gradientti on pienimmillään vedenjakajan läheisyydessä ja laaksossa. Vedenjakajalla virtauksella on myös syvyysuuntainen komponentti alaspäin, mikä myös lisää painumisilmiötä. Laaksossa vastaavasti virtauksella on syvyysuuntainen komponentti ylöspäin. Tässä suhteessa

painumisen mahdollisuus on siis suurimmillaan vedenjakajalla ja sen läheisyydessä.

Vedenjohtavuuden vaikutus painumiseen ei ole aivan yhtä suoraviivainen. Vedenjohtavuuden pienentyessä painumisen mahdollisuus toisaalta kasvaa virtauksen hidastuessa, mutta toisaalta pienenee, koska myös pystysuuntainen vedenjohtavuus pienenee. Taulukon perusteella painumisen mahdollisuus on suurin hyvin vettä johtavissa maalajeissa pohjavedenpinnan gradientin ollessa hyvin pieni. Suurilla pohjavedenpinnan gradientin arvoilla myös virtausnopeudet ovat suuria eikä painumista tapahdu.

Taulukko 8. Suolapitoisen veden painuminen pohjavesimuodostuman pohjalle (tie virtaukseen nähden poikkisuunnassa)

$\frac{dh}{dx}$ \ K [m/s]	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
- 0,0001	-	++	++	++	+	+
- 0,001	-	-	-	+	+	+
- 0,01	-	-	-	-	-	-
- 0,1	-	-	-	-	-	-

- Painumista ei tapahdu
- + Pitkäaikainen suolaus saattaa aiheuttaa painumista
- ++ Jo yhden vuoden suolaus saattaa aiheuttaa painumista

Painumisen mahdollisuus kasvaa tietenkin myös pitoisuuksien kasvaessa. Tästä johtuen joissakin tapauksissa painumista alkaa tapahtua pitkäaikaisen suolauksen seurauksena. Jos virtausnopeus on hidas, peräkkäisten vuosien suola-annokset kasautuvat ja pitoisuudet kasvavat vuosi vuodelta, kunnes jossakin vaiheessa painumista alkaa tapahtua. Näissä tapauksissa painuminen on usein kuitenkin hyvin hidasta (esim. liite 2, kuva 17). Painuminen voidaan usein havaita vasta siinä vaiheessa, kun suolaus lopetetaan. Painumisen hitaudesta johtuen suolauksen jatkuessa maksimipitoisuudet pysyvät yläreunassa.

Taulukon tuloksia voidaan soveltaa tapauksissa, joissa tie kulkee virtaukseen nähden poikittain tunnettaessa vedenjohtavuus ja gradientti tien läheisyydessä. Mikäli taulukon perusteella painumista ei tapahdu, voidaan uskoa, ettei sitä tapahdu luonnossakaan, sillä simuloinneissa oletukset oli valittu painumista suosiviksi. Mikäli taulukon perusteella painuminen on mahdollista on tilanne tutkittava tarkemmin. Monet seikat saattavat pienentää painumisriskiä (vrt.

kappale 10.1). Kaikkien näiden tapausten kartoittaminen ei tässä yhteydessä ollut mahdollista.

Tien kulkiessa virtauksen suuntaisesti painumisen mahdollisuus on suurempi kuin tässä simuloituissa tapauksissa. Näissä tapauksissa esiintyviin pitoisuuksiin vaikuttaa mm. se, kuinka pitkän matkan tie kulkee pohjavesimuodostuman imeytymisalueella. Tällaiset tapaukset on aina tutkittava tarkemmin. Taulukon 8 tuloksia voidaan kuitenkin pitää suuntaa-antavina, ja niiden avulla voidaan tutkimuksia kohdentaa sinne, missä painumisen mahdollisuus on suurin.

11 TIEN SIJAINNIN VAIKUTUS KLORIDIN KULKEUTUMISEEN HARJUSSA OLEVASSA POHJAVESIMUODOSTUMASSA

11.1 Konseptuaalinen malli

Pohjavesien suolaantumisalttiutta tutkittaessa ongelmallisimmaksi on osoittautunut tilanne, jossa tie seuraa harjujaksoa. Tällöin pohjavesialueeseen kohdistuva suolakuormitus on suhteellisesti suurempi kuin tilanteessa, jossa tie kulkee harju muodostuman poikki (Tuominen 1992).

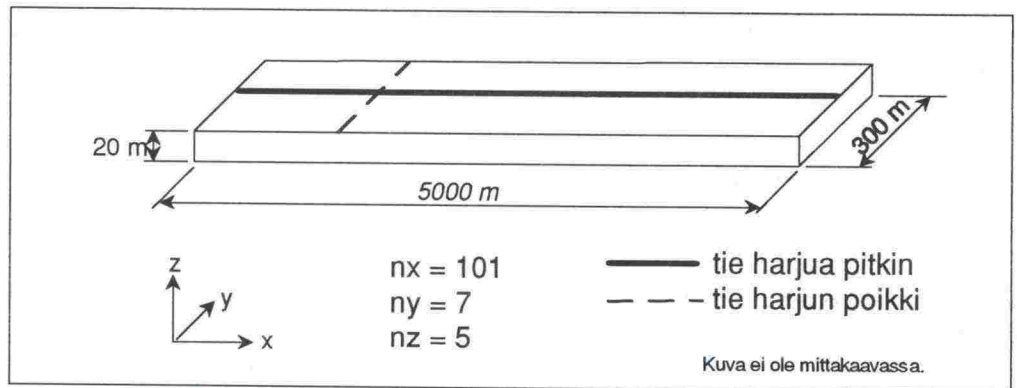
Vaikutuksen suuruusluokan arvioimiseksi simuloitiin näitä kahta tilannetta esimerkkihajumuodostumassa, jossa

- Pohjavesi virtaa harjun suuntaisesti.
- Alue on maa-ainekseltaan lajittunutta hiekkaa.
- Pohjavesikerroksen paksuus on 20 m.
- Pohjaveden pinta laskee harjun suuntaan 5 km:n matkalla n. 15 m ($dh/dx = -0,003$). (Esim. Miekkamäki; Tuominen 1992)
- Kloridin taustapitoisuus on 2 mg/l.

Käytetty konseptuaalinen malli on esitetty kuvassa 23 ja maaperän ominaisuuksia kuvaavat parametriarvot taulukossa 9. Parametriarvot on otettu kirjallisuudesta hiekan keskimääräisten ominaisuuksien perusteella.

Taulukko 9. Parametriarvot. (Airaksinen 1979; Freeze & Cherry 1979).

Ominaisvedenjohtavuus	k	10^{-10}m^2
Tehokas huokoisuus	n	30 %
Dispersiivisyys	α_L	1 m
	α_T	0,5 m
Kokoonpuristuvuus	c	10^{-8}1/Pa



Kuva 23. Harjua kuvaava konseptuaalinen malli.

11.2 Tie kulkee harjun suuntaisesti

Perustilanteena simuloitiin harjun Cl-pitoisuuden kehitystä vuodesta -60 alkaen 31 vuoden ajan, kun tie kulkee 5 km matkalla harjun suuntaisesti. Laskuissa käytettiin taulukossa 10 esitettyjä suolausmääriä, jotka vuodesta 1982 alkaen suurin piirtein vastaavat Miekkamäellä, Keski-Suomessa, käytettyjä suolausmääriä (Tuominen 1992). Kloridin osuuden oletetaan olevan on 65 % suolan määrästä (painosta).

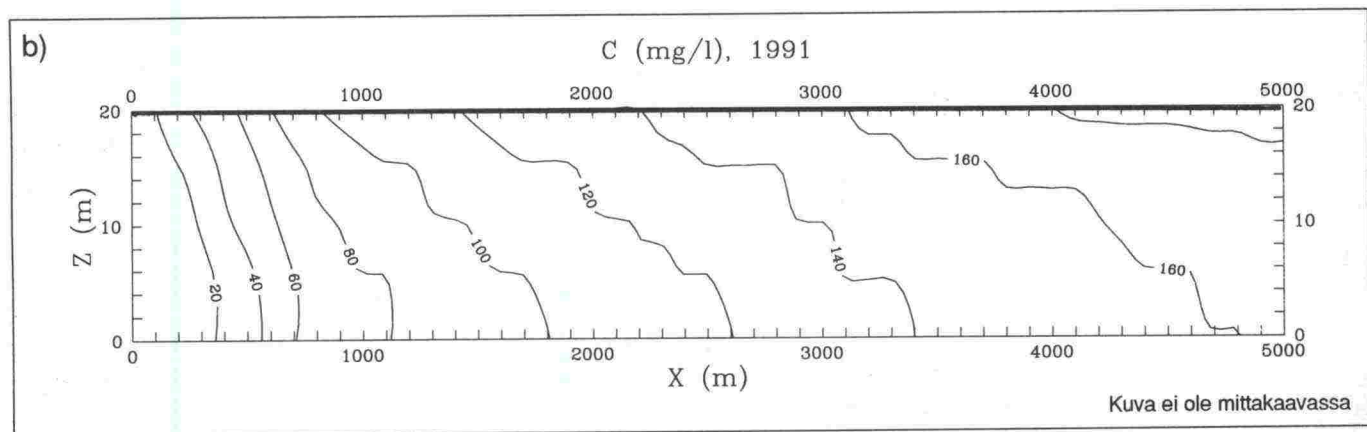
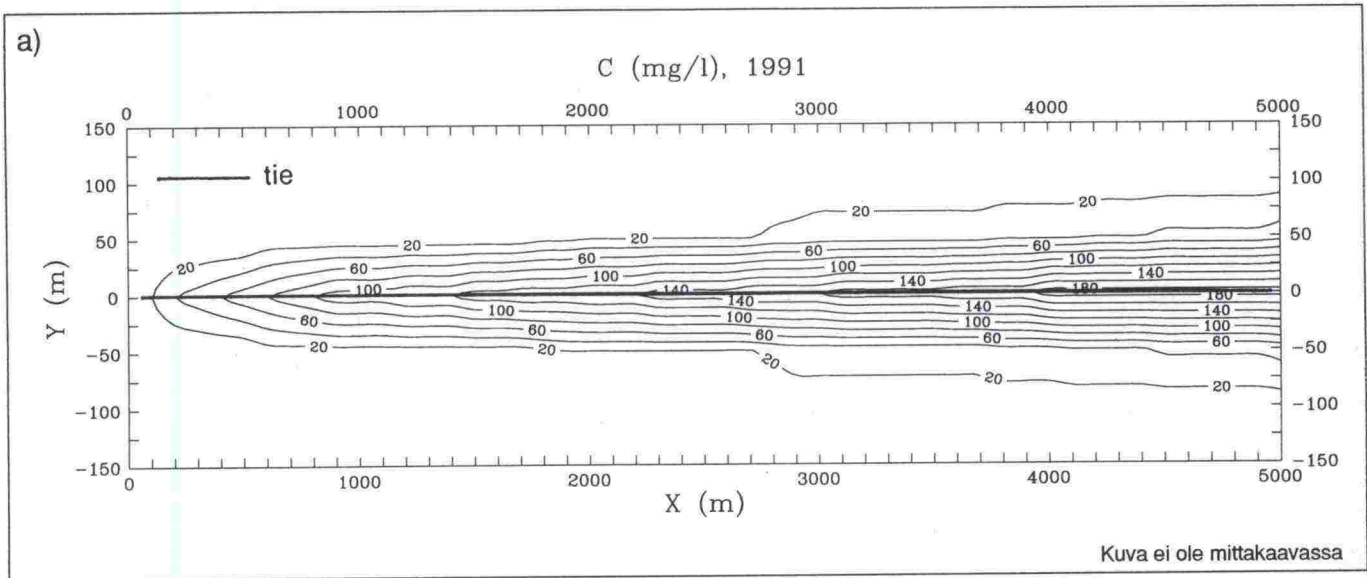
Simuloitu Cl-pitoisuus vuoden -91 lopussa on esitetty kuvissa 24 a ja b. Kuvasta nähdään, kuinka kloridipitoisuus kasvaa virtauksen suunnassa ja on korkeimmillaan harjun alavirran puoleisessa päässä yli 180 mg/l. Esimerkiksi Miekkamäellä suurin havaittu kloridipitoisuus on ollut 102 mg/l harjun keskiosassa 5-6 m syvyydellä maanpinnasta (Tuominen 1992).

Taulukko 10. Laskuissa käytetyt vuosittaiset suolausmäärät .

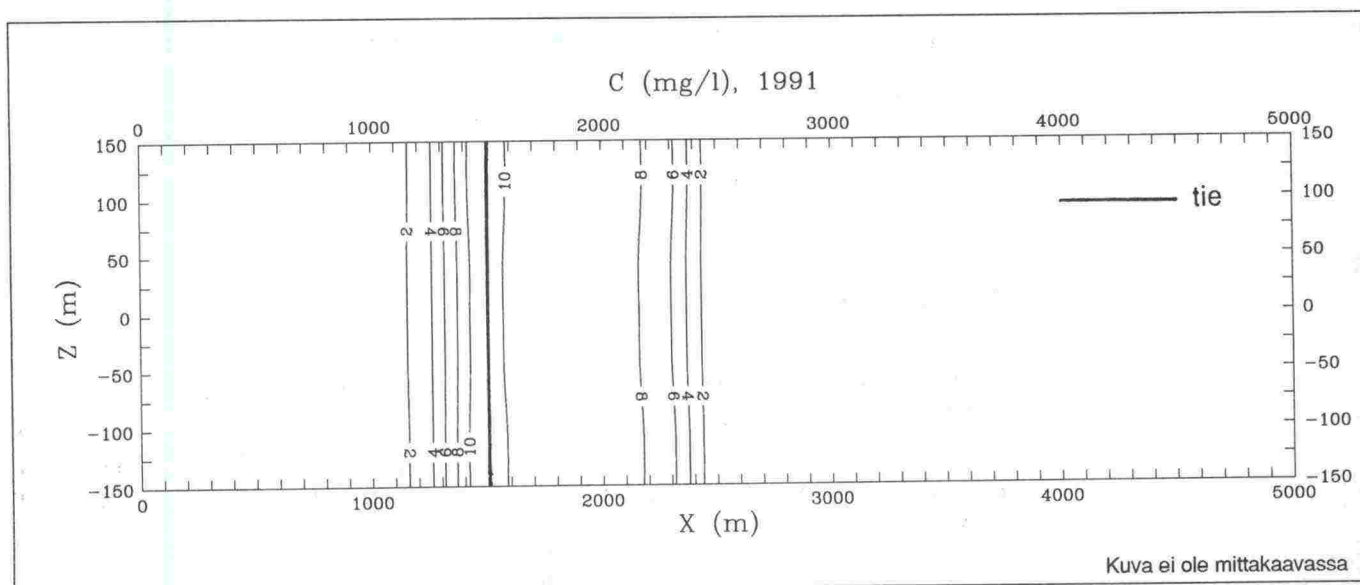
Ajanjakso	Vuosittainen suolausmäärä (NaCl)
1960 - 1987	4,5 t/km
1988 - 1990	12 t/km
1991	7,5 t/km

11.3 Tie kulkee harjun poikki

Vertailutarkasteluna simuloitiin pohjavesimuodostuman Cl-pitoisuutta tien kulkiessa harjun poikki. Tilanne vuoden -91 lopussa on esitetty kuvassa 25. Havaitaan, että simuloitujen kloridipitoisuuksien arvot tässä tapauksessa korkeimmillaan n. 10 mg/l. Pitoisuudet ovat siis huomattavasti pienempiä, kuin tien kulkiessa harjua pitkin.



Kuva 24. Simuloitu Cl-pitoisuus pohjavesimuodostuman a) yläreunassa, b) virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa tien alapuolella vuoden -91 lopussa, kun tie kulkee harjua pitkin.



Kuva 25. Simuloitu Cl-pitoisuus pohjavesimuodostuman yläreunassa vuoden -91 lopussa, kun tie kulkee harjun poikki

12 KLORIDIN KULKEUTUMISEN SIMULOINTI JOUTSENONKANKAAN POHJAVESIMUODOSTUMAN POIKKILEIKKAUKSESSA

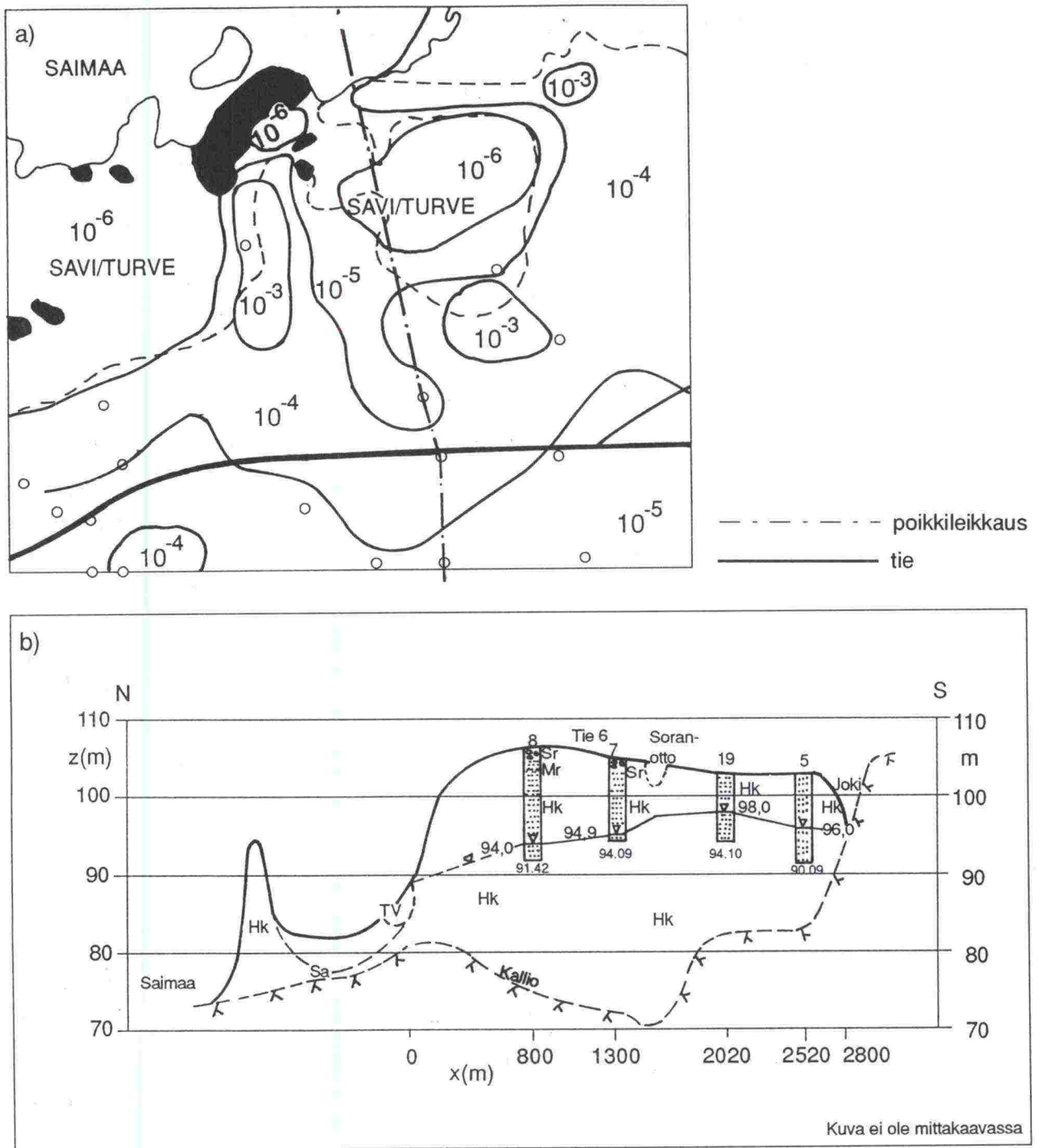
12.1 Mallinnettava kohde

De Coster ym (1993) ovat mallintaneet tiesuolasta peräisin olevan kloridin kulkeutumista Joutsenonkankaan pohjavesimuodostumassa. Alue on Salpausselkään kuuluva deltamuodostuma. Mallinnus on tehty kaksikulotteisena alueellisena tarkasteluna.

Lisätarkasteluna tähän alueelliseen kaksikulotteiseen malliin simuloitiin tämän työn yhteydessä kloridin kulkeutumista de Coster'in ym (1993) raportoimassa esimerkkipoikkileikkauksessa. Tavoitteena oli arvioida mahdollisia tiheysvaikutuksia sekä pystysuoria virtauksia. Mallinnukseen sovellettiin HST3D-mallia. Lähtötiedot otettiin de Coster'n ym. (1993) tutkimuksesta. Mallinnettava esimerkkipoikkileikkaus sekä sen sijoittuminen tutkimusalueella ilmenevät kuvasta 26.

Suolan leviämistä ja mahdollista tiheämmän suolaisen veden painumista voidaan alustavasti arvioida luvuissa 6 ja 10 esitettyjen tulosten perusteella. Kuvasta 26 havaitaan että tien alapuolella maaperän vedenjohtavuus on $K=10^{-4}$ m/s ja pohjavedenpinnan kaltevuus n. 0.005 m/m. Kuvan 8 (luku 6) perusteella suolapulssin etenemisnopeus olisi tällöin noin 30 m vuodessa. Kaavan 6 avulla laskettuna etenemä vuodessa olisi 30 - 44% huokoisuuksilla 50 m - 36 m vuodessa. De Coster'n ym (1993) tulosten perusteella dispersio alueella on kuitenkin voimakasta, jolloin osa suolasta etenee jo vuodenkin kuluessa huomattavasti tätä kauemmaksi.

Painumisen mahdollisuutta arvioitiin luvun 10 tulosten perusteella. Taulukosta 8 nähdään tien läheisyydessä vallitsevan pohjavedenpinnan gradientin arvon sijoittuvan painumiseen viittaavan -0,001 ja päinvastaiseen tulokseen viittaavan -0.01 välille. Suoraa päätelmää painumisesta ei siis voida taulukon 8 perusteella tehdä. Jos tarkastellaan lähemmin tämäntyyppisessä maalajissa simuloitua käyttäytymistä gradientin arvolla -0,001 (liite 2, kuvat 8 ja 9), havaitaan, ettei 10 vuoden jatkuva suolaus 15 tonnia/km vuodessa vielä ole aiheuttanut painumista. Painumista alkaa simuloituissa olosuhteissa tapahtua vasta 20 vuoden jatkuvan suolauksen seurauksena. Tällöinkin painuminen on havaittavissa vasta suolauksen lopettamisen jälkeen. Tämä johtuu painumisen hitaudesta, jolloin suolauksen jatkuessa pitoisuusmaksimi pysyy yläreunassa. Joutsenonkankaalla suolausmäärät ovat vasta viimeisen 13 vuoden aikana olleet yli 10 tonnia/km vuodessa. Näistä vain neljänä vuonna suolaus on ylittänyt 15 tonnia/km.



Kuva 26. a) Tasokuva Joutsenonkankaan pohjavesialueesta. Kuvaan on merkitty vedenjohtavuudet (de Coster ym. 1993) b) Mallinnettava poikkileikkaus (de Coster ym. 1993).

12.2 Käytetty konseptuaalinen ja numeerinen malli

Laskuissa käytetty poikkileikkausmalli on esitetty kuvassa 27a. Tasokuvasta (kuva 26a) nähdään, että poikkileikkaus kulkee ympäristöään huonommin vettä johtavan alueen ($K=10^{-5}$ m/s) läpi. On oletettavaa, että suuri osa virtauksesta ja virtauksen mukana kulkeutuvasta kloridista todellisuudessa kiertää tämän alueen. Poikkileikkausta mallinnettaessa joudutaan kuitenkin olettamaan, että kaikki virtaus ja kulkeutuminen tapahtuu poikkileikkauksessa. Tästä johtuen simuloinnin tuloksena saatavat pitoisuudet ovat mitattuja arvoja suurempia, erityisesti huonommin vettä johtavalla alueella. Simuloinnin tulos kuvaa tilannetta, jossa kaikki rinnakkaiset poikkileikkaukset olisivat samanlaisia.

Mallinnuksella tarkastellaan vedenjakajan ja savipeitteen reunan välistä aluetta. Vedenjakajan tarkka sijainti on todellisuudessa tuntematon (de Coster ym. 1993), mutta simuloinneissa oletetaan sen sijaitsevan 1800 m päässä savipeitteen reunasta. Vedenjakajaa käsitellään läpäisemättömänä reunana ja saven reunaan määritellään vakiopaine-reunaehto. Sadannalle ja suolaukselle käytetään kuvassa 27 b ja c esitettyjä arvoja. Sadannasta 50% oletetaan imeytyvän pohjavedeksi (de Coster ym. 1993). Suolan oletetaan imeytyvän pohjaveteen tasaisesti vuoden aikana. Alustavat maaperän ominaisuuksia kuvaavat parametriarvot on esitetty taulukossa 11.

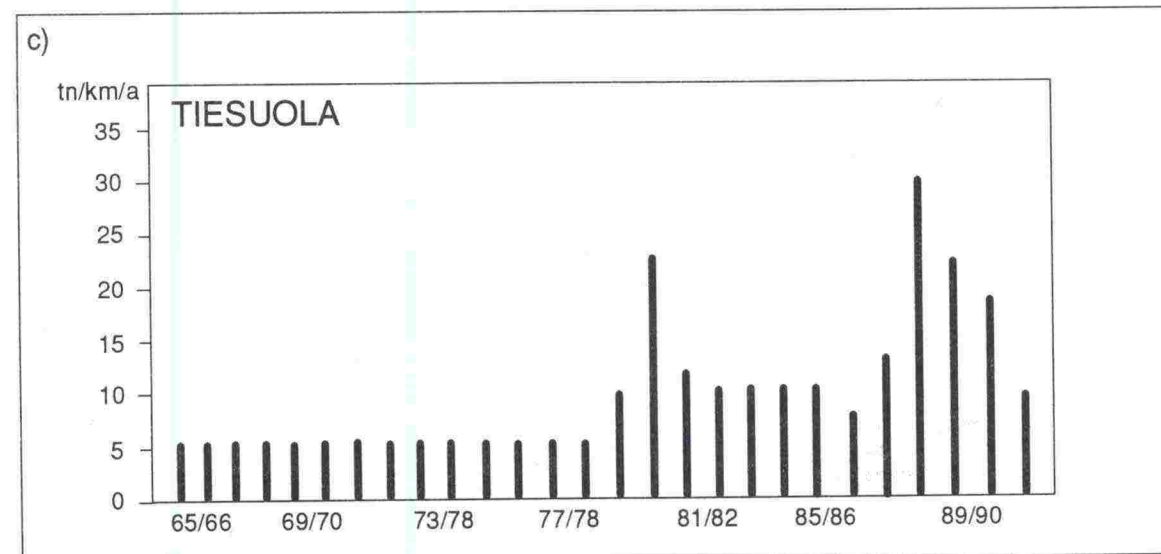
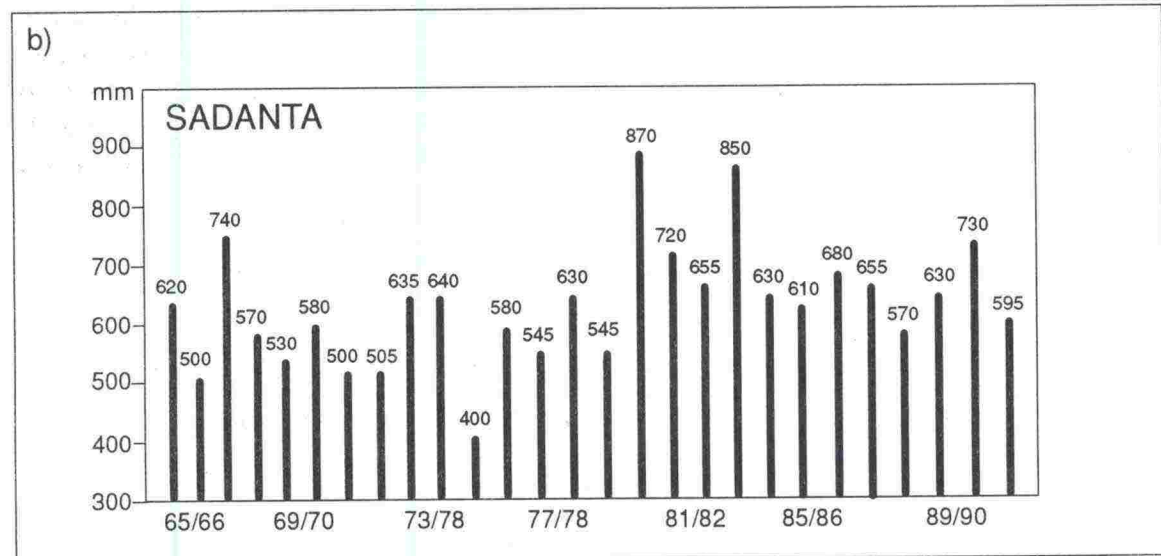
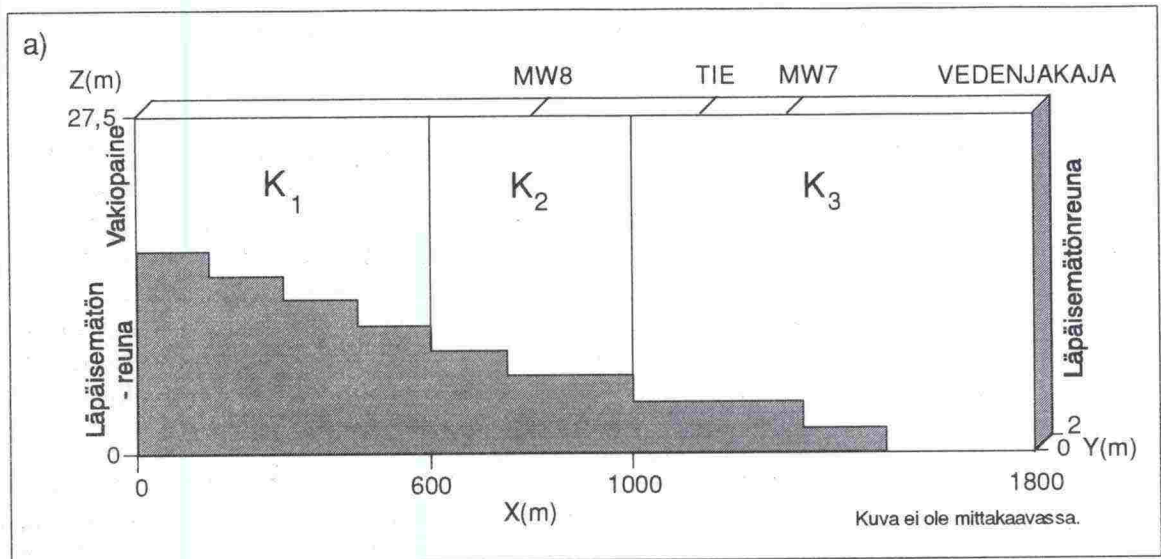
Taulukko 11. Maaperän ominaisuudet

Ominaisvedenjohtavuus	$k_1 = k_3 = 1,5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $k_2 = 1,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
Vedenjohtavuus	$K_1 = K_3 \approx 10^{-4} \text{ m/s}$, $K_2 \approx 10^{-5} \text{ m/s}$
Tehokas huokoisuus	$n = 30 \%$
Dispersiivisyys	$\alpha_1 = 100 \text{ m}$, $\alpha_2 = 30 \text{ m}$
Kokoonpuristuvuus	$c = 10^{-8} \text{ 1/Pa}$

12.3 Simuloinnit

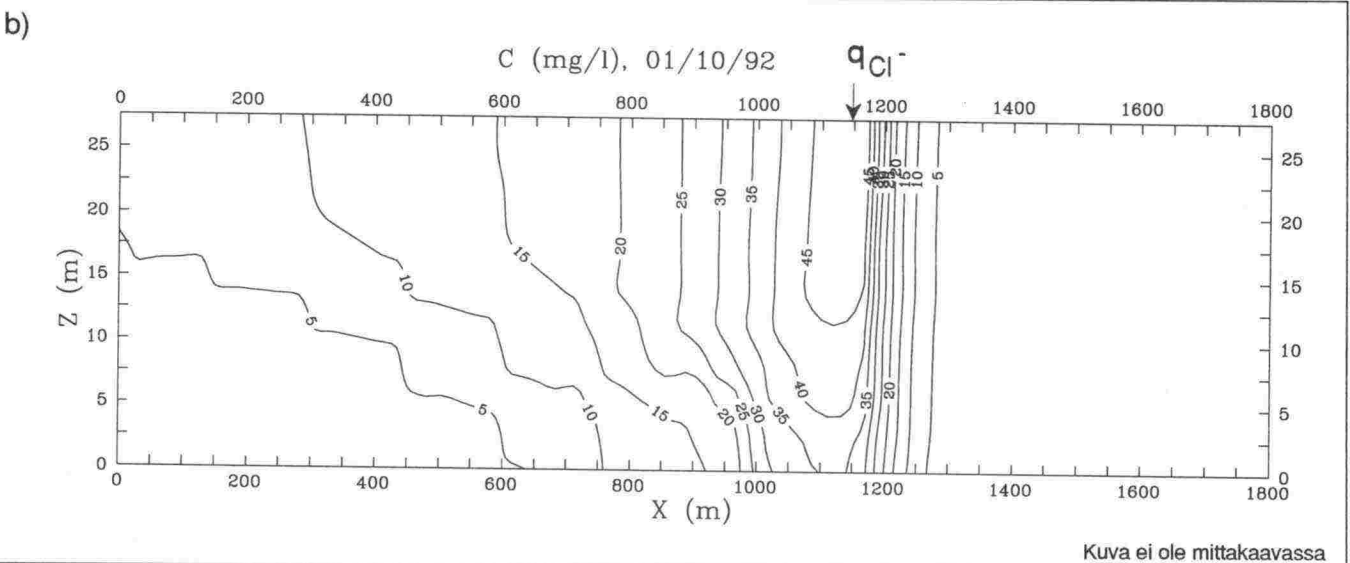
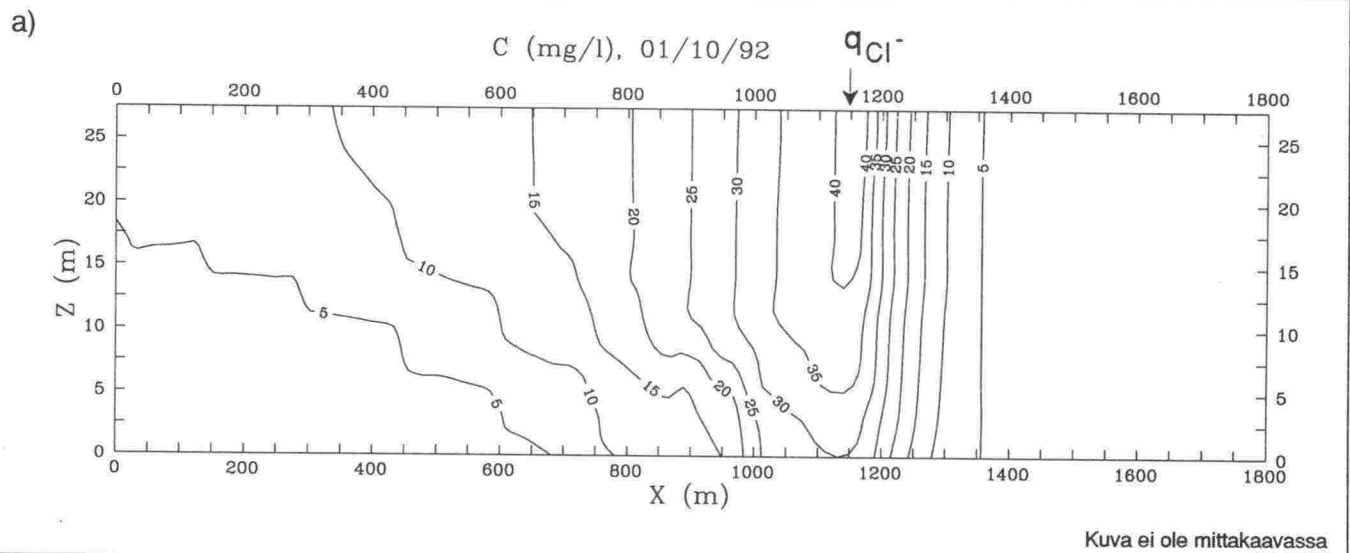
Koska käytetty malli poikkeaa mittakaavaltaan ja ulottuvuuksiltaan de Coster'in (1993) alueellisesta kaksiuolotteisesta mallista, eivät taulukon 11 parametriarvot automaattisesti sovellu vaan malli on myös kalibroitava. Virtauskentän kalibroimiseksi simuloitiin virtauskenttää sadannan keskimääräisellä arvolla ja ominaisvedenjohtavuusarvoja säädettiin, kunnes simuloitujen pohjavedenpinnan tasot vastasivat havaintoputkissa MW7 ja MW8 mitattuja pohjavedenpinnan tasoja.

Näin määritellyillä kalibroiduilla ominaisvedenjohtavuuksilla ($k_1 = k_3 = 6.5 \times 10^{-11}$ m, $k_2 = 10^{-12}$ m; vrt. kuvan 27a vedenjohtavuusvyöhykkeet) simuloitiin kloridin kulkeutumista poikkileikkauksessa kahdella eri dispersiivisyyden arvolla. Simulointien tulokset on esitetty kuvassa 28. Havaintoputkessa MW7 ($x = 1330$ m) mitatut pitoisuudet ovat vaihdelleet välillä $C = 2 - 7,5$ mg/l, mitä parhaiten



Kuva 27. a) Konseptuaalinen malli mallinnettavasta poikkileikkauksesta (havaintoputket: MW7, MW8) b) Sadanta (de Coster ym. 1993) c) Suolaus (de Coster ym. 1993)

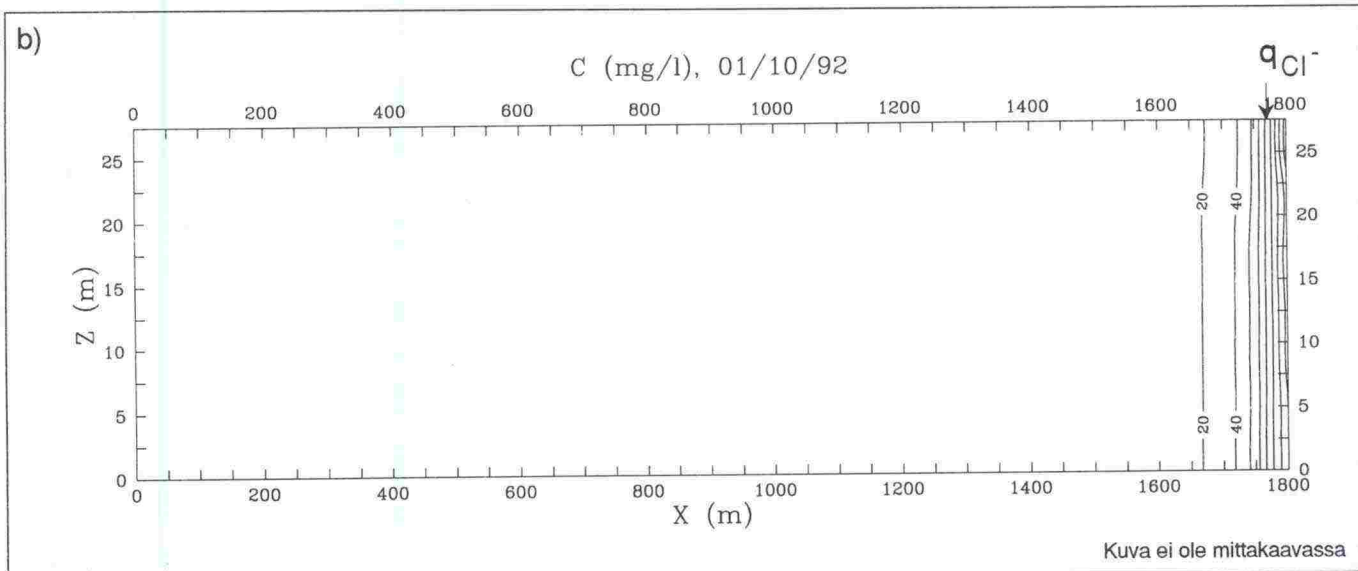
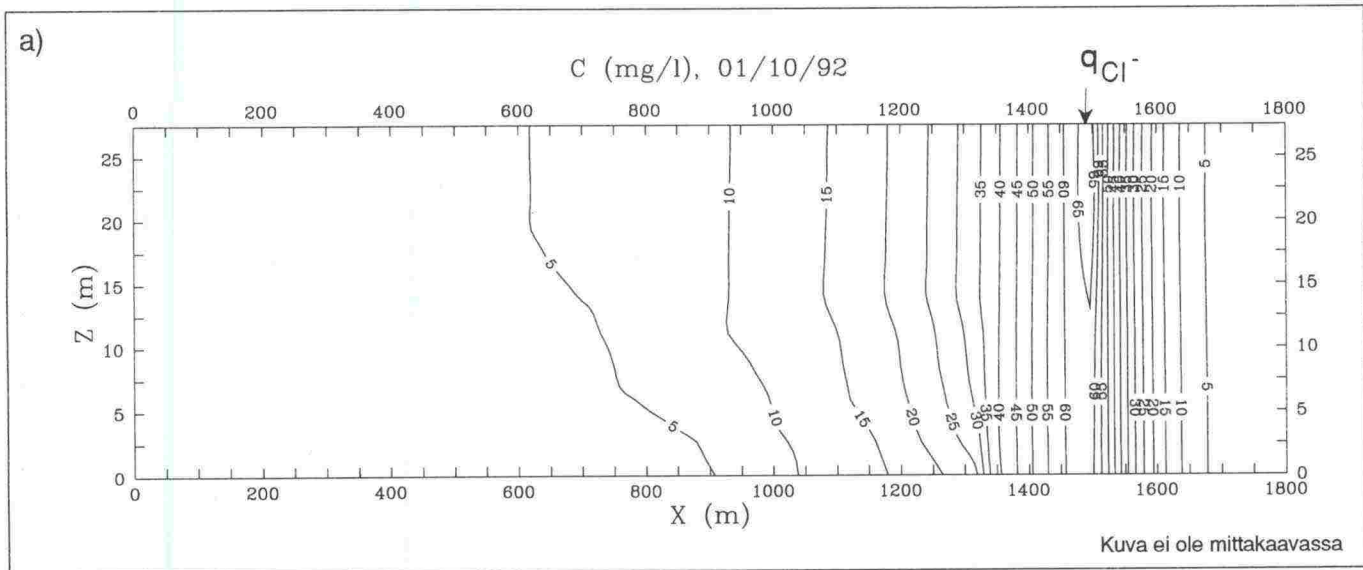
kuvaava dispersiivisyysarvo sijoittuu simuloitujen tilanteiden välille. Havaintoputken MW8 ($x = 800$ m) kohdalla simuloitujen pitoisuuksien arvot ovat huomattavasti mitattuja pitoisuuksia ($C = 3-6$ mg/l) suurempia. Tämä johtuu edellä mainitusta todellisen virtauskentän kolmiulotteisuudesta. Parempaan yhteensopivuuden saavuttamiseen edellyttäisi kolmiulotteista mallinnusta, jolloin pystyttäisiin ottamaan huomioon myös sivuille päin tapahtuva virtaus. Näiden simulointien perusteella ei suolan painumista pohjavesimuodostumassa näytä tapahtuvan.



Kuva 28. Simuloitujen kloridipitoisuusjakaumat dispersiivisyyden arvoilla a) $\alpha_l = 100$ m, $\alpha_c = 30$ m, b) $\alpha_l = 50$ m, $\alpha_c = 15$ m

Kaksiulotteisella pystyleikkausmallilla tarkasteltiin vielä kuvitteellista tilannetta, jossa tie siirrettäisiin lähelle vedenjakajaa. Pohjaveden pinnan kaltevuuden pienentyessä ja alaspäin suuntautuvan virtauskomponentin kasvaessa on tilanne suolan pohjalle painumisen suhteen ongelmallisempi (vrt. luku 10). Simuloinnin tulokset on esitetty kuvassa 29, josta nähdään myös kuvitteellinen tien sijainti eri tapauksissa. Tuloksista nähdään, kuinka tien siirtäminen lä-

hemmäs vedenjakajaa hidastaa suolan leviämistä, jolloin paikalliset pitoisuusmaksimit ovat korkeampia (kuva 29a). Vedenjakajalta (kuva 29b) suola ei vaakasuunnassa oleellisesti leviä tarkastelujakson aikana. Mahdollisen suolapitoisen veden tiheydestä johtuvan painumisen ja alaspäin suuntautuvan virtauksen vaikutusta suolan käyttäytymiseen on vaikea erottaa toisistaan. Niin kauan kuin suolausta jatketaan sijaitsee pitoisuusmaksimi vesimuodostuman yläreunassa tien alapuolella. Mikäli suolaus lopetettaisiin voitaisiin mahdollinen painuminen havaita pitoisuusmaksimin vajoamisena.



Kuva 29. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma a) tapaukselle, jossa tie kulkee lähempänä vedenjakajaa, muttei vedenjakajalla b) tapaukselle, jossa tie kulkee vedenjakajalla.

12.4 Johtopäätökset

Käytetty kaksikulotteinen poikkileikkausmalli antaa lähinnä kvalitatiivista tietoa suolan kulkeutumisesta pystyleikkauksessa. Sitä onkin tarkasteltava alueellisen tasomallinnuksen oheistietona. Tehtyjen simulointien valossa suolan

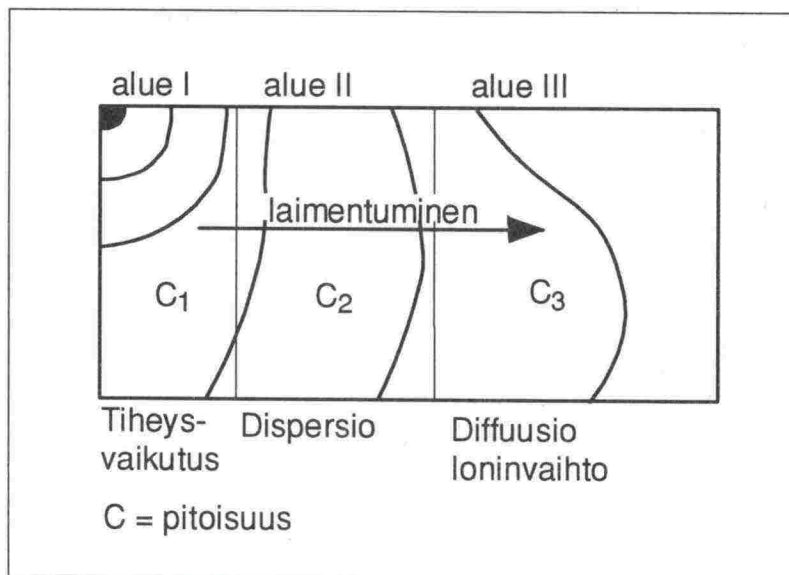
painumista vesimuodostumassa ei tapahdu. Luotettavammat tulokset edellyttäisivät kolmiulotteisia simulointeja, joihin ei tässä yhteydessä ollut mahdollisuutta.

13 GEOKEMIALLINEN MALLINNUS

13.1 Yleistä

Edellä esitetyissä tarkasteluissa on käsitelty kulkeutumiseen liittyviä fysikaalisia prosesseja olettaen kulkeutuva aine reagoimattomaksi. Ioninvaihto saattaa kuitenkin muuttaa natriumin ja kloridin suhteita pohjavedessä alhaisilla suolapitoisuuksilla. Ioninvaihdon suuruusluokka riippuu maaperän ioninvaihtokapasiteetista.

Geokemiallisten ja fysikaalisten kulkeutumisprosessien suhteellista merkitystä voidaan havainnollistaa kuvan 30 mukaisilla pitoisuusvyöhykkeillä. Väkevissä liuoksissa, lähellä lähdettä, tiheyden merkitys on suurin, mikä voi aiheuttaa esimerkiksi suolaisen veden painumisen suoraan alas kerrostuman pohjalle. Kauempana lähteestä normaalin hydrodynaamisen dispersion ja ioninvaihdon merkitys kasvavat. Kulkeutumis-alueen liepeillä pitoisuudet ovat pieniä. Diffuusio sekä ioninvaihto ovat määräävät tekijät hyvin laimeiden liuosten pitoisuuksien muutoksissa.



Kuva 30. Yksinkertaistettu esitys fysikaaliskemiallisista mekanismeista pitoisuuden ja matkan suhteen.

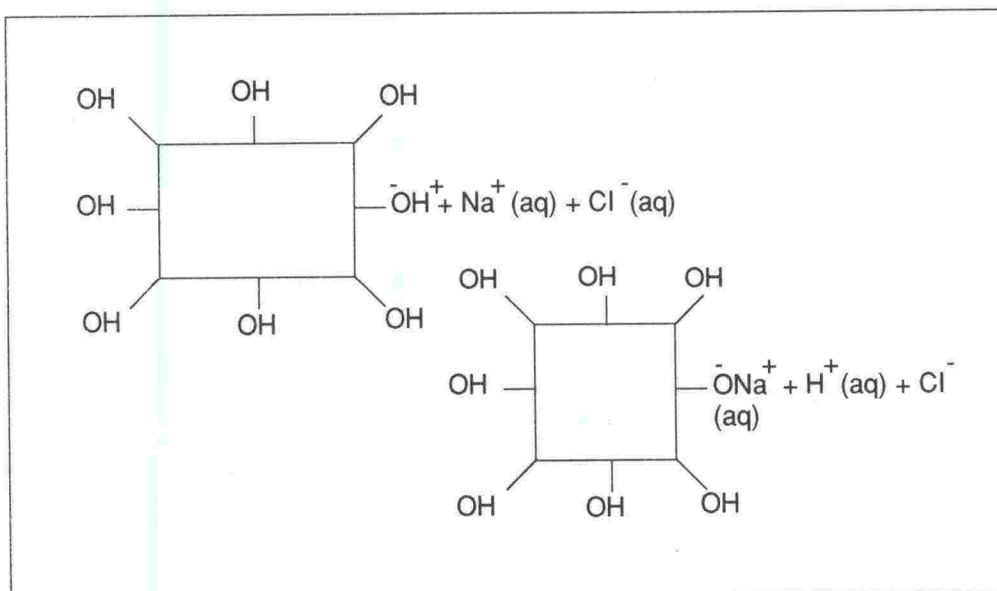
Seuraavassa käsitellään lyhyesti suolan geokemian ja geokemiallisen mallinnuksen periaatteita sekä näiden kytkemistä geohydrologiseen mallinnukseen.

13.2 Ioninvaihto ja sen mallintaminen

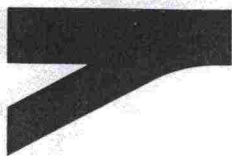
Ioninvaihdin on kiinteää, liikkumaton aine (mineraali) tai veden mukana kulkeutuva hiukkanen (savi, orgaaninen aines), jolla on kyky pidättää liuoksesta varaukseltaan tai kooltaan suurempia ioneja ja vaihtaa ne pienempiin ioneihin. Esimerkiksi natriumin ja kaliumin (varaus +1) pidättyminen ja vaihtuminen vetyioniin, sekä kalsiumin ja magnesiumin (varaus +2) pidättyminen ja vaihtuminen edellämainittuihin ovat tavallisia ioninvaihtotapahtumia luonnontilassa. Samalla ionisuhteet voivat muuttua, koska yhtä vaihtuvaa kalsiumia tai magnesiumia kohti tarvitaan kaksi natriumia tai kaliumia. Tavallisesti ioninvaihtohalukkuus seuraa Stummin (1992) esittämää järjestystä, jolloin listassa vasemmalla oleva vaihtuu oikealla olevaan: Cs^+ , Rb^+ , K^+ , Na^+ , Li^+ , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} .

Tavallisimmat vaihtoon osallistuvat mineraalit Suomen maaperässä ovat savimineraalit (kloriitti, illiitti ja smektiitit esim. montmorilloniitti) ja plagioklaasi (Grim 1962; Stumm 1992). Niitä esiintyy vähän lajittuneissa karkeissa maalojissa, kuten hiekassa ja sorassa (Cation Exchange Capacity, CEC < 10 - 20 meq/100 g) tai laihassa savessa (> 20-30 meq/100 g). Ioninvaihtokapasiteetti on suurin runsaasti orgaanista ainesta sisältävissä maalajeissa (> 40 meq/100 g) ja lihavassa savessa (> 60 meq/100 g). Suurin ioninvaihtokapasiteetti on smektiittisavilla (> 80 - 150 meq/100 g) ja puhtaalla orgaanisella aineella (150-500 meq/100 g). Edellisiä tavataan Suomen maaperässä varsin rajoitetusti.

Savimineraalien ja varsinkin orgaanisten aineiden suuri ioninvaihtokapasiteetti ei perustu ainoastaan suureen vaihtuvien ionien määrään, vaan erityisesti vaihtokykyisiin hydroksyyliiryhmiin (OH^-) (kuva 31). Yksi OH^- -ryhmä vaihtaa yhden natrium- tai kalium-ionin. Myös vähän vaihtuvia kationeja sisältävien silikaattimineraalien, kuten kilteiden, ioninvaihtokapasiteetti perustuu pääosin OH^- -ryhmän ioninvaihtokykyyn.



Kuva 31. Ioninvaihto hydroksyyliiryhmän kanssa.



Tiepiirit

TIESUOLAN POHJAVESIVAIKUTUKSET - KULKEUTUMISMEKANISMIIEN MONI-ILMIÖMALLINNUS

Keskushallinto lähettää oheisena tutkimusraportin "Tiesuolan pohjavesivaikutukset - kulkeutumismekanismien moni-ilmiömallinnus", joka on osa vuonna 1992 käynnistettyä tutkimusohjelmaa tiesuolan pitkäaikaisten pohjavesivaikutusten selvittämiseksi. Tutkimus on tehty VTT/TGL-laboratorion toimesta.

Tutkimusohjelma, joka sisältää neljä erillistä tutkimusta, jakaantuu kahteen osaan: kahden todellisen mallintamiseen, joista vastaa vesi- ja ympäristöhallitus (VYH) ja erilaisten puoliteoreettisten tyyppitilanteiden simulointiin, jotka tekee VTT. Tässä raportissa esitetään tämän simulointiosuuden ensimmäisen vaiheen tulokset.

Tämä tutkimusraportti ei ole tarkoitettu sellaisenaan hyödynnettäväksi. Koko tutkimusohjelma, sen valmistuttua vuoden kuluttua, antanee mahdollisuuden hallita tiesuolan pohjavesivaikutuksia niin, että paikalliset suojelutarpeet ja -toimenpiteet voidaan entistä paremmin mitoittaa ennustettujen pitkäaikaisvaikutusten perusteella.

Tutkimusohjelmaa on toteutettu kiinteässä yhteistyössä VYH:n ja VTT:n kanssa. Myös tulosten hyödyntäminen tultaneen tekemään tiepiireissä yhteistyössä VYH:n ja vesipiirien kanssa.

Tutkimusarjan yhdyshenkilöinä toimivat tielaitoksessa Olli Penttinen (tienpidon suunnittelu) ja Anne Leppänen (liikenteen palvelukeskus).

Apulaisjohtaja
Tienpidon suunnittelu


Raimo Tapio

LIITE

Tiesuolan pohjavesivaikutukset - kulkeutumismekanismien moni-ilmiömallinnus (Tielaitoksen selvityksiä 65/1993)

TIEDOKSI LIITTEINEEN Pääjohtaja
Ylijohtaja
Kk, Tpk, Gk

./..

Liikenneministeriö
Ympäristöministeriö
Vesi- ja ympäristöhallitus
VTT/TGL
Kirsti Granlund VYH
Taina Nysten VYH
Jouko Soveri VYH
Esa Rönkä VYH
Anna-Liisa Kivimäki VYH
Anders Jansson Kk
Ulla Priha Ts
Suomen Kuntaliitto
Suomen luonnonsuojeluliitto
Yleisradio/Kirjasto/Ympäristötietopalvelu

TIEDOKSI LIITTEETTÄ

J, Es, Vi, Ts, Yh, Th, Tk, Lpk, Rpk, Hpk, Vk
Auli Niemi VTT/TGL
Terhi Kling VTT/TGL
Veijo Pirhonen VTT/TGL
Tuomo Latva VYH
Tapani Suomela VYH
Anne Leppänen Lpk
Olli Penttinen Ts

Olli Penttinen

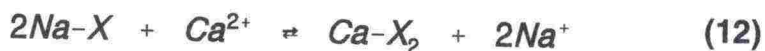
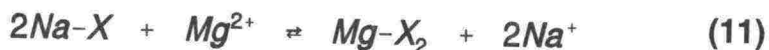
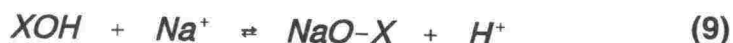
Anionien vaihto on määrällisesti harvinaisempaa, joskin esimerkiksi fosforihapon suolojen (H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻) tiedetään vaihtuvan maaperässä. Myös sulfaatti voi vaihtua. Anionien tapauksessa oksihydroksidit (AlO(OH), FeO(OH)), jotka ovat varsin yleisiä kaikkialla maaperässä, toimivat ioninvaihtimina.

Harjumuodostelmassa, jonka mineraalit koostuvat pääasiassa silikaateista, pidättymistä voidaan kuvata pääasiassa ioninvaihdon avulla. Esimerkiksi natrium pidättyy ja vaihtuu vetyioniin. Osa pidättyneestä natriumista vaihtuu edelleen isompiin ioneihin, kuten kalsiumiin ja magnesiumiin. Osa jää pidättyneenä mineraalipinnalle.

Geokemiallisessa simuloinnissa ioninvaihto on tyyppiä:



X on ioninvaihdin ja A⁺ sekä B⁺ vaihtuvat ionit. Ioninvaihdon seurauksena B⁺:n kokonaiskonsentraatio liuoksessa kasvaa. Vesiliuoksen ionitasapaino voidaan kirjoittaa seuraavasti:



PHREEQM-2D-mallissa lasketaan sekoittuville vesille ensin kemiallinen tasapaino ilman ioninvaihtoa. Ioninvaihto vaikuttaa ainoastaan tasapainotetussa vedessä vapaana oleviin ioneihin. Tasapainotettu vesi kuljetetaan virtauskentän mukaisesti seuraavaan laskentapisteeseen ja sekoitetaan seuraavan laskentavälin veteen. Näin suolainen vesi laimenee kulkeutuessaan eteenpäin.

Jos maassa on runsaasti oksideja, elektrostaattiset vuorovaikutukset tulee huomioida. Tähän tarkoitukseen PHREEQM-2D:ssä on kolme pintakompleksointimallia: diffuusiokerrosmalli (DLM), vakiokapasitanssimalli (CCM) ja kolmikerrosmalli (TLM). Alla olevissa esimerkeissä on käytetty vain ioninvaihtomallia. Hienon hiekkamaan ioninvaihtimen (X⁻) pitoisuutena on käytetty 3.4 eq/l (CEC = 76,4 meq/100g; huokoisuus = 40%)

Yhdistetyn geokemiallisen mallin herkkyyttä kokeiltiin aluksi suurilla pitoisuuksilla harjun helma-aluetta kuvaavassa konseptuaalisessa tilanteessa vaakatasossa (kappale 13.3). Sen jälkeen laskelmat tehtiin realistisemmilla pitoisuuksilla yhdessä pystyleikkauksessa kerroksellisuuden vaikutusten arvioimiseksi (kappale 13.4). Sovellutusesimerkissä (kappale 13.5) tarkasteltiin de Coster'in ym. (1993) raportoimaa Joutsenonkankaan alueen tasomallia.

Geokemiallisen mallinnuksen täysimittainen hyödyntäminen edellyttää maaperän mineraalikoostumuksen ja pohjaveden kemiallisen koostumuksen tuntemusta. Tällaisia tietoja ei kuitenkaan Joutsenonkankaalta ole käytettävissä. Pitkälle viety geokemiallinen mallinnus ei tämän vuoksi ole tässä yhteydessä perusteltua ja seuraavassa esitettäviä laskelmia tuleekin tarkastella suuntaa-antavina ja lähestymistapaa demonstroivina mm. mahdollisia myöhempiä sovellutuksia silmällä pitäen.

13.3 Yhdistetyn mallin soveltuvuus tiesuolatarkasteluun

Alueellinen tasomalli - väkevä suolaliuos

Kulkeutumisen ja ioninvaihdon kuvaamisessa käytettiin edellä mainittua PHR-EEQM-2D-ohjelmaa, joka koostuu ohjelmista HST2D (virtaus) ja PHREEQE (kemiallinen tasapaino ja ioninvaihto). Mallinnettava harjun reuna-alue, sekä sitä kuvaava konseptuaalinen malli on esitetty kuvissa 32 ja 33:

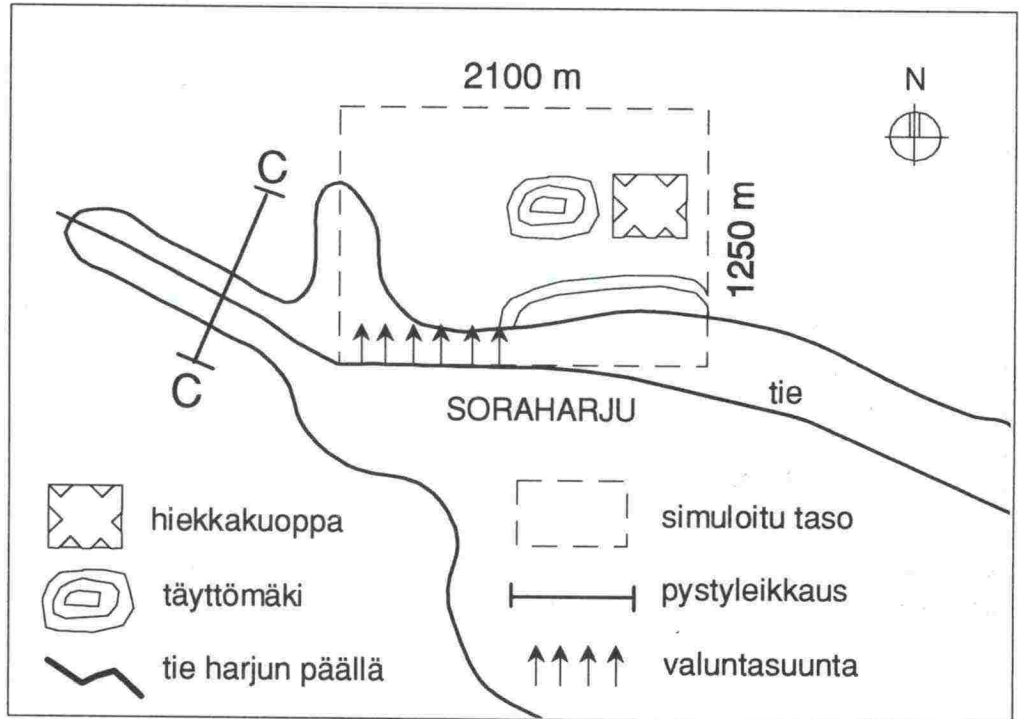
Pohjaveden ja sadeveden kemialliset koostumukset (liite 3) saatiin kirjallisuudesta ja aikaisemmista tutkimuksista (Airaksinen 1978). Injektoitava suola lisättiin sadeveteen, jolloin sen pitoisuus oli 20 000 mg/l Cl:ia ja Na:ia. Vertailun helpottamiseksi kloridia ja natriumia on 'sekoitettu' tieltä tulevaan veteen yhtä paljon (Na/Cl=50/50). Käytetty maaperän mineraalikoostumus oli taulukon 14 mukainen.

Taulukko 14. Käytetty maaperän mineraalikoostumus.⁽¹⁾

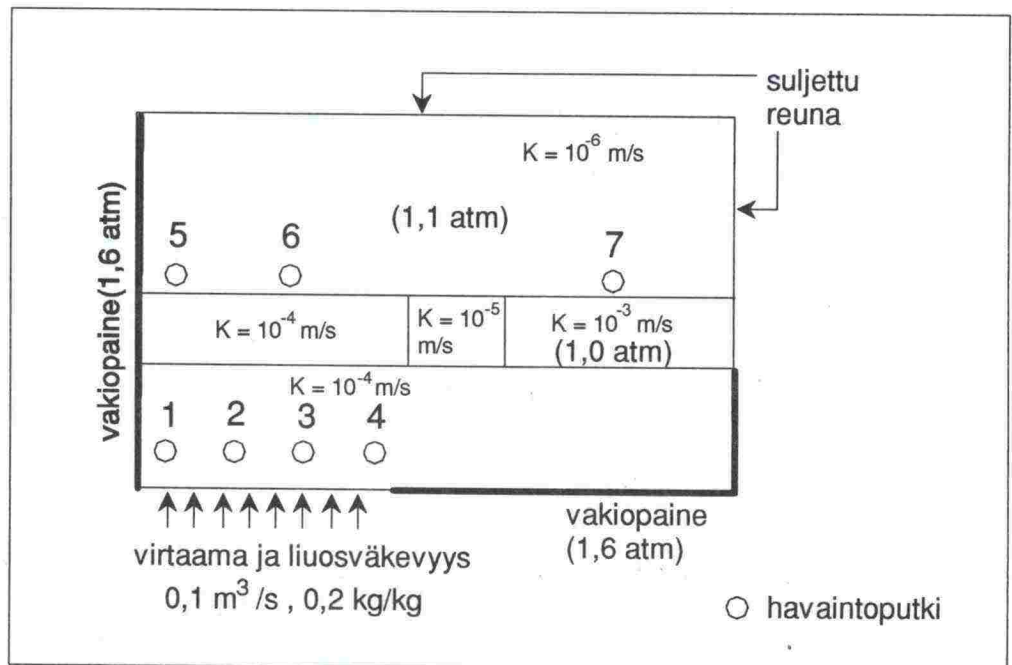
Mineraali	Kyllästysaste (log(IAP/K))	Määrä (mol/kg H ₂ O)
Muskoviitti	5,7	0,1
Mikroliini	3,5	3,0
Kvartsi	0,6	6,0
K-montmorilloniitti	19,0	0,05
Mg-kloriitti	8,9	0,05
Kaoliniitti	0	0,1

1) Pohjana on käytetty Suomen harjujen reuna-alueiden tavanomaisia mineraalikoostumuksia mm. Kauranteen ym. (1972) mukaan siten, että illiittiä vastaa simuloinnissa Mg-kloriitti. Kyllästysasteet on laskettu pohjavedestä PHREEQE-ohjelmalla.

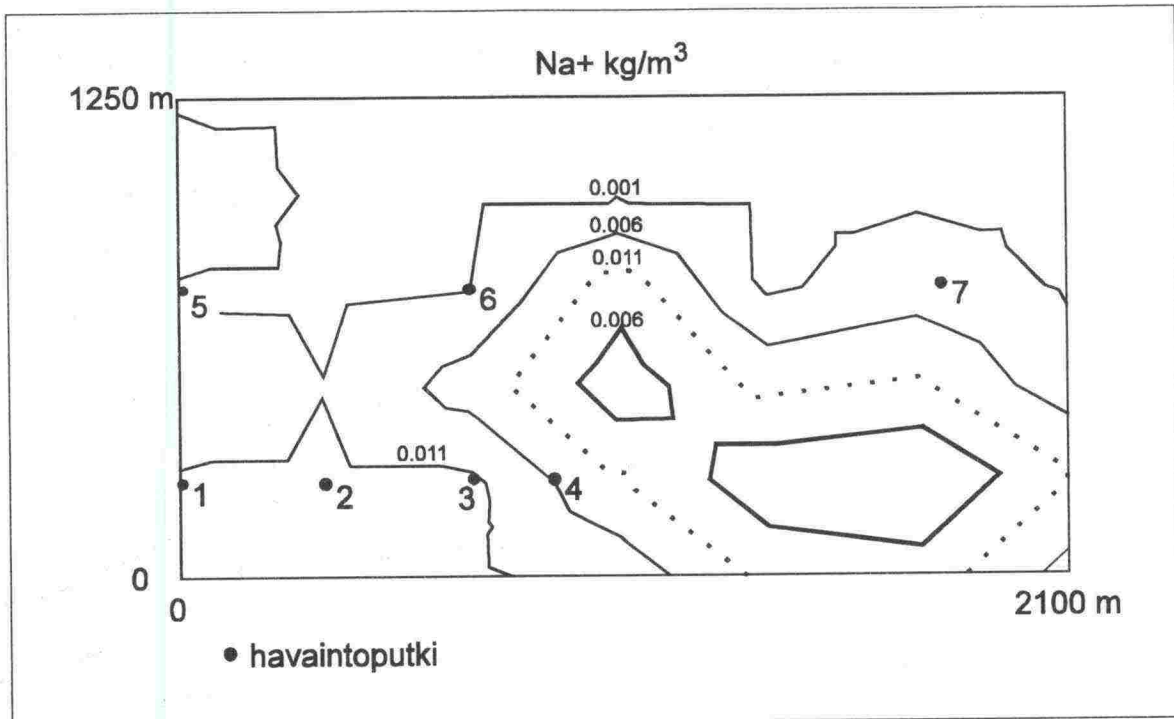
Esimerkki simuloituista pitoisuusjakaumista 180 vrk:n kuluttua injektoinnin aloittamisesta on esitetty kuvissa 34 ja 35. Tuloksista voidaan etäämpänä suolalähteestä havaita natriumin kloridia alhaisemmat pitoisuudet, jotka ovat seurausta natriumin pidättymisestä.



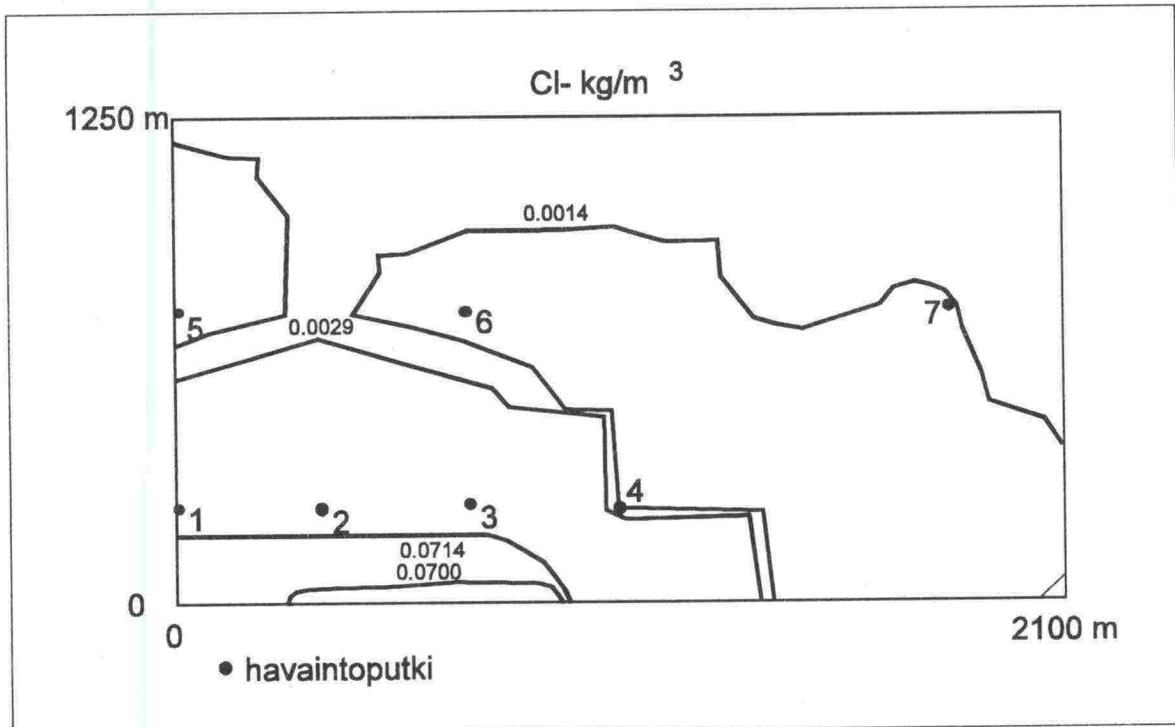
Kuva 32. Mallinnettava harjun helma-alue.



Kuva 33. Konseptuaalinen malli.



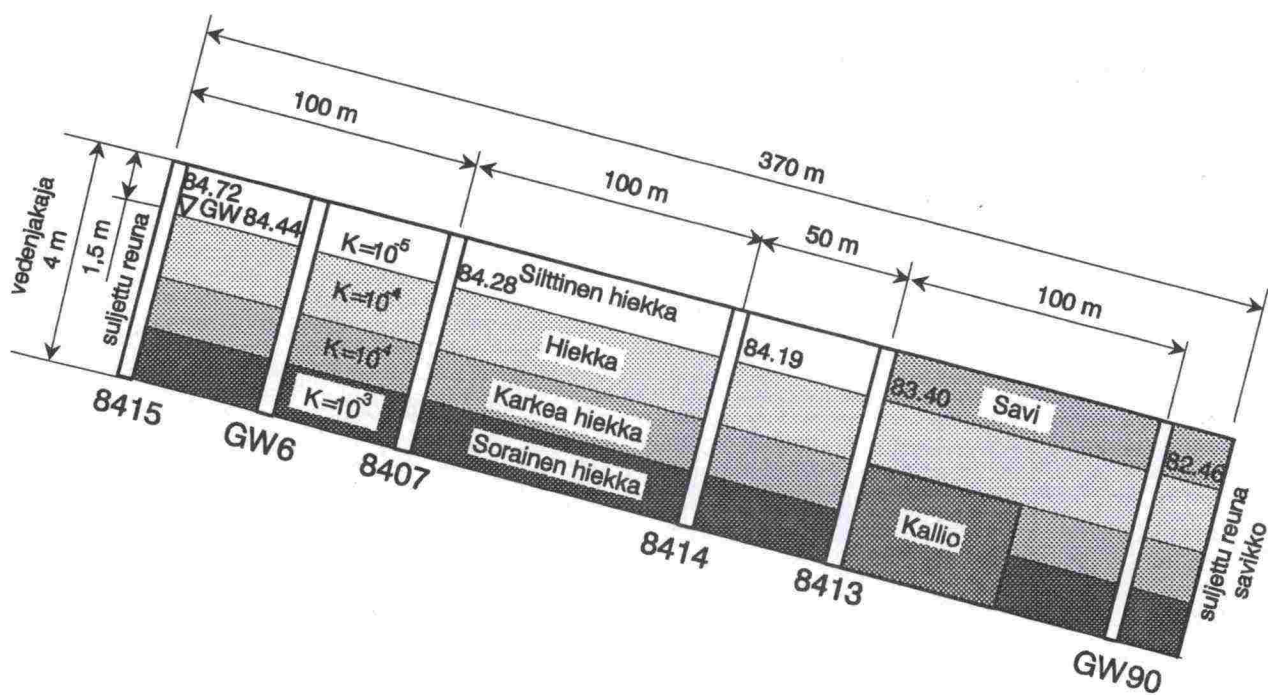
Kuva 34. Simuloitu Na⁺-pitoisuusjakauma (kg/m³) 180 päivän kuluttua (kytketty virtaus-tasapainolaskenta; advektio + dispersio + ioninvaihto).



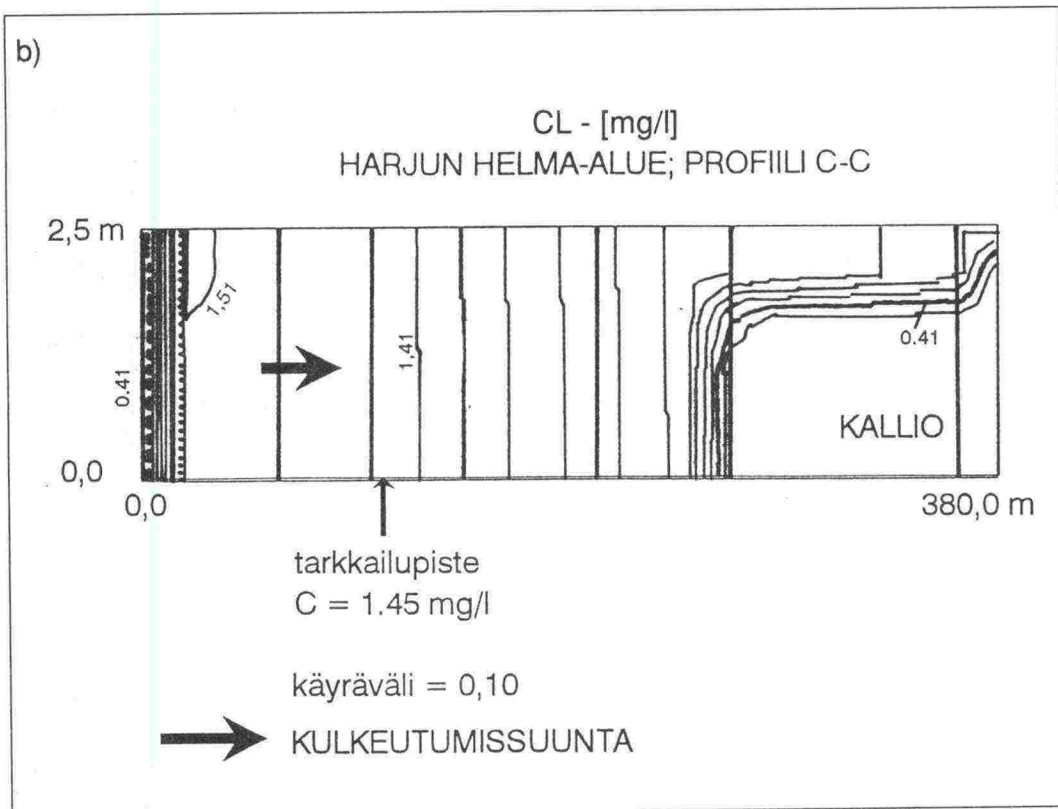
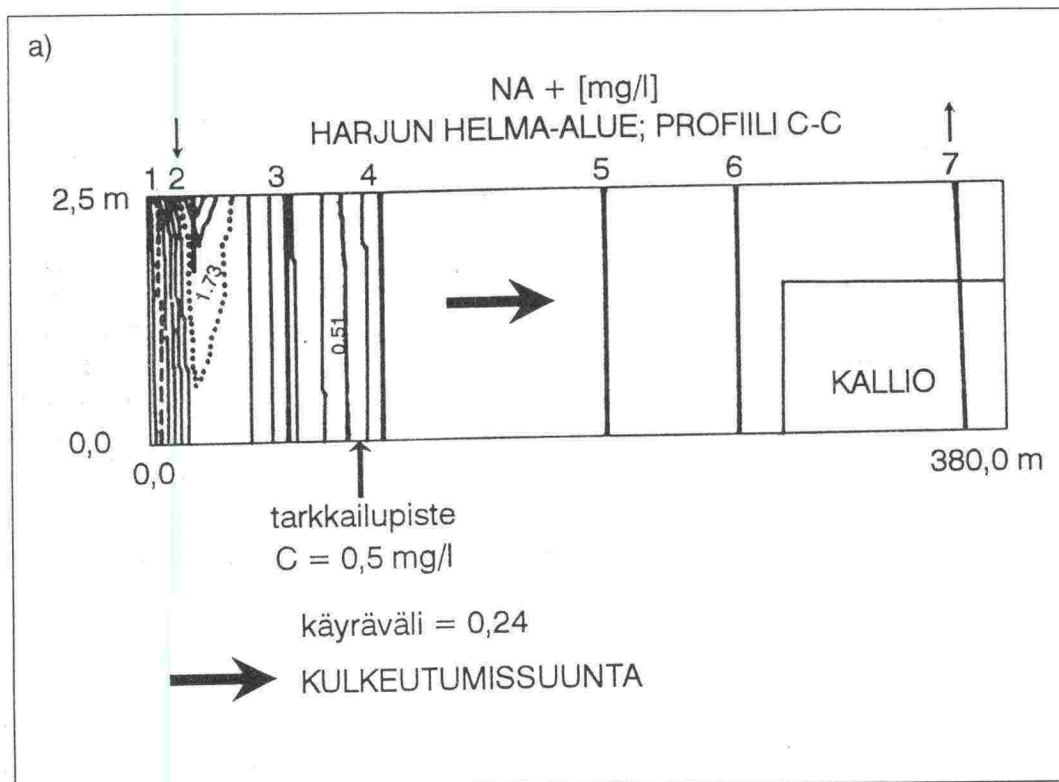
Kuva 35. Simuloitu Cl⁻-pitoisuusjakauma (kg/m³) 180 päivän kuluttua (kytketty virtaus-tasapainolaskenta; advektio + dispersio + ioninvaihto).

Poikkileikkausmalli - laimea suolaliuos

Harjun helmat ovat tavallisesti kerroksellisia siten, että hienot, karkeat ja silttiset hiekkakerrokset vuorottelevat. Esimerkkinä olevan harjun poikkileikkauksen C-C rakenne on esitetty kuvassa 36. Mallin reunat oletettiin läpäisemättömiksi (vedenjakaja ja savikko). Suolainen vesi injektoidiin 180 vrk:n aikana tietä kuvaavasta kaivosta 2. Vastaava määrä vettä pumpattiin pois kaivosta 7 (lähde). Simuloinnin tarkoituksena oli paitsi arvioida kerroksellisuuden vaikutusta yhdistetyssä mallissa, myös demonstroida mallin herkkyyttä realistisilla lähtöpitoisuuksilla (10 mg/l). Kuvissa 37 a ja b esitettyjen tulosten perusteella jatkuvan lähteen tapauksessa suola on maaperän kerroksellisuudesta huolimatta levinnyt koko paksuuteen, kun vedenjohtavuus ei vaihtele suuresti. Natriumin pidentäminen näkyy jo varsin lähellä tietä.



Kuva 36. Harjun helman poikkileikkauksen C-C konseptuaalinen kerrosrakenne ja pohjavesiputkien 1 - 7 sijainti.



Kuva 37. Natriumin (a) ja kloridin (b) pitoisuudet profiilissa C-C 180 vrk:n simuloinnin jälkeen. Tarkkailupisteessä Na/Cl suhde on muuttunut ioninvaihdon seurauksena normaalista 35/65:sta 26/74:een.

13.4 Sovellutus Joutsenonkankaan aineistolla

13.4.1 Lähtötiedot, konseptuaalinen malli ja reunaehdot

Joutsenonkankaan geokemiallisen alueellisen tasomallin lähtötietoina käytettiin vesi- ja ympäristöhallituksen mallinnustutkimuksessa (de Coster ym. 1992) esitettyjä arvoja seuraavasti:

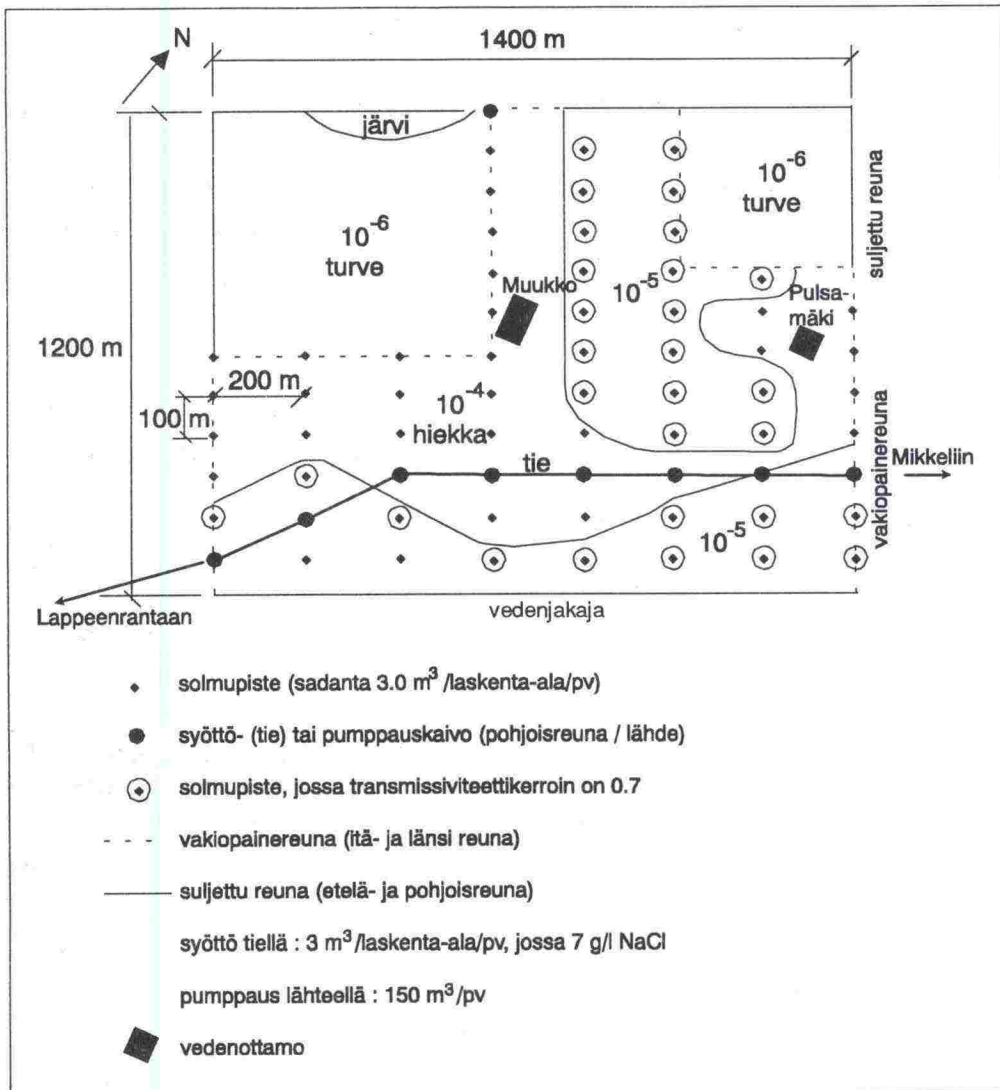
- simuloitavan alueen kooksi valittiin 1200 x 1400 m
- keskimääräinen vuotuinen sadanta on 700 mm
- keskimääräinen suolaus on 15 t/km/v (Na/Cl=35/65)
- vedenjohtavuus vaihtelee vyöhykkeittäin ollen 10^{-3} (karkea hiekka) - 10^{-6} (turve tai liejuturve)
- dispersiivisyys $\alpha_1 = 100$ m ja $\alpha_2 = 50$ m
- pohjaveden luontainen kloridipitoisuus on 1,0 mg/l ja injektoitu vesi on sadevettä, johon on lisätty suolaa (liite 4).
- virtauskenttä kalibroitiin vastaamaan mitattuja pohjaveden pinnan korkeuksia.

Kytkeyssä geohydrokemiallisessa mallissa vedenjohtavuusrakennetta joudutaan yksinkertaistamaan, minkä vuoksi vedenjohtavuuden uudelleenkalibrointi on tarpeen aiemmin käytettyyn MOC-malliin verrattuna (de Coster ym. 1993). Kalibrointi tehtiin yksinkertaistetusti pumppaamalla sadantaa vastaava määrä pohjoisreunassa olevan lähteen kohdalta. Vedenottamon vaikutusta ei huomioidu.

Dispersiokerrointa ei kalibroitu uudelleen, koska yhdistetty malli vaatisi kalibrointia kaikkien komponenttien suhteen (vrt. liite 4). Pohjaveden kokonaisuutuksesta ei ole Joutsenonkankaalla analysoitu, joten tällaisen kalibroinnin edellyttämiä tietoja ei ollut käytettävissä. Simuloinnissa käytetyt pitoisuudet on koottu kirjallisuuden perusteella (mm. Airaksinen 1978). Sadannan ja suolauksen oletettiin jakautuvan tasaisesti vuoden jokaiselle päivälle. Mallin reunaehdot ja pistekohtaiset syöttöarvot on esitetty kuvassa 38. Tie ja suolaus on simuloitu syöttökaivoja käyttämällä.

13.4.2 Tulokset

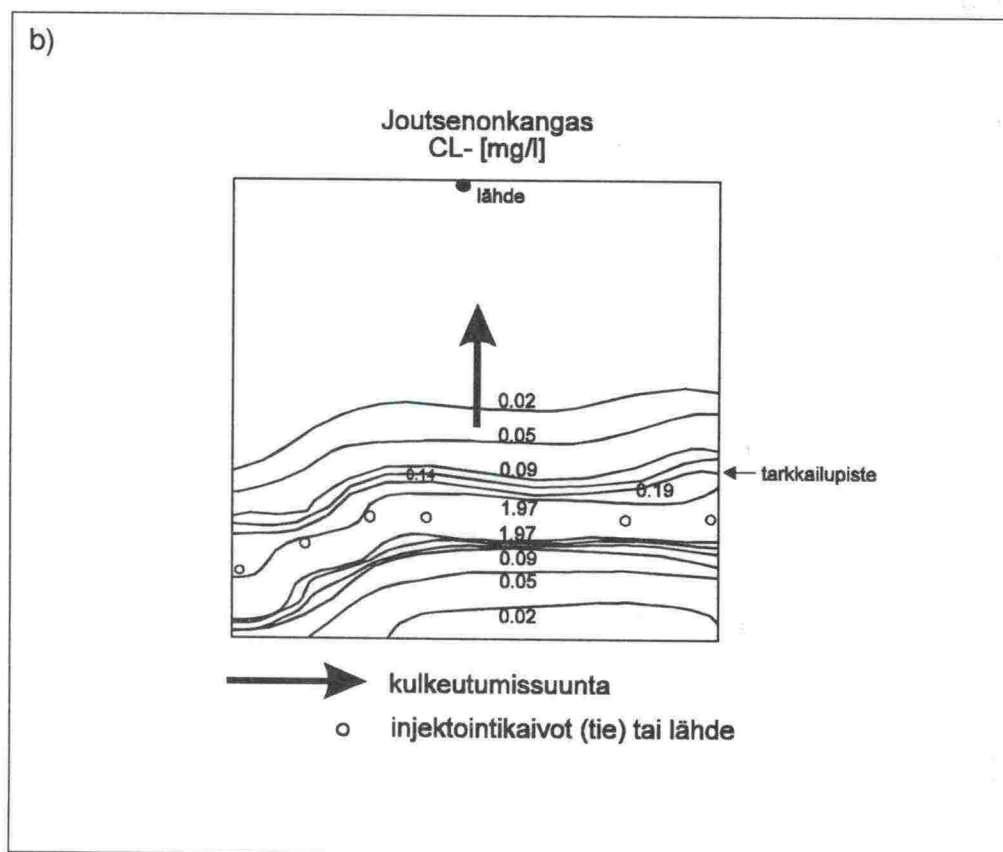
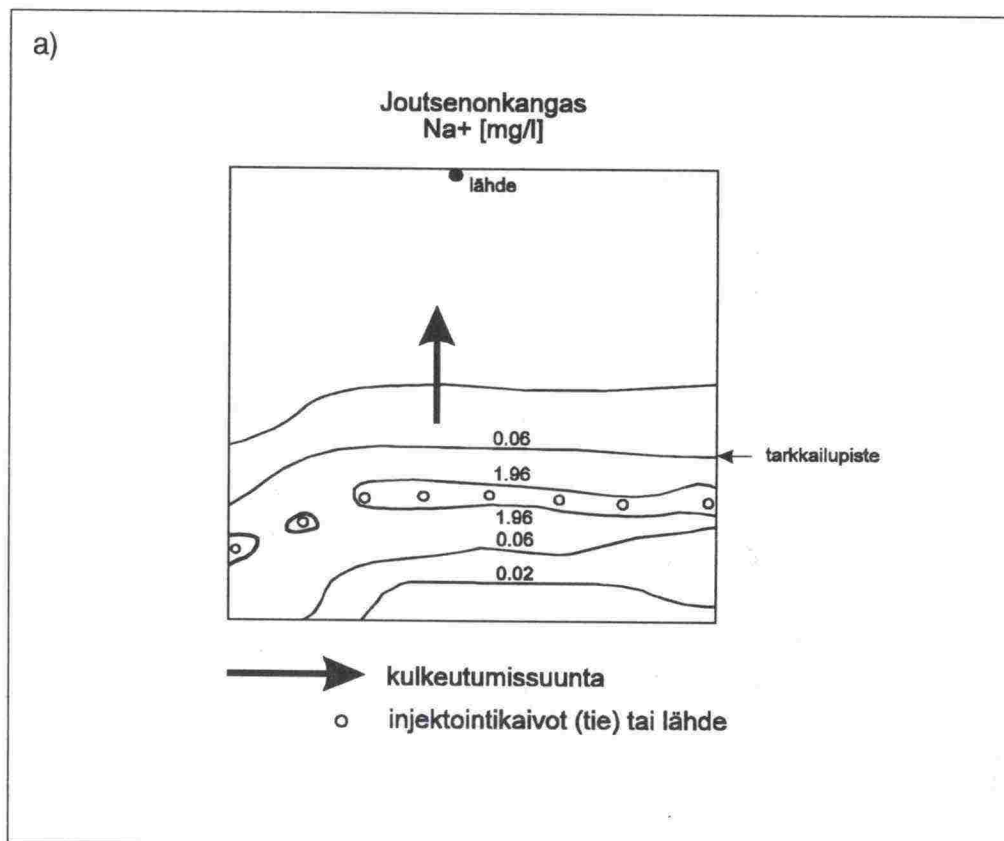
Simuloinnin tuloksena natriumin osuus pieneni kloridiin nähden lyhyellä aikavälillä. Kahden vuoden simuloinnin jälkeen (kuva 39) Na/Cl-suhteen pieneneminen voitiin havaita 100-200 metrin etäisyydellä tiestä. Esimerkiksi kuvan 39 tarkkailupisteessä simuloitu suhde oli 23/77. Suhde kasvoi tieltä pois päin, kunnes tasoittui alkuperäistä suhdetta (35/65) vastaavaksi. Natriumin väheneminen johtuu ioninvaihdosta ($X^- = 50$ mg/l), johon osallistuvat pohjavedessä oleva humus ja maaperän mineraalit (kloriitti, montmorilloniitti, illiitti, biotiitti, muskoviitti). Simuloidut Na^+ ja Cl-pitoisuudet 20 vuoden kuluttua on esitetty kuvassa 40, jossa ioninvaihdosta johtuvaa epätavallista Na/Cl-suhdetta ei tien lähettyvillä enää voi havaita. Etäämpänä lähteestä ero näkyy yhä. Etäällä esiintyvät pitoisuudet ovat kuitenkin jo mittaustarkkuuden rajoilla, eikä erolla suolauksen kannalta ole merkitystä.



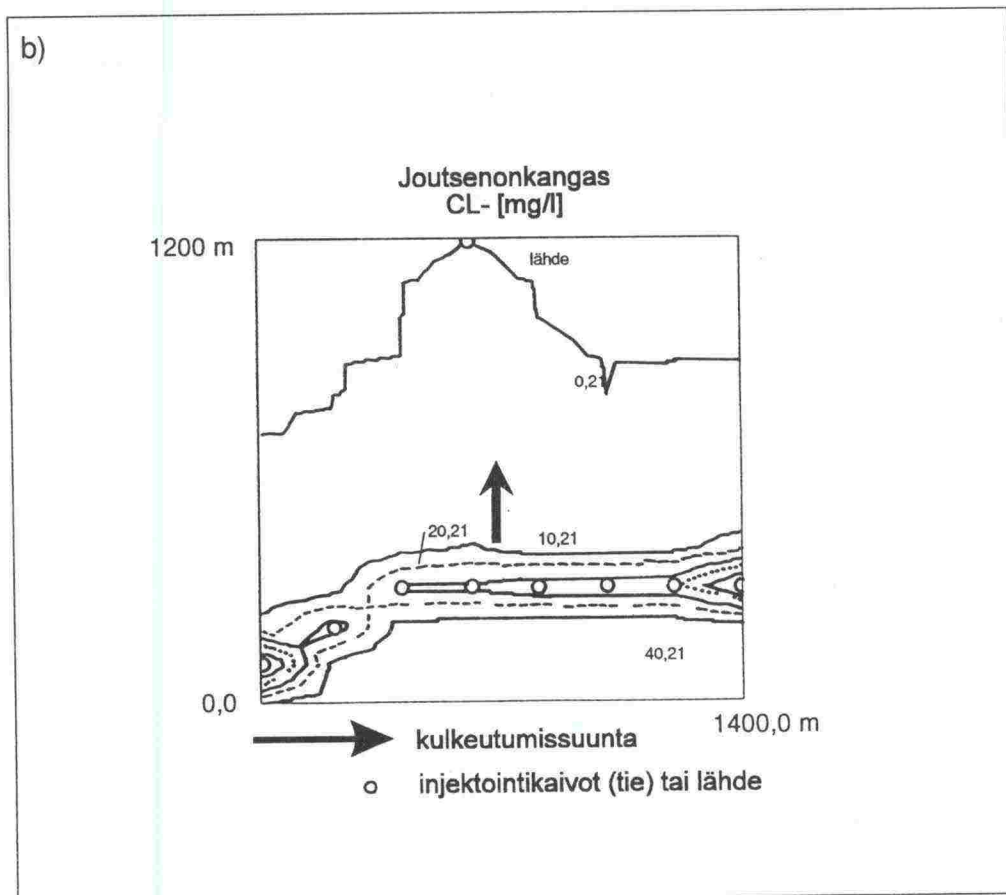
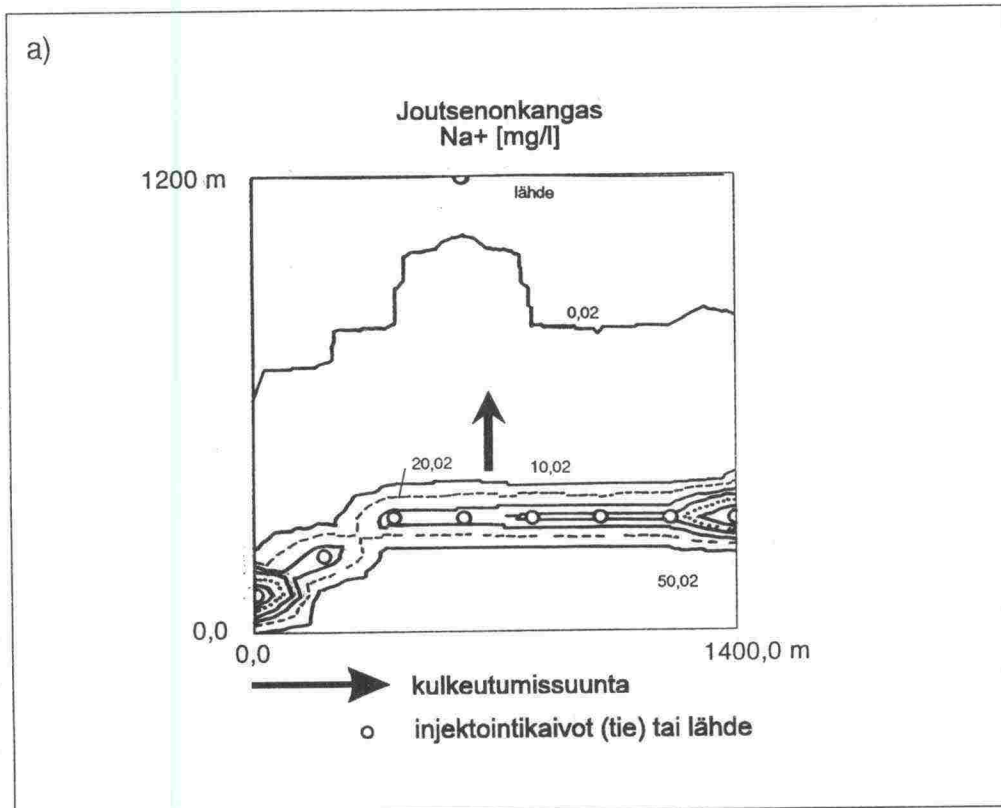
Kuva 38. Joutsenonkankaan geokemiallisessa mallinnuksessa käytetty konseptuaalinen malli ja reunaehdot.

Simulointi osaltaan selittää maastossa havaitut erot natriumin ja kloridin pitoisuuksissa lyhyellä aikavälillä. Myös muiden vaihtuvien ionien pitoisuudet ovat saattaneet muuttua, koska ne vaihtuvat puolestaan natriumiin negatiivisesti varautuneilla mineraalipinnoilla. Pitkällä aikavälillä Na/Cl-suhde palaa normaaliksi, kun maaperän ioninvaihtokapasiteetti on käytetty.

Aiemmin tehtyihin kenttämittauksiin verrattuna (de Coster ym. 1993), simuloinnit vastaavat hyvin mitattuja arvoja noin 100-200 metrin päässä tiestä (Cl: mitattu $10\text{-}20 \text{ mg/l}$, simuloitu 15 mg/l ; Na: mitattu $10\text{-}16 \text{ mg/l}$, simuloitu 10 mg/l). Koska vedenottamon vaikutusta ei huomioitu, yhteensopivuus vedenottamon suunnalla ei ole yhtä hyvä.



Kuva 39. Natriumin (a) ja kloridin (b) pitoisuusjakaumat kahden vuoden kuluttua suolauksen alkamisesta.



Kuva 40. Natriumin (a) ja kloridin (b) pitoisuusjakaumat 20 vuoden kuluttua lähtöhetkestä. Pitkällä aikavälillä Na/Cl-suhde on tasoittunut kaikkialla alkuperäiseksi.

13.4.3 Johtopäätökset

Kytkeytyllä lähestymistavalla pystytään simuloimaan reagoivien vesiliuosten sekoittumisen aiheuttamia muutoksia kokonaiskoostumuksissa. Malli ottaa huomioon myös mineraalien vuorovaikutuksen, tässä tapauksessa ioninvaihdon veden kanssa. Lähestymistapaa voidaan käyttää myös mm. monilähde-tapauksissa seosten synnyn ja komponenttien alkuperän jäljittämiseksi. On kuitenkin huomattava, että pitkällä aikavälillä ioninvaihdon merkitys pienenee, koska maaperän ja veden ioninvaihtokapasiteetti tulee ajan myötä käytetyksi. Edellä lasketuissa tapauksissa ioninvaihto näkyy vain hyvin laimeissa liuoksissa, jolloin myös analyysivirheen mahdollisuus on tavallista suurempi. Yhdistettyä geohydrokemiaalista mallinnusta voidaan tarvittaessa täydentää käänteisellä massatasapainomallilla (esim. NETPATH ja BALANCE), joilla voidaan jäljittää lopullisen koostumuksen aiheuttaneet lähtökäsitteet monilähdetapauksessa.

14 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

14.1 Taustaa

Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut saada suuruusluokkatietoa tiesuolan kulkeutumisesta pohjavedessä ja kulkeutumiseen liittyvien osaprosessien merkittävydestä erilaisissa tyyppiolosuhteissa. Työssä on sovellettu mahdollisimman monipuolisesti eri osaprosessit huomioonottavia mallinnusmenetelmiä.

Yleensä pohjaveden virtausta ja aineen kulkeutumista pohjavedessä mallinetaan olettamalla veden virtausominaisuudet kulkeutuvan aineen pitoisuudesta riippumattomiksi. Tiesuolatutkimusten yhteydessä on esitetty ajatuksia mahdollisesta suolaisemman veden painumisesta vesimuodostuman pohjalle sekä tämän prosessin mahdollisista pitkän aikavälin seurannaisvaikutuksista (Soveri ym. 1992). Tämän ilmiön kvantitatiivinen tarkastelu edellyttää kulkeutuvan aineen tiheydestä riippuvan virtauksen mallintamista. Yksi tämän työn tavoitteista on ollut selvittää millaisissa tapauksissa sinänsä monimutkaisemman ja vaikeammin käytettävän tiheydestä riippuvan mallinnuksen soveltaminen on tarpeen.

Tiesuolan (NaCl) leviämisessä tarkastellaan kahta kemiallisesti erilaista komponenttia, natriumia ja kloridia. Näistä kloridi voidaan olettaa reagoimattomaksi, kun taas natrium voi pidäytyä maaperään ioninvaihdon seurauksena. Ioninvaihdon suuruusluokka riippuu maaperän ioninvaihtokapasiteetista. Tämä on suurin orgaanista ainetta sisältävissä maalajeissa ja lihavassa savessa ja alhaisempi lajittuneissa karkeissa maalajeissa kuten hiekassa ja sorassa. Molempien komponenttien oletaminen reagoimattomiksi vaikuttaa tuloksiin lähinnä konservatiivisesti eli aineen leviämistä vahvistavasti.

Suolapitoisuudeltaan vaihtelevan pohjaveden virtausta sekä suolan kulkeutumista pohjavedessä on aiemmin mallinnettu monissa eri yhteyksissä. Eniten on tutkittu rannikkoalueiden virtaussysteemeissä esiintyvää makean ja suolaisen ($10\ 000\ \text{mg/l} < C < 100\ 000\ \text{mg/l}$) tai murtoveden ($1000\ \text{mg/l} < C < 10\ 000\ \text{mg/l}$) välistä vuorovaikutusta. Tällöin mallinnuksessa on käytetty ns. tarkan rajapinnan oletukseen perustuvia malleja. Nämä mallit eivät päde hydrodynaamisen dispersion ollessa voimakas. Tällöin suolan kulkeutumista on mallinnettu tiheydestä riippuvana virtauksena. Samantyyppisiä lähestymistapoja on sovellettu myös ydinjätteiden loppusijoitustutkimusten yhteydessä syvissä porakaivoissa havaittujen korkeiden suolapitoisuuksien mallintamiseen. Näissä tutkimuksissa vettä on pidetty suolaisena jo pitoisuuden ollessa $300\ \text{mg/l}$. Pohjaveden suolapitoisuuden kasvua teollisuuden jätevesien tai kastelun vaikutuksesta on mallinnettu kulkeutumismalleilla, joissa veden tiheys ja viskositeetti oletetaan vakioiksi ja suolapitoisuudesta riippumattomiksi. Näissä tutkimuksissa tarkastellut kloridipitoisuudet ovat olleet alle $4000\ \text{mg/l}$.

Suomessa suolattujen tieosuuksien lähellä havaitut suolapitoisuudet ovat yleensä alle $300\ \text{mg/l}$, mutta yksittäisissä tapauksissa on havaittu jopa lukema $1700\ \text{mg/l}$ (Soveri 1991). Arvot vaihtelevat siis välillä, jolle on sovellettu sekä tiheydestä riippumatonta mallinnusta, että tiheydestä riippuvan virtauksen mallinnusta. Tyyppiltään tiesuolaongelma muistuttaa teollisuuden jätevesien aiheuttamaa saastumista, jolloin on sovellettu tiheydestä riippumatonta alueellista mallinnusta. Jos halutaan tarkastella tiesuolauksen mahdollisesti aiheuttamaa suolapitoisen veden painumista ja kerääntymistä pohjavesimuodostuman pohjalle, on käytettävä tiheysriippuvuuden huomioivia lähestymistapoja.

14.2 Simulointien tulokset

Useimmissa tämän tutkimuksen mallinnussimuloinneissa on tarkasteltu suolan kulkeutumisen yleisiä prosesseja. Tavoitteena ei ole ollut tutkimusaluekohtaisten ennusteiden tekeminen, mikä aina edellyttää myös tutkimusaluekohtaista mittausaineistoa. Käytetyt parametrien arvot, reunaehdot ja suolausmäärät on kuitenkin valittu siten, että ne mahdollisimman hyvin kuvaisivat suomalaisissa pohjavesimuodostumissa havaittavia olosuhteita.

Suolapulssin keskimääräistä etenemisnopeutta pohjavedessä voidaan arvioida yksinkertaisella analyttisellä kaavalla, vedenjohtavuuden, huokoisuuden ja hydraulisen gradientin avulla. Kirjallisuudessa esitetyt saman maalajin vedenjohtavuudet vaihtelevat useita suuruusluokkia. Virtausnopeuksissa ja matkoissa tämä merkitsee myös suuruusluokkien eroja. Kirjallisuuden vedenjohtavuusarvoja voidaankin pitää vain suuntaa antavina ja eri maalajien välisiä eroja havainnollistavina. Paikkakohtaiset virtausmatka-arviot edellyttävät myös paikkakohtaisia vedenjohtavuusmittauksia. Epävarmuudet huokoisuudessa eivät aiheuta suuruusluokkaeroja. Suuren huokoisuuden omaavilla maalajeilla on yleensä myös hyvä vedenjohtavuus. Poikkeuksena tästä ovat erittäin hienorakeiset maalajit, kuten savi, joissa osa vedestä sitoutuu maaraakeiden pinnoille ja vedenjohtavuus on pieni. Huokoisessa väliaineessa saattaa olla myös virtaukseen osallistumattomia huokosia. Täsmällisiä laskentoja tehtäessä tulisi soveltaa ns. tehokasta huokoisuutta, joka on kokonaishuokoisuutta pienempi.

Eri parametrien ja reunaehtojen vaikutusta kulkeutumiseen tutkittiin simuloineilla muuttamalla yhtä ominaisuutta kerrallaan ja pitämällä muiden ominaisuuksien arvot vakioina. Maaperän ominaisvedenjohtavuus vaikuttaa oleellisesti pulssin etenemisnopeuteen. Samalla se vaikuttaa pitoisuuksiin, koska edetessään pulssi samalla leviää dispersion vaikutuksesta, jolloin pitoisuusmaksimi pienenee. Huokoisuuden vaikutus kulkeutumiseen on huomattavasti vähäisempi. Pienempi huokoisuus aiheuttaa suuremman pitoisuuden ja kloridin nopeamman etenemisen. Dispersiivisyys ei vaikuta pitoisuusmaksimin etenemisnopeuteen, mutta vaikuttaa sen suuruuteen sekä siihen kuinka laajalla alueella pitoisuudet kasvavat. Hydraulinen gradientti vaikuttaa virtaus- ja kulkeutumisen nopeuteen sekä dispersioon lineaarisesti.

Alueellisissa, muodostumakohtaisissa mallinnustarkasteluissa käytetään usein alueellisia tasomalleja. Tämä onkin perusteltua, koska pohjavesimuodostuman pituus ja leveys voivat olla useita kilometrejä paksuuden ollessa vain joitakin kymmeniä metrejä. Kaksiulotteisessa alueellisessa lähestymistavassa virtauksen pystysuora komponentti jätetään huomiotta, ja mallin parametriarvot sekä tuloksena saatavat virtausnopeudet ja pitoisuudet keskimääräistetään syvyysuunnassa. Tämän keskimääräistyksen vaikutuksia arvioitiin simuloimalla suolapulssin etenemistä pohjavedessä sekä pystyleikkausmallilla, että mallilla, jossa syvyyskomponenttia ei huomioida. Tulosten perusteella simuloitujen jakaumat eivät oleellisesti eroa toisistaan, mikäli vesimuodostuma on syvyysuunnassa suhteellisen homogeeninen, eikä merkittävää suolapitoisen veden painumista tapahdu. Mikäli kerroksellisuutta tai painumista esiintyy, voidaan kaksiulotteisia tarkasteluja täydentää mallintamalla kulkeutumista edustavissa poikkileikkauksissa ja paikallisilla kolmiulotteisilla malleilla.

Veden kohonnut suolapitoisuus vaikuttaa kahteen virtausparametriin, nimittäin veden viskositeettiin ja tiheyteen. Vaikutus viskositeettiin on tiesuolauksen tapauksessa vähäinen ja jätetään tässä tarkastelussa huomiotta. Veden tiheyden kasvu suolapitoisuuden lisääntymisen seurauksena saattaa sen sijaan joissakin tilanteissa vaikuttaa kulkeutumiseen. Tilannetta tarkasteltiin simuloimalla suolapulssin kulkeutumista pohjavedessä sekä kytketyllä, tiheysriippuvuuden huomioivalla mallilla, että mallilla, jossa tiheys määriteltiin vakioksi. Kun painumista ei tapahtunut, ei simuloitujen pitoisuusjakaumien välillä ollut havaittavaa eroa. Painumistapauksessa pitoisuusjakaumat poikkesivat toisistaan, mutta pitoisuusmaksimin vaakasuuntaiseen etenemiseen tiheysriippuvuuden huomioimatta jättäminen ei vaikuttanut. Tulosten perusteella voidaan todeta, että mikäli halutaan mallintaa suolan käyttäytymistä syvyysuunnassa, on tiheysriippuvuuden huomioiminen suositeltavaa ja painumistapauksessa välttämätöntä.

Suolapitoisen veden mahdollista painumista tutkittiin simuloimalla suolan käyttäytymistä 24 erilaisessa virtaustilanteessa. Painumisen havaittiin olevan todennäköisintä hyvin vettä johtavissa maalajeissa pienillä pohjavedenpinnan gradientin arvoilla. Pohjavedenpinnan gradientin kasvaessa myös virtausnopeudet kasvavat, eikä painumista tapahdu. Huonommin vettä johtavissa maalajeissa painumisen mahdollisuus pienenee syvyysuuntaisen vedenjohtavuuden pienentyessä, mutta kasvaa toisaalta vaakasuuntaisen virtauksen hidastuessa. Simuloinneissa oletukset valittiin painumista suosiviksi. Mikäli tulosten perusteella painumista ei tapahdu, ei sitä tapahdu luonnos-

sakaan. Mikäli tulosten perusteella painuminen on mahdollista, on tilanne tutkittava tarkemmin. Simuloinneissa tien oletettiin kulkevan virtauskentän poikki. Mikäli tie kulkee virtauksen suuntaisesti, painumisen mahdollisuus kasvaa sitä suuremmaksi, mitä pitemmän matkan tie kulkee vesimuodostuman imeytymisalueella. Tällaiset tapaukset on aina tutkittava tarkemmin.

Maaperän kerroksellisuuden vaikutusta kulkeutumiseen tutkittiin simuloimalla suolan kulkeutumista erilaisissa tyyppipoikkileikkauksissa. Simuloidut tulokset kuvaavat eri syvyyksillä havaittujen kloridipitoisuuksien ja muodostuman kerroksellisuuden välistä riippuvuutta. Kun maakerrosten vedenjohtavuudet poikkeavat toisistaan, ovat myös kloridin etenemisnopeudet näissä maakerroksissa erilaiset. Suurin osa kloridista kulkeutuu parhaiten vettä johtavissa kerroksissa, mutta nämä kerrokset myös puhdistuvat nopeammin kuin huonosti vettä johtavat kerrokset. Kerroksellisuus aiheuttaa siis erilaisten suolapitoisuuksien esiintymistä eri syvyyksillä. Esimerkiksi syvemmillä pohjavesimuodostumassa esiintyvä korkeampi suolapitoisuus voi tämän perusteella aiheutua muodostuman kerroksellisuudesta.

Pohjavesien suolaantumisalttiutta tutkittaessa ongelmallisimmaksi on osoittautunut tilanne, jossa tie seuraa harjujaksoa. Pohjavesialueeseen kohdistuva suolakuormitus on tällöin suhteellisesti suurempi kuin tien kulkiessa muodostuman poikki. Tilanteiden kvantitatiiviseksi vertaamiseksi simuloitiin suolan leviämistä esimerkkihajumuodostumassa. Tien kulkiessa 5 km harjun päällä virtauksen suuntaisesti simuloidut kloridipitoisuudet olivat korkeimmillaan harjun alavirran puoleisessa päässä yli 180 mg/l. Tien kulkiessa harjun poikki korkeimmat pitoisuudet olivat n. 10 mg/l.

De Coster ym. (1993) ovat mallintaneet tiesuolasta peräisin olevan kloridin kulkeutumista Joutsenonkankaan tutkimusalueella. Mallinnus on tehty alueellisella tasomallilla olettaen veden tiheys vakioksi. Lisätarkasteluna tähän malliin, mahdollisten tiheysvaikutusten arvioimiseksi, simuloitiin tämän työn yhteydessä kloridin kulkeutumista de Coster'in ym. (1993) raportoimassa esimerkkipoikkileikkauksessa. Tarkasteltu poikkileikkaus läpäisee huonosti vettä johtavan alueen, jonka osa virtauksesta ja sen mukana kulkeutuvasta kloridista todellisuudessa kiertää. Sovelletulla kaksikulotteisella poikkileikkauksimallilla ei tämän vuoksi saatu hyvää yhteensopivuutta mitattujen ja simuloitujen arvojen välillä. Tällöin myös mallin käyttö aluekohtaisiin ennusteisiin on rajallinen. Paremman yhteensopivuuden saavuttaminen ja luotettavampien ennusteiden tekeminen edellyttäisi kolmiulotteista mallinnusta. Kaksikulotteinen poikkileikkauksimalli antaa lähinnä kvalitatiivista tietoa suolan kulkeutumisesta pystyleikkauksessa ja sitä on tarkasteltava alueellisen tasomallinnuksen oheistietona.

Simulointien perusteella voitiin kuitenkin arvioida painumisilmiön esiintymistä Joutsenonkankaalla. Malli liioittelee pitoisuuksia, jolloin myös mahdollinen painuminen voimistuu. Painumista ei kuitenkaan simulointien perusteella näyttänyt tapahtuvan. Herkkyystarkasteluna simuloitiin suolan käyttäytymistä eo. poikkileikkauksessa tilanteessa, jossa tie kulkisi lähempänä vedenjakajaa tai vedenjakajalla. Tulosten perusteella tien siirtäminen lähemmäs vedenjakajaa hidastaa suolan leviämistä ja kasvattaa pitoisuusmaksimeja. Vedenjaka-

jalta suola ei tarkastelujänteellä (n. 30v) juuri liikkunut. Mahdollista painumista on vaikea erottaa, koska suolauksen jatkuessa pitoisuusmaksimi pysyy yläreunassa. Mikäli suolaus lopetettaisiin painumistapauksessa voitaisiin nähdä pitoisuusmaksimin vajoaminen vesimuodostuman pohjalle.

Natriumin ja kloridin erilaisen geokemiallisen käyttäytymisen simuloimiseksi tarkasteluun sovellettiin myös kytkettyä geohydrokemiallista mallinnusta. Yksityiskohtainen geokemiallinen tasapainomallinnus edellyttää kuitenkin hyviä tietoja maaperän mineraalikoostumuksesta ja pohjaveden kemiallisesta koostumuksesta. Tällaisia ei tätä tutkimusta tehtäessä ollut käytettävissä ja tulokset ovatkin lähinnä suuntaa antavia. Mallinnusta sovellettiin harjun helma-alueella kuvaavaan konseptuaaliseen tilanteeseen, sekä Joutsenonkankaan alueelliseen tasomallinnukseen. Natriumin pidättyminen voitiin havaita tuloksissa lyhyellä aikavälillä. Pitkällä aikavälillä (> 10 v) Na/Cl-suhde palaa normaaliksi. Kytketyllä geohydrokemiallisella lähestymistavalla pystytään simuloimaan reagoivien vesiliuosten sekoittumisen ja reaktioiden aiheuttamia muutoksia kokonaiskoostumuksissa. Malli ottaa huomioon myös mineraalien vuorovaikutuksen, tässä tapauksessa ioninvaihdon veden kanssa. Lähestymistapa voitaisiin käyttää myös mm. monilähdetapausten arvioimisessa. Yhdistettyä geohydrokemiallista mallinnusta voidaan tarvittaessa täydentää käänteisellä massatasapainomallilla, jolla voidaan jäljittää lopullisen koostumuksen aiheuttaneet lähtökomponentit monilähdetapauksessa.

15 KIRJALLISUUSLUETTELO

Ahlberg, T. & Soveri, J. 1988. Simulation of Groundwater Head and Chloride Concentration in a Water Supply Area. Rantajärvi, L. (red.). Nordisk hydrologisk konferens 1988, Rovaniemi, Finland 1-3 augusti 1988, Nordisk Hydrologisk Program, NHP-rapport nr. 22, del 2. Helsinki, Yliopistopaino. s. 340-349. ISBN 951-715-216-7.

Ahlberg, T. & Soveri, J. 1989. Waste Landfill Influence on Chloride Concentration in Perched Water Estimated by a Solute-transport Model. Oystein, A. (ed.). Nordisk seminar on groundwater modelling, 1989. Randsvangen, Norway, 26-27 april 1989, Nordisk Hydrologisk Program, NHP Report no 27, Oslo, s. 307-313. ISBN 82-410-0118-5, ISSN 0900-0267.

Ahlbom, K. 1991. Saline groundwater at the Finnsjö site and its surroundings. SKB technical report 91-57, 12 s.

Airaksinen, J. U. 1978. Maa- ja pohjavesihydrologia. Kustannusosakeyhtiö Pohjoinen. Oulu.

Bear, J., 1960. The transition zone between fresh and salt waters in coastal aquifers, Ph. D. Thesis, University of California, Berceley, Calif.

Bear, J. 1979. Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill Inc.

Bear, J. 1988. Dynamics of fluids in porous media. New York, Dover publications, 764 s.

de Coster, A., Granlund, K. & Soveri, J. 1993. Tiesuolan pohjavesivaikutusten mallintaminen Joutsenonkankaalla. Tielaitos. Helsinki. 53 s.

Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. Groundwater, Prentice-Hall, Inc., USA, 604 s.

Grim, R. E. 1962. Applied clay mineralogy, McGraw-Hill, s. 29, 422 s.

Hassanizadeh, S. M., Leijnse, T. 1988. On the modelling of brine transport in porous media, Water Resources Research, Vol 24, No 3, ss. 321-330.

Hellweg, O. J., Labadie, J. W. 1977. Linked models for managing river basin salt balance, Water Resources Research, Vol 13, No 2. ss. 329-336.

Kauranne, L. K., Gardemeister, R., Korpela, K. & Mälkki, E. 1972. Rakenusgeologia 2. Teknillisen Korkeakoulun Ylioppilaskunta, Otaniemi, Espoo. 363 s.

Kipp, K. L. Jr., 1987. HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water flow systems, U. S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 86-4095, 517 s.

Konikow, L.F. 1977. Modeling of Chloride Movement in the Alluvial Aquifer at

- the Rocky Mountain Arsenal, Colorado, United States Department of the Interior, Geological Survey Water-Supply Paper 2044, Dallas, 43 s.
- Konikow, L. F. & Bredehoeft, J. D. 1974. Modelling flow and chemical quality changes in an irrigated stream aquifer system, *Water Resources Research* 10(3), ss. 546-562.
- Korhonen, K.-H., *Geotekniikka ja pohjarakennus*. Helsinki 1963. Maa- ja vesirakentaja käsikirja.
- Laitinen, M., Taivassalo, V. 1992. Suolapitoisuudeltaan vaihtelevan pohjaveden virtauksen simulointi PHOENICS-ohjelmistolla, VTT/YDI, TVO/Paikkatutkimukset, Työraportti 92-42, 30 s.
- de Marsily, G. 1986. *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press. ISBN 0-12-208915-4. 440 s.
- Pinder, G. F. 1973. A Galerkin-finite element simulation of groundwater contamination on Long Island, N.Y. *Water Resources Res.*, 9, no. 6, pp. 1657-1669.
- Robertson, J.B. 1974. Digital modeling of radioactive and chemical waste transport in the Snake River Plain aquifer at the National Reactor Testing Station, Idaho. U.S. Geol. Surv., Water Resources Div., IDO-22054, Idaho Falls, Idaho.
- Soveri, J., de Coster, A., Vesterinen, J. 1991. Tiesuolauksen vaikutus pohjaveteen Salpausselän alueella. Tielaitoksen selvityksiä 21/1991, Helsinki, 44 s.
- Souza, W. R. & Voss C. I. 1987. Analysis of an anisotropic coastal aquifer system using variable density flow and solute transport simulation, *J. Hydrol.*, 92, 17-41.
- Stumm, W. 1992. *Chemistry of the solid-water interface: processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., USA, 428 s.
- Svensson, U. 1991. Groundwater circulation in the Finnsjö area - A numerical study of the combined effects of salinity gradients, temperature gradients and fracture zones, SKB technical report 91-57, 24 s.
- Svensson, U. 1991. A three-dimensional numerical model of groundwater flow and salinity distribution in the finnsjö area, SKB technical report 91-57, 35 s.
- Tuominen, P. 1992. Tiesuolauksen vaikutus pohjaveteen Keski-Suomessa. Vesi- ja Ympäristöhallituksen monistesarja, nro 423, Vesi- ja Ympäristöhallitus, Helsinki, 118 s.
- Willemsen, A. 1992. Annex VI, subtask A - Coupled Geochemical transport model, IEA report 2. International Energy Agency, Paris, 102 s.

16 LIITTEET

LIITE 1: Yhtälöiden kytkennässä käytetyt fysikaaliset riippuvuudet

LIITE 2: Painumissimulointien tulokset

LIITE 3: Harjun helma-alue: Simuloinneissa käytetyt harjuveden ja suolaa sisältävän sadeveden kemialliset koostumukset

LIITE 4: Joutsenonkangas: Simuloinneissa käytetyt pohjaveden ja suolaa sisältävän sadeveden kemialliset koostumukset

YHTÄLÖIDEN KYTKENNÄSSÄ KÄYTETTÄVÄT FYSIKAALISET RIIPPUVUDET (Kipp 1987)

Nesteen tiheyden oletetaan riippuvan paineesta, lämpötilasta ja konsentraatiosta lineaarisesti:

$$\rho_0(p, T, w) = \rho_0 + \rho_0 B_p (p - p_0) - \rho_0 B_T (T - T_0) + \rho_0 B_w (w - w_0)$$

jossa

- ρ_0 = nesteen tiheys referenssipaineessa p_0 , lämpötilassa T_0 ja liuenneen aineen massaosuudessa w_0
 B_p = nesteen kokoonpuristuvuus
 B_T = nesteen lämpölaajenemiskerroin
 B_w = nesteen tiheyden muuttumiskerroin liuenneen aineen massaosuuden kasvaessa

$$\rho_0 \beta_w = \frac{\rho(w_{\max}) - \rho(w_{\min})}{w_{\max} - w_{\min}}$$

jossa

- w_{\min} = liuenneen aineen massaosuuden minimi
 w_{\max} = on liuenneen aineen massaosuuden maksimi

Nesteen viskositeetti riippuu voimakkaasti lämpötilasta ja vähän konsentraatiosta. Paineriippuvuutta ei huomioida. Viskositeettifunktio on seuraava:

$$\mu(T, w') = 10^{-3} \mu(T_{ov}, w') \exp[(B_0 w' + B_1 (1 - w')) (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ov}})]$$

jossa

- $\mu(T_{ov}, w')$ = nesteen viskositeetti referenssilämpötilassa
 B_0, B_1 = parametreja, jotka kuvaavat viskositeetin lämpötilariippuvuutta konsentraation ääriarvoilla
 T_{ov} = referenssilämpötila
 w' = skaalattu liuenneen aineen massaosuus (0 - 1)

PAINUMISSIMULOINTIEN TULOKSET

$$k = 1,5 \times 10^{-8} \text{ m}, K \approx 10^{-1} \text{ m/s}, n = 42\%, dh/dx = -0,0001$$

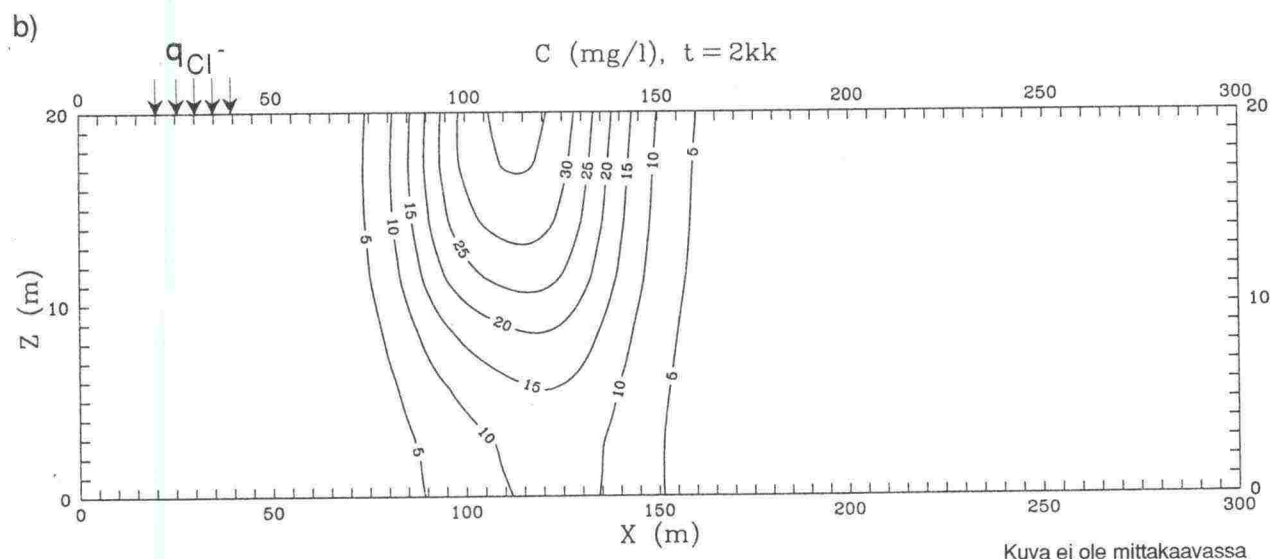
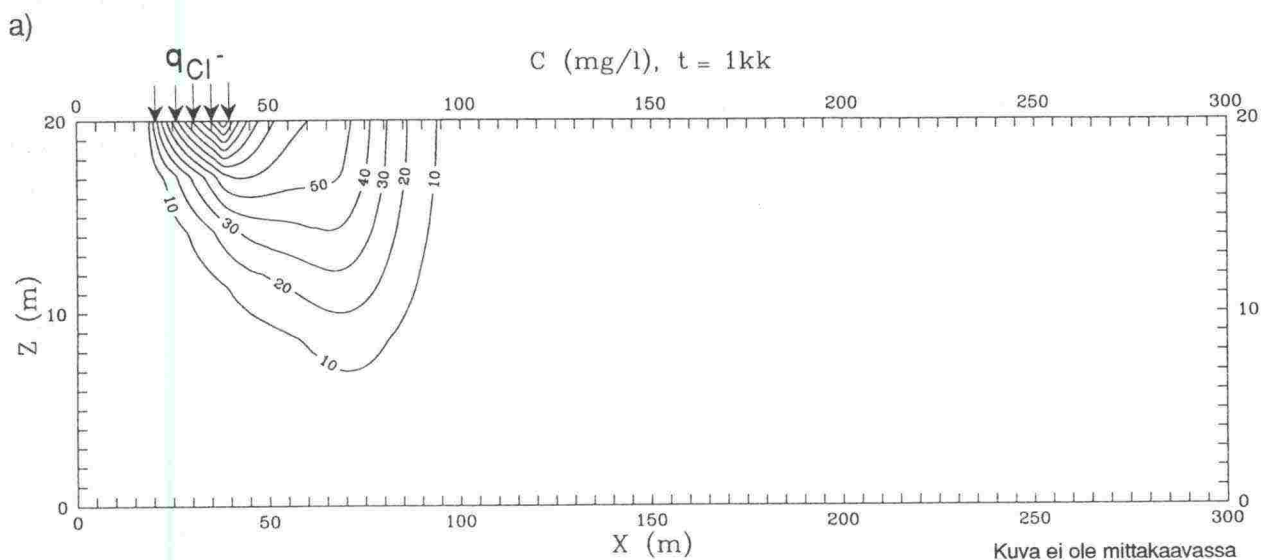
Suolaus: 1 vuosi

Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa

Simulointijakso: 2 kk imeytymisen alkamisesta

Tulokset:

Painumista ei tapahdu, vaan pitoisuusmaksimi pysyy yläreunassa (kuva 1). Koska painumista ei tapahdu heti tien läheisyydessä, ei sitä tapahdu myöhemminkään, koska pitoisuudet laskevat ja pitoisuusjakauma loivenee pulssin edetessä. Useamman vuoden suolaus ei myöskään aiheuta suolan kasautumista, koska suolapulssi kulkeutuu 'alta pois' ennen seuraavan vuoden suola-annoksen imeytymistä.



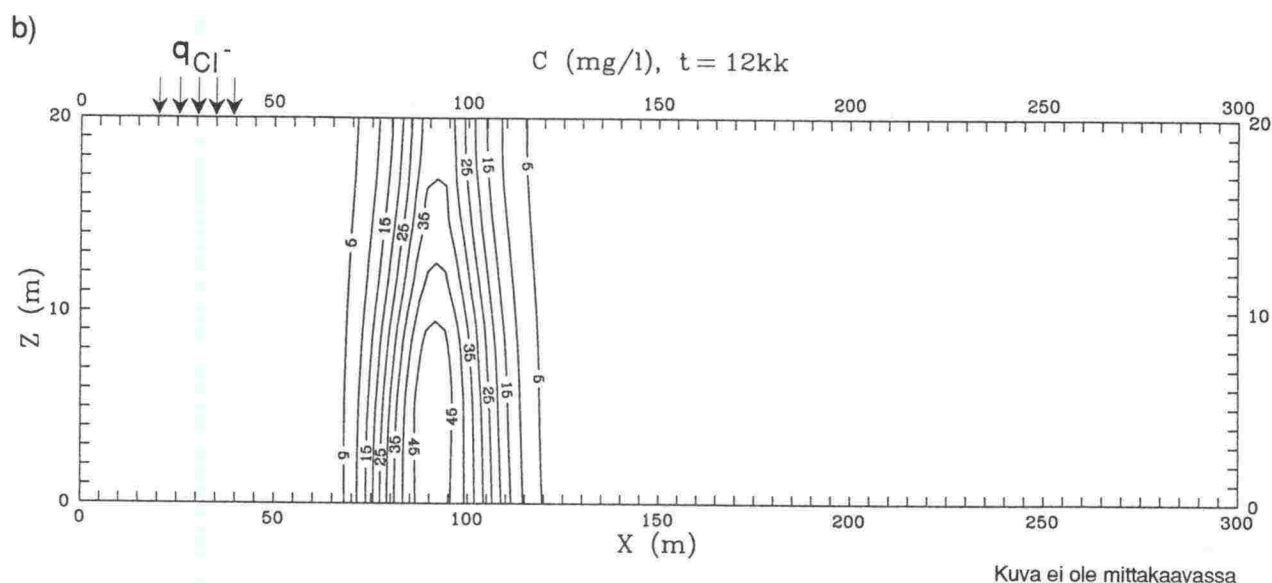
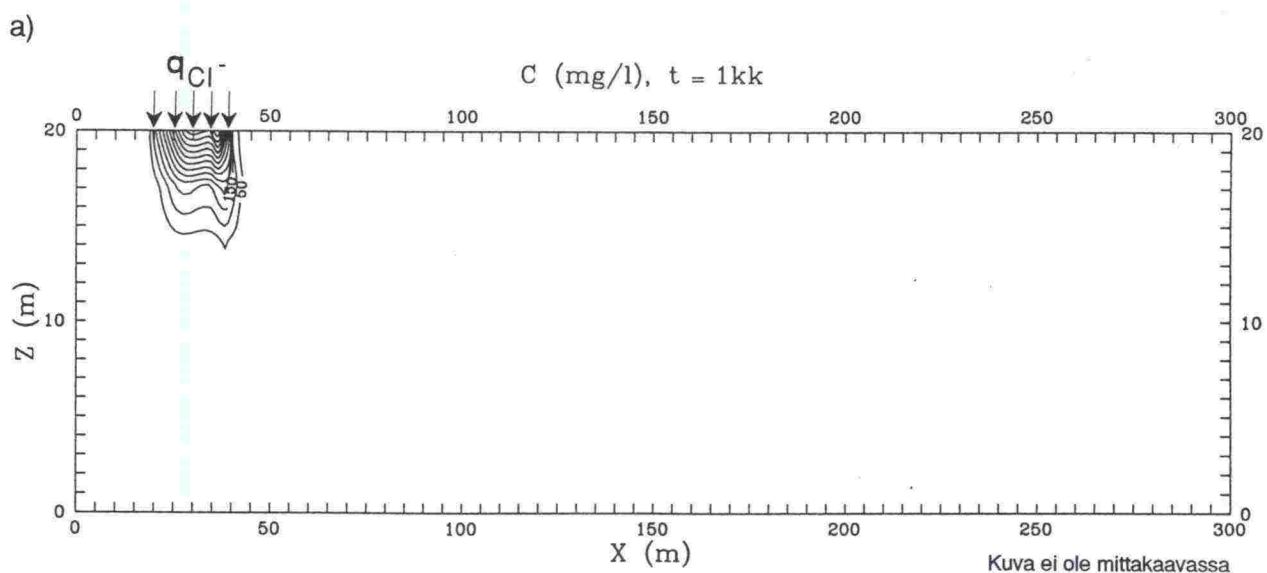
Kuva 1. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1\text{kk}$ b) $t=2\text{kk}$

$$\underline{k = 1,5 \times 10^{-8} \text{ m}, K \approx 10^{-1} \text{ m/s}, n = 42\%, dh/dx = -0,001; -0,01; -0,1}$$

Näitä tapauksia ei simuloitu, koska edellisen tapauksen perusteella voidaan päätellä, että **painumista ei tapahdu**.

$$\underline{k = 1,5 \times 10^{-9} \text{ m}, K \approx 10^{-2} \text{ m/s}, n = 44 \%, dh/dx = -0,0001}$$

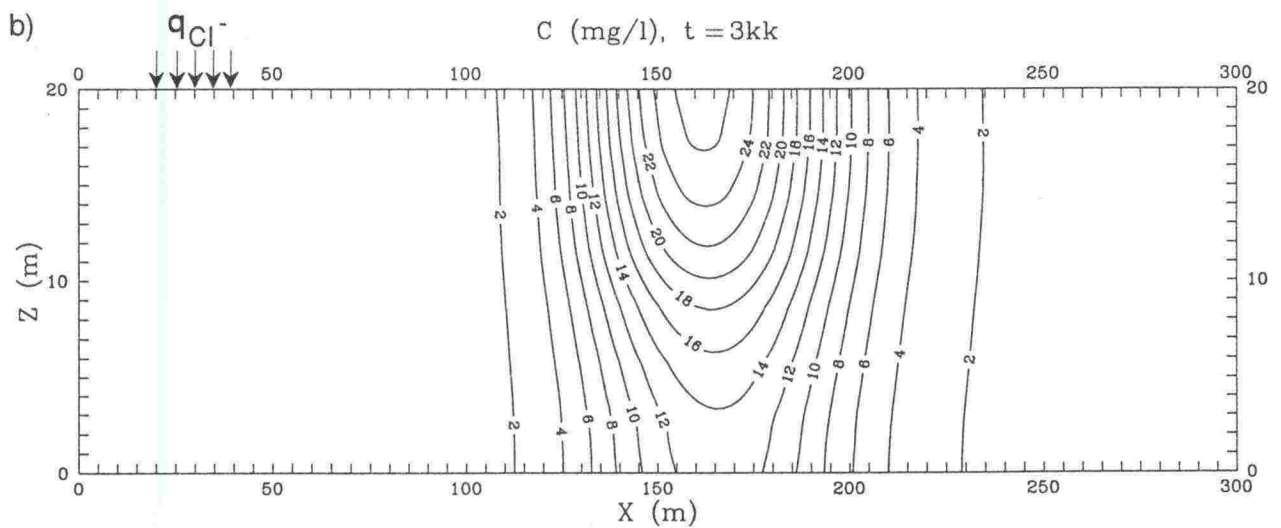
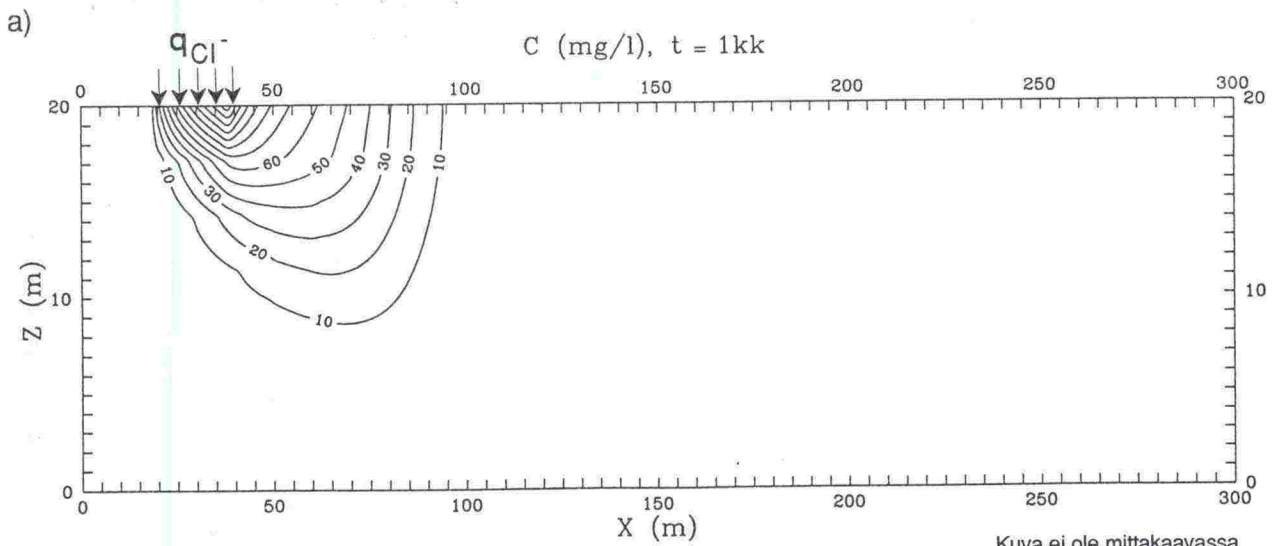
Suolaus: 1 vuosi
 Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 1 vuosi imeytymisen alkamisesta
 Tulokset: Jo yhden vuoden suolauksen seurauksena suolapitoinen vesi **painuu** vesimuodostuman pohjalle (kuva 2).



Kuva 2. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1\text{kk}$, b) $t=12\text{kk}$

$k = 1,5 \times 10^{-9} \text{ m}$, $K \approx 10^{-2} \text{ m/s}$, $n = 44 \%$, $dh/dx = -0,001$

Suolaus: 1 vuosi
 Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk kuluessa
 Simulointijakso: 3 kk imeytymisen alkamisesta
 Tulokset: Kuvasta 3 nähdään, että **painumista ei tapahdu**.
 Painumista ei tapahdu myöskään useamman vuoden suolauksen tuloksena, koska suola ei kasaudu, vaan kulkeutuu 'alta pois' ennen seuraavan vuoden suolapulssia.



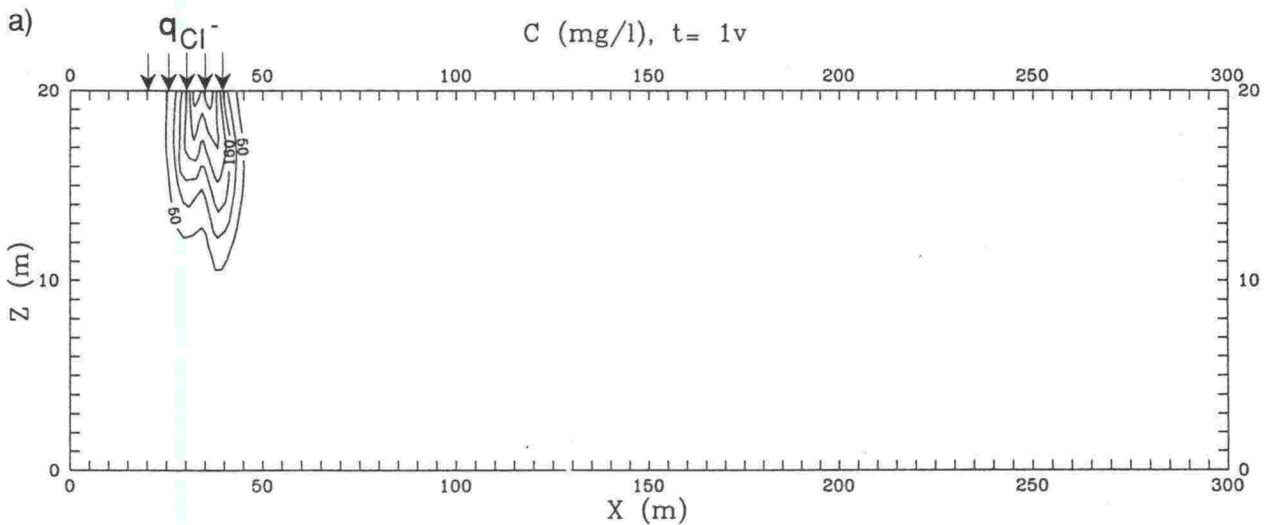
Kuva 3. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1\text{kk}$ b) $t=3\text{kk}$

$k = 1,5 \times 10^{-9} \text{ m}$, $K \approx 10^{-2} \text{ m/s}$, $n = 44 \%$, $dh/dx = -0,01$; $-0,1$

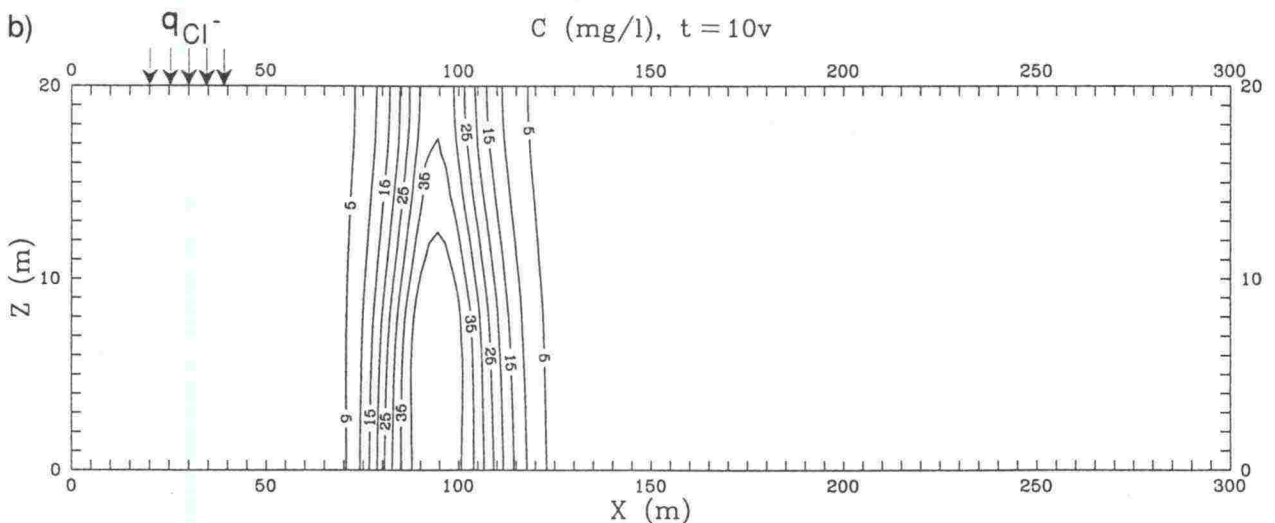
Näitä tapauksia ei simuloitu, koska edellisen tapauksen perusteella voidaan päätellä, että **painumista ei tapahdu**.

$k = 1,5 \times 10^{-10} \text{ m}$, $K \approx 10^{-3} \text{ m/s}$, $n = 44 \%$, $dh/dx = -0,0001$

Suolaus: 1 vuosi
Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
Simulointijakso: 10 vuotta
Tulokset: Jo yhden vuoden suolaus aiheuttaa suolapitoisen veden **painumisen** vesimuodostuman pohjalle (kuva 4).



Kuva ei ole mittakaavassa



Kuva ei ole mittakaavassa

Kuva 4. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1v$ b) $t=10v$

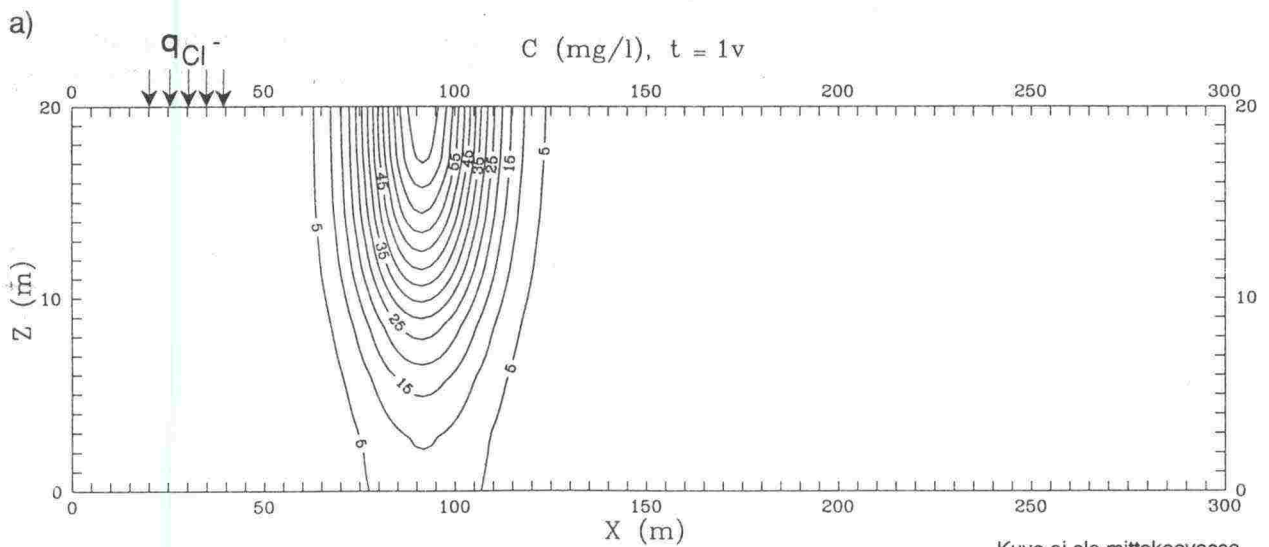
$k = 1,5 \times 10^{-10} \text{ m}$, $K \approx 10^{-3} \text{ m/s}$, $n = 44 \%$, $dh/dx = -0,001$

Suolaus: 10 vuotta

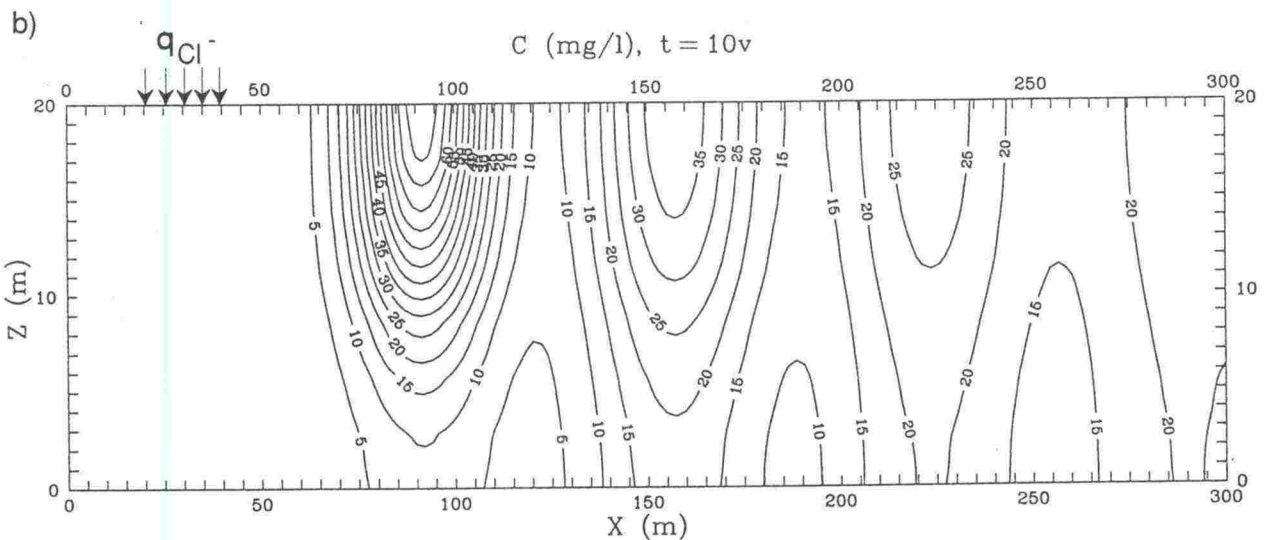
Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätkuukausen aikana 1 kk:n kuluessa

Simulointijakso: 10 vuotta

Tulokset: Pitkäaikainenkaan suolaus ei aiheuta suolapitoisen veden **painumista** vesimuodostumassa (kuva 5). Kuvassa 5b nähdään vuodenaikaisvaihtelu, jossa pitoisuusmaksimit sijaitsevat vesimuodostuman yläreunassa ja pitoisuusminimit alareunassa.



Kuva ei ole mittakaavassa



Kuva ei ole mittakaavassa

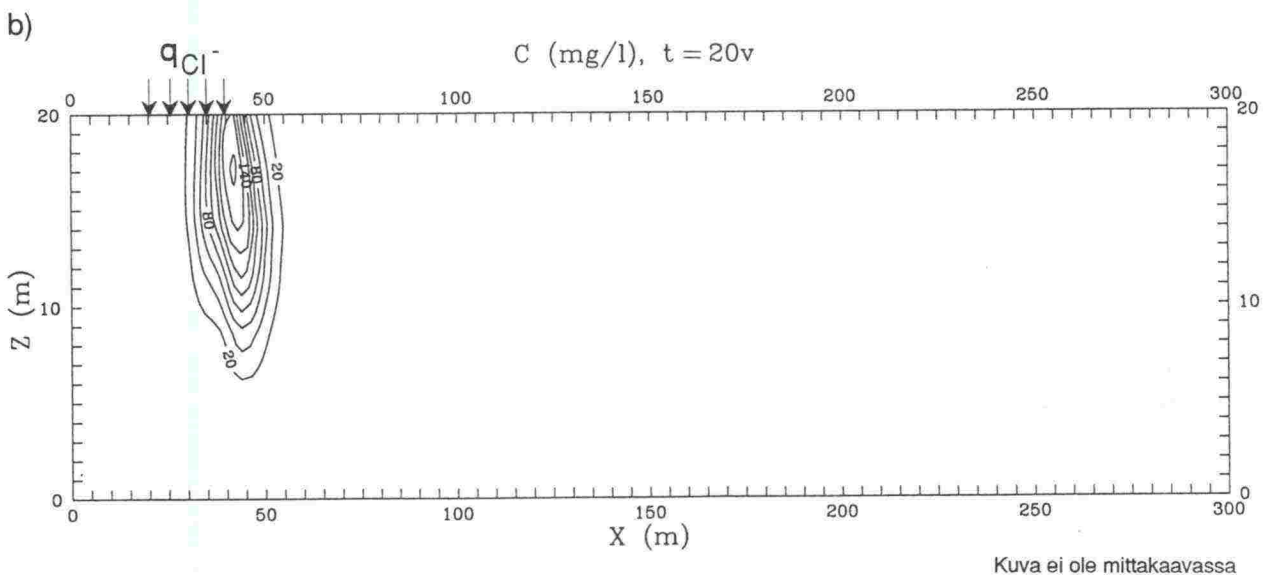
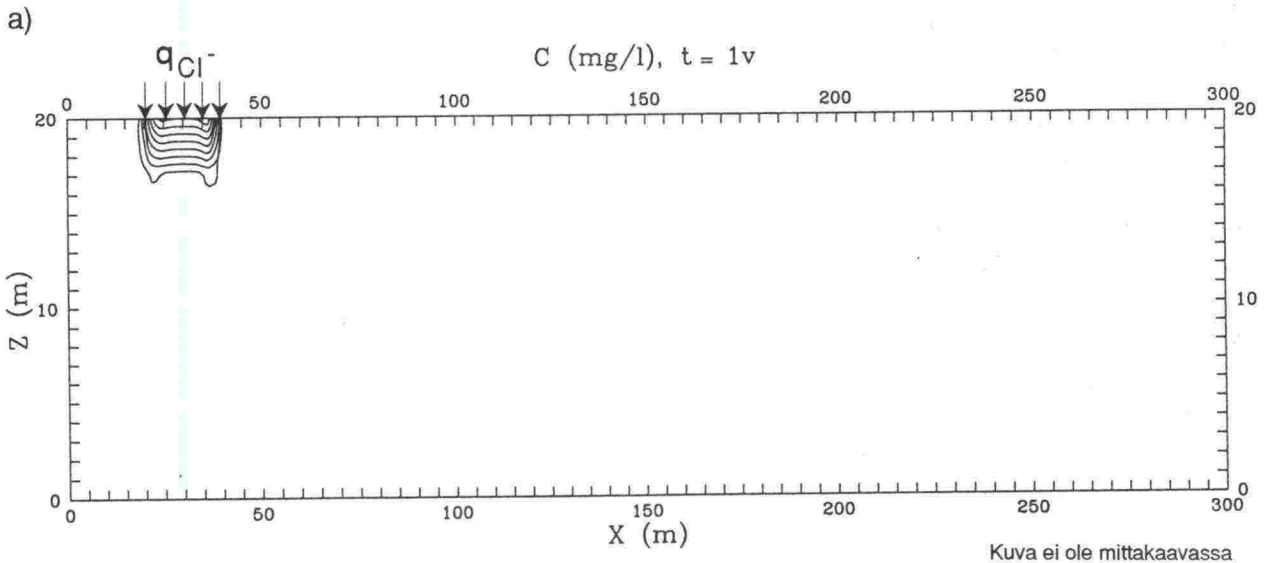
Kuva 5. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1v$ b) $t=10v$

$$\underline{k = 1,5 \times 10^{-10} \text{ m}, K \approx 10^{-3} \text{ m/s}, n = 44 \%, dh/dx = -0,01; -0,1}$$

Näitä tapauksia ei simuloitu, koska edellisen tapauksen perusteella voidaan päätellä, että painumista ei tapahdu.

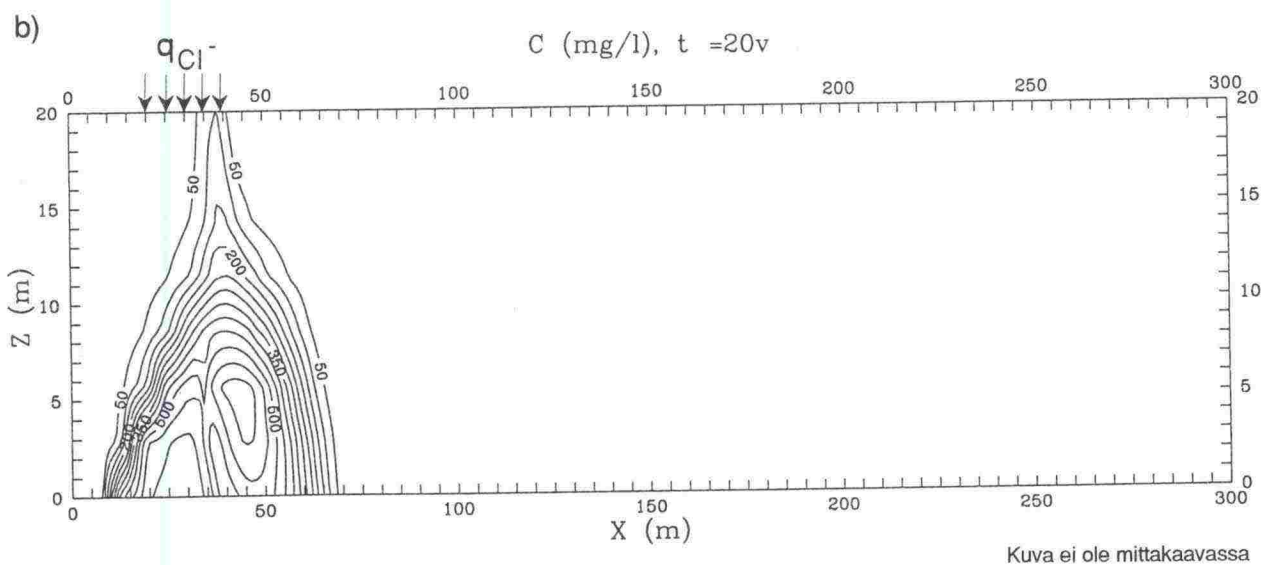
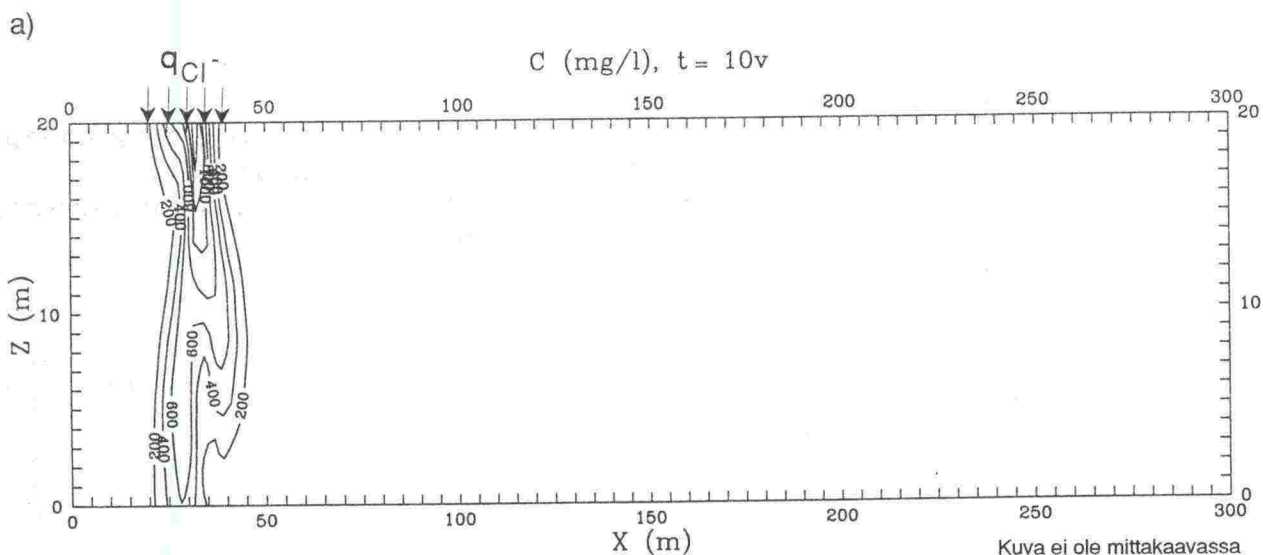
$$\underline{k = 1,5 \times 10^{-11} \text{ m}, K \approx 10^{-4} \text{ m/s}, n = 44 \%, dh/dx = -0,0001}$$

Suolaus: 1 vuosi
 Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 20 vuotta
 Tulokset: Jo yhden vuoden suolauksen jälkeen suolapitoinen vesi **alkaa hyvin hitaasti painua** alaspäin (kuva 6). 20 vuoden kuluttua suolauksesta pitoisuusmaksimi on vajonnut n. 3 metriä.



Kuva 6. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1v$ b) $t=20v$

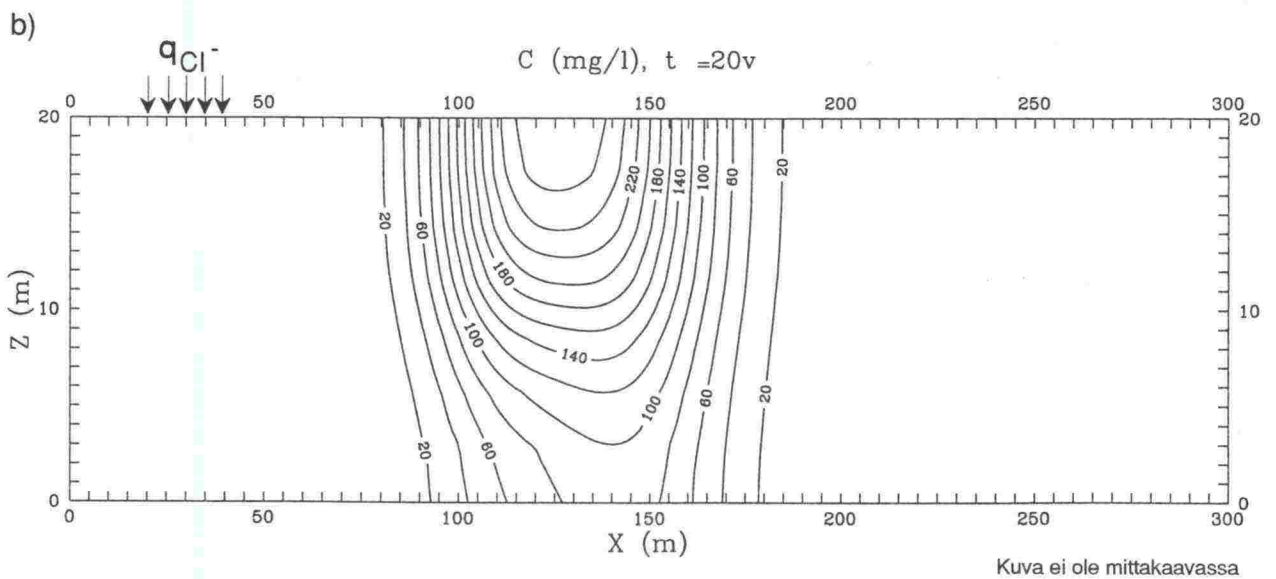
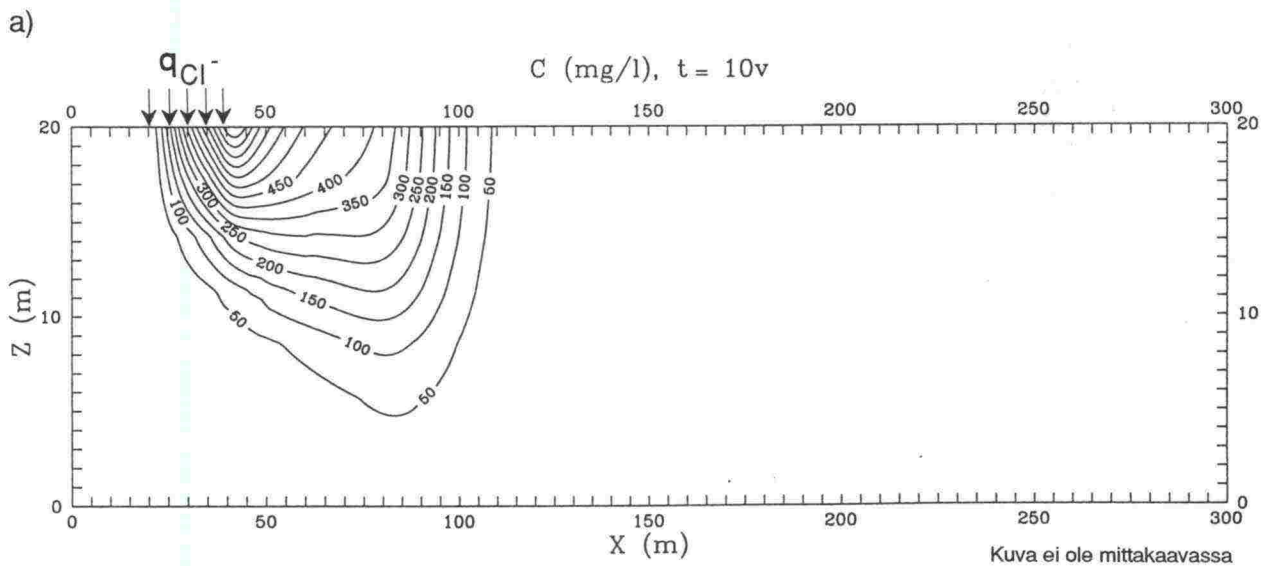
Suolaus: 10 vuotta
 Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätkuun aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 20 vuotta
 Tulokset: 10 vuoden suolaus on aiheuttanut suolan kasautumisen, eli suolapitoisuudet ovat kasvaneet huomattavan korkeiksi, jolloin suolapitoinen vesi **painuu** suoraan vesimuodostuman pohjalle (kuva 7).



Kuva 7. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=10v$ b) $t=20v$

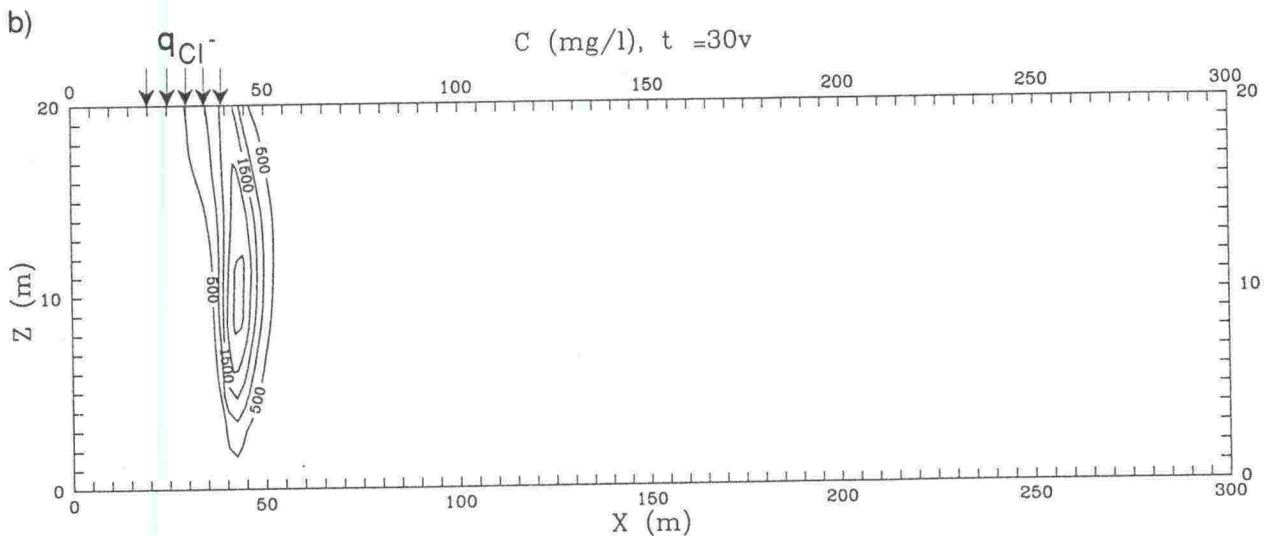
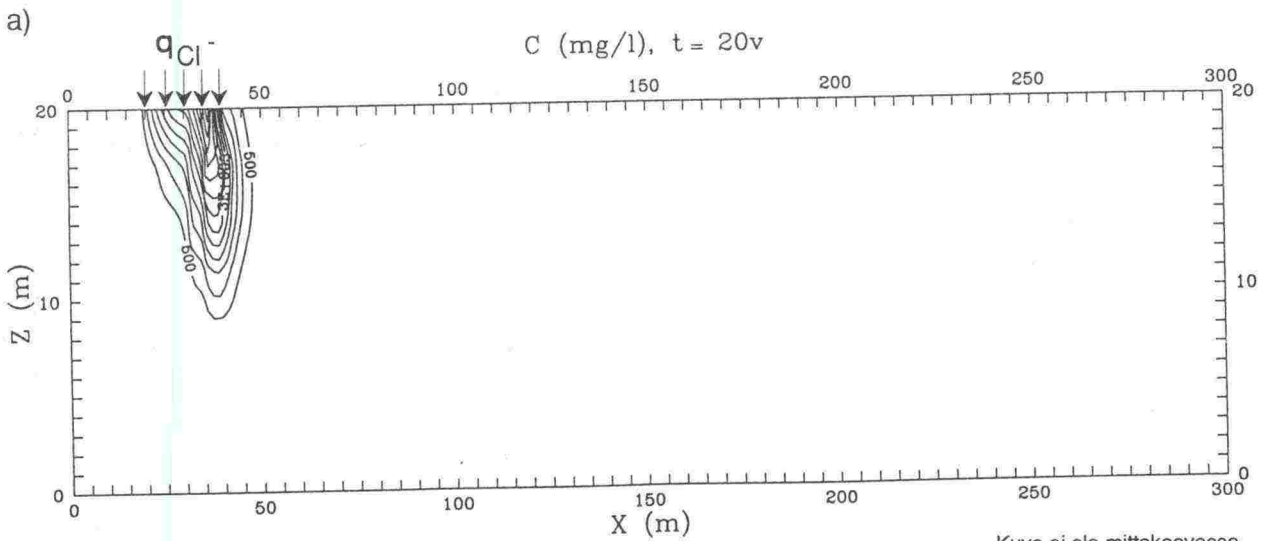
$$k = 1,5 \times 10^{-11} \text{ m}, K \approx 10^{-4} \text{ m/s}, n = 44 \%, dh/dx = -0,001$$

Suolaus: 10 vuotta
 Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 20 vuotta
 Tulokset: 10 vuoden suolaus **ei** suolan kasautumisesta huolimatta **ole aiheuttanut painumista**, vaan 10 vuotta suolauksen lopettamisen jälkeen pitoisuusmaksimi on edelleen yläreunassa (kuva 8).



Kuva 8. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=10v$ b) $t=20v$

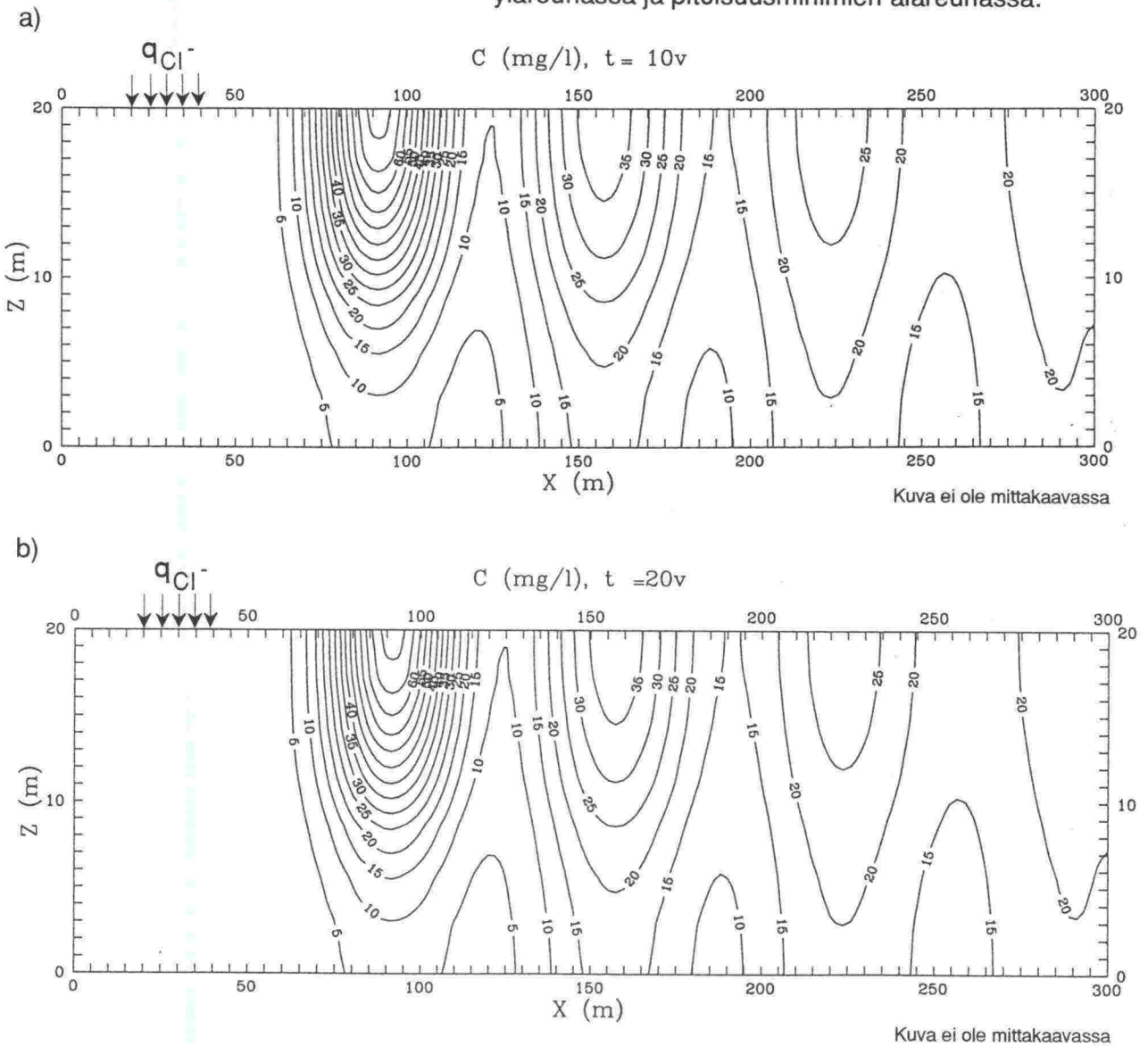
Suolaus: 20 vuotta
 Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätkuun aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 30 vuotta
 Tulokset: 20 vuoden suolauksen ja suolan kasautumisen seurauksena suolapitoinen vesi **on alkanut painua** alas päin (kuva 9). Painuminen on kuitenkin niin hidasta, että 10 vuotta suolauksen lopettamisen jälkeen pitoisuusmaksimi on vajonnut vasta 10 m pinnasta.



Kuva 9. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=20v$ b) $t=30v$

$k = 1,5 \times 10^{-11} \text{ m}$, $K \approx 10^{-4} \text{ m/s}$, $n = 44 \%$, $dh/dx = -0,01$

Suolaus: 20 vuotta
Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätkuun aikana 1 kk:n kuluessa
Simulointijakso: 20 vuotta
Tulokset: Pitkäaikainenkaan suolaus **ei aiheuta painumista** (kuva 10). 10 ja 20 vuoden kuluttua suolauksen aloittamisesta pitoisuusjakaumat ovat samat, ja jakaumissa näkyy selvästi vuodenaikaisvaihtelu pitoisuusmaksimien ollessa yläreunassa ja pitoisuusminimien alareunassa.



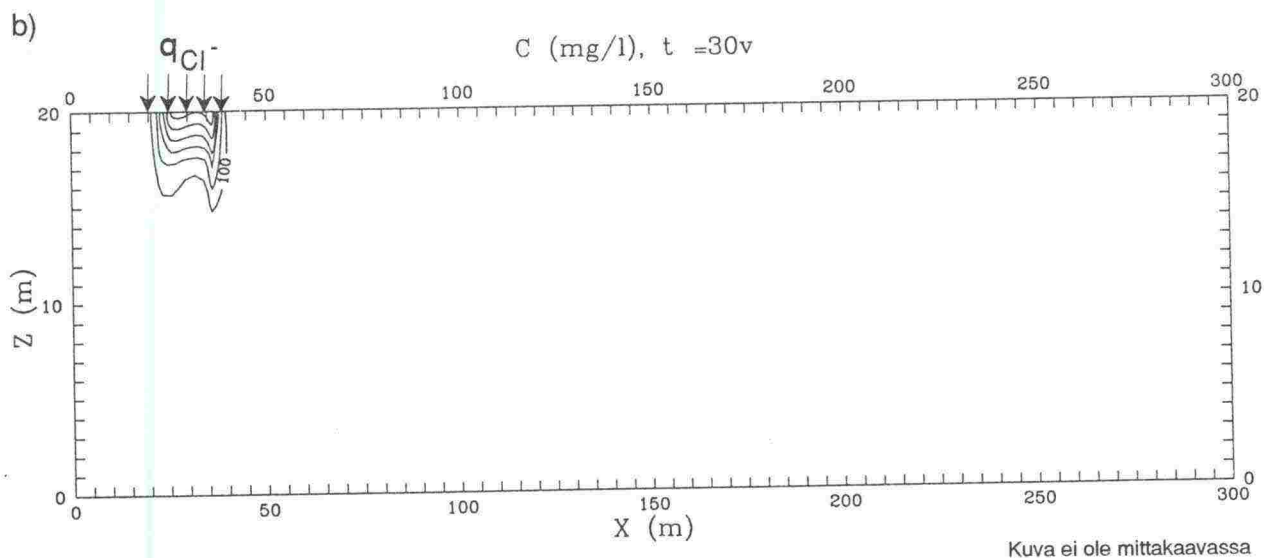
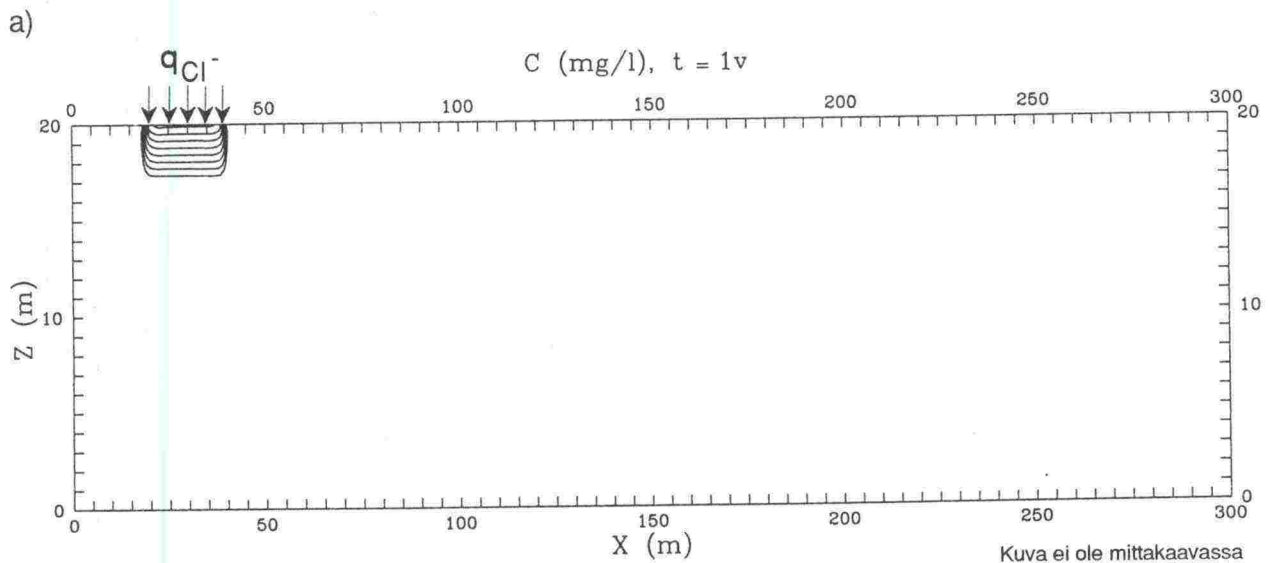
Kuva 10. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=10\text{v}$ b) $t=20$

$$\underline{k = 1,5 \times 10^{-11} \text{ m}, K \approx 10^{-4} \text{ m/s}, n = 44 \%, dh/dx = -0,1}$$

Tätä tapausta ei simuloitu, koska edellisen tapauksen perusteella voidaan päätellä, että **painumista ei tapahdu**.

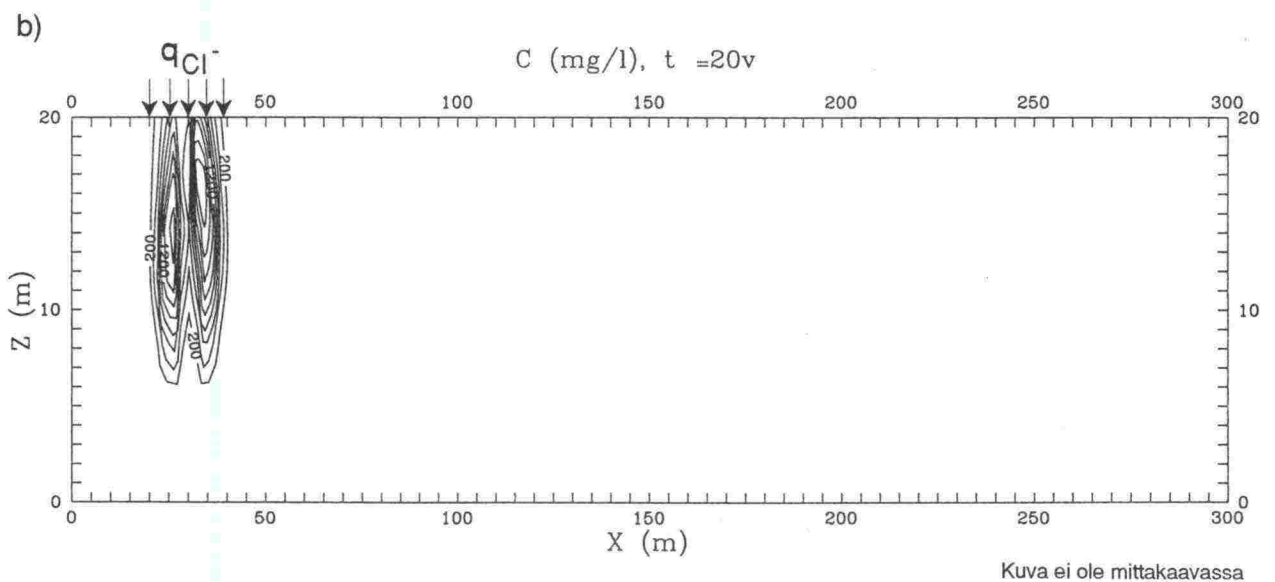
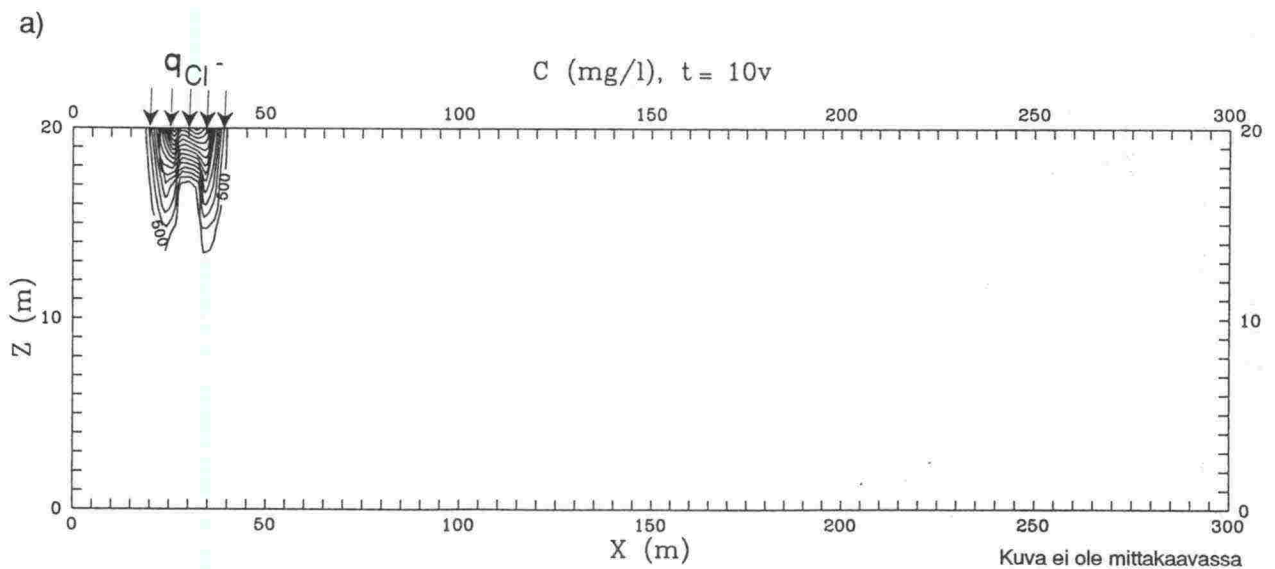
$$\underline{k = 1,5 \times 10^{-12} \text{ m}, K \approx 10^{-5} \text{ m/s}, n = 47 \%, dh/dx = -0,0001}$$

Suolaus: 1 vuosi
 Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 30 vuotta
 Tulokset: 30 vuoden kuluttua suolauksesta pitoisuusmaksimi on edelleen yläreunassa eli **painumista ei ole tapahtunut** (kuva 11).



Kuva 11. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1v$ b) $t=30v$

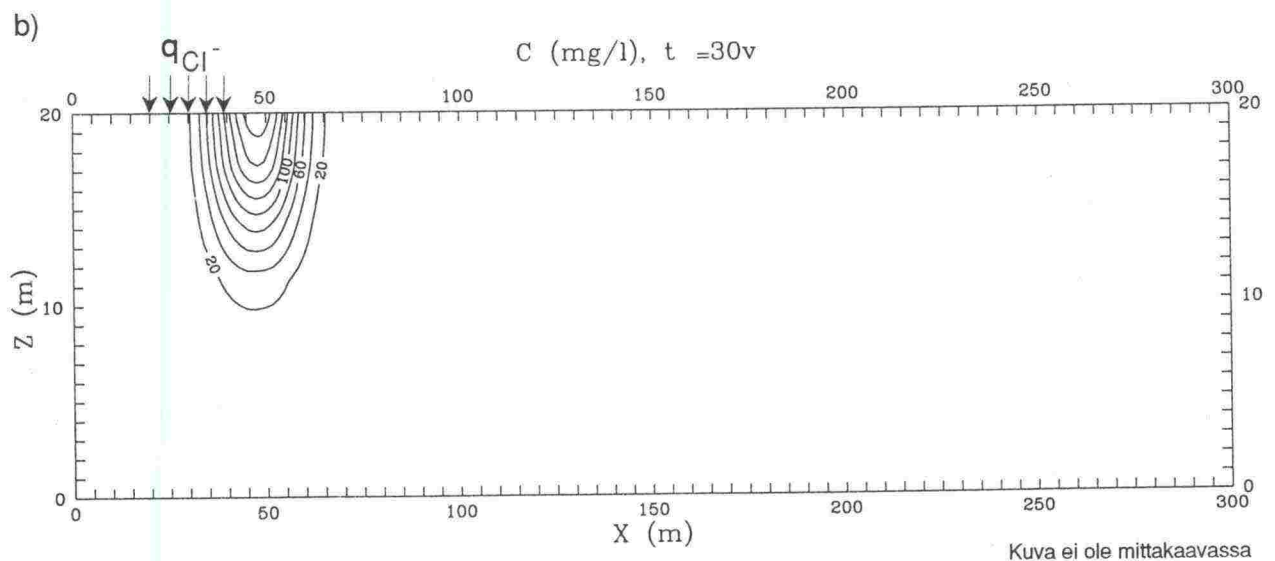
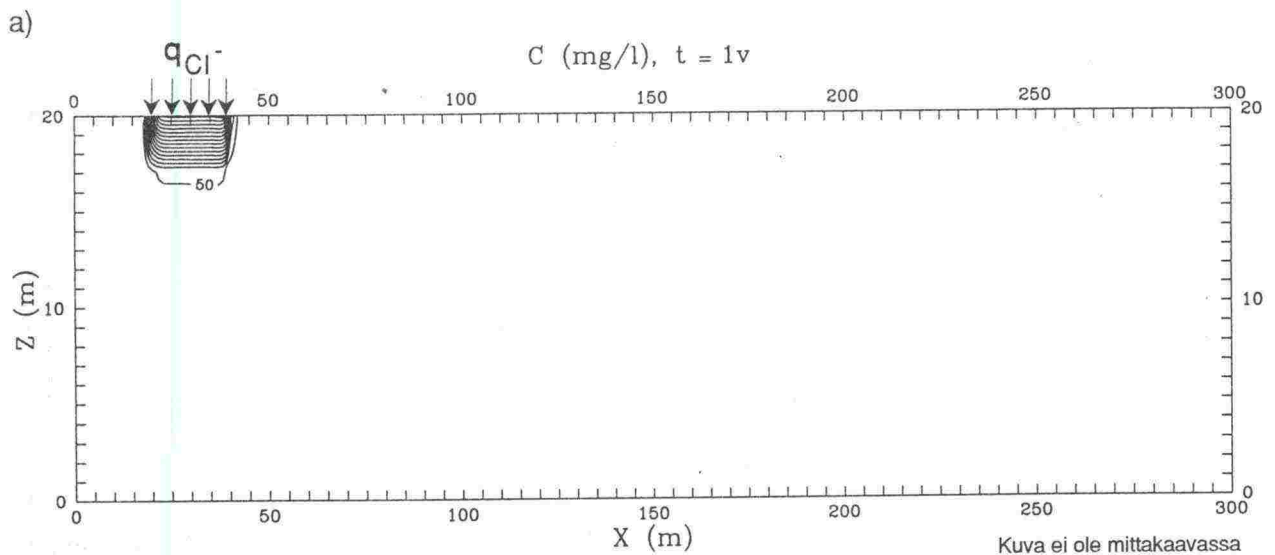
Suolaus: 10 vuotta
 Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätkuun aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 20 vuotta
 Tulokset: 10 vuoden suolaus aiheuttaa suolan kasautumista ja painumista (kuva 12). Painuminen on kuitenkin hyvin hidasta, koska 10 vuotta suolauksen lopettamisen jälkeen pitoisuusmaksimit ovat vajonneet vain muutaman metrin.



Kuva 12. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=10v$ b) $t=20v$

$k = 1,5 \times 10^{-12} \text{ m}$, $K \approx 10^{-5} \text{ m/s}$, $n = 47 \%$, $dh/dx = -0,001$

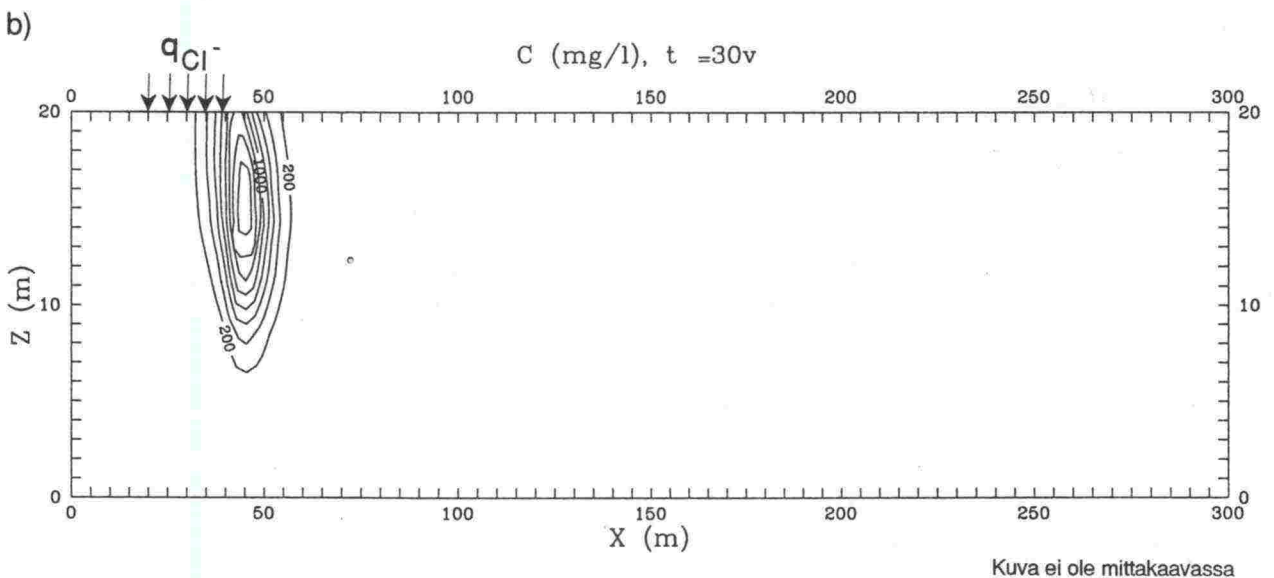
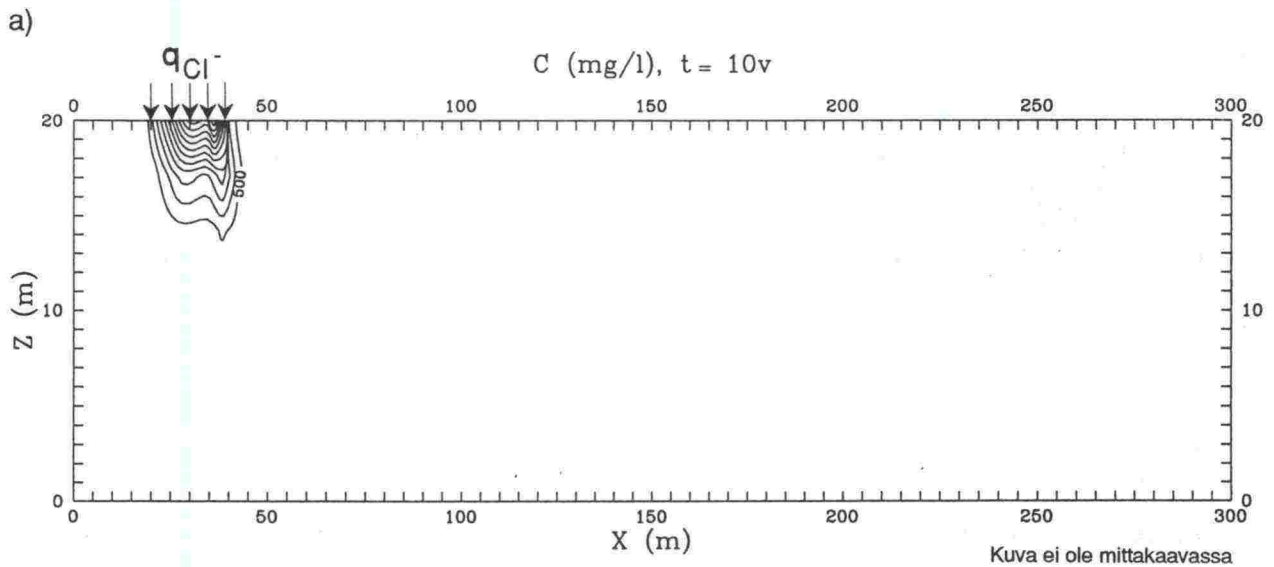
Suolaus: 1 vuosi
 Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 30 vuotta
 Tulokset: Yhden vuoden suolauksen seurauksena **painumista ei tapahdu**, vaan 30 vuoden kuluttua suolauksesta pitoisuusmaksimi on edelleen yläreunassa (kuva 13).



Kuva 13. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1v$ b) $t=30v$

LIITE 2

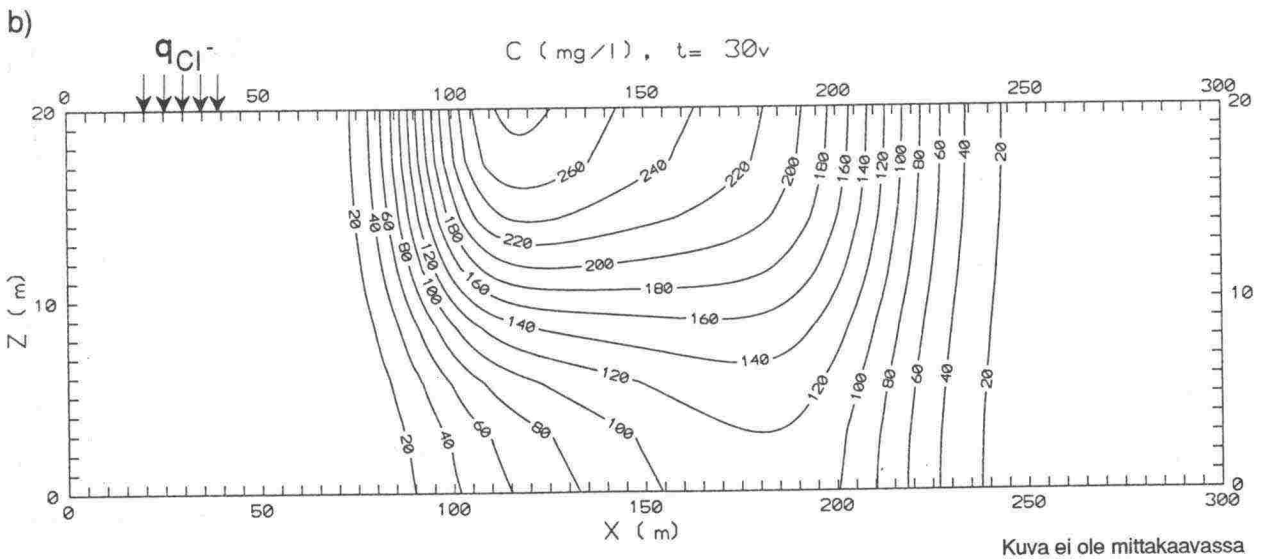
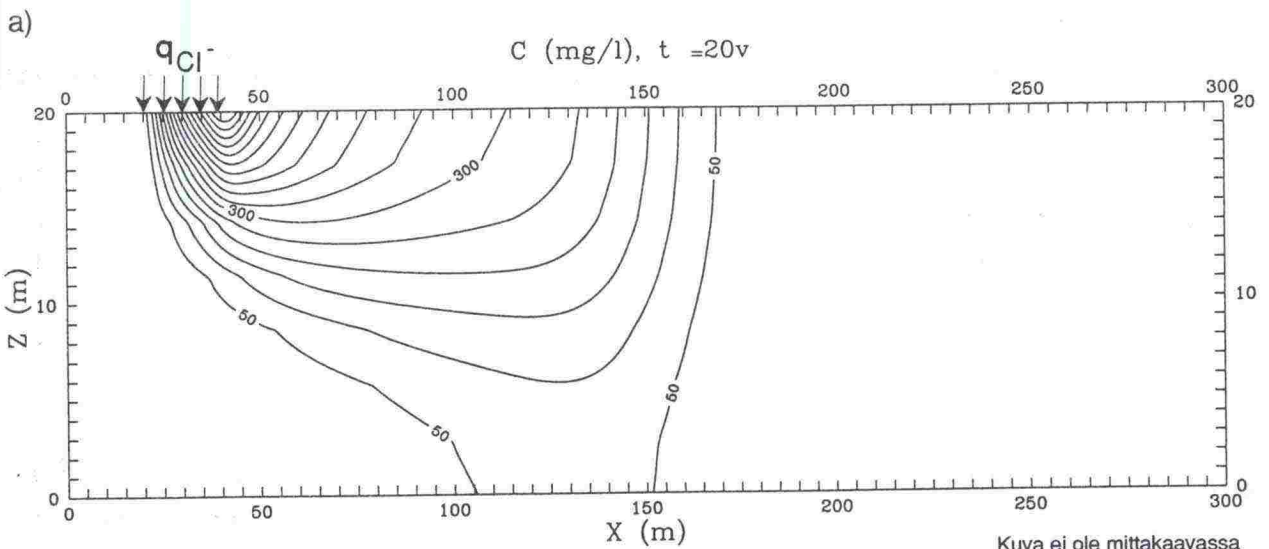
Suolaus: 10 vuotta
 Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätvalun aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 30 vuotta
 Tulokset: 10 vuoden suolauksen ja suolan kasautumisen seurauksena suolapitoinen vesi **alkaa hitaasti vajota** alaspäin (kuva 14). Painuminen on kuitenkin niin hidasta, että 20 vuotta suolauksen lopettamisen jälkeen pitoisuusmaksimi on vajonnut vain muutaman metrin.



Kuva 14. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=10v$ b) $t=30v$

$k = 1,5 \times 10^{-12} \text{ m}$, $K \approx 10^{-5} \text{ m/s}$, $n = 47 \%$, $dh/dx = -0,01$

Suolaus: 20 vuotta
 Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätkuun aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 30 vuotta
 Tulokset: 20 vuodentakaan suolaus ja suolan kasautuminen ei aiheuta painumista, vaan 10 vuotta suolauksen lopettamisen jälkeen pitoisuusmaksimi on edelleen yläreunassa (kuva 15).



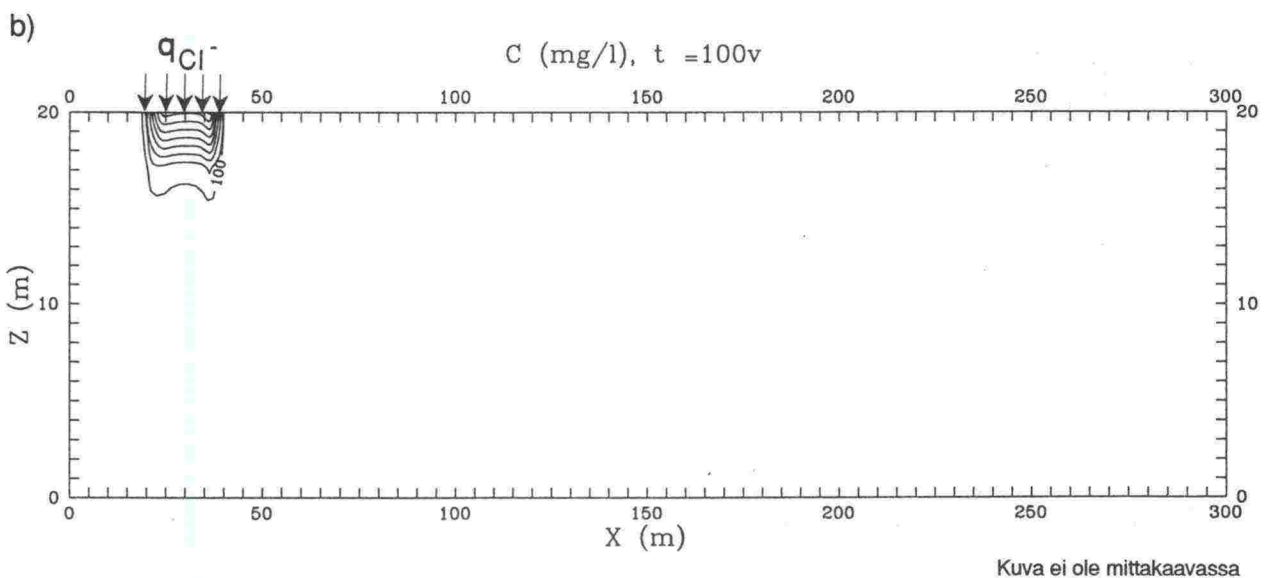
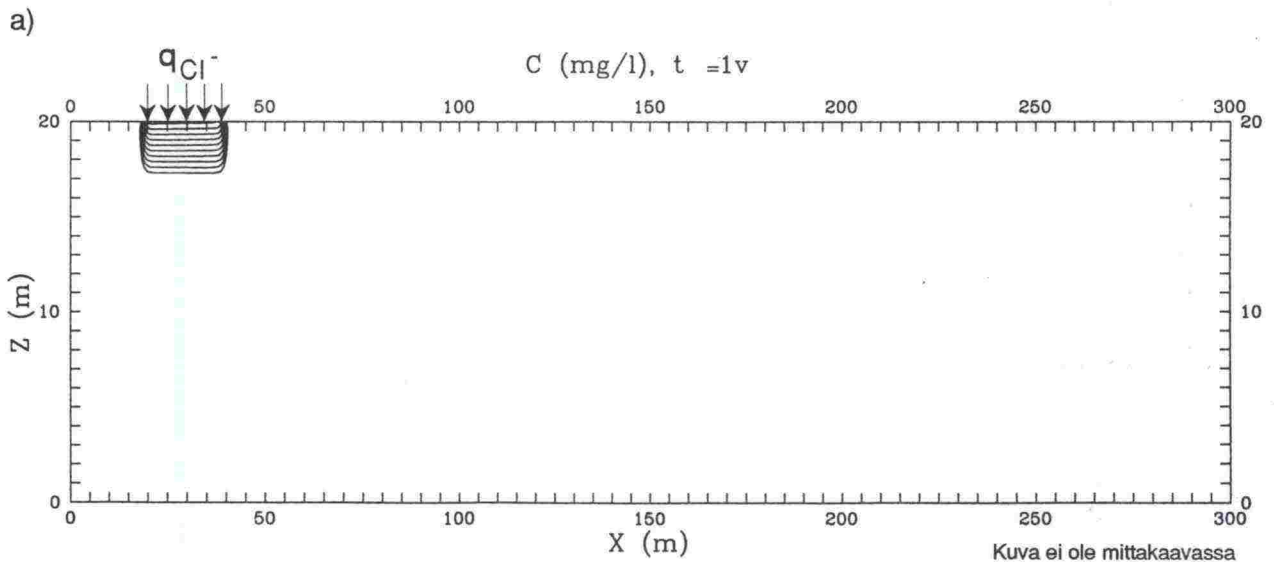
Kuva 15. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=20v$ b) $t=30v$

$$\underline{k = 1,5 \times 10^{-12} \text{ m}, K \approx 10^{-5} \text{ m/s}, n = 47 \%, dh/dx = -0,1}$$

Tätä tapausta ei simuloitu, koska edellisen tapauksen perusteella voidaan päätellä, että **painumista ei tapahdu**.

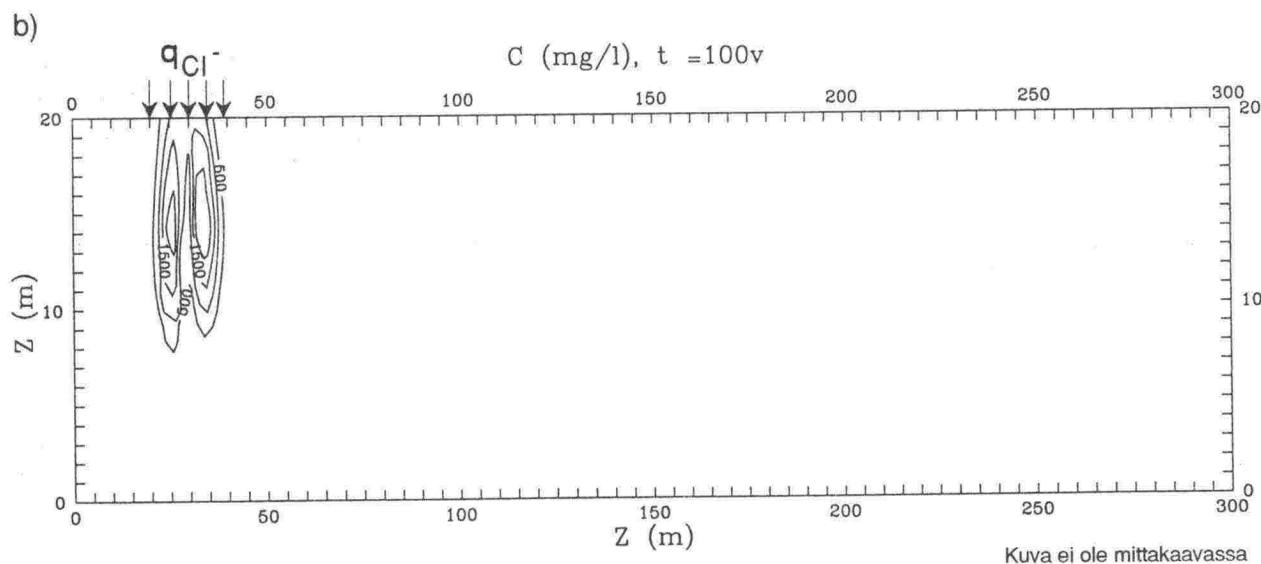
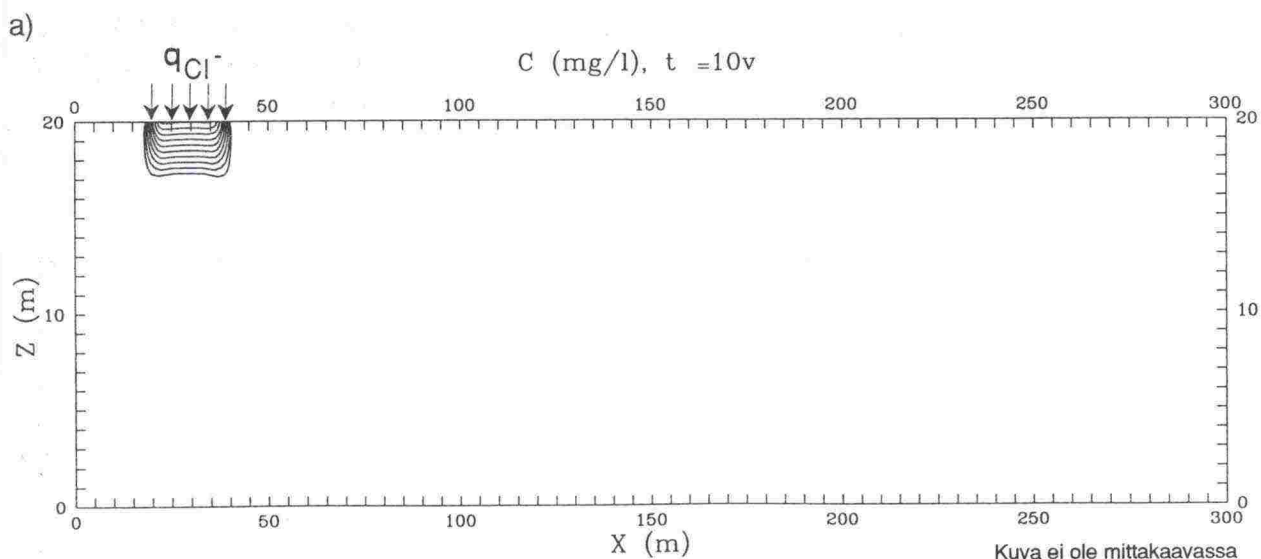
$$\underline{k = 1,5 \times 10^{-13} \text{ m}, K \approx 10^{-6} \text{ m/s}, n = 38 \%, dh/dx = -0,0001}$$

Suolaus: 1 vuosi
 Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 100 vuotta
 Tulokset: Yhden vuoden suolaus **ei aiheuta painumista**, vaan 100 vuoden kuluttua suolauksesta pitoisuusmaksimi on edelleen yläreunassa (kuva 16).



Kuva 16. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=1v$ b) $t=100v$

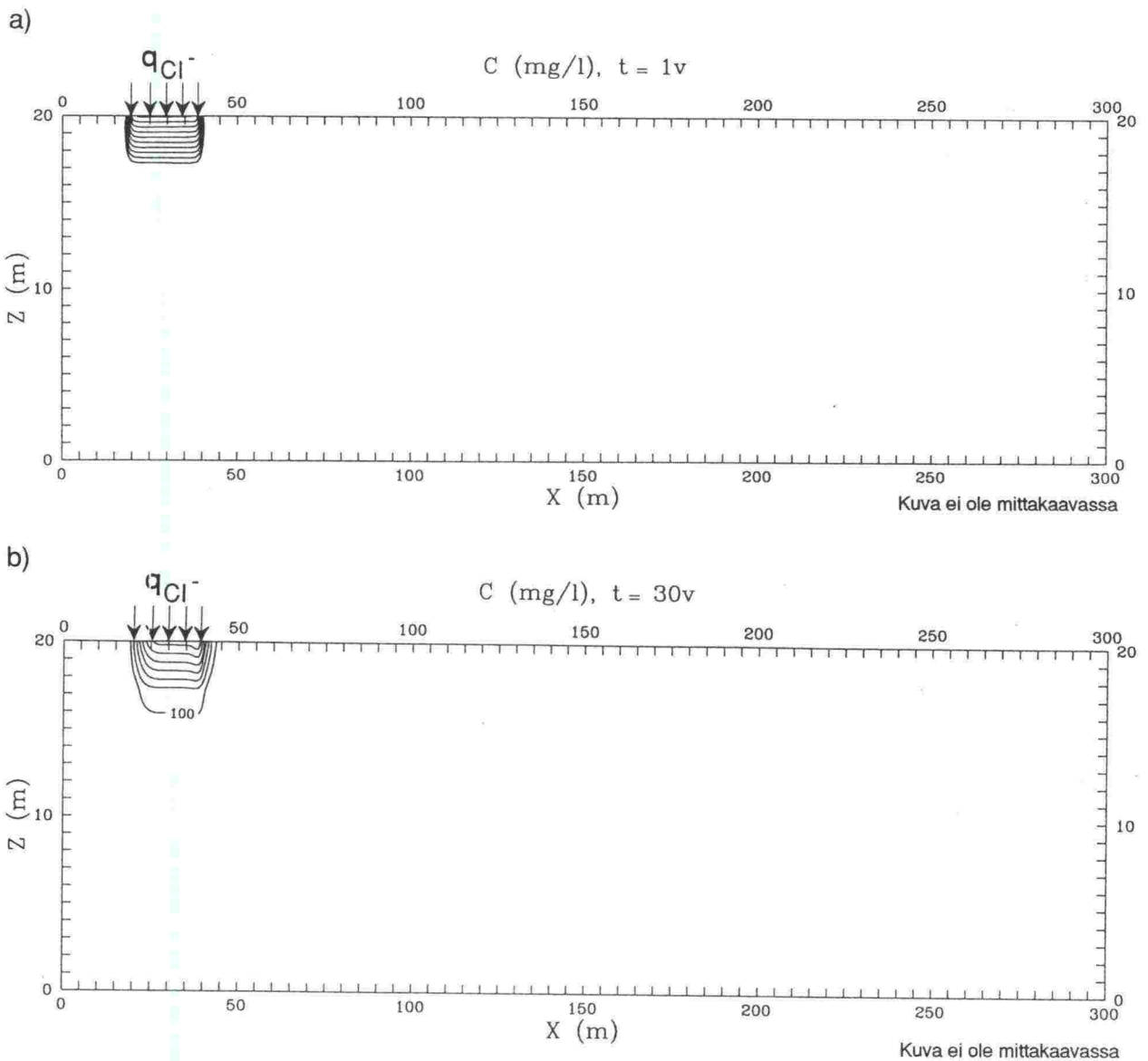
Suolaus: 10 vuotta
 Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätkalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 100 vuotta
 Tulokset: 10 vuoden suolauksen ja suolan kasautumisen seurauksena suolapitoinen vesi **alkaa hyvin hitaasti painua** alaspäin (kuva 17). Painuminen on kuitenkin niin hidasta, että 90 vuotta suolauksen lopettamisen jälkeen pitoisuusmaksimit ovat vajonneet vain muutaman metrin.



Kuva 17. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=10v$ b) $t=100v$

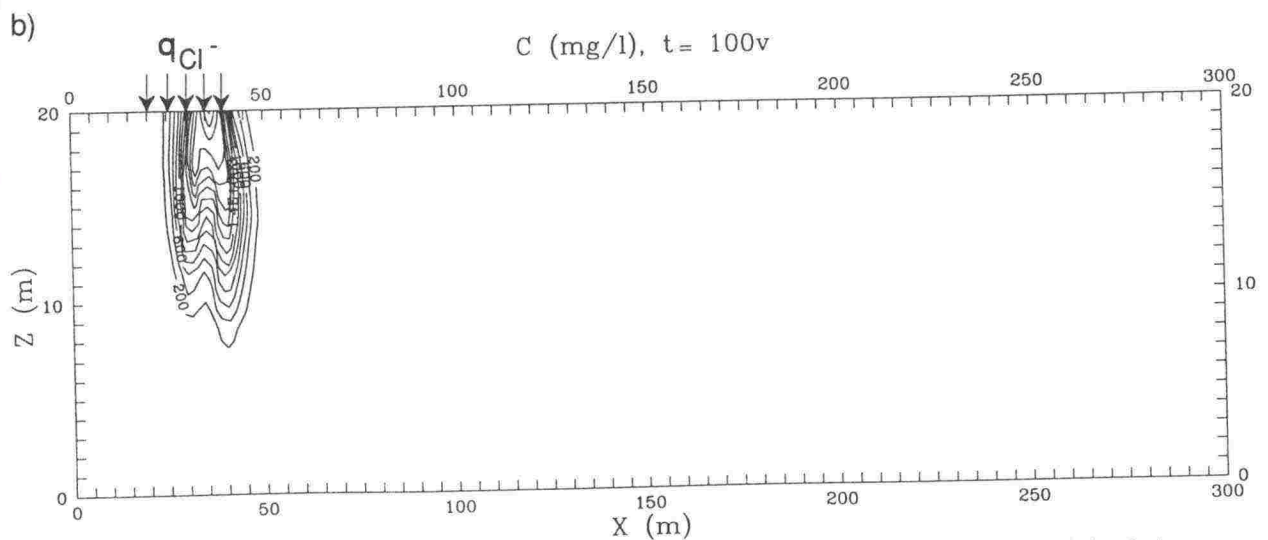
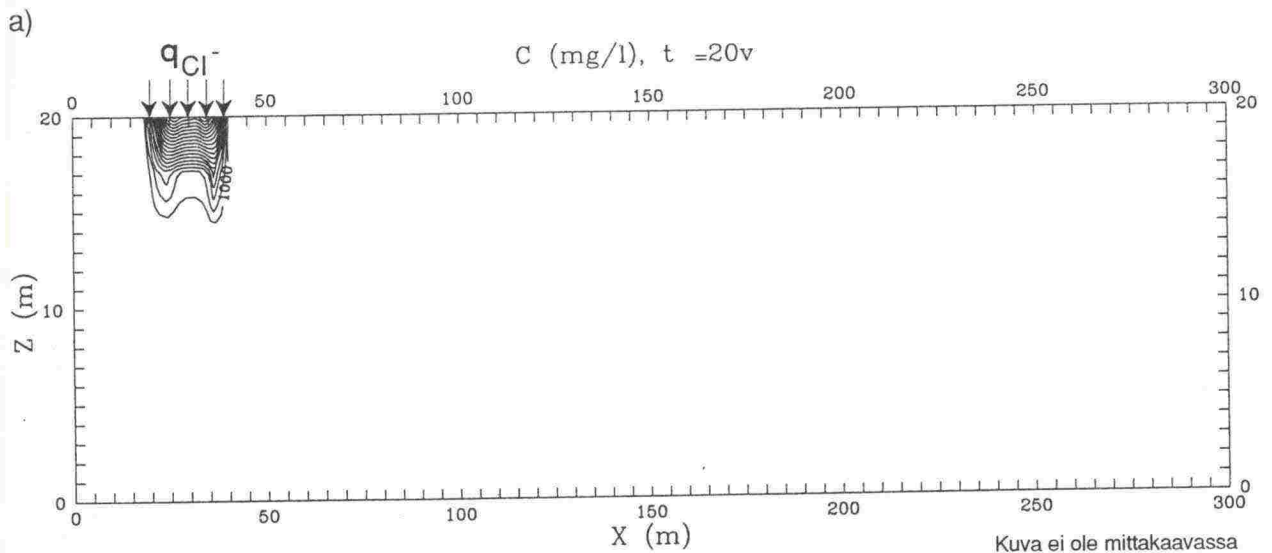
$$k = 1,5 \times 10^{-13} \text{ m}, K \approx 10^{-6} \text{ m/s}, n = 38 \%, dh/dx = -0,001$$

Suolaus: 1 vuosi
 Suolan imeytyminen: Kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 30 vuotta
 Tulokset: Yhden vuoden suolaus **ei aiheuta painumista**,
 vaan 30 vuoden kuluttua pitoisuusmaksimi on edelleen
 yläreunassa (kuva 18).



Kuva 18. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=10v$ b) $t=100v$

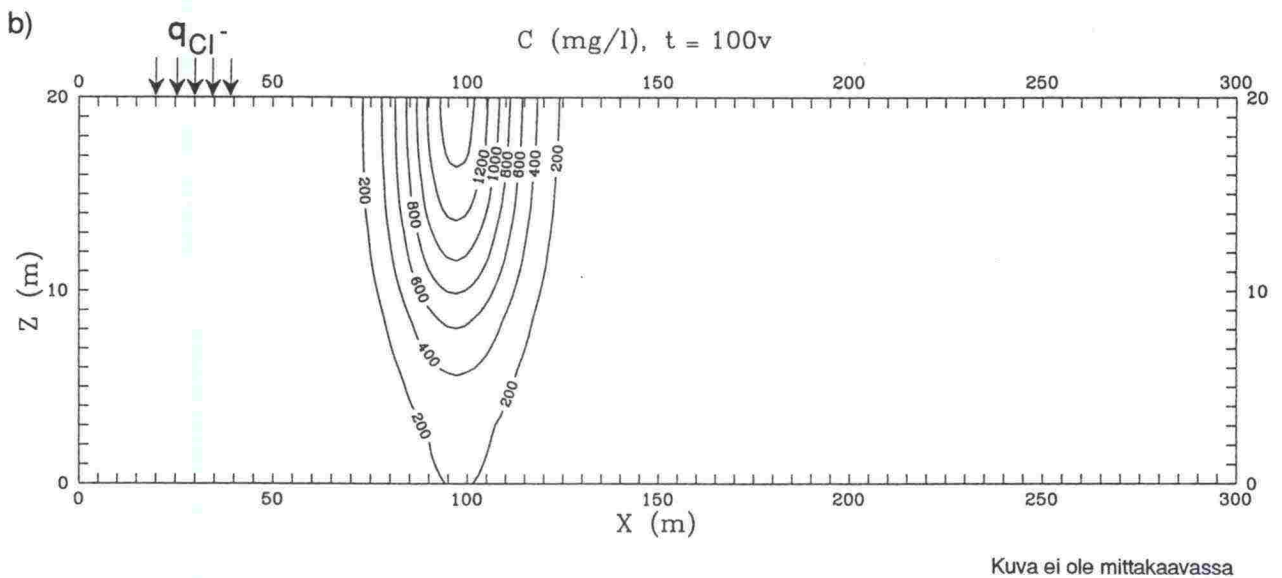
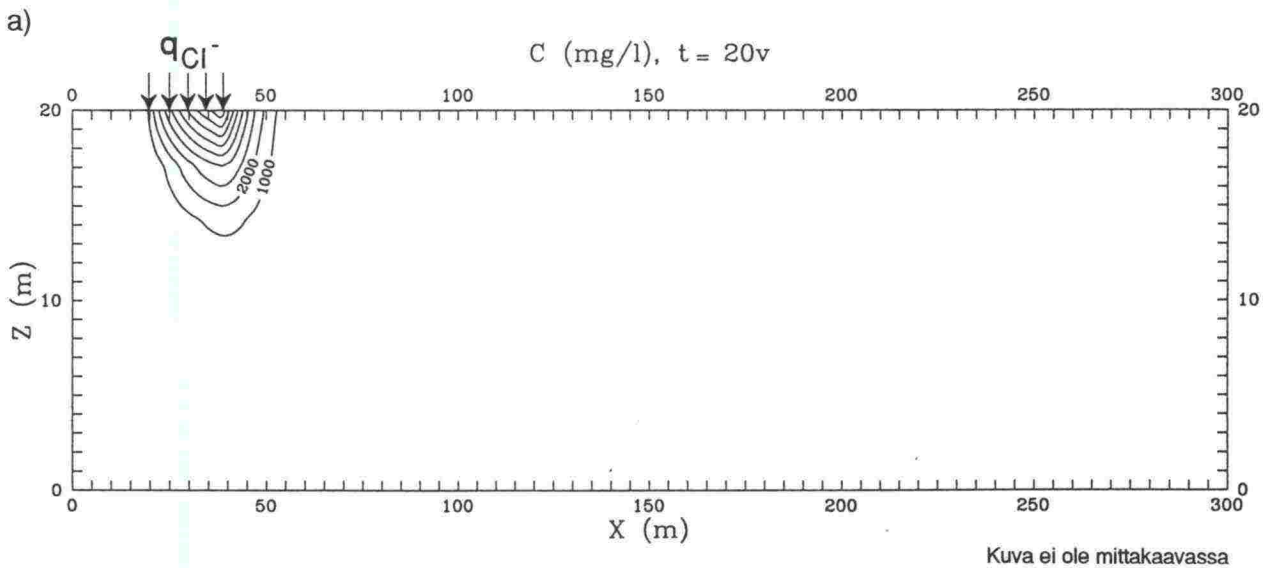
Suolaus: 20 vuotta
 Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
 Simulointijakso: 100 vuotta
 Tulokset: 80 vuoden kuluttua suolauksen lopettamisesta pitoisuusmaksimi on edelleen yläreunassa (kuva 19). Jakauman muoto viittaa kuitenkin painumiseen, joten **painumisen mahdollisuutta** pitkäaikaisen suolauksen seurauksena **ei voida täysin sulkea pois.**



Kuva 19. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma hetkellä a) $t=20v$ b) $t=100v$

$k = 1,5 \times 10^{-13} \text{ m}$, $K \approx 10^{-6} \text{ m/s}$, $n = 38 \%$, $dh/dx = -0,01$

Suolaus: 20 vuotta
Suolan imeytyminen: Joka vuosi kevätvalunnan aikana 1 kk:n kuluessa
Simulointijakso: 100 vuotta
Tulokset: 20 vuoden suolaus ja suolan kasautuminen **ei ole aiheuttanut painumista**, vaan 80 vuotta suolauksen lopettamisen jälkeen pitoisuusmaksimi on edelleen yläreunassa (kuva 20).



Kuva 20. Simuloitu kloridipitoisuusjakauma virtauksen suuntaisessa poikkileikkauksessa hetkellä a) $t=20v$ b) $t=100v$

$k = 1,5 \times 10^{-13} \text{ m}$, $K \approx 10^{-6} \text{ m/s}$, $n = 38 \%$, $dh/dx = -0,1$

Tätä tapausta ei simuloitu, koska edellisen tapauksen perusteella voidaan päätellä, että **painumista ei tapahdu**.

HARJUNHELMA-ALUE: Simuloinneissa käytetyt harjuveden ja suolaa sisältävän sadeveden kemialliset koostumukset

Sadevesi + suola:

Alkuaine	Pitoisuus(mg/l)
Na	20000,00
K	0,50
Ca	0,50
Mg	0,20
N	0,10
Cl	20000,00
S	2,00
Fe	0,02
Al	0,02
Sr	0,02

Harjuvesi:

Alkuaine	Pitoisuus(mg/l)
Na	0,50
K	0,50
Ca	8,00
Mg	3,00
N	1,50
Cl	7,50
S	7,00
Fe	0,50
Al	0,02
Sr	10,00

JOUTSENONKANGAS: Simuloinneissa käytetyt pohjaveden ja suolaa sisältävän sadeveden kemialliset koostumukset

Sadevesi + suola:

Alkuaine	Pitoisuus(mg/l)
Na	4600,00
K	0,50
Ca	0,50
Mg	0,20
N	0,10
Cl	7000,00
S	2,00
Fe	0,02
Al	0,02
Sr	0,02

Harjuvesi:

Alkuaine	Pitoisuus(mg/l)
Na	0,50
K	0,50
Ca	8,00
Mg	3,00
N	1,50
Cl	1,00
S	7,00
Fe	0,50
Al	0,02
Sr	10,00

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 41/1993 Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 42/1993 Tieliikennemelun mittaaminen; Opas. TIEL 3200167
- 43/1993 Asfaltti- ja murskausasemien melun leviäminen. TIEL 3200168
- 44/1993 Auton polttoaineenkulutuksen joustot eri väestöryhmissä; esitutkimus. TIEL 3200169.
- 45/1993 Talvirengastutkimus; Talvirenkaiden käyttö ja kunto sekä kuljettajien arviot talvirenkaistaan talvikaudella 1992-93. TIEL 3200170
- 46/1993 Tieympäristön pehmentämisen turvallisuusvaikutukset. TIEL 3200171
- 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
- 48/1993 Tietullit ja käyttömaksut; Asennoituminen tie- ja automaksuihin. TIEL 3200173
- 49/1993 Tiesuolaus ja pohjavedet; nykytilan selvitys. TIEL 3200174
- 50/1993 Ympäristöpainotteinen taajamatie Ylistarossa; Yleissuunnittelun arviointi. TIEL 3200175
- 51/1993 Liikenteen informaatiopalvelujen käyttötutkimus. TIEL 3200176
- 52/1993 Road Condition Measurement and Pavement Management in Finland. TIEL 3200177E
- 53/1993 Pikavuorojen reitti-, liityntäliikenne- ja pysäkkijärjestelyjen kehittämminen. TIEL 3200178
- 54/1993 Pietarsaaren keskustauudistus; Saavutettavuuden ja vähittäiskaupan analyysi. TIEL 3200179
- 55/1993 Valtatie 3, vuoropuhelun arviointi. TIEL 3200180
- 56/1993 Betonipäällysteen valinta ja talous. TIEL 3200181
- 57/1993 Rakennuttamiskulttuuri; I - vaiheen raportti. TIEL 3200182
- 58/1993 Henkilöliikennetutkimus 1992. TIEL 3200183
- 59/1993 Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P-Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vartailu standardi paripyörä-Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 61/1993 Ylistaron keskustateiden suunnittelu asukkaiden näkökulmasta. TIEL 3200186
- 62/1993 Teknologian siirto; Yhteystiedot lähialueyhteistyössä. TIEL 3200187
- 63/1993 Nastallisten ja nastattomien talvirenkaiden pitotutkimus. TIEL 3200188
- 64/1993 Pellon kuivatus tien kohdalla. TIEL 3200189