

1 Pitkittäisharju matalan veden tyyppi ympäristöön purkava

Sirkku Tuominen

sirkku.tuominen@syke.fi

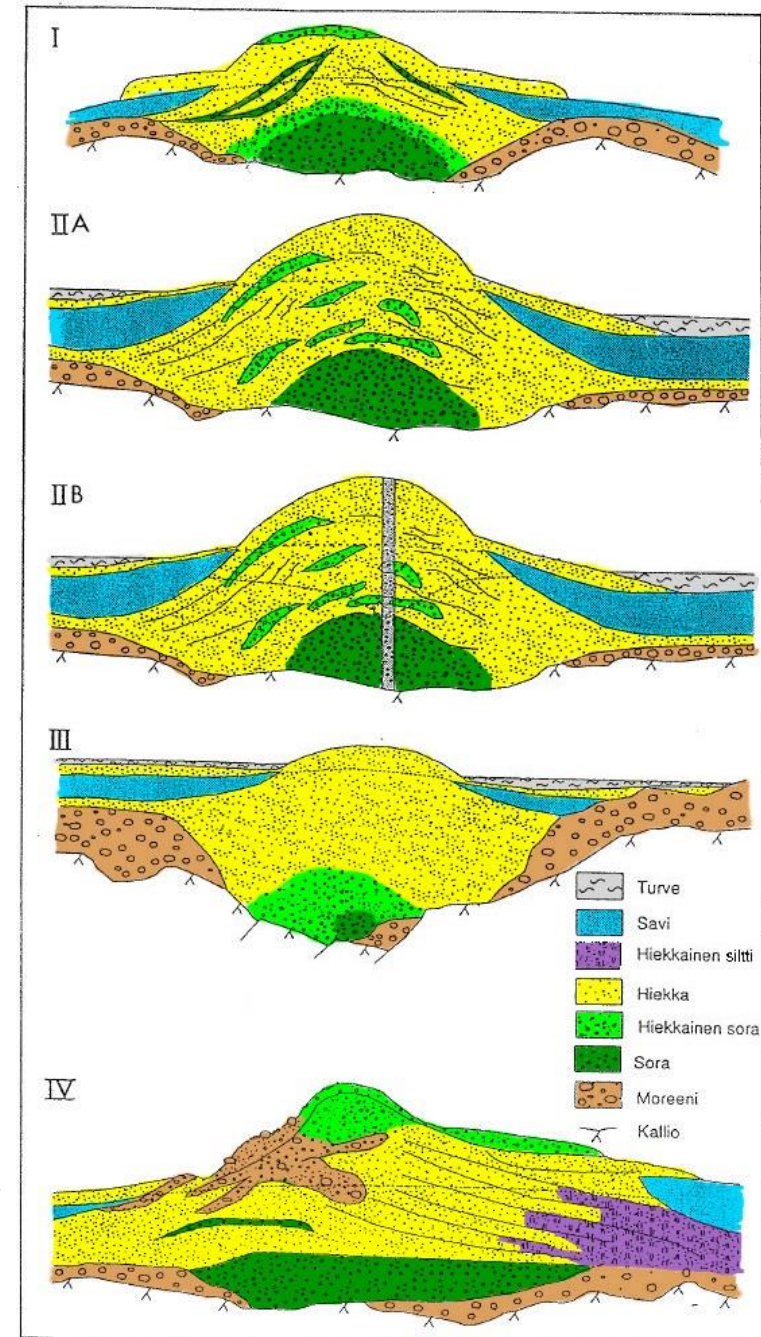
22.12.2020

Taulukko 1. Tarkasteluun otetut pohjavesimuodostumatyyppit, niille määritellyt mediaanikoot ja pienimmät mahdolliset koot.

	mediaani	pienin koko
I Pitkittäisharju		
matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava	$l = 350 \text{ m}$ $b = 15\text{-}20 \text{ m}$ $L = 3 \text{ km}$	
IIA Pitkittäisharju		
syvän veden tyyppi ympäristöön purkava	$l = 350 \text{ m}$ $b = 15\text{-}20 \text{ m}$ $L = 3 \text{ km}$	$l = 90 \text{ m}$ $b = 10\text{-}15 \text{ m}$ $L = 1 \text{ km}$
IIB Pitkittäisharju		
syvän veden tyyppi ympäristöstään keräävä	$l = 350 \text{ m}$ $b = 20\text{-}25 \text{ m}$ $L = 3 \text{ km}$	
III Pitkittäisharju		
Pohjanmaan tyyppi	$l = 400 \text{ m}$ $b = 15\text{-}20 \text{ m}$ $L = 3 \text{ km}$	
IV Reunamuodostuma		
Salpausselkätyyppinen	$*l = 800 \text{ m}$ $b = 30 \text{ m}$ $L = 4 \text{ km}$	



Kuva 2. Tyypimuodostuminen suuntaa-antavat esiintymisalueet. I ja II=matalan ja syvän veden tyyppin pitkittäisharjut, III=Pohjanmaan tyyppin pitkittäisharjut, IV=Salpausselkätyyppiset reunamuodostumat.



l = muodostumisalueen leveys

L = muodostumisalueen pituus

b = pohjavesikerroksen maksimipaksuus

* l = koko muodostuman leveys (tehokkaan muodostumisalueen leveys =

$0.8 \times l$)

Hänninen ym. 1994 Tiesuolauksen vaikutus tärkeillä pohjavesialueilla – tilastollinen tarkastelu

1 Pitkittäisharju

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava

Matalaan veteen kerrostuneissa harjuissa (tyyppi 1) on suhteellisen kapea, jyrkkärinteinen ja peräkkäisten harjukuoppien reunustama ydinselänne sekä laakea deltamainen lieveosa.

Kerrokset ovat yleensä lähes vaaka-asentoisia. Selänteet ja niiden sivuilla olevat muodostumat ovat usein kerrostuneet silloiseen vedenpinnan tasoon.

Hänninen ym. 1994 Tiesuolauksen vaikutus tärkeillä pohjavesialueilla – tilastollinen tarkastelu

1 Pitkittäisharju

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava

Maastossa havaittava rakenne: Harjutyyppi koostuu yleensä kahdesta selvästi toisistaan erottuvasta osasta: suhteellisen kapeasta ydinselänteestä ja laakeasta deltamaisesta lieveosasta. Ydinselännettä reunustavat jyrkkäpiirteiset jäätikön kontaktirinteet, peräkkäiset harjukuopat ja -lammet. Harjukuopat erottavat selänteet ja lieveosaan kuuluvat deltat toisistaan. Selänteet muodostavat verrattain kapeita, karttakuvassa nauhamaisina näkyviä juotteja, jotka etenkin tasaisella kallioalustalla jatkuvat jopa kymmeniä kilometrejä (Niemelä 1979). Selänteet ovat usein pituussuunnassa hyvin tasainen riippumatta ympäröivän maaston korkeussuhteista. Muodostumat ovat yleensä kerrostuneet kallioalustalle, mutta joissain tapauksissa kerrostuminen on tapahtunut joko osittain tai kokonaan moreenipohjalle (Lundqvist 1979).

Pohjavedenpinnan alapuolinen rakenne: Havaintojen mukaan muodostumatyyppin sisältämä sora ja murskauskelpoinen aines (kivet) sijoittuu lähes aina selänteisiin eli harjun keskiosaan, kun taas deltamaiset harjun lieveosat ovat tyypillisesti ainekseltaan hiekkää. Eri lajitteista koostuville kerroksille on ominaista jatkuva selänteiden pituussuunnassa erityisesti silloin, kun harju sijaitsee tasaisella kallioalustalla. Sorapitoisuuden vaihtelu harjun pituussuunnassa on tällöin vähäistä (Niemelä 1979, Pönkkä 1981).

Selänteiden poikkileikkauksissa sorasta, kivistä ja hiekasta koostuvat kerrokset ovat joissakin tapauksissa lähes vaaka-asentoisia. Sama kerroksellisuus on tällöin nähtävissä myös pituusleikkauksissa (Lundqvist 1979). Usein kerrokset ovat osittain kuluneita ja uudelleenkerrostuneita, minkä johdosta kerrosten paksuus ja rae-koostumus vaihtelee epäsäännöllisesti aiheuttaen huomattavia virtausnopeuden vaihteluja eri kerrosten välillä (Mälkki 1972, 1979, Lundqvist 1979).

Pohjaveden virtauskuva: Pohjavesimuodostuma eli akviferi, joka purkaa pohjavettä ympäristöönsä on tyypiltään antikliininen. Tällöin pohjaveden pinta on itse muodostumassa korkeammalla kuin sen ympäristössä (Mälkki 1972). Antikliininen virtauskuva on sitä voimakkaampi mitä suurempi muodostuma on kyseessä ja mitä enemmän se sisältää hienorakeista maa-ainesta. Koska pohjaveden pinta on kupe-
ran muotoinen itse muodostuman alueella, pohjavesi virtaa kohti harjun reunoja. Päävirtaussuunta on kuitenkin tyypillisesti harjun pitkittäisakselin suunnassa johtuen kerroksellisesta rakenteesta (Hatva 1989, Wihuri 1975, Mälkki 1972).

Mallinnettu tyypimuodostuma purkaa pohjavettä ympäristöönsä sekä suotamalla että lähteiden kautta.

Niemi ym. 1994 Tiesuolauksen pohjavesivaikutusten simulointi tyypimuodostumissa

Hatva, T. 1989. Iron and manganese in groundwater in Finland: Occurrence in glaciofluvial aquifers and removal by biofiltration. Publications of the Water and Environment Research Institute 4. National Board of Waters and the Environment, Helsinki. 99 s.

Lundqvist, J. 1979. Morphogenetic classification of glaciofluvial deposits. Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C NR 767. Uppsala. 72 s.

Mälkki, E. 1972. Hydrogeologia. Teoksessa Kauranne, L. K., Garde-meister, R., Korpela, K.,

Mälkki, E. 1979. Ground-water flow velocity as an indicator of the permeability and internal structure of eskers. Vesientutkimuslaitoksen julkaisu 32. Vesihallitus, Helsinki. 42 s.

Niemelä, J. 1979. Suomen sora- ja hiekkavarojen arviointiprojekti 1971-78. Geologian tutkimuslaitos, Tutkimusraportti N:o 42, Espoo. 119 s.

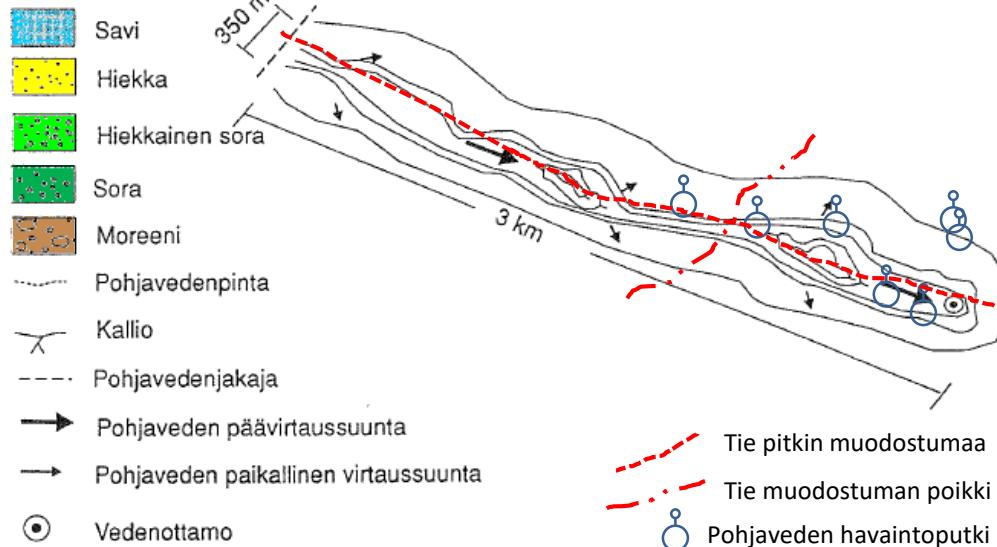
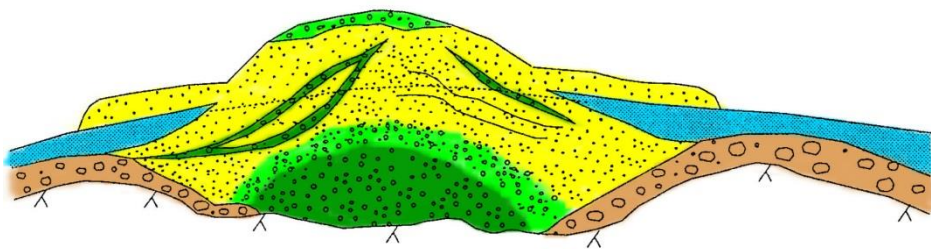
Pönkkä, L. 1981. Suomen eteläpuoliskon glaciofluviaaliset muodostumat pohjavesiesiintyminä. Helsingin yliopisto, Helsinki. 44 s.

Wihuri, H. 1975. Pohjavesigeologia. INSKO Julkaisu 125-75, Pohjavesien hyväksikäyttö ja suojele, Helsinki. 24 s.

Tilastolliseen tarkasteluun perustuva muodostuman kuvaus

I PITKITTÄISHARJU, matalan veden tyyppi ympäristöön purkava

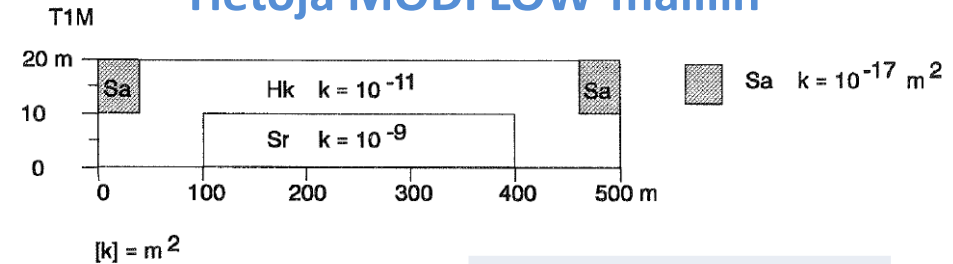
- suhteellisen kapea ydinselänne, jopa kymmeniä km pitkä
- laakea deltamainen lieveosa
- jyrkät jäätikön kontaktirinteet
- peräkkäiset harjukuopat ja -lammet
- harjukuopat erottavat selänteet ja lieveosat toisistaan
- sora ja kivet lähes aina selänteessä
- liepeet hiekkaa
- kerroksille ominaista jatkuvuus selänteen pituussuunnassa
- tyyppillinen Sisä-Suomessa



1 Pitkittäisharju

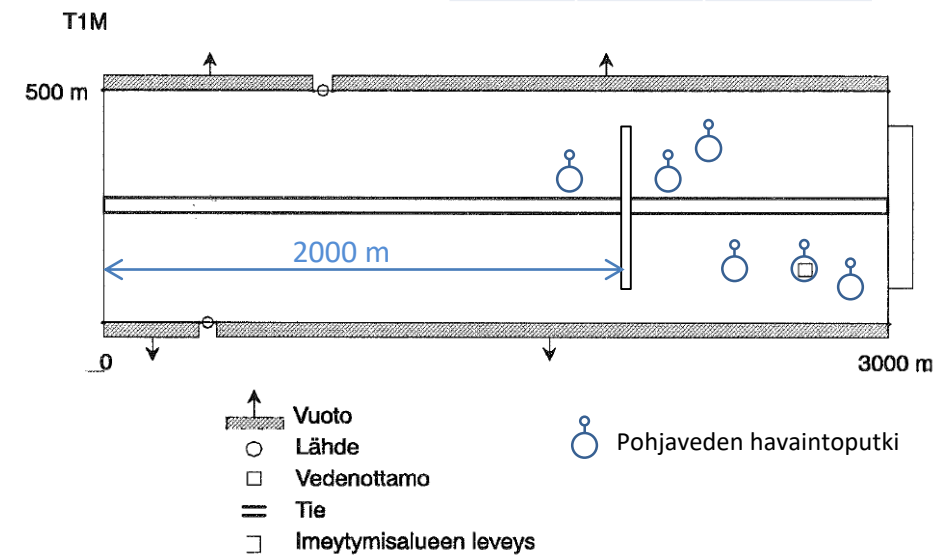
matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava
HST3D-ohjelmalla tehdyn mallin kuvaus

Tietoja MODFLOW-malliin



Vedenjohtavuuden muunnos

maalaji	HST3D k [m ²]	MODFLOW K [m/s]
Sa	1.00E-17	1.10E-10
Hk	1.00E-11	1.10E-04
Sr	1.0E-09	1.10E-02



HST3D-ohjelmalla tehdyn mallin reunaehdot

	T1M
Dimensiot x, (m)	3000
y, (m)	500
z, (m)	20
Imeytymisalue, (m) (leveys)	360
Antoisuus, (m ³ /d)	1188
Veden otto, (%) $\approx 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$	90/1 ottamo
Tausta Cl-pit, (mg/l)	2,8
Dispersiivisyys, α_1, α_t	75, 15
Solmupisteet (n_x, n_y, n_z)	101 x 26 x 3
Virtaama ulos muodostumasta (vakio-h/vuoto-reunojen kautta) ¹⁾	6,6%/3,4%
Gredientti tien kohdalla ¹⁾	0,00015

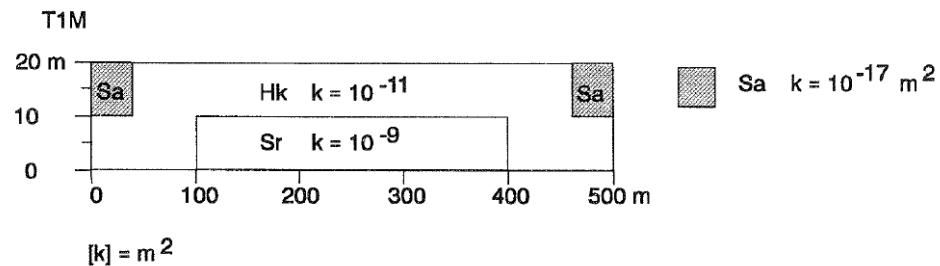
¹⁾ Mallilla laskettu arvo

1 Pitkittäisharju

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava

HST3D-ohjelmalla tehdyn mallin kuvaus

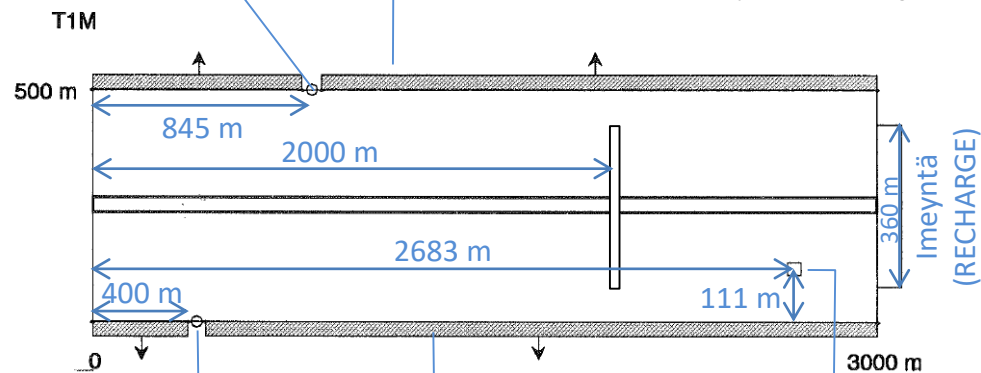
Tietoja MODFLOW-malliin



Lähde: Pysyvä pohjavedenpinta (ConstHead) 15.45 m

Vuoto ulos mallista, toteutus virtuaalisina kaivoina (Well), $-3.9\text{E}-8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{juoksumetri}$

- ↑ Vuoto
- Lähde
- Vedenottamo
- Tie
- ▭ Imeytymisalueen leveys



Lähde: Pysyvä pohjavedenpinta (ConstHead) 15.45 m

Vuoto ulos mallista, toteutus virtuaalisina kaivoina (Well), $-3.9\text{E}-8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{juoksumetri}$

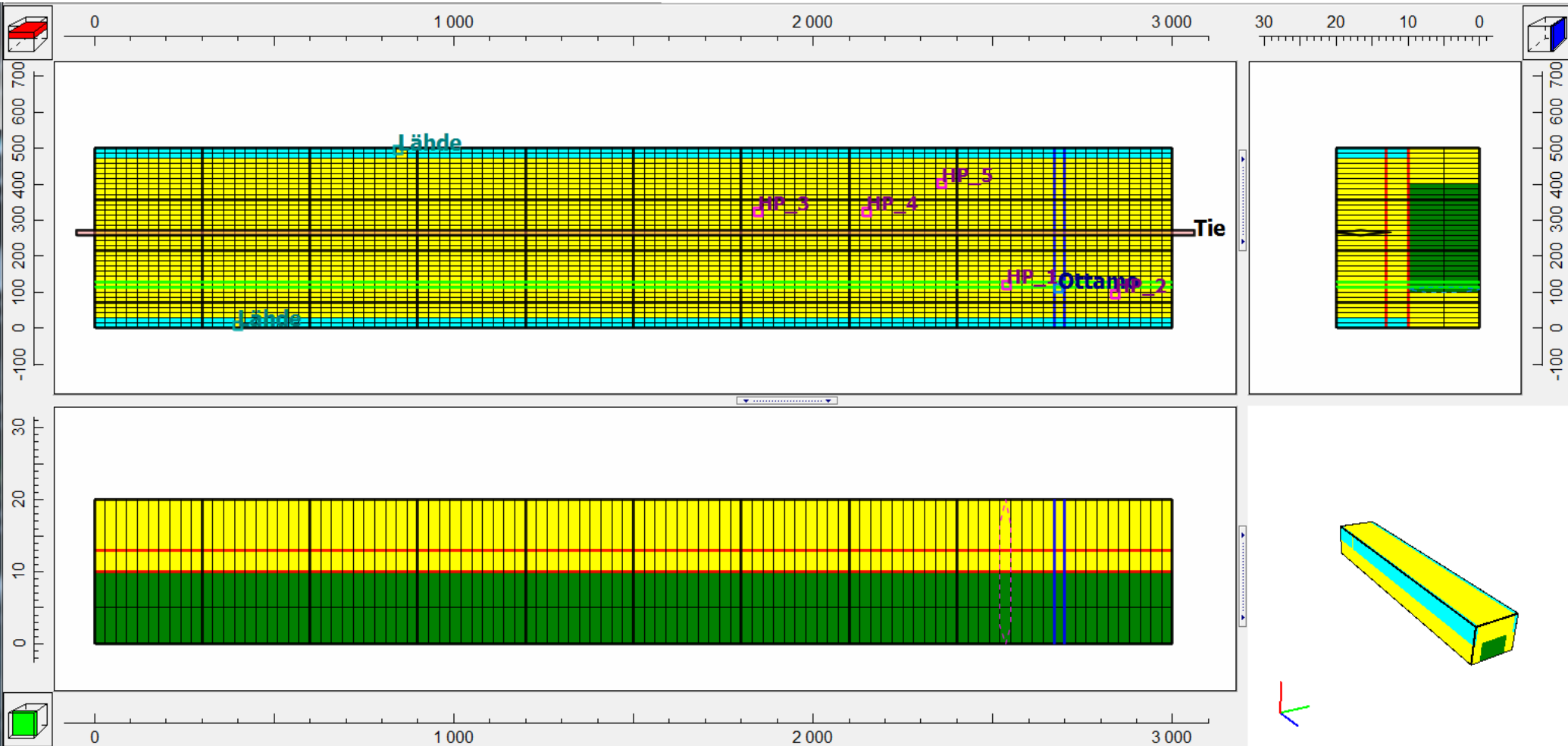
Kaivo (Well) $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$

1 Pitkittäisharju

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava

ModelMuse-näkymä MODFLOW-malliin

maalaji	K [m/s]
Sa	1.10E-10
Hk	1.10E-04
Sr	1.10E-02



Z-suunta esitetty 20-kertaisena verrattuna x- ja y-suuntaan

Mallien laskemat pohjavedenpinnan korkeudet

1 Pitkittäisharju

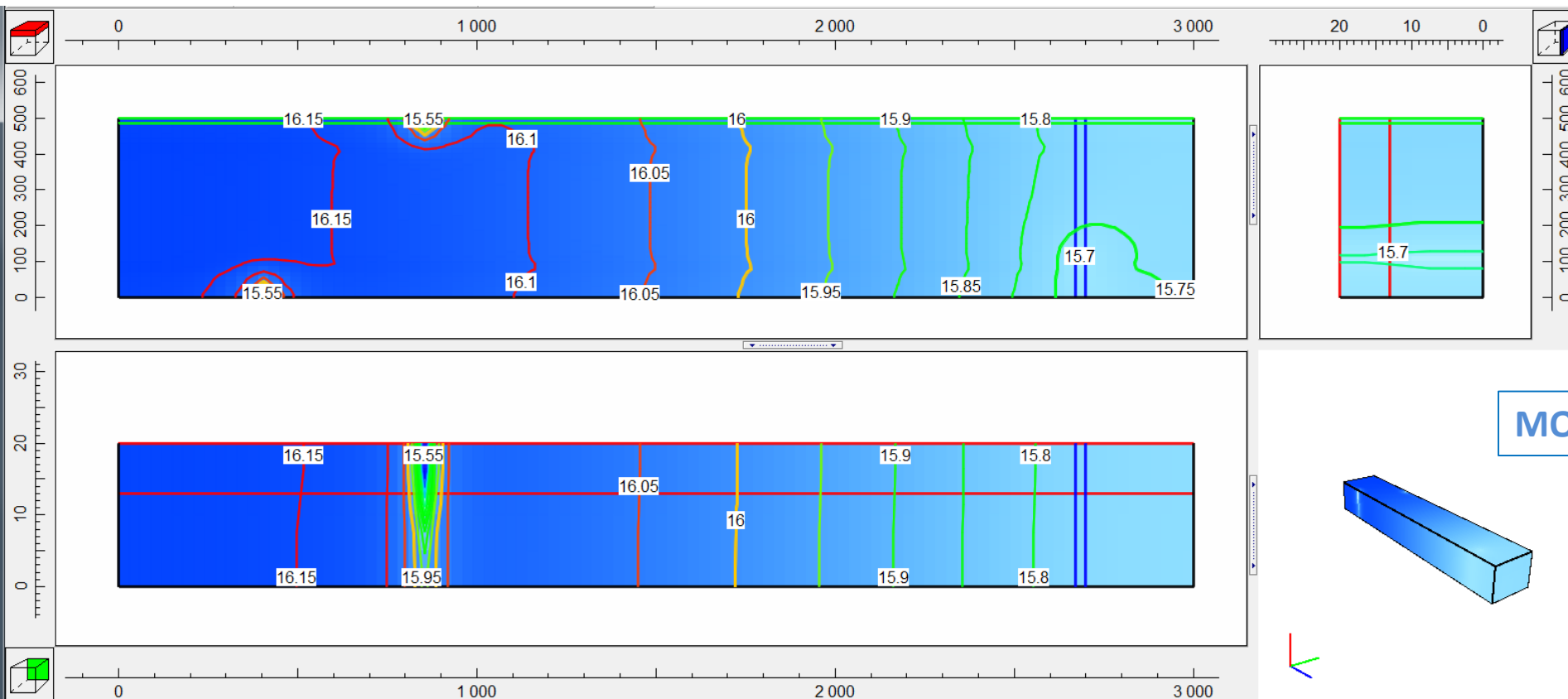
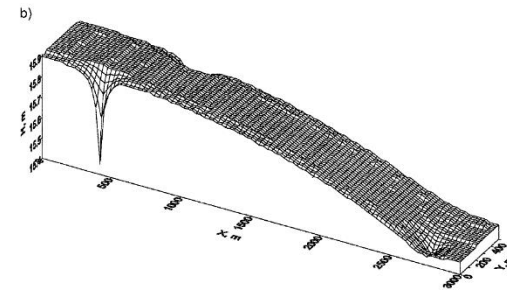
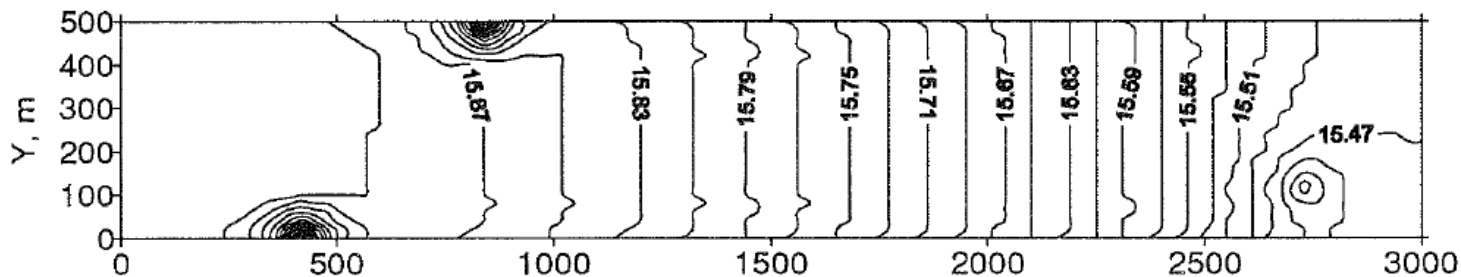
Niemi ym. 1994 Tiesuolauksen pohjavesivaikutusten simulointi tyyppimuodostumissa

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava

Tie pitkin muodostumaa

T1M, vedenotto 90% antoisuudesta
H, m (z=10 m)

HST3D



Mallien laskemat kloridipitoisuudet

Advektio ja dispersio, 1970–1992 suolaushistoria

1 Pitkittäisharju

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava

Tie pitkin muodostumaa

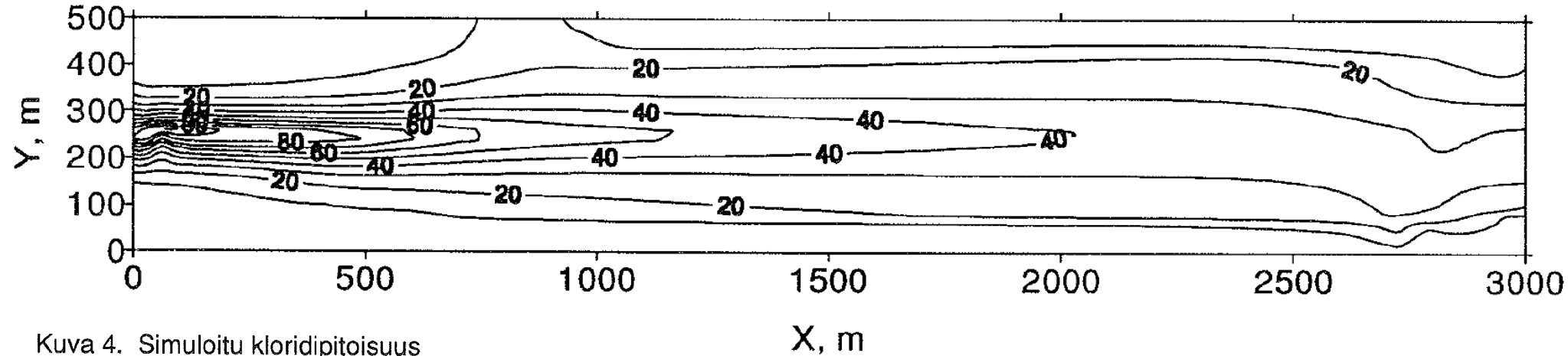
Niemi ym. 1994 Tiesuolauksen pohjavesivaikutusten simulointi tyyppimuodostumissa

1992 : SI/ESI 1970-1992

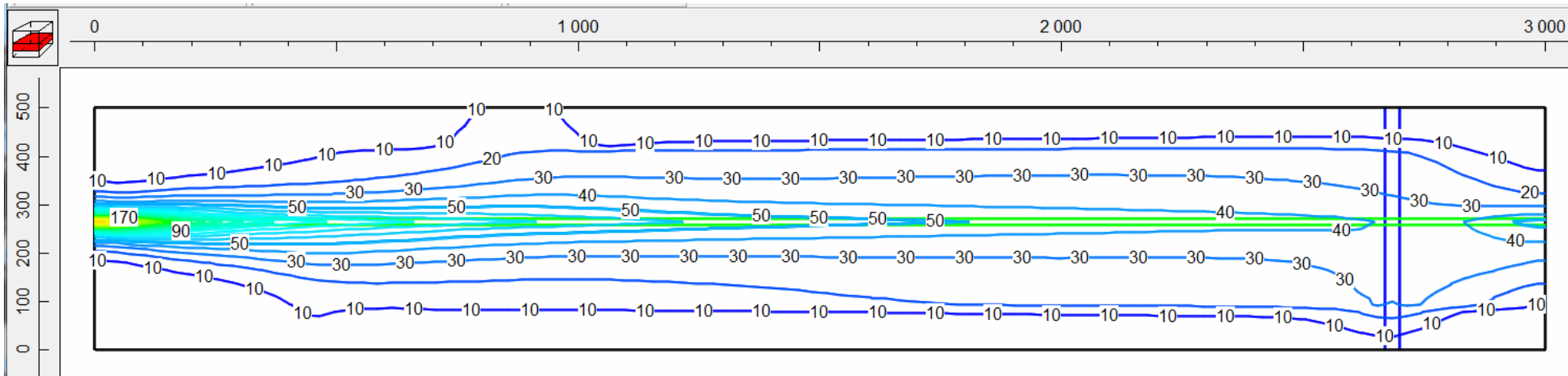
HST3D

Cl⁻-pitoisuudet, z = 10 m

32 mg/l



Kuva 4. Simuloitu kloridipitoisuus
a) v. 1992 (23 vuoden keskimääräisen suolauksen jälkeen)



MODFLOW + MT3DMS

Cl⁻-pitoisuudet, z = 5...10 m

Mallien laskemat kloridipitoisuudet

Advektio ja dispersio, 1970–1992 suolaushistoria, jonka jälkeen ennuste, jossa 30 vuotta suolausta 9.6 t/km/vuosi

1 Pitkittäisharju

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava
Tie pitkin muodostumaa

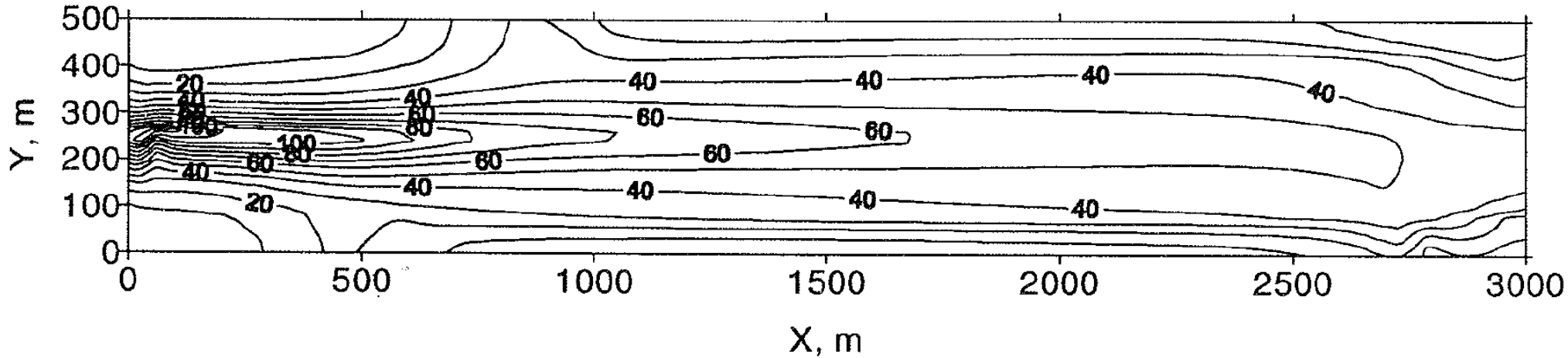
Niemi ym. 1994 Tiesuolauksen pohjavesivaikutusten simulointi tyyppimuodostumissa

HST3D

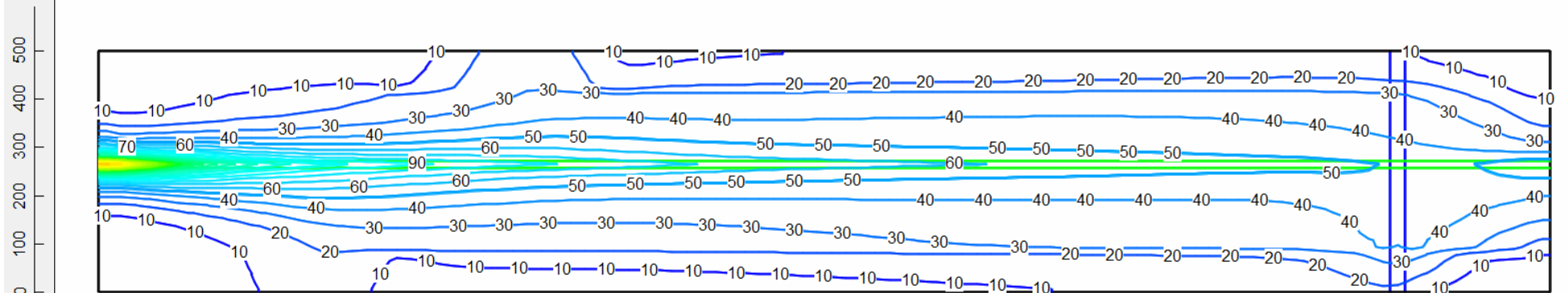
2022 : SI/ESI 1970-2022

Cl⁻-pitoisuudet, z = 10 m

47 mg/l



0 1000 2000 3000



MODFLOW + MT3DMS

Cl⁻-pitoisuudet, z = 5...10 m

Mallien laskemat kloridipitoisuudet

Advektio ja dispersio, 1970–1992 suolaushistoria, jonka jälkeen ennuste, jossa 30 vuotta suolausta 0 t/km/vuosi

1 Pitkittäisharju

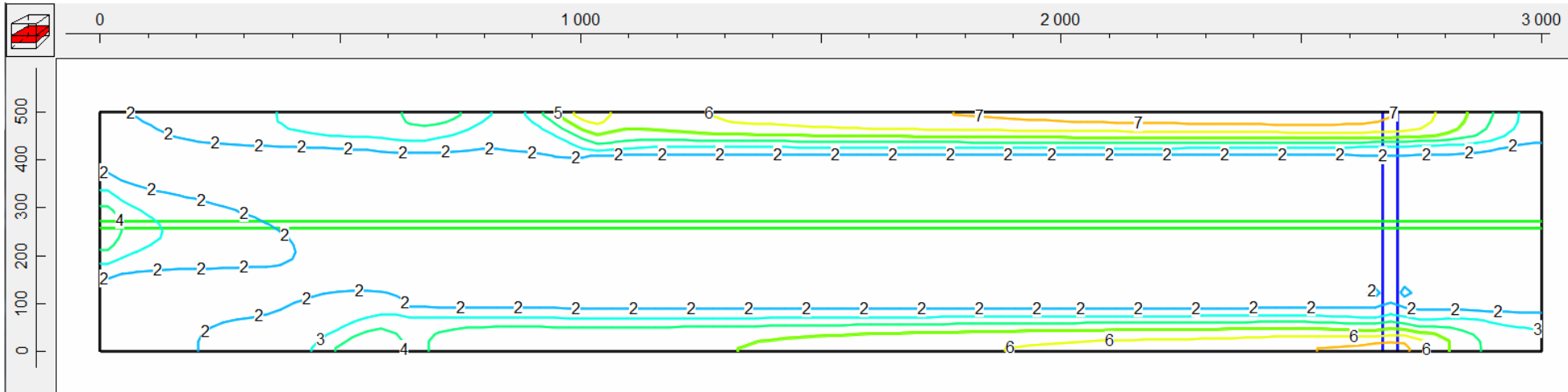
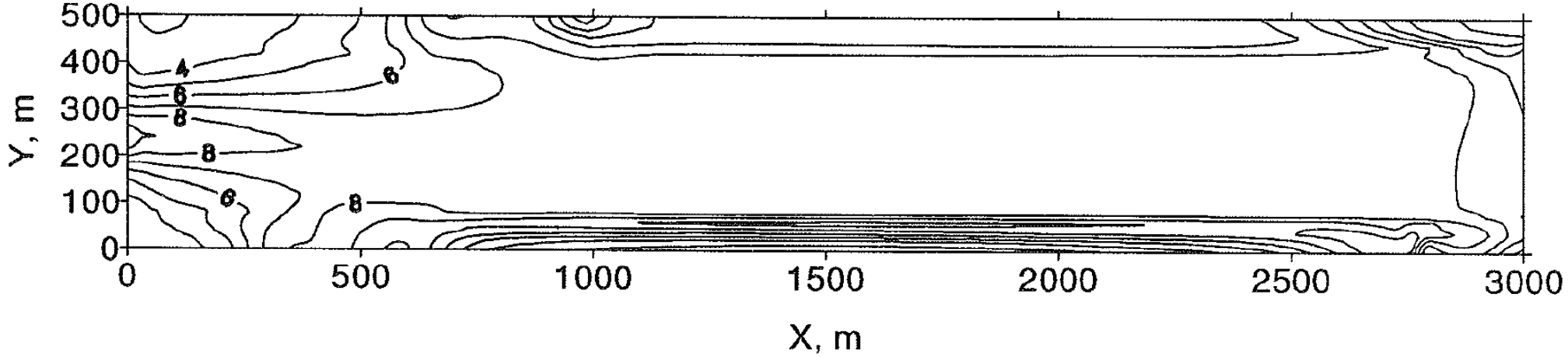
matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava
Tie pitkin muodostumaa

Niemi ym. 1994 Tiesuolauksen pohjavesivaikutusten simulointi tyyppimuodostumissa

HST3D

2022 : SI/ESI 1970-1992 ESI 1993-2022 Cl⁻-pitoisuudet, z = 10 m

7 mg/l



MODFLOW + MT3DMS

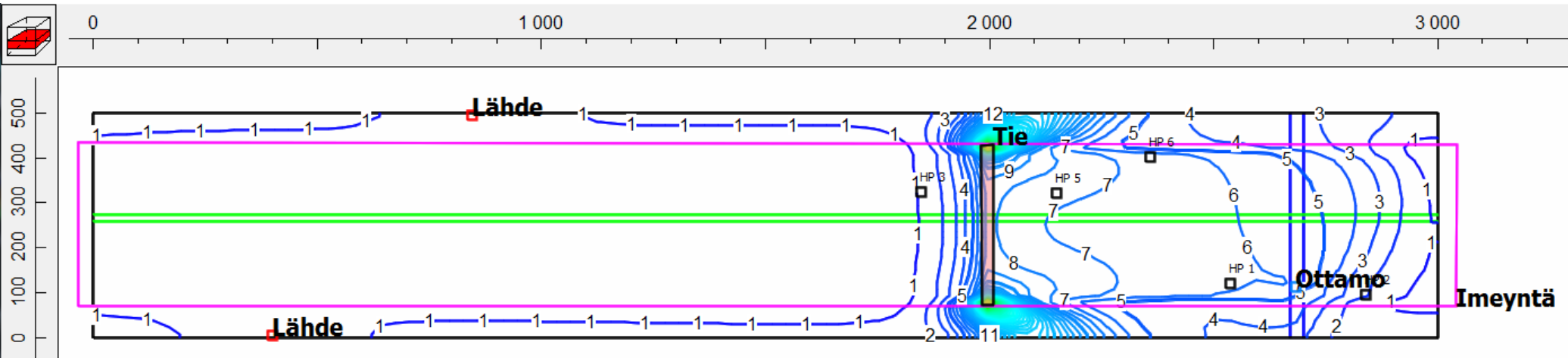
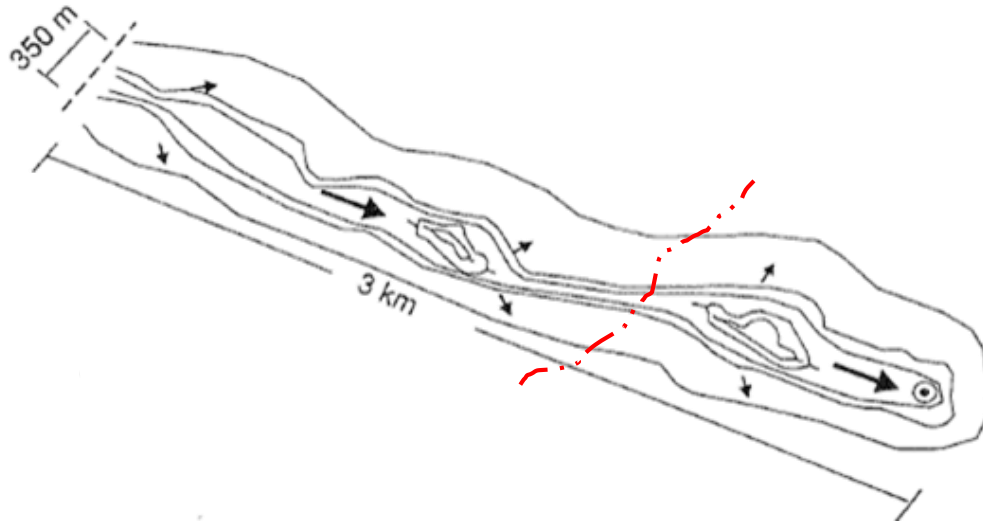
Cl⁻-pitoisuudet, z = 5...10 m

MODFLOW-mallin laskemat kloridipitoisuudet

Advektio ja dispersio, 1970–1992 suolaushistoria, jonka jälkeen ennuste, jossa 30 vuotta suolausta 9.6 t/km/vuosi

1 Pitkittäisharju

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava
Tie muodostuman poikki



MODFLOW + MT3DMS

Cl⁻-pitoisuudet, z = 5...10 m

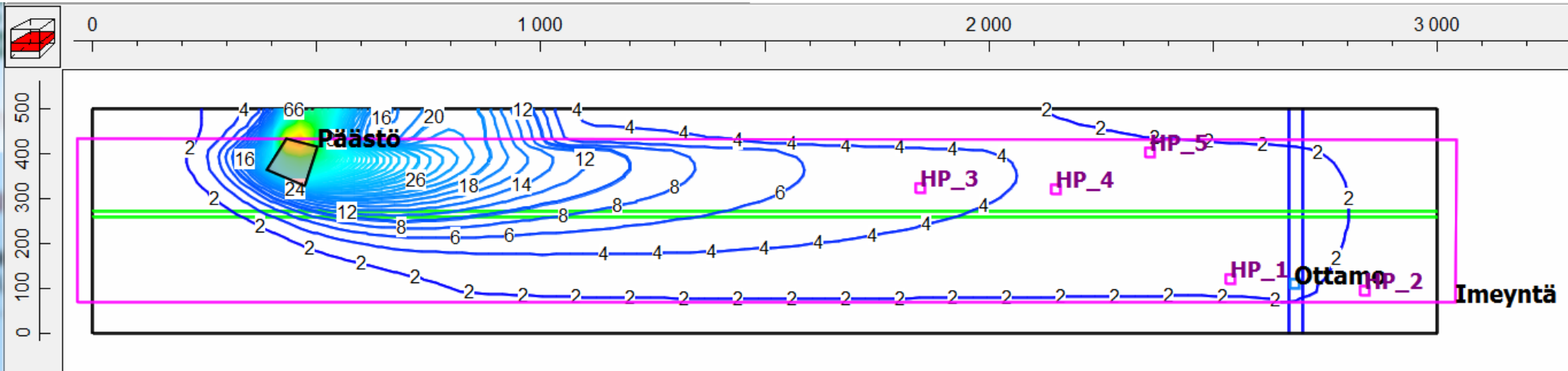
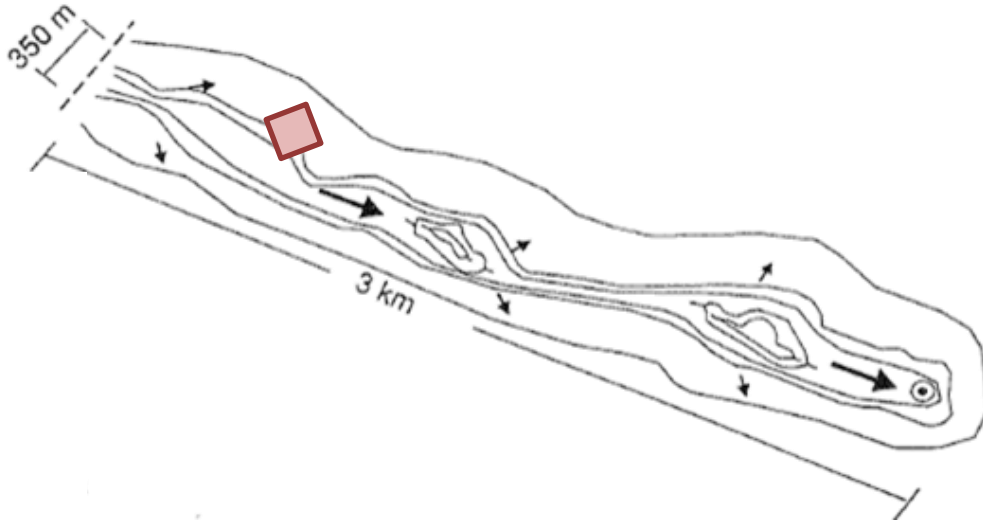
MODFLOW-mallin laskemat aineen X

pitoisuudet

Advektio ja dispersio, päästöalueella imeytyvän veden
pitoisuus 100, päästö kesto 15 v

1 Pitkittäisharju

matalan veden tyyppi, ympäristöön purkava
Geneerinen päästölähde



MODFLOW + MT3DMS

Cl⁻-pitoisuudet, z = 5...10 m

Mallinnettavien tyyppimuodostumien antoisuudet laskettiin suoraan pohjavedeksi imeytyvän vesimäärän (350 mm/a) ja muodostumisalueen pinta-alan perusteella. Käytetyt vedenottomäärät kullekin tyyppimuodostumalle on esitetty taulukossa 2 sekä prosentteina pohjavedeksi muodostuvasta vesimäärästä että prosentteina sadannasta.

Taulukko 2. Mallinnettaville tyyppimuodostumille käytetyt vedenottomäärät

	vedenotto % imeytyvästä pohjavedestä	vedenotto % sadannasta
Tyyppi I	95 %	47,5 %
Tyyppi IIA	95 %	47,5 %
Tyyppi IIB	125 %	63 %
Tyyppi III	70 %	35 %
Tyyppi IV	70 % ja 95 %	35 ja 47,5 %

Vedenottomääriä valittaessa päädyttiin hyödyntämään muodostumia lähes maksimaalisesti (tyypit I ja IIA). Tyypin IIB kohdalla virtauskuvasta johtuen vedenottomäärä ylittää muodostumisalueella imeytyvän pohjaveden määrän. Salpausselkätyyppisessä muodostumassa mallinnetaan kahta erilaista vedenottoa, jotta nähtäisiin vedenoton tehokkuuden vaikutus suolapitoisuuksiin.

Keskimääräinen suolan käytön historia mallintamista varten on määritetty seuraavasti (Olli Penttinen, TIEL, kirje 23.11.1993):

- Vuodesta -80 lähtien tunnetaan ns. suolatun tieverkon pituus ja suolan käyttömäärät (laitoksen keskiarvot)
- Syksyn liukkailla suolataan myös hiukan muita tietoja. Tämän arvioidaan olevan n. 15% koko määrästä.
- Joten vähennetään suolausmäärästä 15% ja jaetaan kilometreillä, jotta saadaan keskimääräisen suolattavan tien suolankäyttömäärät.
- Todellisuudessa eri teiden (kp-luokkien) määrät vaihtelevat.
- 70-luvun arvoiksi oletetaan n. 2/3 80-luvun alun tasosta.

Edellä kuvattua laskentaa käyttäen saadaan seuraava taulukko:

vuosi	Käytetty suolamäärä [tonnia]	Suolattu tieverkko [km]	Keskimääräinen suolaus [t/km]
1970 - 1980			5,17
1980	61200	6713	7,75
1981	63300	6725	8,00
1982	55000	6936	6,74
1983	75000	7300	8,73
1984	71400	8775	6,92
1985	57400	9133	5,34
1986	55900	9496	5,00
1987	78200	9984	6,66
1988	130672	10603	10,48
1989	133200	10670	10,61
1990	157316	11078	12,07
1991	107400	10921	8,36
1992	124800	11021	9,63

Vedenjohtavuuden muunnos

HST3D:n keskeisin virtauskuvaan vaikuttava parametri on ominaisvedenjohtavuus (k [m^2])

MODFLOW:n keskeisin virtauskuvaan vaikuttava parametri on hydraulinen vedenjohtavuus (K [m/s])

Ominaisvedenjohtavuus (k)

-> **Vedenjohtavuus (K)**

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{k g}{\nu}$$

$$K = \frac{9.81 \cdot 1000 \cdot k}{8.90 \times 10^{-4}} \approx 1.1e + 7 \cdot k$$

K = vedenjohtavuus [m/s]

k = ominaisvedenjohtavuus [m^2]

ρ = nesteen tiheys [kg/m^3]

- vedelle $1 \text{ kg/dm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$

g = maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys $\approx 9.81 \text{ m/s}^2$

μ = nesteen dynaaminen viskositeetti [$\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg/m}\cdot\text{s}$]

- vedelle $8.90 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

ν = nesteen kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]

Vedenjohtavuudet tyyppimalleissa

k [m ²] K [m/s]	T1		T2A		T2A-S		T2B		T3		T4	
	k [m ²]	K [m/s]	k [m ²]	K [m/s]	k [m ²]	K [m/s]	k [m ²]	K [m/s]	k [m ²]	K [m/s]	k [m ²]	K [m/s]
Hiekka	1e-11	1.1e-4	1e-11	1.1e-4	1e-12	1.1e-5	1e-11	1.1e-4	1e-11	1.1e-4	1e-11	1.1e-4
Sora	1e-9	1.1e-2	1e-9	1.1e-2	1e-10	1.1e-3	1e-9	1.1e-2	1e-10	1.1e-3	1e-9	1.1e-2
Sora 2			6e-10	6.61e-3								
Moreeni									1e-13	1.1e-6	1e-13	1.1e-6
Moreeni 2											1e-14	1.1e-7
Savi	1e-17	1.1e-10	1e-17	1.1e-10	1e-17	1.1e-10	1e-17	1.1e-10	1e-17	1.1e-10	1e-17	1.1e-10
Kallio			1e-21	1.1e-14	1e-21	1.1e-14	1e-21	1.1e-14				

Huokoisuudet tyyppimalleissa

YHTEENVETO MALLIEN MAALAJIKOHTAISISTA TIEDOISTA

Huokoisuus ¹⁾	T1	T2A	T2A-S	T2B	T3	T4
Hiekka	40 → 35	40 → 35	40 → 35	35	40 → 35	40 → 30
Sora	40 → 35	40 → 35	40 → 35	35	35 → 30	30 → 25
Sora 2			40 → 35	35		
Hiekka sora						
Moreeni					40 → 35	40 → 35
Moreeni 2						40 → 35
Savi	35	60 → 35	60 → 35	35	35	60 → 35
Siltti						40-45 → 35
Kallio		5 → 2	5 → 2	2		

1) Ilmoitettu kokonaishuokoisuus → tehokas huokoisuus

Maalajien hydrogeologisia parametreja, geotekninen maalajiluokitus

Maalaji	Vedenjohtavuus K		Huokoisuus tot [%]	Ominaisantoisuus S_y [%]
	[m s ⁻¹]	[m d ⁻¹]		
Sr	$10^{-1} - 10^{-4}$	10000 – 10	25 – 50	25 – 37
KSr	> 1	> 100000	24 – 36	23
KkSr	$1 - 10^{-2}$	100000 – 1000		24
HSr	$1 - 10^{-3}$	100000 – 100	25 – 38	25
hkSr	$10^{-2} - 10^{-6}$	1000 – 0,1		
Hk	$10^{-2} - 10^{-6}$	1000 – 0,1	25 – 50	25 – 38
KHk	$10^{-1} - 10^{-4}$	10000 – 10	30 – 46	27
KkHk	$10^{-2} - 10^{-5}$	1000 – 1	30 – 40	28
HHk	$10^{-3} - 10^{-6}$	100 – 0,1	26 – 53	10 – 28
Si	$10^{-5} - 10^{-9}$	1 – 0,0001	35 – 61	8
Ksi	$10^{-4} - 10^{-6}$	10 – 0,1	30 – 35	
Hsi	$10^{-5} - 10^{-8}$	1 – 0,001	40 – 50	
Sa	$< 10^{-8}$	< 0,001	34 – 70	3 – 10
laSa			40 – 60	
liSa			60 – 75	
Mr			20 – 55	
SrMr	$10^{-4} - 10^{-7}$	10 – 0,01		16
HkMr	$10^{-6} - 10^{-8}$	0,1 – 0,001		16
SiMr	$10^{-7} - 10^{-10}$	0,001 – 0,00001		6

Kivilajien hydrogeologisia parametreja

Kivilaji	Vedenjohtavuus K		Huokoisuus tot [%]	Ominaisantoisuus S_y [%]
	[m s ⁻¹]	[m d ⁻¹]		
Karstikalkkikivi	1 – 10 ⁻³	100000 – 100	5 – 50	
Huokoinen vulkaaninen kivi	1 – 10 ⁻⁸	100000 – 0,001		21
Basalti	10 ⁻¹ – 10 ⁻¹⁰	10000 – 0,00001	5 – 50	
Karkea-keskikarkea hiekkakivi	10 ⁻¹ – 10 ⁻⁵	10000 – 1	< 20	
Huokoinen hiekkakivi	10 ⁻³ – 10 ⁻⁶	100 – 0,1	5 – 30	
Hienorakeinen hiekkakivi	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁹	1 – 0,0001	< 10	21
Keskikarkearakeinen hiekkakivi				27
Runsaasti rakoilevat syvä- ja metamorfiset kivet	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	10 – 0,1	< 10	
Kalkkikivi, dolomiitti	10 ⁻¹ – 10 ⁻¹⁰	10000 – 0,00001	1 – 50	14
Porfyriitti	10 ⁻⁵ – 10 ⁻¹¹	1 – 0,000001		
Graniitti, gneissi	10 ⁻⁴ – 10 ⁻¹¹	10 – 0,000001	< 10	
Saviliuske, hietakivi	10 ⁻⁷ – 10 ⁻¹¹	0,001 – 0,000001	< 10	12 – 26
Liuske	< 10 ⁻⁸	< 0,001	1 – 10	
Rakoilematon, sementoitunut hiekkakivi	< 10 ⁻⁸	< 0,001		
"Ehyet" syvä- ja metamorfiset kivet	< 10 ⁻⁹	< 0,0001	< 5	