



## Mikrobien kulkeutuminen pohjavedessä, Tuloksia Polaris-hankkeesta

Vesihuollon riskien hallinta ja monitorointi –seminaari  
Kuopio 24.4.2013

# Sisältö

- Yleistä
  - Miten mikrobeja joutuu pohjavesimuodostumaan?
  - Mitkä tekijät vaikuttavat mikrobien kulkeutumiseen ja pidättymiseen?
- Tuloksia Polaris-hankkeesta
  - Case-kohde Mikkeli, Pursiala
  - Mikrobien kulkeutumiskokeet
  - Mikrobien kulkeutumisriskinarviointi
  - Laskuesimerkki
- Johtopäätökset

# Miten mikrobeja joutuu pohjavesimuodostumaan?

- Mikrobeja voi kulkeutua pintaveden mukana pohjaveteen
  - Kun muodostetaan tekopohjavettä
    - Sadetusimeytyksen tai allasimeytyksen avulla
    - Epäsuorasti rantaimetyksen kautta
      - Pohjavesimuodostuma rajoittuu jokeen
      - Pohjavesimuodostuma virtauskuvaltaan synkliininen eli kerää vettä ympäristöstä
  - Huonosti suojatuista kaivoista
    - Pintavesien pääsy kaivoihin rankkasateiden ja tulvien seurauksena
- Piste- ja hajakuormituslähteet
  - Jätevesien käsittelylaitosten purkuvedet
  - Viemärien ylivuodot ja viemäriputkien vuodot
  - Maatilojen lantasäiliöt ja pelloilla käytetty karjanlanta



# Yleistä mikrobien kulkeutumisesta

- Mikrobien inaktivaatio alkaa heti kun mikrobit alkavat suotautua maaperässä
- Mikrobit kulkeutuvat maaperässä veden virtauksen mukana (advektion ja dispersio)
  - Kulkeutumisenopeus riippuu maaperän vesipitoisuudesta ja kyllästysasteesta sekä huokoskoosta, jotka vaikuttavat virtausnopeuteen
  - Dispersio vaikuttaa mikrobien leviämiseen
- Mikrobit voivat kulkeutua maaperässä muutamista senttimetrien matkasta jopa satojen metrien päähän
- Kulkeutumista rajoittavat mikrobien pidättymismekanismit sekä mikrobien säilyminen

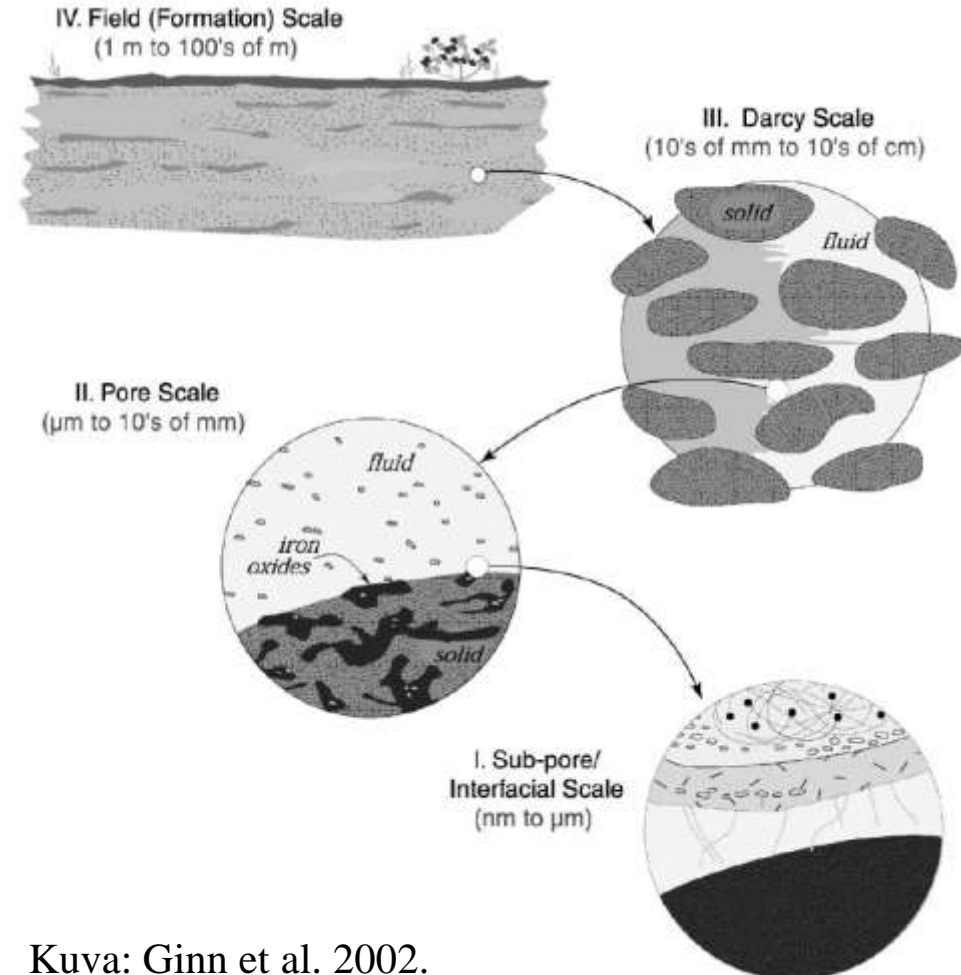


© Jari Väättäinen, GTK



# Miten mikrobit voivat pidäytyä maaperään?

- Mekaaninen suodattuminen
  - Kun maaperän huokoskoko pienempi kuin mikrobin koko (alkueläimet ja bakteerit)
- Kiinnittyminen maapartikkelin pintaan
  - Elektrostaattinen vuorovaikutus (alkueläimet ja bakteerit)
- Kemialliset reaktiot maapartikkelin pinnalla (mm. adsorptio) (virukset)
- Kiinnittyminen toisiin viruksiin
- Huom. Maapartikkelien pinnoille kiinnittyneet mikrobit eivät välttämättä menetä infektiokykyään ja voivat lähteä uudelleen liikkeelle (virukset)



Kuva: Ginn et al. 2002.

# Mitkä tekijät vaikuttavat mikrobien kulkeutumiseen ja pidättymiseen pohjavedessä?

- 1) **Sääolosuhteet**
- 2) **Hydrogeologiset olosuhteet**
- 3) **Geokemialliset olosuhteet**
- 4) **Kemialliset olosuhteet**
- 5) **Mikrobien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet**

# Sääolosuhteet

- **Sadanta**

- Maaperän vesipitoisuus vaikuttaa mikrobien säilymiseen (stressi)
- Mikrobien kulkeutuminen on hitaampaa ja pidäytyminen voimakkaampaa osittain kyllästyneessä maaperässä
- Voimakas sadanta voi saada maapartikkeleihin kiinnittyneet mikrobit uudelleen liikkeelle

- **Lämpötila**

- Mikrobit säilyvät paremmin viileässä kuin lämpimässä vedessä
- Korkea lämpötila yhdessä alhaisen maaperän vesipitoisuuden kanssa vähentää voimakkaasti mikrobien selviytymistä (pintamaa)

- **UV-säteily**

- Vaikuttaa mikrobien elinkykyyn etenkin kesäaikaan



# Hydrogeologiset olosuhteet

- **Maa- ja kallioperän rakenne**
  - Maalajien kerrosrakenne
  - Oikovirtausreitit (juurikanavat, kivien pinnat, halkeamat, kallioperän raot)
    - Virtaus nopeaa, mikrobien suodattumista ja pidättymistä ei ehdi tapahtua
- **Maalajit ja huokoskoko**
  - Karkeammassa maalajissa on suurempi huokoisuus → veden virtausnopeus/mikrobien kulkeutumisen nopeus suurempi
  - Mitä pienempi ja heterogeenisempi huokoskoko, sitä enemmän tapahtuu mekaanista suodattumista





# Kemialliset olosuhteet (1/2)

- **Maaperän geokemiallinen koostumus**

- Pidättävien raudan, alumiinin ja mangaanin oksidien ja oksihydroksidien määrä
- Orgaanisen aineksen määrä
  - Voi lisätä virusten kulkeutumista, koska liukoinen orgaaninen aines kilpailee samoista pidättymispaikoista maarakeissa kuin virukset
  - Voi toimia ravinteiden lähteenä bakteereille ja parantaa niiden selviytymistä

- **Hapen määrä vedessä**

- Useat taudinaiheuttajamikrobit ovat anaerobisia/mikroaerofiilisia → säilyvät paremmin vähähappisissa olosuhteissa

# Kemialliset olosuhteet (2/2)

- **pH**
  - Vaikuttaa maaraikeden varaustilaan ja siten elektrostaattiseen vuorovaikutukseen maapartikkeleiden ja mikrobien välillä
  - Useimpien suolistoperäisten mikrobien säilymiselle optimaalinen pH alue on 6-8
  - Pidättyminen voimakkaampaa alhaisessa pH:ssa
  - pH:n nousu voi saada maapartikkeleihin kiinnittyneet mikrobit uudelleen liikkeelle
- **Ravinteiden määrä vedessä**
  - Vaikuttaa etenkin muiden kuin suolistoperäisten mikrobien kasvuun, lisää mikrobien välistä kilpailua ja siten heikentää suolistoperäisten mikrobien säilymistä
- **Ionivahvuus**
  - Mikrobien pidättyminen on havaittu lisääntyvän ionivahvuuden kasvaessa
  - Ionivahvuuden aleneminen (esim. sadanta) saattaa aiheuttaa pidättyneiden mikrobien mobilisoitumisen

# Mikrobien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet

- **Koko ja muoto**

- Suhteessa maaperän huokosiin

- **Isoelektrinen piste**

- Mikrobit joilla on korkea isoelektrinen piste (pH, jossa nettovaraus on nolla) adsorboituvat pinnoille voimakkaammin kuin mikrobit joilla on alhainen isoelektrinen piste

- **Elektrostaattinen varaus (mille pinnoille sitoutuvat)**

- Mikrobeilla usein vedessä negatiivinen varaus
  - Pinta vetää puoleensa kationeja
  - Pinnan ulkopuolelle syntyy vastakkaismerkkinen kerros
    - elektrostaattinen kaksoiskerros
    - mitä ohuempi, sitä tehokkaammin mikrobit pidättyvät

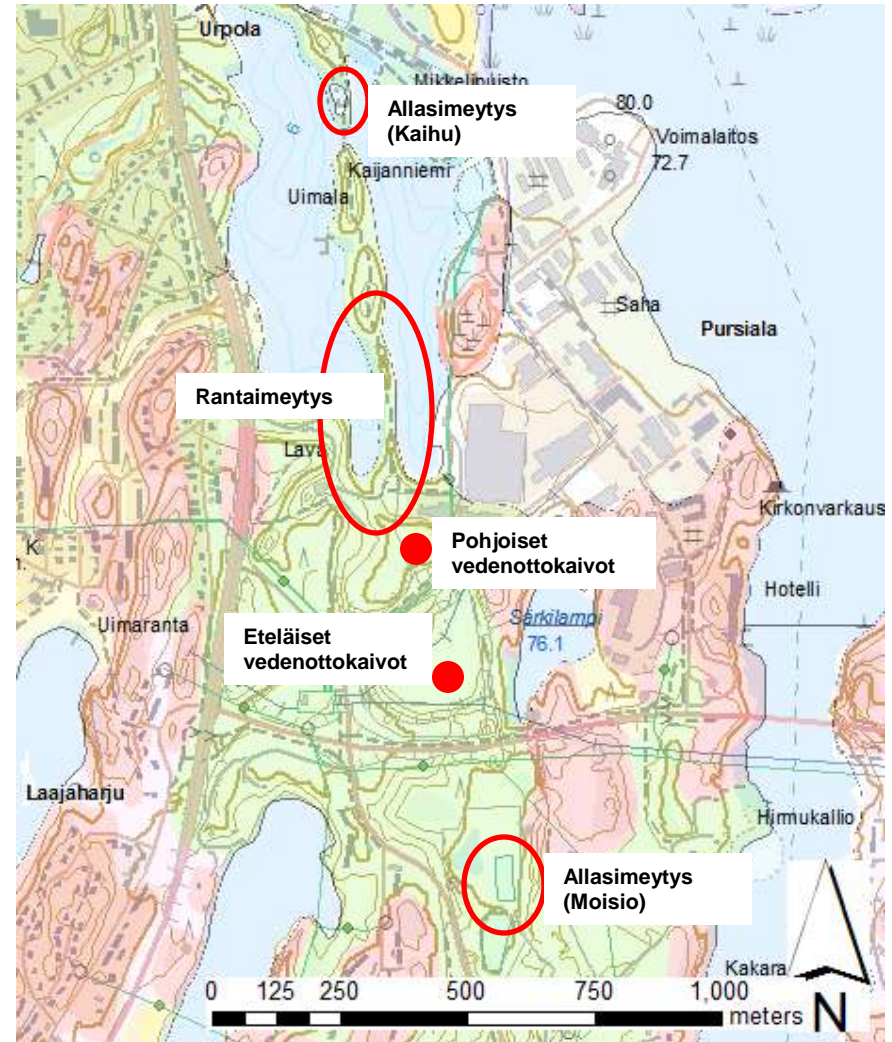
- **Hydrofiilisyyys ja hydrofobisuus (vettähylkivä)**

- Mikrobit joilla on hydrofobinen pinta adsorboituvat helpommin
- Heikosti adsorboituvien mikrobien pintojen on todettu olevan hydrofiilisia

# POLARIS hanke

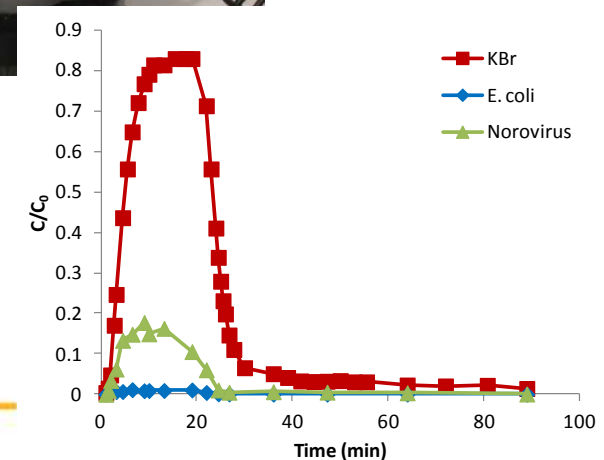
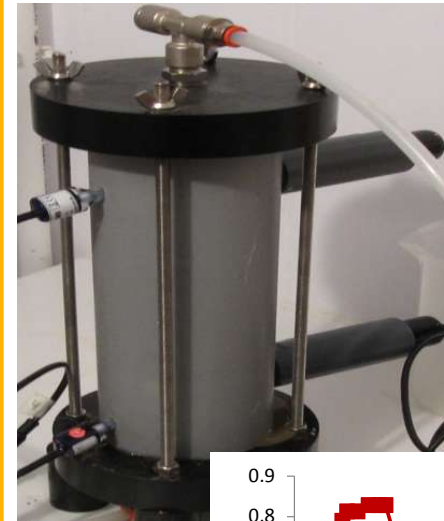
## Case-tutkimus Mikkelä, Pursiala

- Pohjavesimuodostuma kaupungin välittömässä läheisyydessä
- Vedenlaadun riskejä:
  - Rantaimeytys
  - Allasimeytys
  - (Sadetusimeytys)
  - Teollisuus
  - Vanha saha
  - Vanhat kaatopaikat
  - Jätevedenpuhdistamo
  - Liikenne



# Mittaukset ja analyysit 2009-2012

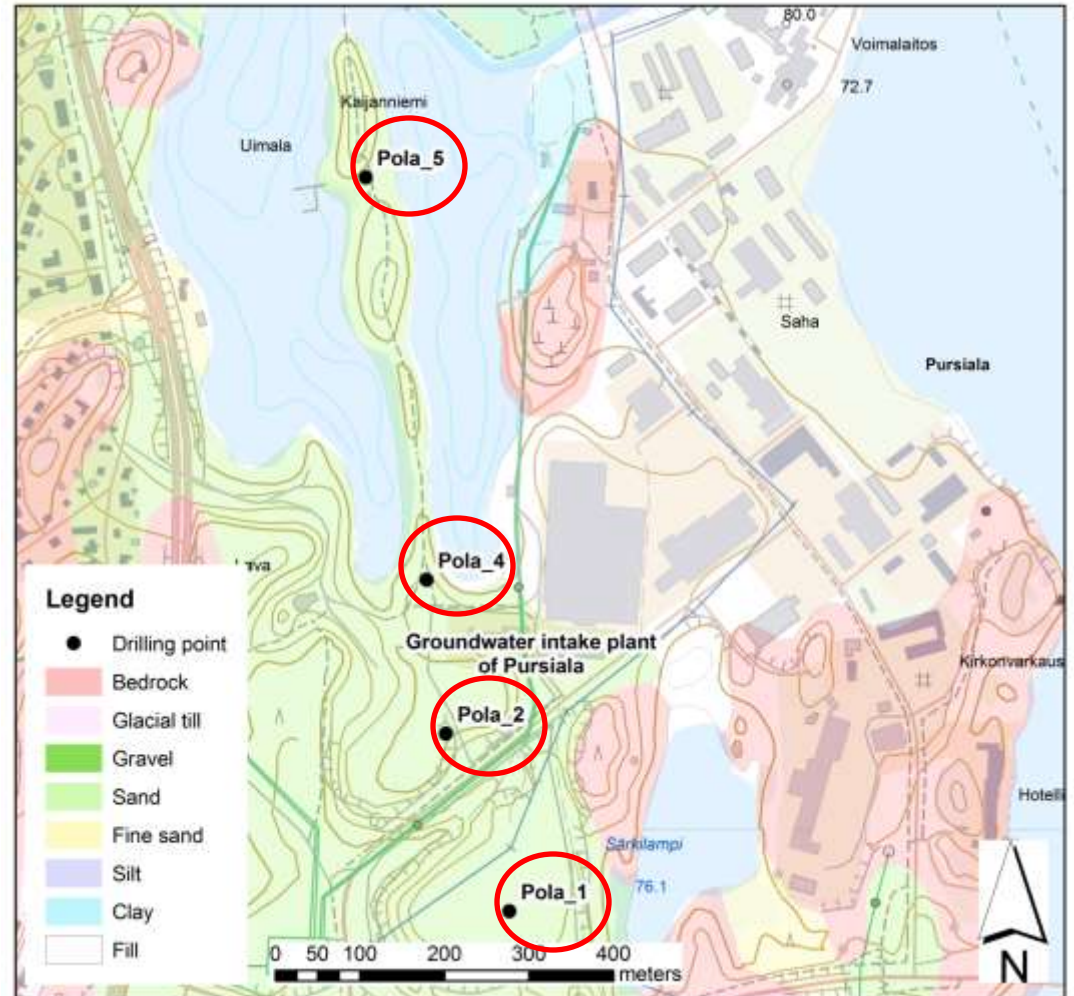
- Maaperän rakennetutkimukset
- Virtausmittaukset
- Pohjaveden virtausmallinnus
- Online-mittaukset
  - Pohjaveden pinnankorkeus, T, pH, EC, happi, sameus
- Vesianalyysit (vesikemia, isotoopit, patogeeniset mikrobit, indikaattorit, kokonaispesäkelukumäärä)
  - Näytteet 2010 and 2011 huhtikuusta elokuuhun ja sadejaksojen jälkeen
- **Mikrobien kulkeutumiskokeet laboratoriossa**





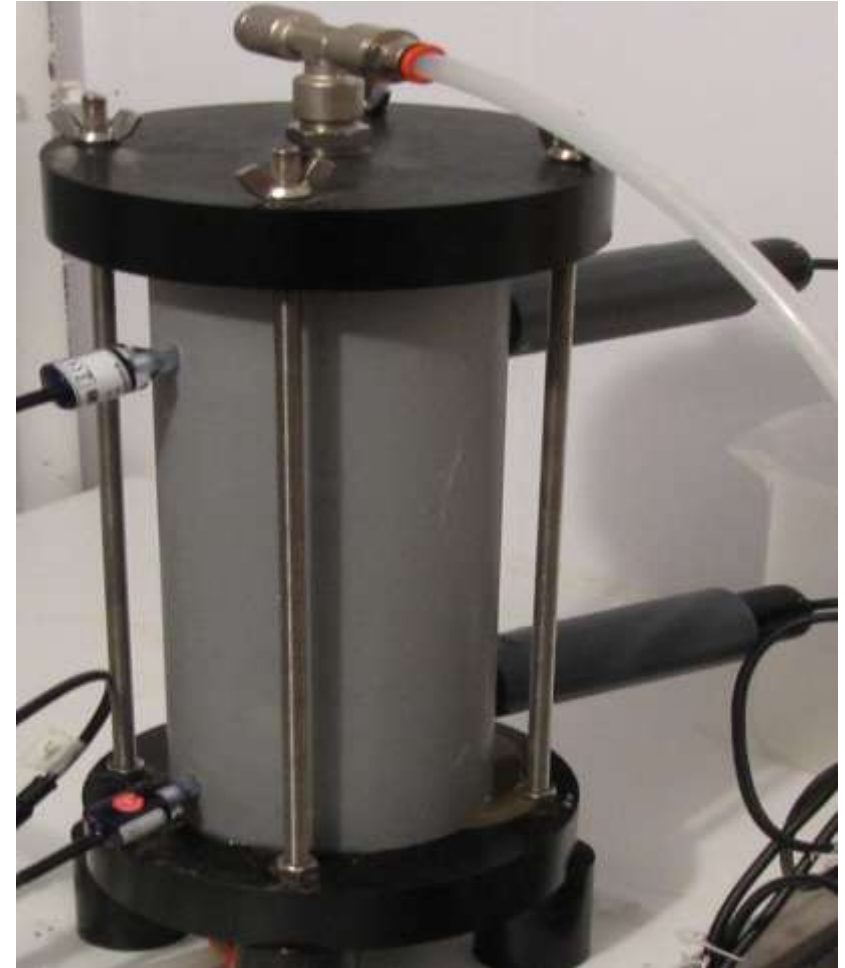
# Näytteenotto kolonnikoikeita varten

- Maalajinäytteet eri harjun osista pohjavesiputkien asennuksen yhteydessä
- Näytteistä analysoitiin rakeisuus ja geokemiallinen koostumus

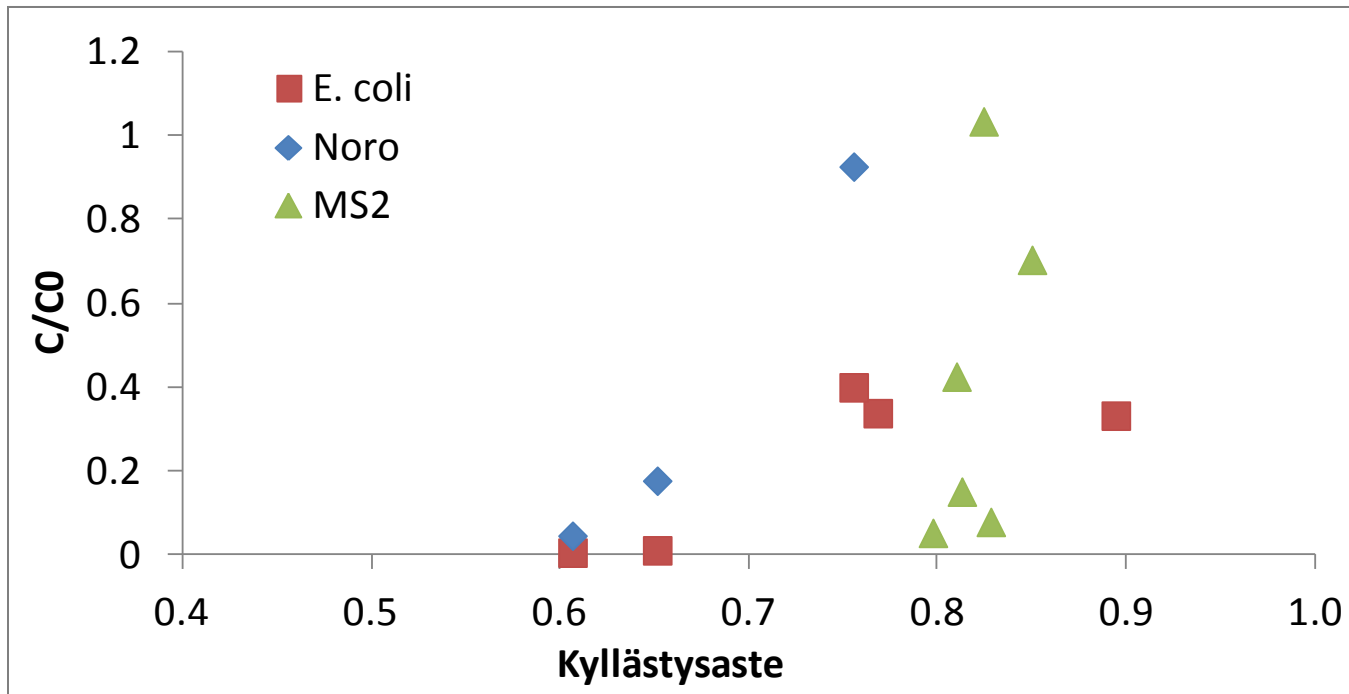


# Mikrobien kulkeutumiskokeet POLARIS hankkeessa

- Tavoitteena selvittää miten mikrobit kulkeutuvat maaperässä
- Verrattiin:
  - Eri mikrobeja: (Norovirus, MS2, *E. coli*)
  - Maalajin (Sr, HSr, KHk, Hk) vaikutusta
  - Virtausnopeuden ja kyllästysasteen vaikutusta
- Kulkeutumisparametrit eri mikrobeille eri osissa harjua
- Hyödyntäminen riskinarvioinnissa

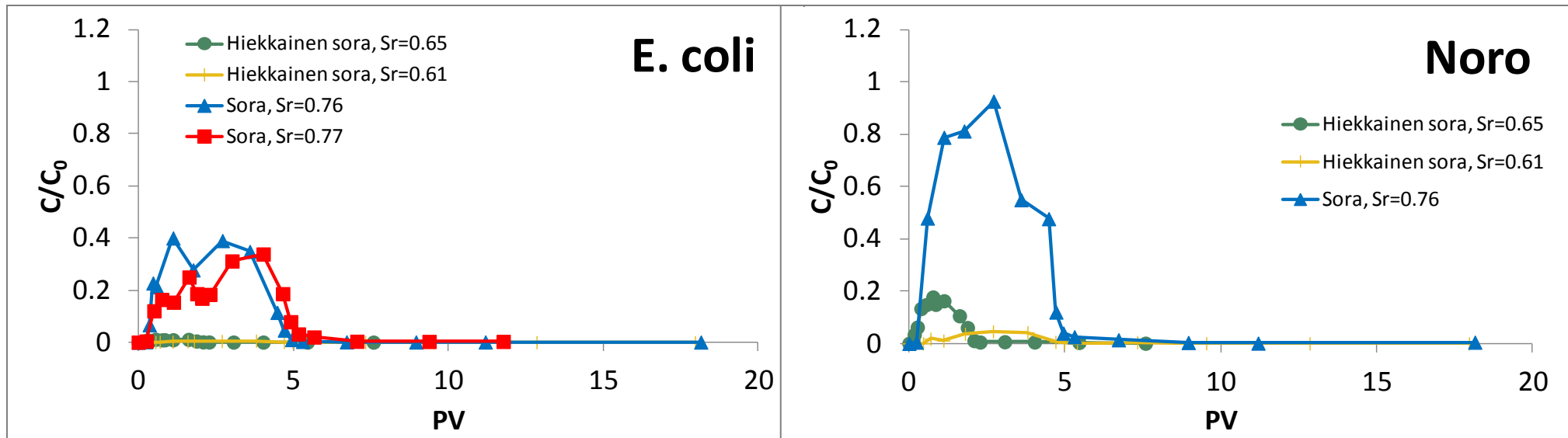


# Tulokset – Kyllästysasteen suhde pidättymiseen



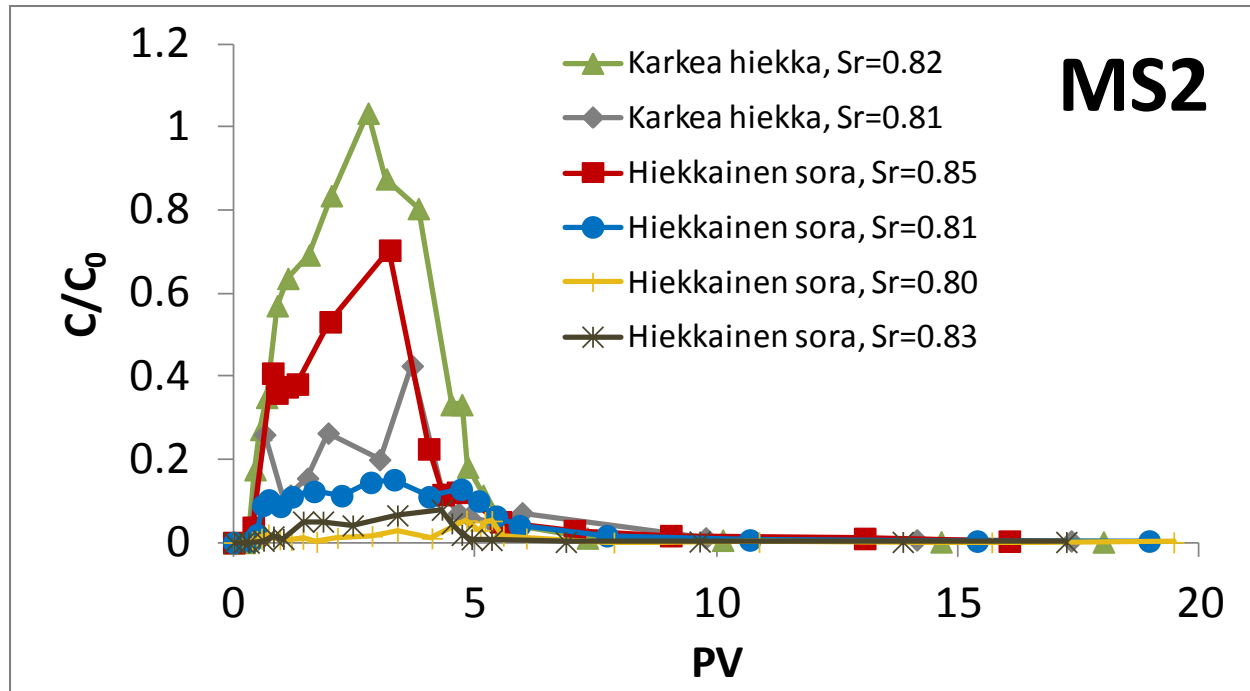
- Kyllästysaste vaikutti voimakkaasti noroviruksen pidättymiseen
- E.coli pidättyi tehokkaasti, kun kyllästysaste oli alle 75 %
- Kyllästysasteen ollessa yli 75 % sillä ei ollut vaikutusta E.colin pidättymistehokkuuteen

# Tulokset – Kyllästysasteen ja raekoon vaikutus



- E. coli bakteeri pidättyi tehokkaammin kuin norovirus
  - Pidättymiseen vaikuttavat sekä kyllästysaste että maalajin rakeisuus

# Tulokset – Raekoon ja geokemiallisen koostumuksen vaikutus



- Pidättyminen oli tehokkaampaa pohjavesivyöhykkeestä otetuissa soranäytteissä kuin karkeassa hiekassa
  - Maaperän pintakerroksessa enemmän orgaanista ainesta, joka kilpailee mikrobien kanssa samoista pidätymispaikoista
  - Myös enemmän ravinteita



# Yhteenvedo kolonnikokeiden tuloksista

- Mikrobin kulkeutumiseen vaikuttivat:
  - **Maaperän raekoko (bakteerit)**
    - Virtaus hitaampaa ja pidättyminen tehokkaampaa mitä hienorakeisempi maa-aines
  - **Kyllästysaste (virukset)**
    - Veden virtaus hitaampaa osittain kyllästyneessä maaperässä
    - Mikrobit pidättyvät tehokkaasti ilma-vesi-kiintoaine rajapinnoille
  - **Maaperän geokemiallinen koostumus (virukset)**
    - Pidätyspaikkojen määrä (Fe ja Al oksidit ja oksihydroksidit)
    - Onko pidätyspaikkoja vapaana? OM ja DOM kilpailevat samoista pidätymispaikoista kuin mikrobit
    - Ravinteiden määrä

# Miten mikrobien kulkeutumisriskejä voidaan arvioida ottaen huomioon WSP:ssä?

- Onko mahdollisen päästölähteen ja vedenottoaivojen välinen etäisyys riittävä?
  - Virtausnopeus/mikrobien kulkeutumisenopeus suhteessa kulkeutumismatkaan?
- Onko viipymä riittävä mikrobien suodattumiselle/pidättymiselle?

**Table 1.** Survival of microorganisms in groundwater at  $T = 4-8^{\circ}\text{C}$  [3, 6]

Microorganisms	$c_0$ , m.b./l	$t_{in}$ , day
Typhoid salmonella	$10^2$	50–56
	$10^4$	$\leq 120$
Paratyphoid B salmonella	$10^2$	$\leq 220$
	$10^4$	74–400
Dysentery shigellos	$10^2$	$\leq 174$
	$10^4$	$> 300$
Poliomyelitis viruses	$10^3^*$	116
Phages E. coli	$10^3^*$	400
Colibacillus and enterococci	$10^5-10^6$	400

\* BOE/ml.

Taulukko: Nevecherya et al. 2005.

Esimerkiksi E.coli faagit voivat säilyä pohjavedessä jopa 400 päivää!

# Riskinarviointityökalun kehitys

## - Mikrobin kulkeutumisen laskenta

- **Maaperän rakenne ja ominaisuudet**

- Osittain kyllästyneen vyöhykkeen ja pohjavesivyöhykkeen paksuus
  - Maalajien hydrauliset ominaisuudet ( $K_s$ ,  $n$ ,  $\theta$ ,  $S_e$  jne)
  - Viemärin sijainti, vuodon virtausnopeus

- **Päästölähteen sijainti ja ominaisuudet**

- Etäisyys vedenottoaivoista, pinnankorkeuksien erot
- Virtausnopeus (esim. viemäriputki)
- Mikrobin tai haitta-aineiden kulkeutumisparametrit

- **Skenaariot**

- Kulkeutuminen päästölähteestä raakavesilähteeseen ja vedenottoaivoihin
  1. Allasimeytys
  2. Sadetusimeytys
  3. Rantaimytys
  4. Viemäriputken rikkoutuminen tai vuoto
  5. Muu haitta-ainepäästö

# Pohjaveden virtaussuunnat ja mikrobin kulkeutumisen arvioiminen

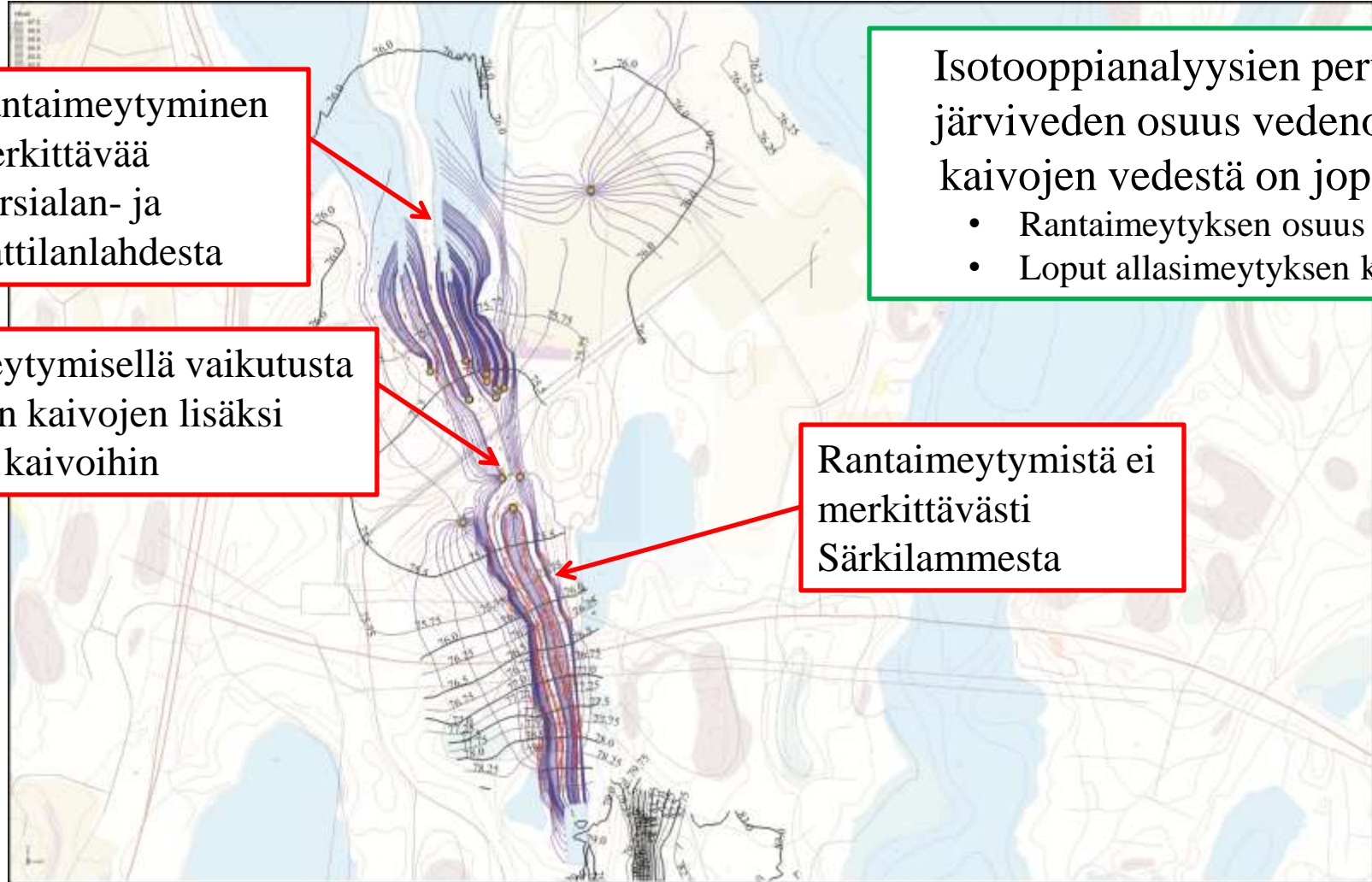
Rantaimeytyminen merkittävää Pursialan- ja Kattilanlahdesta

Rantaimeytymisellä vaikutusta pohjoisten kaivojen lisäksi eteläisiin kaivoihin

Rantaimeytymistä ei merkittävästi Särkilammesta

Isotooppianalyysien perusteella järiveden osuus vedenottamon kaivojen vedestä on jopa 97 %

- Rantaimeytyksen osuus n. 40 %
- Loput allasimeytyksen kautta



# Esimerkkilaskelma, rantaimytys pohjoiseen kaivoryhmään

- Vedenottokaivon etäisyys rannasta  $R = 100$  m
- Pohjavesimuodostuman syvyys  $h = 15$  m
- Maaperän huokoisuus  $n = 0.35$
- Pumpattava virtaama  $Q = 125$  m<sup>3</sup>/h
- Järvivedessä e.coli bakteereja 2 pmy/100 ml, minimipitoisuus 0.002 pmy/100 ml
- E. coli bakteerien inaktivaatiokerroin  $\lambda = 0.83$

## Kulkeutumisaika suhteessa inaktivaatioaikaan?

Kulkeutumisaika:  $T = (2\pi * n * h^2) / Q$

Sijoittamalla arvot saadaan:

$$T = (2\pi * 0.35 * 15\text{m} * (100\text{m})^2) / 125\text{m}^3/\text{h} = 110 \text{ vrk}$$

Inaktivaatioaika:  $t_{in} = \lambda^{-1} \ln(c_0 / c_{min})$

Sijoittamalla arvot saadaan:

$$T_{in} = 0.83^{-1} * \ln(2 / 0.002) = 83 \text{ vrk}$$

→ Bakteerit eivät ehdi kulkeutua kaivoon



# Johtopäätökset

- **Veden laadun riskien hallinnan kannalta on tärkeää tunnistaa mikrobien päästölähteet ja kulkeutumiseen liittyvät riskit!**
- Päästölähteiden ja vedenottokaivojen välinen etäisyys oltava riittävä
- Suoja-alueiden laajuutta arvioidessa tulee huomioida mikrobien kulkeutumis aika suhteessa niiden inaktivaatioaikaan
  - Bakteerien inaktivaatioajat >100 vrk
  - Virusten inaktivaatioon tarvittava aika moninkertainen suhteessa bakteerien inaktivaatioaikaan
- Mikrobien kulkeutumiselle riskialteimpia kohteet, joissa
  - Vedenottokaivojen etäisyys rannasta, imeytysaltaasta tai sadetusalueesta alle 300 m tai veden viipymä alle 4 kk
  - Pohjavedenpinta lähellä maanpintaa (osittain kyllästynyt vyöhyke ohut)
  - Maaperä kauttaaltaan hyvin vettä johtavaa

# KIITOS!

**Yhteystiedot:**  
**soile.backnas@gtk.fi**

