

Ilmastonmuutoksen vaikutukset pohjaveden muodostumiseen Mikkelin Hanhikankaan ja Lahden pohjavesialueilla

SAMRIT LUOMA, ARTO HYVÖNEN, JAANA JARVA, JARKKO OKKONEN, ANU ESKELINEN JA JOHANNES KLEIN

Ilmastonmuutos – erityisesti muutokset lämpötilassa ja sadannassa – vaikuttaa hydrologiaan, pohjaveden muodostumiseen ja pohjavesivaroihin. Ilmaston lämpenemisen ennustetaan etenevän, ja sillä ennakoidaan olevan entistä suurempia vaikutuksia hydrologisille kierroille, mikä puolestaan saattaa heikentää myös pohjavesien muodostumista ja laatua. Pohjaveden virtausmallintaminen ja ilmastonmuutoksen vaikutusten arvioiminen pohjavedenpinnan korkeustasolle ovat työkaluja pohjaveden kestävästä käytöstä hallinnassa.

Pohjaveden muodostuminen Suomessa

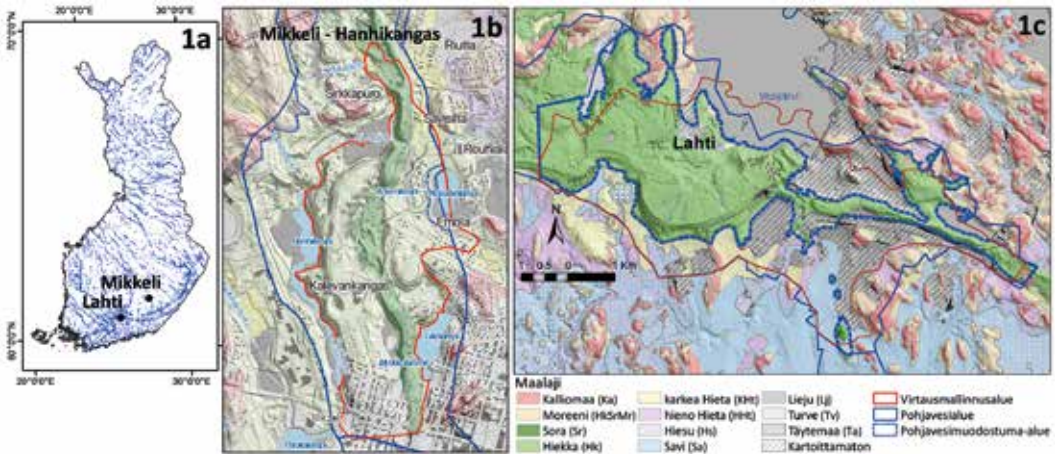
Pohjaveden muodostumiseen vaikuttavat esimerkiksi ilmastoon (sadanta, lämpötila, routatilanne jne.), maaperän laatuun, esiintymän ominaisuuksiin ja maanpeitteeseen liittyvät tekijät. Suomessa pohjaveden muodostuminen on suurinta keväällä sulamisvesien johdosta sekä syksyllä syysateiden ja pienen haihdunnan takia. Pohjaveden muodostuminen on vähäisintä kesällä suuren haihdunnan ja kasvukauden vuoksi sekä talvella lumipeitteen ja erityisesti roudan vuoksi. Pohjavedenpinta tyypillisesti nousee keväällä ja syksyllä sekä laskee kesällä ja talvella (Okkonen 2011; Luoma & Okkonen 2014). Sään vaihtelulla ja ilmastomuutoksella on suora vaikutus pohjaveden muodostumiseen ja pinnankorkeuteen. Ilmaston lämpeneminen aiheuttaa paikoin lumipeitteen ohentumista ja lumisen vuodenaika lyhenee. Myös routajakso saattaa lyhentyä tai maa pysyä kokonaan sulana leutoina talvina.

Toisaalta loppukesä ja syksy voivat olla aiempaa runsassateisempia. Ilmastonmuutoksen vaikutukset pohjaveden muodostumiseen on tärkeää ottaa huomioon, kun suunnitellaan uusia vedenottamoja ja tarkistetaan toiminnassa olevien vedenottamojen ottomääriä.

RAINMAN-projektin tutkimustavoitteet

Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) koordinoima RAINMAN-projekti (*Towards higher adaptive capacity in urban water management*) kehitti ratkaisuja pohjaveden hyvän tilan turvaamiseksi muuttuvassa ilmastossa (Geologian tutkimuskeskus 2021). Projektissa selvitettiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia hydrologiaan, pohjaveden muodostumiseen sekä pohjavesivaroihin kahdella eri pohjavesialueella: Mikkelin Hanhikankaalla ja Lahdessa (kuva 1).

Mikkelin Hanhikankaan harjumuodostuman pohjavesialueen pinta-ala on noin 3,5 km², josta pohjaveden varsinaisen muo-



Kuva 1. Mikkelin Hanhikankaan ja Lahden tutkimusalueiden sijainti (1a) sekä pohjavesialueet maaperä- ja laserkeilauskartalla muodostumisalueineen sekä virtausmallinnusalueineen: Mikkelin Hankikankaan alue (1b) ja Lahden pohjavesialue (1c). Pohjakarttojen lähteet: peruskartta ja laserkeilausaineisto 0,5 p © Maanmittauslaitos (7/2023), pohjavesialueet © SYKE ja ELY-keskukset, maaperäkartta 1:20 000 © Geologian tutkimuskeskus (2023).

Figure 1. Locations of the study sites (1a) and maps of superficial deposits, groundwater protection areas and groundwater modeling areas with the hill-shaded LiDAR DEM of Hanhikangas-Mikkeli (1b) and Lahti (1c) study sites. Background maps: Basemap and LiDAR DEM 0.5 p © the National Land Survey of Finland (7/2023); groundwater areas © SYKE and ELY Centres, Quaternary geological map 1:20 000 © Geological Survey of Finland (2023).

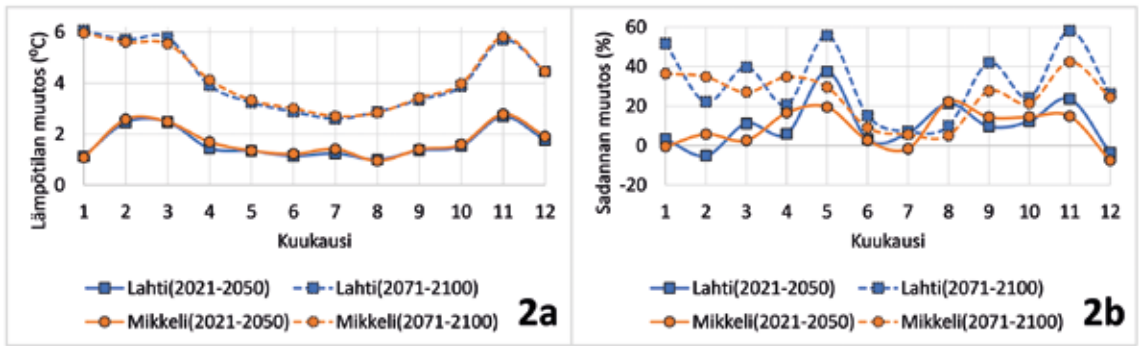
dostumisalueen pinta-ala on 3,21 km². Hanhikankaalla muodostuu pohjavettä arviolta 1 700 m³ vuorokaudessa. Lahden pohjavesialue on osa ensimmäisen Salpausselän reunamuodostumaa. Lahden pohjavesialueen kokonaispinta-ala on noin 33,25 km², josta pohjaveden varsinaista muodostumisaluetta on 15,88 km². Arvio Lahden pohjavesialueella muodostuvan pohjaveden määrästä on 30 000 m³ vuorokaudessa. Molemmat pohjavesialueet sijaitsevat kaupunkialueilla ja rajautuvat osittain pintavesiin. Pohjavesi muodostuu sadannasta ja lumen sulamisvesistä sekä rantaimetyymisen kautta.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset ennakoitaan pohjavesivirtausmallien avulla

Mikkelin Hanhikankaan sekä Lahden pohjavesialueille tehtiin pohjaveden virtausmallit

(Hyvönen ym. 2021; Luoma ym. 2022), joiden avulla voitiin simuloida ilmastonmuutoksen vaikutuksia pohjaveden muodostumiseen, pohjavedenpinnan korkeuteen sekä purkautumiseen eri aikaväleillä tulevaisuudessa. Pohjaveden virtausmallinnukset tehtiin kahdessa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tehtiin ajansuhteen muuttumaton malli (*steady state*) ja toisessa vaiheessa ajansuhteen muuttuva virtausmalli (*transient*). Ajansuhteen muuttuvassa mallissa simuloidaan pohjaveden muodostumisen ja virtauksen vuodenaikaisvaihtelua sekä tutkitaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia pohjavedenpinnan korkeuteen tulevaisuudessa. Pohjaveden virtausmallit tehtiin UZF-MODFLOW-NWT-ohjelmistolla. Malleille laskettiin päivittäinen sadanta, lumen sulanta ja haihdunta sekä arvioitiin pintaveden ja pohjaveden vuorovaikutusta.

Pohjavesisimulaatioissa käytettiin Ruotsin ilmatieteen ja hydrologian laitoksen (*Sveriges*



Kuva 2. Kuukausittaisen keskilämpötilan muutos (2a) ja kuukausittaisen sadannan muutos (2b) Lahdessa ja Mikkeliissä skenaarioissa SMHI-RCA4 ja RCP8.5 vuosille 2021–2050 ja 2071–2100 verrattuna vuosiin 1981–2010. Kuva muokattu lähteestä Klein ja Luoma (2020).

Figure 2. Change in mean monthly temperature (2a) and mean monthly precipitation (2b) in Lahti and Mikkeli in scenarios SMHI-RCA4 and RCP8.5 for the periods 2021–2050 and 2071–2100 compared with 1981–2010. Modified from Klein and Luoma (2020).

meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI tekemää alueellista RCA4-ilmastomallia, jonka taustalle valittiin hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC) RCP8.5-päästöskenaario. Tämä päästöskenaario osoittaa kasvihuonekaasujen määrän mahdollista kehityskulkua, jos kasvihuonekaasujen päästöt kasvavat nykytahdilla. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia pohjavedenpinnan tasoihin simuloitiin aikaväleillä 2021–2050 ja 2071–2100, ja tuloksia verrattiin aikaväliin 1981–2010 (nykyilmasto).

Mallinnuksen tulokset

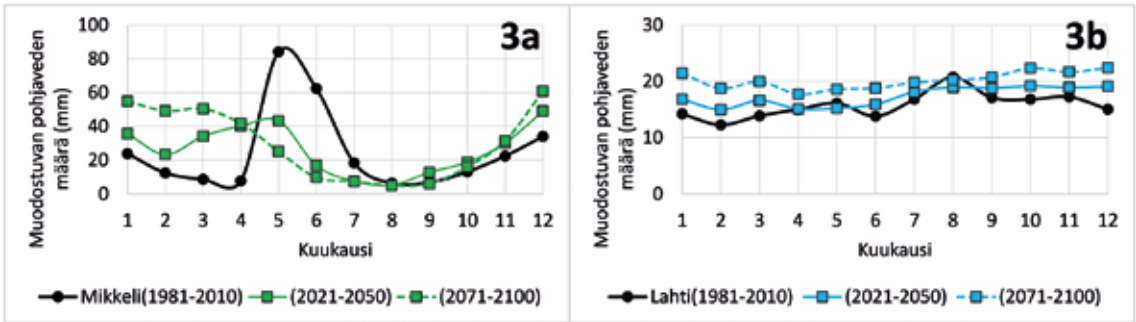
Ilmastomallin RCA4 ja päästöskenaarion RCP8.5 perusteella lämpötilan nousun arvioidaan olevan sekä Lahdessa että Mikkeliissä vuosina 2021–2050 noin 0,9–2,8 °C ja vuosina 2071–2100 noin 2,6–6,1 °C (kuva 2). Lämpötilan nousun arvioidaan olevan pienintä kesällä ja suurinta talvikuu-kausina. Suurin ennustettu keskilämpötilan nousu on 6,1 °C talvikuu-kausina vuosina 2071–2100. Keskimääräinen vuosisadanta kasvaa sekä Lahdessa että Mikkeliissä noin 8,6–10,4 prosenttia vuosina 2021–2050 ja 25–31 prosenttia vuosina 2071–2100. Suurinta sulamisvesimäärän kasvua ennakoidaan

vuosien 2071–2100 talvikuu-kausille, koska myös lämpötilan ennustetaan nousevan silloin eniten (Klein & Luoma 2020; Jarva ym. 2022). Skenaariotietojen lämpötilamuutokset ovat samassa trendissä vuosien 1961–2021 havaintotietojen kanssa, kun taas saman ajanjakson sadantatietojen havainto ei osoittanut merkittäviä muutostrendejä (Luoma ym. 2022).

Lämpötilan muutokset näyttävät vaikuttavan pohjaveden muodostumiseen tutkimusalueilla. Pohjavesimallinnustulosten mukaan tulevaisuudessa nykyistä lumien sulamisesta ja kevätvalunnasta johtuvaa loppukevääseen ja alkukesään sijoittuvaa pohjavedenpinnan nousua ei ole enää kummallakaan tutkitulla pohjavesialueella erotettavissa: pohjavedenpinnan nousu aikaistuu tammi-toukokuulle (kuva 3).

Nykyiseen nähden muodostuvan pohjaveden määrä kasvaa alkuvuodesta ja keväällä, mutta muutos pohjavedenpinnan korkeudessa on kuitenkin keskimäärin vain alle metrin molemmilla pohjavesialueilla. Kesä- ja syyskesäaikaan pohjavedenpinta hieman alenee nykyiseen verrattuna. Loppukesän, syksyn ja alkutalven aikana pohjavedenpinnan tasot eivät juurikaan poikkea nykyisestä.

Muodostuvan pohjaveden määrän vaihtelu riippuu pohjaveden etäisyydestä maanpinnasta. Alueella, missä pohjavedenpinnan taso



Kuva 3. Keskimääräinen muodostuvan pohjaveden määrä ajanjaksoilla 1981–2010, 2021–2050 ja 2071–2100 Mikkelin Hanhikankaan (3a) ja Lahden (3b) pohjavesialueilla.

Figure 3. Mean monthly groundwater recharge during the periods 1981–2010, 2021–2050 and 2071–2100 in Hanhikangas-Mikkeli (3a) and Lahti (3b) groundwater areas.

on lähellä maanpintaa – kuten Mikkelin Hanhikankaan pohjavesialueella – pohjaveden muodostumisen vaihtelu on riippuvainen sateen ja lumen sulamisveden määrästä ja muutokset saattavat näkyä nopeasti. Vähäsateisina kesinä myös talousveden kysyntä kasvaa ja erityisesti pienillä pohjavesimuodostumilla pohjavedenottoa on mahdollisesti rajoitettava. Toisaalta kausina, jolloin sade- ja sulamisvesien määrät ovat suuria, voi pohjavedenpinnan nousu lyhentää pohjaveteen imeytyvän veden suotautumisaikaa. Tämä voi heikentää pohjaveden laatua. Pohjavedenpinnan nousun myötä pohjavettä voi päästä myös maanpinnalle, mikä voi aiheuttaa lähellä maanpintaa sijaitseissa esiintymissä tulvimista. Lisäksi suuri sade- ja sulamisvesien määrä voi aiheuttaa vesistöjen pinnankorkeuden nousua ja tulvimista, jolloin pintavettä pääsee imeytymään enemmän lähitöällä oleviin pohjavesiesiintymiin.

Alueella, jossa vedellä kyllästymätön maakerros on paksu – kuten suurimmassa osassa Lahden pohjavesialuetta – pohjaveden muodostuminen on vähäisempää ja kestää kauemmin. Tällaisissa muodostumissa maaperän läpi suodattava vesi täyttää ensin kyllästymättömän kerroksen huokokset ja suodattuu vasta sitten pohjavesiesiintymään. Kuivina kausina maaperään imeytyvä vesi ei välttämättä riitä täyttämään kyllästymättömän kerroksen

huokosia, mikä voi johtaa pohjavedenpinnan laskemiseen. Lahden pohjavesialueella pohjavesimuodostumaan imeytyvän veden määrään vaikuttavat myös laajat päällystetyt alueet, jotka kattavat noin 51 prosenttia koko pohjavesialueen pinta-alasta. Vettä läpäisemättömät materiaalit, kuten betoni tai asfaltti, estävät erityisesti kaupungin keskustassa sade- ja hulevesien imeytymisen maaperään. Tämä hankaloittaa pohjaveden muodostumista, ja pohjavedenpinnan taso alenee. Lisäksi rankkasateet aiheuttavat muutoksia valunnassa ja tulvia taajama-alueilla.

Ilmastostenaarion mukainen lämpötilan nousu ja sadannan lisääntyminen aiheuttavat muutoksia valunnassa, pohjaveden muodostumisessa, pintavesien vedenpintojen korkeuksissa sekä pinta- ja pohjaveden vuorovaikutukseen. Stabiilien isotooppien ja mallinustulosten mukaan nykyisellä keskimääräisellä pumppausmäärällä molemmissa pohjavesialueissa tapahtuu merkittävää pintaveden suotautumista pohjavedeksi. Tällöin pääosa ottamalla pumpatusta vedestä on pintavesistöistä pohjavedeksi suotautunutta ja siihen sekoitunutta pintavettä (maksimissaan noin 70–90 prosenttia).

Ilmastonmuutosskenaario ennustaa nopeaa lämpötilan nousua ja sadannan vaihtelua. YK:n Maailman ilmatieteen järjestön (*World*

Meteorological Organization, WMO) tuoreen raportin mukaan (Yhdistyneet Kansakunnat 2023) El Niño -sääilmiön ja ihmisen aiheuttaman ilmastomuutoksen seurauksena on 66 prosentin mahdollisuus, että maapallon vuosittainen keskilämpötila ylittää 1,5 asteen ainakin yhtenä vuonna kauden 2023–2027 aikana. Lämpötilan nousu tulee vaikuttamaan selvästi lumen kertymiseen, lumipeitteisten kausien keston ja lumen sulamisprosesseihin. Kesäkuukausina jatkuva lämpötilan nousu voi lisätä haihduntaa, vähentää muodostuvan pohjaveden määrää ja alentaa pohjaveden pintaa. Lämpötilan nousulla sekä sadannan muutoksilla on suoria ja suhteellisen nopeitakin vaikutuksia pohjavesivaroihin sekä pinta- ja pohjaveden vuorovaikutukseen.

FT SAMRIT LUOMA

(samrit.luoma@gtk.fi)

FM ARTO HYVÖNEN

(arto.hyvonen@gtk.fi)

FT JAANA JARVA

(jaana.jarva@gtk.fi)

TKT JARKKO OKKONEN

(jarkko.okkonen@gtk.fi)

FM ANU ESKELINEN

(anu.eskelinen@gtk.fi)

Geologian tutkimuskeskus

TKT JOHANNES KLEIN

(johannes.klein@demoshelsinki.fi)

Demos Helsinki

Samrit Luoma (erikoistutkija), Arto Hyvönen (geologi) ja Jarkko Okkonen (erikoistutkija) työskentelevät GTK:lla pohjaveden virtausmallintajina Hydrogeologia ja mallinnus -ryhmässä Vesiratkaisut-yksikössä. Jaana Jarva työskentelee GTK:lla Ympäristöratkaisut-yksikössä johtavana asiantuntijana tutkimusaloinaan ympäristögeologia ja pohjavesi. Anu Eskelinen työskentelee GTK:lla Vesiratkaisut-yksikössä Pohjavesimuodostumien geologia ja 3D -ryhmän ryhmäpäällikkönä tutkimusaloinaan pohjavesi-

alueiden rakenneselvitys ja pohjavesitiedonhallinta. Johannes Klein työskenteli pitkään GTK:lla ja vuodesta 2023 alkaen Demos Helsingillä erikoistutkijana tutkimusaloinaan taajama- ja aluesuunnittelu ja ilmastomuutokseen sopeutuminen.

Summary

Climate change impacts on groundwater recharge – Case studies from Hanhikangas-Mikkeli and Lahti sites

The impact of climate change on groundwater recharge and groundwater resources in Hanhikangas-Mikkeli (an esker aquifer) and Lahti (a I-Salpausselkä ice-marginal formation) sites (Fig. 1) was assessed using the integration of the 1D unsaturated zone flow (UZF) model coupled with the 3D MODFLOW for a fully integrated flow modeling of the infiltration from ground surface through unsaturated zone flow to the groundwater table where the groundwater recharge, evapotranspiration, and surface leakage were estimated. Snowmelt and potential evapotranspiration (PET) models were calculated to provide the infiltration data for the model. Climate change scenario from the RCA4 regional climate model of the Swedish Meteorological Hydrological Institute (SMHI) with the RCP8.5 emission scenario was used. The simulation results from the periods, 2021–2050 and 2071–2100 were used to compare with the current (1981–2010) data (Fig. 2).

The simulation results revealed that the significant changes in infiltration patterns occur in winter and spring in both periods, where snowmelt and infiltration take place earlier in winter. The high infiltration during spring (April) in current condition does not exist in the scenario data. In the summer and late summer months, the groundwater level will decrease slightly compared to the current situation, but there is no significant change in groundwater levels during autumn and early winter. In both study areas, the mean

groundwater level increases less than one meter in both periods 2021–2050 and 2071–2100 compared with the current condition. Less change in the variability of groundwater recharge is expected in Lahti, due to the thick vadose zone and the impervious surface cover in the urban area. The infiltration capacity of the aquifer is limited by the impervious surface in the urban area. With the increase in the snowmelt and rainfall in the scenario data, the large part of the excess water will contribute to the runoff. This could induce more the potential stormwater flood risk from the snowmelt.

Lähdeluettelo

- Geologian tutkimuskeskus, 2021. RAINMAN – Towards higher adaptive capacity in urban water management. <http://projects.gtk.fi/rainman> [19.7.2023]
- Hyvönen, A., Okkonen, J. & Klein, J., 2021. Mikkelin Hanhikankaan pohjavesialueen virtausmalli ja ilmastomuutoksen vaikutusten mallintaminen alueen pohjavedenpintoihin aikaväleillä 2021–2050 ja 2072–2100. Geologian tutkimuskeskus, GTK:n työraportti 48/2021, 29 s.
- Jarva, J. (toim.), Klein, J. (toim.), Akentyeva, E., Eskelinen, A., Fasolko, D., ym., 2022. The RAINMAN project. General recommendations on adapting water management practices to climate

- change impacts in eastern and southern Finland and St. Petersburg. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 6/2022, 48 s.
- Klein, J. & Luoma, S., 2020. Regional Climate Change Scenarios for the Water Management in Lahti and Mikkeli. Geologian tutkimuskeskus, GTK:n työraportti 61/2019, 24 s.
- Luoma, S., Eskelinen, A., Jarva, J. & Okkonen, J., 2022. Groundwater flow modelling for an assessment of climate change impacts on groundwater recharge at the Lahti aquifer, southern Finland. Geologian tutkimuskeskus, GTK:n työraportti 03/2022, 66 s.
- Luoma, S. & Okkonen, J., 2014. Impacts of Future Climate Change and Baltic Sea Level Rise on Groundwater Recharge, Groundwater Levels, and Surface Leakage in the Hango Aquifer in Southern Finland. *Water* 6, 3671–3700. <https://doi.org/10.3390/w6123671>
- Okkonen, J., 2011. Groundwater and its response to climate variability and change in cold snow dominated regions in Finland: methods and estimations. Artikkeliväitöskirja. Teknillinen tiedekunta, Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Oulun yliopisto, 78 s. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789514297014.pdf>
- Yhdistyneet Kansakunnat, 2023. WMO: Vuoden 2023 alku rikkoo ennätyksiä <https://unric.org/fi/wmo-vuoden-2023-alku-rikkoo-ennatyksia/> [19.7.2023]

Kuvan 1 maaperäpohjakartan lähde

GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n maaperä 1:200 000 aineistoa © Geologian tutkimuskeskus. Lisenssin osoite: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>

Hydrogeologia, globaalimuutos ja Geologian tutkimuskeskus

JARI HYVÄRINEN

Taustaa

Lähestulkoon kaikki nestemäinen makea vesi on pohjavettä. Pohjavesiympäristön olosuhteiden ymmärtäminen ja hydrogeologinen tutkimus ovat entistäkin tärkeitä ilmaston-

muutoksen edetessä. Globaalimuutos käsittää ilmastomuutoksen lisäksi myös maapallon väestömäärän kasvun ja maankäytön tiivistymisen aikaansaamat vaikutukset ympäristölle. Muodostuvan pohjaveden määrään ja laatuun