

Elli Teinilä

ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUKSET POHJAVETEEN

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Elli Teinilä: Ilmastonmuutoksen vaikutukset pohjaveteen
The impact of the climate change on groundwater
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kesäkuu 2023

Ilmastonmuutos on maapallolla luonnostaan tapahtuvaa ilmastollisten olojen vaihtelua. Tällä hetkellä käynnissä on kuitenkin luonnollista ilmastonmuutosta merkittävästi nopeammin tapahtuva ihmisen aiheuttama ilmastonmuutos, joka johtuu suurista kasvihuonekaasupäästöistä, ja jonka seurauksena lämpötila on noussut huomattavasti vain muutaman sadan vuoden aikana. Tässä työssä tarkastellaan ihmisen aiheuttaman ilmastonmuutoksen vaikutuksia pohjaveden määrään ja laatuun sekä tulevaisuudessa mahdollisesti esiintyviin haasteisiin pohjaveden riittävydessä Suomessa. Lisäksi pohditaan ilmastonmuutoksen ja mahdollisten pohjaveden muutosten vaikutuksia rakennetulle ympäristölle. Työn tarkoituksena on tarkastella, vaikuttaako ilmastonmuutos Suomen pohjavesivarantojen täyttymiseen ja kasvaako pohjaveden pilaantumisriski.

Työ on toteutettu kirjallisuustutkimuksena. Ilmastonmuutosta ja pohjavettä on käsitelty omina ilmiöinä. Lisäksi on tarkasteltu, miten ilmastonmuutos muuttaa esimerkiksi pohjavesivarojen täydentymissykliä. Ilmastonmuutoksen tulevaisuudensuunnan arviointiin on käytetty hallitusten välisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n laatimia ilmastonmuutosskenaarioita, joihin myös Suomea koskevat ilmastonmuutosennusteet perustuvat.

Suomen ilmastonmuutosennusteissa ilmastonmuutos näkyy erityisesti talvilämpötilojen nousuna ja sateisuuden lisääntymisenä. Ennusteiden mukaan kesien hellejaksot tulevat pitkittymään ja voimistumaan. Talvien runsas sadanta johtaa pohjaveden määrän kasvuun talvisin, kun taas kesien pitkät kuivuusjaksot ja voimistunut haihdunta vähentävät pohjaveden määrää. Tulevaisuudessa pohjavedestä voi olla pulaa loppukesästä erityisesti Etelä-Suomessa.

Kirjallisuusselvityksen perusteella havaittiin, että ilmastonmuutos voimistaa ilmaston ääri-ilmiöitä ja voi siten aiheuttaa ajoittaisia haasteita veden riittävydessä, mutta kokonaisuudessaan pohjaveden määrä ei tule merkittävästi muuttumaan. Tulvat ja kuivuus voivat kuitenkin kumpikin heikentää pohjaveden laatua ja siten lisätä vedenkäsittelyn tarvetta sekä toisaalta aiheuttaa haasteita rakennetulle ympäristölle. Pohjavedenpinnan aleneminen voi johtaa maan painumiin, kun taas tulvat heikentävät maan kantavuutta. Rakennetun ympäristön pitkän käyttöiän takaamiseksi jo suunnitteluvaiheessa on osattava ottaa huomioon muuttuvan ilmaston aiheuttamat haasteet sekä ennakoida tulevaisuuden tarpeita. Pohjaveden määrä ja laatu vaikuttavat rakennettavuuden lisäksi esimerkiksi perustamistapaan ja -kustannuksiin.

Avainsanat: ilmastonmuutos, ilmasto, skenaario, pohjavesi, kuivuus, tulvat.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ILMASTONMUUTOS	2
2.1 Ilmastonmuutos ilmiönä	2
2.2 IPCC:n ilmastonmuutoskkenaariot	3
2.3 Ilmastonmuutos Suomessa	4
3. POHJAVESI.....	8
3.1 Pohjaveden muodostuminen.....	8
3.2 Pohjaveden virtaus	10
3.3 Alueellinen ja vuodenaikainen vaihtelu.....	11
3.4 Pohjaveden laatu ja seuranta.....	13
4. KUIVUUS.....	16
4.1 Pohjavedenpinnan lasku	16
4.2 Kuivuuden vaikutus pohjaveden käytettävyyteen	18
4.3 Pohjaveden ylikulutus	21
5. TULVAT	23
5.1 Pohjavedenpinnan nousu.....	23
5.2 Tulvien ja rankkasateiden vaikutus pohjaveden laatuun.....	23
5.3 Tulvien vaikutus rakentamiseen	24
6. YHTEENVETO.....	28
LÄHTEET.....	30

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos on yksi aikamme merkittävimmistä ympäristöhaasteista. Ilmastonmuutoksen vaikutusten tiedetään olevan laajoja ja moniulotteisia, mutta varmaa tietoa yksittäisistä muutoksista ei ole. Tämän vuoksi on laadittu ilmastoskenaarioita eli keskenään vaihtoehtoisia mahdollisia kehitysnäkymiä tulevaisuuden ilmastosta (Tieteen termipankki 2014). Ilmastoskenaario perustuu asiantuntija-arvioihin tulevaisuuden säätiloista sekä oletuksiin ilmastoon vaikuttavista tekijöistä. Ilmastoskenaarioita tuottaa IPCC (*eng. Intergovernmental Panel on Climate Change*), joka on kansainvälinen ilmastomuutosta tutkiva organisaatio (Tieteen termipankki 2014).

Suomessa ilmastomuutoksen on ennustettu nostavan lämpötiloja ja lisäävän sateisuutta erityisesti talvisin sekä lisäävän pitkiä kuivuusjaksoja kesäisin. Näiden muutosten vaikutuksesta pohjaveden määrä talvisin kasvaa ja kesäisin mahdollisesti vähenee. (Suomen ympäristökeskus 2016) Ilmastomuutoksen arvioidaan nostavan Suomen keskilämpötilaa noin neljä astetta seuraavan sadan vuoden kuluessa sekä lisäävän sateita merkittävästi (Ala-Outinen et al. 2004, s. 7). Erityisesti voimistuvat rankkasateet voivat johtaa tulvien yleistymiseen ja voimistumiseen. Myös tulvariskialueiden määrä ja laajuus saattaa kasvaa.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, miten eri ilmastomuutosskenaariot vaikuttavat pohjaveden laatuun ja määrään Suomessa. Lisäksi pohditaan, mitä vaikutuksia mahdollisilla pohjaveden muutoksilla on rakennetussa ympäristössä. Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena. Työssä tutustutaan aluksi ilmastomuutokseen ja pohjaveteen omina ilmiöinä luvuissa 2 ja 3. Neljännessä luvussa käsitellään kuivuuden vaikutusta pohjaveden määrään ja laatuun sekä tarkastellaan pohjaveden kulutuksen kestävyttä maailmanlaajuisesti. Viidennessä luvussa käsitellään tulvien vaikutuksia pohjaveteen ja rakentamiseen. Viimeisessä eli kuudennessa luvussa kootaan yhteen tärkeimmät johtopäätökset työn sisällöstä.

2. ILMASTONMUUTOS

2.1 Ilmastonmuutos ilmiönä

Ilmastonmuutos on maapallon eri osissa luonnostaan tapahtuvaa ilmastollisten olojen vaihtelua, jota voi tapahtua useilla eri aikaväleillä (Tieteen termipankki 2019). Luonnollista ilmastonmuutosta on tapahtunut koko maapallon olemassaolon ajan. Pitkällä aikavälillä ilmaston vaihtelu on ilmennyt kylminä jääkausina ja niiden välisinä lämpimämpinä jaksoina. Esimerkiksi viimeisimmän jääkauden, Veikselin, kylmimpinä aikoina 20 000 vuotta sitten maapallon keskilämpötila oli noin kuusi astetta nykyistä alhaisempi. Sen sijaan 80–100 miljoonaa vuotta sitten ilmasto oli erittäin lämmin, ja jopa Etelänavan lähialueet olivat metsän peitossa. Näiden pitkäaikaisten muutosten lisäksi ilmasto voi muuttua lyhyellä aikavälillä esimerkiksi suuren tulivuorenpurkauksen vaikutuksesta. (Ilmatieteen laitos a)

Tämänhetkisen ilmastonmuutoksen odotetaan pahimmillaan vastaavan suuruudeltaan viimeisimmän jääkauden lämpötilamuutoksen suuruutta, mutta lämpimään suuntaan. Merkittävä ero on kuitenkin muutoksen nopeudessa, sillä ihmisen aiheuttama ilmastonmuutos on tapahtunut nopeasti vain muutaman sadan vuoden aikana. Viimeisimmän jääkauden jälkeen ilmasto ei ole juurikaan vaihdellut, mikä on mahdollistanut monien eliöiden sopeutumisen juuri näihin olosuhteisiin. Liian nopea ja voimakas muutos on suuri haaste ekosysteemien ja ihmiskunnan sopeutumiselle. (Ilmatieteen laitos b)

Ilmastonmuutoksen merkittävin aiheuttaja on kasvihuonekaasujen mahdollistama kasvihuoneilmiö. Kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä on lisännyt merkittävästi fossiilisten polttoaineiden käyttö sekä kotieläintuotanto ja metsien hakkuun lisäämä metsäkato. Monia kasvihuonekaasuja esiintyy ilmakehässä luonnostaan, mutta ihmisen toiminnan seurauksena erityisesti hiilidioksidin, metaanin, typpioksiduulien ja fluorikaasujen määrä on lisääntynyt. Näistä eniten ilmaston lämpenemistä aiheuttaa hiilidioksidi, jonka pitoisuus ilmakehässä on noussut noin 48 % esiteollisen ajasta. (Euroopan komissio)

Ilmastonmuutos tulee tutkimusten mukaan muuttamaan vesi- ja maaekosysteemien rakennetta ja toimintaa. Esimerkiksi ekosysteemien tuottavuus ja ravintoketjun suhteet sekä tautien leviäminen tulevat muuttumaan. Samalla fyysinen elinympäristö muuttuu, kun lämpötila nousee ja ilmaston ääriolosuhteet yleistyvät ja voimistuvat. Kokonaisuudessaan ekosysteemien kierron nopeus ja yhteydet muihin ekosysteemeihin

muuttuvat. Ihmiskunnalle ilmastonmuutos aiheuttaa sekä inhimillisiä että taloudellisia kustannuksia. (Grimm et al. 2013)

2.2 IPCC:n ilmastonmuutosskenaariot

Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n kuudes ja viimeisin ilmastonmuutosta koskeva arviointiraportti *AR6* on julkaistu vuosina 2021–2022. Raportin ensimmäisessä osassa on käsitelty ilmastonmuutoksen luonnontieteellistä ja fysikaalista taustaa. Raportissa on esitetty viiden eri päästöskenaarion perusteella muodostettuja mahdollisia ilmastonmuutosskenaariota.

Ensimmäinen skenaario *SSP1-1.9* on optimistisin skenaario, jossa ilmastonmuutoksen aiheuttaman lämpötilannousun arvioidaan nousevan 1,5 astetta esiteollisesta ajasta ja pysähtyvän vuoteen 2050 mennessä. Optimistisin skenaario kuvaa maailmaa, jossa globaalit hiilidioksidipäästöt leikataan nolnaan vuoteen 2050 mennessä. Samalla yhteiskunnissa siirrytään kestävämpiin käytäntöihin ja painopiste siirtyy talouskasvusta yleiseen hyvinvointiin. Äärimmäiset ilmasto-olosuhteet ovat yleisempiä, mutta ilmastonmuutoksen pahimmat vaikutukset onnistutaan välttämään. Skenaario 1 on ainoa, joka täyttää vuonna 2015 solmitun Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteen pitää ilmaston lämpeneminen 1,5 asteessa. Skenaarion mukaan lämpötilannousu tasaantuu 1,4 asteeseen vuosisadan loppuun mennessä. (IPCC 2021, s.12–14)

Toiseksi parhaassa skenaariossa *SSP1-2.6* lämpötila nousee 1,8 astetta vuoteen 2100 mennessä. Tässä skenaariossa globaaleja hiilidioksidipäästöjä leikataan rajusti, mutta ei yhtä voimakkaasti kuin ensimmäisessä skenaariossa. Päästöt laskevat nolnaan vasta vuoden 2050 jälkeen. (IPCC 2021, s.12–14)

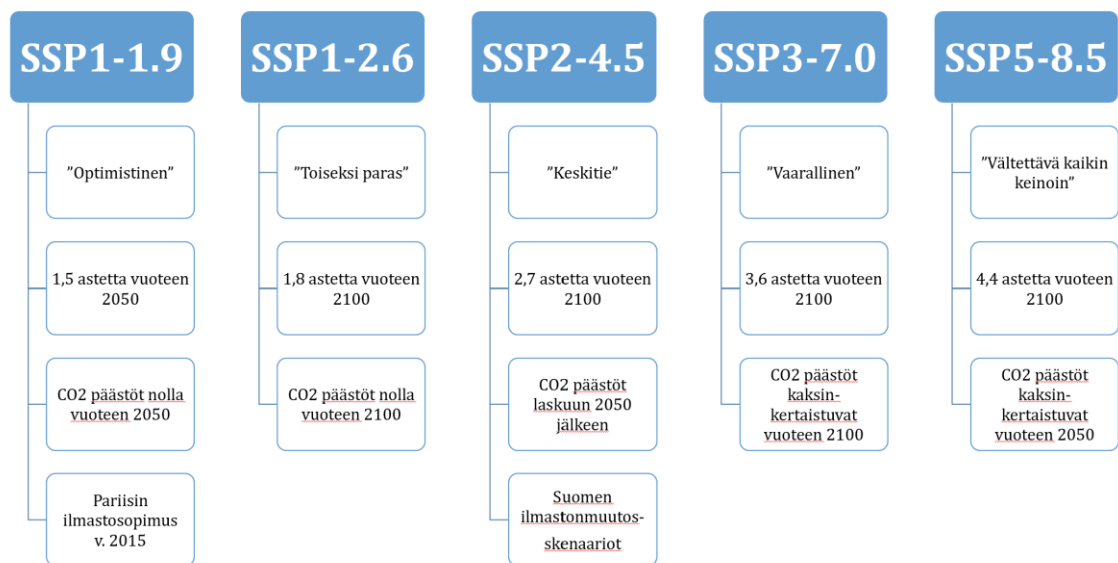
Kolmas skenaario *SSP2-4.5* on niin kutsuttu ”keskitie”, jossa lämpötilannousu on 2,7 astetta vuoteen 2100 mennessä. Hiilidioksidipäästöt pysyvät nykyisellään pitkään ja alkavat laskea vasta vuosisadan puolivälissä, mutta eivät saavuta nolnaa vuoteen 2100 mennessä. Muutos kohti kestävä kehitystä on hidasta ja epätasaista. (IPCC 2021, s.12–14) Uusimmat Suomea koskevat ilmastoennusteet perustuvat tähän skenaarioon.

Neljäs skenaario *SSP3-7.0* on niin kutsuttu ”vaarallinen” skenaario, jossa lämpötila nousee 3,6 astetta vuoteen 2100 mennessä. Tässä skenaariossa päästöt ja lämpötila nousevat tasaisesti ja hiilidioksidipäästöt jopa kaksinkertaistuvat vuoteen 2100 mennessä. (IPCC 2021, s.12–14)

Huonoimmassa skenaariossa *SSP5-8.5* lämpötila nousee 4,4 astetta vuosisadan loppuun mennessä ja hiilidioksidipäästöt kaksinkertaistuvat jo vuoteen 2050 mennessä.

Globaali talous kasvaa nopeasti, mutta kasvun taustalla ovat fossiilisten polttoaineiden runsas hyödyntäminen ja energiantensiivinen elämäntyyli. IPCC:n mukaan tämän skenaarion toteutumista tulisi pyrkiä välttämään kaikin tavoin. (IPCC 2021, s.12–14)

Kuvaan 1 on koottu ilmastonmuutosskenaariot ja niiden taustalla olevat hiilidioksidipäästöskenaariot. Suomen ilmastonmuutosennusteet perustuvat skenaarioon *SSP2-4.5*, mutta poliittisessa päätöksenteossa pyritään saavuttamaan skenaarion *SSP1-1.9* mukaiset päästötavoitteet ja pysäyttämään ilmastonmuutos jo puoleentoista asteeseen.



Kuva 1. IPCC:n ilmastonmuutosskenaariot. (Koostettu lähteestä IPCC 2021, s. 12–14)

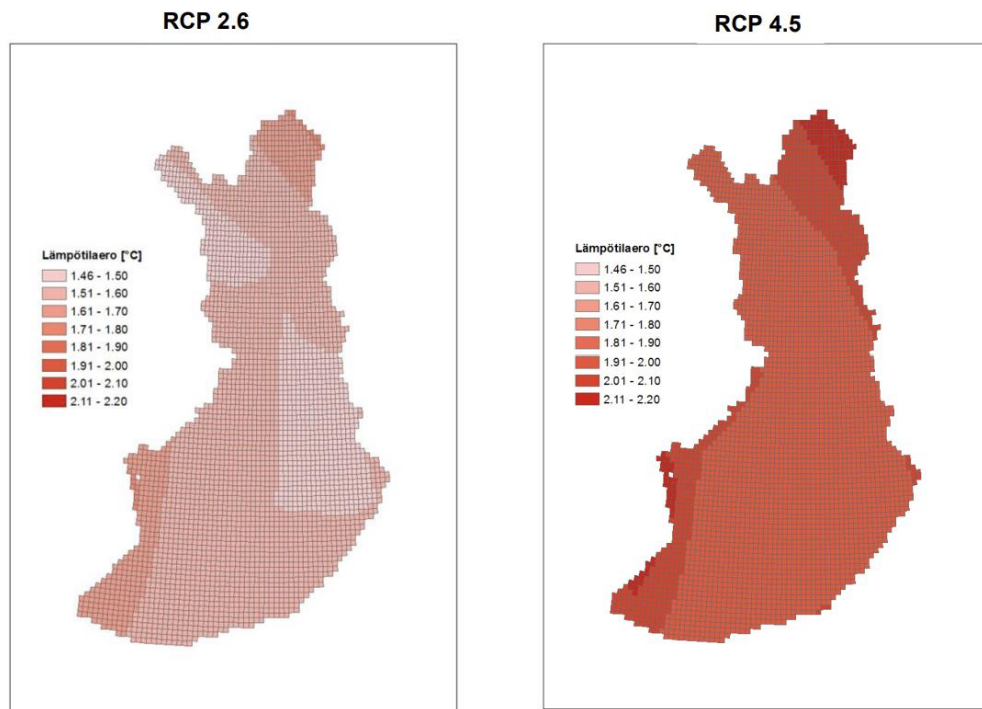
Ilmastonmuutosraportti ei ota kantaa siihen, mikä skenaario on todennäköisin, vaan pyrkii tuomaan esille, miten tämän päivän valinnat vaikuttavat tulevaisuuteen. Kussakin skenaariossa lämpeneminen jatkuu vähintään muutaman vuosikymmenen ajan.

2.3 Ilmastonmuutos Suomessa

Uusimmat Suomea koskevat ilmastonmuutosennusteet on päivitetty vuonna 2022 maailmanlaajusten ilmastonmuutosmallien tulosten perusteella. Uuden laskennan perustana on käytetty keskitason kasvihuonekaasupäästöjen skenaariota *SSP2-4.5*, joka on vastaavanlainen kuin aiempien arvioiden taustalla ollut *RCP4.5*-kasvihuonekaasuskenaario. Uusien ilmastonmuutosennusteiden mukaan Suomessa talven keskilämpötila nousee 2–7 astetta ja kesän 1–5 astetta vuoteen 2100 mennessä. (Jylhä & Lehtonen 2022) Ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvät siis talvilämpötilojen nousussa voimakkaammin kuin kesien. Lämpötilan nousun vaikutuksesta talvien hyvin alhaiset lämpötilat tulevat vähenemään ja kesän hellejaksot yleistymään (Orvomaa

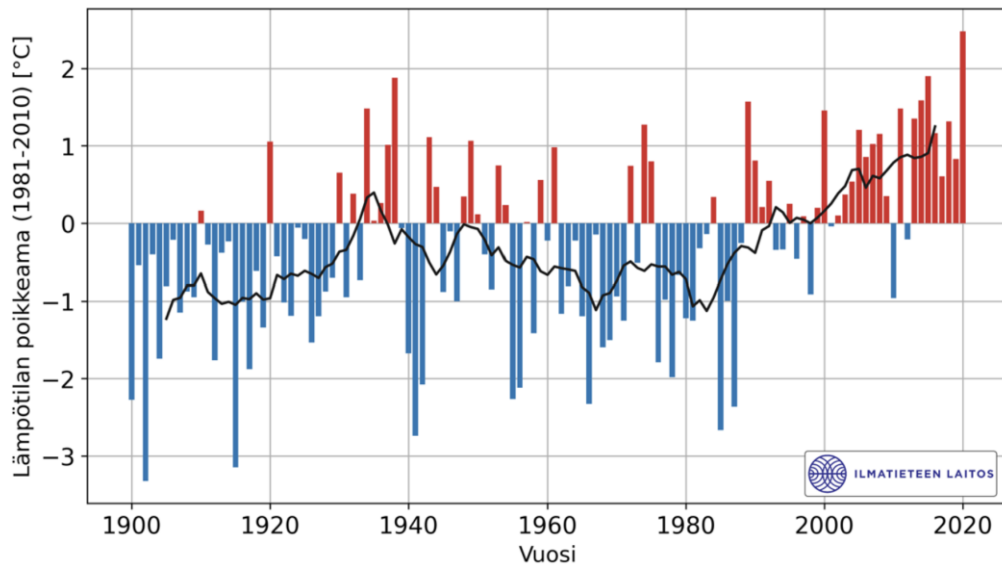
2020). Talvilämpötilojen nousu voi lisätä jäätymis-sulamissykliä määrää. (Haulos et al. 2023)

Kuvassa 2 on esitetty heinäkuun keskilämpötilan ennustettu muutos RCP-kasvihuonekaasuskenaarioissa. Uuden laskennan mukainen SSP2-4.5 skenaario vastaa oikeanpuoleista kuvaa (RCP4.5). Vasemmanpuoleinen kuva vastaa hillitymmän päästöskenaarion lämpötilanmuutosta. Lämpötilanmuutos on esitetty vuosille 2040–2069 ja vertailujaksona on käytetty vuosia 1981–2010.



Kuva 2. Heinäkuun keskimääräisen lämpötilan muutos asteina vertailukaudesta 1981–2010 vuoteen 2040–2069 skenaarioissa RCP2.6 ja RCP4.5. (Meriläinen et al. 2019)

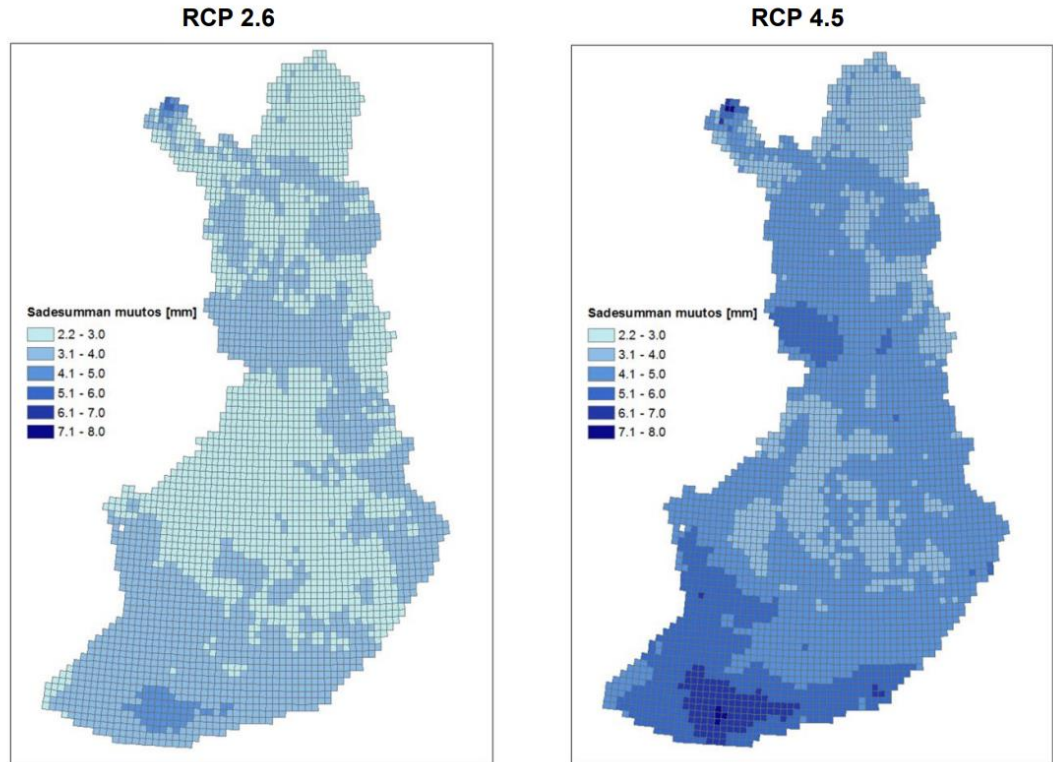
Ilmastonmuutoksen aiheuttama lämpötilannousu voidaan havaita tarkastelemalla pidemmän aikavälin lämpötilankehitystä. Yksittäisen vuoden sääoloista ei voida päätellä ilmastonmuutoksen vaikutuksia lämpötilaan. Kuvasta 3 voidaan nähdä, että Suomen keskilämpötila on noussut viimeisen sadan vuoden aikana ja nousu on kiihtynyt viime vuosikymmeninä.



Kuva 3. Suomen keskilämpötilan kehitys vuosina 1900–2020. Punaiset pylväät kuvaavat yli 0 asteen ja siniset alle 0 asteen vuosittaisia keskilämpötiloja. (Sariola 2021)

Lämpenemisen lisäksi ilmastonmuutoksen ennustetaan kasvattavan sademäärää. Suomen keskimääräinen vuotuinen sadanta on 500–700 mm. Vähiten sataa Perämeren rannikolla ja Pohjois-Lapissa ja eniten maan etelä- ja itäosissa. Suurten päästöjen skenaarion toteutuessa vuoden kokonaissademäärä kasvaisi noin 20 % vuosisadan lopulle tultaessa. Muissa päästöskenaarioissa kasvu jäisi noin 5–10 %:iin. (Lehtonen et al. 2020, s.18)

Sademäärän vuosittaisen vaihtelun ennustaminen on lämpötilanmuutosta epävarmempaa, koska sademäärän vuosien välinen vaihtelu on ennustettua kasvua suurempaa. (Lehtonen et al. 2020, s. 18) Kuvassa 4 on esitetty lokakuun keskimääräisen sademäärän muutos vuosina 2040–2069 verrattuna jakson 1981–2010 keskiarvoon. Vasemmanpuoleisen kuvan tilanne vastaa matalampien päästöjen skenaariota ja oikeanpuoleinen uuden laskennan mukaista SSP2-4.5 skenaariota. Kuvista voidaan nähdä, että sateisuus kasvaa eniten Suomen eteläosissa.



Kuva 4. Lokakuun keskimääräisen sadesumman muutos millimetreinä vertailukaudesta 1981–2010 vuoteen 2040–2069 skenaarioissa RCP2.6 ja RCP4.5. (Meriläinen et al. 2019)

Sademäärien on arvioitu lisääntyvän Suomessa vuosisadan loppuun mennessä kesällä 0–20 % ja talvella 1–40 %. Sadannan odotetaan kasvavan siis erityisesti talvisin. (Meriläinen et al. 2019) Sadannan rankkuuden on ennustettu voimistuvan, sillä sadepäivien määrä ei välttämättä kasva (Ilmatieteen laitos 2021). Kesällä voimakkaammat rankkasateet voivat lisätä sademäärää, mutta kokonaisuudessaan veden määrä tulee laskemaan lämpötilojen nousun ja pidempien hellejaksojen vuoksi. Myös kevään aikaistuminen ja haihdunnan lisääntyminen vähentävät maahan imeytyvän veden määrää erityisesti loppukesästä. (Syke 2016) Myrskyjen ei arvioida voimistuvan, mutta maan jäätyminen väheneminen voi johtaa tuulituhojen lisääntymiseen. (Ilmatieteen laitos 2021)

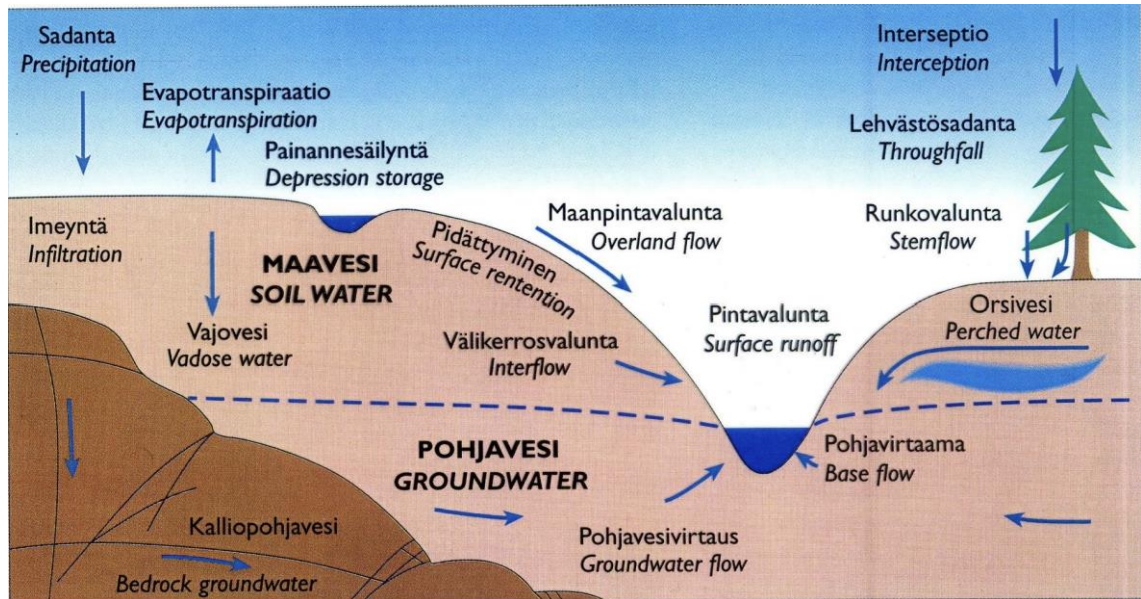
3. POHJAVESI

Pohjavesi on maa- ja kallioperään varastoitunutta vettä. Suomessa on yli 5000 pohjavesialuetta, jotka tuottavat yhteensä 5,4 miljoonaa kuutiota vettä vuorokaudessa. (GTK 2019). Pohjavesi on merkittävä makean veden lähde, josta valtaosa suomalaisista saa talousvetensä.

3.1 Pohjaveden muodostuminen

Pohjavesi on sade- ja sulamisvesistä maaperään imeytynyttä vettä, joka kulkee maaperän huokosissa ja kallioperän raoissa. Vesi puhdistuu suotautuessaan maakerroksen läpi ja samalla siihen liukenee erilaisia aineita. Pohjaveden muodostumisalue on yleensä vedenottamon yläpuolisessa maastossa tai, jos kyseessä on tasainen maasto, vedenottamon ympärillä. Muodostumisalue ulottuu normaalisti jopa satojen metrien päähän lähteestä, mutta kalliossa pidemmällekin. Geologiset muodostumat määrittelevät pitkälti pohjaveden esiintymistä ja varastoitumista. Pohjavesivarastoa ja pohjavedenpinnan tasoa säätelevät eniten sadanta ja haihdunta. (Ojala 2022a)

Kuvassa 5 on esitetty pohjaveden muodostuminen ja siihen liittyvät tärkeimmät käsitteet. Sinisellä katkoviivalla on erotettu toisistaan maa- ja pohjavesivyöhykkeet. Pohjavesivyöhyke on täysin kylläinen vyöhyke, jossa kaikki raot tai huokoset ovat täysin veden täyttämiä. Pohjavesivyöhykkeen yläpinnassa on kapillaarivyöhyke, jonka pinta vaihtelee pohjavedenpinnan ja maaperän huokoskoon mukaan. Kapillaarivyöhyke on kulkeutumisen kannalta olennainen vyöhyke. Vajovesivyöhyke on pohjaveden yläpuolinen, kyllästymätön vyöhyke, jossa vesi painuu alaspäin kohti pohjavesivyöhykettä. Maavesi on pohjavedenpinnan yläpuolella olevaa maaperään sitoutunutta tai vapaana olevaa vettä. (Leveinen)



Kuva 5. Pohjaveden muodostuminen. (Leveinen)

Keskimäärin 10–30 % maanpinnalle tulevasta vedestä imeytyy pohjavedeksi (Ojala 2022a). Pohjaveden määrään ja pinnan tasoon vaikuttavat muun muassa sadannan rankkuus ja vuodenaika. Pohjavedenpinnan korkeusasema voi vaihdella 0,1–1,0 m ja on korkeimmillaan keväällä lumien sulettua ja syksyllä syysateiden jälkeen. Vedenpinta laskee talvisin vähän ja kuivan alkukesän aikana merkittävästi. Pinnankorkeuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten maaperän maalajit ja kerrospaksuudet, pohjavesimuodostuman koko, alueen maantieteellinen sijainti ja kasvillisuus sekä ilmasto-olosuhteet. (Orvomaa 2020) Pitkät kuivuusjaksot tai pohjaveden runsas käyttö voivat vähentää pohjaveden määrää. (Syke 2022a)

Pohjavettä muodostuu parhaiten alueilla, joiden maaperä on karkeaa ja huokoista eli hyvin vettä läpäisevää. Tällaisia maalajeja ovat hiekka, sora sekä karkearakeiset moreenit. Savikoilla pohjavettä ei muodostu, sillä tiivis maa estää veden imeytymisen. (GTK 2019)

Pohjavettä varastoivaa ja johtavaa yhtenäistä geologista muodostumaa kutsutaan akviferiksi (Syke 2022). Akviferit voidaan jakaa vapaisiin ja paineellisiin, joista vapaassa akviferissa pohjaveden pinnan ja ilmakehän paine ovat samansuuruiset. Paineellinen akviferi muodostuu vettä läpäisemättömän kerroksen alapuolelle salpavedeksi, joka ei pääse purkautumaan normaalisti. (Ojala 2022a)

Aika on yksi pohjaveden muodostumiseen vaikuttava tekijä. Suurissa, syvissä akvifereissa pohjavesi liikkuu hitaasti, muutaman metrin vuodessa, jolloin pohjaveden muodostuminen ja purkautuminen alueella kestää satojen tai jopa tuhansien vuosien ajan. Pienissä, matalissa akvifereissa pohjaveden virtaaminen on nopeaa ja veden

vaihtumista mitataan kuukausissa tai vuosissa. Pienissä akvifereissa muodostumis- ja purkautumisalueet voivat olla paljon lähempänä tai jopa kiinni toisissaan. Jako hitaisiin ja nopeisiin akvifereihin on usein vain kuvainnollinen, sillä monesti akviferit ovat yhteydessä toisiinsa. (Ojala 2022a) Suomen merkittävimmät akviferit sijaitsevat harjuissa ja reunamuodostumissa. Runsastuottoiset akviferit on luokiteltu pohjavesialueiksi. Luokiteltuja pohjavesialueita on Suomessa kaikkiaan noin 5000. (Syke 2023).

3.2 Pohjaveden virtaus

Pohjaveden virtaukseen ja maan vedenläpäisevyyteen vaikuttaa huokoisuus. Tämän vuoksi maa-aineksen raekokojakauma ja suhteistuneisuus sekä maaperän tiiviys ja rakeiden järjestyneisyys ovat tärkeitä tekijöitä, kun tarkastellaan virtausta ja vedenläpäisevyyttä. Esimerkiksi soralla ja hiekalla on erittäin hyvä vedenjohtavuus ja niihin varastoituu hyvin vettä. Toisaalta vesi myös poistuu huonon ominaispidätyksen ansiosta hyvin, jolloin sorassa ja hiekassa kulkeva vesi on niin kutsuttua nopeaa pohjavettä. Sen sijaan tiivis moreeni ja kallioperä johtavat vettä heikosti, ja moreeniin tai kallioperään päätyneet vesi kulkeekin hitaasti ja kiertäen useinkin kauan. Kierron pituus vaikuttaa pohjaveden uusiutumispotentiaaliin ja veden laatuun. (Ojala 2022a)

Vedenläpäisevyyteen vaikuttaa myös virtauskanavien määrä väliaineessa sekä niiden koko ja suoruus. Vedenläpäisevyys on suurinta, kun virtauskanavia on paljon, ne ovat suuria ja mahdollisimman suorina, jolloin vesi pääsee virtaamaan mutkittelematta. Mitä vapaammin vesi pääsee liikkumaan, sitä suurempi ominaisantoisuus maalajilla on ja sitä paremmin vesi virtaa kanavissa. (Ojala 2022a)

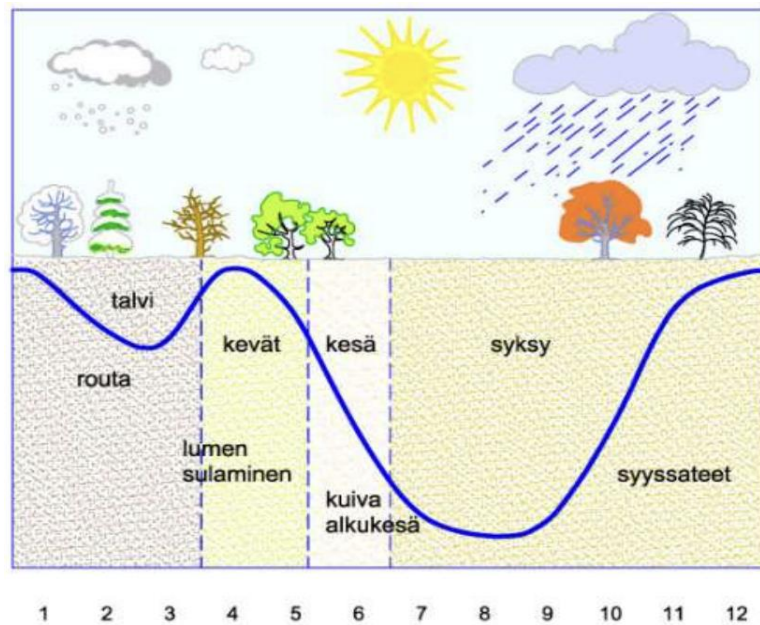
Virtaussuunnan määrittää hydraulinen gradientti, jonka vaikutuksesta pohjavesi virtaa aina kohti alempana sijaitsevia purkautumiskohtia. Darcyn lain mukaan vesi virtaa aina suuremmasta painekorkeudesta pienempään. (Ojala 2022a) Darcyn lakia käytetään pohjaveden virtausten arvioinnissa.

Pohjavesi on yleensä yhteydessä pintavesiin, ja se purkautuu lähteiden tai pintavesistöjen kautta. Vuorovaikutus ei ole yksisuuntaista, sillä suotautuminen voi tapahtua myös pintavedestä pohjaveteen tai pintavesi voi sekä vastaanottaa pohjavettä että luovuttaa pintavettä. Vuorovaikutukseen vaikuttaa pohjavedenpinta, sadanta, haihdunta, tilanne sekä topografia. (Ojala 2022a)

3.3 Alueellinen ja vuodenaikainen vaihtelu

Pohjavettä esiintyy lähestulkoon koko Suomessa, mutta pohjaveden määrä ja tuottoisuus vaihtelevat (Syke 2022). Pohjaveden määrää tarkasteltaessa on tärkeää ymmärtää, paljonko pohjavettä kulloinkin muodostuu ja miten sen määrä vaihtelee alueittain (Katro 2020).

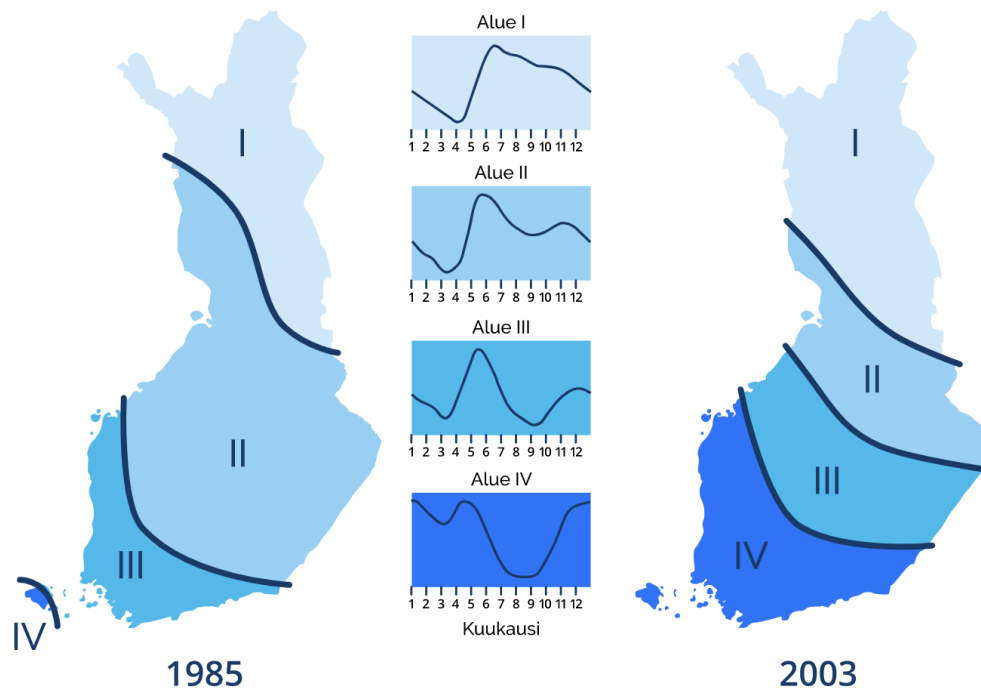
Kuvassa 6 on esitetty pohjaveden pinnankorkeuden vaihtelu vuodenajoin. Kuvasta nähdään, että pohjavedenpinta on alimmillaan loppukesästä elo-syyskuussa kesän hellejaksojen jälkeen. Korkeimmillaan pohjavesi on alkukevällä, kun talvella sataneen lumen sulamisvedet pääsevät imeytymään maahan sekä loppusyksyllä syysateiden jälkeen.



Kuva 6. Luonnontilainen pohjaveden pinnankorkeuden vaihtelu vuodenajoin. (Orvomaa 2020)

Kuvan 6 mukainen pohjavesien vuodenaikainen vaihtelu on tyypillisintä Etelä-Suomessa. Pohjoisemmaksi mentäessä kesähelteiden vaikutus pienenee ja talven kylmyysjaksojen vaikutus kasvaa, jolloin keväinen pohjavedenpinnan nousu siirtyy myöhäisemmäksi. Pohjaveden vuodenaikaisen käyttäytymisen perusteella Suomi voidaan jakaa neljään pohjavesivyöhykkeeseen. (Syke 2022d) Kuvassa 7 on esitetty pohjavesivyöhykkeet ja niiden muutos vuodesta 1985 vuoteen 2003. Ilmastonmuutos siirtää pohjavesivyöhykkeitä pohjoisemmaksi. Kuvasta 7 voidaan nähdä, että siirtymä on ollut huomattavaa jo alle 20 vuoden aikajaksolla.

Pohjoisimmalla vyöhykkeellä (alue I) pohjavesi on alhaisimmillaan huhtikuussa ja korkeimmillaan kesäkuussa. Etelämmäksi siirryttäessä pohjavedenpinnan korkeus kääntyy kasvuun jo aikaisemmin keväällä. Samalla kuivan loppukesän notkahdus voimistuu. Eteläisimmällä vyöhykkeellä pohjavesi on korkeimmillaan huhti-toukokuussa ja alimmillaan loppukesästä elo-syyskuussa. Alueet II ja III ovat näiden ääripäiden välimaastoa. (Syke 2022d)

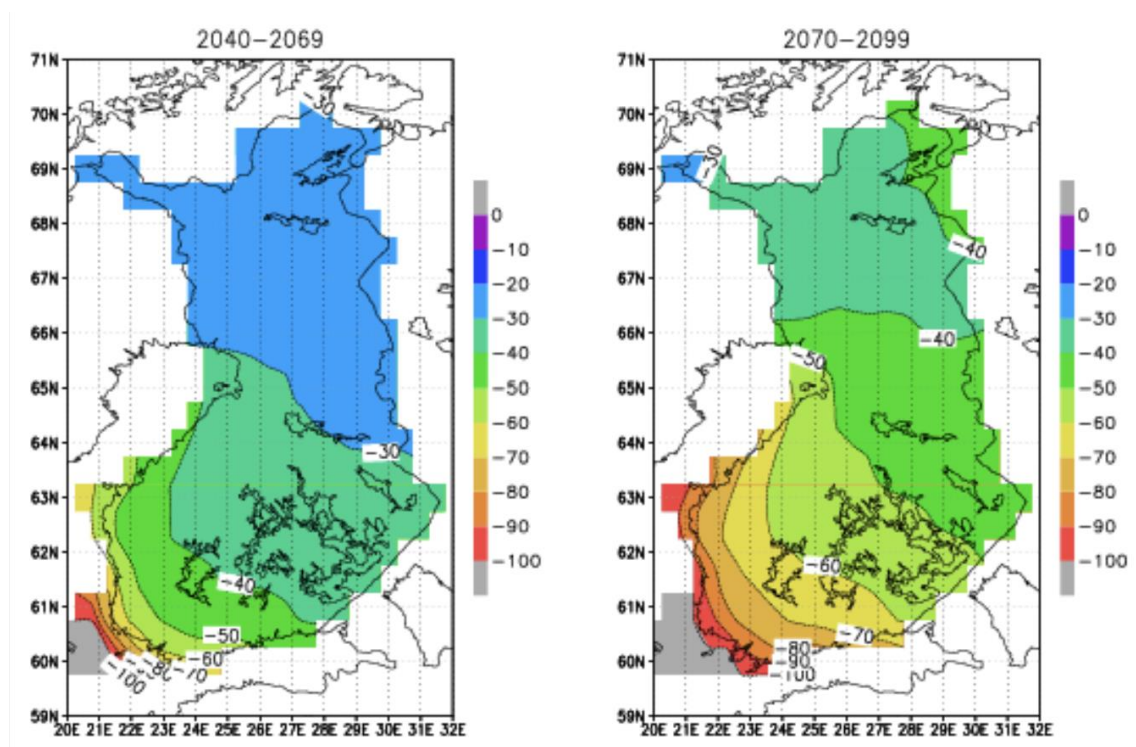


Kuva 7. Pohjavesivyöhykkeiden muutos vuodesta 1985 vuoteen 2003 sekä pohjaveden pinnankorkeuden vuodenaikaisvaihtelu vyöhykkeittäin. (Syke 2022d)

Talvisin lumi ja routa vaikuttavat syntyvän pohjaveden määrään. Lumena tuleva sadanta ei kasvata pohjavesivarantoa ja siten runsaskaan sadanta ei talvisin lisää pohjaveden määrää, vaan lumena tullut sadanta jää maastoon. Lisäksi routa estää veden imeytymisen maahan. Pohjavedenpinta kääntyy nousuun vasta, kun routa on sulanut ja sade- ja sulamisvedet pääsevät imeytymään maahan. Sulamisvedet nostavat keväällä pohjavedenpintaa nopeasti. Lapissa pohjavedenpinta laskee talven aikana tyypillisesti muuta maata alemmas ja lähtee nousuun vasta myöhemmin keväällä. (Syke 2022c)

Keskilämpötilojen nousu aikaistaa kevättä ja pidentää kesän kuivuusjaksoja. Tämä muutos heikentää pohjavesitilannetta loppukesällä ja syksyllä, kun kevään sulamisvesien tuoma täydennys ei riitä ylläpitämään pohjavesivarantoja koko kesää. Loppukesän kuivuus näkyy erityisesti Etelä- ja Keski-Suomessa. (Syke 2022d)

Kuvassa 8 on esitetty lumettomien alueiden routakerroksen ennustettu oheneminen ajanjaksoilla 2040–2069 ja 2070–2099. Vertailuajanjaksona on käytetty vuosien 1971–2000 routasyvyyyksiä. Suurimmat muutokset nähdään maan lounaisosissa, jossa routaa ei ole ennusteen mukaan enää laisinkaan. Roudaton alue laajenee länsirannikon suuntaisesti. Pohjoisemmaksi ja idemmäksi siirryttäessä roudan paksuus ohenee vähemmän.



Kuva 8. Lumettomien alueiden routakerroksen ennustettu oheneminen prosentteina. Vertailukohtana on jakso 1971–2000. (Ilmatieteen laitos c)

Ilmastonmuutos tulee kasvattamaan pohjaveden määrään talvisin. Syynä tähän ovat lumen ja roudan väheneminen sekä sadannan lisääntyminen. Kun talvet lämpenevät, suurempi osa sadannasta tulee vetenä. Myös roudan syvyys pienenee ja routa sulaa pois jo aikaisemmin keväällä, jolloin vesi pääsee imeytymään maahan entistä aikaisemmin. (Syke 2022c) Talvien lyhetyssä pohjavedet ovat nykyistä korkeammalla myös alkukevällä. (Syke 2022d)

3.4 Pohjaveden laatu ja seuranta

Suomessa pohjavesi on yleisesti laadultaan hyvää ja sitä syntyy runsaasti, noin kymmenkertaisesti käyttöön verrattuna. Suomessa 80 %:lle luokitelluista pohjavesialueista on tehty tila-arvio. Näistä arvioituista alueista 90 %:in tila on hyvä, eikä niihin kohdistu merkittäviä määrällisiä tai laadullisia riskejä. (Syke 2023)

Riskialueiksi luokiteltavia pohjavesialueita esiintyy erityisesti taajamissa, joissa pohjavesialueelle kohdistuu paljon toimintaa ja maankäyttöä. Esimerkiksi pohjavesialueella kulkevalla tiellä sattuva öljy- tai kemikaalionnettomuus on merkittävä riski pohjavedelle. Teiden suolaus lisää pohjaveden kloridipitoisuutta. (Syke 2023) Tällaisilla alueilla on kiinnitettävä erityistä huomiota pohjavesiin kohdistuvien riskien hallintaan sekä ohjattava riskejä aiheuttavaa rakentamista toisaalle.

Pohjavettä pyritään suojelemaan lainsäädännöllä. Yksi tärkeimmistä pohjavettä suojelevista laeista on ympäristönsuojelulaki (YSL, 527/2014), joka sisältää ehdottoman pohjaveden pilaamiskiellon (YSL 17§) sekä maaperän pilaamiskiellon (YSL 16§). Näillä turvataan pohjavesiä suoralta sekä maaperän kautta tapahtuvalta pilaantumiselta. Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä (1299/2004) määrää pohjaveden riittävästä laadusta sekä määrältään hyvästä tilasta. Hyvässä tilassa olevan pohjaveden heikentäminen ei ole sallittua. Vesilaissa (587/2011) säädetään muun muassa vedenoton luvanvaraisuudesta sekä lupiin liittyvistä velvoitteista. (Ympäristöministeriö)

Tärkeille pohjavesialueille tehdään suojelusuunnitelma, jossa tunnistetaan merkittävimmät riskitekijät ja laaditaan suositukset toimenpiteistä, joilla riskejä voidaan vähentää. Suojelusuunnitelma laaditaan ensisijaisesti pohjavesialueille, joita käytetään vedenhankinnassa tai joilla on runsaasti pohjaveden laatua tai määrää vaarantavaa toimintaa. Suunnitelman teosta vastaa kunta. Suojelusuunnitelman tavoitteena on ehkäistä pohjaveden laadun heikkenemistä sekä turvata pohjaveden saanti, mutta suunnitelmalla ei ole itsenäisiä oikeusvaikutuksia. (Syke 2022g)

Pohjaveden määrää ja laatua voidaan tutkia erilaisilla menetelmillä. Tavanomaisia tutkimusmenetelmiä ovat näytteenotto, kenttämittaukset ja pohjavedenpinnan korkeuden mittaaminen pohjavesiputkista sekä geofysikaalisten tutkimusmenetelmien soveltaminen. (Pohjavesitutkimusopas 2005)

Suomessa tietoa pohjaveden pinnankorkeuksista ja vedenlaadusta löytyy Suomen ympäristökeskuksen (Syke) aineistoista. Syke seuraa pohjaveden määrän ja laadun paikallisia ja ajallisia vaihteluita noin 80 pohjavesiasemalla eri puolilla Suomea. Asemat sijaitsevat mahdollisimman luonnontilaisilla alueilla, jotka on valittu edustamaan erilaisia hydrologisia ja geologisia olosuhteita. Pohjavesihavainnot on tehty 1970-luvun alkupuolelta lähtien ja havainnot on talletettu pohjavesirekisteriin. (Ojala 2022a)

Pohjaveden korkeushavainnot tehdään maahan pystysuoraan asennetuista havaintoputkista kahdesti kuussa. Putkia on jokaisella havaintoasemalla noin kymmenen. Pohjaveden laadun seuranta puolestaan tehdään 2–4 kertaa vuodessa.

Vesinäytteet otetaan ensisijaisesti aseman yhteydessä olevasta lähteestä, mutta jos lähde ei ole, otetaan näyte pohjavesivyöhykkeeseen asennetusta muovisesta pohjavesiputkesta. (Ojala 2022a) Tämän lisäksi vedenottamoilla on velvoite tarkkailla pumpattua vesimäärää ja pohjavedenpinnan korkeutta. Viime vuosina myös pohjaveden laatuun ja pohjavesistä riippuvaisiin ekosysteemeihin liittyviä tarkkailuvelvoitteita on lisätty. (Rintala 2019, s.9)

4. KUIVUUS

Kuivuus on maailmanlaajuinen haaste, joka valtaa jatkuvasti yhä uusia alueita. Vuosina 1998–2017 kuivuuden on arvioitu vaikuttaneen 1,5 miljardin ihmisen elämään ja aiheuttanut yli 124 miljardin dollarin taloudelliset kustannukset. Tulevaisuudessa kuivuusjaksojen ennakoitaan yleistyvän ja pahentuvan suuressa osassa maailmaa. (Laakso 2021) Suomessa kuivuusjaksojen yleistyminen ja pidentyminen voivat vaikeuttaa esimerkiksi pohjavettä käyttävien vesilaitosten toimintaa (Syke 2022d).

4.1 Pohjavedenpinnan lasku

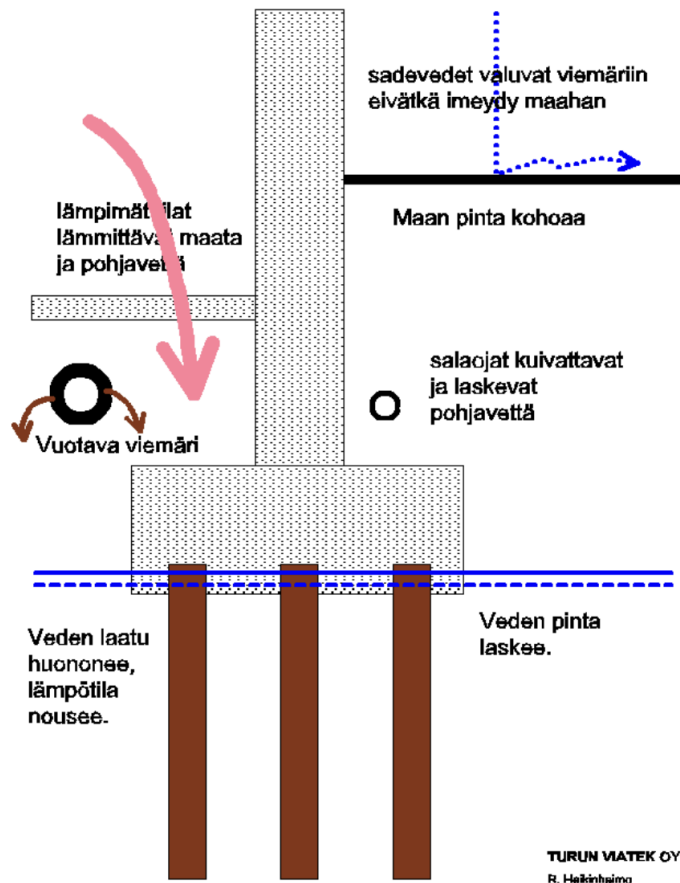
Suomessa kuivuutta voi esiintyä erityisesti loppukesästä, kun lisääntyvät ja voimistuvat kesän kuumuusjaksot sekä runsas haihdunta vähentävät pohjaveden määrää. Kuivuusjaksojen odotetaan yleistyvän ja pidentyvän tulevaisuudessa. Nopeimmin kuivuuden vaikutukset näkyvät pienissä pohjavesiesiintymissä, joissa veden kierto on nopeaa. (Syke 2022d) Pohjaveden määrän väheneminen voi johtaa laadullisiin ongelmiin. Laatuun kohdistuvat riskit ovat tärkeä tiedostaa, jotta niitä voidaan torjua ja ennaltaehkäistä. (Syke 2023)

Pohjaveden riittävyttä on arvioitava aluekohtaisesti ja arvioinnissa on otettava huomioon pohjavedenpinnan luonnollinen vaihtelu. Kuivuusjaksoihin varautuminen ja niiden ennakointi on helpompaa, kun tiedetään, milloin pohjavesi on luonnostaan matalammillaan, ja milloin pohjavesivarastot taas täyttyvät. Pinnankorkeuden sykli vaihtelee eri puolilla Suomea, minkä vuoksi pohjaveden riittävyttä ei voida arvioida koko Suomen laajuudella, vaan tarkastelu on tehtävä alueittain. (Syke 2022d)

Pohjavedenpinnan lasku vaikuttaa myös rakennettuun ympäristöön ja erityisesti maan sisällä kulkeviin rakenteisiin, sillä veden nostevaikutuksen katoaminen voi aiheuttaa maaperän painumista. Erityisesti savimailla maan painuminen voi aiheuttaa putkirikkoja ja esimerkiksi jätevesiputken rikko voi vaarantaa myös pohjaveden laadun. (Orvomaa 2020; Ala-Outinen 2004) Maan epätasainen painuminen voi aiheuttaa muutoksia viettoviemärien kaltevuuksiin ja siten muuttaa vesien virtaussuuntaa. Pohjavedenpinnan lasku vähentää myös paaluihin vaikuttavaa nostetta. Toisaalta veden poistuessa maasta maan kantokestävyys paranee.

Erityinen vaara pohjavedenpinnan aleneminen on alueilla, joilla rakennuksia on perustettu puupaalujen varaan. Puupaaluja on käytetty enimmäkseen eteläisen Suomen rannikkokaupungeissa, kuten Helsingissä ja Turussa. Pohjavedenpinnan korkeudella on merkitystä puupaaluille, koska paalun lahoaminen käynnistyy, kun pohjavesivesi laskee

ja puupaalu altistuu hapelle. Kuvassa 9 on esitetty syitä puupaalujen lahoamisen alkamiselle. Pohjavedenpinnan lasku voi tapahtua useista eri syistä, ja toisaalta myös pohjaveden huono laatu voi aiheuttaa lahoamista, jos puu joutuu kosketuksiin anaerobisten bakteerien kanssa. (Heikinheimo 2018)



Kuva 9. Puupaalun lahoamisen syitä. (Heikinheimo 2018)

Turun kaupungin rakennusjärjestyksessä 21 § 'Puisten perusrakenteiden huomioon ottaminen' määrätään rakentamisesta alueilla, joilla pohjavedenpinnan aleneminen voi aiheuttaa vaurioita rakenteisiin. Rakentamisella ei saa aiheuttaa pohjavedenpinnan laskua alueilla, joilla siitä voi olla haittaa perustuksille. (Turun kaupunki, s.14) Kuvassa 10 on esimerkki lahoavasta puupaalusta kerrostalon perustuksissa.



Kuva 10. Lahoava puupaalu kerrostalon perustuksissa. (Heikinheimo 2018)

Myös Helsingin kaupunki seuraa orsi- ja pohjaveden pinnankorkeuksien vaihtelua sekä niiden virtausta. Esimerkiksi Helsingin päärautatieasema on perustettu puupaaluille. (Kaura 2021)

4.2 Kuivuuden vaikutus pohjaveden käytettävyyteen

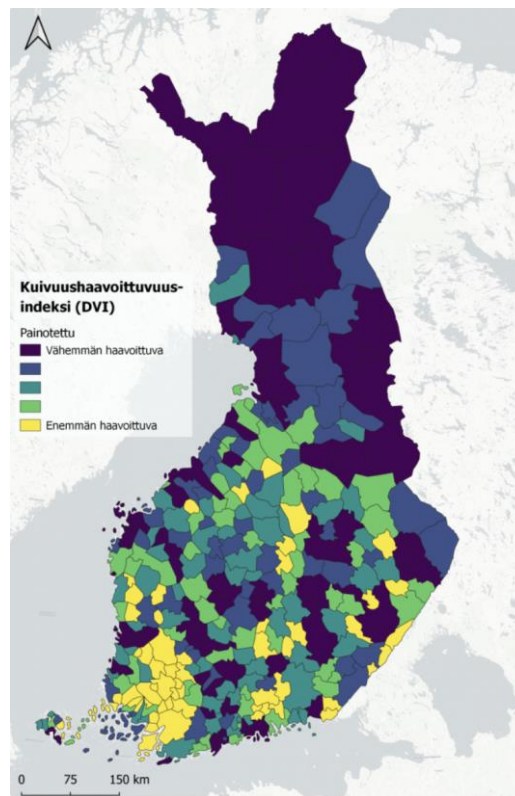
Suomessa pohjavesiesiintymät ovat pääosaksi pieniä, jolloin yhden alueen pilaantuminen ei aiheuta riskiä laajemmalle alueelle. Perinteisesti pohjaveden huono tila ei ole liittynyt veden määrään, vaan sen laatuun kohdistuviin riskeihin. (Syke 2022e) Kuivuus voi kuitenkin aiheuttaa riskejä myös pohjaveden määrään, kun pienten esiintymien vesivarastot eivät täyty normaalisti. Joissain tapauksissa pohjaveden käyttöä voidaan joutua jopa rajoittamaan.

Kuivuuden aiheuttama pohjavedenpinnan korkeuden aleneminen ja pohjaveden määrän väheneminen voivat heikentää veden laatua ja aiheuttaa mahdollisia maku- ja hajuhaittoja. Alhainen happipitoisuus nostaa muun muassa raudan ja mangaanin pitoisuuksia. Muutoksia voidaan havaita myös raakaveden pH-arvoissa sekä lämpötilassa. (Orvomaa 2020) Veden laadun heiketessä vedenkäsittelyä joudutaan lisäämään. (Syke 2022d)

Pohjavedenpinnan alenemisella voi olla myös positiivisia vaikutuksia. Pohjaveden alenemisen seurauksena pinnan yläpuolelle jää paksumpi maakerros, jolloin vedellä on pidempi suotautumismatka maan läpi. Pidemmän suotautumismatkan ansiosta vedestä voi tulla tavallista puhtaampaa. Toisaalta pohjavedenkäytön kustannukset voivat nousta, jos vettä joudutaan pumppaamaan syvemmältä maasta. Syvemmältä pumppaaminen

kuluttaa enemmän energiaa ja kaivoja voidaan joutua poraamaan syvemmälle maahan, jotta ylletään pohjaveteen.

Suomessa on viime vuosina alettu varautua kuivuusriskeihin. Kuivuusriskien hallinnan kehittämiseksi on aloitettu Kuivuusriskien hallinta Suomessa eli KUHASUO-hanke. Hanke on kaksivuotinen ja sen tavoitteena on luoda kansallinen prosessi ja ohjeistus kustannustehokkaaseen kuivuusriskien hallintaan. Kuvassa 11 on esitetty hankkeen alussa tehdyn kuivuusriskiarvioinnin tuloksena tunnistetut kuivuudelle alttiit ja haavoittuvat alueet. Haavoittuvuusarvioinnissa erilaisia haavoittuvuutta kuvaavia muuttujia on yhdistetty kuivuushaavoittuvuusindeksiksi. Kuvassa 11 keltaisella merkityt alueet ovat eniten haavoittuvia ja violetit alueet vähiten haavoittuvia. Arviointi on toteutettu kuntatasolla. (Snellman & Todovic 2022)

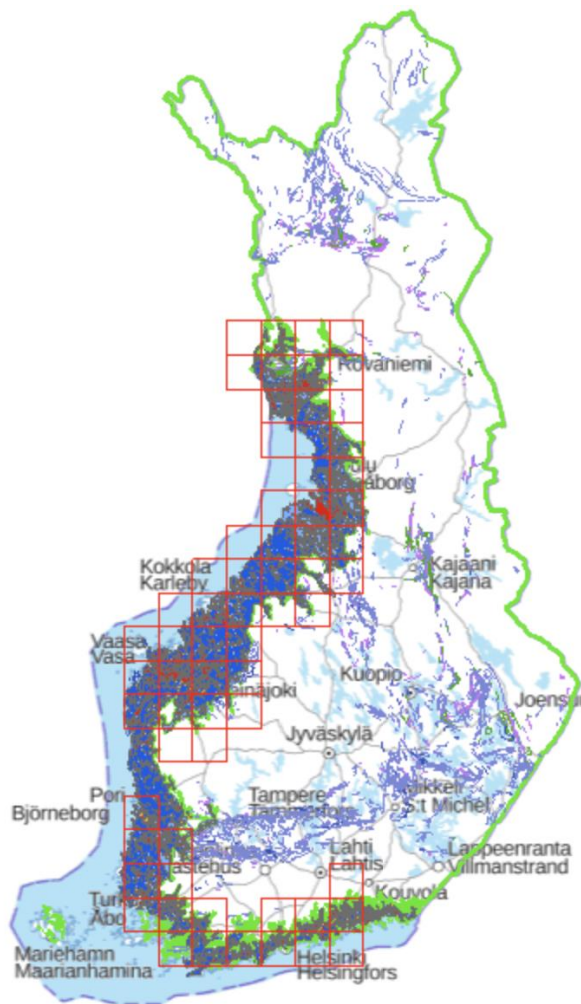


Kuva 11. Kuivuushaavoittuvuusindeksin jakautuminen kunnittain. (Snellman & Todovic 2022)

KUHASUO-hankkeessa kuivuusriskin pienentämiseksi listattuja keinoja ovat esimerkiksi vedensäästökehotukset, säännöstely ja kastelualtaat. Analyysin perusteella suurimmat haitalliset vaikutukset kuivuudella on maataloudelle, teollisuudelle, vesihuollolle ja haja-asutusalueille. Kuvasta 11 voidaan nähdä, että Varsinais-Suomen maatalousalueet ovat muuta maata haavoittuvimpia. (Snellman & Todovic 2022)

Suomen rannikkoseuduilla pohjavedenpinnan aleneminen tavanomaista alemmas voi aiheuttaa haasteita, kun potentiaalisesti happamat sulfaattimaat päätyvät kosketuksiin hapen kanssa. Maan kohoamisen vuoksi nämä litorinakaudella syntyneet maat sijaitsevat nykyään merenpinnan yläpuolella. Litorinakausi on nykyistä Itämeren edeltänyt suolainen merivaihe, jolloin merivesi oli nykyistä suolaisempaa ja lämpimämpää. Litorinameren aika alkoi noin 9 000 vuotta sitten, kun jääkauden sulamisvaiheessa valtameren pinta nousi Tanskan salmien tasolle ja suolasta vettä pääsi virtaamaan Itämeren altaaseen (GTK tietoaieisto). Sulfidimaakerrostuma on kemiallisesti vakaata ja neutraalia niin kauan kun pohjavedenpinta on sen yläpuolella, eikä se altistu hapelle. (Maaseutuverkosto 2009)

Kuvassa 12 on esitetty happamien sulfaattimaiden esiintyminen Suomessa. Kuvasta voidaan nähdä sulfaattimaiden sijaitsevan enimmäkseen länsi- ja etelärannikolla, vanhan merenpohjan alueilla.



Kuva 12. Happamien sulfaattimaiden esiintyminen Suomessa. (GTK kartta-aineisto)

Jos pohjavedenpinta laskee ja happamia sulfaattimaita pääsee muodostumaan, hapettumisen yhteydessä voi vapautua rikkihappoa, alumiinia ja raskasmetalleja. Seurauksena saattaa muodostua happamia ja metallipitoisia vesiä, jotka ovat haitallisia kulkeutuessaan vesistöön ja voivat pilata myös pohjavettä. (Syke 2022f)

4.3 Pohjaveden ylikulutus

Suomessa pohjavettä on runsaasti ja uutta pohjavettä syntyy huomattavasti nopeammin kuin vettä ehditään kuluttamaan. Näin ei kuitenkaan ole kaikkialla maapallolla. Pallomme rasittuneimmat pohjavesialueet löytyvät päiväntasaajan väkirikkaimmilta alueilta.

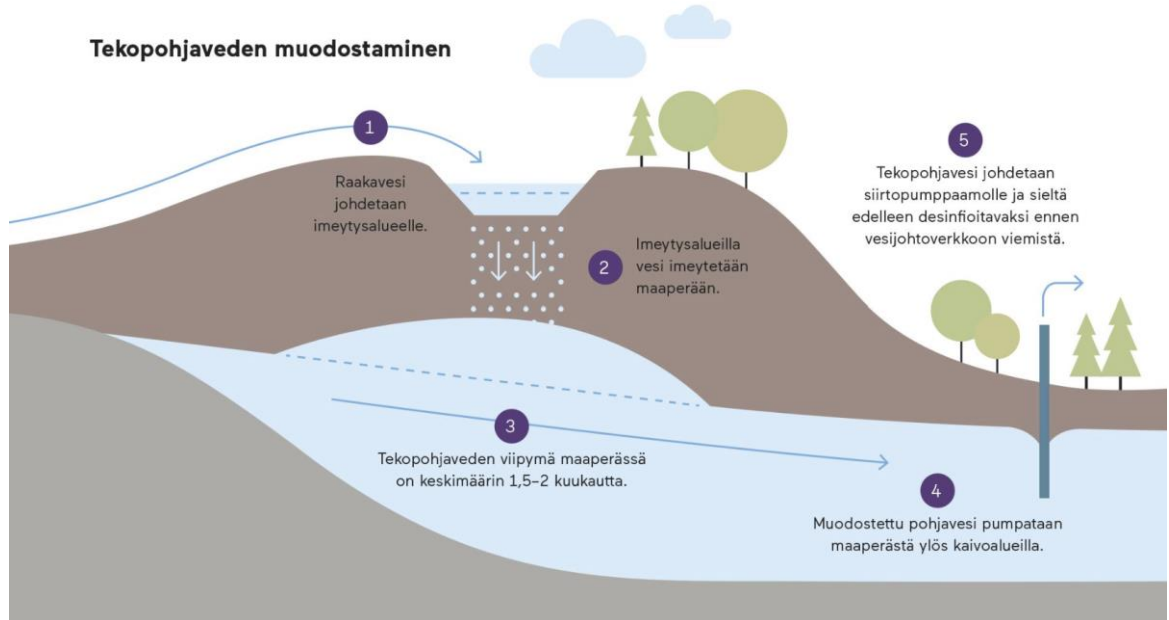
Yhdysvaltain avaruusliitto Nasan satelliittitiedon perusteella on tutkittu maapallon pohjavesialueita. Tutkimuksen mukaan maapallon 37 suurimmasta pohjavesialueesta 21 on ehtymässä ja 13 katsotaan olevan merkittävästi rasittuneita. Näistä 13:sta kahdeksan pohjavesialuetta on luokiteltu yllirasittuneiksi, joilla luonnollinen täyttö ei riitä kompensoimaan käyttöä ja viisi erittäin rasittuneeksi, joihin vettä virtaa takaisin edes vähän, mutta ei silti kylliksi täyttämään varantoja kulutuksen tahtiin. Pahiten rasittuneet pohjavesialueet sijaitsevat maapallon kuivimmilla ja väkirikkaimmilla alueilla, joilla vedenkulutuksen tarve on suuri. (Richey et al. 2015)

Vakavin tilanne on Arabian niemimaan pohjavesialueella, jonka vesivarastoja kuluttaa yli 60 miljoonaa ihmistä. Tämän jälkeen kuormitetuimpia pohjavesialueita ovat Luoteis-Intian ja Pakistanin Indus sekä Pohjois-Afrikassa sijaitseva Murzuk-Djako-pohjavesiallas. (Richey et al. 2015)

Satelliittitiedon perusteella voidaan arvioida pohjaveden määrää vain suuntaa antavasti. Varmaa tietoa pohjaveden määrästä tai kulutuksen nopeudesta ei ole. Tiedetään kuitenkin, että pohjavesivarannot hupenevat ja väestönkasvun seurauksena vettä kuluu jatkossa yhä enemmän. Ilmastonmuutos saattaa vaikuttaa pohjavesitilanteeseen voimistaen alueiden välistä epätasapainoa. Päiväntasaajalla ilmaston on ennustettu lämpenevän ja muuttuvan kuivemmaksi, mikä lisää ihmisten vedenkulutusta. Lisääntynyt haihtuminen ja vähentyneet sateet eivät kuitenkaan täytä pohjavesivarantoja entisellä tahdilla, joka nopeuttaa pohjavesivarastojen hupenemista. Samaan aikaan napaseutujen ilmasto muuttuu kosteammaksi ja pohjavesivarannot täyttyvät. (Kokkonen 2015)

Kun kuivuusjaksot lisääntyvät, käyttöveden saanti on yhä riippuvaisempi pohjavesivarannoista. Käytön voimakas lisääntyminen on suuri kuormitustekijä jo valmiiksi kuivuudesta kärsiville pohjavesivarannoille. Kun pohjavesivarantoja ei luonnostaan ole tai niiden täytyminen on hidasta, voidaan pohjavettä lisätä

keinotekoisesti johtamalla pintavettä akviferiin. Tällä tavoin tuotettua pohjavettä kutsutaan tekopohjavedeksi. Kuvassa 13 on esitetty tekopohjaveden muodostamisen vaiheet.



Kuva 13. Tekopohjaveden muodostamisen vaiheet. (Broman)

Tekopohjaveden avulla pohjavesiesiintymän antoisuutta saadaan kasvatettua ja veden viipymää lyhennettyä. Imeytyksessä käytettävän raakaveden on oltava hyvälaatuista ja veden viipymän tulisi olla vähintään 30–60 vuorokautta. Imeytetty vesi puhdistuu suotautuessaan maakerrosten läpi ja siitä tulee lähes pohjaveden veroista. (Ojala 2022b) Suomen kaikista pohjavesilaitoksista noin 30 on tekopohjavesilaitoksia. Tulevaisuudessa tämän osuuden arvellaan kasvavan. (Meriläinen et al. 2019)

5. TULVAT

Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö OECD:n (*eng. Organization for Economic Cooperation and Development*) mukaan tulvat ovat maailmanlaajuisesti yleisin ja maantieteellisesti laajimmalle alueelle levinnyt luonnonvaara. Tulvat vaikuttavat maailmanlaajuisesti vuosittain noin 250 miljoonan ihmisen elämään ja aiheuttavat yli 40 miljardin dollarin taloudelliset kustannukset. (OECD 2016, s. 9)

5.1 Pohjavedenpinnan nousu

Pohjavedenpinnan odotetaan nousevan Suomessa erityisesti talvisin, kun sademäärät kasvavat ja ilmasto lauhtuu. Lisäksi lumipeitteen oheneminen ja lyhyempi jäätyneen maan aika mahdollistavat pohjaveden imeytymisen pidemmällä ajalla. (Syke 2016) Runsas pohjaveden määrä ja täydet pohjavesivarannot pienentävät maan kapasiteettia imeyttää runsaan sadannan tuomaa vettä. Kun vesi ei pääse imeytymään maahan, se lähtee valumaan pintavaluntana. Suomessa maan kohoaminen kompensoi osittain ilmastomuutoksen aiheuttamaa pohjavedenpinnan nousua (Orvomaa, 2020).

Pohjavedenpinnan nousu voi aiheuttaa pohjavesitulvan. Pohjavesitulvia on tunnistettu tapahtuneen erityisesti Brittien saarilla kalkkipohjaisten pohjavesialueiden yhteydessä. Robins & Finch (2012) ovat jakaneet pohjavesiin liittyvät tulvat kahteen eri tyyppiin. Tyyppi yksi on niin kutsuttu ”todellinen pohjavesitulva”, jossa pohjavedenpinnan korkeus nousee maanpinnan korkeuden yläpuolelle. Tyyppiä 2 puolestaan esiintyy, kun pohjavesi pääsee purkautumaan lähteiden tai hyvin läpäisevien matalien kerrosten kautta pintavesiin ja aiheuttamaan tulvimista rantojen yli. Robins & Finch (2012) määrittelevät, että tyyppi 1 edustaa pohjavesitulvaa ja tyyppi 2 pohjaveden aiheuttamaa tulvaa. Nämä eivät kuitenkaan ole täysin vakiintuneita käsitteitä, vaan pohjaveteen liittyvistä tulvista puhutaan yleisesti pelkkinä pohjavesitulvina.

5.2 Tulvien ja rankkasateiden vaikutus pohjaveden laatuun

Pohjavedenpinnan nousu ohentaa pohjavedenpinnan yläpuolelle jäävän suojaavan maakerroksen paksuutta. Tällöin mahdolliset tulvat voivat olla riski pohjaveden laadulle, kun suodattava kerros on tavallista ohuempi. (Suomen ympäristökeskus, 2016) Kokonaisuudessaan vesimäärän lisääntyminen ja ilmaston lämpeneminen aiheuttavat riskejä pohjaveden laadulle, kun sateisuuden lisääntyminen lisää ravinne- ja mikrobihuuhtoumia ja tulvat edistävät epäpuhtauksien imeytymistä pohjaveteen, joiden lisäksi ilmaston lämpeneminen mahdollistaa mikrobien kasvun vesijärjestelmissä. (Meriläinen et al. 2019)

Tulvat ja rankkasateet voivat johtaa jätevesiverkoston kapasiteetin ylittymiseen ja siten ylivuotoihin. Jotta ylivuodot kyetään tulevaisuudessa pitämään hallittuina, täytyy vesihuoltoverkoston uusimistahtia kasvattaa. Muutoin lisääntyvät rankkasateet tulevat ylittämään kapasiteetin yhä useammin. Runsaat sateet aiheuttavat haasteita myös pohjavesilaitoksille. Yleisimmin ongelmia raakaveden mikrobiologisessa laadussa aiheuttavat tulvat, rankkasateet sekä pitkät sateiset jaksot. (Meriläinen et al. 2019) Talvi- ja rankkasateiden lisääntyminen kasvattaa myös taajamatulvien todennäköisyyttä ja voimakkuutta. Tämä lisää sadeviemäröinnin uusimis- ja saneeraustarpeen ohella myös eroosioriskiä.

Kesän lisääntyvät hellejaksot ja rankkasateet ovat haasteellinen yhdistelmä pohjaveden laadun kannalta, sillä kesän kuivuusjakson jälkeen rankkasateen tuomat sadevedet voivat päästä valumaan tavallista syvemmälle maahan, jos helle on aiheuttanut maan rakoilua tai halkeilua. Myös valumavesien määrä on suuri, kun kuivaan maahan ei ehdi imeytyä tarpeeksi vettä. Rankkasateiden tuomien valumavesien mukaan lähtee helposti epäpuhtauksia, kuten eläinten ulosteita ja roskaa. (THL 2018) Veden mukana kulkeutunut kiintoainekes voi muuttaa maaperän imeytymisolosuhteita, kun kiintoainekes peittämä pinta ei läpäise vettä enää yhtä hyvin.

Rankkasateet ja tulvat on tunnistettu myös terveysriskinä, kun tulvien mukana huuhtoutuvat haitta-aineet imeytyvät pohjaveteen. Valumavesiä ja huuhtoutumista suuremman terveysuhan ja pohjaveden pilaantumisriskin aiheuttavat kuitenkin viemärien ja jätevesijärjestelmien ylivuodot. (THL 2018)

5.3 Tulvien vaikutus rakentamiseen

Korkea pohjavedenpinnantasoo voi aiheuttaa haasteita teiden kuivatukseen. Erityisesti kevättulvien aikaan on riski, että tie ei pääse kuivumaan, koska pohjavedenpinta on liian korkealla. Lisäksi pohjavedenpinnankorkeuden vaihtelu voi aiheuttaa muutoksia maaperän vakauteen. (Haulos et al. 2023) Pohjavedenpinnan nousu vaikuttaa rakennettuun ympäristöön erityisesti maan kantavuuden heikkenemisenä. Kun pohjavedenpinta nousee, maarakenne menettää lujuutta. Lujuuden menetys heikentää maan stabiliteettia ja voi aiheuttaa esimerkiksi liukusortumia.

Ilmastonmuutoksen ja tulvien vaikutukset tulee ottaa huomioon jo rakennusten ja maankäytön suunnitteluvaiheessa, sillä rakennukset suunnitellaan yleensä vähintään 50–100 vuoden käyttöikää varten. Nykyisissä Eurokoodin ohjeissa ja rakennusnormeissa sääilmiöiden aiheuttamat tilastolliset äärikuormat määritellään 50

vuoden toistuvuusajan perusteella. Ne puolestaan on määritelty yleensä edeltävän 30 vuoden ilmastondatan perusteella. Siten ilmastossa tapahtuvat muutokset on jo nyt otettava huomioon rakennusten ja yhdyskuntien suunnittelussa sekä käyttöikään liittyvissä tarkasteluissa. Myös olemassa olevan rakennuskannan säilymisestä tulevilla ilmasto-olosuhteissa olisi huolehdittava. Varautumalla ilmastonmuutokseen etukäteen sen kielteisiä vaikutuksia voidaan pienentää ja myönteisiä vaikutuksia hyödyntää. (Ala-Outinen 2004)

Sademäärien lisääntymisellä on merkittäviä vaikutuksia myös tienpidolle. Sademäärien kasvaessa joudutaan kiinnittämään yhä enemmän huomiota esimerkiksi teiden ja ratojen kuivatukseen sekä pohjarakenteiden mitoitukseen, kun kohonnut pohjavedentaso pienentää maan kantokapasiteettia. Radoilla sademäärän kasvaessa täytyy tarkistaa esimerkiksi rumpujen mitoitukset sekä tehdä tarvittaessa korjauksia uuden laskennan pohjalta. Rankkasateiden varalta kuivatussuunnittelu tulee tehdä entistä suuremmalle sademäärälle ja tulvien ennakkointia ja torjuntaa tulee kehittää. Talvilämpötilojen nousu voi lisätä jäätymis-sulamissykliä määrää ja siten lisätä teiden vaurioita ja liukkaita. Sään ääri-ilmiöt ja poikkeamat heikentävät liikenneturvallisuuksia ja liikenteen sujuvuutta. (Haulos et al. 2023)

Kevätsulamisen aikaan erityisesti sorateilla esiintyvät kelirikot voivat ilmastonmuutoksen vaikutuksesta yleistyä. Kelirikko syntyy, kun talven aikana tien rakenteeseen jäänyt vesi alkaa sulaa, mutta ei pääse pois riittävän nopeasti. Seurauksena tien rakenne kostuu ja pehmenee, ja menettää siten kantavuuttaan. Kuvassa 14 on esitetty kelirikon synty vaiheittain. Kelirikko on perinteisesti ollut sorateiden vaiva, mutta ilmastonmuutoksen myötä ongelmat tulevat lisääntymään myös päällystetyillä teillä. Ilmaston lämpeneminen mahdollistaa kelirikkojen esiintymisen myös syksyisin sekä Etelä- ja Keski-Suomessa jopa talvisin, kun tien rakenteet eivät jäädy. Talvisin runsastuvat sateet pitävät tien märkänä ja kuivuminen on talviaikaan heikkoa. Syksyisin ja talvisin vesi aiheuttaa yleensä pintakelirikkoa, jossa tien pinta velliintyy ja kantavuus ja ajettavuus heikkenevät. Kelirikosta kärsivän tien liiallista vaurioitumista pyritään estämään asettamalla tielle painorajoituksia. (Väylävirasto 2023)



Kuva 14. Kelirikon synty. (Väylävirasto 2023)

Euroopan unionin tulvadirektiivi vaatii tulvariskialueiden kartoitusta sekä suojelusuunnitelmien tekemistä. Direktiivin mukaista tulvariskien hallintaa ohjaa Suomessa laki ja asetus tulvariskein hallinnasta. Lainmukaiseen tulvariskein hallintaan kuuluu tulvariskien arviointi, merkittävien tulvariskialueiden nimeäminen sekä tulvakarttojen ja tulvariskien hallintasuunnitelmien laatiminen merkittävillä riskialueilla. Lain tavoitteena on vähentää tulvariskejä sekä ehkäistä niistä aiheutuvia haittoja sekä edistää varautumista. ELY-keskukset ja kunnat ovat vastuussa tulvariskien hallinnan suunnittelusta. (Syke 2013)

Tulvariskialueiden tunnistamiseksi maa- ja metsätalousministeriö on nimennyt 22 merkittävintä tulvariskialuetta. Nimeämisen taustalla ELY-keskusten tekemät tulvien todennäköisyyteen ja mahdollisten vahinkojen suuruuteen perustuvat tulvariskiariot. Uuteen vuonna 2018 tehtyyn arviointiin on otettu mukaan myös esimerkiksi ilmastonmuutoksen vaikutus ja jo toteutetut tulvariskien hallintatoimenpiteet. Kuvassa 15 on esitetty Suomen 22 merkittävää tulvariskialuetta. Punaisella värillä on merkitty vuoden 2018 päivityksessä lisätyt alueet ja vihreällä on merkitty arvioinnissa poistetut alueet. Kuvassa esitetyille alueille pitää laatia tulvakartat sekä tulvariskien hallintasuunnitelmat. (Syke 2013)

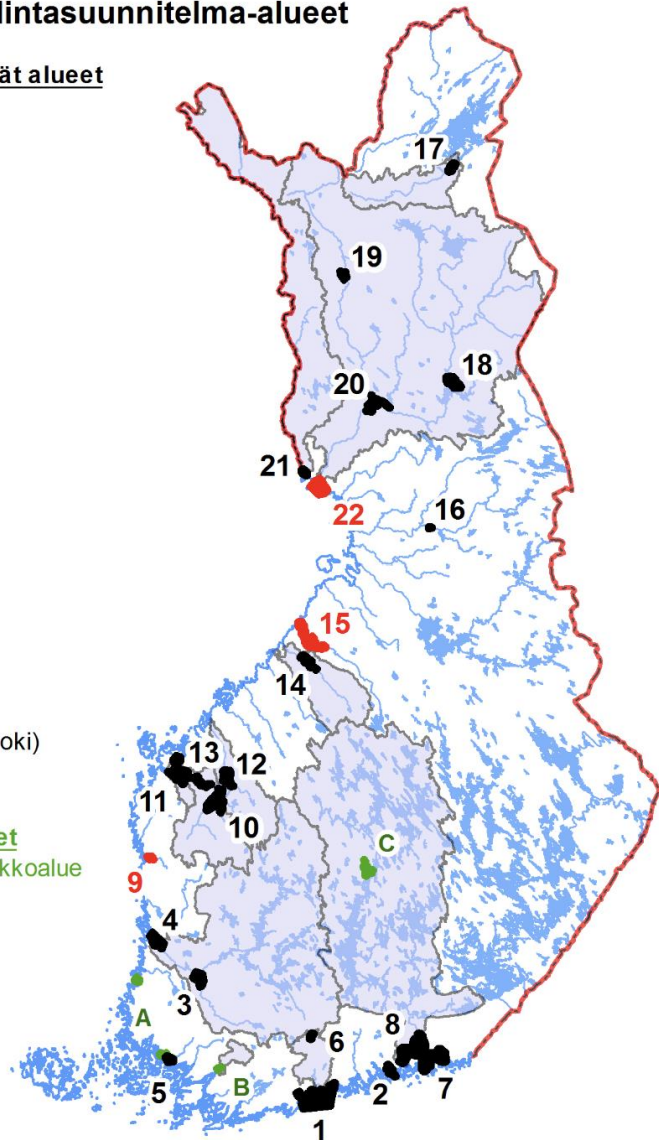
Vesistöjen ja merenrannikon merkittävät tulvariskialueet 2018-2024 sekä nykyiset hallintasuunnitelma-alueet

Olemassa olevat ja uudet merkittävät alueet

- 1 Helsingin ja Espoon rannikkoalue
- 2 Lovisan rannikkoalue
- 3 Huittinen (Kokemäenjoki)
- 4 Pori (Kokemäenjoki)
- 5 Turun rannikkoalue
- 6 Riihimäen keskusta (Vantaanjoki)
- 7 Haminan ja Kotkan rannikkoalue
- 8 Kymijoen alaosa (Kymijoki)
- 9 Lapväärtti (Lapväärtinjoki) UUSI
- 10 Ilmajoki-Seinäjoki (Kyrönjoki)
- 11 Laihia-Tuovila-Runsor (Laihianjoki)
- 12 Lapua (Lapuanjoki)
- 13 Ylistaro-Koivulahti (Kyrönjoki)
- 14 Alavieska-Ylivieska (Kalajoki)
- 15 Pyhäjoen alaosa (Pyhäjoki) UUSI
- 16 Pudasjärven taajama (Iijoki)
- 17 Ivalon taajama (Ivalojoki)
- 18 Kemijärven kaupunki (Kemijoki)
- 19 Kittilän kirkonkylä (Kemijoki)
- 20 Rovaniemen kaupunki (Kemijoki)
- 21 Tomion kaupunki (Tomion-Muonionjoki)
- 22 Kemien rannikkoalue UUSI

Poistuvat merkittävät tulvariskialueet

- A Raision, Naantalın ja Rauman rannikkoalue
- B Salon keskusta (Uskelanjoki)
- C Jyväskylä (Kymijoki)



Maanmittauslaitoksen maastotietokanta 3/2018
SYKE:n vesienhoitoalueet ja valuma-aluejako 2010

Kuva 15. Suomen tulvariskialueet. (Syke 2013)

Parhaiten tulvariskejä voidaan välttää estämällä uusien tulvariskialueiden muodostuminen. Helpoiten tähän voidaan vaikuttaa ottamalla tulvavaara huomioon maankäytön suunnittelussa eli esimerkiksi kaavoituksessa. (Syke 2013)

Kasvaneiden tulvariskien vuoksi Suomen rannikkoa koskevat alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet on päivitetty vuonna 2014. Edellisen kerran suositukset on päivitetty vuonna 1998. (Kahma et al. 2014) Tulvien vaikutus rakennuksille riippuu paljon rakennuksen kunnosta ja käyttiästä. Käyttiän jo ylittäneet tai huonokuntoiset rakennukset ovat alttiimpia tulvien aiheuttamille vaurioille.

6. YHTEENVETO

Ilmastonmuutos tulee muuttamaan Suomen ilmastoa pitkällä aikavälillä. Toistaiseksi ilmastonmuutoksen tunnistetut vaikutukset liittyvät lämpötilannousuun sekä sään ääri-ilmiöiden lisääntymiseen. Ilmastonmuutoksen kehityskulun ennustamiseksi on laadittu ilmastonmuutosskenaarioita eli keskenään vaihtoehtoisia kehitysnäkymiä tulevaisuuden ilmastosta. Skenaarioita on yhteensä viisi, joista ensimmäisessä lämpötila nousee vähiten ja viimeisessä eniten. Kussakin skenaariossa lämpötilannousuun suuruus ja lämpenemisen jatkuminen riippuvat kasvihuonekaasupäästöjen suuruudesta.

Suomessa ilmastonmuutos tulee näkymään eniten talvilämpötilojen nousussa ja sateisuuden kasvussa sekä roudan ja routasyvyyden pienenemisessä. Kesän lämpötilojen odotetaan kasvavan hillitymmiin. Lämpötilannousun vaikutuksesta talvien hyvin alhaiset lämpötilat tulevat vähenemään ja kesän pitkät hellejaksot yleistymään. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna ilmastonmuutoksen vaikutukset tulevat Suomessa olemaan melko lieviä.

Pohjavesi on sade- ja sulamisvesistä maaperään imeytynyttä, maaperän huokosissa ja kallioperän raoissa kulkevaa vettä. Suomessa pohjavesi on laadullisesti hyvää, eikä siihen kohdistu merkittäviä määrällisiä tai laadullisia riskejä. Pohjaveden laatua kuitenkin seurataan jatkuvasti, jotta mahdollisia riskejä voidaan torjua ja ennaltaehkäistä. Lainsäädännöllä pyritään suojelemaan pohjavettä ja säilyttämään hyvä laadullinen ja määrällinen tila. Kokonaisuudessaan ilmastonmuutos ei tule merkittävästi muuttamaan Suomen pohjavesivarantojen kokonaismäärää, mutta vaihtelevat ja voimistuvat ilmaston ääri-ilmiöt voivat aiheuttaa ajoittaisia haasteita veden riittävydessä ja lisätä veden laatuun kohdistuvia riskejä. Vedenlaadun heikkeneminen lisää vedenkäsittelyn tarvetta.

Sadanta ja haihdunta säätelevät pohjaveden pinnankorkeutta. Ilmastonmuutoksen aiheuttama talvien sadannan lisääntyminen voi siis kasvattaa pohjavesivarantoja, kun taas kesäisin yleistyvät kuivuusjaksot ja haihdunnan lisääntyminen voivat heikentää pohjavesitilannetta. Kuivuus ja tulvat voivat kumpikin heikentää pohjaveden laatua ja siten lisätä vedenkäsittelyn tarvetta sekä toisaalta aiheuttaa haasteita rakennetulle ympäristölle.

Ilmastonmuutoksen aiheuttamat pohjaveden muutokset lisäävät rakennetun ympäristön rasitusta. Talvien lämpeneminen lisää jäätymis-sulamissyklin toistumismäärää, joka rasittaa esimerkiksi tie- ja ratarakenteita. Pohjavedenpinnan aleneminen voi johtaa maan painumiin, kun taas tulvat heikentävä maarakenteen kantavuutta. Rakennetun ympäristön pitkän käyttöiän takaamiseksi jo suunnitteluvaiheessa on osattava ottaa

huomioon muuttuvan ilmaston aiheuttamat haasteet sekä osata ennakoida tulevaisuuden tarpeita. Pohjaveden määrä ja laatu vaikuttavat rakennettavuuden lisäksi esimerkiksi perustamistapaan ja -kustannuksiin. Erityisesti pitkällä aikavälillä ilmastonmuutoksella arvioidaan olevan merkittäviä vaikutuksia rakennettuun ympäristöön.

LÄHTEET

Ala-Outinen, T., Harmaajärvi, I., Kivikoski, H., Kouhia, I., Makkonen, L., Saarelainen, S., Tuhola, M. & Törnqvist, J. (2004). Ilmastonmuutoksen vaikutukset rakennettuun ympäristöön. VTT tiedotteita 2227. Espoo. Saatavissa (viitattu 7.2.2023): <https://docplayer.fi/6048134-Ilmastonmuutoksen-vaikutukset-rakennettuun-ymparistoon.html>

Broman, N. Tekopohjavesi – puhdasta ja raikasta suoraan harjusta. 2030-lehti. Tampereen Sähkölaitos, Tampereen Vesi, Pirkanmaan Jätehuolto, Finnpark & Tampereen kaupunkiseudun kuntayhtymä. Saatavissa (viitattu 3.6.2023): <https://2030-lehti.fi/puhdasta-ja-raikasta-suoraan-harjusta/>

Euroopan komissio. Ilmastonmuutoksen syyt. Climate Action. Saatavissa (viitattu 3.6.2023): https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_fi

Grimm, N.B., Chapin, F.S., III, Bierwagen, B., Gonzalez, P., Groffman, P.M., Luo, Y., Melton, F., Nadelhoffer, K., Pairis, A., Raymond, P.A., Schimel, J. & Williamson, C.E. (2013). The impacts of climate change on ecosystem structure and function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11: 474–482. <https://doi.org/10.1890/120282>

GTK (2019). Pohjavesi. Geologia.fi. Saatavissa (viitattu 12.4.2023): <https://www.geologia.fi/2019/12/11/pohjavesi/>

GTK kartta-aineisto. Happamat sulfaattimaat. Saatavissa (viitattu 19.4.2023): <https://gtkdata.gtk.fi/hasu/index.html>

GTK tietoaineistot. Itämeren ja järvien kehitys. Saatavissa (viitattu 3.6.2023): <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/itameri.htm>

Haulos, S., Meskanen, P., Brander, K., Vauramo, S., Dettenborn, T. & Metsävuori, J. (2023). Ilmastonmuutokseen sopeutuminen väylänpidossa – Nykytilaselvitys. Väyläviraston julkaisuja 27/2023. Väylävirasto Helsinki. 81 s. Saatavissa (viitattu 20.5.2023): <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-405-063-0>

Heikinheimo, R. (2018). Kokemuksia perustusten vahvistamisesta. Ramboll.

Ilmatieteen laitos, a. Maapallon ilmastohistoria. Ilmasto-opas.fi. Saatavissa (viitattu 2.3.2023): <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/maapallon-ilmastohistoria>

Ilmatieteen laitos, b. Ilmastonmuutos. Saatavissa (viitattu 2.3.2023): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastonmuutoskysymyksiä>

Ilmatieteen laitos, c. Routakerros ohenee. Ilmasto-opas.fi. Saatavissa (viitattu 6.4.2023): <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/routakerros-ohenee>

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2021). Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. ISBN 978-92-9169-158-6. Saatavissa (viitattu 21.4.2023): https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

- Jylhä, K. & Lehtonen, I. (2022). Suomen ilmastomuutosennusteet on päivitetty. Ilmatieteen laitos. Ilmastokatsaus 7/2022. Saatavissa (viitattu 12.3.2023): <https://doi.org/10.35614/ISSN-2341-6408-IK-2022-07-02>
- Kahma, K., Pellikka, H., Leinonen, K., Leijala, U. & Johansson, M. (2014). Pitkän aikavälin tulvariskit ja alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet Suomen rannikolla. Ilmatieteen laitos. Raportteja; 2014:6. Helsinki. <http://hdl.handle.net/10138/135226>
- Katro, M. (2020). Ilmastomuutos vaikuttaa myös pohjaveden määrään. Kehittyvät kaupungit. Mediaplanet. Saatavissa (viitattu 7.2.2023): <https://www.kehittyvatkaupungit.fi/vesitekniikka/ilmastonmuutos-vaikuttaa-myos-pohjaveden-maaraan/>
- Kaura, E. (2021). Tarkasta kaivosi nyt! Hellekesän varjopuoli vaarantaa jopa arvotalojen perustat. Iltalehti. Saatavissa (viitattu 7.5.2021): <https://www.iltalehti.fi/kotimaa/a/5acd3cf2-5277-425c-8113-34706c1ee0af>
- Kokkonen, J. (2015). Kolmannes maailman pohjavesivarannoista hupenee nopeasti. Yle uutiset. Saatavissa (viitattu 22.4.2023): <https://yle.fi/a/3-8082110>
- Laakso, T. (2021). Kuivuus voi olla seuraava pandemia varoittaa YK-raportti – Ilmastomuutos altistaa lisää useimpien maiden kuivuusriskiä lähivuosikymmeninä. Maailma.net. Saatavissa (viitattu 12.4.2023): <https://www.maailma.net/uutiset/kuivuus-voi-olla-seuraava-pandemia-varoittaa-yk-raportti-ilmastonmuutos-altistaa-lisaa>
- Lehtonen, I., Venäläinen, A. & Gregow, H. (2020). Ilmastomuutoksen vaikutukset Suomessa metsänhoidon näkökulmasta. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2020:5. Helsinki. 43 s. Saatavissa (viitattu 20.5.2023): <http://hdl.handle.net/10138/319348>
- Leveinen, J. Hydrologinen kierto ja pohjavesi. Geologia ja geomekaniikka. Aalto University School of Science and Technology. Saatavissa (viitattu 20.4.2023): https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1286900/mod_folder/content/0/1-Hydrologinen%20kierto.pdf?forcedownload=1
- Maaseutuverkosto (2009). Happamat sulfaattimaat. Saatavissa (viitattu 20.4.2023): <https://www.tukisaatio.fi/tietopankki/2003/happamat-sulfaattimaat/>
- OECD (2016). Financial Management of Flood Risk. OECD Publishing, Paris. Saatavissa (viitattu 3.5.2023): <http://dx.doi.org/10.1787/9789264257689-en>
- Ojala, A. (2022a). Pohjavesigeologia I – pohjaveden lainalaisuudet ja esiintyminen. Julkaisematon, saatavissa rajoitetusti (viitattu 18.2.2023): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/2845231/mod_resource/content/1/Luento6_311020_22.pdf
- Ojala, A. (2022b). Pohjavesigeologia II – pohjaveden hyödyntäminen ja suojele. Julkaisematon, saatavissa rajoitetusti (viitattu 18.2.2023): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/2867128/mod_resource/content/1/Luento7a_14112_022.pdf
- Orvomaa, M. (2020). Pohjavedet ja ilmastomuutos. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa (viitattu 7.2.2023): https://www.vesiyhdistys.fi/wp-content/uploads/2020/11/WWD2020_OrvomaaMirjam.pdf

Pohjavesitutkimusopas (2005). Käytännön ohjeita. Suomen Vesiyhdistys r.y. Vammalan Kirjapaino Oy. Saatavissa (viitattu 7.2.2023): <https://www.vesiyhdistys.fi/pdf/Pohjavesiopas.pdf>

Richey, A.S., Thomas, F.B., Lo, M.-H., Reager, J.T., Famiglietti, J.S., Voss, K., Swanson, S. & Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. AGU: advancing earth and space science. Water Resources Research, vol 51, issue 7, s. 5217-5238. Saatavissa (viitattu 5.4.2023): <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>

Rintala, J. (2019). Pohjavedenoton velvoitetarkkailu. Nykytila sekä suositukset tarkkailusuunnitelman laadintaan ja tarkkailun järjestämiseksi. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 42/2019. Saatavissa (viitattu 7.5.2023): https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/306872/SYKEra_42_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Robins, N. & Finch, J. (2012). Groundwater flood or groundwater-induced flood? Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology, 2012, Vol.45 (1), s.119-122. DOI: 10.1144/1470-9236/10-040 Viitattu 21.5.2023.

Sariola, H. (2021). Ilmasto on sään pitkän ajan keskiarvo. Ilmatieteen laitos. Saatavissa (viitattu 13.4.2023): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/artikkeli/2T67T5Rnz7biE25M6zkWLF>

Snellman, R. & Todovic, S. (2022). Kuivuusriskien hallintaa kehitetään ja tehostetaan valtakunnallisesti. Vesi.fi. Suomen ympäristökeskus Syke. Saatavissa (viitattu 22.4.2023): <https://www.vesi.fi/vesikirje/kuivuusriskien-hallintaa-kehitetaan-ja-tehostetaan-valtakunnallisesti/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2013). Tulviin voidaan varautua tulvariskien hallintatoimilla. Ilmasto-opas.fi. Saatavissa (viitattu 2.5.2023): <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/tulviin-voidaan-varautua-tulvariskien-hallintatoimilla>

Suomen ympäristökeskus Syke (2016). Ilmastonmuutos sekoittaa Suomen vesipalettia. Ilmasto-opas.fi. Saatavissa (viitattu 3.3.2023): <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/ilmastonmuutos-sekoittaa-suomen-vesipalettia>

Suomen ympäristökeskus Syke (2019a). Pohjaveden esiintyminen ja muodostuminen. Ympäristö.fi. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): https://www.ymparisto.fi/fi-ve/pohjavesien_tila/Pohjaveden_esiintyminen

Suomen ympäristökeskus Syke (2019b). Riittääkö pohjavettä? Vesi.fi. Saatavissa (viitattu 19.4.2023): <https://www.vesi.fi/vesitieto/riittaako-pohjavetta/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2021). Pohjavedet laskussa – vähäsateinen ja kuuma kesä voi kuivattaa kaivon. Saatavissa (viitattu 22.4.2023): [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Pohjavedet_laskussa_vahasateinen_ja_kuu\(61229\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Pohjavedet_laskussa_vahasateinen_ja_kuu(61229))

Suomen ympäristökeskus Syke (2022a). Pohjaveden muodostuminen ja esiintyminen. Vesi.fi. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://www.vesi.fi/vesitieto/pohjaveden-muodostuminen-ja-esiintyminen/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2022b). Pohjavesialueet. Vesi.fi. Saatavissa (viitattu 4.4.2023): <https://www.vesi.fi/vesitieto/pohjavesialueet/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2022c). Lumi ja routa vaikuttavat pohjavesivaroihin. Vesi.fi. Saatavissa (viitattu 4.4.2023): <https://www.vesi.fi/vesitieto/lumi-ja-routa-vaikuttavat-pohjavesivaroihin/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2022d). Ilmastonmuutoksen vaikutus pohjavesivaroihin. Vesi.fi. Saatavissa (viitattu 4.4.2023): <https://www.vesi.fi/vesitieto/ilmastonmuutoksen-vaikutus-pohjavesivaroihin/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2022e). Pohjavesien tila ja riskit. Vesi.fi. Saatavissa (viitattu 19.4.2023): <https://www.vesi.fi/vesitieto/pohjavesien-tila-ja-riskit/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2022f). Maankuivatus ja happamat sulfaattimaat. Vesi.fi. Saatavissa (viitattu 20.4.2023): <https://www.vesi.fi/vesitieto/maankuivatus-ja-happamat-sulfaattimaat/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2022g). Pohjaveden käyttö ja pohjavesialueiden suojele. Vesi.fi. Saatavissa (viitattu 22.4.2023): <https://www.vesi.fi/vesitieto/pohjaveden-kaytto-ja-pohjavesialueiden-suojelu/>

Suomen ympäristökeskus Syke (2023). Pohjavesien tila on Suomessa yleisesti hyvä. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. Ymparisto.fi. Saatavissa (viitattu 6.4.2023): <https://www.ymparisto.fi/fi/ympariston-tila/vesi/pohjavesien-tila>

THL (2018). Rankkasateet likaavat pohjavesiä. Saatavissa (viitattu 21.4.2023): <https://blogi.thl.fi/rankkasateet-likaavat-pohjavesia/>

Tieteen termipankki (2014). Geofysiikka: ilmastoskenaario. Saatavissa (viitattu 18.2.2023): <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Geofysiikka:ilmastoskenaario>

Tieteen termipankki (2019). Geofysiikka: ilmastonmuutos. Saatavissa (viitattu 2.3.2023): <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Geofysiikka:ilmastonmuutos>

Turun kaupunki. Turun kaupungin rakennusjärjestys. Saatavissa (viitattu 25.4.2023): https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/rakennusjarjestys_1.3.2021_0.pdf

Väylävirasto (2023). Teiden kelirikko ja painorajoitukset. Saatavissa (viitattu 3.6.2023): <https://vayla.fi/kunnossapito/tieverkon-kunnossapito/painorajoitukset>

Ympäristöministeriö. Pohjavedet. Saatavissa (viitattu 12.4.2023): <https://ym.fi/pohjavedet>