

Lapin POSKI2 – hankkeen erillisselvitys: Isotooppitutkimukset

Julia Nora, Pekka Rossi, Riku Sanaksenaho, Anne Lindholm



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	1
1.1	Taustaa isotooppikoostumuksesta ja isotooppimenetelmän teoriaa	1
2	MENETELMÄT JA AINEISTOT	2
2.1	Säätiedot ja sadanta-aineisto	2
2.2	Pintaveden lämpötila ja järvien pinta-alatiedot	2
2.3	Haihdunta järvistä	3
2.4	Iteratiivinen isotooppimassatase-menetelmä	3
3	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	5
3.1	Veden stabiilit isotoopit	5
3.2	Tutkittujen järvien pohjavesivaikuteisuus	10
3.2.1	Tarvittavat parametrit iteratiivista isotooppimassatase-menetelmää varten	10
3.2.2	Järvien ja pohjavesien isotooppikoostumukset	11
3.2.3	Järvien vesitase isotooppisignaaleilla ja G index	11
4	ISOTOOPPIMENETELMÄN EPÄVARMUUKSISTA	14
5	YHTEENVETO	14
6	LÄHTEET	15

1 JOHDANTO

Tarkoituksena oli tutkia veden stabiilien isotooppien avulla pinta- ja pohjavesien vuorovaikutussuhteita. Järvien pohjavesiriippuvuuden selvittämisessä käytettiin iteratiivista isotooppimassatase-menetelmää. Näytteitä otettiin Lapin alueen järvistä, lammista sekä pohjavesistä kesällä 2017. Tarkemmin tutkimuskohteena olivat Lapin kunnista Enontekiö, Kolari, Muonio, Pelkosenniemi, Posio, Ranua ja Savukoski. Näytteiden isotooppikoostumukset (δ -arvot) analysoitiin Picarro L2120-i-analysaattorilla, jonka toiminta perustuu lasersäteen absorptioon väliaineessa.

Veden stabiilit isotoopit, ^{18}O ja ^2H , ovat luonnollisia merkkiaineita, joita voidaan käyttää järvien pohjavesiriippuvuuden määrittämisessä. Veden stabiilien isotooppien käyttö perustuu niiden fraktioitumiseen hydrologisessa kierrossa. Jos pohja- ja pintaveden isotooppikoostumukset eroavat riittävästi toisistaan eli fraktioitumista on tapahtunut, voidaan veden stabiileja isotooppeja käyttää määrittämään pohja- ja pintavesien suhteita.

Pohjavesivaikutteisuutta voidaan arvioida suhdeluvun avulla (G index), joka kuvaa järven riippuvuutta pohjavedestä (Isokangas 2018, 37). G index määritellään jakamalla järveen tuleva pohjaveden virtaama järveen tulevalla kokonaisvirtaamalla.

1.1 Taustaa isotooppikoostumuksesta ja isotooppimenetelmän teoriaa

Isotoopilla tarkoitetaan saman alkuaineen eri atomeja, joiden molekyyllipaino riippuu atomin ytimessä olevien varauksettomien hiukkasten lukumäärästä. Alkuaineilla tavataan sekä radioaktiivisesti hajoavia ja pysyviä isotooppeja. Veden stabiilien isotooppien määrä on vakio, mutta niiden suhteelliset osuudet vaihtelevat. Hapella tunnetaan kolme stabiilia isotooppia (^{16}O , ^{17}O ja ^{18}O) ja vedyllä pysyviä isotooppeja on kaksi (^1H ja ^2H , jota merkitään D:llä = deuterium). Hapen ja vedyn isotooppitutkimuksissa mitataan isotooppien suhteellisia osuuksia, ja isotooppikoostumukset esitetään delta-arvoina (δD ja $\delta^{18}\text{O}$), jotka kuvaavat isotooppisuhteen poikkeamaa kansainvälisestä merivesistandardista (VSMOW) promilleina (Kaava 1). Hapen kohdalla tutkittava suhde on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ja vedyllä $\text{D}/^1\text{H}$. (Clark & Fritz 1997)

$$\delta_{\text{näyte}} = \left(\frac{R_{\text{näyte}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \right) \cdot 1000, \quad (1)$$

missä $R_{\text{näyte}}$ on näytteen isotooppisuhde ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ tai $\text{D}/^1\text{H}$) ja R_{VSMOW} on standardin isotooppisuhde.

Isotooppien välisen massaeron takia luonnon erilaiset fysikaaliset ja kemialliset prosessit suosivat joko alkuaineen kevyempää tai raskaampaa isotooppia, ja tätä kutsutaan isotooppien väliseksi fraktioitumiseksi. Merkittävimmät luonnon vesien hapen ja vedyn isotooppeja fraktioivat prosessit ovat sadeveden tiivistyminen ja haihdunta.

Parametrilla d (deuteriumin ylijäämä, engl. d-excess) kuvataan ^{18}O ja ^2H isotooppien välistä fraktioitumista veden hydrologisessa kierrossa (Dansgaard 1964). Parametri kuvaa haihdunnan aiheuttamaa fraktioitumista pohja- ja pintavesisysteemeissä. GMWL-suoran mukaisesti parametrin d arvo on sadannassa globaalisti 10 ‰, kuten myös haihtumattomissa pohjavesissä. Puolestaan haihtuneissa pintavesissä arvo on selvästi alle 10 ‰ (Kortelainen 2007).

$$d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O} \text{ ‰} \quad (2)$$

2 MENETELMÄT JA AINEISTOT

2.1 Säättiedot ja sadanta-aineisto

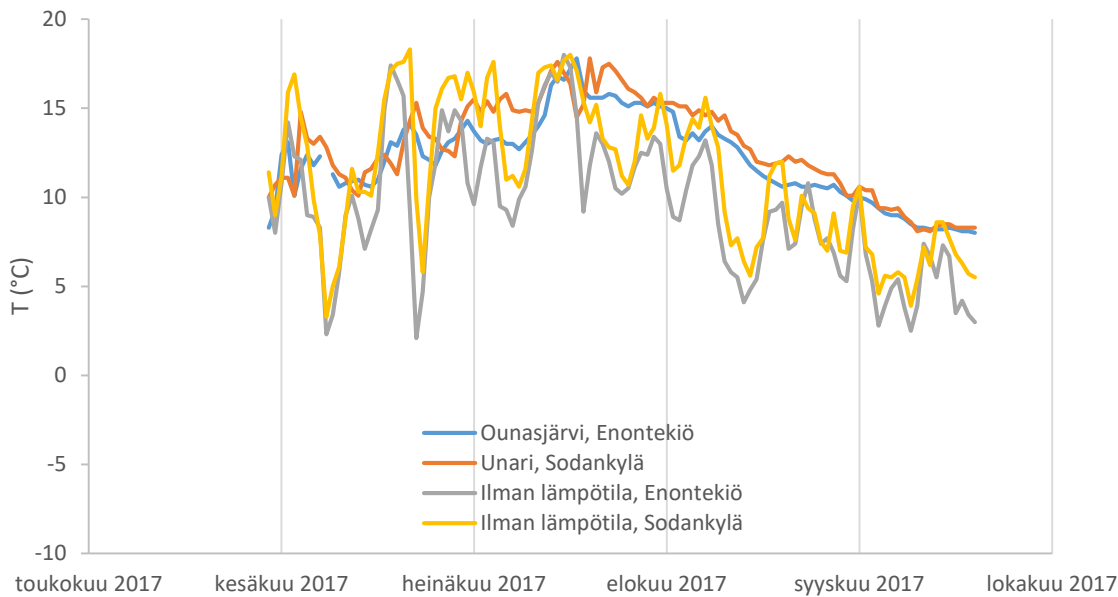
Tarvittavat sääparametrit (vuorokauden keskilämpötila, sademäärä ja suhteellinen kosteus) laskentaa varten saatiin Ilmatieteen laitoksen tuottamasta ilmastohila-aineistosta (Ilmatieteenlaitos 2018). Päivittäinen ilmastohila-aineisto koostuu seitsemästä keskeisestä ilmastosuureesta kattaen vuodet 1961 – 2018, ja sen alueellinen erotuskyky on 10 km x 10 km. Lisäksi hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen lähimpien säähavaintoasemien mittaustietoja tuulennopeuden osalta havaintojaksolle kesä – elokuu 2017 (Ilmatieteenlaitos 2019). Lähimmät havaintoasemat olivat Enontekiön Näkkälän (45 km), Muonion kirkonkylän (50 km), Ranuan lentokentän (100 km) ja Savukosken kirkonkylän (115 km) asemat.

Sadanta-aineistona käytettiin vuosina 2003 – 2016 Rovaniemellä kerättyä sadannan isotooppidataa, jonka tuottamisesta on vastannut Geologian tutkimuskeskus.

2.2 Pintaveden lämpötila ja järvien pinta-aratiedot

Jatkuvatoimista pintaveden lämpötilan mittaustietoja tarvittavalle ajanjaksolle haettiin ympäristöhallinnon OIVA - ympäristö- ja paikkatietopalveluun kuuluvasta Hertta-tietokannasta. Kuvassa 1 on esitetty kahden eri järven pintaveden keskilämpötilat kesältä 2017. Lisäksi Hertan kautta haettiin alueen järvien pinta-aratiedot.

Unari on Kemijoen vesistöalueeseen kuuluva järvi Sodankylässä, Lapin maakunnassa. Ounasjärvi sijaitsee Enontekiöllä. Pintaveden lämpötilaa on mitattu vuodesta 2000 lähtien. Havainnot tehdään kesällä joka päivä aamulla klo 8. Keskiarvo koko havaintojaksolla on ollut Unarilla kesäkuussa 12,6, heinäkuussa 17,0 ja elokuussa 15,9 astetta sekä Ounasjärvellä kesäkuussa 10,3, heinäkuussa 15,0 ja elokuussa 14,3 astetta. (SYKE 2019)



Kuva 1. Ounasjärven (690 ha) ja Unarin (2880 ha) pintaveden vuorokauden keskilämpötila kesällä 2017 sekä ilman lämpötila samalta ajanjaksolta (SYKE 2017, Ilmatieteenlaitos 2019).

2.3 Haihdunta järvistä

Haihdunta (E) laskettiin erikseen jokaiselle tarkastelun kohteena olevalle järvelle (Kaava 2). Laskentatapa ottaa huomioon järven koon. Haihduntanopeus laskettiin käyttäen vuorokauden keskiarvoja. Haihdunta laskettiin seuraavan yhtälön mukaan (Dingman 2008):

$$E = K_E \cdot v_a \cdot (e_s - e_a), \quad (3)$$

missä E on haihdunnan nopeus [mm s^{-1}];

K_E on kerroin [$\text{m km}^{-1} \text{kPa}^{-1}$];

v_a on tuulen nopeus 2m korkeudella [m s^{-1}];

e_s on kyllästynyt höyrinpaine [kPa] pintaveden lämpötilassa T_s [$^{\circ}\text{C}$]

$e_s =$

$$0,611 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot T_s}{T_s + 237,3}\right),$$

e_a on ilman höyrinpaine [kPa], $e_a = h \cdot 0,611 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot T_a}{T_a + 237,3}\right)$, missä h on suhteellinen kosteus ja T_a ilman lämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

2.4 Iteratiivinen isotooppimassatase-menetelmä

Isotooppisessa massataseessa järven vesitaseen komponentit painotetaan niiden isotooppisuhteiden arvoilla. Järven vesitase ja isotooppinen massatase voidaan muodostaa seuraavan laisesti:

$$\frac{dV}{dt} = I_{TOT} - E - O_{TOT}, \quad (4)$$

$$\delta_L \frac{dV}{dt} + V \frac{d\delta_L}{dt} = \delta_{IT} \cdot I_{TOT} - \delta_E \cdot E - \delta_{OT} \cdot O_{TOT}, \quad (5)$$

missä V on järven tilavuus,

I_{TOT} on tuleva kokonaisvirtaama järveen,
 E on haihdunta järvestä,
 O_{TOT} on järvestä lähtevä kokonaisvirtaama (vuosi),
 δ_{IT} on järveen tulevan kokonaisvirtaaman δ -arvo,
 δ_E on haihdunnan δ -arvo,
 δ_{OT} on järvestä lähtevän kokonaisvirtaaman δ -arvo.

Tuleva kokonaisvuosi järveen voi muodostua eri komponenteista (sadannasta, pinta- ja pohjavesivirtaamasta) ja niiden isotooppikoostumuksesta, joten tulevan kokonaisvuon isotooppikoostumus lasketaan näiden painotettuna keskiarvona. Haihtuvan vuon δ -arvo (δ_E):

$$\delta_E = \frac{(\delta_L/\alpha_{LV}) - h_N \delta_A - \varepsilon}{(1 - h_N) + \Delta\varepsilon \times 10^{-3}}, \quad (6)$$

missä h_N on normalisoitu ilman suhteellinen kosteus järven yläpuolella,
 δ_A on ilman vesihöyryn δ -arvo järven yläpuolella,
 α_{LV} on fraktioitumiskerroin veden ja vesihöyryn välillä tasapainotilassa, järven pintalämpötilassa,
 ε on rikastumiskerroin, $\varepsilon = \varepsilon^* + \Delta\varepsilon$,
 ε^* on rikastumiskerroin tasapainotilassa ja
 $\Delta\varepsilon$ on kineettinen rikastumiskerroin.

Avoimelle vesipinnalle on määritetty kokeellisesti kineettiset rikastumiskertoimet, kun C_k on 14,2‰ ^{18}O isotoopille ja 12,5‰ ^2H isotoopille:

$$\Delta\varepsilon = C_k(1 - h_N) \quad (7)$$

Fraktioitumiskertoimet voidaan määrittää veden sekä ilman lämpötilojen avulla. Yhtälöt pätevät lämpötilavälillä 0 – 100 °C:

$$^{18}\alpha_{LV} = \exp\left(\frac{1,137 \cdot 10^3}{T^2} - \frac{0,4156}{T} - 2,0667 \cdot 10^{-3}\right) \text{ ja} \quad (8)$$

$$^2\alpha_{LV} = \exp\left(\frac{24,844 \cdot 10^3}{T^2} - \frac{76,248}{T} + 52,612 \cdot 10^{-3}\right), \quad (9)$$

missä T on veden/ilman lämpötila [K].

Normalisoitu suhteellinen kosteus voidaan laskea suhteellisen kosteuden ja ilman sekä veden kyllästyneiden höyrynpaineiden avulla:

$$h_N = h \frac{p_{sat(ilma)}}{p_{sat(vesi)}}, \quad (10)$$

missä h on suhteellinen ilmankosteus,
 $p_{sat(ilma)}$ on ilman kyllästynyt höyrynpaine,
 $p_{sat(vesi)}$ on veden kyllästynyt höyrynpaine.

Kyllästyneet höyrynpaineet saadaan empiirisestä yhtälöstä veden ja ilman lämpötilojen avulla. Yhtälö pätee lämpötilavälillä 0–50 °C:

$$p_{sat} = \exp\left(\frac{16,78 \cdot T - 116,9}{T + 237,3}\right) [kPa], \quad (11)$$

missä T on ilman tai veden lämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Ilman vesihöyryn δ -arvo (δ_A) voidaan määrittää sadannan isotooppikoostumuksen (δ_P) perusteella:

$$\delta_A = \frac{1}{\alpha_{LV}} (\delta_P + 10^3) - 10^3 \quad (12)$$

Olettaen hydrologinen ja isotooppinen vakiotila ja käyttäen yhtälöitä (3–5), voidaan arvioida haihtuvan vesipinnan ($\Delta\delta$) isotoopin rikastumista:

$$\Delta\delta = \delta_{LS} - \delta_{IT} \cong \frac{\delta_A - \delta_{LS} + \varepsilon/h_N}{1 + \frac{I_{TOT}}{E} \frac{1 - h_N}{h_N}}, \quad (13)$$

missä δ_{LS} on vakiotilassa oleva haihtuvan vesipinnan isotooppikoostumus.

Iteratiivista isotooppimassatase-menetelmää käytettiin järveen tulevan pohjavesivirtaaman määrittämisessä. Järven vesitasetta voidaan kuvata tulevan kokonaisvirtaaman suhteena haihduntaan (I_{TOT}/E), määritetty yhtälöstä (13):

$$\frac{I_{TOT}}{E} = \frac{\delta_A - \delta_{LS} + \varepsilon/h_N}{(\delta_{LS} - \delta_{IT}) \frac{1 - h_N}{h_N}}, \quad (14)$$

missä δ_{IT} kuvaa järveen tulevan kokonaisvirtaaman isotooppikoostumusta. Koska tuleva kokonaisvirtaama muodostuu eri komponenteista, laskettiin δ_{IT} iteratiivisesti erikseen jokaiselle järvelle. Koska haihdunta arvioitiin erikseen, voitiin tuleva kokonaisvirtaama laskea yhtälön (13) avulla. Lisäksi oli mahdollista laskea järveen suotautuva pohjaveden määrä (I_{GW}), sillä tiedettiin sadanta ja arvioitiin tulevaa pintavesivirtaamaa. Järvet jaettiin laskentaan varten kahteen ryhmään: tulouomattomiin (suljettuihin) järviin ja järviin, joissa oli tulouoma (puro tai joki yläpuolisesta järvestä).

Menetelmän oletuksena on järven isotooppinen vakiotila ($d\delta_L/dt = 0$). Isotooppisen vakiotilan lisäksi oletuksena on hydrologinen vakiotila ($dV_L/dt = 0$) sekä järven sekoittuneisuus.

3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

3.1 Veden stabiilit isotoopit

Hapen delta-arvot ($\delta^{18}\text{O}$) vaihtelivat järvissä välillä $-7,4$ ‰ ja $-14,6$ ‰ ja pohjavesissä välillä $-13,0$ ‰ ja $-14,6$ ‰. Vaihteluväli oli suurempi järvissä. Vedyn delta-arvot ($\delta^2\text{H}$) vaihtelivat järvissä välillä -73 ‰ ja -107 ‰ ja pohjavesissä välillä -96 ‰ ja -107 ‰. Järvien delta-arvot olivat suurempia kuin pohjavesien johtuen järvien isotooppikoostumusten rikastumisesta raskaammilla isotoopeilla haihdunnan vaikutuksesta. Pohjavesien $\delta^{18}\text{O}$ - ja $\delta^2\text{H}$ -arvot olivat kaikissa pohjavesipisteissä, paitsi pisteessä UP 1241 (Muonio), melko lähellä toisiaan. Deuteriumin ylijäämä oli pisteessä UP 1241 (Muonio) $4,2$ ‰ (Kuva 2), mikä viittaa haihdunnan vaikutukseen. Osassa järvissä $\delta^{18}\text{O}$ - ja $\delta^2\text{H}$ -arvot vastasivat pohjaveden isotooppikoostumusta. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty kesän 2017 aikana otettujen Lapin alueen järvien ja pohjavesien isotooppikoostumukset.

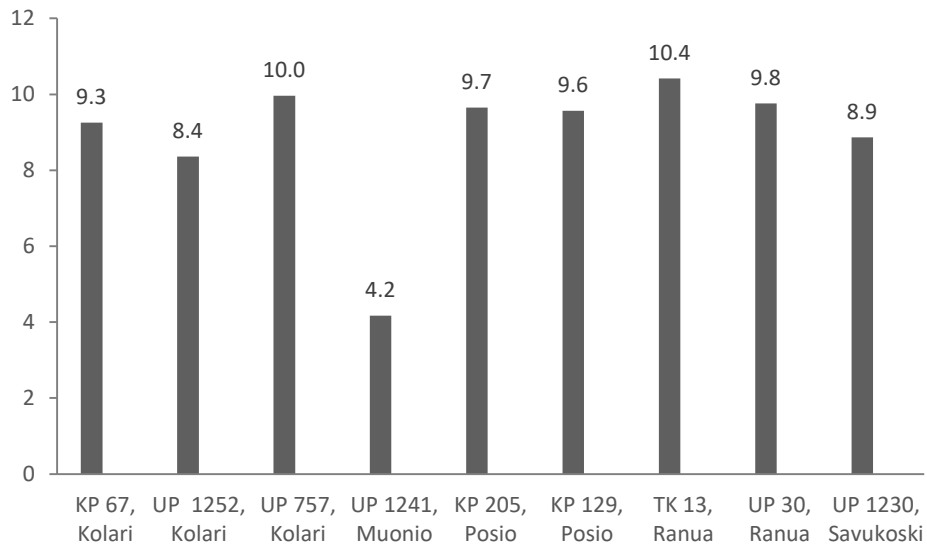
Taulukko 1. Järvien näytteenottopisteet sekä kesän 2017 aikana otetut järvivesinäytteiden $\delta^{18}\text{O}$ - ja $\delta^2\text{H}$ -arvot.

Järvi	Kunta	Näytteenoton pvm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
Lauttajärvi	Enontekiö	21.6.2017	-11.66	-93.45
Lalvajärvi	Enontekiö	22.6.2017	-14.17	-107.21
Nimetönlampi 1	Enontekiö	22.6.2017	-10.43	-87.37
Siikajärvi	Enontekiö	22.6.2017	-9.85	-84.57
Hanhijärvi itä	Enontekiö	21.6.2017	-13.37	-102.05
Hanhijärvi länsi	Enontekiö	21.6.2017	-12.82	-99.81
Hietajärvi	Enontekiö	21.6.2017	-13.47	-99.86
Pahtajärvi	Enontekiö	21.6.2017	-12.99	-100.42
Raasikaltiot itä	Enontekiö	21.6.2017	-13.42	-99.59
Raasikaltiot keski	Enontekiö	21.6.2017	-13.61	-100.55
Raasikaltiot länsi	Enontekiö	21.6.2017	-13.57	-100.51
Pitkäjärvi	Kolari	15.6.2017	-10.16	-84.56
Saivojärvi	Kolari	15.6.2017	-10.17	-86.02
Pikku Karijärvi	Kolari	16.6.2017	-8.08	-74.3
Iso Karijärvi	Kolari	16.6.2017	-8.35	-75.28
Kangasjärvi	Kolari	16.6.2017	-10.31	-86.31
Valkeajärvi	Muonio	20.6.2017	-10.43	-86.89
Pieni Harjujärvi	Muonio	20.6.2017	-13.75	-103.83
Iso Harjujärvi	Muonio	20.6.2017	-13.68	-104.42
Kämpälampi	Pelkosenniemi	26.6.2017	-7.85	-73.47
Siiamojärvi	Pelkosenniemi	27.6.2017	-12.76	-99.10
Sorsalammit	Pelkosenniemi	26.6.2017	-8.70	-77.61
Hopialampi	Pelkosenniemi	27.6.2017	-12.16	-83.99
Syväjärvi	Pelkosenniemi	27.6.2017	-12.14	-94.23
Kuikkalampi	Pelkosenniemi	26.6.2017	-8.84	-78.79
Kolmiloukkonen	Pelkosenniemi	22.6.2017	-9.60	-85.12
Matalajärvi	Pelkosenniemi	27.6.2017	-11.75	-92.02
Hoikkalampi	Pelkosenniemi	22.6.2017	-11.14	-90.13
Palokankaanlammit	Pelkosenniemi	22.6.2017	-10.82	-90.18
Syvälampi	Pelkosenniemi	27.6.2017	-11.93	-93.42
Salmikko	Posio	8.6.2017	-14.63	-99.02
Livojärvi	Posio	8.6.2017	-11.38	-87.98
Aitalampi	Posio	8.6.2017	-11.72	-88.08
Iso Ahvenlampi	Posio	9.6.2017	-11.91	-93.01
Nimetönlampi 2	Posio	6.6.2017	-8.21	-77.79
Pikku Kokkolampi	Posio	7.6.2017	-10.36	-84.35
Pikku Kettulampi	Posio	8.6.2017	-13.62	-100.07
Juurikkalampi	Posio	9.6.2017	-8.40	-76.20

Julmalampi	Posio	8.6.2017	-9.04	-79.67
Saarijärvi	Posio	9.6.2017	-13.27	-98.21
Saarilammit	Posio	9.6.2017	-9.58	-81.99
Kalliolampi	Posio	7.6.2017	-8.27	-73.82
Hoikkalampi	Posio	9.6.2017	-13.27	-98.47
Putikanperä	Posio	8.6.2017	-12.51	-94.79
Rytinki	Posio	9.6.2017	-10.60	-87.05
Iso Kokkolampi	Posio	7.6.2017	-13.40	-101.65
Lampolampi	Posio	8.6.2017	-9.25	-81.04
Petäjäjärvi	Ranua	20.7.2017	-11.96	-90.24
Luiminkajärvi	Ranua	20.7.2017	-11.92	-89.79
Koirajärvi	Ranua	21.7.2017	-10.88	-85.1
Pulkkalampi	Ranua	21.7.2017	-8.35	-74.72
Rämiälampi	Ranua	21.7.2017	-10.73	-85.28
Siuruanjärvi	Ranua	21.7.2017	-11.7	-88.81
Ristilampi	Savukoski	25.7.2017	-12.73	-97
Marjajärvi	Savukoski	26.7.2017	-12.6	-94.93
Rannisjärvi	Savukoski	26.7.2017	-12.68	-95.92
Luoppulainen	Savukoski	26.7.2017	-12.4	-94.86
Pitkä-Sieriäinen	Savukoski	26.7.2017	-12.23	-95.46
Kota-Sieriäinen	Savukoski	26.7.2017	-12.52	-95.46
Haukijärvi	Savukoski	26.7.2017	-13.74	-101.73

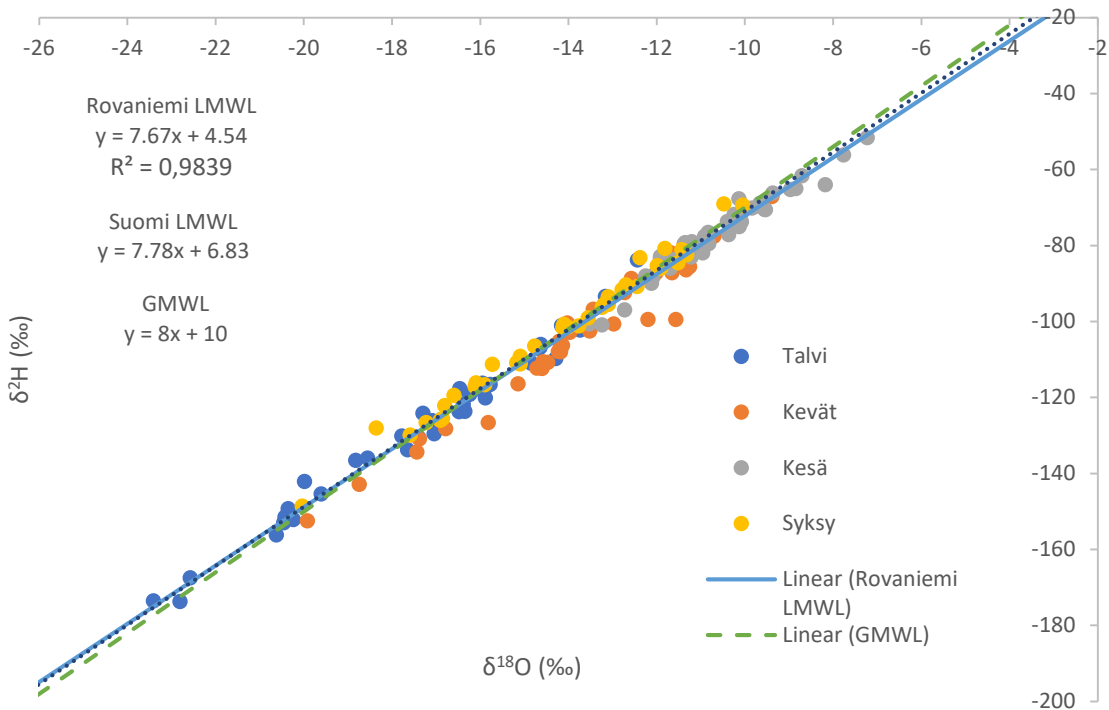
Taulukko 2. Pohjavesien näytteenottopisteet sekä $\delta^{18}\text{O}$ - ja $\delta^2\text{H}$ -arvot.

Pohjavesiputki	Kunta	Näytteenoton pvm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
KP 67	Kolari	16.6.2017	-14.58	-107.39
UP 1252	Kolari	15.6.2017	-13.85	-102.44
UP 757	Kolari	15.6.2017	-14.44	-105.56
UP 1241	Muonio	20.6.2017	-13.02	-99.99
KP 205	Posio	9.6.2017	-13.27	-96.49
KP 129	Posio	7.6.2017	-14.20	-104.01
TK 13	Ranua	20.7.2017	-14.13	-102.62
UP 30	Ranua	20.7.2017	-13.33	-96.88
UP 1230	Savukoski	26.7.2017	-14.53	-107.41



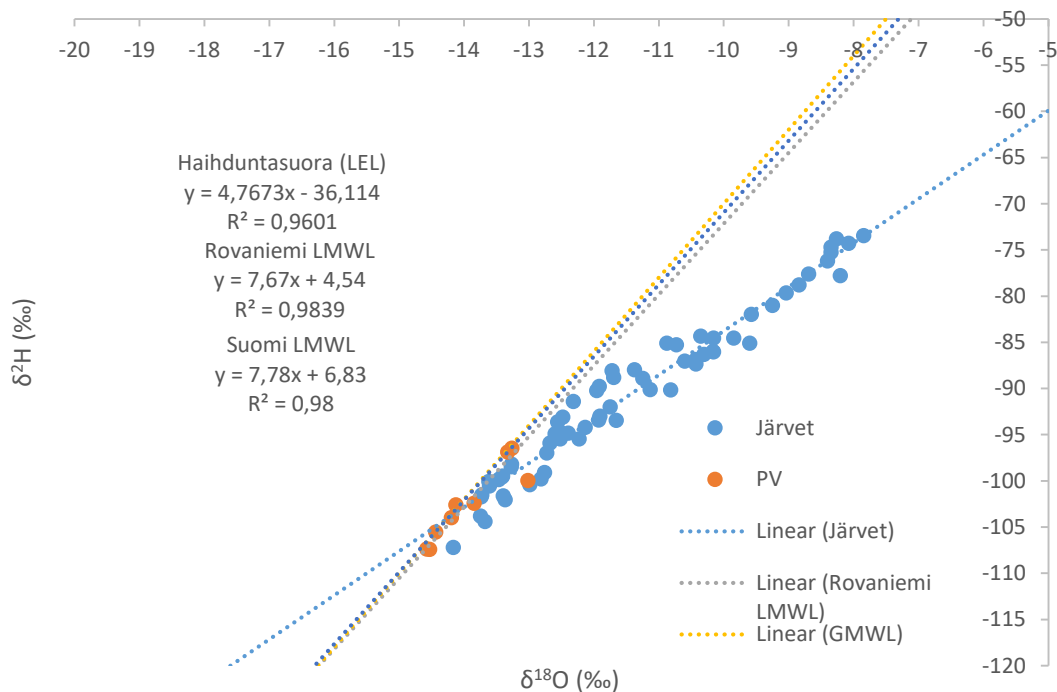
Kuva 2. Pohjavesien havaintopaikkojen d-excess-arvot.

Alueelle määritettiin paikallinen meteoristen vesien suora (Rovaniemi LMWL) sadannan kuukausinäytteiden perusteella, joita on kerätty marraskuusta 2003 vuoden 2016 loppuun Rovaniemellä Geologian tutkimuskeskuksen toimesta (Kuva 3). Alueen LMWL-suora, $\delta^2H = 7,67\delta^{18}O + 4,54$, on lähellä GMWL-suoraa ($\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$) ja Suomelle määritettyä LMWL-suoraa. Referenssisuora GMWL (global meteoric water line) kuvaa vedyn ja hapen isotooppien riippuvuutta sadannassa maailmanlaajuisesti. Kesäsadannan painotetuksi keskiarvoksi saatiin $\delta^{18}O_p = -10,7\text{‰}$ ja $\delta^2H_p = -77\text{‰}$.



Kuva 3. Sadannan isotooppikoostumus ja Rovaniemen LMWL-suora sekä yleinen GMWL-suora (referenssinä) sekä koko Suomelle määritetty LMWL-suora (Craig 1961; Kyllönen 2018).

Haihduntasuora (LEL, $\delta^2\text{H} = 4,77\delta^{18}\text{O} - 36,11$, $R^2 = 0,96$) määritettiin järvien hapen ja vedyn δ -arvojen perusteella (Kuva 4). Järvinäytteistä on havaittavissa haihdunnan aikaansaama rikastuminen raskaampien isotooppien suhteen. Haihduntasuoran ja paikallisen meteoristen vesien suoran (LMWL) leikkauskohtaa ($-14,0$; -103 ‰) käytettiin tulevan kokonaisvirtaaman isotooppikoostumuksen (δ_{IT}) alkuarvona.



Kuva 4. Tutkimusalueen järvien ja pohjavesien isotooppikoostumukset sekä haihduntasuora.

3.2 Tutkittujen järvien pohjavesivaikutteisuus

3.2.1 Tarvittavat parametrit iteratiivista isotooppimassatase-menetelmää varten

Tarvittavia parametreja ovat veden lämpötila (T_{vesi}), ilman lämpötila (T_{ilma}) ja ilmankosteus (h). Tarvittavat parametrit on esitetty taulukossa 3. Suhteellisen kosteuden keskiarvo tarkasteluajanjaksolla (kesä - elokuu 2017) vaihteli välillä 76 - 79 %. Ilman keskilämpötila tarkasteluajanjaksolla oli välillä 10,7 - 13,4 °C. Sademäärä vaihteli alueellisesti paljonkin tarkasteluajanjaksolla välillä 161 - 258 mm. (Ilmatieteen laitos 2018 & 2019)

Taulukko 3. Tarvittavat parametrit iteratiivista isotooppimassatase-menetelmää varten tarkasteluajanjaksolle kesä – elokuu 2017 (Ilmatieteenlaitos 2018 & 2019, SYKE 2017).

Parametri	Arvo	Yksikkö
Sademäärä	161 - 258	mm
Sadannan isotooppikoostumus		
$\delta^{18}O_P$	-10,32	‰
δ^2H_P	-77,4	‰
Ilman keskilämpötila, T_{ilma}	10,7 - 13,4	°C
Veden keskilämpötila, T_{vesi}	13,2 - 14,0	°C

Suhteellinen kosteus ka., h

76 - 79

%

3.2.2 Järvien ja pohjavesien isotooppikoostumukset

Joidenkin tarkastelun kohteena olevien järvien isotooppikoostumukset eivät eronneet riittävästi pohjaveden isotooppikoostumuksesta. Kyseisten järvien isotooppikoostumukset olivat erittäin lähellä pohjaveden keskimääräistä isotooppikoostumusta tai vastasivat pohjaveden isotooppikoostumusta, mikä vaikuttaa isotooppimassatase-menetelmään sovellettavuuteen. Edellä mainittuihin järviin kuuluivat seuraavat järvet 2., 18., 19., 31. ja 37.

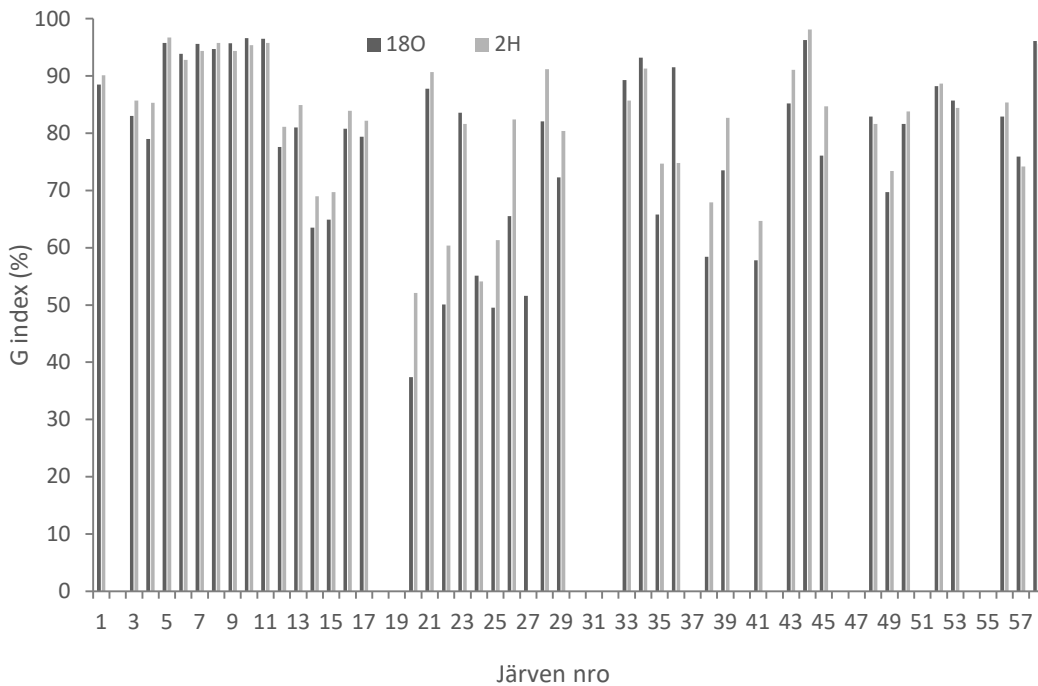
3.2.3 Järvien vesitase isotooppisignaaleilla ja G index

Yhtälön (14) avulla laskettiin tulevan kokonaisvirtaaman suhde haihduntaan (I_{TOT}/E). Järvien isotooppimassataseet laskettiin ajanjaksolle kesä - elokuulle 2017 (Taulukko 4).

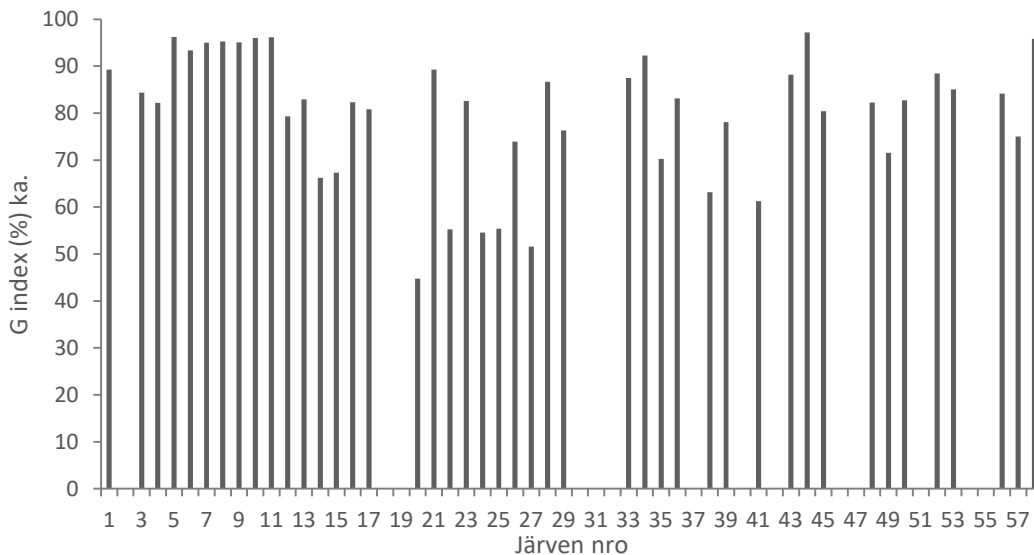
Taulukko 4. Isotooppimassataseen tulokset (mittausjaksona 12.6. – 31.8.2017).

Nro	Kohde	Pinta-ala (ha)	Haihdunta (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	I_{GW} (m ³ /d)		I_{TOT}/E		G index (%)	
						¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H
1	Lauttajärvi	7.931	199	-11.66	-93.45	1848	2188	10.7	12.5	88.5	90.1
2	Lalvajärvi	2.299	212	-14.17	-107.2					≥100	≥100
3	Nimetön lampi 1	0.47	222	-10.43	-87.37	73	90	6.9	8.1	83	85.7
4	Siikajärvi	1.24	212	-9.85	-84.57	148	228	5.8	8.3	79	85.3
5	Hanhijärvi itä	2.145	213	-13.37	-102.1	1482	1906	29.4	35	95.8	96.7
6	Hanhijärvi länsi	2.483	211	-12.82	-99.81	1163	3093	19.2	17.1	93.9	92.8
7	Hietajärvi	26.386	170	-13.47	-99.86	18017	14079	34	26.9	95.6	94.4
8	Pahtajärvi	1.806	215	-12.99	-100.4	1008	1289	22.2	28.1	94.7	95.8
9	Raasikaltiot itä	6.628	182	-13.42	-99.59	4622	3549	32.4	25.2	95.7	94.4
10	Raasikaltiot keski	1.923	194	-13.61	-100.6	4701	3445	38.7	28.7	96.6	95.4
11	Raasikaltiot länsi	1.25	198	-13.57	-100.5	1087	891	56.9	28	96.5	95.8
12	Pitkäjärvi	7.979	147	-10.16	-84.56	730	902	6.5	7.7	77.6	81.1
13	Saivojärvi	5.214	149	-10.17	-86.0	559	736	7.2	9.8	81	84.9
14	Pikku Karijärvi	9.692	142	-8.08	-74.3	389	498	3.6	4.2	63.5	69
15	Iso Karijärvi	11.794	137	-8.35	-75.28	504	627	3.9	4.5	64.9	69.7
16	Kangasjärvi	2.671	147	-10.31	-86.31	260	322	6.6	7.9	80.8	83.9
17	Valkeajärvi	15.903	149	-10.43	-86.89	1657	1956	7.1	8.2	79.4	82.2
18	Pieni Harjujärvi	20.147	147	-13.75	-103.8					≥100	≥100
19	Iso Harjujärvi	22.605	146	-13.68	-104.4					≥100	≥100
20	Kämpälampi	2.316	75	-7.85	-73.47	32	59	4	5.3	37.4	52.1
21	Siiamojärvi	30.645	67	-12.76	-99.10	5051	6839	22.7	29.8	87.8	90.7
22	Sorsalampi (e)	3.727	74	-8.70	-77.61	87	133	4.9	6.2	50.1	60.4
23	Hopialampi	5.253	72	-12.16	-83.99	623	545	16	14.3	83.6	81.6
24	Syväjärvi*	4.311	74	-12.14	-94.23	2272	2186	21.2	20.7	55.1	54.1
25	Kuikkalampi	5.427	72	-8.84	-78.79	124	200	5.2	6.8	49.5	61.3
26	Kolmiloukkonen	13.432	69	-9.60	-85.12	585	1449	7.8	15.4	65.5	82.4

27	Matalajärvi*	17.461	69	-11.75	-92.02						
28	Hoikkalampi	17.116	69	-11.14	-90.13	1806	4063	15.1	30.6	82.1	91.2
29	Palokankaanlampi (p)	3.48	74	-10.82	-90.18	212	333	9.2	12.2	72.3	80.4
30	Syvälampi*	3.197	75	-11.93	-93.41						
31	Salmikko	4.059	130	-14.63	-99.02					≥100	≥100
32	Livojärvi	3286.623	93	-11.38	-87.98						
33	Aitalampi	3.913	130	-11.72	-88.08	523	375	9.3	7	89.3	85.7
34	Iso Ahvenlampi	6.582	130	-11.91	-93.01	2428	1857	24.7	19.3	93.2	91.3
35	Nimetön lampi	2.038	134	-8.21	-77.79	106	162	4.8	6.4	65.8	74.7
36	Pikku Kokkolampi	2.314	133	-10.36	-84.35	1521	420	35.6	12	91.5	74.8
37	Pikku Kettulampi	3.425	131	-13.62	-100.1					≥100	≥100
38	Juurikkalampi	2.361	122	-8.40	-76.20	89	134	4.3	5.6	58.4	67.9
39	Julmalampi	2.56	133	-9.04	-79.67	256	441	6.2	9.7	73.5	82.7
40	Saarijärvi	11.241	127	-13.27	-98.21						
41	Kalliolampi	6.984	126	-8.27	-73.82	257	344	4.1	4.9	57.8	64.7
42	Hoikkalampi	6.61	127	-13.27	-98.47						
43	Rytinki	8.753	125	-10.60	-87.05	1215	2163	10.6	17.6	85.2	91.1
44	Iso Kokkolampi	6.596	127	-13.40	-101.7	4632	9314	46.5	91.8	96.3	98.1
45	Lampolampi	2.125	134	-9.25	-81.04	163	284	6.1	9.5	76.1	84.7
46	Petäjajärvi	132.298	104	-11.96	-90.24						
47	Luiminkajärvi	353.784	99	-11.92	-89.79						
48	Koirajärvi	45.299	92	-10.88	-85.1	2488	4283	5.8	10.2	82.9	81.6
49	Pulkkalampi	1.264	132	-8.35	-74.72	62	75	4.3	4.9	69.7	73.4
50	Rämiälampi	2.649	106	-10.73	-85.28	250	292	8.9	10.1	81.6	83.8
51	Siuruanjärvi	24.534	114	-11.7	-88.81						
52	Ristilampi	3.184	82	-12.73	-97	603	635	21.2	22.2	88.2	88.7
53	Marjajärvi	11.347	75	-12.6	-94.93	1795	1619	19.9	18.3	85.7	84.4
54	Rannisjärvi	13.146	75	-12.68	-95.92						
55	Luoppulainen*	3.424	79	-12.4	-94.86						
56	Pitkä-Sieriäinen*	22.456	70	-12.23	-95.46	2720	3284	16.9	19.8	82.9	85.4
57	Kota-Sieriäinen	34.887	69	-12.52	-95.46	5183	4733	23	21.5	75.9	74.2
58	Haukijärvi	0.42	99	-13.74	-101.7	229	180	46.3	36.9	96.1	95.6



Kuva 5. G index kuvaa järven riippuvuutta pohjavedestä. G index määritellään jakamalla järveen tuleva pohjaveden virtaama järveen tulevalla kokonaisvirtaamalla. Kuvaajassa on sekä ^{18}O - että ^2H -dataan perustuvaan isotooppimassatase-menetelmällä laskettu G index.



Kuva 6. ^{18}O - että ^2H -dataan perustuvaan isotooppimassatase-menetelmällä laskettujen suhdelukujen (G index) keskiarvo.

4 ISOTOOPPIMENETELMÄN EPÄVARMUUKSISTA

Järveen suotautuvan pohjaveden määrittämisessä isotooppimenetelmän avulla sovellettiin eri vuonna määritettyjä δ -arvoja sekä haihdunnan ja sadannan arvoja, joten saadut tulokset ovat suuntaa antavia arvioita pohjavesikomponenttien suuruudesta.

Järvien isotooppikoostumus vaihtelee kausittain, johtuen paikallisesta ilmastosta (ilman lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta, sademäärästä) saavuttaen isotooppisen vakiotilan syys-lokakuussa. Lisäksi jääpeite vaikuttaa järvien isotooppikoostumuksen kausittaiseen vaihteluun. (Isokangas 2015)

Järvivesinäytteet isotooppianalyysija varten otettiin pääasiassa kesäkuussa, mikä aiheuttaa tuloksiin epävarmuutta. Muutamassa kesäkuun alussa otetussa järvessä oli vielä ohut jääpeite.

Pintaveden lämpötilasta oli saatavilla mittausdataa kahdesta järvestä (kokoluokaltaan yli 500 ha). Epävarmuudet liittyen pintaveden lämpötilaan lisäävät epävarmuutta haihdunnan laskentaan, mikä taas vaikuttaa laskettuihin I_{TOT}/E - ja G -arvoihin.

5 YHTEENVETO

Hapen delta-arvot ($\delta^{18}O$) vaihtelivat järvissä välillä $-7,4$ ‰ ja $-14,6$ ‰ ja pohjavesissä välillä $-13,0$ ‰ ja $-14,6$ ‰. Vedyn delta-arvot (δ^2H) vaihtelivat järvissä välillä -73 ‰ ja -107 ‰ ja pohjavesissä välillä -96 ‰ ja -107 ‰. Vaihteluväli oli suurempi järvissä.

Sadanta-aineiston perusteella alueelle määritettiin LMWL-suora eli paikallinen meteoristen vesien suora ($\delta^2H = 7,67\delta^{18}O + 4,54$). Pintavesien δ -arvojen avulla määritettiin haihduntasuora ($\delta^2H = 4,77\delta^{18}O - 36,11$). Suorat kertovat veden stabiilien isotooppien, deuteriumin ja happi-18:n, keskinäisen riippuvuussuhteen. Lapin alueelta kerättyjen pohjavesinäytteiden perusteella pohjaveden keskimääräiseksi isotooppikoostumukseksi saatiin: $\delta^{18}O = -14,04$ ‰ ja $\delta^2H = -102,8$ ‰.

Arvioitu G index vaihteli noin 45:stä yli 95: een %. Laskennan perusteella pohjaveden osuuden arviotiin olevan matalin Kämpälämmin vesitaseessa (44,8 %). Monet tarkastelun kohteena olevista järvistä olivat pohjavesivaikutteisia iteratiivisen isotooppimassatase-menetelmän perusteella. Tulokset ovat kuitenkin suuntaa antavia ja sisältävät paljon epävarmuuksia.

6 LÄHTEET

Clark I., & Fritz P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. New York: CRC Press. 328 s. ISBN 1-56670-249-6

Craig H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133 (3467), s. 1702-1703.

Dansgaard W., 1964. Stable Isotopes in Precipitation. *Tellus*, 16 (4), s. 436–468.

Dingman S. L., 2008. Physical Hydrology, 2. painos. Long Grove, IL: Waveland press, 646 s. ISBN 978-1-57766-561-8

Ilmatieteenlaitos, 2018. Paituli-paikkatietopalvelu [paikkatietoaineisto] Saatavissa:
<https://avaa.tdata.fi/web/paituli/latauspalvelu>

Ilmatieteenlaitos, 2019. Havaintoasemakohtaiset säähavainnot. Saatavissa:
<https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>

Isokangas E., Rozanski K., Rossi P. M., Ronkanen A.-K. & Kløve B., 2015. Quantifying groundwater dependence of a sub-polar lake cluster in Finland using an isotope mass balance approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, pp. 1247–1262

Isokangas E., 2018. Quantifying the groundwater dependence of boreal ecosystems using environmental tracers [väitöskirja]. Oulu: Oulun yliopisto. Saatavissa:
<http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-952-62-2037-6>. 82 s.

Kortelainen N., 2007. Isotopic fingerprints in surficial waters: Stable isotope methods applied in hydrogeological studies. Geological Survey of Finland, Espoo, 41 s.

Kyllönen K., 2018. The variation of stable isotopes of water in precipitation in Finland [diplomityö]. Oulu: Oulun yliopisto.

Suomen ympäristökeskus, 2019. Ympäristöhallinnon keräämä ja tuottama ympäristötiedon hallintajärjestelmä (Hertta).

Liite 1

