

Terrafamen kaivosalueen läheisten järvien sulfaattikerrostumisen tarkastelu, kohteina Kolmisoppi, Kivijärvi ja Jormasjärvi

Terrafame Oy

Hannu Lauri
Titta Anttila

Pöyry Finland Oy, Ympäristötutkimus, Oulu

Copyright © Pöyry Finland Oy

Kaikki oikeudet pidätetään Tätä asiakirjaa tai osaa siitä ei saa kopioida tai jäljentää missään muodossa ilman Pöyry Finland Oy:n antamaa kirjallista lupaa.

Sisältö

1	JOHDANTO	2
2	JÄRVIER SEKOITTUMINEN 2010 – 2016 JOHTAVUUDEN PERUSTEELLA	2
2.1	Järven sekoittuminen syvyysuunnassa	2
2.2	Meromittiset järvet Suomessa	3
2.3	Kivijärvi, Kolmisoppi ja Jormasjärvi	3
2.4	Kerrostuminen mittauksissa	4
2.5	Kolmisoppi	4
2.6	Kivijärvi	5
2.7	Jormasjärvi	6
3	JÄRVIER SULFAATTIVARASTOJEN LASKENTA	8
3.1	Laskentamenetelmä	8
3.2	Lähtötiedot	9
3.3	Kolmisopen laskentatulokset	9
3.4	Kivijärven laskentatulokset	11
3.5	Jormasjärven laskentatulokset	13
3.6	Sulfaattikuormitukset	15
4	LÄHDELUETTELO	16
	LIITE 1: LASKENTAMALLIN KUVAUS	17

1 JOHDANTO

Terrafamen kaivoksen sulfaattipitoisia vesistö päästöjä on valunut vuosina 2010 – 2017 sekä Vuoksen vesistön suunnassa olevaan Kivijärveen, että Oulujoen vesistön suuntaan Kolmisoppeen ja sen kautta Jormasjärveen.

Veteen liuenneena sulfaatti ja metalli-ionit aiheuttavat veden tiheyden nousua. Sulfaattipitoinen vesi on siten järviin normaalisti niiden valuma-alueelta valuvaa vettä tiheämpää ja pyrkii kerrostumaan järvien syvänteisiin. Mikäli sulfaattipitoisuus on riittävän suuri, estää tämä tiheyskerrostuminen tyypillisen boreaalisen järven käyttäytymiseen kuuluvat kevät- ja syystäyskierröt, joissa järven vesi sekoittuu järven koko syvyydeltä.

Alla on tarkastelu kolmea edellä mainittua nykyisen Terrafamen kaivoksen lähialueen järveä kaivoksen purkuvesien aiheuttaman kerrostumisen osalta, sekä arvioitu järviin varastoituneen sulfaatin määrää ja sen purkautumista alavirtaan. Menetelminä on käytetty järvistä tehtyjen johtavuusmittausten analysointia ja yksinkertaista dynaamista varastomallia.

2 JÄRVIEN SEKOITTUMINEN 2010 – 2016 JOHTAVUUDEN PERUSTEELLA

2.1 Järven sekoittuminen syvyysuunnassa

Makea vesi on tiheintä neljän asteen lämpötilassa. Tyypillinen suomalainen järvi on lämpötilakerrostunut kesällä siten, että pinnan lähellä on neljää astetta lämpimämpää vettä, ja talvella siten, että pinnan lähellä on neljää astetta kylmempää vettä. Keväällä ja syksyllä järvi on hetken tasalämpöinen, jolloin järvi voi sekoittua koko syvyydeltä. Ylempi lämmin (tai kylmä) kerros on nimeltään päällysvesi (engl. epilimnion), ja sen alla oleva kerros alusvesi (hypolimnion). Näitä kahta kerrosta erottaa termokliini (välivesi), jossa lämpötila muuttuu nopeasti päällysveden lämpötilasta alusveden lämpötilaksi.

Termokliini on alkukesästä lähellä pintaa, mutta kesän kuluessa se siirtyy syvemmälle tuulen aiheuttaman sekoittumisen seurauksena. Termokliinin syvyyden on havaittu riippuvan pääasiassa tuulen pyyhkäisymatkasta, joka on yleensä laskettu neliöjuurena järven pinta-alasta. Toinen termokliinin syvyyttä määrittävä tekijä on näkösyvyys, joka määrittää sen miten syvälle auringon säteilyn vettä lämmittävä vaikutus voi ulottua. Määrävämpi tekijä on tuulen pyyhkäisymatka. Merialueilla ja suurilla järven selillä termokliini voi ulottua 20 m syvyydelle, hyvin pienillä järvillä sen syvin sijainti voi jäädä 5 m tasolle tai alle.

Kevät- ja syyskierto tapahtuu järvissä, kun vesi on kauttaaltaan tasalämpöistä. Vesi sekoittuu myös tiheyserojen vaikutuksesta, mutta sekoittumiseen tarvittava energia tulee veteen pääosin tuulesta. Kevätkierto voi olosuhteista riippuen jäädä vaillinaiseksi, jos tuulta on vähän ja pintaveden lämpötila nousee nopeasti jään lähdön jälkeen. Syksyllä vesi alkaa jäähtyä pintakerroksesta ja on syvyysuunnassa tasalämpöistä siinä vaiheessa, kun pintalämpötila jäähtyy pohjakerroksen lämpötilaa vastaavaksi. Yleensä tämä lämpötila on neljää astetta korkeampi, ja riippuu järven koosta ja enimmäissyvyydestä. Syksyllä aika, jossa vesi on tasalämpöistä koko syvyydeltä kestää pidempään kuin keväällä, jolloin vedellä on enemmän aikaa sekoittua. Syyskierto on siten tyypillisesti kevätkiertoa tehokkaampi.

2.2 Meromiktiset järvet Suomessa

Järveä, joka ei sekoitu koko syvyydeltään kutsutaan meromiktiseksi. Järvessä olevaa suolaisuudesta tai kemikaalipitoisuudesta johtuvaa rajaa, jossa sekoittuva vesialue vaihtuu sekoittumattomaksi vesikerrokseksi, sanotaan yleisemmin kemokliiniksi. Kemokliinin alapuolinen vesikerros on nimeltään monolimnion.

Suomessa on muutamia luontaisesti meromiktisiä järviä, joista hyvin tunnettuja on esim. Lapissa sijaitseva Pakasaivo. Järvi on pieni ja pinta-alan nähden syvä (60 m), sekä sijaitsee rotkolaaksossa, jonne tuuli ei juuri pääse vaikuttamaan. Muita meromiktisiä järviä on Suomesta löydetty harjujen suppien pohjalta, myös näiden järvien pääasiallinen meromiktian syy lienee tuulen sekoittavan vaikutuksen puuttuminen. Tyypillistä meromiktisille järville on, että kemokliinin alapuolella järveden happipitoisuus on lähellä nollaa. Kemokliinin alapuolisen vesikerroksen happi kuluu loppuun järven pohjan happea kuluttavien prosessien seurauksesta, eikä kerrokseen pääse uutta happipitoista vettä kemokliinin estäessä järven täyskierron.

2.3 Kivijärvi, Kolmisoppi ja Jormasjärvi

Tässä tarkasteltavat kaivosvesien vaikutusalueella olevat järvet ovat Kivijärvi, Kolmisoppi ja Jormasjärvi. Järvien olennaiset tiedot on esitetty taulukossa 1. Pinta-ala, syvyys- ja tilavuustiedot on saatu SYKE:n järvirekisteristä (SYKE 2017b), ja osittain myös laskettu MML:n kartta-aineiston perusteella (Maanmittauslaitos 2017). Valuma-alueet on arvioitu Suomen ympäristökeskuksen kolmannen jakovaiheen valuma-alue aineistosta. Tulovirtaamat on saatu Suomen ympäristökeskuksen WSFS-järjestelmästä (SYKE 2017c). Valumat ja viipymät on laskettu tilavuuden ja lähtövirtaamien perusteella. Näkösyvyydet on poimittu Suomen ympäristökeskuksen Hertta-tietokannasta (SYKE 2017a).

Vedenlaadun mittaustietoja oli kaikista kolmesta järvestä 1990-luvulta lähtien (ennen vuotta 2010 harvalla näytevälillä). Tiedot on poimittu Terrafame'n toimittamasta aineistosta.

Taulukko 1: Kivijärven, Kolmisopen ja Jormasjärven keskeiset tiedot

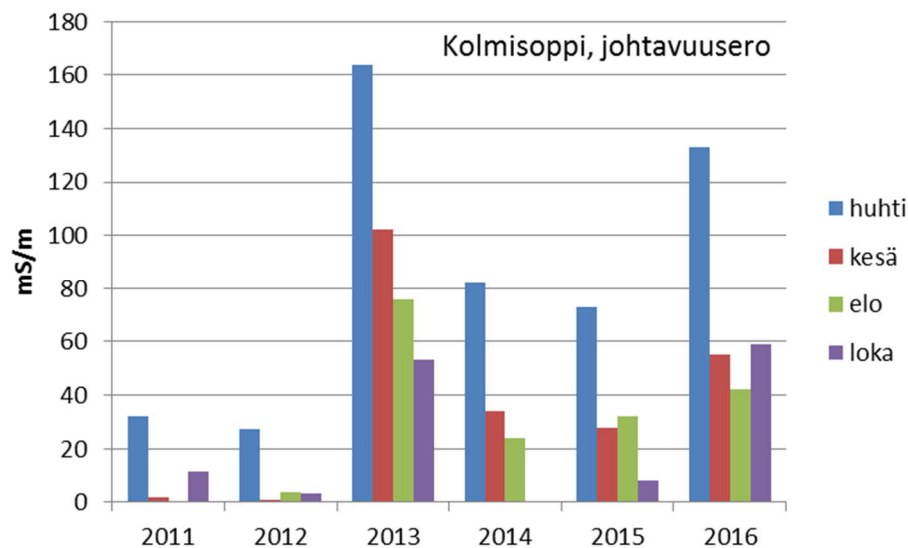
	Kivijärvi	Kolmisoppi	Jormasjärvi
Pinta-ala, km ²	1.89	2.15	20.65
Keskisyvyys, m	3.17	5.55	5.8
Suurin syvyys, m	10.4	14.1	28
Ala >6 m syvää, km ²	0.21		
Tilavuus, 10 ⁶ m ³	5.9	11.2	119
Pyyhkäisymatka, km	1.37	1.47	4.54
Järven yläpuolinen valuma-alue (sis. järven), km ²	53.92	111.0	299.69
Tulovirtaama m ³ /s	0.69	1.69	3.90
Näkösyvyys (2010-2016)	1.02	0.77	1.5
Viipymä, d	98	76	353
Valuma-alueen koodi	04.645	59.885	59.882
Järven koodi	04.645.01.001	59.885.01.002	59.882.01.001

2.4 Kerrostumisen mittauksissa

Järven pysyvän kerrostuneisuuden voi havaita mittauksista useammasta mittaussuureesta, esimerkiksi happipitoisuudesta, lämpötilasta ja johtavuudesta. Mikäli järvi ei sekoitu koko syvyydeltään, loppuu pohjanläheisestä kerroksesta jossakin vaiheessa happi, minkä jälkeen pohjanläheisen vesikerroksen happipitoisuus on pysyvästi lähellä nollaa. Mikäli lämpötila ei sekoitu koko syvyydeltä missään vaiheessa vuotta, pysyy pohjan läheisen kerroksen lämpötila lähes samana vuodenajasta riippumatta. Mikäli kemokliini on matalammalla kuin mihin termokliini ulottuisi normaalitilanteessa, nousee pinta- ja pohjakerroksen välinen lämpötilaero suuremmaksi kuin tilanteessa, jossa pysyvää kerrostumista ei ole. Johtavuus riippuu puolestaan melko lineaarisesti suolapitoisuudesta, joten mitä suolaisempaa ja tiheämpää vesi on, sitä suurempi on johtavuuden arvo. Mikäli vesi sekoittuu koko syvyydeltä, pitäisi myös johtavuuden olla samansuuruinen koko vesisyvyydellä. Tässä järvien kerrostumista on arvioitu johtavuuden perusteella.

2.5 Kolmisoppi

Oulujoen vesistön virtaussuunnassa sijaitsevalla Kolmisopelle johtavuuden ero (pohjakerros – pintakerros) on esitetty kuvassa 1. Kolmisoppi sijaitsee kaivospiirin sisäpuolella, ja vastaanottaa purkuputken kautta meneviä vesiä lukuun ottamatta käytännössä kaikki kaivosalueen Oulujoen suuntaan menevät vedet. Kolmisoppi laskee Tuhkajokea pitkin Jormasjärveen.



Kuva 1: Johtavuusero pohjan ja pinnan välillä (pohja-pinta) Kolmisopen mittauspisteessä, pohjakerroksen mittaussyvyys 12 m.

Kolmisopen mittauksissa on vuosina 2011 ja 2012 ollut talviaikaista kerrostumista, joka on purkautunut kevätkierron yhteydessä. Vuodesta 2013 eteenpäin jäteveden johtavuus on ollut merkittävästi suurempi kuin aikaisempina vuosina, eikä kerrostuminen ole purkautunut täysin vuosina 2013 ja 2016. Vuonna 2014 talviaikainen kerrostuminen ei ole purkautunut kevätkierron yhteydessä, mutta syyskierto on sen sijaan sekoittanut järven kokonaan, mikä näkyy vuoden 2014 lokakuun osalta johtavuuseron nolla-arvona. 2015 syksyllä järvi on todennäköisesti sekoittunut myös koko syvyydeltään pienestä johtavuuserosta päätellen.

Kolmisopessa on kahtena vuonna (2013 ja 2016) saavutettu kriittinen piste, jolloin järvi ei enää sekoitu syvyyssuunnassa. Kuormituksen vähentyessä järvi on kuitenkin

varsin nopeasti palautunut ja syyskierto on tapahtunut vuosina 2014 ja 2015. Lisään-
tynyt kuormitus on kuitenkin palauttanut järven meromiktiseen tilaan vuonna 2016.
Mittauksista päätellen Kolmisopessa kevätkierto estyy, kun johtavuusero pinnan ja
pohjan välillä ylittää 60 mS/m. Kevätkierto on tapahtunut, kun johtavuusero on ollut
noin 32 mS/m. Syyskierto on tapahtunut kun huhtikuun johtavuusero on ollut noin
60-80 mS/m välillä, mutta on jäänyt väliin, jos huhtikuun johtavuusero on ollut 130
mS/m tai suurempi.

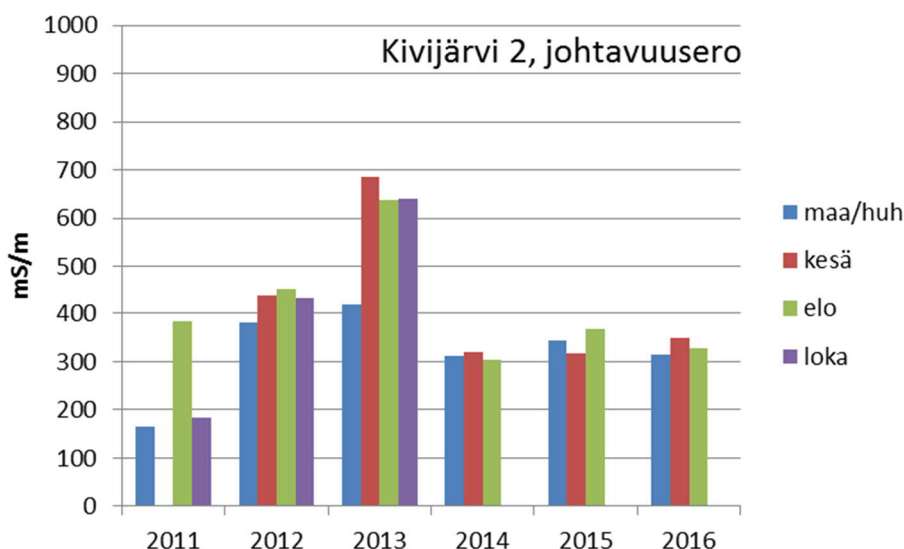
2.6 Kivijärvi

Kivijärvi on jakautunut useampaan pieneen altaaseen, joista kahdessa on yli 10 m
syvyinen alue. Piste Kivijärvi 2 edustaa pohjoisempaa syvännettä ja allasta ja piste
Kivijärvi 10 kaakkoista syvännettä. Piste Kivijärvi 7 sijaitsee järven luusuan lähellä,
noin 3-5 m syvyisellä pienellä selkälueella.

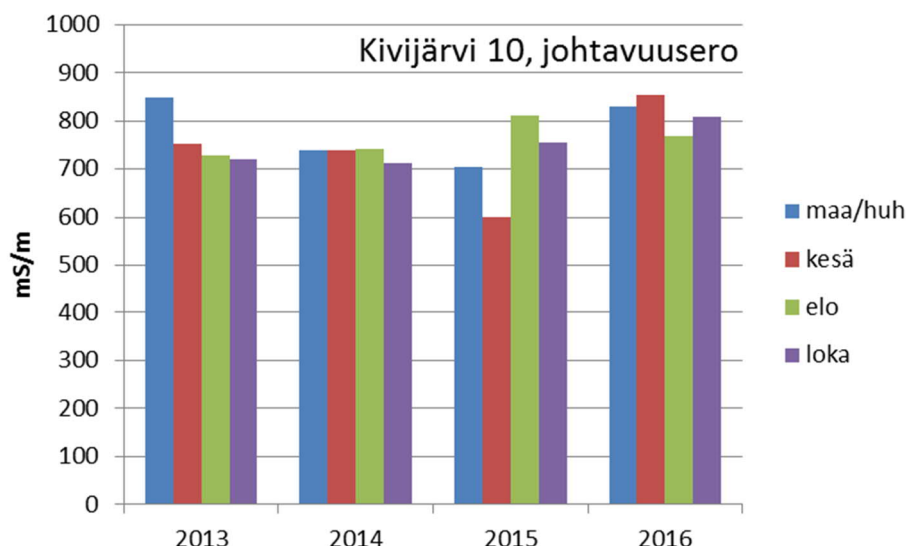
Pisteessä Kivijärvi 2 pysyvä kerrostuminen on jatkunut vuodesta 2011 eteenpäin.
Vuonna 2013 johtavuusero oli suurin, yli 600 mS/m, mutta on sen jälkeen vuosina
2014–2016 vakiintunut tasolle noin 330 mS/m. 2013 jälkeen lokakuun mittauksia ei
ole tehty. Syväne näyttää vakiintuneen meromiktiseen tilaan.

Pisteestä Kivijärvi 10 on mittauksia vuodesta 2012 alkaen. Johtavuusero on pisteessä
tasolla 700 – 800 mS/m, kun se Kolmisopessa on tästä noin viidesosa. Kolmisopessa
kerrostuminen purkautui johtavuuseron ollessa alle 100 mS/m. Kivijärvellä järven
läpivirtaama ja tuulen pyyhkäisymatka on Kolmisoppea pienempi, joten on todennä-
köistä, että tiheyseron olisi oltava Kolmisoppea pienempi kerrostumisen purkamisek-
si. Kaivoksen tuotantokatkoksen aikana 2014–2015 kesäkuun johtavuusero on syvän-
teessä kuitenkin pienentynyt jonkin verran, mikä viittaa siihen, että ulkoisen kuormi-
tuksen väheneminen voi suurentaa sekoittuvan kerroksen osuutta järven koko syvyy-
destä.

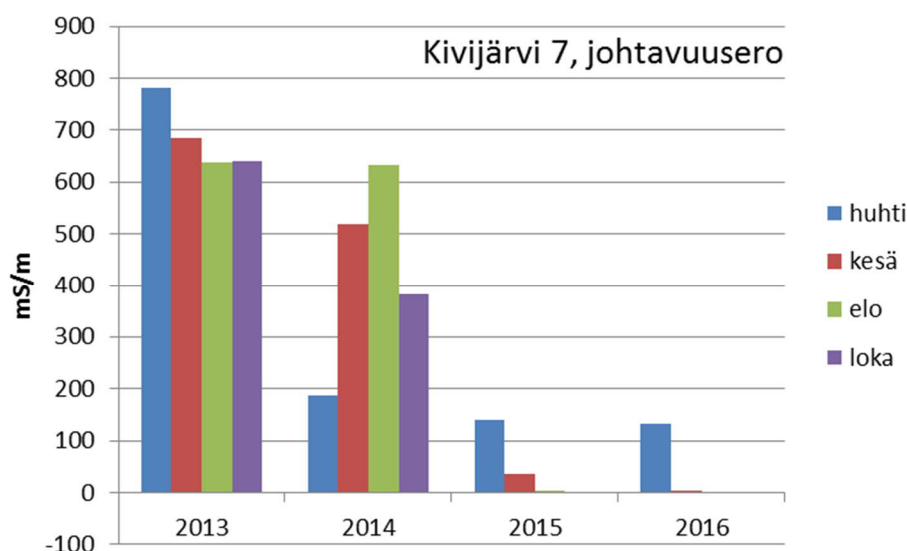
Pisteessä Kivijärvi 7 kerrostumista on ollut 2013 vastaavalla tasolla kuin pisteessä
kivijärvi 10. Kerrostuminen on purkautunut 2015 kevätkierron aikana. Kerrostumisen
purkautumista tässä pisteessä on todennäköisesti auttanut se, että pisteen lähialueen
kautta kulkee koko järvestä poistuva virtaama ja lisäksi se, että alue on kohtalaisen
matalaa (3–5 m).



Kuva 2: Johtavuusero pohjan ja pinnan välillä (pohja-pinta) Kivijärven mittauspiste Kivijärvi 2, pohjakerroksen mittaussyvyys 7 m.



Kuva 3: Johtavuusero pohjan ja pinnan välillä (pohja-pinta) Kivijärven mittauspiste Kivijärvi 10, pohjakerroksen mittaussyvyys 9 m.



Kuva 4: Johtavuusero pohjan ja pinnan välillä (pohja-pinta) Kivijärven mittauspiste Kivijärvi 7, pohjakerroksen mittaussyvyys 4 m.

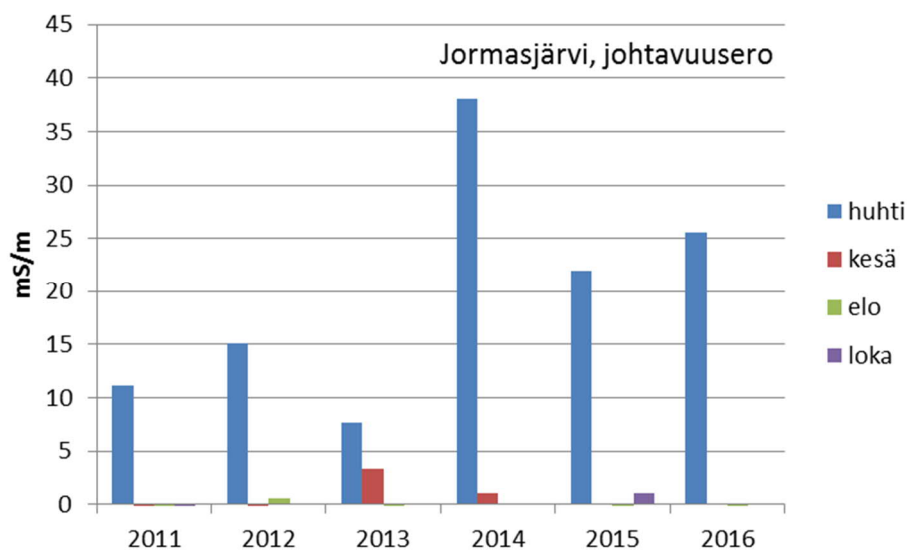
2.7

Jormasjärvi

Jormasjärvi sijaitsee virtaussuunnassa Kolmisopen alapuolella, ja on sekä pinta-alaltaan että tilavuudeltaan noin kymmenen kertaa Kolmisoppea suurempi.

Jormasjärvi ei johtavuuden eron perusteella ole kerrostunut jäteveden takia avovesi-aikana. Vuosina 2008 – 2009 johtavuusero talvella oli alle 2 mS/m, joten johtavuusmittausten perusteella Jormasjärvellä on 2010 jälkeen ollut havaittavissa jäteveden talviaikaista kerrostumista, joka on kuitenkin kevätkierron yhteydessä purkautunut.

Jormasjärvellä ei ole saavutettu vielä kriittistä johtavuuseron arvoa, millä järven syvänteen syyskierto olisi estynyt. Vuosina 2013 ja 2014 kesäkuussa syvänteen pohjalta oli suurempi johtavuus kuin pintakerroksessa, mikä johtuneen Kolmisopesta kevään aikana valuneesta sulfaattipitoisesta vedestä, ei kevätkierron estymisestä.



Kuva 5: Johtavuusero pohjan ja pinnan välillä (pohja-pinta) Jormasjärven syvänteen mittauspisteessä, pohjakerroksen mittaussyvyys noin 25 m.

Jormasjärven syvänte ei ole mittausten mukaan missään vaiheessa ollut meromiktiivinen sulfaattipitoisuudesta johtuen. Mikäli sulfaattikuormitusta ja kuormituksen sulfaattipitoisuuksia voidaan pienentää nykytilanteesta, ei kerrostuminen ole myöskään jatkossa todennäköistä.

3 JÄRVEN SULFAATTIVARASTOJEN LASKENTA

Kolmisopen, Jormasjärven ja Kivijärven sulfaattivarastojen suuruutta ja käyttäytymistä arvioitiin sovittamalla kullekin järvelle yksinkertainen dynaaminen varastomalli, jossa järven sulfaattivarastojen käyttäytymistä laskettiin tulevien ja lähtevien virtaamien, tulevien pitoisuuksien ja järven syvyys-tilavuus käyrän perusteella. Mallin parametrit arvioitiin jakson 2009 – 2016 perusteella, minkä jälkeen järvien käyttäytyminen jaksolla 2017 – 2025 laskettiin käyttämällä vuoden 2009 – 2016 virtaamatietoja ja lupaehdon mukaisia kuormituksia (kuormitus 2500 tn/a ja juoksutuksen pitoisuus enintään 3000 mg/l).

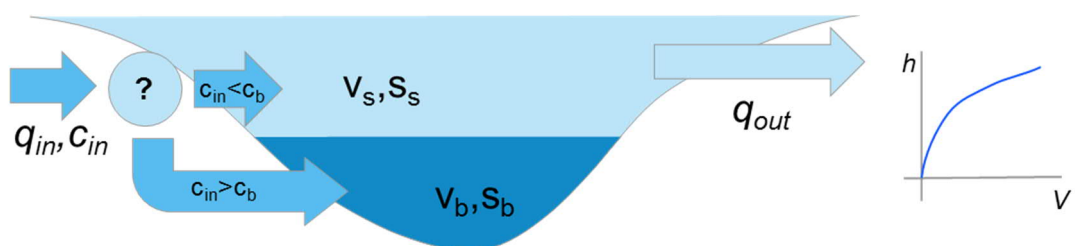
3.1 Laskentamenetelmä

Mallissa järveä kuvattiin kaksikerroksisena varastoaltaana, missä kerrosten tilavuus ja sulfaattipitoisuudet voivat vaihdella ajan kuluessa tulo- ja lähtövirtaamista ja pitoisuuksista riippuen. Mallin alempi kerros kuvaa korkeamman sulfaattipitoisuuden kerrosta pohjan lähellä, ylempi kerros puolestaan tuulen vaikutuksesta avovesiaikana sekoittuvaa kerrosta. Lämpötilakerrostumista ei otettu tässä huomioon.

Mallin tilamuuttujia ovat pinta- ja pohjakerroksen tilavuudet ja sulfaattivarastot. Tuleva vesi lisätään joko järven pinta- tai pohjakerrokseen sulfaattipitoisuuksista riippuen: mikäli tulovirtaaman sulfaattipitoisuus on pohjakerroksen pitoisuutta suurempi, lisätään tulovirtaama pohjakerrokseen, muuten se lisätään pintakerrokseen. Lähtevä virtaama otetaan aina järven pintakerroksesta, ja sen sulfaattipitoisuus on pintakerroksen mukainen. Tulo- ja lähtövirtaamien lisäksi mallissa otetaan huomioon järven syvyysuuntainen sekoittuminen: avovesiaikana järven oletetaan sekoittuvan tuulen vaikutuksesta vähintään parametrina määritellyn minimisyvyuden tasolle asti. Kevät- ja syyskierron aikana järven kerrokset sekoitetaan, mikäli niiden pitoisuusero alittaa annetun enimmäisarvon. Mallin laskentakaavat on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

Mallin lähtötiedoiksi tarvitaan järven kuormitusta tuovan joen päivittäinen sulfaattipitoisuus ja virtaama, sekä järvestä lähtevä virtaama. Järven tulevat muut virtaamat lasketaan sulfaattikuormaa tuovan virtaaman ja lähtevän virtaaman erotuksena olettaen että järven tilavuus pysyy vakiona. Muiden tulovirtaamien sulfaattipitoisuus oletetaan nollassa. Lähtötietona tarvitaan myös järven syvyys-tilavuus käyrä, jota käytetään pinta- ja pohjakerroksen rajan syvyyden määrittämiseen, sekä jäätyksen ja jäänlähdon ajankohdat, joita tarvitaan syvyysuuntaisen sekoittumisen määrittämiseen.

Lopputuloksena mallista saadaan arvio järven sulfaattivaraston koosta ja sen muuttumisesta ajan suhteen, sekä järvestä lähtevän veden sulfaattipitoisuus. Malli on varsin yksinkertainen ja riippuu pitkälti lähtötiedoista, eli käytettyjen lähtötietojen tarkkuus määrää pitkälti myös mallin lopputuloksen tarkkuuden.



Kuva 6: Järven kaksikerrosmallin tilamuuttujat ja lähtötiedot

3.2 Lähtötiedot

Kolmisopen ja Kivijärven mallien virtaama- ja pitoisuustietojen lähteet on esitetty taulukossa 2. Ne virtaamatiedot, joita ei ollut saatavissa suorina mittauksina, poimitiin Suomen Ympäristökeskuksen WSFS-järjestelmästä (SYKE 2017c). Lumijoen osalta virtaamista jäivät puuttumaan jakson 2010 – 2014 kaivoksen juoksutuksen vesimäärät.

Taulukko 2: Kolmisopen ja Kivijärven laskennan lähtötiedot

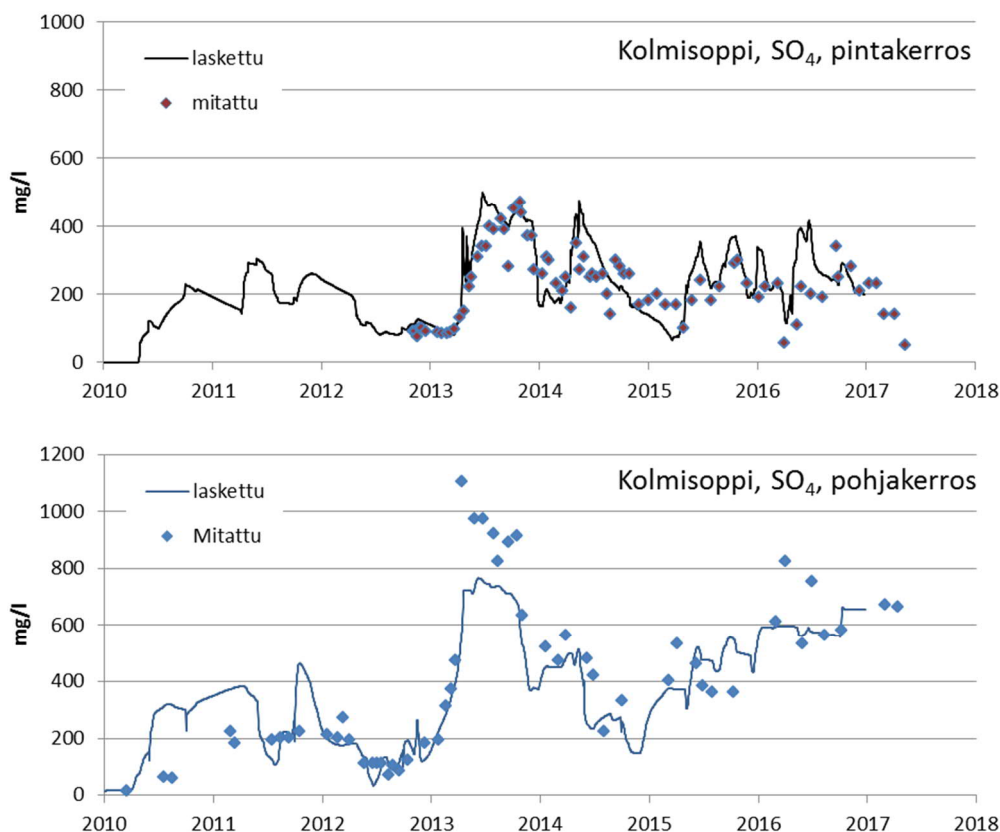
	Kolmisoppi	Kivijärvi	Jormasjärvi
Tulovirtaama	mitattu Kalliojoki	Lumijoki (WSFS + kaivoksen juoksu- tus)	Tuhkajoki (WSFS)
Lähtövirtaama	Kolmisoppi lähtevä (WSFS)	Kivijoki (WSFS)	Jormasjoki (WSFS)
Tulopitoisuus	mittauspiste Kalliojoen suu	Lumijoki mitattu (kk-arvot interpo- loitu päiväarvoiksi)	Tuhkajoki + Kol- misoppi laskettu
Syvyystiedot	SYKE järvirekisteri	SYKE järvirekiste- ri + MML kartta- tiedot	MML-karttatiedot
Jäätyminen /Jäänlähtö	SYKE Oiva	SYKE Oiva	SYKE Oiva
SO ₄ -pitoisuus, pinta (vertailuun)	mittauspiste Kolmisoppi lähtevä	mittauspisteet Kivijoki 4 ja Kivijärvi 2	mittaus Jormasjärvi syväne (Jor3)
SO ₄ -pitoisuus, pohja (vertailuun)	mittauspiste Kolmisoppi	mittauspisteet Kivijärvi 10 ja Kivijärvi 2	mittaus Jormasjärvi syväne (Jor3)

Jakson 2017–2023 laskennassa on käytetty jakson 2010–2016 virtaamia siten, että 2017 virtaamina on käytetty vuoden 2010 tietoja, 2018 vuodelle 2011 tietoja jne. Tulevalle sulfaattikuormitukselle käytettiin Kolmisopelle ja Kivijärvelle seuraavaa skenaariota: kuormitus asetettiin niin, että järveen tulevan veden pitoisuus oli 300 mg/l. Kuormitus aloitettiin heti jäiden lähdettyä, ja sitä jatkettiin kunnes sulfaatin vuosi-kiintiö (2500 tn/a) täyttyi. Jormasjärvelle tulopitoisuutena käytettiin 2017 eteenpäin Kolmisopen mallilla laskettuja tietoja.

3.3 Kolmisopen laskentatulokset

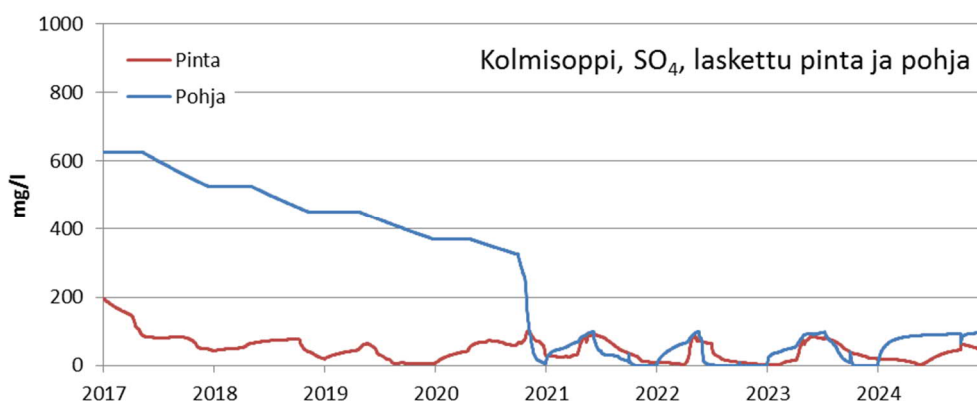
Kolmisopelle sovitettun mallin laskemat pinta- ja pohjakerroksen sulfaattipitoisuudet jaksolta 2010–2016 on esitetty kuvassa 7. Mallin laskemat tulokset on esitetty yhte-näisellä viivalla ja mittauksulokset pisteinä.

Järven pintakerroksen ja pohjakerroksen pitoisuuden vaihtelut toistuvat mallissa pääpiirteittäin, mutta mallin tarkkuus ei riitä mittaustulosten yksityiskohtaisen vaihtelun toistamiseen. Vuoden 2013 osalta pohjakerroksen pitoisuus jää liian pieneksi, mutta muuten laskettu pitoisuustaso vastaa kohtuullisen hyvin mitattuja arvoja. Pintakerrokselle laskettu pitoisuus vastaa tasoltaan mittauksia, mutta vuoden sisällä tapahtuva vaihtelu ei toistu erityisen hyvin.



Kuva 7: Laskettu ja mitattu pinnan ja pohjan sulfaattipitoisuus, Kolmisoppi 2010-2016

Mallin laskema arvio järven pohjan ja pinnan sulfaattipitoisuuksille jaksolle 2017 – 2023 on esitetty kuvassa 8. Tulokuormituksen vähentyessä pohjakerrokseen jää sulfaattipitoista vettä, joka aiheuttaa kerrostumista. Kerrostuminen poistuu tässä tehdyn laskennan mukaan muutaman vuoden kuluessa (käytetyillä parametreilla vuoden 2020 syksyllä). Kerrostumisen purkautumisen tarkempi ajankohta riippuu tulopitoisuuksista, tulovirtaamista, tulokuormituksen ajoituksesta sekä lähtötilanteesta.

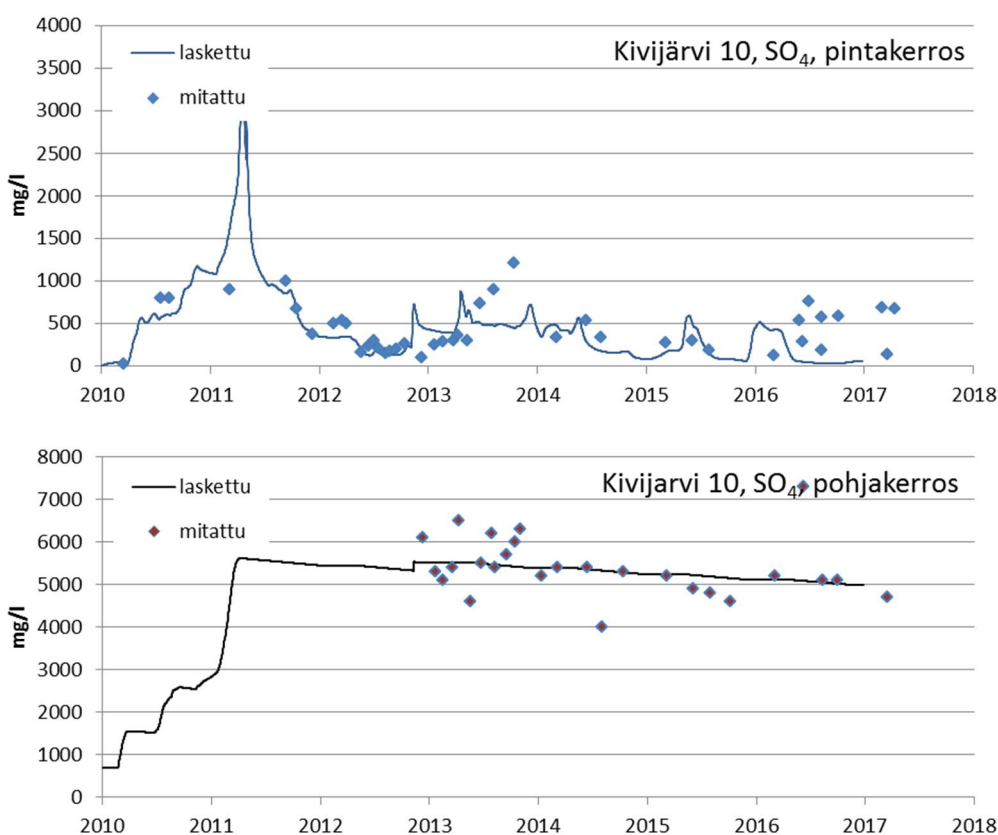


Kuva 8: Laskettu pinnan ja pohjan sulfaattipitoisuus, Kolmisoppi 2017-2024

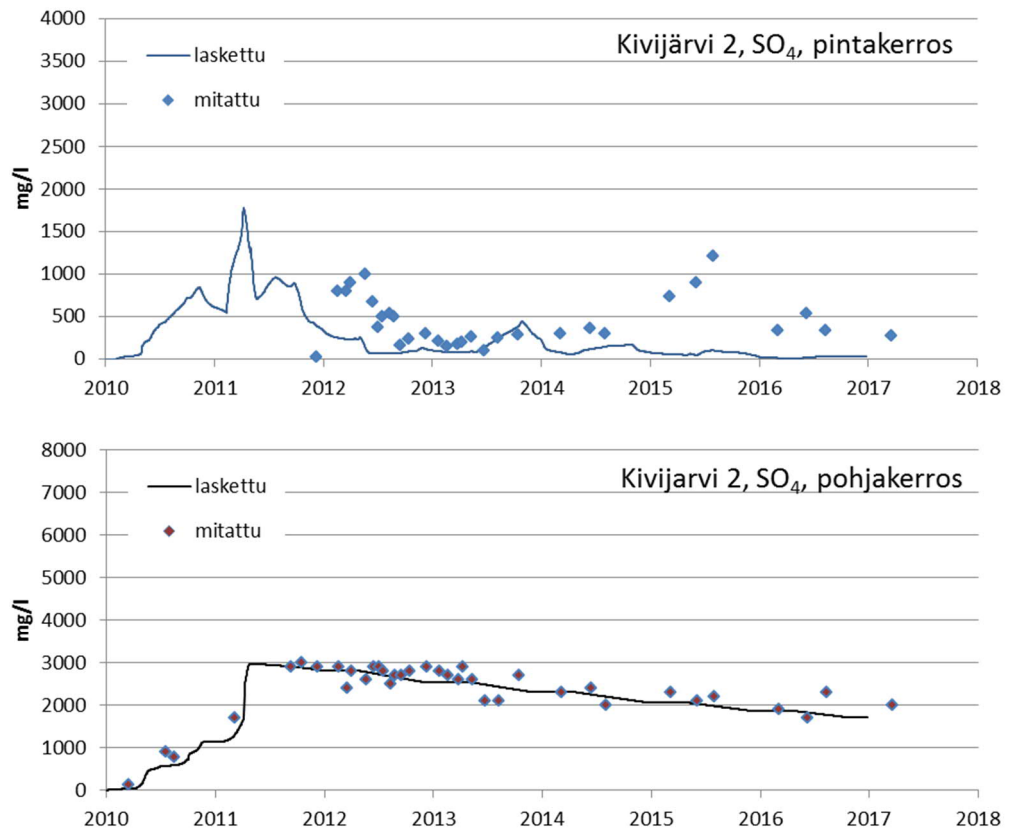
3.4 Kivijärven laskentatulokset

Kivijärvi koostuu useammasta selkääalueesta, joilla jokaisella on muista selkääalueista erillinen syvänealue. Tästä johtuen Kivijärvi mallinnettiin käyttämällä kahta erillistä allasta (tai mallia), joista toinen kuvaa järven eteläosaa sisältäen myös Kivijoen luusuan alueen ja toinen järven pohjoisosaa. Altaat kytkettiin lähtötietoihin ja toisiinsa seuraavasti: 1) Lumijoen tulovirtaama tulee eteläosaan, josta myös Kivijoen lähtövirtaama poistuu. 2) 80 % tulo- ja lähtövirtaaman erotuksesta valuu pohjoisosaan. 3) eteläosan pintavesi virtaa pohjoisosan pohjakerrokseen, mikäli eteläosan pintaveden sulfaattipitoisuus on suurempi kuin pohjoisosan pohjakerroksen sulfaattipitoisuus. Samalla pohjoisosan pintakerroksesta virtaa vastaava vesimäärä eteläosan pintakerrokseen. Sekoittumisvirtaama on rajoitettu kesällä 2 m³/s ja talvella 0.5 m³/s. 4) kesällä pintakerrokset sekoittuvat keskenään kokonaan.

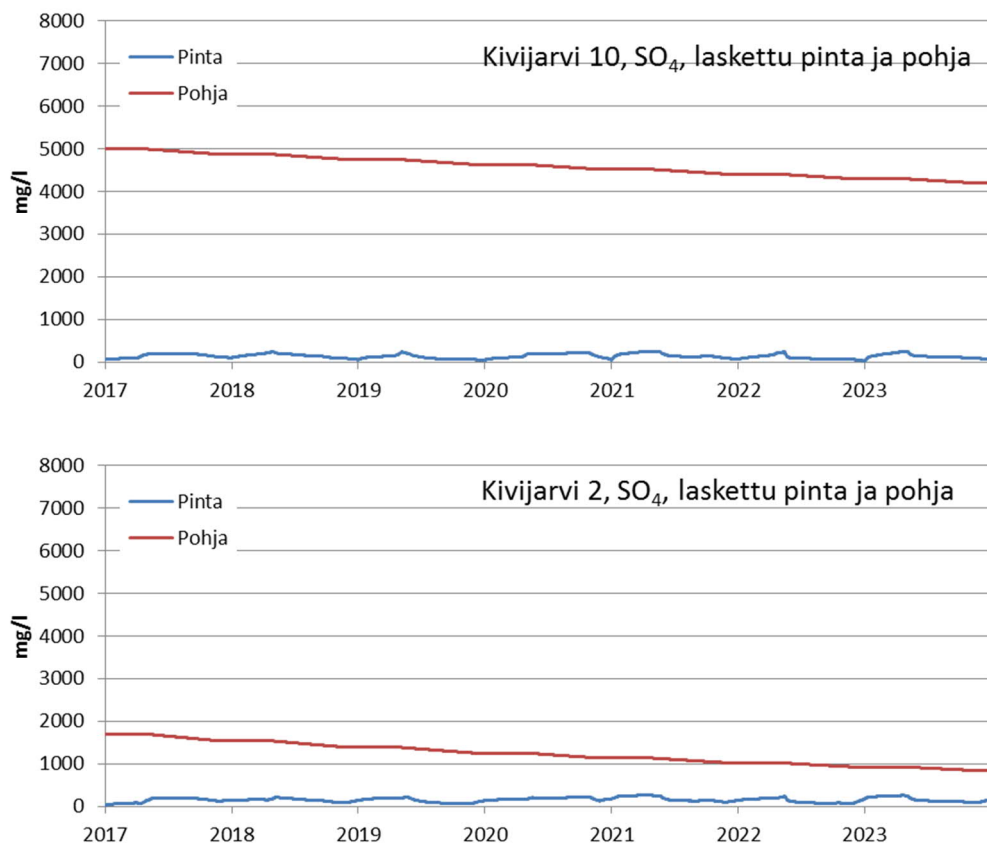
Kivijärvelle sovitetun mallin laskemat pinta- ja pohjakerroksen sulfaattipitoisuudet jaksolta 2010 – 2016 on esitetty kuvissa 9 ja 10 sekä eteläiselle (mittauspiste Kivijärvi 10) että pohjoiselle (mittauspiste Kivijärvi 2) altaalle. Mallin laskemat tulokset on esitetty yhtenäisellä viivalla, ja mittauksien tulokset pisteinä. Pintakerroksen ja pohjakerroksen ero toistuu mallissa hyvin, samoin järven etelä- ja pohjoisosien pohjan pitoisuusero. Pintakerroksen pitoisuus ei ole erityisen tarkka mittauksiin verrattuna, mikä johtuu tulovirtaamien ja pitoisuuksien epätarkkuudesta. Vuoden 2015 ja 2016 osalta pintakerroksen pitoisuudet ovat jääneet liian pieniksi, mutta pohjakerroksen pitoisuus on toistunut hyvin.



Kuva 9: Laskettu ja mitattu pinnan ja pohjan sulfaattipitoisuus, Kivijärvi 10, 2010-2016



Kuva 10: Laskettu ja mitattu pinnan ja pohjan sulfaattipitoisuus, Kivijärvi 2, 2010-2016



Kuva 11: Laskettu pinnan ja pohjan sulfaattipitoisuus, Kivijärvi 10 & 2, 2017-2023

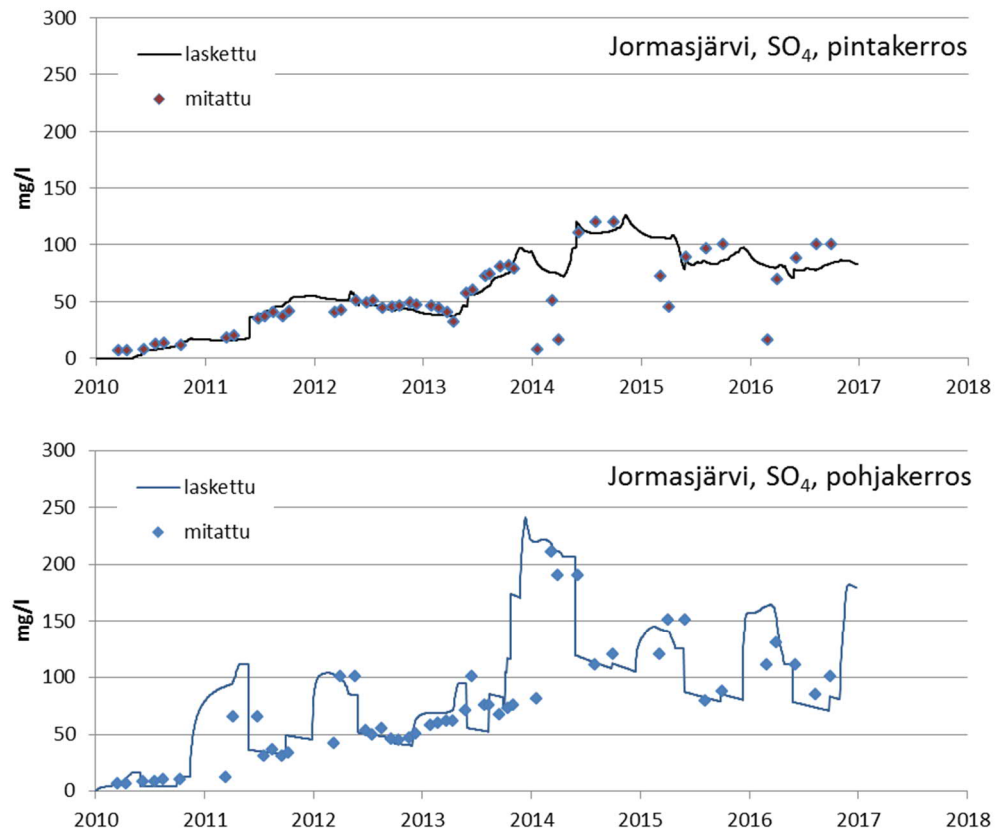
Mallin laskema arvio Kivijärven pohjan ja pinnan sulfaattipitoisuuksille jaksolle 2017 – 2023 on esitetty kuvassa 11. Tulopitoisuuksien laskiessa pohjakerrokseen jää sulfaattipitoista vettä, joka poistuu järvestä hitaasti. Kerrostuminen ei purkaudu tässä tehdyn laskennan mukaan laskennan loppuun mennessä kummastakaan järvioltaasta, mutta on varsin lähellä purkautumista järven pohjoispään altaalla laskennan lopputilanteessa.

3.5 Jormasjärven laskentatulokset

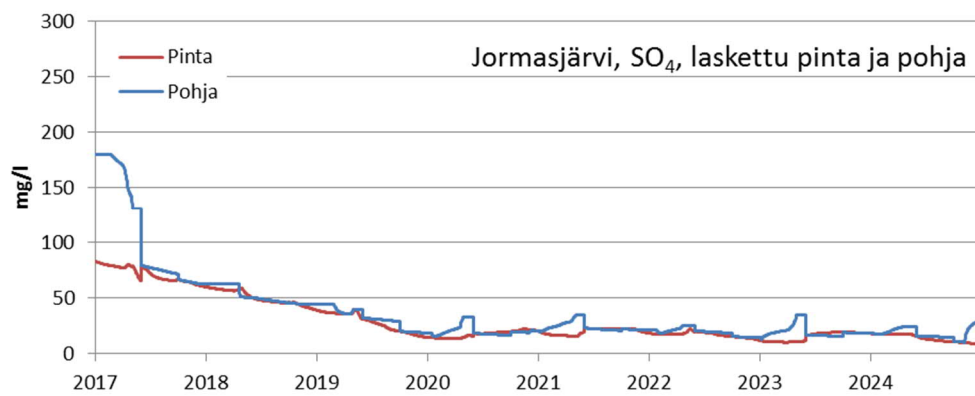
Jormasjärvelle sovitetun mallin laskemat pinta- ja pohjakerroksen sulfaattipitoisuudet jaksolta 2010 – 2016 on esitetty kuvassa 12. Mallin laskemat tulokset on esitetty yhtenäisellä viivalla ja mittaustulokset pisteinä.

Järven pintakerroksen ja pohjakerroksen pitoisuuden vaihtelut toistuvat mallissa pääpiirteittäin. Pintakerroksessa näkyy mittauksissa talvella pitoisuuden selvä lasku, joka johtunee muualta kuin Tuhkajoesta tulevien vesien kerrostumisesta jään alle, jolloin järveen muodostuu kolme sulfaattipitoisuudeltaan erilaista kerrosta. Malli ei toista tätä ilmiötä, sillä siinä kerroksia on vain kaksi. Pohjan pitoisuudet toistuvat kohtalaisen hyvin. Sekä mallissa että mittauksissa näkyy käyttäytyminen, jossa sulfaattipitoinen vesi kerrostuu vain talvella; avovesiaikana se sekoittuu koko vesimassaan. Mallissa kerrostuminen on jonkin verran liian voimakasta mittauksiin nähden (esim. vuonna 2011 ja 2016), eli vesi sekoittuu jossakin määrin myös talvella.

Mallin laskema arvio järven pohjan ja pinnan sulfaattipitoisuuksille jaksolle 2017 – 2023 on esitetty kuvassa 13. Tuleva sulfaattipitoisuus on alle 100 µg/l, jolloin sulfaattipitoisuus ei vaikuta kerrostumiseen enää merkittävästi. Pinta- ja pohjakerroksen sulfaattipitoisuudet ovatkin lähellä toisiaan vuosina 2018 ja 2019. 2020 alkaen pintakerroksen sulfaattipitoisuus on laskenut alle 50 µg/l. Vuoden 2020 talvesta eteenpäin on mallituloksissa havaittavissa sulfaatin pienimuotoista kerrostumista pohjan lähelle, mutta pitoisuuserot jäävät pieniksi ja kerrostuminen purkautuu keväällä. Ilmiö vastaa järven normaali talviaikaista käyttäytymistä, missä pohjanläheinen vesi ei talvella juurikaan sekoitu.



Kuva 12: Laskettu ja mitattu pinnan ja pohjan sulfaattipitoisuus, Jormasjärvi 2010-2016

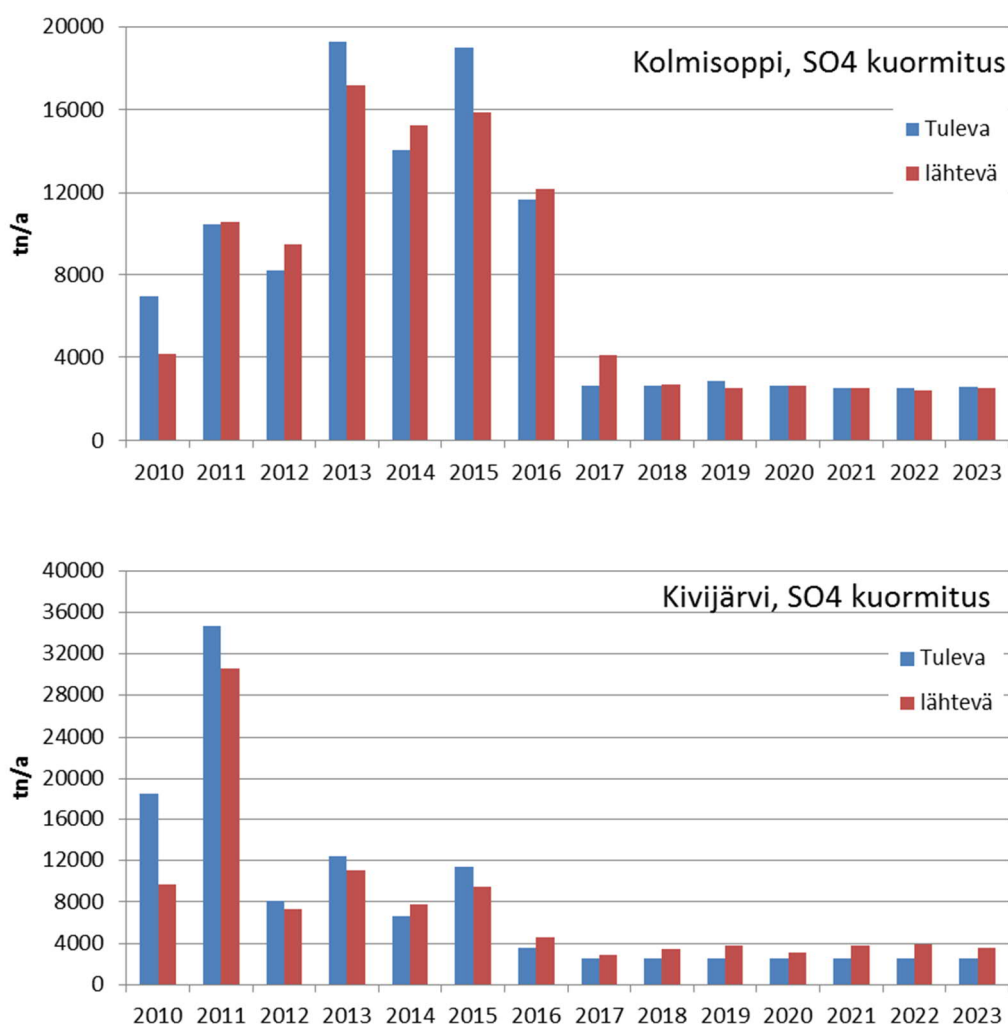


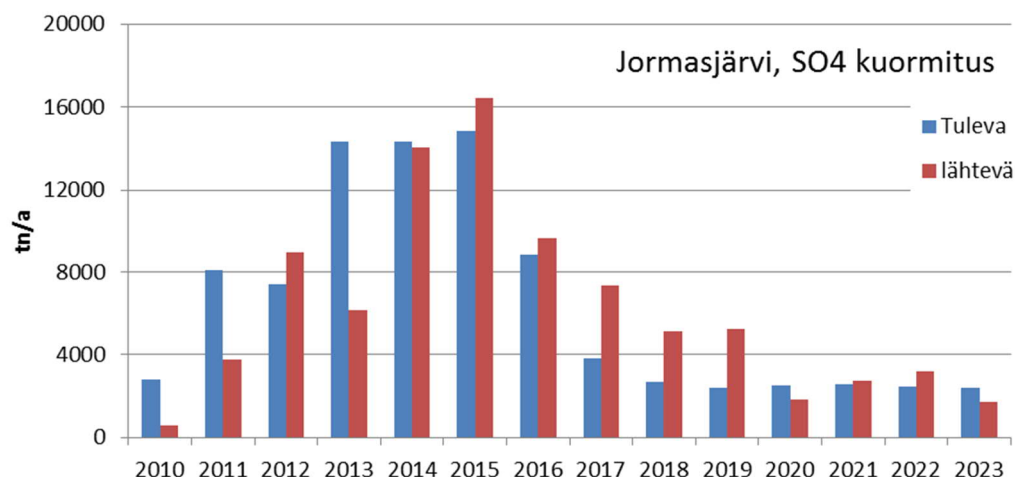
Kuva 13: Laskettu pinnan ja pohjan sulfaattipitoisuus, Jormasjärvi 2017-2024

3.6 Sulfaattikuormitukset

Mittauksista arvioitujen järvien tulokuormitukset ja mallilla lasketut lähtökuormitukset on esitetty kuvassa 14. Kuormitukset on esitetty vuosisummana.

Vuodesta 2018 eteenpäin Kolmisopen lähtökuormitus vakiintuu vuonna 2020 tulokuormituksen suuruiseksi, sitä ennen järven sulfaattivaraston tyhjenemisestä johtuen lähtökuormitus on jonkin verran tulokuormitusta suurempi. Jormasjärven lähtökuormitus vaihtelee mutta on keskimäärin tulokuormituksen suuruinen vuodesta 2020 eteenpäin. Jormasjärvestä Nuasjärveen menevä sulfaattikuormitus putoaa vuosien 2014 – 2015 tasolta yhteen neljäsosaan muutamassa vuodessa. Nuasjärven kuormitus kevenee siten melko nopeasti. Kivijärven lähtökuormitus on koko laskentajakson ajan tulokuormitusta suurempi, eli järven sulfaattivarasto purkautuu laskelmien mukaan vähitellen alajuoksulle ainakin vuoteen 2023 asti. Näin ollen Kivijärven sulfaattivaraston alapuolista vesistöä kuormittava vaikutus vähenee hitaasti. Kuormitusmäärät on laskettu virtaamien ja tulopitoisuuksien perusteella. Menetelmä ei ole tarkka silloin, kun tulopitoisuus vaihtelee nopeasti ja paljon. Tästä johtuen kuormitus voi poiketa siitä mitä kaivos on kuormitukseksi ilmoittanut.





Kuva 14: Arvioidut tulevat ja lähtevät sulfaattikuormitukset 2010-2023.

4 LÄHDELUETTELO

Maanmittauslaitos, 2017, Avoimien aineistojen tiedostopalvelu, tiedot haettu 06/2017, lisenssi ja tietojen haku sivulta <http://www.maanmittauslaitos.fi/asioi-verkossa/avoimien-aineistojen-tiedostopalvelu>

SYKE 2017a, Avoin data-palvelu, syke.fi/avoindata, Hertta-tietokanta, Tiedot haettu 06/2017.

SYKE 2017b, Avoin data-palvelu, syke.fi/avoindata, järvirekisteri. Tiedot haettu 06/2017.

SYKE 2017c, Suomen Ympäristökeskuksen vesistömallijärjestelmä, 3-jakovaiheen valuma-alueiden lasketut virtaamat, ostopalvelu. Tiedot haettu 06/2017.

LIITE 1: LASKENTAMALLIN KUVAUS

Kolmisoppi ja Jormasjärvi

Kolmisopen/Jormasjärven mallin yhtälöt on esitetty kaavoilla (1) – (8). Yhtälöt (1) ja (2) kuvaavat pintakerroksen vesi- ja sulfaattitasetta, ja yhtälöt (3) ja (4) pohjakerroksen vesi- ja sulfaattitasetta. Yhtälö (5) ohjaa tulovirtaaman joko pinta- tai pohjakerrokseen tulopitoisuudesta ja pohjakerroksen pitoisuudesta riippuen. Kaavat (6) – (8) määräävät sekoittumissyvyyden pintakerrokselle.

Tilamuuttujat:

V_s	pintakerroksen tilavuus, m^3
S_s	pintakerroksen sulfaattivarasto, kg
V_b	pohjakerroksen tilavuus, m^3
S_b	pohjakerroksen sulfaattivarasto, kg
$C_s = S_s/V_s$	pintakerroksen sulfaattipitoisuus, kg/m^3
$C_b = S_b/V_b$	pohjakerroksen sulfaattipitoisuus, kg/m^3

Lähtötiedot:

$q_{in}(t)$	päivittäiset tulovirtaamat, m^3/d
$c_{in}(t)$	päivittäiset tulovirtaaman sulfaattipitoisuudet, kg/m^3
$q_{out}(t)$	päivittäiset lähtevät virtaamat, m^3/d
$I(t)$	päivittäinen jääpeitteen arvo, 0=ei jäätä, 1=on jäätä
$V(h)$	järven tilavuus syvyyden funktiona, m^3
$h(V)$	syvyys tilavuuden funktiona, m
h_{max}	enimmäissyvyys

Parametrit:

h_{mixs}	sekoittumissyvyys kesällä
h_{mixw}	sekoittumissyvyys talvella
dh_s	sekoittumissyvyyden muutos päivää kohti kesällä
n_s	avovesipäivien lukumäärä vuoden alusta lukien
h_{mixw}	sekoittumissyvyys talvella
$V_{mix,min}$	halokliinin eroosionopeus, kesällä > 0, talvella = 0
C_{mixmin}	kevät ja syyskierron rajapitoisuusero

Laskentakaavat:

$$(1) \frac{dV_s}{dt} = \delta_s q_{in} - q_{out} + (q_{out} - q_{in}) + v_{mix}$$

$$(2) \frac{dS_s}{dt} = \delta_s c_{in} q_{in} - c_s q_{out} + v_{mix} c_b$$

$$(3) \frac{dV_b}{dt} = (1 - \delta_s) q_{in} - v_{mix}$$

$$(4) \frac{dS_b}{dt} = (1 - \delta_s) c_{in} q_{in} - v_{mix} c_b$$

$$(5) \delta_s = \begin{cases} 1 & c_{in} < c_b \\ 0 & c_{in} \geq c_b \end{cases}$$

$$(6) v_{mix} = \begin{cases} v_b - V(h_{mix}) & v_b > V(h_{mix}) \\ V_{mix,min} & v_b \leq V(h_{mix}) \end{cases}$$

$$(7) h_{mix} = \begin{cases} \min(h_{max}, h_{mixs} + n_s dh_s) & n_s > 0 \\ h_{mixw} & n_s = 0 \end{cases}$$

(8) jos $c_b - c_s < c_{mixmin}$ kevät- ja syyskiertojen (15.5 ja 1.10) aikaan, asetetaan sekoitus-syvyys samaksi kuin järven enimmäissyvyys

Kivijärvi

Kivijärven malli koostuu kahdesta kaavojen (1) – (8) mukaisesta mallista, joista toinen kuvaa Kivijärven eteläosaa, ja toinen pohjoisosaa (alaindeksit e ja p). Molemmat mallit lasketaan ensin erikseen, minkä jälkeen suoritetaan vielä kaavojen (9) – (15) mukainen lisälaskenta-askel.

Kaava (9) määrää eteläaltaan pintakerroksen virtaaman pohjoisaltaan pohjakerrokseen, tässä kaavassa termi $dv_{b,pe,max}$ on parametri, joka voi olla eri suuruinen jääpeitteiselle ja jäättömälle ajalle. Kaava (10) asettaa tuulen aiheuttaman etelä- ja pohjoisaltaan pintakerrosten keskinäisen sekoittumismäärän. Parametri $dv_{s,pe,max}$ on talvella nolla ja kesällä nollaa suurempi. Kaavat (11) – (15) laskevat vesitaseen ja sulfaattimäärien muutokset mallien e ja p välillä.

$$(9) dv_{b,pe} = \begin{cases} dv_{b,pe,max} & c_{s,e} > c_{b,p} \\ 0 & c_{s,e} \leq c_{b,p} \end{cases}$$

$$(10) dv_{s,pe} = dv_{s,pe,max}$$

$$(11) \frac{ds_{s,e}}{dt} = -dv_{b,pe}(c_{s,e} - c_{s,p}) + dv_{s,pe}(c_{s,p} - c_{s,e})$$

$$(12) \frac{ds_{b,p}}{dt} = dv_{b,pe}c_{s,e}$$

$$(13) \frac{ds_{s,p}}{dt} = -dv_{s,pe}(c_{s,p} - c_{s,e}) - dv_{b,pe}c_{s,p}$$

$$(14) \frac{dv_{b,p}}{dt} = dv_{b,pe}$$

$$(15) \frac{dv_{s,p}}{dt} = -dv_{b,pe}$$