

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia Kemijoki Oy:n toiminta-alueella

**Suomen ympäristökeskus
Ilmatieteen laitos**

Noora Veijalainen, Kimmo Ruosteenoja, Jari Uusikivi, Antti Mäkelä,
Bertel Vehviläinen

Sisällysluettelo

1	Tiivistelmä	3
2	Johdanto	4
3	Aineistot ja menetelmät	4
3.1	Ilmastomuutoskenaarioiden laatiminen	4
3.2	SYKE:n aineistot ja menetelmät	6
3.2.1	Hydrologinen mallinnus	7
3.2.2	Säännöstelykäytäntöjen mallinnus	7
4	Aiemmat tulokset ilmastomuutoksen vaikutuksista	8
4.1	Aiemmat tulokset lumen määrän muuttumisesta	8
4.2	Aiemmat tulokset valunnan ja virtaamien muuttumisesta	10
4.3	Aiemmat tulokset vaikutuksesta säännöstelyyn	11
4.4	Aiemmat tulokset vaikutuksesta tulviin	12
5	Ilmastomuutos Kemijoki Oy:n toimialueella	13
5.1	Lämpötilan ja sademäärän muutokset	14
5.2	Lumen määrän muutokset	19
5.3	Virtaamat	21
5.4	Tulvien muuttuminen	26
6	Ilmastoskenaarioiden epävarmuustekijät	30
7	Johtopäätökset	31
	Viitteet	32
	Liitteet	34
	Liite 1. Lämpötilat ja sadannat tulevaisuudessa	34
	Liite 2. Hydrologiset skenaariot	37

1 Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen myötä lämpötila keskimäärin nousee ja sademäärä kasvaa Suomessa. Vuoden keskilämpötila nousisi vuosisadan alkupuolta kuvaavan jakson 2020–2049 aikana noin 1.5–2 asteella ja sademäärä kasvaisi 5–7 % verrattuna vertailujaksoon 1981–2010. Pääsääntöisesti lämpötilat nousevat ja sateet lisääntyvät eniten talvella. Vielä jakson 2020–2049 aikana eri kasvihuonekaasuskenaarioiden (RCP-skenaariot) tuottamat muutokset eivät poikkea toisistaan kovinkaan paljoa. Vuosisadan edetessä skenaarioitten väliset erot käyvät yhä selvemmiksi.

Ilmastonmuutos vaikuttaa myös virtaamiin, ja tulevia muutoksia arvioitiin SYKEN Vesistömallijärjestelmän hydrologista mallia käyttäen. Mallinnetut muutokset keskivirtaamassa Kemijoki Oy:n toimialueella ovat melko pieniä: jaksolla 2020–2049 keskivirtaamat kasvavat keskimäärin 2–7 %, jaksolla 2040–2069 4–11 % ja jaksolla 2070–2099 4–19 %. Vuosisadan lopulla erot eri RCP-skenaarioiden välillä muodostuvat varsin suuriksi johtuen suurimmat päästöt omaavan skenaarion ennakoimista suurista sadannan kasvuista.

Eri vuodenaikojen virtaamat muuttuvat enemmän kuin koko vuoden keskiarvot. Talven ja kevään virtaamat kasvavat kaikissa vesistöissä. Vastaavasti kesän virtaamat pienenevät, kun kevään virtaamahuiput aikaistuvat. Syksyn virtaamien muutos taas vaihtelee vesistöalueittain.

Vaikka keskilämpötilat ilmastonmuutoksen vaikutuksesta kohoavatkin, kylmiä sääjaksoja koetaan edelleen ajoittain. Sääolot vaihtelevat suuresti vuodesta toiseen tulevaisuudessakin. Talvella lämpötilojen vaihteluitten ennustetaan pitkällä tähtäimellä vaimentuvan, jolloin kovimmat pakkaset leudontuisivat enemmän kuin mitä keskilämpötila kohoaa. Kesällä lämpötilan vaihteluissa ei ole odotettavissa suurta muutosta.

Tulvien suuruus määräytyy lumen kertymisen, lämpötilan ja sademäärän mukaan, joten myös niiden esiintyminen ja voimakkuus muuttuvat ilmastonmuutoksen seurauksena. Kemijoella tulvat pysyvät keskimääräisillä skenaarioilla ennallaan tai pienenevät hieman, mutta mörinmillä skenaarioilla tulvat voivat lähitulevaisuudessa myös kasvaa. Lieksanjoella tulvat pienenevät, mutta Kymijoella taas kasvavat etenkin talvitulvien yleistyessä. Eri ilmastoskenaariot tuottavat varsin erilaisia tuloksia tulvien muutoksesta, mikä kuvastaa ilmastonmuutokseen liittyvää epävarmuutta. Epävarmuutta liittyy myös mm. hydrologisen mallin laskentaan.

2 Johdanto

Tässä raportissa arvioidaan ilmastonmuutoksen vaikutusta lämpötilaan ja sademäärään sekä lumen määrään, virtaamiin ja vedenkorkeuksiin Kemijoki Oy:n toiminta-alueella Kemijoen, Kymijoen ja Lieksanjoen vesistöalueilla. Lisäksi raportti kokoaa yhteen olemassa olevaa tutkimusta ilmastonmuutoksen vaikutuksista virtaamiin, tulviin, jään ja supon muodostumiseen ja säännöstelyyn näillä alueilla.

Tässä raportissa lasketaan ilmastonmuutosennusteita kolmelle 30 vuoden mittaiselle tulevaisuuden ajanjaksolle: v. 2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099. Vertailukohtana muutokselle toimii jakson 1981–2010 ilmasto. Ilmastonmuutosarviot perustuvat kolmeen erilaiseen kasvihuonekaasujen päästöskenaarioon (kappale 2.1). Mikä näistä skenaarioista parhaiten vastaa tulevaa kehitystä, on vielä tietymätöntä; sen ratkaisee mm. noudatettava ilmastopolitiikka. Laskelmat on joka tapauksessa tehty erikseen kullekin skenaariorille. Ei kuitenkaan ole perusteltua pitää jokaista kolmesta skenaariorista yhtä todennäköisenä tulevaisuuden kehityksen vaihtoehtona. Tätä kysymystä tarkastellaan lähemmin raportin johtopäätösoiosiossa.

Ilmastonmuutoksen aiheuttamia muutoksia on jo havaittu Suomen ilmastossa ja vesistöissä (Mikkonen ym. 2015, Korhonen 2007). Tulevaisuudessa vaikutukset vesistöissä tulevat näkymään kevättulvien aikaistumisena ja talven virtaamien kasvuna. Ilmastonmuutoksen vaikutukset vesivaroihin, tulviin ja kuivuuteen vaihtelevat merkittävästi eri puolilla Suomea ja riippuvat ilmaston lisäksi vesistöjen hydrologisista ominaisuuksista. Vesistöjen virtaamien ja vedenkorkeuksien muuttumista vertailujaksolta 1981–2010 jaksoille 2020–2049 (eli keskimäärin 2035vuoden tienoilla), 2040–2069 (2055) ja 2070–2099 (2085) tutkittiin eri ilmastoskenaarioiden pohjalta vesistömallin simulointien avulla. Lisäksi arvioitiin tulvien muuttumista edellä mainituilla jaksoilla.

3 Aineistot ja menetelmät

Tässä osiossa on kuvattu tutkimuksessa käytettäviä aineistoja ja menetelmiä. Ilmastoskenaariot on laadittu Ilmatieteen laitoksella. Suomen ympäristökeskuksessa tehtiin simuloinnit virtaamien muuttumisesta ilmastonmuutoksen vaikutuksista käyttäen SYKEN hydrologista Vesistömallijärjestelmä-mallia.

3.1 Ilmastonmuutosskenaarioiden laatiminen

Arvioitaessa tulevaa ilmastoa työkaluna käytetään fysiikan lakeihin perustuvia maapallon ilmastojärjestelmää simuloivia malleja. Malleja ajettaessa tarvitaan syöttötietona arvio ilmastoa muuttavien kasvihuonekaasujen tulevista päästöistä.

Ilmastonmuutosmallit simuloivat ilmakehän, merien ja maaperän pintakerroksen käyttäytymistä näitä järjestelmiä kuvaavien luonnonlakien pohjalta. Mallien toimintaperiaatteesta on kerrottu tarkemmin Ruosteenojan (2011) kirjoituksessa. Tässä raportissa esitettävät ilmastonmuutosarviot perustuvat 28 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin (Ruosteenoja ym. 2016, taulukko 1, IPCC 2013). Mukana on malleja kuudesta Euroopan maasta, Pohjois-Amerikasta, Japanista, Kiinasta ja aina Australiasta asti. Käyttämällä suurta joukkoa malleja eikä vain yhtä ainoaa saadaan luotettavampi käsitys tulevaisuuden ilmastosta. Eri mallien tulosten eroavaisuuksia tarkasteleminen voidaan myös arvioida ennustusten epävarmuusastetta.

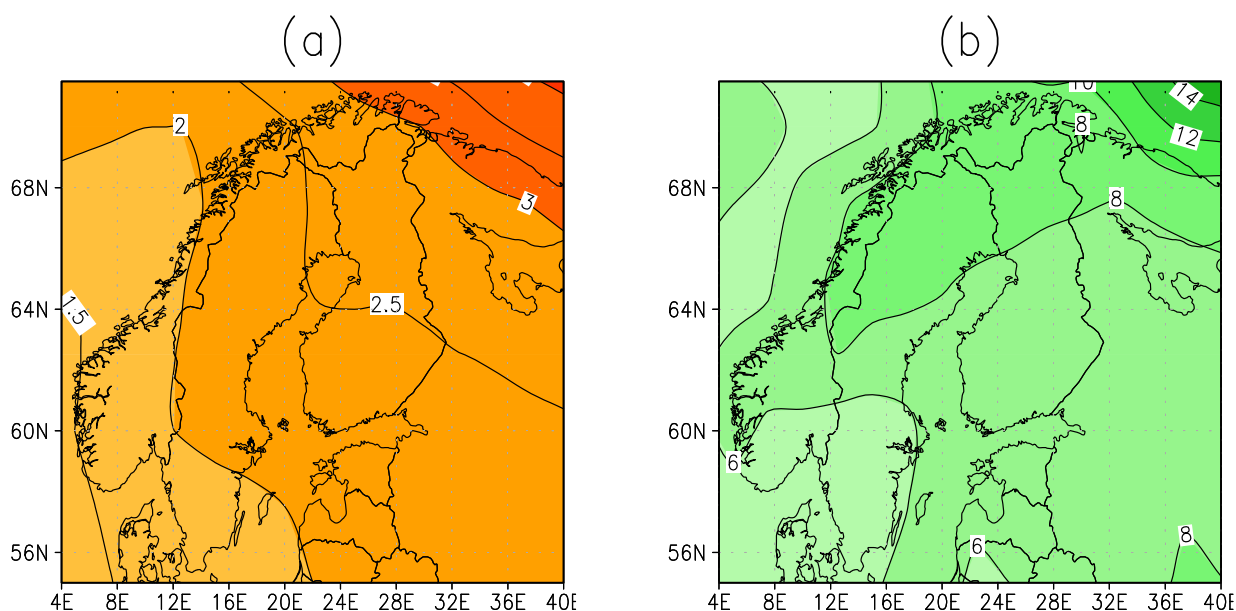
Kasvihuonekaasujen tulevia päästöjä ei voida luonnollisestikaan tietää etukäteen, vaan päästöjen kehitys riippuu mm. väestönkasvusta, ihmisten kulutustottumuksista ja energian tuotantotavoista, joihin voidaan pyrkiä vaikuttamaan ilmastopolitiikan avulla. Tämän raportin ilmastonmuutosarviot perustuvat kolmeen vaihtoehtoiseen kasvihuonekaasuskenaarioon:

- RCP8.5-skenaariossa kasvihuonekaasujen päästöt ja pitoisuudet kasvavat räjähdysmäisesti. Näin käy, jos teollisuus- ja kehitysmaitten tuloerot säilyvät suurina ja kehitysmaitten väestönkasvu jatkuu nopeana. Energiaa käytetään paljon ja siirtyminen fossiilisista polttoaineista muihin energianlähteisiin olisi hidasta. Tämän skenaarion mukaan kasvihuonekaasuista tärkeimmän eli hiilidioksidin maailmanlaajuiset päästöt suunnilleen kolminkertaistuisivat vuodesta 2000 vuoteen 2100.
- RCP4.5-skenaariossa maailmanlaajusten päästöjen oletetaan kääntyvän laskuun ennen vuosisadan puoliväliä. Teollisuusmaissa käänteeseen olisi tapahduttava jo aikaisemmin, jonka jälkeen kehittyvien maitten ja myöhemmin myös köyhien kehitysmaitten olisi seurattava perässä. Vuosisadan lopulla hiilidioksidia pääsisi ilmakehään tällöin noin puolet siitä mitä v. 2000 tienoilla. Tälle kehitysuralle pääsemiseksi taloudellisen kehityksen eroja maailmassa olisi tasattava ja ympäristölle ystävällisen teknologian käyttöönottoa nopeutettava. Tavoite on haastava mutta täysin mahdollinen, mikäli ihmiskunta asian hyväksii tosissaan ponnistelee.
- RCP2.6 edustaa ympäristön kannalta parasta vaihtoehtoa, joka kääntäisi maailmanlaajuiset päästöt jyrkkään laskuun jo vuoden 2020 tienoilla. Vuosisadan loppuvuosikymmeninä päästöt olisivat jo lähellä nollatasoa. Tämä edellyttäisi todella mullistavia muutoksia maailman kehityksessä.

Jos Pariisin ilmastositomuksen tavoitteet onnistutaan saattamaan toteen täydessä määrin, päästöjen kehitys osuisi jonnekin RCP2.6- ja RCP4.5-skenaarioitten väliin. Kutakin skenaariota vastaava hiilidioksidin päästöjen ja pitoisuuksien ajallinen kehitys on esitetty Ruosteenajan ym. (2016) kuvassa 1.

Kuvan 1 kartat esittävät, miten paljon mallit keskimäärin ennustavat vuoden keskilämpötilan ja kokonaissademäärän muuttuvan Pohjois-Euroopassa vuosisadan puoliväliin mennessä; tämä arvio perustuu "keskivahvaan" RCP4.5-skenaarioon. Tämän mukaan lämpötila kohoaisi Suomessa keskimäärin 2–3°C ja sademäärä lisääntyisi noin 8 %, ja muutokset olisivat jonkin verran suurempia Pohjois-Suomessa kuin etelässä. Muutoksen suuruus riippuu kuitenkin voimakkaasti kasvihuonekaasujen päästöistä, ja myös eri mallien tulokset poikkeavat toisistaan melko paljon. Näitä kysymyksiä tarkastellaan myöhemmin tässä raportissa.

Mallien tuottamat lämpötilan muutokset ilmaistaan tässä raportissa asteina ja sademäärän muutokset prosentteina. Muutostietojen perusteella voidaan edelleen laskea lämpötilan ja sademäärän absoluuttiset arvot tulevaisuuden ilmastossa. Se onnistuu käyttämällä ns. delta-menetelmää. Tällöin mallien ennustama lämpötilan muutos lisätään perusjakson 1981–2010 havaittuihin keskilämpötiloihin. Vastaavasti arvio tuleville sademäärille saadaan kertomalla sademäärän perusjakson aikaiset havaitut arvot mallien ennustamalla suhteellisella muutoksella. Perusjakson keskilämpötilat ja sademäärät tarkastellulle kolmelle vesistöalueelle on esitetty taulukossa 1.



Kuva 1. Mallien ennustama (a) lämpötilan ja (b) sademäärän vuosikeskiarvon muutos Pohjois-Euroopassa vuosille 2040–2069, vertailukohtana jakson 1981–2010 keskimääräinen ilmasto. Ennustus pohjautuu RCP4.5-skenaarioon. Lämpötilan muutokset on annettu asteina, sademäärän muutokset prosentteina.

Taulukko 1. Kunkin kuukauden (1=tammikuu, jne.) keskimääräinen (a) lämpötila ja (b) sademäärä jakson 1981–2010 aikana; eri vesistöalueitten aluekeskiarvot. Viimeisessä sarakkeessa on esitetty koko vuoden keskilämpötila ja yhteenlaskettu sademäärä.

Vesistöalue	a) Keskilämpötila (asteina)												Vuosi
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Kemijoki	-13.1	-12.4	-7.5	-1.5	4.9	11.1	14.1	11.3	6.0	-0.1	-6.9	-11.3	-0.5
Lieksanjoki	-11.3	-10.9	-5.5	0.5	7.4	12.8	15.7	12.9	7.9	2.3	-4.2	-8.8	1.6
Kymijoki	-8.0	-8.3	-3.5	2.4	9.2	13.9	16.7	14.4	9.2	4.0	-1.6	-5.8	3.6
Vesistöalue	b) Sademäärät (millimetreinä)												Vuosi
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Kemijoki	42	36	38	33	46	63	80	74	56	56	48	40	609
Lieksanjoki	50	40	42	35	56	72	86	83	71	68	61	56	720
Kymijoki	50	37	39	34	44	67	81	79	58	66	59	54	667

Esimerkki: Kemijoen vesistöalueen havainnoista laskettu toukokuun keskilämpötila on 4.9 °C ja sademäärä 46 mm (taulukko 1). RCP4.5-skenaarion mukaan tämän alueen keskilämpötila on noussut jaksoon 2040–2069 tultaessa 2.4 asteella ja sademäärä lisääntynyt 8.3 prosentilla. Näin saadaan kyseisen jakson RCP4.5-skenaariota vastaavaksi keskilämpötilaksi 7.3 °C ja sademääräksi 50 mm.

3.2 SYKEN aineistot ja menetelmät

Suomen ympäristökeskus on laatinut tässä raportissa esitetyt skenaariot virtaamien muutoksille. Esitetty virtaamat ovat simuloituja arvoja, jotka perustuvat SYKEN Vesistömallijärjestelmän mallin laskentaan, joka puolestaan käyttää lähtötietoinaan Ilmatieteen laitoksen havaintoasemien

lämpötilaa, sademäärää sekä suhteellista kosteutta, ilmanpainetta, tuulen nopeutta ja suuntaa sekä pilvisyyttä. Lisäksi Vesistömallijärjestelmän kalibroinnissa on käytetty virtaama-, vedenkorkeus ja lumilinjahavaintoja jaksolta 1986–2016.

Myös vertailujakson 1981–2010 virtaamat ovat mallin simuloimia ja voivat siten poiketa jonkin verran saman jakson havaituista virtaamista johtuen mallin ja meteorologisten havaintojen epävarmuuksista. Mallin simuloituja arvoja on kuitenkin hyvä käyttää myös vertailujaksolle, koska se mahdollistaa vertaamisen tulevien jaksojen kanssa siten, että jaksojen välinen muutos on ainoastaan ilmastomuutoksen aikaansaamaa.

3.2.1 Hydrologinen mallinnus

Tutkimuksessa käytetään SYKEN Vesistömallijärjestelmä-mallia ilmastomuutoksen hydrologisten vaikutusten simuloimiseen. Vesistömallijärjestelmä koostuu hydrologisesta sadanta-valuntamallista sekä joki- ja järvimalleista. Hydrologinen malli on tyypiltään konseptuaalinen sadanta-valuntamalli, joka muistuttaa perusrakenteeltaan Ruotsissa kehitettyä HBV-mallia (Vehviläinen ym. 2005). Vesistömallin lähtötietoina ovat päivittäinen sadanta ja lämpötila. (Vehviläinen ja Huttunen 2002, Vehviläinen ym. 2005)

Virtaamien ja vedenkorkeuksien muuttumista ilmastomuutoksen vaikutuksesta arvioidaan simuloimalla Vesistömallijärjestelmällä päivittäiset arvot 30 vuodelle ensin vertailujaksolla 1981–2010 ja sitten tarkasteltavilla jaksoilla tulevaisuudessa. Ilmastomuutos on huomioitu käyttäen ns. delta -menetelmää (Arnell 1999, Prudhomme ym. 2003). Vertailujaksolla lähtötietoina käytetään havaittuja lämpötiloja ja sademääriä. Ilmastomuutos otetaan huomioon muuttamalla havaintojen perusteella laskettuja alueellisia lämpötiloja ja sademääriä valitun ilmastoskenaarion mukaisesti. Lämpötilaa muutetaan skenaarion mukaisella kuukausittaisella astemäärällä, sademäärää prosentuaalisesti. Muutokset on laskettu erikseen mallin jokaiselle osa-alueelle perustuen globaalien ilmastomallien tuloksiin 2,5 asteen hilassa. Lopuksi ilmastomuutostilanteen virtaamat ja vedenkorkeudet simuloidaan käyttäen lähtötietoina muutettuja sademääriä ja lämpötiloja, jolloin saadaan uudet päivittäiset arvot 30 vuoden jaksolle. Lämpötilan muutoksessa mukana on myös lämpötilasta riippuva komponentti (Andréasson ym. 2004). Tässä menetelmässä lämpötilan muutokset riippuvat kuukausikeskiarvon muutoksen lisäksi lämpötilan tilastollisen jakauman muutoksesta, jolla huomioidaan se, että etenkin talvella kylmät lämpötilat nousevat ilmastomallien mukaan enemmän kuin lauhat lämpötilat.

3.2.2 Säännöstelykäytäntöjen mallinnus

Mahdollisuuksia sopeutua ilmastomuutokseen säännöstelyä muokkaamalla tutkittiin testaamalla erilaisten säännöstelyohjeiden vaikutusta järvien vedenkorkeuksiin. Mallin säännöstelyohjeissa juoksutus riippuu päivämäärästä ja vedenkorkeudesta. Vertailujaksolla säännöstelyohje on laadittu vastaamaan mahdollisimman hyvin nykyisiä säännöstelylupia ja -käytäntöjä. Käytetyt säännöstelyohjeet perustuvat aiemmin tehdyissä laskennoissa (Uusikivi 2017, Koistinen 2017) käytettyihin säännöstelyohjeisiin. Säännöstelyohjeet on laadittu toimimaan keskimäärin havaintoja vastaavasti, mutta koska sama säännöstelyohje on käytössä kaikkina vuosina, voi säännöstely yksittäisinä vuosina olla epätarkoituksenmukaista. Todellisuudessa säännöstelyä pystytään siis optimoimaan ja hienosäätämään tässä esitettyä paremmin etenkin viikkotasolla, mikä saattaa vaikuttaa esim. suurimpien tulvien aikaiseen virtaamaan. Vuorokauden sisäistä säännöstelyä ei ole tässä selvityksessä huomioitu lainkaan.

4 Aiemmat tulokset ilmastonmuutoksen vaikutuksista

Tässä osiossa käydään läpi keskeisimpiä tuloksia aiemmin tehdyistä arvioista ilmastonmuutoksen vaikutuksista Kemijoki Oy:n toiminta-alueella.

4.1 Aiemmat tulokset lumen määrän muuttumisesta

Aiemmin lumen määrän muutoksia on arvioitu mm. Ruosteenojan ym. (2013) ja Veijalaisen ym. (2012) raporteissa.

Ruosteenoja ym. 2013

Ruosteenojan ym. (2013) raportissa esitellyt arviot lumipeitteen muuttumisesta perustuivat tuohon aikaan käytössä olleeseen A1B-kasvihuonekaasuskenaarioon, joka voimakkuudeltaan osuu RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioitten välimaastoon.

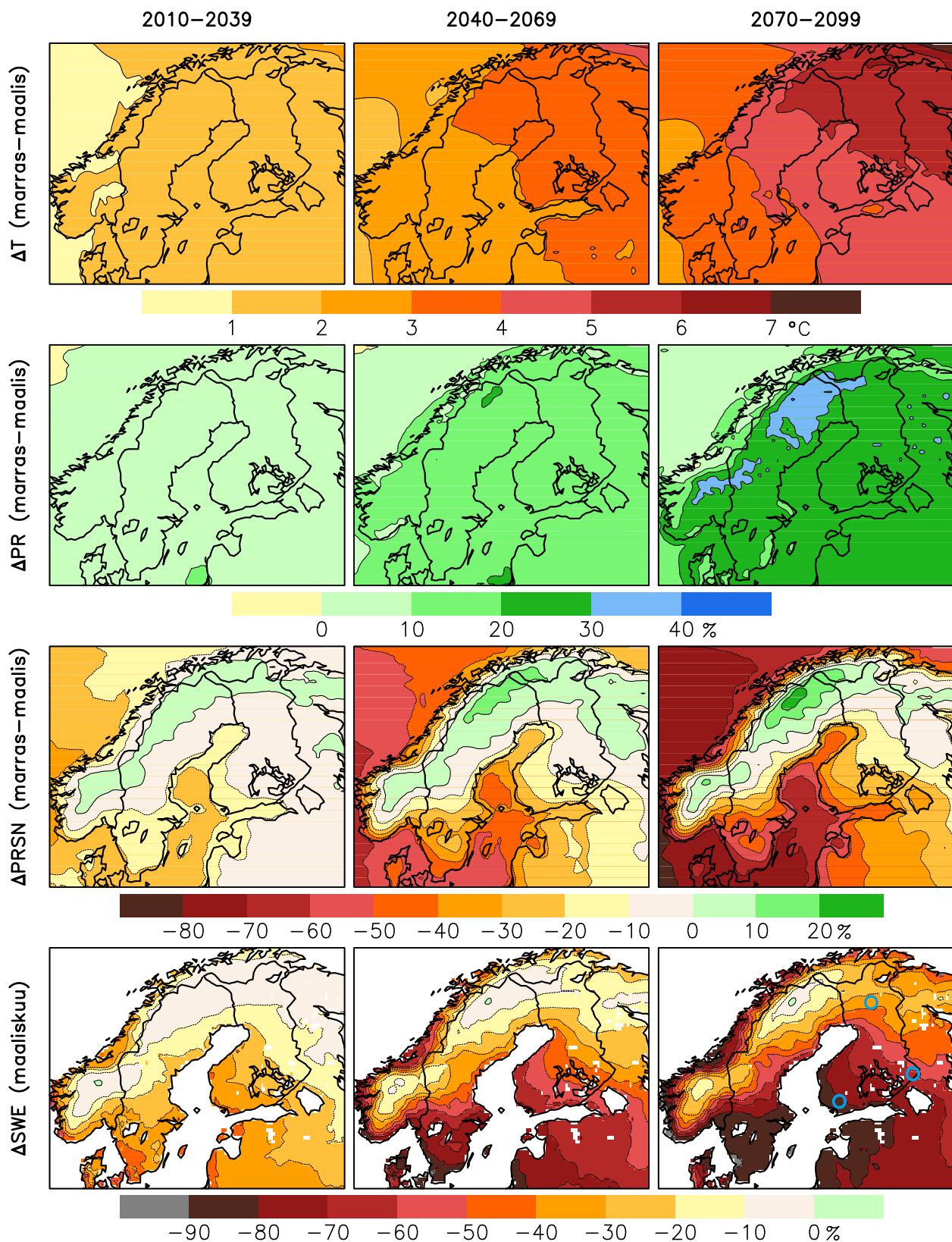
Mallien laskemat neljän talvi-ilmastoa kuvaavan suureen muutokset on esitetty kuvassa 2. Lämpötilan, kokonaissademäärän ja lumen saatavan sateen määrän muutokset kuvaavat koko kylmän vuodenajan, marras-maaliskuun, keskiarvoa. Lumen vesi-arvon muutokset taas esitetään maaliskuulta, jolloin lumen vesi-arvo on yleensä suurimmillaan. Muutokset on laskettu kolmelle eri 30-vuotisjaksolle, ja tässä kuvassa on käytetty vertailukohtana vuosien 1971–2000 ilmastoa.

Malliennusteitten mukaan lämpötilat nousevat (kuva 2 ensimmäinen rivi) ja samalla talvikauden sademäärä kasvaa (kuva 2 toinen rivi). Muutokset voimistuvat vuosisadan loppua kohti. Kokonaissademäärän kasvusta huolimatta lunta sataa suurimmassa osassa Suomea nykyistä vähemmän (kuva 2 kolmas rivi). Osassa Lappia lumen saatavan sateen määrä on kyllä hiukan nykyistä suurempi, mutta sielläkin lumisateet lisääntyvät vähemmän kuin kokonaissademäärä. Lämmenneessä ilmastossa siis entistä suurempi osa kasvavista talvikauden sateista lankeaa vetenä.

Lumipeitteen vesi-arvo pienenee etenkin Etelä- ja Keski-Suomessa rajusti (kuvan 2 neljäs rivi). Lounaisimmassa Suomessa lunta olisi mallien mukaan vuosisadan lopulla jopa 80 % nykyistä vähemmän. Pohjoisempana muutos on selvästi pienempi, ja Käsivarren Lapissa lunta olisi vuosisadan lopullakin vain 10–20 % nykyistä vähemmän. Kaiken kaikkiaan lumen määrä vähenee selvästi lumisateitten määrää jyrkemmin. Lämmenneessä ilmastossa entistä suurempi osa lumesta siis sulaa talvikuukausienkin aikana jo melko pian maahan sadettuaan.

Veijalainen ym. 2012 (WaterAdapt loppuraportti):

Lumipeitteen kesto lyhenee ilmastonmuutoksen myötä sekä syksyllä että keväällä. Runsaslumisimpien talvien lumen määrä vähenee keskiarvoa vähemmän etenkin pohjoisessa Suomessa, jossa lumimäärät joillakin skenaarioilla pysyvät runsaslumisimpina talvina ennallaan. Runsaslumisista vuosia siis esiintyy myös tulevaisuudessa, mutta toisaalta hyvin vähälumiset talvet yleistyvät. Näin lumiolosuhteet vaihtelevat etenkin Keski- ja Pohjois-Suomessa talvesta toiseen nykyistä enemmän.



Kuva 2. Keskilämpötilan (T), sademäärän (PR), lumisateen määrän (PRSN) ja lumen vesiaron (SWE) muutokset A1B-kasvihuonekaasuskenaarion perusteella. Muutokset on laskettu tulevaisuuden jakson (v. 2010–2039 – vasemmanpuoleiset kuvat; v. 2040–2069 – keskimmäiset kuvat; v. 2070–2099 – oikeanpuoleiset kuvat) ja perusjakson 1971–2000 keskiarvojen erotuksina, kolmelle ensimmäiselle suurelle koko talvikauden (marras-maaliskuu) sekä lumen vesiarvolle maaliskuun keskiarvona. Lämpötilan muutokset on ilmaistu asteina, muitten suureitten prosentteina (Ruosteenoja ym., 2013).

4.2 Aiemmat tulokset valunnan ja virtaamien muuttumisesta

Aiemmin ilmastomuutoksen vaikutuksia virtaamiin Kemijoki Oy:n kohdealueilla ovat tutkineet mm. Veijalainen ym. (2012) Uusikivi ym. (2014, 2017) ja Jakkila ym. (2014). Tulokset eri julkaisuissa ovat pääosin samankaltaisia, vaikka osa tutkimuksista on tehty jo melko kauan aikaa sitten. Mahdolliset erot johtuvat eroista käytetyissä ilmastoskenaarioissa ja vertailujaksossa sekä eroista käytetyssä malliversioissa (mallia on kalibroitu ja käyttöön otettu uusia parametreja, mallia on kehitetty jne.). Näissä varhaisemmissa laskelmissa käytetyt ilmastoskenaariot perustuvat aiempiin SRES päästöskenaarioihin, jotka eroavat hieman nykyisistä RCP-skenaarioista määrittelytapansa ja ennakoitujen päästöjen suhteen. Aiemmin yleisimmin käytetty A1B skenaario sijoittuu RCP4.5:n ja RCP6.0:n välimaastoon.

Uusikivi ja Vehviläinen 2017, Kemijoen säännöstelyn kehittäminen:

Ilmastomuutoksen vaikutukset näkyvät Pohjois-Suomessa syksyn sateiden lisääntymisenä ja loppusyksyn virtaamien kasvuna. Talven vedenkorkeudet ja virtaamat kasvavat, koska talven aikana entistä suurempi osa sateesta tulee vetenä ja lunta sulaa talven aikana. Jaksolla 2020–2049 hydrologisten muutosten arvioidaan olevan Pohjois-Suomessa vielä melko pieniä, kun taas etelämpänä muutosten arvioidaan olevan jo selkeitä. Muutokset kevättulvien suuruudessa ovat varsin pieniä; suurimmat tulvat pienenevät vähän, mutta muutos ei ole merkittävä. Ilmastomuutuksessa kevättulvien ajoituksessa on odotettavissa merkittävää muutosta jo lähitulevaisuudessa ja kevättulvat siirtyvät aikaisemmaksi.

Näiden simulointien tulosten perusteella voidaan päätellä kevättulvien huippuvirtaamien pienevän sekä syys- ja talvivirtaamien kasvavan.

Suuret jääpeitekauden virtaamat voivat rikkoa joen jääpeitteen talven aikana ja lisätä jääpatojen syntymisen riskiä sekä talven aikana että keväällä jäiden lähdön yhteydessä. Suurien jääpeitekauden aikaisten virtaamien mahdollisuus kasvaa ilmastomuutoksen myötä. Ilmastomuutossimuloinneissa Valajaskosken jääpeiteajan virtaamat voivat joinakin vuosina nousta yli 800 m³/s, joka todennäköisesti saa joessa olevan jääkannen rikkoontumaan ja voi aiheuttaa jään patoontumista. Talvikauden virtaamien pienentäminen onnistuu säännöstelemällä Kemijärveä talvikaudella niin, että annetaan pinnan nousta eikä yritetä saavuttaa kevätkuopalle asetettuja lupaehtoja.

Kasvavien syys- ja talvivirtaamien takia myös jääpeitteen muodostuminen syksyllä voi viivästyä tai hankaloitua ja siten lisätä hyyteen muodostumisen mahdollisuutta. Hyyderiskiä voidaan pienentää pienentämällä virtaamaa jäänmuodostumiselle otollisena aikana, jolloin jokeen muodostuu pysyvä jääpeite, joka vähentää hyyteen aiheuttamia ongelmia. Jääpeitteen muodostumisen helpottamiseksi simuloinneissa Kemijärven lähtövirtaamaa rajoitetaan syksyllä tai talvella kun ensimmäinen jääpeite muodostuu.

Veijalainen ym. 2012, WaterAdapt loppuraportti (koko Suomi):

Suhteellisesti eniten valunta kasvaa talvella (joului-helmikuu), 34–165 % jaksolla 2040–2069. Suuria prosenttimuutoksia selittää vertailujakson pieni talvivalunta. Keväällä (maaliskoukokuussa) valunta pienenee Etelä-, Länsi- ja Keski-Suomessa, koska talven aikana on kertynyt vähemmän lunta ja lumen sulamisen aiheuttama valunta pienenee. Pohjois-Suomessa taas kevään valunnat kasvavat (6–19 %), kun aiemmin kesäkuulle jatkunut lumen sulaminen tapahtuu kokonaisuudessaan jo kevätkuukausien aikana. Tästä johtuen Pohjois-Suomessa kesän valunnat pienenevät selvästi (13–31 %). Etelämpänä kesän valunnat keskimäärin myös pienenevät (16–25%) kevään aikaistumisesta johtuvan maaperän kuivumisen johdosta. Märimmillä skenaarioilla sademäärän kasvu aiheuttaa kuitenkin kesävaluntojen kasvua. Syksyllä valunnat pääosin kasvavat sateiden lisääntymisen myötä (18–34 %).

Jakkila ym. 2010, raportti Fortumille (englanniksi, tässä suomeksi merkittävimmät tulokset):

Raportissa arvioitiin ilmastomuutoksen vaikutuksia virtaamiin Fortumin vesivoimalaitoksilla Ruotsissa ja Oulujoella. Lisäksi arvioitiin, pitäisikö ilmastomuutos huomioida pitkissä vesistöennusteissa (vuosi eteenpäin) ja miten ilmastomuutoksen huomioiminen kannattaisi toteuttaa. Lopputuloksena oli, että koska havaittu lämpötilan nousu on jo tilastollisesti merkitsevää ja vaikuttaa etenekin vuodenaikojen väliseen jakaumaan, se tulisi huomioida pitkissä ennusteissa. Toisaalta, jos lämpötilaa muutetaan, tulisi myös sademääriä muokata, koska pelkkä lämpötilan muutos todennäköisesti pienentää tulovirtaamia haihdunnan lisääntyessä. Ilmastomuutoksen myötä myös sademäärien on ennakoitu kasvavan, vaikka muutos ei kaikkialla vielä olekaan tilastollisesti merkitsevä sademäärien suuren alueellisen ja ajallisen vaihtelun vuoksi. Jotta pitkät ennusteet olisivat mahdollisimman hyviä sekä virtaamien ajoituksen että kokonaisvolyymien suhteen, suositeltiin raportissa sekä jo tapahtuneen ilmastomuutoksen huomioimista ennusteissa muuttamalla sekä lämpötilaa että sademääriä. Nykyään näin tehdäänkin Vesistömallijärjestelmän ennusteissa muokkaamalla ennusteissa 15 vuorokauden sääennusteen jälkeen lähtötietoina käytettäviä havaintoja vuosilta 1961–1990. Lämpötiloja muokataan havaitun lämpötilan muutoksen ja sademääriä ilmastoskenaarioiden perusteella arvioidun muutoksen mukaisesti. Sademäärille havaintojen suora käyttö ei ole järkevää, koska tällöin muodostuisi liikaa vaihtelua eri puolilla maata.

4.3 Aiemmat tulokset vaikutuksesta säännöstelyyn

Uusikivi ja Vehviläinen, 2017

Talvikauden valunnan kasvaessa Kemijärven tulovirtaaman kasvaminen johtaa talvikaudella suurempiin juoksutuksiin. Kevätkuopan tekeminen nykyisen säännöstelyluvan mukaisesti johtaa syys- ja talvivirtaamien kasvaessa Seitakorvan laitoksella ohijuoksutusten lisääntymiseen syksyn ja alkutalven sekä kevätkuopan syvimmän kohdan aikana. (Uusikivi ym. 2017)

Lapin ELY-keskus 2016, Padotus- ja juoksutusselvitykseen liittyvä esiselvitys

Säännöstelyn muutospaineet Kemijärvellä alkavat muodostua jaksolla 2040–2069, jolloin ilmasto on suurimmalla osalla ilmastoskenaarioista jo lämmennyt merkittävästi. Jaksolla 2010–2039 muutokset ovat pienempiä ja nykyiset säännöstelykäytännöt toimivat pienin muutoksin. Jaksolla 2040–2069 paineita muutokseen aiheuttaa kevätkuopan nykyinen ajoitus, jossa kuoppa on syvimmillään 20.4. Nykyilmastossa tulovirtaamat eivät kasva merkittävästi ennen tätä päivänmäärää, mutta ilmastomuutoksen myötä lumi alkaa sulaa ja tulovirtaamat kasvaa nykyistä aikaisemmin. Tällöin tiukasti kalenteriin sidottu säännöstelylupa ei välttämättä ole enää joka vuosi tarkoituksenmukainen. Niinä vuosina, jolloin lunta on kertynyt tavanomaista vähemmän ja sulaminen alkaa nykyistä aikaisemmin, voi järven pinnan nostaminen 1.6. mennessä luvan mukaiselle kesävedenkorkeudelle olla hankalaa loppukevään aiempaa selvästi pienempien virtaamien johdosta. Lauhoina vuosina juoksutukset joudutaan talven aikana pitämään suurina, jos nykyistä ylärajaa halutaan noudattaa, ja keväällä taas juoksutuksia joudutaan voimakkaasti pienentämään luvanmukaisten kesävedenkorkeuksien saavuttamiseksi. Jaksolla 2040–2069 syntyy tilanteita, joissa säännöstelyrajoja jouduttaisiin rikkomaan joko kevätkuopan ylärajan osalta 20.4. tai alkukesällä kesän vedenkorkeuksien alarajan osalta.

Kemijärven kevätkuopan tekeminen lupaehtojen mukaan alle tason 145 m+N43 ei onnistu kaikin vähälumisimpina vuosina suuren lämpiämisen ilmastomuutoskenaariossa edes jaksolla 2010–2039, ja myös vähäisen lämpiämisen ilmastomuutoskenaariossa ongelmia alkaa ilmennään jaksolla 2040–2069.

Veijalainen ym. 2012, WaterAdapt loppuraportti (koko Suomi):

Ilmastomuutoksen myötä vuosien välinen vaihtelu kasvaa nykyisestä. Runsaslumisia talvia esiintyy edelleen, mutta myös lauhat talvet yleistyvät. Tämä vaikeuttaa säännöstelyn ennakointia pitkällä aikavälillä. Syksyn ja alkutalven virtaamat kasvavat, mikä saattaa lisätä hyydeongelmia. Kemijoen tulvien koko pysyy entisellään tai pienenee 2040–2069 mennessä, riippuen käytetystä ilmastoskenaariosta.

4.4 Aiemmat tulokset vaikutuksesta tulviin

Ilmastomuutoksella on Suomessa sekä vesistötulvia suurentavia että niitä pienentäviä vaikutuksia. Ennakoitu sateiden lisääntyminen voi kasvattaa tulvia, mutta toisaalta lämpimämmät ja vähälumisemmat talvet pienentävät kevään lumensulamisesta aiheutuvia tulvia etenkin Etelä- ja Keski-Suomessa. Niinpä ilmastomuutoksen vaikutus tulviin vaihtelee vesistöalueen sijainnin ja sen ilmastollisten ja hydrologisten ominaisuuksien mukaan.

Tulvien muuttumista on arvioitu koko Suomelle Veijalaisen ym. (2012) raportissa ja lisäksi eri vesistöalueille on tehty omia tarkasteluja. Veijalaisen ym. raportissa tulvien arvioitiin keskimäärin hieman pienenevän Lieksanjoella ja Kemijoella ja kasvavan Kymijoella jaksolle 2070–2099 tultaessa. Jaksolla 2010–2039 tulokset ovat samansuuntaisia, mutta muutokset pienempiä. Epävarmuudet huomioiden voidaan sanoa että jaksolla 2010–2039 muutokset eivät ole vielä merkittäviä vaan tulvien koko pysynee suurin piirtein nykyisellään.

Uusikivi ym. 2014, Raportti ilmastomuutoksen vaikutuksista Kemijärven ja Rovaniemen tulviin

Raportissa tarkasteltiin ilmastomuutoksen vaikutuksia tulvien suuruuteen kolmen eri ilmastoskenaarioiden tulosten perusteella kahdelle 30 vuoden ajanjaksolle 2011–2040 ja 2041–2070 (taulukko 2). Tarkastelussa mukana olleet kolme ilmastoskenaariota edustavat Pohjois-Suomen osalta vähäistä (SMHI Ec5 A1B) (Skenaario A), keskimääräistä (Ka A1B) (Skenaario B) ja suurta (HadRM Had A1B) (Skenaario C) ilmastomuutoksen vaikutusta tulviin.

Vähäisen lämpiämisen skenaariossa lämpötilan nousu on melko pientä, mutta sadanta kasvaa etenkin keväällä. Vähäisen lämpötilan nousun ja sadannan kasvun johdosta lunta kertyy tulevaisuudessa runsaasti, minkä ansiosta tulvat ovat suuria jatkossakin. Suuren lämpiämisen skenaariossa taas lunta on keväällä huomattavasti nykytilannetta vähemmän, jolloin tulvat pienenevät.

Nykytilanteessa Kemijärven mitoitustulvan vedenkorkeus on Kulmungissa, riippuen mitoitustavasta, 151.00–151.48 m+N43. Jaksolla 2011–2040 mitoitustulvan vedenkorkeus Kulmungissa tulee todennäköisesti olemaan välillä 150.42–151.52 m+N43, eli säilymään nykyisen suuruisena tai pienenevään hiukan. Seuraavalla jaksolla 2041–70 mitoitustulva voi säilyä Kemijärvellä nykyisen suuruisena tai pienentyä huomattavastikin, jolloin Kulmungen vedenkorkeus olisi mitoitustulvassa välillä 149.08–151.36 m+N43.

Kerran 1000 vuodessa, kerran 250 vuodessa ja kerran 100 vuodessa toistuvat tulvat tulevat skenaarion A (vähäisin lämpötilan nousu) mukaan säilymään nykyisen suuruisena tai jopa hiukan kasvamaan. Skenaarioiden B ja C (keskimääräinen tai suuri lämpeneminen) mukaan nämä tulvat pienenevät selvästi, ja jaksolla 2041–2070 1/250 ja 1/100 tulvat eivät nosta Kemijärven vedenkorkeutta yli nykyisen säännöstelyn ylärajan 149.00 m+N43. Ilmastomuutoksen vaikutukset Rovaniemellä Valajaskosken virtaamaan ovat hyvin samanlaisia kuin Kemijärven vedenkorkeuteen. Skenaarioiden A mukaan tulvat säilyvät nykyisen suuruisena tai jopa hiukan kasvamaan. Skenaarioiden B ja C perusteella tulvat tulevat pienenevään varsinkin jaksolla 2041–2070.

Taulukko 2. Kemijärven vedenkorkeus Kulmungissa ja Valajaskosken virtaama nykytilanteessa ja ilmastonmuutosskenaarioissa. Skenaario A on vähäisen lämpiämisen, skenaario B on keskimääräisen lämpiämisen ja skenaario C voimakkaan lämpiämisen ilmastonmuutosskenaario. (Uusikivi ym. 2014).

	Mitoitus- tulva	Kemijärvi W (Kulmunki) m+N43			Valajaskoski Q m ³ /s		
		1/1000 toistuvuus	1/250 toistuvuus	1/100 toistuvuus	Mitoitus- tulva	1/250 toistuvuus	1/100 toistuvuus
Nykytilanne	151,00	150,48	150,04	149,52	5940	5320	4950
2011-40 Skenaario A	151,52	150,62	150,33	149,85	5910	5450	5080
2011-40 Skenaario B	150,57	149,94	149,43	149,00	5680	4820	4190
2011-40 Skenaario C	150,42	149,92	149,44	149,00	5290	4540	4100
2041-70 Skenaario A	151,36	150,67	150,24	149,73	6070	5470	5000
2041-70 Skenaario B	149,85	149,13	149,00	149,00	4960	4110	3390
2041-70 Skenaario C	149,08	149,00	149,00	149,00	4680	4040	3540

Veijalainen ja Vehviläinen, 2008, Mitoitustulvaselvitys

Kemijoen 1-luokan patojen (selvityksen tekoaikaan vielä P-patojen) mitoitus-
tulvien muuttumista ilmastonmuutoksen myötä jakson 2070–2099 aikana arvioitiin vuonna 2008 julkaistussa raportissa. Raportin laskelmat on tehty käyttäen mitoitus-
sadantaan perustuvaa menetelmää mitoitus-
tulvan arvioimiseksi sekä vanhempia päästöskenaarioita IS92a (vanha skenaario) ja A2 ja B1 (SRES-
skenaarioita). Mitoitus-
sadannan kasvua on arvioitu Ilmatieteen laitoksen raportissa (Solantie 2000).

Tulosten perusteella Kemijoen P-patojen mitoitus-
tulvalaskelmien mukaan ainoastaan Lokan ja Porttipahdan patojen mitoitus-
tulvat kasvoivat kaikilla skenaariolla, ja kasvua oli 5–45 %. Lokan ja Porttipahdan mitoitus-
tulva ajoittuu syksyyn tekojärvien suuren varastokapasiteetin johdosta. Muilla Kemijoen padoilla mitoitus-
tulva ajoittuu sekä nykytilanteessa että jaksolla 2070–2100 keväälle. Näillä padoilla mitoitus-
tulvan muutoksen suunta riippuu käytettävästä ilmastoskenaariosta. Mitoitus-
tulvien muutos vaihteli välillä -18-(+18) %. Keskimäärin muutos mitoitus-
tulvissa oli siis pieni.

Mitoitus-
tulvan muutos on herkkä ilmastoskenaarioiden ennakoimalle lämpötilan nousulle, mikä vaikuttaa voimakkaasti talvella kertyneen lumen määrään. Talvisadannan ja kevään mitoitus-
sadannan kasvu korvaa lämpötilan noususta johtuvan lyhyemmän talven pienentävän vaikutuksen lumimääriin ja ylivirtaamiin.

5 Ilmastonmuutos Kemijoki Oy:n toimialueella

Tässä osiossa esitellään uusimpien RCP-skenaarioiden perusteella tehtyjä arvioita Kemijoki Oy:n toiminta-
alueitten lämpötilan, sademäärän, lumen määrän ja virtaaman muutoksista ilmastonmuutoksen myötä.

5.1 Lämpötilan ja sademäärän muutokset

Lämpötilojen ja sademäärien kuukausikeskiarvojen arvioituja muutoksia tulevaisuudessa on esitetty kuvissa 3–5. Kullekin vesistöalueelle on piirretty oma kuvasarjansa, josta voi nähdä kutakin RCP-skenaarioita vastaavat muutokset kolmen tulevaisuuden jakson aikana. Koko vuoden keskimääräiset muutokset on annettu taulukossa 3. Huomattakoon, että nämä kaikki muutosarviot perustuvat 28 mallin keskimäärin ennustamiin muutoksiin. Mallitulosten välisiin eroavaisuuksiin palataan tämän kappaleen lopussa.

Taulukko 3. Kolmea kasvihuonekaasuskenaariota (RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5) vastaavat muutokset vuoden (a) keskilämpötiloissa (asteina) ja (b) kokonaissademäärissä (prosentteina) kolmen tulevaisuuden jakson (2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099) aikana erikseen eri vesistöalueilla. 28 ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoja.

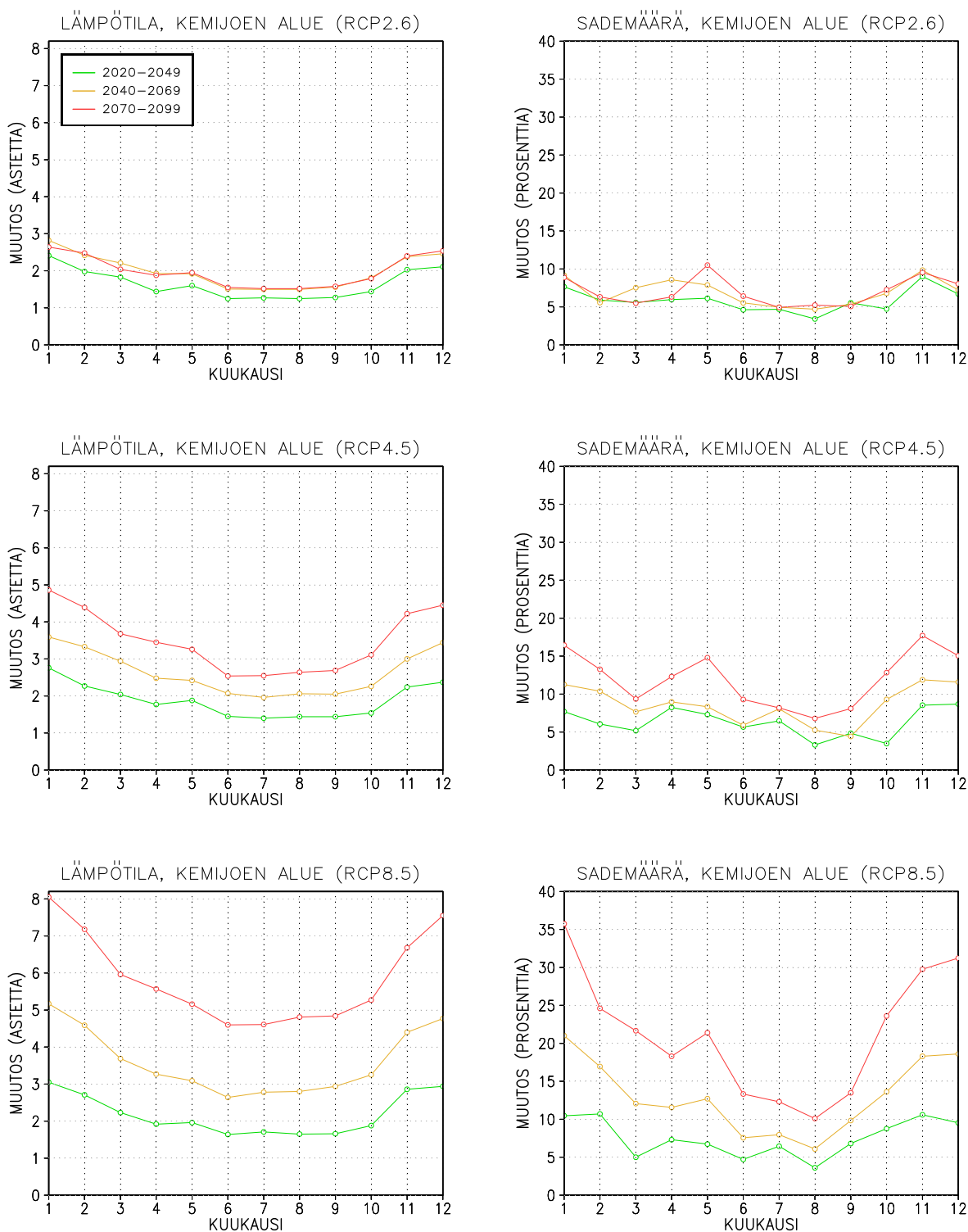
	a) Lämpötilan muutokset (asteina)								
	2020–2049			2040–2069			2070–2099		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Kemijoki	1.7	1.9	2.2	2.0	2.6	3.6	2.0	3.5	5.9
Lieksanjoki	1.6	1.8	2.1	1.9	2.5	3.5	1.9	3.3	5.7
Kymijoki	1.5	1.7	2.0	1.8	2.4	3.3	1.8	3.1	5.4
	a) Sademäärän muutokset (prosentteina)								
	2020–2049			2040–2069			2070–2099		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Kemijoki	5.6	6.1	7.3	6.7	8.2	12.2	6.8	11.5	20.0
Lieksanjoki	4.8	4.7	6.7	5.8	7.1	10.6	5.8	10.1	17.7
Kymijoki	4.9	4.8	6.5	5.2	6.8	9.8	5.7	10.1	16.4

Vielä vuosisadan alkupuolta kuvaavan jakson 2020–2049 aikana eri RCP-skenaarioitten tuottamat muutokset eivät poikkea toisistaan kovinkaan paljoa. Vuoden keskilämpötila nousisi tuohon ajanjaksoon tultaessa noin 1.5–2 asteella ja sademäärä kasvaisi 5–7 %. Vuosisadan edetessä skenaarioitten väliset erot käyvät yhä selvemmäksi. RCP2.6-skenaarion toteutuessa ilmasto ei vuosisadan loppupuolella juuri enää lämpiäisi lisää eivätkä sademääräkään muuttuisi paljoa. RCP8.5-skenaarion mukaan taas muutos jatkuvasti kiihtyisi.

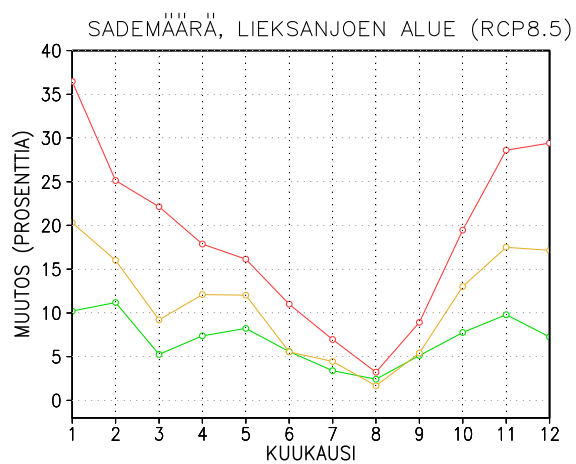
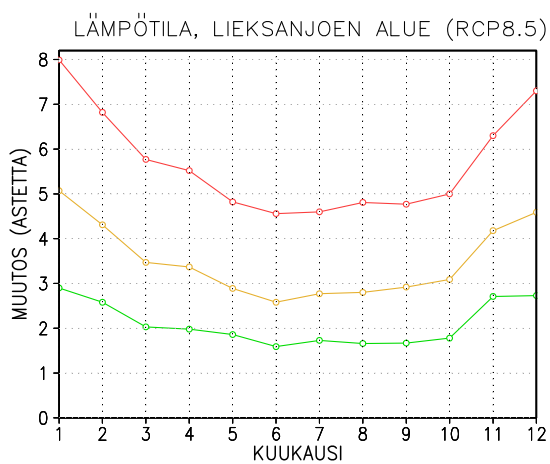
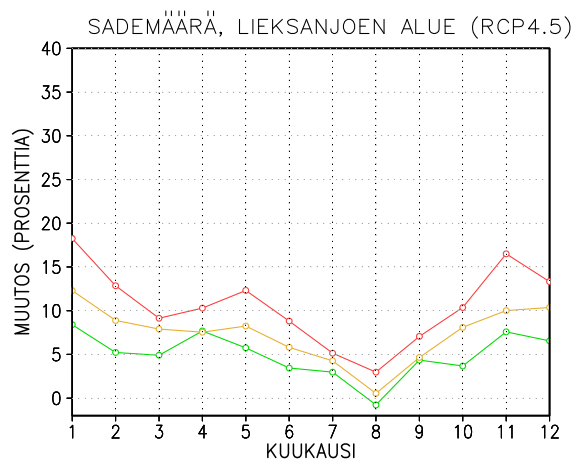
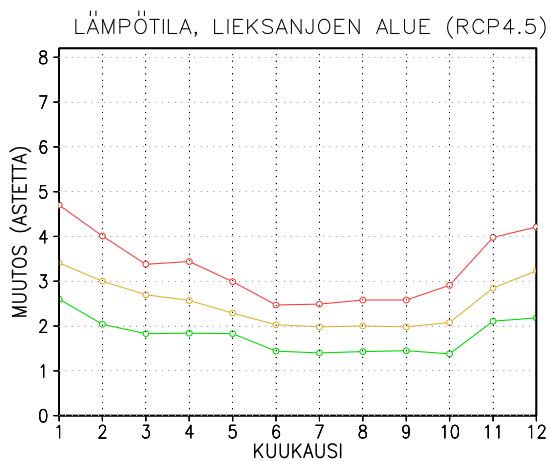
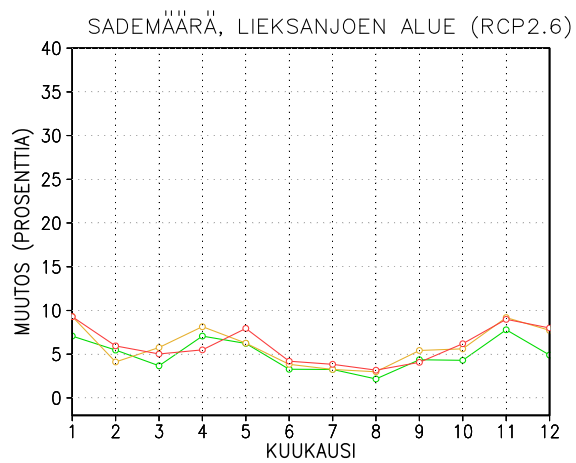
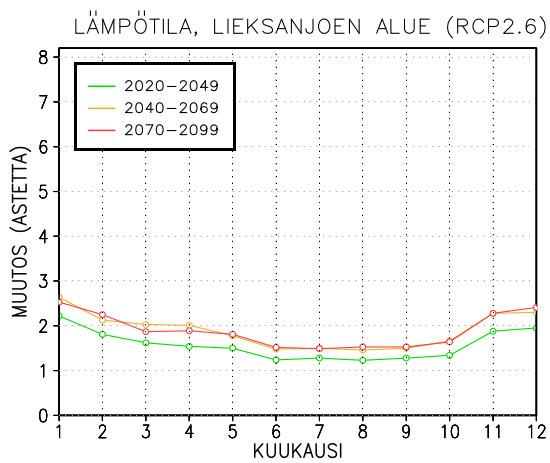
Pääsääntöisesti lämpötilat nousevat ja sateet lisääntyvät eniten talvella. Nähdään myös, että muutokset ovat pohjoisessa, Kemijoen vesistöalueella, jonkin verran suurempia kuin eteläisillä tarkastelualueilla. Alueitten ero on erityisen selvä tarkasteltaessa kesäkuukausien sademääriä. Esimerkiksi elokuussa Kymijoen alueen sademäärä ei näyttäisi kasvavan juuri laisinkaan, kun taas Kemijoen alueelle olisi tuolloinkin luvassa sateita 3–10 % perusjaksoa enemmän, riippuen tarkasteltavasta skenaariosta ja ajanjaksosta.

Muutostiedon ohella käyttäjä saattaa tarvita tulevaisuuden keskilämpötiloja ja sademääriä myös suoraan sellaisenaan. Nämäkin on laskettu tätä raporttia varten valmiiksi käyttäen kappaleen 2.1 lopussa kuvattua delta-menetelmää. Tulokset on esitetty raportin liitteen taulukossa L1.

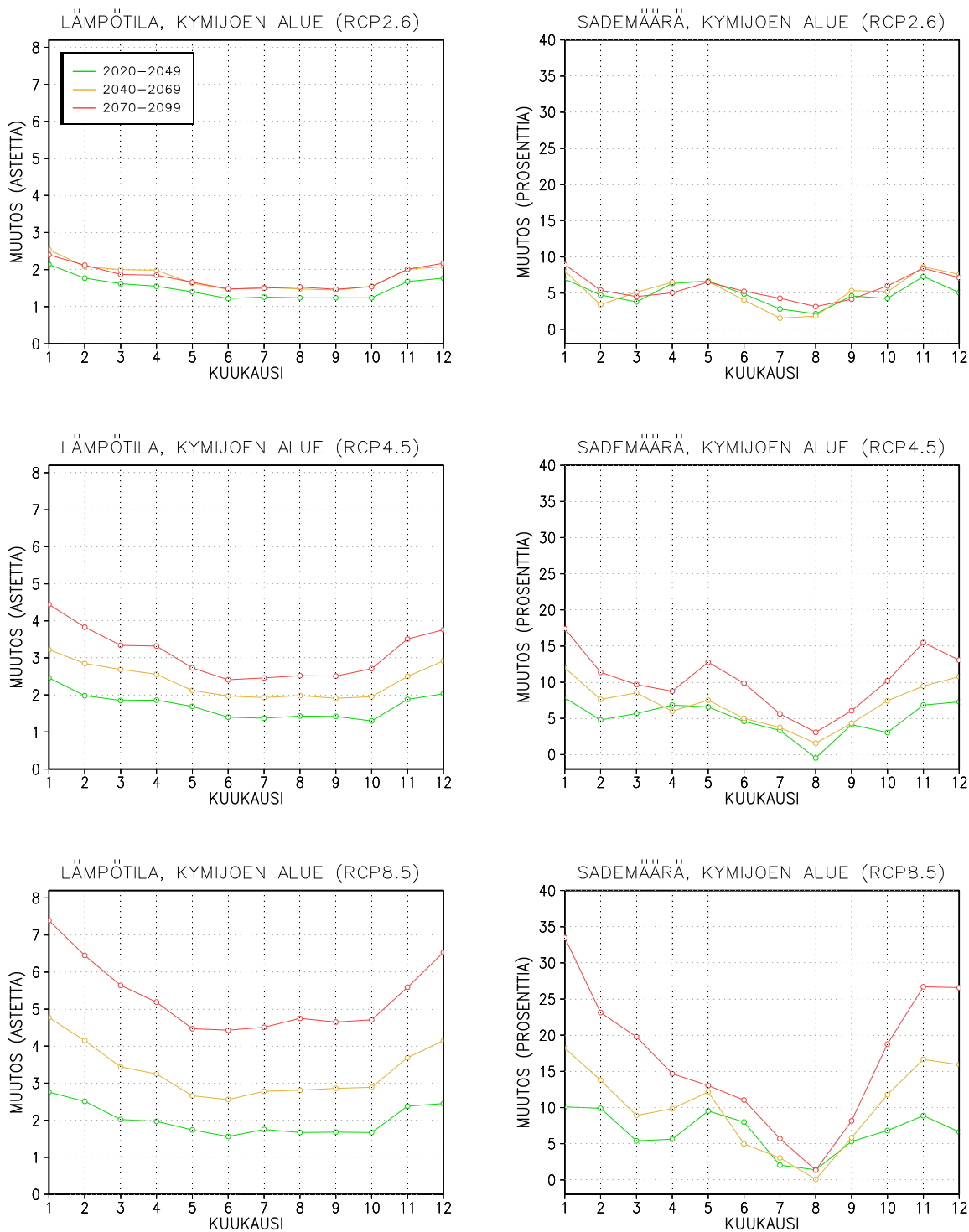
Kuvissa 3–5 tutkittiin ainoastaan 28 mallin ennustamien muutosten keskiarvoja. Eri mallien tulokset kuitenkin poikkeavat toisistaan, vaikka malleja ajettaessa käytettäisiin pohjana samaa kasvihuonekaasuskenaariota. Mallitulosten välisiä eroavaisuuksia Kemijoen alueella on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 3. Ennustetut lämpötilan (asteina; vasemman sarakkeen kuvat) ja sademäärän (prosentteina; oikean sarakkeen kuvat) muutokset Kemijoen vesistön alueella kolmen tulevan ajanjakson aikana (eriväriset käyrät; katso ylimmäisen vasemmanpuoleisen kuvan selityslaatikkoa) vuoden eri kuukausina. Yläkuvat esittävät RCP2.6-, keskimäiset RCP4.5- ja alimmaisat RCP8.5-skenaariot mukaisia muutoksia. Ennustetut muutokset ovat 28 mallin tulosten keskiarvoja.



Kuva 4. Ennustetut lämpötilan ja sademäärän muutokset Lieksanjoen vesistön alueella. Katso kuvan 3 selitystekstiä.

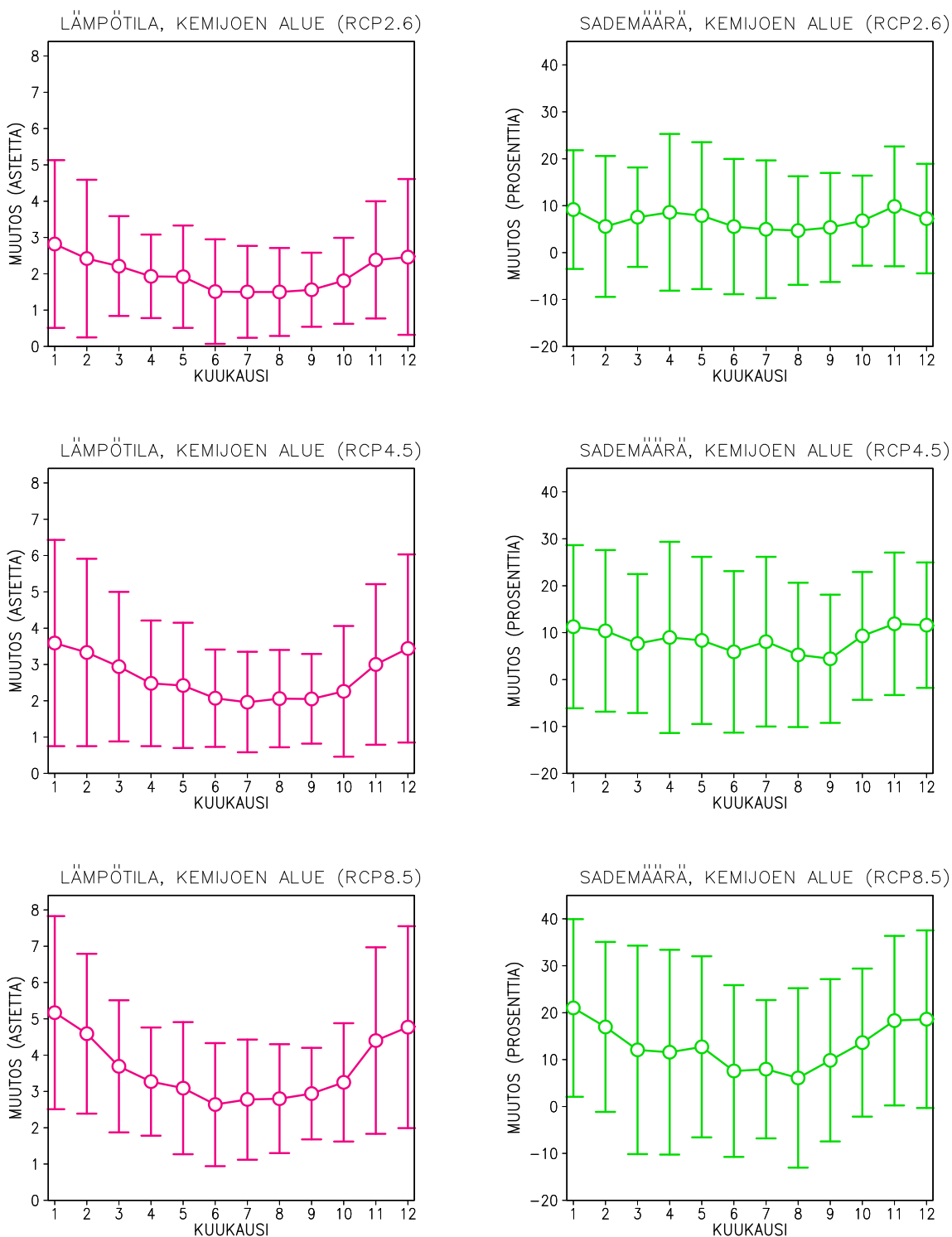


Kuva 5. Ennustetut lämpötilan ja sademäärän muutokset Kymijoen vesistön alueella. Katso kuvan 3 selitystekstiä.

Mallienväliset erot ennustetuissa muutoksissa ovat vielä nykyisillä malleilla melko isoja. Esimerkiksi RCP4.5-skenaarioon pohjautuvissa ennustuksissa jaksolle 2040–2069 (kuvan 6 keskimmäisen rivin kaaviot) mallit keskimäärin ennustavat tammikuun keskilämpötilan kohoavan vajaalla neljällä asteella ja sateitten lisääntyvän reilulla 10 prosentilla. Kuitenkin lämpötilan nousun epävarmuushaarukka ulottuu vajaasta yhdestä asteesta yli kuuteen asteeseen ja sademäärällä lähes 10 prosentin kuivumisesta aina melkein 30 % märkyyden lisääntymiseen. Lämpötilan muutoksen etumerkistä voidaan olla kaikkina kuukausina varsin varmoja. Sen sijaan sademäärä saat-

taa periaatteessa muuttua kumpaan suuntaan tahansa, joskin sen sateiden runsastuminen on vaihtoehtoista selvästi todennäköisempi.

Vastaavia mallitulosten eroja havainnollistavia kuvia ei ole esitetty muille alueille, koska erot olivat kaikilla alueilla varsin samantapaisia.

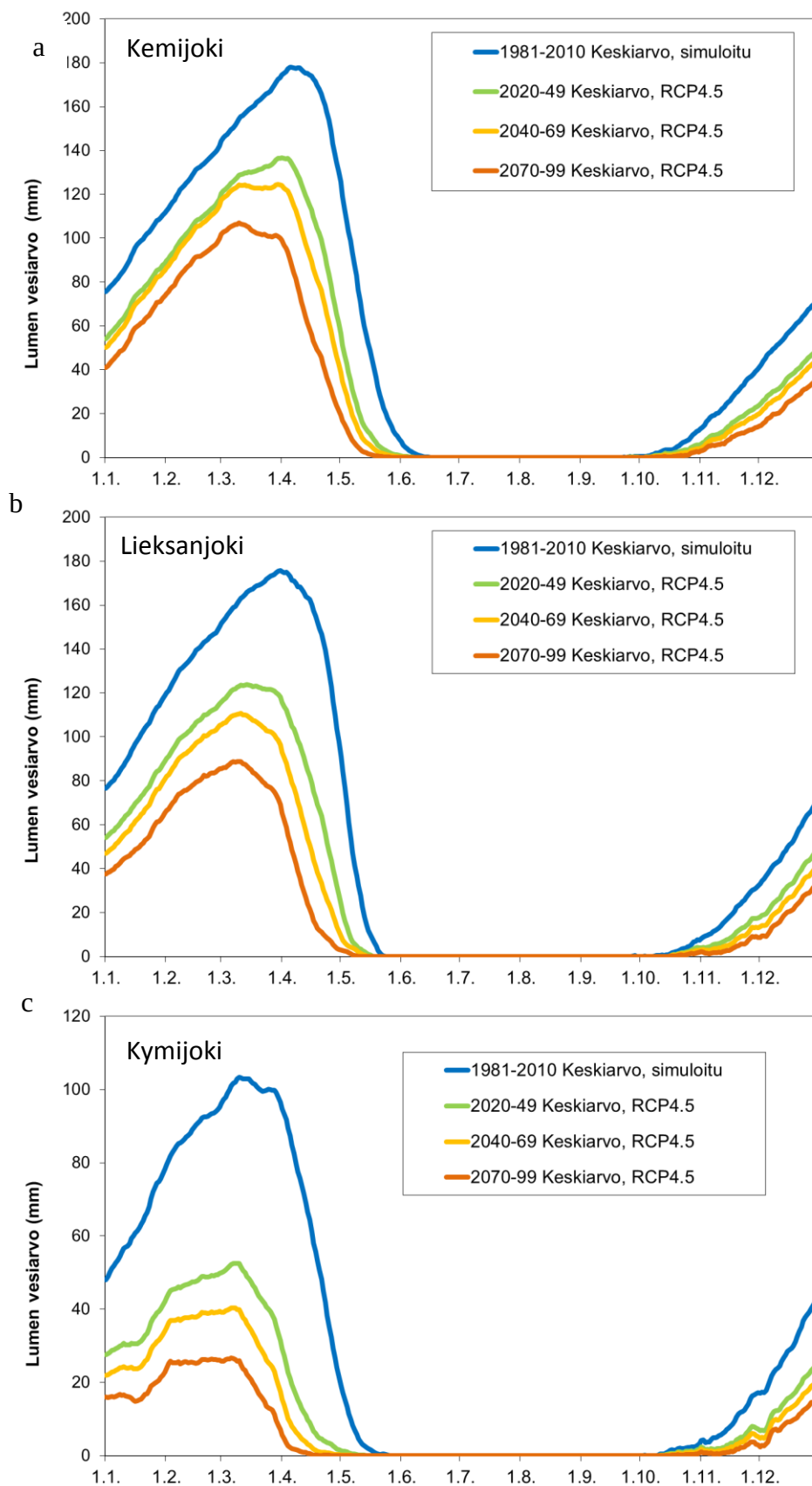


Kuva 6. Ennustetut lämpötilan (asteina; vasemman sarakkeen kuvat) ja sademäärän (prosentteina; oikean sarakkeen kuvat) muutokset Kemijoen vesistön alueella vuosille 2040–2069 vuoden eri kuukausina. Valkoisilla palluroilla merkitty käyrä kuvaa mallitulosten keskiarvoa ja pystyjanat mallitulosten eroavaisuuden perusteella laskettua muutoksen 90 % epävarmuusväliä. Yläkuvat esittävät RCP2.6-, keskimmäiset RCP4.5- ja alimmaiset RCP8.5-skenaarioiden mukaisia muutoksia.

5.2 Lumen määrän muutokset

Ilmaston lämmitessä talviset suojasääät yleistyvät. Siksi entistä isompi osa sateista saadaan talvel-lakin vetenä, ja jo maahan satanutkin lumi sulaa herkemmin. Toisaalta ilmastomallien mukaan talvien kokonaissademäärä kasvaa (kuvat 3-5), mikä taas on omiaan lisäämään myös satavan lu-men määrää. Keskimäärin lumen määrä vähenee koko maassa ilmastonmuutoksen vaikutuksesta, mutta Pohjois-Suomessa väheneminen on vähäisempää kuin etelässä. Pohjois-Suomessa joillain skenaarioilla lumen määrä pysyy ennallaan ja voi jopa hieman kasvaa lähitulevaisuudessa.

Kuvassa 7 on esitetty lumen vesi-arvon vuorokausikeskiarvojen muutokset eri jaksoilla RCP4.5-skenaariolla. Lumen määrä vähenee keskimäärin kaikilla alueilla ja jaksoilla, mutta selvästi eni-ten Kymijoen alueella. Erot eri skenaarioiden välillä ovat merkittäviä. Etenkin vuosisadan lopulla tarkastelun pohjana käytetty RCP-skenaario vaikuttaa tuloksiin voimakkaasti.



Kuva 7. Vuorokauden keskimääräinen lumen vesiarvo (mm) jaksoilla 1981–2010, 2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099 a) Kemijoen koko valuma-alueella, b) Lieksanjoen valuma-alueella ja c) Kymijoen koko valuma-alueella RCP4.5-skenaariota mukaan (28 mallin keskiarvoa Vesistö-mallijärjestelmän lumimallin pohjatietoina käyttäen).

5.3 Virtaamat

Edellä kuvatut muutoksen Suomen lämpötiloissa ja sademäärissä saavat aikaan muutoksia valunnassa ja virtaamassa. Keskimäärin valunta Suomessa kasvaa hieman ja kasvu valunnassa on saman suuruista tai pienempää kuin ennakoitu kasvu sademäärissä johtuen kasvavasta haihdunnasta. Erot eri ilmastoskenaarioiden välillä ovat kuitenkin merkittäviä.

Taulukoissa 4–7 on esitetty arvioita virtaamien muutoksesta ilmastomuutoksen myötä Kemijoki Oy:n toiminta-alueen eri vesistöissä. Mallinnetut muutokset keskivirtaamassa ovat melko pieniä: jaksolla 2020–2049 2–7 % kun käytetään hydrologisen mallin pohjatietoina 28 ilmastomallin tulosten keskiarvoa eri RCP:ille, jaksolla 2040–2069 4–11 % ja jaksolla 2070–2099 4–19 %. Vuosisadan lopulla erot eri RCP-skenaarioiden välillä muodostuvat varsin suuriksi johtuen etenkin RCP8.5 skenaarion ennakoimista suurista sadannan kasvuista. Lisäksi liitteen 2 taulukossa L2 on esitetty simuloidut kuukausittaiset virtaamat vertailujaksolla ja tulevaisuuden jaksoilla.

Jos tarkasteluun otetaan 28 mallin keskiarvon lisäksi myös yksittäisiä ilmastoskenaarioita eri ilmastomalleista, kasvaa vaihteluväli kaikilla jaksoilla huomattavasti (taulukoitten 4 ja 5 vaihteluväli). Yksittäiset ilmastoskenaariot on valittu suuresta 124 ilmastoskenaarion parvesta kuvastamaan lämpötilan ja sademäärän muutosten kannalta ilmastomuutoksen neljää ääripäätä. Nämä ääripäät ovat lämpötilan ja sademäärän muutosten mukaan lämmin-märkä, kylmä-märkä, lämmin-kuiva ja kylmä-kuiva.

Vuosivirtaamaa suuremmat muutokset nähdään, kun tarkastellaan eri vuodenaikojen virtaamien muutoksia (taulukot 6 ja 7). Talven virtaamat kasvavat kaikissa vesistöissä selkeästi. Myös kevään virtaamat kasvavat entistä aikaisemmin kevään johdosta, kun aiemmin kesäkuulle jatkunut keväthuippu ajoittuu entistä enemmän maali-toukokuulle. Vastaavasti kesän virtaamat pienenevät kaikissa vesistöissä. Syksyllä virtaamat kasvavat Kemijoella sadannan kasvun myötä. Sen sijaan Kymijoella syksyn virtaamat hieman pienenevät, kun vedenkorkeudet ja virtaamat laskevat kesän aikana alemmas ja vesistön suuren koon takia tämä heijastuu vielä alkusyksyn virtaamiin. Lieksanjoella syksyn virtaamat pysyvät kutakuinkin ennallaan. Virtaamien keskimääräiset muutokset eri vuodenaikoina näkyvät myös kuvissa 8 ja 9.

Taulukko 4. Keskimääräisten vuosivirtaamien muutokset (%) Kemijoella. Tulokset on laskettu eri RCP-skenaarioille 28 mallin keskiarvona saaduilla lämpötilojen ja sademäärien muutoksilla ja vaihteluväli näiden lisäksi kahdeksalla yksittäisen ilmastomallin tuloksiin perustuvalla skenaarioilla, jotka kuvastavat ilmastoskenaarioiden ääripäitä (lämmin-märkä, kylmä-märkä, lämmin-kuiva ja kylmä-kuiva).

Muutos (%)	Lokka ja Portti- pahta tulovir- taama	Kemijärvi tulo- virtaama	Marraskoski virtaama	Valajaskoski virtaama
2020–2049				
RCP2.6 ka	3.9	4.3	3.7	4.0
RCP4.5 ka	3.9	4.4	3.9	4.1
RCP8.6 ka	5.3	5.8	5.2	5.5
vaihteluväli	1.5–13.0	-0.9–13.9	-0.6–13.7	1.3–12.9
2040–2069				
RCP2.6 ka	4.8	5.2	4.5	4.9
RCP4.5 ka	5.5	6.1	5.8	5.8
RCP8.6 ka	9.6	10.5	9.4	10.0
vaihteluväli	2.7–11.8	-0.3–12.9	1.4–10.5	2.8–11.5
2070–2099				
RCP2.6 ka	4.9	5.3	4.7	5.0
RCP4.5 ka	8.6	9.3	8.5	8.9
RCP8.6 ka	15.8	17.4	15.9	16.7
vaihteluväli	0.1–21.7	-2.8–23.4	2.4–24.6	0.1–22.1

Taulukko 5. Keskivirtaamien muutoksia Lieksanjoella ja Kymijoella. Katso taulukon 4 selitystekstiä.

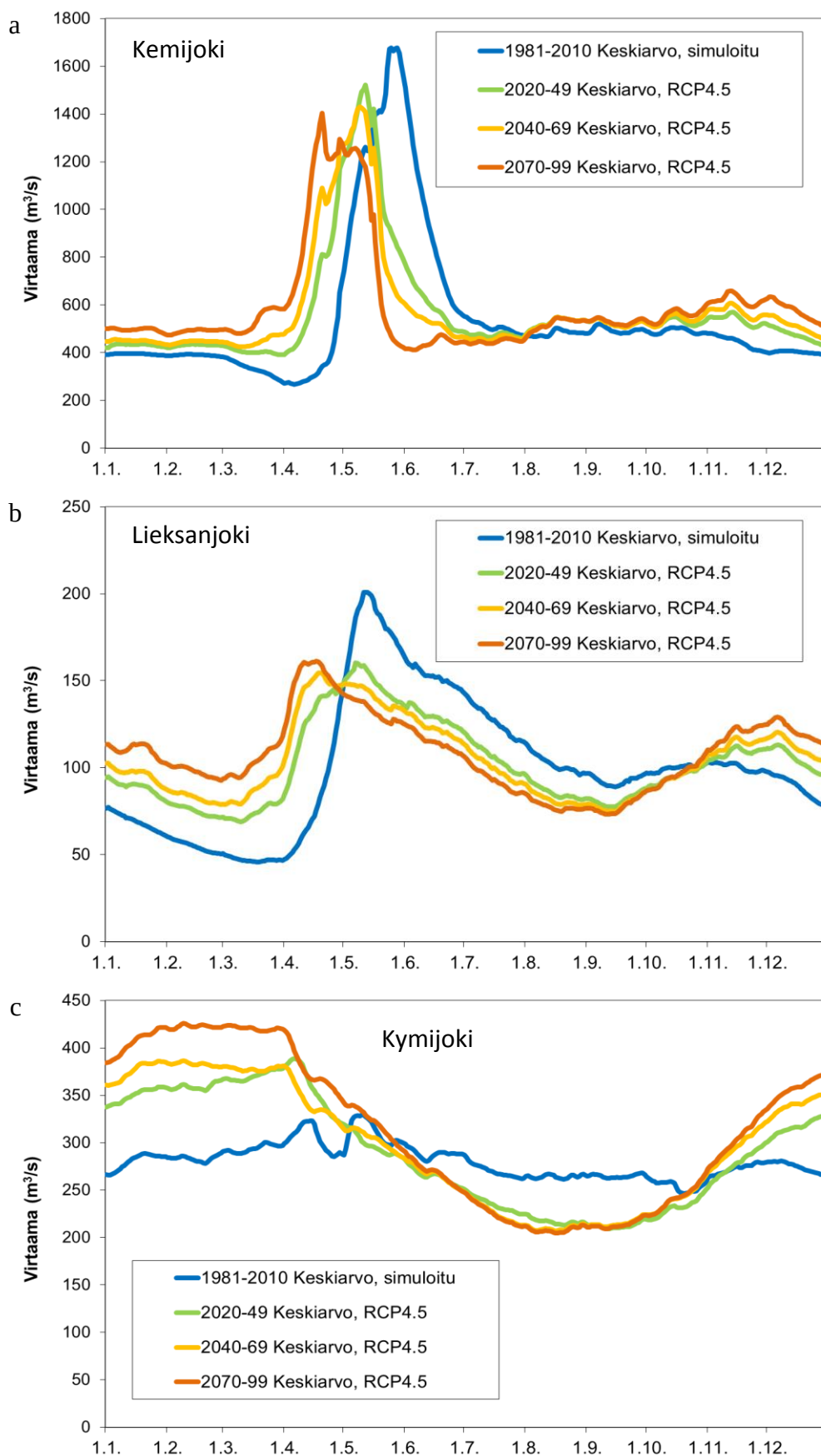
	Lieksanjoen virtaama	Kymijoki virtaama
2020–2049		
RCP2.6	3.1	4.8
RCP4.5	2.2	3.6
RCP8.6	5.2	6.8
vaihteluväli	-6.3–(+12.1)	-3.2–(+13.3)
2040–2069		
RCP2.6	4.0	4.6
RCP4.5	4.5	6.2
RCP8.6	8.3	10.5
vaihteluväli	-4.0–(+10.5)	-5.9–(+14.4)
2070–2099		
RCP2.6	4.2	5.8
RCP4.5	8.0	11.7
RCP8.6	14.8	19.0
vaihteluväli	-6.1–(+21.9)	-6.6–(+22.8)

Taulukko 6. Keskimääräisen eri vuodenaikojen virtaamien muutoksia Kemijoella. Tulokset on laskettu eri RCP-skenaarioille 28 mallin keskiarvona saaduilla lämpötilojen ja sademäärien muutoksilla.

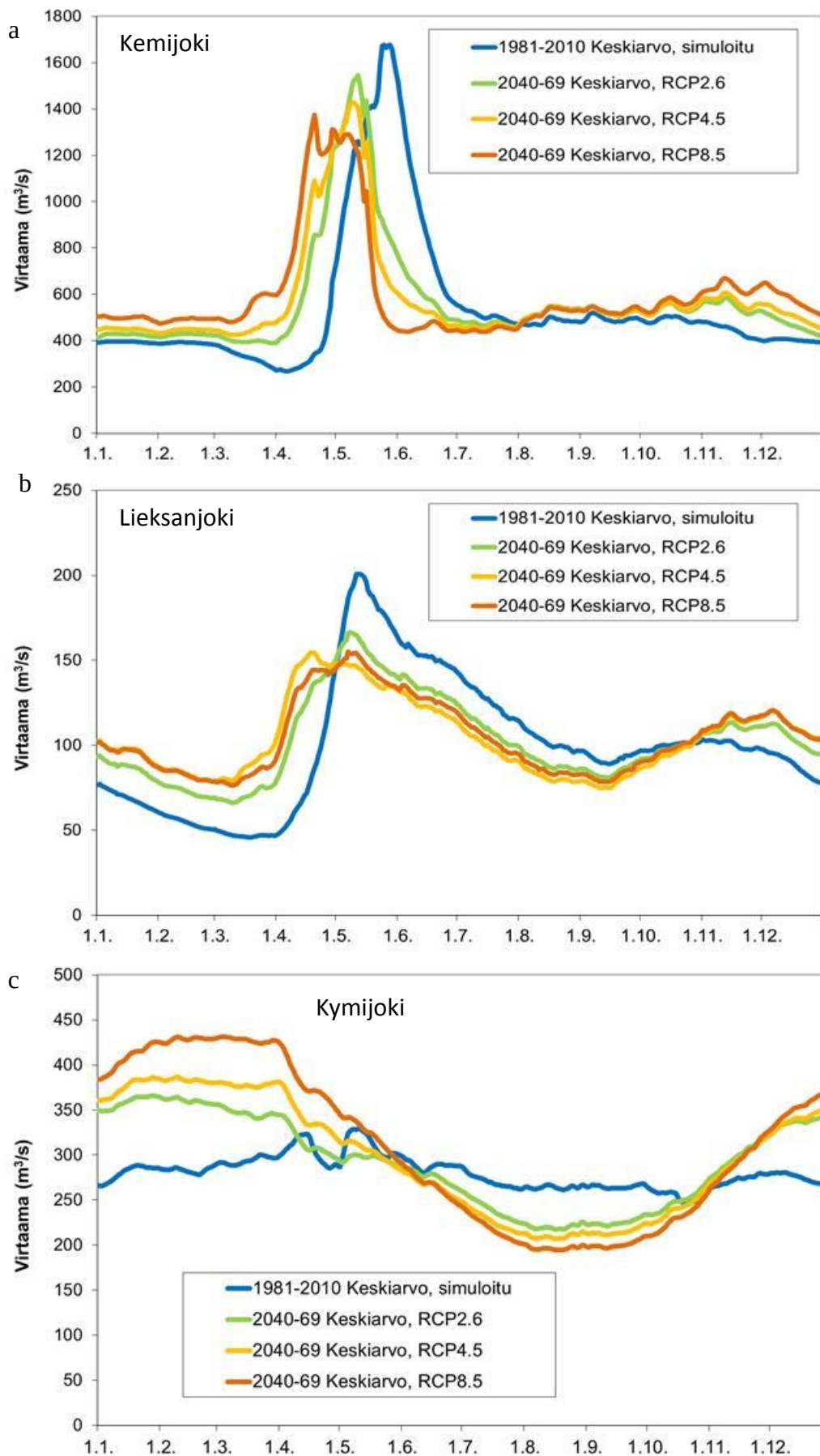
	Lokka ja Porttipahta tulovirtaama	Kemijärvi tulovirtaama	Marraskoski virtaama	Valajaskoski virtaama
2020–2049				
talvi	39–58	18–27	29–44	11–19
kevät	22–25	7–8	12–13	11–13
kesä	-26– (-21)	-16– (-13)	-22– (-19)	-18– (-13)
syksy	13–18	9–13	12–17	11–15
2040–2069				
talvi	42–91	19–41	30–69	11–33
kevät	27–37	10–13	15–19	15–22
kesä	-35– (-24)	-18– (-14)	-28– (-21)	-25– (-16)
syksy	15–27	11–19	14–26	13–20
2070–2099				
talvi	34–189	20–82	32–88	12–69
kevät	27–38	9–11	14–17	14–27
kesä	-45– (-24)	-22– (-14)	-33– (-21)	-35– (-15)
syksy	15–39	11–127	14–40	13–28

Taulukko 7. Keskimääräisen eri vuodenaikojen virtaamien muutoksia Kymijoella ja Lieksanjoella. Tulokset on laskettu eri RCP-skenaarioille 28 mallin keskiarvona saaduilla lämpötilojen ja sademäärien muutoksilla.

	Lieksanjoen virtaama	Kymijoki virtaama
2020–2049		
talvi	24–36	22–28
kevät	12–16	11–18
kesä	-17– (-13)	-13– (-10)
syksy	-3– (+1)	-9– (-6)
2040–2069		
talvi	27–60	26–42
kevät	15–27	5–24
kesä	-27– (-25)	-17– (-11)
syksy	-2– (+1)	-8– (-2)
2070–2099		
talvi	28–104	31–63
kevät	14–34	4–43
kesä	-37– (-13)	-20– (-9)
syksy	-3– (+1)	-12– 0



Kuva 8. Vuorokauden keskivirtaamat jaksoilla 1981–2010, 2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099 a) Kemijoen Valajaskoskella, b) Lieksanjoen ja c) Kymijoen Anjalankoskella RCP4.5-skenaariota mukaan (pohjana 28 ilmastomallin keskimäärin ennustamat lämpötilan ja sademäärän muutokset).



Kuva 9. Vuorokauden keskivirtaamat jaksoilla 1981–2010 ja 2040–2069 a) Kemijoen Valajaskoskella, b) Lieksanjoessa ja c) Kymijoen Anjalankoskella RC 2.6 skenaariolla, RCP4.5 skenaariolla ja RCP8.5 skenaarioiden mukaan (28 mallin keskiarvona).

5.4 Tulvien muuttuminen

Tulvien muutokset ovat herkkiä lämpötilan ja sadannan muutoksille. Ilmastonmuutos voi sekä pienentää että suurentaa tulvia riippuen ilmasto-olosuhteista, käytetystä skenaariosta ja vesistön hydrologisista ominaisuuksista. Myös tulvien ajankohdat muuttuvat.

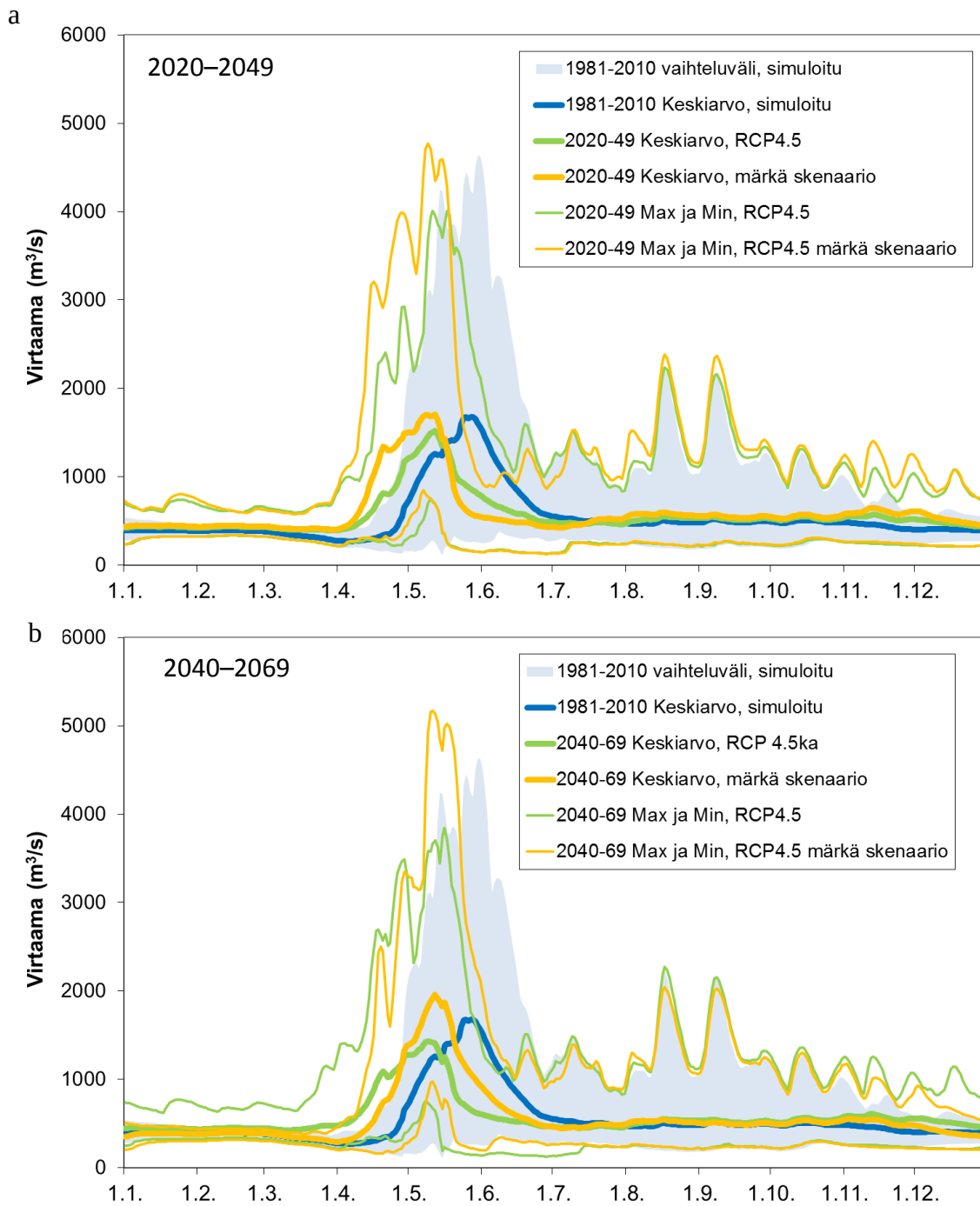
Kemijoella (kuva 10) suurimmat tulvat säilyvät lumen sulamisesta aiheutuvina kevättulvina myös tulevaisuudessa. RCP-skenaarioilla, jotka perustuvat 28 ilmastomallin keskimäärin ennustamiin lämpötilan ja sademäärän muutoksiin, tulvat Kemijoella keskimäärin pienenevät hieman. Yksittäisistä ilmastomalleista löytyy myös skenaarioita, joissa tulvat pysyvät nykyisellään tai hieman kasvavat, etenkin jaksoilla 2020–2049 ja 2040–69. Suurimmat tulvat syntyvät skenaariolla, jossa lämpötilan nousu on melko vähäistä, mutta sademäärä kasvaa suhteellisen paljon (ns. kylmä ja märkä skenaario). Liitteen 2 kuvassa L1 on esitetty vastaavat virtaamat Ounasjoen Marraskoskelle, jossa tulvat pysyvät keskimäärin ennallaan ja kasvavat märimmillä skenaarioilla.

Lieksanjoella (kuva 11) tulvat pienenevät jonkin verran kaikilla skenaarioilla lumen määrän vähetessä ja kevättulvien pienetessä. Talven tulvat puolestaan kasvavat kun talviset lumen sulamisjaksot lisääntyvät, mutta ne eivät yllä kooltaan nykyisten kevättulvien tasolle. Myös Lieksanjoella suurimmat tulvat syntyvät ns. kylmällä ja märällä skenaariolla.

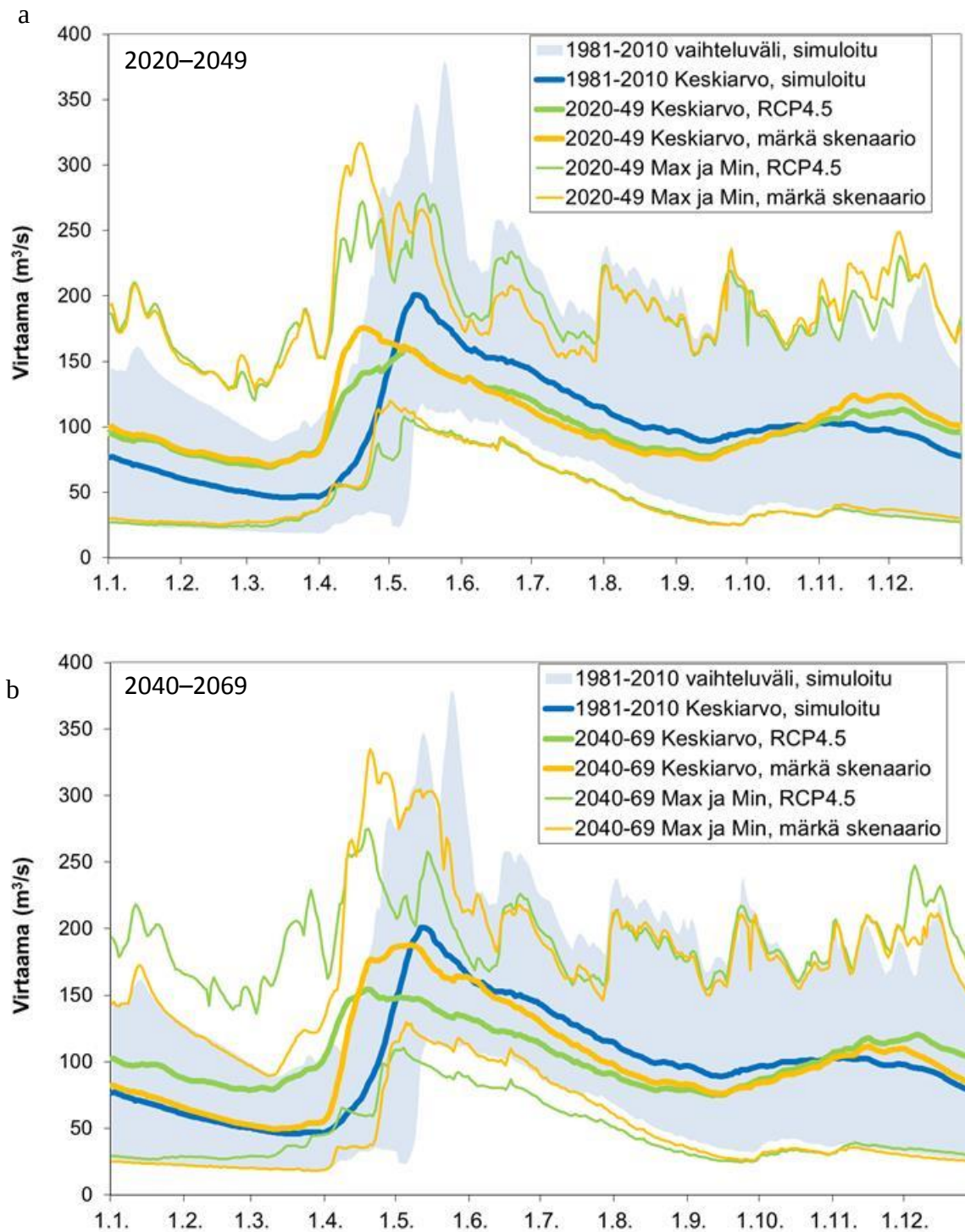
Kymijoella (kuva 12) tulvat muuttuvat entistä enemmän talvitulviksi. Kymijoella tulvat kasvavat suurimmalla osalla skenaarioista. Kuivimmilla skenaarioilla tulvat voivat pysyä nykyisen kokoisina, mutta keskimääräisillä ja märillä skenaarioilla tulvat kasvavat, joillain skenaarioilla varsin huomattavasti. Suuret virtaamat lisääntyvät etenkin talvella, mikä lisää hyyteen muodostumisen riskiä etenkin lähitulevaisuudessa, jolloin kovia pakkasjaksoja esiintyy yhä melko usein. Vuosisadan lopulla kovat pakkaset alkavat jo käydä nykyistä merkittävästi harvinaisemmiksi, mikä todennäköisesti pienentää hyyteen muodostumisen riskiä pitkällä aikavälillä.

Kemijoella ja Kymijoella kuvissa 10 ja 12 esitettyihin vuorokauden maksimivirtaamiin vaikuttaa myös säännöstely. Säännöstelyä optimoimalla ja sitä ilmastonmuutokseen paremmin sopeuttamalla voitaisiin tulvahuippuja todennäköisesti jonkin verran pienentää. Säännöstelyohjeita on tosin jo muokattu ottamaan ilmastonmuutos keskimäärin huomioon, mutta yksittäisen tulvatapahumaan niitä ei ole säädetty.

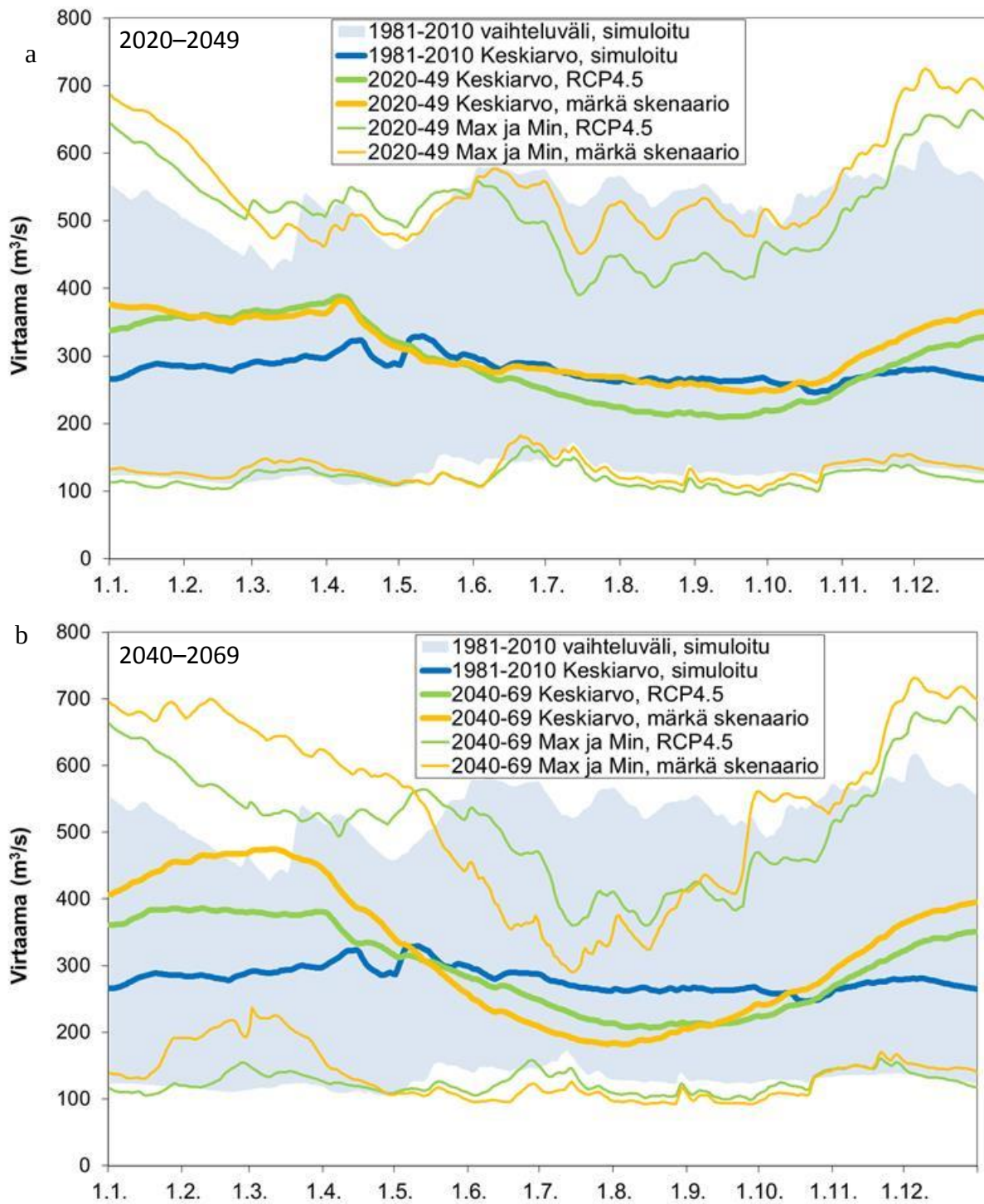
Ilmastonmuutoksen myötä tulevat hyydetulvat todennäköisesti lisääntymään (Aaltonen ym.2010). Erityisesti Kymijoella lähitulevaisuudessa hyydetulvat tulevat olemaan merkittävä tulvariski kun tulvat siirtyvät entistä enemmän talvikaudelle.



Kuva 10. Maksimi-, minimi ja keskivirtaamat Kemijoen Valajaskoskella jaksolla a) 2020–2049 ja b) 2040–2069 RCP4.5-skenaarion mukaan (28 mallin keskiarvo) ja vastaavat arvot keskimääräiseen verrattuna kylmällä ja märällä skenaariolla (CESM1-CAM5-malli, RCP2.6).



Kuva 11. Maksimi-, minimi- ja keskivirtaamat Lieksanjoen Lieksankoskella jaksolla a) 2020–2049 ja b) 2040–2069 RCP4.5-skenaarion mukaan (28 mallin keskiarvo) ja vastaavat arvot keskimääräiseen verrattuna kylmällä ja märällä skenaariolla (CESM1-CAM5 malli, RCP2.6 skenaario).



Kuva 12. Maksimi-, minimi- ja keskivirtaamat Kymijoen Anjalankoskella jaksolla a) 2020–2049 ja b) 2040–2069 RCP4.5- skenaarion mukaan (28 mallin keskiarvo) ja vastaavat arvot keskimääräistä suuremmat tulvat aiheuttavalla skenaariolla (jaksolla 2020–2049 kylmä ja märkä skenaario (MRI-CGCM3 malli, RCP4.5) ja jaksolla 2040–2069 lämmin ja märkä skenaario (MIROC-ESM-CHEM RCP4.5))

6 Ilmastoskenaarioiden epävarmuustekijät

Tulevaa ilmastomuutosta ennustettaessa on otettava huomioon kolme tärkeää epävarmuustekijää:

- Ilmaston luonnollinen vaihtelevaisuus
- Ilmastomallien toimintaan liittyvä epävarmuus
- Kasvihuonekaasujen päästöihin liittyvä epävarmuus

Lyhyitä, muutaman kymmenen vuoden ilmastoennusteita laadittaessa luonnollinen vaihtelu on epävarmuuden lähteistä hallitsevin (Ruosteenoja ym., 2016, kuva 10). Huomattakoon myös, että luonnollinen vaihtelu vaikuttaa voimakkaammin sademääriin kuin lämpötiloihin. Jos tarkasteltavalle 30 vuoden jaksolle osuu vaikkapa muutama poikkeuksellisen sateinen vuosi, tämä näkyy selvänä myös koko jakson keskimääräisessä sademäärässä. Varsinainen ilmastomuutoksesta aiheutuva signaali voi tällöin jäädä luonnollisen vaihtelun peittoon.

Eri mallien antamien ennusteitten eroja hahmoteltiin kuvassa 6. Tuossa kuvassa tarkastellun jakson (2040–2069) aikana eri mallien tulokset poikkeavat toisistaan jopa enemmän kuin eri kasvihuonekaasuskenaarioihin perustuvat arviot. Vasta viimeisen tarkastellun jakson (2070–2099) aikana pätee, että kasvihuonekaasujen päästöt muodostavat lämpötilan ennusteissa todella suuren epävarmuuden lähteen. Sademäärän ennusteissa luonnollinen vaihtelu on isoin epävarmuustekijä vielä tuolloinkin.

Eri skenaariot erilaisine lämpötilan ja sademäärien muutoksineen johtavat toisistaan selvästi poikkeaviin virtaamiin ja vedenkorkeuksiin. Skenaarioissa, joissa lämpötilan nousu on keskimääräistä pienempää, virtaamat ja vedenkorkeudet ovat lähempänä vertailujakson tilannetta kuin muissa skenaarioissa. Suurimmat muutokset vertailujaksoon nähden saadaan usein skenaarioilla, joissa lämpötilan ja sademäärien kasvu on suurta. Alhaisimmat vedenkorkeudet ja virtaamat syntyvät skenaarioilla, joissa lämpötila nousee keskimääräisesti tai sitä enemmän, mutta sademäärän muutos on pientä. Samaan ilmastomalliin perustuva skenaario ei välttämättä ole samanlainen eri puolilla Suomea eikä eri ajanjaksoilla

Skenaarioiden keskinäistä paremmuutta on lähes mahdotonta arvioida. Kaikki ilmastomallit, joilla valitut skenaariot on tuotettu, täyttävät ilmastomallien perusvaatimukset eli pystyvät tuottamaan kohtalaisen hyvin Suomen nykyisen ilmaston vertailujakson aikana.

Ilmastoskenaarioiden lisäksi tuloksiin vaikuttaa käytetty delta-menetelmä ja sen lähtökohdaksi valittu vertailujakso. Nyt on vertailujaksona käytetty jaksoa 1981–2010. Koska ilmastomuutoksen vaikutuksia tarkastellaan muuttamalla tämän jakson sademäärää ja lämpötilaa, vaikuttavat vertailujaksolla vallinneet olosuhteet saatuihin tuloksiin. Vertailujaksolle osuva poikkeuksellinen tulva tai kuivuus tai vastaavasti vertailujaksolta puuttuvat tämänkaltaiset tilanteet ovat läsnä tai puuttuvat myös tulevaa ilmastoa kuvattaessa.

Ilmastoskenaarioiden lisäksi myös hydrologinen malli ja sen epävarmuudet vaikuttavat tuloksiin. Mm. haihdunnan kasvu ilmastomuutoksen vaikutuksesta erilaisilla haihduntamalleilla, lumimallin vaikutus lumen sulantaan (kuinka herkästi esim. lumi sulaa kesken talven) jne. luovat epävarmuuksia ilmastomuutoksen vesistövaikutusten arviointiin. SYKEssä testikäytössä olevan lumen energiatasemallin alustavien tulosten mukaan lumi sulii tulevaisuuden ilmastossa talven aikana hieman vähemmän herkästi kuin nyt käytetyssä astepäivätekijään perustuvassa lumimallissa. Tällöin esimerkiksi Kemijoen tulvat olivat ilmastoskenaarioissa jaksoilla 2020–2049 ja 2040–2069

hieman suurempia kuin nykyisellä mallilla, jolloin tulvat pysyivät nykyisen kaltaisina tai jopa hieman kasvoivat.

7 Johtopäätökset

Ilmastonmuutosarviot on annettu tässä raportissa erikseen kolmelle kasvihuonekaasuskenaariolle. Minkään näistä ei voida olettaa toteutuvan kirjaimellisesti sellaisenaan. Ihmiskunnan päästöt ovat tämän vuosituhannen puolella kasvaneet nopeasti, joten tätä nykyä kasvihuonekaasujen pitoisuudet lähinnä seuraavat pessimististä RCP8.5-skenaariota. Pariisin ilmastopimus kuitenkin antaa toivoa paremmasta, ja lähivuosikymmeninä kehityssuunnan voisi odottaa lähentyvän RCP4.5-skenaariota. Jos sopimusta noudatetaan kirjaimellisesti, päästäisiin tätäkin alhaisempiin päästöihin. RCP2.6-skenaario näyttää tällä hetkellä kaukaiselta haaveelta, mutta kukaanhan ei voi tietää, miten yhtäältä ihmiskunnan ympäristön laadulle antama arvo ja toisaalta päästötön energiantuotantotekniikka pitkän päälle kehittyvät.

Eläminen RCP8.5-skenaario mukaan läpi tämän vuosisadan ei liene käytännössä mahdollista. Tämän vaihtoehdon toteutuessa vuosisadan jälkipuolella luultavimmin ajaututtaisiin maailmanlaajuiseen katastrofiin, joka romahduttaisi teolliset yhteiskunnat.

Joka tapauksessa on selvää, että tulevaisuutta koskevat päätökset on pakko pohjata osaksi epävarmaan tietoon. Epävarmuustekijöistä johtuen tulevaisuudessa toteutuvan ilmastonmuutoksen voimakkuutta ei ole mahdollista ennustaa tarkasti, vaikkakin suunta kohti korkeampia lämpötiloja ja ainakin talvipuolella vuotta lopulta myös kohti suurempia sademääriä näyttää varsin varmalta.

Ilmastoskenaarioita tarkasteltaessa on syytä myös pitää mielessä, että sääolot vaihtelevat suuresti vuodesta toiseen tulevaisuudessakin. Talvella lämpötilojen vaihteluitten ennustetaan pitkällä tähtäimellä vaimentuvan, jolloin kovimmat pakkaset leudontuisivat enemmän kuin mitä keskilämpötila kohoaa (Jylhä ym., 2015). Kesällä lämpötilan vaihteluissa ei ole odotettavissa suurta muutosta. Mutta vaikka keskilämpötilat kohoavatkin, kylmiä sääjaksojakin koetaan edelleenkin ajoittain. Vaihtelut huomioon ottaenkin keskilämpötilat ovat kuitenkin nousseet niin paljon, että ilmaston lämpeneminen on jo tällä hetkellä osoitettavissa tilastollisesti havaintoaikasarjoista.

Sademäärät sen sijaan vaihtelevat vuodesta toiseen vielä paljon voimakkaammin kuin lämpötilat. Sen takia muutossignaalin esilletulo satunnaisten vaihteluitten seasta saattaa viedä vielä kymmeniä vuosia.

Ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan vesivoiman tuotantoon monella tapaan. Virtaamien ja vedenkorkeuksien muutokset ovat suoria muutoksia, jotka näkyvät etenkin eteläisemmässä Suomessa jo nyt. Kokonaisvalunnat tulevat todennäköisesti kasvamaan maltillisesti ilmastonmuutoksen seurauksena. Erityisen selviä ovat ennakoidut muutokset eri vuodenaikojen välillä. Nämä ovat suurempia Etelä-Suomessa kuin Pohjois-Suomessa, jossa talvi säilyy lumisena vielä tulevaisuudessakin.

Myös tulvien esiintyminen ja voimakkuus muuttuvat ilmastonmuutoksen seurauksena. Muutokset ovat erilaisia eri puolilla Suomea johtuen erilaisista ilmasto-olosuhteista ja vesistöjen hydrologisista ominaisuuksista, mikä näkyy hyvin myös kolmen erilaisen kohdevesistön tuloksissa. Myös eri ilmastoskenaariot voivat tuottaa varsin erilaisia tuloksia, mikä kuvastaa ilmastonmuutokseen liittyvää epävarmuutta. Hyyteen muodostuminen ja jääolot tulevat myös muuttumaan ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Hyyteen riski talvella lisääntyy etenkin Kymijoella lähitulevaisuudessa.

Viitteet

- Aaltonen, J., Veijalainen N. & Huokuna M. 2010. The effect of climate change on frazil ice jam formation in the Kokemäenjoki River. Proceeding of the 20th IAHR International Symposium on Ice, Lahti, Finland, June 14–18, 2010. http://www.riverice.ualberta.ca/IAHR%20Proc/20th%20Ice%20Symp%20Lahti%202010/Papers/133_Aaltonen.pdf
- Andréasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L. & Lindström, G. 2004. Hydrological change – climate change impact simulations for Sweden. *Ambio* 33(4): 228–234.
- Arnell, N.W. 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global and Environmental Change* 9(1): 5–23.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jakkila, J., Veijalainen, N. & Vehviläinen, B. 2010. Hydrological climate change simulations for 2010-2039 and effect of climate change on inflow forecasts in Sweden and Oulujoki. Report 2010 for Fortum.
- Jylhä, K., Jokisalo, J., Ruosteenoja, K., Pilli-Sihvola, K., Kalamees, T., Seitola, T., Mäkelä, H.M., Hyvönen, R., Laapas, M. & Drebs, A. 2015. Energy demand for the heating and cooling of residential houses in Finland in a changing climate. *Energy and Buildings*, 99, 104-116. Doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.001.
- Koistinen, A. 2014. Kymijoen ilmastomuutoslaskennat. Julkaisematon raportti ELY-keskukselle.
- Korhonen, J. 2007. Suomen vesistöjen virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelut. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Suomen ympäristö 45/2007. 120 s.
- Lapin ELY-keskus. 2015. Padotus- ja juoksutusselvitykseen liittyvä esiselvitys. Ramboll Oy.
- Mikkonen, S., Laine, M., Mäkelä, H. M., Gregow, H., Tuomenvirta, H., Lahtinen, M. & Laaksonen, A. 2015. Trends in the average temperature in Finland, 1847–2013. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00477-014-0992-2>
- Prudhomme, C., Jacob, D. & Svensson, C. 2003. Uncertainty and climate change impacts on the flood regime of small UK catchments. *Journal of Hydrology* 277(1): 1–23.
- Ruosteenoja, K. 2011. Miten ja miksi ilmasto muuttuu? Julk: Virtanen A. & Rohweder, L. (toim.). Ilmastomuutos käytännössä - hillinnän ja sopeutumisen keinoja. Gaudeamus, Helsinki. S. 69–108.
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Kämäräinen, M. 2016. Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. *Geophysica* 51(1), 17-50. Saatavissa vapaasti verkko-osoitteesta: http://www.geophysica.fi/pdf/geophysica_2016_51_1-2_017_ruosteenoja.pdf.

- Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Jylhä, K., Mäkelä, H., Lehtonen, I., Simola, H., Luomaranta, A. & Weiher, S. 2013. Maailmanlaajuisiin CMIP3-malleihin perustuvia arvioita Suomen tulevas-ta ilmastossa. Raportteja 2013:4, Ilmatieteen laitos, 83 s. Verkko-osoite: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/42362>.
- Uusikivi, J., Veijalainen, N. ja Vehviläinen B. 2014. Selvitys ilmastomuutoksen vaikutuksista Kemijärven ja Rovaniemen tulviin. Julkaisematon raportti Lapin ELY-keskukselle.
- Uusikivi, J. & Vehviläinen, B. 2017 Kemijärven säännöstelyn kehittäminen muuttuvissa ilmasto-oloissa. Julkaisematon raportti Lapin ELY-keskukselle.
- Vehviläinen, B. & Huttunen, M. 2002. The Finnish watershed simulation and forecasting system (WSFS). Publication of the 21st conference of Danube countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management.
- Vehviläinen, B., Huttunen, M. & Huttunen, I. 2005. Hydrological forecasting and real time monitoring in Finland: The watershed simulation and forecasting system (WSFS). In: Innovation, Advances and Implementation of Flood Forecasting Technology, Conference Papers, Tromso, Norway, 17–19 October 2005.
- Veijalainen, N., Jakkila, J., Nurmi, T., Vehviläinen, B., Marttunen, M. & Aaltonen, J. 2012. Suomen vesivarat ja ilmastomuutos-vaikutukset ja muutoksiin sopeutuminen, WaterAdapt-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 16/2012. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 138 s. ISBN 978-952-11-4017-4 <http://hdl.handle.net/10138/38789>

Liitteet

Liite 1. Lämpötilat ja sadannat tulevaisuudessa

Taulukko L1. Eri vesistöalueitten ennustetut keskilämpötilat (asteina) ja sademäärät (millimetreinä) kullekin vuoden kuukaudelle (1=tammikuu, jne.) ja koko vuodelle. Arviot on annettu erikseen kolmelle jaksolle (2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099) sekä kolmelle kasvihuonekaasuskenaariolle (RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5). Tulokset perustuvat 28 ilmastomallin ennusteitten keskiarvoon.

	Lämpötila Kemijoki												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
2020–2049													
RCP2.6	-10.7	-10.4	-5.7	-0.1	6.5	12.3	15.3	12.6	7.3	1.3	-4.9	-9.2	1.2
RCP4.5	-10.3	-10.1	-5.5	0.2	6.8	12.5	15.5	12.8	7.5	1.4	-4.7	-8.9	1.4
RCP8.5	-10.1	-9.7	-5.3	0.4	6.8	12.7	15.8	13.0	7.7	1.8	-4.1	-8.3	1.7
2040–2069													
RCP2.6	-10.3	-10	-5.3	0.4	6.8	12.6	15.6	12.8	7.6	1.7	-4.6	-8.8	1.5
RCP4.5	-9.5	-9.1	-4.6	0.9	7.3	13.1	16.0	13.4	8.1	2.2	-3.9	-7.8	2.2
RCP8.5	-7.9	-7.8	-3.8	1.7	8.0	13.7	16.8	14.1	9.0	3.1	-2.5	-6.5	3.2
2070–2099													
RCP2.6	-10.5	-9.9	-5.5	0.3	6.8	12.6	15.6	12.8	7.6	1.7	-4.5	-8.7	1.5
RCP4.5	-8.2	-8.0	-3.9	1.9	8.1	13.6	16.6	14.0	8.7	3.0	-2.7	-6.8	3.0
RCP8.5	-5.1	-5.2	-1.6	4.0	10.0	15.7	18.7	16.1	10.9	5.2	-0.3	-3.7	5.4
	Sademäärät Kemijoki												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
2020–2049													
RCP2.6	45	38	40	35	49	66	83	76	59	58	52	43	644
RCP4.5	45	38	40	35	49	67	85	76	58	57	52	44	646
RCP8.5	46	40	40	35	49	66	85	76	60	60	53	44	654
2040–2069													
RCP2.6	45	38	41	35	49	67	84	77	59	59	52	43	650
RCP4.5	46	39	41	36	50	67	86	78	58	61	53	45	660
RCP8.5	50	42	42	36	52	68	86	78	61	63	56	48	684
2070–2099													
RCP2.6	45	38	40	35	51	67	84	78	59	60	52	44	651
RCP4.5	48	40	41	37	53	69	86	79	60	63	56	47	680
RCP8.5	56	44	46	39	56	72	89	81	63	69	62	53	731

	Lämpötila Lieksanjoki												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
2020–2049													
RCP2.6	-9.1	-9.1	-3.9	2.0	8.9	14.0	17.0	14.2	9.2	3.6	-2.3	-6.9	3.1
RCP4.5	-8.7	-8.9	-3.7	2.3	9.2	14.2	17.1	14.4	9.3	3.7	-2.1	-6.6	3.3
RCP8.5	-8.4	-8.4	-3.5	2.5	9.2	14.3	17.4	14.6	9.6	4.1	-1.5	-6.1	3.7
2040–2069													
RCP2.6	-8.7	-8.8	-3.5	2.5	9.1	14.2	17.2	14.4	9.4	3.9	-1.9	-6.5	3.5
RCP4.5	-7.9	-7.9	-2.8	3.1	9.6	14.8	17.7	14.9	9.9	4.3	-1.3	-5.6	4.1
RCP8.5	-6.2	-6.6	-2.0	3.9	10.2	15.3	18.5	15.7	10.8	5.4	0.0	-4.2	5.1
2070–2099													
RCP2.6	-8.8	-8.7	-3.6	2.4	9.2	14.3	17.2	14.5	9.4	3.9	-1.9	-6.4	3.5
RCP4.5	-6.6	-6.9	-2.1	3.9	10.4	15.2	18.2	15.5	10.5	5.2	-0.2	-4.6	4.9
RCP8.5	-3.3	-4.1	0.3	6.0	12.2	17.3	20.3	17.8	12.6	7.3	2.1	-1.5	7.2
	Sademäärät Lieksanjoki												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
2020–2049													
RCP2.6	53	42	43	38	60	75	88	85	74	71	66	59	755
RCP4.5	54	42	44	38	59	75	88	83	74	70	66	60	754
RCP8.5	55	44	44	38	61	76	89	85	75	73	67	60	768
2040–2069													
RCP2.6	55	41	44	38	60	75	88	86	75	71	67	60	762
RCP4.5	56	43	45	38	61	77	89	84	74	73	67	62	771
RCP8.5	60	46	46	40	63	76	89	85	75	76	72	66	796
2070–2099													
RCP2.6	55	42	44	37	61	75	89	86	74	72	66	61	762
RCP4.5	59	45	46	39	63	79	90	86	76	75	71	64	793
RCP8.5	68	50	51	42	65	80	92	86	77	81	78	73	847

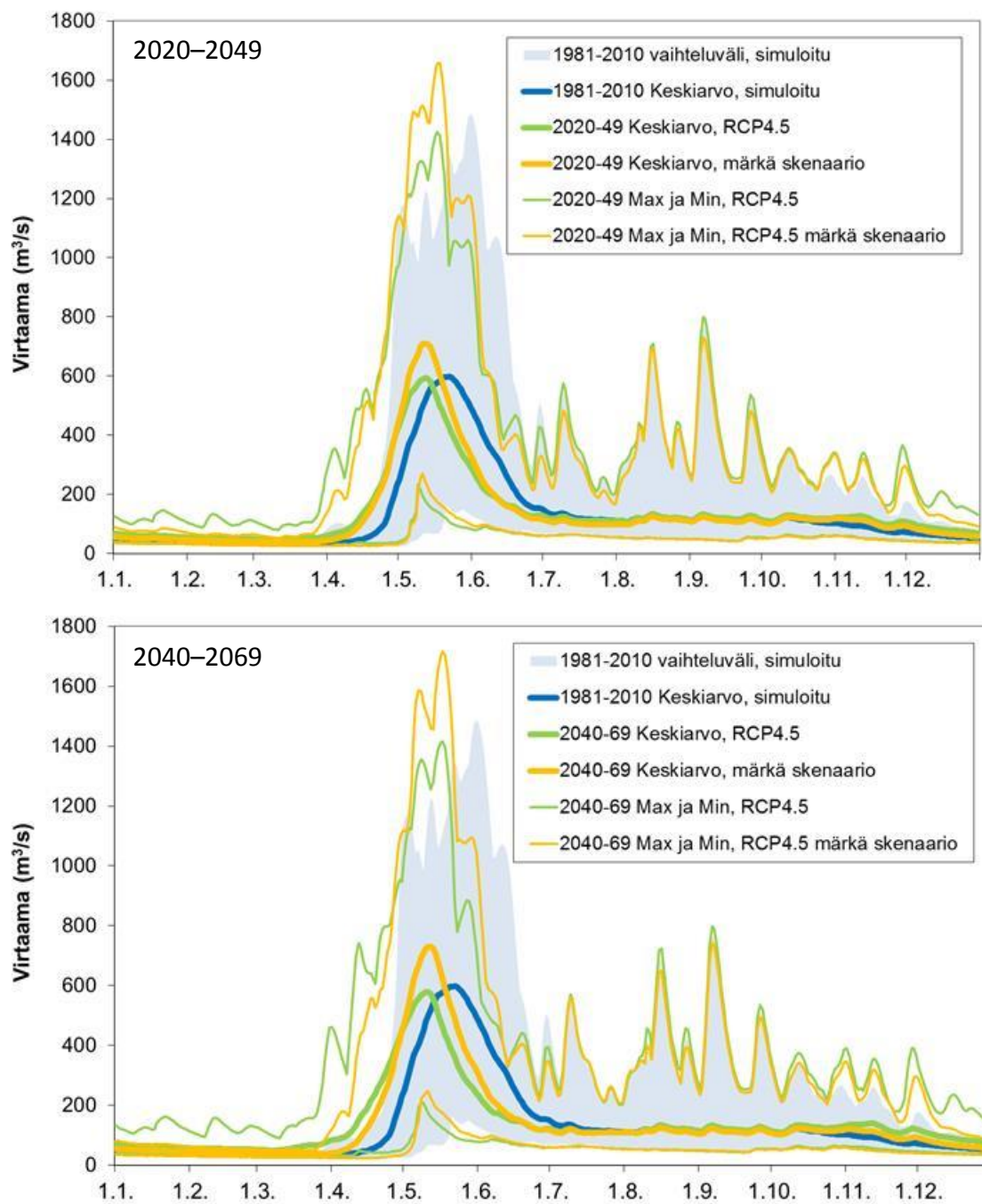
	Lämpötila Kymijoki												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
2020–2049													
RCP2.6	-5.8	-6.5	-1.9	4.0	10.6	15.1	18.0	15.7	10.5	5.3	0.1	-4.0	5.1
RCP4.5	-5.5	-6.3	-1.7	4.3	10.9	15.3	18.1	15.9	10.7	5.3	0.3	-3.8	5.3
RCP8.5	-5.2	-5.8	-1.5	4.4	10.9	15.5	18.5	16.1	10.9	5.7	0.8	-3.4	5.6
2040–2069													
RCP2.6	-5.4	-6.2	-1.5	4.4	10.8	15.4	18.2	15.9	10.7	5.6	0.4	-3.7	5.4
RCP4.5	-4.8	-5.4	-0.8	5.0	11.3	15.9	18.7	16.4	11.2	6.0	0.9	-2.9	5.9
RCP8.5	-3.2	-4.1	-0.1	5.7	11.8	16.5	19.5	17.2	12.1	6.9	2.1	-1.7	6.9
2070–2099													
RCP2.6	-5.6	-6.2	-1.7	4.3	10.8	15.4	18.2	16.0	10.7	5.6	0.4	-3.6	5.4
RCP4.5	-3.5	-4.4	-0.2	5.8	11.9	16.3	19.2	17.0	11.8	6.7	1.9	-2.0	6.7
RCP8.5	-0.6	-1.8	2.1	7.6	13.6	18.3	21.2	19.2	13.9	8.7	4.0	0.7	8.9
	Sademäärät Kymijoki												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
2020–2049													
RCP2.6	53	38	41	36	46	71	84	81	61	68	63	57	700
RCP4.5	54	38	41	37	46	71	84	79	60	68	63	58	700
RCP8.5	55	40	41	36	48	73	83	80	61	70	64	57	711
2040–2069													
RCP2.6	54	38	41	36	46	70	83	80	61	69	64	58	702
RCP4.5	56	39	42	36	47	71	84	80	61	70	64	60	713
RCP8.5	59	42	43	38	49	71	84	79	61	73	68	62	733
2070–2099													
RCP2.6	54	39	41	36	46	71	85	82	60	70	64	58	705
RCP4.5	59	41	43	37	49	74	86	81	62	72	68	61	735
RCP8.5	67	45	47	39	49	75	86	80	63	78	74	68	777

Liite 2. Hydrologiset skenaariot

Taulukko L2. Eri vesistöalueitten ennustetut keskivirtaamat (m³/s) kullekin vuoden kuukaudelle (1=tammikuu, jne.) ja koko vuodelle. Arviot on annettu erikseen kolmelle jaksolle (2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099) sekä kolmelle kasvihuonekaasuskenaariolle (RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5). Tulokset perustuvat 28 ilmastomallin ennusteitten keskiarvoon.

	Virtaama Kemijoki Valajaskoski												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
1981–2010 (simuloitu)	394	390	333	348	1317	907	507	481	495	490	445	401	544
2020–2049 RCP2.6	424	424	394	607	1231	634	477	524	528	531	537	462	565
RCP4.5	432	431	405	671	1181	597	474	525	526	527	538	471	566
RCP8.5	452	448	428	718	1119	571	465	521	528	541	570	510	573
2040–2069 RCP2.6	425	425	400	700	1197	596	473	526	530	537	551	469	570
RCP4.5	448	445	446	839	1068	524	460	524	524	539	572	507	575
RCP8.5	498	490	536	1022	907	454	447	518	531	560	629	579	598
2070–2099 RCP2.6	429	428	400	677	1208	602	474	527	531	538	551	474	571
RCP4.5	496	490	531	1028	869	439	447	520	530	557	620	572	592
RCP8.5	653	647	840	1202	516	301	406	513	530	583	725	705	634
	Virtaama Lieksanjoki Lieksankoski												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
1981–2010 (simuloitu)	69	55	47	80	181	153	127	102	93	100	101	89	100
2020–2049 RCP2.6	87	73	71	121	154	133	110	90	85	98	110	104	103
RCP4.5	89	75	74	126	149	129	106	86	81	95	109	105	102
RCP8.5	96	82	82	131	145	128	105	86	82	98	114	112	105
2040–2069 RCP2.6	89	75	74	131	151	130	107	87	84	98	112	107	104
RCP4.5	96	83	87	141	141	123	100	82	79	95	113	112	104
RCP8.5	114	103	109	152	132	113	91	75	75	94	119	123	108
2070–2099 RCP2.6	89	75	73	127	153	132	108	89	84	98	112	107	104
RCP4.5	110	98	103	151	133	115	93	78	77	96	119	121	108
RCP8.5	150	145	150	151	114	96	78	67	69	92	125	141	115

	Virtaama Kymijoki Anjalankoski												
Ajanjakso Skenaario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vuosi
1981–2010 (simuloitu)	280	283	294	304	311	288	271	264	265	255	273	274	280
2020–2049 RCP2.6	349	355	363	350	298	273	245	225	222	240	287	323	294
RCP4.5	350	359	371	357	298	265	235	217	212	231	278	317	290
RCP8.5	367	377	391	373	308	269	237	216	212	233	285	329	299
2040–2069 RCP2.6	359	360	347	315	296	276	240	220	225	248	299	336	293
RCP4.5	375	383	378	343	303	266	227	210	215	241	295	340	298
RCP8.5	407	428	428	380	322	267	219	197	201	230	294	353	310
2070–2099 RCP2.6	362	362	347	314	297	279	245	227	232	253	304	341	297
RCP4.5	406	422	421	375	321	269	226	208	214	242	303	358	313
RCP8.5	459	503	511	448	356	271	209	184	185	218	294	374	333



Kuva L1. Maksimi-, minimi ja keskivirtaamat Ounasjoen Marraskoskella jaksolla a) 2020–2049 ja b) 2040–2069 RCP4.5-skenaarion mukaan (28 mallin keskiarvo) ja vastaavat arvot keskimääräiseen verrattuna kylmällä ja märällä skenaariolla (CESM1-CAM5-malli, RCP2.6).