

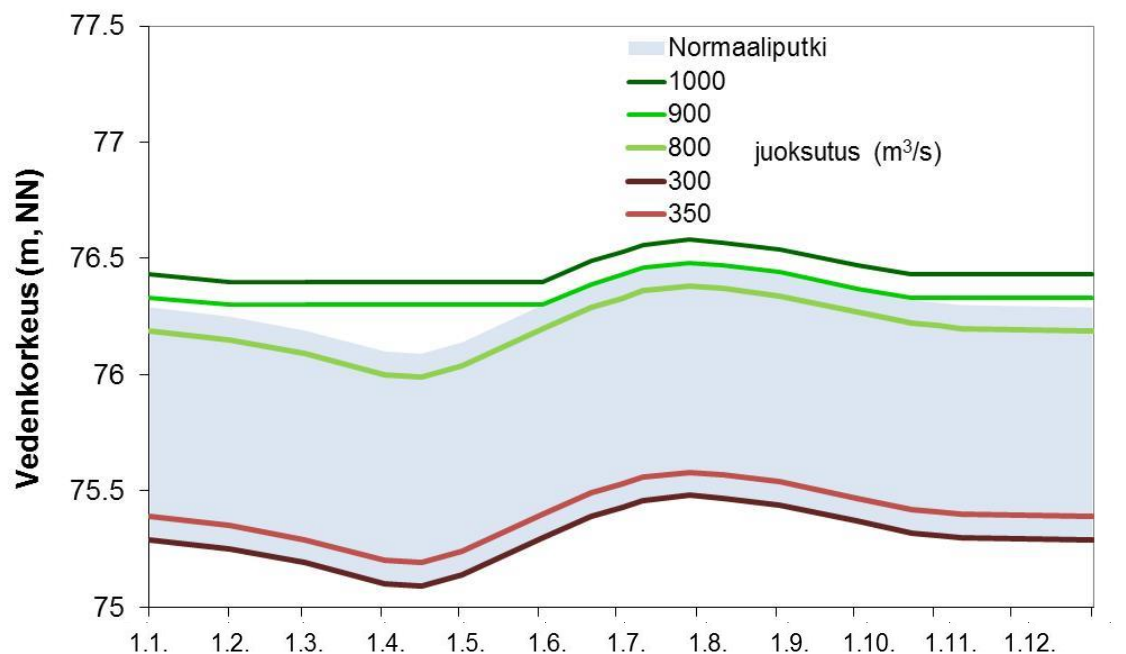
Saimaan ja Vuoksen tulvat ja ilmastonmuutos

Tässä työssä arvioidaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia Saimaan ja Vuoksen tulviin. Tarkasteluissa arvioidaan erityisesti kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan muuttumista ilmastonmuutoksen vaikutuksesta jaksolla 2020–49. Arvio tehdään useilla eri ilmastoskenaarioilla ja vaihtoehtoisilla juoksutusstrategioilla. Lisäksi arvioidaan juoksutussäännön soveltuvuutta ilmastonmuutoksen mukaisessa 1/100 vuoden yksittäisessä tulvatilanteessa. Tuloksien tarkastelussa on huomattava, että vuoden 1974–75 poikkeuksellisten olosuhteiden vuoksi simuloitu tulvatilanne on todennäköisesti liian suuri 1/100 tulvaksi, eli todellisuudessa simuloitun tulvan toistumisaika on suurempi kuin 1/100. Simuloinnit on tehty SYKEN Vesistömallijärjestelmää käyttäen. Vesistömallijärjestelmästä on käytössä versio, jossa on mukana parannettu järvihaihdunnan laskenta ja pistekorjatut sadannat. Ilmastonmuutos huomioidaan muuttamalla havaittuja lämpötiloja ja sadantoja delta change -menetelmällä ilmastoskenaarioiden ennakoimien kuukausittaisten lämpötilojen ja sadantojen muutosten mukaisesti.

Simuloinneissa käytetyt Saimaan juoksutusstrategiat

Lisäjuoksutus 1:

- 800 m³/s 10 cm ennen normaaliputken ylärajaa
- 900 m³/s normaaliputken ylärajalla (oikaisu talvella ja keväällä)
- 1000 m³/s 10 cm yli normaaliputken ylärajan (oikaisu talvella ja keväällä)



Lisäjuoksutus 2:

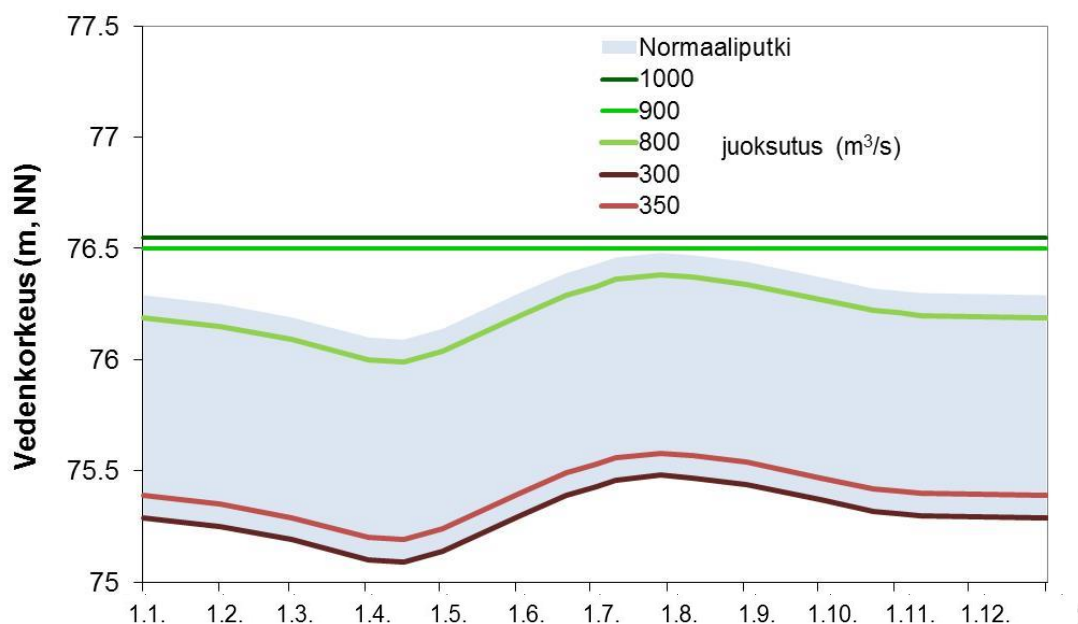
- 800 m³/s 10 cm ennen normaaliputken ylärajaa
- 900 m³/s tasolla 76,55 m +NN
- 1000 m³/s tasolla 76,60 +NN

Lisäjuoksutus 3 (kuten 2, mutta 800 m³/s 10 cm ylempänä):

- 800 m³/s normaaliputken ylärajalla
- 900 m³/s tasolla 76,55 m +NN
- 1000 m³/s tasolla 76,60 +NN

Lisäjuoksutus 4 (kuten 2, mutta 900 m³/s ja 1000 m³/s 5 cm alempana):

- 800 m³/s 10 cm ennen normaaliputken ylärajaa
- 900 m³/s tasolla 76,50 m +NN
- 1000 m³/s tasolla 76,55 +NN

**Lisäjuoksutus 5** (kuten 4, mutta lisäksi 1100 m³/s):

- 800 m³/s 10 cm ennen normaaliputken ylärajaa
- 900 m³/s tasolla 76,50 m +NN
- 1000 m³/s tasolla 76,55 +NN
- 1100 m³/s tasolla 76,75 +NN ilmastomuutostilanteessa

100 vuoden tulvan muuttuminen

Laskelmissa arvioitiin kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan suuruutta sovittamalla Gumbelin jakauma jakson 1961–2013 havaituilla lämpötiloilla ja sadannoilla simuloituihin vedenkorkeuksiin.

Jakso 2020–49 laskettiin muuttamalla 1961–2013 jakson lämpötiloja ja sadantoja ilmastoskenaarioiden mukaisesti.

Eriolaisten juoksutusstrategioiden vaikutusta arvioitiin keskiarvoskenaariolla (19 globaalimallin keskiarvo A1B päästöskenaarioilla) ja tulokset on esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1. Saimaan kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan aikainen vedenkorkeus referenssijaksolla ja jaksolla 2020–49 eri juoksutusstrategioilla.

	1961–2013 (m, NN)	2020–2049 (m, NN)	Muutos referenssiin (cm)
Luonnontilainen purkautuminen	77,23	77,44	+21
Lisäjuoksutus 1*	76,92	77,11	+19
Lisäjuoksutus 2*	76,99	77,24	+25
Lisäjuoksutus 3*	77,05	77,28	+23
Lisäjuoksutus 4*	76,98	77,21	+23
Lisäjuoksutus 5*	79,98	77,18	+20

* Lisäjuoksutusten aloitusvedenkorkeudet kuvattu raportin alussa

Tulvariskikartoissa käytetty havaituista vedenkorkeuksista arvioitu 1/100 tulvakorkeus on 77,04 m +NN (77,10 m+N60)

Jos tähän lisää ilmastomuutoksen vaikutuksen +19–25 cm niin 1/100 tulvakorkeus olisi juoksutusstrategiasta riippuen 77,23–77,29 m +NN.

Juoksutuksessa ennakoitu 19–25 cm kasvu tarkoittaisi luonnontilaisen purkautumiskäyrällä tulvatilannetta vastaavilla vedenkorkeuksilla 65–86 m³/s kasvua Saimaan juoksutuksissa.

Muut ilmastoskenaariot

Kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan (Gumbel) suuruus arvioitiin 12 eri ilmastoskenaariolla ja lisäjuoksutuksilla 4 (Taulukko 2 ja 3). Useita ilmastoskenaarioita käyttämällä voidaan arvioida ilmastomuutokseen liittyvää epävarmuutta. Lisäjuoksutusvaihtoehdolla 4 referenssijakson 1/100 vedenkorkeus oli 76,98 m (NN) ja eri ilmastoskenaarioiden mukaiset jakson 2020–49 tulokset näkyvät taulukossa 2. Skenaarioiden tulosten vaihteluväli on 77,08–77,56 m (NN) eli 10–58 cm referenssijakson vedenkorkeutta suurempi. Suurin osa skenaarioista on välillä +19–27 cm referenssiin nähden. Ilmastoskenaarioiden antama koko vaihteluväli on varsin laaja, mutta keskiarvoskenaario (keskiarvo A1B) sijoittuu varsin hyvin vaihteluvälin keskivaiheilla ja sitä voidaan siten käyttää jatkotarkastelujen perustana.

Taulukko 2. Eri skenaarioiden mukaiset kerran 100 vuodessa tulvat ja muutos referenssijakssoon nähden

Skenaario	1/100 vedenkorkeus (m +NN)	Muutos referenssiin (cm)
Keskiarvo A1B	77,21	+23 cm
Keskiarvo A2	77,20	+22 cm
Keskiarvo B1	77,23	+25 cm
HadCM3 A1B	77,20	+22 cm
Echam5 A1B	77,20	+22 cm
CCCM3 A1B	77,17	+19 cm
CNMR A1B	77,31	+33 cm
SMHI Had A1B	77,56	+58 cm
SMHI Echam5 A1B	77,11	+13 cm
DMI ARPEGE A1B	77,08	+10 cm
HadRM Had A1B	77,25	+27 cm
REMO Echam4 A1B	77,19	+21 cm

Taulukko 3. Kerran 100 vuodessa toistuvia vedenkorkeuksia (Lisäjuoksutus 4) vastaavat juoksutukset luonnontilaisella purkautumisella

Skenaario	1/100 virtaama (m ³ /s)	Muutos referenssiin (m ³ /s)
Keskiarvo A1B	1039	+80
Skenaarioiden minimi (DMI ARPEGE A1B)	993	+34
Skenaarioiden maksimi (SMHI Had A1B)	1160	+201
Skenaarioiden 80 % vaihteluväli	1004–1074	+ 45–115

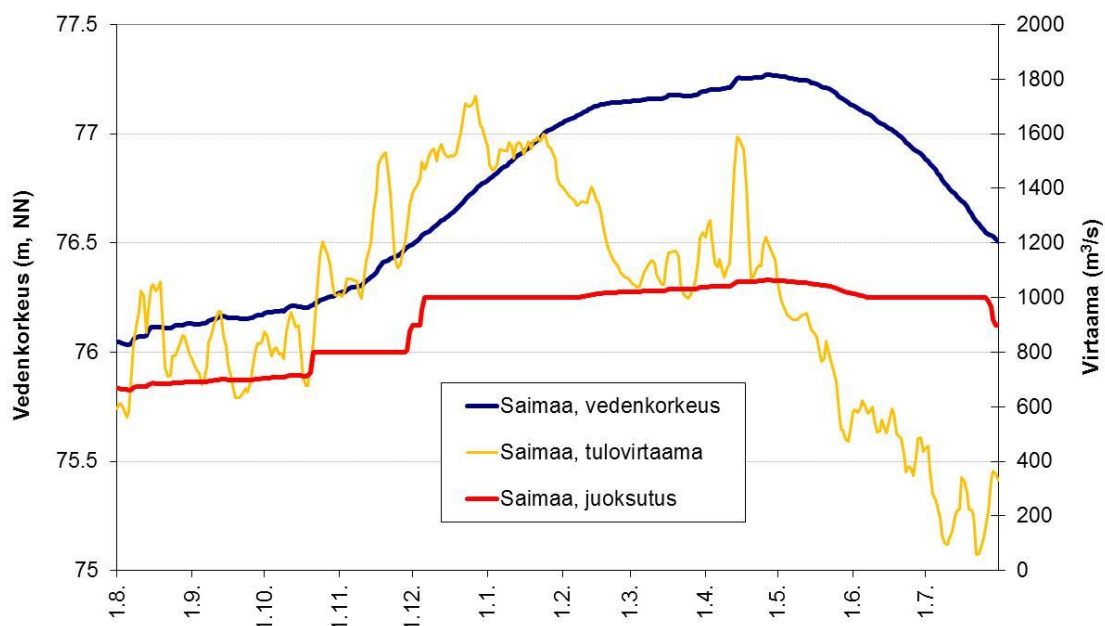
100 vuoden tulvan tarkastelu

Tässä osiossa tarkastellaan yksittäistä simuloitua Saimaan kerran 100 vuodessa toistuvaa tulvaa jaksolla 2020–49. Kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan suuruus on 77,27 m +NN (=77,04 m +NN eli nykyinen 1/100 vuodessa toistuva tulva + 0,23 m eli ilmastonmuutoksen vaikutus keskiarvoskenaariolla lisäjuoksutuksilla 4). Tulvatilanne pohjautuu 1974–75 tilanteeseen ilmastonmuutoksella muokattuna. Nykytilanteen 1/100 tulvakorkeutena on käytetty tulvariskikarttojen arvoa vertailun helpottamiseksi ja epävarmuuksien vähentämiseksi.

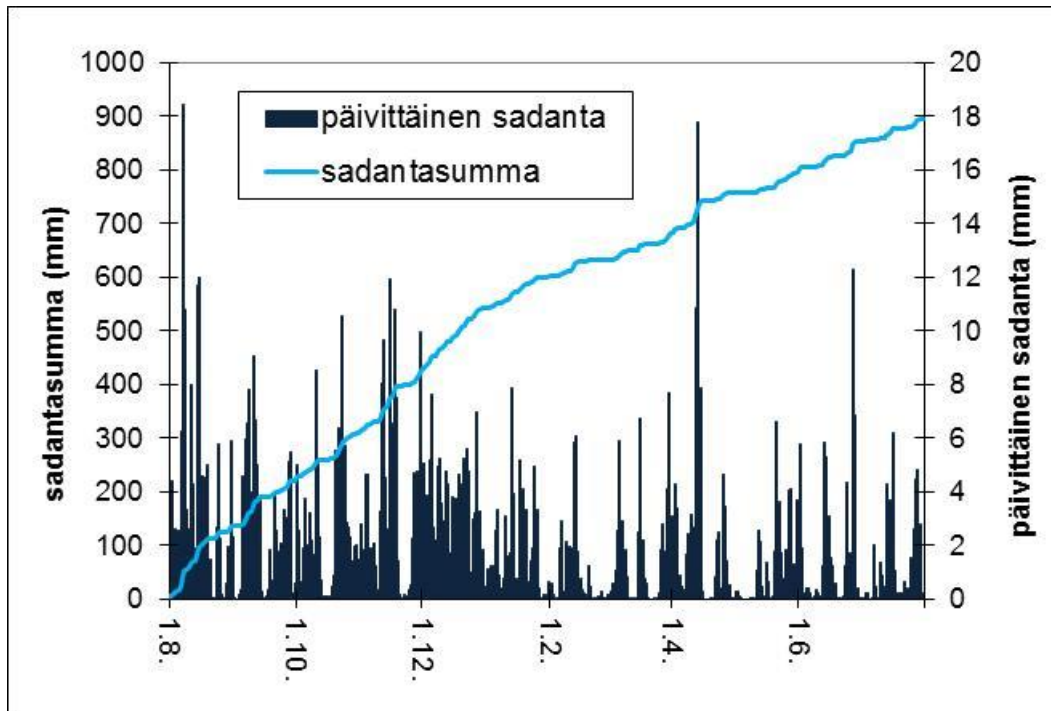
Tulvatilanteen kuvaus

Tässä tulvatilanteessa Saimaa on tulvan alkaessa muodostua elokuun alussa keskivedenkorkeudellaan (Kuva 1), mutta lähtee sen jälkeen nousuun johtuen elokuun ja syksyn runsaista sateista (Kuva 2). Koko vesistöalueen keskimääräinen sadesumma on elomarraskuussa on 424 mm, kun vastaavan jakson keskimääräinen sadesumma jaksolla 1961–

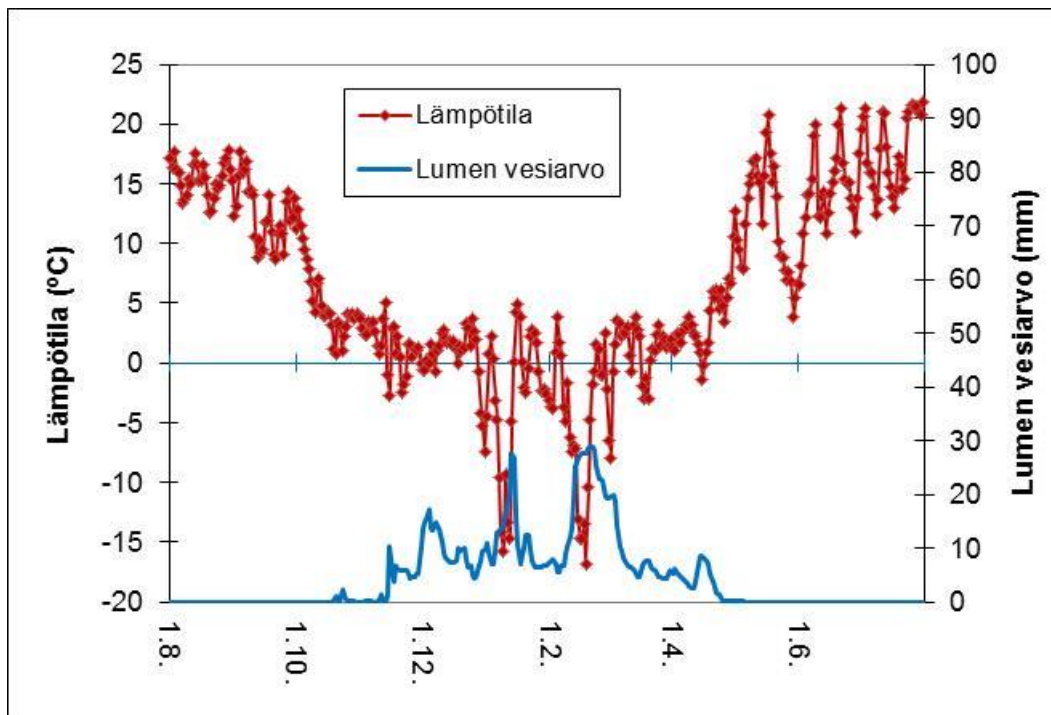
2013 on 286 mm. Talven aikana sää jatkuu edelleen lauhana ja sateisena (Kuvat 1 ja 2). Erityisesti joulukuun ja tammikuun runsassateisia (sadesumma 176 mm, jaksolla 1961–2013 keskimääräinen sadesumma 112 mm) ja lauhvoja (keskilämpötila -1,1 astetta, kun jaksolla tavanomainen keskilämpötila ilman ilmastomuutosta on -8,7 astetta). Puolen vuoden (elokuun–tammikuun) sadantasumma on 600 mm (398 mm keskimääräinen sadantasumma jaksolla 1961–2013). Lämpötila putoaa ensimmäistä kertaa pidemmäksi aikaa nollan alapuolelle vasta joulukuun lopussa. Vielä tammikuun puolivälissä lämpötila on useita päiviä plussan puolella ja saadaan runsaita uusia vesisateita. Ennen helmikuun alkupuolta lähes kaikki sadanta on joko tullut vesisateena tai sulanut, keskimääräinen lumen vesiarvo koko vesistöalueella on vain 10 mm. Lisäksi talviajan pienestä haihdunnasta johtuen sataneesta vedestä suuri osa muodostaa valuntaa. Helmi-maaliskuussa sademäärät ovat melko pieniä ja tulovirtaamat kääntyvät laskuun, mutta vielä huhtikuussa saadaan runsaita sateita (kuukauden sadantasumma 74 mm) ja lauhan sään myötä vesistöalueen viimeisetkin lumet sulavat. Sateet ja sulanta aiheuttavat vielä viimeisen tulovirtaamapiikin, joka nostaa Saimaan vedenkorkeutta muutamia senttejä. Tämän jälkeen tulovirtaamat kääntyvät nopeaan laskuun, koska seuraavien kuukausien sademäärät ovat vähäisiä, lunta ei vesistöalueella enää huhtikuun lopun jälkeen ole ja haihdunta alkaa kasvaa lämpötilojen noustessa. Myös vedenkorkeus kääntyy laskuun, mutta sen laskeminen normaalitasolle (alle normaaliputken ylärajan) vie useita kuukausia, aina elokuun alkuun asti.



Kuva 1. Saimaan jaksolla 2020–49 kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan aikainen tulovirtaama, vedenkorkeus ja juoksutus (lisäjuoksutus 4).



Kuva 2. Koko valuma-alueen päävittäinen sadanta ja sadantasumma tulvatilanteen aikana



Kuva 3. Koko valuma-alueen lämpötila ja lumen vesiarvo tulvatilanteen aikana

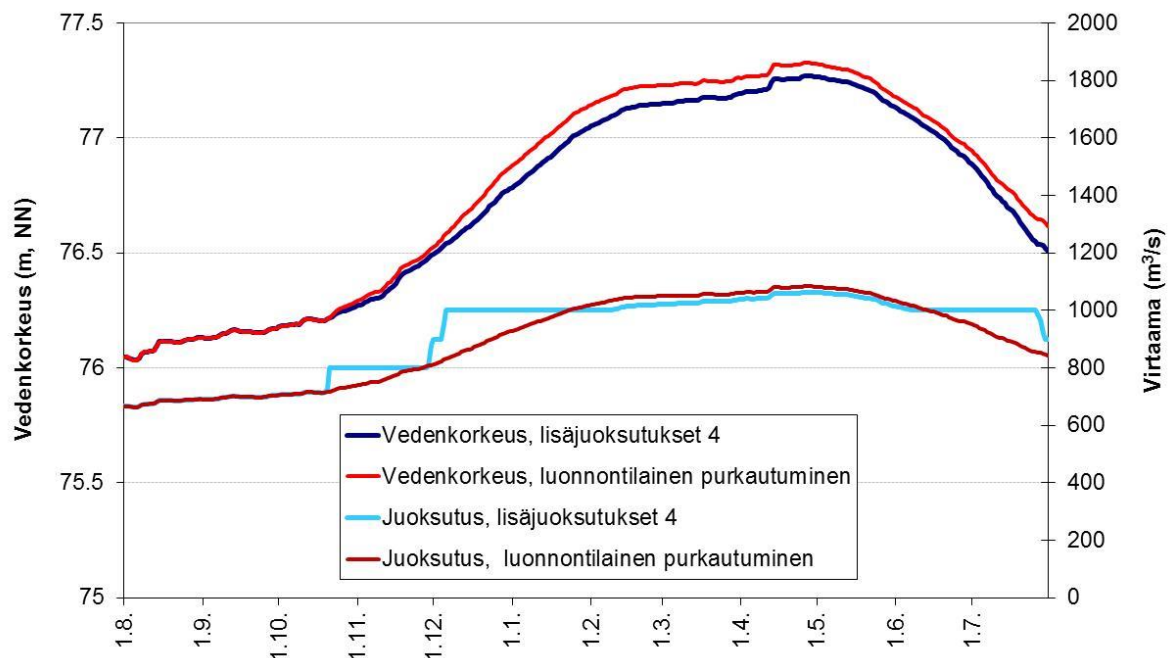
Juoksutusstrategioiden vertailu

Kuvassa 4 on esitetty tulevaisuuden 1/100 vuodessa tulva lisäjuoksutuksella 4 ja luonnontilaisella purkautumisella. Lisäjuoksutuksilla 4 vedenkorkeuden maksimi on

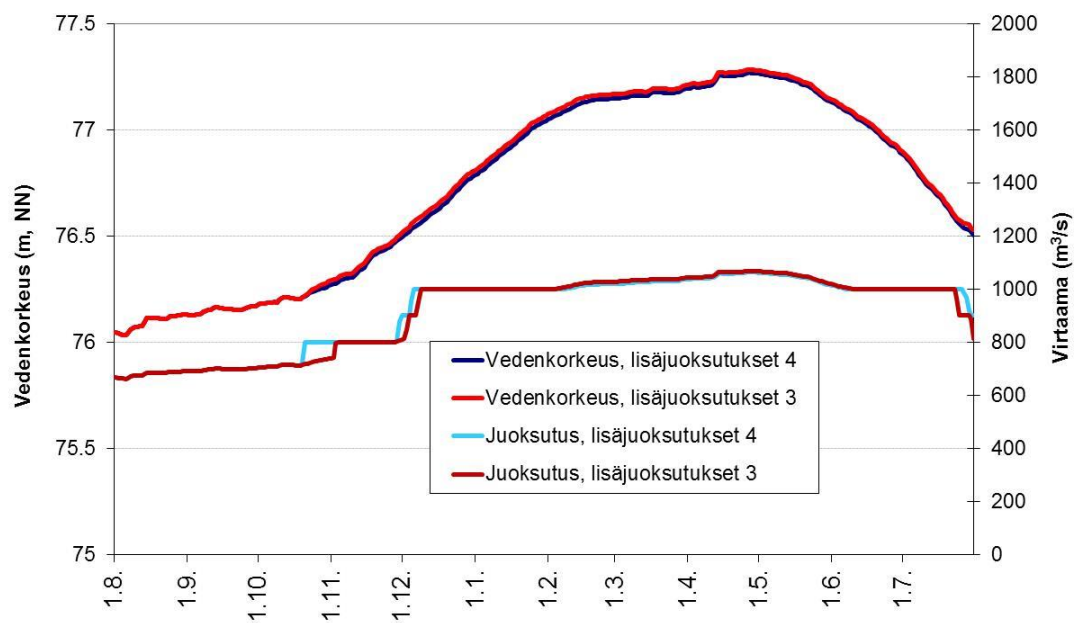
laskelmissa 77,27 m +NN. Suuressa tulvassa lisäjuoksutusten hyöty verrattuna luonnontilaiseen on varsin pieni (6 cm), jos juoksutuksen maksimina pidetään maksimissaan arvossa 1000 m³/s kunnes luonnontilainen virtaama on sitä suurempi (kuten lisäjuoksutusvaihtoehdossa 4). Pienempiä tulvia pystytään lisäjuoksutuksilla hillitsemään huomattavasti tehokkaammin, mutta suuren tulvan tapauksessa tulva nousee niin nopeasti että luonnontilaista suuremman juoksutuksen määrä jää melko vähäiseksi. Ero luonnontilaiseen verrattuna kutistuu kun luonnontilaisen purkautumisella lähtövirtaama kasvaa yli 1000 m³/s vedenkorkeuden ylittäessä tason 77,10 m +NN aikaisemmin kuin vaihtoehdossa, jossa lisäjuoksutukset ovat käytössä.

Kuvassa 5 on esitetty tulevaisuuden 1/100 vuodessa tulva lisäjuoksutuksilla 3 ja 4. Näissä molemmissa vaihtoehdoissa maksimilisäjuoksutuksena 1000 m³/s. Vaihtoehdossa 4 juoksutuksia kasvatetaan tasolle 800 m³/s 10 cm alemmalla vedenkorkeudella ja tasolle 900 m³/s ja 1000 m³/s 5 cm alempana kuin vaihtoehdossa 3. Näiden eri juoksutusstrategioiden välinen ero on suuren tulvan tapauksessa hyvin pieni, maksimivedenkorkeudessa eroa on vain 1,5 cm.

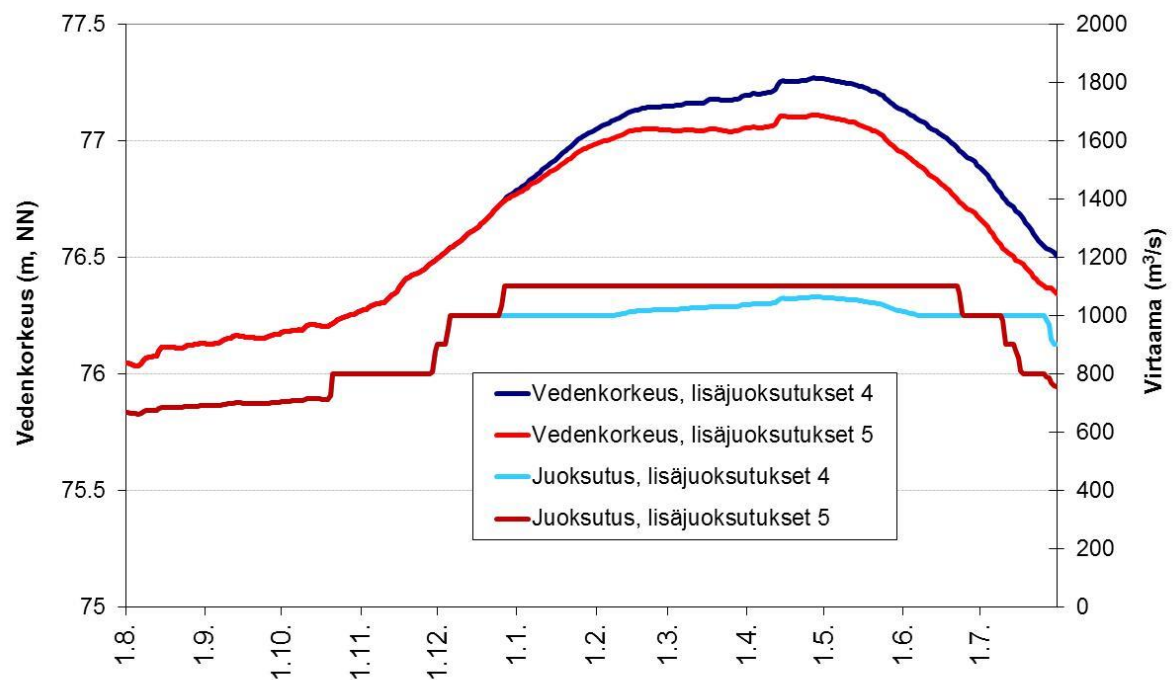
Jotta Saimaan vedenkorkeuden nousua saataisiin ilmastonmuutosjakson 1/100 tulvan aikana merkittävästi hillittyä, pitäisi lisäjuoksutuksen maksimia kasvattaa arvosta 1000 m³/s arvoon 1100 m³/s (Kuva 6). Jos tämä lisäjuoksutus aloitettaisiin vedenkorkeuden noustessa tasolle 76,75 (joulukuun lopussa) saataisiin tulvan aikaista maksimivedenkorkeutta alennettua 16 cm tasolle 77,11 m +NN. Juoksutuksen maksimi kasvaisi lisäjuoksutukseen 4 verrattuna arvosta 1064 m³/s arvoon 1100 m³/s eli vain 36 m³/s, mutta merkittävän vaikutuksen aikaansaamiseksi juoksutus jouduttaisiin pitämään tasolla 1100 m³/s hyvin pitkään (noin puolen vuoden tai ainakin 5 kuukauden ajan), mikä voi lisätä vahinkoja Vuoksen rannalla.



Kuva 4. Saimaan jakson 2020–49 kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan aikainen vedenkorkeus ja juoksutus lisäjuoksutuksella 4 ja luonnontilaisella purkautumisella.



Kuva 5. Saimaan jakson 2020–49 kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan aikainen vedenkorkeus ja juoksutus lisäjuoksutuksilla 3 ja 4.



Kuva 6. Saimaan jakson 2020–49 kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan aikainen vedenkorkeus ja juoksutus lisäjuoksutuksilla 4 (maks. 1000 m³/s) ja 5 (maks. 1100 m³/s).

Muutokset eri toistumisajan tulvissa

Kun tarkastellaan eri toistumisajan tulvien muuttumista (Taulukko 4), nähdään että pienemmän toistumisajan tulvat kasvavat senttimääräisesti vähemmän kun suuremmat tulvat. Tähän vaikuttaa osaltaan ilmastomuutosjakson suurin tulvatapahtuma, joka muodostuu hyvin suureksi ja kasvattaa siten erityisesti harvinaisten tulvien suuruutta jaksolla 2020–49.

Taulukko 4. Eri toistumisajan tulvien muuttuminen jaksolla 2020–49 keskiarvoskenaariolla lisäjuoksutuksilla 4.

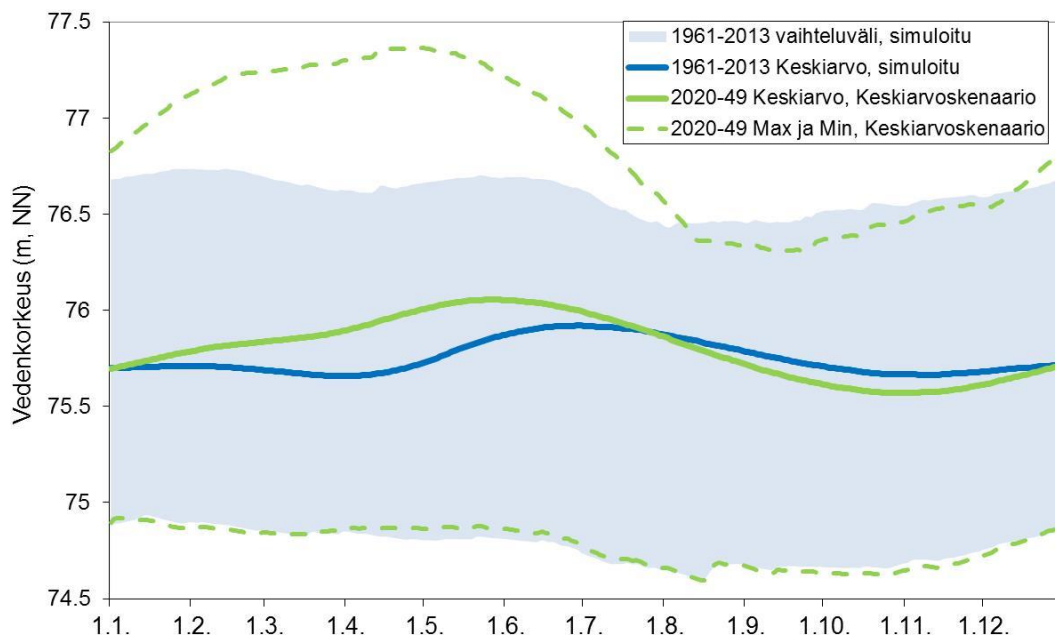
Toistumisaika (a)	Vedenkorkeus (m +NN)	Muutos referenssiin (cm)
2	76,10	+8 cm
5	76,40	+13 cm
10	76,60	+15 cm
20	76,79	+18 cm
50	77,03	+21 cm
250	77,46	+27 cm

Muutokset koko tarkastelujaksolla

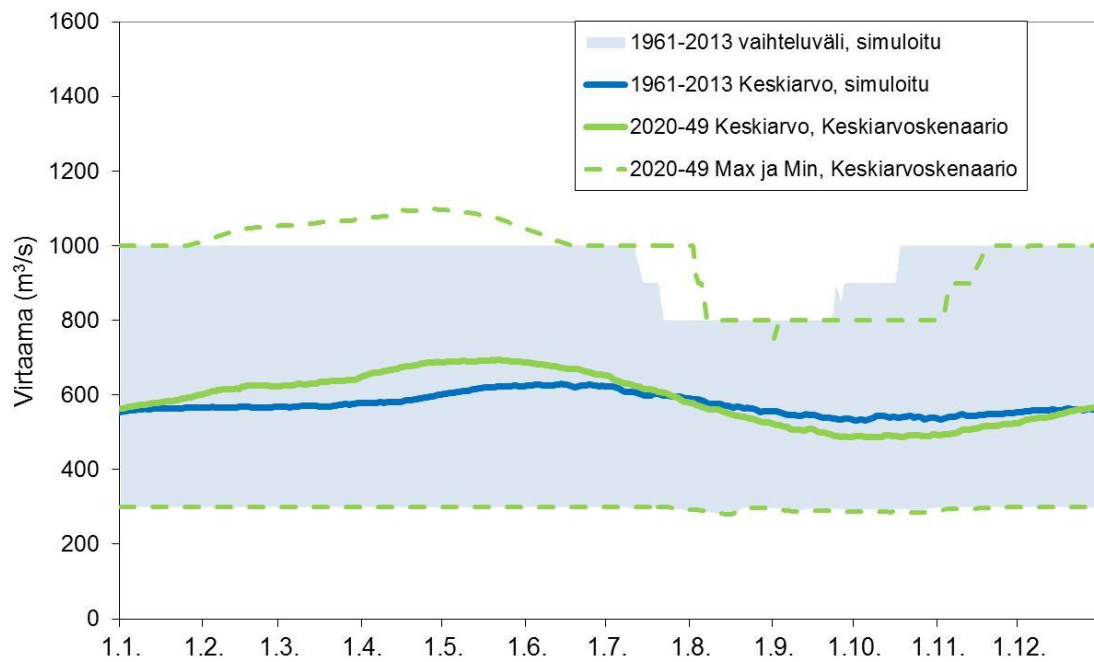
Keskivedenkorkeudessa suurin muutos jaksolla 2020–49 on loppupalven ja kevään (helmikesäkuu) vedenkorkeuksien nousu. Tämä aiheutuu entistä lauhemmista ja sateisemmista talvista ja aikaisemmasta kevästä. Syys-lokakuussa vedenkorkeus on keskimäärin hieman referenssijaksoa alempana.

Keskivirtaama kasvaa jaksolla 2020–49 keskiarvoskenaariolla 2,8 % simuloituun referenssijaksoon nähden (Taulukko 5). Myös ohijuoksutukset (virtaama yli 850 m³/s) kasvaa huomattavasti (93 %), mutta tästä huolimatta keskivirtaama ilman ohijuoksutuksia kasvaa myös selvästi, 2,3 % eli 13,1 m³/s.

Poikkeusjuoksutusten yleisyydessä tapahtuu myös muutoksia ilmastomuutoksen vaikutuksesta (Taulukko 6). Simuloituun referenssijaksoon nähden jaksolla 2020–49 suuret (800 m³/s tai yli) juoksutukset muuttuvat selvästi yleisemmäksi. Saimaan juoksutus poikkeaa luonnontilaisesta myös kuivuuden vuoksi ja myös pienet juoksutukset lisääntyvät ilmastomuutoksen vaikutuksesta (Taulukko 6). Poikkeusjuoksutukset siis yleistyvät selvästi ilmastomuutoksen vaikutuksesta sekä kuivuuden että tulvien vuoksi. Kun referenssijaksolla juoksutus on luonnontilainen (lisäjuoksutusten 4 tapauksessa, jossa juoksutus luonnontilainen +-40 cm nykyisin käytetystä päivittäisestä keskivedenkorkeudesta) 77,8 % ajasta, niin ilmastomuutosjaksolla tämä luku tippuisi arvoon 69,4 %:iin.



Kuva 7. Saimaan vedenkorkeuden keskiarvo, maksimi- ja minimi lisäjuoksutuksilla 4 referenssi- ja ilmastonmuutosjaksolla.



Kuva 8. Saimaan juoksutuksen keskiarvo, maksimi- ja minimi isäjuoksutuksilla 4 referenssi- ja ilmastonmuutosjaksolla.

Taulukko 5. Saimaan lähtövirtaaman keskiarvot simuloinneissa referenssijaksolla ja jaksolla 2020–49

	1961–2013 Simuloitu	2020–49 Simuloitu
Keskimääräinen virtaama (m³/s)	574	590
Muutos (%)		+ 2,8 %
Keskimääräinen virtaama ilman ohijuoksutuksia (>850 m³/s) (m³/s)	571	584
Muutos (%)		+2,3 %
Keskimääräiset ohijuoksutukset (m³/s)	2,8	5,5
Muutos (%)		+93 %

Taulukko 6. Saimaan poikkeusjuoksutusten yleisyys havainnoissa ja simuloinneissa referenssijaksolla ja jaksolla 2020–49

Juoksutus	Prosenttia ajasta 1961–2013 (Havaittu)	Prosenttia ajasta 1961–2013 (Simuloitu)	Prosenttia ajasta 2020–49
1000 m³/s tai yli	2,2	1,6	2,3
900 m³/s tai yli	4,3	2,2	4,4
850 m³/s tai yli	6,1	2,3	4,6
800 m³/s tai yli	12,8	10,9	16,2
350 m³/s tai alle	5,5	11,3	14,4
300 m³/s tai alle	3,1	4,2	5,8

Tarkastelujen epävarmuuksia

Ilmastomuutoksen vaikutusten ja suuren tulvan suuruuden arviointiin liittyy monia epävarmuuksia:

- Ilmastoskenaarioiden epävarmuudet. Eri ilmastoskenaariot antavat varsin suuren vaihteluvälin tuloksille.
- Ääri-ilmiöiden muuttumiseen liittyvät epävarmuudet. Rankkojen sateiden on ilmastomuutoksen vaikutuksesta arvioitu kasvavan keskimääräisiä sateita

enemmän. Tätä ei laskelmissa ole huomioitu, mutta Saimaan tapauksessa tällä ei ole merkittävää vaikutusta, koska tulva syntyy pitkän jakson aikana

- Mallin laskennan epävarmuudet. Mallin laskentaan liittyy epävarmuuksia mm. haihdunnan muuttuminen lämpötilan noustessa. Maahaihdunnan laskennassa on otettu huomioon vain lämpötilan ja sadannan muutokset sekä maankosteuden muutokset. Myös järvihaihdunta on laskettu olettaen että suhteellinen kosteus ja tuulen nopeus pysyvät samana. Myös muihin prosessimalleihin liittyy epävarmuuksia.
- Käytetyn referenssijakson ominaisuudet. Vuoden 1974–75 tulva muodostuu ilmastomuutostilanteessa poikkeuksellisen suureksi (toistuvuus yli 1/100 vuodessa), mikä voi vaikuttaa Gumbelin jakauman sovitukseseen. Tarkastelujakson toiseksi suurin tulva on huomattavasti tätä tulvaa pienempi.
- Yläpuolisten järvien säännöstely. Saimaan yläpuolisten järvien säännöstely on pyritty tekemään tulvatilanteeseen sopivalla tavalla, mutta on mahdollista että poikkeusjärjestelyin vettä pystyttäisiin pidättämään enemmän yläpuolisissa järvissä ja siten Saimaan tulvan aikaista vedenkorkeutta voitaisiin saada alennettua. Todennäköisesti vaikutus Saimaan vedenkorkeuteen olisi kuitenkin melko pieni.

Johtopäätökset

- Ilmastomuutos todennäköisesti kasvattaa tulvia Saimaalla ja Vuoksessa
- Tulvien ajankohta muuttuu entistä enemmän talvelle
- Lisäjuoksutusten vaikutusmahdollisuudet hyvin suuren tulvan tapauksessa ovat varsin rajallisia
- Ilmastomuutoksen myötä poikkeusjuoksutusten tarve kasvaa
 - Suurten juoksutusten (1000 m³/s ja 1100 m³/s) todennäköisyys kasvaa
 - Myös pienet juoksutukset (350 m³/s ja alle) yleistyvät