TURUN
YLIOPISTO
Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Yhdistelmätulvat Suomessa

Samanaikaisten merivedenkorkeus- ja virtaamahuippujen esiintyminen Suomen rannikon suistoalueilla

Sampo Viljanen

Maantiede
LuK-tutkielma
Laajuus: 6 op

18.5.2025
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

Pääaine: Maantiede
Tekijä: Sampo Viljanen
Otsikko: Yhdistelmätulvat Suomessa – samanaikaisten merivedenkorkeus- ja virtaamahuippujen esiintyminen Suomen rannikon suistoalueilla
Ohjaaja: Harri Tolvanen
Sivumäärä: 44 sivua
Päivämäärä: 18.5.2025

Yhdistelmätulva tarkoittaa tilannetta, jossa useampi erillinen tulvatekijä – kuten merenpinnan nousu, lumensulaminen tai rankkasade – esiintyy samanaikaisesti tai peräkkäin ja niiden yhteisvaikutus johtaa tulvaan. Tässä tutkielmassa tarkastellaan mahdollisten yhdistelmätulvien esiintymistä kolmella Suomen rannikon suistoalueella: Kokemäenjoella, Uskelanjoella ja Tornionjoella. Tavoitteena on selvittää, kuinka usein virtaamien ja merenpinnan korkeuksien huippuarvot esiintyvät samanaikaisesti, millaista vuodenaikaisvaihtelua ilmiössä on havaittavissa ja miten yhdistelmätulvariski saattaa muuttua ilmastonmuutoksen vaikutuksesta tulevaisuudessa.

Tutkimusaineistona käytettiin Ilmatieteen laitoksen keräämiä merenpinnan korkeushavaintoja sekä Suomen ympäristökeskuksen keräämiä virtaamahavaintoja 30 vuoden ajalta, vuosilta 1995–2024. Huippuarvot määritettiin 95. persentiilien perusteella ja yhdistelmätulvatapahtumat tunnistettiin tilanteina, joissa molemmat muuttujat ylittivät kynnysarvon samaan aikaan. Tapahtumien lukumäärät, keskimääräiset kestot ja toistuvuudet laskettiin, ja niiden ajallista jakautumista tarkasteltiin kuukausi- ja vuodenaikatasolla. Muuttujien riippuvuussuhteiden analysoimiseen käytettiin Pearsonin ja Kendallin korrelaatioanalyyseja.

Tulosten perusteella yhdistelmätulvat ovat selvästi yleisempiä Kokemäenjoen ja Uskelanjoen suistoalueilla kuin Tornionjoella. Kokemäenjoella havaittiin 34 ja Uskelanjoella 60 yhdistelmätulvatapahtumaa. Tornionjoella tapahtumia oli ainoastaan kaksi koko tarkastelujakson aikana. Tilastollisesti merkitsevää, heikkoa positiivista riippuvuutta virtaamien ja merenpinnan korkeuksien välillä havaittiin Kokemäenjoella ja Uskelanjoella. Tornionjoella riippuvuus ei ollut merkittävää. Yhdistelmätulvat painottuivat vahvasti talvikuukausille.

Tulokset viittaavat siihen, että yhdistelmätulvat ovat todellinen riski Etelä-Suomen rannikon suistoalueilla. Ilmastonmuutoksen seurauksena riski voi kasvaa entisestään, jos jokien virtaamahuiput ajoittuvat yhä useammin samaan aikaan korkean merenpinnan kanssa. Pohjois-Suomessa yhdistelmätulvariskin kehitys riippuu erityisesti siitä, siirtyvätkö kevättulvat aiempaan ajankohtaan ja osuvatko ne aikaan, jolloin merenpinta on useimmiten korkealla. Tutkimuksen tulokset korostavat tarvetta aluekohtaiselle yhdistelmätulvariskien arvioinnille sekä tulevaisuuteen suuntautuville mallinnuksille, joissa otetaan huomioon myös muuttuvat ilmasto-olosuhteet.

Tutkimuksen suurimmat epävarmuustekijät liittyvät merenpinnan korkeusaineiston käyttökelpoisuuteen, sillä aineisto perustui yksittäisiin vuorokauden mittaushetkiin vuorokausikeskiarvojen sijaan. Lisäksi tässä tutkimuksessa yhdistelmätulvat määritettiin puhtaasti tilastollisin kriteerein ilman tietoa todellisista tulvavahingoista. Näin ollen kaikki havaitut tapahtumat eivät välttämättä vastaa käytännössä todellisia tulvia.

Avainsanat: yhdistelmätulvat, tulvariski, ilmastonmuutos, rannikkomaantiede

Sisällysluettelo

1 Johdanto 5

2 Tutkimuksen tausta 7

2.1 Yhdistelmätulvat 7

2.1.1 Määritelmä ja ilmiö yleisesti 7

2.1.2 Yhdistelmätulvatutkimuksen menetelmät 9

2.2 Suistoalueiden tulvaherkkyyteen vaikuttavat tekijät Suomen rannikolla 11

2.2.1 Merelliset tekijät: Itämeren korkeusvaihtelut ja rannikkotulvat 11

2.2.2 Fluviaaliset tekijät: jokien vedenkorkeudet, virtaamat ja vesistötulvat 12

2.2.3 Pluviaaliset tekijät: rankkasateet ja sadeperäiset tulvat 13

2.2.4 Tulvatekijöiden yhteisesiintyminen 13

2.3 Tutkimusalueet 14

2.3.1 Kokemäenjoen suistoalue ja Pori 14

2.3.2 Uskelanjoen suistoalue ja Salon keskusta 15

2.3.3 Tornionjoen suistoalue ja Tornion kaupunki 17

3 Aineistot ja menetelmät 19

3.1 Aineistot 19

3.1.1 Virtaamahavainnot 19

3.1.2 Merenpinnan korkeushavainnot 20

3.2 Analyysimenetelmät 21

3.2.1 Huippuarvojen ja yhdistelmätulvatapahtumien määrittäminen 21

3.2.2 Samanaikaisten huippuarvojen tilastollinen tarkastelu 21

3.2.3 Riippuvuusanalyysi 22

4 Tulokset 23

4.1 Virtaamien ja merenpinnan korkeuksien tarkastelu erikseen 23

4.2 Huippuarvojen samanaikaisuus 24

4.3 Riippuvuusanalyysien tulokset 28

5 Keskustelu 30

5.1 Suomen rannikon yhdistelmätulvariskin arviointi 30

5.2 Tutkimuksen epävarmuustekijät 32

5.3 Jatkotutkimusmahdollisuudet 34

6 Johtopäätökset 36

Kiitokset **38**

Lähteet **39**

1 Johdanto

Tulvat ovat maailmanlaajuisesti yksi yleisimmistä ja merkittävimmistä luonnonriskeistä. Tulvat voivat vahingoittaa infrastruktuuria, haitata elinkeinoja ja aiheuttaa huomattavaa inhimillistä kärsimystä (Rentschler ym. 2022; Kirezci ym. 2023). On tärkeää ymmärtää tulvien syntymekanismit, jotta niihin osataan varautua ja niiden vaikutuksia lieventää. Tulvariskien hallinta edellyttää myös tulevaisuuden haasteiden, kuten ilmastonmuutoksen, huomioimista.

Perinteisesti tulvatutkimuksessa on keskitytty yksittäisiin tulvatekijöihin, kuten merenpinnan nousuun, sadantaan tai lumensulamiseen (Green ym. 2025). Viimeisen vuosikymmenen aikana ympäristöriskien tutkimuksessa on alettu kuitenkin kiinnittää yhä enemmän huomiota niin kutsuttuihin yhdistelmätapahtumiin (engl. *compound events*), joissa useat sää- ja ympäristötekijät vaikuttavat samanaikaisesti tai peräkkäin, aiheuttaen yhdessä suurempia vaikutuksia kuin yksittäiset tekijät erikseen (Leonard ym. 2014; Zscheischler ym. 2020; Villalobos-Herrera ym. 2021). Tämä viitekehys on läheisesti yhteydessä ilmastonmuutostutkimukseen, sillä ilmastonmuutoksen on arvioitu lisäävän tällaisten monimutkaisten tapahtumien todennäköisyyttä ja voimakkuutta tulevaisuudessa (Sebastian 2022). Eräs esimerkki tällaisista yhdistelmätapahtumista on yhdistelmätulvat. Yhdistelmätulvalla tarkoitetaan tilannetta, jossa useampi tulvatekijä – kuten lumensulaminen, meriveden nousu tai rankkasade – esiintyy samanaikaisesti tai peräkkäin ja niiden yhteisvaikutus aiheuttaa tulvan (Zscheischler ym. 2020). Yhdistelmätulvat voivat potentiaalisesti olla tavallisia tulvia huomattavasti voimakkaampia ja vaikeammin ennakoitavia, minkä vuoksi ne muodostavat merkittävän riskin yhteiskunnille (Sebastian 2022).

Kansainvälisesti yhdistelmätulvia on tutkittu jo paljon, mutta Suomessa aihetta on käsitelty toistaiseksi suhteellisen vähän. Tutkimukseni tavoitteena onkin kartoittaa yhdistelmätulvien mahdollista esiintymistä Suomen rannikolla. Tarkastelun kohteena on Kokemäenjoen, Uskelanjoen ja Tornionjoen suistoalueet. Arvioin yhdistelmätulvariskiä tarkastelemalla näillä alueilla jokivirtaamien ja merivedenkorkeuksien huippuarvojen samanaikaisuutta tilastollisin menetelmin. Tutkimuskysymykseni ovat seuraavat:

1. Kuinka usein virtaaman ja merivedenkorkeuden samanaikaiset huippuarvot esiintyvät tarkastelluilla suistoalueilla?

2. Onko mahdollisten samanaikaisten huippuarvojen esiintymisessä havaittavissa vuodenaikaisvaihtelua?

3. Miten Suomen rannikon yhdistelmätulvariski kehittyy tulevaisuudessa?

Tutkimukseni tarjoaa tärkeää uutta tietoa mahdollisten yhdistelmätulvien esiintyvyydestä Suomen oloissa ja luo perustaa jatkotutkimukselle. Tulokset auttavat hahmottamaan milloin ja missä yhdistelmätulvat ovat todennäköisimpiä, mikä voi tukea esimerkiksi tulvariskien hallintaa ja varautumista.

2 Tutkimuksen tausta

2.1 Yhdistelmätulvat

2.1.1 Määritelmä ja ilmiö yleisesti

Yhdistelmätulva tarkoittaa tilannetta, jossa useampi erillinen tulvatekijä esiintyy samanaikaisesti tai peräkkäin ja niiden yhteisvaikutus johtaa tulvaan (Zscheischler ym. 2020). Tulvatekijöitä ovat esimerkiksi voimakas sadanta, merenpinnan kohoaminen, vuorovesi ja lumensulaminen. Yhdistelmätulvan synnyttävät tulvatekijät voivat liittyä samaan sääilmiöön – kuten myrskyyn, joka aiheuttaa sekä rankkasateita että merenpinnan kohoamista – tai ne voivat olla toisistaan riippumattomia, kuten esimerkiksi samanaikaisen korkean vuoroveden ja rankkasateen aiheuttaman yhdistelmätulvan tapauksessa (Sebastian 2022). Ilmastonmuutoksen myötä sään ääri-ilmiöiden voimakkuuden ja toistuvuuden on ennustettu muuttuvan, mikä saattaa lisätä yhdistelmätulvienkin esiintymistä ja voimakkuutta tulevaisuudessa (Kirkpatrick & Olbert 2020; Zscheischler ym. 2020; Sebastian 2022). Tämän vuoksi ilmiön ymmärtäminen on yhä tärkeämpää tulvariskien hallinnan ja varautumisen kannalta (Kupfer ym. 2025).

Yhdistelmätulvat kuuluvat osaksi laajempaa yhdistelmätapahtumien (engl. *compound events*) viitekehystä, joka on herättänyt kasvavaa kiinnostusta ilmastonmuutoksen myötä yleistyvien sään ääri-ilmiöiden vuoksi (Zscheischler ym. 2020). Yleisesti yhdistelmätapahtuma tarkoittaa tilannetta, jossa kahden tai useamman tekijän välinen yhteisvaikutus johtaa yhteiskunnalliseen tai ympäristölliseen riskiin (Zscheischler ym. 2020). Yhdistelmätapahtumat jaotellaan neljään kategoriaan niiden syntymekanismien mukaan: aikaisempiin olosuhteisiin perustuviin yhdistelmätapahtumiin (engl. *preconditioned*), monimuuttujatapahtumiin (engl. *multivariate*), ajallisesti kasautuviin yhdistelmätapahtumiin (engl. *temporally compounding*) ja alueellisesti kasautuviin yhdistelmätapahtumiin (engl. *spatially compounding*) (Zscheischler ym. 2020).

Aikaisempiin olosuhteisiin perustuvat yhdistelmätapahtumat tarkoittavat tilanteita, joissa aiempi ympäristön olosuhde lisää alttiutta myöhemmin esiintyvälle ilmiölle ja voimistaa sen vaikutuksia: esimerkiksi pitkään kestänyt kuivuusjakso voi lisätä metsäpalon riskiä, kiihdyttää sen leviämistä ja pahentaa sen vaikutuksia (Ruffault ym. 2018). Monimuuttujatapahtumissa useat eri tekijät vaikuttavat samanaikaisesti ja voimistavat toistensa vaikutuksia: esimerkiksi samanaikaisen rankkasateen ja myrskyvuoksen nostattaman meriveden yhteisvaikutus voi johtaa yhdistelmätulvaan (Bevacqua ym., 2017). Ajallisesti kasautuvilla yhdistelmätapahtumilla viitataan tilanteisiin, joissa peräkkäiset sääilmiöt, kuten toistuvat helleaallot, esiintyvät lyhyin

väliajoin ja voimistavat toistensa vaikutuksia (Baldwin ym. 2019). Alueellisesti kasautuvissa yhdistelmätapahtumissa samanaikaiset ilmiöt eri alueilla aiheuttavat laajempia seurauksia: esimerkiksi viljasatojen samanaikaiset epäonnistumiset ympäri maailmaa voivat heikentää globaalia ruoantuotantoa (Anderson ym. 2019).

Yhdistelmätapahtumien viitekehys on luotu helpottamaan yhdistelmätapahtumien tutkimusta, mutta luokkarajat eivät ole tiukasti määriteltyjä ja yksittäinen tapahtuma voi kuulua useampaankin luokkaan (Zscheischler ym. 2020). Yhdistelmätulvat kuuluvat yleensä monimuuttujatapahtumiin tai aikaisempiin olosuhteisiin perustuviin tapahtumiin. Usein niillä on molempien luokkien piirteitä: esimerkiksi vuonna 2012 Alankomaissa samanaikainen rankkasade ja myrskyvuoksen nostattama merivesi aiheuttivat tulvauhan, jota pahensi se, että maaperä oli aikaisempien sateiden vaikutuksesta valmiiksi kyllästynyt vedestä (Van den Hurk ym. 2015). Tässä tutkielmassa keskityn yhdistelmätulviin kuitenkin ensisijaisesti monimuuttujatapahtumina, joissa kaksi muuttujaa, korkea virtaama ja korkea merenpinta, esiintyvät samaan aikaan.

Yhdistelmätulvat voivat olla huomattavasti voimakkaampia kuin vain yhdestä tulvatekijästä johtuvat tulvat (Gori ym. 2020). Esimerkiksi hurrikaani Harveyn yhteydessä koettiin tuhoisia yhdistelmätulvia Houstonin ja Galvestonin alueella Yhdysvaltojen Texasissa vuonna 2017 (Valle-Levinson 2020; Huang ym. 2021). Tulvat johtuivat usean tekijän samanaikaisesta yhteisvaikutuksesta: voimakkaiden ja pitkäkestoisten sateiden lisäksi Buffalo Bayou- ja San Jacinto-joet tulvivat, ja samaan aikaan merenpinta nousi myrskyvuoksen seurauksena. Huang ym. (2021) osoittivat, että näiden tekijöiden yhteisvaikutus ei ollut lineaarinen, vaan tekijät vahvistivat toistensa vaikutuksia monimutkaisilla tavoilla: esimerkiksi merenpinnan nousu hidasti joen veden purkautumista mereen, mikä pahensi veden kertymistä Galvestonin lahden alueelle. Tutkimuksessa todettiin, että jos jokainen tulvatekijä olisi mallinnettu erikseen ja sen jälkeen yksinkertaisesti summattu niiden vaikutukset, niin todellista vedenkorkeutta olisi aliarvioitu jopa 90 prosentilla (Huang ym. 2021).

Yhdistelmätulvien esiintyvyys, voimakkuus ja syntymekanismit vaihtelevat paljon eri puolilla maailmaa, mikä tekee aluekohtaisista tarkasteluista tärkeitä (Ward ym. 2018). Aiemmassa kirjallisuudessa on tunnistettu useita yhdistelmätulville alttiita alueita (Green ym. 2025). Esimerkiksi Etelä- ja Kaakkois-Aasiassa yhdistelmätulvat liittyvät tyypillisesti trooppisiin sykloneihin ja Yhdysvaltojen itä- ja etelärannikoilla keskeisin yhdistelmätulvia aiheuttava tekijä on hurrikaanit (Lai ym. 2021). Euroopan alueella yhdistelmätulvia esiintyy erityisesti talvikuukausina

matalapaineiden yhteydessä (Heinrich ym. 2023). Yhdistelmätulvien riskiarviointi edellyttääkin paikallisiin olosuhteisiin soveltuvia menetelmiä ja kattavaa aineistoa eri tulvatekijöistä.

Suomessa yhdistelmätulvat ovat olleet suhteellisen vähän tutkittu ilmiö, mutta esimerkiksi Rantanen ym. (2021) ovat tutkineet rankkasateiden ja korkean merenpinnan samanaikaista esiintymistä Suomen rannikolla 60 vuoden aikasarja-aineistoilla. Heidän tuloksensa osoittivat, että sadannan ja merenpinnan korkeuden samanaikaiset huippuarvot ovat yleisimpiä syksyllä ja talvella. Heidän mukaansa yhdistelmätulvien taustalla vaikuttavat eniten voimakkaat matalapaineet, jotka tuovat mukanaan sateita ja nostavat merenpintaa. Pohjanlahden alueella havaittiin tilastollisesti merkittävä trendi tapahtumien yleistymisessä. Vaikka Suomea koskevaa tutkimustietoa onkin saatavilla rajallisesti, yhdistelmätulvariski on kuitenkin mainittu joidenkin merkittäviksi tulvariskialueiksi nimettyjen alueiden, kuten Kokemäenjoen vesistöalueen, tulvariskien hallintasuunnitelmissa (Kokemäenjoen vesistöalueen… 2022).

2.1.2 Yhdistelmätulvatutkimuksen menetelmät

Yhdistelmätulvatutkimuksessa on hyödynnetty laajasti sekä fysikaalisen mallinnuksen että tilastollisen analyysin menetelmiä (Green ym. 2025). Yhdistelmätulvien fysikaalinen mallinnus yhdistelee usein hydrologisia, hydrodynaamisia sekä ilmakehämalleja, joiden avulla pyritään simuloimaan eri tulvatekijöiden vaikutuksia. Näiden menetelmien avulla voidaan arvioida esimerkiksi yhdistelmätulvien syntytapaa, laajuutta ja vaikutuksia tietyllä alueella.

Tilastolliset menetelmät muodostavat toisen keskeisen suunnan yhdistelmätulvien tutkimuksessa (Green ym. 2025). Keskityn tässä tutkimuksessa pääasiassa niihin. Tilastollisiin menetelmiin sisältyvät esimerkiksi ääriarvoanalyysit, regressiomallit, pääkomponenttianalyysit, Bayesilaiset menetelmät ja koneoppiminen. Tutkimuksissa hyödynnetään historiallisten havaintojen lisäksi usein myös mallinnettua dataa.

Yleensä ensimmäinen vaihe yhdistelmätulvien tutkimusta tilastollisin menetelmin on eri tulvatekijöiden huippuarvojen määrittely (Green ym 2025). Tyypillisimmin käytettyjä menetelmiä tähän ovat kynnysarvon ylitykseen perustuvat menetelmät, eli POT-menetelmät (engl. *peaks over threshold*) sekä blokkimaksimimenetelmät (engl. *block maxima*). POT-menetelmässä huippuarvoiksi määritellään kaikki ne aineiston havainnot, jotka ylittävät ennalta määritellyn kynnysarvon. Tyypillisiä kynnysarvoja ovat esimerkiksi 95.–99. persentiilit. Blokkimaksimimenetelmässä taas aineisto jaetaan yhtä pitkiin aikajaksoihin – kuten vuosiin, kuukausiin tai

viikkoihin – ja kunkin jakson suurin havainto määritetään huippuarvoksi. Blokkimaksimimenetelmän ongelmana on se, että se voi jättää huomioimatta muita korkeita arvoja, jotka eivät ole esimerkiksi kuukausittaisia tai vuosittaisia maksimiarvoja (Coles 2001: 74). POT-menetelmän etuna onkin se, että se mahdollistaa useamman huippuarvon tarkastelun ja antaa kattavamman kuvan huippuarvojen esiintymisestä. Menetelmän haasteena on kuitenkin sopivan kynnysarvon valinta: liian matala raja voi johtaa turhan moniin huippuarvoihin ja lisätä kohinaa, kun taas liian korkea raja saattaa jättää olennaisia tapahtumia huomiotta (Coles 2001: 78).

Monet tutkimukset ovat osoittaneet, että eri tulvatekijöiden välisen riippumattomuuden olettaminen voi johtaa yhdistelmätulvariskin aliarviointiin (Moftakhari ym. 2017; Ward ym. 2018). Keskeinen lähestymistapa yhdistelmätulvatutkimuksissa onkin ollut eri tulvatekijöiden välisten tilastollisten riippuvuussuhteiden tarkastelu. Tilastollinen riippuvuus voi paljastaa, missä määrin tulvatekijät esiintyvät samanaikaisesti ja kuinka todennäköistä niiden yhteisesiintyminen on verrattuna siihen, että ne ovat riippumattomia toisistaan (Green ym. 2025). Useimmiten tutkimuksissa on tarkasteltu kahta muuttujaa, jotka yleensä ovat merenpinnan korkeus ja sadanta tai merenpinnan korkeus ja virtaama (Green ym. 2025). Myös useamman kuin kahden muuttujan riippuvuusanalyysejä on tehty, kuten esimerkiksi Camus ym. (2021).

Muuttujien välisten riippuvuuksien tarkasteluun on käytössä useita menetelmiä. Usein käytetään järjestyskorrelaatiokertoimia, kuten Kendallin tau ja Spearmanin rho, joiden etu esimerkiksi Pearsonin korrelaatiokertoimeen on se, että niillä pystytään mittaamaan epälineaarista riippuvuutta (Green ym. 2025). Kendallin järjestyskorrelaatiokerrointa (Kendall 1938) ovat käyttäneet yhdistelmätulvatutkimuksessa esimerkiksi Ward ym. (2018), Hendry ym. (2019), Stephens & Wu (2022) sekä Camus ym. (2021). Toinen paljon käytetty menetelmä tulvatekijöiden välisten riippuvuuksien analyysissä ovat Kopula-mallit (Green ym. 2025). Kopula-mallien avulla voidaan analysoida monimutkaisempia yhteisriippuvuuksia ja arvioida samanaikaisten ääritapahtumien esiintymistodennäköisyyksiä, mutta niiden käyttö vaatii laajempaa tilastollista ja matemaattista osaamista (Phillips ym. 2022). Pitäydynkin tässä tutkielmassa yksinkertaisemmissa tilastollisissa menetelmissä.

2.2 Suistoalueiden tulvaherkkyyteen vaikuttavat tekijät Suomen rannikolla

2.2.1 Merelliset tekijät: Itämeren korkeusvaihtelut ja rannikkotulvat

Itämeri on matala murtovesiallas, joka on yhteydessä Atlantin valtamereen Tanskan salmien kautta (Leppäranta & Myberg 2009). Itämeren korkeusvaihteluihin vaikuttavat useat, eri aikaskaaloissa ilmenevät tekijät (Weisse ym. 2021). Lyhytkestoisiin korkeusvaihteluihin vaikuttavat pääasiassa tuuliolosuhteet, ilmanpaine, veden virtaus Tanskan salmien läpi, sekä seiche-aallot, eli seisovat aallot (Pellikka ym. 2018). Myös vuorovesi-ilmiöllä on vähäinen, mutta mitattavissa oleva vaikutus Itämerellä, joka voidaan havaita paikoin myös Suomen rannikolla (Medvedev ym. 2013). Talvikuukausina mahdollinen merijää vaikuttaa myös merenpinnan korkeusvaihteluihin (Weisse ym. 2021). Edellä mainittujen tekijöiden vaikutukset kestävät yleensä vain muutamista sekunneista kuukausiin. Pidemmän aikavälin korkeusvaihteluita Itämeressä aiheuttavat kokonaisvesimäärän muutokset, maankohoamisilmiö, sekä ilmastonmuutoksesta aiheutuva globaali merenpinnan nousu, jotka vaikuttavat vuosikymmenien ja -satojen aikaskaaloissa (Weisse ym. 2021; Pellikka ym. 2023).

Ilmanpaine ja tuuli ovat merkittävimmät yksittäiset tekijät merenpinnan lyhytaikaisiin korkeusvaihteluihin Itämerellä (Weisse ym. 2021). Yleinen nyrkkisääntö on, että yhden hehtopascalin paine-ero vastaa noin yhden senttimetrin muutosta merenpinnan korkeudessa, vaikkakin suhde voi vaihdella hieman alueellisesti (Iz 2018). Myrskyvuoksi tarkoittaa matalapaineen aiheuttamaa merenpinnan nopeaa paikallista nousemista (Holden 2017: 597). Itämerellä myrskyvuokset kestävät tyypillisesti muutamista tunneista vuorokausiin ja ne esiintyvät yleisimmin syksyllä ja talvella, jolloin havaitaan myös vuoden suurimmat merenpinnan korkeudet (Wolski & Wiśniewski 2023). Talvisin mahdollinen merijää vaimentaa myrskyvuoksien vaikutuksia merkittävästi (Weisse ym. 2021). Itämeren alueella Pohjanlahden ja Suomenlahden rannikoiden on todettu olevan erityisen alttiita myrskyvuoksille, missä ne toistuvat usein ja kestävät pitkään (Wolski & Wiśniewski 2020).

Meriveden aiheuttamat rannikkotulvat tapahtuvat tyypillisimmin, kun useampi merenpintaa nostattava tekijä esiintyy samanaikaisesti (Pellikka ym. 2018). Esimerkiksi vuoden 2005 ennätykselliset vedenkorkeudet Suomenlahdella syntyivät samanaikaisen matalapaineen aiheuttaman myrskyvuoksen, seiche-aallon ja poikkeuksellisen suuren kokonaisvesimäärän yhteisvaikutuksesta. Pellikka ym. (2018) ovat arvioineet, että rannikkotulvariski kasvaa Suomessa 2100-luvulle tultaessa erityisesti Suomenlahden ja Selkämeren rannikkoalueilla. Perämeren rannikkoalueella, jossa maankohoamisilmiö on vielä voimakas, rannikkotulvariskin on arvioitu ensin

pienenevän 2050-luvulle asti, mutta jälleen kasvavan 2100-luvulle tultaessa. Tulevaisuuden rannikkotulvariskin kehitykseen vaikuttaakin suuresti ilmastonmuutoksen hillinnässä onnistuminen. Pahimmassa päästöskenaariossa merenpinnan nousun on arvioitu olevan maankohoamisen vaikutusta suurempaa kaikkialla Suomen rannikolla (Pellikka ym. 2018).

2.2.2 Fluviaaliset tekijät: jokien vedenkorkeudet, virtaamat ja vesistötulvat

Suomessa jokien vedenkorkeuksien ja virtaamien vuodenaikaisvaihteluissa on yleensä havaittavissa kaksi korkeaa ja kaksi matalaa jaksoa vuoden aikana (Korhonen 2007). Talvella vedenpinnat laskevat, koska maa on jäässä ja suurin osa sateesta kertyy lumipeitteeseen sen sijaan, että valuisi vesistöihin. Haihtuminen on myös hyvin vähäistä talvikuukausina. Tavallisesti virtaamat ja vedenkorkeudet ovat matalimmillaan lopputalvella, juuri ennen kevään lumensulamista. Joinakin vuosina lauha sää voi kuitenkin käynnistää lumensulamisen jo aikaisemmin talvella, mikä voi nostaa vedenpinnan korkeuksia ja virtaamia tavallista aikaisemmin. Keväällä lumensulaminen kasvattaa virtaamia nopeasti, kun talven aikana lumeen kertynyt vesi purkautuu vesistöihin lyhyessä ajassa. Tämä sulamisvesistä johtuva kevättulva on usein vuoden suurin vedenkorkeuden nousu. Kevättulvan jälkeen vedenkorkeus alkaa vähitellen laskea haihdunnan lisääntyessä kesää kohti. Tämä johtaa niin sanottuun kesäminimiin. Syksyllä haihtuminen vähenee lämpötilojen laskiessa ja ilmankosteuden kasvaessa. Sateiden myötä vedenkorkeus nousee, ja myöhäissyksyllä saavutetaan tyypillisesti toinen, yleensä kevättä matalampi tulvahuippu. Talven lähestyessä vedenkorkeus alkaa jälleen laskea, kun sateet varastoituvat lumena maastoon.

Ilmastonmuutoksen on arvioitu muuttavan merkittävästi jokien virtaamien vuodenaikaisvaihtelua (Irannezhad ym. 2022; Lintunen ym. 2024). Suomessa tapahtuneita muutoksia jokien tulvahuippujen ajoittumisessa ovat tarkastelleet muun muassa Lintunen ym. (2024). He havaitsivat, että kevään virtaamapiikit ovat aikaistuneet keskimäärin 6–68 päivällä ja syksyn virtaamapiikit myöhästyneet keskimäärin 30–60 päivällä. Lumipeitteen väheneminen on heikentänyt lumensulamisesta johtuvien kevättulvien voimakkuutta, kun taas lisääntyneet syyssateet ovat kasvattaneet syksyn tulvien voimakkuutta. Suurinta muutos on ollut Etelä- ja Keski-Suomessa. Pohjois-Suomessa muutos on ollut vähäisempää, sillä luminen talvi on säilynyt siellä pidempään (Lintunen ym. 2024).

2.2.3 Pluviaaliset tekijät: rankkasateet ja sadeperäiset tulvat

Pluviaaliset eli sadeperäiset tulvat syntyvät, kun rankkasateet aiheuttavat paikallista pintavaluntaa nopeammin kuin maaperä tai viemärijärjestelmät pystyvät vettä vastaanottamaan (Holden 2017: 489). Myös pitkään kestänyt kohtalainenkin sade voi aiheuttaa tulvimista, jos maaperä on valmiiksi kylläinen vedestä. Erityisesti kaupunkialueilla sadevesien aiheuttamat hulevesitulvat ovat merkittävä riski, sillä rakennettu ympäristö koostuu suurelta osin vettä läpäisemättömistä pinnoista, kuten asfaltista ja betonista (Valtanen ym. 2014).

Suomessa vuotuinen sadanta on keskimäärin noin 600–700 millimetriä (Ilmatieteen laitos s.a.). Sadannasta noin puolet kulkeutuu jokiin ja muodostuu virtaamiksi (Korhonen 2007). Toinen puoli sadannasta muodostuu haihdunnaksi. Ilmastonmuutoksen on ennustettu lisäävän rankkasateiden esiintymistiheyttä ja voimakkuutta pohjoisilla leveysasteilla, joka saattaa lisätä sadeperäisten tulvien esiintymistä Suomessa tulevaisuudessa (Gregow ym. 2021).

Tässä tutkimuksessa en tarkastele sadantaa kuitenkaan erillisenä muuttujana, sillä jokivirtaama toimii jo epäsuorana indikaattorina valuma-alueen sadannan vaikutuksesta. Rankkasateiden vaikutus näkyy suoraan joen virtaaman nousuna, jolloin virtaamatietoihin perustuva tarkastelu kattaa myös merkittävimmät pluviaaliset vaikutukset yhdistelmätulvariskin kannalta (Bevacqua ym. 2020).

2.2.4 Tulvatekijöiden yhteisesiintyminen

Suistoalueilla, joissa tulvariskiin vaikuttavat niin merelliset, fluviaaliset kuin pluviaaliset tulvatekijät, on keskeistä tarkastella, miten nämä tekijät esiintyvät yhdessä ja miten ne vaikuttavat toisiinsa (Ward ym. 2018; Kupfer ym. 2025). Itämerellä liikkuviin matalapaineisiin liittyvät myrskyt voivat samanaikaisesti aiheuttaa merenpinnan kohoamista, lisätä sademääriä ja nostaa jokien vedenkorkeuksia (Rantanen ym. 2021; Heinrich ym. 2023). Tämä voi johtaa tilanteisiin, joissa suistoalueilla esiintyy samanaikaisesti sekä vesistötulva että merivesitulva – ja mahdollisesti myös rankkasateiden aiheuttama hulevesitulva. Yksittäisten tulvatekijöiden ei ole välttämätöntä olla äärimmäisiä, jotta niiden yhteisvaikutus voi johtaa vakavaan yhdistelmätulvaan (Leonard ym. 2014).

Suistoalueilla korkea merenpinnan taso usein hidastaa joessa virtaavan veden purkautumista mereen, mikä voi johtaa veden kasautumiseen ja tulvimiseen suistoalueella (Feng ym. 2022). Tämä patovaikutus (engl. *backwater effect*) voi merkittävästi pahentaa tulvatilannetta erityisesti

silloin, kun virtaama on muutenkin suurta esimerkiksi rankkasateiden tai lumensulamisen vuoksi.

Yhteisvaikutuksia voi syntyä myös tilanteissa, joissa maaperä on valmiiksi kyllästynyt vedestä aikaisemman sadejakson seurauksena. Tällöin seuraava sade voi aiheuttaa tulvimista, kun vesi ei enää pääse imeytymään maaperään (Zscheischler ym. 2020). Myös lumensulamisesta johtuvan kevättulvan kanssa samaan aikaan tapahtuva rankkasade voi kasvattaa virtaamia ja vedenkorkeuksia nopeasti.

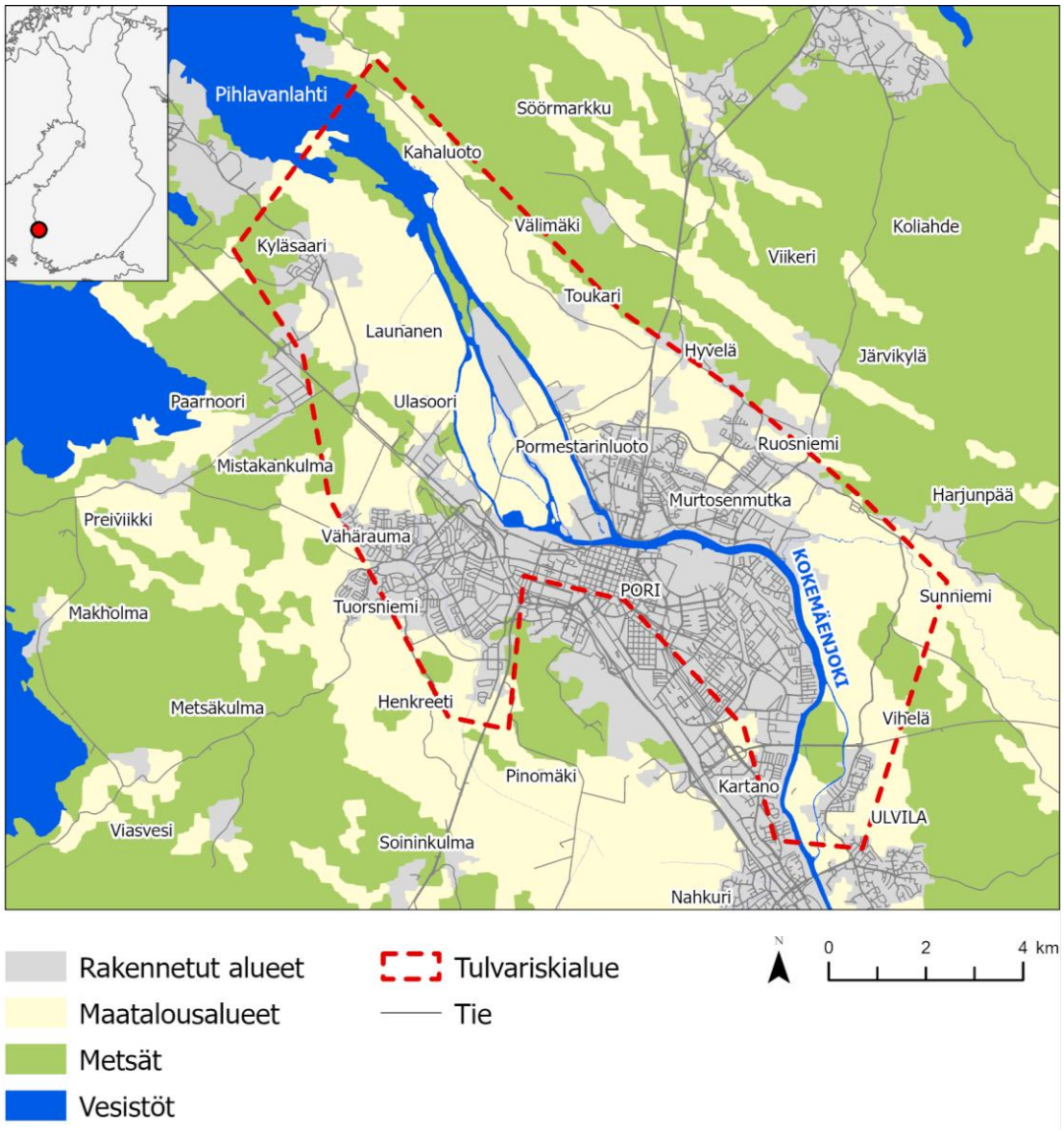
2.3 Tutkimusalueet

2.3.1 Kokemäenjoen suistoalue ja Pori

Kokemäenjoki on Lounais-Suomessa sijaitseva keskisuuri joki, joka laskee Selkämereen Porin kohdalla muodostaen laajan suistoalueen, Pihlavanlahden (Aulio 2015). Joki on noin 121 kilometriä pitkä, ja sen valuma-alue kattaa noin 27 000 km², ulottuen Satakunnan, Pirkanmaan ja Hämeen maakuntiin. Kokemäenjoen vesistöalue on runsasjärvinen: noin 11 % sen pinta-alasta on järviä. Keskivirtaama on Harjavallan kohdalla noin 241 m³/s (Kokemäenjoen vesistöalueen… 2022).

Kokemäenjoen vesistöalue on arvioitu Suomen merkittävimmäksi tulvariskialueeksi, ja alueella sijaitsee kaksi valtakunnallisesti nimettyä merkittävää tulvariskialuetta: Pori (kuva 1) ja Huittinen (Suomen merkittävät tulvariskialueet… 2024). Porissa tulvat liittyvät pääasiassa talviaikaisiin hyyde- ja jääpatoihin (Kokemäenjoen vesistöalueen… 2022). Kokemäenjoen vesistöalueen vuosien 2022–2027 tulvariskien hallintasuunnitelmassa (2022) on tunnistettu myös useiden tekijöiden yhteisvaikutuksista syntyvät yhdistelmätulvat mahdollisina suurtulvan aiheuttajina.

Tulvariskien hallintaan on panostettu merkittävästi Porissa, jossa tulvasuojelua on toteutettu muun muassa pengertämällä, rakentamalla tulvapatoja, ruoppaamalla sekä kehittämällä padotus- ja juoksutuskäytäntöjä. Lisäksi suunnitteilla on uusia toimenpiteitä, kuten Säpilän oikaisuuoma Huittisten kohdalla, joka alentaisi tulvien korkeuksia suurella alueella (Kokemäenjoen vesistöalueen… 2022).



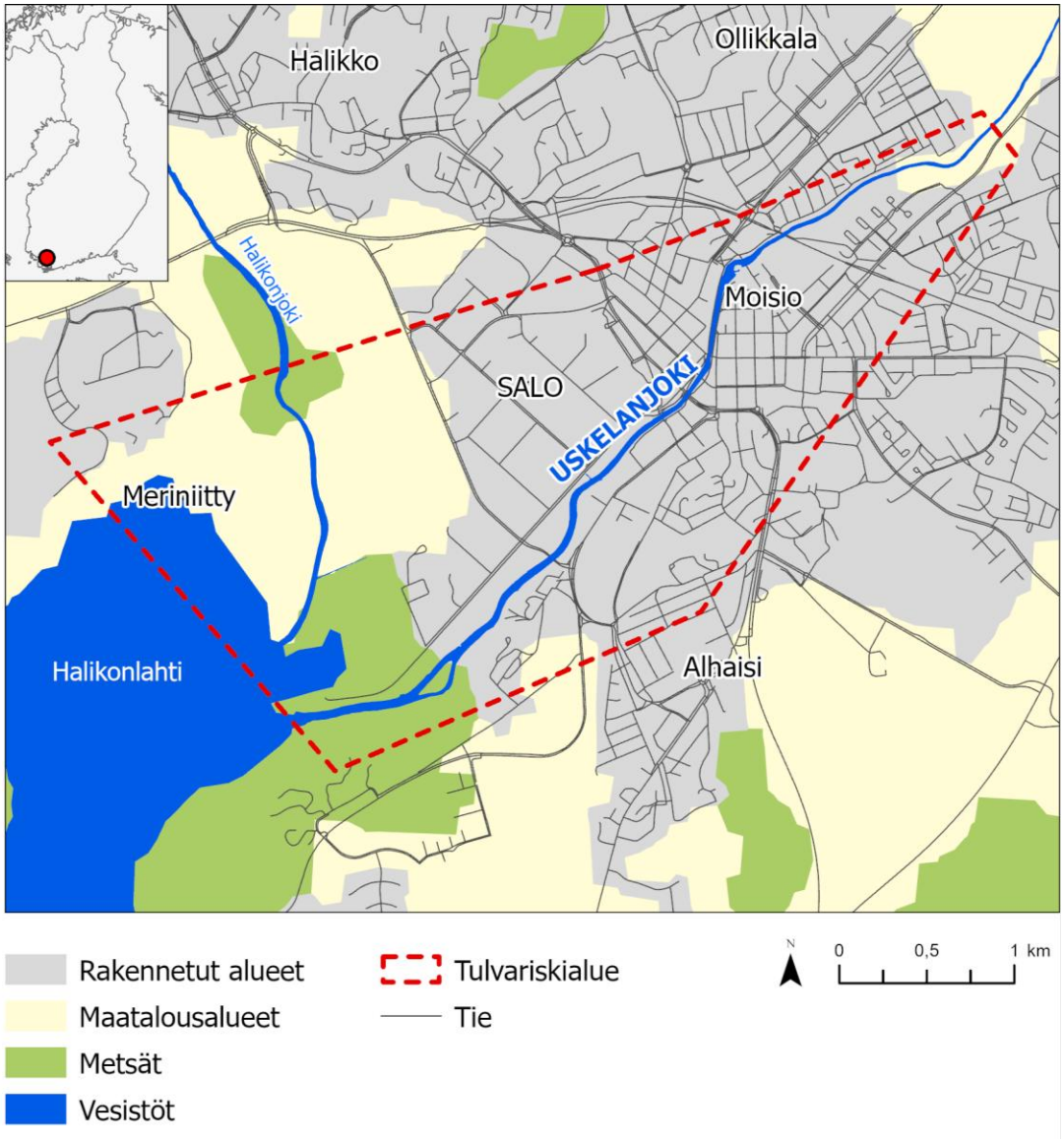
Kuva 1. Kokemäenjoki sekä Porin tulvariskialue (SYKE 2018; SYKE 2024b)

2.3.2 Uskelanjoen suistoalue ja Salon keskusta

Uskelanjoki on noin 30 km pitkä joki, jonka valuma-alue ulottuu Salon kaupungin ja Someron kunnan alueelle (Uskelanjoen vesistöalueen… 2015). Valuma-alueen pinta-ala on 566 km^2 ja se on hyvin vähäjärvinen: järvien osuus on vain noin 0,6 % alueen pinta-alasta. Alueella vuotuinen sadanta on keskimäärin 621 mm ja se on vaihdellut 455–755 mm välillä. Uskelanjoki saa alkunsa siihen laskevista Rekijoesta, Terttilänjoesta, Hitolanjoesta ja Kurajoesta. Joki virtaa Salon kaupungin läpi rakennetussa uomassa ja se laskee Halikonlahteen Saaristomerellä. Uskelanjoen keskivirtaama noin 5,4 m3/s Kaukolankoskelta mitattuna. Joelle tunnusomaisia ovat suuret ja nopeat virtaamavaihtelut ja tulvahuiput kestävät tyypillisesti vain alle vuorokauden

(Tulvariskien alustava arviointi… 2024). Tämä johtuu valuma-alueen suhteellisen suuresta kaltevuudesta, peltojen suuresta määrästä sekä vähäjärvisyydestä.

Salon keskusta (kuva 2) oli vuoteen 2018 asti nimetty merkittäväksi tulvariskialueeksi (MMM… 2018). Uskelanjoelle rakennettiin vuosina 2018–2019 jäänpidätysrakenteita, joiden tarkoituksena oli estää jäänlähdön aikaisten jääpatojen muodostuminen Salon keskustan alueelle. Toimenpiteen myötä jääpatoriskin todettiin pienentyneen niin, ettei Salon keskustaa ole enää nimetty merkittäväksi tulvariskialueeksi vuoden 2018 jälkeen. Nykyään Salon keskusta on määritelty kuitenkin muuksi tulvariskialueeksi, sillä alue on yhä altis merivesitulville (Tulvariskien alustava arviointi… 2024). Myös mahdollisten jääpatojen ja merivesitulvan aiheuttamien yhdistelmätulvien muodostama riski on mainittu tulvariskien alustavassa arvioinnissa.

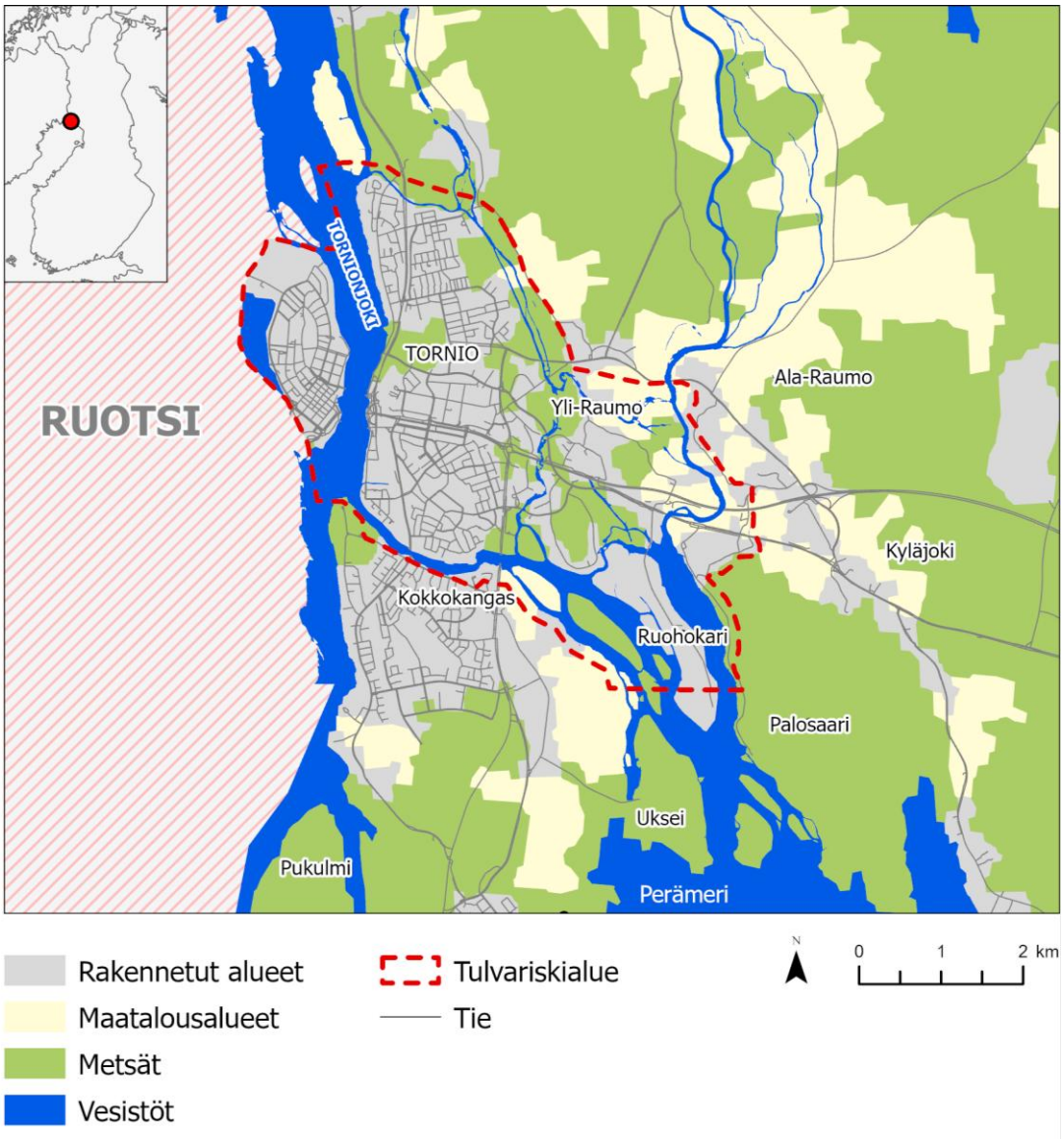


Kuva 2. Uskelanjoki sekä Salon keskustan tulvariskialue (SYKE 2018; SYKE 2024b)

2.3.3 Tornionjoen suistoalue ja Tornion kaupunki

Tornionjoki saa alkunsa Torniojärvestä Pohjois-Ruotsissa ja se yhdistyy Muonionjokeen Pajalan taajaman läheisyydessä (Karjalainen & Kurkela 2022). Tästä yhtymäkohdasta eteenpäin joki kulkee Suomen ja Ruotsin välisenä rajajokena ja laskee Perämereen Tornion kaupungin kohdalla. Tornionjoen pituus Muonionjoen yhtymäkohdasta merelle on noin 180 kilometriä. Joen keskivirtaama on Karungin mittauspisteeltä pitkän aikavälin (1912–2019) keskiarvona mitattuna ollut noin 391 m^3/s. Virtaama vaihtelee kuitenkin paljon vuosittain, sillä vesistöalue on laaja. Vuotuinen sadanta alueella on noin 500–550 mm. Vesistöalueen pohjoisen sijainnin vuoksi alueella on usein pitkälle kevääseen kestävä lumipeite ja lumensulamisen alkaminen ajoittuu yleensä huhtikuun lopusta toukokuun puoleen väliin.

Tornionjoen vesistöalueella merkittäväksi tulvariskialueeksi on nimetty Tornion kaupunki (kuva 3), joka sijaitsee Tornionjoen suistoalueella (Suomen merkittävät tulvariskialueet… 2024). Tulvariskit johtuvat pääosin jääpadoista ja keväisestä lumen sulamisesta, mutta myös merivesitulvat ovat mahdollisia jokisuun alueella. Tulvariskien hallintasuunnitelmassa (Karjalainen & Kurkela 2022) ei kuitenkaan ole arvioitu yhdistelmätulvien todennäköisyyttä. Tulvasuojelua on toteutettu esimerkiksi rakentamalla Suensaaren alueelle tulvapenkereitä sekä ruoppaamalla.



Kuva 3. Tornionjoki sekä Tornion kaupungin tulvariskialue (SYKE 2018; SYKE 2024b)

3 Aineistot ja menetelmät

3.1 Aineistot

3.1.1 Virtaamahavainnot

Käytän tässä tutkimuksessa Suomen ympäristökeskuksen keräämiä virtaamahavaintoja Kokemäenjoelta (Harjavallan mittauspiste), Uskelanjoelta (Kaukolankosken mittauspiste) ja Tornionjoelta (Karungin mittauspiste). Virtaamat on määritetty laskennallisesti vedenkorkeushavaintojen ja purkautumiskäyrien perusteella (SYKE 2024a). Aineisto koostuu päivittäisistä virtaamahavainnoista 30 vuoden ajalta vuosilta 1995–2024. Virtaamat on ilmoitettu kuutiometreinä sekunnissa (m^3/s).

Aineisto on varsin kattava ja puuttuvien havaintojen osuus jää jokaisella mittausasemalla alle kahden prosentin (taulukko 1). Eniten puuttuvia havaintoja on Uskelanjoelta, yhteensä 203. Suurin keskimääräinen virtaama on Tornionjoessa, jossa 30 vuoden keskiarvo on 442,4 m^3/s. Kokemäenjoen keskimääräinen virtaama on 219,6 m^3/s. Uskelanjoki erottuu edellisistä selvästi pienemmällä keskivirtaamallaan, joka on vain 4,9 m^3/s.

Virtaamien vaihteluissa on suuria eroja jokien välillä. Suurin absoluuttinen vaihtelu on Tornionjoella, 3559 m^3/s. Kokemäenjoessa vaihteluväli on 725 m^3/s ja Uskelanjoessa vaihteluväli on 105 m^3/s. Suhteellista vaihtelua kuvaava variaatiokerroin osoittaa kuitenkin kiinnostavan eron: Uskelanjoen virtaama vaihtelee selvästi eniten suhteessa sen keskivirtaamaan. Sen variaatiokerroin on 1,8. Tornionjoella variaatiokerroin on 1,1 ja Kokemäenjoella 0,6.

Taulukko 1. Vuosien 1995–2024 virtaamahavaintojen tunnuslukuja. Virtaamat on ilmoitettu kuutiometreinä sekunnissa (m/s^2) (SYKE 2024a).

	Kokemäenjoki (Harjavalta)	**Uskelanjoki (Kaukolankoski)**	**Tornionjoki (Karunki)**
N	10956	10755	10937
Puuttuvia	2	203	21
Keskiarvo	219,6	4,9	442,4
Keskihajonta	131,9	8,6	478,3
Min	30,2	0,1	57,9
Max	755,3	105,0	3617,0
Vaihteluväli	725,1	105,0	3559,1
Variaatiokerroin	0,6	1,8	1,1
Persentiilit			
25	112,7	0,6	140,0
75	305,3	4,5	535,0

3.1.2 Merenpinnan korkeushavainnot

Virtaamamittausten lisäksi käytän tässä tutkimuksessa Ilmatieteen laitoksen keräämiä päivittäisiä merenpinnan korkeushavaintoja Turun Ruissalon-, Porin Mäntyluodon-, sekä Kemin Ajoksen mareografeilta. Merenpinnan korkeushavainnot on ladattu samalta aikaväliltä kuin virtaamatkin, eli 30 vuoden ajalta vuosilta 1995–2024. Havainnot on ladattu Ilmatieteen laitoksen avoimen datan latauspalvelusta. Korkeushavainnot on ilmoitettu N2000-järjestelmässä, jonka lähtötasona on Amsterdamin nollapiste. Korkeudet on ilmoitettu millimetreissä. Ilmatieteen laitoksen mukaan mittaustarkkuus on alle 1 cm mitatuille- sekä alle 10 cm lasketuille korkeusarvoille. Aineisto on varsin kattava ja puuttuvia havaintoja esiintyy ainoastaan Turun mareografilta kolmen päivän ajalta.

Ilmatieteen laitoksen latauspalvelussa ei ollut suoraa mahdollisuutta ladata päivittäisiä keskiarvoja, joten jokaiselle päivälle on haettu vuorokauden ensimmäisen mittauksen arvo (klo 0.00 mitattu arvo). Tämä on rajoite, sillä Itämerellä korkeusvaihtelut ovat melko nopeita (Weisse ym. 2021). Hetkellisen mittauksen laatu pitäisi kuitenkin olla periaatteessa tarkka, sillä mareografirakennuksen mereen yhdistävä vaimennusputki suojaa mittauksia aallokon aiheuttamilta häiriöiltä (Ilmatieteen laitos 2025b).

Merenpinnan keskimääräinen korkeus on kaikilla kolmella asemalla suunnilleen samalla tasolla (taulukko 2). Korkeus kasvaa hieman pohjoista kohti mentäessä: Turussa keskiarvo on 171,8 mm, Porissa 174,7 mm ja Kemissä 178,3 mm. Selvempi ero havaitaan kuitenkin korkeuksien vaihteluissa. Kemin mittauspisteellä merenpinnan korkeuden vaihtelu on selvästi suurinta: sen vaihteluväli on 2711 mm ja variaatiokerroin 1,7. Turussa ja Porissa vaihteluvälit ovat huomattavasti pienemmät (1726 mm ja 1823 mm) ja molempien variaatiokertoimet ovat 1,3.

Taulukko 2. Vuosien 1995–2024 merenpinnan korkeushavaintojen tunnuslukuja. Merenpinnan korkeudet on ilmoitettu millimetreinä N2000-järjestelmässä (Ilmatieteen laitos 2025a).

	Pori	**Turku**	**Kemi**
N	10958	10955	10958
Puuttuvia	0	3	0
Keskiarvo	174,7	171,8	178,3
Keskihajonta	221,1	216,0	296,7
Min	-565,0	-475,0	-1123,0
Max	1258,0	1251,0	1588,0
Vaihteluväli	1823,0	1726,0	2711,0
Variaatiokerroin	1,3	1,3	1,7
Persentiilit			
25	27,0	29,0	-15,0
75	305,0	300,0	348,0

3.2 Analyysimenetelmät

3.2.1 Huippuarvojen ja yhdistelmätulvatapahtumien määrittäminen

Suoritin kaikki tilastolliset analyysit IBM SPSS Statistics -ohjelmistolla. Ensimmäinen vaihe aineiston käsittelyssä oli löytää ne merenpinnan korkeuden ja virtaaman havainnot, jotka luokitellaan ”huippuarvoiksi”. Käytin huippuarvojen määrittämiseen kynnysarvomenetelmää asettamalla kynnysarvoiksi muuttujien 95. persentiilien arvot. Tämä tarkoittaa, että huippuarvoiksi määritellään suurimmat 5 % virtaamien ja merenpinnan korkeuksien havainnoista. Samaa kynnysarvovalintaa ovat käyttäneet aiemmin esimerkiksi Ward ym. (2018). Valittu kynnysarvo mahdollistaa riittävän laajan otoksen huippuarvoista säilyttäen samalla analyysin keskittymisen poikkeuksellisiin tapahtumiin. Kynnysarvomenetelmän pohjalta muodostin binäärimuuttujat siten, että havainto sai arvon 1, jos se ylitti 95. persentiilin rajan, ja arvon 0, jos ylitystä ei tapahtunut.

Seuraavaksi muodostin binäärimuuttujan, joka ilmaisi ne päivät, joina sekä merenpinnan korkeus että virtaama ylittivät 95. persentiilin kynnysarvon. Nämä päivät luokiteltiin potentiaalisiksi yhdistelmätulvapäiviksi (jatkossa lyhyesti yhdistelmätulvapäivä). Jos tällaisia päiviä esiintyi peräkkäin, ryhmittelin ne yhdeksi yhdistelmätulvatapahtumaksi. Tämä menettely perustuu ajatukseen, että useamman päivän kestävät tulvapäivät liittyvät todennäköisesti samaan sääilmiöön. Kahden tapahtuman välillä tuli olla vähintään yksi päivä, jolloin jompikumpi muuttuja jäi alle 95. persentiilin rajan. Määritin myös jokaiselle yhdistelmätulvatapahtumalle yhden pääpäivän, joka oli tapahtuman se päivä, jolloin merenpinnan korkeus oli korkeimmillaan. Samaa menetelmää ovat käyttäneet myös Rantanen ym. (2021).

3.2.2 Samanaikaisten huippuarvojen tilastollinen tarkastelu

Tutkin merenpinnan korkeuksien ja virtaamien huippuarvojen samanaikaista esiintymistä ensin yksinkertaisesti laskemalla ne päivät, jolloin sekä merenpinnan korkeus, että virtaama ylittivät 95. persentiilin kynnysarvon. Tämän lisäksi laskin erillisten yhdistelmätulvatapahtumien määrät. Jakamalla yhdistelmätulvapäivien lukumäärät erillisten tapahtumien lukumäärällä, pystyin määrittämään yhdistelmätulvatapahtumien keskimääräisen keston vuorokausissa. Vuodenaikaisvaihtelua tarkastelin laskemalla tapahtumien lukumäärät kuukausittain ja vuodenajoittain. Toistuvuutta arvioin jakamalla tarkastelujakson pituuden (30 vuotta) havaittujen yhdistelmätulvatapahtumien lukumäärällä. Näin sain karkean arvion siitä, kuinka monta vuotta keskimäärin kuluu tapahtumien välillä.

3.2.3 Riippuvuusanalyysi

Tulvatekijöiden välisen tilastollisen riippuvuuden tarkastelu on keskeistä, jotta saadaan selville, onko tulvatekijöiden yhteisesiintyminen vain sattumaa, vai esiintyvätkö ne yhdessä odotettua useammin (Sebastian 2022). Tilastollinen riippuvuus voi viitata esimerkiksi yhteisiin syntymekanismeihin tai vuodenaikaisuuteen. Päivittäisten virtaamahavaintojen ja merenpinnan korkeushavaintojen riippuvuutta analysoin ensin Pearsonin korrelaatiokertoimella, joka mittaa lineaarista riippuvuutta. Sen lisäksi tarkastelin riippuvuutta myös Kendallin järjestyskorrelaatiokertoimen avulla.

4 Tulokset

4.1 Virtaamien ja merenpinnan korkeuksien tarkastelu erikseen

Virtaamien 95. persentiilit, eli huippuarvojen rajat, olivat Kokemäenjoella 476 m³/s, Uskelanjoella 23 m³/s ja Tornionjoella 1478 m³/s. Merenpinnan korkeuksille 95. persentiilit olivat puolestaan Porissa 574 mm, Turussa 561 mm ja Kemissä 714 mm. Näitä suuremmat arvot määritettiin siis huippuarvoiksi.

Molemmilla muuttujilla on havaittavissa voimakasta kausivaihtelua. Virtaamahuippujen ajoittumisessa näkyy myös selkeää alueellista vaihtelua (taulukko 3). Kokemäenjoella virtaamien huippuarvoista 43 % esiintyi talvella ja 36 % keväällä. Syksyn osuus oli 18 % ja kesä oli selvästi harvinaisin vuodenaika. Uskelanjoella kausivaihtelu on pitkälti samankaltaista: talvella 35 %, keväällä 43 % ja syksyllä 18 %. Tornionjoella sen sijaan virtaamahuiput ajoittuvat pääosin keväälle ja kesälle, erityisesti touko-kesäkuulle, jolloin havaittiin peräti 96 % kaikista huippuvirtaamista.

Taulukko 3. Virtaamien huippuarvojen esiintyminen vuodenajoittain ja kuukausittain Kokemäenjoella, Uskelanjoella ja Tornionjoella

	Kokemäenjoki		**Uskelanjoki**		**Tornionjoki**	
	N	%	N	%	N	%
Vuodenaika						
Talvi	237	43 %	182	35 %	0	0 %
Kevät	197	36 %	223	43 %	313	58 %
Kesä	16	3 %	24	5 %	223	41 %
Syksy	97	18 %	94	18 %	3	1 %
Kuukausi						
Tammikuu	74	14 %	55	11 %	0	0 %
Helmikuu	30	5 %	45	9 %	0	0 %
Maaliskuu	39	7 %	69	13 %	0	0 %
Huhtikuu	117	21 %	143	27 %	2	0 %
Toukokuu	41	7 %	11	2 %	311	58 %
Kesäkuu	13	2 %	0	0 %	207	38 %
Heinäkuu	3	1 %	8	2 %	14	3 %
Elokuu	0	0 %	16	3 %	2	0 %
Syyskuu	1	0 %	9	2 %	3	1 %
Lokakuu	24	4 %	26	5 %	0	0 %
Marraskuu	72	13 %	59	11 %	0	0 %
Joulukuu	133	24 %	82	16 %	0	0 %
Yhteensä	547		523		539	

Merenpinnan korkeuksien huippuarvot ajoittuivat alueiden välillä virtaamahuippuja huomattavasti samankaltaisemmin (taulukko 4). Porissa ja Turussa vuodenaikaisjakaumat ovat lähes identtiset: 70 % havaittiin talvella, 11 % keväällä ja 18 % syksyllä. Vain 1 % merenpinnan korkeuksien huippuarvoista havaittiin kesäkuukausina. Myös Kemissä tilanne on samankaltainen, mutta syksylle ajoittuvien korkeiden merenpintojen osuus on hieman edellisiä suurempi, 29 %, ja kevään pienempi, 5 %. Kaikilla mittausasemilla kesä oli merenpinnan korkeushuippujen esiintymisen kannalta selvästi epätyypillinen vuodenaika.

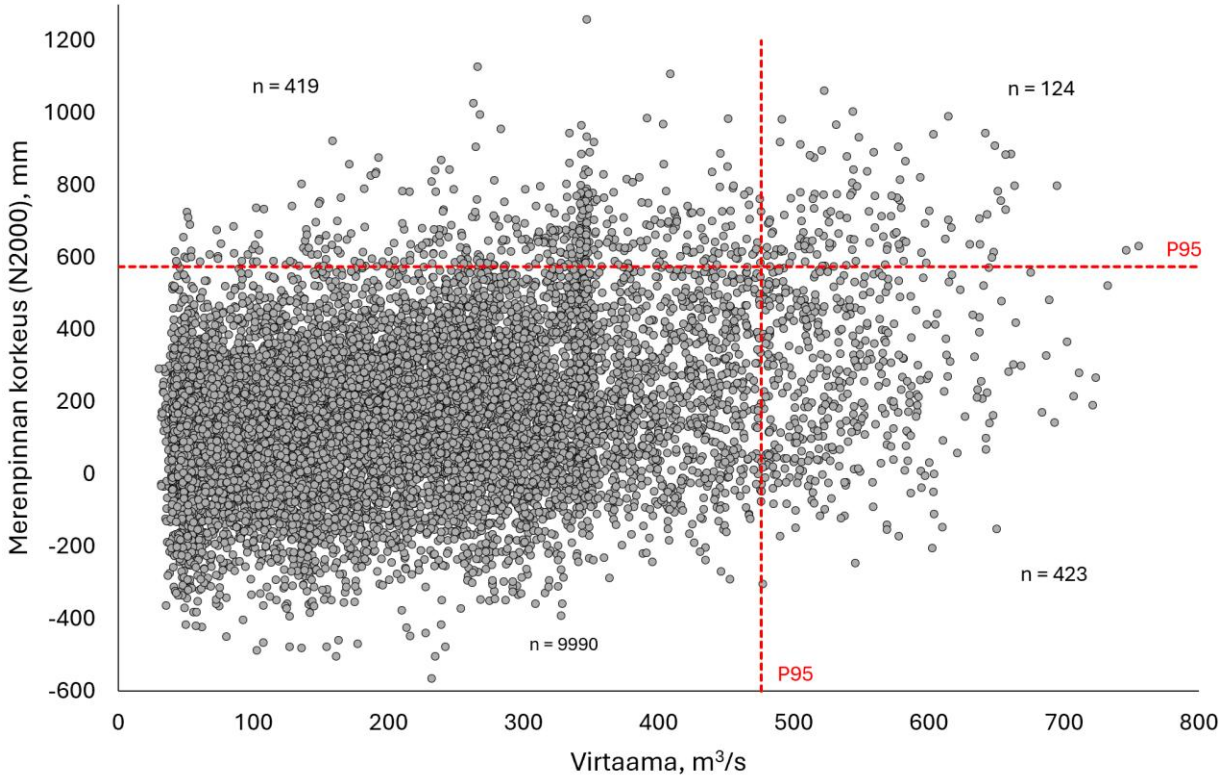
Taulukko 4. Merenpinnan korkeuksien huippuarvojen esiintyminen vuodenajoittain ja kuukausittain Porissa, Turussa ja Kemissä

	Pori		**Turku**		**Kemi**	
	N	%	N	%	N	%
Vuodenaika						
Talvi	380	70 %	379	70 %	344	63 %
Kevät	62	11 %	60	11 %	28	5 %
Kesä	4	1 %	7	1 %	14	3 %
Syksy	97	18 %	97	18 %	159	29 %
Kuukausi						
Tammikuu	122	22 %	124	23 %	127	23 %
Helmikuu	128	24 %	123	23 %	86	16 %
Maaliskuu	53	10 %	53	10 %	23	4 %
Huhtikuu	9	2 %	7	1 %	4	1 %
Toukokuu	0	0 %	0	0 %	1	0 %
Kesäkuu	0	0 %	0	0 %	2	0 %
Heinäkuu	1	0 %	2	0 %	3	1 %
Elokuu	3	1 %	5	1 %	9	2 %
Syyskuu	20	4 %	20	4 %	29	5 %
Lokakuu	32	6 %	28	5 %	50	9 %
Marraskuu	45	8 %	49	9 %	80	15 %
Joulukuu	130	24 %	132	24 %	131	24 %
Yhteensä	543		543		545	

4.2 Huippuarvojen samanaikaisuus

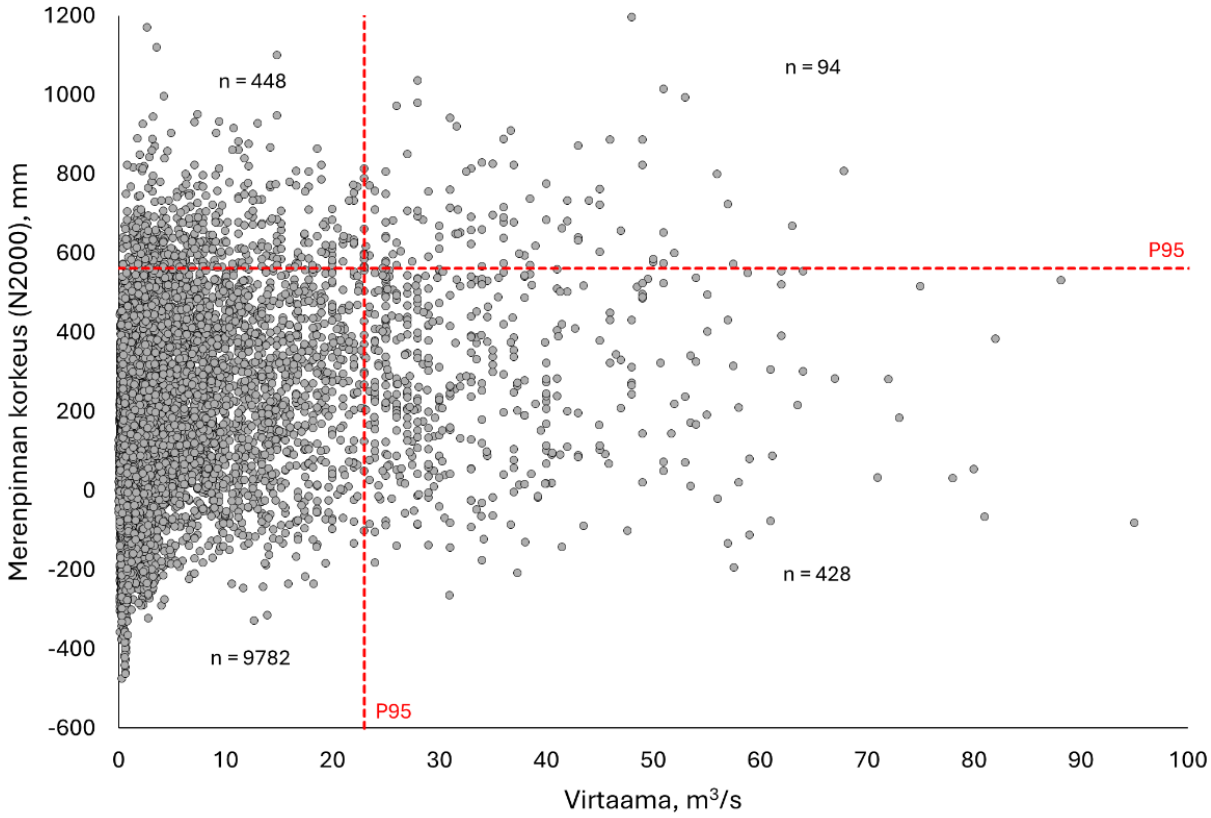
Eniten samanaikaisia virtaaman ja merenpinnan korkeuden huippuarvoja havaittiin Kokemäenjoen suistoalueella, yhteensä 124 päivänä (kuva 5; taulukko 5). Kun useamman peräkkäisen päivän kestäneet tilanteet ryhmiteltiin erillisiksi tapahtumiksi, havaittiin 34 yhdistelmätulvata-

pahtumaa. Lisäksi aineistosta havaittiin 419 päivää, jolloin merenpinnan korkeus ylitti 95. persentiilin kynnysarvon, mutta jotka eivät olleet yhdistelmätulvapäiviä. Vastaavasti havaittiin 423 päivää, jolloin virtaaman kynnysarvo ylittyi, mutta merenpinnan korkeus jäi kynnysarvon alle. Kokemäenjoen yhdistelmätulvatapahtumat kestivät keskimäärin 3,6 vuorokautta ja ilmiön toistuvuudeksi saatiin n. 0,88 vuotta per tapahtuma.



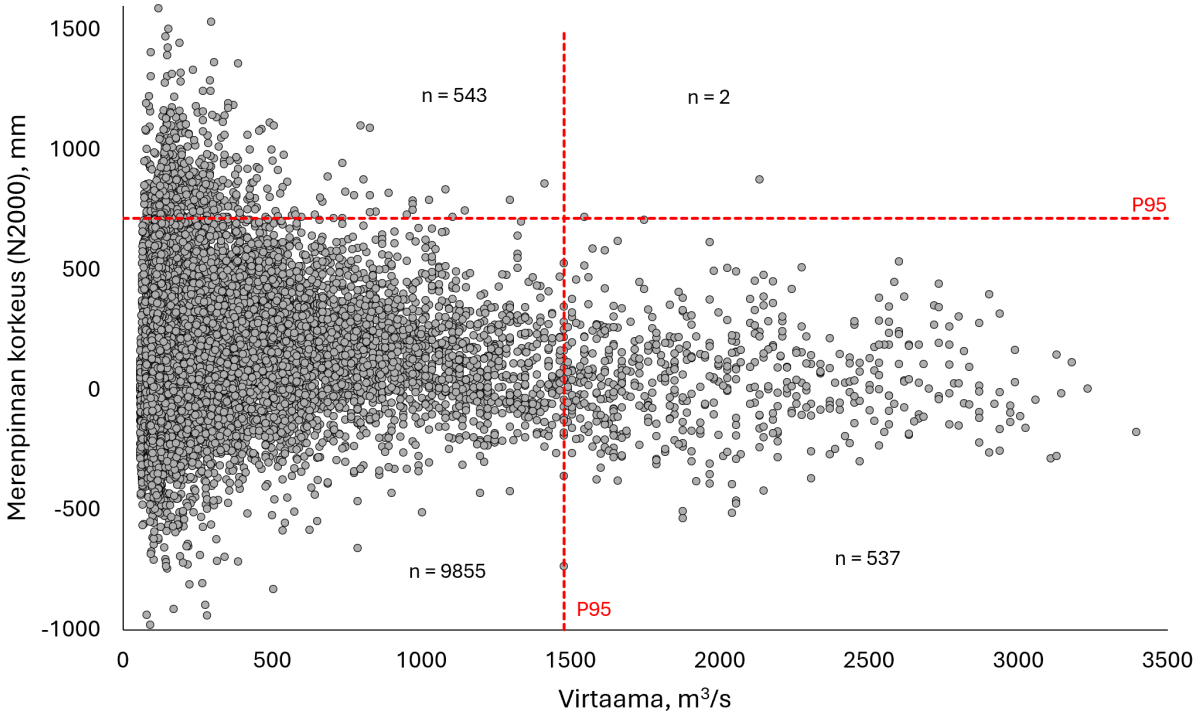
Kuva 4. Päivittäiset havainnot virtaamista ja merenpinnan korkeuksista Kokemäenjoen suistoalueella vuosilta 1995–2024. Hajontakuviossa on esitetty virtaama vaaka-akselilla ja merenpinnan korkeus pystyakselilla. Punaisilla katkoviivoilla on merkitty muuttujien 95. persentiilien rajat.

Uskelanjoen suistoalueella samanaikaisia merenpinnan korkeuksien ja virtaamien huippuarvoja havaittiin 94 päivänä. Yhdistämällä peräkkäiset päivät havaittiin 60 erillistä yhdistelmätulvatapahtumaa (kuva 6; taulukko 5). Vaikka samanaikaisten huippuarvojen lukumäärä oli siis pienempi kuin Kokemäenjoella, niin Uskelanjoella erillisiä yhdistelmätulvatapahtumia oli lähes kaksi kertaa enemmän. Lisäksi aineistossa havaittiin 448 päivää, jolloin ainoastaan merenpinnan korkeus ylitti 95. persentiilin kynnysarvon sekä 428 päivää, jolloin vain virtaama ylitti rajan. Yhdistelmätulvatapahtumat kestivät keskimäärin lyhyemmän aikaa kuin Kokemäenjoella, vain 1,6 vuorokautta. Toistuvuudeksi saatiin 0,5 vuotta per tapahtuma, eli yhdistelmätulvia esiintyy alueella keskimäärin kaksi vuodessa.



Kuva 5. Päivittäiset havainnot virtaamista ja merenpinnan korkeuksista Uskelanjoen suistoalueella vuosilta 1995–2024. Hajontakuviossa on esitetty virtaama vaaka-akselilla ja merenpinnan korkeus pystyakselilla. Punaisilla katkoviivoilla on merkitty muuttujien 95. persentiilien rajat.

Tornionjoen suistoalueella samanaikaisia virtaaman ja merenpinnan korkeuden huippuarvoja havaittiin ainoastaan kaksi koko tarkastelujakson aikana (kuva 7; taulukko 5). Toinen tapauksista oli kynnysarvon ylitykseltään vain lievä. Aineistossa havaittiin 543 päivää, jolloin merenpinnan korkeus ylitti 95. persentiilin kynnysarvon ilman virtaamahuippua, sekä 537 päivää, jolloin vain virtaama ylitti kynnysarvon. Yhdistelmätulvatapahtumien vähyyden vuoksi ei ole mielekästä tehdä päätelmiä tapahtumien keskimääräisestä kestosta tai toistuvuudesta.



Kuva 6. Päivittäiset havainnot virtaamista ja merenpinnan korkeuksista Tornionjoen suistoalueella vuosilta 1995–2024. Hajontakuviossa on esitetty virtaama vaaka-akselilla ja merenpinnan korkeus pystyakselilla. Punaisilla katkoviivoilla on merkitty muuttujien 95. persentiilien rajat.

Taulukko 5. Yhdistelmätulviin liittyviä havaintoja: kynnysarvojen ylitysten määrät, yhdistelmätulvatapahtumien määrät, tapahtumien keskimääräiset kestot ja toistuvuudet

	Pori – Kokemäenjoki	Turku - Uskelanjoki	Kemi – Tornionjoki
Havaintopäivien lukumäärä	10958	10958	10958
Puuttuvia havaintopäiviä	2	206	21
Virtaama ja merenpinnan korkeus < 95P (vrk)	9990	9782	9855
Vain virtaama > 95P (vrk)	423	428	537
Vain merenpinnan korkeus > 95P (vrk)	419	448	543
Virtaama ja merenpinnan korkeus > 95P (vrk)	124	94	2
Yhdistelmätulvatapahtumat (kpl)	34	60	2
Keskimääräinen tapahtuman kesto (vrk)	3,6	1,6	1,0
Toistuvuus (vuotta / tapahtuma)	0,88	0,50	15,00

Yhdistelmätulvatapahtumien esiintymisessä on havaittavissa selkeää vuodenaikaisvaihtelua (taulukko 6). Kokemäenjoen ja Uskelanjoen suistoalueilla yhdistelmätulvat ovat yleisimpiä talvella, jolloin havaittiin noin 70 % tapahtumista. Syksyn osuus oli molemmilla alueilla noin 20 % ja kevään osuus noin 10 %. Kummallakaan suistoalueella ei 30 vuoden tarkastelujakson aikana havaittu yhtään kesälle sijoittuvaa yhdistelmätulvaa. Sen sijaan Tornionjoella ainoat kaksi havaittua tapahtumaa sijoittuivat kesälle ja syksylle.

Kuukausitasolla yhdistelmätulvat keskittyvät selvästi vuodenvaihteeseen (taulukko 6). Kokemäenjoen suistoalueella yleisimmät kuukaudet olivat joulukuu (35 %) ja tammikuu (29 %). Uskelanjoella yleisimmät kuukaudet olivat joulukuu (35 %) ja helmikuu (22 %). Molemmilla alueilla kaikki yhdistelmätulvat sijoittuivat lokakuun ja huhtikuun välille, eli toukokuun ja syyskuun välillä yhdistelmätulvia ei havaittu. Tornionjoella havaitut kaksi tapahtumaa sijoittuivat edellisistä poiketen kesäkuulle ja syyskuulle.

Taulukko 6. Yhdistelmätulvatapahtumien vuodenaikaisvaihtelu

	Pori – Kokemäenjoki		**Turku - Uskelanjoki**		**Kemi – Tornionjoki**	
	N	%	N	%	N	%
Vuodenaika						
Talvi	24	71 %	42	70 %	0	0 %
Kevät	3	9 %	7	12 %	0	0 %
Kesä	0	0 %	0	0 %	1	50 %
Syksy	7	21 %	11	18 %	1	50 %
Kuukausi						
Tammikuu	10	29 %	8	13 %	0	0 %
Helmikuu	2	6 %	13	22 %	0	0 %
Maaliskuu	2	6 %	5	8 %	0	0 %
Huhtikuu	1	3 %	2	3 %	0	0 %
Toukokuu	0	0 %	0	0 %	0	0 %
Kesäkuu	0	0 %	0	0 %	1	50 %
Heinäkuu	0	0 %	0	0 %	0	0 %
Elokuu	0	0 %	0	0 %	0	0 %
Syyskuu	0	0 %	0	0 %	1	50 %
Lokakuu	2	6 %	3	5 %	0	0 %
Marraskuu	5	15 %	8	13 %	0	0 %
Joulukuu	12	35 %	21	35 %	0	0 %
Yhteensä	34		60		2	

4.3 Riippuvuusanalyysien tulokset

Pearsonin ja Kendallin korrelaatiokertoimet osoittavat, että Kokemäenjoen ja Uskelanjoen suistoalueilla virtaamien ja merenpinnan korkeuksien välillä on tilastollisesti merkitsevää, mutta heikkoa positiivista riippuvuutta (taulukko 7). Pearsonin korrelaatiokertoimen arvo oli Kokemäenjoella 0,302 ja Uskelanjoella 0,286. Kendallin tau -kertoimet vastaavasti 0,173 ja 0,244.

Tornionjoen suistoalueella riippuvuus oli vähäinen tai puuttui kokonaan. Pearsonin korrelaatiokerroin oli lievästi negatiivinen (-0,099) ja myös Kendallin tau oli lähes nolla (-0,005), eikä tilastollisesti edes merkitsevä.

Taulukko 7. Pearsonin ja Kendallin rippuvuusanalyysien tulokset eri suistoalueilla. Tilastollisesti merkitsevän p-arvon raja on 0,05.

	Pori – Kokemäenjoki	**Turku - Uskelanjoki**	**Kemi – Tornionjoki**
Pearson			
r	0,302	0,286	-0,099
p-arvo	<0,001	<0,001	<0,001
Kendall			
tau	0,173	0,244	-0,005
p-arvo	<0,001	<0,001	0,397

5 Keskustelu

5.1 Suomen rannikon yhdistelmätulvariskin arviointi

Yhdistelmätulvat ovat selvästi vuodenaikaisilmiö. Suomen rannikolla suurin mahdollisuus joki- ja meriveden aiheuttamien yhdistelmätulvien esiintymiselle on talvella, mutta myös syksy on merkittävä riskikausi. Tämä on loogista, sillä molemmat tulvatekijät esiintyvät Suomessa usein juuri näinä vuodenaikoina. Vaikka jokien tulvahuiput ajoittuvat tyypillisesti kevääseen, yhdistelmätulvariski on kuitenkin silloin paljon pienempi, koska merivesi ei yleensä ole silloin korkealla. Yhdistelmätulvariski on käytännössä olematon kesällä, jolloin sekä joki- että merivesitulvat ovat harvinaisia. Päätelmä yhdistelmätulvien talvipainotteisuudesta on linjassa myös aiempien tutkimusten kanssa. Esimerkiksi Heinrich ym. (2023) tarkastelivat tutkimuksessaan yhdistelmätulvien esiintymistä Pohjois- ja Keski-Euroopassa ja totesivat, että valtaosa yhdistelmätulvista sijoittuu juuri talvikaudelle. Rantanen ym. (2021) ovat tutkineet korkean sademäärän ja korkeiden merenpintojen yhteisesiintymistä Suomen rannikolla ja he havaitsivat, että myös nämä tapahtumat painottuvat erityisesti talveen ja syksyyn.

Vuodenaikojen lisäksi yhdistelmätulvariski vaikuttaisi vaihtelevan paljon myös alueellisesti, erityisesti pohjois-eteläsuunnassa. Kokemäenjoella ja Uskelanjoella samaan aikaan sattuvat korkeat merenpinnat ja suuret virtaamat ovat suhteellisen yleisiä, kun taas Tornionjoella tapahtumia on ollut vain kaksi kertaa 30 vuoden aikana. Tämä selittyy tulosten perusteella sillä, että virtaamahuiput ja merenpinnan korkeat tasot ajoittuvat eri vuodenaikoihin pohjoisessa, kun taas etelämpänä ne osuvat useammin yhteen. Pohjois-Suomessa jokien kevättulvat tapahtuvat tyypillisesti myöhemmin kuin etelässä, sillä lumipeite pysyy siellä pidempään.

Riippuvuusanalyysin tulokset täydentävät havaintoja yhdistelmätulvariskin alueellisesta vaihtelusta. Kokemäenjoen ja Uskelanjoen suistoalueilla virtaamien ja merenpinnan korkeuksien välillä havaittiin tilastollisesti merkitsevää heikkoa positiivista riippuvuutta. Sen sijaan Tornionjoen suistoalueella muuttujien välinen riippuvuus on käytännössä olematonta, mikä tukee havaintoa siitä, että yhdistelmätulvien esiintyminen alueella on harvinaisempaa. On todennäköistä, että havaittu tilastollinen riippuvuus eteläisemmillä alueilla ei kuitenkaan viittaa niinkään virtaamien ja merenpinnan korkeuden väliseen fysikaaliseen vuorovaikutukseen, vaan heijastaa lähinnä muuttujien vuodenaikaisten vaihteluiden päällekkäisyyttä. Sekä virtaamahuiput että korkeat merenpinnan tasot esiintyvät useimmiten talvisin ja syksyisin, mikä lisää luonnollisesti yhteisesiintymien todennäköisyyttä. Couasnon ym. (2020) osoittivat, että muuttujien

sesonkiluonteisuus voi vääristää riippuvuusanalyysin tuloksia, ellei vuodenaikojen vaikutusta oteta analyyseissä erikseen huomioon. Tästä syystä riippuvuusanalyysin tuloksia tulee tulkita kriittisesti erityisesti alueilla, joilla molemmat muuttujat ovat vahvasti kausittaisia. Riippuvuuksia olisikin kenties pitänyt tarkastella jakamalla aineisto vuodenaikojen mukaan.

Ilmastonmuutos tulee todennäköisesti muuttamaan yhdistelmätulvariskin ajallista ja alueellista vaihtelua tulevaisuudessa (Kirkpatrick & Olbert 2020; Ghanbari ym. 2021). Vaikka tässä tutkimuksessa ei tehtykään tulevaisuuteen suuntautuvaa mallinnusta, voidaan aiempien havaintojen ja olemassa olevan tutkimustiedon perusteella esittää varovaisia arvioita siitä, miten yhdistelmätulvariski saattaa kehittyä tulevaisuudessa Suomen rannikolla. Koska ilmastonmuutoksen on osoitettu vaikuttavan sekä merenpinnan korkeuteen että jokien tulvahuippujen ajoittumiseen (Pellikka ym. 2018; Lintunen ym. 2024), voidaan olettaa, että sillä on todennäköisesti näiden tekijöiden kautta vaikutusta myös yhdistelmätulvariskiin.

Pellikka ym. (2018) arvioivat, että ilmastonmuutoksen aiheuttama merenpinnan nousu lisää rannikkotulvariskiä erityisesti Suomenlahdella ja Selkämeren alueella, kun taas Perämerellä vaikutukset ovat pienempiä voimakkaamman maankohoamisilmiön vuoksi (Pellikka ym. 2018). Tämä tarkoittaa, että myös yhdistelmätulvariskin voi odottaa yhä kasvavan erityisesti eteläisillä rannikkoalueilla, mutta pohjoisessa riskin kehitys riippuu vielä siitä, ylittääkö merenpinnan nousu maankohoamisen vaikutukset tulevaisuudessa (Pellikka ym. 2018).

Vielä tällä hetkellä jokien kevättulvat ajoittuvat suurimmaksi osaksi ajankohtiin, jolloin merenpinta on jo laskenut korkeimmilta tasoiltaan. Lintunen ym. (2024) ovat kuitenkin havainneet, että ilmaston lämmetessä kevättulvat ovat aikaistuneet monissa Suomen joissa (Lintunen ym. 2024). Tästä voidaan päätellä, että jos virtaamahuiput siirtyvät lähemmäs ajankohtia, jolloin merenpinta on tavallisesti korkealla, yhdistelmätulvien esiintyvyys voi kasvaa. Toisaalta Lintunen ym. (2024) havaitsivat myös kevättulvien voimakkuuden heikentyneen erityisesti Etelä-Suomessa, mikä saattaa tarkoittaa, että vaikka yhdistelmätulvien määrä lisääntyisi, niiden vaikutukset voivat kuitenkin jäädä vähäisemmiksi.

Etelä-Suomen rannikolla yhdistelmätulvariski on jo nyt suhteellisen korkea, ja se voi kasvaa entisestään merenpinnan nousun ja jokien kevättulvien aikaistumisen myötä. Pohjoisemmassa Perämeren rannikon alueella yhdistelmätulvista voi tulevaisuudessa tulla todellinen riski, mikäli jokien kevättulvat aikaistuvat niin paljon, että ne osuvat samalle ajalle, jolloin merenpinta on vielä koholla.

Yhdistelmätulvat ilmiönä vaikuttaa olevan kuitenkin jo hyvin tunnistettu juuri niillä alueilla, joilla tutkimukseni perusteella riski on suurin. Yhdistelmätulvien mahdollisuus on mainittu Kokemäenjoen tulvariskien hallintasuunnitelmassa (Kokemäenjoen vesistöalueen… 2022) ja myös Salon keskustan tulvariskien arvioinnissa on otettu huomioon samanaikaisen jääpatotulvan ja meriveden nousun aiheuttamat yhdistelmätulvat (Tulvariskien alustava arviointi… 2024). Sen sijaan Tornion kaupungin tulvariskien hallintasuunnitelmassa (Karjalainen & Kurkela 2022) ei yhdistelmätulvia ole erikseen mainittu. Vaikka Torniossa yhdistelmätulvariski ei tällä hetkellä olekaan merkittävä, tulevaisuudessa riski saattaa tulla todelliseksi, mikäli virtaamahuiput aikaistuvat ja merenpinta nousee ilmastonmuutoksen vaikutuksesta.

5.2 Tutkimuksen epävarmuustekijät

Tutkimukseni suurin epävarmuustekijä liittyy merenpinnan korkeusaineiston soveltuvuuteen. Ilmatieteen laitoksen latauspalvelu ei tarjonnut suoraa mahdollisuutta ladata vuorokautisia keskiarvoja merenpinnan korkeuksista. Koska mareografit rekisteröivät merenpinnan korkeutta minuutin välein, niin useamman vuoden aikasarjoja ladatessa tuli vastaan nopeasti tiedostojen maksimirivimäärä. Lisäksi latauspalvelussa on rajoitettu päivittäin ladattavan aineiston määrää, mikä teki 30 vuoden aineiston kokoamisesta ja vuorokausikeskiarvojen laskemisesta käytännössä erittäin hankalaa. Näistä syistä käytin tutkimuksessa jokaiselta vuorokaudelta ensimmäistä, klo 0.00 tehtyä havaintoa edustamaan kyseisen päivän merenpinnan korkeutta. Tämä aiheuttaa kuitenkin epävarmuutta tuloksiin, sillä merenpinnan korkeus voi vaihdella vuorokauden sisällä huomattavasti. Itämerellä erityisesti tuulen ja ilmanpaineen muutokset voivat aiheuttaa nopeita vedenkorkeuden vaihteluita (Weisse ym. 2021), minkä vuoksi yksittäisen hetken mittaus ei välttämättä anna edustavaa kuvaa koko päivän tilanteesta.

Käytin kynnysarvomenetelmää ja 95. persentiilejä merenpinnan korkeuksien ja virtaamien huippuarvojen määrittämiseen, mikä on melko yleinen käytäntö yhdistelmätulvatutkimuksessa. Kynnysarvon valintaan liittyy kuitenkin aina tutkijan omaa harkintaa (Coles 2001: 78), ja vaihtoehtoinen raja, kuten 97. tai 99. persentiili, olisi voinut vaikuttaa havaittujen yhdistelmätulvatapahtumien lukumäärään. Toisaalta esimerkiksi Ward ym. (2018) ovat tarkastelleet kynnysarvon merkitystä yhdistelmätulvatutkimuksen kontekstissa ja he totesivat, että 95. ja 99. persentiilit tuottivat hyvin samankaltaiset tulokset. Tämä tukee tekemääni valintaa, mutta olisi kuitenkin voinut olla perusteltua vertailla eri kynnysarvojen valinnan vaikutuksia tuloksiin tässäkin tutkimuksessa.

Yhdistelmätulvatapahtumien määrittelyssä käytin menetelmää, jossa useamman peräkkäisen päivän kestäneet samanaikaiset huippuarvopäivät ryhmiteltiin yhdeksi tapahtumaksi. Kaksi tapahtumaa katsottiin erillisiksi, jos niiden välillä oli vähintään yhden päivän tauko, eli jos huippuarvot eivät ylittyneet peräkkäisinä päivinä. Tämä voi kuitenkin jakaa käytännössä samaan tapahtumaan liittyviä useamman päivän jaksoja keinotekoisesti erillisiksi tapahtumiksi, jos jompikumpi muuttujista laskee edes vain hetkellisesti alle valitun kynnysarvon. Lisäksi yhdistelmätulvapäivien määrittelyni perustui muuttujien huippuarvojen samanaikaisuuteen täsmälleen samana päivänä. Tämä tapa voi olla kuitenkin rajoittava, sillä huippujen välillä kannattaisi tutkimusten mukaan sallia myös lyhyt viive. Hendry ym. (2019) ovat nimittäin osoittaneet, että varsinkin suuremmilla valuma-alueilla virtaaman ja merenpinnan korkeuden huippuarvojen ei useinkaan tarvitse esiintyä täsmälleen samalla hetkellä, jotta yhdistelmätulva voi syntyä. Tämä johtuu siitä, että esimerkiksi merenpinta voi pysyä kynnysarvon ylityksen jälkeen koholla vielä usean päivän ajan, jolloin myöhemmin tapahtuva virtaamahuippu voi kohdata jo laskevan, mutta edelleen lievästi kohonneen merenpinnan. Jos tarkastelu rajoittuu vain täsmälleen samalle päivälle osuviin huippuihin, tällaiset tilanteet jäävät huomaamatta, vaikka ne voisivat käytännössä aiheuttaa tulvatilanteen.

Tutkimukseni aikajakso, 30 vuotta, on kohtuullinen tilastolliseen tarkasteluun, mutta se ei tässä tapauksessa mahdollistanut pitkän aikavälin trendien analysointia. Pidemmän aikavälin aineisto olisi voinut mahdollistaa tarkemman analyysin siitä, onko yhdistelmätulvien esiintyvyys muuttunut ajan myötä, mikä olisi voinut tuoda lisätukea ilmastonmuutoksen vaikutusten arviointiin.

Riippuvuusanalyyseissä käytetyt Pearsonin ja Kendallin korrelaatiotestit ovat yleisiä tapoja arvioida muuttujien välistä riippuvuutta. Yhdistelmätulvatutkimuksessa kuitenkin kehittyneemmät monimuuttujamenetelmät**,** kuten kopulamallit, voisivat tarjota tarkemman kuvan virtaaman ja merenpinnan korkeuden huippuarvojen yhteisesiintymisestä (Green ym. 2025). Kopulamallit mahdollistavat epälineaaristen riippuvuuksien tarkastelun ja voivat olla hyödyllisiä erityisesti ääri-ilmiöiden analysoinnissa. Lisäksi riippuvuusanalyysi suoritettiin koko 30 vuoden aineistolle ilman vuodenaikoihin jakoa. Tämä voi johtaa virhetulkintoihin etenkin muuttujien ollessa kausiluonteisia. Couasnon ym. (2020) osoittivat, että sesonkiluonteiset huippuarvot voivat vääristää riippuvuusanalyysin tuloksia, mikäli vuodenaikojen vaikutusta ei oteta huomioon. Näin ollen tulevissa tutkimuksissa voisi olla perusteltua tarkastella riippuvuutta myös vuodenajoittain eriteltynä.

Tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu samanaikaisten virtaamien ja merenpinnan korkeuksien huippuarvojen yhteyttä todellisiin, raportoituihin yhdistelmätulviin. Todennäköisesti kaikki tutkimuksessa esiin tulleet tilastolliset yhdistelmätulvatapahtumat eivät todellisuudessa täytä yhdistelmätulvan tai edes tulvan määritelmää käytännössä.

5.3 Jatkotutkimusmahdollisuudet

Suomen rannikon yhdistelmätulvariskin arvioinnissa on useita jatkotutkimusmahdollisuuksia, jotka voisivat syventää ymmärrystä ilmiön dynamiikasta ja tulevaisuuden kehityssuunnista. Ensimmäinen selkeä jatkotutkimuksen suunta olisi tarkastelun laajentaminen useampiin alueisiin eri puolilla Suomen rannikkoa. Tässä tutkimuksessa tarkastelin vain kolmea suistoaluetta, joten tulosten yleistettävyys koko Suomen rannikkoalueeseen jää vielä avoimeksi.

Toinen jatkotutkimusmahdollisuus liittyy yhdistelmätulvariskin ajallisen kehityksen tarkasteluun. Vaikka 30 vuoden aikasarja oli riittävä käyttämiini tilastollisiin menetelmiin, se ei vielä tässä tapauksessa mahdollistanut luotettavaa arviota siitä, ovatko yhdistelmätulvat yleistyneet tai voimistuneet ajan myötä. Pidempi aikasarja tarjoaisi paremmat edellytykset yhdistelmätulvien esiintymisen pitkän aikavälin trendien tarkasteluun. Trenditarkastelu mahdollistaisi paremman arvion esimerkiksi ilmastonmuutoksen vaikutuksista yhdistelmätulvien esiintyvyyteen ja voimakkuuteen. Aikasarjan pidentämiseen on myös hyvät edellytykset, sillä Suomen ympäristökeskus on kerännyt virtaamahavaintoja ja Ilmatieteen laitos vastaavasti merenpinnan korkeushavaintoja useiden vuosikymmenten ajalta.

Yhdistelmätulvia olisi hyödyllistä tarkastella myös useamman muuttujan näkökulmasta. Tässä tutkimuksessa keskityin virtaaman ja merenpinnan korkeuden samanaikaisuuteen, mutta myös muut tekijät, kuten sadannan määrä – jota esimerkiksi Rantanen ym. (2021) tarkastelivat – voisi olla hyödyllistä sisällyttää mukaan analyysiin. Useampien muuttujien analysointi voisi tarjota yksityiskohtaisemman kuvan yhdistelmätulvien syntymekanismeista.

Tulevaisuuden kannalta ilmastonmuutoksen vaikutuksien mallintaminen on keskeinen tutkimusalue yhdistelmätulvariskin kehityksen arvioimisessa. Tarkastelin tässä tutkimuksessa yhdistelmätulvien esiintymistä historialliseen aineistoon pohjautuen, mutta tällainen tarkastelu ei yksin riitä kuvaamaan riskin kehitystä muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa. Jatkossa voitaisiin hyödyntääkin esimerkiksi fysikaalisen mallinnuksen menetelmiä, joilla voitaisiin simuloida kuinka merenpinnan nousu ja jokien kevät- ja syystulvien muutokset vaikuttavat yhdessä yhdistelmätulvariskiin.

Lopuksi tilastollisessa tarkastelussa havaittujen yhdistelmätulvien vaikutuksia infrastruktuuriin, yhteiskuntaan ja ympäristöön tulisi tutkia tarkemmin. Tilastollisesti tunnistettujen yhdistelmätulvien yhteys konkreettisiin tulviin jää usein avoimeksi. Lisäämällä tarkasteluun esimerkiksi ilmakuvia havaittujen yhdistelmätulvien ajalta voitaisiin saada parempi käsitys siitä, millaisia vaikutuksia näillä tapahtumilla todellisuudessa on.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksessani analysoin virtaamien ja merenpinnan korkeuksien huippuarvojen samanaikaisuutta Kokemäenjoen, Uskelanjoen ja Tornionjoen suistoalueilla 30 vuoden aineistolla. Tulosten perusteella yhdistelmätulvariski on huomattavasti suurempi Kokemäenjoella ja Uskelanjoella kuin Tornionjoella. Tämä johtuu siitä, että eteläisemmillä rannikkoalueilla jokien virtaamahuiput ja korkea merenpinnan taso esiintyvät useammin samaan aikaan. Pohjoisemmassa Perämeren rannikolla taas tulvatekijät ovat selvästi ajallisesti eriytyneet: virtaamahuiput keskittyvät kevääseen ja kesään, jolloin merenpinta on tyypillisesti matalammalla.

Tutkimuksen ensimmäinen kysymys käsitteli sitä, kuinka usein virtaaman ja merivedenkorkeuden huippuarvot esiintyvät samanaikaisesti tarkastelluilla suistoalueilla. Kokemäenjoella tällaisia tilanteita havaittiin 124 kertaa ja ne muodostivat 34 erillistä yhdistelmätulvatapahtumaa. Keskimäärin yhdistelmätulvia tapahtuu siis Kokemäenjoella hieman alle vuoden välein. Uskelanjoella samanaikaisia huippuarvoja esiintyi 94 päivänä ja ne muodostivat 60 yhdistelmätulvatapahtumaa, mikä vastaa keskimäärin noin kahta tapahtumaa vuodessa. Tornionjoella sen sijaan yhdistelmätulvat ovat hyvin harvinaisia ja niitä esiintyi ainoastaan kahdesti 30 vuoden tarkastelujakson aikana.

Toinen tutkimuskysymys koski yhdistelmätulvariskin vuodenaikaisvaihtelua. Tulosten perusteella yhdistelmätulvat painottuvat eteläisemmillä Kokemäenjoella ja Uskelanjoella vahvasti talvikuukausille. Tämä johtuu siitä, että merenpinnan korkeimmat tasot ajoittuvat talveen, jolloin myös jokien tulvahuiput ovat yleisiä. Keväisten virtaamahuippujen aikaan merenpinta on jo matalammalla, jonka vuoksi yhdistelmätulvat ovat harvinaisempia keväällä. Kesäaikaan kumpikaan tulvatekijä ei ole yleinen, eikä yhdistelmätulvia juuri havaita. Syksyllä yhdistelmätulvat ovat mahdollisia, mutta selvästi harvinaisempia kuin talvella. Pohjoisemmassa sijaitsevalla Tornionjoella havaittiin vain kaksi tapahtumaa ja ne osuivat kesäkuulle ja syyskuulle. Tapahtumien vähyyden vuoksi ei ole kuitenkaan mielekästä tehdä arviota vuodenaikaisvaihtelusta tällä alueella.

Kolmannessa tutkimuskysymyksessä tarkasteltiin yhdistelmätulvariskin kehitystä tulevaisuudessa. Aikaisemman tutkimuksen perusteella voidaan arvioida, että riski kasvaa vielä todennäköisesti ainakin Etelä-Suomessa, missä ilmastonmuutoksen aiheuttama merenpinnan nousu ja aikaistuvat jokien kevättulvat voivat lisätä samanaikaisten merenpinnan korkeuden ja virtaa-

mien huippuarvojen esiintyvyyttä. Tornionjoen ja muun Perämeren rannikon osalta yhdistelmätulvista voi tulla mahdollisia, mikäli jokien kevättulvat aikaistuvat niin paljon, että ne osuvat useammin ajankohtaan, jolloin merivesi on vielä korkealla.

Tulokset osoittavat, että yhdistelmätulvat ovat todellinen riski erityisesti Etelä-Suomen rannikon suistoalueilla. Ilmastonmuutoksen vaikutusten ymmärtäminen ja yhdistelmätulvariskin tarkempi mallintaminen ovat jatkossa keskeisiä tutkimusalueita, jotta tulvariskeihin voidaan varautua entistä paremmin.

Kiitokset

Haluan kiittää Turun Yliopiston ympäristömaantieteen dosentti Tua Nyléniä johdatuksesta tutkimusaiheen pariin sekä käytännön neuvoista työn alkuvaiheessa.

Lähteet

Anderson, W. B., Seager, R., Baethgen, W., Cane, M. & You, L. (2019) Synchronous crop failures and climate-forced production variability. *Science Advances* 5(7). https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw1976

Aulio, K. (2015) Kokemäenjoki river delta, Western Finland – natural treasury in an exceptionally rapidly changing aquatic environment. *International Letters of Natural Sciences* 32 36–53. https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ILNS.32.36

Baldwin, J. W., Dessy, J. B., Vecchi, G. A. & Oppenheimer, M. (2019) Temporally compound heat wave events and global warming: An emerging hazard. *Earth's Future* 7(4) 411–427. https://doi.org/10.1029/2018EF000989

Bevacqua, E., Maraun, D., Haff, I. H., Widmann, M. & Vrac, M. (2017) Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: Analysis of floods in Ravenna (Italy). *Hydrology and Earth System Sciences* 21(6) 2701–2723. https://doi.org/10.5194/hess-21-2701-2017

Bevacqua, E., Vousdoukas, M., Shepherd, T. G. & Vrac, M. (2020) Brief communication: The role of using precipitation or river discharge data when assessing global coastal compound flooding. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20(6) 1765–1782. https://doi.org/10.5194/nhess-20-1765-2020

Camus, P., Haigh, I. D., Nasr, A. A., Wahl, T., Darby, S. E. & Nicholls, R. J. (2021) Regional analysis of multivariate compound coastal flooding potential around Europe and environs: Sensitivity analysis and spatial patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21(7) 2021–2040. https://doi.org/10.5194/nhess-21-2021-2021

Coles, S. (2001) *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer, Bristol

Couasnon, A., Eilander, D., Muis, S., Veldkamp, T. I. E., Haigh, I. D., Wahl, T., Winsemius, H. C. & Ward, P. J. (2020) Measuring compound flood potential from river discharge and storm surge extremes at the global scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20(2) 489–504. https://doi.org/10.5194/nhess-20-489-2020

Feng, D., Tan, Z., Engwirda, D., Liao, C., Xu, D., Bisht, G., Zhou, T., Li, H. & Leung, L. R. (2022) Investigating coastal backwater effects and flooding in the coastal zone using a global river transport model on an unstructured mesh. *Hydrology and Earth System Sciences* 26(21) 5473–5491. https://doi.org/10.5194/hess-26-5473-2022

Ghanbari, M., Arabi, M., Kao, S., Obeysekera, J. & Sweet, W. (2021) Climate change and changes in compound coastal-riverine flooding hazard along the U.S. coasts. *Earth's Future* 9(5). https://doi.org/10.1029/2021EF002055

Gori, A., Lin, N. & Smith, J. (2020) Assessing compound flooding from landfalling tropical cyclones on the North Carolina coast. *Water Resources Research* 56. https://doi.org/10.1029/2019WR026788

Green, J., Haigh, I. D., Quinn, N., Neal, J., Wahl, T., Wood, M., Eilander, D., de Ruiter, M., Ward, P. & Camus, P. (2025) Review article: A comprehensive review of compound flooding literature with a focus on coastal and estuarine regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 25(2) 747–816. https://doi.org/10.5194/nhess-25-747-2025

Gregow, H., Mäkelä, A., Tuomenvirta, H., Juhola, S., Käyhkö, J., Perrels, A., Kuntsi-Reunanen, E., Mettiäinen, I., Näkkäläjärvi, K., Sorvali, J., Lehtonen, H., Hildén, M., Veijalainen, N., Kuosa, H., Sihvonen, M., Johansson, M., Leijala, U., Ahonen, S., Haapala, J., Korhonen, H., Ollikainen, M., Lilja, S., Ruuhela, R., Särkkä, J. & Siiriä, S.-M. (2021) *Ilmastonmuutokseen sopeutumisen ohjauskeinot, kustannukset ja alueelliset ulottuvuudet*. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2021. Suomen ilmastopaneeli. https://doi.org/10.31885/9789527457047

Heinrich, P., Hagemann, S., Weisse, R., Schrum, C., Daewel, U. & Gaslikova, L. (2023) Compound flood events: analysing the joint occurrence of extreme river discharge events and storm surges in northern and central Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23(5) 1967–1985. https://doi.org/10.5194/nhess-23-1967-2023

Hendry, A., Haigh, I. D., Nicholls, R. J., Winter, H., Neal, R., Wahl, T., Joly-Laugel, A. & Darby, S. E. (2019) Assessing the characteristics and drivers of compound flooding events around the UK coast. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(7) 3117–3139. https://doi.org/10.5194/hess-23-3117-2019

Holden, J. (2017) *An introduction to physical geography and the environment*. Pearson, Harlow.

Huang, W., Ye, F., Zhang, Y. J., Park, K., Du, J., Moghimi, S., Myers, E., Pe'eri, S., Calzada, J. R., Yu, H. C., Nunez, K. & Liu, Z. (2021) Compounding factors for extreme flooding around Galveston Bay during Hurricane Harvey. *Ocean Modelling* 158. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101735

Ilmatieteen laitos (2025a) *The Finnish Meteorological Institute's open data*. https://en.ilmatieteenlaitos.fi/open-data 29.1.2025

Ilmatieteen laitos (2025b) *Vedenkorkeuden mittaaminen.* https://www.ilmatieteenlaitos.fi/mareografi 29.4.2025

Ilmatieteen laitos (s.a.) *Climate elements*. https://en.ilmatieteenlaitos.fi/climate-elements 29.4.2025.

Irannezhad, M., Ahmadian, S., Sadeqi, A., Minaei, M., Ahmadi, B. & Marttila, H. (2022) Peak spring flood discharge magnitude and timing in natural rivers across northern Finland: Long-term variability, trends, and links to climate teleconnections. *Water* 14(8). https://doi.org/10.3390/w14081312

Iz, H. B. (2018) The effect of regional sea level atmospheric pressure on sea level variations at globally distributed tide gauge stations with long records. *Journal of Geodetic Science* 8(1) 55–71. https://doi.org/10.1515/jogs-2018-0007

Kendall, M. G. (1938) A new measure of rank correlation. *Biometrika* 30(1–2) 81–93. https://doi.org/10.1093/biomet/30.1-2.81

Kirezci, E., Young, I. R., Ranasinghe, R., Lincke, D. & Hinkel, J. (2023) Global-scale analysis of socioeconomic impacts of coastal flooding over the 21st century. *Frontiers in Marine Science* 9. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1024111

Kirkpatrick, J. I. M. & Olbert, A. I. (2020). Modelling the effects of climate change on urban coastal-fluvial flooding. *Journal Of Water And Climate Change*. https://doi.org/10.2166/wcc.2020.166

Kokemäenjoen vesistöalueen tulvariskien hallintasuunnitelma vuosille 2022–2027. (2022) Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, Turku. https://www.doria.fi/handle/10024/183694

Korhonen, J. (2007) *Suomen vesistöjen virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelut*. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. https://helda.helsinki.fi/items/1a7c4450-ba15-464d-8e8d-aa488df23a49

Kupfer, S., Vafeidis, A. T. & MacPherson, L. R. (2025) Accounting for compound flooding can prevent maladaptation—A Baltic Sea case study. *Earth's Future* 13(2). https://doi.org/10.1029/2024EF005106

Kurkela, A. & Karjalainen, N. (2022) Tornionjoen–Muonionjoen vesistöalueen tulvariskien hallintasuunnitelma vuosille 2022–2027. Lapin elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, Raportteja 24/2022. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/184181/Raportteja_24_2022.pdf

Lai, Y., Li, J., Gu, X., Liu, C. & Chen, Y. D. (2021) Global compound floods from precipitation and storm surge: Hazards and the roles of cyclones. *Journal of Climate* 34(20) 8319-8339. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0050.1

Leonard, M., Westra, S., Phatak, A., Lambert, M., van den Hurk, B., McInnes, K., Risbey, J., Schuster, S., Jakob, D. & Stafford-Smith, M. (2014) A compound event framework for understanding extreme impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 5(1) 113–128. https://doi.org/10.1002/wcc.252

Leppäranta, M. & Myrberg, K. (2009) *Physical oceanography of the Baltic Sea*. Springer, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6

Lintunen, K., Kasvi, E., Uvo, C. B. & Alho, P. (2024) Changes in the discharge regime of Finnish rivers. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 53. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101749

Medvedev, I. P., Rabinovich, A. B. & Kulikov, E. A. (2013) Tidal oscillations in the Baltic Sea. *Oceanology* 53(5) 526–538. https://doi.org/10.1134/S0001437013050123

MMM nimesi merkittävät tulvariskialueet 2018–2024. (2018) Maa- ja metsätalousministeriö. https://mmm.fi/-/mmm-nimesi-merkittavat-tulvariskialueet-vuosiksi-2018-2024 23.3.2025

Moftakhari, H. R., Salvadori, G., AghaKouchak, A., Sanders, B. F. & Matthew, R. A. (2017) Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(37) 9785–9790. https://doi.org/10.1073/pnas.1620325114

Pellikka, H., Johansson, M. M., Nordman, M. & Ruosteenoja, K. (2023) Probabilistic projections and past trends of sea level rise in Finland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23(4) 1613–1630. https://doi.org/10.5194/nhess-23-1613-2023

Pellikka, H., Leijala, U., Johansson, M. M., Leinonen, K. & Kahma, K. K. (2018) Future probabilities of coastal floods in Finland. *Continental Shelf Research* 157 32–42. https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.02.006

Phillips, R. C., Samadi, S., Hitchcock, D. B., Meadows, M. E. & Wilson, C. A. M. E. (2022) The devil is in the tail dependence: an assessment of multivariate copula-based frameworks and dependence concepts for coastal compound flood dynamics. *Earth's Future* 10(9). https://doi.org/10.1029/2022EF002705

Rantanen, M., Jylhä, K., Särkkä, J., Räihä, J. & Leijala, U. (2021) Characteristics of joint heavy precipitation and high sea level events on the Finnish coast in 1961–2020. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* (preprint). https://doi.org/10.5194/nhess-2021-314

Rentschler, J., Salhab, M. & Jafino, B. A. (2022) Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nature Communications* 13(1) 3527–3527. https://doi.org/10.1038/s41467-022-30727-4

Ruffault, J., Curt, T., Martin-StPaul, N. K., Moron, V. & Trigo, R. M. (2018) Extreme wildfire events are linked to global-change-type droughts in the northern Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(3) 847–856. https://doi.org/10.5194/nhess-18-847-2018

Sebastian, A. (2022) Compound flooding. Teoksessa Brody, S., Lee, Y. & Kothuis, B. B. (toim.) *Coastal flood risk reduction* 77–88. Elsevier, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85251-7.00007-X

Stephens, S. A. & Wu, W. (2022) Mapping dependence between extreme skew-surge, rainfall, and river-flow. *Journal of Marine Science and Engineering* 10(12). https://doi.org/10.3390/jmse10121818

Suomen merkittävät tulvariskialueet on nimetty. (2024) Maa- ja metsätalousministeriö. https://mmm.fi/-/suomen-merkittavat-tulvariskialueet-on-nimetty 23.3.2025.

SYKE (2018) Corine maanpeite 2018. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. https://ckan.ymparisto.fi/dataset/corine-maanpeite-2018 7.2.2025

SYKE (2024a) Hydrologiset havaintopaikat. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. https://ckan.ymparisto.fi/dataset/hydrologiset-havaintopaikat 24.1.2025.

SYKE (2024b) Tulvariskialueet. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. https://ckan.ymparisto.fi/dataset/tulvariskialueet 7.2.2025

Tulvariskien alustava arviointi Uskelanjoen vesistöalueelle. (2024) Vesi.fi. https://www.vesi.fi/tulvariski-pdf/alustava-arviointi-vesistoalue-32356-25-2025106-kuulemisen-jalkeen-2024.pdf 23.5.2023.

Uskelanjoen vesistöalueen tulvariskien hallintasuunnitelma vuosille 2016–2021. (2015) Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, Turku. https://www.doria.fi/handle/10024/117984

Valle-Levinson, A., Olabarrieta, M. & Heilman, L. (2020) Compound flooding in Houston-Galveston Bay during Hurricane Harvey. *The Science of the Total Environment* 747 141272–141272. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141272

Valtanen, M., Sillanpää, N. & Setälä, H. (2014) Effects of land use intensity on stormwater runoff and its temporal occurrence in cold climates. *Hydrological Processes* 28(4) 2639–2650. https://doi.org/10.1002/hyp.9819

Van den Hurk, B., van Meijgaard, E., de Valk, P., van Heeringen, K.-J. & Gooijer, J. (2015) Analysis of a compounding surge and precipitation event in the Netherlands. *Environmental Research Letters* 10(3). https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/035001

Villalobos-Herrera, R., Bevacqua, E., Ribeiro, A. F. S., Auld, G., Crocetti, L., Mircheva, B., Ha, M., Zscheischler, J. & De Michele, C. (2021) Towards a compound-event-oriented climate model evaluation: a decomposition of the underlying biases in multivariate fire and heat stress hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21(6) 1867–1885. https://doi.org/10.5194/nhess-21-1867-2021

Ward, P. J., Couasnon, A., Eilander, D., Haigh, I. D., Hendry, A., Muis, S., Veldkamp, T. I. E., Winsemius, H. C. & Wahl, T. (2018) Dependence between high sea-level and high river discharge increases flood hazard in global deltas and estuaries. *Environmental Research Letters* 13(8). https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad400

Weisse, R., Dailidienė, I., Hünicke, B., Kahma, K., Madsen, K., Omstedt, A., Parnell, K., Schöne, T., Soomere, T., Zhang, W. & Zorita, E. (2021) Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region. *Earth System Dynamics* 12(3) 871–898. https://doi.org/10.5194/esd-12-871-2021

Wolski, T. & Wiśniewski, B. (2020) Geographical diversity in the occurrence of extreme sea levels on the coasts of the Baltic Sea. *Journal of Sea Research* 159. https://doi.org/10.1016/j.seares.2020.101890

Wolski, T. & Wiśniewski, B. (2023) Characteristics of seasonal changes of the Baltic Sea extreme sea levels. *Oceanologia* 65(1) 151–170. https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.02.006

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R., van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M., Maraun, D., Ramos, A., Ridder, N., Thiery, W. & Vignotto, E. (2020) A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment* 1 1–15. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z