

Jokuoman kartoitus ja virtausolosuhteiden mallinnus tukena perkauksen suunnittelussa: esimerkkinä Eurajoki

LINNEA BLÅFIELD¹ & PETTERI ALHO^{1,2} & TEIJA KIRKKALA³
Turun yliopisto¹, Paikkatietokeskus², Pyhäjärvi-instituutti³



Blåfield, Linnea & Alho, Petteri & Kirkkala, Teija (2021). Jokuoman kartoitus ja virtausolosuhteiden mallinnus tukena perkauksen suunnittelussa: esimerkkinä Eurajoki (Bathymetric mapping and hydraulic modelling as a dredging planning tool: case Eurajoki River). Terra 133: 2, 77–94. <https://doi.org/10.30677/terra.101421>

➤ Dredging has a significant effect on sediment transportation, water quality and flow conditions in a river channel. However, often the effects of dredging are not studied carefully in advance. One reason for this is the lack of suitable study approach. Studies on river dynamics require high quality geometric models of riverbed, banks and floodplain. Accurate terrain and bathymetric data are also crucial components of reliable hydraulic modelling. In this study, we created an approach to model the presumable impacts of dredging. We modelled high discharges and annual flooding magnitudes in Eurajoki River, SW Finland in its current form and after dredging. As the low-sloped channel is heavily vegetated, the aim of the dredging is to improve flow conditions by removing sediment and vegetation within a reach of 8 km. First, we created a geometric model of the riverine environment by combining riverbank topography from national Airborne Laser Scanning (ALS) data by the Finnish National Land Survey and bathymetry, gathered with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). The ADCP was attached to a kayak to enable access to shallow areas as well. This way, we were able to model the geometry of the fluvial forms within a few centimetres' accuracy. Next, we modified the model of the river geometry using GIS software according to the dredging plan. Finally, we used a 2D Computational Fluid Dynamics to model the current and after dredging flow conditions during various flow events. We analysed the effects on dredging on the flood magnitudes and flow conditions based on the models and compared these to the present situation. These models offer improvements on river management and observing the effects on dredging.

Key words: hydraulic modelling, bathymetric mapping, dredging, close-range remote sensing

Linnea Blåfield, Virtavesien tutkimusryhmä, Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto, Vesilinnantie 5, FI-20014 Turku, Finland. E-mail <limebla@utu.fi>
Petteri Alho, Virtavesien tutkimusryhmä, Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto, Vesilinnantie 5, FI-20014 Turku, Finland. Paikkatietokeskus, Geodeetinrinne 2, FI-02430 Kirkkonummi, Finland. E-mail <mipeal@utu.fi>
Teija Kirkkala, Pyhäjärvi-instituutti, Sepäntie 7, Ruukinpuisto, FI-27500 Kauttua, Finland. E-mail <teija.kirkkala@pji.fi>

Tulvariskien hallinta Suomessa perustuu EU:n tulvadirektiivin (2007/60/EC) ja hallinnan tukena käytettäviin tulvavaara- ja tulvariskikarttoihin (Sane ym. 2006). Tulvimisen syynä on usein se, etteivät vesistön tilavuus ja vedenjohtokyky ole riittäviä vesistöön päätyvälle vesimäärälle (Mansikkaniemi 1986; Rinta-Paavola 1994; Hanski 2004). Lisäksi siihen vaikuttavat valuma-alueen topografia ja uoman morfologia, jotka määrittävät, kuinka nopeasti

vesi päätyy uomaan ja kulkeutuu sen läpi. Yleisimpiä keinoja tulvimisen vähentämiseksi ovat vesikasvillisuuden poisto tai perkaus ruoppaamalla (Jormola ym. 1998). Niiden avulla lisätään vesisyvyvyyttä. Vesikasvillisuuden poisto uomasta ja sen reunoilta parantaa virtausolosuhteita ja vedenjohtokykyä jokiympäristössä. Ruoppaamalla uoman pohjasta ja reunoilta poistetaan maa-ainesta ja sakkaa. Perkauksen ja kasvillisuuden poiston vaikutukset ovat

kuitenkin paikallisia ja toisinaan lyhytaikaisia. Perkauksen vaikutuksia virtausdynamiikkaan tai fluviaaligeomorfologiaan ei ole juuri tutkittu akustisten virtaus- ja kaikuluoatustekniikoiden avulla (vrt. Dereck 1985; Wilber & Clarke 2001; Harvey ym. 2011). Pohjan muokkaaminen muuttaa virtausvoimia, kuten leikkausjännitystä ja kulutusvoimaa, jotka vaikuttavat uoman morfologiaan ja virtausrakenteeseen (Charlton 2008: 69). Myös vesikasvillisuuden poisto muuttaa virtausta vastuksen vähentyessä (Hickin 1984; Saarinen ym. 2013). Perkaustoi-
menpiteistä aiheutuvat virtausrakenteen muutokset voivat sekä vähentää tulvaongelmia että lisätä niitä. Kun veden virtaus yläjuoksulla helpottuu, päätyy vesi nopeammin alajuoksulle ja mikäli alajuoksun vedenjohtokyky ei ole riittävä, se voi tulvia. Tästä syystä virtausrakenteen ja uoman pohjan morfologian muutosten ymmärtäminen on tärkeää perkausta suunniteltaessa (Alho ym. 2008).

Lähikaukokartoitusmenetelmiin perustuvat mittaukset ovat tehokas ja luotettava tapa tutkia jokiympäristön muutoksia (Alho & Käyhkö 2003; Bales ym. 2007; Hyyppä & Hyyppä 2007; Guerrero & Lamberti, 2011; Hohenthal ym. 2011; Lotsari ym. 2014; Costabile ym. 2015; Flener ym. 2015; Kasvi 2017). Erityisesti tulvakartoituksessa ja -mallinuksessa lähtöaineiston tarkkuus vaikuttaa tulosten alueelliseen ja sisällölliseen tarkkuuteen (Alho ym. 2008). Eniten vaikutusta on maanpinnan korkeusmallilla (Alho ym. 2009; Flener 2010, Haile & Rentjes 2010). Myös uoman pohjan geometria on oleellinen osa tulvakartoitusta. Lähikaukokartoitusmenetelmiin perustuvilla kaikuluoatussovelluksilla voidaan mitata vedenalainen geometria muutaman senttimetrin tarkkuudella ja keräämään kattavat referenssi- ja validointiaineistot todellisista virtaamatilanteista (Flener 2010; Kasvi ym. 2017). Esimerkiksi uoman kaikuluoituksen etuna on pohjan muotojen laaja-alainen mittaaminen useasta kohtaa (Caamaño ym. 2010). Poikkileikkauksiin perustuvien mittausten ongelmana ovat sen sijaan poikkileikkauslinjojen väliin jäävien alueiden interpoloinnista aiheutuvat virheet. Kun lähikaukokartoitusmenetelmiin perustuvat vedenalaiset ja vedenpinnan yläpuoliset geometriat yhdistetään virtaamaan tai vedenkorkeustietoon ja uoman korkeuskertoimeen, saadaan laskennallisessa virtausmallinnuksessa tarvittava tarkka ja kattava lähtöaineisto (Bates 2004; Kasvi ym. 2013). Mallinnuksen kohteena voi olla yksittäinen tulvatapahtuma tietyllä toistumisajalla, kuten kerran kahdessakymmenessä vuodessa (1/20a) tai kerran sadassa vuodessa (1/100a), tai hydrologinen vuosi tai vuosikymmen (Sane ym. 2006).

Laskennallinen virtausmallinnus on tulvien tutkimisen tehokkaimpia menetelmiä silloin, kun halu-

taan tietoa sekä tulva-alueen peittävytydestä ja vesisyvytydestä, että veden virtausdynamiikasta (Flener ym. 2013; Alho ym. 2015; Ermilov ym. 2020; Ostrowski & Falkowski 2020). Sen avulla voidaan luoda vaihtoehtoisia geometria- tai virtauskenaariota ja arvioida niiden vaikutuksia etukäteen. Toisin kuin pelkkiin kaukokartoitusaineistoihin perustuvat tai paikkatieto-ohjelmilla tehtävät tulvamallinnukset ja -kartoitukset, laskennallinen virtausmallinnus tuottaa virtausdynamiikkaa kuvaavia tuloksia, kuten virtausnopeuden ja -suunnan sekä uoman pohjan ja reunoihin kohdistuvien leikkausjännityksen ja kulutusvoiman määrän (Horrit & Bates 2002; Hunter 2007; Käyhkö ym. 2007). Parhaat tulokset saavutetaan, kun mallinnusten perustana on sekä lähi- että kaukokartoitusmenetelmiin perustuva aineisto, ja mallit kalibroidaan virtausmittauksin jostakin todellisesta virtaamatilanteesta.

Mallinnusten avulla voidaan suunnitella tulvasuojelun ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä ja tulvariskien hallintaa sekä arvioida ja testata ennalta jokiympäristön kunnostustoimenpiteiden toimivuutta. Mikään menetelmä ei kuitenkaan ole ongelmaton. Suurten alueiden mallinnusten ongelmana on usein lähtöaineiston tarkkuus (Alho ym. 2008; Flener 2010; Haile & Rentjes 2010). Kun kartoitus on aikaa vievää ja kallista, monet mallinnukset perustuvat harvakseltaan mitattuihin syvyyspisteisiin, jolloin tulokset ovat suurpiirteisiä (Kasvi ym. 2013; Alho ym. 2015).

Tässä tutkimuksessa yhdistetään kaukokartoitus- ja lähikaukokartoitusaineistoja. Vedenalainen aineisto kerättiin lähikaukokartoittamalla kaikuluoitaimella. Maanpinnan aineistona käytetään olemassa olevaa, kaukokartoittamalla kerättyä ilmalaserkeilaukseen perustuvaa korkeusmallia. Vastaavaa aineistoa ei ole aiemmin käytetty Suomessa. Kohdealueena on Eurajoki, jonne Varsinais-Suomen ELY-keskus (VARELY) oli suunnitellut perkaustomia poikkileikkauksiin perustuvien uoman syvyystietojen ja yksiulotteisten virtausmallinnusten perusteella (Eurajoen yläosan perkaus..., 2018). Tässä tutkimuksessa täydennettiin näitä mittauksia lähi- ja kaukokartoitusmenetelmin ja mallinnukset toisinnettiin kaksiulotteisina tarkempaan lähtöaineistoon.

Artikkelissa esitetään, miten kaksiulotteisia laskennallisia virtausmallinnuksia tehdään yhdistämällä lähikaukokartoitusmenetelmillä kerätyt syvyys- ja virtausaineistot kaukokartoittamalla kerättyyn kansalliseen laserkeilauksaineistoon. Lisäksi esitetään, miten näiden avulla voidaan arvioida perkauksen vaikutuksia tulvariskiiin ja uoman virtausrakenteeseen ennakoivasti. Mallinnukset suoritettiin ensin koko uomalle ja sen jälkeen mallinnusten pohjalta tunnistetuille potentiaalisille ongelma-alueille.

Yhteensä luotiin 10 erilaista virtausskenaariota. Koko uoman perkausta kuvaavissa malleissa uoma muokattiin vastaamaan VARELY:n suunnitelmaan pohjautuvaa tulevaisuuden geometriaa ja siihen yhdistettiin erilaisia virtaamaskenaarioita. Jälkimmäiset mallinnukset olivat pienemmälle alueelle sijoittuvia, kokeellisiin geometrioihin perustuvia virtausskenaarioita, joiden avulla selvitettiin, mikä perkaustyö vähensi tulvimista tehokkaimmin kyseisillä ongelma-alueilla. Tulosten avulla arvioidaan perkaussuunnitelman muokkaustarpeita, ekosysteemimuutoksia sekä perkauksen hyötyjä ja haittoja.

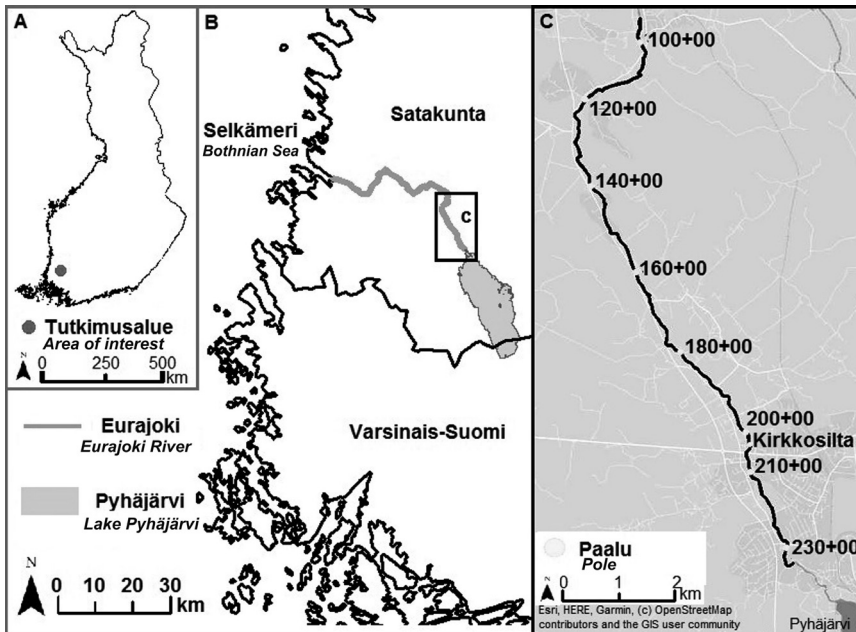
Eurajoen hydrologia ja vuoden 2018 perkaussuunnitelma

Satakunnassa sijaitseva Eurajoki saa alkunsa Pyhäjärvestä ja laskee Selkämereen. Se virtaa noin 52 kilometrin matkan Euran ja Eurajoen kuntien lävitse (kuva 1). Vesistöalueen pinta-ala on 1 336 neliökilometriä ja putouskorkeutta sillä on noin 45 metriä (Eurajoen yläosan perkaus... 2018). Tässä tutkimuksessa keskitytään Eurajoen yläjuoksuun, joka käsittää noin 14 kilometrin mittaisen joki-osuuden Kauttuan ja Eurakosken padon välillä. Putouskorkeutta tällä matkalla on noin puolitoista metriä. Pyhäjärven pintaa ja Eurajoen virtaamaa säännöstellään Kauttuankosken padolla Länsi-Suomen vesioikeuden 26.5.1975 antaman päätöksen mukaan. Suurin sallittu Pyhäjärvestä Eurajokeen juoksetettava vesimäärä on 17 kuutiota sekunnissa, eikä juoksetus saa alittaa 0,8 kuutiota sekunnissa.

Kuivien kausien aikana on pyrittävä juoksettamaan noin kaksi kuutiota sekunnissa.

Säännöstelyn tarkoituksena on tasata Eurajoen virtaamia erityisesti yläjuoksulla, jossa uoman vedenjohtokyky ei ole riittävä. Runsasvetisinä aikoina säännöstelyn yläraja ylittyy Pyhäjärvellä ja aiheuttaa tulvahaittoja Eurajoen yläosassa. Tästä syystä Euran keskusta on tulvariskien hallintasuunnitelmassa luokiteltu riskiluokkaan kaksi (Tulvariskien alustava arviointi Eura – ja Lapinjoen... 2011). Tulvaraja Euran keskustassa on +31,00 metriä N60-korkeusjärjestelmässä. Se ylittyi esimerkiksi talvella 2020 kahdeksana päivänä (Valtion ympäristöhallinto 2020). Aluehallintovirasto myönsi Eurajoen yläosan perkaukselle 19.01.2018 (päätös numero 12/2018/2) luvan, jonka Vaasan hallinto-oikeus kumosi 3.12.2019 ja palautti uudelleen käsiteltäväksi (päätös 19/0236/2). Alkuperäisessä suunnitelmassa mitoituksen lähtökohdaksi otettiin Pyhäjärven juoksetusluvan sallima 17 kuution juoksetus sekunnissa ja samanaikaisesti Eurajoen yläjuoksulla kerran kahdessakymmenessä vuodessa (1/20a) tapahtuva tulvatilanne.

VARELY:n perkaussuunnitelma perustui sen tekemiin nykyhetken perustuviin yksiuolotteisiin laskennallisiin virtausmallinnuksiin, joiden avulla arvioitiin perkaustarpeen mitoitus. Suunnitelmassa uoma jaettiin sadan metrin paaluväleihin (kymmenen paalua on yksi kilometri). Sen mukaan perkaus toteutetaan leventämällä uomaa paaluvälillä 180–95 (kuva 1) ja Euran keskusta-alueella syventämällä paaluvälillä 210–180. Uoman pohjalle kertyneen sedimentin (108 000 kuutiota) sekä kasvillisuuden



Kuva 1. A) Tutkimusalue. B) Eurajoen ja Pyhäjärven sijainti Satakunnassa. C) Eurajoen yläjuoksu, paaluvälit sekä Kirkkosillan sijainti.

Fig 1. A) Area of interest. B) Location of Eurajoki River and Lake Pyhäjärvi in Satakunta region. C) Upstream of Eurajoki, pole intervals and the location of the Kirkkosilta Bridge.

(25 000 neliometriä) perkauksen lisäksi poistetaan muita virtauksen esteitä kuten vanhoja siltoja ja rakenteita. VARELY:n suunnitelmassa perkauksen jälkeinen tulevaisuuden tilanne mallinnettiin yllä olevien tietojen perusteella geometriaa muokaten sekä hyödyntäen yksiulotteista laskennallista virtausmallinnusta. Virtaamien muutokset mitoitettiin kolmen suurimman sivu-uoman mukaan sekä nykyistä että tulevaisuuden virtaamatilanteita mallinnettaessa.

Kasvillisuus ohjaa vettä uomassa ja vaikuttaa uoman muotoon ja virtauskenttään (Millar 2000; Coulthard 2005; Tal & Paola 2007). Se toimii myös virtausvastuksena pakottaen virtauksen jatkautumaan ja muuttamaan suuntaansa (Hickin 1984; Coulthard 2005). Tulvatilanteessa törmien ja suojavyöhykkeiden kasvillisuus pienentää uoman tilavuutta ja virtausnopeuksia (Graf 1987; Hupp & Osterkamp 1996; Millar 2000). Oletettavasti kasvillisuuden poistaminen vaikuttaa joen virtauskenttään ja tulvimiseen, sillä Eurajoen uoma on paikoin voimakkaasti kasvittunut. Toisaalta kasvillisuus suojaa uoman reunoja veden virtauksen aiheuttamalta eroosiolta (Graf 1987; Hupp & Osterkamp 1996; Millar 2000). Eurajoessa kasvillisuutta esiintyy koko matkalla, mutta sen määrä ja laatu vaihtelevat. Vedessä kasvillisuusvyöhyke on kapea, ja runsain kasvillisuus keskittyy uoman reunoille (Kirkkala & Ryömä 2010). Yleisimpiä

kasveja alueella ovat kelluslehtiset uistinviita ja ulpukka. Myös ruohomaisia kasveja kuten osman-käämiä ja palpakkoa esiintyy laajalti.

Perkauksen lisäksi Kirkkosillan (kuva 1) oikeaan reunaan yläjuoksulta katsottuna suunniteltiin rakennettavaksi kolmas virtausaukko virtausolosuhteiden parantamiseksi. Sen nykyiset kaksi holvikaaren muotoista aukkoa ovat riittämättömiä nykyisillä juoksumäärillä (Eurajoen tulvasuojelu 2013). VARELY:n arvion mukaan joen perkauksella alennetaan vedenkorkeutta 1/20a tulvatilanteessa paikoin jopa metrillä (taulukko 1).

VARELY:n yksiulotteiset mallit ja laskelmat perustuivat kahden kilometrin välein uomasta mitattuihin poikkileikkausgeometrioihin. Mittaukset tehtiin tilanteessa, jossa virtaama oli 1,8 kuutiota sekunnissa ja vedenkorkeus kasvillisuuden takia kasvittoman ajan keskivirtaamatilannetta (5 kuutiota sekunnissa) korkeammalla. Tulvavedenkorkeuksien laskennan lähtökohtana oli, että Eurakosken padon kaikki viisi säännöstelyluukku olivat täysin avoinna, jolloin alaosan mitoitusvirtaamalla (33,0 kuutiota sekunnissa) lähtövedenkorkeus oli +28,45 metriä N60-korkeusjärjestelmässä. Keski- ja alivirtaamalla vedenkorkeuksien laskennassa oletettiin, että vedenkorkeus Eurakosken padolla pidettiin säännöstelyn ylärajalla eli korkeudessa +28,44 metriä N60-korkeusjärjestelmässä.

Taulukko 1. VARELY:n vuoden 2018 perkaussuunnitelmassa esitetyt Eurajoen nykyiset (nyk.) ja tulevaisuuden (tul.) ali- keski- ja ylivedenkorkeudet (Eurajoen yläosan perkaus... 2018 mukailten). Vedenkorkeuden muutos on suurin ylivirtaamatilanteessa paalulla 200+00 (1,05 metriä N60 korkeusjärjestelmässä).

Table 1. Existing and planned water levels according to the 2018 dredging plan by the Centre for Economic Development, Transport and the Environment of Varsinais-Suomi region (after Eurajoen yläosan perkaus... 2018). Water levels were calculated for base (NW), mean (MW) and high (HW) flow. Biggest water level change of 1,05 meters is during high flow at pole 200+00 in N60 system.

Paalu Pole	NW nyk. (existing)	NW tul. (planned)	MW nyk. (existing)	MW tul. (planned)	HW nyk. (existing)	HW tul. (planned)
210+00	30,04	29,40	30,35	29,55	31,90	30,94
200+00	29,76	28,67	29,90	29,15	31,57	30,52
180+00	29,32	28,52	29,25	28,83	31,05	30,07
160+00	29,05	28,45	28,92	28,63	30,63	29,67
140+00	28,91	28,35	28,78	28,55	30,15	29,43
120+00	28,83	28,44	28,64	28,48	29,80	29,14
100+00	28,72	28,44	28,58	28,44	28,85	28,65

Aineisto ja menetelmät

Kenttämittaukset ja aineiston käsittely

Geometrian, virtaaman ja vedenkorkeuden mittaukset toteutettiin 26.6.–3.7.2017 systemaattisesti samalla tavalla joka päivä. Jokuoman geometria mitattiin kahdella akustisella virtausprofiilimittarilla (*Acoustic Doppler Current Profiler*, ADCP) Kauttuankoskelta Eurakosken padolle asti noin 14 kilometrin jokiosuudelta. Mittaukset aloitettiin uoman yläjuoksulta kohti alajuoksua jatkaen aina siitä, mihin ne oli edellisenä päivänä lopetettu.

ADCP on akustinen mittalaite, jota käytetään kartoitettaessa virtausdynamiikkaa ja vedenalaista geometriaa (Simpson 1986; Morlock 1996; Muste ym. 2004; Salmela ym. 2020). Sillä pystytään mittaamaan uoman virtausolosuhteet ja vedenalainen geometria tarkasti ja luotettavasti (Muste ym. 2004; Dineheart & Burau 2005; Fong & Jones 2006; Vermeyen 2006; Kasvi ym. 2019; Salmela ym. 2020). Edellä mainituissa tutkimuksissa ADCP:lla mitattua syvyysaineistoa on verrattu muun muassa VRS-GNSS (*Virtual Reference Station – Global Navigation Satellite System*), UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ja kaikuluotausaineistoihin ja todettu sen luotettavuus. Myös tässä tutkimuksessa käytettyä ADCP-aineistoa voidaan pitää luotettavana. ADCP:n epävarmuustekijä on sen oman differentiaalisen GPS:n (*Differential Global Positioning System*, DGPS) heikko laatu (tarkkuus noin yksi metri) (Rennie & Rainville 2006; Muirhead & Annable 2014; Zhao ym. 2014).

Kenttämittauksissa käytetyt ADCP-laitteet olivat RiverSurveyor M9 ja S5 (laitevalmistaja SonTek/YSI). RiverSurveyor M9-laitteessa on yhdeksän ja S5-laitteessa viisi mittauspulssia lähettävää sensoria. Uoman geometrian mittaaminen ADCP:llä perustuu sensorien vertikaaliseen signaaliin kohti pohjaa, josta se kimpoaa takaisin ja määrittää syvyyden signaalin kulkuajan perusteella. Laite mittaa syvyyden sekunnin välein. Virtausdynamiikkaa mitataan viistosäteillä, jotka ovat noin 25 asteen kulmassa vertikaaliseen pulssiin nähden. Säteet laskevat virtausnopeuden ja -suunnan sedimenttipartikkelien liikkeisiin perustuen. Virtausdynamiikkaa mitattaessa laite on asetettuna virtausta vasten siten, että virtaus tulee kohtisuoraan yläjuoksulta alajuoksua kohti laitteen mittaussäteisiin. Laite oli kiinnitetty kelluvaan alustaan ja sitä liikutettiin virtausnopeutta hitaampaa vauhtia kahden narun avulla uoman reunasta reunaan (kuva 2A).

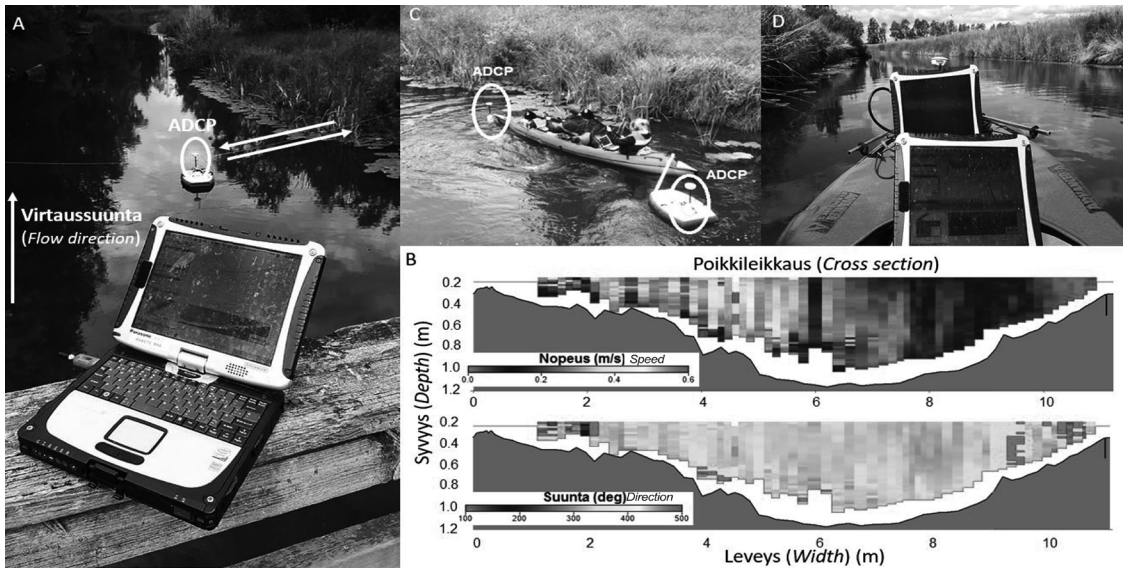
ADCP-laitetta voidaan käyttää kahdella ohjelmistolla, HydroSurveyor ja RiverSurveyor, joista ensimmäinen on suunniteltu syvyyskartoituksen koeka varten. Tällöin ADCP käyttää syvyyden mittaa-

miseen vertikaalisen säteen lisäksi viistosäteitään, jolloin vedenalainen geometria voidaan mitata tarkasti (Dinehart & Burau 2005; Jongmin ym. 2015). Jälkimmäinen ohjelmisto on suunniteltu virtausdynamiikan mittaukseen. Tällöin ADCP käyttää viistosäteitään virtaussuunnan ja -nopeuden mittaamiseen sekä virtaaman laskemiseen, kun vertikaalinen säde puolestaan mittaa syvyyttä (kuva 2B). Tässä tutkimuksessa syvyyskartoitukseen käytettiin HydroSurveyor -ohjelmistoa ja virtausdynamiikan mittaukseen RiverSurveyoria.

Kenttämittauksissa mittalaitteet olivat kiinnitettyinä kajakin keulaan ja kajakkiin kiinnitettyyn kelluvaan alustaan (kuva 2C). Yhdistelmällä melottiin kuusi suoraa linjaa yläjuoksulta alajuoksulle ja tiheä siksak-kuvio uoman reunasta reunaan koko matkalta. Näin saatiin koko uoman vedenalaista geometriaa kuvaava pisteistö, jossa yhdellä nelio-metrillä on keskimäärin neljä syvyyspistettä. Voidaan olettaa, että kajakki ja erillinen mittausalusta eivät aiheuttaneet mittauksen tulosten kannalta merkittävää häiriötä vesipatsaassa, sillä kajakilla kuljettiin joen virtauksen kuljettamaa rauhallista vauhtia (kuva 2D). ADCP:lle ilmoitettiin sitä käytävän mittausalustan pituus, leveys ja syvyys, sekä itse sensorin uintisyvyys vedenpinnasta (*Transducer Depth*), joka oli kajakissa 14 ja mittausalustassa 11 senttimetriä. Lisäksi ADCP:lle ilmoitettiin vertikaalinen etäisyys sensorista, josta mittaus haluttiin aloittaa (*Screening Distance*). Näissä mittauksissa tämä syvyys oli kuusi senttimetriä sensorin alapuolella. Näin pystyttiin vähentämään mittausalustasta vesipatsaaseen aiheutuvaa häiriötä.

Uoman reunoja oli paikoin vaikea saavuttaa, joten oletettavasti osa kaikuluotaussignaaleista palasi takaisin kasvillisuudesta saavuttamatta uoman todellista pohjaa. Kasvillisuudesta aiheutunut häiriö syvyysmittaukseen oli kuitenkin vähäinen, sillä merkittävä määrä kasvillisuudesta oli veden pinnalla. Lisäksi ADCP oli ohjelmoitu käyttämään viittä syvyysädettä, jolloin mittaussäteen viuhka levittyi laajalle alueelle.

Virtaamaa mitattiin viidestä poikkileikkauksesta, tutkimusalueen ylä- ja alajuoksulta sekä kolmen suuren sivu-uoman jälkeen alajuoksun puolelta ADCP M9 -sensorilla. Mittaamalla virtaama päivittäin useista kohdista pystyttiin tarkkailemaan sen muutoksia pää- ja sivu-uomissa mittausjakson aikana. Lisäksi näitä virtaamapoikkileikkauksia käytettiin validointiaineistona alivirtaamatilanteen mallinnuksissa. Vedenkorkeutta ja sen muutoksia tarkkailtiin kinemaattista, reaaliaikaista ja virtuaalista tukiasemaa sekä koko maailmaa palvelevaa satelliittipaikannusjärjestelmää käyttävällä vastaanottimella (VRS-GNSS) koko mittausjakson ajan uoman eri vaiheilta. Vedenkorkeus tai virtaa-



Kuva 2. A) Virtaama mitattiin poikkileikkauksista ADCP kiinnitettynä erilliseen kelluvaan alustaan. Yhdistelmää liikutettiin hitaasti uoman reunasta reunaan niin, että virtaus tuli yläjuoksulta kohtisuoraan mittariin nähden. B) ADCP:lla mitattu uoman poikkileikkaus. C) Uoman pohjan geometria mitattiin kajakilla meloen yläjuoksulta kohti alajuoksua. Kajakin kärkeen oli kiinnitetty ADCP ja toinen sivulla kelluvaan alustaan. Runsas kasvillisuus esti paikoin todellisen reunan tavoittamisen (Kuva Santtu Kaipanen). D) Maisemaa Eurajoki. Kajakilla livuttiin virtauksen kuljettamaa vauhtia kohti alajuoksua.

Fig 2. A) Measuring cross section of the channel. ADCP was attached to floating platform and gently moved from bank to bank. Flow came from upstream straight towards the ADCP. B) The channel cross section measured by ADCP. C) Channel bed geometry was measured with two Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP, attached to the bow of the kayak and to floating platform next to the kayak. Due to heavy vegetation, the banks were impossible to reach at some places (Picture Santtu Kaipanen). D) Scenery from Eurajoki. The straight lines were measured with a kayak by floating down along the flow.

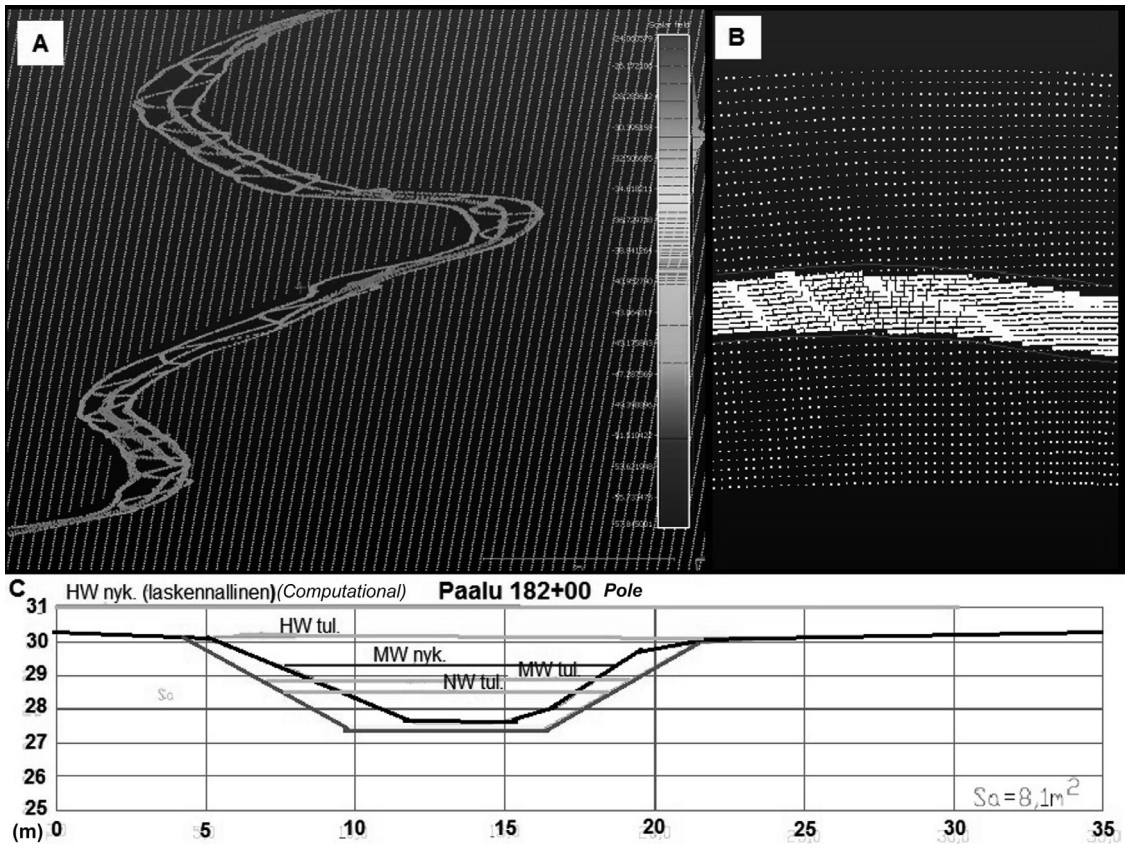
ma ei vaihdellut merkittävästi mittausjakson aikana (vedenkorkeus < 5 senttimetriä ja virtaama < 0,2 kuutiota sekunnissa). Virtaama oli noin 1,8 kuutiota sekunnissa koko mittausjakson ajan.

VRS-GNSS:n tarkkuus on sekä horisontaali- että vertikaalisuunnassa alle viisi senttimetriä, parhaimmillaan päästään jopa yhden senttimetrin tarkkuuteen. VRS-GNSS ilmoittaa mittauksen horisontaalisen ja vertikaalisen tarkkuuden mittauksista tehden. Tarvittaessa nämä ovat jälkikorjattavissa erillisessä ohjelmistossa tunnetun pisteen tai kiinteän tukiaseman avulla. Tässä tutkimuksessa jälkikorjauksia ei tehty mittauksien tarkkuuden vaihdeltaessa yhden ja kolmen senttimetrin välillä sekä horisontaalisesti että vertikaalisesti.

ADCP:lla mitatun aineiston perusteella interpoloitiin uoman nykyinen, mittaushetken perustuva vedenalainen geometria, jota muokattiin paikkatieto-ohjelmalla vastaamaan VARELY:n vuoden 2018 perkaussuunnitelman mukaista tulevaisuuden vedenalaista geometriaa. Lopputuloksena oli kaksi

vedenalaista geometriaa, nykyinen ja tuleva. Kummankin geometriaa kuvaavan rasteripinnan solukokona käytettiin 0,2 metriä (kuva 3A). Nämä kaksi rasteripintaa muutettiin edelleen x, y, z -pisteistöksi (kuva 3B), jolloin saatiin kaksi koko vedenalaisen uoman kattavaa tiheää geometriapistettä. Geometrian muokkauksessa käytettiin samoja uoman leveyksiä, syvyyksiä ja liuskakaltevuuksia kuin VARELY:n mallinnuksissa (kuva 3C).

Nämä kaksi vedenalaista geometriapistettä, mittaushetken perustuva nykyinen ja nykyisestä geometriasta VARELY:n suunnitelman mukaisesti muokattu tulevaisuuden geometria, yhdistettiin Maanmittauslaitoksen (MML) tuottamaan avoimesti saatavilla olevaan, ilmalaserkeilaukseen perustuvaan 2 × 2 metrin maanpinnan korkeusmalliin (julkaisu vuosi 2016). Korkeusmallin rasteripinta rajattiin tutkimusalueen mukaan ja muutettiin pisteistöksi, jossa jokaisella pisteellä on x, y, z -arvot (kuva 3A–B). Näin saatiin kaksi erillistä koko tutkimusalueen kattavaa yhtenäistä geometriaa.



Kuva 3. A) MML:n 2×2 m korkeusmalliin perustuva pisteistö ja ADCP:n pistepilvi. B) Pisteistöt interpoloituina yhtenäiseksi pinnaksi. C) Uoman poikkileikkaus paalun 182+00 kohdalta, kuvassa nykyiset ja tulevaisuuden vedenkorkeudet sekä uoman pohjan geometrian muutos VARELY:n laatimaa perkaussuunnitelmaa mukaillen.

Fig 3. A) 2×2 m point cloud based on the Digital terrain model produced by National Land Survey of Finland (NLS) and ADCP point cloud. B) The point clouds interpolated as one surface. C) The channel cross section at the pole 182+00 with existing and future water levels and the planned geometry after the dredging plan by VARELY.

Marraskuussa 2019 tehtiin tarkentavia mittauksia Euran Kirkkosillan alueella. Kirkkosillasta ja siihen suunnitelluista muutoksista mitattiin geometriapistettä VRS-GNSS:n avulla. Näitä mittoja käytettiin tarkentavien mallien (skenaariot 1–6) rakennuksessa, jotta sillan rakenteiden vaikutus uoman tulvimiseen saatiin selville.

Hydrodynamiikan perusta ja virtausolosuhteiden mallintaminen

Hydrodynamiikan perustan muodostaa teoria energian, massan ja liikemäärän säilymislaeista (Steffler & Blackburn 2002: 2). Näihin lakeihin perustuvia yhtälöitä hyödynnetään laskennallisissa virtausmalleissa. Yhtälöitä muunnellaan tai yksinkertaistetaan käyttötarkoitukseen sopiviksi (Ji 2008:

17). Tämän tutkimuksen mallinnuksissa käytettiin Delft-3D Flow -ohjelman 2D virtausmoduulia virtausolosuhteiden laskemiseen. Se laskee muuttuvaa (non-steady) virtausdynamikkaa x- ja y-suunnissa syvyyskeskiarvotettuna hyödyntäen liikemäärän säilymislakia (kaava 1). Liikemääräksi kutsutaan massan ja nopeuden tuloa ja sen säilymislain mukaan tietyn alueen liikemäärä pysyy vakiona silloin, kun ulkoiset voimat eivät vaikuta siihen (Steffler & Blackburn 2002: 2; Ji 2008: 17). Ulkoisella voimalla tarkoitetaan tässä tapauksessa kiihtyvyyden ja massan tuloa. Liikemäärän voimakkuuden muuttamisen tase on verrannollinen alueeseen vaikuttaviin ulkoisiin voimiin. Ulkoisten voimien suunta määrää liikemäärän suunnan muutokset (kaava 2).

$$P=mv \quad (\text{kaava 1})$$

, jossa P = liikemäärä, m = massa, v = nopeus.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} - cv + F_{sec1x}$$

$$= -\frac{1}{\rho_0} P_x + V_n \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} - cv + F_{sec1y}$$

$$= -\frac{1}{\rho_0} P_y + V_n \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{kaava 2})$$

, jossa u ja v ovat nopeuskomponentit karteesisessa koordinaattijärjestelmässä (m/s^{-1}), g = painovoima (m/s^{-2}), c = Coriolisilmiö (S^{-1}), $P_{x,y}$ = paine, F_{sec} = sekundäärisen syvyydeskiarvotetun virtauksen vaikutus, d = vesisyvyys (m), ρ_0 = veden tiheys (kg/m^3), ω = vertikaalinen virtausnopeus σ -koordinaatistossa (m s^{-1}), V_v = vertikaalinen turbulenssi (lasketaan $k-e$), V_h = horisontaalinen turbulenssi (käyttäjän määrittelemä).

Kun uoman leveyttä muokataan, pätee tähän teoria virtauksen jatkuvuudesta (*flow continuity*) (kaava 3). Tällöin veden virtausnopeus muuttuu, kun uoman poikkileikkausalala muuttuu, vaikka virtaama ja syvyys pysyvät samoina (Charlton 2008: 76). Kun uomaa levennetään, veden virtausnopeus hidastuu, koska sama vesimäärä levittäytyy laajemmalle poikkileikkausalalle ja näin siihen kohdistuva uoman pohjan ja reunojen kitkavoima kasvaa.

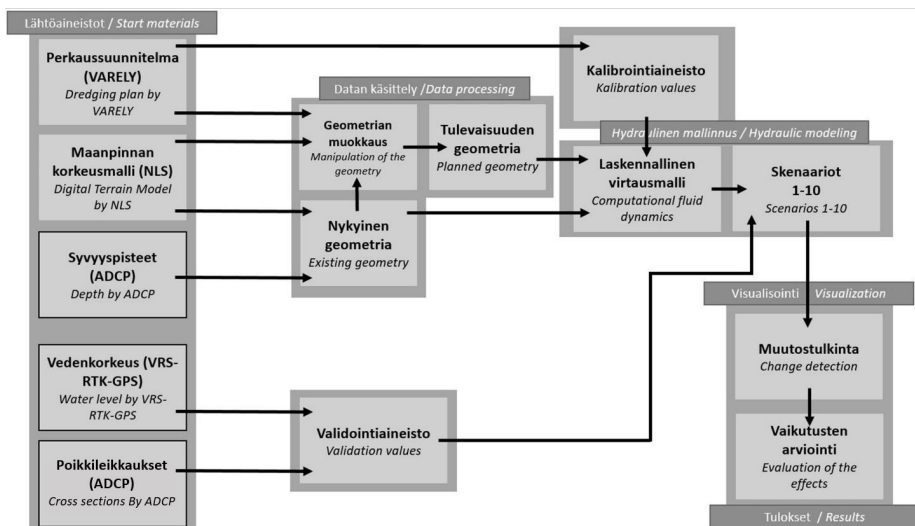
$$Q = v^1 A^1 = v^2 A^2 \quad (\text{kaava 3})$$

, jossa Q = virtaama, v = poikkileikkauksen keskiarvotettu virtausnopeus, a = poikkileikkauksen pinta-ala.

Virtausolosuhteiden mallintamiseen tarvitaan neljä lähtöaineistoa, jotka ovat uoman vedenalainen geometria ja maanpinnan topografia, vedenpinnan korkeus- ja virtaamatieto, uoman pohjan sekä maanpinnan karkeustieto ja validointiaineisto (Bates 2004) (kuva 4). Mallin tulosten tarkkuuteen ja oikeellisuuteen vaikuttavat sekä aineistojen tarkkuus, että mallinnettavat olottuvuudet.

Yksiuolotteisessa mallissa on vain yksi spatiaalinen olottuvuus (x) poikkileikkauksen välillä, jolloin virtausolosuhteet lasketaan yksiuolotteisesti ohjelmaan syötetyille poikkileikkauksille ja niiden väliset alueet interpoloidaan samansuuntaisesti (Ji 2008: 441). VARELY:n perkaussuunnitelmassa käytettiin tällaista yksiuolotteista mallinnumenettelmää. Kaksiuolotteisessa mallissa on kaksi spatiaalista olottuvuutta (x ja y), jotka mahdollistavat virtausolosuhteiden laskennan koko jokiuomassa kahteen suuntaan. Sen avulla pystytään mallintamaan monimutkaisia virtausrakenteita ja syvyydeskiarvotettuja virtausnopeuksia (Horritt & Bates 2002; Syme ym. 2004; Ernst ym. 2010; Koivumäki ym. 2010; Kasvi ym. 2013).

Tämän tutkimuksen kaksiuolotteisissa simulaatioissa käytettiin kurvilineaarista, rajattua rasteriverkkoa, joka perustui etukäteen paikkatieto-ohjelmistossa määritettyihin koordinaatteihin. Rasteriverkon alueelle syötettiin aluksi kaksi erilaista interpoloitua geometriaa, kenttämittauksiin ja MML:n korkeusmalliin perustuva nykyinen geometria sekä perkaussuunnitelman mukaan nykyisestä geometriasta ja MML:n korkeusmallista muokattu tulevaisuuden geometria (kuva 4). Manningin karkeuskertoimena



Kuva 4. Jokiuoman kartoituksen ja virtausolosuhteiden mallinnuksen lähtöaineistot sekä aineiston käsittelyn ja mallin rakennuksen vaiheet. Mustalla reunuksella olevat lähtöaineistot ovat itse mitattuja.

Fig 4. The phases, materials and data needed for modelling computational fluid dynamics. The boxes with black edges are self-measured data.

käytettiin mallin ka-libroinnin jälkeen nykykenaarioissa arvoa 0,035 ja perkauksen jälkeisissä skenaarioissa arvoa 0,03, sillä kasvillisuuden poiston jälkeen sen aiheuttama virtausvastus uomassa vähennee (Hickin 1984). Samoja arvoja käytettiin myös VARELY:n tuottamissa yksilotteisissa malleissa. Kyseiset arvot ovat yleisesti käytettyjä kasvittu-neiden savipohjaisten jokien tulvamallinnuksessa (Phillips & Tadayon 2006; Ball ym. 2019). Eurajoen

uoma on homogeeninen pohjamateriaaliltaan, jolloin spatiaalisesti muuttuvaa karkeuskerrointa ei tarvittu.

Koko 14 kilometrin jokiosuudelle (paalut 95–235) tehtiin neljä skenaariota, kaksi nykyiseen geometriaan ja kaksi tulevaisuuden geometriaan. Lisäksi tehtiin kuusi tarkempaa skenaariota paaluvälille 176–210 (taulukko 2). Tulevaisuuden virtauskenaarioissa tarkasteltiin erityisesti virtauskentän muutoksia sekä tulva-alueen koon muutoksia suh-

Taulukko 2. Skenaarioiden alueellinen sijoittuminen, käytetty uoman geometria, lähtövirtaama sekä Manningin karkeuskerroin. Paaluvälille 176–210 sijoittuvissa skenaarioissa lähtövirtaamassa on huomioitu Ahmasojan virtaama 1/20a tulvatilanteessa (5,3 kuutiota sekunnissa).

Table 2. The spatial reach, used geometry, discharge and Manning's roughness value for each scenario. Discharge from Ahmasoja stream (5,3 cubic meters per second) in a 1/20a flood situation is included in the boundary conditions of scenarios 1–6.

Skenaario Scenario	Paalut Poles	Geometria Geometry	Lähtövirtaama ja sivu-uomat m ³ /s Starting discharge and tributaries m ³ /s	Manningin arvo Manning's value
NW nyk.	95–235	Nykyinen (itse mitattu) Existing (self-measured)	1,7	0,035
NW tul.	95–235	Tuleva (suunnitelman mukainen) Planned (according to the plan)	1,7	0,03
HW nyk.	95–235	Nykyinen (itse mitattu) Existing (self-measured)	17 (Sivu-uomat / tributaries: paalu / pole 208+70 Ahmasoja 5,3 m ³ /s, paalu / pole 156+50 Ruonoja 6,9 m ³ /s, paalu / pole 135+00 Vaaninoja 3,5 m ³ /s)	0,035
HW tul.	95–235	Tuleva (suunnitelman mukainen) Planned (according to the plan)	17 (Sivu-uomat / tributaries: paalu / pole 208+70 Ahmasoja 5,3 m ³ /s, paalu / pole 156+50 Ruonoja 6,9 m ³ /s, paalu / pole 135+00 Vaaninoja 3,5 m ³ /s)	0,03
Skenaario 1 Scenario 1	176–210	Levennetty paaluvälillä 176–200, syvennetty suunnitelman mukaan Wider between poles 176–200, depth according to the plan	22,3 (Sisältää / Includes: paalu / pole 208+70 Ahmasoja 5,3 m ³ /s)	0,03
Skenaario 2 Scenario 2	176–210	Levennetty paaluvälillä 176–200, syvennetty suunnitelman mukaan, Kirkkosilta kolmas virtausaukko Wider between poles 176–200, depth according to the plan, 3 rd outlet in Kirkkosilta Bridge	22,3 (Sisältää / Includes: paalu / pole 208+70 Ahmasoja 5,3 m ³ /s)	0,03
Skenaario 3 Scenario 3	176–210	Levennetty paaluvälillä 176–210, syvennetty suunnitelman mukaan Wider between poles 176–210, depth according to the plan	22,3 ((Sisältää / Includes: paalu / pole 208+70 Ahmasoja 5,3 m ³ /s)	0,03
Skenaario 4 Scenario 4	176–210	Levennetty paaluvälillä 176–210, syvennetty suunnitelman mukaan, Kirkkosilta kolmas virtausaukko Wider between poles 176–210, depth according to the plan, 3 rd outlet in Kirkkosilta Bridge	22,3 (Sisältää / Includes: paalu / pole 208+70 Ahmasoja 5,3 m ³ /s)	0,03
Skenaario 5 Scenario 5	176–210	Levennetty paaluvälillä 200–210, syvennetty suunnitelman mukaan Wider between poles 200–210, depth according to the plan	22,3 (Sisältää / Includes: paalu / pole 208+70 Ahmasoja 5,3 m ³ /s)	0,03
Skenaario 6 Scenario 6	176–210	Levennetty paaluvälillä 200–210, syvennetty suunnitelman mukaan, Kirkkosilta kolmas virtausaukko Wider between poles 200–210, depth according to the plan, 3 rd outlet in Kirkkosilta Bridge	22,3 (Sisältää / Includes: paalu / pole 208+70 Ahmasoja 5,3 m ³ /s)	0,03

teessa nykytilanteeseen. Koko uoman kattavat skenaariot nimettiin vastaavalla tavalla kuin VARELY:n vuoden 2018 perkaussuunnitelman mallinukset. Alivirtaamatilannetta kuvaavat mallit nimettiin seuraavasti: NW nyk. (nykyinen alivirtaamatilanne) ja NW tul. (tulevaisuuden alivirtaamatilanne). Ylivirtaamatilannetta kuvaavat mallit HW nyk. (nykyinen ylivirtaamatilanne) ja HW tul. (tulevaisuuden ylivirtaamatilanne). Paaluvälin 176–210 tarkemmissa skenaarioissa käytettiin samaa 1:2 luiskakaltevuutta kuin koko uoman skenaarioissa. Näissä skenaarioissa uomaa levennettiin keskustassa nykyisestä noin kuudesta metristä enintään noin kahdeksaan metriin. Uomaa syvennettiin perkaussuunnitelman mukaisesti. Nämä skenaariot nimettiin yhdestä kuuteen ja ne kaikki kuvaavat ylivirtaamatilannetta.

Mallien kalibrointiin käytettiin VARELY:n perkaussuunnitelmassa esitettyjä ali- ja ylivirtaamarvoja sekä ali- ja ylivedenkorkeusarvoja kullekin virtaamaskenaariolle. Kalibrointivirtaama alivirtaamatilanteessa oli 1,7 kuutiota sekunnissa yläjuoksulla (sivu-uomilla ei merkittävää vaikutusta) ja vedenkorkeus 30,04 metriä yläjuoksulla ja alajuoksulla 28,72 metriä. Ylivirtaamatilanteessa kalibrointivirtaama oli 17,0 kuutiota sekunnissa yläjuoksulla. Tämän lisäksi huomioitiin sivu-uomista tuleva virtaama. Ylivirtaamatilanteessa kalibroinnissa käytetyt vedenkorkeudet olivat yläjuoksulla 31,9 metriä ja alajuoksulla 28,85 metriä. Mallien kalibrointi onnistui erinomaisesti (vaihtelu vedenkorkeudessa < 5 senttimetriä).

Validoinnissa käytettiin ADCP:lla mitattuja poikkileikkauksia ja VRS-GNSS:lla mitattuja vedenkorkeuksia. Koska todelliseen virtaamatilanteeseen perustuvia mittauksia oli vain alivirtaamatilanteesta, pystyttiin vain nykyistä alivirtaamatilannetta kuvaava malli validoimaan luotettavasti. Validoinnissa käytettiin virtausnopeuksia ja virtaussuuntia ADCP:lla

mitatuista poikkileikkauksista 1,8 kuution virtaamatilanteessa. Näitä verrattiin mallin poikkileikkauksiin samoista kohdista. Poikkileikkauksien kohdalta VRS-GNSS:lla mitattuja vedenkorkeuksia verrattiin mallin vedenkorkeuksiin. Muiden mallien validointiin käytettiin VARELY:n perkaussuunnitelmassa esitettyjä vedenkorkeusarvoja muualla uomassa kuin ylä- ja alajuoksulla, sillä näitä ylä- ja alajuoksunarvoja oli käytetty malleissa kalibroinnin reunaehtoina.

Tulokset

Skenaariossa HW nyk. (nykyinen ylivirtaamatilanne) tulva-alue peitti 30,1 hehtaaria maanpintaa, kun taas perkauksen jälkeen skenaariossa HW tul. (tulevaisuuden ylivirtaamatilanne) tulvan peittämä pinta-ala oli kooltaan 16,6 hehtaaria (taulukko 3). Mallien mukaan tulva-alue pieneni perkauksen myötä 44,9 prosenttia. Sen peittävyys kuitenkin vaihteli spatiaalisesti koko uoman matkalla erityisesti tulevaisuuden ylivirtaamatilanteessa (HW tul.), jossa ala- ja yläjuoksun tulva-alueiden kokoerot olivat huomattavat. Mallinukset osoittivat, että tulvatilanteessa tulva-alueiden koko pysyi tutkimusalueen yläjuoksulla lähes ennallaan, kun taas tutkimusalueen alajuoksulla ne pienenivät tai katosivat. Tästä syystä alueen yläjuoksulle paaluvälille 176–210 mallinnettiin tarkemmat skenaariot 1–6 eri tavoin muokattuihin geometrioihin.

Tarkempien mallien mukaan tulva-alueen koko pieneni kaikissa skenaarioissa paaluvälillä 176–210. Jäljelle jääneiden tulva-alueiden koko ja sijainti olivat kaikissa skenaarioissa lähes samoja, mutta tulva-alueiden vesisyvytykset vaihtelivat. Tulva-alueen peittävyys ja vesisyvyys olivat pienimmät skenaariossa 4, jossa paaluvälin 176–210 alkuperäisestä 8,5 hehtaarin tulva-alueesta jäljelle jäi 2,9 hehtaaria. Tämä tarkoittaa, että tulva-alueen koko pieneni 65,8

Taulukko 3. Eri skenaarioiden tulva-alueiden laajuudet hehtaareina sekä suurimmat virtausnopeudet. Koko perkausalueella tulva-alue pieneni 44,9 prosenttia. Paaluvälillä 176–210 tulva-alue pieneni 65,8 prosenttia.

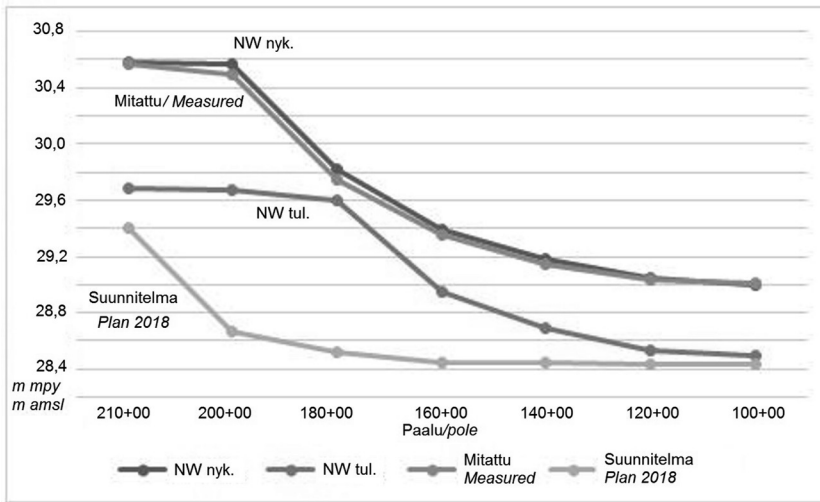
Table 3. Inundation area size, maximum flow velocity and mean flow velocity in each scenario. The inundation area decreases by 44,9 percent according to the whole reach models. Models between poles 176–210 indicates that the inundation area decreases by 65,8 percent.

Skenaario Scenario	Tulva-alue (ha) Flood area (ha)	Max. virtausnopeus (m/s) Max. flow velocity (m/s)	Keskinopeus (m/s) Mean flow velocity (m/s)
NW nyk. / existing	-	2,17 (Paalu / pole 204)	0,13
NW tul. / planned	-	1,03 (Paalu / pole 176)	0,03
HW nyk. / existing	30,1	2,49 (Paalu / pole 96)	0,19
HW tul. / planned	16,6	2,45 (Paalu / pole 96)	0,18
Skenaario 4 (nykyinen) / Scenario 4 (existing)	8,5	2,44 (Paalu / pole 180)	0,19
Skenaario 4 (tulevaisuus) / Scenario 4 (planned)	2,9	2,42 (Paalu / pole 179)	0,18

prosenttia (taulukko 3). Rakennuksiin kohdistuva tulvavaara väheni perkauksen jälkeen koko tutkimusalueella. Nykyisessä ylivirtaamatilanteessa (HW nyk.) tulvavesi tavoitti 54 rakennusta joen varrelta, kun tulevaisuuden ylivirtaamatilanteessa (HW tul.) tulvavesi tavoitti yhdeksän rakennusta. Rakennuksiin kohdistuva tulvavaara laski 83,3 prosenttia. Alivirtaamatilanteissa vesi ei uhannut rakennuksia.

Perkauksen vaikutus vedenkorkeuteen oli suurempi ylivirtaama- kuin alivirtaamatilanteessa. Vedenkorkeus laski perkauksen jälkeen jokaisella paalulla sekä alivirtaama- että ylivirtaamatilanteessa

perkausta edeltäviin vedenkorkeuksiin verrattuna (kuva 5). Perkauksen vaikutukset eivät kuitenkaan jakautuneet uomassa tasaisesti; erityisesti paaluvälin 176–210 vedenkorkeudet jäivät perkaussuunnitelman mukaisesta tavoitetasosta sekä tulevaisuuden alivirtaamatilanteessa (NW tul.) että tulevaisuuden ylivirtaamatilanteessa (HW tul.) (kuva 6). Suurin ero vuoden 2018 perkaussuunnitelmassa ja tässä tutkimuksessa mallinnettujen vedenkorkeuksien välillä oli sekä NW että HW-skenaarioissa paalulla 176, jossa perkaustyylillä vaihtui syvennyksestä levennykseen.

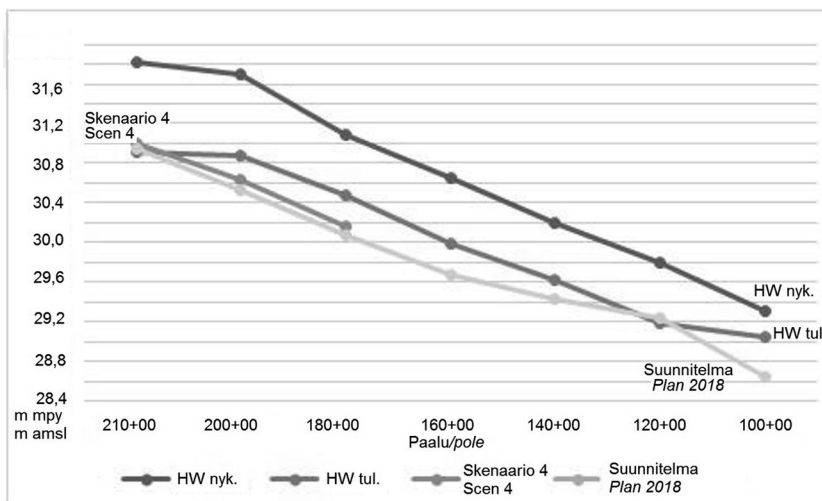


Kuva 5. Vedenkorkeudet alivirtaamatilanteessa mallinnettujen skenaarioiden sekä vuoden 2018 perkaussuunnitelman mukaan. Lisäksi itse mitatut vedenkorkeudet vuoden 2017 mittaustajajaksolta, joita käytettiin mallin validoinnissa.

Fig 5. Water levels during base flow situation according to models and the dredging plan from 2018. In addition, there is water levels measured during the field campaign in 2017. These water levels were used in the model validation.

Skenaarioissa NW tul. ja HW tul. vesi pidättyi uoman yläjuoksulla. Tästä syystä yläosan keskusta-alueelle mallinnettiin tarkemmat skenaariot (1–6). Näistä skenaario 4:n vedenkorkeudet vastasivat parhaiten perkauksella tavoiteltua tulosta (kuva 6). Samalla huomattiin, ettei Kirkkosillan kolmannel-

la virtausaukolla ollut huomattavaa vaikutusta vedenkorkeuteen ja tulva-alueen kokoon silloin, kun uomaa levennetään sekä Kirkkosillan ylä- että alajuoksulta kuten skenaarioissa 3 ja 4. Skenaarioissa 1, 2, 5 ja 6 vedenkorkeus jäi perkauksen tavoitetasosta skenaarioita 3 ja 4 enemmän.

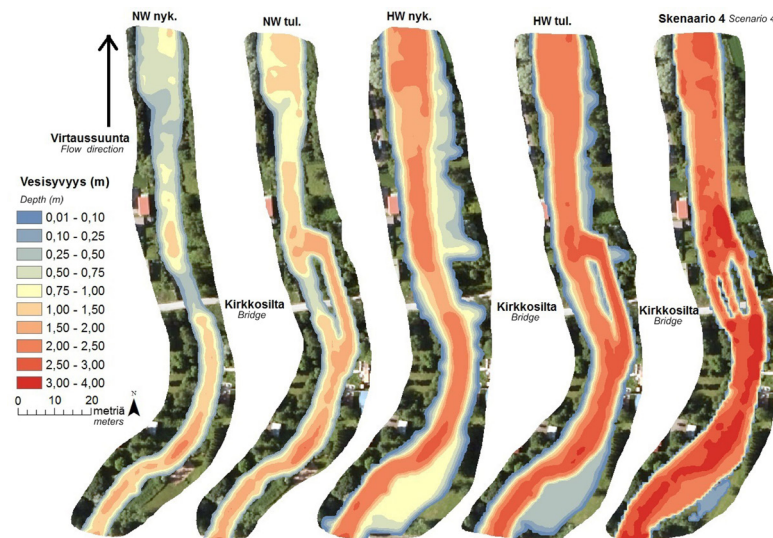


Kuva 6. Vedenkorkeudet 1/20a tulvatilanteessa, nyk., tul. ja 4-skenaarioiden vedenkorkeus sekä vuoden 2018 perkaussuunnitelmassa esitetyt vedenkorkeudet.

Fig 6. Water levels during 1/20a discharge. There is existing and future water levels, Scenario 4 water level and water level according to the dredging plan from 2018.

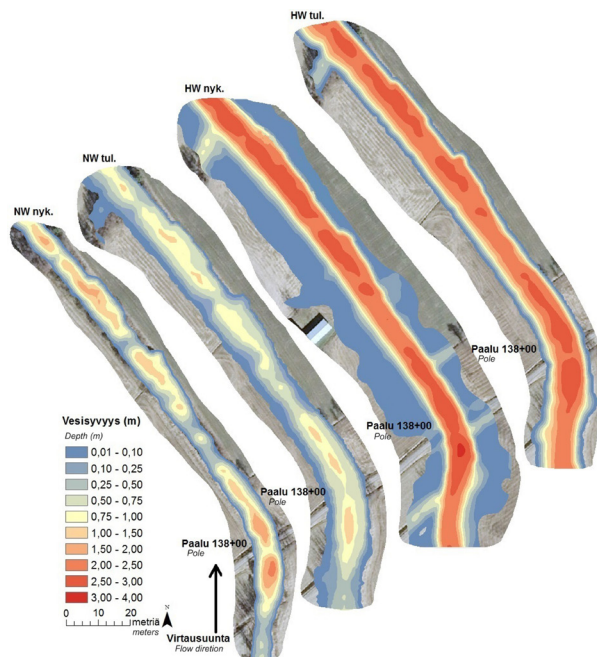
Muutoksia uoman vesisyvytydessä tapahtui erityisesti tulevaisuuden alivirtaamatilanteessa (NW tul.), jossa 62 prosenttia syvyyssoluista madaltui. Tällöin 92 prosenttia uomasta oli syvyydeltään alle 1,50 metriä perkauksen jälkeen. Syvyyssoluista 79 prosenttia madaltui alle 25 senttimetriä. Tulevaisuuden ylivirtaamatilanteessa (HW tul.) 91 prosenttia syvyyssoluista madaltui, mikä näkyi erityisesti tulva-alueiden madaltumisena tai poistumisena. Vesisyvyys kasvoi perkauksen myötä kaikissa skenaarioissa ainoastaan keskusta-alueella, jossa uomaa syvennettiin (kuva 7).

Perkauksen vaikutus vesisyvytyteen tutkimusalueen alajuoksulla oli alivirtaamatilanteessa suurempi kuin ylivirtaamatilanteessa (kuva 8). Tulevaisuuden alivirtaamatilanteessa uoman vesisyvyys oli selkeästi pienempi kuin nykyisessä alivirtaamatilanteessa. Tulevaisuuden ylivirtaamatilanteessa (HW tul.) vesisyvyys uomassa oli hieman matalampi kuin nykyisessä ylivirtaamatilanteessa (HW nyk.). Selkeä ero havaittiin tulva-alueiden vesisyvytydessä, joka perkauksen myötä laski. Suurimmat virtausnopeudet kaikissa skenaarioissa oli koskialueilla, joissa pudotuskorkeus kasvoi hetkellisesti. Virtausnopeus hidastui sekä NW



Kuva 7. Vesisyvyys sekä tulva-alueen laajuus Kirkkosillan kohdalla. Erityisesti HW nyk. ja HW tul. skenaarioiden välillä näkyi, että tulva-alueen koko ei juurikaan pienentynyt, mutta sen vesisyvyys laski. Skenaario 4:ssä uomaa levennettiin kauttaaltaan, jolloin tulva-alue poistui lähes täysin.

Fig 7. Water depth and the inundated areas at Kirkkosilta Bridge. The inundated area size did not change much between the models HW nyk. and HW tul., however the water depth in the inundated area diminished. There is hardly any inundated areas in the Scenario 4, since the channel is now also wider.

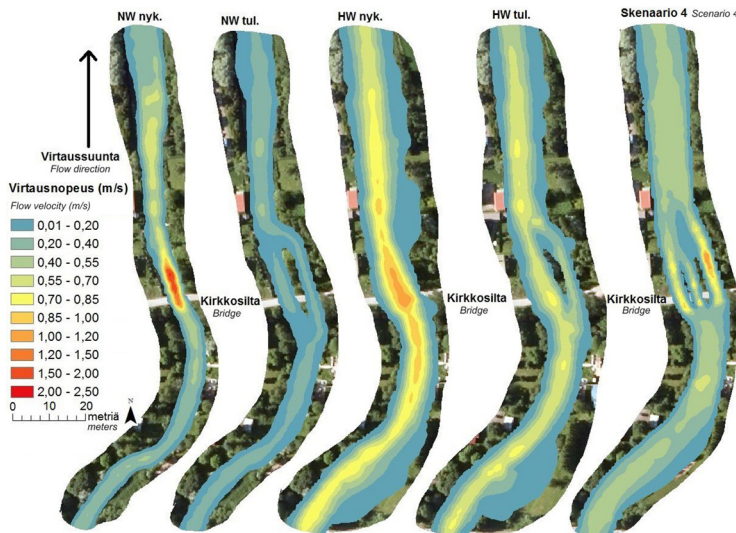


Kuva 8. Alajuoksun vesisyvytydet sekä tulva-alueen laajuus paalun 138+00 kohdalla. Tulva-alueen koko pieni huomattavasti skenaarioiden HW nyk. ja HW tul. välillä. NW tul. skenaariossa vesisyvyys laski verrattuna NW nyk. skenaarioon uoman levennyksen seurauksena.

Fig 8. Water depth and inundated areas on the downstream of Eurajoki River at pole 138+00. The change between the HW nyk. and HW tul. inundation areas can be clearly seen. In NW tul. scenario, the water level dropped, since the channel is wider after the dredging compared to the NW nyk. scenario.

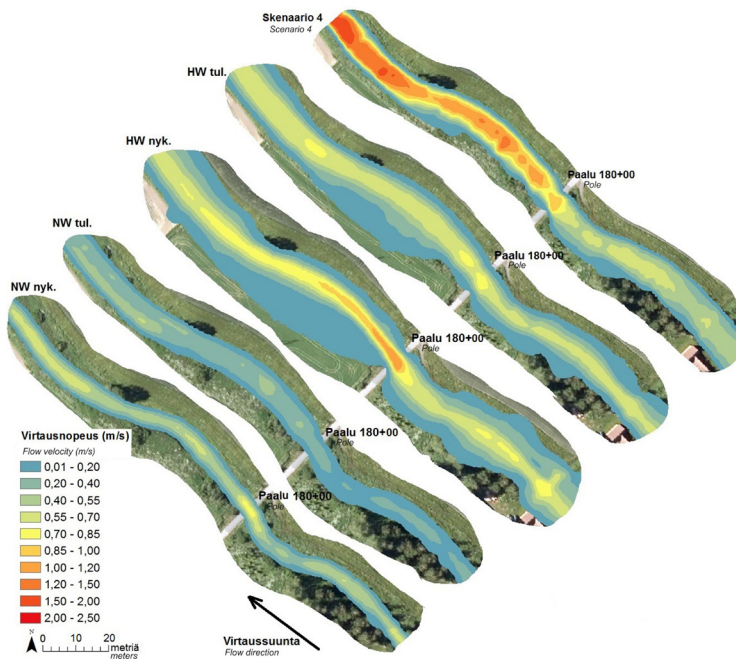
tul. että HW tul. -skenaariossa suhteessa nykyiseen. Vaikutus oli voimakkaampi alivirtaamatilanteessa, jossa sama vesimassa levittäytyy nyt laajemmalle alueelle. Nykyisessä alivirtaamatilanteessa (NW nyky.) virtausnopeus oli alle 0,5 metriä sekunnissa 97 prosentissa virtaussoluista (kuvat 9 ja 10). Tulevaisuuden alivirtaamatilanteessa (NW tul.) 99 prosenttia uoman virtaussoluista oli nopeudeltaan alle 0,5 metriä sekunnissa. Virtauksen keskinopeus hidastui nykyisestä alivirtaamatilanteen 0,13 metristä sekunnissa tulevaisuuden alivirtaamatilanteen 0,03 metriin sekunnissa.

Nykyisessä ylivirtaamatilanteessa virtausnopeus oli alle 0,5 metriä sekunnissa 61 prosentissa soluista (kuvat 9 ja 10). Perkauksen jälkeen 76 prosenttia virtaussoluista oli nopeudeltaan alle 0,5 metriä sekunnissa. Virtauksen keskinopeus ylivirtaamatilanteessa ennen perkausta oli 0,19 metriä sekunnissa ja perkauksen jälkeen 0,18 metriä sekunnissa. Virtaussuunnissa tapahtui jonkin verran yhtenäistymistä perkauksen jälkeistä tilannetta kuvaavissa mallinnuksissa, kun virtausesteitä poistettiin.



Kuva 9. Virtausnopeudet Kirkkosillan kohdalla eri skenaarioiden mukaan. Kirkkosillan koskialue erottui kaikissa malleissa nopeimmin virtaavana alueena. Virtausnopeus kuitenkin hidastui koskessa sekä muussa uomassa perkauksen jälkeistä tilannetta kuvaavissa malleissa. Hidastuminen oli voimakkainta NW tul. skenaariossa, jossa virtausnopeus perkauksen jälkeen oli huomattavasti pienempi kuin ennen perkausta.

Fig 9. Flow velocity at the Kirkkosilta Bridge according to the above scenarios. The rapids of Kirkkosilta were the fastest flowing area. In general, the flow velocities dropped in each scenario after dredging. Biggest change was in NW tul. scenario, where the velocity was clearly slower than before the dredging.



Kuva 10. Virtausnopeudet paalun 180+00 kohdalla eri skenaarioiden mukaan. Virtausnopeus hidastui perkauksen jälkeen kaikissa skenaarioissa. Hidastuminen ei ole yhtä suurta ylivirtaamatilanteessa kuin alivirtaamatilanteessa. Skenaario 4:ssä virtausnopeus häiriintyy erityisesti alajuoksulla gridin reunan aiheuttaman takaisinheijastuman vuoksi eikä siksi ole todenmukainen.

Fig 10. Flow velocity at the pole 180+00. After dredging, the flow velocities dropped in each scenario. The velocity change is not as big in high discharge situation as it is in low discharge. In Scenario 4, the velocities can-not be trusted because of the "bounce back" effect of the grid downstream boundary.

Tulosten tarkastelu

Perkauksen vaikutus tulva-alueiden sijaintiin ja kokoon vaihteli uoman ylä- ja alajuoksulla. Perkaus vähensi tulvimista erityisesti alajuoksulla, jossa vedenkorkeudet laskevat tavoitetasolle. Yläjuoksulla tulva-alueiden vesisyvyys laski, mutta koko pysyi lähes samana. Rakennuksiin kohdistuva tulvavaara pieneni tulevaisuuden ylivirtaamatilanteessa erityisesti alajuoksulla, mutta yläjuoksulla osa rakennuksista oli yhä tulva-alueella. Tämä tarkoittaa, että Euran keskustassa alkuperäistä perkaussuunnitelmaa tulisi muuttaa tulvavaaran vähentämiseksi. Kun keskusta-alueesta mallinnettujen kuuden tarkemman skenaarion tuloksia verrattiin aikaisempiin ylivirtaamatilanteen mallinnuksiin, huomattiin, että uoman osittainkin levennys paaluvälillä 176–210 laski vedenkorkeutta. Paras tulos saatiin leventämällä ja syventämällä uomaa koko paaluväliltä 176–210 (skenaario 4). Tässä skenaariossa uomaa levennettiin sekä Kirkkosillan ylä- että alajuoksulta koko matkalta ja Kirkkosiltaan rakennettiin kolmas virtausaukko. Tulvatilanteessa vesimassa vaati siis huomattavasti enemmän tilaa kuin alkuperäisessä perkaussuunnitelmassa esitettyjen mallinnustulosten perusteella oletettiin.

Euran keskusta-alueella uoman leventäminen tasaisesti koko matkalta on mahdotonta, sillä joen ympäristö on tiheästi rakennettu. Joen reunoilla on kuitenkin umpeen kasvaneita ruovikkoisia joutomaita, jotka poistamalla uomaa pystyttiin leventämään malleihin paikoin useita metrejä enemmän kuin vuoden 2018 perkaussuunnitelmassa esitettiin. Skenaario 4:n mukaan keskustan tulva-alue pieneni 65,8 prosenttia, mikä riitti säästämään keskustassa rakennukset tulvavaaralta 1/20a-tulvatilanteessa. Tulvavesi nousi silti tasolle, jossa se ei pysynyt normaalissa uomassa koko matkalta Euran keskustassa.

Perkaus vaikutti virtausnopeuteen hidastavasti alivirtaamatilanteessa, sillä kaikki virtausnopeuden muutokset ovat riippuvaisia uoman poikkileikkausalasta (Yen & Overton 1973), joka tässä tapauksessa leveni ja syveni. Tällöin sama vesimassa levisi laajemmalle alueelle ja uoman vesisyvyys väheni. Kasvillisuuden perkaus vähentää virtausvastusta (Saarinen ym. 2013), mutta Eurajoessa sen vaikutus virtausnopeuteen alivirtaamatilanteessa oli mallien mukaan pieni. Uomassa, jonka pituuskaltevuus on lähes olematon, veden virtausnopeus hidastuu poikkileikkausalaa kasvaessa kasvillisuuden perkauksesta huolimatta.

Tulevaisuuden ylivirtaamatilanteessa uoman vedenjohtokyky parani suhteessa nykyiseen, sillä uoman tilavuus kasvoi ja vesimassat liikkuvat tehokkaammin. Ylivirtaamatilanteessa uoman alhaisen pituuskaltevuuden ja kitkavoiman hidastava vai-

kutus ei ollut yhtä suuri kuin alivirtaamatilanteessa, sillä vesimassa ja sen voima olivat suurempia. Virtausnopeus tulvatilanteessa hidastui perkauksen myötä hieman nykyisestä (0,01 metriä sekunnissa). Tulevaisuuden alivirtaamatilanteessa virtauksen keskinopeus perkauksen jälkeen 1,8 kuution virtaamatilanteessa oli 0,03 metriä sekunnissa. Tällä hidastumisella voi olla vaikutuksia esimerkiksi veden lämpötilaan ja laatuun, kalastoon ja kasvillisuuteen (Hokanson 1977; Snickars 2009; Salminen & Böhlting 2018). Lisäksi talviaikaan hidas virtaama on otollisempi jääpatojen synnylle; toisaalta se voi myös vauhdittaa jääpatojen jääkannen syntyä (Aho 2016). Tähän vaikuttavat sääolosuhteet.

Virtausnopeuden hidastuessa veden vaihtuvuus hidastuu ja nostaa veden lämpötilaa. Tämä puolestaan lisää rehevöitymistä ja heikentää vedenlaatua alentaen esimerkiksi veden happitasoa (Jonsson 1991; Eaton & Scheller 1996; Caissie 2006). Lisäksi perkauksesta aiheutuva veden samentuminen vähentää valon pääsyä veteen, jolloin hapenkulutus vesistöissä kasvaa. Useat kalat ja kasvit ovat sopeutuneet tietynlaiseen ympäristöön ja muutokset voivat olla kohtalokkaita esimerkiksi kalojen lisääntymiselle ja kasvilajien pärjäämiselle vesistöissä. Eurajoella kalataloudellinen seuranta on ollut käynnissä jo vuosia eikä perkausta ole suunnitteilla vaelluskalojen kannalta kriittisille alueille (Ojala 2020).

Perkauksen jälkeen tulisi huomioida se, että virtausolosuhteet pysyisivät koko uomassa jokiekosysteemin kannalta edullisina kaikissa virtaamatilanteissa. Uoman tilavuuden ja vedenjohtokyvyn kasvaessa Pyhäjärvestä pystyttäisiin juoksuttamaan suurempia vesimääriä ja Eurajoen virtaama voitaisiin pitää jatkuvasti nykyistä suurempana. Tällä voi olla positiivisia vaikutuksia Eurajoen jokiekosysteemille. Tässä tapauksessa vaikutukset Pyhäjärven ekosysteemille tulisi arvioida uudelleen. On tärkeää, että kuivinakin aikoina veden virtaus uomassa pystytään turvaamaan.

Tulevaisuuden ylivirtaamatilanteessa alajuoksulla sijainneet tulvatasangot poistuitvat perkauksen jälkeen. Kun uoman tilavuus ja vedenjohtokyky kasvoivat, tulvavesi poistui tehokkaammin ja rakennuksiin kohdistuva tulvavaara pieneni. Tulvaveden nopeammalla poistumisella voi kuitenkin olla negatiivisia vaikutuksia Eurajoen jokiekosysteemiin ja eliöstöön, sillä tulvatasangot ovat monille kala- ja lintulajeille tärkeitä elinympäristöjä (Korpinen ym. 2018; Kotilainen 2018).

Tarkemmista 176–210 paaluvälän skenaarioista ei käy ilmi, miten Euran keskusta-alueen vedenkorkeuden lasku vaikuttaa perkausalueen alajuoksun vedenkorkeuksiin, mikäli skenaarion HW tul. ja skenaario 4:n geometriat yhdistetään. On mahdollista, että vedenkorkeus laskee alajuoksulla jokiympä-

ristön kannalta epäedulliselle tasolle, mikäli Euran keskustan intensiivisiä perkaustoimia ei huomioida alajuoksulla. Huolellisella suunnittelulla voidaan kuitenkin välttää ongelmia ja varautua vaikeasti ennakoitaviin vaikutuksiin. Kunnostustoimien jälkeisellä seurannalla havaitaan virheet tai perkauksen toimivuus. Perkauksen suunnitteluun, tulokseen ja haittoihin vaikuttavat paikan fyysiset ominaisuudet sekä ympäristön kunto ja spatiaalitemporaaliset ominaisuudet (Wilber & Clarke 2001). Kun perattavan jokuoman ympäristö ja ominaisuudet tunnetaan tarkasti, pystytään monimuotoisuuden kärsiminen välttämään (Sampakoski 2002). Tästä syystä jokuomaa ja sen prosesseja tulisi tarkastella kokonaisuutena. Seuraavaksi perkaussuunnitelma tulisi päivittää näiden mallinnusten yhdistelmällä, jotta saataisiin kehitettyä koko perkausalueelle edullinen suunnitelma.

Jokiympäristöjen suunnittelutyössä hydraulinen mallinnus auttaa muutosten arvioinnissa ja tulkinassa. Sen avulla voidaan tarkastella etukäteen tulvariskienhallinnan vaihtoehtoja ja pystytään parantamaan ja tehostamaan tulvariskienhallinnan toimenpiteitä. Sillä voidaan havainnoida ja suunnitella jokikohtaisesti sopivat toimenpiteet. Suunnittelutyössä tulee huomioida, että virtausmalliin jää aina epävarmuuksia, sillä kaikkia vaikuttajia uomassa ei pystytä huomioimaan. Tärkeintä mallin tuloksien arvioinnissa ja epävarmuuksien välttämässä on valita ne muuttujat, joista tietoa halutaan. Eurajoessa ne olivat vedenkorkeus, virtauskentän ominaisuudet ja vesisyvyys. Avainasemassa on kuitenkin hydraulisessa mallissa käytettävä lähtö- ja validointiaineisto, jonka tulee olla riittävän tarkka ja kattava (Alho ym. 2008; Kasvi ym. 2017).

Johtopäätökset

Perkauksen hyödyt ja haitat jokiympäristön ekosysteemille tulee arvioida tapauskohtaisesti, joten mallinnuksen tuloksia ei voi yleistää muihin jokiympäristöihin. Eurajoen tapauksessa jo alkuperäisen suunnitelman mukaan toteutettu perkaus vähentää tulvimista kaikkialla uomassa. Vaikutukset kuitenkin vaihtelevat spatiaalisesti. Erityisesti Euran keskustassa tarvitaan suunniteltua laajempia perkaustoimia, jotta tulvavaara vähenee. Lisäksi Eurajoella tulee kiinnittää huomiota virtausnopeuden muutokseen sekä sen seurauksiin.

Perkaus vaikuttaa oletettavasti veden laatuun kuten sameuteen myös tutkimusalueen ulkopuolella. Sen vaikutuksia virtausolosuhteisiin ja vesimäärään tällä alueella on kuitenkin vaikea arvioida tämän tutkimuksen perusteella. Ylivirtaamatilanteessa virtausnopeus ei mallien perusteella muutu merkittävästi tutkimusalueella, joten oletettavasti

vesitilanne pysyy ennallaan myös tutkimusalueen ulkopuolella. Alivirtaamatilanteessa virtausnopeuden voimakas hidastuminen voi vaikuttaa nopeuksi myös tutkimusalueen ulkopuolella.

Jokiympäristöjen kunnostuksessa on tärkeä ymmärtää jokiprosessien kytkeytyvyys ja dynamiikka, sekä vaikutukset jokiekosysteemiin. Ennen kunnostustoimenpiteisiin ryhtymistä on suositeltavaa, että joelle tyypillisiä virtausdynaamisia ja ekologisia prosesseja seurataan riittävän pitkään. Huolellinen jokikohtainen taustaselvitys takaa hyvät lähtökohdat perkaukselle. Myös kunnostuksen jälkeen on tärkeää seurata virtausdynamiikkaa ja jokiekosysteemin muutoksia. Vaikka vesistöistä tarvitaan monipuolista ja pitkäkestoista tutkimustietoa, tieteellistä tutkimusta kunnostustoimien vaikutuksista virtausdynamiikkaan ja jokiekosysteemiin on tehty vähän, ja aikasarjat ovat lyhyitä. Eurajoella seurantatietoa on kattavasti perkausta edeltävältä ajanjaksolta, mutta tietoa tulee kerätä myös perkauksen jälkeen.

Tämä tutkimus havainnollistaa lähtöaineiston tarkkuuden merkitystä mallinnettaessa; lähi- ja kaukokartoitukseen perustuva geometria tuotti tarkempia tuloksia kuin poikkileikkausgeometria. Tämä havaitaan erityisesti vertaamalla kaksiulotteisten mallien nykyisiä ja tulevaisuuden vedenkorkeuksia yksiulotteisiin malleihin. Mallinnusten perusteella voidaan todeta, että jokuomaa tulee tarkastella kokonaisuutena, sillä yhden pisteen tai pienen alueen vedenalainen geometria ja virtausominaisuudet vaikuttavat koko uoman virtausolosuhteisiin. Näihin mallinnuksiin pohjautuvia koko jokuoman kattavia jatkomallinnuksia tarvitaan, jotta pystytään arvioimaan perkauksen vaikutukset koko Eurajoessa.

Tutkimus osoittaa, että hydraulinen mallinnus tukee jokiympäristöjen suunnittelutyötä ja auttaa jokiympäristön muutosten arvioinnissa. Mallintamalla pystytään suunnittelemaan jokikohtaisesti sopivat toimenpiteet. Mallinnusten avulla voidaan reagoida muutoksiin ja ongelmiin, kuten esimerkiksi eroosion lisääntymiseen, sillä niiden avulla voidaan tarkastella vaikutuksia etukäteen. Näin pystytään tehostamaan tulvariskienhallintaa ja ennaltaehkäisemään ongelmia, joita voi syntyä kunnostusten yhteydessä.

Kiitokset

Kiitos Pyhäjärvi-instituutille, Turun yliopiston virtavesien tutkimusryhmälle sekä kenttätöissä avustaneille ryhmän nykyisille ja entisille jäsenille. Lisäksi erityiskiitos Euran kunnalle ja VARELY:n vesipuolelle. Kiitos tutkimuksen rahoittajille COMBAT (Suomen Akatemia, Strategisen tutkimuksen neuvosto), Pyhäjärvi-instituutti, Euran kunta ja HYDRO-RDI-Network (Suomen Akatemia) ja Turun yliopistosäätiö.

KIRJALLISUUS

- Alho, P. & Käyhkö, J. (2003) Hydraulinen tulvamallinnus paikkatietomenetelmien avulla: Mödrudalur, Koillis-Islandi. *Terra* 115(3) 139–148. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ELE-903686>
- Alho, P., Sane, M., Huokuna, M., Käyhkö, J., Lotsari, E. & Lehtiö, L. (2008) *Tulvariskien kartoittaminen*. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2008. <http://hdl.handle.net/10138/41688>
- Alho, P., Hyypä, H. & Hyypä, J. (2009) Consequence of DTM precision for flood hazard mapping: a case study in SW Finland. *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research* 6, 21–39. <<https://journal.fi/njs/article/view/2704>>
- Alho, P., Laamanen, L., Kasvi, E., Yunsheng, W. & Flener, C. (2015) Tulvariskien hallinta uusilla teknologioilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 15(1). <https://doi.org/10.14214/ma.6301>
- Bales, J. D., Wagner, C. R., Tighe, K. & Terziott, C. M. (2007) LiDAR-Derived Flood Inundation Maps for Real-time Flood-Mapping Applications, Tar River Basin, North Carolina. *U.S Geological Survey Publications: Scientific Investigations Report* 5032. <https://doi.org/10.3133/sir20075032>
- Ball, J., Babister, M., Nathan, R., Weeks, W., Weimann, E., Retallick, M. & Testoni, I. (2019) *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation*. Commonwealth of Australia. <<http://pid.geoscience.gov.au/dataset/ga/127626>>
- Bates, P. D. (2004) Remote-sensing and flood inundation modelling. *Hydrological Processes* 18, 2593–2597. <https://doi.org/10.1002/hyp.5649>
- Caissie, D. (2006) The thermal regime of rivers: A review. *Freshwater Biology* 55(8) 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- Charlton, R. (2008) *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9780203371084>
- Costabile, P., Macchione, F., Natale, L. & Petaccia, G. (2015) Flood mapping using LiDAR DEM: Limitations of the 1-D modeling highlighted by the 2-D approach. *Natural Hazards* 77, 181–204. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1606-0>
- Coulthard, T. J. (2005) Effects if vegetation on braided stream pattern and dynamics. *Water Resources Research* 41(4). <https://doi.org/10.1029/2004WR003201>
- Dineheart, R.L. & Burau, J.R. (2005) Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamic in a tidal river. *Journal of Hydrology* 314(1–4) 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.019>
- Eaton, J. G. & Scheller, R. M. (1996) Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States. *Limnology and Oceanography* 41(5) 1109–1115. <https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.5.1109>
- Ermilov, A. A., Baranya, S. & Török, G. T. (2020) Image-Based Bed Material Mapping of a Large River. *Water* 12(3) 916. <https://doi.org/10.3390/w12030916>
- Ernst, J., Dewals, B. J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S. & Piroton, M. (2010) Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards* 55, 181–209. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9520-y>
- Flener, C., Lotsari, E., Alho, P. & Käyhkö, J. (2010) Comparison of empirical and theoretical remote sensing based bathymetry models in river environments. *River Research and Applications* 28(1) 118–133. <https://doi.org/10.1002/rra.1441>
- Flener, C., Vaaja, M., Jaakkola, A., Krooks, A., Kaartinen, H., Kukko, A., Kasvi, E., Hyypä, H., Hyypä, J., Alho, P. (2013) Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography. *Remote-Sensing* 5(12) 6382–6407. <https://doi.org/10.3390/rs5126382>
- Graf, W. L. (1987) Fluvial adjustment to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region. *Geological Society* 89, 1491–1501. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<1491:FATTSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<1491:FATTSO>2.0.CO;2)
- Guerrero, M. & Lamberti, A. (2011) Flow field and Morphology Mapping Using ADCP and multi-beam Techniques: Survey in the Po River. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000464)
- Haile, A. T. & Rentjes, T.H.M. (2010) Effects of LiDAR DEM resolution in Flood Modelling: A model sensitivity study for the City of Tegucigalpa, Honduras. *Teoksessa Vosselman, M. G. & Brenner, C. (toim.) ISPRS 2005: Vol. XXXVI Comm. 3 W19 proceedings of the ISPRS workshop laser scanning 2005, 12-15 September, Enschede ITC, The Netherlands*. <http://www.itc.nl/library/papers_2005/conf/rientjes_eff.pdf>
- Hanski, M. (2000) Jokien rakenteellisen tilan arviointi: taustaa EU:n vesipolitiikan puitteiden toteutukseen Suomen virtavesissä. *Suomen ympäristö* 379. <http://hdl.handle.net/10138/40455>
- Harvey, B. C. & Lisle, T. E. (2011) Effects of Suction Dredging on Streams: A review and an Evaluation Strategy. *American Fisheries Society* 23(8) 8–17. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1998\)023<0008:EOSD OS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1998)023<0008:EOSD OS>2.0.CO;2)
- Hickin, E. J. (1984) Vegetation and river channel dynamics. *The Canadian Geographer* 28(2) 111–126. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1984.tb00779.x>
- Hohenthal, J., Alho, P., Hyypä, J. & Hyypä, H. (2011) Laser scanning applications in fluvial studies. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 35(6) 782–809. <https://doi.org/10.1177/0309133311414605>
- Hokanson, K.E.F. (1977) Temperature Requirements of Some Percids and Adaptations to the Seasonal Temperature Cycle. *Journal of the Fisheries*

- Research Board of Canada 34, 1524–1550. <https://doi.org/10.1139/f77-217>
- Horritt, M. S. & Bates, P. D. (2002) Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* 268(4) 87–99. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00121-X)
- Hunter, J. D. (2007) MATPLOTLIB: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering* 9(3) 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Hupp, C. R. & Osterkamp, W. R. (1996) Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology* 14, 277–295. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00042-4](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00042-4)
- Hyyppä, J. & Hyyppä, H. (2007) Kansallisen laserkeilauksen mahdollisuudet. *Maankäyttö* 1/2007, 6–8. <http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk107/mk107_995_hyyppa.pdf> 28.01.2019.
- Jongmin, K., Dongsu, K., Geunsoo, S. & Seujon, K. (2015) Accuracy Analysis of Velocity and Water Depth measurement in the Straight Channel using ADCP. *Journal of Korea Water Resources Association* 48(5) 367–377. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00042-4](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00042-4)
- Jonsson, N. (1991) Influence of Water Flow, Water Temperature and Light on Fish Migration in River. *Norwegian Institute of Nature research* 66, 20–35.
- Jormola, J., Järvelä, J., Lehtinen, A. & Pajula, H. (1998) Luonnonmukainen vesirakentaminen: mahdollisuudet ja erityispiirteet Suomessa. *Suomen ympäristö* 265.
- Kasvi, E., Alho, P., Vaaja, M., Hyyppä, H. & Hyyppä, J. (2013) Spatial and temporal distribution of fluvio morphological processes on a meander point bar during a flood event. *Hydrology Research* 44(6) 1022–1039. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.091>
- Kasvi, E., Laamanen, L., Lotsari, E. & Alho, P. (2017) Flow patterns and morphological changes in a sandy meander bend during a flood—spatially and temporally intensive ADCP measurement approach. *Water* 9(2) 106. <https://doi.org/10.3390/w9020106>
- Kasvi, E., Salmela, J., Lotsari, E., Kumpula, T. & Lane, S. N. (2019) Comparison of Remote Sensing based approaches for Mapping Bathymetry of Shallow, clear water rivers. *Geomorphology* 333, 180–197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.017>
- Kirkkala, T. & Ryömä, H. (2010) *Eurajoen Kasvillisuus selvitys*. Pyhäjärvi-Instituutti.
- Koivumäki, L., Alho, P., Lotsari, E., Käyhkö, J., Saari, A. & Hyyppä, H. (2010) Uncertainties in flood risk mapping: a case study on estimating building damages for a river flood in Finland. *Journal of flood risk management* 3(2) 166–183. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01064.x>
- Korpinen, S., Laamanen, M., Suomela, J., Paavilainen, P., Lahtinen, T. & Ekeboom, J. (2018) *Suomen meriympäristön tila 2018*. Suomen ympäristökeskuksen julkaisuja 4/2018. <http://hdl.handle.net/10138/274086>
- Kotilainen, A., Kiviluoto, S., Kurvinen, L., Sahla, M., Ehrnsten, E., Laine, A., Lax, H.-G., Kontula, T., Blankett, P., Ekeboom, J., Hällfors, H., Karvinen, V., Kuosa, H., Laaksonen, R., Lappalainen, M., Lehtinen, S., Lehtiniemi, M., Leinikki, J., Leskinen, E., Riihimäki, A., Ruuskanen, A. & Vahteri, P. (2018). Itämeri. Teoksessa Kontula, T. & Raunio, A. (toim.) *Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja – Osa 2: luontotyyppien kuvaukset*. Suomen ympäristö 5/2018. Suomen ympäristökeskus & ympäristöministeriö, Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4819-4>
- Korkeusmalli 2x2m (2016) Maanmittauslaitos. <<https://paituli.csc.fi/download.html>> 01.08.2017.
- Lotsari, E., Vaaja, M., Flener, C., Kaartinen, H., Kukko, A., Kasvi, E. & Alho, P. (2014) Annual bank and point bar Morphodynamics of a meandering river determined by high-accuracy multitemporal laser scanning and flow data. *Water Resources Research* 50(7) 5532–5559. <https://doi.org/10.1002/2013WR014106>
- Mansikkaniemi, H. (1986) Suomen jokien tulvaindeksit. *Terra* 98(2) 126–137.
- Millar, R. G. (2000) Influence of bank vegetation on alluvial channel patterns. *Water Resources* 36, 1109–1118. <https://doi.org/10.1029/1999WR900346>
- Muirheart, J.W. & Annable, W.K. (2014) Limitations in extraction of Survey Data from Real-Time-Kinematic GPS ADCP systems. *Journal of Hydraulic Engineering* 140(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000893](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000893)
- Muste, M., Yu, K., Pratt, T. & Abraham, D. (2004) Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II: fixed-vessel measurements. *Flow measurement and Instrumentation* 15(1) 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2003.09.002>
- Ojala, S. (2020) *Eurajoen ja Eurajoensalmen kalataloudellinen yhteistarkkailuohjelma vuodesta 2020 alkaen*. KVVY Tutkimus Oy. <https://www.eurajoki.fi/wp-content/uploads/2020/06/eurajoen_eurajoensalmen_kalataloudellinen_yhteistarkkailuohjelma_2020_alkaen.pdf>
- Ostrowski, P. & Falkowski, T. (2020) Application of Remote Sensing Methods to Study the Relief of Lowland River Valleys with a Complex Geological Structure – A Case Study of the Bug River. *Water* 12(2) 487. <https://doi.org/10.3390/w12020487>
- Phillips, J. V. & Tadayon, S. (2006) Selection of Manning’s Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and Non-Vegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizona. *U.S. Geological Survey: Scientific Investigations Report* 2006–5108. <https://doi.org/10.3133/sir20065108>
- Rennie, C.D. & Rainville, F. (2006) Case study of precision of GPS Differential correction Strategies: Influence on ADCP velocity and Discharge

- estimates. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:3\(225\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:3(225))
- Rinta-Paavola, J. (1994) Kyrönjoen tulvariski ja sen mieltäminen. *Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja* 498. Vesi- ja ympäristöhallitus: Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri.
- Saarinen, N., Vastaranta, M., Vaaja, M., Lotsari, E., Jaakkola, A., Kukko, A., Kaartinen, H., Holopainen, M., Hyypä, H. & Alho, P. (2013) Area-based approach for mapping and monitoring riverine vegetation using mobile laser scanning. *Remote Sensing* 5(10) 5285–5303. <https://doi.org/10.3390/rs5105285>
- Salmela, J., Kasvi, E., Vaaja, M., Kaartinen, H., Kukko, A., Jaakkola, A. & Alho, P. (2020) Morphological changes and riffle-pool dynamics related to flow in a meandering river channel based on a 5-year monitoring period using close-range remote sensing. *Geomorphology* 352(1). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106982>
- Salminen, M. & Böhling, P. (2018) *Kalavarojen käyttö ja hoito : A. Luonnonvarakeskus*. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-655-1>
- Sane, M., Alho, P., Huokuna, M., Käyhkö, J. & Selin, M. (2006) *Opas yleispiirteisen tulvakartoituksen laatimiseen*. Ympäristöopas 127, Luonto ja luonnonvarat. Suomen ympäristökeskus. <http://hdl.handle.net/10138/41018>
- Snickars, M., Sundblad, G., Sandström, A., Ljunggren, L., Bergström, U., Johansson, G. & Mattila, J. (2010) Habitat selectivity of substrate-spawning fish: modeling requirements for the Eurasian perch *Perca fluviatilis*. *Marine Ecology Progress Series* 398, 235–243. <https://doi.org/10.3354/meps08313>
- Syme, W. J., Pinell, M. G. & Wicks, J. M. (2004) *Modelling Flood Inundation of Urban Areas in the UK Using 2D / 1D Hydraulic Models*. 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering, The Institution of Engineers, Australia. Corpus ID: 18402480.
- Tal, M. & Paola, C. (2007) Dynamic single-thread channels maintained by the interaction of flow and vegetation. *Geology* 35(4) 347–350. <https://doi.org/10.1130/G23260A.1>
- Tulvariskien alustava arviointi Eura- ja Lapinjoen vesistöalueilla sekä niiden edustan rannikkoalueilla*. (2011) Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, VARELY/54/07.02/2011. 1.4.2011. <<https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B16F4714E-269C-44E1-B470-3E303D6C64C7%7D/78335>>
- Valtion ympäristöhallinto. (2020) Vesistöennusteet: Eurajoen vesistöalue – Eura keskusta. <<http://www.wi2.ymparisto.fi/i2/34/q3402200y/wqfi.html>> 21.9.2020.
- Veremyen, T. B. (2006) *Using ADCP, Depth Sounder and GOS for bathymetric Surveys*. World Environmental and Water Resources Congress 2006. [https://doi.org/10.1061/40856\(200\)172](https://doi.org/10.1061/40856(200)172)
- Wilber, D. H., & Clarke, D. G. (2001) Biological effects of suspended sediments: A review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries. *North American Journal of Fisheries Management* 21, 855–875. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(2001\)021%3C0855:BEOSSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(2001)021%3C0855:BEOSSA%3E2.0.CO;2)
- Yen, C. & Overton, D. (1973) Shape effects on resistance in flood-plain channels. *Journal of Hydraulic Division* 99(1) 219–223.
- Zhao, J., Chen, Z. & Zhang, H. (2014) A robust method for determining the heading misalignment angle of GPS compass in ADCP measurement. *Flow measurement and Instrumentation* 35, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.10.005>