

Turun yliopiston maantieteen ja geologian laitos

Linnea Blåfield

**TULVASUOJELURUOPPAUKSEN
VAIKUTUSTEN MALLINTAMINEN
- Esimerkkinä Eurajoki**

Maantieteen pro gradu -tutkielma

Asiasanat: Hydraulinen mallinnus, ruoppaus, tulviminen, akustinen virtausprofiilimittaus,
ilmalaserkeilaus, digitaalinen korkeusmalli

Turku 2019

*Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.*

TURUN YLIOPISTO
Luonnontieteiden ja tekniikan tiedekunta
Maantieteen ja geologian laitos

BLÅFIELD, LINNEA: Tulvasuojeluruoppauksen vaikutusten mallintaminen - esimerkkinä
Eurajoki

Pro gradu -tutkielma, 93 s., 2 liites.
40 op
Maantiede
Syyskuu 2019

Tulviminen on osa vesistön normaalia toimintaa, se kuitenkin aiheuttaa sekä aineellisia että aineettomia vahinkoja ympäristölle ja yhteiskunnalle. Yksi yleisimmistä keinoista vähentää tulvimista ja parantaa jokiuoman virtausolosuhteita on ruoppaus. Ruoppauksen vaikutuksia jokien virtausdynamiikkaan on kuitenkin tutkittu jokseenkin vähän moderneja mittaus- ja mallinnus tekniikoita hyödyntäen. Ruoppaus muokkaa uoman geomorfologiaa ja geomorfologia puolestaan vaikuttaa uoman virtaukseen. Lisäksi EU:n laatima tulvadirektiivi velvoittaa jäsenmaitaan kartoittamaan potentiaaliset tulvavaara ja -riskikohteet.

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin ruoppauksen vaikutusta Eurajoen tulvimiseen ja virtauskenttään hydraulisen mallinnuksen ja tulvavaarakartoituksen keinoin. Pääpaino tutkielmassa oli tulvavaaran ja virtauskentän muutoksessa, joihin ruoppaus olennaisesti vaikuttaa poistamalla virtausesteitä ja muokkaamalla uoman geomorfologiaa. Tutkimus suoritettiin hyödyntämällä lähikaukokartoitusmenetelmiä: akustiseen virtausprofiilimittariin perustuvaa syvyysmallinnusta sekä ilmalaserkeilaukseen perustuvaa digitaalista korkeusmallia. Syvyysmalliin perustuva vedenalainen geometria ja ALS-korkeusmalli toimivat hydraulisen mallin pohjana, jolla mallinnettiin erilaisia kaksiuotteisia virtausskenaarioita ennen ja jälkeen ruoppauksen. Aineiston pohjalta tehtiin tulvavaarakartat ja muutostulkinta tulva-alueen laajuudelle sekä virtauskentän muutoksille. Mittausjakso sijoittui kesälle 2017, jonka aikana suoritettiin tutkimusta varten laajamittaiset kenttämittaukset.

Tulokset osoittavat hydraulisen mallinnuksen olevan tehokas väline ruoppauksen vaikutusten arvioinnissa etukäteen. Tarkka lähtöaineisto on kuitenkin avainasemassa mallin tulosten oikeellisuuden kanssa. Ruoppauksen vaikutukset vaihtelevat uomassa spatiaalisesti. Tulva-alueen laajuus ja vesisyvyys pienenevät paikoin paljon ja toisaalla ruoppauksella ei ole huomattavaa vaikutusta. Vaikutuksen voimakkuus kasvaa kuitenkin yläjuoksulta kohti alajuoksua, jossa tulvavesi pysyy ruoppauksen myötä uomassaan. Tulvavedenkorkeudet laskevat koko uoman matkalla, Euran keskustan alueella vaikutus on kuitenkin pieni. Uoman levennyksen vaikutus veden virtausnopeuteen on havaittavissa sekä alivirtaamalla että ylivirtaamalla, kummassakin tapauksessa virtaushidastuu. Virtauskentän muutokset olivat suurimmat alueilla, joilla myös vedenkorkeuden muutokset olivat suurimmat.

Asiasanat: Hydraulinen mallinnus, ruoppaus, tulviminen, akustinen virtausprofiilimittaus,
ilmalaserkeilaus, digitaalinen korkeusmalli

UNIVERSITY OF TURKU
Faculty of Science and Engineering
Department of Geography and Geology

BLÅFIELD, LINNEA: Modeling the effects of dredging on flooding and flow dynamics - case
Eurajoki
Master's Thesis, 93 pp., 2 app.
40 ETCS
Geography
September 2019

Flooding is a part of natural behavior of a watershed, though it might cause financial and material damages to society and environment. One of the most common ways to reduce flooding and improve flow conditions is dredging. However, there is only little research about the effect of dredging on river dynamics. Dredging alters riverbed geomorphology and geomorphology influences to flow of the water. EU has composed a directive, which demands its member countries to map their potential flood areas.

Changes of flow dynamics and flooding were detected by close-range remote sensing methods. Bathymetry measured with ADCP was used to create the riverbed geometry and ALS-based digital terrain model (DTM) for the land surface topography. Together they confirmed the base of a 2D hydraulic model. Different flow scenarios, before and after dredging, were compared to understand the effect of dredging. The survey was done in Eurajoki River in South-West Finland in summer 2017.

The results indicate that hydraulic modeling is effective tool for estimating the effects of dredging in beforehand. To get good results from the model, accurate and precise source material is needed. Results shows that dredging decreases flooding, though the effect varies spatially among the river channel. Making the channel wider had bigger influence than making it deeper. In addition, the decreasing of flooding increases towards downstream. Flow velocities decreases after dredging in both, NQ and HQ, scenarios as the hydraulic efficiency drops. Eddy viscosities on the flood plains decreases and the amount of property and buildings affected by flood drops remarkably.

Keywords: Hydraulic modeling, dredging, flooding, Acoustic Doppler Current Profiler, Aerial Laser Scanning, DTM

Sisällysluettelo	
1 Johdanto	1
2 Tausta ja teoria.....	3
2.1 Virtausdynamiikka	3
2.1.1 Virtaava vesi.....	3
2.1.2 Virtaavan veden liikkeet ja nopeus	5
2.1.3 Virtaava vesi muokkaajana.....	8
2.2 Geomorfologia.....	10
2.2.1 Jokiuoman geomorfologia	10
2.2.2 Kasvillisuuden vaikutus morfologiaan ja virtaukseen	12
2.3 Tulvat	13
2.3.1 Tulviminen	13
2.3.2 Tulvariskien hallinta	16
2.4 Jokiuoman muokkaus.....	19
2.4.1 Jokiuoman muokkausmenetelmät.....	19
2.5 Jokiympäristön mittaus- ja mallinnusmenetelmät	22
2.5.1 Kehitys ja nykytilanne.....	22
2.5.2 Virtausprofiilin mittaus ja syvyyskartoitus	23
2.5.3 Topografian mittaus	25
2.6 Hydraulinen virtausmallinnus.....	27
2.6.1 Mallien luokittelu	27
2.6.2 Hydraulisen virtausmallinnuksen perusteet.....	31
3 Tutkimusalue.....	33
3.1 Eurajoki	33
3.2 Eurajoen vesistöalueen hydrologia.....	34
3.3 Eurajoen historia ja teollisuus	36
3.4 Eurajoen säännöstely ja tulviminen.....	36
4 Aineistot ja menetelmät	39
4.1 Tutkimusasetelma ja kenttämittaukset	39
4.2 Uoman geometrian mittaus	40
4.3 Virtausprofiilimittaus	43
4.4 Vedenpinnan yläpuolisten alueiden kartoittaminen	44
4.5 Vedenkorkeuden mittaus.....	44
4.6 Ruoppaussuunnitelma	46

4.7 Virtausolosuhteiden mallintaminen Delft-3D -ohjelmalla	49
4.7.1 Mallin rakennuksen vaiheet	51
5 Tulokset.....	57
5.1 Ruoppauksen vaikutus tulvavaaraan	57
5.1.2 Vedenkorkeuden muutos	66
5.2 Ruoppauksen vaikutus uoman virtauskenttään	69
6 Tulosten tarkastelu	78
6.1 Ruoppauksen vaikutus tulvavaaraan	78
6.2 Vaikutus virtauskenttään	80
6.3 Ruoppauksen hyödyllisyys.....	81
6.4 Lähikaukokartoitusmenetelmien virhelähteet jokiympäristön muutostulkinnassa	82
6.5 Hydraulisen mallinnuksen ongelmat ja edut.....	83
7 Johtopäätökset.....	85
Kiitokset	86
Lähdeluettelo	86
LIITTEET	94

1 Johdanto

Tulvat ovat yksi yleisimmistä ihmiskuntaa ja ympäristöä uhkaavista luonnonkatastrofeista (Alcántara-Ayala 2002; Grothmann & Reusswig 2006). Ilmastonmuutoksen myötä tulvat tulevat lisääntymään maailmanlaajuisesti ja Suomessa etenkin rannikkoalueilla (Veijalainen ym. 2010). Myös tulvien esiintymisen ajankohta Suomessa muuttuu, sillä ilmastonmuutos vaikuttaa erityisesti eri vuodenaikojen virtaamiin vesistöissä. Ilmastonmuutos ei kuitenkaan ole yksiselitteinen syy tulvimiselle vaan siihen vaikuttavat useat eri tekijät kuten maankäyttö sekä vesistön morfologia ja hydrologia (Hyvärinen & Puupponen 1986).

Tulvien aiheuttamat taloudelliset vahingot ihmishenkien menetysten rinnalla ovat vauhdittaneet tulvatutkimusta viime vuosina (Grothmann & Reusswig 2006). Samat syyt johtivat EU:n tulvadirektiivin (2007/60/EC) laatimiseen, joka velvoittaa jäsenmaita kartoittamaan ja arvioimaan potentiaaliset tulva-alueensa. Jotta tulviin osattaisiin paremmin varautua, tarvitaan tietoa niiden toistuvuuksista ja laajuudesta. Tulvariskienhallinta Suomessa pohjautuu tähän direktiiviin ja hallinnan tukena käytetään tulvavaara- ja tulvariskikarttoja, joilla esitetään tulvan laajuutta ja riskikohteita (Sane ym. 2006; Alho ym. 2008; Parjanne & Huokuna 2014). Hallintaan kuuluu tulvasuojelun ennaltaehkäiseviä keinoja kuten pengerrys, vedenkorkeuden säännöstely, ruoppaus ja kasvillisuuden perkaus uomasta (Parjanne ym. 2018).

Ruoppaus on perinteisesti ollut yleisimpiä keinoja vesistöjen kunnostukseen ja tulvimisen vähentämiseen (Jormola ym. 1998). Sen tarkoitus on ensisijaisesti lisätä vesisyvyyttä ja parantaa sitä kautta virtausolosuhteita jokiympäristössä. Myös kasvillisuuden poistolla on suuri vaikutus uoman vedenjohtokykyyn ja tulvimiseen. Ruoppausta käsittelevät tutkimukset ovat keskittyneet lähinnä vedenlaadullisiin ja ekologisiin ongelmiin eikä sen vaikutuksia jokidynamiikkaan ei juurikaan ole tutkittu moderneja tekniikoita hyödyntäen (Derecki 1985; Wilber & Clarke 2001; Harvey ym. 2011).

Riippuen uoman pohjan materiaalista ja morfologiasta, seuraukset ruoppauksesta vaihtelevat. Uoman pohjan muokkaaminen muuttaa uomassa vaikuttavia voimia kuten leikkausjännitystä ja kulutusvoimaa, jotka edelleen vaikuttavat uoman morfologiaan ja virtausrakenteeseen (Charlton 2008: 69). Ruoppaus ja siitä seuraavat muutokset virtausrakenteessa voivat myös aiheuttaa tulvaongelmia muualla uomassa (Saarinen ym. 2013). Tästä syystä veden virtausrakenteen ja uoman pohjan morfologian muutosten ymmärtäminen on ensiarvoisen tärkeää ruoppausta suunniteltaessa (Alho ym. 2008). Samalla se mahdollistaa ympäristön olosuhteiden muutoksia ennakoivan vesirakentamisen ja jokiympäristön käytön.

Lähikaukokartoitusmenetelmien kehitys tarjoaa uusia ja yhä tehokkaampia keinoja vesistöjen ja jokiuomien kartoitukseen (Alho ym. 2011). Tutkimukset osoittavat maanpinnan korkeusmallilla olevan suurin vaikutus tulvakartoituksen tarkkuuteen (Alho ym. 2009a; Flener 2010). Laserkeilauksen avulla voidaan tuottaa jopa millimetrien tarkka korkeusmalli maanpinnasta (Hyypä & Hyypä 2003; Alho ym. 2009b; Vaaja ym. 2011). Nykyiset laserkeilaimet eivät kuitenkaan läpäise virtaavaa vettä kunnolla, joten uoman vedenalainen geometria on sen ulottumattomissa. Erilaisilla kaikuluotaussovelluksilla voidaan kuitenkin mitata vedenalainen geometria senttien tarkkuudella (esim. Alho ym. 2015; Kasvi ym. 2017).

Kun vesistön valuma-alueen ja vedenalaisen geometrian yhdistää virtaamatietoon ja uoman karkeuskertoimeen, pystytään niiden avulla mallintamaan tulvan laajuus (Bates 2004). Hydraulinen mallinnus on yksi tulvien laajuuden tutkimisen tehokkain menetelmä, jonka avulla mallinnetaan laskennallisesti veden virtaus uomassa sekä tulvatasangoilla (Horrit & Bates 2002; Hunter 2007). Kohteena voi olla yksittäinen tulvatapahtuma tai hydrologinen vuosi - vuosikymmen. Tulosten avulla voidaan suunnitella tulvasuojelun ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä tai tulvariskien hallintaa.

Tämän tutkielman tavoitteena on tutkia ruoppauksen vaikutuksia joen virtausolosuhteisiin ja tulvavaaraan, sekä arvoida ruoppauksen mahdollisia vaikutuksia matalan ja korkean virtaamaan aikaan. Tutkielmassa keskitytään Eurajoen yläosaan, jossa on ollut toistuvia tulvahaittoja uoman liettymisen ja umpeenkasvun johdosta. Alueelle on suunnitteilla ruoppaus Euran kunnan sekä Varsinais-Suomen ELY-keskuksen toimesta, jossa mitoituksena käytetään kerran kahteenkymmeneen vuoteen tapahtuvaa (1/20a) tulvavirtaamaa. Ruoppauksen toivotaan parantavan virtausolosuhteita ja sitä kautta vähentävän tulvimista alueella.

Ruoppauksen vaikutuksia tarkastellaan seuraavin tutkimuskysymyksiin:

1. Mikä on ruoppauksen vaikutus tulva-alueen laajuuteen? Tulvan laajuuden ja tulvavaara-alueiden kartoittaminen ennen ja jälkeen ruoppauksen.
2. Miten virtausrakenteet ja -nopeudet muuttuvat? Lähikaukokartoitusmenetelmien ja hydraulisen mallinnuksen avulla tarkastellaan ruoppauksen vaikutuksia virtauskenttään.
3. Saavutetaanko ruoppauksella toivottu hyöty? Tulosten analysoinnilla selvitetään ruoppauksen mahdolliset hyödyt ja haitat.

Tulvimista ja sen mahdollisia muutoksia tarkastellaan tulvavaarakartoituksella. Kartat esittävät tulvan laajuuden ja vesisyvyyden. Vertailemalla eri virtausskenaarioihin perustuvia tulvakarttoja nähdään ruoppauksen vaikutus alueen tulvavaaraan. Lähikaukokartoitusmenetelmien ja hydraulisen mallinnuksen avulla pystytään havainnollistamaan mahdollisia virtauskentän muutoksia, jolloin ruoppauksen vaikutuksista saadaan todenmukainen kuva jo ennen ruoppauksen toteuttamista. Näin pystytään ennakoimaan ja estämään mahdollisia ongelmia kuten eroosiota ja tulvimista uoman muissa osissa. Tulvavaarakarttoja ja virtausolosuhteita analysoimalla saadaan kattava ennakkotieto ruoppauksen hyödyistä ja haitoista juuri kyseisessä jokiympäristössä.

Tutkimuksen aineisto kerättiin Pyhäjärvi-instituutin tilauksesta toteutetulla laajalla kenttämittauskampanjalla. Mittauksissa kartoitettiin Eurajoen uoman tarkka geometria ja virtauskenttä akustiseen kaikuluotaukseen perustuvilla mittalaitteilla. Senttimetriä tarkka geometria uoman pohjasta yhdistettynä Maanmittauslaitoksen tuottamaan ilmalaserkeilausaineistoon tuottaa tarkan pohjan hydrauliselle mallinnukselle, jonka avulla lasketaan erilaisia kaksiulotteisia (2D) virtausskenaarioita Eurajoelle ennen ja jälkeen ruoppauksen. Mallinnettavien skenaarioiden avulla saadaan luotettavaa tietoa siitä, miten ruoppaus vaikuttaa joen virtausolosuhteisiin.

2 Tausta ja teoria

2.1 Virtausdynamiikka

2.1.1 Virtaava vesi

Veden virtaus joessa tapahtuu yksinkertaistettuna yläjuoksulta kohti alajuoksua painovoiman ja uoman kaltevuuden vaikutuksesta, kitkan toimiessa vastustavana voimana (Chow 1959; van Rijn 2011). Pääsääntöisesti virtauksen suunta ja voimakkuus ovat uoman suuntaisia, jolloin virtausta kutsutaan primäärivirtaukseksi (eng. *primary flow*). Sekundaarisesti virtaukseksi (eng. *secondary flow*) kutsutaan primäärivirtaukseen nähden vertikaalista ja lateraalista virtausta. Virtauksen nopeuteen vaikuttavat muun muassa uoman vesimääriä ja poikkileikkaus. Virtauksen suuntaan vaikuttavat uoman pohjan muoto ja mahdolliset esteet uomassa.

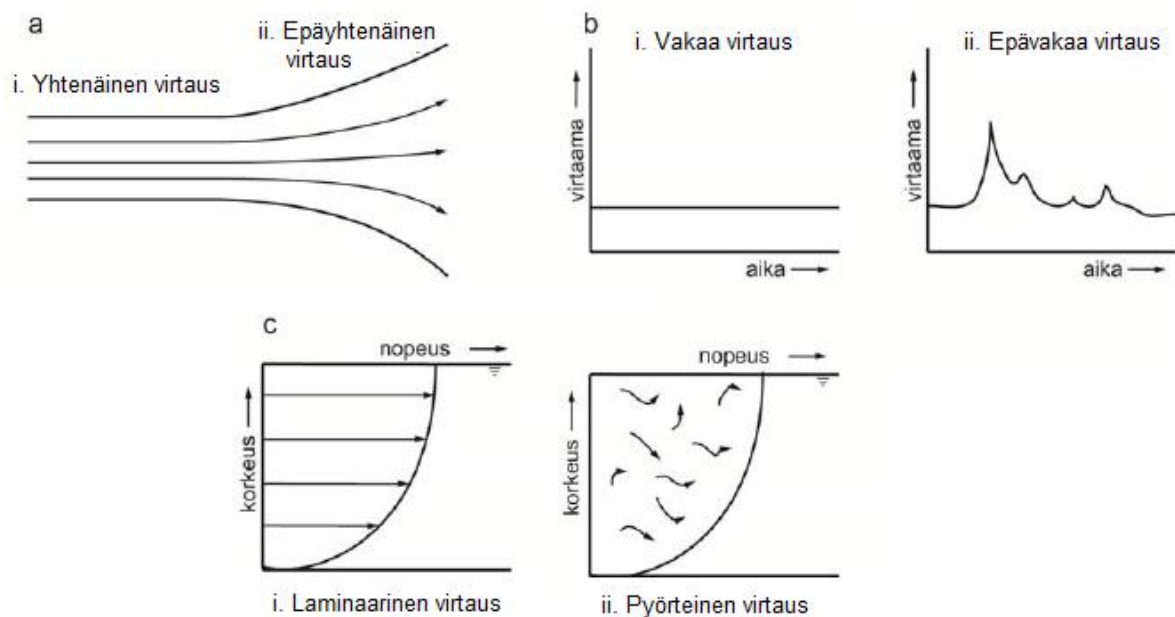
Luonnonuomassa avouomavirtaukseen vaikuttavien voimien merkittävyysjärjestys on yleisesti seuraava (Nagle 2000):

1. Painovoima
2. Turbulenssiin liittyvät voimat
3. Tuuli (ei aina läsnä)
4. Keskipakovoima
5. Coriolisilmiö
6. Pintajännitys
7. Viskositeetti

Todellisuus luonnonuomassa virtaavasta vedestä on kuitenkin monimutkaisempi siihen kohdistuvien eri voimien ja uoman muodon vaikutuksesta. Uoman reunojen ja pohjan muodot, raekoko, sekä kasvillisuus vaikuttavat virtaavaan veteen kohdistuvaan kitkaan sekä turbulenssiin ja sitä kautta vaikuttavat virtaustyyppien luokitteluun (kuva 1) (Charlton 2008: 71; van Rijn 2011). Ensimmäiset ominaisuudet virtausluokittelussa ovat paikan ja ajan suhteen pysyvyys sekä muuttuvuus (taulukko 1) (Dooge 1986; Kolev 2015). Virtaus voi olla tyyppiltään yhtenäistä (eng. *uniform*) tai epäyhtenäistä (eng. *non-uniform*) riippuen siitä, muuttuuko virtausnopeus tietyssä paikassa. Yhtenäinen, paikassa muuttumaton virtaus on mahdollinen vain silloin kun painovoima ja kitka ovat suhteessa toisiinsa tasapainossa (symmetrinen rakennelma) (Knighton 1998: 96). Epäyhtenäinen virtaus muuttuu asteittain tai nopeasti uoman syvyyden tai leveyden muuttuessa (Charlton 2008: 77). Tämä virtaustyyppi on yleisin luonnonuomissa.

Vakaa virtaus (eng. *steady flow*) ei muutu tietyssä paikassa suhteessa aikaan, toisin kuin epävakaa virtaus (eng. *unsteady flow*) muuttuu suhteessa aikaan (Dooge 1986). Tällainen epävakaa virtaus tapahtuu esimerkiksi tulvan aikana, jolloin uoman vesimäärä ja virtausnopeudet eli virtaama kasvaa. Suurin osa virtausteorioista perustuu oletukseen vakaasta yhtenäisestä virtauksesta (Dooge 1986; Charlton 2008:77) samoin kuin matemaattiset mallit (Knighton 1998: 96). Luonnonuomassa, jossa virtausolosuhteet ovat yleensä ajassa ja paikassa muuttuvia, tällaiset vakaat ja yhtenäiset olosuhteet eivät kuitenkaan toteudu.

Laminaarinen – pyörteinen ja verkas – kiitovirtaus luokitteluparilla kuvataan virtauksen etenemistä. Laminaarisessa virtauksessa (eng. *laminar flow*) vesikerrokset eivät sekoitu keskenään vaan vesi virtaa tiettyä liikerataa (Knighton 1998: 96; Charlton 2008: 81). Kerrosten nopeus on kuitenkin eri pohjan hidastavasta kitkavaikutuksesta johtuen, jolloin pintakerrokset virtaavat nopeammin kuin alemmat kerrokset. Kun virtausnopeus kasvaa muuttuu virtaus pyörteiseksi (eng. *turbulent flow*), jolloin vesikerrokset sekoittuvat keskenään ja liikerata virtauksessa on epätasainen (Uijttewaal ym. 2001; Charlton 2008: 81). Laminaarisen ja pyörteisen virtauksen määrittelyssä käytetään yleensä Reynoldsin lukua (eng. *Reynolds number*) (Uijttewaal ym. 2001; Costard ym. 2003). Yksiköttömän luvun määrittelyyn käytetään virtauksen inertiaivoimia (virtausnopeus, hydraulinen säde ja tiheys) sekä molekulaarista viskositeettia ja näiden välistä suhdetta (Knighton 1998: 97).



Kuva 1. Eri virtaustyyppit a) i. yhtenäinen & ii. epäyhtenäinen virtaus, b) i. vakaa & ii. epävakaa virtaus ja c) i. laminaarinen & ii. pyörteinen virtaus (Knighton 1998: 98; Charlton 2008: 77, mukailleen).

Virtaus on laminaarinen, kun Reynoldsin luku on alle 500 ja turbulentiin kun luku on yli 2500. Tässä välissä on vaihettumisalue, jossa virtaus on epävakaata eikä sijoitu kumpaankaan yllä olevista vaihtoehdoista. Turbulenssia eli pyörteisyyttä luonnonuomassa aiheuttaa myös luonnonjoissa uoman suunnanmuutokset ja esteet kuten kivet ja puun rungot. Tämä aiheuttaa poikkeavuuksia esteen läheisissä vesikerroksissa muiden kerrosten liikeratoihin nähden. Esteen alapuolelle saattaa syntyä takaisinvirtauspyörre (eng. *recirculation eddy*), tutummin akanvirta (Charlton 2008: 81).

Hidas, eli verkasvirtaus (eng. *subcritical flow*) ja nopea, eli kiitovirtaus (eng. *supercritical*) määritellään Frouden luvun, inertiaan, ja putoamiskiiktyvyyden välisenä suhteena (Yen 1965; Perkins 1993; Breuer 1998; Borghei ym 1999). Kun painovoima vaikuttaa virtaukseen enemmän kuin inertia, on kyseessä verkasvirtaus. Veden inertiaivoimien vaikuttaessa painovoimaa enemmän on kyseessä kiitovirtaus (Wallis 1980; Grant 199). Kiitovirtaus on melko harvinainen, sillä se vaatii jyrkän uoman kaltevuuden.

Taulukko 1. Avoimen uoman virtaustyyppien ominaisuudet (Knighton 1998: 97, mukailten).

Virtaustyyppi	Virtauksen ominaisuus
Yhtenäinen / epäyhtenäinen	Paikassa tasainen / muuttuva nopeus
Vakaa / epävakaa	Ajassa tasainen / muuttuva nopeus
Laminaarinen / pyörteinen	Rinnakkaisesti yhdensuuntaisesti / sisäisesti sekoittuva virtaus
Verkasvirtaus / kiitovirtaus	Virtaus voi edetä vastavirtaan / ei voi edetä vastavirtaan

Virtauksen avouomassa aiheuttaa painovoima, Frouden luku kuvaa sen vaikutusta virtaukseen ja virtauksen luonteeseen (Chanson 2004). Frouden luku on Fr ja se määrittellään alla olevan kaavan mukaisesti;

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

kaava1

, jossa v = virtausnopeus, g = painovoiman kiihtyvyyys ja L = karakteristinen pituus, eli hydraulinen säde. Jos Frouden luku on <1 , on kyseessä verkkasvirtaus ja luvun ollessa >1 on kyseessä kiitovirtaus.

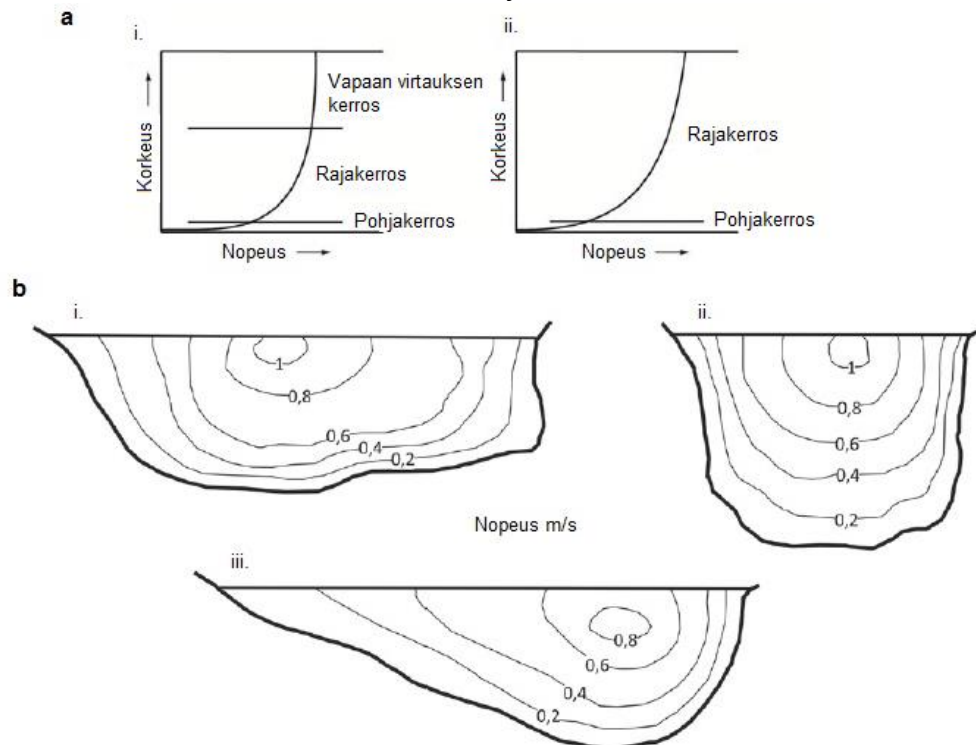
2.1.2 Virtaavan veden liikkeit ja nopeus

Luonnonuomassa nopeus on herkin ja epävakain ominaisuus, sillä siihen vaikuttaa monet eri tekijät (Knighton 1998: 99). Nopeus vaihtelee neljässä eri ulottuvuudessa (Knighton 1998: 100–101; Charlton 2008: 71–76):

1. Etäisyys uoman pohjasta, jossa pohjan läheisimmissä kerroksissa virtausnopeus on nolla., mutta kasvaa kun pystysuora etäisyys muuttuu. Uoman pohjan kitka vaikuttaa virtauksen kulkuun, jolloin virtausnopeus kasvaa rajakerroksessa. Kerroksen yläpuolella kitka ei enää vaikuta vaan vesi virtaa vapaasti. Matalassa uomassa kitka vaikuttaa koko uoman profiiliin virtaukseen.
2. Uoman poikkileikkauksessa uoman reunat hidastavat veden virtausta, jolloin virtausnopeus kasvaa poikkileikkauksen keskipistettä kohti. Nopeimman virtauksen jakautuminen poikkileikkauksessa riippuu uoman suuntauksesta ja muodosta, jolloin esimerkiksi uoman kaarteissa poikkileikkauksen virtausnopeudet ovat jakautuneet epätasaisesti.
3. Alavirran suuntaan silloin kun uoman pohjan sedimentin karkeus ja uoman vastus pienenevät alajuoksulle päin. Tällöin virtaavan veden hydraulinen tehokkuus kasvaa, joka aiheuttaa sen, että virtausnopeus ei pienene vaan se kasvaa suhteessa yläjuoksun olosuhteisiin.
4. Ajassa, riippuen pyörteisyyden nopeasta vaihtelusta. Virtaaman vaihteluiden mukana virtausnopeus muuttuu eri aikaväleillä kuten päivien, viikkojen, kuukausien ja vuosien välillä hetkittäisten vaihteluiden lisäksi.

Virtausnopeuteen vaikuttaa painovoiman lisäksi kitka. Kitka aiheuttaa sen, että uomaan syntyy virtausnopeudeltaan toisistaan eroavia kerroksia (kuva 2) (Griffiths ym. 1981; Charlton 2008:71; Kolev 2015). Vesimolekyylit, jotka virtaavat lähellä uoman pohjaa tai reunoja hidastuvat kitkan vaikutuksesta, tämä aiheuttaa sen, että nopean virtauksen keskus (eng. *high velocity core (HVC)*) sijoittuu useimmiten uoman keskelle lähelle pintaa kitkan vaikutuksen

ollessa pienimmillään. Mitä suurempi osa virtaavasta vedestä on pohjan ja reunojen kanssa kosketuksissa, sitä suurempi on kitkan virtausta hidastava voima (Griffiths 1981; Kolev 2015). Tällainen tilanne on esimerkiksi leveissä ja matalissa kohdissa uomaa.



Kuva 2. Kitkan vaikutus virtausnopeuden jakautumiseen uomassa. a) Pinnan lähellä (i.) virtausnopeus on kovempi kuin lähellä pohjaa (ii.). b) Kitkavoiman vaikutus on pienimmillään uoman keskiosassa lähellä pintaa, jossa tyypillisesti sijaitsee nopean virtauksen keskus (i.) Syvässä profiilissa pohjan kitka ei vaikuta pintakerroksen virtaukseen (ii.) Matalassa poikkileikkaus profiilissa kitka vaikuttaa pintakerrokseen asti (iii.). (Griffiths 1981; Knighton 1998; Charlton 2008; Kolev 2015, mukaillen).

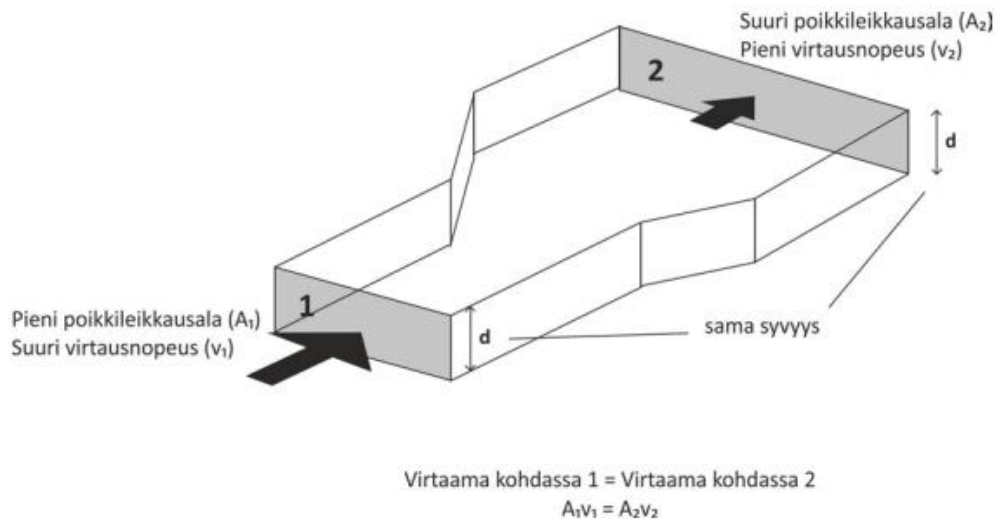
Mitä pienempi määrä vettä on kosketuksissa uoman pohjaan tai reunoihin, sitä pienempi on kitkan hidastava voima (Emmett 1984; Kolev 2015). Ilmiötä kutsutaan hydrauliseksi tehokkuudeksi (eng. *hydraulic efficiency*), joka kertoo, kuinka tehokkaasti uoma pystyy siirtämään vettä eteenpäin. Hydraulinen tehokkuus voidaan laskea kullekin uoman osalle uoman poikkileikkausalan ja veteen kosketuksissa olevan uoman pohjan sekä reunojen yhteenlaskettuun pituuteen perustuen (Liu ym. 2008; Bal ym. 2009). Veden liikettä hidastava kitkavoima on sitä pienempi, mitä pienempi osa vedestä on kosketuksissa uoman pohjaan. Tästä syystä uoman virtausnopeus pohjan lähellä on syvässä kohdissa nopeampi kuin matalissa kohdissa.

Kun halutaan tarkastella virtauksen nopeutta uomassa, siihen voidaan soveltaa niin kutsuttua virtauksen jatkuvuus -teoriaa (eng. *flow continuity*) (kuva 3) (Emmett 1984; Charlton 2008: 76; Gleason 2015; Kolev 2015). Kyseistä teoriaa voidaan soveltaa jatkuvalla tasaisella virtauksella (eng. *steady flow*), jolloin virtaama ei muutu. Virtaaman laskemisessa käytetään virtausnopeutta sekä uoman poikkileikkausala. Kaava on seuraava:

$$Q = v^1 A^1 = v^2 A^2$$

kaava2

jossa Q merkitsee virtaamaa, v^1 ja v^2 ovat poikkileikkauksen keskiarvotetut virtausnopeudet ja A^1 ja A^2 ovat poikkileikkauksien pinta-alat.



Kuva 3. Virtauksen jatkuvuus. Virtaama ei muutu poikkileikkausten (1 ja 2) välillä. Sen sijaan virtausnopeus kasvaa poikkileikkauksessa 1 ja hidastuu poikkileikkauksessa 2 uoman leveyden muuttuessa. Syvyys pysyy koko ajan samana (Charlton 2008: 76; Kolev 2015, mukailleen).

Virtauksen jatkuvuusteoria perustuu siihen, että virtaama pysyy koko uoman matkalta samana, silloin kun vesimäärässä ei esiinny poistumaa tai lisäystä (Charlton 2008: 76). Kun joesta mitataan kaksi poikkileikkausta, toinen kapeasta ja toinen leveästä kohdasta, pysyy virtaama molemmissa samana poikkileikkauksen pinta-alan pienentymisestä huolimatta. Sen sijaan virtausnopeuden on kasvettava saman vesimäärän virratessa pienemmän pinta-alan läpi. Tähän voidaan soveltaa massan säilymlakia, jonka mukaan virtausnopeuden on muututtava uoman kaventuessa (van Rijn 1990). Joki tulvisi pienemmän poikkileikkauksalan yläjuoksulta ja kuivuisi saman poikkileikkauksen alajuoksulta, mikäli virtausnopeus ei muuttuisi. Näin ollen esimerkiksi joen ruoppauksen yhteydessä uoman levennys ja syventäminen hidastavat virtausnopeutta, sillä uoman poikkileikkauspinta-ala kasvaa.

Toinen yleisimmin käytetyistä virtausteorioista on niin kutsuttu Manningin karkeuskerroin, jota käytetään avouomavirtauksen virtausvastuksen kaavana (Brush ym. 1960; Tilp, 1965; Graf ym. 1973; Leutheusser ym. 1973; Yen ym. 1973). Se on yksi tärkeimmistä veden virtausta kuvaavista parametreista, mutta sen määrittely tietyille uomatyypille on hankalaa (Arcement ym. 1989; Li & Zhang 2001). Manningin karkeuskertoimeen vaikuttavat uoman ominaisuudet kuten pohjan karkeus ja kitkavoima, kasvillisuus, mutkaisuus, poikkileikkauksen säännöllisyys/epäsäännöllisyys, lietteisyys, syöpyminen sekä muut supistavat rakenteet. Lisäksi virtaama, vedenkorkeus ja veden viskositeetti, aineskuljetus sekä jääkansi vaikuttavat Manningin karkeuskertoimeen. Nämä kaikki voivat vaihdella uomassa ajan ja paikan suhteen. Yleisesti sen oletetaan määräytyvän uoman pysyvien ominaisuuksien perusteella (Limerinos 1970; Hameed & Ali 2013).

Vaikka Manningin karkeuskerrointa jokiuomassa on tutkittu paljon, ei runsaan kasvillisuuden ja tulvatasankojen Manningin karkeuskertoimesta ole juurikaan tietoa (Limerinos 1970; Arcement ym. 1989; Li & Zhang 2001). Kasvipeitteisissä uomissa Manningin karkeuskerroin vaihtelee huomattavasti Reynoldsin luvun tai veden syvyyden vaihdellessa. Muutoksen suuruus ja suunta ovat kuitenkin uomakohtaista, yleensä Manningin karkeuskerroin pienenee, kun Reynoldsin luku tai syvyys kasvaa (Li & Zhang 2001). Tulvatasangoilla

Manningin karkeuskertoimeen vaikuttavat kuitenkin myös puut, pensaat ja muu jyrkempi kasvillisuus (Limerinos 1970; Arcement ym. 1989). Tällaisille alueille Manningin karkeuskerroin voidaan päätellä laskemalla kasvillisuuden tiheys. Yhtä lailla kertoimeen vaikuttavat ihmisen tekemät virtaukseen vaikuttavat esteet kuten sillat. Merkittävää on kuitenkin se, peittääkö tulvavesi alleen kasvillisuuden vai onko kasvillisuus tulvavettä korkeampaa (Pasche & Rouvé 1985). Ensimmäisessä tilanteessa Manningin karkeuskerroin on pienempi kuin tilanteessa, jossa kasvillisuus on tulvavettä korkeampaa.

Tasaisessa virtauksessa uomassa keskinopeudelle pätee Manningin karkeuskerroin, jota käytetään virtausvastuksen arvioinnissa (Shen 1979; Fisher 2001). Sen yhtälö on seuraava;

$$\bar{u} = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2}$$

kaava3

, jossa n = Manningin karkeuskerroin, R = hydraulinen säde ja S = uoman pohjan kaltevuus.

Kaikki virtausnopeuden muutokset ovat riippuvaisia uoman mittakaavasta (ks. kuva 3). Muutokset voivat tapahtua yhdessä pisteessä, yhdellä osa-alueella tai koko jokiuoman alueella. Hydrologisten prosessien mittakaavatasoja tarkastellaan joko kokonaisuuksina tai osa-alueina, sillä niiden välillä ei ole yleismaailmallista yhteyttä (Smith 1970; Blöschl 2001). Yhden pisteen virtausominaisuudet sisältyvät koko uoman virtausolosuhteisiin ja koko uoman virtausolosuhteet koostuvat näiden yksittäisten pisteiden olosuhteista, näin ollen mittakaavatarkastelu toimii molempiin suuntiin.

Alueellisen mittakaavan lisäksi tapahtuu muutosta myös ajallisesti (Smith 1970). Virtaama uomassa kasvaa, kun valuma-alueen vesimäärä lisääntyy. Jokiuomilla on yksilölliset, niille tyypilliset hydrologiset vasteajat niiden valuma-alueiden ominaisuuksista riippuen (Koivumäki ym. 2010). Vasteajat vaikuttavat virtaaman ajallisiin muutoksiin ja ne vaihtelevat vuodenajoin riippuen haihdunnan ja sadannan suhteesta ja vuodenaikavaihtelusta (Charlton 2008: 27). Vuodenaikavaihteluihin vaikuttavat pääosin vallitsevat ilmasto-olosuhteet sekä sijainti (Nohara 2006; Döll ym 2012). Vuotuisten vaihteluiden lisäksi ajalliseen vaihteluun vaikuttavat myös pienemmät hetkelliset meteorologiset ilmiöt kuten sadekuurot (Charlton 2008: 26). Keväällä lumien sulaminen aiheuttaa suurimmat virtausolosuhteiden ajalliset muutokset Suomessa (Kaatra ym. 2006). Rannikkoalueilla muutoksia aiheuttaa myös runsaat sateet ja Keski-Suomessa useat peräkkäiset sateiset vuodet, jolloin järvien veden varastointikyky ylittyy.

2.1.3 Virtaava vesi muokkaajana

Virtaava vesi muovaa joen muotoa ja muuttaa sitä jatkuvasti (Hugget 2003; Kasvi 2015). Se kuluttaa, kuljettaa ja kasaa sedimenttiaineista, jonka vuoksi jokiuoma on jatkuvassa muutoksessa. Muutoksen nopeus ja joen uoman muoto riippuvat ensisijaisesti sedimenttiaineksen laadusta ja määrästä sekä uoman vesimäärästä (Best 1988; Charlton 2008:117). Uoman syvyys, leveys, kaltevuus ja virtausnopeus ovat komponentteja, jotka vaikuttavat paikallisesti uoman muotoon ja muutokseen (Leopold & Wolman 1983). Uoman pohjan topografia puolestaan vaikuttaa virtausrakenteeseen (Dietrich & Smith 1957) ja virtaavan veden kulkureittiin ja näin ollen vaikuttaa taas uoman muotoon (Blanckaert 2010).

Uoman täytyy sopeutua virtaavan veden lukuisiin muutosta aiheuttaviin voimiin säilyttääkseen muotonsa (Knighton 1998: 96). Virtausvoima on suurimmillaan tulvan aikana, sillä vedenpinnan kasvaessa myös vesimäärä kasvaa. Virtausvoimat jaetaan kahteen eri suureeseen; leikkausjännitykseen (eng. *shear stress*) ja kulutusvoimaan (eng. *stream power*), joista kulutusvoima ottaa huomioon myös virtausnopeuden. Leikkausjännityksellä tarkoitetaan jännityksen määrää, joka syntyy veden syvyydestä yhdessä uoman kaltevuuden kanssa (Charlton 2008: 69). Pohjaan syntyy yhdensuuntainen jännitys veden virratessa ja tämä aiheuttaa sedimentin liikkumisen ja morfologian muuttumisen. Pohjan leikkausjännityksen kaava on seuraava;

$$\tau = \rho g D S$$

kaava4

, jossa ρ on veden ominaistiheys (1000 kg/m^3), g on maan vetovoimasta aiheutuva putoamiskiihtyvyyden ($9,81 \text{ m/s}^2$), D on veden syvyys ja S on vedenpinnan kaltevuus (Charlton 2008: 70).

o

Kulutusvoima kuvaa vesimassasta uomanpohjassa häviävää energiaa (Yang 1972) ja sitä kautta liittyy vahvasti sedimentin kuljetukseen, joen kykyyn kuluttaa, uoman vakauteen ja herkkyyteen tulvan aikana, uoman muodon muuttumiseen ja tulvasangon muodostumiseen tulvan aikana (Bagnold 1966; Nanson & Hickin 1986; Brookes 1987; Alabyan & Chalov 1998; Larsen ym. 2007). Kokonaiskulutusvoimasta (eng. *total stream power*) puhutaan kun tarkastellaan energian häviämistä uoman pituuden suhteen eli kulutusvoimaa pituusyksikköä kohden (Knighton 1999). Energiahäviötä voidaan tarkastella myös pinta-alan suhteen, jolloin puhutaan ominaiskulutusvoimasta (eng. *specific stream power*). Sen yksikkö on W/m^2 ja sen laskemiseksi voidaan käyttää useita eri kaavoja, useimmiten se määritellään kuitenkin vedenpinnan kaltevuuden, veden syvyyden ja virtausnopeuden avulla seuraavasti;

$$\omega = \rho g D S v$$

kaava5

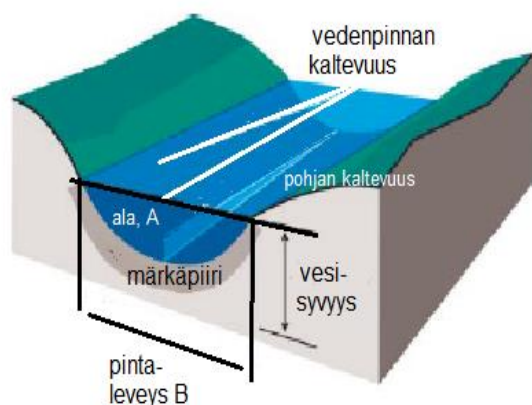
, jossa ρ on veden ominaistiheys (1000 kg/m^3), g on maan vetovoimasta aiheutuva putoamiskiihtyvyyden ($9,81 \text{ m/s}^2$), D on veden syvyys, S on vedenpinnan kaltevuus ja v on veden virtausnopeus m/s (Bagnold 1966).

Kulutusvoimat riippuvat uoman morfologiasta ja vedenpinnan kaltevuudesta, tästä johtuen ne eivät jakaudu tasaisesti uomassa. Kun kulutusvoiman suuruus ja jakautuminen vaihtelee alueellisesti, vaihtelee myös pohjakuljetus, kulutus ja kasautuminen (Bridge & Jarvis 1982; Dietrich & Smith 1984). Mitä paremmin uoma kestää suuriakin kulutusvoimia sitä merkittävämpi vaikutus sillä on eroosioon (Larsen ym. 2007). Ajalliset vaihtelut virtaamassa aiheuttavat kulutusvoimien voimakkuuksien muutoksia, suurimmillaan voimat ovat huippuvirtaaman aikaan (Kasvi ym. 2013b; Lotsari ym. 2014). Virtaaman kasvu aiheuttaa nopean virtauksen ytimen siirtymisen erityisesti meanderinkaarteissa. Suurimmat arvot seuraavat nopean virtauksen ytimen aluetta ja matalammat arvot jakautuvat muualle uomaan.

2.2 Geomorfologia

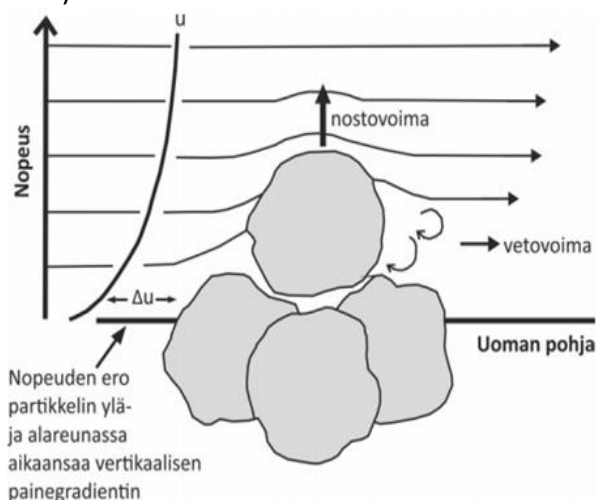
2.2.1 Jokiuoman geomorfologia

Uoman muoto on kolmiulotteinen (x, y, z), ja se jaetaan reunoihin ja pohjaan (kuva 4) (Best 1988; Lane 1999; Gleason 2015). Usein kuitenkin pohjan ja reunojen raja on häilyvä eikä niiden välistä rajaa voida yksiselitteisesti määrittellä. Uoman leveys, syvyys ja kaltevuus sekä poikkileikkausala vaihtelevat uomassa välillä voimakkaastikin riippuen vallitsevista virtausoloista sekä uoman pohjan materiaalista ja raakoosta. Muoto on riippuvainen mittakaavasta (Frothingham & Rhoads 2003; van Rijn 2011). Pienikokoiset muodot uoman pohjassa muuttuvat suurilla muotoilla nopeammin, suurien muutoksien syntyminen, kuten leveyden muutos, pohjan särkän siirtyminen tai törmän sortuminen vaativat pidemmän ajan.



Kuva 4. Uoman hydraulisen geometrian kuvaamiseen yleisesti käytetyt parametrit. Hydraulinen syvyys (D) voidaan laskea jakamalla ala, A pintaleveydellä, B . Hydraulinen säde (R) saadaan jakamalla ala, A märkäpiirillä (USDA 2001, mukailten).

Virtaava vesi kuluttaa, kuljettaa ja kasaa sedimenttiä ja näin ollen uoman pohjan sedimentin laatu ja määrä sekä raekoko määräävät uoman koon ja muodon (van Rijn 2011; Lotsari 2014). Raakoosta ja sedimentin tyypistä riippumatta, pohjan sedimenttipartikkeleihin vaikuttaa kaksi eri virtaavan veden voimaa; partikkeliin virtauksesta kohdistuva vetovoima sekä virtausnopeuden vaihteluista ja eroista johtuva nostovoima (kuva 5). Lisäksi sedimentissä itsessään on sen partikkelikoosta riippuen tietyn suuruinen koheesivoima (Mehta ym. 1989).

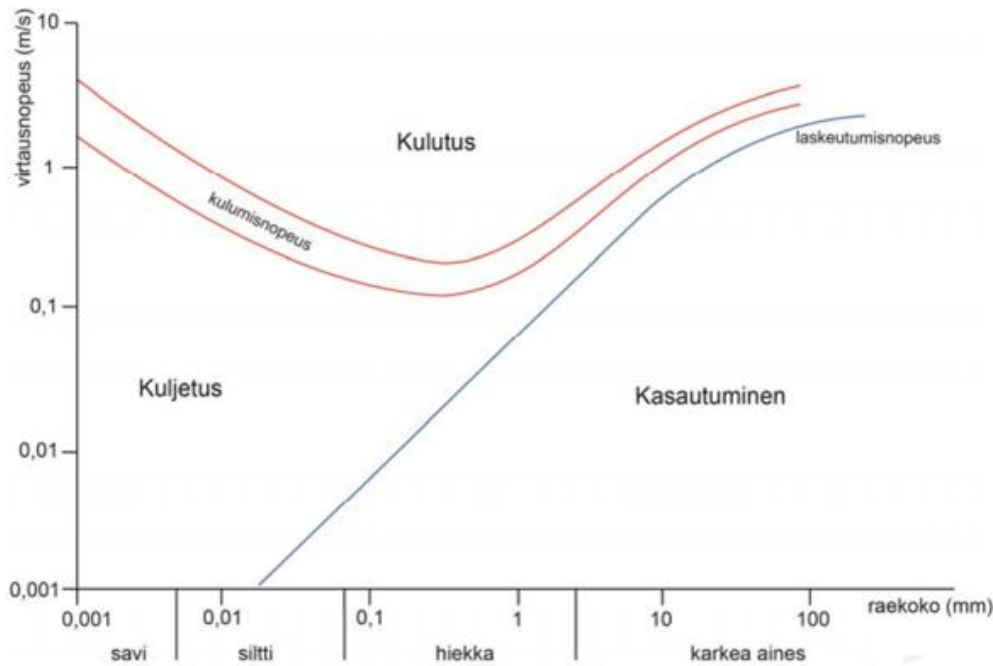


Kuva 5. Partikkeliin kohdistuvat voimat virtaavassa vedessä. Nostovoima johtuu vesipatsaan vertikaalisista nopeuseroista, jolloin partikkeliin kohdistuu ylöspäin suuntautuva voima. Nostovoiman lisäksi virtaavassa vedessä partikkeliin kohdistuu vetovoima, joka johtuu veden ja partikkelin välisestä kitkavoimasta (Knighton 1998; Fryirs & Brierley 2013, mukailten).

Vetovoiman suuruus on suoraan verrannollinen virtauksen nopeuteen, toisin sanoen, mitä nopeampi virtaus sitä voimakkaampi voima kohdistuu sedimenttipartikkeliin (Knighton 1998; Fryirs & Brierley 2013). Nostovoima puolestaan syntyy tasoittumaan pyrkivistä paine-eroista. Bernoullin lain mukaan eri virtausnopeuksien ja vesimassojen välinen paine-ero pyrkii tasoittumaan, sillä ero on sitä suurempi, mitä suurempi on virtaavien massojen nopeusero (Bernoulli 1738). Hitaalla virtauksella on korkeampi paine kuin nopealla virtauksella ja pyrkimys tasoittaa erot aiheuttavat nosteen. Sama periaate nostaa lentokoneen ilmaan. Sedimenttipartikkelit irtoavat pohjasta, mikäli voimien yhteisvaikutus on suurempi kuin partikkelia paikallaan pitävät voimat.

Koheesivoimalla tarkoitetaan aineen keskinäisiä vetovoimia, jotka pitävät aineen koossa ja vastustavat sitä kuluttavia ja rikkovia voimia, kuten nosto- ja vetovoimaa (Mehta ym. 1989; Partheniades 1965; Winterwerp & Van Kesteren 2004: 161-165). Mikäli kaksikomponenttisisä seoksessa A-komponentin (esim. sedimenttipartikkelit) välillä vallitsee voimakas koheesio, ei B-komponentti (esim. vesi) pääse tunkeutumaan A-komponentin partikkelien väliin. Tällöin kumpikin komponentti muodostaa oman faasin (Partheniades 1965). Kun sedimentin koheesivoima on tarpeeksi vahva, ei vesi pysty sitä kuluttamaan tehokkaasti. Sedimenttipartikkelit, joiden välillä vallitsee heikko koheesivoima ovat alttiita virtaavan veden kulutukselle.

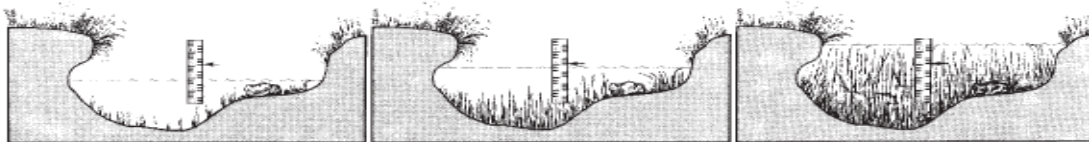
Sedimentin koheesivoima vaikuttaa siihen, miten paljon materiaalia uoman pohjasta lähtee liikkeelle. Savella on voimakkaampi koheesivoima kuin esimerkiksi hiekalla, jolloin savi- ja hiekkapohjainen joki kuluvat ja käyttäytyvät eri tavalla altistuessaan virtaavalle vedelle (Winterwerp & Van Kesteren 2004). Sedimentin kuluminen ja kasautuminen määrittelevät uoman geometrian yhdessä kaltevuuden ja virtaaman kanssa, sillä kaltevuuden kasvu lisää virtaavan veden kulutusvoimaa (eng. *stream power*) (Kennedy 1969; Knighton 1998). Riippuen siitä, missä uoman kohdassa edellä mainitut prosessit tapahtuvat, kuluminen syventää/leventää uomaa ja kasaantuminen taas madaltaa/kaventaa uomaa. Uoma on jatkuvassa muutoksessa sekä ajallisesti että paikallisesti näiden prosessien takia (Hjulström, 1935). Muutoksen nopeus vaihtelee savi- ja hiekkapohjaisessa joessa merkittävästi. Savipohjainen joki muuttuu huomattavasti hitaammin kuin hiekkapohjainen, tämä johtuu materiaalien koheesivoimien eroista (kuva 6) Nopeuteen vaikuttavat erityisesti virtausnopeus ja kulutusvoima, jotka ovat tulvien ajan suurimmillaan ja saavat aikaan suurimmat ja nopeimmat geomorfologiset muutokset (Lotsari ym. 2014).



Kuva 6. Hjulströmin kaavio esittää sedimentin kulutus, kuljetus ja kasautumisnopeuden veden keskiarvoisen virtausnopeuden ja raekoon välisenä suhteena (Hjulström 1935, mukailten). Kulumisnopeus vastaa sitä virtausnopeutta, joka irrottaa tietyn kokoisen partikkelin uoman pohjasta. Vaihtelevista virtausolosuhteista johtuen, kulumisnopeus esitetään yleensä nopeuksien välisenä alueena. Esimerkiksi turbulenssi monimutkaistaa irtoamisprosessia. Kun virtausnopeus laskee, vesi ei enää pysty kuljettamaan tietyn kokoista sedimenttiä mukanaan, jolloin sedimentti laskeutuu joen pohjaan ja kasaantuu. Mitta-asteikko on logaritminen.

2.2.2 Kasvillisuuden vaikutus morfologiaan ja virtaukseen

Kasvillisuus on yksi uoman pääkomponenteista, se kontrolloi virtausrakennetta ja sillä on merkittävä vaikutus fluviaaliprosesseihin (Hickin 1984; Mackin 1956; Nanson and Knighton, 1996; Millar 2000). Se vaikuttaa esimerkiksi uoman tilavuuteen (kuva 7), turbulenssiin, sedimentin kulkeutumiseen, särkkien muodostumiseen ja eroosioon. Erityisesti kasvillisuuden latvusto aiheuttaa turbulenssia vedessä (Nepf & Vivoni 2000). Turbulenssin vertikaalinen sijainti ja vahvuus ovat riippuvaisia kasvillisuuden ja veden syvyyden suhteesta sekä virtauksen voimakkuudesta.



Kuva 7. Kasvillisuuden vaikutus virtausoloihin voi olla huomattavan suuri. Kuvassa on havainnollistettu kasvillisuuden määrän vaikutusta vedenkorkeuteen samalla virtaamalla (Madsen 1995).

Virtauksen, uoman morfologian ja kasvillisuuden suhde on monimutkainen; Kasvillisuuden on osoitettu ohjaavan vettä uomassa ja vaikuttavan tätä kautta uoman muotoon ja virtauskenttään (Tal & Paola 2007; Coulthard 2005). Kasvillisuus voi toimia paikoin esteenä ja pakottaa virtauksen jakautumaan ja muuttamaan suuntaansa. Virtauksen jakautuminen aiheuttaa paitsi turbulenssia, mutta myös sedimentin kasautumista, joka voi erityisesti hiekkapohjaisissa joissa aiheuttaa särkkien ja pienten saarekkeiden syntymistä (Coulthard

2005). Virtausnopeuteen kasvillisuus vaikuttaa hidastavasti, jolloin se vaikuttaa usein myös uoman reunojen eroosion kestävyYTEEN ja koheesivoimaan (Thorne 1990). Hidastuessaan virtauksesta aiheutuva kulutusvoima vähenee ja vähentää uoman reunojen kulumista, jolloin myös eroosio vähenee. Kasvillisuus voi siis toisin sanoen vahvistaa uoman reunoja. Samalla se kuitenkin vähentää uoman tilavuutta jopa 50% runsaasti kasvittuneissa uomissa (Hey & Thorne 1986).

Samaan aikaan kun kasvillisuus vaikuttaa virtausdynamiikkaan ja uoman morfologiaan, kasvillisuuden tyyppi, määrä ja jakauma uomassa on virtausdynamiikan määräämä. Vedenpinnan alapuolisen kasvillisuuden lisäksi törmien ja suojavyöhykkeiden kasvillisuus vaikuttaa uoman tilavuuteen ja virtausnopeuksiin (Graf, 1978; Hupp & Osterkamp, 1996; Huang & Nanson, 1997). Tutkimukset osoittavat, että metsäisillä alueilla virtaavien jokien uomat ja törmät ovat vähemmän kasvittuneita kuin uomat, jotka virtaavat metsättömien, peltomaisten alueiden läpi (James ym. 2004; McBride ym. 2007; Perona ym. 2009). Tämä vaikuttaa esimerkiksi tulvaveden virtausnopeuteen ja korkeuteen normaalin uoman rajojen ulkopuolella.

2.3 Tulvat

2.3.1 Tulviminen

Tulviminen on sää- ja vesistöolosuhteiden aiheuttama luonnonilmiö, jolla tarkoitetaan vesistön vedenpinnan noususta, hulevesien kertymisestä tai merenpinnan noususta aiheutuvaa maan hetkellistä peittymistä vedellä (Mandelbrot ym. 1968; Miller 1977; Käyhkö 2007). Tulvat jaetaan yleisesti kolmeen tyyppiin; meritulviin (kuva 8, A), hulevesitulviin (kuva 8, B) ja vesistötulviin (kuva 8, C). Hydrologiassa tulvaksi määritellään kaikki tilanteet, joissa vesi nousee yli sen luonnollisen uoman tai altaan reunan (Michaud & Pilon 1999). Tulva-alueen kokoon vaikuttavat valuma-alueen maankäyttö, vuotuinen vesitilanne sekä topografia (Rantakokko 2002).



Kuva 8. Tulvat jaetaan yleisesti kolmeen tyyppiin; meritulviin, hulevesitulviin ja vesistötulviin. A. Meritulva Helsingin Kauppatorilla vuonna 2005, jolloin merivesi nousi altaan reunojen yli torille. Kuvassa suojapato tulva-alueen rajaamiseksi. B. Rankkasateiden aiheuttama hulevesitulva Porin keskustassa vuonna 2011. C. Pitkittyneiden sateiden aiheuttama vesistötulva.

Suomessa tulvavirtaamia (HQ) aiheuttavat erilaiset hydrologiset prosessit; keväisin jääpadot sekä lumien sulaminen, muina aikoina suurin tekijä on yleensä runsaat tai pitkäaikaiset sateet (Mansikkaniemi 1986; Rinta-Paavola 1994, Hanski 2004). Nämä kolme tekijää jakautuvat alueellisesti Suomen sisällä (Hyvärinen & Kajander 2005). Tyypillisesti ne jaetaan rannikko-Suomen, järvi-Suomen ja Pohjois-Suomen tulviin (kuva 9). Rannikkoalueilla yleisimpiä ovat rankkasateiden aiheuttamat tulvat, järvi-Suomessa järvet puskuroivat valuntapiikkejä tehokkaasti, jonka ansiosta tulvimiseen vaaditaan usein useampi märkä vuosi tai pitkäaikaisia sateita (Hyvärinen & Kajander 2005:144). Vesistöjen säännöstelyllä on kuitenkin vaikutusta Järvi-Suomen tulviin. Pohjois-Suomessa lumen sulaminen on yleisin tulvien aiheuttaja.



Kuva 9. Eri puolilla Suomea tulvat syntyvät erilaisten hydrologisten prosessien myötä. Jääpadot ja lumen sulaminen aiheuttavat tulvia erityisesti Pohjois-Suomessa, mutta myös satunnaisesti Etelä-Suomen pienissä joissa. Järvi-Suomessa järvet tasaavat virtaamia tehokkaasti, joten tulvien syntyyn vaaditaan pitkäaikaisia sateita. Rannikolla rankkasateet ovat yleisin syy tulvalle (Hanski 2004).

Tulvan toistumisajalla ja todennäköisyydellä kuvataan tulvan yleisyyttä (Hamed ym. 1999). Toistumisaika tarkoittaa aikaa, joka keskimäärin kuluu, ennen kuin tietyn suuruinen tulva esiintyy uudelleen. Tulvat eivät todellisuudessa kuitenkaan esiinny säännöllisesti tiettyjen ajanjaksojen välein, vaan vaihtelevat sääolosuhteiden mukaan, joskus harvemmin ja joskus useammin (Alho ym. 2008; Käyhkö ym. 2007). Toistumisaikaa kuvataan sen esiintyvyyden tiheytenä ajanjaksoittain esimerkiksi 1/10a tai todennäköisyyttä kuvaavin prosenttein kuten > 10%.

Sanallisia kuvauksia käytetään siinä missä toistuvuus- ja todennäköisyyskuvauksia (Alho ym. 2008, Sane ym. 2006:10). Sanalliset kuvaukset on luokiteltu nimellisesti yleisiin (1/10a), melko yleisiin (1/20a), melko harvinaisiin (1/50a), harvinaisiin (1/100a) tai erittäin harvinaisiin (1/250a) tulviin. Toistumisaika ilmaistaan usein esimerkiksi 1/10a ja 1/250a, tarkoittaen tulvaa, joka esiintyy todennäköisesti kymmen kertaa sadassa vuodessa (1/10a) tai neljä kertaa tuhannessa vuodessa (1/250a). Todennäköisyys ilmaistaan vuotuisen todennäköisyyden mukaan prosenttilukuna esimerkiksi > 10% tai < 0,4%.

Virtaamat ja vedenkorkeudet tietyn toistuvuuden tulvalle voidaan määrittää vesistömalleilla tai tilastollisin menetelmin (Ollila ym. 2000; Alho ym. 2008) Vesistömallit kuvaavat tietyn vesistön veden kulkeutumista ja hydrologista kiertoa. Suomen Ympäristökeskuksella (SYKE) on käytössä vesistömallijärjestelmä, joka kattaa koko Suomen. Sitä käytetään vesistöjen virtaamien, vedenkorkeuksien ja pohjavesien korkeuksien ennustamisessa. Järjestelmän alta löytyvät tiedot mm. tulvaennusteista ja tulvatilannekartoista, jäänlähdestä, valunnasta sekä vesien lämpötilasta ja levätilanteesta. Tilastollisissa menetelmissä ekstrapoloidaan haluttua toistuvuutta vastaavat virtaamat ja sovitetaan niihin todennäköisyysjakauma. Näiden avulla pystytään laskemaan tulvatilannetta vastaavat vedenkorkeudet. Mallinnus ja tarkastelujakson pituus lisäävät kuitenkin aina epävarmuutta tulvan toistuvuuden arviointiin, joten niitä on tarkasteltava suuntaa-antavina.

Tulviminen on osa hydrologista kiertoa ja sitä kautta se on erityisen herkkä ilmastonmuutoksen vaikutuksille (Sane ym. 2006; Käyhkö ym. 2007). Esimerkiksi muutokset sadannassa ja haihdunnassa sekä varastoitumisessa (lumipeite) ja jossain määrin myös lämpötilassa altistavat tulville. Suomessa lumi on tärkeä osa hydrologista kiertoa ja sen sulaminen keväällä saattaa aiheuttaa tulvia (Vehviläinen & Huttunen 1997; Beldring ym. 2006). Ilmastonmuutos kuitenkin saattaa vähentää tai kasvattaa tulvimisen riskiä paikasta riippuen.

Ilmastonmuutoksella on lukuisia vaikutuksia jokien virtaamiin ja sitä kautta tulvimiseen (Timonen ym. 2003; Veijalainen 2005; Veijalainen ym. 2010). Tulvien on ennustettu lisääntyvän ympäri maailmaa ja tutkimusten (Veijalainen ym. 2010; Agrawala ym. 2003; Hallegatte ym. 2013) perusteella erityisesti rannikolla tulvista tulee yleistyvä ongelma. Lisääntyneisiin tulvaongelmiin on havahduttu myös Euroopan tasolla ja EU on laatinut tulvadirektiivin (2007/60/EC), jota sen jäsenmaiden tulee noudattaa. Direktiivi velvoittaa jäsenmaitaan kartoittamaan kaikki tulvimiselle potentiaaliset alueet, tekemään riskikarttoja sekä erilaisia tulvariskien ja -suojelun hallintasuunnitelmia.

Suomessa tulvien esiintyminen ympäri vuoden kasvaa suurimmassa osassa maata, erityisesti rannikolla (Veijalainen ym. 2010). Ilmastonmuutoksen myötä lisääntynyt sadanta lisää tulvia myös järviolueilla ja niiden purkautumisjoissa. Vaikutukset vaihtelevat kuitenkin eripuolella Suomea, sillä Suomessa on useita erilaisia jokiverkostoja, valuma-alueita ja järvikomplekseja. Virtaamien seuranta osoittaa, että valunta talvella on lisääntynyt ja tulvapiikit keväällä aikaistuneet, mutta tulvien koko ei ole juurikaan muuttunut (Korhonen & Kuusisto 2010). Sadannan kasvaessa tai vähentyessä paikoin, myös lumen määrään tulee muutoksia. Suomessa tulvien odotetaan yleistyvän ja pahenevan, sillä sadannan on ennustettu kasvavan 13-26 % vuoteen 2080 mennessä (Ruosteenoja & Jylhä 2007).

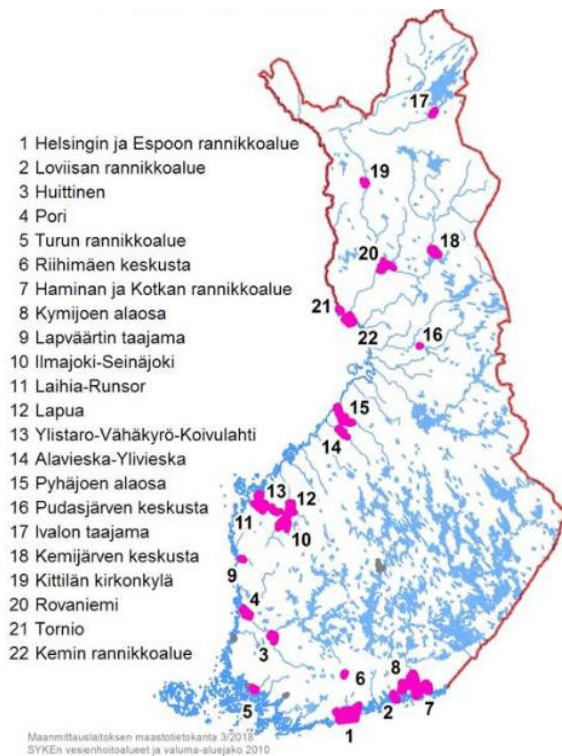
Sään ääri-ilmiöiden, kuten rankkasateiden odotetaan yleistyvän (Beniston ym. 2007). Toisaalta ennustetun 2-6 °C asteen lämpötilanousun oletetaan vähentävän lumen määrää jopa 70 % vuoteen 2080 mennessä ja samalla vähentävän keväällä lumen sulamisesta aiheutuvia tulvia. Ainoastaan Pohjois-Lapissa kevättulvat ovat ennusteiden mukaan edelleen tulvimisen yleisin ajankohta myös tulevaisuudessa (Veijalainen ym. 2010).

Virtavesien tulvat aiheuttaa usein äkillinen sään ääri-ilmiö kuten rankkasade, mutta myös massavieremät sekä runsaslumiset talvet kerryttävät jokien vesimassaa (Käyhkö ym. 2007). Lisäksi valuma-alueiden hydrologisessa vasteajassa on spatiaalisia eroja, topografia, alueen muut piirteet kuten kasvillisuus ja maaperä sekä uomaverkosto luovat hydrologialtaan erilaisia kokonaisuuksia. Esimerkiksi maaseutu valtaisilla alueilla peltojen ojitus nopeuttaa sadevesien virtausta jokiin, joka nopeuttaa tulvan nousua (Sane ym. 2006). Kun vesimassa kasvaa normaalia suuremmaksi, se ei enää mahdu luonnolliseen uomaansa ja aiheuttaa tulvimista. Tulvien aikana tapahtuvien veden virtausrakenteen ja uoman pohjan morfologian muutosten ymmärtäminen mahdollistaa ympäristön olosuhteiden muutoksia ennakoivan vesirakentamisen ja jokiympäristön käytön (Alho ym. 2008). Joen tulviessa vesimassa hakee topografian perusteella helpoimman reitin virrata ja saattaa luoda uusia uomia sekä peittää vanhan alleen kokonaan.

2.3.2 Tulvariskien hallinta

Tulvariskien hallinnalla tarkoitetaan toimenpiteitä, joiden tavoitteena on arvioida ja vähentää tulvariskejä sekä estää tai vähentää tulvien aiheuttamia vahinkoja (Schanze 2006; Koivumäki ym. 2010; Merz ym. 2010). Tällaisia toimenpiteitä ovat esimerkiksi tulvakartoitus, tulvariskistä tiedottaminen ja tulvasuojelu. Toimenpiteiden kattavuus voi olla koko vesistöalue tai yksittäinen kohde, kuten osa jokiuomaa. Ne voivat olla suunnattuja tulvariskin vähentämiseen tai valmiustoimiin ja toimintaan itse tulvatilanteessa.

EU:n laatima tulvadirektiivi (2007/60/EC) velvoittaa jäsenmaitaan kartoittamaan tulvariskialueet (kuva 10) sekä laatimaan niiden hallintasuunnitelman. Tulvariskikartat perustuvat tulvavaaraan (Koivumäki ym. 2010). Direktiivin mukaiset tulvavaarakartat on laadittava eri toistuvuusajoille, esimerkiksi tilastollisesti kerran 20 vuodessa tapahtuvalle tulvalle. Suomessa toistuvuusajat, joille tulvavaarakartat on vähintään laadittava ovat 1/20, 1/50, 1/100, 1/250 ja 1/1000 vuodessa esiintyvät tulvat (Hyvärinen & Kajander 2005). Tulvavaarakarttojen lisäksi on laadittava tulvariskikartat, joissa esitetään tulvaan liittyvät mahdolliset vahingot, mahdollisten kärsivien asukakiden lukumäärä ja alueella harjoitettavan taloudellisen toiminnan tyyppi sekä sen mahdollisesti aiheuttamat riskit, esim. kemikaalivuodot.



Kuva 10. Suomen merkittävimmät tulvariskialueet, kun tarkastellaan vesistöjen tai merenpinnan noususta johtuvia tulvia. Rannikkoalueilla tulvariskiä lisäävät rankkasateet (kuva SYKE).

Tulvat ovat luonnollinen osa vesistöjen toimintaa varsinkin alueilla, joilla järvisyys on vähäistä (Plate 2002). Järvet tasaavat virtaamavaihteluita ja näin ollen vähentävät tulvavaaraa ja -riskiä järvisillä alueilla (Hyvärinen & Kajander 2005: 144). Ihminen kuitenkin muokkaa ympäristöä ja vesistöjä ja sitä kautta saattaa vaikuttaa vesistöjen luontaiseen toimintaan, joka puolestaan kasvattaa tulvavaaraa ja sitä kautta tulvariskiä. Tulvavaaralla tarkoitetaan tulvan laajuutta ja sen vesisyvyyttä, -riskillä tarkoitetaan yleisesti tulvavahingon tai – vaaran uhkaa (Plate 2002; Schanze 2006; Alho ym. 2008). Riskin tarkka määrittely on tapauskohtaista, mutta sen voidaan todeta koostuvan ainakin tulvavaarasta ja kohteen haavoittuvuudesta, käytännössä se siis tulkitaan mahdollisten vahinkojen kautta. Tulvavaaraan ja -riskiin vaikuttavat tulvaveden virtausnopeus ja syvyys. Haavoittuvuudella tarkoitetaan kohteiden alttiutta tulvavahingoille ja sekä niiden mahdollisia tuhoja (Alho ym. 2008).

Tulvariskejä voidaan vähentää ennakkoon toteutettavilla toimenpiteillä, joiden tarkoitus on tulvavahinkojen ja vahinkopotentiaalini vähentäminen (Plate 2002; Merz ym. 2010). Tarkoitus on myös estää tulvariskiä kasvavasta ennestään. Maankäytönsuunnittelu on yksi tehokkaimmista tulvariskien ennaltaehkäisyistä, kaavoituksella ja huomioimalla rakennuspaikat ja -tavat voidaan vähentää alueen herkkyyttä tulvien aiheuttamille vahingoille. Rakenteilla ja toimenpiteillä voidaan ehkäistä tai pienentää vesistötulvien syntymistä (Alho ym. 2008, Koivumäki ym. 2010). Patorakenteet, tekojärvet sekä lampimaiset altaat joissa toimivat tulvavesien pidätykseen. Vesistön säännöstely ja juoksutus pienentävät tulvariskiä erityisesti jokiuomassa. Ennaltaehkäiseviä keinoja ovat myös tulvien todennäköisyyden ja vahinkojen arviointi sekä tulvavaara- ja tulvariskikartoitukset.

Tulvimisen vaikutuksia voidaan pitää joko haitallisina tai hyödyllisinä, riippuen näkökulmasta (Hyvärinen & Kajander 2005; Alho ym. 2008). Nykypäivänä tulvat koetaan yhä enenevässä määrin haitallisina ja niiden torjumiseksi tehdään suuriakin investointeja (Sane ym. 2006; Jha ym. 2012). Tulvavahingot ovat yleistyneet ja kasvaneet niin Suomessa kuin

maailmanlaajuisestikin (Sane ym. 2006; Alho ym. 2008). Tulvat voivat aiheuttaa vahinkoja niin ympäristölle, ihmiselle, infrastruktuurille sekä taloudelle. Vahinkojen luokittelussa käytetään luokittelua aineellisiin ja aineettomiin sekä suoriin ja epäsuoriin vahinkoihin (Alho ym. 2008; Koivumäki ym. 2010). Aineellisia vahinkoja ovat esimerkiksi omaisuusvahingot ja liikennehäiriöt, joista omaisuusvahingot luetaan suoriin vahinkoihin ja liikennehäiriöt epäsuoriin. Aineettomia vahinkoja ovat esimerkiksi ihmishenkien menetykset. Lisäksi vahingot jaetaan primäärisiin ja sekundaarisiin sen perusteella, ovatko vahingot suoria vai epäsuoria.

Tulvasuojelulla on osa tulvariskien hallintaa ja sen avulla pyritään ennaltaehkäisevästi vähentämään tulvavahinkoja esimerkiksi pysyvien rakenteiden suunnittelulla ja rakentamisella (kuva 12) (Plate 2002). Rakenteiden tarkoitus on estää tai vähentää tulvimista sekä sen aiheuttamia vahinkoja ja haitallisia vaikutuksia. Tällaisia rakenteita voivat olla esimerkiksi tulvaluukut, joista vesi ohjataan pengerrysalueille tai pelloille, jolloin vältetään vahingot taajama-alueilla (kuva 11). Muita perinteisiä keinoja vahinkojen ja haittojen torjumiseen ovat jokien perkaus tai ruoppaus, rantojen pengerrys sekä vesistön säännöstelytoimenpiteet, kuten säännöstelyaltaat (Schanze ym. 2007; Alho ym. 2008; Jha ym. 2012).



Kuva 11. Kyrönjoen tulvavesi on juoksetettu tulvaluukkujen kautta pelloille, jotta vältettäisiin vahingot taajama-alueilla. Tulvavesien juoksetus pelloille on yksi tulvasuojelun keinoista (kuva Pohjanmaan Ely-keskus).

Ympäristövaikutusten arviointi on iso osa tulvasuojeluhankkeita ja nykyään vesistötöissä pyritäänkin luonnonmukaisuuteen ja veden pidättämiseen valuma-alueella (Rantakokko 2002; Koivumäki ym. 2010; Saarinen ym. 2013). Vanhojen tulvatasankojen säilyttäminen, uusien tulva-alueiden luominen tai erillisten tulvauomien ja eroosiosuojien rakentaminen on osa luonnonmukaista tulvasuojelua. Esimerkiksi joen törmien suojavyöhykkeet vähentävät tulvan aiheuttamaa eroosiota jopa viisinkertaisesti (Saarinen ym. 2013). Tulvasuojelutoimenpiteillä ei silti välttämättä pystytä poistamaan täysin tulvariskin olemassaoloa (Plate 2002).

Yksityiskohtainen ja yksilöllinen suunnittelu jokaiselle kohteelle on tärkeää, jotta saadaan paras mahdollinen vaste hankkeelle (Klijn ym. 2004). Suunnitelman toimivuutta voidaan ennalta arvioida ja testata erilaisin mallein ja ennustein. Kohteet muokataan suunnitelmia ja malleja vastaavaksi, mutta siitä, miten ne toimivat käytännössä luonnossa ei ole silti täysiä

takuita. Tulvasuojelutoimenpiteen onnistuneisuutta arvioidaan toteutuksen jälkeen sen perusteella, miten hyvin se tuottaa toivottua tulosta (Koivumäki ym. 2010; Saarinen ym. 2013).

Perkaus tai ruoppaus voi toisaalta myös edesauttaa tulvimista, sillä se saattaa nopeuttaa veden virtausta uomassa, ja jos veden poistuma uoman alajuoksulla ei vastaa uoman yläjuoksulta syötettävää vesimäärää, alkaa uoma tulvia (Saarinen ym. 2013). Uoman kaltevuus vaikuttaa myös olennaisesti tulvimiseen sekä vesimäärän poistumisnopeuteen, samoin kuin se mihin vesi laskee ja mikä on laskupaikan meren/järven vedenpinnan korkeus tai se, onko uomaa padottu (Klijn ym. 2004).

2.4 Jokuoman muokkaus

2.4.1 Jokuoman muokkausmenetelmät

Jokuoman muokkauksella tarkoitetaan jokuoman luonnolliseen toimintaan puuttumista ihmisen toimesta (Seuna 1986; Jormola & Pajula 1999). Yleisin syy uoman muokkaukselle on yhteiskunnan tarpeet esimerkiksi energiantuotannon tai tulvasuojelun näkökulmasta. Muokkauksen keinoja on useita eri tyyppisiä riippuen sen tarkoituksesta. Yleisimpiä syitä muokkaukselle on virtaaman säännöstely, tulvavesien ohjaus, vesistön olosuhteiden parantaminen, eroosion estäminen tai vedenkorkeuden nosto (Harjula ym. 2003; Huhtala ym. 2003).

Säännöstelylle ja veden ohjaukselle syynä on usein virtaaman tasaaminen, joka voi olla tarpeellista erityisesti tulvatilanteessa (Helmiö 2003). Erilaisilla säännöstely- ja ohjaurakenteilla ja toimenpiteillä voidaan ohjata tulvavettä ja vähentää tulvimista esimerkiksi taajamissa tai kaupungeissa. Yleisiä tulvaveden säännöstelyn ja ohjailun keinoja ovat padot, tulvaluukut ja tulvauomat (kuva 12) (Turunen 1958). Padoilla pyritään tasaamaan virtaamaa joen eri vaiheilla. Ne on kuitenkin suunniteltava tarkasti siten, että tulvatilanteessa ne eivät nosta entisestään vedenkorkeutta tulva-alueella vaan johtavat vettä tehokkaasti.



Kuva 12. Erilaisia jokuoman muokkauksen keinoja. Samoja keinoja käytetään tulvasuojelussa. A. Eroosiosuojaus estää virtaavaa vettä kuluttamasta uoman törmä. B. Pohjapadot pidättävät kiintoainesta ja nostavat vedenkorkeutta. C. Tulvauomat ohjaavat tulvatilanteessa vettä vaihtoehtoiselle reitille. D. Tulvaluukut säännöstelevät ja ohjaavat virtaavaa vettä (kuvaajien nimet kuvissa).

Tulvaluukut ovat rakenteita, joista tulvavettä ohjataan pois uomasta esimerkiksi pelloille tai pengerrysalueille (kuva 11). Suomessa ne ovat käytössä erityisesti Pohjanmaalla, jossa on toistuvia kevättulvia lumien sulamisen yhteydessä (Jormola 2003). Tulvauomat ovat joen uoman yhteyteen kaivettavia matalampia maastonkohtia, jotka ovat suurimman osan ajasta kuivina, mutta tulvatilanteessa vesi virtaa niiden kautta (Harjula ym. 2003). Muita keinoja parantaa vesistön olosuhteita ja vähentää tulvimista ovat uoman ruoppaus ja perkaus.

Suomessa ruoppausta säätelee vesilaki ja kaikkiin yli 500 kuution ruoppauksiin tarvitaan lupa. Ruoppauksella tarkoitetaan vesistön pohjan muokkaamista joko kaivamalla (kuva 13) tai hydraulisesti imemällä, tarkoituksena veden syvyyden lisääminen ja vesistön olosuhteiden parantaminen (Wenger ym. 2017). Ruopattavaa massaa kutsutaan sedimentiksi, jonka paksuus tulee arvioida ennen ruoppausta. Sedimentti on vesistön pohjaan, luonnontilaisen saven päälle kertynyttä eloperäistä ja mineraalipitoista massaa. Ylimääräisen sedimentin ja kasvillisuuden poisto jokiuomasta antaa tilaa vedelle, parantaa veden virtausta ja sitä kautta myös veden vaihtuvuutta.



Kuva 13. Ruoppaus toteutetaan usein rannoilta käsin kaivurilla kaivamalla. Otollisin aika ruoppaukselle on talvella, sillä roudan ansiosta maaperä kestää raskaan ruoppauskaluston (kuva Pasi Lampinen).

Ruoppauksen vaikutuksia jokiympäristössä on tutkittu jokseenkin vähän modernein mittausmenetelmin (Harvey ym. 2011). Tutkimukset keskittyvät kalaston, muun eliöstön, kasvien ja ympäristön toipumiseen ruoppauksesta, virtauskentän muutosta ei ole juurikaan tutkittu. Tutkimusten perusteella (Derecki 1985; Harvey ym. 2011) ruoppauksen vaikutukset vaihtelevat paljon riippuen jokisysteemistä ja uoman piirteistä. Vaikutukset voivat vaihdella myös uoman sisäisesti eri osissa uomaa. Ruoppaus saattaa aiheuttaa myös hetkittäistä veden samentumista, ravinteiden vapautumista pohjasedimentistä ja kalakuolemia (Wenger ym. 2017). Samentumiseen vaikuttaa pohjan sedimentin määrä ja raekoko sekä vesistön hydrodynamiikka. Sortumat ja uoman reunojen hetkellinen voimakkaampi kuluminen ovat myös mahdollisia ruopatun pinnan altistuessa eroosiolle kasvillisuuden poistuttua.

Ruoppauksen hyötyjä ja haittoja jokiympäristölle on tutkittu pitkälti ekologisesta näkökulmasta (Derecki 1985; Wilber & Clarke 2001; Harvey ym. 2011). Haittavaikutukset ovat tutkimusten perusteella hetkellisiä, paikallisia ja suhteessa hyötyyn pieniä, joista jokiuoma ja sen eliöstö toipuvat. Toisaalta uoman ruoppaus edesauttaa veden virtausta uomassa ja näin nopeuttaa tulvavesien poistumista, joka nähdään usein hyötynä (Petit ym. 2005). Pinter ym. (2004) on tutkinut ruoppauksen vaikutuksia sedimentin kasautumiseen viidessä eri uomatyypissä; 1. Uomassa, joka jakautuu useisiin pienempiin sivu-uomiin, 2.

Luonnonmukaisessa, sääntelemättömässä uomassa, 3. Meanderoivassa uomassa, 4. Suorassa uomissa ja 5. Rakennetussa ja säännöstellyssä uomassa.

Pinter ym. (2004) tutkimus osoittaa, että ruoppauksen irrottama sedimentti, uomatyypistä riippumatta, kasautuu erityisesti joen estuaari alueelle, jolla taas on suuri merkitys joen hydrologiseen toimintaan ja tulvimiseen. Sedimentin kulkeutumiseen ja kasautumiseen vaikuttaa kuitenkin uoman pohjan materiaali ja siihen kohdistuvat voimat. Savipohja kestää voimakkaampia koheesiovoimia kuin hiekkapohjainen joki (Winterwerp & Van Kesteren 2004.) Toisaalta savinen hienoaines kulkeutuu pidemmälle kuin raskaammat hiekkapartikkelit.

Ruoppaus on kuitenkin aina suunniteltava tapauskohtaisesti, jotta suurempia haittoja voidaan välttää. Matalat rantavedet ja uomat sekä niihin liittyvät tulva-alueet ovat monimuotoisia elinympäristöjä, jonka takia ruoppaus tulee suunnitella tarkasti (Saarinen ym. 2013). Wilber & Clarke (2001) mukaan ruoppauksen suunnitteluun, tulokseen ja mahdollisiin haittoihin vaikuttavat paikan fyysiset ominaisuudet sekä ympäristön kunto yhtä lailla siinä missä spatiaalistemporaalisetkin ominaisuudet. Kun ruopattavan jokiuoman ympäristö ja ominaisuudet tunnetaan tarkasti, pystytään sen monimuotoisuuden kärsiminen välttämään mahdollisimman hyvin (Sampakoski 2002).

Liika kasvillisuus aiheuttaa vesistössä ongelmia, kuten happikatoja, madaltumista ja veden vaihtumisen hidastumista (Heimlich ym. 1998). Perkauksella eli liian kasvillisuuden poistolla voidaan kuitenkin edesauttaa vesistön olosuhteiden parantumista ja edistää virtausolosuhteita (Petit ym. 2005). Perkauksessa muokataan uoman poikkileikkauksen leveyttä kaivamalla, samalla kun uomasta poistetaan liika kasvillisuus. Sen tarkoitus on alentaa tulvavesien korkeutta ja lyhentää tulvan kestoa. Kasvillisuutta ei kuitenkaan tule poistaa liikaa, sillä se altistaa uoman pohjan ja reunat kulutusvoimille eli eroosiolle (kuva 14) (Heimlich 1998).



Kuva 14. Eroosiota jokitörmässä. Eroosioon voimakkuuteen vaikuttavat virtaavan veden määrä ja nopeus, uoman pinta-ala sekä pohjan ja törmien materiaali (Kuva Kirkkala & Ryömä 2010)

Myös uoman reunojen luiskakaltevuus tulee arvioida perkauksen yhteydessä maaperän mukaan, jotta välttytään turhalta eroosiolta (Hosia 1983). Perinteisesti vesirakentamisessa uoman luiskat on tehty tasakalteviksi, esim 1:2. Todellisuudessa uoman reunat ja ranta eivät kuitenkaan ole tasakalteva luiska, vaan niiden muodot vaihtelevat. Muotoon vaikuttavat maaperä, kasvillisuus sekä virtaama ja se vaihtelee spatiaalistemporaalisesti uomassa. Luiskien uudelleenmuotoilulla voi aiheuttaa virtausnopeuden muutosta ja virtausvastuksen

kasvamista (Thorne 1997). Perkauksessa tulee siis ottaa huomioon erityisesti maaperän eroosioherkkyys ja uoman virtausnopeus.

Uoman vakauden varmistaminen on muokkauksessa tärkeää, jotta eroosio ja kasautuminen tapahtuvat jatkossakin luonnollisesti (Mäki-Petäys ym. 1994; Eloranta 1995; Hanski 2000). Eroosiota pystytään estämään eroosiosuojauksilla, joita voivat olla esimerkiksi kiveykset, geotekstiilit ja kasvillisuus. Muita jokiuoman muokkauksen tapoja ovat esimerkiksi pohjapadot, joilla pyritään nostamaan vedenkorkeutta ja pidättämään kiintoainesta, laskeutusaltaat ja suojavyyhykkeet (Heimlich 1998; Wenger ym. 2017). Laskeutusaltaat vähentävät kiintoaineksen määrää vedessä ja suojavyyhykkeet vähentävät uoman reunojen eroosiota erityisesti tulvatilanteessa. Suojavyyhykkeet torjuvat myös ravinteiden huuhtoutumista vesistöihin.

2.5 Jokiympäristön mittaus- ja mallinnusmenetelmät

2.5.1 Kehitys ja nykytilanne

Jokiympäristöä ja sen muutoksia on tutkittu jo useita vuosisatoja. Tutkimuksia on toteutettu laboratorio-olosuhteissa (Friedkin 1945; Naqshband ym. 2016), in-situ (Ferguson & Ashworth 1992; Schumm 1963) sekä kaukokartoitusmenetelmin (Carbonneau & Piégay 2012: 8; Constantine ym. 2014; Kasvi ym. 2015). Näillä menetelmillä voidaan tutkia jokiympäristön ilmiöitä eri temporaalisilla ja spatiaalisilla resoluutioilla. Tutkimukset ovatkin kattaneet niin suuren mittakaavan tutkimukset, kuten jokityyppien muutokset, ja pienempien geomorfologisten yksiköiden muutokset.

Lähikaukokartoitusmenetelmien käyttö jokiympäristön tutkimuksessa on mahdollistunut viimeisen vuosikymmenen vaihteessa empiiristen mittaustekniikoiden parantumisen myötä (Alho ym. 2009b; Kasvi 2015). Uudet tekniikat mahdollistavat useiden eri parametrien, kuten virtauskenttien ja pohjan geometrian mittaamisen yhtäaikaisesti. Jokiympäristön muutosten parantuneen tutkimuksen ansiosta ymmärrys näistä prosesseista on parantunut. Samalla myös tutkimuksessa ja mallinnuksessa käytettävän lähtöaineiston laatu on parantunut. Nykypäivänä yhä useammat jokiympäristöä käsittelevät tutkimukset pohjautuvat menetelmiltään lähikaukokartoitusmenetelmiin (Alho ym. 2009ab; Kasvi ym. 2013ab; Lotsari ym. 2014; Flener ym. 2015; Costabile ym. 2016).

Mittalaitteet ovat tulleet pienemmiksi ja kevyemmiksi teknologian kehityksen ansiosta, joten jokiympäristöjen prosessien mittaaminen esimerkiksi kaikuluotaimella on mahdollistunut (Parsons ym. 2007; Guerrero & Lamberti 2011). Yksittäisten poikkileikkausten sijaan kaikuluotauksista hyödynnetään jokiympäristöjen tutkimisessa yhä enemmän (Kaeser ym. 2013, Kasvi ym. 2017). Kaikuluotauksessa etuna on uoman pohjan muotojen samanaikainen laaja-alainen mittaus useasta kohtaa yksittäisten poikkileikkausten sijaan (Caamaño ym. 2010). Poikkileikkauksiin perustuvien mittausten ongelmana on poikkileikkauslinjojen väliin jäävien alueiden interpoloinnista aiheutuvat virheet, jotka laskevat syvyyksien tarkkuutta. On myös mahdollista, että uoman pohja muuttuu mittausten välissä, joka heikentää osaltaan mittaustarkkuutta.

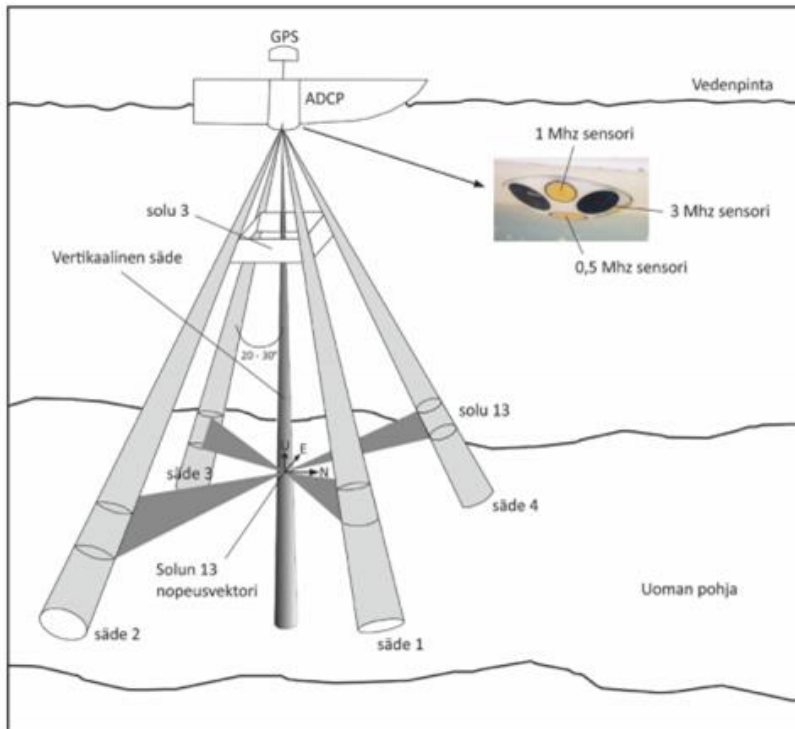
2.5.2 Virtausprofiilin mittaus ja syvyyskartoitus

Lähikaukokartoitusmenetelmien kehittymisen ja yleistymisen myötä joen virtauskentän ja virtaaman mittausmenetelmät ovat kehittyneet paljon (Kasvi ym. 2017). Virtaamamittauksia tarvitaan niin maataloudessa, ympäristön tilan seurannassa kuin teollisuuden eri osa-alueillakin ja tämä on osaltaan ajanut mittausten kehitystä eteenpäin. Jokien virtaamien mittaukseen käytetään nykyään erilaisia optisia, akustisia ja mekaanisia sensoreita, kuten akustisia virtausprofiilimittareita ja siivikkoa. Juuri akustiseen Doppler-ilmiöön perustuvat mittaustekniikat ovat suosittuja niiden tehokkuuden ja tarkkuuden ansiosta.

Tarkkuuden ja tehokkuuden parantuminen on mahdollistanut joen virtausnopeuksien ja –suuntien tarkan mittauksen. Vesipatsaan virtausolosuhteiden tarkka mittaus pystytään toteuttamaan esimerkiksi kiinnittämällä akustinen virtausprofiilimittari (myöhemmin ADCP, eng. *Acoustic Doppler Current Profiler*) veneeseen, kauko-ohjattavaan veneeseen tai kelluvaan alustaan (Guerrero & Lamberti 2011; Kasvi ym. 2017). ADCP-mittausten spatiaalistemporaalinen resoluutio on huomattavasti tarkempi kuin yksittäisiin poikkileikkauslinjoihin perustuvat mittaukset.

ADCP-mittalaitteiston toiminta perustuu Doppler-ilmiöön; laitteiston sensorit lähettävät akustisia pulsseja, jotka heijastuvat takaisin sensoreihin veden mukana kulkeutuvista partikkeleista sekä uoman pohjasta (kuva 15). Sensorit mittaavat sekä sedimenttipartikkelien liikkeitä (suunnan ja nopeuden) määrättyssä aikayksikössä että pohjan etäisyyden. Signaalin taajuuden muutokset rekisteröityvät sensoriin, kun signaali osuu virran mukana kulkeviin sedimenttipartikkeleihin (Muste ym. 2004). Laitteisto laskee sedimenttipartikkeleiden suunnan ja nopeuden, joka taas vastaa kyseisen veden virtausnopeutta sen hetkessä ajassa. Pohjanetäisyyden laitteisto laskee signaalin takaisinheijastumisajasta eli ajasta, missä signaali on kulkenut sensorista pohjaan ja takaisin. ADCP-laitteisto tarvitsee toimiakseen sedimenttikulkeutumista, joten se soveltuu parhaiten sameisiin vesiin, kirkkaissa vesissä sen toiminta häiriintyy.

ADCP-sensoreita on useita eri tarkoituksiin soveltuvia, mutta pienten ja keskisuurten avoimen uoman hydrauliiikan mittauksiin soveltuu RiverSurveyor M9 -sensori (laitevalmistaja SonTek/YSI). RiverSurveyor M9-sensorissa on nimensä mukaisesti yhdeksän sensoria, jotka lähettävät mittaussädetä; yksi 0,5 MHz:n, neljä 1 MHz:n sekä neljä 3 MHz:n vertikaalista sädetä (kuva 16). 0,5 MHz:n sensori mittaa pohjan etäisyyttä ja yhden ja kolmen MHz:n sensorit mittaavat veden nopeutta vesipatsaassa eri syvyyksillä. Säteet ulottuvat jopa 40 m syvyyteen. Veden nopeutta mittaavat säteet ovat 25 asteen kulmassa vertikaaliseen pohjan etäisyyttä mittaavaan säteeseen nähden. Virtaamamittausten tarkkuus on laitevalmistajan mukaan jopa 0.02 cm/s.

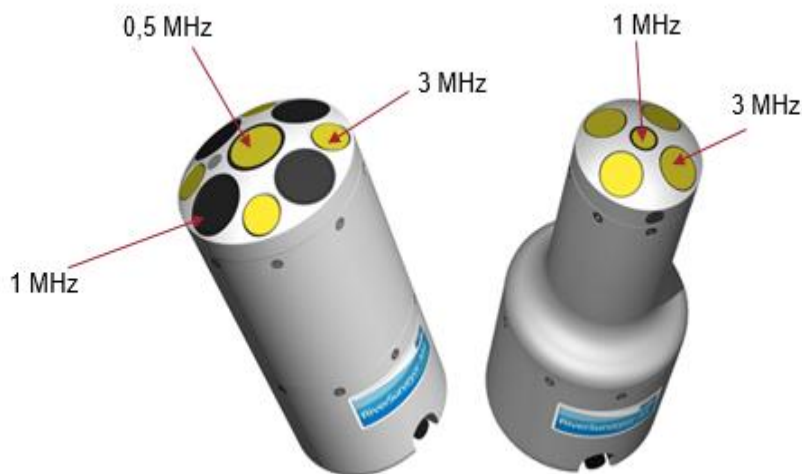


Kuva 15. ADCP:n toimintaperiaate. Laitteisto rekisteröi virtauskenttää viistoilla säteillä, jotka ovat 25 asteen kulmassa suhteessa vertikaaliseen säteeseen, joka mittaa uoman pohjan etäisyyttä. Solu 3 viittaa tilaan, jonka perusteella laitteisto laskee veden tilavuuden soluille. Jokaisen yksittäisen solun tilavuus kasvaa syvemmälle mentäessä. Solu 13 määrittää virtausnopeuden ja – suunnan viistojen signaalien keskiarvosta (Flener 2015: 24 mukailten).

Laitteisto mittaa ja tallentaa virtauskentän virtaussolut ja pohjan etäisyyden yhden sekunnin välein. Virtaussolun vertikaalinen sijainti määräytyy vertikaalisen säteen mukaan, eli se on suoraan laitteiston alapuolella (Kasvi ym. 2017). Horisontaalinen sijainti virtaussolulle määritellään puolestaan laitteiston DGPS-antennilla (eng. *Differential Global Position System*) tai suhteessa uoman pohjaan (BottomTrack). Myös veneen oma nopeus tulee huomioida ja vähentää virtausmittauksista. Se voidaan määrittellä virtaussolun tapaan, joko DGPS-antennilla tai suhteessa uoman pohjaan. Jos nopeuden ja virtaussolun sijainnin määrittämisessä käytetään uoman pohjaa, tulee pohjan olla vakaa eikä siinä saa esiintyä pohjakulkeumaa.

Akustisia virtausprofiilimittareita käytetään myös geometrian mittaamiseen. RiverSurveyor S5-sensori soveltuu erityisesti matalien vesialueiden (alle 5 m syvä) kartoittamiseen ja sen toimintaperiaate on sama kuin M9-sensorilla. S5 sensorissa on viisi mittaussädettä lähettävää sensoria, joista pystysäde on 1 MHz ja neljä viistosädettä jokainen 3 MHz (kuva 16). Uoman geometrian mittaaminen ADCP:llä perustuu vertikaalisen sensorien (0,5MHz M9:ssa ja 1 MHz S5:ssa) kohtisuoraan signaaliin kohti pohjaa. Laite mittaa sekunnin välein etäisyyden sensorista pohjaan ja määrittää signaalin keston perusteella etäisyyden pohjaan, jolloin saadaan tarkka syvyystieto. Syvyystieto, eli pohjan etäisyys sensorista ja sen muutokset kuvaavat pohjan geometriaa. Mittaushetkellä täytyy tietää, kuinka syvällä sensori ui vedessä (eng. *transducer depth*), jolloin laite laskee automaattisesti korjauksen syvyyteen pohjan ja vedenpinnan välille.

Laitteen omaa DGPS-signaalia käytetään määrittämään syvyysmittauksien jokaisen pisteen horisontaalinen sijainti suhteessa vertikaaliseen säteeseen. Sijainnin tarkkuus perustuu satelliittien keskinäiseen yhteyteen ja geometriaan sekä mittauspaikan avoimuuteen. Vahva latvusto tai muu peitteisyys häiritsee DGPS-signaalia ja täten heikentää sijainnin tarkkuutta. Tarkkuus on parhaimmillaan, kun satelliittien peitto ja kattavuus ovat mahdollisimman korkea, tällöin laite pystyy keskustelemaan useamman satelliitin kanssa yhtä aikaa ja paikannustarkkuus paranee. Laitevalmistajan mukaan laitteen DGPS-antennilla päästään yhden metrin tarkkuuteen.



Kuva 16. SonTek RiverSurveyor M9 vasemmalla ja S5 oikealla sekä niiden mittaussäteet. c. SonTek

2.5.3 Topografian mittaus

Topografian mittaus lähikaukokartoitusmenetelmillä onnistuu tehokkaasti hyödyntäen laserkeilausta. Laserilla tehtävä pintamallinnus perustuu etäisyyteen laserpulssin ja maanpinnan välillä (Hyyppä & Hyyppä 2003). Laserkeilaimen lähettämä laserpulssi osuu kohteeseen ja palaa siitä takaisin laserkeilaimeen, jolloin laite määrittää pulssin kulkuajan (eng. *time-of-flight*) perusteella etäisyyden laitteen ja maanpinnan välillä. Kun tiedetään tarkasti laserkeilaimen asento ja paikka, saadaan pulssiosumasta laskettua kohteen tasosijainti ja korkeus.

Laserkeilaimen keräämästä pistepilvestä voidaan tuottaa erilaisia korkeusmalleja maanpinnan topografiasta. Maanpinnan korkeusmalli (eng. *Digital Terrain Model, DTM*) ja sen tarkkuus vaikuttavat merkittävästi tulvamallinnuksen ja -kartoituksen lopputuotteen tarkkuuteen (Alho ym. 2008). Mitä luotettavampi ja tarkempi korkeusaineisto on mallin pohjalla, sitä tarkemmin pystytään mallintamaan tulvan leviäminen. Korkeusmallit, varsinkin pistepilviin perustuva ovat raskaita käsitellä, tästä syystä niitä joudutaan usein harventamaan ja yleistämään. Tämä tarkoittaa sitä, että hyvin pienipiirteistä topografian muutosta on vaikea havaita pikselikooltaan isosta korkeusmallista. Juuri tällaiset pienipiirteiset muutokset topografiassa ovat jokiympäristössä kuten penkereissä ja törmissä yleisiä, tästä syystä tarkka korkeusmalli on tulvamallinnuksessa oleellinen. (Costabile ym. 2016).

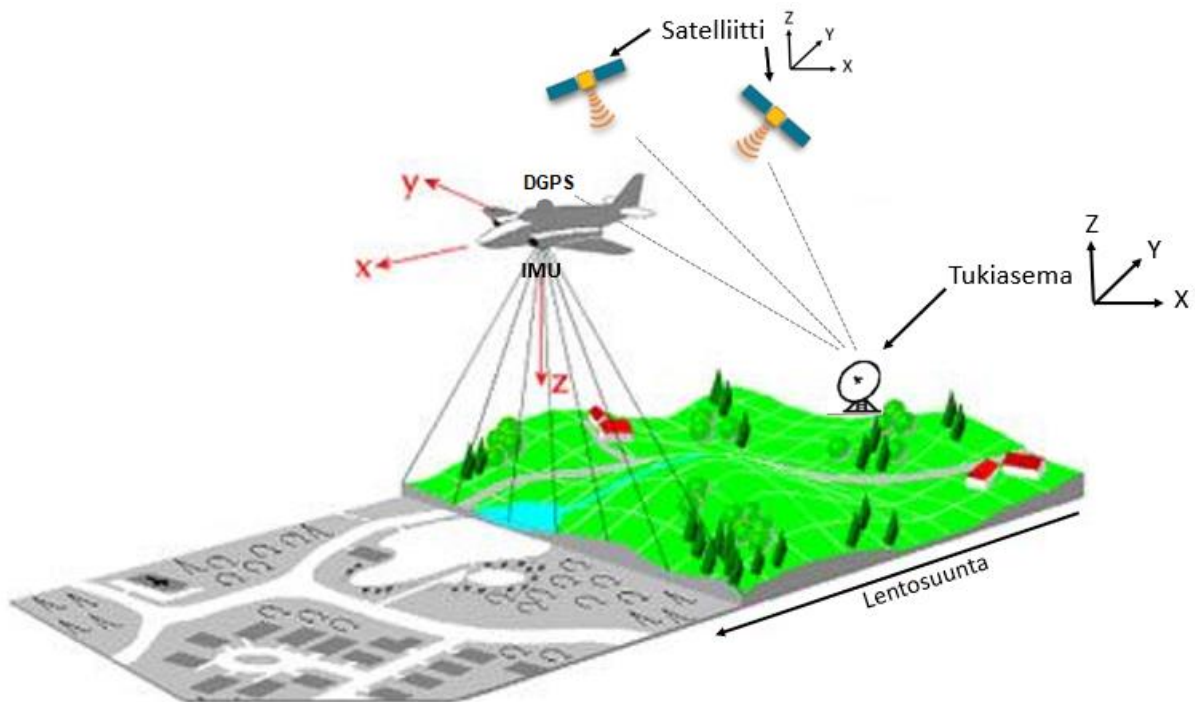
Laserkeilaus soveltuu erittäin hyvin maanpinnan kartoitukseen, erityisesti linjamaisiin kohteisiin kuten jokiin ja onkin yleistynyt jokitutkimuksessa (Hyyppä & Hyyppä 2006; Milan

ym. 2007; Hodge ym. 2009; Calle ym. 2015). Sen avulla voidaan tehdä tarkkoja ja pienipiirteisiä malleja jokiympäristön vedenpinnan yläpuolisista osista. Laserpulssi ei kuitenkaan lävistä vettä kunnolla vaan taittuu, joten vedenpinnan alaiset muodot jäävät laserin ulottumattomiin. Laserkeilaamalla saadaan aikaan miljoonista pisteistä koostuva pistepilvi. Pistepilvestä voidaan erottaa maanpintaa edustavat pisteet sekä muita maanpinnalla olevia kohteita kuten puita ja rakennuksia. Kun tähän pistepilveen lisätään vedenpinnanlaisia muotoja kuvaavat pisteet, esimerkiksi ADCP:llä mitattu syvyystieto, saadaan kattava geometriamalli koko uomasta reunoja ja törmiä myöten.

Perinteisiin topografian mittausmenetelmiin, kuten takymetri- tai GPS-mittauksiin verrattuna laserkeilaus on huomattavasti nopeampi ja tehokkaampi menetelmä, lisäksi sen spatiaalinen kattavuus on huomattavasti suurempi (Hyyppä & Hyyppä 2006; Calle ym. 2015). Ilmasta käsin toteutettava laserkeilaus (eng. *Airborne Laser Scanning, ALS*) sopii maastakäsin suoritettavia maalaserkeilausta (eng. *Terrestrial Laser Scanning, TLS*) ja liikkuvaa laserkeilausta (eng. *Mobile Laser Scanning, MLS*) paremmin suurten alueiden tulvakartoitukseen. Toisaalta maastakäsin toteutettavilla keilauksilla saadaan huomattavasti ilmalaserkeilasta tarkempaa korkeustietoa kohde alueesta, kun kyseessä on esimerkiksi muutaman kilometrin mittainen alue tai yksi meanderinkaarre (Alho ym. 2008).

Tulvamallinnuksessa käytettäviä korkeusmalleja varten topografinen tieto alueesta saadaan yhä useammin laserkeilauksella (Alho ym. 2008). Lentokoneella kerättyyn laserkeilausaineistoon perustuva digitaalinen korkeusmalli (eng. *Digital Elevation Mode, DEMI*), soveltuu tähän erinomaisesti. Se on avaruuskoordinaatistoon (x, y, z) sijoitettujen pisteiden muodostama verkko, joka voidaan esittää joko epäsäännöllisenä kolmioverkkona (TIN-malli) vektorimuodossa tai säännöllisenä ruutuverkkona rasterimuodossa (GRID-malli), kuten tässä tutkielmassa. Verkoilta pystytään määrittämään mielivaltaisesti valitun pisteen x, y -pisteen z-koordinaatti. DEM-mallissa käytetään vain maanpinnan pisteitä eli ALS korkeusaineistosta on poistettu kaikki muu kuten puut ja rakennukset.

ALS-data kerätään noin 2 km korkeudesta laserkeilain kiinnitettynä lentokoneeseen, jolla lennetään nauhamaisia linjoja (kuva 17). Linjojen leveys voi vaihdella 50 metrin ja 1000 metrin välillä (Hyyppä & Hyyppä, 2003; 2007). Laserkeilaimen differentiaalisten paikannus- ja navigointijärjestelmien (DGPS) sekä lentokoneiden asennon- ja kallistuksen seuraamisjärjestelmien (eng. *Inertial Measurement Unit, IMU*) ansiosta ALS sopii erinomaisesti korkeusmalliksi tulvamallinnukseen (Hyyppä, 2007). Lentokoneen oma DGPS keskustelee satelliittien ja maassa sijaitsevien tukiasemien kanssa ja näin saadaan tarkka sijainti jokaiselle pisteelle. IMU mittaa lentokoneen liikettä kolmiulotteisesti (kääntyminen, kiertyminen, kallistuminen) ja korjaa siitä johtuvia virheitä.



Kuva 17. ALS-pistepilvi tuotetaan lentokoneella lentämällä laserkeilain kyydissä. Kun laserpulsseja heijastuu takaisin kohteesta, kuten maasta tai puustosta keilain rekisteröi sen kulkeutumiseen kuluneen ajan sekä heijastuskulman. Näin pystytään määrittämään yksittäisten pisteiden sijainti suhteessa keilaimen (Hyyppä & Hyyppä 2006, mukailen).

2.6 Hydraulinen virtausmallinnus

2.6.1 Mallien luokittelu

Mallinnusta käytetään tehokkaana apuvälineenä uomien suunnittelussa, mitoituksessa sekä virtaavan veden dynamiikan tutkimisessa (Shen 1979). Pintavesien tutkimuksessa käytettävät mallit jaetaan kahteen luokkaan; fysikaalisiin ja laskennallisiin malleihin niiden ratkaisutavan perusteella (Shen 1979; Ji 2008: 437). Fysikaaliset mallit ovat fyysisiä, tietyssä mittakaavassa olevia laboratorioipienomalleja esimerkiksi joen virtauksesta (Viessman ym. 1989: 494; Ji 2008: 437). Laboratorioissa vedellä luodaan haluttu virtaus, josta tehdään mittauksia ja näin voidaan tehdä päätelmiä mallin kuvaamasta, oikeasta luonnon joesta.

Fysikaalisessa mallinnuksessa tarkkuus kuitenkin riippuu pitkälti pienoismallin mittakaavasta ja siitä kuinka hyvin tuntemattomat parametrit on voitu rajata, vastaavaa ongelmaa ei ole matemaattisessa mallinnuksessa (Frostick ym. 2010: 181; Shen 2010: 4). Matemaattisissa malleissa käytetään tietokoneella numeerisesti ratkaistavia matemaattisia yhtälöitä veden virtauksen kuvaamiseen. Matemaattiset mallit jaetaan edelleen ominaisuuksiensa perusteella useisiin eri luokkiin, joita ovat tilastolliset tai mekaaniset, deterministiset tai stokastiset sekä analyttiset tai numeeriset (Ji 2008: 438).

Tilastollisilla malleilla (empiirinen) kuvataan yksinkertaisia matemaattisia suhteita sovittamalla aineistoon tilastollisesti yhtälöitä. Esimerkiksi vedensyvyyden ja lämpötilan välisen suhteen lineaarinen regressio on tyypillinen tilastollinen malli, esim. Chenini ym. 2009; Sahoo ym. 2009. Mekaaniset mallit perustuvat fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin

mekanismeihin, joita käytetään erilaisten hydrodynaamisten ja vedenlaatua koskevien prosessien yksityiskohtaiseen kuvailuun. Tästä syystä mekaanisten mallien perusteella tehdyt skenaariot ja yleistyksset ovat luotettavimpia (Ji 2008: 438). Malleja, jotka kuvaavat ajasta riippumattomia prosesseja kutsutaan staattisiksi malleiksi (eng. *static* tai *steady state*). Staattiset mallit eivät muutu ajan suhteen, toisin kuin dynaamiset mallit (eng. *dynamic*), jotka kuvaavat ajassa muuttuvia prosesseja (Viessman ym. 1989: 496).

Deterministisen mallin jokainen syöttöarvo ja komponentti on tarkasti määritelty matemaattisilla yhtälöillä, eikä se näin ollen sisällä satunnaismuuttujia (Black 1991: 229; Ji 2008: 438). Jokaisen muuttujan käyttäytyminen on määritelty tarkasti alkuperäisien arvojen sekä niihin vaikuttavien yhtälöiden perusteella. Deterministiset mallit eivät sisällä satunnaisvaihtelua, joten samat asetukset ja syöttöarvot tuottavat aina saman lopputuloksen. Stokastiset mallit puolestaan sisältävät satunnaisvaihtelua ja sen tulokset perustuvat satunnaismuuttujan todennäköisyysjakaumaan (Ji 2008: 439). Tästä johtuen samat syöttöarvot voivat tuottaa erilaisia tuloksia. Stokastisella mallilla ei kuitenkaan pystytä selvittämään tarkasti esimerkiksi virtaamaa, toisinkuin deterministisellä mallilla.

Analyttisten mallien avulla saadaan esimerkiksi virtaukselle ominaisia prosesseja ja yleistä luonnetta ratkovia matemaattisia yhtälöitä (esim. Lynch 1978; Hunt 1998), mutta ei siihen vaikuttavia muuttujia (Ji 2008: 440). Nämä matemaattiset ratkaisut ovat funktioita, jotka kuvaavat mallinnettavan systeemin tilaa yleisesti ottaen kaikissa olosuhteissa. Muuttuvia olosuhteita ja niiden vaikutuksia systeemin tilaan voidaan tutkia numeeristen mallien avulla (Swanson & Bahr 2004: 748). Numeeriset mallit soveltuvat muita analyttisiä malleja paremmin pintavesille ominaisten monimutkaisten prosessien mallintamiseen (Mobley 1989; Ji 2008: 440). Yksinkertaisimmillaan matemaattinen malli on yksi ainoa yhtälö (Koistinen 2006). Ratkaisut saadaan syöttämällä mallinnettava aineisto ja sen parametrit tietokoneohjelmaan, joka tuottaa numeerisen ratkaisun. Ne ovat likimääräisiä ja ne esitetään yleensä karttojen, taulukoiden tai graafisten esitysten muodossa (Swanson & Bahr 2004; Ji 2008: 440).

Hydraulinen mallinnus perustuu numeerisiin laskennallisiin malleihin, joten jatkossa tekstissä keskitytään niihin. Numeeriset mallit voidaan jakaa niiden spatiaalisten ulottuvuuksien perusteella kolmeen eri luokkaan (taulukko 2) (Ji 2008: 441). 1D-malleissa on vain yksi spatiaalinen ulottuvuus, X . Näiden mallien avulla virtausolosuhteet saadaan selville ainoastaan viivamaisista kohteista kuten poikkileikkauksista. Ne eivät myöskään ole raskaita toteuttaa. 2D-mallinnus puolestaan mahdollistaa virtausolosuhteiden selvityksen kahdessa eri ulottuvuudessa, X & Y .

Nämä kaksi ulottuvuutta, tasoa, mahdollistavat virtausominaisuuksien selvityksen koko joesta. Niiden avulla on onnistuttu mallintamaan jokien virtausta varsin tehokkaasti (Alho & Mäkinen 2010; Kasvi ym. 2013a). Ne eivät kuitenkaan pysty stimuloimaan vertikaalista virtausta, toisin kuin 3D-mallit, mutta ovat laskennallisesti kevyempiä (Kasvi ym. 2015: 1605; Jowett & Duncan 2012: 92). 3D-mallissa, on kolme ulottuvuutta X , Y & Z . Sen avulla voidaan mallintaa pitkittäis-, poikittais- ja pystysuuntaisia virtausominaisuuksia. Näin ollen se kuvaa virtausolosuhteita kaikkein todenmukaisimmin (Jowett & Duncan 2012: 92; Shaad ym. 2016: 168).

Taulukko 2. Yksiulotteisten (1D), kaksiulotteisten (2D) ja kolmiulotteisten (3D) numeeristen mallien ominaisuudet suhteessa toisiinsa. Yksiulotteinen malli eroaa ominaisuuksiltaan voimakkaasti kaksi- ja kolmiulotteisesta mallista. Kaksi- ja kolmiulotteisen mallin välillä eroavuudet vähenevät. Malli tulee kuitenkin aina valita mallinnettavan kohteen ja halutun tarkkuuden perusteella.

Ominaisuudet	1D	2D	3D
Ulottuvuus	Yksi spatiaalinen ulottuvuus x	Kaksi spatiaalista ulottuvuutta x, y	Kolme spatiaalista ulottuvuutta x, y, z
Vaativuus	Nopea laskennallisesti	Suhteellisen nopea laskennallisesti, käytetyin virtauksen mallinnustapa	Raskas laskennallisesti, isojen alueiden mallinnus vie aikaa
Soveltuvuus	Vakaat ja epävakaat virtaukset, yksinkertaiset virtausrakenteet	Tulvatasangot, monimutkaiset virtausrakenteet, meanderinkaarteet, särkät, syvyyskeskiarvotettu virtausnopeus	Monimutkaiset virtausrakenteet, partikkelien liikkeet, vuorovedet, virtaus erilaisissa rakenteissa ja niiden ympärillä, virtausnopeudet syvyyskerroksittain
Rajoitteet	Ei virtausdynamiikkaa eikä virtausrakenteita	Geometrian iterointi hankalaa, ei pysty mallintamaan syvyyskeskiarvotettuja virtausnopeuksia esteiden tai rakenteiden ympärille	Epävakaampi kuin 1D tai 2D mallit, hidas mallinnusaika
Kenttätyöt	Satunnaiset poikkileikkaukset	Laajat kenttämittaukset	Vaativat & laajat kenttämittaukset
Tulokset	Suuntaa antava, eroavaisuuksia 2D ja 3D mallien tuloksiin	Luotettava, täsmää usein 3D mallin kanssa	Todenmukaisin ja tarkin

Mallin diskretisoinnissa käytetään yleensä numeerisia menetelmiä. Diskretisoinnissa mallinnettavan alueen ääretön määrä yhtälöitä ja tuntemattomia pisteitä jaetaan äärelliseksi määräksi yhtälöitä ja pisteitä verkossa (eng. *mesh*) tai ruudukossa (eng. *grid*). Verkkoa tai ruudukkoa käytetään muodostettaessa topografia-aineistosta mallin geometrialle pinta, jossa vesi virtaa (Steffler & Blackburn 2002: 3, 12; Bhavikatti 2004: 1). Yleisesti käytetään joko differenssimetodia (eng. *finite difference method*) tai elementtimenetelmää (eng. *finite element method*) (Voller 2009:1). Elementtimenetelmässä mallinnusalue jaetaan pieniin osiin eli elementeiksi, jotka muodostavat verkon. 2D-mallissa nämä elementit ovat yleensä joko kolmi- tai nelikulmaisia ja usein erikokoisia. Noodeiksi kutsutaan elementin kärjissä tai rajoilla keskeisessä paikassa olevia pisteitä. Noodien arvot ratkaistaan yhtälöiden avulla, jonka

jälkeen elementtien tuntemattomat pisteet voidaan ratkaista interpoloimalla (Entwistle 2001: 1; Bhavikatti 2004: 1; Voller 2009: 1).

Differenssimenetelmä hyödyntää mallintamisessa ruudukkoa, mutta sen avulla voidaan määrittää arvot vain ruudukon noodeille. Mallinnuksen onnistumiseksi se tarvitsee myös huomattavasti suuremman määrän noodeja kuin elementtimenetelmä. Sitä ei myöskään voida käyttää epäsäännöllisten alueiden mallintamiseen, sillä sen käyttämä ruudukko on säännöllinen. Elementtimenetelmässä verkon elementit voivat tästä poiketen olla erimuotoisia ja -kokoisia, jolloin se soveltuu paremmin esimerkiksi kaarevien tai mutkittelevien alueiden mallinnukseen (Rao 2007: 3; Voller 2009: 1).

Noodien arvot ratkaistaan iteroimalla eli toistamalla alkutilanteessa samaa työvaihetta useita kertoja. Iterointia käytetään myös staattisissa malleissa, vaikka se muistuttaa ajassa etenevää prosessia. Eksplisiittinen menetelmä käyttää noodien ratkaisuun aikaisemman iterointiaskeleen arvoja. Menetelmä on nopea, mutta iterointien väliset aika-askleet (eng. *time step*) ovat rajoitettuja. Implisiittisessä menetelmässä noodien arvot ovat riippuvaisia muiden noodien aiemman iterointiaskeleen ja sen hetkisen iterointiaskeleen arvoista (Steffler & Blackburn 2002: 15–16).

Numeerinen mallinnus aloitetaan valitsemalla sopiva malli ja päättyy tulosten analysointiin. Mallinnusprosessi jaetaan yleensä kuuteen eri vaiheeseen (Ji 2008: 77, 466–470):

1. mallin valitseminen tutkimuskysymysten perusteella
2. aineiston keruu
3. mallin rakennus ja ajo
4. mallin kalibrointi
5. mallin verifiointi
6. mallin tulosten analysointi

Jin (2008: 77) mukaan yllä käsitellyt numeeristen mallien ominaisuudet ja rajoitteet ovat tärkeitä ymmärtää onnistuneen mallinnuksen kannalta. Mallin ominaisuuksien ymmärtämisen lisäksi, ymmärrys fysikaalisista prosesseista mallinnettavalla alueella on tärkeää mallin valinnassa. Näin pystytään valitsemaan malli, joka vastaa mahdollisimman luotettavasti tutkimuskysymyksiin. Ji (2008: 77) painottaa myös kalibrointi ja verifiointi vaiheita, jos halutaan varmistaa mallin luotettavuus. Kalibrointi tehdään, kun malli on rakennettu ja ajettu, sen tarkoitus on sopeuttaa mallin parametrien arvot, esimerkiksi pohjan karkeusarvo, niin että ajetun mallin virtausominaisuuksia kuvaavat arvot vastaavat mahdollisimman hyvin mitattuja arvoja. Samalla tulee kuitenkin huomioida, että parametrien arvot ovat mallinnettavan kohteen kannalta järkeviä. Onnistuneen kalibroinnin jälkeen mallin muuttujia voidaan tarkastella ja analysoida luotettavasti (Ji 2008: 466–467).

Vertaamalla kalibroidun mallin parametreja itsenäisen aineiston arvoihin, voidaan mallin luotettavuutta parantaa. Tätä vaihetta kutsutaan verifiointiksi (Ji 2008: 467, 470). Jos mitatut arvot ja mallin tulokset vastaavat toisiaan tarpeeksi hyvin, voidaan todeta mallin olevan verifioitu. Tällöin luotetaan, että se pystyy jäljittelemään mallinnettavaa kohdetta eri olosuhteissa. Tulosten analysoinnissa tulee kuitenkin huomioida, että huolellisesta ja

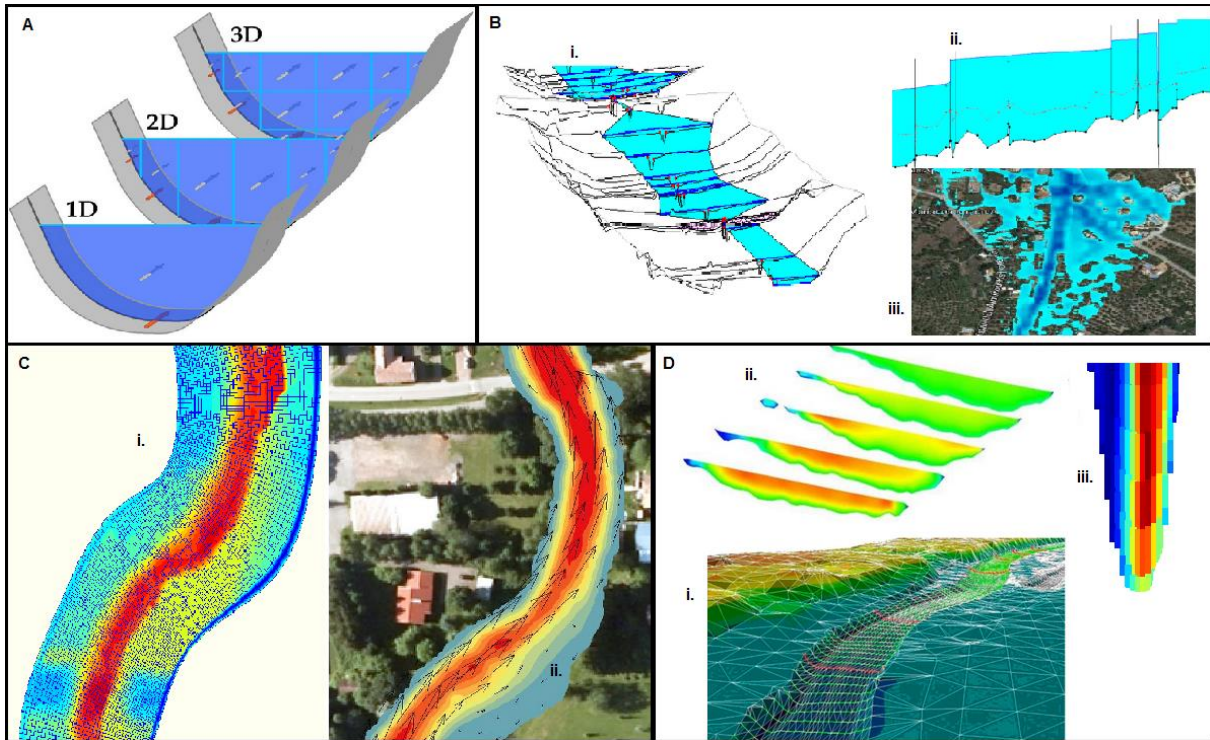
onnistuneesta kalibroinnista ja verifiointista huolimatta, mikään malli ei pysty simuloimaan kaikkia monimutkaisia hydrodynaamisia prosesseja täydellisesti.

2.6.2 Hydraulisen virtausmallinnuksen perusteet

Hydraulinen mallinnus on tärkeä väline tulvien peittävyden sekä tulvariskien arvioinnissa (Horritt and Bates, 2002; Hunter, 2007; Käyhkö ym. 2007; Pender & Néelz, 2007; Alho ym. 2003). Tulvatutkimuksessa on yleisesti erotettu *hydrologinen* ja *hydraulinen* mallinnus toisistaan. Hydrologinen mallinnus kattaa veden kiertokulun ja toiminnan valuma-alueella kuten sadannan, lumen sulamisen, haihdunnan, imeytymisen ja veden kertymisen uomiin (Alho & Käyhkö 2003). Hydraulinen mallinnus keskittyy avouomavirtauksen mallintamiseen hyödyntäen hydraulisia muuttujia kuten uoman topografiaa ja karkeutta (Bates & De Roo 2000).

Kun tarkastellaan avouomavirtausta, keskeisiä käsitteitä ovat pysyvä virtaus, muuttuva virtaus, tasainen virtaus sekä epätasainen virtaus (Hyvärinen & Puupponen 1986). Mallien avulla voidaan määrittää vedenkorkeus ja virtausnopeus uoman eri kohdissa käyttäen tarkasteluun valitun hetken virtaamatietoa sekä uoman geometriaa. Hydraulisessa mallinnuksessa voidaan hyödyntää joko todellisia virtaus- ja vedenkorkeushavaintoja tai asettaa hypoteettisia arvoja skenaarioiden mallinnukseen (Veijalainen ym. 2010)

Hydraulisella mallinnuksella pystytään määrittämään vedenkorkeus ja virtausnopeus uoman eri kohdissa tarkastellun hetken virtaaman ja uoman geometrian perusteella (Alho & Käyhkö 2003; Seppälä & Tuominen 2005). Hydrauliset mallit voivat olla joko yksi- (1D), kaksi- (2D) tai kolmiulotteisia (3D) (kuva 18, A). 1D-mallissa veden oletetaan virtaavan yhteen suuntaan (kuva 18, B). 2D-mallissa virtausnopeudet ovat syvyyskeskiarvotettuja, jolloin niitä pystytään mallintamaan kahteen eri suuntaan x , y (kuva 18, C). 3D- mallissa virtauskenttä pystytään mallintamaan kaikissa kolmessa ulottuvuudessa x , y , z (kuva 18, D). Kaksi- ja kolmiulotteiset mallit tulevat kyseeseen, kun halutaan mallintaa ilmiöitä sekä leveys- että syvyysuunnassa (Shen 1979).



Kuva 18. Eri mallien ominaisuuksia. A. 1D, 2D ja 3D mallien ulottuvuudet. B. Yksiulotteinen malli perustuu poikkileikkauksiin uoman pohjasta (i.) joiden välit interpoloidaan. Se antaa tuloksena vedenkorkeuden (ii.), jonka perusteella voidaan luoda yksinkertainen tulvavaarakartta (iii.). C. Kaksiulotteisessa mallissa uoman pohjan geomorfologiaa ja maanpinnan topografiaa käytetään mallin pohjana (i.). Malli antaa tuloksena vedenkorkeuden sekä virtaussuunnan ja -nopeuden (ii.). D. Kolmiulotteinen malli on malleista monimutkaisin ja sen geometriaa voidaan tarkastella kolmiulotteisesti (i.). Malli antaa tuloksena vedenkorkeuden ja virtausnopeuden sekä -suunnan lisäksi kolmiulotteisia poikkileikkauksia virtauskentästä (ii. & iii.).

Malleja käytetään todellisten tilanteiden simulointiin eli jäljittelyyn, sen avulla voidaan luoda erilaisia tulevaisuuden skenaarioita tai muutosvaikutuksia (Black 1991: 227). Hydraulista mallinnusta käytetään ensisijaisesti realististen, pintavesiä kuvaavien mallien tekoon (Ji 2008: 7). Realististen mallien avulla saavutetaan parempi ymmärrys pintavesistä sekä niihin vaikuttavista prosesseista, tämä auttaa esimerkiksi pintavesiä koskevaa päätöksentekoa. Yksinkertaisissa tapauksissa yksiulotteinen pysyvän virtauksen malli voi olla riittävä, mutta muuttuvan ja monimutkaisen virtauksen mallinnukseen, kuten tulva-aallon eteneminen ja viipymä, tarvitaan kaksiulotteinen tai kolmiulotteinen malli (Shen 1979).

Hydraulisten mallien hydrodynamiikan perustan muodostaa teoria kolmesta säilymislaista, joita ovat energian säilymislaki, massan säilymislaki ja liikemäärän säilymislaki (Steffler & Blackburn 2002: 2). Näihin kolmeen lakiin perustuvia yhtälöitä hyödynnetään hydraulisissa malleissa. Mallista riippuen näitä yhtälöitä muunnellaan tai yksinkertaistetaan siihen sopiviksi (Ji 2008: 17). Energiansäilymislaissa energian kokonaismäärä säilyy koko ajan samana, vaikka energia muuttaisi muotoaan toiseen. Siinä potentiaalienergia ja liike-energia muuttuvat toinen toisikseen, joten energiaa ei voi siis syntyä eikä kadota vaan sen määrä pysyy vakiona koko ajan. Energiansäilymislain kaava on seuraava:

$$\sum_i m_i v_i^2$$

kaava6

, jossa m = massa, v = nopeus.

Massansäilymislaki perustuu tietyltä alueelta lähtevän massan ja tietylle alueelle tulevan massan väliseen tasapainoon. Lain mukaan massaa ei voi tuhota tai tuottaa, joten joessa virtaavan veden suhteen se voidaan tulkita siten, että jokeen virtaavan veden määrän täytyy olla sama kuin joesta pois virtaavan veden. Tämän havainnollistamiseksi mallinnuksen kohde, esimerkiksi joki kuten tässä tapauksessa, jaetaan useammiksi vedenpinnasta pohjaan asti ulottuviksi hypoteettisiksi lieriöiksi (Ji 2008: 17). Samalla oletetaan, että lieriöön kerääntyneen massan muutos tietyssä ajanjaksossa on yhtä suuri kuin samassa ajanjaksossa lieriöön tulevan ja sieltä lähtevän massan välinen erotus (Dingman 2009: 149). Massansäilymislain kaava on seuraava;

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \int \rho dV = 0$$

kaava7

, jossa p = tiheys, t = aika, v = nopeus, M = massa = dV = differentiaalinen integraali, joka määrittää koko systeemin volyymin.

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 ase on verrannollinen alueeseen vaikuttaviin ulkoisiin voimiin. Ulkoisten voimien suunta määrää liikemäärän suunnan muutokset. Lisäksi ulkoista voimaa vastaava, yhtä suuri voima suuntautuu alueelta ulkoista voimaa vastakkaiseen suuntaan (Dingman 2009: 138, 152). Liikemäärän kaava on seuraava:

$$P = mv$$

kaava8

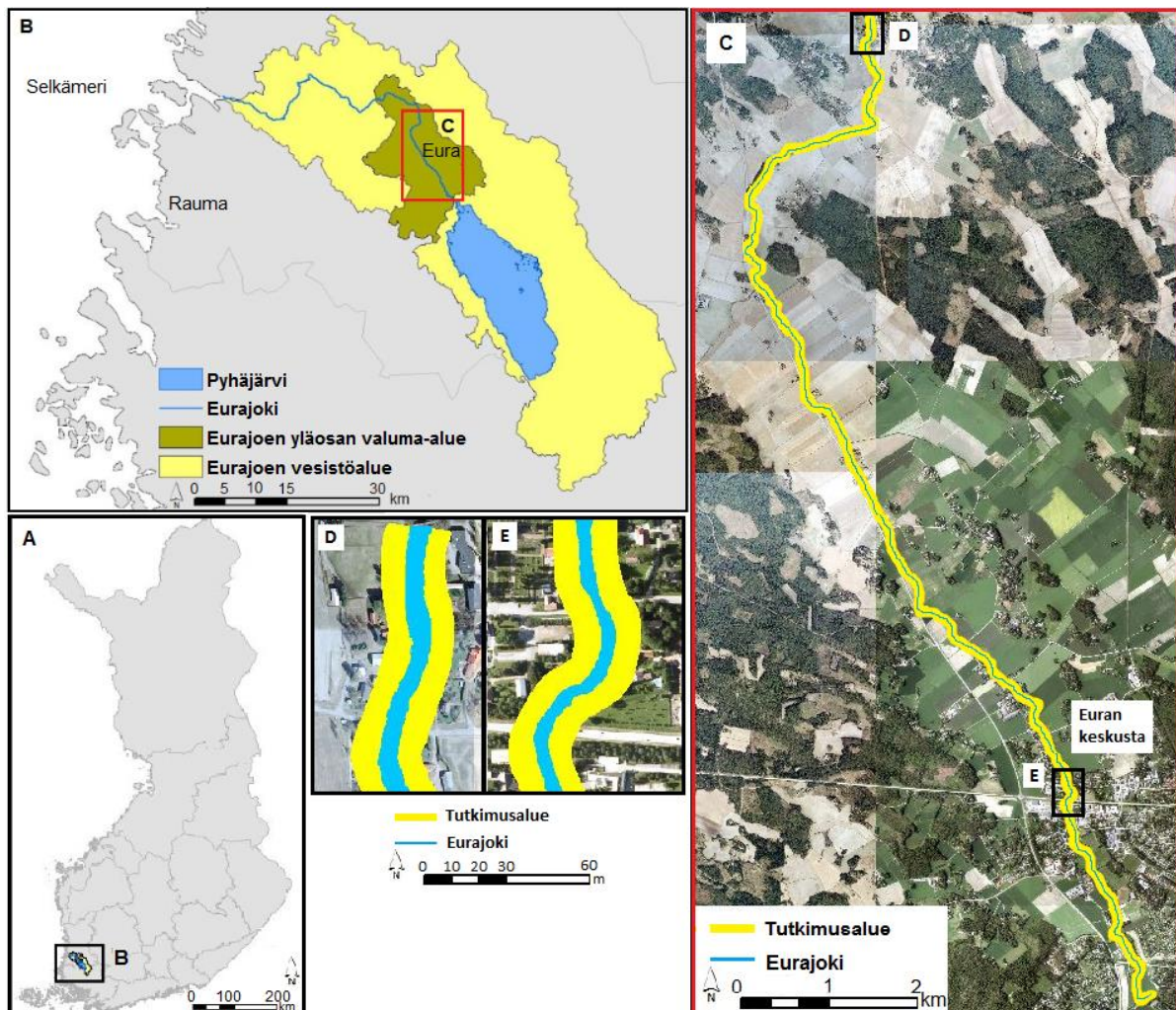
, jossa p= liikemäärä, m = massa ja v = nopeus.

3 Tutkimusalue

3.1 Eurajoki

Eurajoki sijaitsee Lounais-Suomessa Satakunnan alueella (kuva 19, A). Se saa alkunsa Säskylän Pyhäjärvestä ja laskee Rauman pohjoispuolella Selkämereen Eurajoensalmessa, virraten noin 52km matkan Euran ja Eurajoen kuntien lävitse (kuva 19, B). Sen varrella on kolme voimalaitosta sekä 11 koskialuetta, joista osa on padottuja (Kirkkala & Ryömä 2010). Joen vaikutusalueella asuu noin 25 000 ihmistä ja asutus on keskittynyt jokivarteen. Tässä tutkielmassa keskitytään Eurajoen yläjuoksuun, jolla tarkoitetaan Pyhäjärven Luusuan ja Eurakosken padon välistä jokialuetta (kuva 19C). Tutkimusalue kattaa noin 14 km matkan Kauttuankoskelta Eurakosken padolle (kuva 19C). Lähempään tarkasteluun otetaan jokivarren tiheimmin asutut alueet Euran keskusta, tarkemmin Kirkkosillan alue, sekä Eurakosken padon

alue (kuva 19, D, E). Lisäksi tarkastellaan mahdollisia muita mielenkiintoisia ruoppauksesta aiheutuvia muutoksia. Joki virtaa läpi Euran keskustan sekä tasaisten laajojen peltoalueiden, jossa uoman leveys on keskimäärin noin 7 m. Sen pohja on liettynyt ja reunat kasvittuneet, joten ahdas uoma ei johda vettä kunnolla. Alueella onkin ollut toistuvia tulvahaittoja, jonka takia Eurajoen yläosan alueelle on suunnitteilla ruoppaus.



Kuva 19. Tutkimusalue sijaitsee Lounais-Suomessa Satakunnan alueella (A). Eurajoki saa alkunsa Pyhäjärvestä ja se laskee Selkämereen Rauman yläpuolella. Sen vesistöalue on noin 1336 km² (B). Tutkimusalue on noin 14 km pitkä jokiosuus Eurajoen yläjuoksulla, Kauttuankoskelta Eurakoskelle (C). Tutkielmassa keskitytään tarkemmin kahteen pienempään alueeseen; Euran keskustan Kirkkosillan alue (E) ja Eurakosken padon alue alajuoksulla (D).

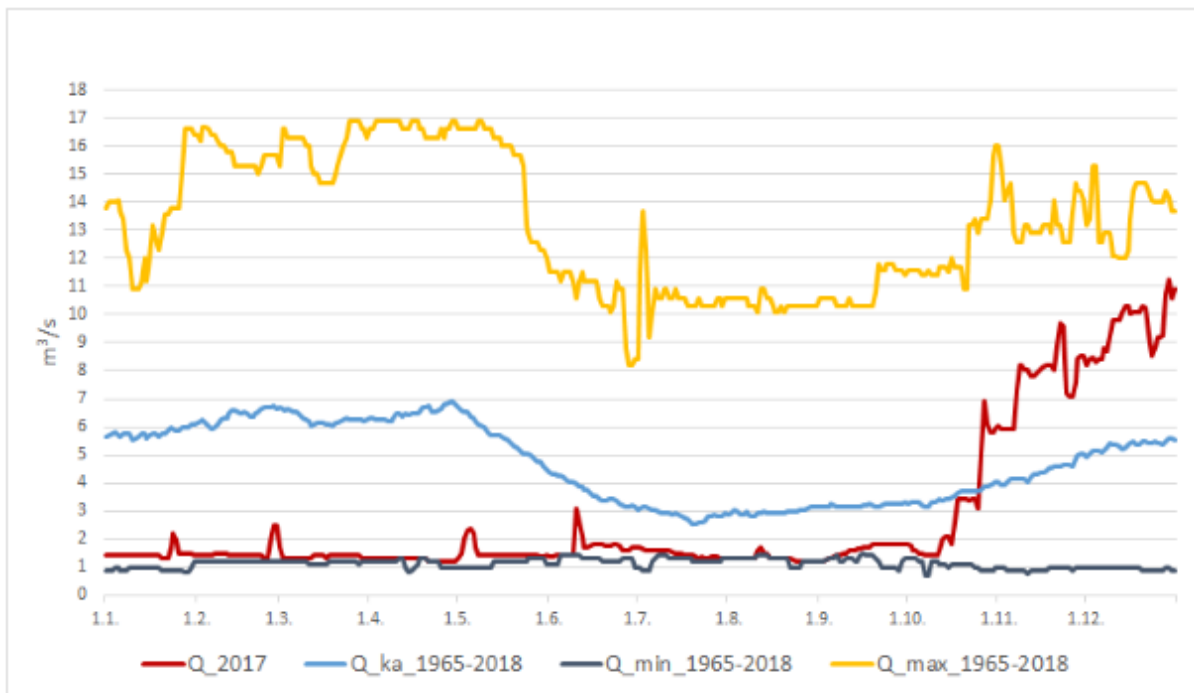
3.2 Eurajoen vesistöalueen hydrologia

Eurajoen vesistöalue on 1336 km², josta järvien osuus on 13%, peltojen 23% ja metsien 60% (SYKE 2019). Se on Lounais-Suomen kolmanneksi suurin vesistöalue ja se jaetaan seitsemään osavaluma-alueeseen, josta Eurajoen yläosan osavaluma-alue on kooltaan 774 km². Vesistöalueen vähistä järvistä suurin järvi on Pyhäjärvi (154 km²), josta Eurajoki saa alkunsa. Se kuuluu pintavesityypiltään keskisuurien savimaiden jokiin. Koko joen keskivirtaama on noin 11 m³/s ja yläosan keskivirtaama noin 5 m³/s (taulukko 3) (kuva 20).

Taulukko 3. Eurajoen yläosan virtaamia. Taulukko esittää kuinka paljon virtaama kasvaa matkalla Pyhäjärveltä Eurakosken padolle eri virtausskenaarioissa.

	Pyhäjärvi (m ³ /s)	Eurakoski (m ³ /s)
Ylivirtaama HQ_{1/20}	17,5	35,7
Keskiylivirtaama MHQ	11,0	21,2
Keskivirtaama MQ	4,7	5,6
Keskialivirtaama MNQ	0,7	0,8

Vesistö-alueen vuotuinen sadanta oli jaksolla 1971-2017 SYKE:n HERTTA-palvelun mukaan keskimäärin 653 mm. Lumen vesiaron maksimiarvot sijoittuvat saman palvelun mukaan maaliskuun loppuun ja huhtikuun alkuun sen ollessa keskimäärin 66 mm. Eurajoessa on käytössä kaksi virtaaman ja vedenkorkeuden mittausasemaa, Pappilankoskella ja Pyhäjärven Luusualla. Valuma-alueen geometrian takia Eurajoen yläosan pituuskaltevuus on hyvin pieni, suurin osa alueesta on tasaista ja alle 50 m merenpinnan yläpuolella (Liimatainen ym. 2007. Kauttuankosken ja Eurakosken padon välisellä matkalla joen pohjalla on korkeuseroa noin 1,5 m. Kun tämä jaetaan koko matkalle tasaisesti, saadaan kaltevuudeksi noin 0,0001 m. Luonnon uomassa kaltevuus ei kuitenkaan jakaudu tasaisesti ja Eurajoen tapauksessa se vaihtelee lähes tasaisesta pinnasta aina 0,0003 metrin välillä, kaltevuuden kasvaessa pääsääntöisesti alajuoksua kohti. Loiva kaltevuus aiheuttaa sen, että virtaavaan veteen kohdistuvat voimat ovat pieniä.



Kuva 20. Eurajoen yläosan virtaamatiedot vuodelta 2017 sekä koko mittaushistorian keskiarvo-, minimi- sekä maximivirtaamat. SYKE:n HERTTA -palvelusta. Yläosan ainoa mittauspiste sijaitsee Pyhäjärven luusualla, joten arvot vastaavat juoksutusta Pyhäjärvestä. Tutkimuksen mittausajanjakso ajoittuu kesäkuun viimeiselle viikolle. Vuonna 2017 virtaama on ollut lähes minimissään aina lokakuun puoleen väliin asti.

3.3 Eurajoen historia ja teollisuus

Alue on vanhaa kulttuurimaisemaa ja historiassa Eurajoki on ollut tärkeä kulkureitti mereltä sisämaahan niin ihmisille, tavaroille kuin kaloillekin (Liimatainen ym. 2007. Se on myös joskus ollut tunnettu hyvänä lohijokena. Tällä hetkellä teollistuminen, maatalous, joen varrella olevat voimalaitokset, taajama-alueet sekä joen käyttö ja ihmisen tekemät muotoilut sen uomaan ovat kaikki rasittaneet vesistöaluetta ja sen eliöstöä. Ekologiselta luokituksestaan joen tila on tyydyttävän ja välttävän rajalla (Kirkkala & Ryömä 2010). Vedenlaatua kuormittavat teollisuus, maa- ja metsätalous ja yhdyskuntien jätevedet. Tämä aiheuttaa ongelmia erityisesti joen virkistyskäytölle ja veden hygieeniselle laadulle, esimerkiksi Rauman kaupunki ottaa osan talousvedestänsä Eurajoesta, kuten myös useat teollisuuslaitokset.

Kauttuan teollisuuslaitoksilta ja Euran jäteveden puhdistamolta johdetaan lauhdevesiä sekä jätevettä jokeen, joka aiheuttaa sen, ettei Eurajoki yleensä jäädy (Kirkkala & Ryömä 2010). Jääkannen puuttumisen myötä olosuhteet ovat hyydepatojen synnylle otolliset. Toistaiseksi hyydepatot eivät ole aiheuttaneet merkittäviä tulvantorjuntatoimenpiteitä. Yläjuoksulla on kuitenkin ollut toistuvia sekä vuosittain pahenevia tulvaongelmia, jotka johtuvat uoman luontaisesti huonosta vedenjohtokyvystä sekä liettyneestä ja kasvittuneesta uomasta (kuva 23).

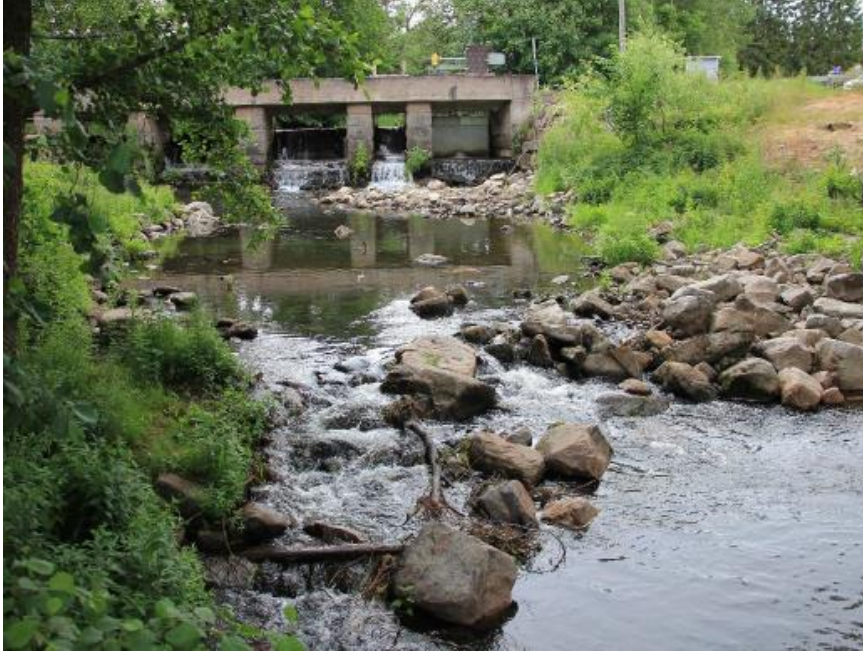
3.4 Eurajoen säännöstely ja tulviminen

Pyhjäjärven pinnankorkeutta säännellään Kauttuankosken voimalaitokselta (Pyhjäjärven Luusua), josta vettä säännöstellään Eurajokeen. Sen vaikutus Eurajoen virtaamiin on merkittävä. Säännöstelyn tarkoitus on tasata joen virtaamia erityisesti sen yläjuoksulla. Ongelmana kuitenkin on, että Eurajoen uoman tilavuus ja vedenjohtokyky eivät ole riittäviä sille vesimäärälle, joka Kauttuankoskelta tulisi juoksuuttaa, jotta Pyhjäjärven veden pinta pysyisi järven ekosysteemien kannalta edullisella tasolla (Anttila 2018). Tällä hetkellä jo 11 m³/s juoksumäärä aiheuttaa tulvahaittoja yläjuoksulla (kuva 21).



Kuva 21. Keväällä 2008 Eurajoki tulvi Euran keskustassa joen varressa sijaitseville tonteille aiheuttaen tulvariskejä (kuva Juha-Pekka Triipponen).

Yläjuoksun virtaamaa säännellään Kauttuankosken lisäksi myös Eurakosken padolta (kuva 22), joskin sen vaikutus on pienempi kuin Kauttuankosken voimalaitoksen sääntelyn. Alivirtaamilla padon vaikutus ulottuu noin 8 km päähän ylävirtaan ja tulvavirtaamilla noin 2 km ylävirtaan (Anttila 2018). Voimakas säännöstely on myös pienentänyt virtaamia joessa ja näin ollen vaikuttanut esimerkiksi veden laatuun heikentävästi. Sääntelyn lisäksi virtaamaa haittaavat uoman voimakas kasvittuneisuus erilaisista vesi- ja rantakasveista (kuva 23) sekä liettynyt pohja (Kirkkala & Ryömä 2010).



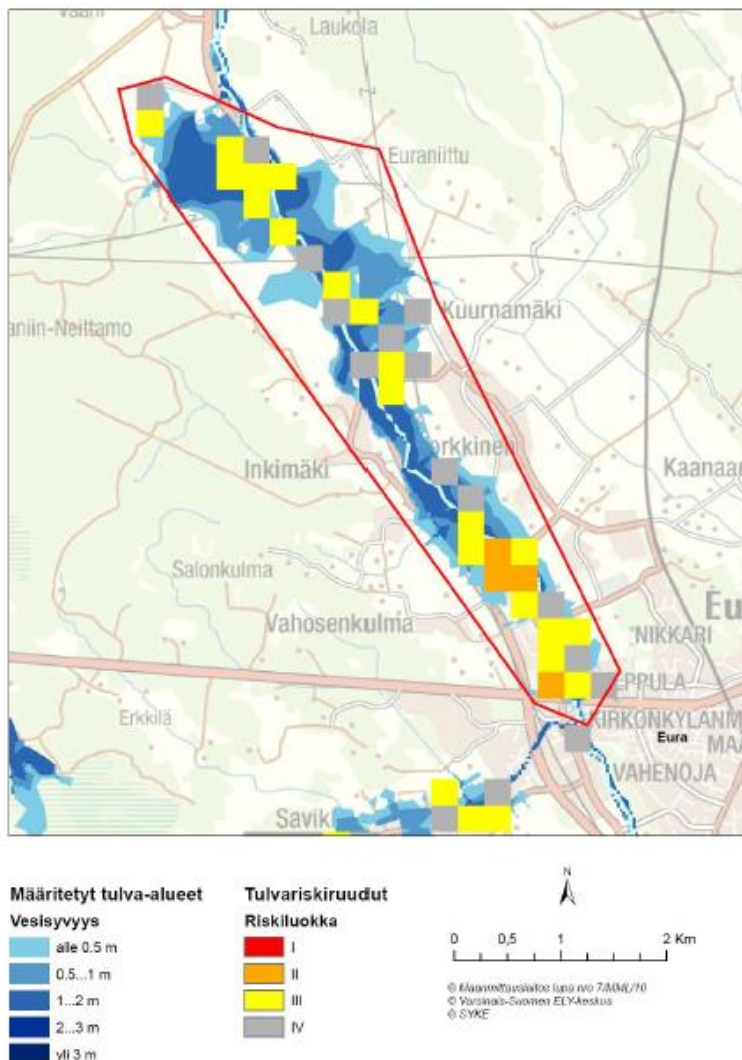
Kuva 22. Eurakosken pato alajuoksun puolelta kuvattuna. Padossa on 5 luukua, joista kaksi on sähkökäyttöisiä ja kolme käsikäyttöisiä. Pato on kulkueste vaelluskaloille, sillä siinä ei ole erillistä kalatietä (kuva Lauri Anttila).



Kuva 23. Eurajoen uoma on kasvittunut erilaisista vesikasveista, perkaamalla kasvillisuutta n. 25 000 m² parannetaan uoman vedenjohtokykyä ja samalla uoman tilavuus kasvaa. A. Kasvillisuus on kasautunut uomaan saarekkeiksi. B. Sen reunat ovat kaislikkoisia. C. Uoma on paikoin laajalti kasvittunut. D. Reunojen lisäksi myös uoman pohjassa on runsasta kasvillisuutta (kuvat Kirkkala & Ryömä 2010).

Eurajoen vesistöalueella on tehty lukuisia tulvasuojelu- ja kuivatustoimenpiteitä (Kipinä-Salokannel 2015). Osa näistä toimenpiteistä on tehty voimalaitosten sekä maa- ja metsätalouden tarpeisiin. Padotukset ja ruoppaukset ovat vuosien saatossa muokanneet uoman luonnollista virtavesiympäristöä, osa koskista on kuitenkin kunnostettu ja niiden morfologia on pyritty palauttamaan ennalleen (Liimatainen ym. 2007). Lisääntyneen tulvimisongelman ja kasvaneen tulvavaaran takia Eurajokeen on suunnitteilla ruoppaus.

Euran keskusta on tulvariskien hallintasuunnitelmassa luokiteltu riskiluokkaan 2 (kuva 24). Tulvariski muodostuu siitä, että tulvatilanteessa Pyhäjärvestä joudutaan juoksuttamaan vettä, enemmän kuin Eurajoen uoma ja sen rakenteet pystyvät johtamaan. Ruoppauksella odotetaan olevan merkittävä tulvariskiä alentava ja tulvavahinkoja ehkäisevä vaikutus. Tulvasuojeluruoppaus aloitetaan Eurakosken säännöstelypadolta Kiukaisista ja päättyy Kauttuantiehen Euran keskustan yläpuolelle.



Kuva 24. Eurajoen yläosan määritetyt tulva-alueet, tulvaveden syvyys ja tulvariskialueet 1/1000a tulvan sattuessa SYKE:n laatiman mallin perusteella. Suurin tulvariski on erityisesti Euran keskustan ja sen alapuolisella alueella.

4 Aineistot ja menetelmät

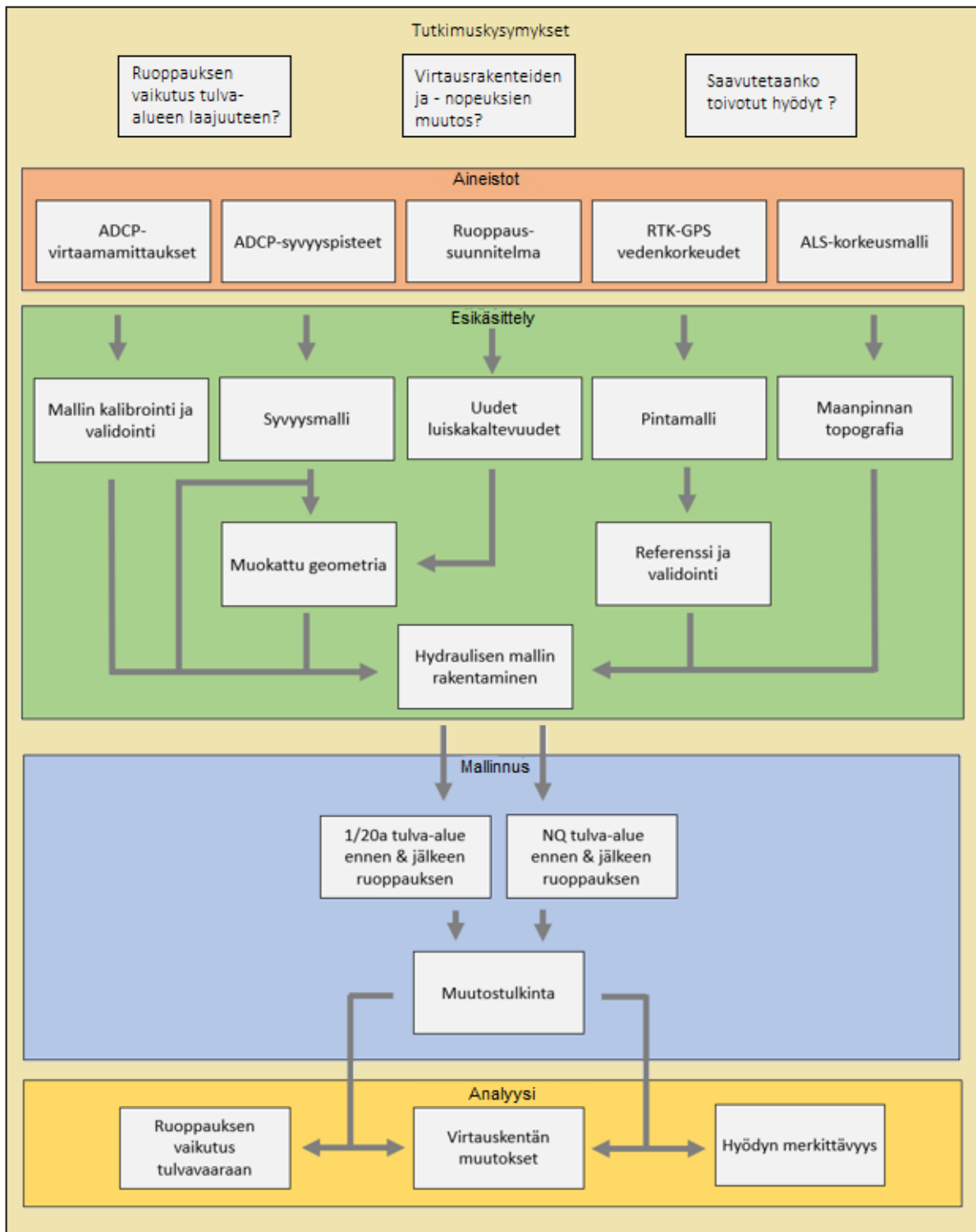
4.1 Tutkimusasetelma ja kenttämittaukset

Vastatakseni tutkimuskysymyksiin aineistojen keräämiseen ja analysointiin käytettiin useita eri menetelmiä (kuva 25). Kenttämittauksilla kerättiin kattava syvyysaineisto Eurajoesta, jotta hydraulisen mallin pohjalle saataisiin mahdollisimman tarkka ja ajankohtainen geometria. Tarkan geometria-aineiston avulla pystytään mallintamaan nykyiset tulvatilanteet ja virtaamat tarkasti. Kun tiedetään lähtötilanne, voidaan sitä verrata mallinnukseen, jonka geometriadata on muovattu ruoppaussuunnitelmaa vastaavaksi. Näin saadaan tietää ruoppauksen vaikutus tulvatilanteisiin eri virtaamilla. Todellisia virtaamatilanteita voidaan käyttää myös referenssiaineistona sekä mallien validoinnissa.

Kenttämittaukset ja aineiston keruu suoritettiin kesä- heinäkuun vaihteessa 2017 matalan virtaaman ja kasvittuneen uoman aikaan, joka vastaa tilannetta johon ruoppaussuunnitelman laskelmat perustuvat. Syvyysaineisto kerättiin käyttämällä akustisia virtausprofiilimittareita (SonTek M9 ja S5). Kenttämittauksissa tehtiin kajakilla meloen kuusi suoraa linjaa ja tiheä "zigzag" -kuvio reunasta reunaan. Mittaukset toteutettiin useammassa eri osassa samaa tekniikkaa käyttäen koko mittausjakson ajan.

Virtaamamittauksia otettiin viidestä eri poikkileikkauksesta, tutkimusalueen ylä- ja alaosasta sekä kolmen merkittävän sivu-uoman jälkeen. Mittaamalla virtaus päivittäin useista kohdista pystyttiin tarkkailemaan muutoksia virtaamassa ja sivu-uomien vesimäärässä mittausjakson aikana. Vedenkorkeutta ja uoman kaltevuutta tarkkailtiin koko mittausjakson ajan päivittäin mittaamalla vedenkorkeus VRS-RTK-GPS:llä useista eri kohdista. Näin varmistettiin se, ettei vedenkorkeus muutu merkittävästi mittausjakson aikana ja vaikuta tuloksiin.

Laitteisto ja sensorit kalibroitiin ennen mittausten aloittamista tarkkuuden parantamiseksi. Lisäksi ne asetettiin vastaamaan paikalla vallitsevia magneettisia olosuhteita (eng. *magnetic declination*). Kalibrointi edesauttaa mittausten virheettömyyttä silloin, kun mittaukset suoritetaan epästabiililla alustalla, jossa laitteisto voi päästä kallistumaan hallitsemattomasti. Mahdollinen kallistuminen, kiertyminen ja kurssi suhteessa virtaukseen määritettiin laitteen omalla kaltevuusmittarilla, DGPS:llä ja kompassilla mittauksen aikana.

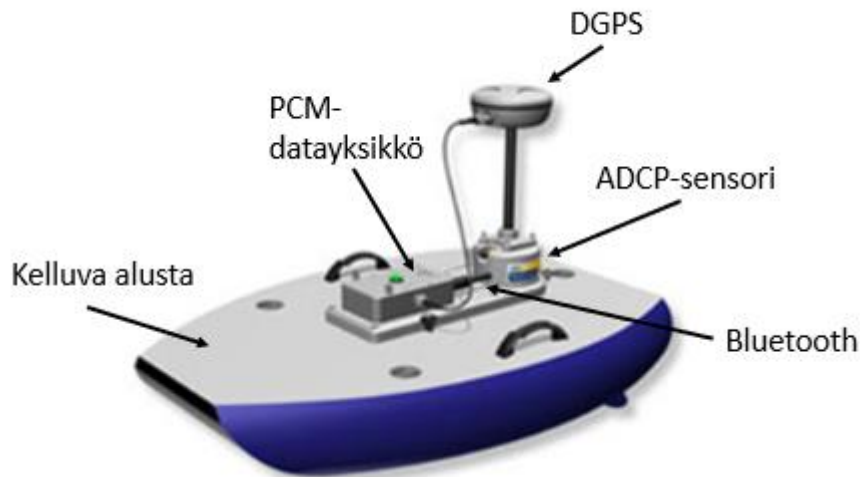


Kuva 25. Tutkielman viitekehys ja tutkimusasetelma. Tutkielma jaotellaan kolmeen osaan: aineistot, aineistojen esikäsittely sekä analysointi, joiden avulla vastataan kolmeen tutkimuskysymykseen.

4.2 Uoman geometrian mittaaminen

Jokiuoman geometria mitattiin kahdella akustisella virtausprofiilimittarilla (eng. *Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP*) Kauttuankoskelta aina Eurakosken padolle asti. Uoma jaettiin kuuteen pitkittäiseen suoraan linjaan, reunasta reunaan. Näiden lisäksi tehtiin koko uoman

pituuuden kattava, tiheä zigzag kuvio uoman reunasta reunaan noin 5 metrin välein. Sensorit olivat kiinnitettyinä kajakin keulaan sekä erilliseen kelluvaan alustaan (kuva 26), joka oli kiinnitettyinä kajakiin (kuvat 27 & 28). Pitkittäisiä suoria linjoja tehdessä kelluva alusta sensoreineen oli kiinnitetty kajakin sivuun noin 1 m päähän kajakista toisen sensorin ollessa kajakin keulassa (kuva 27). Näin saatiin kaksi vierekkäistä pitkää linjaa samaan aikaan. "Zigzag" -kuviota tehdessä kelluva alusta sensoreineen oli kiinnitetty noin 5 m pitkällä narulla kajakin perään, joka mahdollisti sen vapaan liikkumisen kajakin perässä (kuva 28). Mittaukset suoritettiin yläjuoksulta kohti alajuoksua.



Kuva 26. ADCP:n kelluva alusta ja mittauksissa käytettävä laitekokoontamo. Alustaan kiinnitetään datayksikkö PCM, joka tallentaa dataa ja toimii samalla virtalähteenä. PCM:n kiinnitetään DGPS, joka mittaa sijaintitiedon jokaiselle pisteelle. ADCP-sensori kiinnitetään PCM:n, josta sensori ottaa virran. Bluetooth:lla saadaan langaton yhteys tietokoneeseen, jolloin laitetta voidaan komentaa ja ohjailta etäältä.

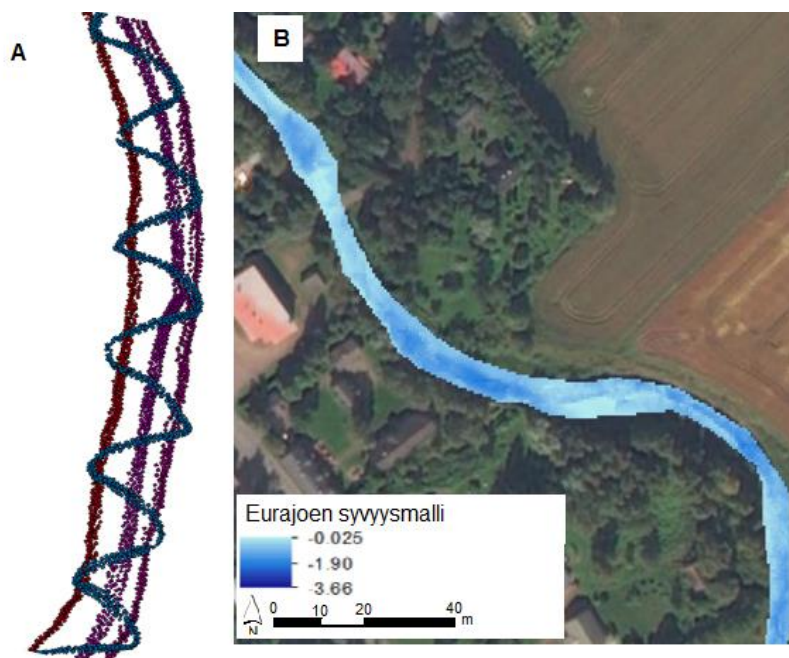


Kuva 27. Uoman pohjan geometria mitattiin kajakilla meloen yläjuoksulta kohti alajuoksua. Kajakin kärkeen oli kiinnitetty ADCP ja sivulle toinen ADCP kelluvaan lauttaan, noin metrin päähän kajakista. Tällä yhdistelmällä tehtiin kuusi suoraa pitkittäistä linjaa yläjuoksulta alajuoksulle. Uoman reunojen paikoin runsas kasvillisuus esti uoman todellisen reunan tavoittamisen (Kuva Santtu Kaipanen).



Kuva 28. ADCP kiinnitettynä kajakin keulaan sekä kelluvaan lauttaan, joka on pitkällä narulla kiinni kajakin perässä. Tällä yhdistelmällä melottiin tiheää "zigzag" kuviota koko uoman läpi reunasta reunaan (Kuva Linnea Blåfield).

ADCP-sensoreilla kerätty pistepilvi (kuva 29, A) uoman geometriasta tuotiin RiverSurveyor-ohjelmasta Exceeliin, jossa se muutettiin x, y, z muotoon. Pisteet tuotiin ArcMap-ohjelmaan, jossa niistä interpoloitiin yhtenäinen, jatkuva pinta (kuva 29, B) käyttäen MML:n tuottamien ilmakuvien perusteella uoman reunoista digitoitua polygonia interpoloinnin rajana. Interpolointiin käytettiin TIN-menetelmää, joka muodostaa pisteistä epäsäännöllisen kolmioverkon. Verkon solukooksi asetettiin 0,2 m. TIN-malli muutettiin rasteripinnaksi, joka edelleen pisteiksi. Näin saatiin koko uoman kattava tiheä pisteistö, joka kuvaa uoman vedenalaista geometriaa. Tarkka geometria toimi hydraulisen mallin pohjana.



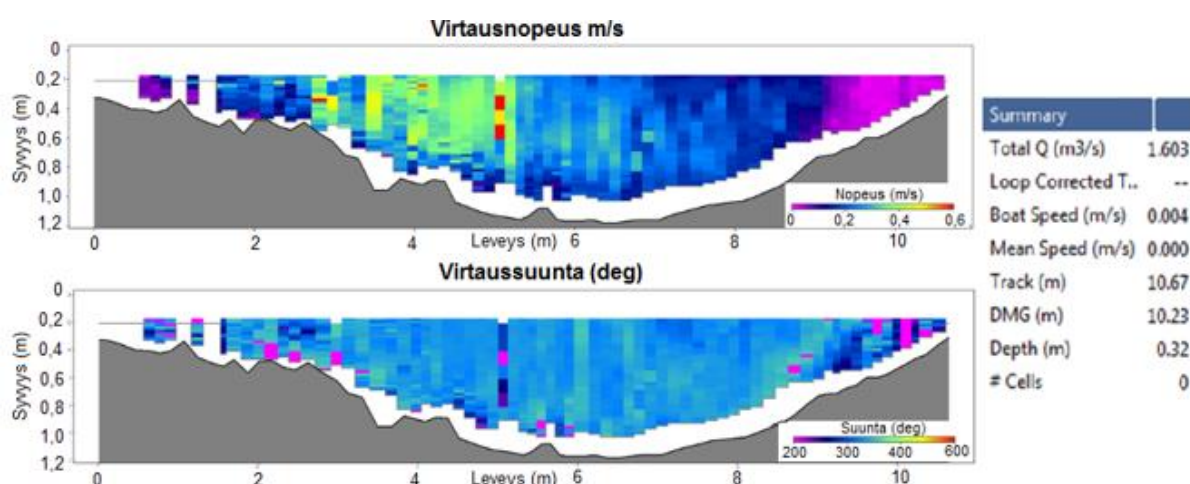
Kuva 29. A. ADCP M9-sensorin tuottamaa pistepilveä, kolme suoraa linjaa sekä "zigzag". Jokaisella pisteellä on tarkka sijainti- ja syvyystieto, jonka avulla pisteistöstä voidaan interpoloida yhtenäinen geometria uoman pohjalle. B. ADCP:n tuottaman pistepilven pohjalta interpoloitu syvyysmalli Eurajoesta.

4.3 Virtausprofiilimittaus

Virtausprofiilimittauksella saadaan selville uoman poikkileikkauksen läpi kulkevan veden määrä eli virtaama. Virtaaman lisäksi saadaan yksityiskohtaista tietoa poikkileikkauksen virtausnopeuksista ja suunnista yksittäisissä virtaussoluissa. Virtaamatietoa tarvitaan hydraulisen mallin kalibroinnissa. Virtaama mitattiin kelluvaan alustaan kiinnitettyllä ADCP-sensorilla tekemällä poikkileikkauksia uoman reunasta reunaan (kuva 30). Sensori mittaa vesipatsaan virtaussolujen nopeuden sekä suunnan ja virtaamatiedon lisäksi se antaa oheistietoa esimerkiksi poikkileikkauksen pituudesta (kuva 31).



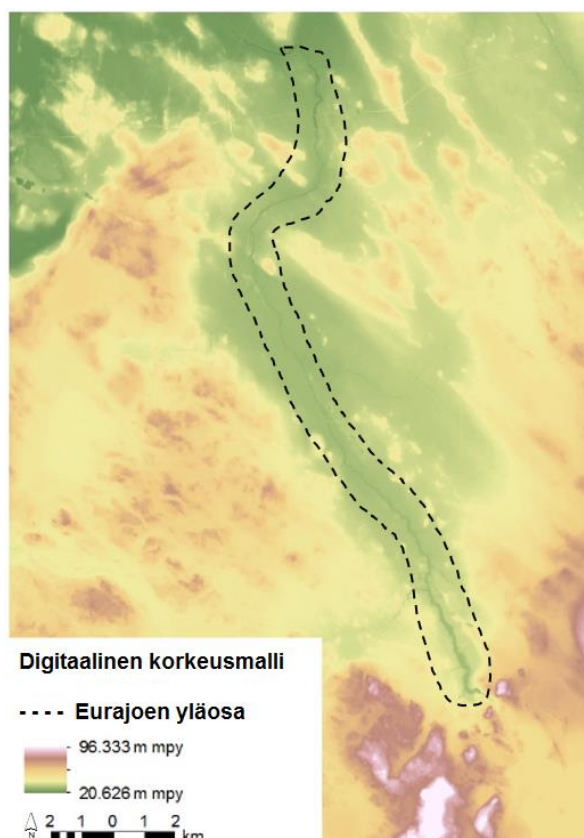
Kuva 30. Virtausprofiili mitattiin lauttaan kiinnitetyllä ADCP:llä, jota ohjattiin naruin uoman kummaltakin reunalta. Lauttaa liikutettiin hiljalleen uoman laidalta toiselle useita kertoja, jotta poikkileikkauksen virtausprofiili saataisi mitattua mahdollisimman tarkasti. Sensorin tulee olla virtausta vasten, kuva on otettu yläjuoksulta kohti alajuoksua (Kuva Linnea Blåfield).



Kuva 31. Virtausprofiilia mitatessa saadaan tietää kyseisen poikkileikkauksen läpi kulkeva vesimäärä eli virtaama, lisäksi saadaan vesipatsaan yksittäisen solun virtausnopeus ja suunta sekä uoman syvyys ja leveys. Kyseinen poikkileikkaus on otettu Euran keskustasta.

4.4 Vedenpinnan yläpuolisten alueiden kartoittaminen

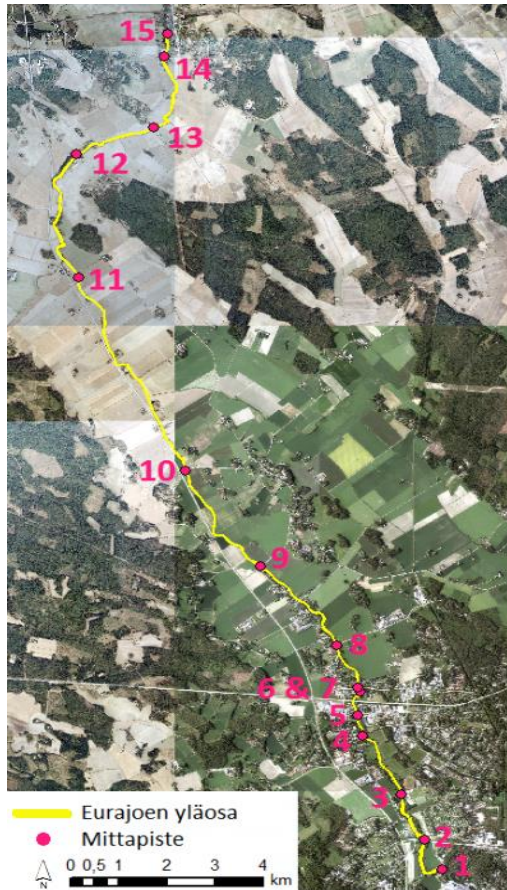
Korkeusmallina vedenpinnan yläpuolisista alueista käytettiin MML:n tuottamaa, pistepilveen perustuvaa 2 m x 2 m ALS-korkeusmallia. LAS muotoinen rasteripinta rajattiin ArcGIS:ssä tutkimusalueen mukaan (kuva 32) ja muutettiin pisteistöksi, jossa jokaisella pisteellä on oma korkeusarvo. Jokaiselle pisteelle laskettiin myös x, y koordinaatit. Korkeusarvot muutettiin negatiivisiksi, sillä Delft-3D-mallinnusohjelmassa merenpinnan taso on 0, sen yläpuoliset korkeusarvot ovat negatiivisia ja merenpinnan tason alapuoliset arvot positiivisia.



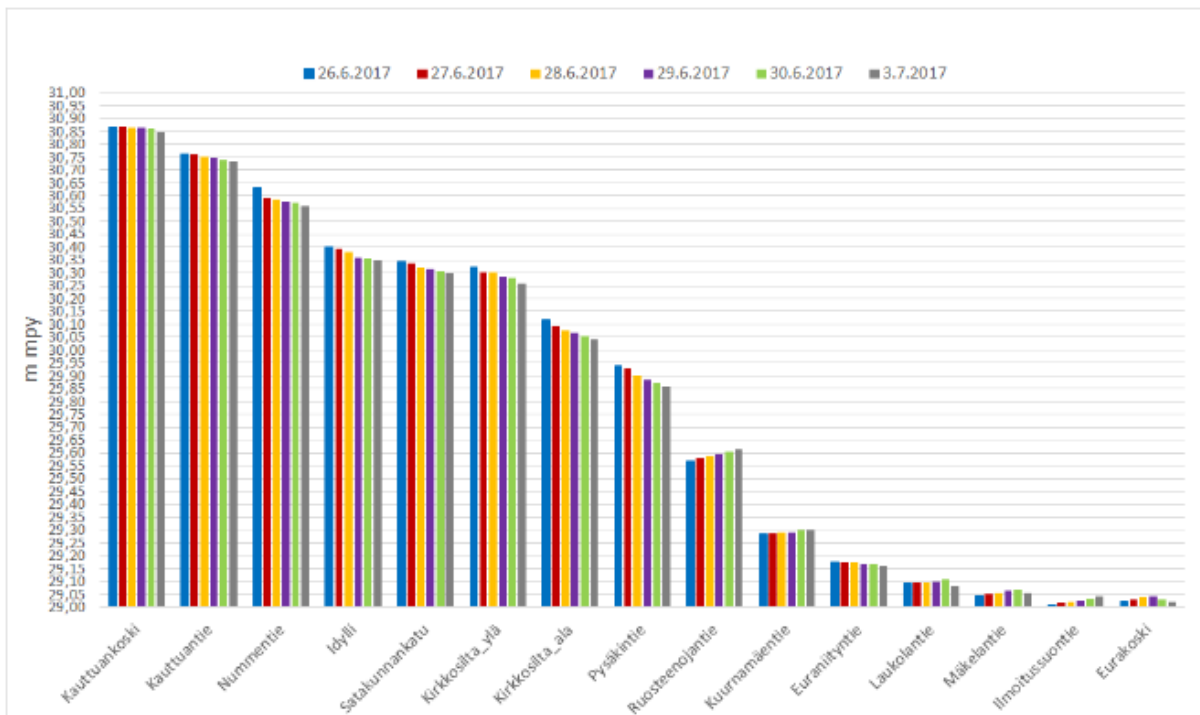
Kuva 32. MML:n tuottamat viisi ALS pohjaista 2m x 2m digitaalista korkeusmallirasteria Eurajoen yläosan alueelta yhdistettynä. Tutkimusalue rajattu mustalla katkoviivalla. Tämä korkeusmalli toimi hydraulisen mallissa maanpinnan topografiana.

4.5 Vedenkorkeuden mittaus

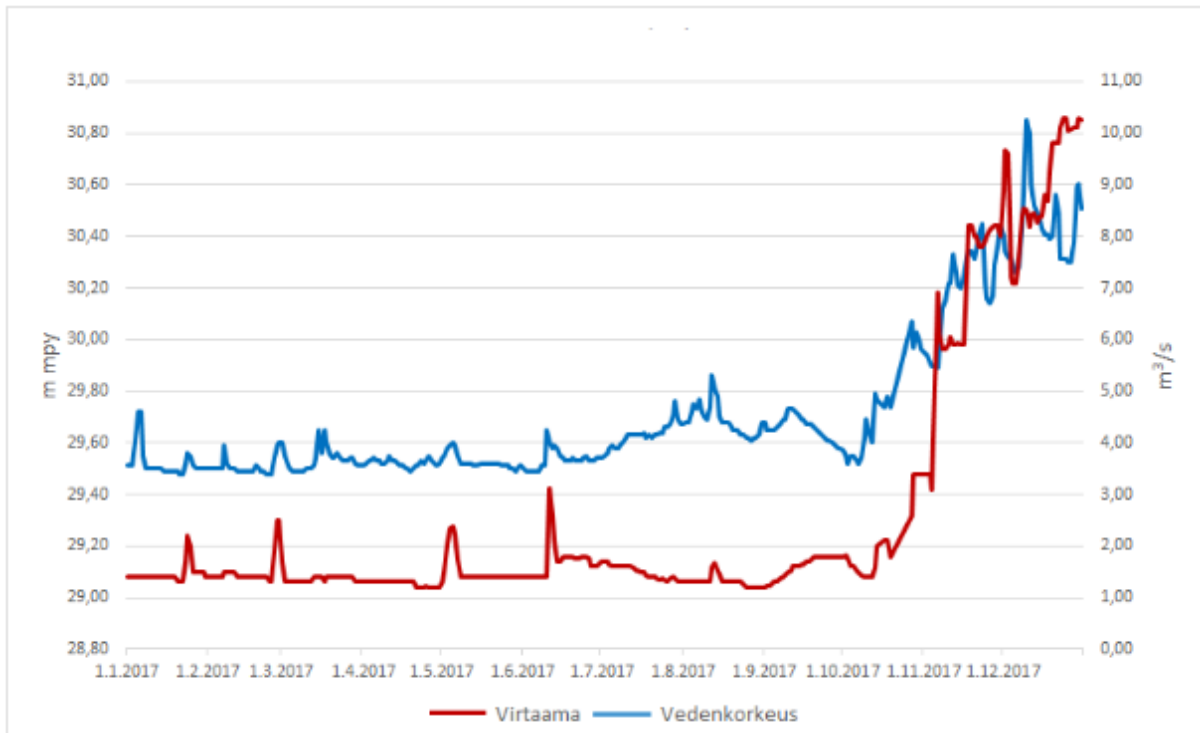
Kenttämittausten aikana vedenkorkeutta ja sen mahdollisia muutoksia tarkkailtiin RTK-GNSS:n (eng. *Real Time Kinematic – Global Navigation Satellite System*) avulla. Sen toiminta perustuu liikkuvan tukiaseman ja vastaanottimen laskemaan differentiaalikorjausdataan koko maailman kattavassa satelliittinavigointijärjestelmässä (Bhatta, 2010). Mittauksia tehtiin päivittäin sekä ylä- että alajuoksulla sekä uoman keskivaiheilla yhteensä 15 eri kohdasta (kuva 33). Vedenkorkeus ei vaihdellut merkittävästi mittausjakson aikana (< 5cm) (kuvat 34 ja 35). Mitatuista arvoista laskettiin kullekin pisteelle keskiarvo, joilla interpoloitiin vedenkorkeuden taso yhtenäiseksi pinnaksi koko uomalle kyseiselle mittausajanjaksolle. Tunnettua vedenkorkeutta käytettiin hydraulisen mallin kalibroinnissa. Tulvaskenaariomallinnuksissa käytettiin ruoppaussuunnitelman historiaan pohjautuvia laskennallisesti ennustettuja vedenkorkeusarvoja.



Kuva 33. Vedenkorkeuden mittapisteeet yläjuoksulta kohti alajuoksua. 1. Kauttuankoski 2. Kauttuantie 3. Nummentie 4. Idylli 5. Satakunnantie 6. Kirkkosilta yläjuoksu 7. Kirkkosilta alajuoksu 8. Pysäköintie 9. Ruosteenojantie 10. Kuurnamäentie 11. Euraniityntie 12. Laukolantie 13. Mäkeläntie 14. Ilmoitussuontie 15. Eurakoski.



Kuva 34. Vedenkorkeuden vaihtelu mittausajanjaksolla. Veden korkeuksia tarkkailtiin päivittäin 15 eri pisteestä. Vedenkorkeus ei vaihdellut merkittävästi mittausjakson aikana (+-5 cm). Suurin vaihtelu oli Kirkkosillan ja Pysäköintien mittauspisteissä, joka on koskialuetta. Seuraavilla kahdella mittauspisteillä vedenkorkeus on noussut ja voidaan olettaa tämän osuuden joesta johtavan huonommin vettä.



Kuva 35. Virtaaman vaikutus vedenkorkeuksiin vuonna 2017. Data SYKE:n HERTTA -palvelusta. Virtaamatieto on Pyhäjärven Luusualta ja vedenkorkeus Euran keskustasta Pysäköintien kohdalta. Virtaama- ja vedenkorkeuspiikit seuraavat toisiaan eikä niiden välillä ole juurikaan viivettä. Heinä- syyskuun välillä kasvillisuus aiheuttaa sen, että vaikka virtaama laskee, vedenkorkeus nousee, sillä kasvillisuus vie tilaa uomasta. Mittausajanjaksolla vedenkorkeuden sekä virtaaman muutos on ollut vähäistä.

4.6 Ruoppaussuunnitelma

Ruoppaussuunnitelman perusteella digitoitiin uudet uoman rajat levennyksen ylärajaa pitkin. Ylärajalla tarkoitetaan poistettavan massan ehdotonta maksimimäärää. Suunnitelmassa ilmoitettujen uusien pohjanleveyksien ja luiskakaltevuuksien perusteella laskettiin syvyysarvot levennyksessä syntyneille uusille uoman reunoille. Lisäksi suunnitelmassa esitetyjä tavoitteellisia vedenkorkeusarvoja käytettiin referenssinä tulvamallinnuksessa skenaarioissa, joissa havainnollistettiin tilannetta ruoppauksen jälkeen.

Etelä-Suomen Aluehallintovirasto on myöntänyt luvan Eurajoen yläosan ruoppaukselle tammikuussa 2018. Varsinais-Suomen ELY-keskus (jatkossa VARELY) on yhdessä Euran kunnan kanssa valmistellut ruoppaussuunnitelman, jossa on hyvin yksityiskohtaiset ohjeet ruoppaukselle. Ruoppaus on osa Eurajoen yläosan tulvasuojeluhanketta, jonka tavoitteena suunnitella ja toteuttaa tarpeelliset tulvasuojelutoimenpiteet Euran keskusta-alueen ja sen alapuolisen jokiosuuden tulvariskien vähentämiseksi aina Eurakoskelle asti (Kipinä-Salokannel 2015).

Hankkeen keskeinen osa on Eurajoen yläosan perkaus ja lisäksi siinä on tarkoitus suunnitella ja toteuttaa Eurajoen virkistyskäyttöä ja kalataloutta kehittäviä toimenpiteitä. Noin 11 km pitkä hankealue alkaa Kauttuantiestä ja päättyy Eurakosken säännöstelypadolle. Tavoitteena on mahdollistaa Pyhäjärven säännöstelyluvan lupaehtojen mukainen 17 m³/s maksimivirtaaman juoksuttaminen Pyhäjärvestä Eurajokeen ilman joen tulvimista (taulukko 4). Tarkoitus on edesauttaa Euran keskusta-alueen sekä sen alapuolisen jokiosuuden

tulvavaara vähentymistä. Lisäksi, tavoite on parantaa joen ekologista tilaa kunnostamalla koskia ja tekemällä kalataloudellinen kunnostus.

VARELY:n yksiulotteisessa mallinnusohjelmassa laskemien tulvavedenkorkeuksien lähtökohdaksi on otettu, että Eurakosken padon kaikki viisi säännöstelyluokkaa ovat täysin avoimina, jolloin mitoitusvirtaamalla 33,0 m³/s lähtövedenkorkeus on +28,45 N60. Keski- ja alivirtaamilla vedenkorkeuksien laskennassa on oletettu, että vedenkorkeus Eurakosken padolla pidetään säännöstelyn ylärajalla eli korkeudessa +28,44 N60.

Taulukko 4. Ruoppauksen mitoitusvirtaaman lähtökohdaksi on otettu Pyhäjärven juokutusluvun sallima 17 m³/s ja samanaikaisesti Eurajoen yläjuoksulla sattuva HQ1/20 tapahtuva tulvatilanne. Virtaamien muutokset on huomioitu ja mitoitettu kolmen suurimman sivu-uoman mukaan ollen seuraavat:

Paaluväli	Mitoitusvirtaama (m ³ /s)
95+50 – 135+00 Vaaninoja	33,0
135+00 – 156+50 Ruonoja	29,5
156+50 – 208+70 Ahmasoja	22,6
208+70 - Pyhäjärvi	17,0

Ruoppauksen mitoituksena käytetään Pyhäjärvestä juoksutettavaa luvan sallimaa maksimivirtaamaa (17 m³/s) sekä Eurajoen yläosan valuma-alueella kerran 20 vuodessa toistuvaa tulvatilannetta, jolloin virtaama nousee 35,7 m³/s:ssa. Ruoppauksessa käytetään samaa paalunumerointia kuin vuoden 1977 perkaussuunnitelmassa (liite 1), jossa yksi paaluväli vastaa 100 metriä. Tavoitteeseen on tarkoitus päästä poistamalla uoman pohjalle kertynyttä sedimenttiä sekä veden virtausta haittaavaa kasvillisuutta ja muita esteitä kuten vanhoja siltoja.

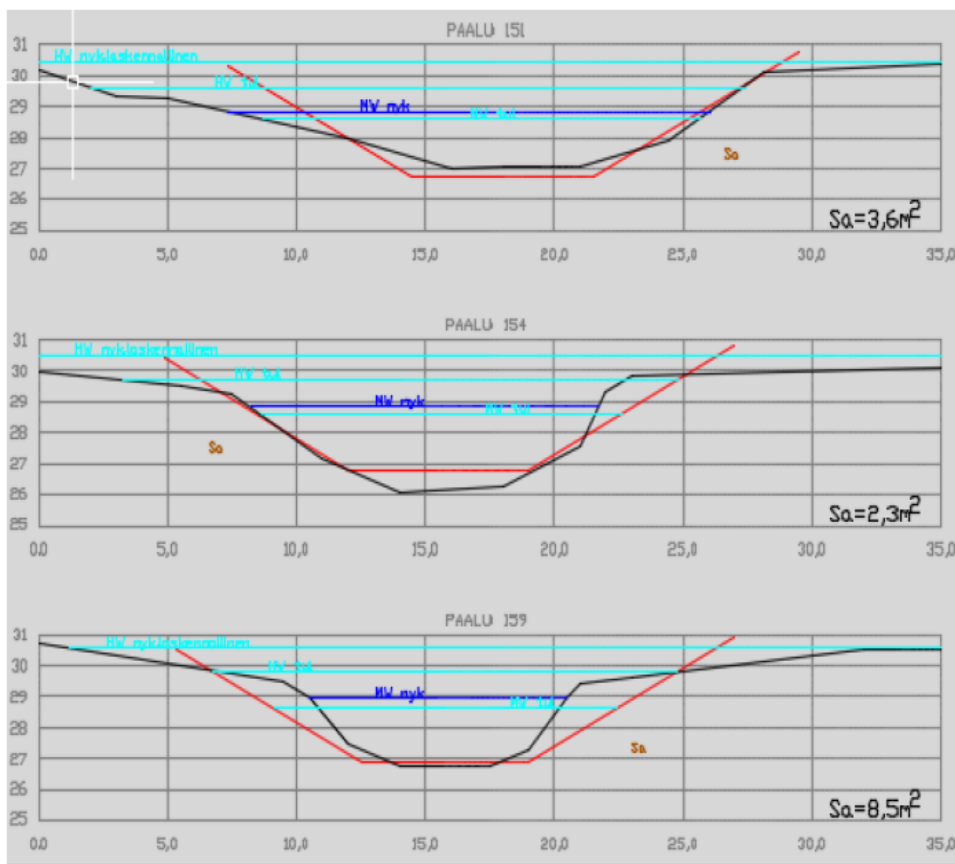
Pääsääntöisesti ruoppaus toteutetaan leventämällä uomaa (taulukko 5) (kuva 36), mutta yläjuoksulla, paalusta 180+00 ylöspäin, uomaa myös syventämällä enimmillään noin metrin. Laskelmien mukaan joen ruoppauksella pystyttäisiin laskemaan vedenkorkeutta tulvatilanteessa (1/20a) 0,96 metrillä (taulukko 6). Laskelmat perustuvat tilanteeseen, jossa virtaama on ollut 1,8 m³/s ja kasvillisuuden takia vedenkorkeus on ollut kasvittoman ajan keskivirtaamatilannetta (5 m³/s) korkeampi. VARELY:n laskennassa uoman virtausvastusta kuvaavan Manningin karkeruskertoimen arvona on käytetty lukua 0,030, mikä vastaa uoman virtausvastusta välittömästi perkauksen jälkeen. Aikaisemman perkauksen mitoitusvirtaamana on käytetty arvoa 27 m³/s.

Taulukko 5. ruoppausmitoitus eri paaluväleillä perustuen VARELY:n laskentoihin. Luiskakaltevuuksien sekä pohjanleveyksien perusteella muokattiin ADCP:lla mitattua pohjangeometriaa vastaamaan ruoppauksen jälkeistä geometriaa.

Paaluväli	Pituuskaltevuus l	Pohjanleveys m	Luiskakaltevuus
95+40...135+00	0,00000	9,0	1:3/1:2
135+00...156+00	0,00025	7,0	1:2
156+00...199+00	0,00020	6,5	1:2
199+00...204+15	0,00300	6,5	1:2
204+50...211+00	0,00100	6,5	1:2
211+00...228+70	ei perkausta	ei perkausta	ei perkausta

Taulukko 6. Ruoppauksen arvioitu vaikutus Eurajoen yläosan vedenkorkeuksiin. Arvot on laskettu HEC-RAS 1D-mallilla VARELY:n toimesta. Vedenkorkeuden odotetaan laskevan tulvatilanteessa parhaimmillaan noin metrillä Euran keskustassa ruoppauksen jälkeen.

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

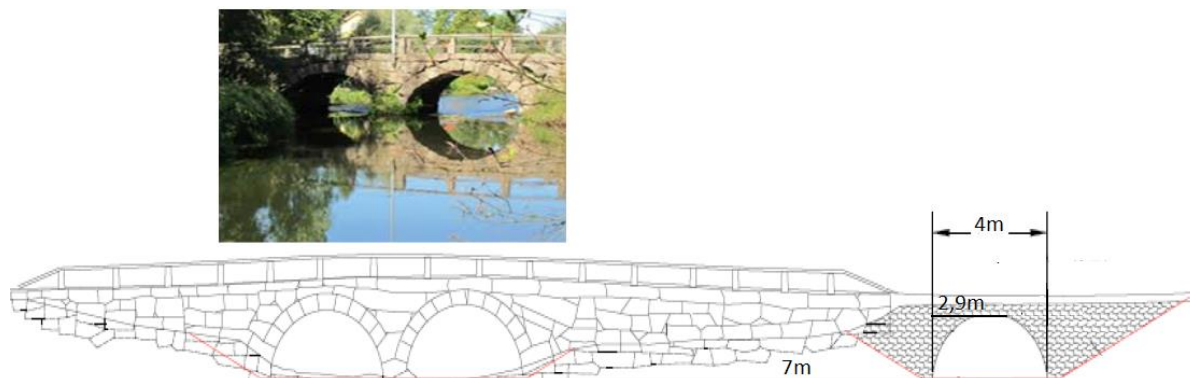


Kuva 36. Poikkileikkauksia Eurajoen keskivaiheilla, paaluvälillä 151-159. Punainen viiva on tuleva geometria, musta nykyinen. Vaaleansiniset poikkiviivat kuvaavat vedenkorkeutta; ylin viiva on vedenkorkeus nykyään HW tilanteessa, keskimäinen on tuleva vedenkorkeus HW tilanteessa, alin viiva on tuleva vedenkorkeus NW tilanteessa. Tumman sininen viiva kuvaa nykyistä MW:tä.

Pääosin savesta koostuvia massoja poistetaan yhteensä 108 000 m³ ktr. Kasvillisuutta tullaan poistamaan noin 25 000 m². Tarvittaessa myös siltojen rakenteita muutetaan, mikäli ne ovat esteenä virtaukselle esim. Kirkkosiltaan rakennetaan kolmas virtausaukko (kuvat 36 ja 37). Sen nykyiset kaksi holvikaaren muotoista aukkoa ovat riittämättömät jo nykyisillä juoksu- määriillä. Sen rakenteesta johtuen, ilman kolmatta virtausaukkoa sillan alapuolisen jokiosuuden ruoppaus ei tuota tulvatilanteessa toivottua hyötyä.



Kuva 36. Kirkkosilta (ympyröity keltaisella) sijaitsee Euran keskustan välittömässä läheisyydessä sen alajuoksun puolella. Kirkkosillan rakenteella on merkittävä vaikutus Euran keskustan vedenkorkeuksiin. Myös muut ihmisen tekemät rakenteet, kuten kuvan muut sillat ja laiturit, vaikuttavat veden virtaukseen uomassa.



Kuva 37. Kirkkosiltaan rakennetaan kolmas virtausaukko noin 7 m päähän nykyisistä aukoista. Uuden aukon leveys on 4 m ja korkeus 2,9 m. Uuden aukon tarkoitus on edesauttaa veden virtausta tulvatilanteessa., sillä nykyiset kaksi aukkoa eivät ole mitoitukseltaan riittäviä tulvatilanteessa.

4.7 Virtausolosuhteiden mallintaminen Delft-3D -ohjelmalla

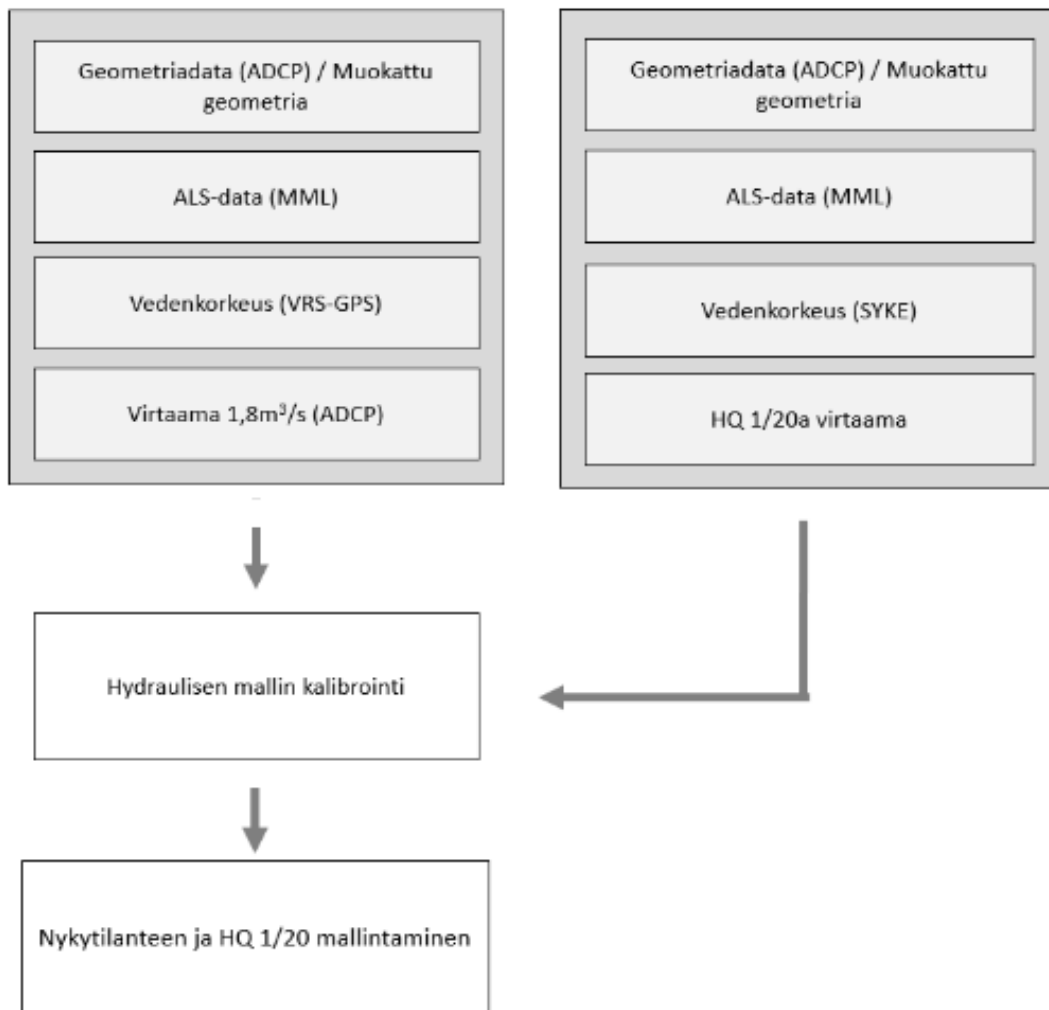
Delft-3D on hydraulinen mallinnusohjelma, joka on suunnattu erityisesti hydrodynamiikan, sedimentin kulkeutumisen, morfologian sekä vedenlaadun tarkasteluun virtavesi-, estuaari- ja rannikkoympäristöissä (Delft-3D FLOW user manual 2019). Delft-3D ohjelmassa on virtaus, morfologia- sekä aaltomodulit, joista virtausmoduuli on Delft-3D:n perusta. Virtausmoduuli

(FLOW) on moniulotteinen (2D tai 3D) hydrodynaaminen simulointiohjelma, joka laskee vuorovesi-ilmiötä sekä meteorologisia arvoja hyödyntäen epävakaata (eng. *non-steady*) virtaus- ja kuljetusdynamiikkaa. Simulaatiossa hyödynnetään kurvilineaarista, valmiiksi rajattua gridiä (rasteriverkkoa) tai etukäteen määriteltyjä koordinaatteja. 3D simulaatioissa vertikaalinen gridi määritellään niin sanotun sigma koordinaatin eli Z-arvon perusteella. Aaltomoduuli (WAVE) laskee pinta- ja vedensisäisten aaltojen nopeutta, liikkeitä ja muutoksia esimerkiksi tuulen vaikutuksesta.

Morfologiamoduuli sisältyy virtausmoduuliin ja se laskee sedimenttikuljetusta (liuennut aines, pohja- ja kokonaiskuljetus) sekä morfologisia muutoksia satunnaisille koheesivoimien vaikutuksen alaisena oleville osasille samoin kuin ei koheesivoimien vaikutuksessa oleville (Luijendijk 2001). Sekä virtaus että aallot ovat pääasiallisina vaikuttavina voimina ja siihen lisätään monimutkainen kuljetusta kuvaava kaava. Jokainen moduuli hyödyntää toinen toistaan ja morfologia moduuli onkin lähes kokonaan muodostettu virtaus- ja aaltomoduulien perusteella hyödyntäen aikaskaalaa (Delft-3D FLOW user manual 2019). Aikaskaala voi olla päivistä, esimerkiksi myrskyn tai voimakkaan tulvan aiheuttama nopea muutos, aina vuosisatoihin asti, jolloin vaikuttava tekijä on systeemin oma dynamiikka. Morfologia moduulia voidaan myös hyödyntää esimerkiksi simuloitaessa tai vesistöalueen täyttöö maalla tai ruoppausta, kuten tässä tutkielmassa

Tässä tutkielmassa käytetään Delft 2D-virtausmoduulia virtausolosuhteiden laskemiseen. Hydraulinen malli vaatii tarkan lähtöaineiston (kuva 38) ja ennen mallin laatimista on oltava käsitys lainalaisuuksista, joita mallinnettava ilmiö noudattaa. Mallin parametrien arvot tulee olla sellaiset, että laskentatulokset vastaavat oikeita fysikaalisia havaintoja (Koistinen 2006). Näiden optimaalisten arvojen etsimistä kutsutaan kalibroinniksi. Mallin parametreille asetetaan arvot ja malli ajetaan.

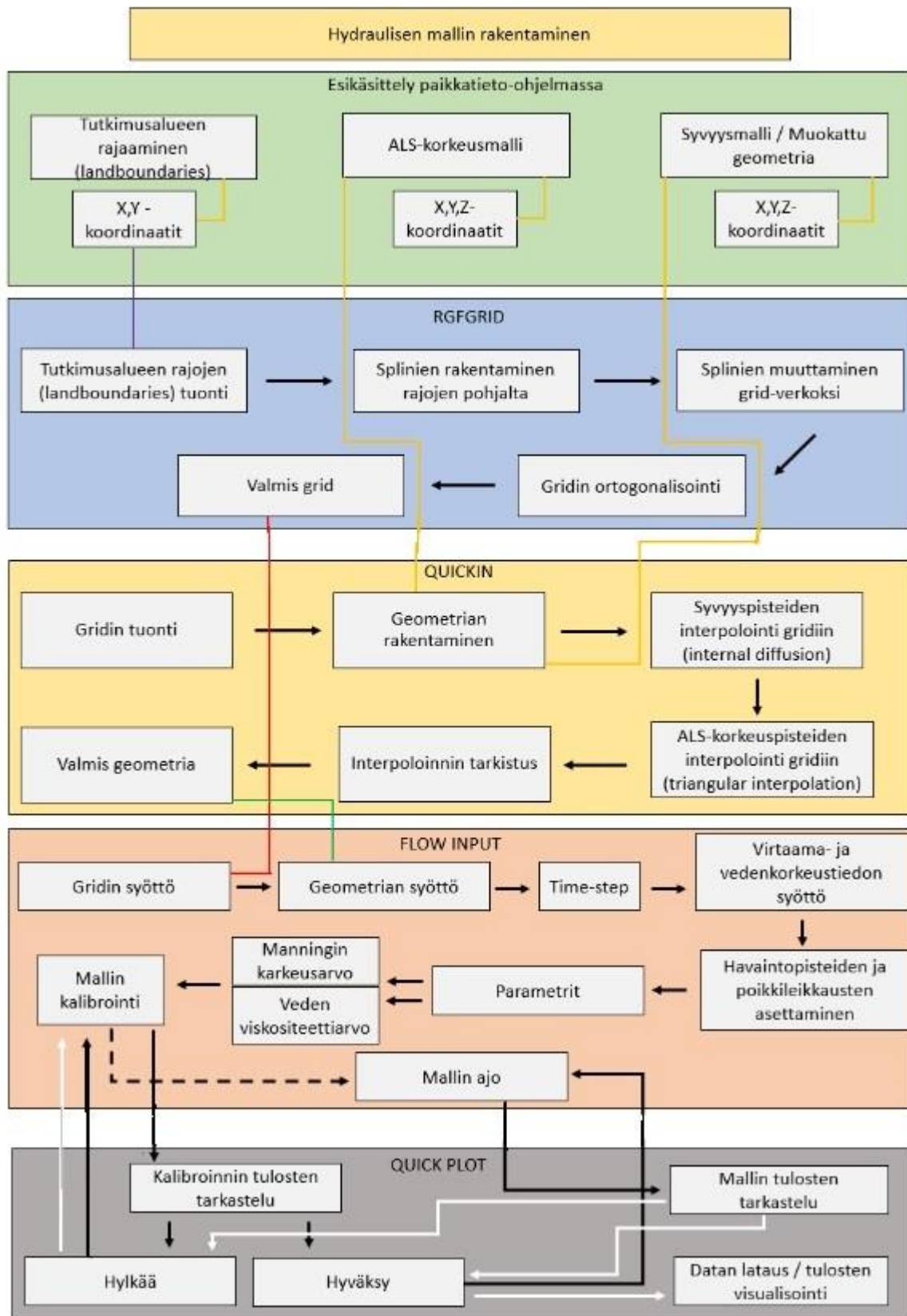
Laskentatuloksista voidaan päätellä, mitä parametrejä tulee muuttaa vertaamalla tuloksia havaintoihin. Tätä jatketaan, kunnes saadaan havaintoja vastaavia riittävän hyviä tuloksia, tai kunnes tulokset eivät enää parane (Luijendijk 2001; Koistinen 2006). Kalibroinnin jälkeen voidaan ajaa suurempia skenaarioita. Asettamalla useita havaintopisteitä mallinnettavalle alueelle, voidaan seurata vedenkorkeuden vaihtelua uoman eri vaiheilla ja verrata niitä jälleen havaintoihin tai ennusteisiin. Kun päästään halutulle tarkkuudelle, voidaan mallin tuloksia tarkastella paikkatieto-ohjelmassa.



Kuva 38. DELFT-3D-mallinnusohjelma tarvitsee virtausolosuhteiden mallintamiseen neljää erilaista lähtöaineistoa. 1. Pohjan geometria 2. Maanpinnan topografia 3. Vedenkorkeustieto 4. Virtaamatieto. Nämä ovat pääkomponentit mallinnuksessa ja niiden tarkkuus vaikuttaa huomattavasti tulosten tarkkkuuteen ja oikeellisuuteen (Alho ym. 2015).

4.7.1 Mallin rakennuksen vaiheet

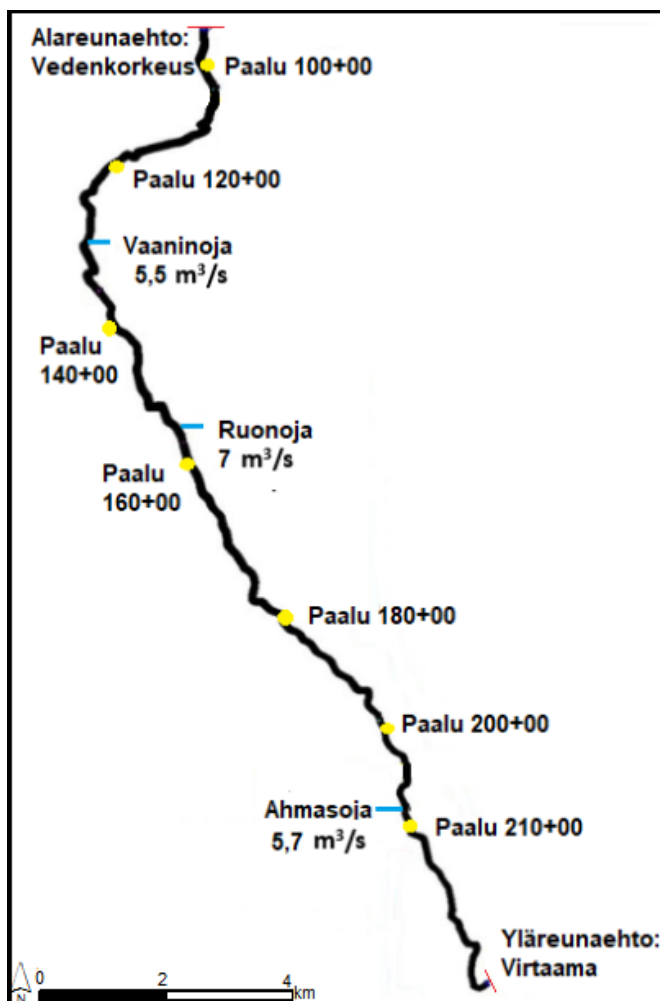
Mallin rakentaminen on monimutkainen ja monivaiheinen prosessi (kuva 39). Tutkielmassa mallinnettiin neljä eri skenaariota Eurajoen virtausdynamikasta ja tulvavaarasta, jotta mahdollisen ruoppauksen vaikutuksista saataisiin luotettavaa tietoa. Skenaarioista kaksi kuvaa nykyistä tilannetta ja kaksi tulevaa, ruoppauksen jälkeistä tilannetta. Skenaarioiden pohjaksi rakennettiin kaksi eri geometriaa, nykyinen geometria sekä ruoppauksen jälkeinen geometria. Geometrian rakentamiseen käytettiin itse ADCP:lla mitattua vedenalaista geometriaa sekä MML:n tuottamaa ALS:n perustuvaa korkeusmallia maanpinnan topografiasta. Ruoppauksen jälkeistä tilannetta kuvaavien mallien geometria muokattiin vastaamaan ruoppaussuunnitelmassa määriteltyjä mittoja uoman pohjasta.



Kuva 39. Hydraulisen mallin rakennuksen vaiheet. Mallin rakennus on monimutkainen prosessi, joka vaatii erityistä tarkkuutta. Kalibrointi suoritetaan yhä uudelleen, kunnes mallin tulokset vastaavat referenssi arvoja. Mikäli kalibrointi ei onnistu, täytyy mallia muokata paremmaksi.

Skenaarioille annettiin nimeksi NW nyk., HW nyk., jotka kuvaavat nykyistä tilannetta alivedenkorkeudella (NW) ja ylivedenkorkeudella (HW) sekä NW tul. ja HW tul., jotka kuvaavat tulevaa tilannetta alivedenkorkeudella ja ylivedenkorkeudella. Alivedenkorkeutta käytettiin skenaarioiden kalibrointimalleissa, sillä se vastasi kenttämittausten aikana ollutta vedenkorkeus- ja virtaamatilannetta. Näin referenssiarvoina pystyttiin käyttämään todellista tilannetta. Manningin karkeusarvona NW nyk. ja HW nyk. skenaarioissa käytettiin lukua 0,035 ja NW tul. ja HW tul. skenaarioissa lukua 0,03. Manningin karkeusarvot oli laskettu valmiiksi VARELY:n toimesta. Karkeusarvon muutoksella pystyttiin simuloimaan sedimentin ja kasvillisuuden poistamisen vaikutusta virtaukseen uomassa. Kaikissa skenaarioissa yläreunaehtona oli virtaama ja alareunaehtona vedenkorkeus. Kalibrointimallien skenaarioissa, NW nyk. ja NW tul., käytettiin lähtövirtaamana kenttämittaushetkellä mitattua $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$ virtaamaa ja vedenkorkeuden referenssiarvoina itse mitattuja vedenkorkeuksia (kuva 34).

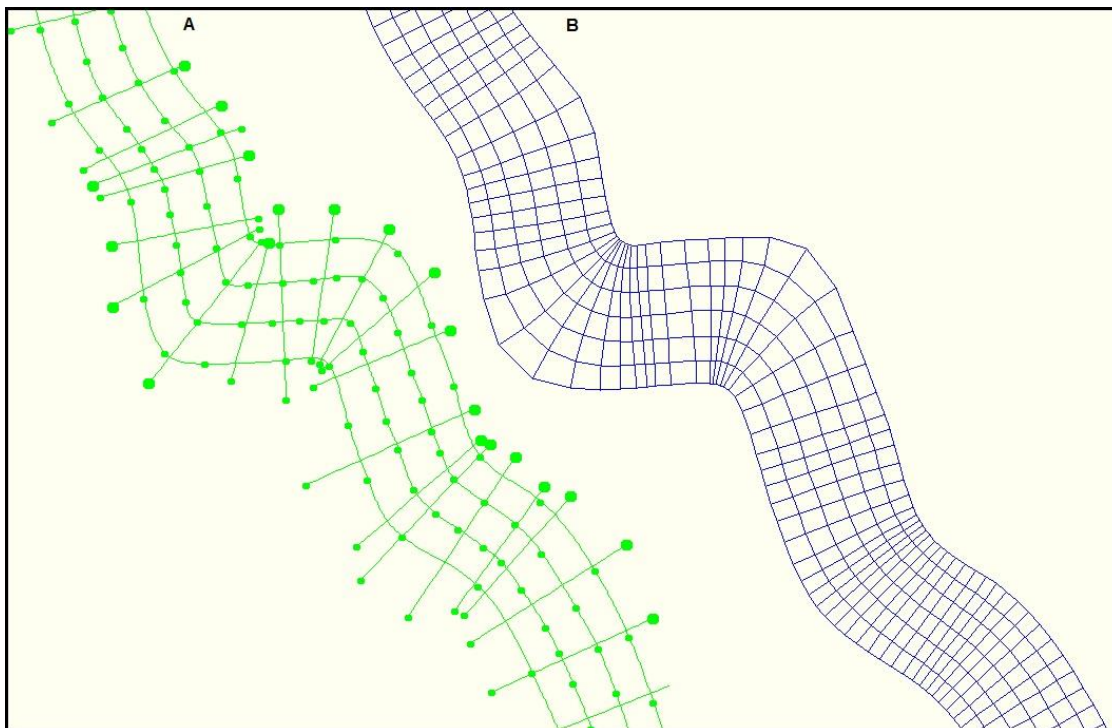
Tulvamallien skenaarioissa, HW nyk. ja HW tul., lähtövirtaamana oli $17 \text{ m}^3/\text{s}$ ja vedenkorkeuden referenssiarvoina käytettiin SYKE:n tietokantaan perustuvia havaittuja arvoja sekä ruoppaussuunnitelmassa esitettyjä HEC-RAS-malliin perustuvia arvoja. Näiden lisäksi HW nyk. ja HW tul. skenaarioihin asetettiin väliehtoina sivu-uomista tulevia virtaamia niin, että virtaama kasvaa lopulta $35,7 \text{ m}^3/\text{s}$:ssa (kuva 40). Kalibrointimallien (NW nyk. ja NW tul.) alivedenkorkeus ja alivirtaama tilanteessa sivu-uomien vaikutus virtaamaan on käytännössä olematon.



Kuva 40. Reunaehdot, havaintopisteet sekä virtaamat, joilla mallit ajettiin. Eurajoen yläosaan laskee kolme sivu-uomaa, joiden vaikutus virtaamaan tulvatilanteessa on huomattava: Ahmasoja, Ruonoja sekä Vaaninoja. Vedenkorkeuden havaintopisteet asetettiin samojen paalujen kohdalle kuin ne ovat ruoppaussuunnitelmassa eli noin 2 km välein.

Mallien pohjat rakennettiin Delft3D:n alaisella RGFGRID-ohjelmalla luomalla uoman muotoja mukaileva gridi eli rasteriverkko. Gridin rakennusvaihe on monimutkainen ja aikaavievä vaihe, sillä gridin tulee täyttää tietyt laatuvaatimukset, jotta se toimii. Gridin laatu määritellään resoluutiolla ja ortogonalisuudella, jälkimmäisen ollessa määrittävämpi tekijä. Gridin tulee mukailla mallinnettavan alueen muotoja ja sen rasteriverkoston tulee olla mahdollisimman suorakulmainen. Lisäksi rasterin rivivälien tulee olla tasaisia koko alueella. Muita huomioon otettavia speksejä ovat gridin tasaisuus (eng. smoothness) ja muotosuhde (eng. aspect ratio).

Gridi tehdään tuomalla tutkimusalueen rajaviivat (eng. landboundaries) ohjelmaan ja muuttamalla rajaviivat splineiksi. Rajaviivat tein multipoint -muotoon ArcGIS -ohjelmassa noin 30 metrin etäisyydelle uomasta sen molemmin puolin. Pisteille laskettiin x ja y sijainnin koordinaatit ja ne muutettiin Excelissä Delft3D:n luettavaan yhdenstoista (11) desimaalin muotoon. Kun vertikaaliset rajaviivat on tuotu ohjelmaan ja muutettu RGFGRID:ssä splineiksi rakennetaan niiden välille horisontaalisia splinejä mahdollisimman kohtisuoraan vertikaalisiin splineihin nähden (kuva 41, A). Splinit muutetaan gridin rungoksi (kuva 41, B), jota tihennetään vertikaalisessa ja horisontaalisessa suunnassa kunnes päästään haluttuun resoluutioon. Gridiä voidaan tihentää myös paikallisesti joltain tietyltä alueelta.

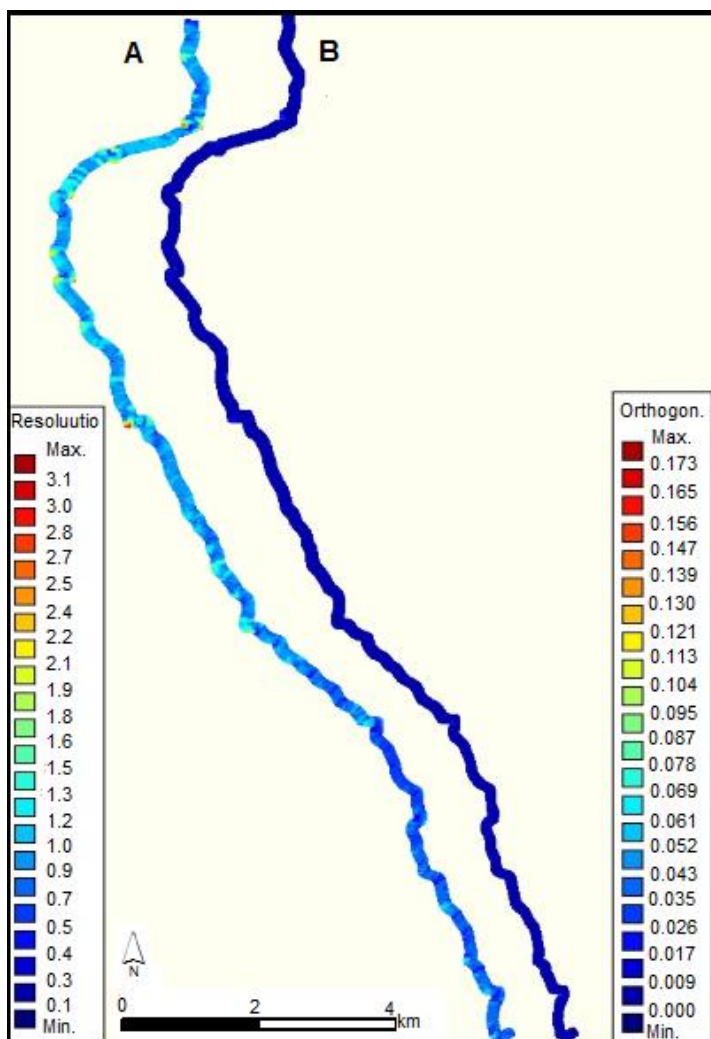


Kuva 41. Gridin rakennuksen vaiheet. A. Splinit toimivat grid-verkon runkona. Reunimmaisiet vertikaaliset splinit perustuvat etukäteen määriteltyihin koordinaatteihin (landboundaries), niiden ympärille rakennetaan lisää sekä vertikaalisia että horisontaalisia splinejä. Horisontaalisten splinien tulee olla mahdollisimman suorakulmaisia suhteessa vertikaalisiin splineihin. B. Grid-verkko on mallin runko. Sen resoluutio määrittää mallin laskentasuojien määrän, mitä tiheämpi verkko on, sitä pienipiirteisemmin malli laskee virtauksen. Samalla myös laskenta-aika kasvaa.

Gridin reunojen resoluution ei tarvitse olla yhtä tarkka kuin gridin keskustan resoluution, olettaen, että uoma kulkee gridin keskellä. Tässä mallinnuksessa käytetyssä gridissä resoluutio on 0,6-3 metriä, uoman keskellä resoluution ollessa keskimäärin noin metrin luokkaa (kuva 42). Pienin resoluutio on kurvien sisäkaarteissa, jossa gridin rasterikoko on

kaikkein pienin, vastaavasti suurin resoluutio on kurvien ulkokaarteissa, joissa gridin rasterisolut ovat venyneet ja kaartuneet (kuva 42, B).

Kun gridin rasterikoko ja resoluutio on halutussa tarkkuudessa, gridi ortogonalisoidaan (eng. orthogonalise grid). Ortogonalisointi oikaisee gridin soluja ja tekee niistä suorakulmaisempia ja kohtisuorempia. Ortogonalisuus (eng. orthogonality) on tärkein gridin laadun määrittäjä. Ortogonalisoinnin tarkkuuden eli rasterin solujen keskiön kosiniarvon (eng. cosine value) tulee olla alle 0.04 gridin sisällä. Gridin ulkoreunoilla voidaan sallia hieman tätä suurempia arvoja, kuitenkin maksimissaan 0.1. Mitä suurempi poikkeama kosiniarvolla on nolasta, sitä suurempia virheitä se aiheuttaa virtauksen suuntaan ja paineen gradienttiin. Tässä tutkielmassa käytetyn gridin ortogonalisuus saatiin koko gridin keskusalueelta alle 0.04 (kuva 42, A).



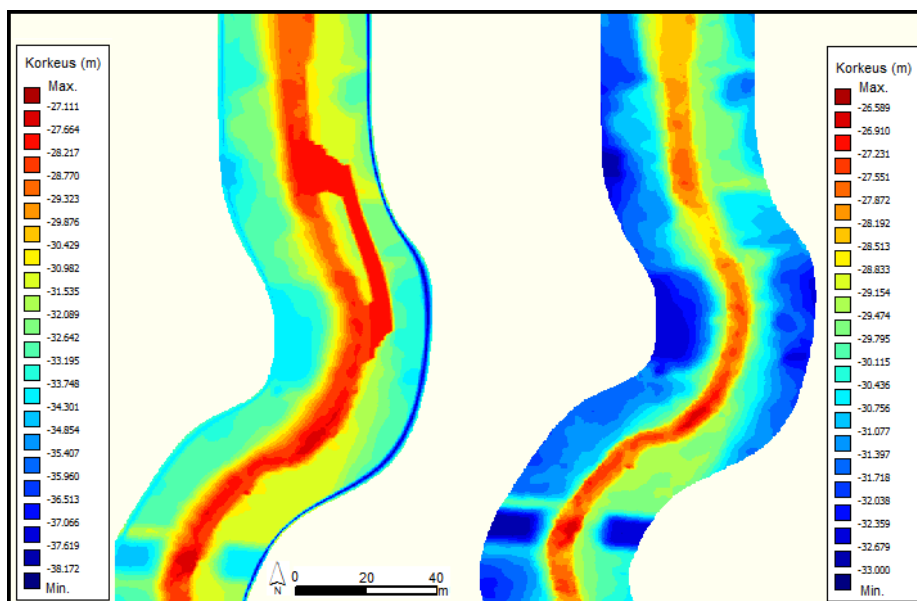
Kuva 42. Gridiverkon resoluutio sekä ortogonalisuus. A. Gridin resoluutio on pääsääntöisesti noin metrin. Reunoja kohti sekä ulkokaarteissa resoluutio kasvaa, kun taas sisäkaarteissa se pienenee. Joen kaarteissa resoluution vaihtelu on suurempaa solujen muodon ja koon takia. B. Gridin ortogonalisoinnin tulos, koko uoma on kosiniarvoltaan alle 0.04.

Kun gridi on valmis ja laadultaan vaatimukset täyttävä, luodaan gridin alueelle tutkimusalueen geometria käyttäen Delft3D:n alaista QUICKIN-ohjelmaa. Korkeuspisteet geometriaa varten tuodaan x, y, z -muodossa ja interpoloidaan gridin alueelle käyttäen apuna polygoneja ja erilaisia interpolointi työkaluja. Lopuksi tulee varmistaa, että jokaisella gridin solulla on korkeusarvo, jotta se toimii oikein. Tämän tutkimuksen mallin geometria luotiin käyttämällä sekä itse ADCP:llä mitattua syvyysdataa, että MML:n tuottamaa ALS 2 m x 2 m korkeusmallia.

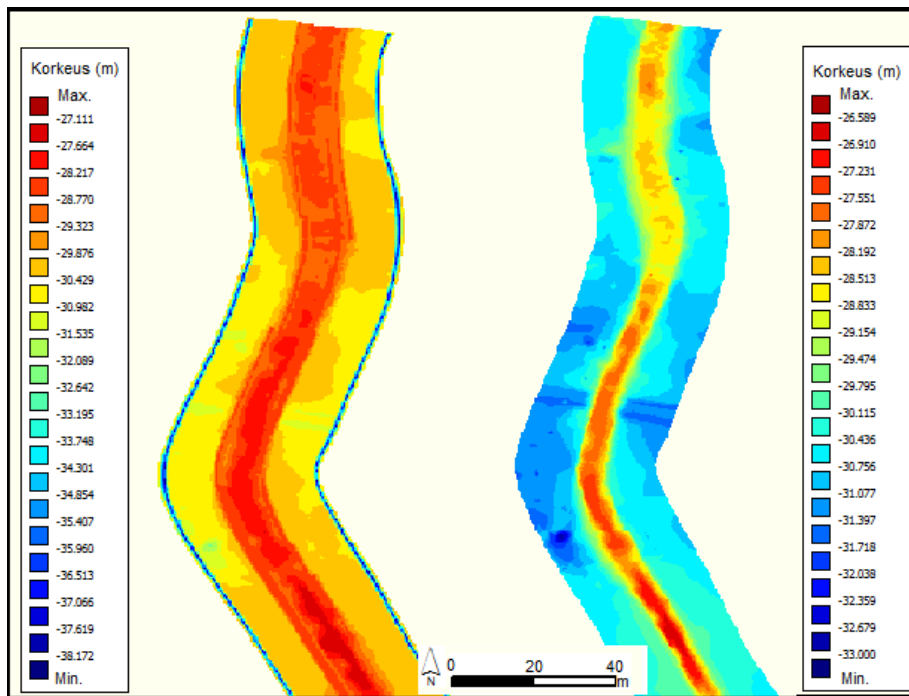
ADCP:n pistepilvestä luodun 0,2 m x 0,2 m syvyysmallin z-arvot vähennettiin pintamallin vastaavista z-arvoista, jolloin saatiin kunkin pisteen korkeus merenpinnasta. Arvot muutettiin ohjelmaa varten Excelissä yhdentoista (11) desimaalin muotoon ja z-arvot negatiivisiksi, jolloin ollaan ohjelman mukaan merenpinnan yläpuolella. Viisi (5) 2 m x 2 m ALS-rasteria yhdistettiin ja sen jälkeen rajattiin ArcGIS ohjelmassa tutkimusalueen mittaan. Tämän jälkeen rasterit muutettiin pisteiksi ja jokaiselle pisteelle laskettiin x ja y sijainti eli koordinaattiarvo. Lopuksi ALS-korkeuspisteet (x, y, z) muutettiin Excelissä samaan muotoon kuin syvyysmallin pistepilvi eli vastaamaan ohjelman vaatimuksia (11 desimaalia).

Geometria rakennettiin osissa tuomalla ensin uoman syvyyspisteet ohjelmaan, jonka jälkeen tehtiin solujen automaattinen täyttö (grid cell averaging). Toiminto sopii käytettäväksi tilanteessa, jossa pisteitä on enemmän kuin gridin soluja. Sen avulla täyttyvät kaikki gridin solut, joiden sisällä on vähintään kaksi pistettä, solun lopulliseksi korkeusarvoksi tulee näiden pisteiden keskiarvo. Loput solut täytettiin tekemällä uoman reunoja mukailevia polygoneja, joiden sisällä olevista pisteistä interpoloitiin (internal diffusion) polygonin sisälle jääville soluille korkeusarvo. Internal diffusion -menetelmä laskee polygonin sisällä olevien pisteiden sekä polygonia ulkopuolelta ympäröivien pisteiden korkeusarvojen perusteella tasaisesti porrastetun geometrian alueelle.

Tämän jälkeen lisättiin maanpinnan pisteet (ALS) ja koska niiden tiheys oli liian harva automaattiseen täyttöön, käytettiin niiden interpoloinnissa triangular interpolation -menetelmää sekä polygonien täyttöä internal diffusion -toiminnolla. Triangular interpolation sopii parhaiten tilanteisiin, joissa gridin soluja on huomattavasti enemmän kuin tuotuja pisteitä. Menetelmä muodostaa kolmioverkon pisteiden välille, jonka avulla se laskee interpoloinnissa käytettäviä keskiarvoja pisteiden välille. Lopuksi interpoloinnin laadun voi tarkistaa (check interpolation), jolloin ohjelma vertaa alkuperäisiä arvoja interpoloituihin arvoihin, näiden erotus indikoi interpoloinnin laatua. Valmiit geometriat toimivat hydraulisen mallin pohjana (kuvat 43 & 44).



Kuva 43. ALS-pisteisiin perustuva maanpinnan topografia sekä ADCP-pisteisiin perustuva uoman geometria interpoloituna gridin sisään. Kirkkosillan ylimääräinen kolmas virtausaukko ja noin yhden metrin syvennys mitattuun geometriaan on lisätty vasemmanpuoleiseen malliin.



Kuva 44. ALS-pisteisiin perustuva maanpinnan topografia sekä ADCP-pisteisiin perustuva uoman geometria interpoloituina gridin sisään. Vasemmanpuoleisen mallin geometriassa uoma on levennetty ruoppaussuunnitelman arvojen mukaan.

Kun gridi ja geometria ovat valmiita ne syötetään Delft3D:n laskentaohjelmaan, Flow Input:iin. Gridin ja geometrian lisäksi syötetään halutut reunaehdot ja parametrit kuten virtaama ja vedenkorkeus sekä Manningin karkeusarvo ja veden viskositeetti. Manningin karkeusarvo ja veden viskositeetti määrittelevät suurimmilta osin veden virtauksen mallissa. Juuri kyseiseen malliin sopivat arvot löytävät kokeilemalla useampia mahdollisia eri arvoja mallin kalibrointi vaiheessa. Eri pohjamateriaaleille ja kasvittuneisuusasteille on kuitenkin olemassa laskennallisia Manningin karkeusarvoja, jotka toimivat suuntaa antavina.

Kun ohjelma on ajanut mallit, niiden tuloksia tarkastella QUICKPLOT-toiminnolla. Jos vedenpinnan arvot vastaavat referenssi- ja validointiarvoja, voidaan mallia pitää onnistuneena ja sen sisältämä data ladataan ohjelmasta ulos myöhempää tarkastelua varten esim. paikkatieto-ohjelmassa. Jos arvot eivät vastaa referenssiarvoja täytyy mallin parametreja muokata ja kalibroida malli uudestaan, kunnes tulokset vastaavat tunnettua tilannetta.

5 Tulokset

5.1 Ruoppauksen vaikutus tulvavaaraan

Neljän eri mallin skenaarioista puhutaan tuloksissa nimillä NW nyk., NW tul., HW nyk. ja HW tul. NW:lla viitataan skenaarioihin, jotka on ajettu alivirtaamalla (NQ) ja alivedenkorkeuksilla (NW). HW:lla viitataan skenaarioihin, jotka on ajettu 1/20a tulvavirtaamalla eli ylivirtaamalla (HQ) ja ylivedenkorkeuksilla (HW). Sekä NW että HW tilanteista ajettiin kaksi skenaariota; nykyinen (nyk.) ja tuleva (tul).

Tulvan peittävyys laskettiin ArcGIS-ohjelmalla Delft-malleihin perustuvista tulvarasterista. Koko-uoman (Kauttuankoskelta Eurakosken padolle) tulva-alueen laajuus on HW nyk. skenaarion mukaan 65,7 hehtaaria, josta 49,9 hehtaaria on maanpintaa normaalin uoman ulkopuolella (taulukko 7). HW tul. skenaarion mukaan ruoppauksen jälkeen koko uoman tulva-alueen laajuus on 52 hehtaaria, josta 24 hehtaaria on maanpintaa (taulukko 7). Tulvan alle jäävä maanpinta vähenee koko uoman alueella 51,9 %. Kun lasketaan pelkästään ruopattavan osuuden tulva-alueen laajuus (Euran keskustasta Eurakosken padolle), saadaan arvoiksi HW nyk. skenaariolla 56,8 hehtaaria, josta 30,1 hehtaaria on maanpintaa uoman ulkopuolella ja HW tul. mallilla 41 hehtaaria josta 16,6 hehtaaria on maanpintaa uoman ulkopuolella. Tulviminen ruoppausalueella vähenee 44,9 %.

Taulukko 7. Tulva-alueen pinta-ala hehtaareina HW-skenaarioiden mukaan. Koko uomalla tarkoitetaan aluetta Kauttuankoskelta Eurakosken padolle ja ruoppausalueella aluetta Euran keskustasta Eurakosken padolle. Kummastakin skenaariosta on laskettu nykyinen tilanne (nyk.) sekä tuleva tilanne (tul.). Koko tulva-alue kuvastaa vedenpinnan kokonaismäärää ja tulvan alle jäävä maanpinta sitä aluetta, joka matalan virtaaman aikaan on luonnollisen uoman ulkopuolella, mutta nyt tulvaveden peittämä. Tulvan alle jäävä maanpinta vähenee 51,9 % koko uomassa ja ruoppausalueella 44,9 %.

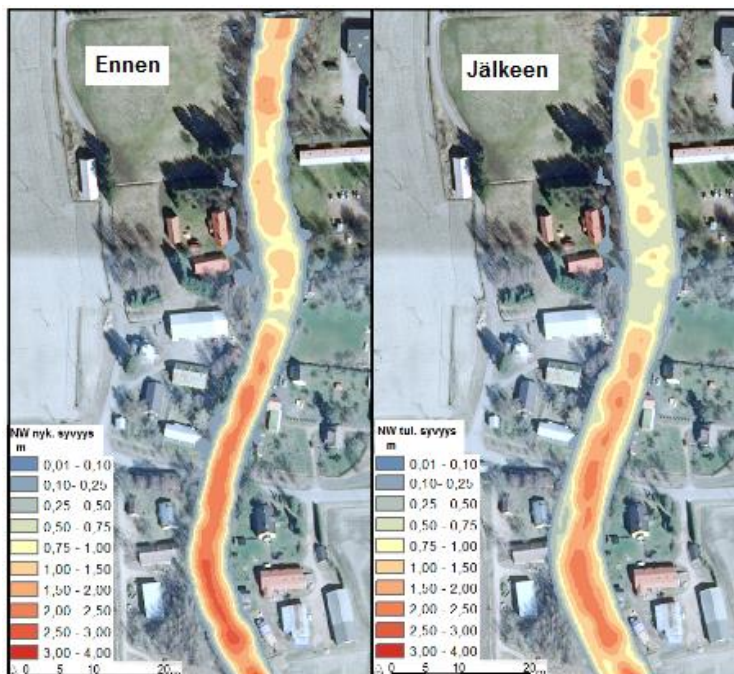
	Koko tulva-alue (ha)	Tulvan alle jäävä maanpinta (ha)
Koko uoma HW nyk.	65,7	49,9
Koko uoma HW tul.	52,0	24,0
Ruoppausalue HW nyk.	56,8	30,1
Ruoppausalue HW tul.	41,0	16,6

Vesisyvyyden muutosta tarkasteltiin Kirkkosillan ja Eurakosken padon kohdalta tulvavaarakartoin (kuvat 45-53). Koko uomassa tapahtuvaa vesisyvyyden jakautumista ja muutosta tarkasteltiin syvyysluokittain pylväsdiagrammein (kuvat 54-59). Uoman leventyessä ja tulva-alueen pienentyessä, myös niiden vesisyvyys muuttuu. Muutos vesisyvytydessä on NW nyk.- ja NW tul. -skenaarioiden sekä HW nyk.- ja HW tul. -skenaarioiden välillä on huomattava (kuvat 45-50). NW tul. -skenaariossa uoman vesisyvyys laskee levennettävällä uoman osuudella voimakkaasti suhteessa NW nyk. -skenaarioon (kuvat 45, 47, 48, 50). Uoman levennyksen myötä vesisyvyys laskee, sillä sama vesimäärä levittäytyy nyt laajemmalle alueelle. HW tul. -skenaariossa uoman levennyksen myötä tulva-alueen laajuus pienenee ja tulvavaara vähenee suhteessa HW nyk.-skenaarioon veden pysyessä uomassa ruoppauksen jälkeen. HW-skenaarioissa ero on huomattava HW nyk.- ja HW tul- skenaarioiden tulva-alueiden laajuuksien ja niiden vesisyvyyksien välillä (46, 49, 50, 51). HW tul. -skenaariossa tulva-alueiden koko pienenee 51,9 % suhteessa HW nyk.-skenaarioon.

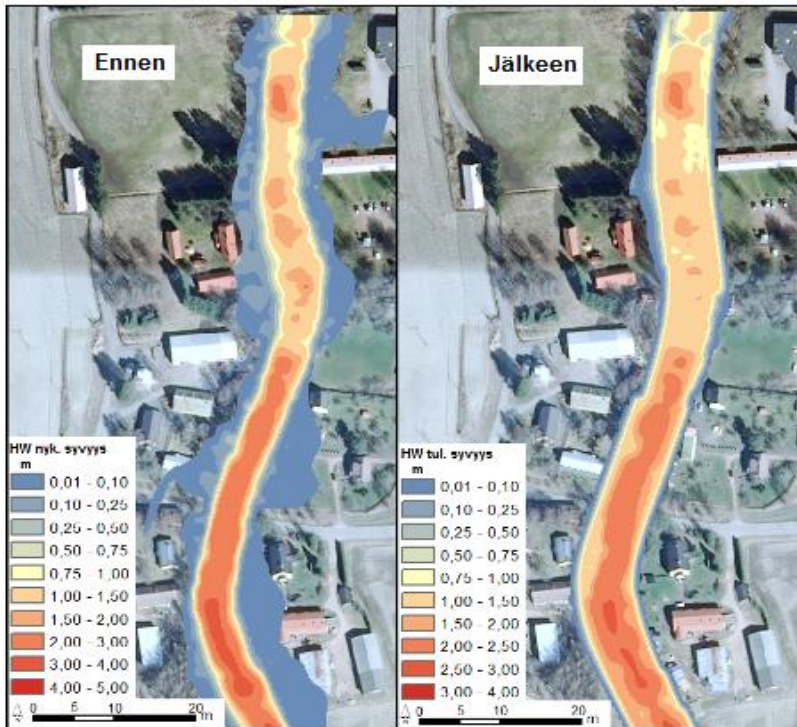
Vesisyvyyden muutos laskettiin skenaarioiden erotuksella. Erotuskuvat (kuvat 47 & 50) osoittavat muutoksen määrän skenaarioiden välillä. NW-skenaarioiden erotuksessa vesisyvyys vähenee levennettävällä alueella (kuva 47) ja kasvaa syvennettävällä alueella (kuva 50). HW skenaarioiden erotuksessa vesisyvyys laskee (kuva 47) lukuun ottamatta satunnaisia painaumuksia uoman pohjassa sekä Kirkkosillan kolmatta virtausaukkoa, joissa vesisyvyys kasvaa (kuva 50). Kirkkosillan kolmas virtausaukko erottuu sekä NW- että HW-skenaarioiden

erotuksessa positiivisena, sillä sen syvyysarvo on NW nyky.- ja HW nyky.-skenaarioissa ollut 0 m (kuvat 47 & 50). NW tul.- ja NW nyky.-skenaarioiden erotus osoittaa, että vesisyvyys laskee ruoppauksen jälkeen 62 %:ssa vesisyvyysarvon omaavista soluista. HW-skenaarioiden erotuksessa vastaava luku on 91 %. Erotukset on laskettu vähentämällä NW tul.- ja HW tul.-skenaarioista NW nyky.- ja HW nyky.-skenaarioiden vesisyvyydet.

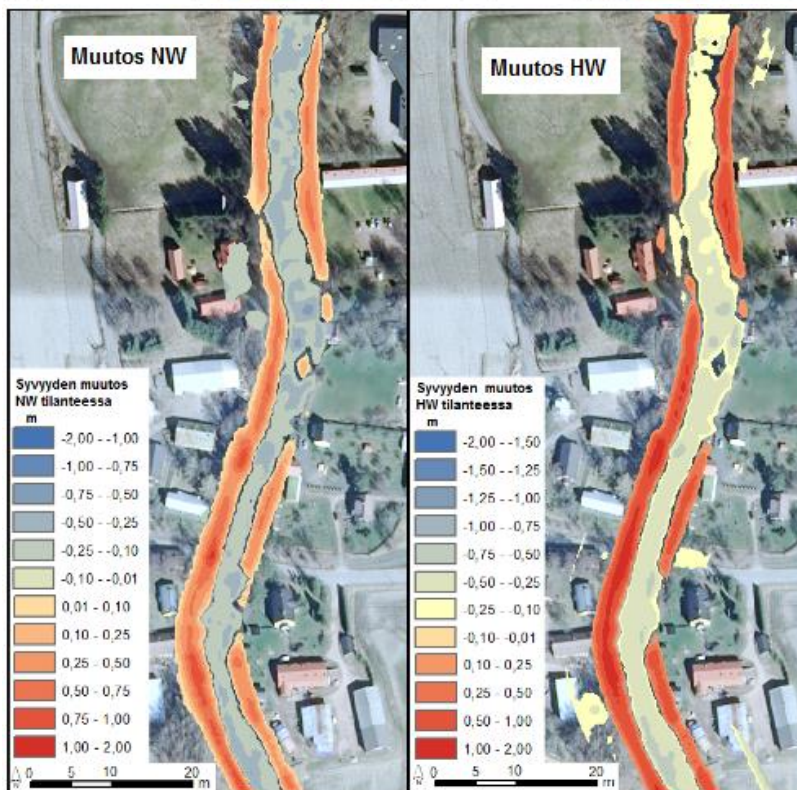
Tuloksien perusteella vaikutus tulva-alueen laajuuteen vaihtelee kuitenkin spatiaalisesti tutkimusalueen sisällä (kuva 51). Euran keskustassa tulva-alueet ei juurikaan pienene kooltaan, mutta niiden vesisyvyys laskee, kun taas alajuoksulla tulvatasangot häviävät kokonaan (kuva 51). Erityisesti Piuhon kylän jälkeen vesi pysyy uomassa lähes täysin ja tulvatasangot häviävät (kuva 52, liite 2). Ruoppauksen teho siis kasvaa kohti alajuoksua. Rakennuksiin kohdistuva tulvariski vähenee ruoppauksen jälkeen. HW nyky.-skenaariossa tulvavesi tavoittaa yhteensä 54 rakennusta joen varrella, kun vastaavasti HW tul.-skenaariossa tulvavesi tavoittaa 9 rakennusta (kuva 53). Tämä tarkoittaa 83,3 % laskua rakennuksiin kohdistuvassa tulvavaarassa. NW-skenaarioissa vesi ei uhkaa rakennuksia.



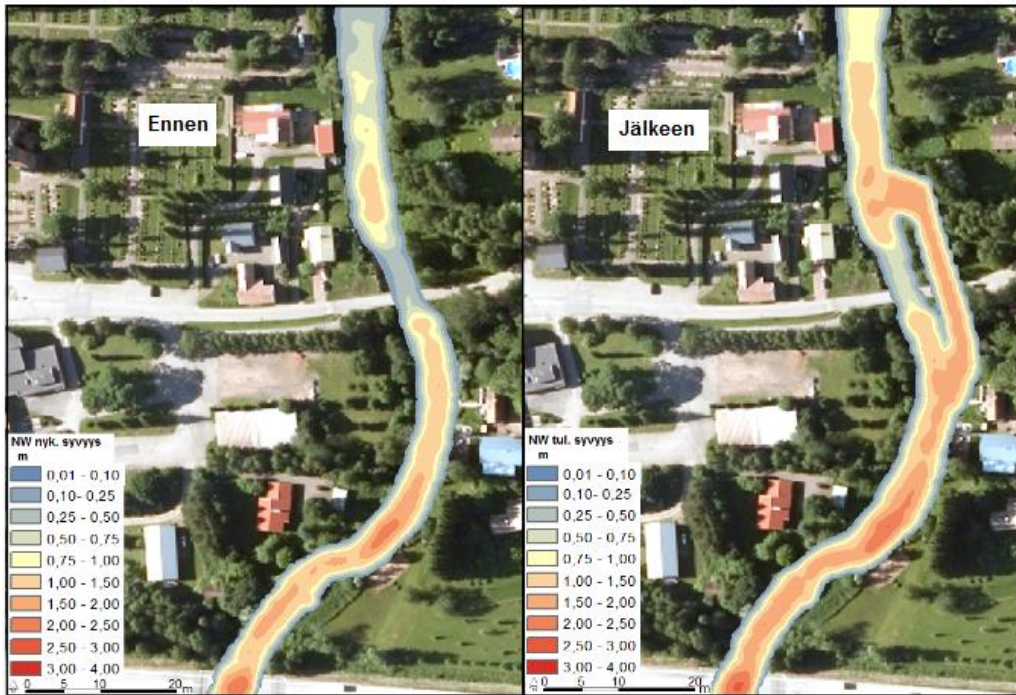
Kuva 45. NW-skenaarioiden mukainen vesisyvyys Eurakosken padolla ennen ja jälkeen ruoppauksen. Uoman levennyksen myötä vesisyvyys laskee, sillä sama vesimäärä levittäytyy nyt laajemmalle alueelle.



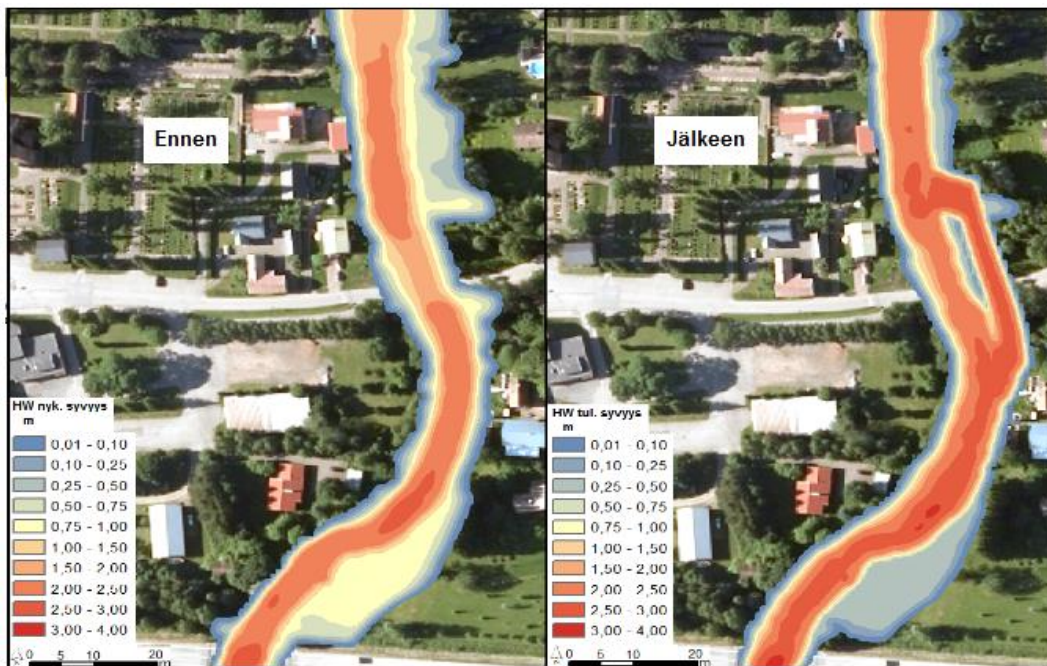
Kuva 46. HW-skenaarioiden mukainen vesisyvyys Eurakosken padolla ennen ja jälkeen ruoppauksen. Uoman levennyksen myötä tulva-alueen laajuus pienenee ja tulvavaara vähenee veden pysyessä uomassa. Vesisyvyys uomassa ei juurikaan muutu levennyksestä huolimatta.



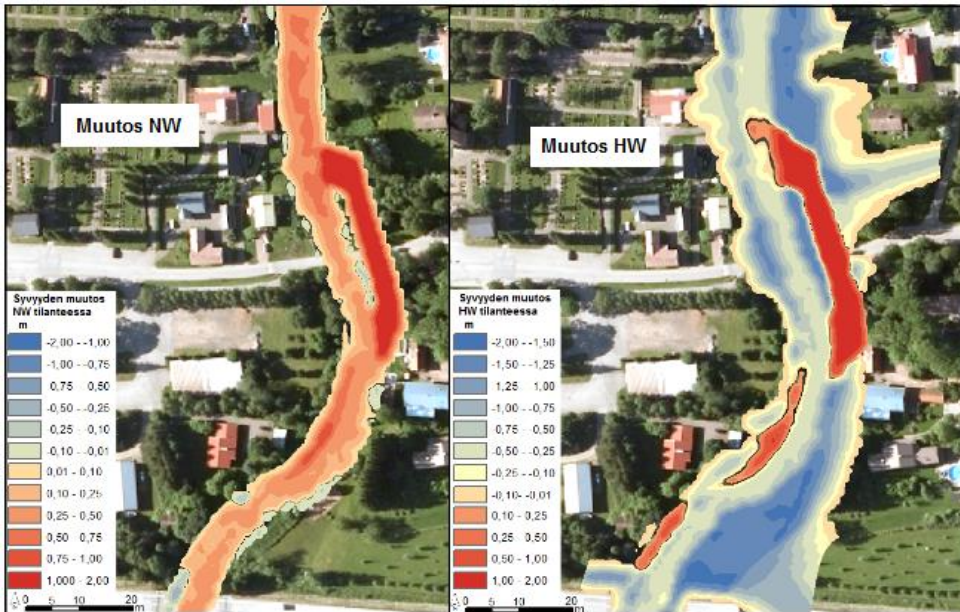
Kuva 47. Vesisyvyyden muutoksen erotuskuvat NW- ja HW-tilanteista Eurakosken padolla. Erotukset on laskettu vähentämällä NW tul. - skenaarion vesisyvyydestä NW nyk. skenaarion vesisyvyydet sekä vähentämällä HW tul. skenaarion vesisyvyydestä HW nyk. skenaarion vesisyvyydet.



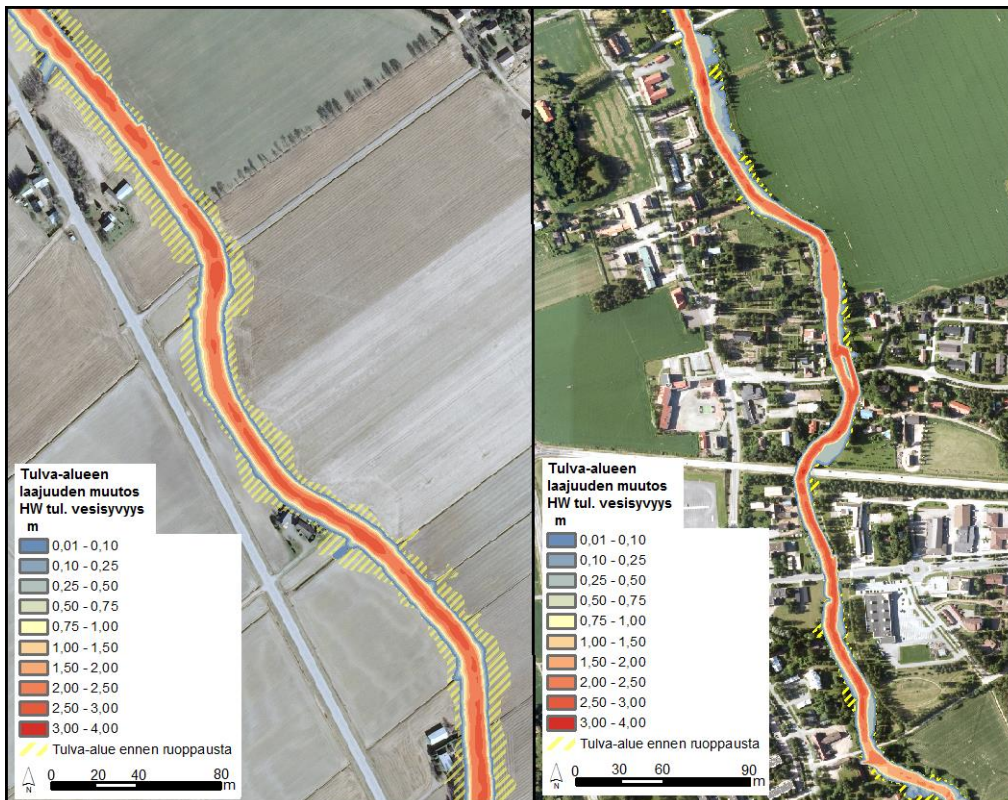
Kuva 48. NW-skenaarioiden mukainen vesisyvyys Kirkkosillalla ennen ja jälkeen ruoppauksen. Vesisyvyys kasvaa uoman syvennyksen myötä NW tul. skenaariossa verrattuna NW nyk. -skenaarioon.



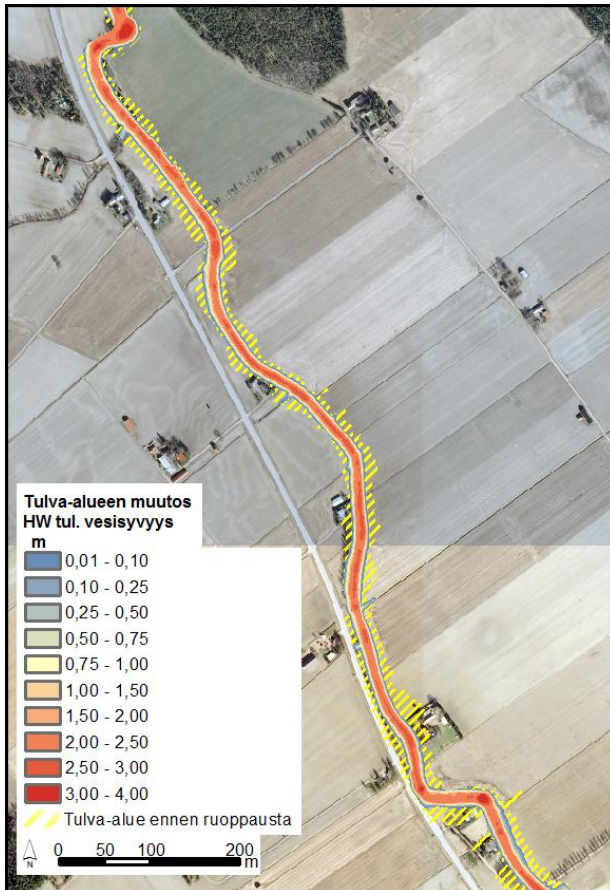
Kuva 49. HW-skenaarioiden mukainen vesisyvyys Kirkkosillalla ennen ja jälkeen ruoppauksen. Uoman syvennyksellä ei ole huomattavaa vaikutusta tulva-alueen laajuuteen, mutta tulvasankojen vesisyvyys laskee HW tul. skenaariossa suhteessa HW nyk. skenaarion tulvasankojen vesisyvyYTEEN. Uoman vesisyvyys kasvaa HW tul. skenaariossa syvennyksen myötä.



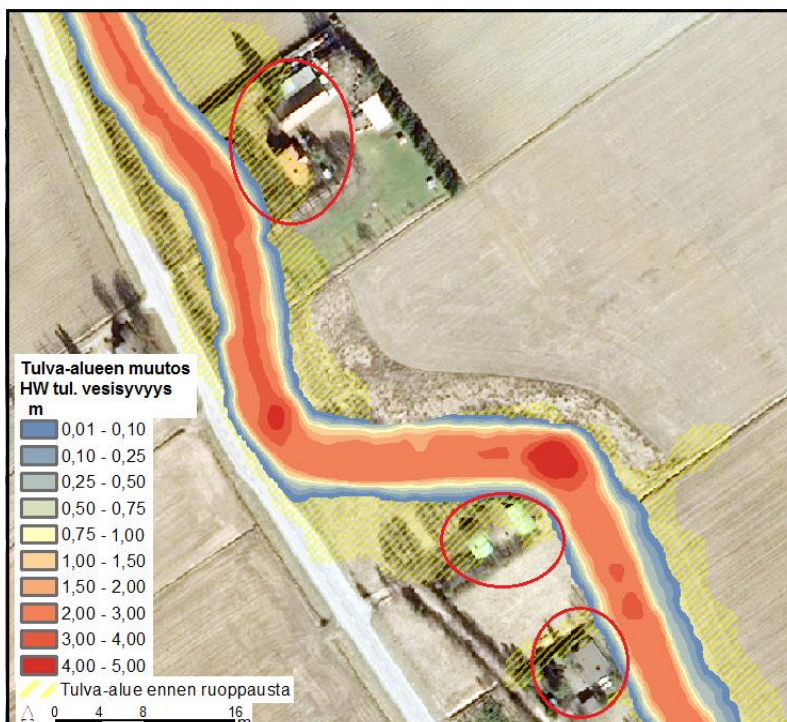
Kuva 50. Vesisyvyyden muutoksen erotuskuvat NW ja HW tilanteista Kirkkosillan kohdalla. Erotukset on laskettu vähentämällä NW tul. skenaarion vesisyvyydestä NW nyky. skenaarion vesisyvyydet sekä vähentämällä HW tul. skenaarion vesisyvyydestä HW nyky. skenaarion vesisyvyydet.



Kuva 51. Tulva-alueen laajuuden muutos on alajuoksulla suurempi kuin Eurajoen yläjuoksulla. Alajuoksulla tulvavesi poistuu pelloilta lähes kokonaan, kun taas Euran keskustan alueella ruoppauksella ei juurikaan ole vaikutusta tulvaveden laajuuteen



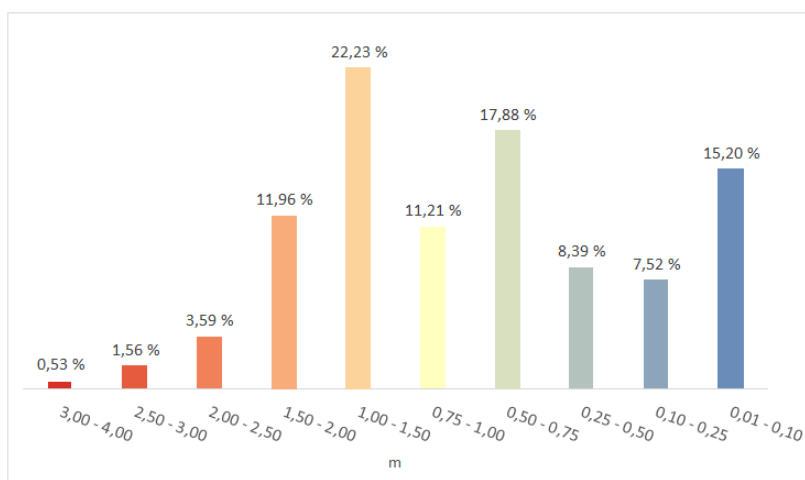
Kuva 52. Tulvavaara vähenee ruoppauksen myötä huomattavasti tutkimusalueen alajuoksulla. Kuva on Piuhon kylän kohdalta, jossa tulvavesi pysyy HW tul. -skenaarion mukaan uomassa ja tulvatasangot pelloilta poistuvat kokonaan.



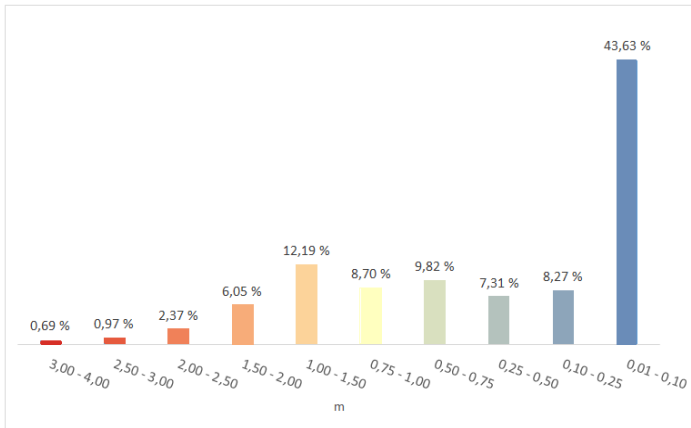
Kuva 53. Rakennuksiin kohdistuva tulvariski pienenee ruoppauksen jälkeen 83 %. Punaisella on ympäröity rakennuksia, jotka HW nyky. -skenaariossa jäävät tulvan alle, mutta HW tul. -skenaariossa säästävät tulvalta.

Vesisyvyyden muutokset ruoppauksen jälkeen vaihtelevat NW- ja HW-skenaarioiden välillä. NW nyk.-skenaarion mukaan Eurajoen vesivyys alivirtaamatilanteessa on matala, sillä noin 82%:sta uomassa vesisyvyys on alle 1,50 metriä (kuva 54). NW tul. -skenaariossa levennyksen takia sama vesimassa levittäytyy nyt laajemmalle alueelle, jolloin sen vesisyvyys vähenee entisestään. Ruoppauksen jälkeen NW-tilanteessa 92,9 % uomasta on vesisyvyydeltään alle 1,50 m (kuva 55). Muutos NW tilanteessa NW nyk. ja NW tul. skenaarioiden välillä on huomattava. Vesisyvyyden voimakas vähentyminen saattaa aiheuttaa ongelmia alivirtaamatilanteessa ruoppauksen jälkeen esimerkiksi vedenlaadulle tai eliöstölle. NW tul. - ja NW nyk.-skenaarioiden erotuksesta nähdään, että 62 % syvyyssoluista madaltuu ruoppauksen jälkeen NW-tilanteessa (kuva 56). NW tul. -skenaariosta on vähennetty NW nyk.-skenaarion syvyysarvot, jolloin saadaan vesisyvyyden muutos siten, että syvyyden kasvu on positiivisina arvoina ja syvyyden vähentyminen negatiivisina arvoina. Madaltuminen on kuitenkin suurimmaksi osin vähemmän kuin 25 cm. Positiivisena eli syventymisenä erottuvat arvot ovat osaksi seurausta uoman levennyksestä, sillä NW nyk. skenaarion näiden solujen syvyysarvo on ollut 0 m, jolloin niiden muutos suhteessa NW tul. - skenaarioon erottuu positiivisena.

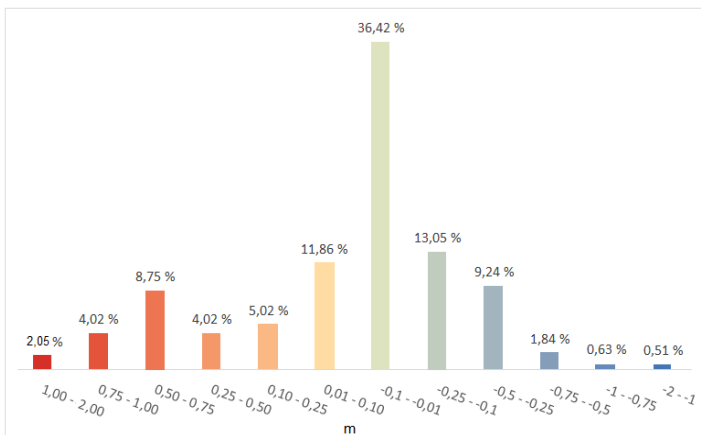
HW-tilanteessa uoman vesisyvyys kasvaa reilusti verrattuna NW-tilanteeseen. HW nyk. – skenaarion syvyysluokat ovat suhteellisen tasaisia keskenään (kuva 57). Matalat syvyydet ovat pääosin uoman ulkopuolella tulvatasangoilla. HW tul. –skenaarion vesisyvyydet laskevat (kuva 58). Ruoppauksen jälkeen jäljelle jäävien tulvatasankojen vesisyvyyden madaltuminen kasvattaa alle 10 cm syvyyksien osuutta noin 10 %, jonka lisäksi syvyydet jakautuvat epätasaisemmin kuin HW nyk. skenaarion. Muutos vesisyvyyksien jakaumassa HW-tilanteessa käy ilmi HW-skenaarioiden erotuskuvasta (kuva 59). HW tul. -skenaarion syvyysarvot, jolloin saadaan vesisyvyyden muutos siten, että syvyyden kasvu on positiivisina arvoina ja syvyyden vähentyminen negatiivisina arvoina. Ruoppauksen jälkeen 91 %:ssa vesivyysoluista vesisyvyys laskee. Positiivisena eli syventymisenä erottuvat arvot ovat suurimmaksi osin seurausta uoman levennyksestä, sillä HW nyk. skenaarion näiden solujen syvyysarvo on ollut 0 m.



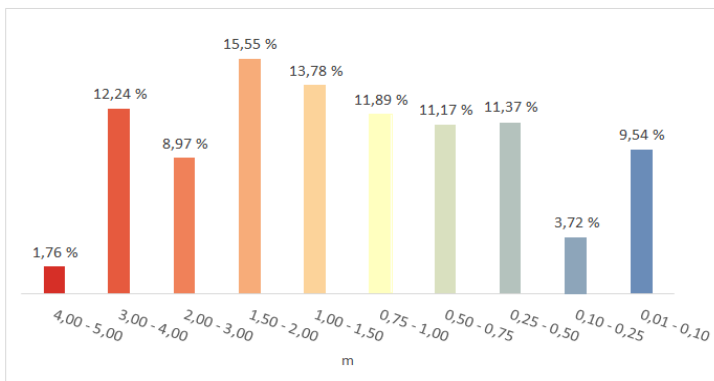
Kuva 54. NW nyk. -skenaarion vesisyvyyksien jakauma luokittain. Noin 82 % uomasta on vesisyvyydeltään alle 1,50 m.



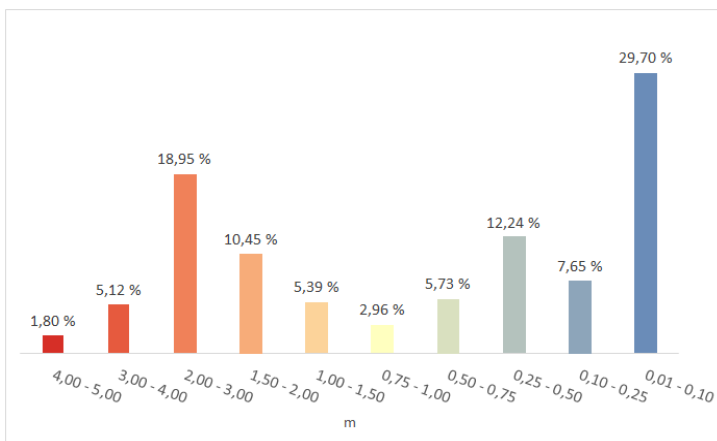
Kuva 55. NW tul. -skenaarion vedesyvyyksien jakauma luokittain. 92,9 % uomasta on vesisyvydeltään alle 1,50 m.



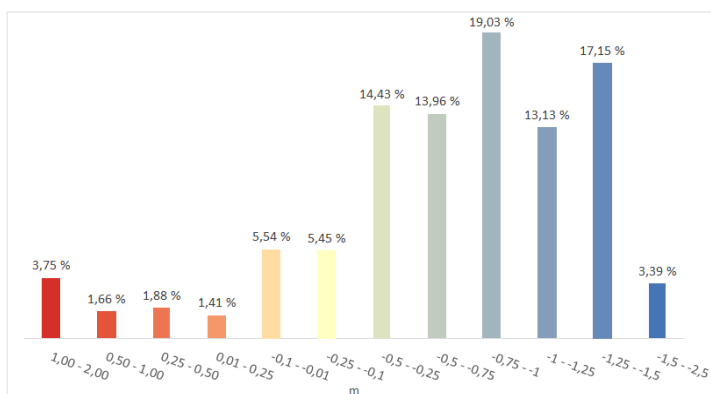
Kuva. 56. NW-skenaarioiden muutos suhteessa toisiinsa. Noin 62 % syvyyssoluista madaltuu ruoppauksen jälkeen NW-tilanteessa.



Kuva 57. HW nyky. -skenaarion vedesyvyyksien jakauma luokittain. Tulvatilanteessa uoman vesisyvyys kasvaa reilusti verrattuna NW-tilanteeseen.



Kuva 58. HW tul. -skenaarion vedesyvyyksien jakauma luokittain. Uoman vesisyvyys laskee levennyksen myötä tulvaveden mahtuessa uomaan ja levittäytyessä siellä laajemmalle alueelle.



Kuva 59. HW-skenaarioiden muutos suhteessa toisiinsa. Ruoppauksen jälkeen 91%:ssa vesivysyysoluista vesivysyys laskee.

5.1.2 Vedenkorkeuden muutos

Ruoppauksen myötä vedenkorkeudet laskevat NW tul.- ja HW tul. -skenaarioiden mukaan kaikilla paaluilla suhteessa NW nyk.- ja HW nyk. -skenaarioiden vedenkorkeuksiin (taulukko 8). Vedenkorkeudet eivät kuitenkaan kaikissa skenaarioissa vastaa ruoppaussuunnitelman arvoja. Lisäksi ruoppauksen vaikutuksen voimakkuus vedenkorkeuteen vaihtelee eri paalujen välillä. Yläjuoksun vaste ruoppaukseen on heikompi kuin alajuoksun.

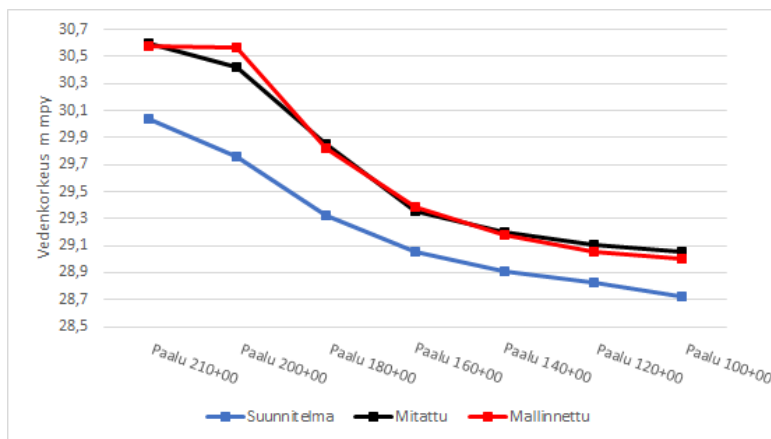
Taulukko 8. Neljän eri skenaarion vedenkorkeudet NQ ja HQ virtaamilla. Kalibrointimallien skenaariot NW nyk. ja HW nyk. kuvaavat nykytilanteen vedenkorkeutta metreinä alivirtaaman (1,8m³/s) ja ylivirtaaman (35,7 m³/s) aikana. Skenaariot NW tul ja Hw tul. kuvaavat vedenkorkeutta metreinä ruoppauksen jälkeen alivirtaaman (1,8m³/s) ja ylivirtaaman (35,7 m³/s) aikana.

Paalu	NW nyk. (m mpy)	NW tul. (m mpy)	HW nyk. (m mpy)	HW tul. (m mpy)
100+00	29,00	28,50	29,30	29,05
120+00	29,05	28,54	29,80	29,19
140+00	29,18	28,69	30,19	29,62
160+00	29,39	28,95	30,65	29,99
180+00	29,82	29,60	31,08	30,48
200+00	30,57	29,67	31,70	30,88
210+00	30,58	29,69	31,82	30,92

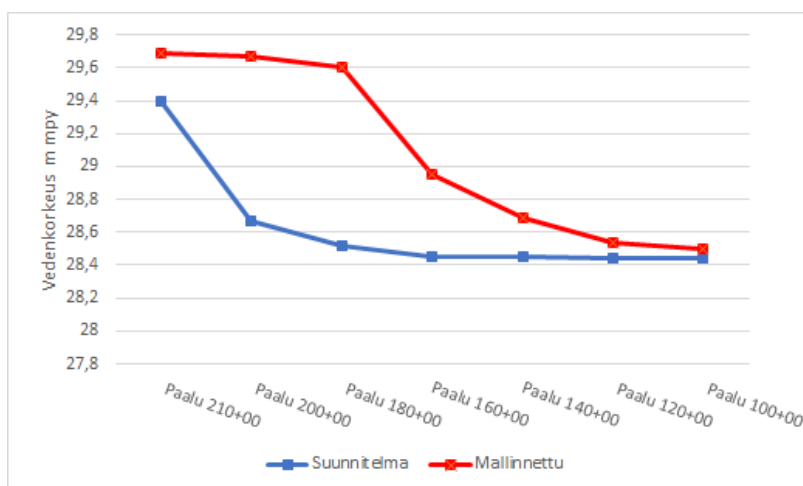
NW nyk. skenaarion mallinnettu vedenkorkeus ja referenssinä käytetty, itse mitattu vedenkorkeus vastaavat hyvin toisiaan, joten kalibrointia voidaan pitää onnistuneena (kuva 60). Suunnitelman vedenkorkeudet ovat mitattu eri tilanteessa, mutta käyrän trendi vastaa hyvin itse mitattujen vedenkorkeuksien ja NW nyk.-skenaarion käyrien trendiä (kuva 60). NW tul. -skenaariossa Euran keskustan alueella (paalut 210-180) vesi ei purkaudu odotetusti, vasta syvennyksen vaihduttua levennykseksi paalulla 180 käyrä alkaa laskea jyrkästi, kunnes se paalulla 120 saavuttaa ruoppaussuunnitelman tason (kuva 61). Vedenkorkeuden muutos

NW-tilanteessa (NW nyk. ja NW tul. erotus) eroaa kaikilla paaluilla suunnitelman tavoitteiden mukaisista arvoista (kuva 62). Erotuksen mukaan pienin lasku tapahtuu paalun 180 kohdalla (kuva 62), jossa uoman syvennys vaihtuu levennykseen, samassa kohdassa on suurin poikkeama suunnitelman arvoista. Alajuoksulla vedenkorkeus laskee NW-tilanteessa enemmän kuin suunnitelman perusteella odotetaan (kuva 62).

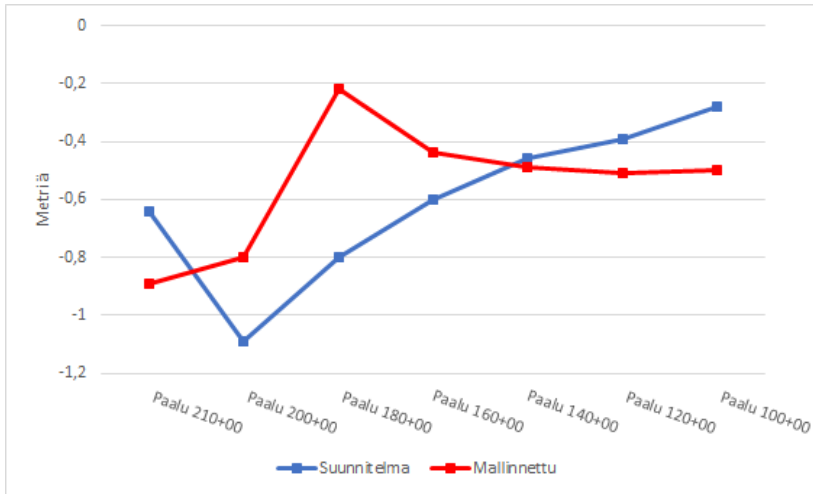
HW nyk. -skenaarion vedenkorkeudet vastaavat ruoppaussuunnitelman arvoja alajuoksun paalua 100 lukuun ottamatta (kuva 63). HW tul. -skenaariossa yläjuoksun (200-180) vedenkorkeuksien vaste ruoppaukseen on jälleen heikempi kuin alajuoksun vaste (kuva 64). Vedenkorkeuden muutos HW-tilanteessa (HW nyk. ja HW tul. erotus) jää paaluvälillä 200-140 suunnitelman tavoitearvoista, mutta alajuoksulla paaluilla 120-100 vedenkorkeus vastaa tavoitearvoja. HW nyk. ja HW tul. skenaarioiden erotuksen mukaan paalulla 180 on suhteessa pienin lasku sekä suurin ero suunnitelman arvoihin (kuva 64). Alajuoksulla vedenkorkeuksien erot tasoittuvat ja päästään hyvin lähelle ruoppaussuunnitelman laskelmia.



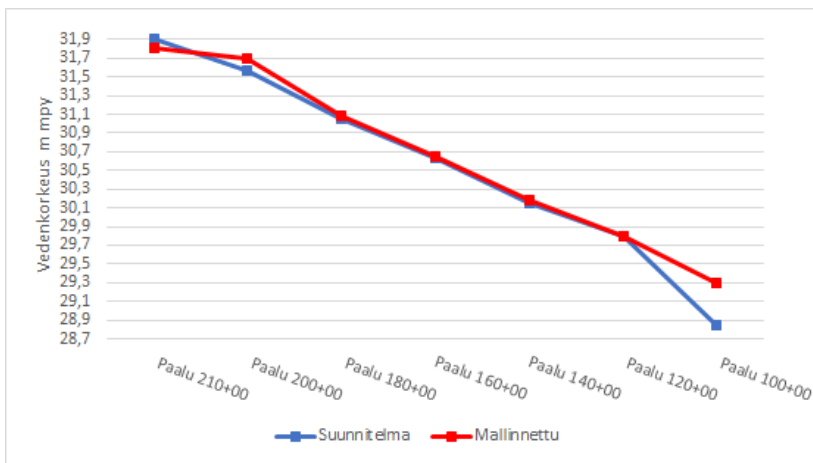
Kuva 60. NW nyk. -skenaarion vedenkorkeudet suhteessa itse mitattuihin korkeuksiin sekä ruoppaussuunnitelman vedenkorkeuksiin.



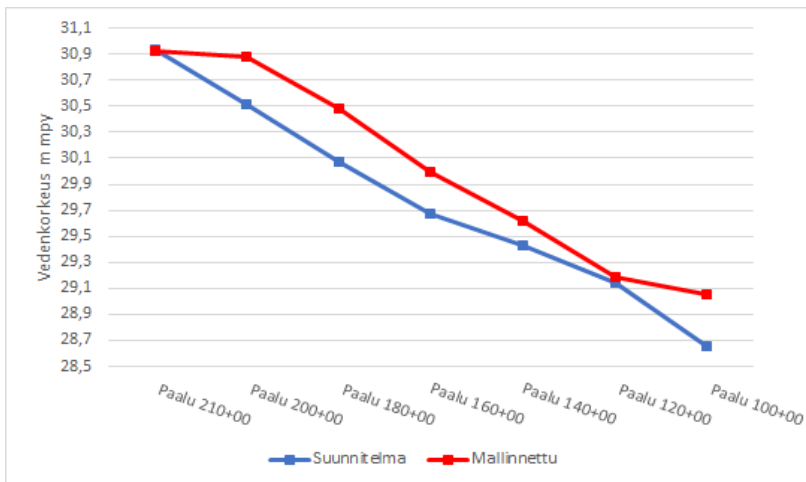
Kuva 61. NW tul. skenaarion vedenkorkeudet suhteessa ruoppaussuunnitelman vedenkorkeuksiin.



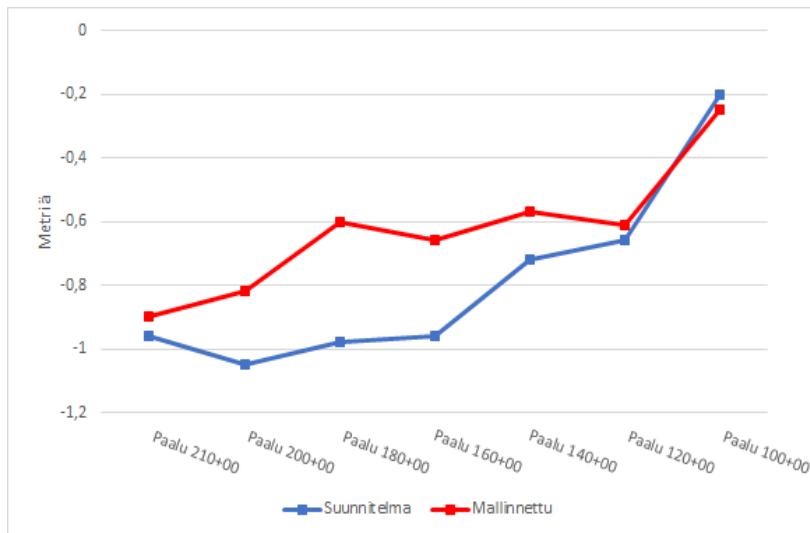
Kuva 62. NW tul. skenaarion vedenkorkeuden muutos suhteessa NW nyk. skenaarion vedenkorkeuteen sekä vedenkorkeuksien laskuun NW tilanteessa.



Kuva 63. HW nyk. skenaarion vedenkorkeudet suhteessa ruoppausuunnitelman vedenkorkeuksiin.



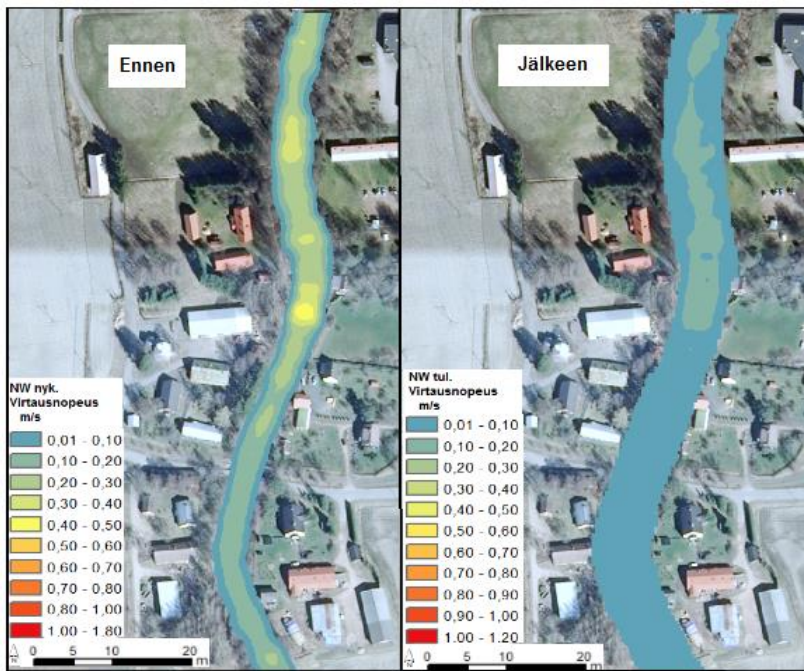
Kuva 64. HW tul. skenaarion vedenkorkeudet suhteessa ruoppausuunnitelman vedenkorkeuksiin.



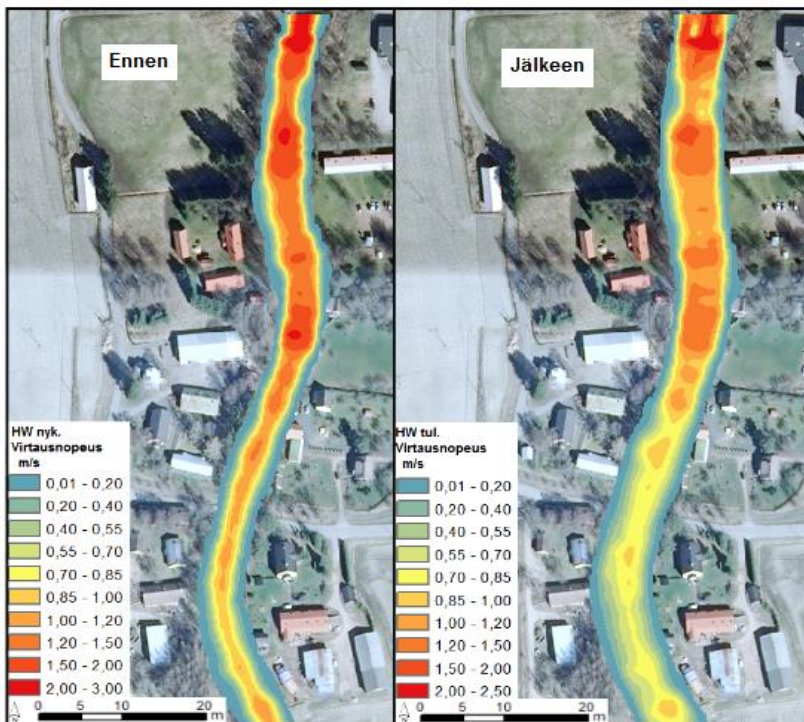
Kuva 65. HW tul. skenaarion vedenkorkeuden muutos suhteessa HW nyk. skenaarion vedenkorkeuteen sekä ruoppaussuunnitelman vedenkorkeuksien laskuun HW tilanteessa.

5.2 Ruoppauksen vaikutus uoman virtauskenttään

Virtausnopeuden muutoksia tarkasteltiin yläjuoksulla Kirkkosillan ja alajuoksulla Eurakosken padon kohdilla. NW tul. skenaariossa virtausnopeus hidastuu suhteessa NW nyk. skenaarion virtausnopeuksiin (kuva 66 & 69). HW tul. -skenaariossa virtausnopeus hidastuu ruoppauksen jälkeen suhteessa HW nyk. skenaarion virtausnopeuksiin (kuvat 67 & 70). Ruoppauksen hidastava vaikutus on voimakkaampi NW-tilanteessa kuin HW-tilanteessa. NW nyk.- ja NW tul. - sekä HW nyk.- ja HW tul. -skenaarioiden virtausnopeuksien erotuskuvien perusteella virtaus uoman keskiosassa hidastuu, mutta paikoin reunoilla virtausnopeus kasvaa (kuvat 68 & 71). Levennyksen takia reunat erottuvat positiivisina arvoina, sillä ne ovat uutta uoman pohjaa ja NW nyk.- sekä HW nyk. -skenaarioissa niiden virtaussolujen nopeus on ollut 0 m/s (kuva 68). Kirkkosillan uusi, kolmas virtausaukko erottuu kuvista positiivisena arvona, sillä kyseisessä kohdassa ei NW nyk. ja HW nyk. skenaarioissa ollut virtausta ollenkaan vaan arvo oli 0 m/s (kuva 71).



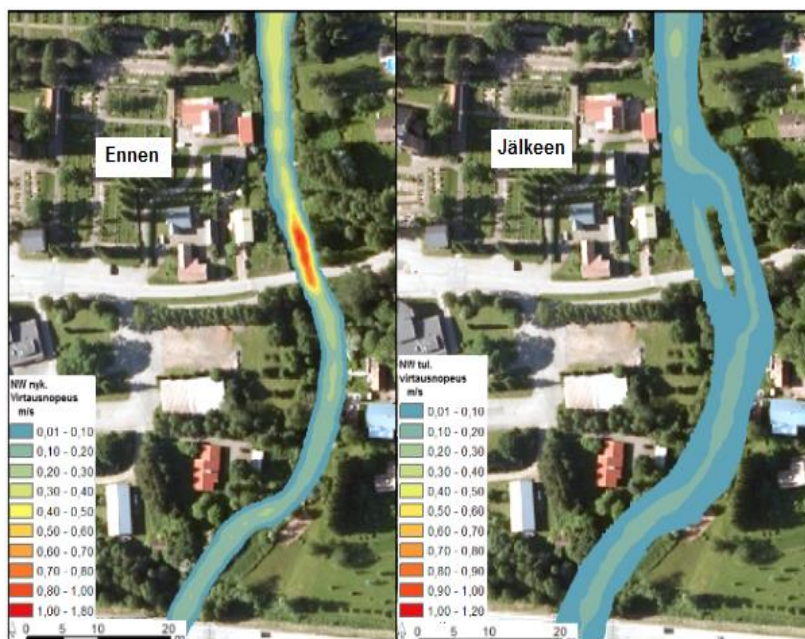
Kuva 66. NW-skenaarioiden mukainen virtausnopeus ennen ja jälkeen ruoppauksen Eurakosken padolla.



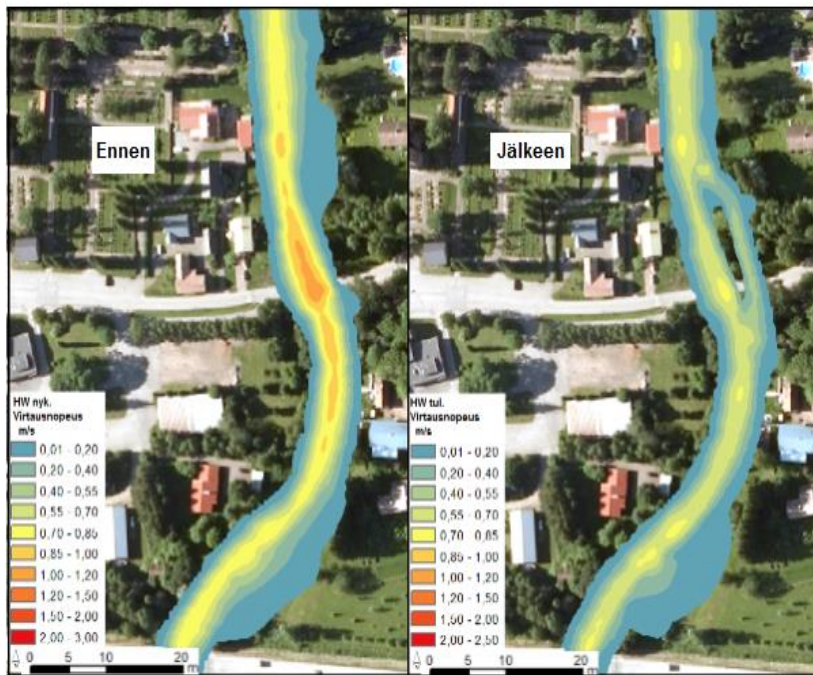
Kuva 67. HW-skenaarioiden mukainen virtausnopeus ennen ja jälkeen ruoppauksen Eurakosken padolla.



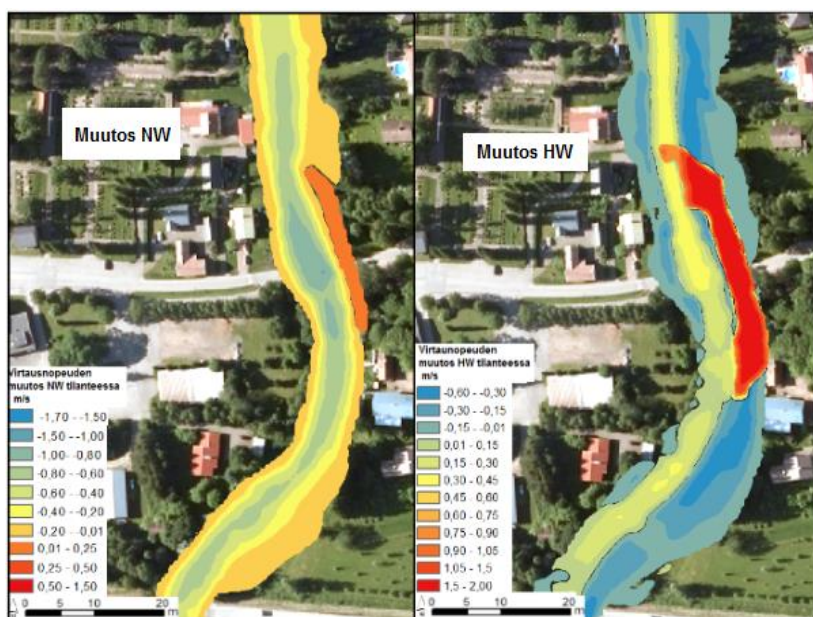
Kuva 68. NW nyk.- ja NW tul.- sekä HW nyk.- ja HW tul. - skenaarioiden virtausnopeuksien erotuskuva tutkimusalueen alaosaista Eurakosken padolta.



Kuva 69. NW-skenaarioiden mukainen virtausnopeus ennen ja jälkeen ruoppauksen Euran keskustan Kirkkosillan kohdalla. Virtausnopeus hidastuu NW tul. skenaariossa suhteessa NW nyk. skenaarion virtausnopeuksiin.



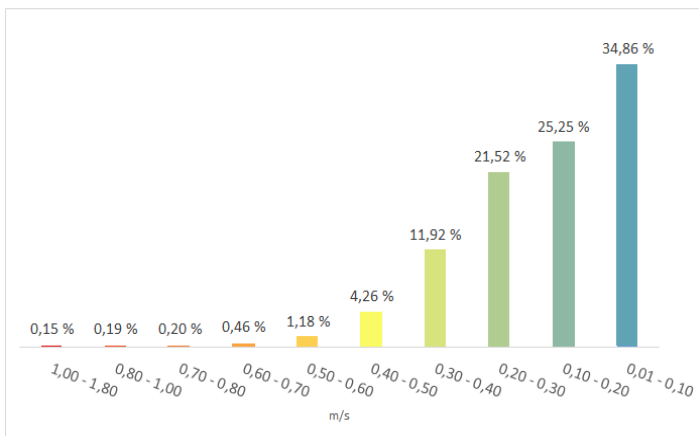
Kuva 70. HW-skenaarioiden mukainen virtausnopeus ennen ja jälkeen ruoppauksen Euran keskustan Kirkkosillan kohdalla. Virtausnopeus hidastuu HW tul. -skenaariossa suhteessa HW nyk. -skenaarion virtausnopeuksiin.



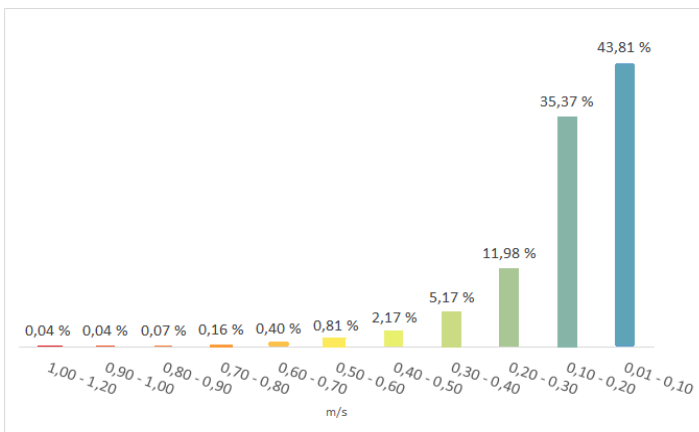
Kuva 71. Virtausnopeuden muutos Kirkkosillalla NW- & HW-tilanteissa. Kuvissa on erotettu NW tul. ja NW nyk. skenaariot sekä HW tul. ja HW nyk. skenaariot toisistaan.

NW nyk. -skenaarion virtausnopeudet vastaavat kenttämittauksissa tehtyjä havaintoja, arvoista yli 97 % kuuluu luokkiin, joiden nopeus on alle 0,5 m/s (kuva 72). Virtausnopeudet ovat hitaita kasvittuneen uoman ja sen pienen kaltevuuden takia. Suurimmat nopeudet esiintyivät syvissä kaarteissa. Ruoppauksen jälkeen virtausnopeus hidastuu NW tul. -skenaarion mukaan (kuva 73). Erytisesti pienten nopeuksien osuus kasvaa. NW nyk.- ja NW tul. -skenaarioiden virtausnopeuksien erotuksen perusteella virtaussoluista noin 59 % hidastuu. (kuvat 74). Erotuskuvassa tulee ottaa huomioon vääristymä, joka syntyy uoman levennyksen aiheuttamista positiivisista arvoista (virtausnopeuden kasvu), sillä levennettävällä alueella virtausnopeus on ollut NW nyk.- ja HW nyk. -skenaarioissa 0 m/s.

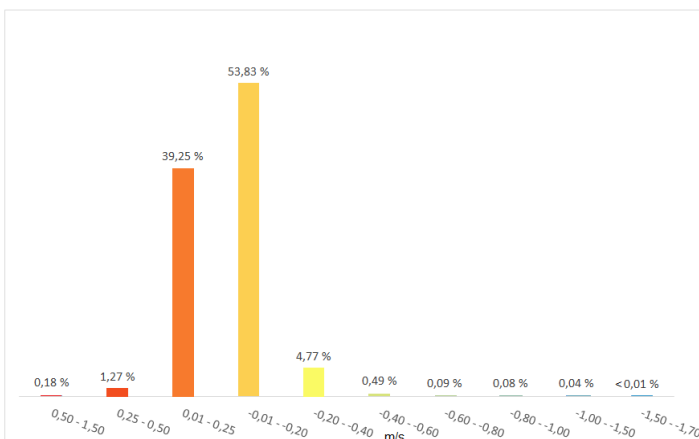
HW nyk. skenaariosta käy ilmi, että tulvavirtaamasta huolimatta pienet nopeudet ovat yleisimmät nopeusluokat (kuva 75). Noin 76 % virtaussoluista kuuluu nopeusluokkiin, joiden nopeus on alle 0,55 m/s (kuva 75). Kasvillisuus ja erilaiset rakenteet hidastavat virtausta uoman ulkopuolella tulvatasangoilla. Lisäksi uoman pieni kaltevuus hidastaa virtausta myös tulvatilanteessa. Ruoppauksen jälkeen HW tul. –skenaarion perusteella sekä suuret (yli 1,00 m/s) että pienet (alle 0,55 m/s) virtausnopeudet vähenevät ja luokat välillä 0,55 - 1,00 m/s kasvavat (kuva 76). Alle 0,55 m/s luokkiin kuuluvien solujen osuus on enää 61 % ruoppauksen jälkeen. (kuva 76). Uoman levennys vähentää suurimpia virtausnopeuksia ja tulvatasankojen sekä kasvillisuuden vähentyessä myös pienet nopeudet vähenevät. Vaikka virtausnopeudet ruoppauksen jälkeen kasvavat, erotuskuvan mukaan silti 59 % virtaussoluista hidastuu (kuva 77).



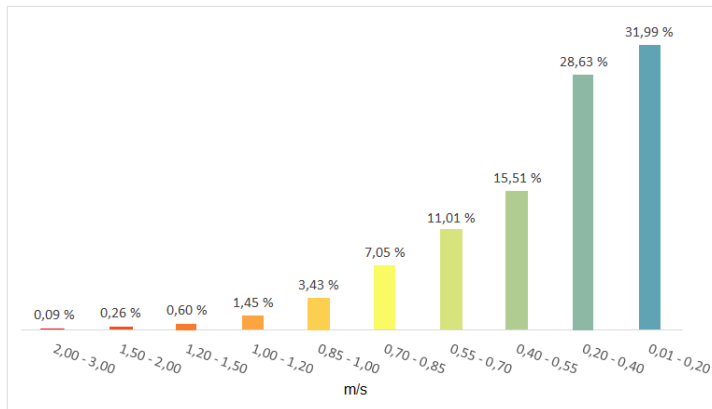
Kuva 72. NW nyk. skenaarion syvyyskeskiarvotettujen virtausnopeuksien jakauma luokittain.



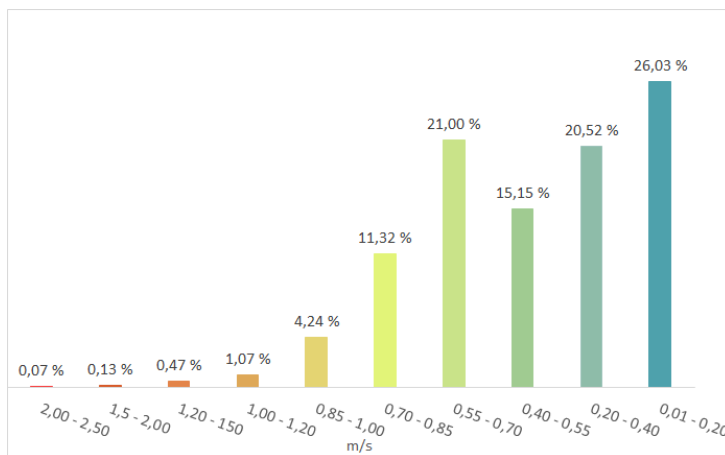
Kuva 73. NW tul. skenaarion syvyyskeskiarvotettujen virtausnopeuksien jakauma luokittain.



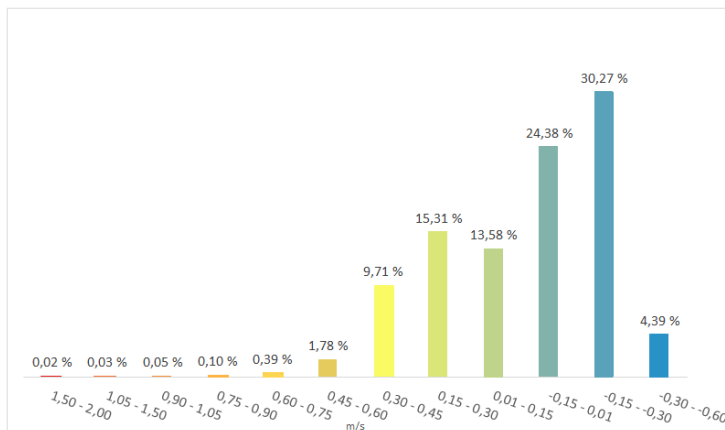
Kuva 74. NW nyk. ja NW tul. skenaarioiden syvyyskeskiarvotettujen virtausnopeuksien muutoksen jakauma luokittain. Noin 59 % virtausnopeussoluista hidastuu ja 41 % nopeutuu.



Kuva 75. HW nyk. skenaarion syvyyskeskiarvotettujen virtausnopeuksien jakauma luokittain.



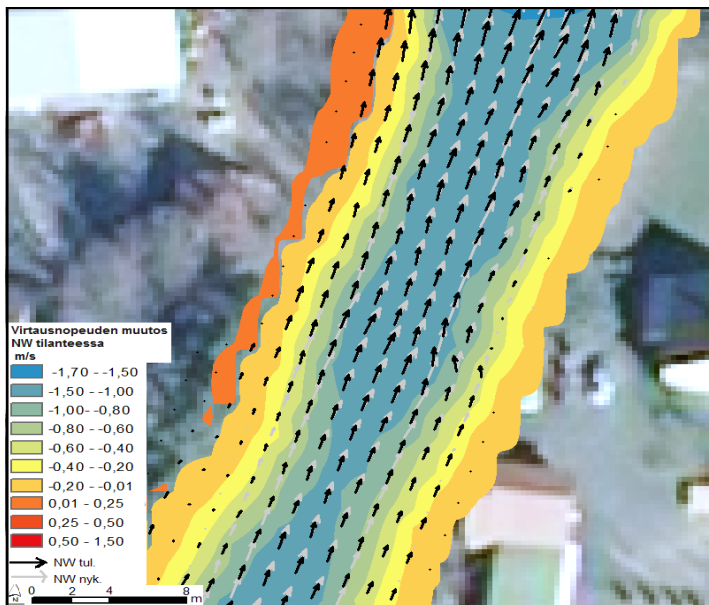
Kuva 76. HW tul. skenaarion syvyyskeskiarvotettujen virtausnopeuksien jakauma luokittain.



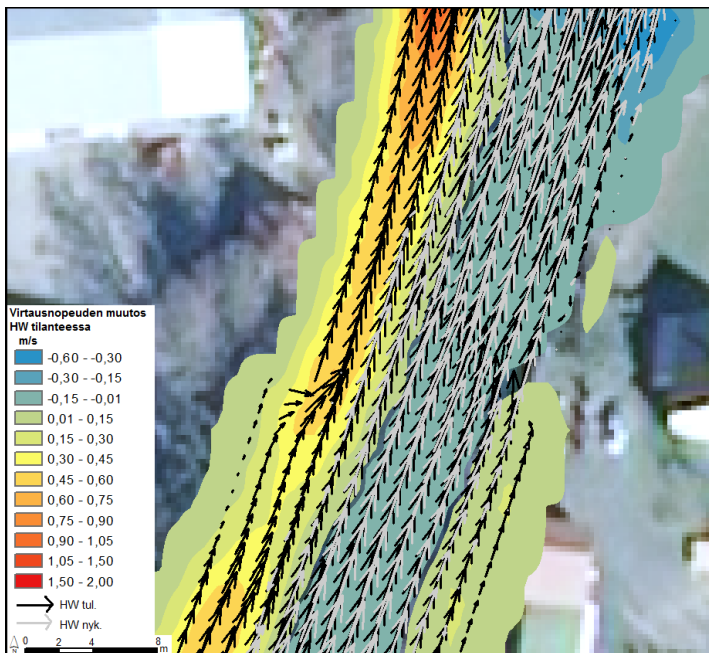
Kuva 77. HW nyk. ja HW tul. skenaarioiden syvyyskeskiarvotettujen virtausnopeuksien muutoksen jakauma luokittain. 59 % virtausnopeussoluista hidastuu ja 41 % nopeutuu.

Virtauskentän muita muutoksia tarkasteltiin virtaussuuntien muutoksen kautta. Virtaussuunnat ja niiden muutokset esitettiin vektorinuolista koostuvana pintana (kuvat 78, 79, 80, 81). Nuolen suunta kertoo kyseisen solun virtauksen suunnan ja nuolen pituus sen nopeuden. Tarkasteltavana alueena oli jälleen yläjuoksulta Kirkkosilta ja alajuoksulta Eurakosken pato. Alajuoksulla NW-tilanteessa virtausnopeuden hidastuminen ruoppauksen myötä on havaittavissa sekä taustalla olevasta erotuskuvasta, että virtaussuuntia ja -nopeutta kuvaavista nuolista (kuva 78). Virtaussuunnat pysyvät yhtenäisinä, mutta nopeus pienenee NW tul. skenaarissa suhteessa NW nyk. skenaarioon (kuva 78). HW-tilanteessa virtausnopeuden hidastuminen ruoppauksen myötä on havaittavissa erotuskuvasta, että virtaussuuntia ja -nopeutta kuvaavista nuolista (kuva 79). Virtaussuunnat pysyvät yhtenäisinä, mutta nopeus pienenee HW tul. skenaarissa suhteessa HW nyk. skenaarioon (kuva 79).

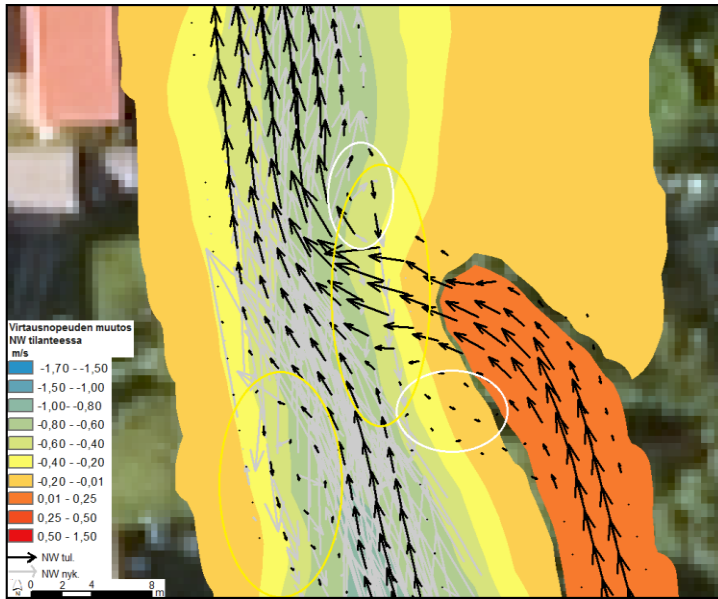
Yläjuoksulla Kirkkosillalla erityisesti hitaan virtauksen alueille tulvatasangoille sekä sillan rakenteiden taakse syntyy akanvirtoja (kuvat 80 & 81). NW nyk. -skenaariossa akanvirrat syntyvät uoman molemmille reunoille sekä sillan rakenteiden taakse (kuva 80). Ruoppauksen jälkeen NW tul. skenaariossa akanvirrat syntyvät uuden virtausaukon ja vanhan uoman yhtymäkohtaan ja niiden koko on pienempi kuin ennen ruoppausta (kuva 80). HW nyk. -skenaarion mukaan akanvirrat syntyvät tulvatasangoille (kuva 81). HW tul. -skenaarion mukaan ruoppauksen jälkeen akanvirta poistuu tulvatasangolta, mutta uudet akanvirrat syntyvät Kirkkosillan taakse toisen ja kolmannen virtausaukon takapuolelle sekä uoman vasempaan reunaan (kuva 81).



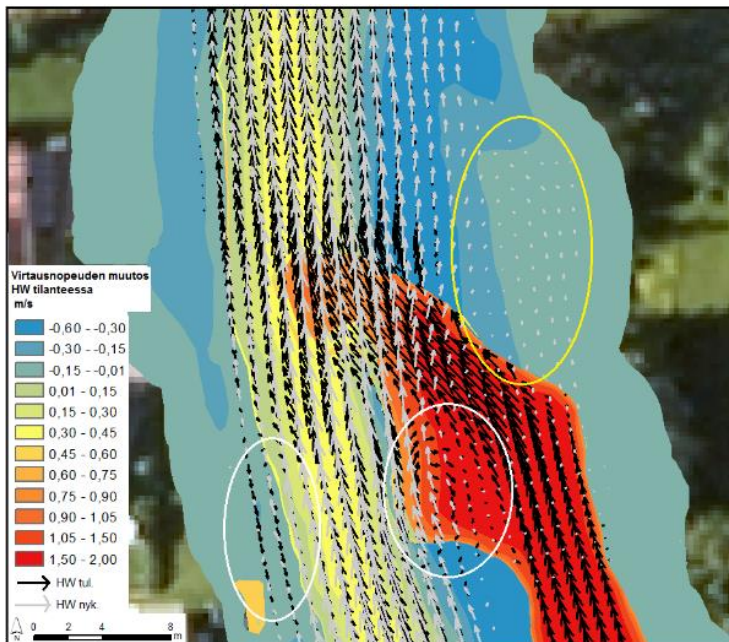
Kuva 78. Virtausnopeuden sekä -suuntien muutos NW -tilanteessa Eurakosken padolla. Nuolen suunta kuvaa virtauksen suuntaa ja pituus virtausnopeutta.



Kuva 79. Virtausnopeuden sekä -suuntien muutos HW -tilanteessa Eurakosken padolla. Nuolen suunta kuvaa virtauksen suuntaa ja pituus virtausnopeutta.

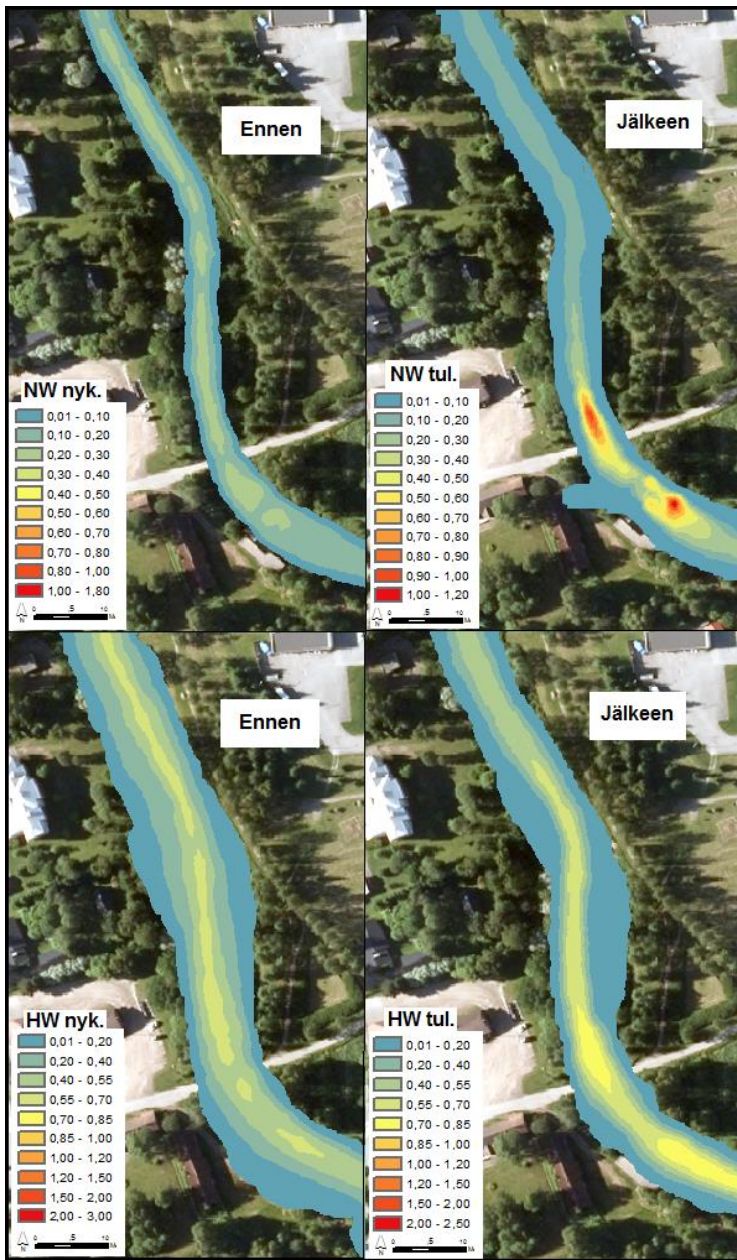


Kuva 80. Virtausnopeuden muutos sekä virtaussuunnat NW nyky. ja NW tul. skenaarioiden mukaan. Nuolen suunta kuvaa virtauksen suuntaa ja pituus virtausnopeutta. NW nyky. -skenaarion akanvirtojen sijainti ja koko ympäröity keltaisella ja NW tul. -skenaarion akanvirtojen sijainti ja koko ympäröity valkoisella.

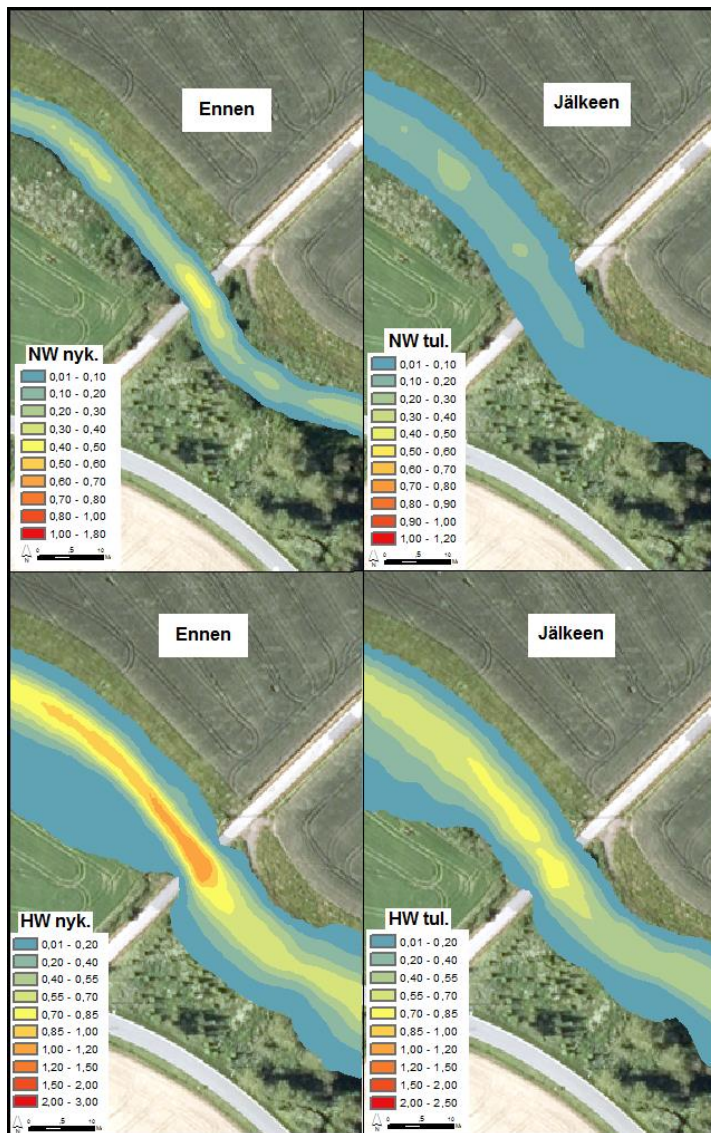


Kuva 81. HW nyky. ja HW tul. skenaarioiden virtaussuuntien ja -suuntien ero sekä nopeuksien muutos Kirkkosillan alajuoksun puolella. Nuolen suunta kuvaa virtauksen suuntaa ja pituus virtausnopeutta. HW nyky. -skenaarion akanvirtojen sijainti ja koko ympäröity keltaisella ja HW tul. -skenaarion akanvirtojen sijainti ja koko ympäröity valkoisella.

Euran keskustassa vedenkorkeuksien muutos ei paaluvälillä 180-210 vastaa ruoppausuunnitelman arvoja ja kyseinen paaluväli erottuu kaikissa eri skenaarioissa huonoiten ruoppaukseen vastaavana alueena. NW tul.- ja HW tul. -skenaarioiden virtausnopeuksista on nähtävissä, että syvennys hidastaa huomattavasti virtausnopeutta suhteessa NW nyky.- ja HW nyky. -skenaarioiden virtausnopeuksiin (kuva 82). Vaikutus on suurempi alivirtaamatilanteessa kuin ylivirtaamatilanteessa. Syvennyksen aiheuttama hidastus virtausnopeudessa saattaa olla syy miksi vedenkorkeus ei laske Euran keskustan alueella odotetusti. Paalulla 180 syvennys vaihtuu levennykseksi. Kaikissa skenaarioissa on huomattavissa virtausnopeuden kasvu paalulla 180 sekä ennen että jälkeen ruoppauksen (kuva 83). Erityisesti se korostuu kuitenkin skenaarioissa NW tul. ja HW tul., joissa syvennyksen loppuessa virtausnopeus kiihtyy (kuva 83). Voidaan todeta syvennyksen pidättävän vettä ja hidastavan virtausta, levennyksen alkaessa vesi pääsee purkautumaan ja virtausnopeus kasvaa.



Kuva 82. Virtausnopeuden muutos Euran keskustan yläpuolella mistä ruoppausalue alkaa uoman syvennyksellä.



Kuva 82. Virtausnopeuksien muutos eri skenaarioiden mukaan paalulla 180, jossa syvennys vaihtuu levennykseksi.

6 Tulosten tarkastelu

6.1 Ruoppauksen vaikutus tulvavaaraan

Ruoppauksen tarkoitus on vähentää tulvavaaraa ja helpottaa vedenvirtausta uomassa. Eurajoen tapauksessa ruoppauksen vaikutus tulvavaaraan mallien perusteella on toivotun kaltainen. Vaikutuksen voimakkuus kuitenkin vaihtelee uomassa spatiaalisesti. Uomassa on mallien perusteella paremmin vettä johtavia osuuksia ja osuuksia, jotka pidättävät vettä. Lisäksi selvä ero on havaittavissa syvennettävän alueen ja levennettävän alueen tulva-alueiden koon muutoksessa. Erityisesti alue, jossa syvennys vaihtuu levennykseen (paalu 180) vastaa NW tul.- ja HW tul.-skenaarioiden vedenkorkeusarvojen perusteella ruoppauksen huonoiten. HW tul.-skenaarion mukaan Euran keskustassa (paalut 180-210) vedenkorkeus ja tulvavaara ei laske odotetusti ruoppauksen myötä. Ruoppaussuunnitelmaa kannattaisi muokata ajamalla lisää erilaisia skenaarioita, joissa Euran keskustassa uoman geometriaa olisi muokattu eri tavoin. Näin saataisiin tietää, miten uomaa tulisi muokata, jotta tulvavaara alueella helpottaisi.

Alajuoksua kohti tulvavaara vähenee ja tulva-alueen laajuus pienenee, eikä alueella jatkossa ole laajoja tulvaongelmia. Uoman levennys on riittävä ja se pystyy johtamaan tarvittavan määrän vettä myös tulvatilanteessa. Vedenjohtokyky paranee tulvavaarakarttojen perusteella kohti alajuoksua, mikä on hyvä merkki, sillä se tarkoittaa vedenpoistuman uomasta olevan tasapainossa virtaaman kanssa. Vedenkorkeuden liika lasku voisi aiheuttaa ongelmia esimerkiksi ekosysteemille ja joen virkistyskäytölle. Tästä syystä uoman luonnollinen muoto tulisi säilyttää mahdollisimman hyvin, eikä muokata joesta sileää putkimaista rakennetta, josta vesi virtaa suoraan läpi.

HW-tilanteessa vesisyvyyden ja vedenkorkeuden aleneminen tarkoittaa nimenomaan tulvavaaran ja tulva-alueiden pientymistä eikä vesi Eurajoessa laske liian alhaiseksi. NW-tilanteessa vedenkorkeuden ja vesisyvyyden lasku voi kuitenkin vaikuttaa jokiympäristöön ja sen ekosysteemiin heikentävästi. Lukbe ym. (1984) toteaa tutkimuksessaan, että ruoppauksen jälkeen kestää noin 5 vuotta, että kasvillisuus palaa uomaan, tosin pienimuotoisempana. Kasvillisuuden monimuotoisuuden paluu voi kestää kuitenkin vuosikymmeniä (Lukbe ym. 1984). Toisaalta kasvillisuuden perkaus edesauttaa vedenkorkeuden alenemistä ja sitä kautta tulvavaaran pientymistä.

Koska jokiympäristön muokkaus ihmisen toimesta saattaa myös kasvattaa tulvavaaraa, täytyy muokkaustoimet suunnitella tarkoin (Hyvärinen & Kajander 2005). Tulvariskien hallinnan kannalta ruoppaus edesauttaa sen tavoitteiden täyttymistä. Hallinnan tavoitteena on arvioida ja vähentää tulvariskejä sekä estää tai vähentää tulvien aiheuttamia vahinkoja (Schanze 2006; Koivumäki ym. 2010; Merz ym. 2010), jotka tässä tapauksessa käyvät toteen. Tulvavaaran pientymässä myös ympäristöä, infrastruktuuria ja ihmisiä uhkaava tulvariski pienenee. Tulvariskin pientyminen voi tarkoittaa tuhansien eurojen säästöjä tulvatilanteessa, kun ruoppauksen ansiosta mahdollisilta vahingoilta vältytään.

Hydraulinen mallinnus tukee jokiympäristöjen suunnittelutyötä ja toimii välineenä jokiympäristön muutosten arvioinnissa ja tulkinnassa. Se antaa mahdollisuuden tarkastella erilaisia vaihtoehtoja tulvariskienhallinnan kannalta ja tätä kautta se voi parantaa ja tehostaa tulvariskienhallinnan toimenpiteitä. Sen avulla pystytään havainnoimaan ja suunnittelemaan jokikohtaisesti juuri kyseiselle jokiympäristölle sopivat toimenpiteet. Se mahdollistaa myös ennakkoinnin sekä luotettavan ja tarkan tulvavaarakartoituksen.

NW tul.- ja HW tul. -skenaarioissa ei ole otettu huomioon mahdollisen läjityksen vaikutuksia uoman törmien korkeuteen ja maanpinnan topografiaan. Riippuen läjityspaikkojen sijainneista, sillä saattaa olla vaikutusta uoman ulkopuolelle ruoppauksesta huolimatta tulvivan veden muodostamien tulvatasankojen muotoon ja mahdollisesti vesisyvyyteen. Vaikutus on oletettavasti kuitenkin niin pieni, että se ei vaikuta mallinnuksen tuloksiin. Täytyy kuitenkin muistaa, että vaikka malleilla on hyvin tarkka geometria- ja virtaamatieto, mallit ovat silti vain suuntaa-antavia skenaarioita, vaikkakin hyvin luotettavia sellaisia.

6.2 Vaikutus virtauskenttään

Virtausnopeus yhdessä virtausuuntien kanssa vaikuttaa uoman geomorfologiaan ja geomorfologia puolestaan vaikuttaa uoman virtausnopeuteen sekä -suuntiin. Kun geomorfologiaa muokataan ruoppauksen yhteydessä, voidaan olettaa virtauskentän ominaisuuksien muuttuvan. Virtauskentän muutokset ovat kuitenkin Eurajoen tapauksessa vähäisiä, mutta selkeitä muutoksia on havaittavissa erilaisten rakenteiden kuten siltojen lähellä. Esimerkiksi akanvirtojen sijaintien ja kokojen muutos nähdään mallien avulla hyvin. Ruoppauksen jälkeen uoman virtausnopeus hidastuu. Uoman kaltevuus ei muutu, joten painovoiman vaikutus virtaukseen pysyy samana. Leveyden kasvaessa uomaan syntyy enemmän virtausta hidastavaa kitkapintaa

Virtauksen jatkuvuusteorian mukaan vesimäärän pysyessä muuttumattomana, mutta poikkileikkauksen kasvaessa virtausnopeus hidastuu (Charlton 2008: 76; Kolev 2015), joka pätee myös Eurajoen tilanteessa. Tulvatilanteessa vesi virtaa myös uoman ulkopuolella esim. peltujen suojavyöhykkeillä, joiden kasvillisuus ja muut rakenteet hidastavat virtausnopeutta entisestään. Toisaalta uoman ruoppauksen myötä virtausta haittaava kasvillisuus uomassa vähenee, jolla puolestaan on virtausnopeutta kasvattava vaikutus turbulenssin ja kitkan vähentyessä. Tulokset osoittavat, että vaikka Eurajoen virtauskentässä ei tapahdu suuria muutoksia, voidaan hydraulista mallinnusta hyödyntää muissa vastaavissa tapauksissa, kun halutaan selvittää virtaussuuntien muutosta ja niiden vaikutusta esimerkiksi eroosioon.

Jokiympäristön kannalta olisi tärkeää, että Pyhäjärvestä pystyttäisiin jatkossa juoksuttamaan riittäviä vesimääriä leventyneeseen uomaan. Mikäli juoksutus on liian pieni, vesi ei virtaa uomassa kunnolla. Virtausnopeuden hidastuminen voi aiheuttaa esimerkiksi vedenlaadullisia ongelmia (Durance & Ormerod 2009; Niemi & Mitikka 2013). Eurajoessa on historiassa toistuvasti ollut vedenlaadullisia ongelmia teollisuuden päästöjen ja pelloilta tulvien ravinnekuormitusten vuoksi (Kirkkala & Ryömä 2010). Vedenvaihtuvuus hidastuu virtausnopeuden hidastuessa, joten vedenlaadulliset ongelmat ovat yksi riski tulevaisuudessa ruoppauksen jälkeen (Derecki 1985; Wilber & Clarke 2001). Ruoppauksen on kuitenkin tarkoitus estää näitä ongelmia, mutta se voi edellyttää muutoksia Pyhäjärven juoksutukseen.

Eroosion riski kasvaa ruoppauksen yhteydessä. Tutkimukset toteavat eroosion, sedimentin kulkeutumisen sekä veden samentuminen yleisiä vaikutuksia heti ruoppauksen jälkeen (Pinter ym. 2004; Petit ym. 2005). Vaikutukset voivat vaihdella myös uoman sisäisesti eri osissa uomaa. Virtaussuuntaa ja -nopeutta kuvaavista nuolista voidaan päätellä eroosiolle alttiita kohtia uomassa. Samentumiseen vaikuttaa pohjan sedimentin määrä ja raekoko sekä virtausdynamiikka. Eurajoen tapauksessa eroosion riski on pieni, sillä uoman pohja ja törmät koostuvat savesta. Saven koheesiovoima on suuri, joten se kestää kulutusta. Hjulströmin diagrammin (Hjulström 1935) mukaan savi tarvitsee suuren virtausnopeuden erodoituaan. Toisaalta saven hienon partikkelikoon takia ruoppauksessa irtoavat sedimentit suspendoituvat eivätkä laskeudu. Tämä voi näkyä hetkellisenä samentumisena. Voidaan olettaa ruoppauksessa irtoavan sedimentin kulkeutuvan aina jopa Eurajoen estuaariin Selkämerelle asti.

6.3 Ruoppauksen hyödyllisyys

Ruoppaus vaikuttaa uoman virtausdynamiikkaan ja tulvavaaraan. Sen aiheuttamat muutokset virtauskentässä sekä tulvavaarassa vaihtelevat spatiaalisesti uomassa. Eurajoen tapauksessa tulvavaara pieneni ja virtausnopeudet hidastuivat. Erilaisilla rakenteilla kuten silloilla oli suurin vaikutus virtaussuuntiin. Tulosten avulla voidaan reagoida mahdollisiin muutoksiin, esimerkiksi eroosion lisääntymiseen tai virtauksen käytökseen ennakoivasti. Ruoppauksella on mahdollista saavuttaa toivottu hyöty, mutta se aiheuttaa myös haittoja. Hyödyt ja haitat tulee kuitenkin arvioida aina tapauskohtaisesti. Yhden jokiympäristön mallinnuksen tuloksia ei voida yleistää muihin jokiympäristöihin.

Ruoppaussuunnitelman tavoite on vähentää Eurajoen tulvimista ja siitä aiheutuvia haittoja. HW tul. skenaarion perusteella ruoppaus vähentää tulvimista 51,9% suhteessa HW nyky. skenaarioon, mutta ruoppaussuunnitelman mukaisiin tuloksiin ei päästy useista malleista, huolellisesta kalibroinnista ja tarkasta geometrian laskemisesta huolimatta. Ruoppauksen jälkeen tulviminen vähenee, mutta ongelma ei poistu kokonaan. Lisäksi vaikutusten spatiaalinen vaihtelu aiheuttaa ruoppauksen hyödyllisyyden arviointiin hankaluuksia. Erityisesti paalulta 160+00 alajuoksua kohti ero on huomattava ja vesimäärä pelloilla pienenee reilusti tai poistuu paikoin kokonaan (liite 1). Euran keskustassa paaluvälillä 180+00 - 210+00 ruoppauksella ei saavuteta tavoiteltua hyötyä tulva-alueiden koon pysyessä lähellä alkuperäistä ja vedekorkeuden laskun jäädessä tavoitteesta. Tulvavaaran kannalta voidaan kuitenkin todeta ruoppauksen olevan hyvä vaihtoehto jokiuoman kunnostukseen. Tulvavaaran pienentyminen säästää esimerkiksi useita rakennuksia kastumiselta tulvan yhteydessä, joka jälleen pienentää tulvariskiä alueella.

Tuloksia tarkastellessa on kuitenkin otettava huomioon, millainen on ruoppaussuunnitelman ja tämän tutkielman mallien lähtömateriaali, mihin tilanteisiin suunnitelman ja tutkimuksen mallinnusten tulokset perustuvat sekä millaisilla mallinnusohjelmilla niiden tulokset on saatu aikaan. Suunnitelman arvot perustuvat HEC-RAS 1D-malliin. 1D-malleissa vesi virtaa mallin läpi nopeammin kuin 2D- mallissa, sillä 1D-mallissa on vähemmän ulottuvuuksia (Shen 1979). Suunnitelmassa mallin geometriana on käytetty GPS:llä paalujen 100-210 kohdalta mitattuja poikkileikkauksia pohjasta ja näiden poikkileikkauksien välit on interpoloitu jatkuvaksi, tasaiseksi pinnaksi. Tässä tutkielmassa mallien geometriana käytettiin jopa senttimetrin tarkkaa ADCP:lla mitattua tiheää pisteistöä uoman pohjasta, jonka perusteella uoman geometria interpoloitiin. Näin ollen tässä tutkielmassa käytetyn geometrian interpolointivirheiden voidaan olettaa olevan huomattavasti pienempiä kuin suunnitelmassa käytetyssä HEC-RAS 1D-mallissa. Poikkileikkauksia interpoloidessa niiden välille syntyy huomattavasti tasaisempi geometria kuin se oikeasti luonnossa on (Gharbi ym. 2016), joka vaikuttaa olennaisesti virtauksen käyttäytymiseen mallissa. Samasta syystä 1D-mallien tuottama vedenkorkeustieto voi erota 2D-mallin vastaavasta tiedosta.

Hydraulista mallinnusta ei juurikaan ole käytetty ruoppauksen vaikutusten arvioinnissa (Harvey ym. 2011). Ruoppauksella kuitenkin tiedetään olevan erinäisiä vaikutuksia jokiympäristöön aina veden samentumisesta eroosioon ja virtauskentän muutoksiin (Derecki 1985; Harvey ym. 2011). Erityisesti virtauskentän muutosten yksityiskohtainen tarkastelu on jäänyt vähemmälle. Tämän tutkielman perusteella voidaan todeta ruoppauksella olevan vain

vähäisiä vaikutuksia Eurajoen virtauskenttään. Tuloksia ei kuitenkaan voida yleistää sillä jokainen joki on oma monimutkainen ympäristönsä. Ruoppauksen haittavaikutukset ovat kuitenkin usein spatiaalistemporaalisesti esiintyviä, hetkellisiä ja suhteessa hyötyyn pieniä, joista jokiuoma ja sen eliöstö toipuvat. Mikäli ruoppauksella on mahdollista saavuttaa suuria hyötyjä ja säästöjä tulvavaaran ja tulvariskin pienentymisen myötä, kannattaa sen toteuttamista harkita mahdollisista hetkellisistä haitoista huolimatta.

Erityisesti hydraulista mallinnusta hyödyntämällä näitä epävarmuuksia ja haittoja voidaan tarkastella ja sulkea pois. Toisaaalta mallit voivat osoittaa jotain uutta ja yllättävää, mihin ei olisi osattu varautua ilman mallien tuloksia. Jokiympäristöt ovat monipuolisia elinympäristöjä, jonka takia ruoppaus tulee suunnitella aina tarkasti. Talodelliset sekä ilmastolliset vaatimukset ovat kasvattaneet tarvetta tulvariskien kartoitukselle sekä niihin varautumiseen. Ilmastonmuutoksen myötä tulvavaarat ja tulvariskit kasvaa Suomessa erityisesti rannikkoalueilla (Veijalainen ym. 2010), joihin Eurajoki kuuluu. Lähikaukokartoitusmenetelmiin perustuvat riskien arvioinnit ovat yleistyneet EU:n vaatiessa tulva-alueiden kartoitusta jäsenmailtaan. Tästä syystä tulvavaaran arviointi itsessään jo on hyödyllinen, vaikei ruoppausta toteutettaisikaan. Eurajoen tapauksessa hydraulinen mallinnus osoittaa ruoppauksesta olevan hyötyä tulvavaaran pienentämiseen. Euran keskustan alueelle tulisi kuitenkin suunnitella vaihtoehtoisia ratkaisuja, jotta tulvavaara pieneni myös siellä. Mallintamalla eri skenaarioita pystyttäisiin selvittämään paras vaihtoehto tulvavaaran pienentämiseen myös Euran keskustan alueella.

6.4 Lähikaukokartoitusmenetelmien virhelähteet jokiympäristön muutostulkinnassa

Etuna lähikaukokartoitustekniikoissa on niiden käytön tehokkuus sekä tarkka spatiaalinen resoluutio (Hohenthal ym. 2011; Kasvi ym. 2017). Ne mahdollistavat entistä tarkemmat ja laajemmat mittaukset jokiympäristöstä. Mikään menetelmä ei kuitenkaan ole täysin virheetön vaan niiden käytön yhteydessä saattaa syntyä tarkkuusvirheitä. Tutkimus voidaan kuitenkin tehdä ja tulokset saavuttaa näiden tarkkuusvirheiden rajoissa. Tuntemalla käytettävien mittausmenetelmien ja aineiston rajat, pystyy tuloksia ymmärtämään paremmin.

RTK-GNSS:n virheet ovat tutkielmani kannalta vähäisiä (<0,05m). Virheitä voi kuitenkin syntyä lähettimen ja vastaanottimen kellojen tarkkuuseroista laitteen laskiessa näennäisetäisyyttä niiden välille (Bhatta, 2010; Seeber 2008;). Virheitä voi myös aiheuttaa ilmakehän häiriöt ja satelliittien sijoittuminen taivaalla. Sen sijaan suurimmat virheet syntyivät akustisen virtausprofiilimittarin DGPS-antennin sijainnin horisontaalisesta mittaustarkkuudesta (0 - 1m) sekä GPS-signaalin pätkimisestä. GPS-signaali otti kenttämittausten aikana häiriötä latvustosta sekä useista joen ylittävistä silloista, jolloin signaali katkesi hetkellisesti. ADCP-sensorin akustinen signaali saattaa myös häiriintyä lähellä uoman reunoja sekä hyvin matalassa vedessä, jolloin se saattaa lähettää virhekaikuja (Muste ym. 2010). Ainakin satunnaisten kaikuluotaussignaalien voidaan myös olettaa palanneen takaisin runsaasta kasvillisuudesta, saavuttamatta uoman todellista pohjaa. Lisäksi uoman pohjaan on kertynyt höttöinen liejukerros, jota ADCP:n signaali ei läpäise kunnolla.

ADCP:n heikkous on, ettei se pysty mittaamaan virtauskenttää aivan pohjan läheltä eikä heti sensorin läheltä (noin 10cm) (Muste ym. 2010). Tämän tutkielman kannalta sillä ei ole merkitystä, sillä tutkielmassa ei keskitytä erityisesti pohjan- tai pinnanläheiseen virtaukseen. Usean ADCP:n samanaikainen käyttö voi tietyissä olosuhteissa myös aiheuttaa sen, että ne ottavat häiriötä toistensa signaaleista (Muste ym. 2010; Tokyay ym. 2009). Kenttätyöt ja ADCP mittaukset toteutettiin kuitenkin siten, että sensorit olivat koko ajan 3-7 metrin etäisyydellä toisistaan. Matalassa uomassa signaalin viuhka ei leviä niin laajalle, että sensorit olisivat tällä etäisyydellä ottaneet häiriötä toisistaan.

ALS-dataan pohjautuvissa korkeusmalleissa virhelähteet syntyvät lähinnä kasvillisuudesta (Ahokas ym. 2003; Hyyppä ym. 2005; Sirkiä ym. 2008). Tästä syystä keilauksia vältetään tekemästä korkean kasvipeitteisyyden aikaan esim. kesällä (Sirkiä ym. 2008). Laser saattaa kimmota takaisin kasvillisuudesta saavuttamatta todellista maanpintaa. Tässä tutkielmassa käytetyt Maanmittauslaitoksen aineistot täyttävät tiukat laatukriteerit ja niiden pistetiheys on vähintään 0,5 neliöllä ja peittoalueet (pääallekkain menevät lentolinjat) ovat vähintään 250 m leveitä. Tasotarkkuus aineistossa on 0,60 metriä ja korkeustarkkuus 0,15 metriä. Lisäksi maanmittauslaitoksella laatuvaatimuksena on, että aineistossa ei ole aukkoja esimerkiksi tulvien vuoksi.

Tutkielmassani käytettyjä menetelmiä on käytetty useissa jokiympäristöön liittyvissä tutkimuksissa jo useiden vuosien ajan (Alho ym. 2003; Alho ym. 2009a; Hohenthal ym. 2011; Kasvi ym. 2017). Tutkimukset osoittavat, että lähikaukokartoitusmenetelmiin perustuvat jokiympäristön kartoitusmenetelmät ovat tehokas ja luotettava tapa tutkia jokiympäristön muutosta (Hyyppä & Hyyppä 2007; Alho ym. 2009a; Lotsari ym. 2014; Flener ym. 2015; Kasvi ym. 2017). Erilaiset lähikaukokartoitusmenetelmiin perustuvat geometriat ja virtausskenaariot yhdessä havaintoihin perustuvan, kattavan referenssi- ja validointiaineiston kanssa antavat luotettavan pohjan mallinnukselle. Erot erilaisten mallien välillä huomataan, kun vertaillaan ruoppaussuunnitelman yksiulotteisen, harvaan kenttämittausaineistoon perustuvan mallin tuloksia tämän tutkielman kaksiulotteisen, tarkkaan ja tiheään kenttämittausaineistoon perustuvaan mallin tuloksiin.

6.5 Hydraulisen mallinnuksen ongelmat ja edut

Hydraulisen mallinnuksen epävarmuuksia on tutkittu kansainvälisesti eri tutkimusryhmien toimesta ja on huomattu, että kehitystä tarvitaan erityisesti mallien kalibroinnissa ja validoinnissa (Horrit & Bates 2002; Williams ym. 2013; Alho ym. 2010; Alho ym. 2015). Suurimmat virheet mallin tuloksiin tulee liian epätarkoista korkeusmalleista (Alho ym. 2009a; Flener ym. 2010). Mahdolliset mittavirheet ja liian suuret yksinkertaistukset, esimerkiksi suuret interpolointivälit, vähentävät mallin luotettavuutta entisestään.

Oikeanlaiset ja riittävän tarkat lähtömateriaalit ovat avainasemassa mallien oikeellisuuden kanssa (Alho ym. 2008; Kasvi ym. 2017). Liit virheet tai puutteet lähtömateriaalissa johtavat siihen, että malli ei enää todenmukaisesti kuvaa sitä ilmiötä, jota halutaan mallintaa (Shen 1979). Mallin validoinnin kannalta todellisiin tilanteisiin perustuvat, mitatut havainnot ovat tärkeitä (Alho ym. 2010). Validointi ongelmat ovatkin yksi yleisimmistä hydraulisen mallinnukseen liittyvistä ongelmista. Tässä tutkielmassa mallien validointiin käytettiin nimenomaan oikeaan tilanteeseen perustuvaa mitattua havaintoa ja mallin tulokset

vastasivat hyvin kyseitä tilannetta. Luotettavat tulokset saavuttaakseen on tärkeä ymmärtää sopivan mallin valinnan tärkeys sekä sen asianmukainen käyttö. Liian monimutkaisilla malleilla yksinkertaisen ongelman ratkaisu voi aiheuttaa mallin oman epätarkkuuden lisäksi muita moninkertaisia virheitä malliin (Helmiö 1997).

Numeeristen tietokoneella tehtävien mallien ongelma on usein se, että vaikka ne ovat pitkälle kehittyneitä ne ovat samalla myös rajoittuneita (Koistinen 2006). Ohjelmisto ei välttämättä pysty ottamaan huomioon kaikkia mallinnettavaan ilmiöön vaikuttavia seikkoja. Mallinnettava kohde, mallinnus prosessi ja mallinnettava ilmiö tulee tuntea kunnolla, jotta mallin tuloksia osaa tulkita ja hyödyntää oikein. Jos mallin käyttäjällä ei ole ymmärrystä, millä perusteella mallin tulokset ovat syntyneet, mitä virheitä numeerisessa mallissa mahdollisesti on ja mitä tulokset kertovat, ei mallin tuloksia pystytä kriittisesti tarkastelemaan. Tällöin ei välttämättä tiedetä, mitä malli on mallintanut ja mitä tulokset lopuksi kertovat. Toisaalta mallin numeerisella ratkaisutavalla ei ole merkitystä käyttäjälle, mikäli tuloksen tarkkuus on riittävä (Shen 1979).

Mahdollisimman hyvään tulokseen päästäkseen ja optimointiongelmia välttääkseen tulisi mallin parametrien kalibrointiin käyttää juuri niille parametreille parhaiten sopivaa menetelmää (Mertens 1989). Optimoinnilla minimoidaan mallin virheitä hyödyntämällä mallin minimi ja maksimi arvoja. Tämä on yhden tai kahden muuttujien funktioissa on erityisen tärkeää. Luonnonuomassa huomioon otettavat parametrit ovat Manningin karkeusarvo ja sen mahdolliset vaihtelut sekä uoman ja tulvatasankojen liikemäärän siirtymisestä aiheutuva häviö (Nuding 1998; Helmiö 2002). Toisaalta Manningin arvoa on myös kritisoitu siitä, että se ei ole dimensioton eikä konkreettisesti mitattava suure, jolloin sen määrittely on hankalaa (Pasche & Rouvé 1985).

Tämän tutkielman kannalta avainasemassa olivat tarkat lähtömateriaalit, joita käytettiin hydraulisen mallin teossa. Niiden sekä kenttämittauksiin perustuvien havaintojen avulla mallien pohjan interpolointivirheet olivat vähäisiä sekä validointi luotettava. TLS:n pohjautuvalla pistepilvellä olisi topografiasta saatu vieläkin tarkempi (Hohenthal ym. 2011), mutta suuren jokialueen laserkeilaaminen maastakäsin olisi ollut työlästä. ALS:n pohjautuvasta pistepilvestä saatiin tämän tutkielman tarkoitukseen kuitenkin riittävän tarkka topografia. Manningin karkeusarvona käytettiin kahta eri lukua riippuen mallinnettavasta skenaariosta. Arvot olivat valmiiksi asetettuja ja yhtä arvoa käytettiin koko uomalle skenaariosta riippuen. Karkeusarvoja ei lähdetty tämän tutkielman puitteissa määrittelemään uudestaan tai käytetty spatiaalisesti muuttuvaa karkeusarvoa.

Kun malli on rakennettu alusta asti itse, itse kerätyllä aineistolla on sen tulosten tulitseminen ja niiden oikeellisuuden arviointi helpompi. Koska kyseessä oli suuri alue ja sen mallinussajat olivat pitkiä, alue päätettiin mallintaa vain kaksiulotteisesti. Käyttämällä eri virtauskenaarioita sekä erilaisia geometrioita pystyttiin arvioimaan ruoppauksen vaikutuksia eri tilanteissa. Näiden tulosten hyödyntäminen esimerkiksi ruoppauksen suunnittelussa voi vähentää ruoppauksesta mahdollisesti aiheutuvia ongelmia. Mielenkiintoisten, pienempien, alueiden myöhempi tarkastelu kolmiulotteisesti voisi kuitenkin olla tulevaisuudessa tarpeellista. Hydraulisiin malleihin perustuvissa tulvakartoissa ja tulvariskiarivoissa on kuitenkin omat epävarmuutensa (Zhou & Arnbjerg-Nielsen 2018). Malliin jää aina epävarmuuksia, joita ei välttämättä pystytä ennustamaan eikä mallintamaan. Epävarmuuksien arviointi on tärkeää, jotta tuloksiin jäisi mahdollisimman vähän aukkoja. Rajallisen aineiston kanssa tämän vaikutus

korostuu entisestään. Tärkein työkalu mallin tuloksien arvoinnissa ja epävarmuuksien välttämässä on valita tärkeimmät muuttujat, joista tietoa halutaan. Epävarmuudet korostuvat aina eri malleja vertaillessa, kuten tässäkin tutkielmassa huomattiin verratessa yksiulotteisen- ja kaksiulotteisenmallin vedenkorkeustuloksia keskenään.

7 Johtopäätökset

Tutkielmassa selvitettiin, miten ruoppaus vaikuttaa joen virtausolosuhteisiin ja tulvavaaraan. Tarkastelu toteutettiin Eurajoessa hyödyntäen kenttämittauksia, lähiaukokartoitusmenetelmiä ja hydraulista mallinnusta. Hydraulisen mallinnuksen perusteella ruoppauksella on selkeä vaikutus tulvavaaraan ja uoman virtauskenttään. Tuloksista voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

1. Ruoppaus vaikuttaa uoman virtausdynamiikkaan ja tulvavaaraan. Sen aiheuttamat muutokset virtauskentässä sekä tulvavaarassa vaihtelevat spatiaalisesti uomassa. Eurajoen tapauksessa tulvavaara pieneni ja virtausnopeudet hidastuivat. Erilaisilla rakenteilla kuten silloilla oli suurin vaikutus virtaussuuntiin. Tulosten avulla voidaan reagoida mahdollisiin muutoksiin, esimerkiksi eroosion lisääntymiseen, ennakoivasti.
2. Ruoppauksella on mahdollista saavuttaa toivottu hyöty, mutta se aiheuttaa myös haittoja. Hyödyt ja haitat tulee kuitenkin arvioida aina tapauskohtaisesti. Yhden jokiympäristön mallinnuksen tuloksia ei voida yleistää muihin jokiympäristöihin.
3. Hydraulinen mallinnus tarvitsee tarkan lähtöaineiston. Erilaiset lähiaukokartoitusmenetelmiin perustuvat geometriat ja virtausskenaariot yhdessä havaintoihin perustuvan, kattavan referenssi- ja validointiaineiston kanssa antavat luotettavan pohjan mallinnukselle. Lähtöaineiston laatu vaikuttaa tulosten oikeellisuuteen.
4. Ruoppauksen vaikutusten arviointi etukäteen on mahdollista hydraulisella mallinnuksella. Käyttämällä eri virtausskenaarioita sekä erilaisia geometrioita pystytään arvioimaan ruoppauksen vaikutuksia eri tilanteissa. Näiden tulosten hyödyntäminen ruoppauksen suunnittelussa voi vähentää ruoppauksesta mahdollisesti aiheutuvia ongelmia.
5. Hydraulinen mallinnus tukee jokiympäristöjen suunnittelutyötä ja toimii välineenä jokiympäristön muutosten arvioinnissa ja tulkinnassa. Se antaa mahdollisuuden tarkastella erilaisia vaihtoehtoja tulvariskienhallinnan kannalta ja tätä kautta se voi parantaa ja tehostaa tulvariskienhallinnan toimenpiteitä. Sen avulla pystytään havainnoimaan ja suunnittelemaan jokikohtaisesti juuri kyseiselle jokiympäristölle sopivat toimenpiteet.

Tulevaisuudessa hydraulista mallinnusta kannattaisi hyödyntää jokiympäristöjen kunnostuksen ja rakennuksen suunnittelussa. Vaikka hydraulista mallinnusta yleisesti käytetään tulvariskien ja -vaarojen kartoittamiseen (Käyhkö ym. 2007), on jokiuoman muokkauksen vaikutuksia virtauskenttään tutkittu jokseenkin vähän modernein lähiaukokartoitusmenetelmin. Hyödyntämällä lähiaukokartoitusmenetelmiä ja hydraulista mallinnusta jokiuoman muokkauksen suunnittelussa saataisiin luotettavaa tietoa siitä, miten joki reagoi siihen tehtäviin muutoksiin. Näin pystyttäisiin ennalta ehkäisemään mahdollisia ongelmia, joita voi syntyä esimerkiksi ruoppauksen yhteydessä.

On tärkeää ymmärtää tulvien aikana tapahtuvien veden virtausrakenteen ja uoman pohjan morfologian muutoksia, sillä se mahdollistaa ympäristön olosuhteiden muutoksia ennakoivan vesirakentamisen ja jokiympäristön käytön (Alho ym. 2008). Avainasemassa on kuitenkin hydraulisessa mallissa käytettävä lähtöaineisto, jonka tulee olla riittävän tarkka ja kattava luotettavien tulosten saamiseksi (Alho ym. 2008; Alho ym. 2015; Kasvi ym. 2017). Tulvariskienhallinnan kannalta tulvaskenaarioita mallintamalla pystyttäisiin varautumaan mahdollisiin tulviin tekemällä ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä ja minimoimaan riskejä.

Kiitokset

Pro gradu -tutkielma toteutettiin tilaustyönä Pyhäjärvi-Instituutille sekä osana maantieteen ja geologian laitoksen virtavesiryhmän tutkimusta. Haluan kiittää virtavesiryhmän jäseniä ja Pyhäjärvi-Instituutin väkeä kenttätyöavusta ja tuesta prosessin aikana. Erytiskiitos tutkielmani ohjaajille dosentti & tutkijatohtori Elina Kasville rakentavista ja kannustavista kommentteista sekä professori Petteri Alholle tämän kaiken mahdollistamisesta.

Lähdeluettelo

- Agrawala, S. Ota, T. Ahmed, A. U., Smith, J., van Aalst, M. (2003). Development and climate change Bangladesh. Focus on coastal flooding and the Sundarbans. *Environment directorate development co-operation directorate*. 70p.
- Ahokas, E., Kaartinen, H. & Hyyppä, J. (2003). A quality assessment of airborne laser scanner data. ISPRS WG III/3 Workshop 3D laser scanner and InSAR data, Dresden, Germany 8-10 October 2003. *The International Archives of Photogrammetry and Spatial Information Sciences, XXXVI (part 3/W19):115-119*
- Alabyan, A. M. & Chalov, R. S. (1998). Types of river channel patterns and their natural controls. *Earth Surface Processes and Landforms*. 23:5.
- Alcantra-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disaster in developing countries. *Geomorphology*. 47: 2-4. 107-124.
- Alho, P. & Käyhkö, J. (2003). Hydraulinen tulvamallinnus paikkatietomenetelmien avulla: Mödrudalur, Koillis-Islandi. *Terra* 115:3, 139-148.
- Alho, P., Sane, M. Huokuna, M., Käyhkö, J., Lotsari, E. & Lehtiö, L. (2008). Tulvariskien kartoittaminen. *Ympäristöhallinnon ohjeita*. 2, 102.
- Alho, P., Hyyppä, H. & Hyyppä, J. (2009a). 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.
- Alho, P., Kukko, A., Hyyppä, H., Kaartinen, H., Hyyppä, J. & Jaakkola, A. (2009b). Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1831–1838.
- Alho, P. & J. Mäkinen (2010). Hydraulic parameter estimations of a 2D model validated with sedimentological findings in the point bar environment. *Hydrological Processes* 24: 18, 2578– 2593.
- Alho, P., Laamanen, L., Kasvi, E., Yunsheng, W., Flener, C. (2015). Tulvariskien hallinta uusilla teknologioilla. *Metsätieteen aikakauskirja*.15:1. 42-45.
- Anttila, L. (2018). Eurajoen ala- ja keskiosan virtapaikkojen kalataloudellinen investointi. *Pyhäjärvi-Instituutin julkaisuja*. B35. 31 s.
- Arcement, G. J., Schneider V. R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *U.S. Geological Survey's Water-Supply Paper*. 2339. 30 s.
- Asworth, P., Ferguson, R, Ashmore, P., Paola, C., Powell, D., Prestegards, K. L. (1992). Measurements in braided river chute and lobe: 2. sorting of bedload during entrainment, transport, and deposition. *Water Resources Research*.
- Bagnold, R. A., (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. *Physiographic and Hydraulic studies of rivers*. 422:1
- Bal, K. D. & Meire, P. (2009). The Influence of Macrophyte Cutting on the Hydraulic Resistance of Lowland Rivers. *Journal of Aquatics and Plant Manage.* 47: 65-68

- Bates, P. D. & De Roo, A. P. (2000). A simple raster-based model for flow inundation simulation. *Journal of Hydrology*. 236:1-2. 54-77s.
- Bates, P. D., (2004). Remote sensing and flood inundation modelling. *Hydrological Process* 18, 2593–2597.
- Beldring, S., Andréasson, J., Bergström, S., Graham, L.P., Jónsdóttir, J.F., Rogozova, S., Rosberg, J., Suomalainen, M., Tønning, T., Vehviläinen, B., Veijalainen, N., (2006). Mapping water resources in the Nordic region under a changing climate. *Report No. CE-3. CE Nordic project on Climate, Energy, and Norden*. Reykjavik, Iceland. 125 s.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K., (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climate Change* 81, 71–95 s.
- Best, J. L. (1988). Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*. 35:3.
- Bhatta, B. (2010). Global Navigation Satellite Systems: Insights into GPS, GLONASS, Galileo, Compass, and Others. Hyderabad, IND: *Global Media*. 62-66 s.
- Bhavikatti, S. S. (2004). Finite element analysis. *New Age International*, New Delhi. 347 s.
- Black, P. E. (1991). Watershed hydrology. *Prentice-Hall*, New Jersey. 408 s.
- Blanckaert, K. (2010). Topographic steering, flow recirculation, velocity redistribution, and bed topography in sharp meander bends. *Water resources research*, 46.
- Blöschl, G. (2001). Scaling in hydrology. *Hydrological processes* 15, 709–711.
- Borghei, S. M., Jalili, M. R., Ghodsian, M. 1999. Discharge Coefficient for Sharp-Crested Side Weir in Subcritical Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125:10
- Breuer, M. (1999). Large eddy simulation of the subcritical flow past a circular cylinder: numerical and modeling aspects. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*. 28:9
- Bridge, J. S., & Jarvis, J. (1982). The dynamics of a river bend: a study in flow and sedimentary processes. *Sedimentology*. 29:4
- Brookes, A. (1987). River channel adjustments downstream from channelization works in England and Wales. *Earth Surface Processes and Landforms*. 12:4.
- Brush, L. M. & Mack, L. R. (1960). Fourth Decade of Hydraulics at the State University of Iowa. *Studies in Engineering*. 101s.
- Caamaño, D., Goodwin, P. & Buffington, J. M. (2010). Flow structure through pool-riffle sequences and a conceptual model for their sustainability in gravel-bed Rivers. *River research and applications*, 10:10.
- Calle, M., Lotsari, E., Kukko, A., Alho, P., Kaartinen, H., Rodriguez-Lloveras, X. & Benito, G. (2015). Morphodynamics of an ephemeral gravel-bed stream combining Mobile Laser Scanner, hydraulic simulations and geomorphological indicators. *Zetischrift fur Geomorphologie, Supplementary Issues*, 59(3), 33.
- Chanson, H. (2004). Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction (2nd Ed.). *Butterworth–Heinemann*. p. 650.
- Charlton, R. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London: Routledge. 280 s.
- Chenini, I. & Khemiri, S. (2009). Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. *International Journal of Environmental Science & Technology*. 6:3. 509-519s.
- Chow, V.T., (1959). Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill, 680 s.
- Carbonneau, P. E. & Piégay, H. (2012). *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. Wiley Blackwell.
- Constantine, J. A., Dunne, T., Ahmed, J., Legleiter, C. & Lazarus, E. D. (2014). Sediment supply as a driver of River meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. *Nature Geoscience*, 7:12, 899– 903.
- Costabile, P., F. Macchione., L. Natale & P. Gabriella. (2016). Flood mapping using LIDAR DEM. Limitations of the 1-D modeling highlighted by the 2-D approach. *Natural Hazards* 77: 181–204.
- Costard, F., Dupeyrat, E., Gautier, E., Carey-Gailhardis, E. (2003). Fluvial thermal erosion investigation along rapidly eroding riverbanks: Application to the Lena River central Siberia. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28:12.
- Coulthard, T. J. (2005). Effects if vegetation on braided stream pattern and dynamics. *Water Resources Research*. 41:4.
- Delft-3D Flow User Manual. (2014). Delft-3D FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. *Deltares System*. 697s.
- Dereck, J. A. 1985. Effect of Channel Changes in the St. Clair River during the Present Century. *Journal of Great Lakes Research*. 11:3, 201-207.
- Dietrich, W. E. & J. D. Smith (1983). Influence of the point bar on flow through curved channels. *Water Resources Research* 19, 1173–1192.
- Dingman, S. L. (2009). Fluvial hydraulics. *Oxford University Press*. 559 s.
- Dooge, J. C. (1986). Looking for hydrologic laws. *Water Resources Research*.
- Durance, I. & Ormerod, S. J. (2009). Trends in water quality and discharge confound long-term warming effects on river macroinvertebrates. *Freshwater Biology*.
- Döll, P. & Müller Schmied H. (2012). How is the impact of climate change on a river flow regime related to the impact on mean annual runoff? A global-scale analysis. *Environmental Research Letters*. 7:1. 11 s.

- Ferguson, R. & Ashworth, P. (1992). Spatial patterns of bedload transport and channel change in braided and Near braided rivers. In: Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R. and Tacconi, P., eds. *Dynamics of gravel-bed rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, 477–492.
- Eloranta, A. (1995). Kunnostuskivet eivät tuo vaelluskaloja virtoihin. *Suomen Kalastuslehti* 102 (8): S. 4 - 8. 0039-5528.
- Emmett, W., W. (1981). Measurement of bed load in rivers. *U.S Geological Survey*. 133.
- Entwistle, K. M. (2001). *Basic principles of the finite element method*. 185 s. Maney Publishing, London.
- Ferguson, R. I., Ashmore, P., Ashworth, P., Paola, C., Prestegard, K. (1992). Measurements in a braided river chute and lobe: 1. flow pattern, sediment transport and climate change. *Water Resources Research*.
- Fisher, K. (2001). An Australian Handbook of stream roughness coefficients. *Engineers Australia*. 2:57. 2-64.
- 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*.
- Flener, C., Yunsheng, W., Laamanen, L. Kasvi, E., Vesakoski, J., Alho, P. (2015). Empirical Modeling of spatial 3D flow characteristics using remote-controlled ADCP-system: Monitoring a spring flood. *Water* 2015, 7:1, 217-247
- Friedkin, J. (1945). A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers. *United States Waterways Experiment Station, Vicksburg*, 40.
- Frostick, L. E., J. McLelland & T. G. Mercer (2010). Users guide to physical modelling and experimentation: *Experience of the HYDRALAB network*. 272 s.
- Frothingham, K. M., Rhoads, B. L. (2003). Three-dimensional flow structure and channel change in an asymmetrical compound meander loop, Embarrass River, Illinois. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28:6.
- Fryirs, K. A. & Brierley, G. J. (2013). *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell.
- Gharbi, A., Soualmia, A. Dartus, D., Masbernat, L. (2016). Comparison of 1D and 2D hydraulic models for flood simulation on the Medjera river Tunisia. *Journal of Material Environment Science*. 7:8. 3017-3026s.
- Gleason, C. J. (2015). Hydraulic geometry of natural rivers: A review and future directions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 39:3. 337-360 s.
- Graf, W. H., Chhun, V. H. (1976). Manning's roughness for artificial grasses. *Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE*. 102:4. 413-323.
- Graf, W. L. (1987). Fluvial adjustment to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region. *Geological Society*. 89. 1491-1501.
- Grant, G. E. (1997). Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: A new hypothesis. *Water Resources Research*. 33:2
- Griffiths, G. A. (1981). Flow Resistance in Coarse Gravel Bed Rivers. *Civil Engineering Database*. 107:7. 899-918 s.
- Grothmann, T. & Reusswig, F. (2006). People at risk of Flooding: Why some residents take precautionary action while others do not. *Natural Hazards*. 38: 1-2. 101-120.
- Guerrero, M. & Lamberti, A. (2011). Flow Field and Morphology Mapping Using ADCP and Multibeam Techniques: Survey in the Po River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137:12, 1576–1587.
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., Corfee-Morlot, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*. 3, 802-806.
- Hamed, K., Rao, A. (1999). *Flood Frequency Analysis*. Boca Raton: CRC. 376 s.
- Hameed, L. K., Ali, S. T. (2013). Estimating of Manning's Roughness Coefficient for Hilla River trough Calibration Using HEC-RAS Model. *Journal of Civil Engineering*. 7:1.
- Hanski, M. (2000). Jokien rakenteellisen tilan arviointi: taustaa EU:n vesipolitiikan puitteiden toteuttamiseen Suomessa virtavesissä. *Helsinki, Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö* 379 952-11-0651-4, 1238-7312. . 94 s.
- Hanski, M. (2004). *Varautuminen suuriin tulviin*. Esitelmä Rakennusinsinöörien Liiton Studia Generalia -tilaisuudessa "Suomen vesiympäristö ja äärimmäiset luonnonilmiöt", 26.10.2004. Helsinki.
- Harjula, H. (2003). (toim.) *Kosteikkoja ja jokikunnostuksia U.S.A.:ssa*.
- Harvey, B. C. & Lisle, T. E., (2011). Effects of Suction Dredging on Streams: A review and an Evaluation Strategy. *American Fisheries Society*. 23:8.
- Heimlich, R., Wiebe, K., Claasen, R., Gadsby, D., House, R. (1998). Wetlands and Agriculture: Private interest and public benefits. *Agricultural Economics Report*. 99s.
- Helmiö, T. (2003). Tulvien torjuntaa luonnon omilla menetelmillä. *Vesitalous*. (2): 24 - 27.
- Hey, R. D., Thorne, C. R. (1986). Stable channels with mobile gravel beds. *Hydraulic Engineering*. 112. 671-689 s.
- Hickin, E. J. (1984). Vegetation and river channel dynamics. *The Canadian Geographer*. 28:2. 111-126s.

- Hirsch, R. M., Slack, J., Smith, R. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water resources Research*. 18:1. 107-121s.
- Hjulström, F. (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute of the University of Uppsala*, 25, 221–527.
- Hodge, R., Brasington, J. & Richards, K. (2009). In situ characterization of grain-scale fluvial morphology using Terrestrial Laser Scanning. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 954–968.
- Hohenthal, J., Alho, P., Hyyppä, J. & Hyyppä, H. (2011). Laser scanning applications in fluvial studies. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*.
- Horrit, 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.
- Hosia, L. (1983). *Pienten uomiin virtausvastuseroin: yleiskatsausosa*. Helsinki. 65 s.
- Huang, H. Q & Nanson, G. C. (1997). Vegetation and channel variation: A case study of four small streams in southeastern Australia. *Geomorphology*. 18. 237-249.
- Hugget, R. J. (2003). *Fundamentals of geomorphology*. Routledge. 386 s.
- Huhtala, J., Kuosku, P., Rautiainen, T., Sampakoski, L., Sarvilinna, A. (2003). Eroosion ja sedimentaation hallinta. *Luonnonmukainen vesirakentaminen: Uusia näkökulmia vesistösuunnitteluun*. 631. 106 – 121.
- Hunt, R. J., Anderson, M., Kelson, V. (2005). Improving a complex finite-difference ground water flow model through the use of an analytic element screening model. *The Groundwater Association*. 36:6. 1011-1017s.
- Hunter, J. D. (2007). MATPLOTLIB: A 2D Graphics Environment. *Co2003mputing ins Science & Engineering*, 90:9.
- Hupp, C. R. & Osterkamp, W. R. (1996). Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology*. 14. 277-295.
- Hyvärinen, V. & V. Kajander (2005). Rivers and lakes in Fennoscandia. *Teoksessa Seppälä, M. (toim.): The physical geography of Fennoscandia*. s. 144.
- Hyvärinen, V. & Puuppo, M. (1986). Valunta. *Teoksessa*. Mustonen. S. (toim). *Sovellettu hydrologia*. 152-223. Vesiyhdistys, Helsinki.
- Hyyppä, H. (2007). Kaukokartoitusaineistojen käyttö ja soveltaminen rakennus- ja ympäristötekniikassa. Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, Espoo. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, reports 1/2007. 107 s.
- Hyyppä, H. & Hyyppä, J. (2003). Laserkeilauksen laadun osatekijät. *Teoksessa: Jokela, J. (toim.). Pikseleitä ja pistepilviä - kuvauksen uudet ulottuvuudet*. Maanmittaustieteiden päivät 20.–21.11.2003, s. 43–49. Maanmittaustieteiden seura ry., Helsinki
- Hyyppä, H. & Hyyppä, J. (2006). National laser scanning handbook - *Recommendation for best practices in airborne laser scanning - Laserkeilaus ja kansallisia suosituksia*. ver. 1.0. Geodeettinenlaitos. Helsinki. 31 s.
- Hyyppä, J. & Hyyppä, H. (2007). Kansallisen laserkeilauksen mahdollisuudet. *Maankäyttö 1/2007*: 6–8. <http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk107/mk107_995_hyyppa.pdf> [Viitattu 28.01.2019.]
- Hyyppä, J., Wagner, W., Hollaus, M., Hyyppä, H. (2007). *Airborne Laser Scanning*. 30 s.
- James, C. S., Birkhead, A., Jordanova, A. A., O'Sullivan, J-J. (2004). Flow resistance of emerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research* 42(4): 390-398.
- Ji, Z. (2008). Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuarie. *John Wiley & Sons*, Hoboken. 702 s.
- Jha, A. k., Bloch, R., Lamond, R. (2013). Cities and Flooding. *World Bank*. 2013.
- Jormola, J., Järvelä, J., Lehtinen, A. & Pajula, H. (1998). Luonnonmukainen vesirakentaminen: mahdollisuudet ja erityispiirteet Suomessa. *Suomen ympäristö*, 265. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 952-11-0388-4, 1238-7312. 78 s.
- Jormola, J. & Pajula, H. (1999) Luonnonmukainen vesirakentaminen Saksassa ja Tanskassa. *Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristökeskuksen moniste* 137. 56 s.
- Jormola, J., Harjula, H., Sarvilinna, A. (2003). Luonnonmukainen vesirakentaminen: Uusia näkökulmia vesistösuunnitteluun. *Suomen Ympäristökeskus*. 631. 85 s.
- Jowett, I. G. & M. J. Duncan (2012). Effectiveness of 1D and 2D hydraulic models for instream habitat analysis in a braided river. *Ecological Engineering* 48, 92–100.
- Kaatra, K., K. Suihkonen, T. Tolvi, K. L. Välipirtti, A. Leinonen, V-P. Reskola, M. Ollila, M. Kujanpää, U. Hurmeranta, N. Gullstén, H. Ijäs, R. Seppänen & K. Valjakka (2006). Tulvavahinkotyöryhmä. *Työryhmämuistio MMM* 2006:16. 62s.
- Kaeser, A. J., Litts, T. L. & Tracy, W. T. (2013). Using low-cost side-scan sonar for benthic mapping throughout the lower Flint River, Georgia, USA. *River research and applications*, 29, 364–644

- Kasvi, E., P. Alho, M. Vaaja, H. Hyypä & J. Hyypä (2013a). Spatial and temporal distribution of fluvio morphological processes on a meander point bar during a flood event. *Hydrology Research* 44: 6, 1022–1039.
- Kasvi, E., M. Vaaja, H. Hyypä, J. Hyypä, H. Kaartinen & A. Kukko (2013b). Morphological changes on meander point bars associated with flow structure at different discharges. *Earth Surface Processes and Landforms* 38: 6, 577–590.
- Kasvi, E. (2015). Fluvio-Morphological Processes of Meander Bends – Combining Conventional Field
- 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. Close-Range Remote Sensing and Computational Modelling. *Turku: Annales Universitatis Turkuensis*.
- Kennedy, J. F. (1969). The Formation of Sediment Ripples, Dunes, and Antidunes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1:1, 147–168.
- Kipinä-Salokannel, S. (2015). Eurajoen-lapinjoen-Sirppujoen pintavesien toimenpideohjelma vuosille 2016-2021. *Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus*. 106s.
- Kirkkala, T. & Ryömä, H. (2010). Eurajoen kasvillisuus selvitys. *Pyhäjärvi-Instituutin julkaisu*. 28s.
- Klijn, F. & Baan, P. (2010). Flood risk perception and implications for flood risk management in the Netherlands. *International Journal of River Basin Management*. 2:2004. 2. 113-122s.
- Knighton, D. (1998) *Fluvial forms and processes. A new perspective*. Arnold, London. 383 s
- Koistinen, A. (2006). Mallinnusta ja tulvien ennustamista. *Solmu*. 3. 5s.
- Kolev, N. I. (2015). *Multiphase Flow Dynamics 1. Fundamentals*. Springer International Publishing Switzerland. 838 s.
- Korhonen, J., Kuusisto, E., (2010). Long term changes in the discharge regime in Finland. *Hydrology Research*. 41 (34),253–268.
- Käyhkö, J., Alho, P. & Selin, M. (2007). Tulvat ja tulvien kartoitus Suomessa. *Terra* 119: 3–4, 217–229.
- Lane, S. N., Biron, P. M., Bradbrook, K. F., Butler, J. B., Chandler, J. H. Crowell, M. D., McLelland, Richards, K. S., Roy, A. G. (1999). Three-dimensional measurements of river channel flow processes using acoustic doppler velocimetry. *Earth Surface Processes and Landforms*. 23:13.
- Larsen, E. W., Fremier, A., Greco, S. (2007). Cumulative effective stream power and bank erosion on the Sacramento river, California, USA. *Journal of the American Water Resources Association*. 1077-1097.
- Leopold, L. B. & M. G. Wolman (1960). River meanders. *Bulletin of the Geological Society of America* 71, 769-794.
- Leutheusser, H. J., Crisholm, W. O. (1973). Extreme roughness of natural river channel. *Journal of Hydraulic Division. ASCE*. 99:7, 1027-1041.
- Li, Z., Zhang, J. (2001). Calculation of Field Manning's Roughness Coefficient. *Agricultural Water Management*. 49:2, 153-161.
- Liimatainen, J., Uusiniitty-Kivimäki, M., Valpasvuo-Jaatinen, P. (2007). Turvetuotanto Satakunnassa. *Satakunnan maakuntakaava: Valmisteluvaihe 2007*. 38 s.
- Liu, Y., Metivier, F., Lajeunesse, E., Lancien, P., Narteau, P., Ye, B., Meunier, P. (2008). Measuring bedload in gravel-bed Mountain Rivers: average methods and sampling strategies. *Geodinamica Acta*. 21:1-2.
- Limerinos J. T. (1970). Determination of the Manning Coefficient from Measured Bed Roughness in Natural Channels; Studies of flow in alluvial channels. *US. Geological Survey Water-Supply Paper*. 1898-B. 46 s.
- 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.
- Lubke, R. A., Reavell, P., Dye, P. (1984). the effects of dredging on the macrophytic vegetation on the Boro river, Okavango delta, Botswana. *Biological Conservation*. 30:3. 211-236s.
- Luijendijk, A. (2001). Validation, calibration and evaluation of a Delft3d-FLOW model with ferry measurements. *Tu Delft*. 73s.
- Lynch, D. R. (1978). Analytic solutions for computer flow model testing. *Civil Engineering Database*. 104:10- 1409-1428s.
- Mackin, J. H. (1956). Cause of braiding by a graded river. *Geological Society*. 67. 1717-1718.
- Mansikkaniemi, H. (1986). Suomen jokien tulvaindeksit. *Terra* 98: 2, 126–137.
- Mandelbrot, B. B., Wallis, J. R. (1968). Noah, Joseph and operational hydrology. *Water Resources Research*. 4:909-18.
- McBride, M., Hession, W. C., Rizzo, D. M., Tomphson, D. M. (2007). The Influence of riparian vegetation on near-bank turbulence: A flume experiment. *Earth surface processes and landforms* 32(13): 2019-2037.
- Mehta, A. J., Parker, R. Krone, R. B. (1989). Cohesive sediment transport. I: Process Description. *Journal of Hydraulic Engineering*. 115:8.
- Mertens, W. (1989). Zur Frage hydraulischer Berechnungen naturnaher Fließgewässer. *Wasserwirtschaft*, 79, 4, s. 170 - 179. 0043-0978.
- Merz, B., Hall, J., Disse, M., Schumann, A. (2010). Fluvial Flood Risk Management in a Changing World. *Risk management of extreme flood events*. 10:3

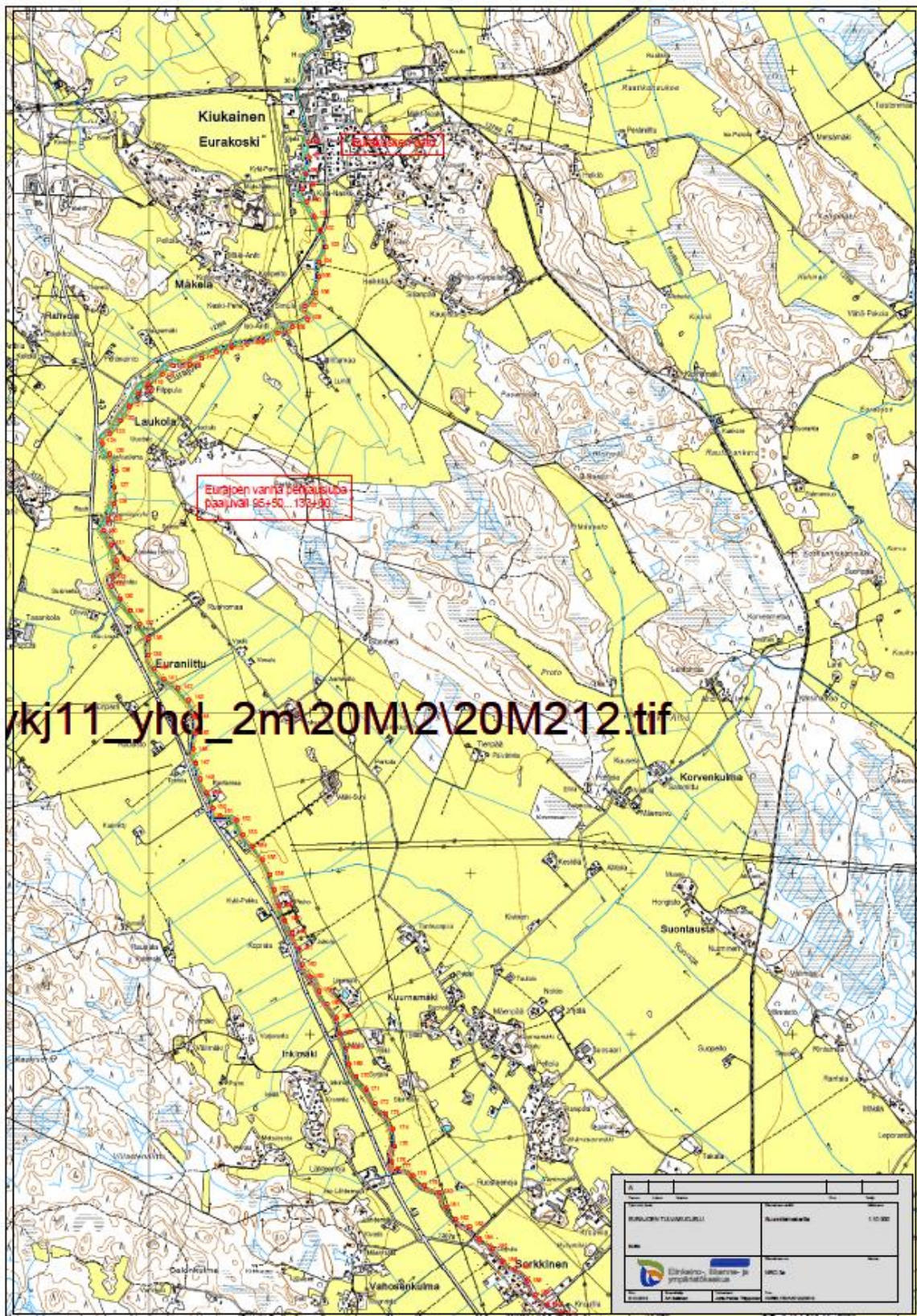
- Michaud, R. & P. J. Pilon (1999). Hydrological hazards. Teoksessa Melching, C. S. & P. J. Pilon (toim): Comprehensive risk assessment for natural hazards. *World Meteorological Organization, Geneve*. 93 s.
- Milan, D., Heritage, G. & Hetherington, D. (2007). Application of a 3D laser scanner in the assesment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1657–1674.
- Millar, R. G. (2000). Influence of bank vegetation on alluvial channel patterns. *Water Resources*. 36. 1109-1118.
- Miller, D. H. (1977). *Water and the surface of the Earth*. New York, Academic Press. 557 s.
- Mobley, C. D. (1989). A numerical model for the computation of radiance distribution in natural water with wind-roughened surfaces. *Limnology and Oceanography*. 34:8. 1473-1483s.
- Muste, M., Yu, K., Pratt, T. & Abraham, D. (2004). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: Moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15:1, 1-16.
- 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.
- Muste, M., Kim, D., Gonzalez-Castro, J. A. (2010). Near-Transducer Errors in ADCP Measurements: Experimental Findings. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135:5.
- Mäki-Petäys, A., Muotka, T., Tikkanen, P., Huusko, A., Kreivi, P. & Kuusela, K. (1994). Kokoluokkien väliset erot taimenen poikasten mikrohabitaattien käytössä. Helsinki, Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. Kalatutkimuksia 80. 951-8914-57-5. 38 s
- Nagle, G. (2000). *Advanced geography*. Oxford University Press, New York. 464 s.
- Naqshband, S., van Duin, O., Ribberink, J. & Hulscher, S. (2016). Modeling river dune development and dune transition to upper stage plane bed. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41:3, 323–335.
- Nanson, G. C. & Hickin, E. J. (1986). A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada. *GeoScienceWorld, GSA Bulletin*. 97:4. 497-504.
- Nanson, G. C. & Knighton, D. A. (1996). Anabranching rivers: Their cause, character and classification. *Earth Processes and Landforms*. 21. 217-239.
- Nepf, H. M., & Vivoni, E. R. (2000). Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Journal of Geophysical research: Oceans*. 105:C12.
- Niemi, j & Mitikka, S. (2013). Jokien vedenlaadun seurannan julkaistuja tuloksia. Ympäristö. *Suomen Ympäristökeskus*. 17s.
- Nohara, D., Kitoh, A., Oki, T. (2006). Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble. *Meteorological Research Institute, Tsukuba, and CREST, Japan Science and Technology Agency, Kawaguchi, Japan*. 1076-1089 s.
- Nuding, A. (1998). Zur Durchflußermittlung bei gegliederten Gerinnen. *Wasserwirtschaft*, 88, 3, s. 130 - 132.
- Ollila, M., Virta, H., Hyvärinen V. (2000). Suurtulvaselvitys: Arvio mahdollisen suurtulvan aiheuttamista vahingoista Suomessa. Luonto ja Luonnonvarat. *Suomen ympäristökeskus*. 2000. 441. 136 s.
- Parsons, D. R., Best, J. L., Lane, S. N., Orfeo, O., Hardy, R. J. & Kostaschuk, R. (2007). Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence–difffluence, Rio Parana, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32:1, 155–162.
- Parjanne, A. & Huokuna, M. (2014). Tulviin varautuminen rakentamisessa - Opas alimpien rakentamiskorkeuksien määrittämiseksi ranta-alueilla. *Suomen Ympäristökeskus. Ympäristöopas*.
- Parjanne, A., Silander, J., Tiitu, M. Viinikka, A. (2018). *Suomen tulvariskin nyt ja tulevaisuudessa – Varautuminen maankäytön, talouden ja ilmastomuutokseen. Suomen ympäristökeskus. 30/2018*
- Partheniades, E. (1965). Erosion and Deposition of Cohesive Sediments. *Journal of the Hydraulics Division*. 91:1. 105-139.
- Pasche, E. & Rouvé, G. (1985). Overbank Flow with Vegetatively Roughened Flood Plains. *Journal of Hydraulic Engineering*. 111:9.
- Pender, G. & Néelz, S. (2007). Use of computer models of flood inundation to facilitate communication in flood risk management. *Environmental Hazards*. 7:2, 106-114.
- Perkins, T. K. (1993). Critical and Subcritical Flow of Multiphase Mixtures through Chokes. *Society of Petroleum Engineers*. 8:4.
- Perona, P., Camporeale, C., Perucca, E., Savina, M. (2009). Modelling river and riparian vegetation interactions and related importance for sustainable ecosystem management. *Aquatic Sciences* 71(3): 266-278.
- Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G. Assaani, A. A. (2005). Critical specific stream power in gravel-bed rivers. *Geomorphology*. 69:1, 92-101.
- Pinter, N., Miller, K., Wlosinski, J., van der Ploeg, R. (2004). Recurrent shoaling and channel dredging, Middle and Upper Mississippi river, USA. *Journal of Hydrology*. 209:3-4. 275-296s.
- Plate, E. J. (2002). Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*. 267:1-2. 2-11 s.

- Rantakokko, K. (2002). Tulvavesien pidättäminen valuma-alueilla. Kartoitus mahdollisuuksista Suomen oloissa. Suomen ympäristö. *Suomen ympäristökeskus*.
- Rao, H. S. G. (2007). Finite element methods vs. classical methods. 434 s. *New Age International, New Delhi*.
- Rinta-Paavola, J. (1994). Kyrönjoen tulvariski ja sen mieltäminen. *Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja* 498. 128 s.
- Ruosteenoja, K. & Jylhä, K., (2007). Temperature and precipitation projections for Finland based on climate models employed in the IPCC 4th Assessment Report. In: *Third International Conference on Climate and Water, Helsinki, Finland*, 3–6 September 2007. Proceedings, pp. 404–406.
- Saarinen, N., Vastaranta, M., Vaaja, M., Lotsari, E., Jaakkola, A., Kukko, A., Kaartinen, H., Holopainen, M., Hyyppä, H., Alho, P. (2013). Area-based approach for mapping and monitoring riverine vegetation using mobile laser scanning. *Remote Sensing*. 5:10, 5285-5303.
- Sahoo, G. B., Schladow, S., Reuter, J. (2009). Forecasting stream water temperature using regression analysis, artificial neural network, and chaotic non-linear dynamic models. *Journal of Hydrology*. 378:3-4. 325-342s.
- Sampakoski, L. 2002. Luonnonmukainen vesirakentaminen ja sen soveltaminen Tarpianjoen järjestelyssä. *Hämeen ammattikorkeakoulu*. Opinnäytetyö.
- Sane, M., P. Alho, M. Huokuna, J. Käyhkö & M. Selin (2006). Opas yleispiirteisen tulvakartoituksen laatimiseen. Ympäristöopas 127, *Luonto ja Luonnonvarat*. 73 s.
- Schanze J. (2006) flood risk management – a basic framework. In: Schanze J., Zeman E., Marsalek J. Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures. *NATO Science Series*, vol 67.
- Schumm, S. A. (1963). Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74, 1089–1100.
- Seeber, G. (2008). *Mathematik: Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Berlin, DEU: Walter de Gruyter. 301 s.
- Seppälä, M. & Tuominen, S. (2005). Pohjaveden virtauksen mallintaminen. Ympäristöopas: Luonto ja luonnonvarat. *Suomen ympäristökeskus*. 61 s.
- Seuna, P. (1986). Ihmisen toiminnan vaikutus hydrologiseen kiertoon. Teoksessa: Mustonen S. (toim.). *Sovellettu hydrologia*. Vesiyhdistys ry. Helsinki. 503 s.
- Shaad, K., Y. Ninsalam, R. Padawangi & P. Burlando (2016). Towards high resolution and costeffective terrain mapping for urban hydrodynamic modelling in densely settled river-corridors. *Sustainable Cities and Society* 20, 168–179.
- Shen, H. T. (1979). Numerical simulation of mixing in natural rivers. *Civil Engineering Database*. 105:4. 393-408 s.
- Shen, H. T. (2010). Mathematical modeling of river ice processes. *Cold Regions Science and Technology* 62: 1, 3–13.
- Smith, J. D. (1970). Stability of a sand bed subjected to a shear flow of low Froude number. *Journal of Geophysical Research*. 75:30.
- Sirkä, O & Laaksonen, H. (2008). Kesäkeilauksen soveltuvuudesta korkeusmallituotantoon. *MML muistio*. 6 s.
- SonTek. (2013). *RiverSurveyor S5/M9 system manual, firmware version 3.00*. 154 s. SonTek, San Diego.
- Steffler, P. & J. Blackburn (2002). River2D: Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat. *Introduction to depth averaged modeling and user's manual*. 120 s..
- Swanson, S. K. & J. M. Bahr (2004). Analytical and numerical models to explain steady rates of spring flow. *Groundwater* 42: 5, 747–759.
- SYKE. (2019). *Vesivarat*. Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta.
- Tal, M. & Paola, C. (2007). Dynamic single-thread channels maintained by the interaction of flow and vegetation. *Geology*. 35:4. 347-350.
- Thorne, C. (1990). Effects of vegetation on riverbank erosion and stability. *Vegetation and Erosion*, Wiley, Chichester, England. 125-144s.
- Thorne, C. (1997). Channel Types and Morphological Classification. Teoksessa: Thorne, C., Hey, R. & Newson, M. (toim.). *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley, Chichester. 175-222s.
- Tilp, P. J. (1965). Capacity tests in large concrete-lined canals. *Journal of Hydraulics Division. ASCE*. 91:3. 189-216.
- Timonen, R., R. Ruuska, K. Suihkonen, P. Taipale, M. Ollila, S. Kouvalainen, T. Savea-Nukala, M. Maunula, E. Vähäsöyrinki & M. Hanski (2003). Suurtulvatyöryhmän loppuraportti. *Maa- ja Metsätalousministeriö*, Helsinki. 96 s.
- Tokyay, T., Constantinescu, M., Gonzalez-Castro J. A., (2009). Investigation of Two Elemental Error Sources in Boat-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler Measurements by Large Eddy Simulations. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135:11.
- Turunen, H.(1985). Lakeuden joet, Etelä-Pohjanmaan vesienkäytön historia. *Etelä-Pohjanmaan maakuntaliitto, Kurikkal*. 951- 99703-9-8. 288s.
- Uijttewaal, W. S., Lehmann, D., van Mazijk, A. (2001). Exchange processes between a river and its Groyne fields: Model Experiment. *Journal of hydraulic Engineering*. 127:11.
- USDA. (2001). *Stream corridor restoration: principles, practices and processes*. Revised edition, August.

- Van Rijn, L. C. (2011). Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Universiteit Utrecht. *Physical Geography*. 926 s.
- Vehviläinen, B., Huttunen, M., (1997). Climate change and water resources in Finland. *Boreal Environment*. Res.2, 3–18.
- Veijalainen, N. (2005). Extreflood: *Ilmastonmuutoksen vaikutus kerran 100 ja kerran 250 vuodessa toistuviin tulviin*. EXTREFLOOD I -projektin julkaisematon raportti. 17 s.
- Veijalainen, N., Lotsari, E., Alho, P., Vehviläinen, B., Käyhkö, J. (2010). National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of Hydrology*. 391:3-4. 333-350 s.
- Viessman, W. Jr., G. L. Lewis & J. W. Knapp (1989). *Introduction to hydrology, third edition*. 780 s. Harper & Row, New York.
- Voller, V. R. (2009). *Basic control volume finite element methods for fluids and solids*. 185 s. World Scientific Publishing Co., New Jersey
- Wallis, G. B. (1980). Critical two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*. 6:1-2. 97-112 s.
- Wenger, A. S., Harvey, E., Wilson, S., Rawson, C., Newman, S. J, Clarke, D., Saunders, B. J., Browne, N., Travers, M. J., McIlwaine, J. L, Erftemeijer, P. L. A., Hobbs, J-P. A., McLean, D. Depczynski, M. Evans, R. D. (2017). A critical analysis of the direct effects of dredging on fish. *Fish and Fisheries*. 2017; 18:967–985.
- 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.
- Winterwerp J. C. & Van Kesteren W. (2004). Introduction to the physics of cohesive sediment in marine environment. *Developments in sedimentology*. 429 s
- Yang, J. (1972). Unit stream power and sediment transport. *Hydrological Division, ASCE*.
- Yen, B-C. (1965). Characteristics of Subcritical Flow in a Meandering Channel. *Hydraulic Engineering Reports*. 154 s.
- Yen, C. & Overton, D. (1973). Shape effects on resistance in flood-plain channels. *Journal of Hydraulic Division. ASCE*. 99:1. 219-238.
- Zhou, Q & Arnbjerg-Nielsen, A. (2018). Uncertainty Assesment of Climate change adaption options using and Economic Pluvial Flood risk framework. *Water*. 10:1877. 17s.

LIITTEET

Liite 1. Ruoppauksessa käytetty paalujako Eurajoen yläjuoksulla.



Liite 2. Piuhon kylän jälkeen vesi pysyy uomassaan lähes täysin ja tulvatasangot häviävät. Ruoppaus vähentää tällä alueella tulvavaaraa huomattavasti.

