

**Konenäköön perustuvat virtauksen ja virtaaman mittausmenetelmät —
menetelmien soveltuvuuden testaus Iijoella ja Kalajoella**

Juha-Matti Välimäki

791619S Pro gradu -tutkielma
Maantieteen tutkinto-ohjelma
Oulun Yliopisto
7.12.2020

Yksikkö: Maantieteen tutkimusyksikkö	Pääaine: Maantiede
Tekijä (Sukunimi ja etunimet, myös entinen sukunimi): Välimäki Juha-Matti	Opiskelija-numero: 2308234
	Tutkielman sivumäärä: 73 s. + III liit.
Tutkielman nimi (suomeksi; muun kielinen nimi ilmoitetaan vain jos se on tutkielman kieli): Konenäköön perustuvat virtauksen ja virtaaman mittausmenetelmät — menetelmien soveltuvuuden testaus lijoella ja Kalajoella	
Asiasanat:	hydrologia, virtaama, virtausnopeus, LSPIV, Large Scale Particle Image Velocimetry, STIV, Space-Time Image Velocimetry, konenäkö, riistakamera, drone, kaukokartoitus, ADCP, Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus
Tiivistelmä (kirjoitetaan vapaamuotoisesti, selväsanaisesti ja lyhyin lauserakentein, ks. ohje seuraavalla sivulla):	
<p>Hydrologisen seurannan avulla kerätään tietoa Suomen vesivaroista, jota hyödynnetään monipuolisesti yhteiskunnan eri aloilla. Tietoa virtausnopeudesta ja virtaamista tarvitaan moneen eri käyttötarkoitukseen. Hydrologisista suureista virtaama on käytännönläheisin, sillä se on veden kiertoon liittyvistä suureista tarkimmin mitattavissa. Virtaaman mittaaminen on haastavaa monien eri muuttujien takia ja uusille kustannustehokkaille kaukokartoitukseen perustuville menetelmille on tarvetta.</p> <p>Tässä työssä testattiin kahta kaukokartoitukseen ja konenäköön perustuvaa virtaus- ja virtaamamittausmenetelmää sekä arvioitiin menetelmien soveltuvuutta suhteessa hydrologian alan vakiintuneisiin menetelmiin. Tutkimuskohteena oli virtaamamittausten osalta lijoen Pudasjärven kaksi kohdetta ja virtausnopeuden osalta Kalajoen Juurikoski. Pudasjärvellä aineistoa kerättiin kahdella riistakameralla sekä dronella noin kahden viikon ajalta Pudasjärven Varpuvirralla sekä Kurenaluksella. Kalajoella virtausnopeusaineistoa kerättiin dronella yhden päivän aikana vesivoimalaitokselta juoksetuilla virtaamilla.</p> <p>STIV-menetelmällä (Space Time Image Velocimetry) saadaan alan vakiintuneisiin menetelmiin verrattuna luotettavia ja johdonmukaisia yksiulotteisia (suuruus) virtausnopeus- ja virtaama-arvoja. LSPIV-menetelmällä (Large Scale Particle Image Velocimetry) saadaan kaksiulotteista (suunta ja suuruus) tietoa virtausnopeudesta, mutta menetelmä on herkkä virtaus- ja valaistusolosuhteille. STIV-menetelmä on vähemmän virheherkkä ja soveltuu hyvin sekä yksittäisiin virtausnopeus- tai virtaamatiedon mittauksiin, että jatkuvan keräämiseen vaihtelevissakin olosuhteissa. Nykyiset kuluttajatasen dronet mahdollistavat tutkimuksen tekemisen melkein missä tahansa lyhyellä käyttökoulutuksella. Menetelmien soveltamista heikentää tällä hetkellä saatavilla olevat ohjelmistot.</p> <p>Menetelmät eivät vielä ole valmiita korvaamaan alan vakiintuneita mittausmenetelmiä, mutta ovat hyvä lisätyökalu hydrologisen tiedon keräämiseen. Molemmat menetelmät ovat valmiita otettavaksi käyttöön laajemmin hydrologisen tiedon keräämiseen. Erityisesti LSPIV-menetelmän tuottamasta spatiaalisesta tiedosta virtauksen nopeudesta ja suunnasta olisi merkittävästi hyötyä monenlaisessa hydrologisessa ja ekologisessa tutkimuksessa.</p>	
Muita tietoja:	Tutkimuksen rahoitti Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus.
Päiväys:	Oulu 7.12.2020

Sisältö

1 Johdanto	1
2 Hydrologia	3
2.1 Virtaama	3
2.2 Jokiuomien virtausfysiikkaa	3
3 Konenäköön perustuvat virtauksen mittausmenetelmät	8
3.1 LSPIV - Large Scale Particle Image Velocimetry	9
3.2 STIV - Space Time Image Velocimetry	11
3.3 Menetelmien sovelluskohteita	14
4 Tutkimusalueet ja -menetelmät	16
4.1 Tutkimusalue 1: Iijoki, Pudasjärvi	16
4.1.1 Menetelmät ja -aineistot	17
4.1.2 Muut aineistot	21
4.1.2.1 Vedenkorkeusmittaukset	22
4.1.2.2 ADCP vertailumittaukset	23
4.1.2.3 Jongunjärven purkautumiskäyrä	24
4.2 Tutkimusalue 2: Kalajoki, Ylivieska	24
4.2.1 Menetelmät ja -aineistot	25
4.3 Ohjelmistot	27
5 Tulokset	29
5.1 Tutkimusalue 1: Iijoki, Pudasjärvi	29
5.1.1 Kurenaluksen tutkimuspaikka	29
5.1.1.1 Virtaama-aikasarja (STIV)	29
5.1.1.2 Vertailu ADCP-mittauksiin	30
5.1.2 Varpuvirran tutkimuspaikka	31
5.1.2.1 Vertailu ADCP-mittauksiin	32
5.2 Tutkimusalue 2: Kalajoki, Ylivieska	33

6 Tulosten tarkastelu ja pohdinta	36
6.1 Tutkimusalue 1: Iijoki, Pudasjärvi	36
6.1.1 Virtaama-aikasarja	36
6.1.1.1 Virtausnopeuspoikkeama: kameran muuttuvat asetukset . . .	38
6.1.1.2 Syklisyys: kameran liike	41
6.1.1.3 Syklisyys: kameran liikkeen vaikutus virtaama-aikasarjaan .	42
6.1.2 ADCP vertailumittaukset	47
6.1.2.1 STIV - Kurenalus	47
6.1.2.2 STIV - Varpuvirta	48
6.1.2.3 LSPIV - Kurenalus	49
6.1.2.4 LSPIV - Varpuvirta	51
6.2 Tutkimusalue 2: Kalajoki, Ylivieska	53
6.3 Virhelähteet	55
6.3.1 Virtausolosuhteet	55
6.3.2 Tukipisteet	56
6.3.3 Resoluutio ja erottelukyky	57
6.3.4 Kuvavääristymät ja kuvan laatu	57
6.3.5 Videon pituus ja kuvataajuus	59
6.3.6 Valaistusolosuhteet	60
6.3.7 Kameran tai dronen liike	61
6.3.8 Vedenkorkeus	62
6.4 Yhteenveto	62
7 Johtopäätökset	64
Lähdeluettelo	67
Liitteet	73
Liite 1	73
Liite 2	74
Liite 3	75

1. Johdanto

Hydrologisen seurantaverkon avulla kerätään tietoa Suomen vesivaroista ja -määristä. Hydrologista tietoa hyödynnetään monipuolisesti yhteiskunnan eri aloilla. Hydrologisia havaintoja käytetään muun muassa vesistöjen säännöstelyssä ja tulvariskien hallinnassa, vesistöjen hoidon sekä käytön suunnittelussa, vesistöennusteissa ja -mallintamisessa, veden hankinnassa, hankkeiden suunnittelussa, kaavoituksen, rakentamisen ja alueiden käytön suunnittelussa, taustatietona maa- ja metsätaloudessa, vesistöjen virkistyskäytössä sekä erilaisissa tutkimuksissa (Suomen Ympäristökeskus 2020a).

Virtaamamittauksilla muun muassa kalibroidaan vesistömalleja sekä tulvaennusteita ja tarkistetaan vedenkorkeushavaintopaikkojen purkautumiskäyrien oikeellisuus (Korhonen 2007). Virtaamaa mitataan suoraan uomista uuden purkautumiskäyrän laatimiseksi, vanhan purkautumiskäyrän tarkistamiseksi, säännöstelypatojen sekä voimalaitosten kalibroimiseksi, vesihuollon tarpeisiin ja jääreduktion tekemiseen eli virtaaman talviaikaisten arvojen korjaamiseen (Korhonen 2007). Määrittämällä vedenkorkeushavaintopaikalle purkautumiskäyrä voidaan vedenkorkeushavaintojen avulla laskea virtaamatilastoja (Vesihallitus 1984). Luotettavia virtausnopeustietoja tarvitaan esimerkiksi tulvien synnyn ja etenemisen mekanismien ennustamisessa ja monet tulvarajoitusjärjestelmät perustuvat reaaliaikaiseen tietoon virtaamasta (Kantoush ym. 2011). Jatkuvia virtaushavaintoja käytetään muun muassa valuma-alueen kehittymisen, eroosiodynamiikan ja sedimentin kulkeutumisen tutkimuksessa (Hrachowitz ym. 2013). Virtausnopeuden sekä virtaaman seurannalla on suuri merkitys hydraulisten rakenteiden, kuten tekojärvien ja voimalaitosten käytön ohjaamisessa sekä suunnittelussa (Kantoush ym. 2011).

Virtausolosuhteista tarvitaan tietoa myös monenlaisessa ekohydrologisessa tutkimuksessa. Esimerkiksi kalojen lisääntymiseen sopivien vesihabitaattien luomisessa sekä kalojenkulun esteisyyden arvioinnissa tarvitaan tietoa virtauskentistä jokirakenteiden läheisyydessä tai jokien rantatörmien lähetyvillä (Muste, Fujita & Hauet 2008). Tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen myötä on edelleen tarvetta ajantasaiselle ja luotettavalle tiedolle muuttuvista virtausolosuhteista (Korhonen 2007).

Suomessa pisimmät vedenkorkeuksien ja virtaamien havaintosarjat alkavat 1800-luvun puolivälistä ja ensimmäiset kojeelliset virtaamamittaukset tehtiin hydrometrisellä siivikolla vuonna 1862 (Korhonen 2007). Vaikka hydrologian alan vakiintuneet mittausten menetelmät ovat todennettu tehokkaiksi vuosien käytännön kokemusten perusteella, ovat niiden käyttöpaikat rajoitettuja helposti saavutettavissa oleviin paikkoihin. Menetelmien käyttö edellyttää mittauslaitteiden kontaktia veden kanssa ja siksi niiden käyttö poikkeuksellisissa tilanteissa kuten tulvissa on haasteellista ja jopa vaarallista. Edellä mainittujen rajoitteiden vuoksi ja teknisen kehityksen myötä kaukokartoitusmenetelmiä on alettu hyödyntämään myös laajasti erilaisissa ympäristötutkimuksissa.

Kaukokartoituksella (remote sensing) tai etämittauksella tarkoitetaan menetelmiä, jotka eivät edellytä fyysistä kontaktia mitattavaan asiaan tai aineeseen. Useimmiten kaukokartoitusmenetelmät perustuvat optiseen havainnointiin, joko tavallisen kameran sensorin tai eri aallonpituuksia mittaavien sensorien tuottamaan tietoon. Hydrologisiin mittauksiin on pyritty kehittämään erilaisia kaukokartoitukseen perustuvia mittaamenetelmiä kuten tutkia (Fulton & Ostrowski 2008), mikroaaltosensoreita (Plant, Keller & Hayes 2005) sekä satelliitteja (Tarpanelli ym. 2013). Kyseiset menetelmät soveltuvat lähinnä isojen virtaamien mittaamiseen, eivätkä ne sovellu usein toistettaviin mittauksiin ja ovat käyttökustannuksiltaan kalliita (Tauro, Porfiri & Grimaldi 2016).

Viime vuosina erilaiset konenäköön perustuvat menetelmät ovat kehittyneet nopeasti. Konenäkö on monitieteinen ala, jolla tarkoitetaan sellaisen hyödyllisen tiedon, jota ihmissilmin on vaikea erottaa, automaattista keräämistä, tallentamista ja käsittelyä.

Tässä työssä käytetyillä konenäkömenetelmillä voidaan videon tai kuvasarjan aikana tapahtuvan muutoksen perusteella tuottaa tietoa virtausnopeuksista. Kaksi tällaista konenäköön perustuvaa uutta menetelmää hydrologian alalla ovat Japanilaisen Fujitan ym. kehittämät LSPIV- (Large Scale Particle Image Velocimetry, 1998) ja STIV-menetelmät (Space-Time Image Velocimetry, 2007; 2018). Menetelmillä saadaan määritettyä virtausnopeus videokuvasta, jonka perusteella on laskettavissa myös virtaama. Konenäkömenetelmät ovat varsin kustannustehokkaita verrattuna perinteisiin virtaamamittaamenetelmiin, sillä nykyisin melkein mikä tahansa kuvamateriaalia tuottava laite on riittävän tarkka analyysiin tekemiseen. Erityisen kiinnostavaksi menetelmät tekee nykyisten droonien edullisuus, helppokäyttöisyys ja lentovakaus, jotka avaavat uusia mahdollisuuksia erilaisen monipuolisen tiedon tuottamiseen maastossa. Konenäkömenetelmien soveltamiseen maastossa liittyy muutamia mittaustulosten epävarmuutta lisääviä käytännön haasteita kuten kuvausalueen tai kameran liike, kuvien perspektiivin korjaukseen käytettävien referenssipisteiden määrittäminen ja muuttuvat sää-, valaistus- sekä virtausolosuhteet (Lewis & Rhoads 2018; Huang, Young & Liu 2018).

Tämän lopputyön tavoitteena on kokeilla kahta edellä mainittua konenäköön perustuvaa menetelmää kenttäolosuhteissa kuluttajatasoisen laitteistolla ja verrata niiden tuottaman tiedon tarkkuutta hydrologian alalle vakiintuneisiin mittaamenetelmiin. Lisäksi arvioidaan konenäkömenetelmien keskeisiä virhelähteitä ja menetelmien soveltuvuutta osaksi vakituista hydrologista havainnointia. Tutkielman toisessa sekä kolmannessa kappaleessa käydään läpi keskeiset teoreettiset käsitteet ja menetelmien teoria. Neljännessä kappaleessa esitetään tutkimusalue ja -menetelmät ja viidennessä kappaleessa esitellään keskeiset tulokset. Kuudennessä kappaleessa tarkastellaan tuloksia ja pohditaan keskeisiä virhelähteitä.

2. Hydrologia

Hydrologiaan eli vesitieteeseen sisältyy kaikki veteen liittyvä tutkimus. Veden kierto- ja vesivarantojen tutkimus sekä seuranta ovat keskeisiä tutkimuskohteita hydrologian alalla. Virtaama on hydrologisista suureista käytännönläheisin, sillä se on veden kiertoon liittyvistä suureista tarkimmin mitattavissa (Vesihallitus 1984).

2.1 Virtaama

Virtaamalla tarkoitetaan jokiuoman jonkin kohdan poikkileikkauksen läpi aikayksikössä virtaavaa veden määrää, joka ilmoitetaan tavallisimmin mittayksikössä (m^3/s tai l/s) (Vesihallitus 1984). Virtaaman määritelmän takia virtaama vesistöissä on periaatteessa aina tarkoin sidottu aikaan ja paikkaan (Mustonen 1986).

Pintavesiprosessien monimutkaisuuden vuoksi yhtä yksittäistä mittausten menetelmää, jolla virtauksia voitaisiin tunnistaa sekä kvantifioida, ei ole löydetty (Hrachowitz ym. 2013). Virtaamamittauksissa havaintojen ajallinen edustavuus sekä kattavuus ovat tärkeitä (Mustonen 1986). Virtaamamittauksia tehdään nykyisin mm. siivikkomittauksin (Tazioli 2011), erilaisilla merkkiainemenetelmillä (Planchon ym. 2005) ja ultraäänitutkalla (ADV, Acoustic Doppler Velocimetry ja ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler) (Yorke & Oberg 2002).

Suomessa yleisimmin virtaamatietoa tuotetaan siivikkomittauksin ja ultraäänitutkalla (Suomen Ympäristökeskus 2020a). Virtaamamittauksia tehdään paikassa, joissa virtausolosuhteet ovat selkeästi todettavissa; virtaussuunta on koko uomapoikkileikkauksessa sama ja muuttumaton ja virtaus on silmämääräisesti havaittavissa eikä vaihtelee voimakkaasti tai satunnaisesti (Mustonen 1986). Tyypillisesti virtaamamittauksille sopiva havainto- ja mittausta paikka on esimerkiksi järven luusua, tasainen kohta joessa, virtaava salmi tai veden johtamiseen käytettävä rakenne, kuten pato tai vesivoimalaitos (Mustonen 1986). Vesivoimalaitokset toimivat virtaaman mittareina, sillä vesivoimalaitoksen tuottaman tehon ja tiedetyn hyötysuhteen avulla voidaan laskea virtaama (Korhonen 2007). Pienillä valuma-alueilla virtaaman mittaus tapahtuu kiinteästi asennetuilla mittapadoilla (Vesihallitus 1984). Virtaaman tarkempaan laskentatavan esittelyyn tarvitaan hieman taustateoriaa jokiuomien virtausfysiikasta.

2.2 Jokiuomien virtausfysiikkaa

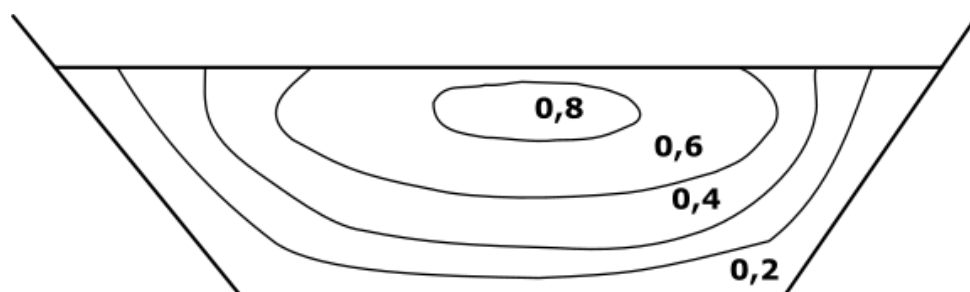
Avouomavirtauksella tarkoitetaan jokiuomassa ilmakehän paineen alaisena painovoiman aikaansaamaa virtausta, jolloin joen virtaus noudattaa avouomahydrauliikan periaatteita (Mustonen 1986). Avouomavirtausta voi tapahtua myös päältä suljetuissa kanavissa ja putkissa, mikäli virtaus ei täytä koko kanavaa (Osman Akan 2006). Avouomavirtausta voidaan luokitella monin eri tavoin; mikäli tarkastelukriteerinä on aika, voidaan avouomavirtaus luokitella pysyväksi (steady),

jos virtausolosuhteet pysyvät ajan suhteen muuttumattomina tai muuttuvaksi (unsteady) mikäli virtausolosuhteet muuttuvat ajan myötä (Osman Akan 2006: 10).

Tasainen virtaus on harvinaista luonnonuomissa, mutta virtaus voi olla osassa jokea lähes tasaista, jos virtaama ei vaihtele ja jokiuoman kaltevuus sekä poikkileikkaus pysyvät lähes samoina. Esimerkiksi tulvan aikana tai voimalaitoksen käytön myötä virtaus voi olla voimakkaasti muuttuvaa lyhyelläkin aikavälillä. Mikäli avouomavirtauksen luokittelukriteerinä on paikka, niin silloin avouomavirtaus voidaan luokitella tasaiseksi (uniform), kun virtausolosuhteet pysyvät samana paikan suhteen ja muussa tapauksessa epätasaiseksi (varied flow). Turbulenttisuuden mukaan virtaus voidaan jaotella laminaariseksi (laminar flow) ja turbulenttiseksi (turbulent flow). Laminaarisessa virtauksessa nesteen hiukkaset eivät sekoitus keskenään ja etenevät tasaisissa rinnakkaisissa kerroksissa. Turbulenttisessa virtauksessa kerrokset sekoittuvat ja luonnonuomissa virtaus onkin tyypillisesti turbulenttista, paitsi mahdollisesti rajapintojen tuntumassa, esimerkiksi uoman seinämien lähellä (Osman Akan 2006: 10).

Avouomavirtausta tarkastellessa keskeinen asia on uoman poikkileikkaus, joka luonnonuomissa voi vaihdella paljon ja rakennetuissa uomissa saattaa pysyä hyvinkin samanlaisena (Osman Akan 2006). Luonnonuomissa ja rakennetuissa uomissa poikkileikkaus on tyypillisesti puolisuunnikkaan tai ympyrän muotoinen. Joen uoman geometria vaikuttaa joessa vallitseviin virtausolosuhteisiin sekä virtausnopeuteen ja virtauksella voi yksittäisessä pisteessä tarkastellessa olla virtauskomponentteja kaikkiin kolmeen eri suuntaan (Osman Akan 2006). Yleisesti virtaus kuitenkin oletetaan yksiulotteiseksi ja virtausyhtälöt kirjoitetaan päävirtaussuunnan (kohtisuoraan uoman poikkileikkausta vastaan) mukaisesti (Osman Akan 2006).

Monet voimat vaikuttavat avouomavirtauksen hydrauliseen käyttäytymiseen. Keskeisin virtausta aiheuttava tekijä on painovoima; muita virtaukseen vaikuttavia tekijöitä ovat tuuli, maan pyörimisliike (coriolisvoima), keskipakovoima, turbulenssiin liittyvä voima, viskositeetti ja pintajännitys. Virtausnopeus ei jakaudu tasaisesti uoman poikkileikkauspinta-alalle vaan vaihtelee uomien seinämäkitkan sekä vapaan vesipinnan takia. Kuvan 1 virtausnopeusjakaumasta nähdään, että virtaus on nopeinta keskellä uomaa hieman vedenpinnan alapuolella ja hitainta uoman reunoilla sekä pohjassa (Osman Akan 2006).



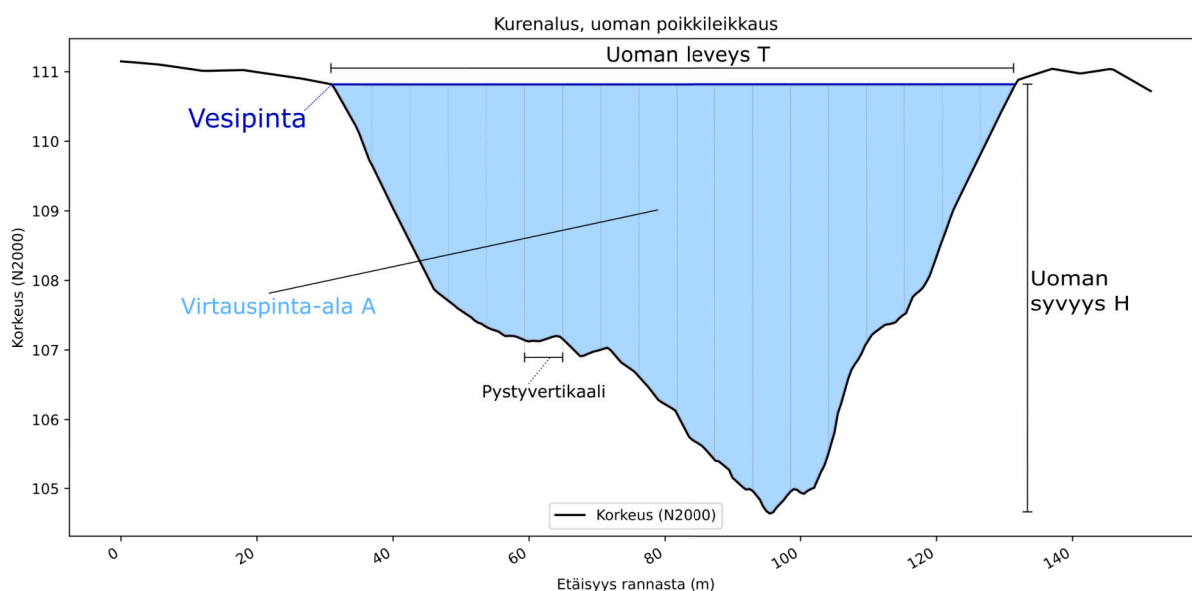
Kuva 1: Virtausjakauma avouoman poikkileikkauksessa (Mukaillen Osman Akan 2006: 4).

Suorat virtaamamittaukset tehdään tavallisimmin määrittämällä uoman poikkileikkaus ja mittaamalla virtausnopeus kyseisessä poikkileikkauksessa sopivalla mittausmenetelmällä (Vesihallitus

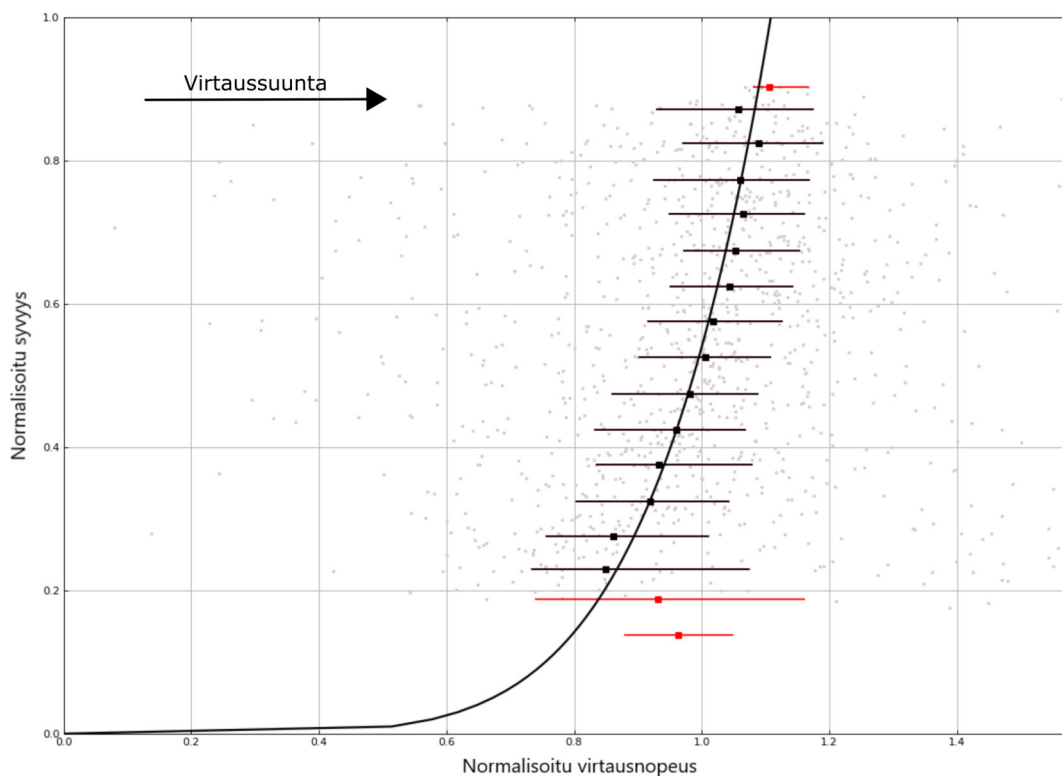
1984). Virtaama Q lasketaan kertomalla virtausnopeuden keskiarvo U ja uoman poikkileikkauksen pinta-ala A (Leppäranta, Virta & Huttula 2017) kaavan 1 mukaisesti. Tyypillisessä Suomalaisessa joessa virtausnopeus U on noin 1 m/s , A noin 250 m^2 ja Q noin $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (Leppäranta, Virta & Huttula 2017).

$$Q = UA, \quad (1)$$

Tyypillisesti poikkileikkaus jaetaan pystyvertikaaleihin (kuva 2), joiden keskimääräinen virtausnopeus määritetään (Mustonen 1986). Pystyvertikaalien määrä riippuu käytetystä mittausmenetelmästä ja uoman leveydestä (Suomen Ympäristökeskus 2020a). Käytännön kokemukset hydraulikan alalla ovat osoittaneet, että tasaisesti virtaavissa avoimissa uomissa virtausprofiili syvyyden suhteen noudattaa potenssilakia (kuva 3) uoman pohjan ja seinämien aiheuttaman kitkan takia (Chanson 2004: 27). Virtaama pystyvertikaalissa saadaan laskettua kertomalla keskimääräinen virtausnopeus pystyvertikaalin pinta-alalla.



Kuva 2: Virtaamamittauksissa tyypillisesti uoma jaetaan pystyvertikaaleihin, joiden keskimääräinen virtausnopeus mitataan. Virtaama saadaan laskettua kertomalla pystyvertikaalin keskimääräinen virtausnopeus pystyvertikaalin pinta-alalla.



Kuva 3: ADCP-mittauksella tuotettu virtausnopeusprofili. Virtausnopeus noudattaa syvyyden suhteen potenssilakia tasaisesti virtaavissa avoimissa uomissa. Vaaka-akselilla normalisoitu virtausnopeus ja pystyakselilla normalisoitu syvyys.

Tässä työssä myöhemmin esiteltävät ja aineistojen tuottamiseen käytetyt ohjelmistot käyttävät niin sanottua alpha-kerrointa pintavirtausnopeuden muuntamiseksi syvyyden suhteen keskiarvoistetuksi virtausnopeudeksi poikkileikkauksen pystyvertikaalissa. Alpha-kerroin lasketaan Manningin karkeuskertoimen avulla seuraavalla kaavalla:

$$\alpha = \frac{m}{m+1}, \quad (2)$$

missä m on Manningin karkeuskerroin. Karkeuskerroin kuvaa virtauksen etenemisen vastusta eli kitkaa uomassa ja sen suuruus riippuu paikasta ja virtausolosuhteista (Chanson 2004: 278). Uoman karkeuskertoimeen vaikuttavat muun muassa seuraavat tekijät: kasvillisuus, uoman maan aines, uoman mutkaisuus, poikkileikkauksen epäsäännöllisyys, vedenkorkeus (ja siten virtaama), veden kuljettamat ainekset, lietekasaumat ja syöpymät. Manning kertoimen arvoja erilaisille uomapohjille on taulukossa 1.

Taulukko 1: Tyypillisiä luonnonuomien karkeuskertoimia (m) ja niitä vastaavat alpha-kertoimet (α) (International Organization for Standardization 2007)

	normaali	tasainen	karkea	erittäin karkea	ääritapaukset
m	6-7	10	4	2-3	-
α	0,86-0,87	0,91	0,8	0,67-0,75	0,6-1.2

Käytännön kokemusten perusteella useimpiin tilanteisiin sopiva oletusarvo alpha-kertoimelle luonnonuomissa on 0,85 (Rantz 1982: 137). Siten keskimääräinen virtausnopeus V_m pystyvertikaalissa saadaan laskettua kaavalla 3.

$$V_m = \alpha \times V_s, \quad (3)$$

missä V_s on pintavirtausnopeus.

3. Konenäköön perustuvat virtauksen mittaussmenetelmät

Virtausolosuhteiden määrittämisessä ja virtaamanmittauksessa käytettävät konenäkömenetelmät perustuvat aiemmin mekaniikan alalla vakiintuneeseen PIV-menetelmään (Particle Image Velocimetry, Adrian 1991). PIV-menetelmään perustuvia mittaussmenetelmiä on useita, joista tässä työssä tarkemmassa tarkastelussa ovat LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) ja STIV (Space-Time Image Velocimetry).

PIV (Particle Image Velocimetry) on yleisnimitys mittaussmenetelmille, joissa nesteen tai kaasun virtauksen mukana kulkevien hiukkasten liikettä jäljitetään (Fujita, Muste & Kruger 1998). Ensimmäinen systemaattinen nesteen virtausta hiukkasjäljitysmenetelmällä mittaava tutkimus tehtiin jo 1900-luvun alkupuolella, jolloin ensimmäiset kamerat mahdollistivat kuvien tallentamisen (Adrian 2005). Viimeisen neljän vuosikymmenen aikana PIV-menetelmät ovat kehittyneet nopeaan tahtiin kun digitaaliset kuvankäsittely-, laskenta- ja tallennusmenetelmät ovat korvanneet analogiset vastineensa.

Veden virtauksen tutkimiseen käytettävät konenäkömenetelmät perustuvat siihen oletukseen, että veden pinnassa on jotakin havaittavissa olevaa tekstuuria, jonka liikettä virtauksen mukana voidaan jäljittää (Fujita ym. 2018). Tekstuuri on tyypillisesti jotakin luontaisesti virtauksen mukana kulkevaa (esimerkiksi vaahtoa, ilmakuplia tai sedimenttiä) tai virtauksen turbulenssin synnyttämää eri suuntiin tapahtuvaa vesipinnan väreilyä. Kaikkien PIV:hen pohjautuvien menetelmien käytön edellytyksenä on:

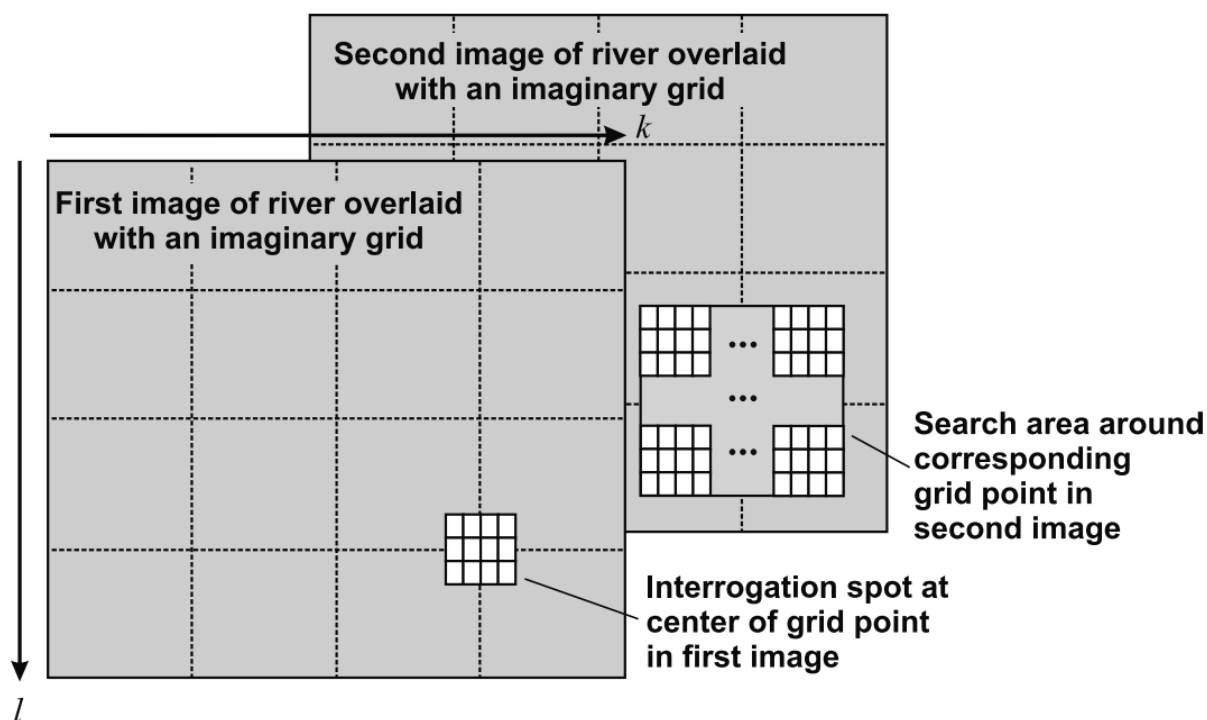
1. Veden pinnassa on jotakin virtausta jäljitteleviä hiukkasia tai virtauksessa tapahtuu jotakin muutosta, jota voidaan havainnoida.
2. Perättäiset kuvat tai video tutkimuskohteena olevasta virtauksesta, joiden välillä muutosta pintavirtauksessa analysoidaan.
3. Tukipisteiden (ground reference points tai ground control points) määrittäminen kuva-alalta, jolla tutkimusalueen fyysiset mitat ja kuvapikselien väliset mitat kalibroidaan sekä kuvat ortorektifioidaan. Ortorektifoinnissa kuvan geometria korjataan eli kuva oikaistaan. Viistosti kuvatun aineiston käsittelyyn tarvitaan vähintään kuusi pistettä ja kohtisuoraan yläpuolelta kuvattuun aineistoon riittää kaksi pistettä tai yksi tunnettu etäisyys.
4. Virtaaman laskentaa varten tarvitaan uoman poikkileikkauksen mitat sekä tieto vedenkorkeudesta.

PIV:hen pohjautuvia virtauksen jäljitysmenetelmiä on useita ja menetelmästä riippuen, liikkeen mittaussvirtauksessa voi perustua virtauksen mukana luontaisesti kulkevan aineksen tai virtaukseen lisättyyn merkkiaineeseen (LSPIV) tai johonkin virtauksessa tapahtuvaan luontaiseen muutokseen, kuten kirkkauden (STIV) tai lämpötilan (TPIV, Thermal Particle Image Velocimetry) muutokseen. Yksittäisen hiukkasen liikkeen mittausta kutsutaan hiukkas-jäljitys

menetelmäksi (particle-tracking velocimetry, PTV), josta on olemassa myös maastoon soveltuva versio nimeltä LSPTV (Large Scale Particle Tracking Velocimetry) (Koutalakis, Tzoraki & Zaimis 2019). Silloin, kun jäljityshiukkasia on runsaasti on järkevämpää mitata hiukkasryhmien siirtymää, josta käytetään nimitystä LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) (Fujita, Muste & Kruger 1998).

3.1 LSPIV - Large Scale Particle Image Velocimetry

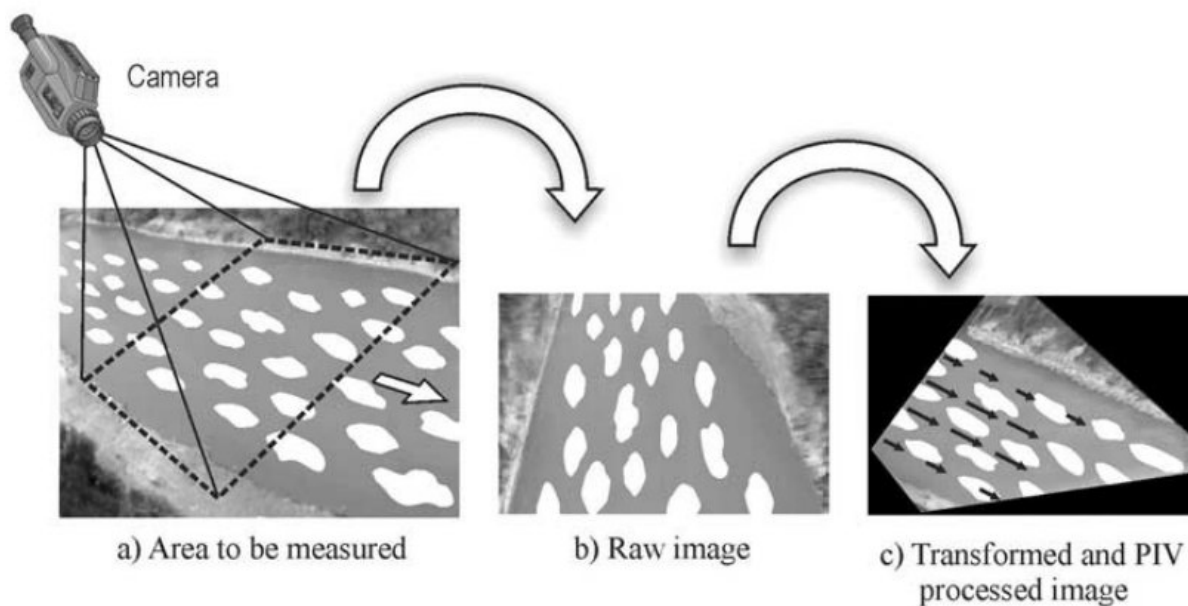
LSPIV on Fujitan ym. (1998) kehittämä maastossa tehtäviin laajamittaisiin virtaus- ja virtaamamittauksiin soveltuva versio PIV-menetelmästä. LSPIV-menetelmällä mitataan hiukkasryhmien siirtymistä liikkeen (virtauksen) mukana (Fujita, Muste & Kruger 1998) kahden kuvan välillä. Video puretaan yksittäisiksi kuviksi ja peräkkäisistä kuvista muodostetaan kuvaparit, joiden välillä liikettä lasketaan. Kuva-alalle rajataan ensin tutkimusalue, joka jaetaan ruudukoksi (grid, kuva 4).



Kuva 4: LSPIV-menetelmässä kuvaparin välillä tapahtuvaa liikettä arvioidaan spatiaalisen autokorrelaation avulla. Ensimmäisen kuvaan asetetun etsintäpisteen (interrogation spot) kohdalla olevaan hiukkasryhmää haetaan vastaavan kohdan ympäriltä toisesta kuvasta (search area) (Bradley ym. 2002).

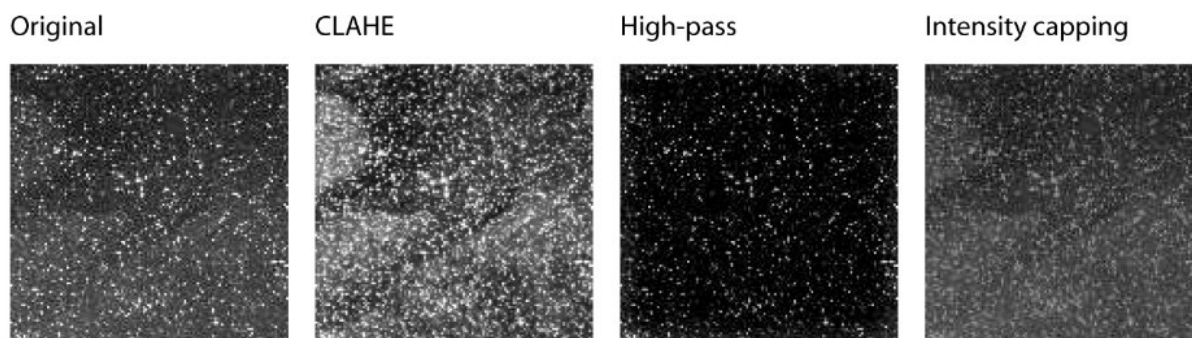
Siirtymä lasketaan peräkkäisten kuvien välillä siten, että ensimmäisen kuvan niin sanotun etsintäpisteen (interrogation spot) sisältämää hiukkasryhmää etsitään jälkimmäisestä kuvasta vastaavan kohdan ympäriltä tilastotieteeseen perustuvalla algoritmilla, joka soveltaa kuvion tunnistamiseen spatiaalista autokorrelaatio tai ristikorrelaatiota (Bradley ym. 2002). Suurimman korrelaatioarvon

saanut alue on todennäköisin paikka, johon kuvio on siirtynyt kuvien välillä. Jokaiselle alueelle lasketaan virtausvektori jakamalla kuvion kulkema matka siirtymään kuluneella ajalla. Kulunut aika edustaa kuvien välistä aikaa, joka saadaan videon kuvataajuuden (frame rate) perusteella. Analyysin tuloksena saadaan kuvapareista virtausvektorikentät toistamalla edellä mainittu prosessi jokaiselle kuvaparille erikseen jolloin lopputuloksena on koko mittausalueen hetkelliset virtausnopeudet ja suunnat (Fujita, Muste & Kruger 1998). Käsiteltävän aineiston määrä riippuu videon pituudesta sekä kuvataajuudesta. Esimerkiksi 30 sekunnin video, joka on tallennettu 30/s kuvan taajuudella (fps, frames per second) saadaan yhteensä 900 ($30s * 30 \text{ 1/s}$) kuvaa, joista saadaan yhteensä 450 analysoitavaa kuvaparia. Koska menetelmä perustuu tilastolliseen laskentaan, tuottaa se aina jonkin verran virheellisiä vektoreita. Aineisto jälkikäsitellään poikkeavien ja virheellisten havaintojen poistamiseksi (Bradley ym. 2002). Virheelliset vektorit voi poistaa tai korvata interpoloiduilla vektoreilla. Lopullinen aineisto tuotetaan laskemalla perättäisten kuvaparien vektoreista keskiarvovektorit, joita käytetään virtaaman laskemiseen. LSPIV:n periaate selviää kuvasta 5.



Kuva 5: LSPIV-menetelmän periaate. Tutkimuksen kohteena oleva virtaus kuvataan (a), josta saadaan aineisto (b). Viistosta kuvakulmasta kuvattu aineisto pitää ortorektifioida eli kuvan perspektiivi korjataan kuva-alalta määritettyjen tukipisteiden avulla. Lopputuloksena lopullinen oikaistu aineisto virtausvektoreineen (c) (Muste, Fujita & Hauet 2008).

Keskeinen edellytys menetelmän käytölle on se, että virtauksen mukana joko kulkee hiukkasia tai virtaus itsessään synnyttää pintaan jotakin muutosta, joka on havaittavissa. Hyvä ohje sääntö on, että mikäli virtausta on vaikea havaita paljain silmin, niin todennäköisesti silloin LSPIV-analyysikään ei todennäköisesti tuota luotettavaa tulosta. Käsittelemällä kuvat erilaisin kuvankäsittelymenetelmin (kuva 6) ennen analysointia voidaan virtauksen erottuvuutta parantaa (Thielicke & Stamhuis 2014).



Kuva 6: Kuvankäsittelymenetelmillä virtauksen erottuvuutta saadaan paremmaksi ennen varsinaista LSPIV-analyysiiä (Thielicke & Stamhuis 2014).

Virtaukseen voi myös lisätä jotakin ekologisesti neutraalia ainesta erottelukyvyn parantamiseksi, esimerkiksi sahanpuruja (Lewis & Rhoads 2018) tai ekologista pakkausmateriaalia (Strelnikova ym. 2020). Aineksen lisääminen tasaisesti virtaukseen on haastavaa, etenkin jos virtaus ei ole yhdenmukainen tai jos tutkittava alue on suuri.

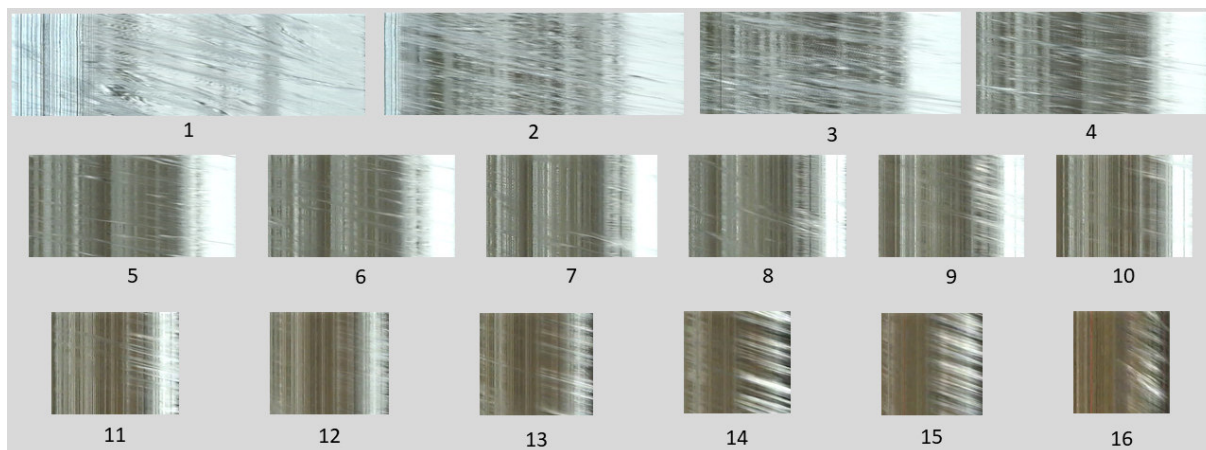
3.2 STIV - Space Time Image Velocimetry

Space-Time Image Velocimetry on Fujitan ym. 2007 vuonna 2007 kehittämä LSPIV-menetelmästä johdettu versio. Menetelmän toimintaperiaate on sama, eli kuvat sidotaan fyysiseen maailmaan tunnettujen tukipisteiden avulla (kuva 7), mutta virtauksen laskenta perustuu kuvaan asetettavien niin sanottujen etsintälinjojen kohdalta havaittaviin muutoksiin. Ortorektifioituihin eli oikaistuihin kuviin asetetaan virtauksen suuntaiset etsintälinjat (kuva 7), joiden kohdalta lasketaan virtausnopeuden keskiarvo koko videon pituiselta ajanjaksolta. Virtausnopeuden laskenta perustuu niin sanottuihin aika-avaruuskuviin (space-time image, STI). Yksittäinen aika-avaruuskuva koostuu etsintälinjojen kohdalta videon jokaisesta kuvasta tallennetuista pikseleiden kirkkausarvoista, jotka ladotaan päällekkäin siten, että pysty-akseli edustaa aikaa ja vaaka-akseli matkaa (kuva 8) (Fujita, Watanabe & Tsubaki 2007). Aika-avaruuskuviin tallentuvat kunkin kuva-alalle asetetun etsintälinjan kohdan kirkkausarvot. Päällekkäisistä pikselijonoista on erotettavissa poikittaisia viivoja, joiden kulma vastaa virtausnopeutta.



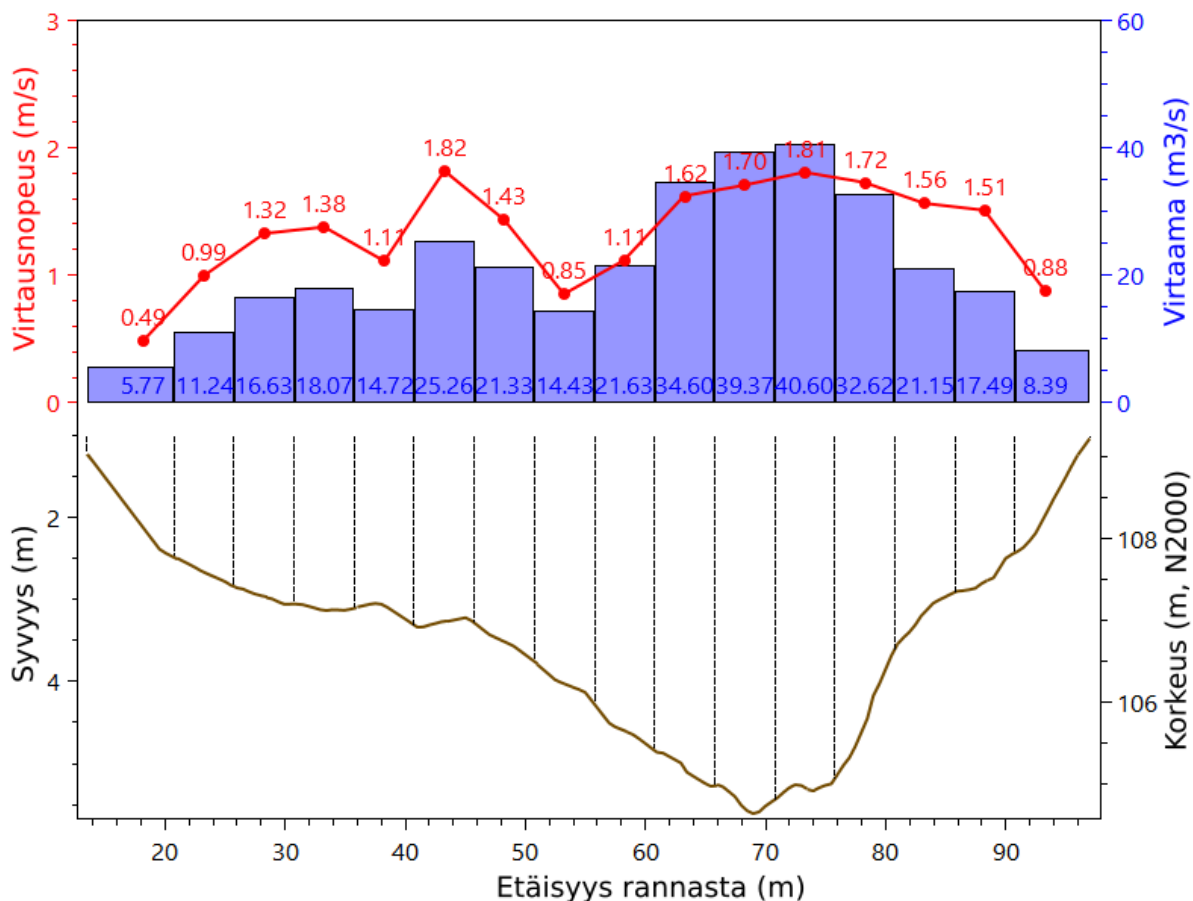
Kuva 7: Kuvassa vaalean sinisellä GPS-RTK:lla mitatut tukipisteet, joilla kuvat sidotaan reaaliaikaiseen maailmaan. Tumman siniset etsintälinjat on asetettu poikkileikkauksen kohdalle. Linjojen pituus on 15 metriä ja linjojen välinen etäisyys on 5 metriä. Veden virtaussuunta on kuvassa vasemmalle.

Videon pituuden ja kuvataajuuden avulla virtausnopeus voidaan laskea aika-avaruuskuviin muodostuneiden viivojen kulman perusteella. Viivojen kulma vastaa virtausnopeutta siten, että pystysuuntaisten viivojen nopeus on nolla ja kasvaa kohti vaakasuuntaa. Aika-avaruuskuviin tallentuu myös satunnaista virhettä, kuten tuulen aiheuttamia aaltoja, sadetta, tai paikallaan pysyviä esteitä. Viivojen kulman määrittämiseksi on kaksi menetelmää; gradient tensor-menetelmä sekä fourier-muunnokseen perustuva analyysi. Gradient tensor-menetelmässä viivojen kulman määrittäminen tapahtuu algoritmilla, joka normalisoi pikselimatriisin pikselien kirkkauden voimakkuuden vaihtelun keskihajonnan suhteen, jolloin voimakkuuden varianssi saa saman arvon koko pikselimatriisissa (Fujita ym. 2018). Normalisoinnin seurauksena käsiteltyihin kuviin jäävät vain kirkkaudenvaihtelua edustavat pikselit. Fourier-muunnosmenetelmässä (Fourier Analysis) kaksikulotteista autokorrelaatiofunktioita sovelletaan kuvan pikselien voimakkuuksien jakaumaan. Autokorrelaatiofunktion avulla voidaan havaita kuvasta todennäköisin kaltevuus (Fujita ym. 2018). Menetelmien tarkempi kuvaus löytyy muualta (Fujita, Watanabe & Tsubaki 2007; Fujita ym. 2018).



Kuva 8: Etsintälinjoista luodut aika-avaruuskuvat, joissa vaaka-akseli edustaa aikaa ja pysty-akseli matkaa. Kuvissa pysty-akseli pysyy saman pituisena, mutta vaaka-akseli lyhenee, mitä kauemmas kamerasta liikutaan, koska pikseleiden määrä suhteessa etäisyyteen vähenee vinosti kuvatussa videossa. Kuva numero on 1 lähinnä kameraa oleva etsintälinja kuvassa 7 ja 16 kauimpana.

Aika-avaruuskuvia voidaan käsitellä muun muassa histogrammia tasaamalla, jolloin viivat erottuvat paremmin. Analyysin lopputuloksena saadaan keskimääräinen virtausnopeus koko videon ajalta jokaiselta etsintälinjalta (Fujita ym. 2018). Virtausnopeuden ja poikkileikkauksen avulla saadaan laskettua virtaama kussakin etsintälinjaa edustavassa pystyvertikaalissa (kuva 9). Pintavirtausnopeus muutetaan pystyvertikaalin keskimääräiseksi virtausnopeudeksi kertomalla virtausnopeus aiemmin esitetyllä alpha-kertoimella, joka on ohjelmassa oletusarvona 0,85.



Kuva 9: Aika-avaruuskuvista laskettujen virtausnopeuskeskiarvojen ja poikkileikkauksen avulla saadaan laskettua virtaamat pystyvertikaaleissa.

Kahden edellä läpi käydyn menetelmän keskeisen ero on se, että LSPIV laskee hetkittäisen kaksiulotteisen pintavirtausvektorin, jolloin tuloksena saadaan pintavirtausnopeuden suuruus sekä suunta kahden kuvaparin väliltä. Usean kuvaparin pohjalta lasketuista vektoreista lasketaan kaksiulotteiset keskiarvovektorit. STIV taas laskee suoraan keskiarvona yksiulotteisen pintavirtausnopeuden kuva-alalle määritellyiltä mittausviivoilta koko mittausjakson eli videon pituuden ajalta. Molemmilla menetelmillä on mahdollista laskea virtaama, kun tiedetään uoman poikkileikkauksen mitat sekä vedenkorkeus.

3.3 Menetelmien sovelluskohteita

LSPIV-menetelmää on käytetty monessa erilaisessa hydrologisessa tutkimuksessa. Lewis ym. (2018) sovelsivat menetelmää kahden joen yhtymäkohdan monimutkaisen pintavirtauksen kaksiulotteiseen analyysiin dronella kuvatulta videolta. LSPIV-mittaus yhdessä hydroakustisten mittausten kanssa tuottivat tarkan analyysin virtauspaikasta. Koska LSPIV antaa lopputuloksena pintavirtausnopeudet, voi niitä verrata suoraan hydrologisen mallinnuksen lopputuloksiin ilman tarvetta ekstra- tai interpolointiin. Siten saadaan tärkeää lisätietoa erilaisista virtausolosuhteista mallinnuksen avuksi (Lewis & Rhoads 2018).

Kalateiden toimivuus on pitkälti riippuvainen virtausolosuhteista kalatien suulla. Strelnikova ym. (2020) sovelsivat LSPIV-menetelmää vesivoimalaitoksen kalatien toimivuuden arviointiin kuvaamalla dronevideoita kalatien suun yläpuolelta. Virtaukseen lisättiin ekologista pakkausmateriaalia erottelukyvyn parantamiseksi. LSPIV-tulosten todettiin vastaavan hyvin perinteisen virtausmittarin antamiin tuloksiin sekä virtauksen suunnan että virtauksen voimakkuuden osalta.

LSPIV-menetelmää on sovellettu onnistuneesti virtausmittauksiin erilaisissa virtausympäristöissä. Muun muassa jokisuistoalueen virtausolosuhteiden määrittämisessä (Bechle ym. 2012) ja osana jokiympäristöjen laajamittaisempaa kartoitusta (Hauet, Muste & Ho 2009). Sekä LSPIV-, että STIV-menetelmiä on hyödynnetty tulvien aikaisiin virtaamamittauksiin; muun muassa rankkasateiden aiheuttamien äkkitulvien mittauksiin (Al-mamari ym. 2019) ja lumen sulamisvesien mittaamiseen (Fujita 2017).

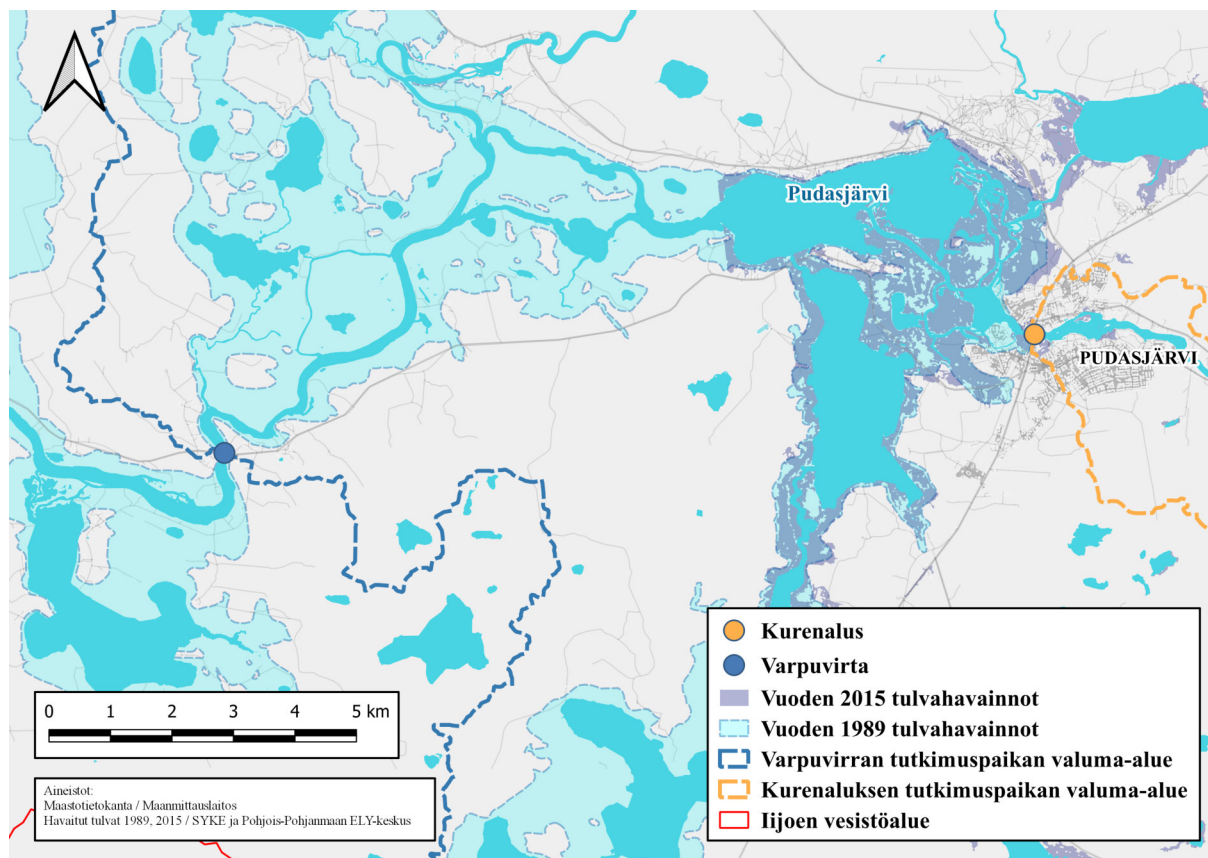
4. Tutkimusalueet ja -menetelmät

4.1 Tutkimusalue 1: Iijoki, Pudasjärvi

Iijoki kuuluu Iijoen vesistöalueeseen ja se laskee Perämereen. Iijoen vesistöalue on kooltaan noin 14 190 km² ja se saa alkunsa Kuusamossa sijaitsevasta Irnijärvestä. Iijoen pääuomaan laskee 4 merkittävää sivujokea: Siuruanjoki, Livojoki, Kostonjoki ja Korpinjoki. Pudas- ja Jongunjärven alueella tyypillisiä ovat kevättulvat. Pudasjärven keskusta on nimetty valtakunnallisesti merkittäväksi tulvariskialueeksi (Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2015). Tutkimuspaikat valittiin siten, että saataisiin tietoa Pudasjärven lähtö- ja tulovirtaamista. Tutkimusajankohta (19.5.-12.6.2020) oli kevättulvien aikaan, jolloin oli mahdollista kerätä aineistoa eri virtaamilla lyhyellä aikavälillä. Iijoelta valittiin aiempien vuosien tulvien kattavuuden perusteella kaksi edustavaksi katsottua paikkaa, joissa tulvavesi ei leviäisi liian laajalle alueelle, jotta uoman kuvaaminen on mahdollista. Toinen tutkimuspaikka oli Pudasjärven keskustan Kurenaluksen sillan kohdalta (kuva 12) ja toinen alavirtaan Petäjäkosken sillan kupeessa Iijoen Varpuvirran kohdalta (kuva 13).



Kuva 10: Virtaamamittausten tutkimusalue kuuluu Iijoen vesistöalueeseen. Iijoki saa alkunsa Irnijärvestä ja se laskee Perämereen.



Kuva 11: Pudasjärven kaksi tutkimuskohdetta. Tavoitteena oli saada tietoa Pudasjärven lähtö- ja tulovirtaamasta. Tutkimuskohteet valittiin alueella havaittujen edellisten tulvien perusteella siten, että vesi ei leviäisi liian laajalle alueelle ja uoman kuvaaminen olisi mahdollista.

Kurenaluksen tutkimuspaikalla valuma-alueen koko on noin $8\,069\text{ km}^2$ ja Varpuvirralla $10\,727\text{ km}^2$. Kurenaluksella virtaamat vaihtelevat noin $50\text{--}300\text{ m}^3/\text{s}$, keskiarvon ollessa $91\text{ m}^3/\text{s}$ (Suomen Ympäristökeskus 2020b). Suurimmillaan virtaamat ovat juuri keväällä lumien sulamisen aikaan. Varpuvirran tutkimuspaikalla virtaamat ovat hieman suuremmat, koska Livojoki yhtyy Iijokeen tutkimuspaikkojen välillä. Varpuvirralla virtaamat vaihtelevat $100\text{--}500\text{ m}^3/\text{s}$ välillä, vuosikeskiarvon ollessa $131\text{ m}^3/\text{s}$ (Suomen Ympäristökeskus 2020b).

4.1.1 Menetelmät ja -aineistot

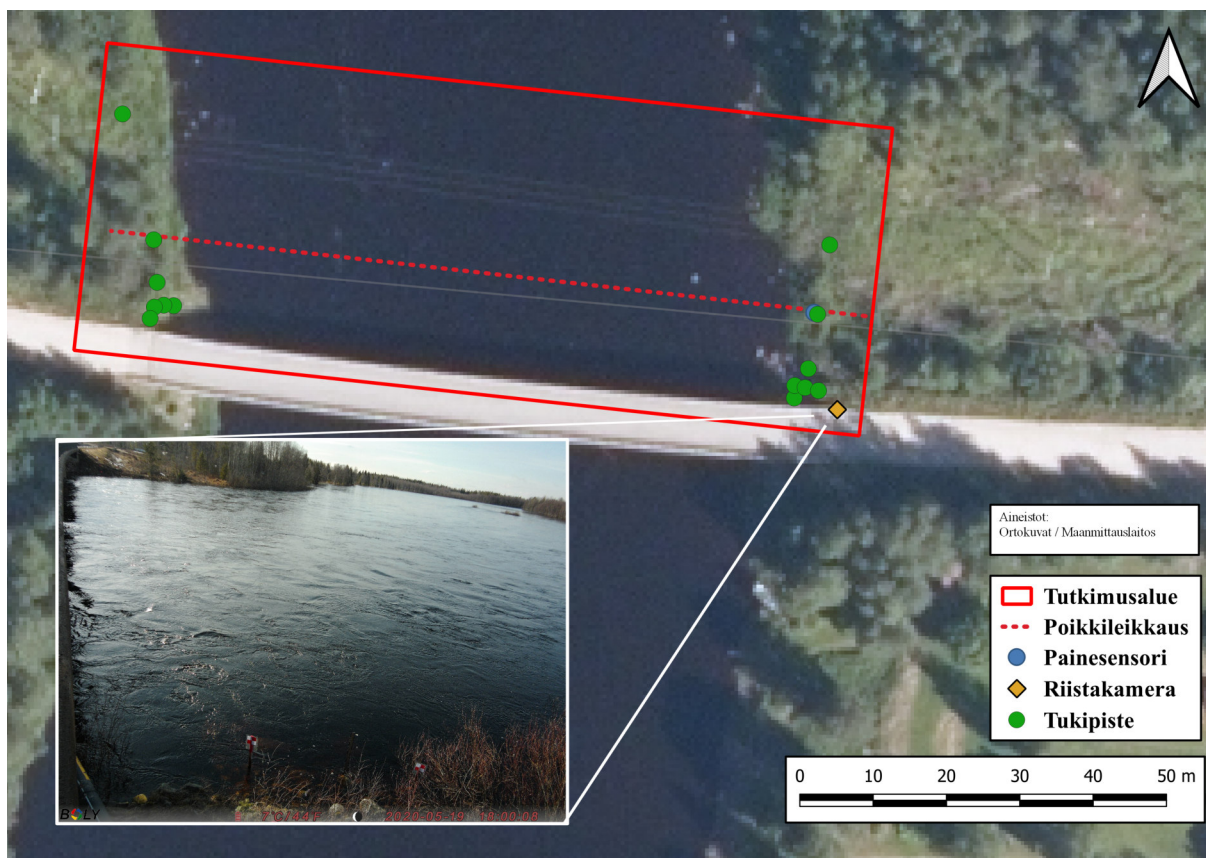
Pudasjärven tutkimuskohteisiin asennettiin kaksi riistakameraa (Boly Guard BG668-E36WG), jotka tallensivat 4K-resoluutiolla (3840×2160) ensin 30 sekunnin ja myöhemmin 60 sekunnin mittaisia videoita tunnin välein koko mittausjakson ajan (19.5.-12.6.2020). Riistakameravideoita kuvattiin Kurenaluksella 571 ja Varpuvirralla 537 kappaletta. Lisäksi eri kuluttajaluokan droneilla (DJI Mavic Air, DJI Phantom 4 Pro V2.0 ja Parrot Anafi) kuvattiin ajoittaisesti vertailuainestojä käytettävien ADCP-virtaamamittausten yhteydessä sekä muutenkin aina paikalla käydessä. Kevättulvan takia aineistoa saatiinkin kerättyä erilaisilla virtaamilla, vaikka tulvat jäivät ennustettua pienemmiksi. ADCP-mittauksilla saatiin myös jokiuomien poikkileikkaukset virtaaman laskentaa varten. Vedenkorkeushavaintoja kerättiin jatkuvina mittauksina

LeveLogger-painesensoreilla kuviin 12 ja 13 merkityiltä paikoilta sekä ajoittaisina mittauksina GPS-RTK:lla. Lisäksi vertailuaineistona käytettiin tutkimusalueilta alajuoksulle päin sijaitsevan Pohjolan Voiman Haapakosken voimalaitoksen virtaaman tuntikeskiarvot mittausjakson ajalta ja tutkimusalueilta yläjuoksulle päin sijaitsevan Jongunjärven vedenkorkeushavaintoihin perustuva laskettu virtaama-aikasarja.



Kuva 12: Kurenaluksen tutkimuskohde. Riistakamera kiinnitettiin siltaan ja kuva-alalta mitattiin virtaama-analyysiin tarvittavat tukipisteet. Poikkileikkaus saatiin vertailuaineistona käytettyjen ADCP-virtaamamittausten yhteydessä. Vedenkorkeus mitattiin painesensorilla.

Kurenaluksen tutkimuspaikalta (kuva 12) mitattiin tukipisteitä ja muita kiintopisteitä mitattiin yhteensä 8 kappaletta ja Varpuvirran tutkimuspaikalta (kuva 13) 11 kappaletta. Tukipisteinä käytettiin punaiseksi maalattuja kiviä sekä laminoituja noin 30x30 cm kokoisia punavalko-ruutukuvioituja lätkiä, joiden tarkka sijainti korkeuksineen mitattiin GPS-RTK:lla. Kiintopisteinä käytettiin siltojen valaisintolppia ja muita kiinteitä rakenteita. Kiintopisteitä kerättiin varmuuden vuoksi droneilmakuvien georeferointia varten. Maalatut kivet osoittautuivat hyviksi tukipisteiksi, sillä ne erottuvat kohtuullisen hyvin kuvasta huonommallakin kuvanlaadulla. Ruutukuvioisten lätkien laminoitu pinta heijastaa hieman valoa, minkä takia ne katoavat helposti kuvan pikselimassaan sekä riistakamera- että dronevideoissa. Tukipisteiden määrittäminen kuvasta oli välillä hankalaa etenkin kauimpana kamerasta sijaitsevien pisteiden osalta, johtuen vaihtelevista valaistusolosuhteista sekä riistakameroiden käyttämän voimakkaan videopakkausten takia.



Kuva 13: Varpuvirran tutkimuskohde. Riistakamera kiinnitettiin maantiesiltaan ja kuva-alalta mitattiin virtaama-analyysiin tarvittavat tukipisteet. Poikkileikkaus saatiin vertailuaineistona käytettyjen ADCP-virtaamamittausten yhteydessä. Vedenkorkeus mitattiin painesensorilla. Kameran asettelu osoittautui haastavaksi aineiston analysointivaiheessa, sillä se on liian lähellä virtausta.

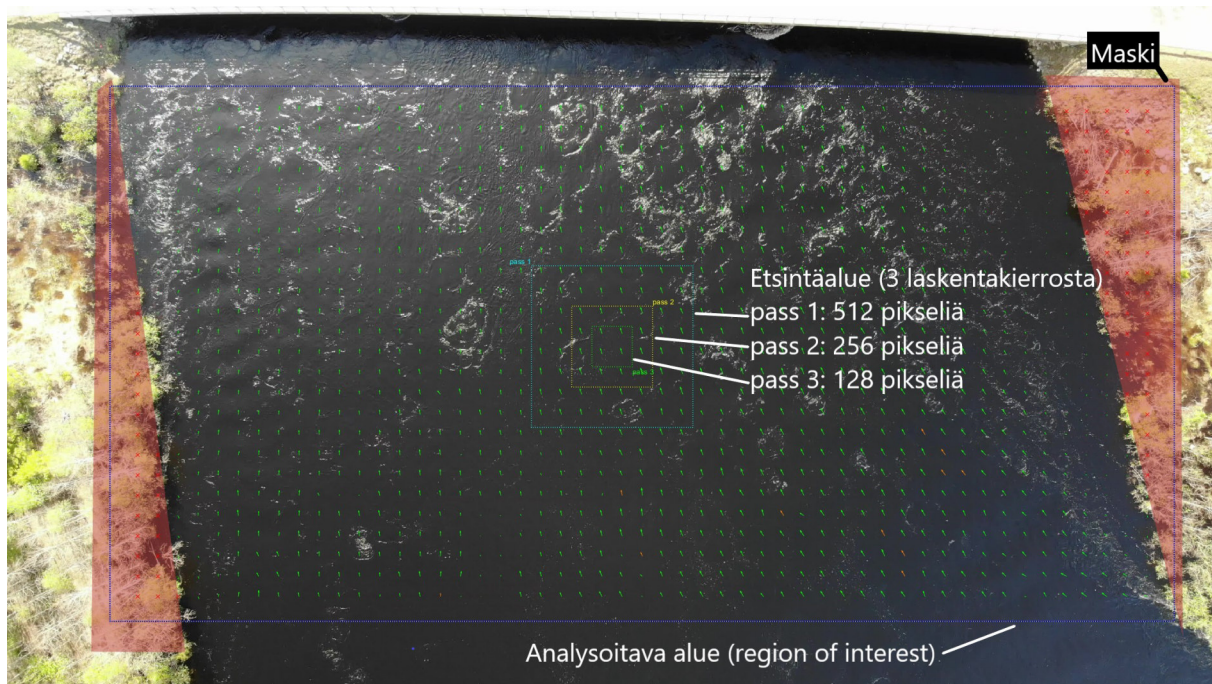
Kurenaluksen ja Varpuvirran tutkimuskohteiden riistakamera- ja dronevideoiden STIV-analyysit tehtiin kaikki Hydro-STIV-ohjelmalla. Ohjelmaan tuodaan videotiedosto, joka käytetään analyysissä kokonaisuudessaan pilkkomatta sitä ensin kuviksi. Sen jälkeen kuva-alalta määritetään tukipisteet, joille annettiin GPS-RTK:lla mitatut X-, Y- ja Z-koordinaatit. Tukipisteiden ja annetun vedenkorkeuden avulla kuvat ortorektifioidaan (esimerkkikuva: liite 48), jolloin kuvan mittasuhteet vastaavat reaali maailmaa. Ortorektifiointin jälkeen ohjelmaan syötetään tutkimuspaikan poikkileikkauksen koordinaatit, joka asettuu oikeaan paikkaan suhteessa tukipisteisiin.

Seuraavaksi asetetaan etsintälinjoille pituus, linjojen välinen etäisyys sekä kulma suhteessa poikkileikkaukseen. STIV-analyysien tekemiseen ei ole olemassa mitään standardoitua ohjetta, kuten virtaaman mittaamiseen muilla hydrologian alan vakiintuneilla menetelmillä. Johdonmukaisten tulosten saamiseksi etsintälinjojen pituuden ja asettelun suhteen kokeiltiin useita eri asetuksia. Asetuksien välillä ei ole kovinkaan suurta eroa tuloksissa, mutta satunnaisia virheellisiä virtausnopeusarvoja saa vähennettyä sijoittamalla etsintälinjat kohtiin, joissa virtaus on selkeimmin havaittavissa. Analyysissä käytettiin sellaisia etsintälinjojen asetuksia, jotka sopivat mittausjakson aikana muuttuvaan vedenkorkeuteen, siten että tulokset ovat vertailukelpoisia eikä asetuksia tarvitse muuttaa virtausolosuhteiden muuttuessa. Siten videoanalyysien välillä

ainoastaan vedenkorkeus muuttuu. Riistakamera- ja dronevideoiden analysoinnissa käytettiin likimain samoja etsintälinja-asetuksia.

Hydro-STIV ohjelmassa on batch-ominaisuus, jolla voi analysoida useiden videoiden sarjoja kerralla. Batch-ajossa sarjan ensimmäiselle videolle asetetaan tukipisteet, etsintälinjat sekä vedenkorkeus. Sarjan muille videoille asetetaan ainoastaan vedenkorkeus. Ensimmäisen analyysin asetuksilla ohjelma analysoi automaattisesti muuttuvalla vedenkorkeudella sarjan muut videot. Dronevideoita ei pysty vastaavana sarjatyönä tekemään, koska tukipisteiden asettelu muuttuu aina jonkin verran eri videoiden välillä. Dronevideoiden analysoinnissa periaate on muuten sama, mutta tukipisteiksi riittää kaksi tunnettua pistettä (X ja Y), joiden avulla lasketaan kuvapikselin koko metreissä, sekä vedenkorkeus. Ortorektifioinnin kannalta vedenkorkeus on sama kuin tukipisteiden korkeus, joten tukipisteiden tulisi sijaita lähellä vedenpintaa ja olla mielellään samalla korkeudella.

LSPIV-analyyseissä video pilkotaan ensin kuviksi PIVLab tai RIVeR-ohjelmassa tai jossakin videonkäsittelyyn tarkoitettussa ohjelmassa. Kuvat tuodaan PIVLab ohjelmaan, joissa kuvasta määritetään suorakulmainen analysoitava alue (region of interest). Jos alueelle osuu isoja kiviä, kasvillisuutta tai rantaa voi niiden päälle määrittää maskit, jotta ne jäävät analysoimatta. Tämän jälkeen määritetään LSPIV-analyysin asetukset. LSPIV-menetelmässä asetetaan ensin etsintäalueen koko pikseleissä, jota suositellaan puolitettavaksi jokaisella laskentakierroksella, joita voi asettaa maksimissaan neljä (kuva 14). Etsintäalueen koko ja laskentakierrosten määrä vaikuttavat analyysin kokonaiskestoon. Käytettävän etsintäalueen koko riippuu siitä, kuinka yksityiskohtaista tietoa tarvitaan ja analysoitavan aineiston resoluutiosta. Myös kuvataajuuden tulisi olla virtausnopeuden suhteen sellainen, että kuvien välillä on havaittavissa liikettä, mutta ei kuitenkaan liikaa. Jos kuvataajuus on liian harva niin etsittävien hiukkasryhmien etäisyys kasvaa liian suureksi kuvien välillä, eikä korrelaatiota välttämättä enää löydy ja analyysi tuottaa virheellisiä vektoreita. Jos havaittava pikselien siirtymä on kuvien välillä N pikseliä, niin luotettavien korrelaatioiden löytämiseksi tulisi etsintäalueen (SA, search area) koko olla $4N \times 4N$ pikseliä ja hakualueen (IA, interrogation area) $2N \times 2N$ pikseliä (Thielicke & Stamhuis 2014). Koska Pudasjärven aineistossa oltiin kiinnostuneita virtaamasta, muutaman kokeilun kautta haettiin sellaiset asetukset, joilla analysointi-aika on kohtuullinen ja riittävän yksityiskohtainen.



Kuva 14: Esimerkki Varpuvirran tutkimuskohteessa kuvattuun dronevideoon asetetuista LSPIV-analyysin asetuksista PIVLab-ohjelmassa. Ensin määritetään analysoitava alue (region of interest) ja analyysin ulkopuolelle jätettävät alueet rajataan maskilla. Etsintäalueen koko määritetään kuvapikseleinä ja laskentakierroksilla alueen koko pienenee puoleen. Etsintäalueen koko riippuu siitä kuinka yksityiskohtaista tietoa tarvitaan sekä siitä, miten nopeasti havaittavat hiukkasryhmät liikkuvat kuva-alalla.

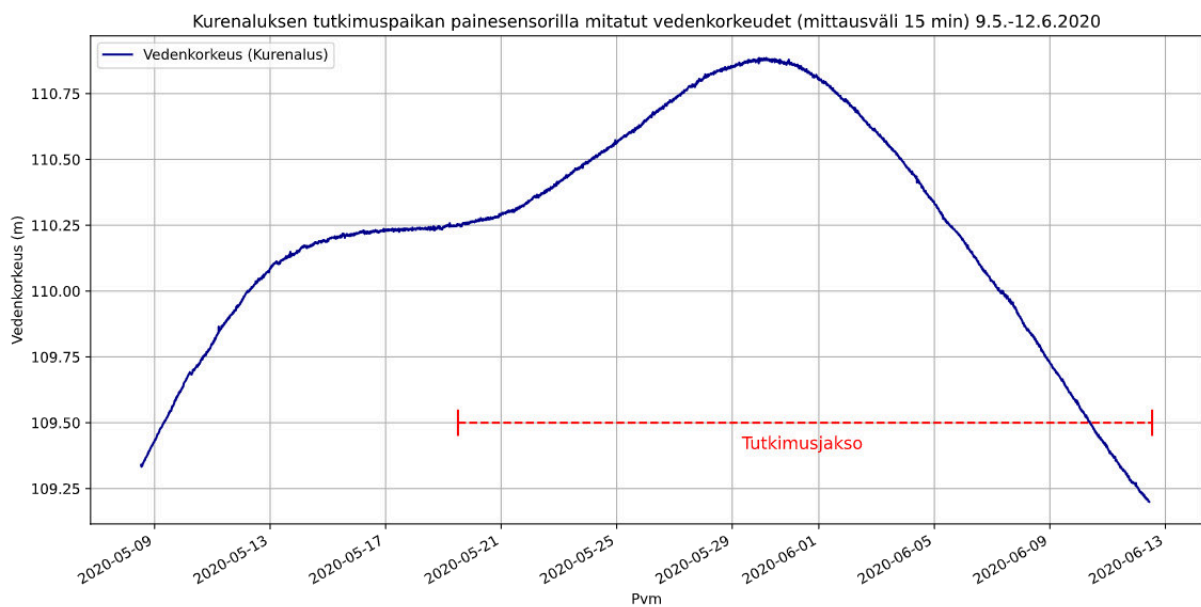
Aiemmistä aiheeseen liittyvistä tutkimuksista ei löytynyt virtaaman määrittämiseen liittyviä ohjeellisia arvoja, ainoastaan suurpiirteiset oletusarvot, joista kannattaa aloittaa. Asetusten hakua helpottaa se, että asetuksia voi kokeilla ensin yhdellä kuvaparilla, joten silmämääräisellä tarkastelulla voi etsiä sopivat asetukset. Sopiviksi asetuksiksi todettiin kolme laskentakierrosta asetuksilla, joissa ensimmäisellä kierroksella etsintäalueen koko on 512 pikseliä, toisella 256 ja kolmannella 128 pikseliä. Mitä enemmän laskentakierroksia on ja mitä pienempi etsintäalue on, sitä pidempään analyysi kestää. Esimerkiksi neljän kierroksen analyysi 512-256-128-64 pikselin etsintäalueilla kesti noin 22 minuuttia käsiteltäessä tehokkaalla pöytäkoneella yhteensä 450 4K-kuvaa (videon pituus 30 sekuntia ja kuvataajuus 15 kuvaa per sekunti). Analyysin lopputuloksena saadaan pintavirtausvektorit yhteensä 225 kuvaparin välillä, joista voi laskea keskiarvoistetun virtausprofiilin. Keskiarvoprofiilia käytetään RIVeR-ohjelmassa virtaaman laskentaan sovittamalla se poikkileikkaukseen.

4.1.2 Muut aineistot

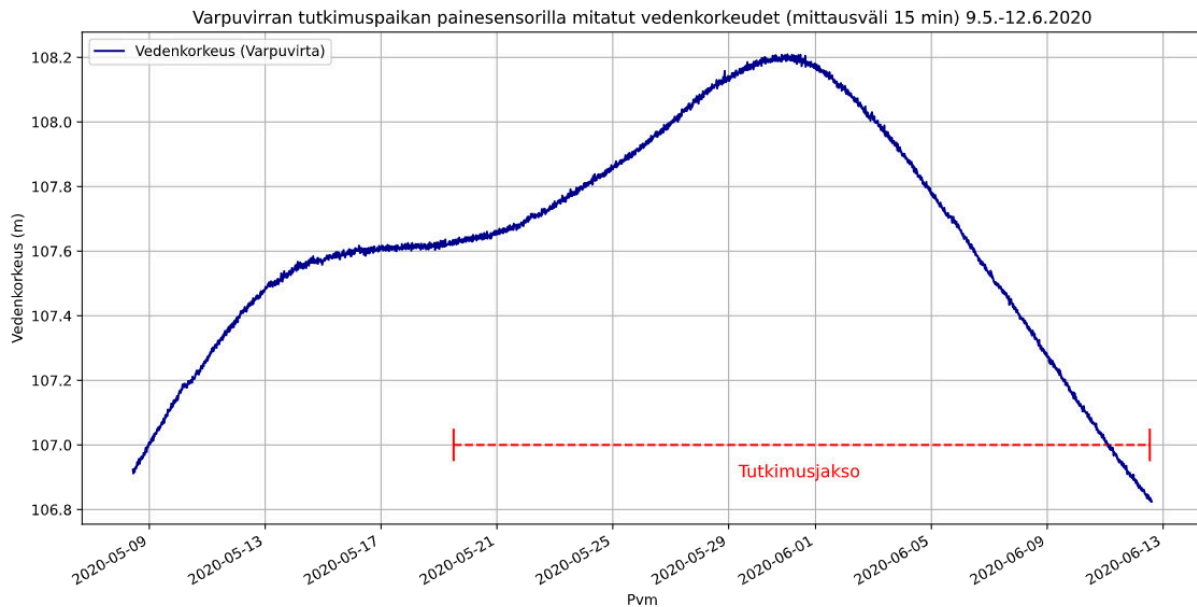
Virtaamien laskentaa varten kerättiin vedenkorkeushavaintoja. Virtaamatulosten vertailua varten tehtiin ADCP-virtaamamittauksia ja virtaama-aikasarjan vertailuaineistoksi ladattiin Suomen Ympäristökeskuksen ylläpitämä Jongunjärven purkautumiskäyrä.

4.1.2.1 Vedenkorkeusmittaukset

Painesensorilla tehtyjä jatkuvia vedenkorkeusmittauksia käytettiin virtaama-aikasarjan tuottamiseen STIV-menetelmällä. Vedenkorkeus mitattiin tutkimuspaikoilla LeveLogger-painesensorilla 15 minuutin välein koko tutkimusjakson ajalta. Painesensorien antamat lukemat kalibroitiin ilmanpaineen suhteen ja muutettiin korkeudeksi GPS-RTK:lla mitattujen arvojen avulla. Kuvissa 15 ja 16 ovat vedenkorkeuden mitatut arvot Kurenaluksen ja Varpuvirran tutkimuspaikoissa. Riistakameravideosta tehdyn Kurenaluksen virtaama-aikasarjan tekemiseen käytettiin painesensorien havainnoista laskettuja tuntikeskiarvoja. Lisäksi vedenkorkeus mitattiin aina ADCP-mittausten sekä dronevideoiden tallentamisen yhteydessä GPS-RTK:lla. GPS:llä mitattuja vedenkorkeuksia käytettiin tarkemmissa ADPC:n ja STIV:n välisissä vertailuanalyseissä, koska painesensorin ja GPS:n antamien vedenkorkeusarvojen välillä on jonkin verran eroa.



Kuva 15: Painesensorilla mitattu vedenkorkeus Kurenaluksen tutkimuspaikalta. Mittausväli 15 minuuttia.



Kuva 16: Painesensorilla mitattu vedenkorkeus Varpuvirran tutkimuspaikalta. Mittausväli 15 minuuttia.

4.1.2.2 ADCP vertailumittaukset

ADCP-mittaustuloksia käytettiin STIV- ja LSPIV-menetelmillä saatujen tulosten vertailuun. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) on ultraäänitutkaukseen perustuva menetelmä, jossa veden pinnalla oleva ultraäänitutka lähettää korkeataajuisia ultraäänipulsseja, jotka heijastuvat takaisin mittauslaitteeseen uoman pohjasta sekä vedessä olevista partikkeleista. Virtausnopeus saadaan laskemalla veneen ja heijastavan partikkelin välinen suhteellinen nopeusero perustuen äänen Doppler-siirtymään (Yorke & Oberg 2002). Mittaus tehdään kuljettamalla mittauslaitetta virtauksen suhteen poikittaisessa suunnassa. Mittaus voidaan tehdä esimerkiksi moottoriveneellä, radio-ohjattavan pienveneen avulla tai sillalta ohjauksköysien avulla. Ultraäänitutkauksella tehdään kaikki suuret virtaamamittaukset Suomessa sen nopeuden, toistettavuuden, tarkkuuden ja turvallisuuden vuoksi (Korhonen 2007). Taulukossa 2 näkyvät ADCP:lla mitattujen tulosten keskiarvot, vaihteluvälit ja keskihajonnat.

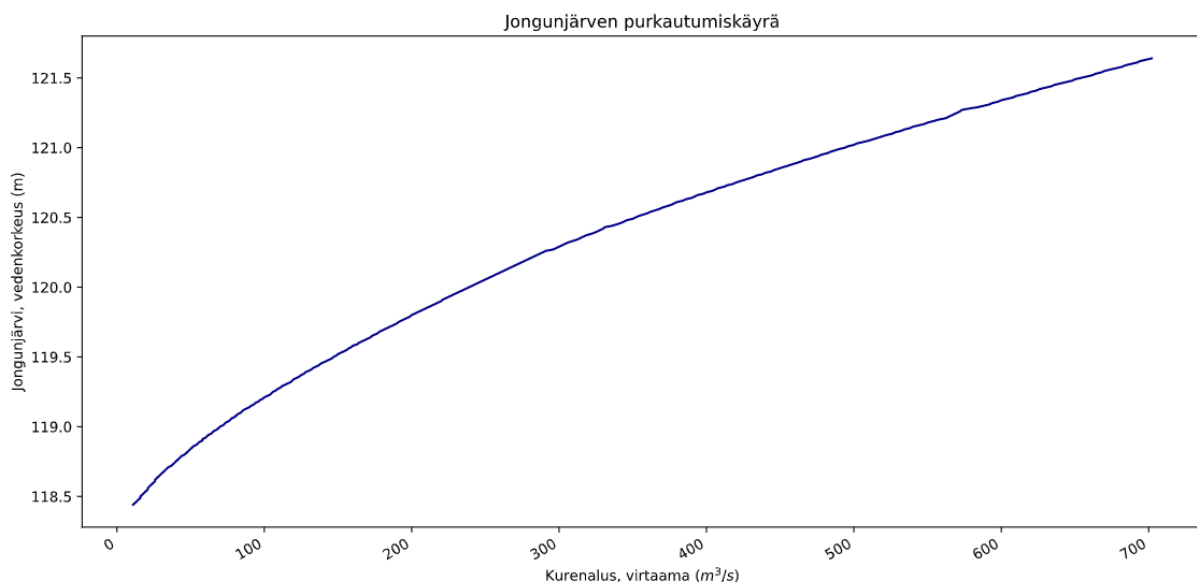
Taulukko 2: Ijoen tutkimuskohteiden ADCP-vertailumittaukset. Kummassakin tutkimuspaikassa mittauksia tehtiin kolmena päivänä tutkimusjakson aikana.

Paikka	Päivä	Vedenkorkeus	N	Q (ka)	Q (min)	Q (max)	Q (sd)
Kurenalus	19.05.2020	110.231	6	347.39	343.64	350.91	2.98
	01.06.2020	110.756	6	418.39	413.80	424.82	3.62
	12.06.2020	109.185	6	179.44	174.31	184.70	3.92
Varpuvirta	19.05.2020	107.491	10	486.24	465.76	501.24	12.80
	01.06.2020	107.979	6	626.97	606.99	644.19	16.38
	12.06.2020	106.801	8	280.80	270.21	290.47	7.63

ADCP-mittaukset teki tilaustyönä Mitta Oy. Virtaamatiedon lisäksi ADCP-mittauksien yhteydessä saatiin tutkimuspaikan poikkileikkauksen mitat sekä GPS-RTK:lla määritetty vedenkorkeus.

4.1.2.3 Jongunjärven purkautumiskäyrä

Virtaama-aikasarjan vertailuaineistona on purkautumiskäyrään perustuva Jongunjärven laskettu lähtövirtaama, joka saatiin Suomen Ympäristökeskuksen ylläpitämästä HERTTA-tietojärjestelmästä (Suomen Ympäristökeskus 2020c). Purkautumiskäyrällä tarkoitetaan vedenkorkeuden ja virtaaman välistä suhdetta (kuva 17) ja purkautumiskäyrä kalibroidaan kenttämittauksin (Subramanya 2017: 145). Virtaama-arvot lasketaan Jongunjärven mitatun vedenkorkeuden perusteella eli ne eivät ole suoria havaintoja. Purkautumiskäyrään perustuviissa virtaama-arvoissa saattaa olla merkittävästi virhettä. Di Baldassaren ja Montaren (2009) tutkimuksen mukaan keskimääräinen virhe purkautumiskäyrään perustuviissa virtaamahavainnoissa on 25,6%.

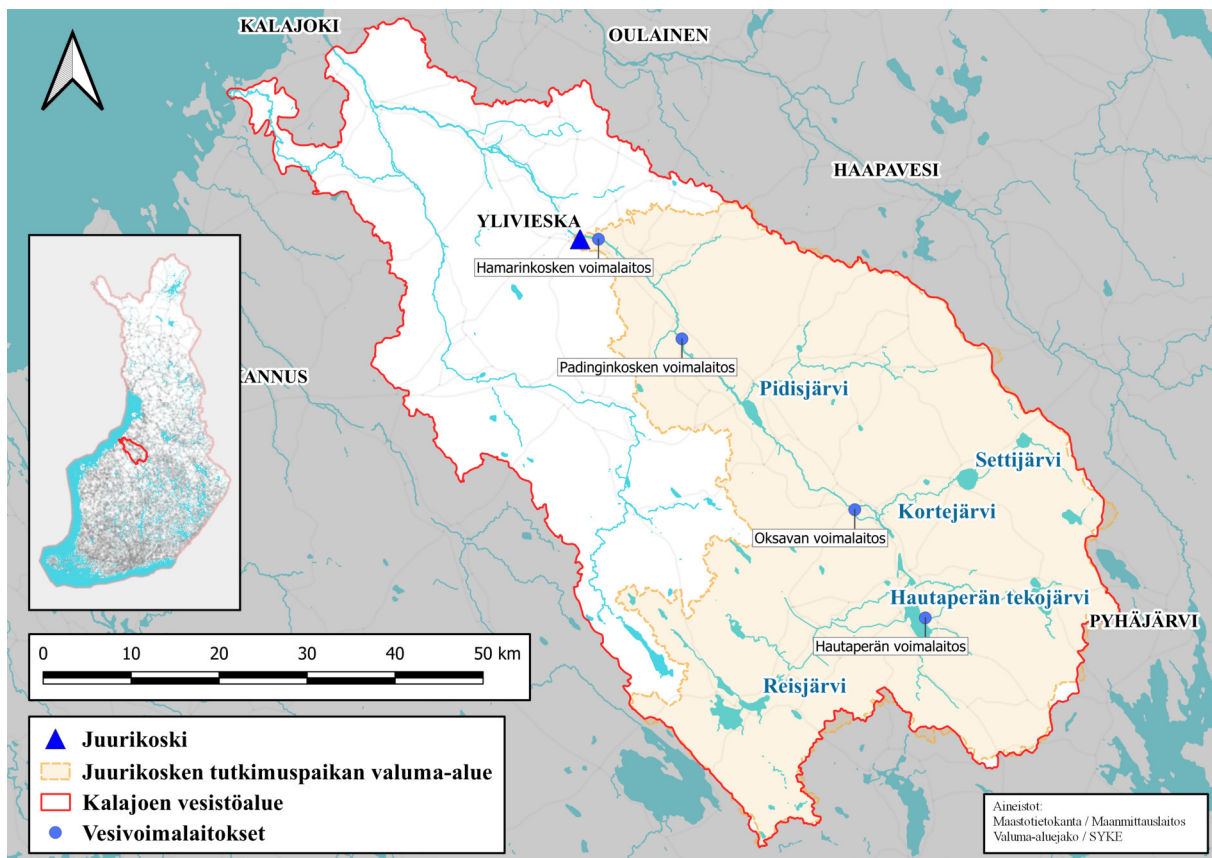


Kuva 17: Purkautumiskäyrällä tarkoitetaan vedenkorkeuden ja virtaaman välistä suhdetta. Jongunjärven purkautumiskäyrä perustuu Jongunjärven havaintoaseman mittaamaan vedenkorkeuteen, mutta virtaama-arvot ovat Kurenalukselta, jossa purkautumiskäyrän kalibrointimittaukset on tehty.

4.2 Tutkimusalue 2: Kalajoki, Ylivieska

Toiseksi tutkimuspaikaksi valittiin Pohjois-Pohjanmaalla sijaitseva Kalajoen vesistöalueeseen kuuluva Kalajoki, joka alkaa Reisjärvestä ja laskee Perämereen. Kalajoki on 130 kilometriä pitkä säännöstelty joki, jonka varrella sijaitsee neljä vesivoimalaitosta (kuva 18). Vesivoimalaitoksissa harjoitetaan lyhytaikaissäännöstelyä, jolla tasataan vaihtelevaa sähkönkulutusta vuorokauden aikana. Nopeasti muuttuvat virtausolosuhteet aiheuttavat ongelmia kalojen lisääntymispaikoilla, joissa keskeinen muuttuja on virtausnopeus (Person 2013). Kalojen elinpaikkoja on pyritty parantamaan 2000-luvun alussa kunnostamalla koskia paikoissa, joissa virtausnopeus on suuri.

Ylivieskan keskustassa sijaitseva Juurikoski on tällainen kunnostettu koski (Aronsoo & Wennman 2012). Kalajoen osalta tutkimuksessa tehtiin yhteistyötä ECORIVER-hankkeen (2020) kanssa, jossa tutkitaan edellä mainitun vesivoimalaitosten lyhytaikaissäännöstelyn vaikutuksia kalahabitaatteihin. Tutkimus tehtiin kevättulvien jälkeen (24.6.2020) melko vähävetiseen aikaan, jolloin virtaamat ovat pieniä. Juurikosken neljästä koskipaikasta (kuva 19) oli tavoitteena tuottaa LSPIV-menetelmällä pintavirtausprofiilit neljällä eri virtaamalla. Juurikoskesta noin kilometrin yläjuoksuun päin sijaitsevalta Hamarinkosken voimalaitokselta (kuva 19) saatiin sovittua mittauspäiväksi ajoitetut juoksutusvirtaamat. Juoksutusvirtaamat olivat 2, 3, 6 ja 12 m^3/s , jotka edustavat hyvin voimalaitoksen lyhytaikaissäännöstelyn aiheuttamaa vaihtelua.

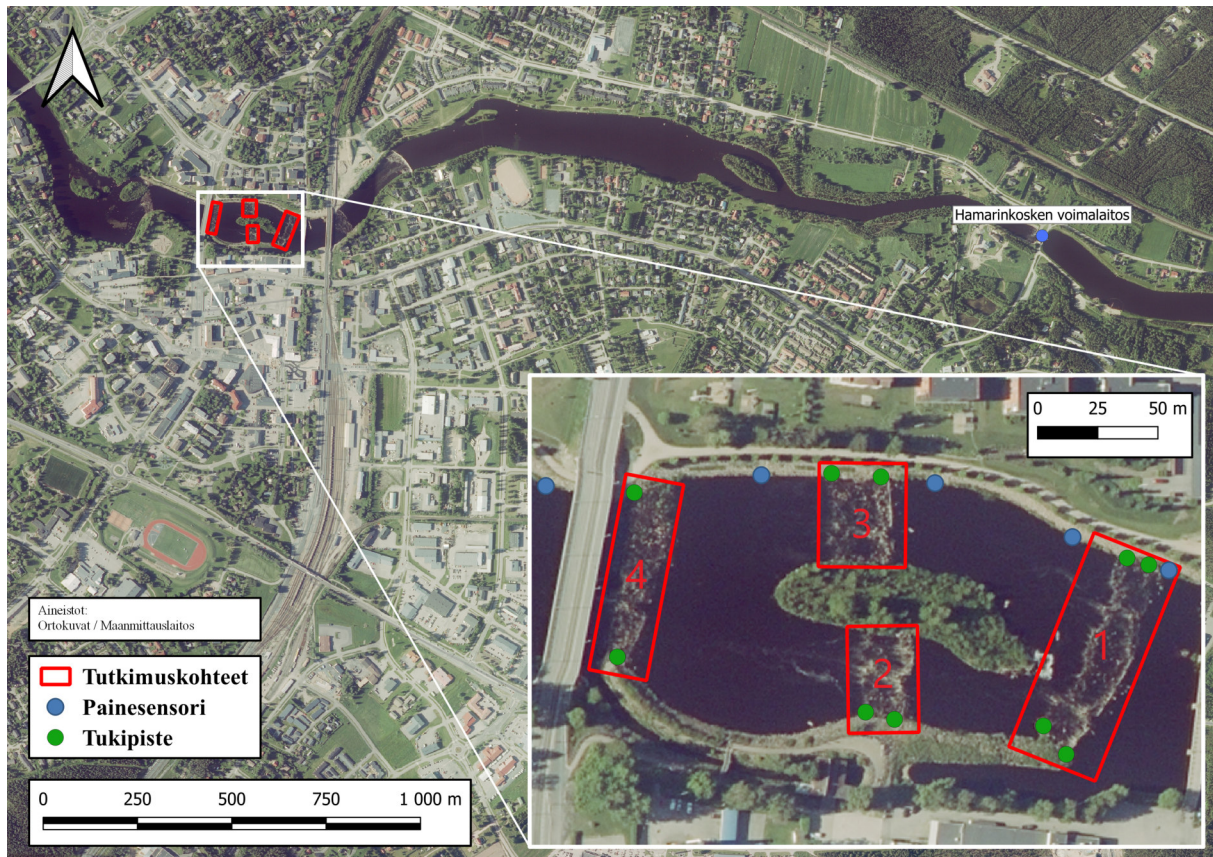


Kuva 18: Juurikosken tutkimusalue sijaitsee Ylivieskan keskustassa. Kalajoki on säännöstelty joki, jonka varrella on neljä vesivoimalaitosta.

4.2.1 Menetelmät ja -aineistot

Kalajoella mittaukset toteutettiin yhden päivän aikana 24.6.2020. Ylivieskan keskustan Juurikosken (kuva 19) neljää eri koskea kuvattiin DJI Mavic Air-dronella kohtisuoraan yläpuolelta kullakin vesivoimalaitoksen kanssa ennakkoon sovitulla juoksutusvirtaamalla. Ennen videoitten kuvaamista määritettiin jokaiseen koskipaikkaan kuva-alalle GPS-RTK:lla molemmille rannoille tukipisteet, jotka näkyvät videokuvassa. Tukipisteiden avulla saadaan laskettua yhden kuvapikselin koko metreissä, jota tarvitaan virtausnopeuden määrittämiseen. Lisäksi tutki-

musalueella oli vedenkorkeuden mittaamiseen painesensorit ja virtaamia seurattiin ajoittaisilla ADCP-mittauksilla.



Kuva 19: Juurikosken tutkimusalue. Kuvan neljää koskea kuvattiin neljällä eri Hamarinkosken voimalaitokselta juoksetetulla virtaamalla. Koskien kohdalta mitattiin GPS-RTK:lla dronen kuva-alalle tukipisteitä ja vedenkorkeutta mitattiin painesensoreilla koskien läheisyydestä.

Videoiden resoluutio oli 3840*2160, kuvataajuus 30 fps ja pituus 30-60 sekuntia. Kaikista koskipaikoilla kuvattiin neljä videota joka juoksetusvirtaamalla ja videoita tallennettiin yhteensä 72 kpl. Dronen kamerassa oli polarisaatio-suodatin auringon heijastumien vähentämiseksi ja kuvanlaadun parantamiseksi. Kuvatuista videoista valittiin silmämääräisesti sopivimmat LSPIV-menetelmällä analysoitavaksi. Analyysiin valitut videot leikattiin tasan 30 sekunnin mittaisiksi ja pilkottiin kuviksi käyttämällä FFmpeg-videokirjastoa, siten että joka toinen kuva videosta tallennettiin (kuvia yhteensä kertyi siis 900 kpl per video). Dronen liike poistettiin kuvista stabiloimalla kuvat Fudaa-LSPIV-ohjelmassa olevalla stabilointialgoritmilla. Varsinainen analysointi tehtiin kuitenkin PIVLab ohjelmalla, koska se soveltuu paremmin isoresoluutioisten kuvien analysointiin ja on muutenkin käyttäjäystävällisempi.

Juurikoskessa oltiin kiinnostuneita yksityiskohtaisesta virtausnopeustiedosta, joten LSPIV-analyysin asetukset asetettiin sopiviksi aiheesta aiemmista tutkimuksista saatujen kokemusten (Strelnikova ym. 2020; Pearce ym. 2020; Lewis & Rhoads 2018; Thielicke & Stamhuis 2014; Kantoush ym. 2011) sekä omien kokeilujen avulla. Tarkempi kuvaus kuvien esikäsittelystä, etsintäalueen koosta, jälkiprosessoinnista ja niiden vaikutuksesta lopputulokseen löytyy muualta

(muun muassa Thielicke & Stamhuis 2014). Esikäsittelyssä ja jälkiprosessoinnissa käytettiin suositeltavia oletusasetuksia. Hyviä tuloksia tuottivat etsintäalueen asetukset, joissa etsintäalgoritmi toistettiin neljä kertaa, joka toistolla pienenevällä etsintäalueella. 1. analyysi tehtiin 256 pikselin kokoisella etsintäalueella, toinen 128, kolmas 64 ja viimeinen 32 pikselin kokoisilla etsintäalueilla. Kuvia analysoitiin yhteensä 900 kappaletta eli 450 kuvaparia analyysiä kohden. Analyysin tuloksista poistettiin selvästi virheelliset havainnot oletusasetuksilla, joka perustuu keskihajontaan. Poistetut vektorit korvattiin interpoloiduilla vektoreilla. Virheellisten vektoreiden poistamisen jälkeen laskettiin keskiarvovirtausvektorit. Keskiarvovektorit georeferoitiin pistemäisenä tietona, joista muodostettiin tulososiossa esitetyt rasterit.

4.3 Ohjelmistot

Kuvatulkintamenetelmien käyttöön on useita ohjelmia. LSPIV-menetelmän käyttöön on olemassa kolme avoimeen lähdekoodiin perustuvaa ohjelmaa (PIVLab + RIVeR ja Fudaa-LSPIV). PIVLab (Thielicke & Stamhuis 2014) ja RiVeR (Patalano, García & Rodríguez 2017) ovat kaksi erillistä ohjelmaa, jotka luovat kokonaisuuden, jossa PIVLabissa tehdään varsinainen LSPIV-virtausnopeusanalyysi. Analyysin tuloksena saadaan pintavirtausprofiili, jonka perusteella lasketaan virtaama RIVeR-ohjelmassa. PIVLab ja RiVeR ovat Matlabin lisäosia, mutta niiden käyttö onnistuu ilman varsinaisen Matlabin asennusta, joka on maksullinen. Fudaa-LSPIV (Le Coz ym. 2014) on erillinen Javalla tehty ohjelma, joka sisältää kaiken tarvittavan LSPIV-analyysin tekemiseen. Fudaa-LSPIV on varsin kankea käytettäessä isoresoluutioisia (4K) kuvia, mutta toimii hyvin esim. FullHD kuvien kanssa. STIV-menetelmän käyttöön tällä hetkellä paras vaihtoehto on kaupallinen Hydro-STIV niminen ohjelma, jota kehittää Japanissa toimiva Hydro Technology Institute-niminen yritys. Ohjelman lisenssiin liittyy kertamaksu ja vuosimaksu. Tutkimuskäyttöön Hydro-STIV:n saa edullisemmin. Ohjelma oli juuri julkaistu tutkimuksen alkaessa (toukokuu 2020). STIV-menetelmän käyttöön on olemassa myös ilmainen Matlabin lisäosa nimeltä RiVeR-STIV, mutta sen kehitystyö näyttäisi olevan keskeytynyt, eikä sitä nykyisellään kannata käyttää, sillä se on varsin keskeneräisen oloinen ja tuottaa epä johdonmukaisia tuloksia. Taulukkoon 3 on koottu ohjelmistojen keskeiset ominaisuudet ja arvioitu niiden käytettävyyttä.

Taulukko 3: Tiivistelmä ohjelmistoista ja niiden ominaisuuksista. Ohjelmien käytettävyyttä arvioitu välillä (*-*****).

Ominaisuus	STIV		PIVLab	LSPIV	
	Hydro-STIV	RIVeR-STIV		RIVeR	Fudaa-LSPIV
Virtausnopeuden laskenta	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä
Virtaaman laskenta	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Kuvavääristymien korjaus	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Kuvien stabilointi	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Ortorektifointi	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Georeferointi	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Saatavuus	kaupallinen	ilmainen	ilmainen	ilmainen	ilmainen
Käytettävyys	*****	*	****	**	***

5. Tulokset

Kaikki tulokset esitetään ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja N2000-korkeusjärjestelmässä ellei toisin mainita.

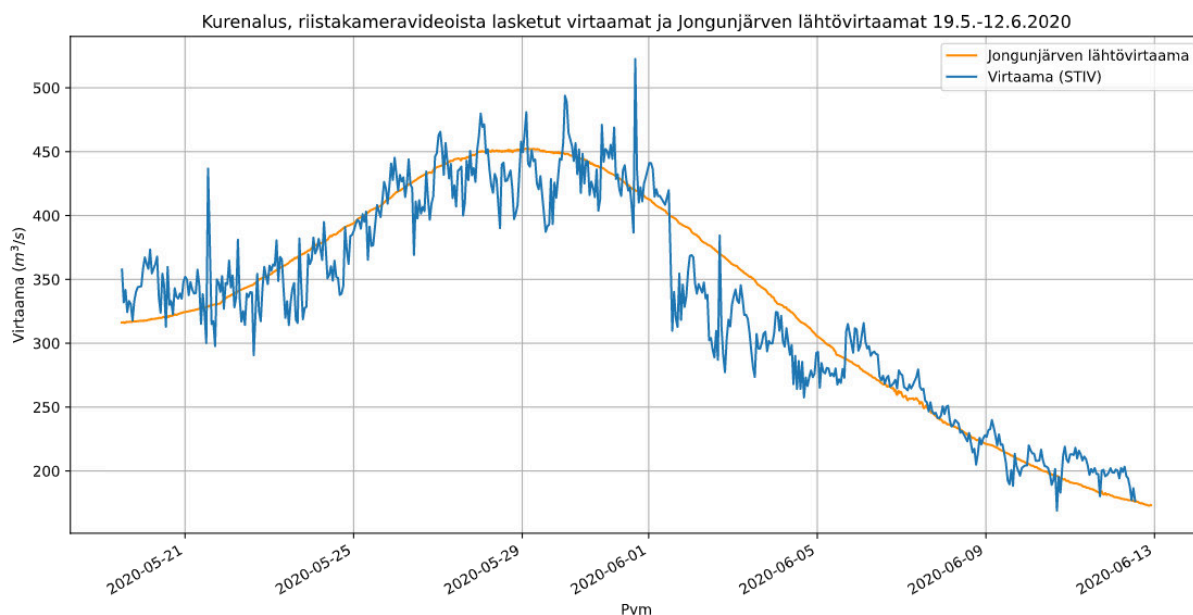
5.1 Tutkimusalue 1: Iijoki, Pudasjärvi

5.1.1 Kurenaluksen tutkimuspaikka

Kurenaluksen tutkimuspaikalta on sekä virtaama-aikasarja koko tutkimusjakson ajalta, että vertailumittaukset ADCP-virtaamamittauksiin kolmelta päivältä.

5.1.1.1 Virtaama-aikasarja (STIV)

Kurenaluksen tutkimuspaikan riistakameran tallentamien videoiden STIV-analysoinnin lopputuloksena saatiin virtaama-arvot tunnin välein koko mittausjakson ajalta. Riistakamerat eivät syystä tai toisesta tallentaneet videoita täysin luotettavasti ja aineistossa on vähäisiä puutteita. Vertaillessa STIV-menetelmällä laskettuja virtaamia Jongunjärven purkautumiskäyrään havaitaan virtaama-arvojen vastaavan hyvin toisiaan (kuva 20). STIV-menetelmällä tuotetun virtaama-aikasarjan voimakas vaihtelu johtuu erinäisistä tekijöistä, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.



Kuva 20: Kurenaluksen tutkimuspaikan riistakameravideoista STIV-menetelmällä tuotettu virtaama-aikasarja koko tutkimusajalta. Vertailuarvona Jongunjärven purkautumiskäyrään perustuva lähtövirtaama.

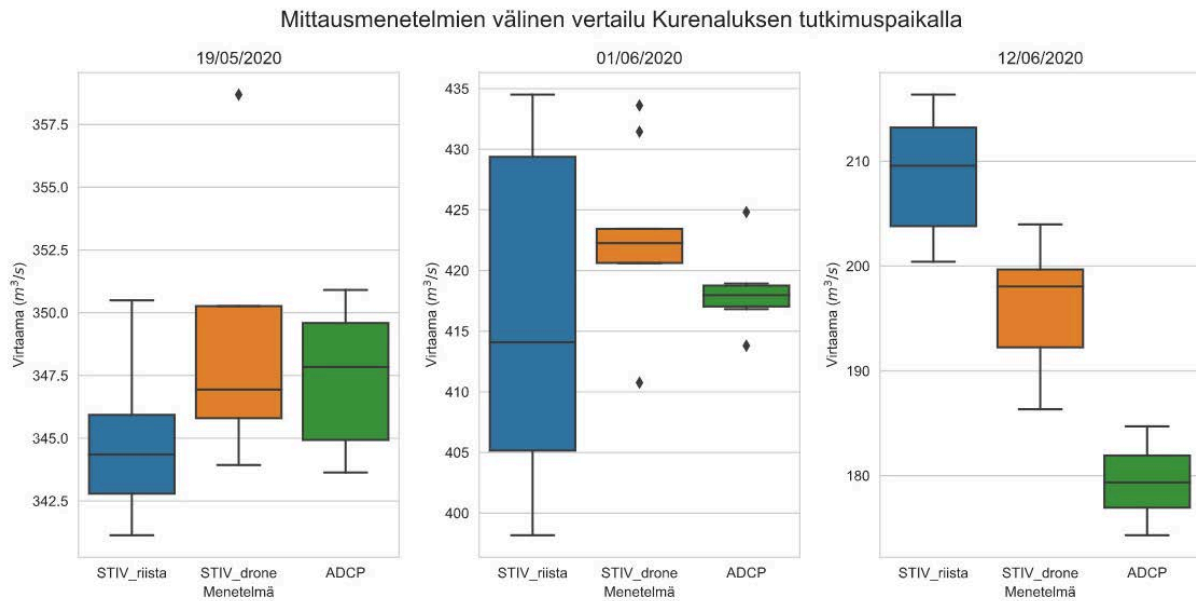
5.1.1.2 Vertailu ADCP-mittauksiin

Aikasarjan lisäksi riistakameravideoista tehtiin tarkempi vertailu ADCP-mittauksien tuloksiin tekemällä analyysit käyttäen samaa vedenkorkeutta usealla saman päivän aikana tallennetuilla videoilla. Analyysien asetukset olivat kaikkien päivien osalta samat. LSPIV-menetelmällä analysoiduissa aineistoissa käytettiin samoja tukipisteitä kuin edellä. Koska LSPIV-analyysien tekeminen on laskennallisesti huomattavasti vaativampaa kuin STIV-menetelmällä eikä analyysien automatisointi ole mahdollista, olisi aikasarjan tuottaminen liian työlästä ja aikaa vievää. Vertailut ADCP- ja STIV-mittauksiin tehtiin kuitenkin virtausnopeuden osalta ja niitä tarkastellaan seuraavassa osiossa. Taulukossa 4 on esitetty ADCP-mittausten tulokset, purkautumiskäyrään perustuvat virtaama-arvot sekä riista- että dronevideoista STIV-menetelmällä tuotetut virtaamatulokset. Kuvassa 21 on tulokset esitettyinä laatikkojana-kuviona, josta mittaustulosten erot tulevat

Taulukko 4: Iijoen Kurenaluksen tutkimuspaikan riistakamera- ja dronevideoista tehtyjen analyysien virtaamatulosten vertailu ADCP-vertailumittauksiin sekä Jongunjärven purkautumiskäyrään. Prosentuaalinen erotus on laskettu suhteessa ADCP-mittaustulokseen.

Päivä	Menetelmä	N	Q (ka)	Q (ero-%)	Q (min)	Q (max)	Q (sd)
19.05.2020	ADCP	6	347,39	-	343,64	350,91	2,72
	STIV (riista)	8	344,92	-0,71	341,14	350,49	3,25
	STIV (drone)	4	349,12	0,50	343,93	358,69	6,55
	Purkautumiskäyrä	-	316,20	-8,98	-	-	-
01.06.2020	ADCP	6	418,39	-	413,80	424,82	3,62
	STIV (riista)	8	416,17	-0,53	434,51	398,18	13,94
	STIV (drone)	9	423,08	1,12	415,99	436,77	6,59
	Purkautumiskäyrä	-	400,40	-4,30	-	-	-
12.06.2020	ADCP	6	179,44	-	174,31	184,70	3,92
	STIV (riista)	8	208,60	16,25	200,41	216,36	6,26
	STIV (drone)	7	196,03	9,24	186,33	203,98	6,15
	Purkautumiskäyrä	-	176,20	-1,81	-	-	-

selkeämmin esille.



Kuva 21: Laatikko-janakuvi virtaamamittaustuloksista eri menetelmillä Kurenaluksen tutkimuspaikalla.

Ennen tulvahuippua (19.05.2020) mittaustulokset menetelmien välillä ovat lähes identtisiä; ADCP:n kuuden mittauksen keskiarvo oli 347,39. STIV-menetelmällä riistakameralla saatiin kahdeksan videon keskiarvoksi 344,92, joka on vain 0,71 % pienempi kuin ADCP-mittausten keskiarvo. Dronevideoista vastaavasti neljän videon keskiarvo oli 0,5 % suurempi 349,12. Purkautumiskäyrään perustuva virtaama-arvo oli edellisiin verrattuna huomattavasti alhaisempi 316,20. Tulvahuipun tienoilla (01.06.2020) ADCP:n kuuden mittauksen keskiarvo oli 418,39 ja kahdeksan riistakameran videon keskiarvo STIV-menetelmällä oli 0,53 % pienempi 416,17. Yhdeksän dronevideon keskiarvo taas oli 423,08, joka on 1,1 % suurempi ADCP-mittausten keskiarvoon verrattuna. Purkautumiskäyrään perustuva virtaama-arvo oli tulvahuipun aikaan selvästi alhaisempi 400,40. Tulvan jälkeen (12.06.2020) mittaustuloksissa on selkeämpi ero, sillä kuuden ADCP-mittauksen keskiarvo oli 179,44 ja kahdeksan riistakameravideon keskiarvo STIV-menetelmällä oli noin 16,2 % korkeampi keskiarvon ollessa 208,6. Seitsemän dronevideon keskiarvo 196,03 oli noin 9,2 % suurempi kuin ADCP-mittausten keskiarvo. Purkautumiskäyrään perustuva virtaama 176,2 vastaa hyvin ADCP-mittaustulosta, mutta eroaa STIV-menetelmillä saaduista virtaamista.

5.1.2 Varpuvirran tutkimuspaikka

Varpuvirran tutkimuspaikalta tehtiin vain ADCP-vertailut. Riistakameran sijoitteluun ja tukipisteisiin liittyvien ongelmien takia aikasarjan tekeminen kävi liian työlääksi tämän tutkimuksen puitteissa. Päiväkohtainen vertailu ADCP-mittauksiin kuitenkin onnistui.

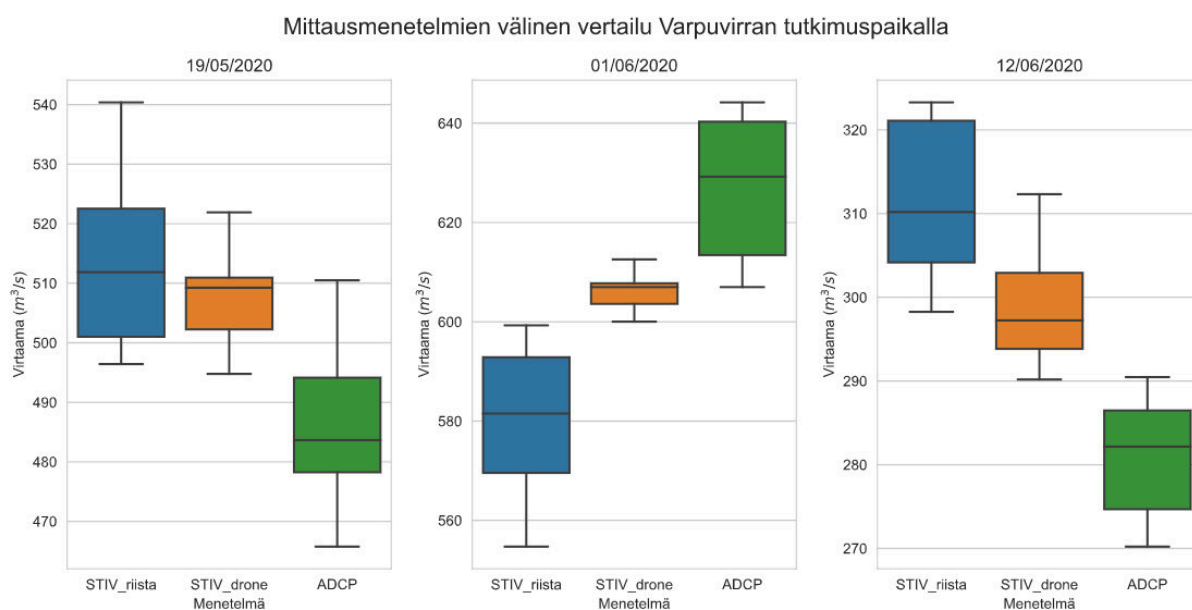
5.1.2.1 Vertailu ADCP-mittauksiin

Vertailussa käytettiin samaa ADCP-mittausten yhteydessä GPS-RTK:lla mitattuja vedenkorkeuksia. Varpuvirralla dronevideoista tehtyjen STIV-analyyysien etsintälinja-asetuksia oli pakko muuttaa päiväkohtaisesti, koska virtausolosuhteet muuttuivat merkittävästi eri virtaamilla ja etsintälinjojen sijoittelua oli muutettava järkevien tuloksen saamiseksi. Taulukossa 5 ja kuvassa 22 on esitetty Varpuvirran tutkimuspaikan ADCP-mittaukset sekä riistakamera- ja dronevideoista STIV-analyyysien tuottamat tulokset.

Taulukko 5: Iijoen Varpuvirran tutkimuspaikan riistakamera- ja dronevideoista tehtyjen analyyysien virtaamatulosten vertailu ADCP-vertailumittauksiin.

Päivä	Menetelmä	N	Q (ka)	Q (ero-%)	Q (min)	Q (max)	Q (sd)
19.05.2020	ADCP	11	486,24		465,76	510,49	12,80
	STIV (riista)	6	514,00	5,71	496,43	540,38	16,80
	STIV (drone)	7	507,47	4,37	494,77	521,91	8,73
01.06.2020	ADCP	6	626,97		606,99	644,20	16,38
	STIV (riista)	5	579,59	-7,56	599,29	554,72	17,94
	STIV (drone)	5	606,20	-3,31	600,04	612,58	4,70
12.06.2020	ADCP	8	280,80		270,22	290,47	7,63
	STIV (riista)	5	311,40	10,90	298,27	323,29	10,74
	STIV (drone)	8	299,46	6,65	290,18	312,32	8,30

Varpuvirralla tulosten hajonta ja erot menetelmien välillä olivat suuremmat kuin Kurenaluksen tutkimuspaikalla, joka tulee hyvin esille laatikko-janakuviossa (kuva 22).

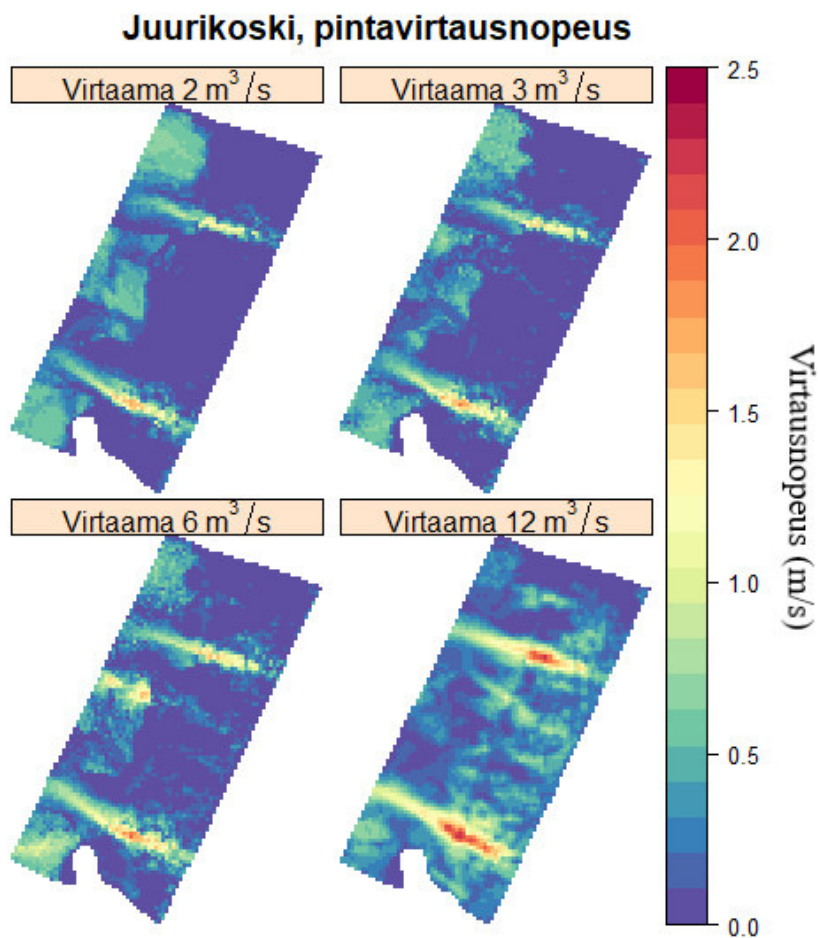


Kuva 22: Laatikko-janakuvio virtaamamittaustuloksista eri menetelmillä Varpuvirran tutkimuspaikalla.

Ennen tulvahuippua (19.05.2020) yhdentoista ADCP-mittauksen keskiarvo oli 486,24 ja keskihajonta 12,80. STIV-menetelmällä kuuden riistakameravideon keskiarvo oli noin 5,7 % suurempi (514,0). Seitsemän dronevideon keskiarvo oli 507,47, joka on noin 4,3 % suurempi kuin ADCP-mittausten keskiarvo. Tulvahuipun aikaan (12.06.2020) kuuden ADCP-mittauksen keskiarvo oli 626,97 ja viidestä riistakameravideosta saatu keskiarvovirtaama oli 579,59, joka on noin 7,6 % pienempi verrattuna ADCP-mittauksiin. Viiden dronevideon keskiarvo oli noin 3,3 % prosenttia pienempi keskiarvon ollessa 606,20. Tulvahuipun jälkeen (12.06.2020) kahdeksan ADCP-mittauksen keskiarvo oli 280,80. Viiden riistakameravideon keskiarvo oli noin 10,9 % isompi verrattuna ADCP-mittauksiin keskiarvon ollessa 311,40. Kahdeksan dronevideon keskiarvo oli 299,46, joka noin noin 6,6 % suurempi kuin ADCP-mittausten keskiarvo.

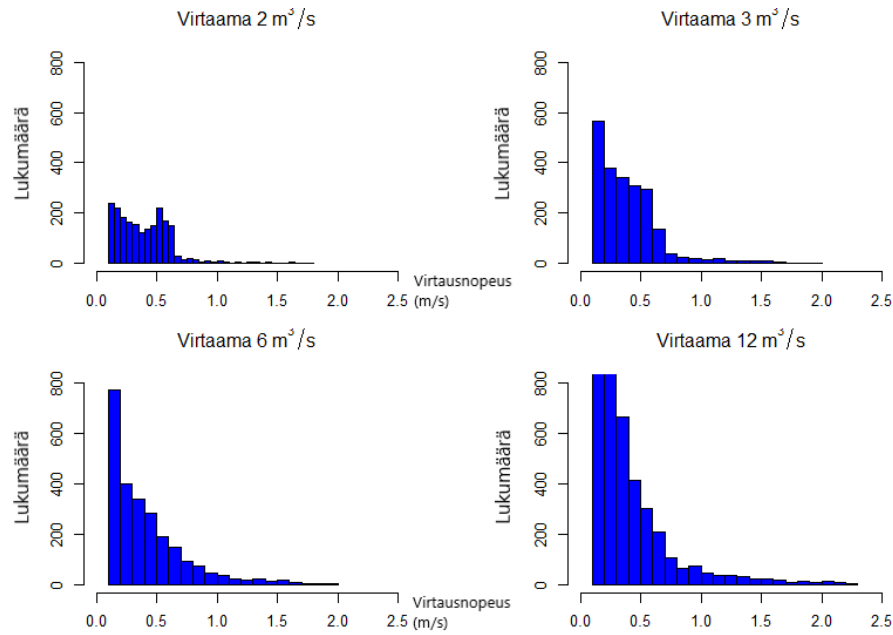
5.2 Tutkimusalue 2: Kalajoki, Ylivieska

Kalajoen aineiston käsittelyä ja soveltamista on tarkoitus jatkaa suunnitteilla olevassa jatkotutkimuksessa ECORIVER-hankkeessa Oulun Yliopistossa ja tässä yhteydessä esitellään alustavia tuloksia. Kalajoella tutkimuskohteena oli Ylivieskan keskustassa sijaitseva Juurikoski. Tavoitteena oli pintavirtausprofiilin määrittäminen koskessa erisuuruisilla virtaamilla. Tutkimuspaikalta noin kilometrin verran ylävirtaan päin sijaitsevalta Hamarinkosken voimalaitokselta juoksutettiin vettä virtaamilla 2, 3, 6 ja 12 m^3/s . Kuvassa 23 on LSPIV-menetelmällä tuotetut pintavirtausnopeuden vaihtelua kuvaavat rasterit eri virtaamilla.



Kuva 23: LSPIV-menetelmällä lasketut pintavirtausnopeudet eri virtaamilla Kalajoen Ylivieskan Juurikoskessa.

Pintavirtausnopeuden vaihtelun perusteella voidaan päätellä, millaiset vaikutukset nopeasti muuttuvilla virtaamilla on kalahabitaatteihin, sillä niissä virtausnopeus on keskeisin muuttuja. Pintavirtausnopeuksista laaditut histogrammit ovat kuvassa 24.



Kuva 24: LSPIV-menetelmällä lasketuista pintavirtausnopeuksista laaditut histogrammit eri virtaamilla Kalajoen Ylivieskan Juurikoskessa.

Histogrammeista nähdään pintavirtausnopeuden luokkien määrät eri virtaamilla kuva-alalla. Pintavirtaushavainnoista poistettiin kaikki alle 0.1 m/s havainnot ennen histogrammien laatimista, sillä menetelmä tuottaa virhearvoja maa-alueilla, sillä tuulen yms. aiheuttama liike tallentuu vektoreina. Maa-alueet voi ennen LSPIV-analyysin tekoa jättää huomiotta analyysissä tekemällä niille maskin kuvaan. Koskialueilla ko. maskin luonti on monimutkaista, joten virhearvoja poistettiin jälkikäteen.

6. Tulosten tarkastelu ja pohdinta

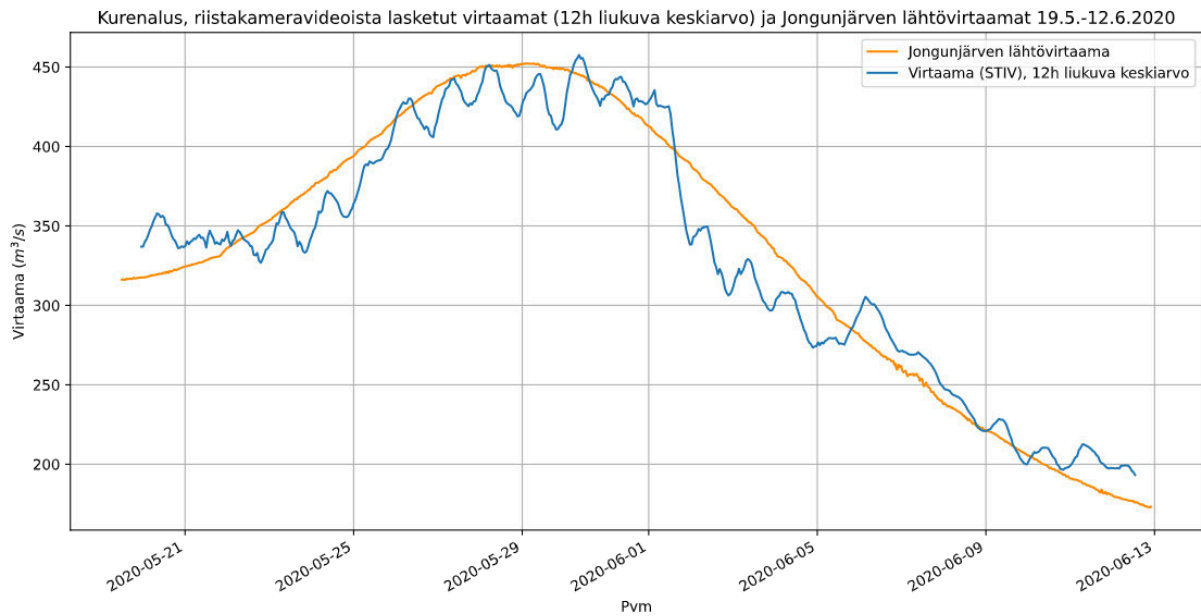
Tuloksia arvioitaessa on otettava huomioon, että vertailuarvoina käytettyjen virtaama-arvojen mittaamiseen käytetty ADCP-menetelmä on myös altis virheille ja eri menetelmien vertailu on haastavaa eikä tuloksia ole mielekästä verrata suoraan keskenään. Uuden menetelmän käyttökelpoisuutta arvioitaessa on oleellista keskittyä sen tuottamien tulosten edustavuuteen ja mittausten toistettavuuteen.

6.1 Tutkimusalue 1: Iijoki, Pudasjärvi

6.1.1 Virtaama-aikasarja

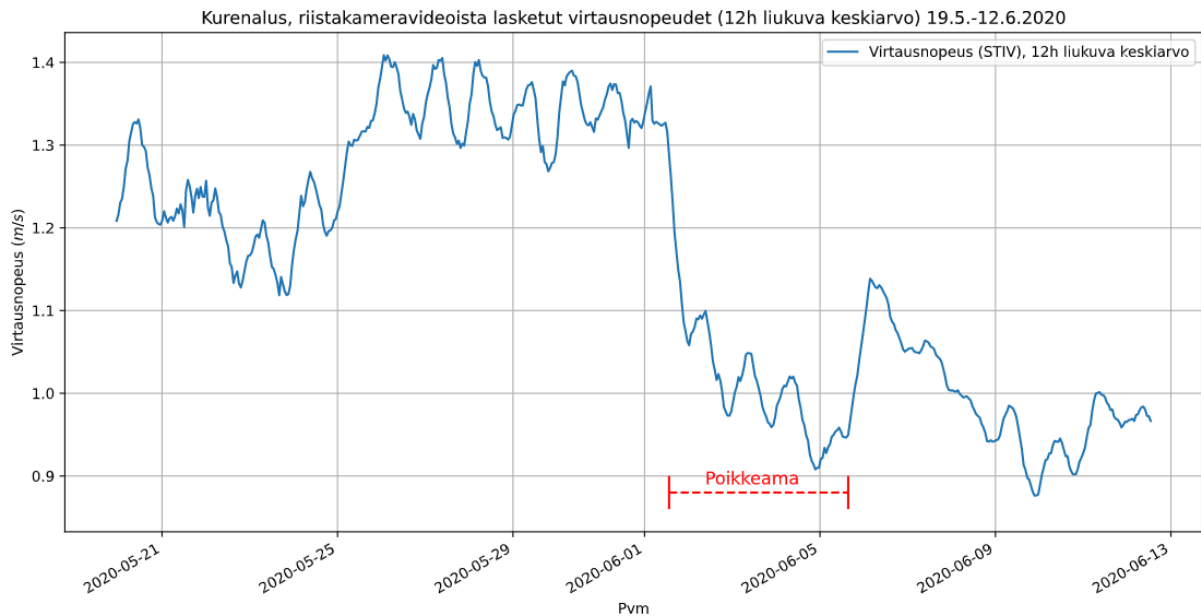
Hydro-STIV ohjelmalla on mahdollista tehdä analyyskejä sarjana usealle kiinteästi asennetulla kameralla kuvatuille videolle eri vedenkorkeuksilla. Aikasarja tehtiin kaikista ajanjaksolla riistakameralla tallennetuista videoista (571 videoita). Koko mittausajalta tehty virtaama-aikasarja Kurenaluksen tutkimuspaikalta vastaa hyvin Jongunjärven lähtövirtaamaa, lukuun ottamatta muutamaa poikkeuksellisen korkeaa virtaama-arvoa.

Aikasarjassa on kuitenkin havaittavissa kaksi mielenkiintoista seikkaa. Ensinnä aikasarjassa on erikoinen poikkeama 1.6. jälkeen, jolloin virtaamat laskevat lyhyessä ajassa poikkeuksellisen paljon verrattuna Jongunjärven purkautumiskäyrästä johdettuihin virtaama-arvoihin. Virtaamat vastaavasti näyttävät nousevan 5.6. jälkeen takaisin alkuperäiselle tasolle. Edellän mainitun poikkeaman lisäksi aikasarjasta on havaittavissa jonkinlaista syklisyyttä. Tarkastellessa virtaama-aikasarjaa 12 tunnin liikkuvan keskiarvon perusteella virtaama-arvot näyttäisivät vaihtelevan yön ja päivän välillä (kuva [25](#)).



Kuva 25: Kurenaluksen tutkimuspaikan virtaama-arvojen 12 tunnin liukuva keskiarvo ja painesensorin mittaama vedenkorkeus. Virtaama-arvoissa näyttäisi olevan vuorokauden aikana tapahtuvaa syklisyyttä. Vedenkorkeudessa samaa syklisyyttä ei ole nähtävissä.

Aikasarjassa havaittu syklisyys voisi olla seurausta lumen sulamisnopeuden vaihtelusta, joka vaihtelee lämpötilan mukaan. Lämpötilan noustessa päiväsaikaan sulaminen kiihtyy, joka näkyy viiveellä kohonneessa virtaamassa yöaikaan (Gribovszki, Szilágyi & Kalicz 2010). Vastaavasti yöllä lämpötilan laskiessa sulaminen hidastuu ja virtaamat päiväsaikaan pienenevät hieman. Vastaava syklisyys ei näy Jongunjärven vertailuaineistossa, koska purkautumiskäyrään perustuvat virtaamahavainnot lasketaan vedenkorkeuden perusteella, eivätkä siten ole suoria havaintoja. Syklisyys ja poikkeama tulevat vielä selvemmin esille virtausnopeuksia tarkastellessa (kuva 26).



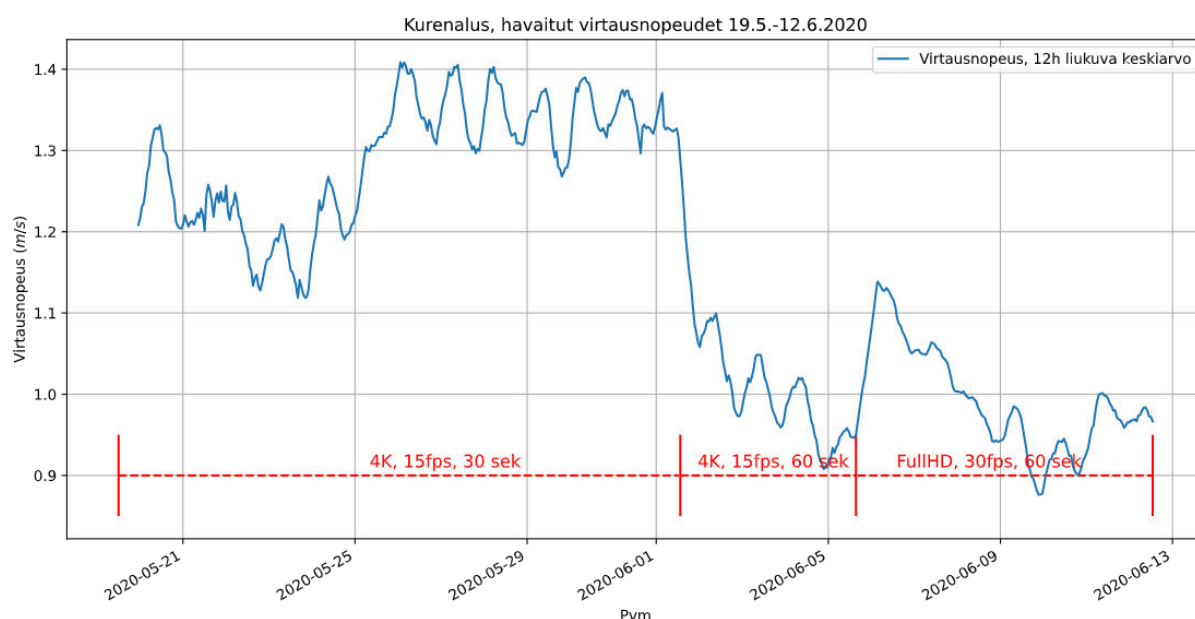
Kuva 26: Kurenaluksen tutkimuspaikan virtausnopeusarvojen 12 tunnin liukkuva keskiarvo. Aikasarjassa näyttäisi olevan selkeää vuorokauden aikana tapahtuvaa syklisyyttä. Huomattava poikkeama virtausnopeuksissa 1.6. ja 5.6. välillä tulee myös selvästi esille virtausnopeuksia tarkastellessa.

Poikkeama ilmenee selvästi alempina virtausnopeuksina. Virtaaman syklisyys taas näyttäisi aiheutuvan pelkästään virtausnopeuden vaihtelusta vuorokauden aikana, sillä tutkimuskohteesta mitatuissa vedenkorkeusarvoissa samanlaista syklisyyttä ei ole nähtävissä (kuva 15). Kurenaluksen tutkimuskohteelta heti alajuoksulle päin oleva Pudasjärvi saattaa tasata vedenkorkeuden vaihtelua ja siten virtaaman vaihtelu johtuisi ainoastaan virtausnopeuden vaihtelusta. Virtaama-aikasarjan syklisyys saattaa toisaalta osittain johtua myös kameran liikkeestä aiheutuvasta vaihtelusta. Seuraavissa osioissa tutkitaan virtausnopeuksissa havaittua poikkeamaa sekä syklisyyttä erikseen.

6.1.1.1 Virtausnopeuspoikkeama: kameran muuttuvat asetukset

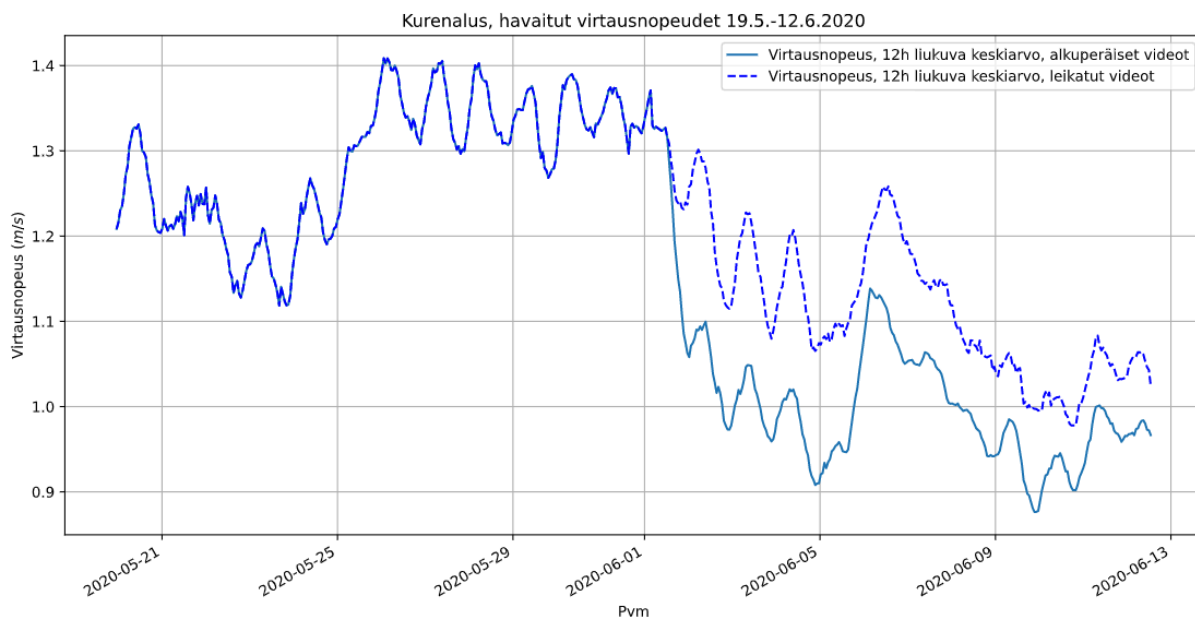
Tarkastellessa virtausnopeuden 12 tunnin liukkuvaa keskiarvoa (kuva 27), on aikasarjasta nähtävissä selvät poikkeamat virtausnopeuksissa päivien 1.6.2020 ja 5.6.2020 kohdalla, jotka johtunevat kameran asetusten muutoksesta, sillä ne eivät selity hydrologilla tekijöillä. 1.6.2020 videoiden pituus nostettiin 30 sekunnista 60 sekuntiin, joka aiheuttaa merkittävän laskun keskimääräisissä virtausnopeuksissa. Poikkeama liittyy kuvausteknisiin seikkoihin, sillä STIV-menetelmän teorian perusteella virtausnopeuksien pitäisi olla eri pituisillakin videoilla likimain samaa luokkaa. 5.6.2020 kohdalla resoluutiota pienennettiin 4K:sta FullHD:ksi, jolloin virtausnopeudet näyttäisivät taas nousevan poikkeuksellisesti. Tässä työssä käytetyssä riistakamerassa resoluution muutos on toteutettu siten, että pienemmällä resoluutiolla kamera käyttää vain osaa kameran sensorista, jolloin kuva muodostuu kuperan linssin keskiosasta tulevasta valosta, jossa valo taittuu vähemmän ja vääristymät vähenevät (vrt. liitteet 46 ja 47). 4K-resoluution kuvissa on

havaittavissa voimakasta tynnyrivääritystä, joka on tyypillisesti laajakulmaisille kalansilmätyyppisille linssille. Vaikka kuva sidotaankin fyysiseen maailmaan tukipisteiden avulla niin menetelmät eivät huomio kuvaväärityksiä millään tavalla ja olettavat kuvamateriaalin olevan rektilineaarista (suorakulmaista), joten kuva-alan keskellä laajentuneet pikselit saattavat merkittävästi vähentää sitä matkaa, jonka virtaus kulkee pikseleissä laskettuna ja reunoilla vastaavasti lisätä. Väärityksen seurauksena molempien menetelmien kuva-analyyysien perusteella lasketut virtausnopeudet olisivat kuva-alan keskiosassa liian matalia ja reunoilla liian korkeita todelliseen virtausnopeuteen verrattuna. Vääritymä voisi selittää eron keskimääräisissä virtausnopeuksissa 4K- ja FullHD-resoluutioiden välillä sekä 30 sekunnin ja 60 sekunnin videoiden välillä.



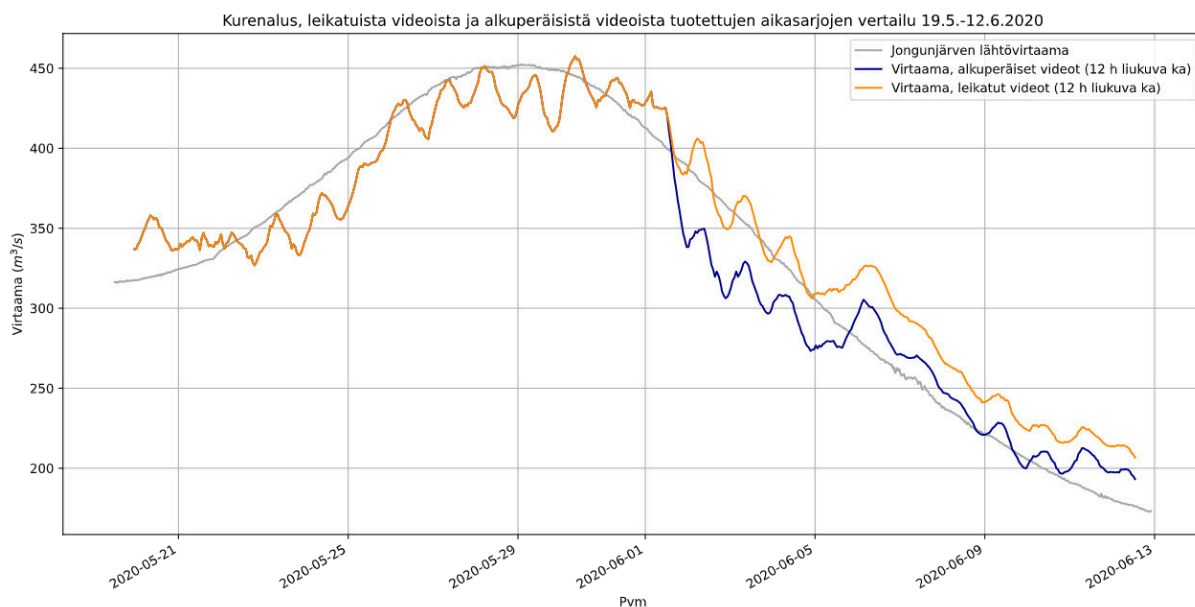
Kuva 27: Virtausnopeuden 12 tunnin liikkuvan keskiarvon kuvaajassa on havaittavissa selkeä poikkeama 1.6. alkaen, jolloin virtausnopeudet putoavat merkittävästi. Virtausnopeudet vastaavasti nousevat 5.6. Poikkeama johtunee riistakameran muuttuvista videoasetuksista.

Leikkaamalla kaikki videot 30 sekunnin mittaisiksi ja tekemällä vastaava aikasarja uudelleen huomataan keskimääräisten virtausnopeuksien olevan merkittävästi korkeampia poikkeaman kohdalla eli 1.6. jälkeen (28). Tämän perusteella voidaan päätellä 60 sekunnin videoiden tuottavan merkittävästi pienempiä virtausnopeuksia. Ero 4K-videoiden välillä on hieman suurempi kuin FullHD-videoiden. Eroon virtausnopeuksissa ei löydy yksiselitteistä syytä; STIV-menetelmän teorian perusteella virtausnopeuksien pitäisi olla samaa luokkaa eri pituisilla videoilla. On todennäköistä, että ero liittyy riistakameran voimakkaaseen linssivääritykseen, sillä dronevideoissa samaa eroa virtausnopeuksissa ei ollut havaittavissa eri pituisilla videoilla.



Kuva 28: Leikattujen videoiden virtausnopeuden 12 tunnin liikkuvan keskiarvon perusteella virtausnopeuksissa on merkittävä ero eri pituisten videoiden välillä. STIV-menetelmän teorian perusteella eron ei pitäisi olla näin suuri.

Vertaamalla leikatuista videoista tehtyä virtaama-aikasarjaa Jongunjärven vertailuaineistoon, havaitaan poikkeaman kadonneen ja käyrän istuvan siltä osin paremmin vertailuaineistoon (kuva 29). Kuitenkin edelleen on havaittavissa 5.6. erikoinen nousu virtaamissa, joka saattaa johtua resoluution muutoksesta. Resoluution muutoksen seurauksena kuvavääristymät vähenevät, joten myös tämä poikkeama saattaa liittyä linssivääristymiin.



Kuva 29: Leikatuista videoista tehty virtaama-aikasarja. Havaittu poikkeama 1.6.-5.6. ei ole enää nähtävissä, joten videon pituudella näyttää olevan merkittävä vaikutus virtausnopeuksiin ja siten myös virtaamiin. STIV-menetelmän teorian perusteella tulosten pitäisi olla samaa luokkaa, joten ero johtunee kuvausteknisistä seikoista.

6.1.1.2 Syklisyys: kameran liike

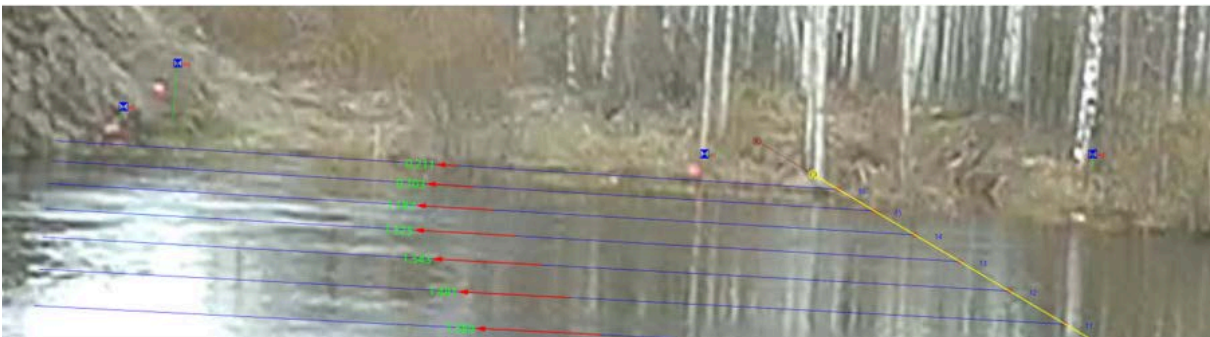
Vaikka riistakamera oli tukevasti asennettu niin videota tarkastellessa havaitaan, että se pääsi liikkumaan vähän. Liike on todennäköisesti seurausta ympäristöolosuhteiden vaihteluista vuorokauden aikana. Kameran liike vaikuttaa virtaama-arvoihin, koska usean videon analyysi tehdään asettamalla tukipisteet ja muut asetuksen sarjan ensimmäiselle videolle. Sarjan muissa videoissa ainoastaan vedenkorkeuden arvo muuttuu ja muut asetukset pysyvät samoina. Siksi ensimmäisen videon perusteella asetetut tukipisteet vaeltavat kameran liikkeen mukana sarja-analyyseissä. Tekemällä videoista otetuista kuvakaappauksista komposiittikuvan, voi liikkeen määrää havainnoida (kuva 30). Komposiittikuvasta on selvästi nähtävissä kameran liikkeen aiheuttama sumeus. Vaikka kameran liike on vähäistä, niin liikkeen vaikutus moninkertaistuu suhteessa kamerasta kauimpana oleviin vastarannan tukipisteisiin. Tukipisteiden liikkeen vaikutusta voi arvioida tekemällä analyysin väärin sijoitetuilla tukipisteillä. Erityisesti ylös- ja alaspäin tapahtuva liike aiheuttaa vesipinnan muutoksen suhteessa poikkileikkaukseen, jolloin analyysissä saadut virtaamat muuttuvat (kuvat 31 ja 32).



Kuva 30: 19.5.-25.6.2020 otetuista videokuvakaappauksista tehty komposiittikuva, jossa on selvästi havaittavissa kameran liikkeen aiheuttamaa sumuisuutta.



Kuva 31: Esimerkki analyysistä 19.05.2020 Kurenaluksen tutkimuspaikalla kuvatusta riistakameravideoista, joissa tukipisteet on sijoitettu oikein. Analyysin tuloksena saatu virtaama on noin $350 \text{ m}^3/\text{s}$.



Kuva 32: Edellisen kuvan analyysi väärin sijoitetuin tukipistein. Tukipisteiden liike pystysuunnassa aiheuttaa huomattavaa virhettä virtaamiin, koska oletettu vesipinta liikkuu tukipisteiden mukana, jolloin virtaamat ovat liian suuria (tukipisteet liian ylhäällä) tai liian pieniä (tukipisteet liian alhaalla) jokaisessa pystyvertikaalissa. Liian ylös sijoitetuilla tukipisteillä analyysin tuloksena saatu virtaama on noin $312 \text{ m}^3/\text{s}$.

Riistakameran voimakas linssivääristymä lisää kameran liikkeen mukana vaeltavista tukipisteistä aiheutuvan virheen satunnaisuutta virtaama-aikasarjassa, sillä kuperasta linssistä johtuen kameran liikkeen aiheuttama muutos kuva-alan eri osissa on eri suuruista. Laajakulmaisille linssille tyypillinen ns. tynnyrivääristymä (barrel distortion) aiheuttaa kuvapikselien muodonmuutosta, jonka seurauksena pikselien koko vaihtelee kuva-alan eri osissa. Tukipisteiden liikkeen aiheuttama virhe virtaamiin oli suurimmillaan kuvien 31 ja 32 luokkaa, eli noin 10 %. Kameran liikkeen vaikutuksen voi poistaa stabiloimalla videoiden välillä tapahtuva liike. Stabiloinnin voi tehdä manuaalisesti videokäsittelyohjelmalla, mutta satojen videoiden käsittelyyn kannattaa hyödyntää konenäköä.

6.1.1.3 Syklisyys: kameran liikkeen vaikutus virtaama-aikasarjaan

Kuvastabilointi on keskeinen tutkimusaihe konenäön (computer vision) tutkimuskentällä (Szeliski 2010). Kuvastabiloinnilla tarkoitetaan ei-toivotun liikkeen vaikutuksen poistamista kuva-sarjasta (Rodriguez-Padilla ym. 2019). Stabiloinnilla voidaan poistaa yksittäisen videon aikana

tapahtuva tai videoiden välillä tapahtuva liike. Kuvien stabilointi voi perustua kuvien välillä tapahtuvan liikkeen laskemiseen konenäkömenetelmillä kuvien perusteella tai mittaamalla kameran liikettä tutkimuksen aikana ja jälkikäsittelemällä videot mitatun liikkeen perustella. Kuvien perusteella tehtävä stabilointi toteutetaan kohdistamalla kaikki kuvat joidenkin kuva-alla olevien kiintopisteiden suhteen (Blois ym. 2016; Le Boursicaud ym. 2016). Yksittäisen videon aikana tapahtuva liike on huomattavasti helpompi poistaa kuin videoiden välillä tapahtuva liike, koska yhden videon aika valaistus- ja sääolosuhteet pysyvät yleensä muuttumattomina. Videoiden välillä muuttuva valaistus tai sääolosuhteet vaikeuttavat stabiloinnin kannalta keskeisten yhteneväisyyksien löytymiseen kuvien väliltä. Stabilointiin on olemassa monia valmiita algoritmeja, jotka perustuvat konenäköön. Algoritmit etsivät kuvista kiintopisteitä, jotka pysyvät yhteneväisinä kuvien välillä ja joita voi käyttää kuvien kohdistamiseen. Kahdessa ulottuvuudessa (X- ja Y-suuntaisen) tapahtuvan liikkeen poistaminen on kohtalaisen yksinkertaista (Detert & Weitbrecht 2015; Tauro, Porfiri & Grimaldi 2016). Monimutkaisemman liikkeen poistaminen olisi myös mahdollista, mutta huomattavasti herkempi virheille muuttuvissa sää- ja valaistusolosuhteissa (Blois ym. 2016)).

Vaikka monissa ohjelmissa on valmiina stabilointiominaisuudet (Fudaa-LSPIV, RIVeR, useimmat videoeditorit), on kymmenien tai jopa satojen videoiden stabilointi työlästä ilman jonkinlaista automatisointia. Nämä valmiit stabilointimenetelmät sopivat vain yksittäisen videon aikana tapahtuvan liikkeen stabilointiin, eivätkä niinkään videoiden välillä tapahtuvan liikkeen poistamiseen. Tässä työssä videosarjan stabilointiin sovellettiin avoimen lähdekoodin OpenCV-konenäkökirjastoa (*OpenCV 2020*), jota voi käyttää sekä C++, että Python-ohjelmointikielien avulla. OpenCV sisältää useita valmiita algoritmeja, jotka tunnistavat kuvista joitakin korkea kontrastierojen alueita tai muita kiintopisteitä, joiden avulla kuvien välillä tapahtuvaa liikettä lasketaan. Menetelmästä riippuen kuvasarjoista voidaan poistaa 2-ulotteinen liike (vaaka- ja pystysuuntainen liike sekä kiertoliike) tai 3-ulotteinen liike, jossa lasketaan lisäksi perspektiivin muutos. Algoritmit muodostavat kiintopisteiden siirtymän perusteella joka kuvalle muutosmatriisin, jolla kuvapikseleitä siirretään ja skaalataan siten, että kuvat kohdistuvat suhteessa toisiinsa. Käsittelemällä videon kaikki kuvat saadaan kameran liike minimoitua tai kokonaan poistettua.

Riistakameravideot käsiteltiin prosessina siten, että ne purettiin ensin kuviksi ja jokaisen videon ensimmäistä kuvaa käytettiin kameran liikkeen laskennassa suhteessa vertailukuvaan, joka oli kameran asennon suuremman muutoksen jälkeen kuvatun videosarjan ensimmäisestä videosta. Kameran asennuksesta johtuen kameran asemointi muuttui jonkin verran muistikortin ja akkujen vaihdon yhteydessä, joten aikasarja jaettiin viiteen erikseen stabiloitavaan sarjaan (19.5.-25.5., 25.5.-01.06., 1.6.-5.6.2020, 5.6.-10.6. ja 10.6.-12.6.). Vertailukuvat ja kaikkien videoiden ensimmäiset kuvat muokattiin siten, että muuttuvan valaistuksen vaikutukset saadaan minimoitua; kuvat muunnettiin mustavalkoisiksi ja käsiteltiin ns. Canny-edge algoritmilla (Canny edge detector, Canny 1986), joka tuo esiin kuvista kiintopisteiksi soveltuvia kohtia, kuten kulmia ja muita muotoja. Kiintopisteiden tunnistamiseen käytettiin Shi-Tomasi kulmantunnistusalgoritmia (Jianbo Shi & Tomasi 1994) ja kiintopisteiden liikettä kuvien välillä arvioitiin Lukas-Kanade

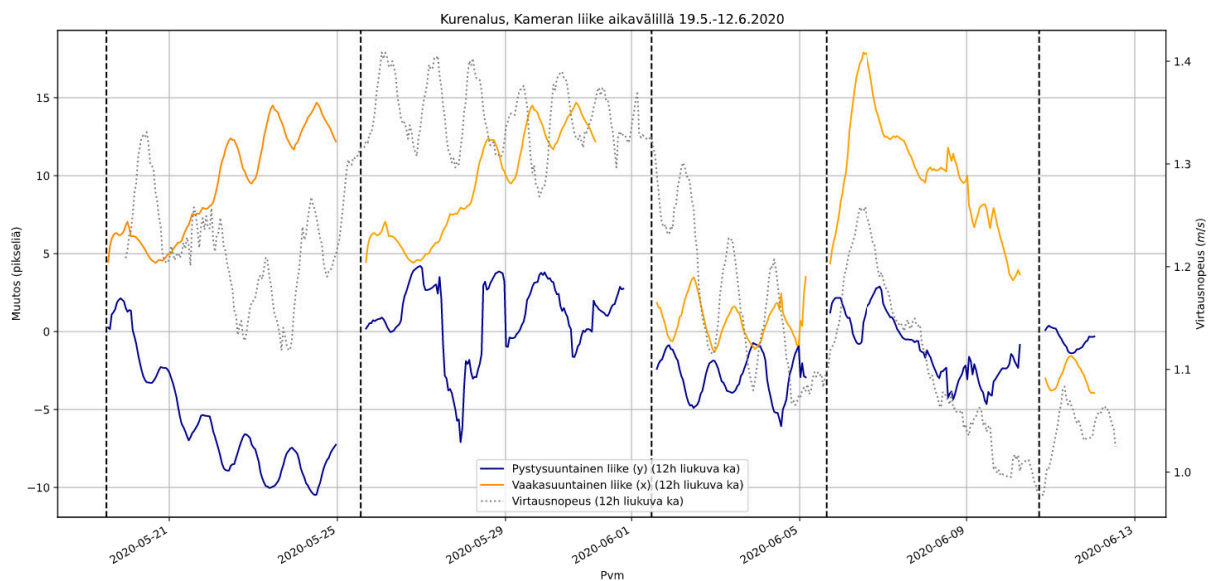
algoritmillä (Lucas & Kanade 1981), joka tunnistaa kiintopisteet ja laskee niiden siirtymän kuvaparien välillä. Siirtymää arvioitiin ainoastaan kaksiulotteisena. Lasketun siirtymän avulla algoritmi luo muunnosmatriisin, jonka avulla jokainen videon kuva saadaan siirrettyä kohdistettua suhteessa vertailukuviin.

Riistakameravideoiden stabilointi onnistui kohtuullisen hyvin. Kuvassa 33 on edellä kuvailun stabilointiprosessin jälkeen tehty komposiittikuva, jossa kameran liike videoiden välillä on minimoitu aikavälillä 19.5.-25.6.2020. Kuvassa on silti nähtävissä lievää sumeutta. Kevään edetessä kasvillisuuden muutos aiheutti selvästi virheitä yhteneväisyyksien löytymiseen kuvien väliltä myöhemmissä videoissa. Riistakameravideoiden voimakkaasta linssivääristymästä johtuen kaikkea liikettä videoiden välillä on vaikea saada poistettua, sillä vääristymän takia liikkeen määrä on eri suuruista kuva-alan eri kohdissa. Lisäksi kameran liikettä arvioitiin ainoastaan kaksiulotteisena, joka todettiin riittäväksi tässä yhteydessä koska kameran liike on niin vähäistä. Todellisuudessa muutos on kolmiulotteista, mutta muuttuvan perspektiivin korjaus on huomattavasti monimutkaisempi ja virhealttiimpi prosessi. Käsitellyt kuvat pakattiin uudelleen videoksi samalla kuvataajuudella kuin alkuperäiset videot.



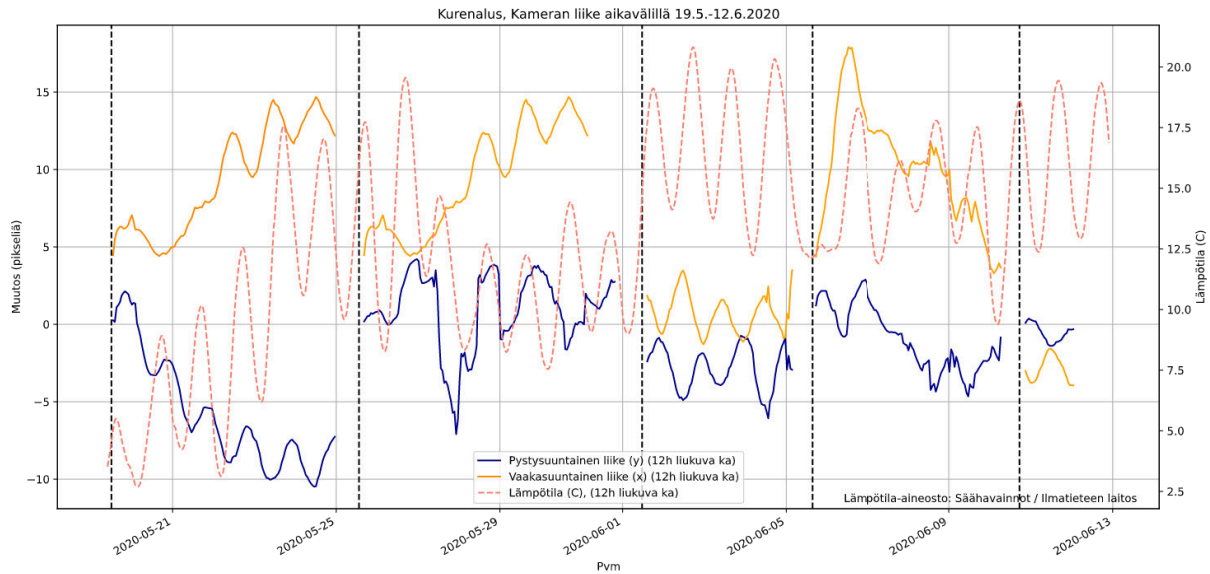
Kuva 33: Stabilointiprosessin jälkeen videoista tuotettu komposiittikuva. Kuvan sumeus on selvästi vähäisempää eli kameran liike videoiden välillä saatiin minimoitua. Kuvassa näkyvät vihreät pisteet kuvaavat kameran liikettä ja siniset pisteet tukipisteiden sijaintia.

Riistakameran liikkeen määrää voi visualisoida muunnosmatriisin antamalla arvoilla, jotka edustavat kuvan siirtymistä x- ja y- akselilla pikseleinä. Tarkastelemalla arvoja suhteessa virtausnopeuteen (kuva 34), kameran liikkeessä on havaittavissa vuorokauden aikana tapahtuvaa syklisyyttä sekä videosarjan aikana tapahtuvaa pidemmän ajan trendiä. Syklisyys vastaa hyvin alkuperäisen aikasarjan syklisyyttä. Kuvapikselikoordinaatisto alkaa kuvan vasemmasta yläreunasta, jossa x-akseli edustaa kuvan leveyttä ja y-akseli korkeutta pikseleinä. Arvot kasvavat liikkessa kuva-alalla oikealla (x) ja alas (y). Koska muunnosmatriisi antamat arvot kuvaavat pikselimääriä jolla kuva saadaan kohdistettua suhteessa vertailukuvaan, voidaan kameran liikettä kuvaavan kuvaajan perusteella päätellä kameran liikkuneen alas ja vasemmalle. Kameran kallistuskulmasta johtuen kameran liikkessa alas, aiheutti se kuvassa myös vaakasuuntaista liikettä vasemmalle. Liikkeen syklisyys saattaa johtua lämpötilan ja kosteuden vaihteluista vuorokauden aikana. Kamera oli kiinnitetty sillan kaiteen pystypilariin puisella parrulla, johon oli ruuvein kiinnitetty metallinen kulmarauta. Kamera oli kiinnitetty kulmarautaan kameran pohjassa olevan tavallisella kameraruuvilla. Puu ja metalli elävät jonkin verran lämpötilan ja kosteuden mukaan, joka saattaisi selittää kameran liikkeen.



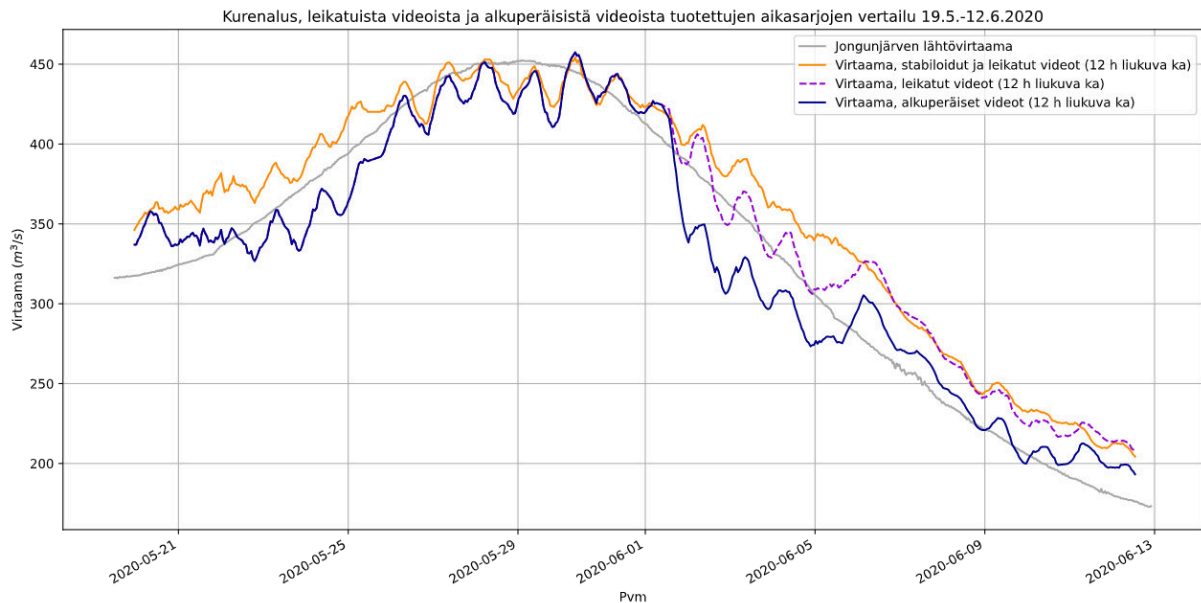
Kuva 34: Kurenaluksen tutkimuspaikan riistakameran liikettä havainnoiva kuvaaja. Kuvaajat edustavat vaaka- ja pystysuuntaista liikettä suhteessa videosarjan ensimmäiseen kuvaan. Pystysuuntaiset katkoviivat kuvaajassa osoittavat stabiloitavien videosarjojen alkukohtia, jolloin kameran liike nollaantui eli videosarja ja siten myös vertailukuva vaihtuivat. Pysty- ja vaakasuuntaisen liikkeen perusteella kamera on liikkunut samanaikaisesti alas ja vasemmalle.

Vertaamalla kameran liikettä ja Pudasjärven lämpötilahavaintoja (kuva 35), nähdään että kameran liikkeen syklisyys seuraa lämpötilan vuorokauden aikaista vaihtelua. Lisäksi nähdään, että kun lämpötilan vaihtelu pysyy tasaisempuna, liikkuu kamera myös vähemmän.



Kuva 35: Kurenaluksen tutkimuspaikan riistakameran liikettä havainnoiva kuvaaja sekä Pudasjärven lämpötilahavainnot.

Stabiloidusta videosarjasta tehty virtaama-aikasarja on kuvassa 36. Stabiloidussa aikasarjassa käytettiin leikattuja videoita. Alkuperäisellä videoaineistolla tuotettu virtaamien syklisyys on edelleen havaittavissa, mutta syklien ääriarvot ovat hieman tasoittuneet. Virtausnopeuspoikkeama näyttää hävinneen ja lisäksi leikatuista videoista tehdyssä aikasarjassa virtausnopeuksissa havaittu poikkeama 5.6. kohdalla näyttää myös tasoittuneen stabiloidussa aineistossa. Keskimäärin virtaamat ovat suurempia veden nousu- ja laskuvaiheessa. Ero virtaama-arvoissa voisi selittyä kameran liikkeen kuvaajassa havaittavissa trendissä, jonka perusteella kamera näyttäisi hiljalleen laskevan ajan myötä. Aikasarjan alussa arvot ovat hyvin samansuuruiset, mutta kameran laskun seurauksena kussakin analyysissä tukipisteet siirtyvät alaspäin, joka siirtää etsintälinjoja sekä vesipintaa aina jonkin verran alaspäin. Alaspäin tapahtuvan liikkeen seurauksena lasketut virtaama-arvot ovat liian pieniä ja ero kasvaa ajan myötä eli kameran liikkeen mukana. Vastavasti tulvahuipun aikaan (1.6.2020) erot aineistojen välillä ovat pieniä, koska lämpötilan vaihtelu oli vähäistä ja kameran liike pysyivät tasaisena. Näiden havaintojen perusteella voisi virtaama-aikasarjassa havaitun syklisyyden olettaa johtuvan enimmäkseen hydrologisista tekijöistä, eli lumen sulamisen ja uomaan tulevan vesimäärän syklisyydestä. Kameran vuorokauden aikainen liike korostaa syklisyyden ääriarvoja ja laskee virtaama-arvoja keskimäärin 5-10 %.



Kuva 36: Stabilointiprosessin jälkeen tuotetun Kurenaluksen virtaama-aikasarjan, alkuperäisen aikasarjan ja leikatuista videoista tehdyn aikasarjan vertailu. Stabiloinnin jälkeen virtaamien syklisyys on edelleen havaittavissa, mutta syklisyys on vähemmän voimakasta ja virtaamien arvot ovat keskimäärin suurempia kuin alkuperäisessä aineistossa.

6.1.2 ADCP vertailumittaukset

Tässä osiossa tarkastellaan menetelmien eroja suhteessa ADCP-mittauksiin. Virtaamien laskemisen LSPIV-menetelmällä osoittautui liian työlääksi nykyisillä ohjelmistoilla ja tulosten tarkastelu keskittyy menetelmien tuottamiin eroihin virtausnopeuksien suhteen tutkimuspaikoilla. Virtausnopeuden perusteella voidaan päätellä myös eroja virtaamissa, koska molemmissa menetelmissä virtaama lasketaan samalla tavalla.

6.1.2.1 STIV - Kurenalus

Verrattaessa STIV-menetelmällä Kurenaluksen riistakameravideoista saatuja virtaamatuloksia ADCP-mittauksiin ja purkautumiskäyrän arvoihin havaitaan niiden olevan samaa luokkaa, paitsi 12.6.2020 osalta, jolloin STIV-menetelmä tuotti keskimäärin huomattavasti korkeampia virtaamia (+16,25%). Vertailu tehtiin tekemällä STIV-analyysit useasta ADCP-mittauspäivänä kuvatuista videoista käyttämällä jokaisessa analyysissä samaa vedenkorkeutta, joka mitattiin ADCP-mittauksen yhteydessä GPS-RTK:lla. Vaikka todellisuudessa vedenkorkeus nousi tai laski päivän aikana, on muutos vuorokauden aikana niin hidasta ja vähäistä ettei se vaikuta merkittävästi vertailuanalyysiin. Analyysissä käytetyt asetukset olivat muilta osin identtiset. STIV-menetelmän tuottamien virtaama-arvojen suurempi keskihajonta saattaa johtua siitä, että riistakameravideot on kuvattu tunnin välein ja virtaama saattaa vaihdella jonkin verran ajan myötä kuten aikasarjan syklisyydestä havaittiin. Ero virtaamissa 12.6. päivän osalta voi selittyä myös sillä, että tilaustyönä ostetun ADCP-mittauksen tarkka paikka ei ole tiedossa kyseisen päivän

osalta, joten ADCP-mittaus itsessään ei välttämättä ole edustava kyseiselle tutkimuspaikalle. Toisaalta taas purkautumiskäyrän antama virtaama ja ADCP-mittaus täsmäävät hyvin, joten STIV-menettelmän tuottama virtaama voi olla väärä. Mittauspäivänä oli voimakas auringonpaiste joka loi vesipintaan heijasteita. Heijasteet ja hyvin tasainen vesipinta ovat saattaneet aiheuttaa virhettä analyyseissä. Riistakameran videoiden ja ADCP-mittausten vertailussa olisi kannattanut kuvata videoita samaan aikaan useita, kuten dronella tehtiinkin.

Dronella kuvatuista videoista STIV-menettelmällä tehdyt analyysit täsmäävät hyvin ADCP-mittausten kanssa ja hajonta on vähäistä, paitsi edellä mainitun samaisen 12.6. päivän osalta, jolloin ero menetelmien välillä on noin 9%. Dronevideoista saadut tulokset lienevät edustavampia itse menetelmän tuottamien tuloksien arvioinnissa, koska niihin ei liity niin monia virhelähteitä kuin viistosti riistakameralla kuvattuihin videoihin.

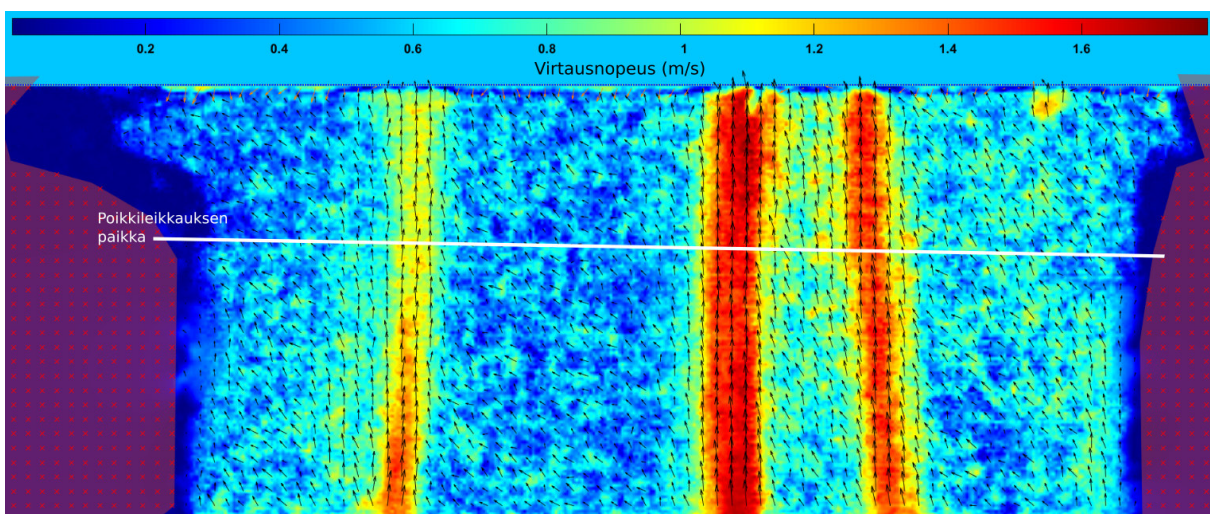
6.1.2.2 STIV - Varpuvirta

Varpuvirran tutkimuspaikalla riistakameravideoista tuotettujen virtaamatuloksien sekä ADCP-mittausten hajonta on huomattavasti suurempaa kuin Kurenaluksella. STIV-menettelmällä saadut tulokset vastaavat ADCP-mittauksen antamia virtaamia ja suurin prosentuaalinen ero oli 10,9% suhteessa ADCP-mittaukseen. Varpuvirran tutkimuspaikalla oli lukuisia ongelmakohtia, jotka vaikuttavat tuloksiin. STIV-analyysiin tukipisteinä käytettiin kiviä sekä puisien kepin päissä olevia muovilätkiä. Kolme tukipistettä lähti veden virtauksen mukana kesken tutkimusjakson ja suurin osa paikallaan pysyneistä tukipisteistä jäi veden alle vedenkorkeuden noustessa. Tämä vaikeutti analyysien tekoa merkittävästi, sillä myös tämä kamera liikkui tutkimusjakson aikana ja siten tukipisteet vaeltavat liikkeen mukana, mutta analyysien korjaaminen on hyvin vaikeaa kun tukipisteitä ei enää näe kuvasta. Näin ollen vertailuanalyyseissä joutui tukipisteet laittamaan kohdalleen vertaamalla tutkimuspaikan aiempiin videoihin, joka on haasteellista. Tukipisteongelmien lisäksi Varpuvirralla kamera oli sijoitettu liian lähelle uomaa, joka entisestään lisää tukipisteistä aiheutuvaa virhettä, koska tukipisteet sijaitsevat lähellä kuva-alan reunoja jossa riistakameran linssivääristymä on voimakkaimmillaan. Voimakkaan linssivääristymän takia ja muuttuvien pintavirtausolosuhteiden takia johdonmukaisten tulosten saaminen Varpuvirran tutkimuspaikalta oli haastavaa STIV-menettelmällä.

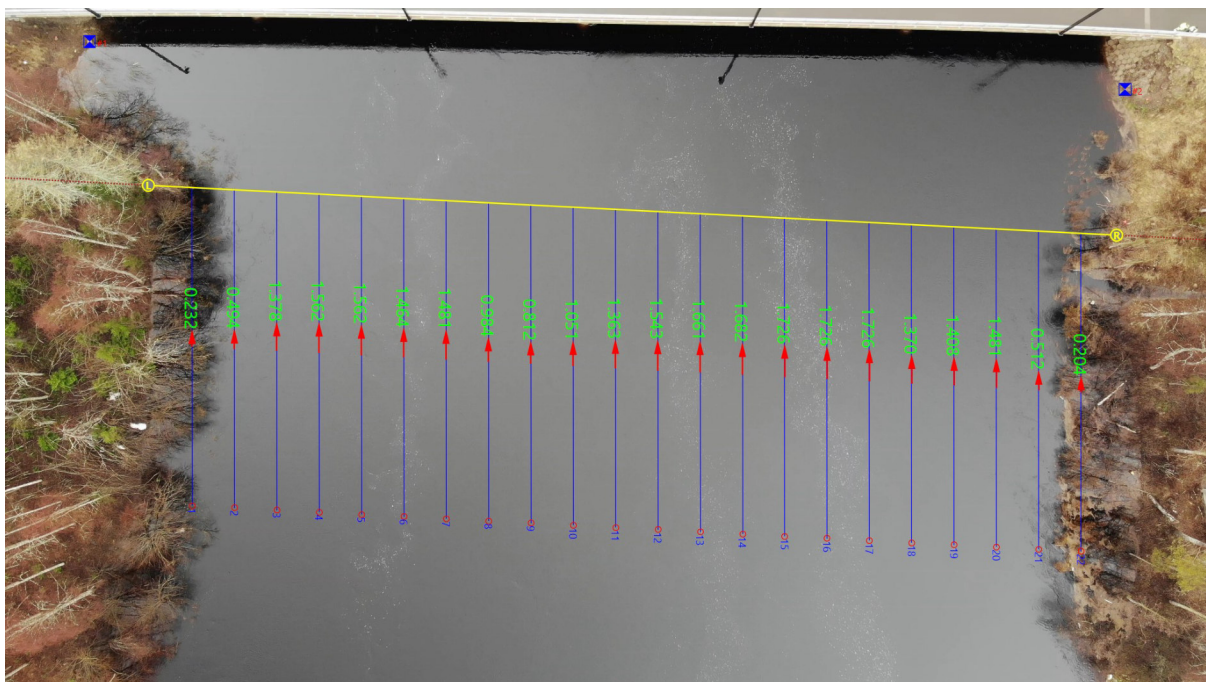
Varpuvirralla drone-videoista tehdyt STIV-analyysit vertautuvat hyvin ADCP-mittausten kanssa. Virtausolosuhteet paikalla olivat sellaiset, että ne muuttuivat voimakkaasti eri virtaamilla veden pakkautuessa jokiuoman kapeaan kohtaan. Siksi STIV-menettelmällä oli hankala löytää sopivia asetuksia, joilla saatiin ADCP-mittauksia vastaavia tuloksia. Toisin sanoen, jos ei olisi ADCP-tuloksia mihin verrata, niin tällä tutkimuspaikalla olisi hyvin vaikeaa saada luotettavia virtaamatuloksia. Etsintälinjojen sijoittelua ja pituuksia vaihtamalla virtaamatulokset vaihtelivat jopa 20%. Toisaalta taas samoilla asetuksilla tulosten vaihtelu oli vähäistä mikä osoittaa STIV-menettelmän toistettavuuden. Hyvistä tuloksista huolimatta on kuitenkin selvää, että Varpuvirran tutkimuspaikka ei ole STIV-menettelmälle optimaalinen.

6.1.2.3 LSPIV - Kurenalus

Kurenaluksen tutkimuspaikalla LSPIV-menetelmällä virtausnopeusarvoista tuli kautta linjan liian pieniä sekä riistakamera- että dronevideoista, johtuen Kurenaluksen tutkimuspaikan virtauksen tasaisuudesta, jossa virtausta oli paikoin vaikea nähdä paljainkaan silmin. Tässä tulee hyvin esille LSPIV-menetelmän heikkous, eli virtauksessa tulisi olla jotakin hiukkasia tai muutosta jota jäljittää. Riistakameravideoista ei saatu LSPIV-menetelmällä lainkaan järkeviä tuloksia johtuen heikosta kuvanlaadusta. Kuvissa on LSPIV-menetelmän (37) ja STIV-menetelmän (38) samasta dronevideosta tuottama virtausprofiili, jossa on selkeästi havaittavissa, että LSPIV-menetelmä löytää virtauskohdat, joissa virtaus on nähtävissä, mutta uoman keskikohdan tasaisessa virtauskohdassa sekä reunoilla virtausnopeusarvot ovat liian matalia verrattuna STIV-menetelmään.

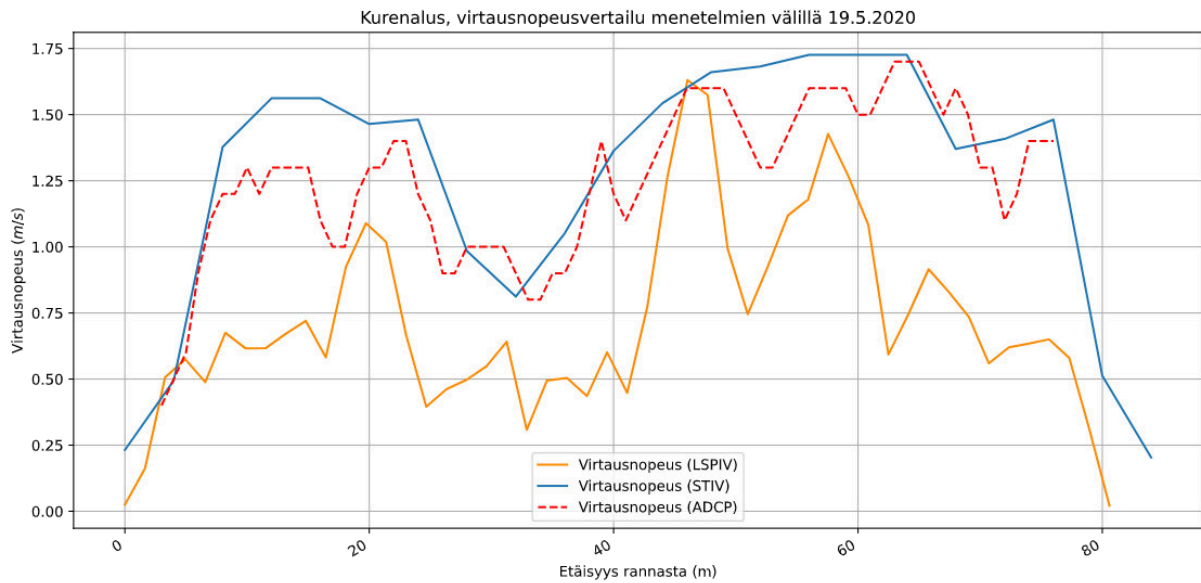


Kuva 37: Kurenaluksen tutkimuspaikalla dronevideosta tehty LSPIV-analyysi. Kuvasta on havaittavissa kuinka menetelmä löytää kohdat, joissa virtaus on selkeästi havaittavissa (punaiset kohdat), mutta virtauksen keskiosassa sekä reunoilla (sinivihreät alueet) tuottaa virheellisiä arvoja, jonka seurauksena virtausnopeudet ovat liian alhaisia.



Kuva 38: Kurenaluksen tutkimuspaikalla dronevideosta tehty STIV-analyysi. Menetelmä laskee virtausnopeudet etsintälinjojen kohdalta.

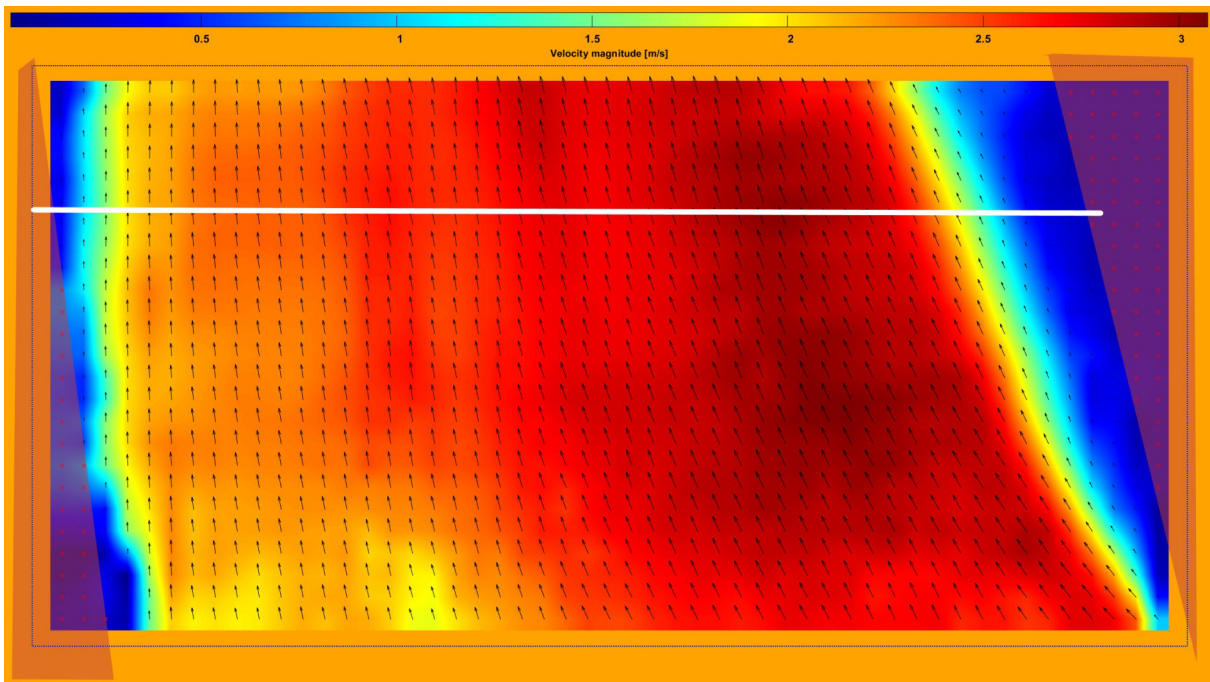
Verrattaessa menetelmien tuottamia virtausnopeusarvoja poikkileikkauksen kohdalta (kuva 39), havaitaan LSPIV-menetelmän tuottamien virtausnopeusarvojen poikkeaman STIV-menetelmän sekä ADCP-mittauksen virtausnopeuksista. On myös otettava huomioon, että ADCP-menetelmän antama virtausnopeusarvo on hieman veden pinnan alapuolelta, joka eroaa LSPIV- ja STIV-menetelmien antamasta pintavirtausnopeudesta. Ero LSPIV- ja STIV-menetelmien tuottamissa virtausnopeuksissa johtuu kuva-alalle osuvista tasaisen virtauksen kohdista. LSPIV-menetelmän tuottaman virtausnopeuden perusteella Kurenaluksen tutkimuspaikalta virtaama-arvot olisivat liian pieniä verrattuna ADCP- ja STIV-menetelmien tuottamiin virtaama-arvoihin.



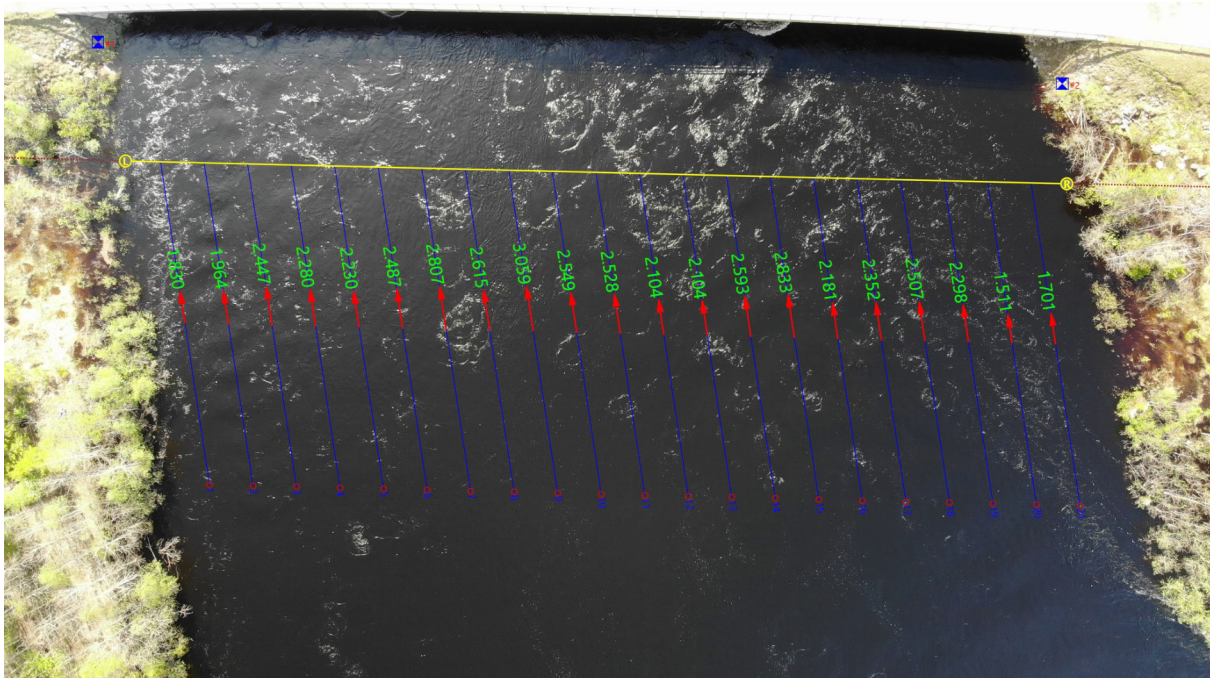
Kuva 39: Kurenaluksen tutkimuspaikalla dronevideosta 19.5.2020 tehtyjen analyysien tuottamien virtausnopeuksien vertailu ADCP-mittaukseen. LSPIV-menetelmä tuottaa liian alhaisia virtausnopeuksia johtuen tutkimuspaikan virtausolosuhteista. ADCP-menetelmän virtausnopeusarvot ovat hieman veden pinnan alapuolelta, joten ne eroavat LSPIV- ja STIV-menetelmien tuottamasta pintavirtausnopeudesta.

6.1.2.4 LSPIV - Varpuvirta

Vastaavasti LSPIV-menetelmällä tehdyt dronevideoanalyysit onnistuivat paremmin Varpuvirran tutkimuspaikalla kuin Kurenaluksella johtuen juuri erilaisesta virtausolosuhteista. Turbulenttinen virtaus synnyttää väreilyä, ilmakuplia, vaahtoa yms. joka soveltuu hyvin virtauksen jäljitykseen. Kuvissa ovat LSPIV-menetelmän 40 ja STIV-menetelmän tuottamat 41 pintavirtausprofiilit Varpuvirran tutkimuspaikalla kuvatusta dronevideosta 1.6.2020. Kuvista nähdään hyvin, miten erilaista tietoa menetelmät tuottavat. LSPIV-menetelmällä saadaan hyvinkin yksityiskohtaista tietoa virtauksen suunnasta ja nopeudesta laajemmalta alueelta kun taas STIV-menetelmällä saadaan ainoastaan virtausnopeus etsintälinjojen kohdalta.

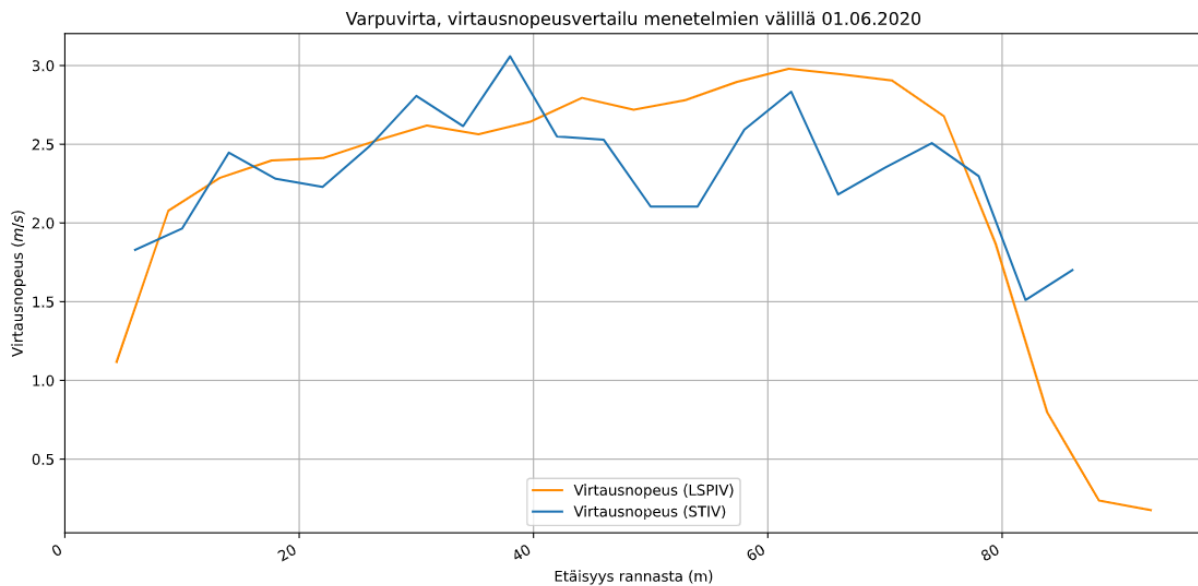


Kuva 40: Varpuvirran tutkimuspaikalla dronevideosta tehty LSPIV-analyysi. Valkoinen viiva osoittaa poikkileikkauksen kohdan. Kuvasta on havaittavissa, että Varpuvirran tutkimuspaikan turbulenttiset virtausolosuhteet sopivat paremmin menetelmälle ja virtausnopeuden jakauma näyttää luonnollisemmalta kuin Kurenaluksen vastaava.



Kuva 41: Varpuvirran tutkimuspaikalla dronevideosta tehty STIV-menetelmän tuottama pintavirtausjakauma. Kuvassa ylhäällä analyysiin käytetyt tukipisteet ja poikkileikkauksen alapuolelle asetetut etsintälinjat.

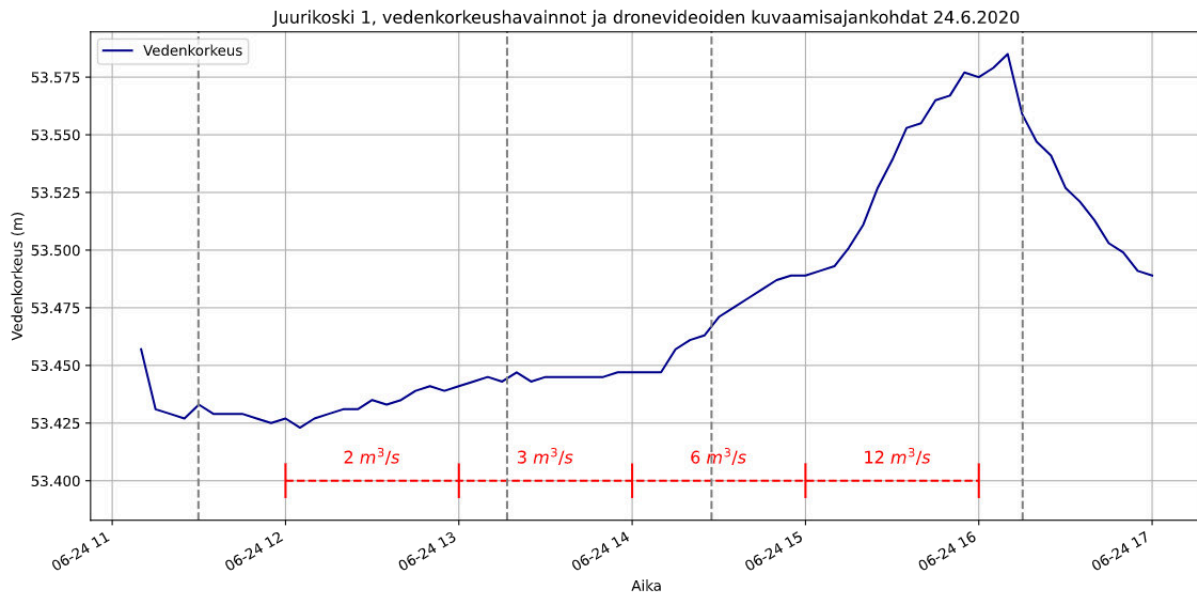
Menetelmien virtausnopeudet vastaavat hyvin toisiaan (kuva 42). Molemmilla menetelmillä virtaaman laskenta tapahtuu samalla tavalla, joten virtausnopeuden perusteella LSPIV-menetelmällä olisi siis mahdollista saada luotettavia virtaama-arvoja Varpuvirran tutkimuspaikalta.



Kuva 42: Varpuvirran tutkimuspaikalla dronevideosta tehty menetelmien välinen virtausnopeusvertailu. Virtausnopeuden arvot vastaavat huomattavasti paremmin toisiaan kuin Kurenaluksen tutkimuspaikalla.

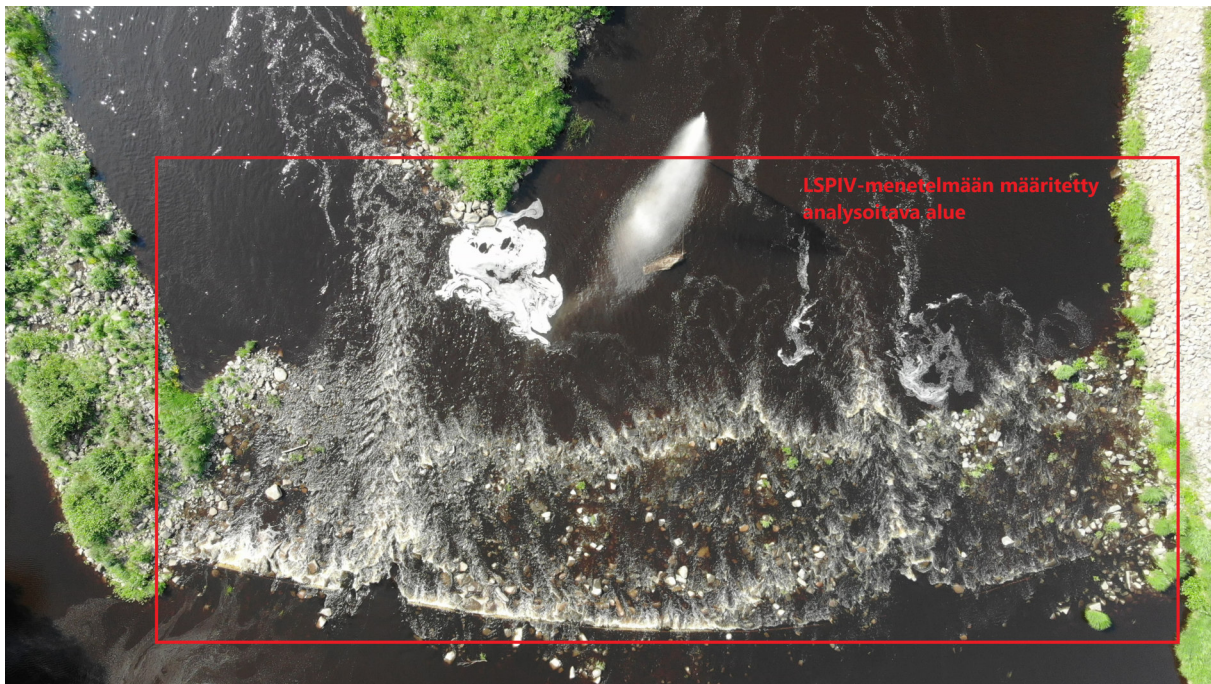
6.2 Tutkimusalue 2: Kalajoki, Ylivieska

Juurikosken tulosten arvioinnin avuksi ei ole aiempia tutkimustuloksia, sillä LSPIV-menetelmää ei ole aiemmissa tutkimuksissa sovellettu koskien virtausnopeuksien määrittämiseen. Juurikosken tutkimuspaikalla virtaaman muutosta seurattiin reaaliajassa veteen asennetusta vedenkorkeuden mittataulusta sekä ajoittaisin ADCP-mittauksin. Koska koskialue on kohtalaisen suuri niin virtaaman tasoittuminen tutkimusalueella kestää jonkin aikaa ja sitä on silmämääräisesti vaikea arvioida, sillä muutokset vedenkorkeudessa ovat pieniä. ADCP-mittauksilla ja vedenkorkeutta seuraamalla yritettiin ajoittaa kuvaukset siten, että voimalaitokselta juoksutettu virtaama olisi ehtinyt tasoittumaan koskissa. Painesensorin mittaamia vedenkorkeuksia (kuva 43) tutkittaessa havaitaan, että juoksutusvirtaamille varatut aika-ikkunat olivat liian lyhyitä, eivätkä juoksutusvirtaamat ehtineet tasoittumaan kuin pienempien virtaamien kohdalla. Kuvan 43 pystyviivat osoittavat dronekuvauksien ajankohtaa suhteessa vedenkorkeuksiin ja niistä havaitaan, että videoista luodut virtausprofiilit eivät täysin edusta tavoitevirtaamia.



Kuva 43: Kuvausajankohdat suhteessa vedenkorkeuteen Juurikosken (koski 1) tutkimuskohteessa. Vesivoimalaitoksen kanssa sovitut juoksutusvirtaamat olivat klo 12-13: $2 m^3/s$, klo 13-14: $3 m^3/s$, klo 14-15: $6 m^3/s$ ja klo 15-16: $12 m^3/s$. Vedenkorkeuksien perusteella juoksutusvirtaamat eivät ehtineet tasoittumaan niille varatuissa aika-ikkunoissa.

Koskipaikoissa on aina jonkin verran korkeusmuutoksia ja kuvien maastoerotuskyky (GSD, Ground Sampling Distance) muuttuu kuva-alalla korkeuden mukaan. Maastoerotuskyvyllä tai pikselierotuskyvyllä tarkoitetaan yksittäisen kuvapikselin kokoa maanpinnalla ja sen suuruus riippuu käytettävästä resoluutiosta ja kuvausetäisyydestä (eli tässä yhteydessä lentokorkeudesta). Tässä työssä käytetyissä ohjelmistoissa pikselierotuskyky määritetään mittaamalla kuva-alalta jokin etäisyys, jonka perusteella lasketaan erotuskyky (pikselietäisyys jaettuna fyysisellä etäisyydellä), mutta pikselierotuskyvyn voi laskea myös dronen kuvasensorin koon, polttovälin, resoluution ja lentokorkeuden perusteella (Gonçalves & Henriques 2015). Juurikoski 1:n kohdalla GPS-mittausten perusteella korkeusero on noin 0,6 metriä kosken yläpuolen ja alapuolen välillä eli kuvan 44 alaosan ja yläosan välillä. Lentokorkeudesta 75m resoluutiolla 3840×2160 kuvatun videon pikselien erotuskyvyksi, eli pikselien keskikohtien väliseksi etäisyydeksi saadaan noin 2,8 cm. Pikselin koko kasvaa korkeuden myötä, mutta isolla resoluutiolla vaikutus on pieni. Korkeuden laskiessa (tai lentokorkeuden noustessa) 0,6 metriä pikselierotuskyky pienenee vain vähän; 2,82 cm eli muutos (0,02 cm) on alle prosentti. Tässä aineistossa korkeuserolla ei ole merkitystä laskettuihin virtausnopeuksiin, mutta asia on syytä huomioida mikäli korkeuserot kuvattavalla alueella ovat suuret. Korkeuserojen vaikutuksen virtausnopeuksiin voi poistaa analysointivaiheessa ortorektifiomalla aineiston useamman kuva-alalta määritetyn tukipisteen avulla (vähintään neljä pistettä).



Kuva 44: Juurikosken (koski 1) LSPIV-menetelmällä analysoitu alue. Vedenkorkeutta mittaava sensori oli kuva-alan oikeassa alareunassa.

Kosken kuohunta synnyttää vesipintaan ilmakuplia ja vaahtoa, jotka näyttävät sopivan hyvin LSPIV-menetelmän jäljittämiksi hiukkasryhmiksi. Aineistossa on kuitenkin selvästi virheellisiä havaintoja syvimpien altain kohdalla ja paikoissa, joissa virtaus on vähäistä tai olematonta. Osassa aineistoa tuuli synnyttää vedenpintaan aaltoilua, joka aiheuttaa paikoin virheitä. Virheeliset havainnot on LSPIV-analyysin yhteydessä poistettavissa eri menetelmin ja ne voi korvata interpoloiduilla vektoreilla tai jättää kokonaan pois. Aineistossa on myös virtausnopeusvektoreita maa-alueilla ja kivien kohdalla joka johtunee tuulen aiheuttamasta kasvillisuuden liikkeestä ja valaistuksen lievistä muutoksista sekä analyysin asetuksista. Jos etsintäalueen koko on niin iso, että vesialueen lisäksi siihen osuu maa-alueita niin silloin myös maa-alueet saavat virtausnopeusarvon. Maa-alueiden virheelliset virtausnopeusarvot ovat hyvin pieniä ($<0.1 \text{ m/s}$) ja ne voi poistaa aineistosta jälkikäteen.

6.3 Virhelähteet

6.3.1 Virtausolosuhteet

STIV-menetelmä tuotti tasaisempia ja luotettavampia tuloksia Kurenaluksen tutkimuspaikalla. Varpuvirran tutkimuspaikka taas tuotti ongelmia STIV-analyysissä johtuen tutkimuspaikan uoman geometriasta, sillä heti ylävirtaan päin tutkimuspaikasta joessa on mutka ja samalla uoma kapenee, joka aiheuttaa pintavirtaukseen voimakasta vaihtelua eri virtaamilla. Silloin STIV-analyysissä käytettävien etsintälinjojen sijoittelu on vaikeaa, sillä niiden pitäisi olla likimain virtauksen suuntaiset. Eri suuntiin tapahtuvat aaltoilut ja voimakkaan turbulenttinen virtaus

aiheuttaa virhettä virtausnopeuksissa ja siten myös virtaamassa. Tutkimuspaikan ongelmat näkyvät myös Varpuvirran ADCP-mittaustuloksissa, joissa on huomattavasti enemmän hajontaa kuin Kurenaluksen vastaavissa mittauksissa.

LSPIV-menettelyn osalta tilanne oli päinvastainen, sillä LSPIV tuotti parempia tuloksia nimenomaan Varpuvirran tutkimuspaikalla johtuen em. turbulentsista virtauksesta ja Kurenaluksen osalta LSPIV:n tuottamat virtaamatulokset olivat huomattavasti pienempiä kuin STIV:n dronevideosta tehdyssä analyysissä. Ero virtaamissa johtuu menetelmien tuottamista eroissa virtausnopeudessa, joka johtuu LSPIV-menettelyn herkkyydessä virtauksen erotte- lussa. Virtaus oli Kurenaluksen tutkimuspaikassa erittäin tasainen erityisesti keskiosasta ja siitä oli vaikea havaita virtausta paljain silmin. Kurenaluksen riistakameravideoista LSPIV ei tuotta- nut lainkaan järkeviä tuloksia, johtuen vesipinnan tasaisuudesta, heijastumista sekä kuva-alalla olevasta kasvillisuudesta. STIV-menettelmällä tasainen kohta tuotti myös virheellisiä vektoreita osassa analyysijä nimenomaan riistakameralla kuvatuissa videoissa.

6.3.2 Tukipisteet

Tukipisteiden huolellinen määrittäminen on aiemmissakin tutkimuksissa havaittu keskeiseksi tutki- muksen onnistumisen kannalta (Lewis & Rhoads 2018; Muste, Fujita & Hauet 2008). Erityisesti viistosti kuvatulla aineistolla tukipisteiden merkitys korostuu, koska kuva-aineisto pitää ortorekti- fioida molempia menetelmiä sovellettaessa. Väärin mitatuista tai kuvaan asetetuista tukipisteistä aiheutuu merkittävää virhettä menetelmien tuottamissa virtaamissa viistosti kuvatussa videossa, koska vesipinta liikkuu suhteessa poikkileikkaukseen tukipisteiden mukana jolloin se vaikuttaa jokaiseen pystyvertikaalin laskettuun keskimääräiseen virtausnopeuteen.

Dronella kuvatessa kohtisuoraan yläpuolelta kuvatussa videossa tarvitaan vain yksi tunnettu etäisyys kuva-alalta, jonka avulla lasketaan pikselierotuskyky. Pikselierotuskyvyn voi myös laskea lentokorkeuden, kameran sensorin leveyden ja polttovälin avulla, jolloin tukipisteitä ei tarvitse maastossa mitata välttämättä lainkaan. Tämä seikka mahdollistaa tutkimuksen te- kemisen vaikeasti saavutettavissa tai vaarallisissa paikoissa. Tukipisteiden tulisi olla riittävän isoja ja erottua maastosta, sillä analyysijä tehdessä vaihtuvat valaistusolosuhteet, muuttuva ve- denkorkeus ja kasvillisuus ynnä muut tekijät vaikeuttavat tukipisteiden määrittämistä kuvasta. Isotkin tukipisteet ovat kuvassa muutaman pikselin levyisiä jolloin yksittäisen pikselin koko voi olla 2-3 senttimetriä dronekuvissa ja 5-10 senttimetriä viistoissa kuvissa riippuen kuvaase- täisyydestä. Tässä työssä käytetyt laminoituneet punavalkoiset lätkät erottuivat huonosti ja isot punaiseksi värjäytyneet kivet havaittiin parhaiten erottuviksi sekä riistakamera-, että dronevideois- ta. Yleensäkin muodot erottuvat paremmin pikselimassasta kuin värit, sillä kuvia käsitellään usein mustavalkoisina. Erityisesti dronella aurinkoisina päivinä kuvatuissa videoissa joen ran- nat helposti ylivalottuvat, koska valotusasetukset määrittyvät tumman veden suhteen, jolloin tukipisteiden erottaminen on vaikeaa.

6.3.3 Resoluutio ja erottelukyky

Videokuvan resoluutio vaikuttaa siihen, kuinka paljon yksityiskohtia kuvasta on erotettavissa. Resoluution ja kuva-alalla olevan tunnetun etäisyyden avulla voi laskea ns. maastoerotuskyvyn, jolla tarkoitetaan yhden pikselin edustamaa etäisyyttä metreissä maastossa. Maastoerotuskyky riippuu kuvausetäisyydestä eli droonilla kuvatessa lentokorkeudesta. Kohtisuoraan yläpuolelta kuvatessa maastoerottelukyky pysyy likimain vakiona videon aikana. Viistosti kuvatessa maastoerottelukyky laskee nopeasti etäisyyden myötä. Videon resoluutiolla ei näyttäisi olevan juurikaan vaikutusta STIV-analyysin tulokseen. Aiemmissa tutkimuksissa STIV-menettelmällä on saatu luotettavia tuloksia jopa 640*480 VGA-resoluution infrapunakameralla (Fujita 2017). Korkeampi resoluutio helpottaa analyysien tekemistä varsinkin jos tukipisteet joutuu etsimään kuvasta. STIV-menettelmän on arvioitu olevan luotettava maksimissaan 150 metriä leveällä poikkileikkauksella viistosti kuvatessa, koska maastoerotuskyky laskee etäisyyden myötä voimakkaasti vinosti kuvatessa (Fujita ym. 2018). Dronella kuvatessa vastaavaa rajoitusta ei ole ja virtaamia on mitattu jopa kilometrin levyisestä jokiuomasta. LSPIV-menettelmää sovellettaessa resoluutiolla on suora vaikutus menettelmän kykyyn erotella hiukkasia virtauksessa. Jäljitettävien hiukkasten tulee olla suurempia kuin yksittäisen kuvapikselin (Lewis & Rhoads 2018). Analyysin asetusten, resoluution, kuvataajuuden ja tutkittavan virtausnopeuden välillä on monimutkainen vuorovaikutus, joka vaikuttaa siihen, kuinka pitkän matkan hiukkaset kulkevat yhden pikselin sisällä. Dronella kuvatessa LSPIV-menettelmän soveltamiselle on jokin yläraja lentokorkeuden (kuvausetäisyyden) suhteen, jolloin jäljitettävien hiukkasten koko suhteessa pikselien kokoon kasvaa liian suureksi ja maastoerottelukyky laskee liian alhaiseksi.

6.3.4 Kuvavääristymät ja kuvan laatu

Menettelmistä aiemmin tehdyissä tutkimuksissa kuvavääristymien vaikutukseen ei ole kiinnitetty erityisemmin huomiota. Kuvavääristymällä tarkoitetaan mitä tahansa kuvan perspektiiviä muuttavaa vaikutusta, joka voi johtua monista tekijöistä (Paine & Kiser 2012: 35). Tyypillisesti edullisissa kameralinsseissä on aina jonkin verran vääristymää, koska täysin vääristämättömien linsien tekeminen on kallista. Riistakameroiden tuottamien videoiden laatu on heikkoa korkeasta resoluutiosta huolimatta voimakkaan kalansilmälinsseille tyypillisen tynnyrivääristymän (barrel distortion) sekä voimakkaan kuvapakkauksen takia. Tynnyrivääristymästä ja laajasta kuvakulmasta johtuen kuva-alan keskiosassa suurennos on isompi kuin kuva-alan reunoilla (Gibbon, Johnston & Bailey 2003). Sen myötä pikselit kuva-alan keskiosassa laajentuvat ja reunoilla vastaavasti kutistuvat. Vaikka kuva sidotaankin fyysiseen maailmaan tukipisteiden avulla niin menettelmät eivät huomio kuvavääristymiä millään tavalla ja olettavat kuvamateriaalin olevan rektilineaarista (suorakulmaista), joten kuva-alan keskellä laajentuneet pikselit saattavat merkittävästi lyhentää sitä matkaa, jonka virtaus kulkee pikseleissä laskettuna ja reunoilla vastaavasti lisätä. Vääristymän seurauksena molempien menettelmien kuva-analyysien perusteella lasketut virtausnopeudet olisivat kuva-alan keskiosassa liian matalia ja reunoilla liian korkeita

todelliseen virtausnopeuteen verrattuna. Tämä voisi selittää merkittävän eron virtausnopeuksissa 4K-resoluutiolla ja FullHD-resoluutiolla kuvattujen videoiden välillä, koska tässä työssä käytetyn riistakameran kuvausominaisuuksien takia kuvavääristymät ovat huomattavasti vähäisempiä pienemmällä resoluutiolla kuvattaessa.

Kuvavääristymä lisää myös tukipisteiden liikkumisesta aiheutuvaa virhettä, sillä tukipisteiden siirtyminen ei ole samansuuruisia eri kohdissa kuva-alaa, johtuen edellä mainitusta linssivääristymästä. Vääristymien lisäksi kameroiden valotusasetukset muuttuivat sää- ja valaistusolosuhteiden mukaan, jolloin videoiden välillä on suuria eroja muun muassa kohinan määrässä, mutta sillä oli vain vähäinen vaikutus virtaamiin. Kamerat tallensivat yöaikaan muuttaman videon infrapuna-asetuksella, joiden kuvanlaatu on selvästi heikompi, mutta silti analyysin tekeminen onnistui myös hyvin. Riistakamerat pakkaavat tallennettua videoita voimakkaasti tallennustilan säästämiseksi, jonka yhteydessä aina häviää jonkin verran tietoa. Riistakameroilla otettiin myös videota pienemmällä resoluutiolla (1920*1080), joka yllättäen muuttikin kuvasuhdetta sekä vähensi vääristymiä merkittävästi. Vääristymät vähenivät, koska halvassa riistakamerassa resoluution muutos on toteutettu siten, että kamera käyttää vain osaa kameran sensorista, jolloin kuva muodostuu kuperan linssin keskiosasta tulevasta valosta, jossa valo taittuu vähemmän ja vääristymät vähenevät. Pienemmällä resoluutiolla kuvatuissa videoissa on keskimääräisesti korkeammat virtausnopeudet ja vähemmän vaihtelua virtaamisessa, johtuen juuri pienemmästä linssivääristymästä. Resoluution vaikutus itsessään on olematon STIV-analyysissä, ainakin FullHD- (1920*1080) ja 4k-resoluutioiden (3840*2160) välillä. Linssivääristymä yhdessä kameran liikkeen aiheuttaman tukipisteiden vaeltamisen videoiden välillä aiheuttivat eniten virhettä virtaama-aikasarjassa.

Myös droonien tuottamissa videoissa on vääristymää, mutta sen vaikutus virtausnopeuteen jäänee vähäiseksi kohtisuoraan yläpuolelta kuvatussa videossa, sillä vääristymää on eniten kuva-alan reunoilla, jotka sijaitsevat useimmiten joen rannalla. Mikäli kuvia georeferoi esimerkiksi paikkatieto-ohjelmassa niin vähäistenkin vääristymien takia niitä voi olla vaikea kohdistaa oikein suhteessa koordinaatistoon. Toisin sanoen ilmakuva ei vastaa karttaa ilman kuvavääristymien korjaamista (Paine & Kiser 2012: s. 35).

Linssi- tai kuvavääristymistä aiheutuvan virheen suuruutta on vaikea arvioida, koska se vaikuttaa myös muihin virhelähteisiin, mutta on selvää, että kuvavääristymät aiheuttavat virhettä virtausnopeusanalyseissä. Kuvavääristymät ovat kameran ominaisuuksista riippuvia ja ne on mahdollista korjata kalibroimalla kamera (Zhengyou Zhang 1999). Kameran kalibroinnilla laskeaan kalibroitukuvien avulla kameralle kuvamuunnosyhtälöparametrit, joilla kuvavääristymät saadaan korjattua (Fitzgibbon 2001). Suosituimmille kameramalleille on myös olemassa valmiita kalibroitiprofiileja. Kameran kalibrointiin ja kuvien oikomiseen on olemassa valmiita ohjelmia sekä algoritmeja joita voi soveltaa itse ohjelmoimalla.

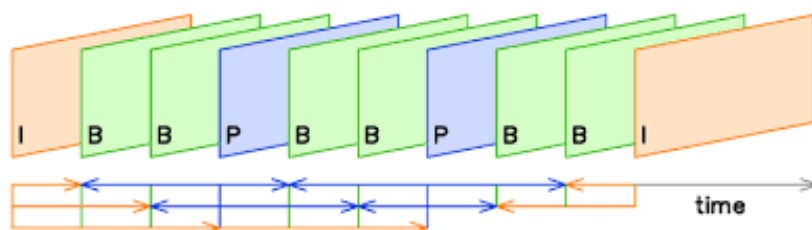
6.3.5 Videon pituus ja kuvataajuus

Videoiden pituudella havaittiin olevan merkittävä vaikutus mitattuihin virtausnopeuksiin ja siten myös virtaamiin STIV-menetelmällä. Alla olevan taulukon 6 vertailun perusteella riistakameralla FullHD-laadulla kuvatusta 30 sekunnin videoista saatiin keskimäärin suurempia virtausnopeuksia kuin pidemmistä 60 sekunnin videoista STIV-menetelmällä. 4K-laadulla keskimääräiset erot olivat vielä suuremmat. Vertailu 4K- ja FullHD-videoiden välillä on haastavaa, sillä riistakameran tuottaman videon kuvasuhde muuttuu resoluution myötä ja linssivääristymä muuttuu; siten 4K-videosta on jälkikäteen lähes mahdotonta muokata täysin samanlaista kuin FullHD:lla kuvattu video. Erot johtunevat tässä työssä käytetyn riistakameran voimakkaista kuvavääristymistä, sillä droneaineistossa vastaavaa eroa ei ole eri pituisilla videoilla. Kuvataajuus vaikuttaa myös jonkin verran virtausnopeudessa havaittuihin eroihin, mutta videon pituuden vaikutus on selkeämpi.

Taulukko 6: Yksittäisen videon aikana videon pituudesta ja kuvataajuudesta aiheutuva virhe STIV-menetelmällä lasketussa virtausnopeudessa. Vertailussa dronella kuvattu video sekä riistakameran kahdella eri resoluutiolla kuvatut videot. Kuvataajuus ei näytä juurikaan vaikuttavan tuloksiin, mutta videon pituudella on vaikutus. Riistakameralla tallennetuilla 30 sekunnin videoilla saa tulokseksi korkeampia virtausnopeuksia kuin 60 sekunnin videoilla.

FPS	Drone 4K (3840*2160)				60s	FHD (1920*1080)			Riistakamera 4K (3840*2160)			
	60s	50s	40s	30s		50s	40s	30s	60s	50s	40s	30s
30		0,86 %	0,94 %	0,24 %		2,18 %	3,26 %	5,02 %	-	-	-	-
25	0,63 %	-0,47 %	1,18 %	-0,08 %	-0,08 %	1,67 %	1,92 %	1,76 %	-	-	-	-
20	0,63 %	0,47 %	1,81 %	0,16 %	0,25 %	2,01 %	1,92 %	2,43 %	-	-	-	-
15	1,42 %	0,63 %	2,52 %	0,47 %	0,25 %	2,76 %	3,10 %	4,85 %		2,19 %	4,79 %	7,39 %
10	0,86 %	0,47 %	0,71 %	0,16 %	0,17 %	2,01 %	1,67 %	3,93 %	-0,32 %	2,84 %	5,61 %	8,29 %
5	1,73 %	1,89 %	2,44 %	2,52 %	-0,42 %	3,77 %	4,94 %	4,85 %	-2,36 %	3,25 %	5,85 %	7,96 %

LSPIV-menetelmässä kuvataajuudella saattaa olla merkittävä vaikutus laskettuihin virtausnopeuksiin johtuen siitä, että videot pilkotaan kuviksi analyysiä varten (STIV-menetelmässä koko video analysoidaan pilkkomatta sitä kuviksi). Useimmat videokamerat tallentavat peräkkäisiä kuvia ja, tallennustilan säästämiseksi, pakkaavat ne videoiksi siten, että ainoastaan niin sanotut I-kuvat (kuva 45) sisältävät kaiken tiedon kuvasta. P-kuvat sisältävät vain tiedon kuvien välillä tapahtuvasta muutoksesta ja B-kuvat käyttävät tietoa muutoksesta sekä edeltävästä, että seuraavasta kuvasta (Setton & Girod 2005).



Kuva 45: Kamerat tallentavat ja pakkaavat kuvia videoiksi siten, että I-kuvat sisältävät todelliset kuvat ja P- sekä B-kuvat sisältävät vain tiedon kuvien välillä tapahtuvasta muutoksesta (Setton & Girod 2005; kuvan lähde: Wikimedia Commons 2006)

Tyypillisesti videossa on vain yksi I-kuva sekuntia kohden. LSPIV-analyysin kannalta I-kuvat ovat tärkeimpiä, sillä niissä on eniten tietoa. Toinen tapa, jolla videokamerat säästävät tallennustilaa on dynaaminen kuvataajuus, jolloin kuvia tallennetaan enemmän silloin kun kuvassa on paljon liikettä (Pejhan, Chiang & Zhang 1999). Siten asetettu kuvataajuus on vain keskiarvo, mutta kuvien todellinen aikaväli on vaihteleva. LSPIV-analyysiin käytetyt ohjelmat eivät nykyisellään ota huomioon vaihtelevaa kuvataajuutta, sillä video pilkotaan kuviksi LSPIV-analyysiä varten poimimalla kuvat tasaisin aikaväleihin. Siten kuvien todellinen aikaväli ei ole tiedossa, joka aiheuttanee jonkin verran virhettä lopullisessa virtausnopeudessa. Virheen määrää voi suurpiirteisesti arvioida laskemalla (taulukko 7) erosta kuvien välisestä ajasta (esimerkiksi 0,005 ja 0,02 sekuntia) aiheutuvaa virhettä virtausnopeudessa. Virhe kuvaa yksittäisen kuvaparin välillä tapahtuvaa virhettä virtausnopeudessa.

Taulukko 7: Esimerkki kuvataajuuden pienestä vaihtelusta (0.005 ja 0.02 sekuntia) aiheutuvasta virheestä LSPIV-menetelmässä.

Kuvataajuus (FPS)	Kuvien väli (sekuntia)	Virhe-% virtausnopeudessa	
		0.005 s	0.02 s
10	0,1	5 %	17 %
15	0,067	8 %	23 %
20	0,05	9 %	29 %
25	0,04	11 %	33 %
30	0,033	12 %	45 %

Pidemmällä kuvavälillä eli pienemmällä kuvataajuudella virhe pienenee, koska virheen suhteellinen osuus pienenee isommalla aikavälillä. Todellisuudessa virheet vaihtelevat kuvaparien välillä eivätkä liene näin suuria, mutta korostaa kuvataajuuden merkitystä LSPIV-menetelmässä. Vaihtelevasta kuvataajuudesta aiheutuva virhe saattaa vaikuttaa myös STIV-analyysiin jos videoita joudutaan esikäsittämään ja videot joudutaan pakkaamaan uudelleen, sillä videon purkamisen yhteydessä tieto todellisesta kuvien aikavälistä katoaa.

6.3.6 Valaistusolosuhteet

Valaistuksen vaikutus STIV-analyysin tulokseen ei ollut merkittävä kuin muutamassa poikkeustapauksessa, jossa erittäin tasainen virtaama tai vastavaloon kuvatun videon heijastumat tuottivat virheellisiä tuloksia. Etsintälinjojen paikkaa siirtämällä eri kohtiin virtauksessa voi vähentää virheellisiä tuloksia. Kuten jo aiemmin mainittiin, niin LSPIV-analyysi ei tuottanut järkeviä tuloksia Kurenaluksen tutkimuspaikassa riistakameravideoista, johtuen juuri valaistus- ja virtausolosuhteista; tutkimuskohteessa oli erittäin tasainen virtauskohta, jossa ei ollut silminkään havaittavaa virtausta, joka tuotti virheellisiä tuloksia LSPIV:llä. STIV-menetelmä taas tuotti luotettavan tuloksen lähes kaikista Kurenaluksen riistakameravideoista. Sopivasta kulmasta suhteessa kameraan paistavan auringon heijastumat vesipinnasta saattavat aiheuttaa videoon ylivalottuneita kohtia, joiden osalta tieto menetetään. Kirkkaalla säällä kuvatessa auringon heijastumia voi

vähentää käyttämällä polarisaatiosuodatinta. Virhelähteenä heijastumien merkitys on kuitenkin kokonaisuutena melko vähäinen.

6.3.7 Kameran tai dronen liike

Kiinteästi asennetun riistakameran pieni liike videoiden välillä aiheutti virhettä STIV-menetelmällä tuotetussa virtaama-aikasarjassa. Liike on hyvin vähäistä mutta se kasvaa ajan myötä, jolloin aikasarjoissa liikkeen aiheuttama virhe kasvaa ajan myötä. Liikettä aiheutti todennäköisesti kameran kiinnityksen lievä liikkuminen muuttuvien lämpötila- ja kosteusolosuhteiden myötä. Liike aiheuttaa analyysissä käytettyjen tukipisteiden siirtymisen kuvassa. Erityisesti pystysuuntainen pienikin liike aiheuttaa virhettä virtaamassa, sillä tukipisteet ovat sidottu vedenkorkeuteen, jolloin liikkeen seurauksena vesipinta liikkuu analyyseissä eri videoiden välillä. Kameran liikkeen vaikutus vähenee mitä ylempää video kuvataan, koska liikkeen tapahtuu silloin enemmän vaakasuuntaisena. Asia on helppo korjata yksittäisen videon osalta, mutta kun videoita on satoja, niin virheellisten analyysien korjaaminen tukipisteiden osalta käy liian työlääksi. Riistakameravideoissa liikettä ei tapahtunut videon aikana, vaan ainoastaan videoiden välillä. Kiinteätä asemaa perustettaessa on siis syytä kiinnittää huomiota kamera-asennuksen pysyvyyteen tai soveltaa jotakin jälkiprosessointimenetelmää liikkeen vaikutuksen poistamiseen jos halutaan tuottaa johdonmukaisia virtaama-aikasarjoja. Tukevastikin asennettu kamera liikkuu aina jonkin verran ja vähäistä liikettä on käytännössä lähes mahdoton eliminoida kenttä-olosuhteissa (Jodeau ym. 2008).

Dronevideoissa liike aiheuttaa myös virhettä. Vaikka droneissa on lento- ja kuvanvakaajat, eivät drone pysy täysin paikallaan tuulen aiheuttaman kuorman takia (Blois ym. 2016). Tuulesta aiheutuvaa liikettä on kolmen tyyppistä; (1) pystysuunnassa tapahtuva lievä korkeuden vaihtelu, jolla on vähäisin vaikutus, (2) vaakasuuntainen ns. vaeltaminen on dronen pientä lyhyen aikavälin liikettä vaakasuunnassa ja (3) rotaatio taas pidemmällä aikavälillä tapahtuvaa hidasta myötä- tai vastapäivään tapahtuvaa kiertoliikettä vaakasuunnassa tuulen mukana (Blois ym. 2016). STIV-menetelmässä dronen liikkeistä aiheutuva virhe on vähäistä. Vaeltamisen vaikutus virtaamaan on pieni, jos liike pysyy kohtuullisena ja etsintälinjat pysyvät vedessä. Virhettä aiheuttaa videon aikana tapahtuva hidas rotaatioliike, joka pahimmillaan siirtää etsintälinjat vedestä osittain rannalle videon aikana. Rotaation seurauksena aika-avaruuskuviin tulee havaittavaa lievää kaartumista ylös tai alaspäin, joka rotaation suuruudesta riippuen saattaa muuttaa analyysin lopputuloksena saatua virtausnopeuden keskiarvoa. Useimmissa dronevideoissa vaeltaminen ja rotaatio pysyivät kohtuullisena, vaikka tuuliolosuhteet olivatkin välillä hankalat lentämisen kannalta.

LSPIV-menetelmä on huomattavasti herkempi videon aikana tapahtuvalle liikkeelle. Riippuen liikkeen määrästä ja siitä, kuinka yksityiskohtaista tietoa tarvitaan, saattaa videot olla syytä stabiloida ennen analysointia. Aiemmissa tutkimuksissa dronen liike on todettu systemaattiseksi ja merkittäväksi virhelähteeksi LSPIV-analyyseissä, joka tulisi poistaa kuvista ennen virtausanalyysien tekemistä LSPIV-menetelmällä (Blois ym. 2016). Siksi sekä RIVeR-

että Fudaa-LSPIV-ohjelmissa on sisäänrakennettuna kuvien stabilointiominaisuus. Myös Hydro-STIV-ohjelmaan on tulossa videoiden stabilointiominaisuus seuraavassa versiossa.

6.3.8 Vedenkorkeus

Vedenkorkeuden mittaaminen on tärkeä osa analyysiä kummassakin menetelmässä, kun tarkoituksena on laskea virtaama. Virtaama-aikasarjan tuottamiseen analyysissä käytettiin neljästä painesensorin tekemästä mittauksesta laskettuja tuntikeskiarvoja kullekin videoille. Tarkemmassa ADCP-vertailuanalyysissä käytettiin ADCP-mittausten yhteydessä GPS-RTK:lla mitattua vedenkorkeutta. GPS-RTK:n tarkkuus vaakasuunnassa on noin ± 1 cm ja korkeuden suhteen on noin ± 2 cm (Feng & Wang 2008). Virheellinen vedenkorkeus muuttaa jokaisen pystyvertikaalin pinta-alaa ja siten myös jokaisen pystyvertikaalin virtaamaa. Virheen määrää on vaikea arvioida, koska aineistot ortorektifioidaan käyttäen vedenkorkeutta, jonka seurauksena oletettu vesipinta liikkuu suhteessa tukipisteisiin vedenkorkeuden mukana kuva-alalla. Näin ollen vedenkorkeuden virheen vaikutus virtaamaan riippuu uoman leveydestä, syvyydestä ja veden virtausnopeudesta sekä analyysin asetuksista.

6.4 Yhteenveto

Työn tulokset ja havaitut virhelähteet vertautuvat hyvin aiempiin tutkimuksiin. Tukipisteisiin ja kameran liikkeeseen sekä linssivääristymiin liittyvät haasteet osoittautuivat suurimmaksi vaihtelua aiheuttavaksi tekijäksi. Linssi- ja kuvavääristymien vaikutusta ei ole aiemmissa tutkimuksissa otettu huomioon; linssivääristymät vaikuttavat moniin muihin virhelähteisiin, joten pelkästään niiden aiheuttamaa virhettä on vaikea arvioida. Tämän työn yhteydessä havaittiin vääristymien vaikuttavan havaittuihin virtausnopeuksiin ja virtaamiin siten, että vääristymät aiheuttavat alhaisempia virtausnopeuksia pidemmällä videoilla. Muutoinkin vääristymät hankaloittavat analyysien tekoa ja tukipisteiden määrittämistä kuvasta. Taulukossa 8 on yhteenveto virhelähteistä ja arvio niiden merkityksestä analyysin kannalta. Monet virhelähteistä ovat vuorovaikutuksessa keskenään, joten yksittäisen virhelähteen vaikutusta on haastavaa arvioida, mutta taulukosta selviää mihin asioihin kannattaa kiinnittää huomioita menetelmiä hyödyntäessä. Osa virhelähteistä, kuten tukipisteiden liikkeen ja kuvavääristymien aiheuttamien virheiden vaikutus on mahdollista poistaa tai minimoida käsittelemällä videot jälkikäteen erilaisin kuvakäsittelymenetelmin ennen varsinaista analyysiä, mutta huolellisesti kerätty aineisto helpottaa työn tekemistä.

Virhelähteistä huolimatta tämä työ osoittaa, että molemmilla menetelmillä on mahdollista saada johdonmukaisia ja vertailukelpoisia tuloksia edullisellakin kuvauslaitteistolla. Molemmat menetelmät ovat valmiita otettavaksi käyttöön laajemmin erilaisessa hydrologisessa tutkimuksessa. Menetelmillä on omat rajoitteensa, kuten kaikilla mittausmenetelmillä joka pitää ottaa huomioon tutkimuspaikkaan valitessa. STIV-menetelmä soveltuu parhaiten yksiulotteisen virtausnopeuden ja virtaaman mittaamiseen paikoissa, jossa virtaus on tasaista. LSPIV-menetelmä vastaavasti soveltuu monimutkaisempien, kaksiulotteisten virtausten analysointiin, jossa ollaan

Taulukko 8: Yhteenvetotaulukko tässä työssä havaituista epävarmuutta aiheuttavista tekijöistä. Virhelähteiden merkitystä arvoitu välillä (* - *****). Monet virhelähteistä ovat vuorovaikutuksessa keskenään (esim. kuvavääristymät ja videon pituus), joten yksittäisen virhelähteen vaikutusta on hankala arvioida. Taulukko on työn tekijän arvio siitä, mihin asioihin kannattaa kiinnittää huomiota tehdessä tutkimusta konenäkömenetelmillä.

Mitattava suure	Muuttuja	STIV		LSPIV	
		kiinteä	drone	kiinteä	drone
Virtausnopeus	Resoluutio	*	*	***	***
	Kuvataajuus	*	*	*****	*****
	Videon pituus	*****	*	-	*
	Kuvavääristymät	*****	*	*****	**
	Tukipisteet	*****	*	*****	*
	Virtausolosuhteet	**	**	*****	*****
	Valaistusolosuhteet	*	*	*****	*****
	Sääolosuhteet	*	*	***	*****
	Kameran liike (yksit.)	-	**	-	*****
	Kameran liike (aikasarja)	*****	-	-	-
Virtaama	Vedenkorkeuden mittaus	**	***	**	***
	Poikkileikkaus	**	**	**	**
	Virtauskerroin (α)	**	**	**	**

kiinnostuneita virtauksen suunnasta ja suuruudesta. LSPIV-menetelmän heikkous on edellytys virtauksessa näkyville hiukkasille. STIV-menetelmä on laskennallisesti nopeampi ja huomattavasti vähemmän virheherkkä kuvanlaadulle, sääolosuhteille ym. virhetekijöille ja melkein mistä tahansa videosta on mahdollista saada tieto virtausnopeudesta. Tiedonkäsittelyn automatisointi ja reaaliaikainen tiedon tuottaminen on toteutettavissa Hydro-STIV-ohjelmalla ja soveltuu siten hyvin virtaaman aikasarjojen tuottamiseen. LSPIV:llä vastaava automatisointi ei liene mahdollista nykyisillä ohjelmistoilla ainakaan yhtä helposti. Muutoinkaan LSPIV-menetelmä ei sovellu kovinkaan hyvin viistosta kuvattuihin videoihin, koska videon resoluutio laskee nopeasti etäisyyden myötä, joka vaikuttaa merkittävästi mitattuihin virtausnopeuksiin.

Mikäli videoita kuvataan vinosta kuvakulmasta on menetelmien soveltamisessa maastossa tärkein ja työläin vaihe on tukipisteiden huolellinen määrittäminen. Kohtisuoraan ylhäältä kuvatessa dronella tukipisteiksi riittää kaksi pistettä tai jokin tunnettu etäisyys kuva-alalta. Lentokorkeuden ja kameran ominaisuuksien avulla voi laskea pikselierottelukyvyn, jolloin tukipisteitä kuva-alalta ei välttämättä tarvitse määrittää lainkaan. Vedenkorkeuden määrittämiseen tarvitaan toistaiseksi jokin toinen menetelmä (esim. GPS tai painesensori). Hydro-STIVin seuraavaan versioon on kehittäjien kertoman mukaan tulossa ominaisuus, jossa vedenkorkeuden voi määrittää automaattisesti kuvasta, joka entisestään lisää menetelmän sovelluskohteita ja helppokäyttöisyyttä. Poikkileikkauksen määrittämiseen tarvitaan myös jokin erillinen menetelmä.

7. Johtopäätökset

Hydrologisen tutkimuksen tekeminen ja luotettavien mittaustulosten tuottaminen on haastavaa virtaukseen vaikuttavien monien muuttujien vuoksi. Hydrologisen tiedon tuottamisessa absoluuttinen mittaustarkkuus ei ole keskeistä vaan tulosten edustavuus ja vertailukelpoisuus. Tässä työssä kokeiltiin kahta konenäköön perustuvaa virtaus- ja virtaamamittausmenetelmää käytännön kenttätyössä Iijoella sekä Kalajoella. Työn tulokset osoittavat, että kuvatulokintamenetelmillä saadaan kustannustehokkaasti tarkkaa ja vertailukelpoista tietoa virtausolosuhteista ja virtaamista. Menetelmien keskeiset virhelähteet ja rajoitteet liittyvät tutkimuspaikan virtausolosuhteisiin sekä kuvausteknisiin seikkoihin. Voimakkaat linssivääristymät vaikeuttavat molempien menetelmien soveltamista ja heikentävät tulosten johdonmukaisuutta.

STIV-menetelmä soveltuu parhaiten yksiulotteisen virtausnopeus- tai virtaamatiedon tuottamiseen. Menetelmä on varsin luotettava ja tuottaa johdonmukaisia tuloksia riippumatta aineiston laadusta. Kuvaustekniset muuttujat kuten linssivääristymät, videon pituus ja kuvataajuus vaikuttavat tuloksiin, mutta samoilla asetuksilla tulokset pysyvät vertailukelpoisina. Automatisoidun aikasarjan tuottamisessa on tärkeää kiinnittää erityistä huomiota kamera-asennuksen pysyvyyteen, sillä kameran liikkeen vaikutus aikasarjaan on selkeä ja riistakameran kuperan linssin aiheuttamien kuvavääristymien takia liikkeen vaikutus korostuu. Jatkuvia automaattisesti kerättäviä havaintoja varten olisi siis viisasta käyttää kameraa, jonka linssi on mahdollisimman rektilineaarinen eli suorakulmainen. Mikäli kuitenkin käytetään riistakameran tyyppistä kameraa aineiston keräämiseen, voi vääristymien sekä kameran liikkeen vaikutusta vähentää sijoittamalla tutkimusalue ja tukipisteet kameran kuva-alan keskiosaan sekä kuvaamalla videot poikkileikkauksen myötäisesti uoman sivulta. Kameran liikkeen arviointiin tai liikkeen vaikutuksen poistamista varten kuva-alalla olisi hyvä olla myös joitakin kiinteitä pysyviä kohteita, joita voi hyödyntää videostabilointiprosessissa. Mikäli halutaan tuottaa lähes jatkuvia ja reaaliaikaisia virtaama-aikasarjoja olisi kiinteän mittausaseman perustaminen ja virtaamatiedon tuottamisen automatisointi toteuttavissa STIV-menetelmällä edullisin kustannuksin verrattuna perinteisiin hydrologisiin mittausasemiin. Seuraava askel menetelmän soveltuvuuden arvioinnissa vakituisen hydrologiseen seurantaan olisi perustaa nykyisten hydrologisten havaintoasemien yhteyteen konenäköön perustuva virtaamamittausasema. Vedenkorkeusasemilta saataisiin tieto vedenkorkeudesta reaaliajassa ja STIV-menetelmän tuottamia virtaamatuloksia voisi verrata asemien purkautumiskäyriin. Kuvatulkintamenetelmät soveltunevat hyvin myös eri vesirakenteissa (esim. betoniset kalatiet ja säännöstelypadot) yhteydessä tapahtuvan virtauksen mittaamiseen, koska niiden poikkileikkaukset ovat tiedossa ja rakenteiden tunnettuja mittoja voisi käyttää tukipisteinä. Jo olemassa olevaa kamerainfraa (esim. valvontakamerat ja kelikamerat) voisi mahdollisesti hyödyntää menetelmän soveltamisessa. Toistuvia dronemittauksia varten voisi määrittää ennalta sopivat mittauspaikat poikkileikkauksineen kiinnostuksen kohteena olevalta alueelta ja käydä keräämässä aineistoja eri ajankohtina.

LSPIV-menetelmä soveltuu paremmin monimutkaisempien virtausten kaksiulotteiseen mittaamiseen. Menetelmä on herkkä kuvausteknisille muuttujille ja huomattavasti valikoivampi virtausolosuhteille kuin STIV-menetelmä. Resoluution, kuvausetäisyyden (tai lentokorkeuden), kuvataajuuden ja analyysien asetusten välillä on vuorovaikutus, joka vaikuttaa tuloksiin. Keskeinen edellytys luotettaville tuloksille on se, että veden virtaus on silmin nähtävissä tai sen mukana kulkee jotakin ainesta, jonka kulkua pystytään jäljittämään. Suomen sedimenttipitoiset tummat vedet näyttävät kuitenkin soveltuvan kohtuullisen hyvin menetelmälle. Virtauksen erottumista pystyy parantamaan lisäämällä virtaukseen jotakin ekologisesti neutraalia ainesta. Menetelmän tuottama kaksiulotteinen spatiaalinen tieto virtauksesta lisää menetelmän sovellyskohteita merkittävästi erilaisessa paikallisemmassa tutkimuksessa. Menetelmälle soveltuvia tutkimuskohteita voisi olla eroosioon tai sedimentaatioon, kalojen kulkuun ja kalojen lisääntymiseen liittyvässä tutkimuksessa tai vaikkapa koskikunnostusten suunnittelussa ja onnistumisen arvioinnissa. Pintavirtauksen perusteella olisi esimerkiksi mahdollista löytää parhaimmat sijoituspaikat kutusoraikoille koskikunnostusten yhteydessä. Yhdistämällä pintavirtaustietoon valon eri aallonpituuksia mittaavilla sensoreilla saatua tietoa, voitaisiin mahdollisesti arvioida jopa uoman pohjan laatua. Keväisten jäidenlähden yhteydessä menetelmää voisi soveltaa jääpatojen yhteydessä virtauksen arviointiin, sillä ajelehtiva jäämurska saattaisi toimia luontaisena merkkiaineena virtaukselle. Oulun Yliopistossa on suunnitteilla LSPIV-menetelmään liittyvä jatkotutkimus, jossa tässä työssä kerättyä Kalajoen Juurikosken aineistoa on tarkoitus hyödyntää hydrologiseen mallinnukseen pohjatiedoiksi tai mallien kalibrointiin.

Droonien käyttö mahdollistaa virtausanalyysien tekemisen melkein missä tahansa ja helpottaa analyysien tekoa merkittävästi, sillä kohtisuoraan virtauksen yläpuolelta kuvatussa videossa analyysiin vaadittavien tukipisteiden määrittäminen on helpompaa kuin viistosti kuvaavan kiinteän kameran tapauksessa, jossa tukipisteiden määrittäminen on työlästä ja voi olla merkittävä virhelähde. Droneilla olisi mahdollista tuottaa samalla mittauksella tietoa monella eri menetelmällä. Esimerkiksi yhdistämällä LSPIV-menetelmän tuottamaa tietoa ja fotogrammetrialla tai LiDAR-menetelmällä tuotettua tietoa voisi samalla kertaa saada tietoa uoman virtausolosuhteista sekä uoman ympäristöstä, vaikka menetelmät eivät toistaiseksi vesipintaa läpäisekään. Dronella, jossa on sisäänrakennettu GPS-RTK yksikkö, olisi mahdollista toteuttaa automatisoitu aineiston kerääminen siten, että kuvatun videon asemointi suhteessa tutkimuspaikkaan olisi aina identtinen, joka helpottaisi analyysien tekemistä.

Konenäkömenetelmien perustuminen kuva-analyysiin on käyttäjäystävällisempää kuin niin sanottujen perinteisten menetelmien (esimerkiksi ADCP:n signaalianalyysi on vaikeatulkintainen), joka laajentaa sen käyttömahdollisuuksia myös muille kuin hydrologian asiantuntijoille. Droonien avulla tutkimusta voidaan tehdä lyhyellä käyttökoulutuksella. Erityisen hyvin menetelmät soveltuvat poikkeuksellisten virtausolosuhteiden, kuten tulvien aikaisen virtaamien tai virtausolosuhteiden mittaamiseen ja arviointiin. Virtaama-analyysiin tarvittavat tiedot (tukipisteet, vedenkorkeus ja uoman poikkileikkaus) voi määrittää maastossa jälkikäteen tulvien jälkeen.

Muitakin konenäkömenetelmiä voisi hyödyntää analyysien tekemisessä. Esimerkiksi tässä työssä tehty videoiden kohdistaminen ja stabilointi helpottaa analyysien tekemistä ja parantaa tulosten luotettavuutta huomattavasti. Konenäköä voisi hyödyntää vedenkorkeuden mittaamiseen tai tukipisteiden automaattiseen määrittämiseen kuva-alalta. Hyödyntämällä laajemmin erilaisia kuvankäsittelymenetelmiä voitaisiin mahdollisesti parantaa LSPIV-menetelmän virtauksen erottelukykyä tuomalla kuvista esiin yksityiskohtia, joita ei paljaalla silmällä erota.

Kaukokartoitusmenetelmät eivät vielä ole valmiita korvaamaan alan vakiintuneita mittausten menetelmiä, mutta ovat hyvä lisätyökalu hydrologisen tutkimuksen tekemiseen. Tekniikan, menetelmien ja ohjelmistojen kehittymisen myötä tulevaisuudessa voi olla mahdollista mitata virtaamaa ja muita hydrologisia muuttujia pelkästään kaukokartoituksella. Ehkäpä tulevaisuudessa useilla erilaisilla sensoreilla varustetut itseohjautuvat dronit voitaisiin ohjelmoida lentämään ennalta ohjelmoituja reittejä tiettyihin aikoihin ja keräämään tietoa hydrologisista muuttujista.

Lähdeluettelo

- Adrian, R. J. (1991). "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics". *Annual Review of Fluid Mechanics* 23.1, 261–304. DOI: [10/b749gs](https://doi.org/10/b749gs).
- Adrian, R. J. (2005). "Twenty Years of Particle Image Velocimetry". *Experiments in Fluids* 39.2, 159–169. DOI: [10.1007/s00348-005-0991-7](https://doi.org/10.1007/s00348-005-0991-7).
- Aronsoo, K. & K. Wennman (2012). *Vesirakentamisen Ja Säännöstelyn Sekä Niihin Liittyvien Kompensaatio Toimenpiteiden Vaikutukset Kalajoen Kala, Nahkiais Ja Rapukantoihin*. 5. URL: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/78690/Elinvoimaa_5_2012.pdf.
- Bechle, A. J., S. M. Asce, C. H. Wu, M. Asce, W.-C. Liu & N. Kimura (2012). "Development and Application of an Automated River-Estuary Discharge Imaging System", 13. DOI: [10/ftqnt5](https://doi.org/10/ftqnt5).
- Blois, G. ym. (2016). "UAV-Based PIV for Quantifying Water-Flow Processes in Large-Scale Natural Environments". *18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics*, 12. URL: http://lces.dem.ist.utl.pt/lxaser/lxaser2016/finalworks2016/abstracts/03.14_5.pdf.
- Bradley, A. A., A. Kruger, E. A. Meselhe & M. V. I. Muste (2002). "Flow Measurement in Streams Using Video Imagery: FLOW MEASUREMENT USING VIDEO IMAGERY". *Water Resources Research* 38.12, 51-1-51–8. DOI: [10.1029/2002WR001317](https://doi.org/10.1029/2002WR001317).
- Canny, J. (1986). "A Computational Approach to Edge Detection". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-8.6, 679–698. DOI: [10/fn3fdk](https://doi.org/10/fn3fdk).
- Chanson, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: Basic Principles, Sediment Motion, Hydraulic Modelling, Design of Hydraulic Structures*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier [u.a.] 585 s.
- Detert, M. & V. Weitbrecht (2015). "A Low-Cost Airborne Velocimetry System: Proof of Concept". *Journal of Hydraulic Research* 53.4, 532–539. DOI: [10/ggthrn](https://doi.org/10/ggthrn).
- Di Baldassarre, G. & A. Montanari (2009). "Uncertainty in River Discharge Observations: A Quantitative Analysis". *Hydrology and Earth System Sciences* 13.6, 913–921. DOI: [10/c8x4fp](https://doi.org/10/c8x4fp).

- ECORIVER (2020). URL: https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus__kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Vesivoimatuotantoon_rakennettujen_jokien_ekosysteemipalvelujen_arviointi_ja_arvottaminen_monitieteisesti__ECORIVER (viitattu 03. 12. 2020).
- Feng, Y. & J. Wang (2008). "GPS RTK Performance Characteristics and Analysis". *Journal of Global Positioning Systems* 7.1, 1–8. DOI: [10/bpsmvd](https://doi.org/10/bpsmvd).
- Fitzgibbon, A. (2001). "Simultaneous Linear Estimation of Multiple View Geometry and Lens Distortion". *2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1, I-125-I-132. DOI: [10/fj6h9c](https://doi.org/10/fj6h9c).
- Fujita, I. (2017). "Discharge Measurements of Snowmelt Flood by Space-Time Image Velocimetry during the Night Using Far-Infrared Camera". *Water* 9.4, 269. DOI: [10.3390/w9040269](https://doi.org/10.3390/w9040269).
- Fujita, I., M. Muste & A. Kruger (1998). "Large-Scale Particle Image Velocimetry for Flow Analysis in Hydraulic Engineering Applications". *Journal of Hydraulic Research* 36.3, 397–414. DOI: [10.1080/00221689809498626](https://doi.org/10.1080/00221689809498626).
- Fujita, I., Y. Notoya, K. Tani & S. Tateguchi (2018). "Efficient and Accurate Estimation of Water Surface Velocity in STIV". *Environmental Fluid Mechanics*. DOI: [10.1007/s10652-018-9651-3](https://doi.org/10.1007/s10652-018-9651-3).
- Fujita, I., H. Watanabe & R. Tsubaki (2007). "Development of a Non-intrusive and Efficient Flow Monitoring Technique: The Space-time Image Velocimetry (STIV)". *International Journal of River Basin Management* 5.2, 105–114. DOI: [10.1080/15715124.2007.9635310](https://doi.org/10.1080/15715124.2007.9635310).
- Fulton, J. & J. Ostrowski (2008). "Measuring Real-Time Streamflow Using Emerging Technologies: Radar, Hydroacoustics, and the Probability Concept". *Journal of Hydrology* 357.1-2, 1–10. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.03.028](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.028).
- Gonçalves, J. & R. Henriques (2015). "UAV Photogrammetry for Topographic Monitoring of Coastal Areas". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104, 101–111. DOI: [10/f7c2cv](https://doi.org/10/f7c2cv).
- Gribbon, K. T., C. T. Johnston & D. G. Bailey (2003). "A Real-Time FPGA Implementation of a Barrel Distortion Correction Algorithm with Bilinear Interpolation", 6. URL: https://www.researchgate.net/publication/228546868_A_real-time_FPGA_implementation_of_a_barrel_distortion_correction_algorithm_with_bilinear_interpolation.
- Gribovszki, Z., J. Szilágyi & P. Kalicz (2010). "Diurnal Fluctuations in Shallow Groundwater Levels and Streamflow Rates and Their Interpretation – A Review". *Journal of Hydrology* 385.1-4, 371–383. DOI: [10/d3r4fg](https://doi.org/10/d3r4fg).

- Hauet, A., M. Muste & H.-C. Ho (2009). "Digital Mapping of Riverine Waterway Hydrodynamic and Geomorphic Features". *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS* 34, 11.
- Hrachowitz, M. ym. (2013). "A Decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a Review". *Hydrological Sciences Journal* 58.6, 1198–1255. DOI: [10.1080/02626667.2013.803183](https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183).
- Huang, W.-C., C.-C. Young & W.-C. Liu (2018). "Application of an Automated Discharge Imaging System and LSPIV during Typhoon Events in Taiwan". *Water* 10.3, 280. DOI: [10.3390/w10030280](https://doi.org/10.3390/w10030280).
- International Organization for Standardization (2007). *Hydrometry - Measurement of Liquid Flow in Open Channels Using Current-Meters or Floats*.
- Jianbo Shi & Tomasi (1994). "Good Features to Track". *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-94*, 593–600. DOI: [10/bb3gcz](https://doi.org/10/bb3gcz).
- Jodeau, M., A. Hauet, A. Paquier, J. Le Coz & G. Dramais (2008). "Application and Evaluation of LS-PIV Technique for the Monitoring of River Surface Velocities in High Flow Conditions". *Flow Measurement and Instrumentation* 19.2, 117–127. DOI: [10/dttkjt](https://doi.org/10/dttkjt).
- Kantoush, S. A., A. J. Schleiss, T. Sumi & M. Murasaki (2011). "LSPIV Implementation for Environmental Flow in Various Laboratory and Field Cases". *Journal of Hydro-environment Research* 5.4, 263–276. DOI: [10.1016/j.jher.2011.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jher.2011.07.002).
- Korhonen, J. (2007). *Suomen Vesistöjen Virtaaman Ja Vedenkorkeuden Vaihtelut*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus Edita Publishing [jakaja].
- Koutalakis, P., O. Tzoraki & G. Zaimis (2019). "UAVs for Hydrologic Scopes: Application of a Low-Cost UAV to Estimate Surface Water Velocity by Using Three Different Image-Based Methods". *Drones* 3.1, 14. DOI: [10.3390/drones3010014](https://doi.org/10.3390/drones3010014).
- Le Boursicaud, R., L. Pénard, A. Hauet, F. Thollet & J. Le Coz (2016). "Gauging Extreme Floods on YouTube: Application of LSPIV to Home Movies for the Post-Event Determination of Stream Discharges: Application of LSPIV to Flood Home Movies". *Hydrological Processes* 30.1, 90–105. DOI: [10.1002/hyp.10532](https://doi.org/10.1002/hyp.10532).
- Le Coz, J., M. Jodeau, A. Hauet, B. Marchand & R. Le Boursicaud (2014). "Image-Based Velocity and Discharge Measurements in Field and Laboratory River Engineering Studies Using the Free Fudaa-LSPIV Software". Teoksessa: *River Flow 2014*. Toim. A. Schleiss, G. de Cesare, M. Franca & M. Pfister. CRC Press, 1961–1967. DOI: [10.1201/b17133-262](https://doi.org/10.1201/b17133-262).
- Leppäranta, M., J. Virta & T. Huttula (2017). *Hydrologian perusteet*. Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos. DOI: [10.31885/2018.00021](https://doi.org/10.31885/2018.00021).

- Lewis, Q. W. & B. L. Rhoads (2018). "LSPIV Measurements of Two-Dimensional Flow Structure in Streams Using Small Unmanned Aerial Systems: 2. Hydrodynamic Mapping at River Confluences". *Water Resources Research* 54.10, 7981–7999. DOI: [10.1029/2018WR022551](https://doi.org/10.1029/2018WR022551).
- Lucas, B. D. & T. Kanade (1981). "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision", 10.
- Al-mamari, M., S. Kantoush, S. Kobayashi, T. Sumi & M. Saber (2019). "Real-Time Measurement of Flash-Flood in a Wadi Area by LSPIV and STIV". *Hydrology* 6.1, 27. DOI: [10.3390/hydrology6010027](https://doi.org/10.3390/hydrology6010027).
- Muste, M., I. Fujita & A. Hauet (2008). "Large-Scale Particle Image Velocimetry for Measurements in Riverine Environments: LARGE-SCALE PARTICLE VELOCIMETRY". *Water Resources Research* 44.4. DOI: [10.1029/2008WR006950](https://doi.org/10.1029/2008WR006950).
- Mustonen, S., toim. (1986). *Sovellettu Hydrologia*. Vesiyhdistyksen Julkaisuja 1. Helsinki: Vesiyhdistys r.y. 503 s.
- OpenCV (2020). URL: <https://opencv.org/> (viitattu 10. 11. 2020).
- Osman Akan, A. (2006). *Open Channel Hydraulics*. Amsterdam; Boston: Elsevier/BH.
- Paine, D. P. & J. D. Kiser (2012). *Aerial Photography and Image Interpretation*. 3. ed. Hoboken: Wiley. 629 s.
- Patalano, A., C. M. García & A. Rodríguez (2017). "Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A Simple and User-Friendly Toolbox for Large Scale Water Surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)". *Computers & Geosciences* 109, 323–330. DOI: [10.1016/j.cageo.2017.07.009](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009).
- Pearce, S. ym. (2020). "An Evaluation of Image Velocimetry Techniques under Low Flow Conditions and High Seeding Densities Using Unmanned Aerial Systems". *Remote Sensing* 12.2, 232. DOI: [10.3390/rs12020232](https://doi.org/10.3390/rs12020232).
- Pejhan, S., T.-H. Chiang & Y.-Q. Zhang (1999). "Dynamic Frame Rate Control for Video Streams". *Proceedings of the seventh ACM international conference on Multimedia*, 141–144. DOI: [10/bgxb54](https://doi.org/10/bgxb54).
- Person, É. (2013). "Impact of Hydropeaking on Fish and their Habitat". Communication (Laboratoire de constructions hydrauliques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne) 55, 151. URL: https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A13524/datastream/PDF/Person-2013-Impact_of_hydropeaking_on_fish-%28published_version%29.pdf.

- Planchon, O., N. Silvera, R. Gimenez, D. Favis-Mortlock, J. Wainwright, Y. L. Bissonnais & G. Govers (2005). "An Automated Salt-Tracing Gauge for Flow-Velocity Measurement". *Earth Surface Processes and Landforms* 30.7, 833–844. DOI: [10.1002/esp.1194](https://doi.org/10.1002/esp.1194).
- Plant, W., W. Keller & K. Hayes (2005). "Measurement of River Surface Currents with Coherent Microwave Systems". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43.6, 1242–1257. DOI: [10.1109/TGRS.2005.845641](https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.845641).
- Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (2015). *Iijoen vesistöalueen tulvariskien hallintasuunnitelma*. 119. Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, 79. URL: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BB11EAA0F-EC53-40C5-BA73-DADD8BBBF514%7D/114511>.
- Rantz, S. (1982). *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1, Measurement of Stage and Discharge*. DOI: [10.3133/wsp2175_voll](https://doi.org/10.3133/wsp2175_voll).
- Rodriguez-Padilla, I., B. Castelle, V. Marieu & D. Morichon (2019). "A Simple and Efficient Image Stabilization Method for Coastal Monitoring Video Systems". *Remote Sensing* 12.1, 70. DOI: [10/gg92sr](https://doi.org/10/gg92sr).
- Setton, E. & B. Girod (2005). "Video Streaming with SP and SI Frames". *Visual Communications and Image Processing 2005*, 59606F. DOI: [10/bkcc6h](https://doi.org/10/bkcc6h).
- Strelnikova, D. ym. (2020). "Drone-Based Optical Measurements of Heterogeneous Surface Velocity Fields around Fish Passages at Hydropower Dams". *Remote Sensing* 12.3, 384. DOI: [10/ggtsbp](https://doi.org/10/ggtsbp).
- Subramanya, K. (2017). *Engineering Hydrology*. New Delhi: McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- Suomen Ympäristökeskus (2020a). *Hydrologisen Seurannan Kenttätöiden TOIMINTAKÄSIKIRJA*. URL: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B98453718-0AEE-4500-8D8B-5E9D4BD9F769%7D/150876>.
- Suomen Ympäristökeskus (2020b). *Vesistöjen Virtaama Pohjois-Pohjanmaan Elinkeino-, Liikenne- ja Ympäristökeskuksen Alueella*. URL: <http://wwwi3.ymparisto.fi/i3/tilanne/FIN/virtaama/PPO.htm> (viitattu 16. 11. 2020).
- Suomen Ympäristökeskus (2020c). *Hydrologiset havainnot*. URL: https://www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Ymparistotietojarjestelmat (viitattu 04. 12. 2020).
- Szeliski, R. (2010). "Computer Vision: Algorithms and Applications", 979. URL: <http://szeliski.org/Book/>.

- Tarpanelli, A., S. Barbeta, L. Brocca & T. Moramarco (2013). "River Discharge Estimation by Using Altimetry Data and Simplified Flood Routing Modeling". *Remote Sensing* 5.9, 4145–4162. DOI: [10.3390/rs5094145](https://doi.org/10.3390/rs5094145).
- Tauro, F., M. Porfiri & S. Grimaldi (2016). "Surface Flow Measurements from Drones". *Journal of Hydrology* 540, 240–245. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2016.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.012).
- Tazioli, A. (2011). "Experimental Methods for River Discharge Measurements: Comparison among Tracers and Current Meter". *Hydrological Sciences Journal* 56.7, 1314–1324. DOI: [10.1080/02626667.2011.607822](https://doi.org/10.1080/02626667.2011.607822).
- Thielicke, W. & E. J. Stamhuis (2014). "PIVlab – Towards User-Friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB". *Journal of Open Research Software* 2. DOI: [10.5334/jors.bl](https://doi.org/10.5334/jors.bl).
- Vesihallitus, toim. (1984). *Hydrologiset Havainto- Ja Mittausmenetelmät*. Vesihallituksen Julkaisuja 47. Helsinki: Vesihallitus. 88 s.
- Wikimedia Commons (2006). *I, P and B Pictures Sequence*. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IPB_images_sequence.png (viitattu 16. 11. 2020).
- Yorke, T. H. & K. A. Oberg (2002). "Measuring River Velocity and Discharge with Acoustic Doppler Profilers". *Flow Measurement and Instrumentation* 13.5-6, 191–195. DOI: [10.1016/S0955-5986\(02\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(02)00051-1).
- Zhengyou Zhang (1999). "Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations". *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 666–673 vol.1. DOI: [10/czpjkp](https://doi.org/10/czpjkp).

Liitteet

Liite 1



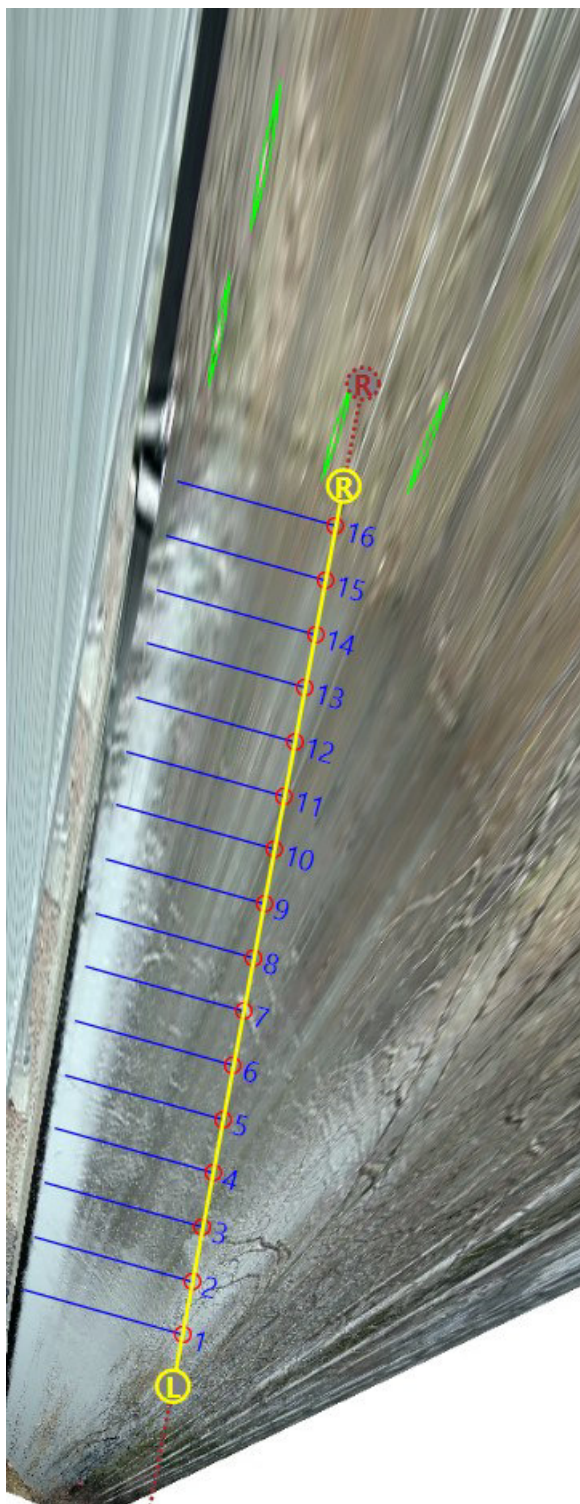
Kuva 46: Kuraluksen tutkimuspaikalla riistakameran 4K-resoluutiolla kuvatun videon kuva-kaappauksesta on nähtävissä voimakas tynnyrivääristymä. Lisäksi kuvasuhde (2880*2160 eli 4:3) on eri kuin pienemmällä resoluutiolla.

Liite 2



Kuva 47: Verrattaessa liitteen 1 kuvaan on Kurenaluksen tutkimuspaikalla riistakameran FullHD-resoluutiolla kuvatun videon kuvakaappauksessa huomattavasti vähemmän kuvavääristymiä. Myös kuvasuhde (1920*1080 eli 16:9) on eri kuin isommalla resoluutiolla.

Liite 3



Kuva 48: Kurenaluksen riistakameravideo ortorektifoinnalla. Ortorektifoinnilla viistosti kuvatun videon perspektiivi korjataan kuva-alalta mitattujen tukipisteiden avulla. Korjatusta kuvasta käy ilmi myös riistakameran erittäin voimakas linssivääristymä.