

# **Kuvatulkintaan perustuvat virtaaman mittausmenetelmät**



**Juha-Matti Välimäki**

Maantieteen tutkimusyksikkö  
Oulun Yliopisto

Joulukuu 2019

## Tiivistelmä

Tutkielman tarkoituksena on arvioida kuvatulkinntamien soveltuvuutta Suomessa tehtäviin virtaamamittauksiin. Virtaama on käytettävissä olevien vesivarojen tarkin mitta sekä veden kiertokulun tarkimmin mitattavissa oleva suure, joten sillä on suuri käytännön merkitys. Virtaamatietoja käytetään muun muassa vesistöjen säännöstelyssä, tulvariskien hallinnassa, erilaisissa vesistömalleissa ja tutkimusten pohjatietona.

Kuvatulkintamien tarkemmasta tarkastelusta ovat aiemmin mekaniikan alalla vakiintuneeseen PIV-menetelmään (Particle Image Velocimetry) pohjautuvat LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) sekä STIV (Space Time Image Velocimetry). Kuvatulkintamien periaate on yksinkertainen; kuvataan tutkitavaa uomaa ja havainnoidaan veden pintavirtauksessa tapahtuvaa muutosta kahden tai useamman kuvan välillä, jonka perusteella lasketaan nopeus. Muutos voi perustua pintavirtauksen mukana kulkevien hiukkasryhmien paikan (LSPIV) tai vedenpinnan kirkkauden (STIV) muutokseen, jonka perusteella saadaan tilastollisin menetelmin laskettua vedenpinnan virtausnopeus. Yhdistämällä virtausnopeus uoman poikkileikkauksen mittoihin sekä tietoon vedenkorkeudesta, saadaan arvio virtaamasta.

Kuvatulkintamien on sovellettu monipuolisesti erilaisissa tutkimuskohteissa ja niiden on todettu olevan riittävän tarkkoja, vaikka niiden käyttöön liittyykin monia mittausepävarmuutta tuottavia tekijöitä. Muun muassa vaihtelevat maasto- ja virtausolosuhteet, kameran ominaisuudet, kuvausetaisyys, kuvakulma sekä kuvausalueen liike tuottavat satunnaista virhettä mittauksiin.

Kuvatulkintamien näyttävät soveltuvan hyvin perinteisten mittausmenetelmien rinnalle Suomessa tehtäviin virtaamamittauksiin. Menetelmien vahvuuksia ovat muun muassa kustannustehokkuus, mittausnopeus ja toistettavuus sekä työturvallisuus, koska mittaus ei edellytä kontaktia veden kanssa. Kumpikin menetelmä voidaan automatisoida tuottamaan lähes jatkuvaa virtaamatietoa. Hyödyntämällä drooneja yhdessä kuvatulkintamien kanssa, voidaan tutkimuksia tehdä lyhyellä varoitusaajalla ja poikkeuksellisissakin virtausolosuhteissa, kuten tulvien aikana.

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Virtaaman mittaus</b>	<b>3</b>
2.1	Suomen Hydrologinen havaintoverkko . . . . .	3
2.2	Virtaama . . . . .	4
2.3	Virtaaman mittausmenetelmät . . . . .	5
2.3.1	Siivikkomittaus . . . . .	6
2.3.2	Ultraäänitutkalla (ADV tai ADCP) suoritettava mittaus . . . . .	8
2.3.3	Purkautumiskäyrän laatiminen sekä ylläpito . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Kuvatulkintaan perustuvat virtauksen mittausmenetelmät</b>	<b>11</b>
3.1	Particle Image Velocimetry . . . . .	11
3.2	LSPIV-menetelmä (Large Scale Particle Image Velocimetry) . . . . .	12
3.2.1	Kuvien esikäsittely . . . . .	15
3.2.2	Kuvien analysointi ja jälkiprosessointi . . . . .	15
3.2.3	Kuvien oikaisu ja virtaama-arvojen laskenta . . . . .	17
3.3	STIV - Space Time Image Velocimetry . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Pohdinta</b>	<b>21</b>
4.1	Mittausepävarmuutta tuottavat tekijät . . . . .	22
4.1.1	Kuvausalue, kamera ja kuvakulma . . . . .	22
4.1.2	Kuvausetaisyys ja merkkiaineen syöttö . . . . .	23
4.1.3	Sää-, valaistus- ja virtausolosuhteet . . . . .	24
4.1.4	Mittaustarkkuuden arviointi . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>26</b>
	<b>Lähdeluettelo</b>	<b>28</b>

# 1. Johdanto

Suomessa hydrologista tietoa kerätään hydrologisen seurantaverkon avulla ja tietoa hyödynnetään monella eri yhteiskunnan alalla (Maa- ja metsätalousministeriö, 2017). Ilmastonmuutoksen myötä tulevaisuudessa tarvitaan edelleen luotettavaa ja ajantasaista tietoa muuttuvista virtausolosuhteista (Korhonen, 2007).

Virtaamalla tarkoitetaan poikkileikkauksen läpi aikayksikössä kulkevaa vesimäärää ja se on käytännönläheisin mitattavista hydrologisista suureista, sillä se on veden kiertoon liittyvistä suureista tarkimmin mitattavissa (Vesihallitus, 1984). Virtaamamittauksin vahvistetaan vedenkorkeuden havaintopaikan purkautumiskäyrän oikeellisuus ja kalibroidaan vesistömallaja sekä tulvaennusteita (Korhonen, 2007). Virtaamanmittaus on haastavaa, johtuen virtaukseen vaikuttavien muuttujien suuresta määrästä, minkä vuoksi yhtä yksittäistä joka tilanteeseen sopivaa mittaussuunnitelmaa ei ole löydetty (Hrachowitz et al., 2013). Nykyisin virtaamamittauksia tuotetaan siivikkomittauksin ja ultraäänimittauksilla, jotka eivät sovellu kaikkiin virtausolosuhteisiin (Suomen Ympäristökeskus, 2017).

Teknisen kehityksen ja erilaisten kaukokartoitusmenetelmien kehityksen myötä ympäristötutkimuksessa on alettu hyödyntää laajasti uusia tutkimusmenetelmiä. Kaksi kuvatulkinnaan perustuvaa menetelmää, joilla on saatu lupaavia tuloksia hydrologisessa tutkimuksessa ovat Fujita et al. (1998) kehittämä LSPIV-menetelmä (Large Scale Particle Image Velocimetry) ja samaisen Fujitan et al. (2007; 2018) myöhemmin kehittämä STIV-menetelmä (Space-Time Image Velocimetry), joissa perättäisten kuvien tilastotieteellisiin menetelmiin perustuvassa kuva-analyysissä saadaan tietoa vesistöomien virtausolosuhteista ja virtaamasta. Kuvatulkintaan perustuvat menetelmät, kuten LSPIV ja STIV, ovat konseptina yksinkertaisia, mutta niissä on otettava huomioon useita pieniä yksityiskohtia, joista tärkeimmät ovat kuvien analysointiin käytettävät algoritmit (Bradley et al., 2002; I. Fujita et al., 2018). Kuvatulkintamenetelmien soveltamiseen maastossa liittyy muutamia mittaustulosten epävarmuutta lisääviä käytännön haasteita kuten kuvausalueen tai kameran liike, merkkiaineen käyttö, kuvien perspektiivin korjaukseen käytettävien referenssipisteiden määrittäminen ja muuttuvat maasto-olosuhteet, kuten sää-, valaistus- sekä virtausolosuhteet (Lewis ja Rhoads, 2018a; Huang, Young ja Liu, 2018). Kuvatulkintaan perustuvat menetelmät ovat monipuolisia ja kustannustehokkaita, koska nykyisin melkein mikä tahansa kuvamateriaalia

tuottava laite on riittävän tarkka analyysin tekemiseen. Erityisesti droonien edullisuus, helppokäyttöisyys ja lentovakaus on avannut uusia mahdollisuuksia monenlaisen tiedon tuottamiseen maastossa.

Tämän tutkielman tarkoituksena on arvioida kuvatulkintamenetelmien soveltuvuutta Suomessa tehtäviin virtaamamittauksiin. Toisessa kappaleessa luodaan yleiskatsaus virtaaman mittaamiseen käytettyihin nykyisiin menetelmiin. Kolmannessa kappaleessa tutustutetaan lukija LSPIV- ja STIV-menetelmien perusteisiin ja neljännessä kappaleessa arvioidaan menetelmien sovelluskohteita sekä menetelmiin liittyviä epävarmuutta tuottavia tekijöitä.

## 2. Virtaaman mittaus

Suomen Ympäristökeskuksen Hydrologisen seurannan ryhmän tuottaman toimintakäsikirjan (Suomen Ympäristökeskus, 2017) mukaan hydrologisia havaintoja tarvitaan mm. vesistöjen säännöstelyssä ja tulvariskien hallinnassa, vesistöennusteissa ynnä muussa mallintamisessa, vesistöjen käytön ja hoidon suunnittelussa, veden hankinnassa, hankesuunnittelussa, kaavoituksen, rakentamisen ja alueiden käytön suunnittelussa, maa- ja metsätaloudessa taustatietona, vesistöjen virkistyskäytössä sekä erilaisissa tutkimuksissa. Luotettavia virtausnopeustietoja tarvitaan tulvien synnyn ja etenemisen mekaniismien ennustamisessa ja tulvavaroitusjärjestelmät usein perustuvat reaaliaikaiseen virtaamatietoon (Kantoush et al., 2011). Jatkuvia virtaushavaintoja käytetään muun muassa eroosidynamiikan, sedimentin kulkeutumisen ja valuma-alueen kehittymisen tutkimuksessa (Hrachowitz et al., 2013). Virtaaman ja virtausnopeuden seurannalla on suuri merkitys hydraulisten rakenteiden, kuten tekojärvien ja voimalaitosten suunnittelussa sekä käytön ohjaamisessa (Kantoush et al., 2011). Virtausolosuhteista tarvitaan tietoa monenlaisessa ekohydrologisessa tutkimuksessa. Esimerkiksi kalojenkulun esteisyyden arvioinnissa ja vesihabitaattien luomisessa tarvitaan tietoa virtauskentistä jokirakenteiden läheisyydessä tai jokien rantatörmien lähetyillä (M. Muste, I. Fujita ja A. Hauet, 2008). Suomen Ympäristökeskuksen toimintakäsikirjan (Suomen Ympäristökeskus, 2017) mukaan kustannuksien suhteen mahdollisimman tarkoilla ja katkoksettomilla havainnoilla sekä kattavalla havaintoverkolla taataan yhteiskunnan tarvitsemat maastotiedot sekä vältetään puuttuvista tai virheellisistä havainnoista koituvat kustannukset. Maastohavaintoja tarvitaan mallien ja kaukokartoitusmenetelmien kalibrointiin ja siksi erilaiset mallit ja kaukokartoitusmenetelmät eivät pysty ainakaan vielä korvaamaan maastohavaintoja.

### 2.1 Suomen Hydrologinen havaintoverkko

Maa- ja Metsätalousministeriön vuonna 2017 tuottaman selvityksen (Maa- ja metsätalousministeriö, 2017) mukaan Suomen hydrologinen seurantaverkko tuottaa tietoa vesistöjen vedenkorkeudesta, virtaamista, valunnasta, pohjavedestä, haihdunnasta, sadannasta, lumen vesiärvosta, maankosteudesta, roudasta, pintaveden lämpötilasta, lämpötilaprofilista, jäänpaksuudesta ja jäätymisestä sekä jäiden lähdöstä. Vedenkorkeuden

havaintoja käytetään virtaaman aikasarjojen tuottamiseen purkautumiskäyrän avulla. Vedenkorkeuden havaintoasemia on lähes 900 kpl, josta valtion ylläpitovastuulla on noin 550 kpl ja loput 300 kpl ovat ulkopuolisten tiedontuottajien asemia. Vedenkorkeuden ja virtaaman havaintoasemat ovat jaettu valtakunnalliseen ja alueelliseen seurantaverkkoon. SYKE vastaa valtakunnallisen verkoston osalta, ja ELY-keskukset alueellisen verkoston osalta, tiedon oikeellisuudesta. Lisäksi alueelliset ELY-keskukset osallistuvat alueensa hydrologisen tiedon hankinnan suunnitteluun, valvontaan ja soveltuvien osin myös tuotantoon (Maa- ja metsätalousministeriö, 2017).

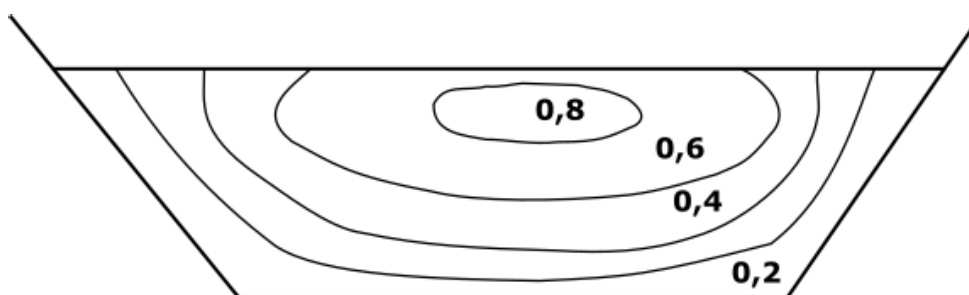
Suomen ympäristökeskuksen tietokantaan tulee lähes reaaliaikaisia virtaamahavaintoja noin 400 asemalta, joista valtion ylläpidettäviä (SYKE ja ELY-keskukset) on noin 185 kpl. Ulkopuolisen tiedon tuottajaryhmistä vesivoimayhtiöt ovat kaikkein tärkein. SYKE ja ELY-keskukset havainnoivat virtaamia pääasiassa luonnonuomista, joista määritetään virtaaman aikasarjoja vedenkorkeushavaintojen perusteella purkautumiskäyrien avulla. Ulkopuolisten tiedontuottajien virtaamahavainnot tulevat pääasiassa vesivoimalaitoksista ja säännöstelypadoista, joissa tieto perustuu kalibroituihin mittauksiin (Koskinen, 2018).

Suomen ympäristökeskuksen tuottaman Hydrologisten kenttätöiden toimintakäsikirjassa (Suomen Ympäristökeskus, 2017) kuvataan ja ohjeistetaan valtakunnallisen seurantaverkon kenttätyöt vaatimuksineen ja menettelyineen. Suomen ympäristökeskuksessa toimivalta Certi-ryhmältä saa hydrologisen seurannan kenttätöiden henkilösertifikaatin, joka edellyttää edellä mainitun Toimintakäsikirjan tuntemusta sekä käytännön töiden osaamista. Tavoitteena on, että tulevaisuudessa kaikilla hydrologian kenttätöitä tekevillä henkilöillä olisi alan henkilösertifikaatti. Toimintakäsikirjan mukaisissa havaintomenetelmissä seurataan alalla tapahtuvaa kehitystä ja uusia menetelmiä voidaan ottaa käyttöön tarvittaessa testi- ja kokeilukäytäntöjen jälkeen (Suomen Ympäristökeskus, 2017).

## 2.2 Virtaama

Avouomavirtauksella tarkoitetaan joessa ilmakehän paineen alla painovoiman aikaansaamaa virtausta, jolloin joen virtaus noudattaa avouomahydrauliikan periaatteita (Mustonen, 1986). Avouomavirtausta voi tapahtua myös myös päältä suljetuissa kanavissa ja putkissa, mikäli virtaus ei täytä koko kanavaa (Akan, 2006). Avouomavirtausta tarkastellessa keskeinen asia on uomien poikkileikkaus, joka luonnonuomissa voi vaihdella paljon ja rakennetuissa uomissa saattaa pysyä hyvinkin samanlaisena (Akan, 2006). Luonnonuomissa ja rakennetuissa uomissa poikkileikkaus on tyypillises-

ti 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 (Akan, 2006). Yleisesti virtaus kuitenkin oletetaan yksiulotteiseksi ja virtausyhtälöt kirjoitetaan päävirtaussuunnan (kohtisuoraan uoman poikkileikkausta vastaan) mukaisesti (Akan, 2006). 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 reunoille (Akan, 2006).



**Kuva 1:** Virtausjakauma avouoman poikkileikkauksessa (Mukaiillen Akan, 2006, s. 4).

Virtaamalla tarkoitetaan vesistön jonkin kohdan poikkileikkauksen läpi aikayksikössä virtaavaa veden määrää, joka ilmoitetaan mittayksikössä ( $m^3/s$  tai  $l/s$ ) (Vesihallitus, 1984). Virtaaman määrittelyn seurauksena virtaama vesistöissä on periaatteessa aina tarkoin sidottu aikaan ja paikkaan (Mustonen, 1986). Koska virtaama on käytettävissä olevien vesivarojen tarkin mitta sekä veden kiertokulun tarkimmin mitattavissa oleva suure, on virtaamamittauksilla suuri käytännön merkitys (Vesihallitus, 1984). Virtaamaa mitataan suoraan uomista uuden purkautumiskäyrän laatimiseksi, vanhan purkautumiskäyrän tarkistamiseksi, patojen sekä voimalaitosten kalibroimiseksi, vesihuollon tarpeisiin ja virtaaman talviaikaisten arvojen korjaamiseksi (jäähedäntuotto) (Korhonen, 2007). Suorat mittaukset tehdään tavallisimmin määrittämällä uoman poikkileikkaus ja mittaamalla virtausnopeus kyseisessä poikkileikkauksessa sopivalla mittausmenetelmällä. Määrittämällä vedenkorkeushavaintopaikalle purkautumiskäyrä voidaan vedenkorkeushavaintojen avulla laskea virtaamatilastoja (Vesihallitus, 1984).

## 2.3 Virtaaman mittausmenetelmät

Pintavesiprosessien monimutkaisuuden vuoksi yhtä yksittäistä mittausmenetelmää, jolla virtauksia voitaisiin tunnistaa sekä kvantifioida, ei ole löydetty (Hrachowitz et al.,

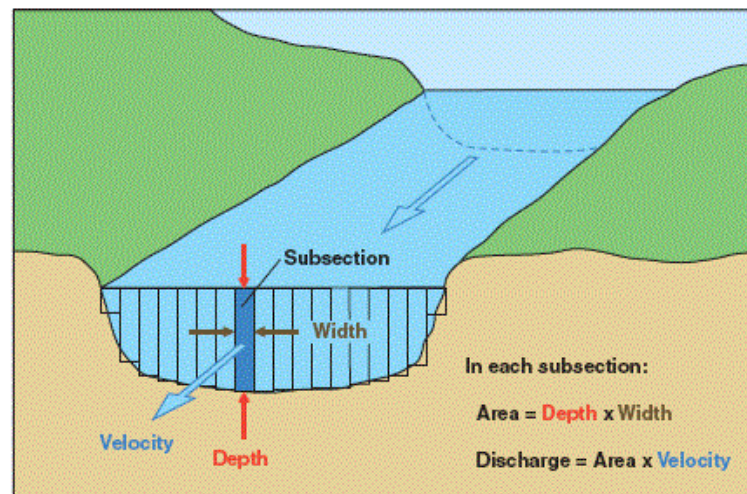


2013). Virtaamamittauksissa on tärkeää havaintojen ajallinen edustavuus sekä kattavuus (Mustonen, 1986). Virtaamamittauksia tehdään mm. siivikkomittauksin (Tazioli, 2011), erilaisilla merkkusainemenetelmillä (Planchon et al., 2005) ja ultraäänitutkalla (ADV, Acoustic Doppler Velocimetry ja ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler) (Yorke ja Oberg, 2002). Virtaamanmittauksia tehdään paikossa, joissa virtausolosuhteet ovat selkeästi todettavissa eli virtaussuunta on koko uomapoikkileikkauksessa sama ja muuttumaton ja että virtaus on silmämääräisesti havaittavissa eikä vaihtelee voimakkaasti tai satunnaisesti (Mustonen, 1986). Tyypillisesti virtaamamittauksille sopiva havainto- ja mittauspaikka 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 tehon ja hyötysuhteen avulla voidaan määrittää virtaama (Korhonen, 2007). Pienillä valuma-alueilla virtaaman mittaus tapahtuu kiinteästi asennetuilla mittapadoilla (Vesihallitus, 1984).

*"Hydrologiset mittaukset pyritään tekemään mahdollisimman edustavilla havaintopaikoilla. Havaintojen on oltava luotettavia, tarkkoja, mahdollisimman katkoksettomia sekä ajantasaisia."* (Suomen Ympäristökeskus, 2017, s. 8)

### 2.3.1 Siivikkomittaus

Siivikkomittauksia on tehty jo 1800-luvulta lähtien ja siinä määritellään samanaikaisesti uoman poikkileikkauksen pinta-ala sekä keskimääräinen virtausnopeus kyseisessä poikkileikkauksessa (Korhonen, 2007). Siivikon eli virtausanturin pyörimisnopeus on verrannollinen virtausnopeuteen ja se upotetaan joen poikkileikkauksen eri kohtiin (ns. mittapystysuorille) ja jokaiselle leikkaukselle määritetään virtausnopeuden keskiarvo (kuva 2) (Tazioli, 2011).



**Kuva 2:** Siivikkomittauksen periaate. Virtausanturi upotetaan eri syvyyksille mittapystysuorille (subsection) ja jokaiselle leikkaukselle määritetään virtauskeskiarvo. Virtaama saadaan kertomalla mittapystysuoran pinta-ala virtausnopeuden keskiarvolla (US Geological Survey).

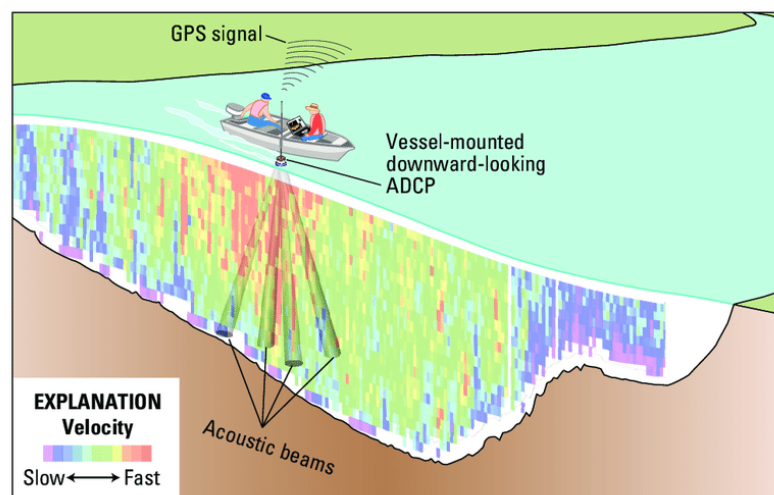
Suomen Ympäristökeskuksen toimintakäsikirjan (Suomen Ympäristökeskus, 2017) mukaan mittauksella pyritään uoman leveyden, syvyyden ja virtausnopeuden jakautumisen määrittämiseen. Mittaus tehdään veneestä, lautalta, sillalta, jäältä tai kahlaten riippuen uoman koosta. Tavoitteena on valita kohdealueelta vedenkorkeuteen sopiva mittauspoikkileikkaus, jossa seuraavat ehdot toteutuvat:

- Uoma on suora ja poikkileikkaus on säännöllisen muotoinen
- virtaus on pyörteetöntä ja virtausnopeus pääosin välillä 0,2-2 m/s
- vesisyvyys välillä 2-3 m
- poikkileikkauksessa ei kasvillisuutta tai muita mittausta tai virtausta häiritseviä tekijöitä
- paikka on tyyni. Kova tuuli häiritsee mittausta erityisesti leveissä uomissa

Mittaustiheys riippuu uoman leveydestä. Vertikaalien eli mittapystysuorien määrän suhteen seurataan standardin ISO 748:2007 mukaista mittaustiheyttä (Suomen Ympäristökeskus, 2017). Sopivissa olosuhteissa siivikkomittaus on tarkka menetelmä. Taziolin (2011) mukaan ongelmia aiheuttavat kuitenkin suuret virtaamat ja virtauksen mukana kulkeutuva materiaali, kuten tavallisesti tapahtuu tulvatilanteissa. Toinen ongelmatilanne on liian matala vesisyvyys, jolloin mittalaitetta ei saada upotettua veteen tai jos virtausnopeus on liian alhainen. Lisäksi voimakas turbulenssi vaikeuttaa virtaaman jakauman mittausta.

### 2.3.2 Ultraäänitutkalla (ADV tai ADCP) suoritettava mittaus

Ultraäänitutkia on käytetty virtaaman mittauksessa jo 1960-luvulta alkaen ja aluksi ne olivat pääasiassa kiinteitä rakenteita (Korhonen, 2007). Yorcken ja Obergin (2002) mukaan 1980-luvun loppupuolella ultraäänitutkia alettiin soveltaa liikkuvissa aluksissa. Teknisen kehityksen myötä itse laitteet ja mittausaineiston analysointiin käytettävät ohjelmistot soveltuvat nykyään erinomaisesti jokiuomien virtaamamittauksiin. Mittaus tapahtuu siten, että ultraäänitutka kiinnitetään liikkuvaan alukseen moottoriveneeseen tai radio-ohjattavaan veneeseen, joka liikkuu mitattavan virtauksen suhteen poikittaisessa suunnassa (kuva 3) (Yorke ja Oberg, 2002). Ultraäänitutka lähettää korkeataajuisia ultraäänipulsseja, jotka heijastuvat uoman pohjasta sekä vedessä olevista partikkeleista takaisin mittauslaitteeseen (Korhonen, 2007). Virtausnopeus saadaan laskemalla veneen ja heijastavan partikkelin välinen suhteellinen nopeusero saadaan laskettua perustuen äänen Doppler-siirtymään. Ohjelmisto laskee virtausnopeuden kolmessa ulottuvuudessa trigonometristen suhteiden avulla (Yorke ja Oberg, 2002).



**Kuva 3:** Ultraäänitutka lähettää korkeataajuisia ultraäänipulsseja, jotka heijastuvat uoman pohjasta ja vedessä olevista partikkeleista. Lopputuloksena saadaan virtausnopeus kolmessa ulottuvuudessa (Mueller et al., 2013, s. 2).

Suomen Ympäristökeskuksen toimintakäsikirjan (2017) mukaan yksi tärkeimmistä vaiheista ultraäänimittauksessa on mittapaikan valinta, jotta saadaan kerättyä korkealaatuaista dataa. Mittauspaikka tulisi valita siten, että se toimii tarkasti ja johdonmukaisesti useimmissa virtaus- ja uomavaihtoehtoissa, mutta on huomioitava myös tietyt rajoitukset:

- Mittapaikan poikkileikkaus ja virtaussuunnat ovat mahdollisimman tasaisia, uoman syvyysuhteet tunnetaan ja laitteen operointisyvyudet tiedostetaan

- Mittauspoikkileikkauksen tulisi sijaita mahdollisimman lähellä vedenkorkeuden mittauspaikkaa
- Pyörteisiä, turbulenttisia, kumpuavia ja jyrkkiä uoman seinämäkohtia sekä akanvirtakohtia tulisi välttää
- Pohjanmuotojen tulee olla loivia ja pohjan mahdollisimman tasainen, koska useimmat laitteet rekisteröivät syvyyden useamman kaiun keskiarvona
- Mittauskohdassa virtauksen pitäisi olla rannoilla olematonta tai vähäistä, jotta rantakorjaus jää mahdollisimman pieneksi
- Voimakkaan magneettikentän alueita tulisi välttää (esim. sillat), laitteen kompassin toimivuuden takaamiseksi

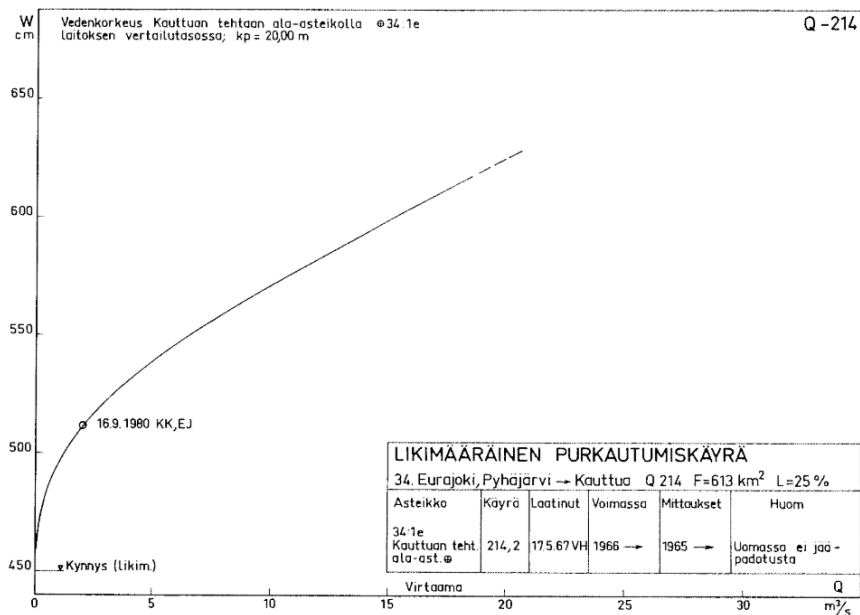
Korkealaatuisen virtaamamittauksen takaamiseksi pitää tehdä ns. liikkuvan pohjan testi, joka huomioi uoman pohjalla mahdollisesti liikkuvan sedimentin. Veden lämpötila tulee tallentaa mittauspöytäkirjaan, koska lämpötila vaikuttaa äänen nopeuteen. Mittauslaitteen syvyys vesipinnasta ilmoitetaan tarkasti, koska sillä on suora vaikutus mitatun virtaaman tarkkuuteen (Suomen Ympäristökeskus, 2017).

Yorcken ja Obergin (2002) mukaan virtausnopeuden ja virtaaman mittausten tarkkuus ultraäänitutkalla on riippuvainen ultraäänitutkan käyttäjän koulutuksesta ja kokemuksesta, sekä myös veneen kuljettajan kokemuksesta ja taidoista ohjata venettä suorassa linjassa. Kokemusta tarvitaan myös ultraäänitutkan asetusten optimointiin tutkimuskohteena olevan jokiuoman ominaisuuksien suhteen.

Suomessa kaikki suuret virtaamanmittaukset tehdään nykyisin akustisella virtausmittarilla mittauksen nopeuden, toistettavuuden, tarkkuuden ja turvallisuuden vuoksi. Ultraäänimenetelmä ei sovellu kuitenkaan pieniin uomiin, joissa mittaukset tehdään siivikolla tai pienois-ADCP:lla (FlowTracker) (Korhonen, 2007).

### **2.3.3 Purkautumiskäyrän laatiminen sekä ylläpito**

Purkautumiskäyrän (kuva 4) avulla jatkuvista vedenkorkeushavainnoista saadaan laskettua virtaamalle aikasarjoja (Suomen Ympäristökeskus, 2017).



**Kuva 4:** Purkautumiskäyrä kuvaa vedenkorkeuden ja virtaaman välistä suhdetta. Vaaka-akselilla virtaama ( $Q$ ) ja pysty-akselilla vedenkorkeus ( $W$ ) (Vesihallitus, 1984).

Purkautumiskäyrä kuvaa vedenkorkeuden ja virtaaman välistä suhdetta luonnonuomisissa (Korhonen, 2007). Purkautumiskäyrä voidaan laatia vain sellaisille vesistön osuiksille, joissa pätee yksikäsitteinen riippuvuus vedenkorkeuden ja virtaaman välillä (Suomen Ympäristökeskus, 2017). Suomen Ympäristökeskuksen toimintakäsikirjan (2017) mukaan purkautumiskäyrää laadittaessa on ympäristöhallinnon virtaama-asemilla tehtävä 5-6 virtaamamittausta eri vedenkorkeuksilla ja virtaamamittauksen lisäksi on määritettävä kynnyskorkeus, joka on se korkeuspiste, jonka alapuolella purkautuminen tyrehtyy. Toimintakäsikirjan (2017) mukaan muutoksia purkautumiskäyräasemilla havaitaan harvoin, mutta purkautumiskäyrän oikeellisuuden kontrolloimiseksi virtaamamittaus on tehtävä joka asemalla vähintään kerran kolmessa vuodessa mutta mieluummin vuosittain. Mikäli kontrollimittaus poikkeaa voimassaolevalta käyrältä enemmän kuin 5 % on mittaus toistettava ja jos poikkeavat mittaustulokset toistuvat, on koko käyrä arvioitava uudelleen 5-6 mittauksella. Baldassaren ja Montanarin (2009) tekemän tutkimuksen mukaan purkautumiskäyrällä tehdyissä virtaamaennusteissa on useita virhelähteitä: vedenkorkeuden havainnon virheet, laskentaan liittyvät interpolaatio- ja ekstrapolaatiovirheet, epävakaut virtausolosuhteet ja vuodenaikainen muutos kasvillisuudessa. Baldassare ja Montanari (2009) määrittivät omassa tutkimuksessaan, huomioiden edellä mainitut tekijät, purkautumiskäyrän avulla määritettyjen virtaama-arvojen virheen suuruudeksi 6,2% - 42,8%, keskiarvon ollessa 25,6%.

## 3. Kuvatulkintaan perustuvat virtauksen mittaussmenetelmät

Vaikka edellisessä osiossa mainittujen mittaussmenetelmien tehokkuus on todennettu vuosien käytännön kokemusten perusteella, niiden käyttöpaikat ovat rajoitettuja helposti saavutettavissa oleviin paikkoihin ja koska perinteisten mittaussmenetelmien käyttö edellyttää mittausslaitteiden kontaktia veden kanssa, on niiden käyttö poikkeuksellisissa tilanteissa kuten tulvissa, haasteellista ja jopa vaarallista. Edellä mainittujen rajoitteiden vuoksi on pyritty kehittämään erilaisia kaukokartoitukseen (remote sensing) perustuvia virtaamamittaussmenetelmiä kuten tutkia (Fulton ja Ostrowski, 2008), mikroaaltosensoreita (Plant, Keller ja Hayes, 2005) sekä satelliitteja (Tarpanelli et al., 2013). Edellä mainitut menetelmät soveltuvat parhaiten isojen virtauksien mittaamiseen, ovat usein kalliita, eivätkä sovellu usein toistettaviin mittauksiin (Tauro, Porfiri ja Grimaldi, 2016). Virtausolosuhteiden määrittämisessä ja virtaamanmittauksessa käytettävät kuvatulkintamenetelmät perustuvat aiemmin mekaniikan alalla vakiintuneeseen PIV-menetelmään (Particle Image Velocimetry). Tässä osiossa kyseisistä menetelmistä tarkemmassa tarkastelussa ovat LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) ja STIV (Space-Time Image Velocimetry).

### 3.1 Particle Image Velocimetry

PIV (particle image velocimetry) on yleisnimitys hiukkasten liikettä nesteen tai kaasun virtauksessa jäljittäville mittaussmenetelmille (Ichiro Fujita, Marian Muste ja Krueger, 1998). Yksinkertaisimmillaan PIV tarkoittaa jonkin kappaleen kulun seuraamista virtauksen pinnalla (Adrian, 1991). Ensimmäinen systemaattinen tutkimus, jossa nesteen virtausta tutkittiin hiukkasjäljitysmenetelmällä tehtiin jo 1900-luvun alkupuolella, jolloin ensimmäiset kamerat mahdollistivat kuvien tallentamisen (Adrian, 2005). Nykyisessä muodossaan PIV tarkoittaa tarkkaa kvantitatiivista nesteen virtauksen nopeusvektorin mittausta suuressa määrässä pisteitä samanaikaisesti (Adrian, 1991). Viimeisen neljän vuosikymmenen aikana PIV-menetelmä on kehittynyt nopeasti, kun analogiset tallennus- sekä laskentamenetelmät ovat korvautuneet digitaalisilla vastineillaan ja suurien datamäärien käsittely on tullut halvemmaksi ja nopeammaksi.

PIV:hen perustuvia kuvatulointamenetelmiä on kehitetty useita. Kaikkien PIV:hen pohjautuvien menetelmien käytön edellytyksenä on:

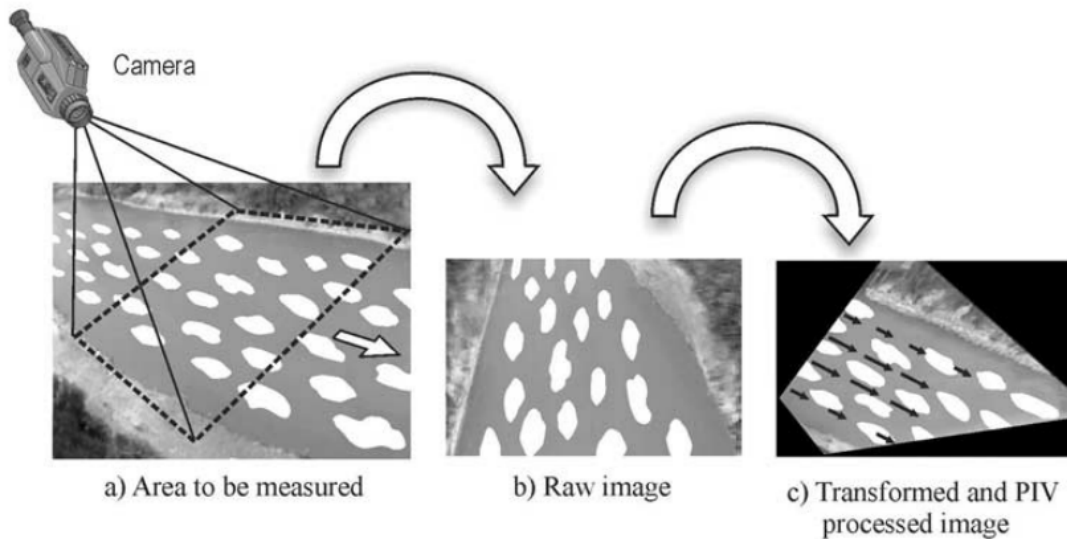
1. Veden pinnassa on jotakin virtausta jäljitteleviä hiukkasia tai virtauksessa tapahtuu jotakin muutosta, jota voidaan havainnoida.
2. Perättäiset kuvat tutkimuskohteena olevasta virtauksesta, joiden välillä muutosta pintavirtauksessa analysoidaan.
3. Tunnetun etäisyyden määrittäminen tutkimusalueelta, jolla tutkimusalueen fyysiset mitat ja kuvapikselien väliset mitat kalibroidaan. Lisäksi, jos kuvien perspektiiviä pitää korjata, tarvitaan vähintään neljä tunnettua vertailupistettä (ground reference points) tutkimusalueelta.
4. Virtaaman laskentaa varten tarvitaan uoman poikkileikkauksen mitat sekä tieto vedenkorkeudesta.

Menetelmästä riippuen, liikkeen havaitseminen virtauksessa voi perustua virtaukseen lisättyyn merkkiaineeseen (LSPIV) tai johonkin virtauksessa tapahtuvaan luontaiseen muutokseen, kuten kirkkauden (STIV) tai vaikkapa lämpötilan (TPIV, Thermal Particle Image Velocimetry) muutokseen. Jos virtausta jäljitteleviä hiukkasia on vähän tai ne ovat isokokoisia, silloin voidaan havainnoida ja mitata yksittäisen hiukkasen siirtymää (Ichiro Fujita, Marian Muste ja Kruger, 1998). 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 ja Zaimes, 2019). Jos jäljityshiukkasia on runsaasti on järkevämpää mitata hiukkasryhmien siirtymää, josta käytetään nimitystä LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) (Ichiro Fujita, Marian Muste ja Kruger, 1998).

### **3.2 LSPIV-menetelmä (Large Scale Particle Image Velocimetry)**

LSPIV on Fujitan et al. (1998) kehittämä maastossa tehtyihin virtaamamittauksiin soveltuva versio PIV-menetelmästä. LSPIV:ssä keskeinen tavoite on mitata merkattujen alueiden siirtymistä liikkeen (virtauksen) mukana kaksi tai useampi kertaa (Ichiro Fujita, Marian Muste ja Kruger, 1998). Siirtymistä mitataan kahdessa peräkkäisessä

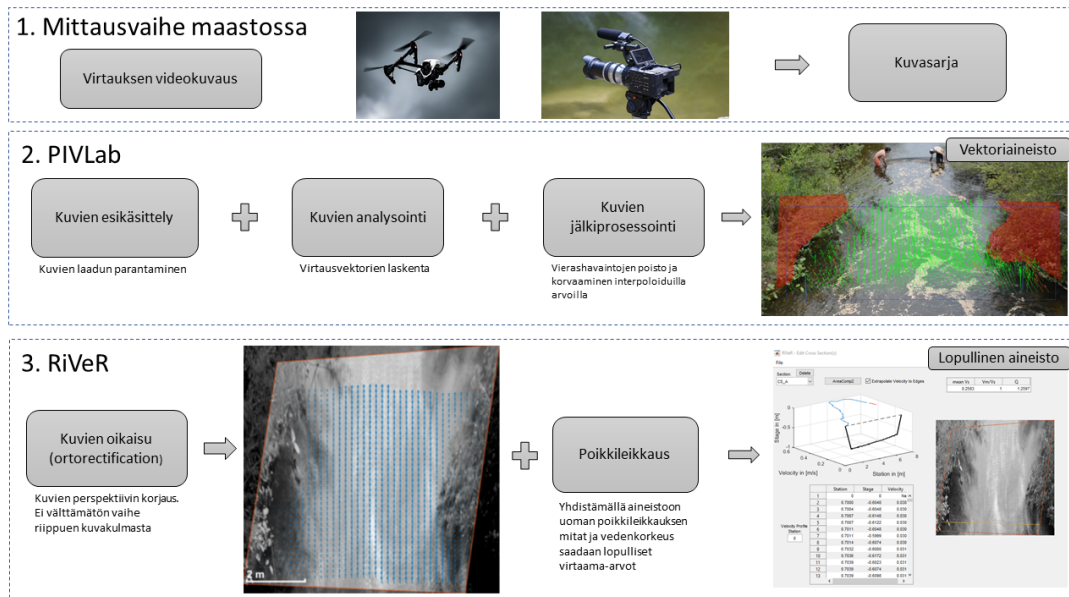
kuvassa ns. etsintäalueella (interrogation area) tilastollisin menetelmin, jotka perustuvat kuvion tunnistamiseen spatiaalisen autokorrelaation tai ristikorrelaation avulla (Bradley et al., 2002). Suurimman korrelaatioarvon saanut alue on todennäköisin paikka, johon kuvio on siirtynyt. Jokaiselle alueelle määritetään virtausvektori jakamalla siirtymä siirtymään kuluneella ajalla. Lopullinen virtausvektorikenttä saadaan toistamalla edellä mainittu prosessi jokaiselle etsintäalueelle erikseen ja lopputuloksena on koko mittausalueen keski- sekä hetkelliset nopeuskentät (Ichiro Fujita, Marian Muste ja Kruger, 1998). Koska menetelmä perustuu tilastolliseen laskentaan, on lopullista aineistoa jälkikäsiteltävä poikkeavien ja virheellisten havaintojen poistamiseksi (Bradley et al., 2002).



**Kuva 5:** LSPIV-prosessi yksinkertaistettuna: (a) kuvataan tutkimusaluetta, jossa valkoiset läiskät kuvaavat luontaista tai lisättyä merkkiainetta, jonka pohjalta virtausta visualisoidaan, (b) vääristynyt kuva, ja (c) oikaistu kuva, jossa on arvioidut virtauksen nopeusvektorit (M. Muste, I. Fujita ja A. Hauet, 2008).

Tyypillisesti kuvatulkintaan perustuvat virtaaman määritykset tapahtuvat niin, että videokuvataan uoman virtausta esimerkiksi 10-30 sekunnin ajan. Videosta poimitaan kuvia tietyn väliajoin (esim. neljä kuvaa per sekunti) ja muodostetaan kuvaparisarjoja, joiden välillä tapahtuvaa liikettä analysoidaan. Tutkimusalueelta pitää määrittää vähintään yksi tunnettu etäisyys, jolla kuvien etäisyys ja tutkimusalueen etäisyydet kalibroidaan keskenään (esim. uoman leveys) (Lewis, Lindroth ja Rhoads, 2018). Analyysin lopputuloksena on veden pinnan virtausnopeusvektoreiden muodostama kenttä. Mikäli virtausta kuvataan vinosta kuvakulmasta, pitää kuvat vielä oikaista (kuva 5 kohta (c)). Virtaaman laskentaa tarvitaan poikkileikkauksen mitat sekä tieto vedenkorkeudesta. Keski virtausnopeuskenttä muutetaan virtaama-arvoksi standardin (ISO 748,





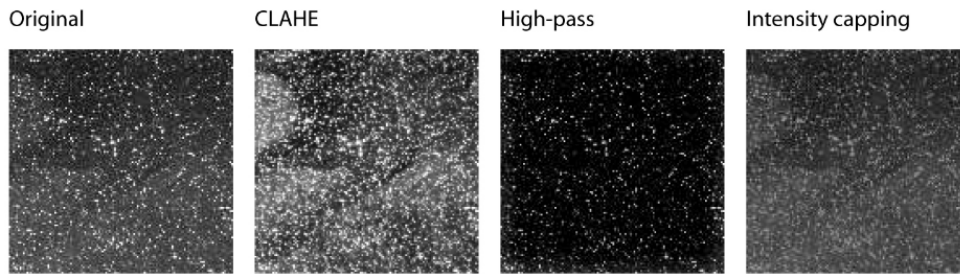
**Kuva 6:** LSPIV-prosessin vaiheet. Maastossa kuvataan uoman virtausta esimerkiksi dronilla ja lopputuloksena saadaan kuvasarja. Kuvasarja käsitellään ja analysoidaan PIVLabissa, josta lopputuloksena saadaan virtausnopeusvektorikenttä (vektoriaineisto). Vektoriaineisto oikaistaan RiVeR:ssä, mikäli oikaisu on tarpeen, ja uoman poikkileikkauksen mitat ja vedenkorkeus liitetään vektoriaineistoon, josta saadaan lopullinen valmis aineisto (Patalano, García ja Rodríguez, 2017).

2007) mukaisesti nopeus-pintamenetelmällä (Dramais et al., 2011). Keskinopeusarvot poikkileikkauksen segmenteissä voidaan laskea joko (1) interpoloimalla tai (2) ekstrapoloimalla pintanopeuden suhteen ja kertomalla nopeuskertoimella, joka huomioi virtausnopeusjakauman uomassa (Le Coz et al., 2010). Nopeuskerroin (velocity coefficient) riippuu uoman pystysuuntaisesta virtauskentän rakenteesta ja vaihtelee uoman rakenteesta riippuen. Tyypillisesti nopeuskertoimena käytetään arvoa 0,85 (Kinzel ja Legleiter, 2019).

Virtaamatiedon saamiseksi mittausaineistosta eli kuvasarjapareista, tarvitaan niiden käsittelyssä kahta eri ohjelmaa. Matlab-ohjelmiston PIVLab-lisäosalla voi tehdä kuvaparien esikäsittelyn sekä analyysin, josta tuloksena saadaan virtausvektorit. Virtausvektoriaineisto viedään RiVeR (Rectification of Image Velocity Results) nimiseen ohjelmaan, jossa tehdään kuvien oikaisu, mikäli se on tarpeen, ja yhdistetään virtausvektoriaineisto poikkileikkaukseen sekä vedenkorkeuteen, jolloin tuloksena saadaan syvyysuuntaiset virtausnopeudet sekä virtaama-arvo yksikössä  $m^3/s$  (Patalano, García ja Rodríguez, 2017). RiVeR ja PIVLab-lisäosa ovat avoimen lähdekoodin mukaisesti ilmaisia, mutta Matlabia varten tarvitaan maksullinen lisenssi. Analyysissä käytettävät kuvat poimitaan videokuvasta esimerkiksi RiVeR-ohjelmassa.

### 3.2.1 Kuvien esikäsittely

Koska analyysi perustuu kuviin, hyödynnetään analyysissä myös kuvankäsittelyn menetelmiä (kuva 7). Kuvien esikäsittelyssä pyritään kohentamaan kuvan laatua mitaustuloksen parantamiseksi (Thielicke ja Stamhuis, 2014). Histogrammin tasaamisella (CLAHE, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) parantaa huomattavasti kuva-analyysin onnistumista. Epätasaisen valaistuksen aiheuttama matalataajuinen taustakohina saadaan poistettua käyttämällä pikasuodatusta (Intensity Highpass), joka säilyttää hiukkasten valaistuksen korkeat taajuudet. Kirkkaat hiukkaset ja kirkkaat kohdat kuulustelualueella korostuvat korrelaatio-signaalissa, joka voi vääristää lopputulosta. Asettamalla kirkkaille pikseleille yläraja (Intensity Capping) saadaan ääriarvojen vaikutusta lievennettyä (Thielicke ja Stamhuis, 2014).



*Kuva 7: Kuvien esikäsittelyn vaikutukset (Thielicke ja Stamhuis, 2014).*

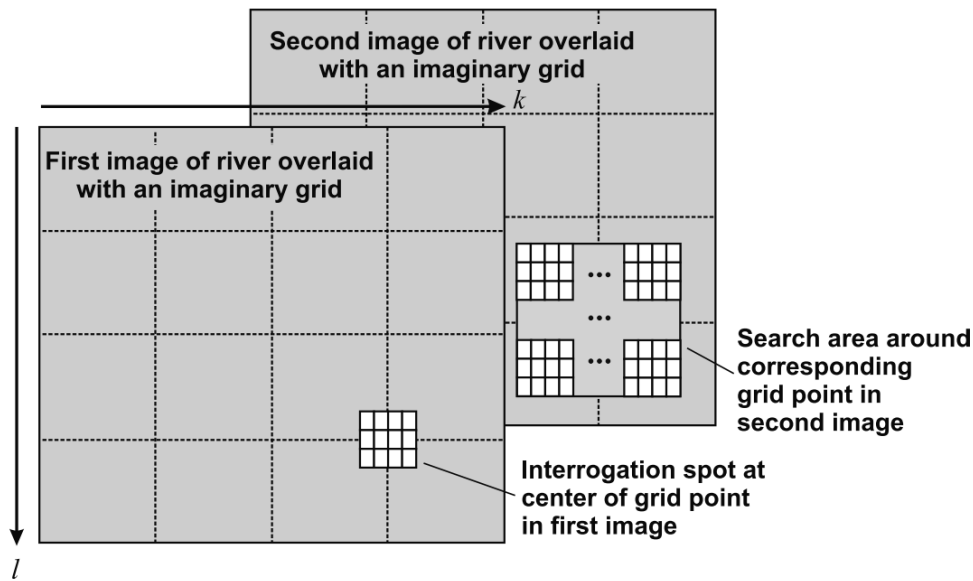
### 3.2.2 Kuvien analysointi ja jälkiprosessointi

Luotettavien mittaustulosten kannalta oleellisin asia LSPIV-menetelmään perustuvissa mittauksissa on algoritmi, joka laskee tilastollisin menetelmin hiukkasryhmien siirtymät kuvien välillä ja määrittää virtausvektorit (Bradley et al., 2002).

Kuvassa (8) on nähtävissä kaksi kuvitteellista virtauskenttää, joiden päälle on asetettu ruudukko. Ensimmäisestä kuvasta valitaan hakupiste (interrogation spot). Seuraavassa vaiheessa algoritmi valitsee etsintäalueen toisesta kuvasta ensimmäistä kuvaa vastaavasta kohdasta hakupisteen ympäriltä. Etsintäalueen sisällä jokaiselle mahdolliselle sijaintipisteelle lasketaan lineaarinen korrelaatiokerroin ( $R$ ) yhtälöllä. Sijainti, jossa korrelaatiokerroin saa suurimman arvon, on todennäköisin uusi sijainti alkuperäisestä hakupisteestä siirtyneille pikseleille. (Bradley et al., 2002).

$$R = \frac{\sum_{i=l} \sum_{i=k} (a_{kl} - a_{kl})(b_{kl} - b_{kl})}{\sum_{i=l} \sum_{i=k} (a_{kl} - a_{kl})^2 (b_{kl} - b_{kl})^2} \quad (1)$$

Yhtälön (1) ratkaisemiseksi on kaksi menetelmää, joista molempia voi käyttää PIV-Lab:ssa, sillä niillä on omat hyvät ja huonot puolensa (Thielicke ja Stamhuis, 2014).



**Kuva 8:** Kahden peräkkäisen kuvan väliltä etsitään ensimmäisen kuvan etsintäpisteen (interrogation spot) kuviota vastaavaa kuviota toisen kuvan etsintäalueelta (search area). Jokaiselle pikselille etsintäalueen sisällä lasketaan korrelaatiokerroin sitä vastaavan pikselin kanssa etsintäalueelta (Bradley et al., 2002)

Ensimmäinen tapa (Direct cross correlation, DCC) on laskea korrelaatiomatriisi spataalisessa määrittelyjoukossa. Toinen tapa (discrete Fourier transform, DFT) on laskea korrelaatiomatriisi toistumistiheyden määrittelyjoukossa. Suoran ristikorrelaation (DCC) on todettu antavan tarkempia lopputuloksia kuin DFT:n, mutta se on laskennallisesti raskaampi, erityisesti jos kuulustelualue on suuri. (Thielicke ja Stamhuis, 2014). PIVLabissa Thielicken ja Stamhuisin ohjeen (2019) mukaan oletusasetuksena DFT, koska se sopii paremmin useimpiin tilanteisiin.

LSPIV-analyysin lopputuloksen laatu on voimakkaasti riippuvainen valitun hakupisteen ja etsintäalueen sijainnista ja koosta sekä käytetyn ruudukon muodosta ja koosta (Bradley et al., 2002). Mikäli etsintäpiste on liian pieni, moni pikseliryhmä saa ison korrelaatiokertoimen, jolloin virtausvektoreista tulee virheellisiä. Vastaavasti liian iso etsintäpiste aiheuttaa liian pienet korrelaatiokertoimet, jolloin virtausvektoreista tulee myös virheellisiä. Parametrien (hakupiste, etsintäalue, ruudukko) muuttamisesta ja niiden vaikutuksesta on tehty useita simulaatioita ja tutkimuksia (esim. Bradley et al. (2002), Thielicke ja Stamhuis (2014), Lewis, Lindroth ja Rhoads (2018)).

Vektoriaineiston jälkiprosessointia tarvitaan luotettavien tuloksien saamiseksi. Jälkiprosessoinnissa vierashavainnot (outlier) voidaan suodattaa manuaalisesti valitsemalla sopivat raja-arvot nopeuksille keskihajonnan avulla tai normalisoidun mediaanitestin avulla (Thielicke ja Stamhuis, 2014). Vierashavaintojen poiston jälkeen puuttuvat vek-

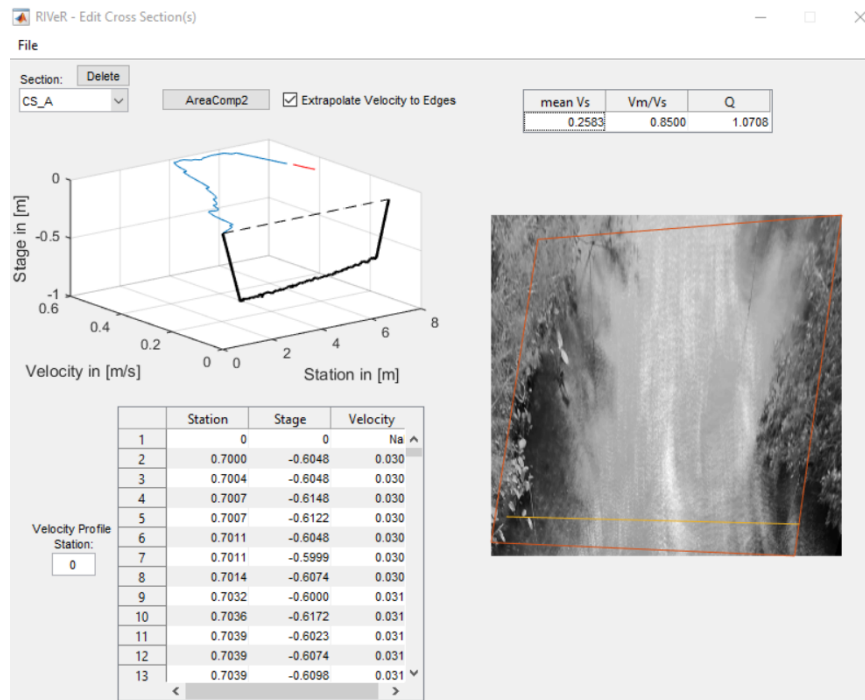
torit korvataan interpoloidulla datalla. PIV-analyysissä esiintyy aina jonkin verran mittauskohinaa, joka voidaan poistaa aineiston tasoituksella (data smoothing). PIV-lab käyttää tasauksessa pienimmän neliösumman menetelmää (Thielicke ja Stamhuis, 2014).

### 3.2.3 Kuvien oikaisu ja virtaama-arvojen laskenta

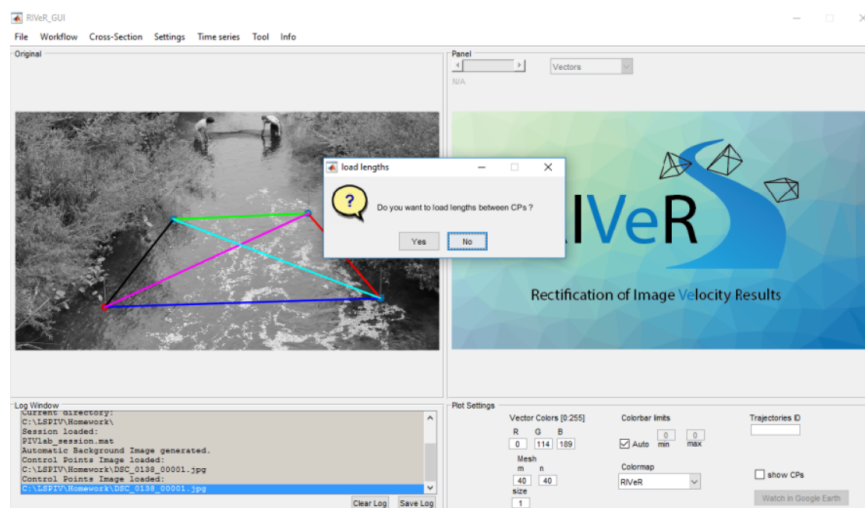
Vektoriaineiston perspektiivin korjaus ja varsinaisten virtaama-arvojen laskenta tapahtuu RiVeR-ohjelmassa. Mikäli kamera on virtauksen suhteen vinossa kuvakulmassa, täytyy analysoitaville virtausvektorikuville suorittaa koordinaattimuunnos, jolla pikselien sijainnit saadaan sidottua fyysisiin sijainteihin (Bradley et al., 2002). Koordinaattimuunnoksen tekeminen edellyttää vähintään neljän referenssipisteen (ground reference points tai ground control points) määrittämistä mittausalueelta (Ichiro Fujita, Marian Muste ja Kruger, 1998). RiVeR-ohjelma hyödyntää fyysisten koordinaattien muuntamisessa kuvakoordinaateiksi seuraavaa muunnosmatriisiyhtälöä:

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Missä  $X_r$ ,  $Y_r$  ovat kuvapisteen projektoidut koordinaatit ja  $X_p$ ,  $Y_p$  ovat fyysisten pisteiden koordinaatit.  $H_i$  ovat kahdeksan tuntematonta muuttujaa, joiden laskemiseksi pitää määrittää vähintään neljä referenssipistettä ja niiden väliset etäisyydet (kuva 9) (Patalano, García ja Rodríguez, 2017). Muunnos olettaa, että vesipinta on likimain horisontaalinen ja oikaisu tehdään analyysivaiheessa määritetyn vesipinnan suhteen, jolloin Z-komponenttia ei tarvita muunnoksessa. Lewis ja Rhoadsin (2018a) mukaan referenssipisteiden määrittämistä ei tarvita mikäli virtausta kuvataan kohtisuoraan yläpuolelta, esimerkiksi droonilla, josta lisää tutkielman seuraavassa luvussa. Oikaistu vektoriaineisto yhdistetään uoman poikkileikkauksen mittoihin, jolloin lopputuloksena saadaan syvyysuuntaiset virtausnopeudet ja arvio virtaamasta ( $m^3/s$ ) poikkileikkauksessa (kuva 10) (Patalano, García ja Rodríguez, 2017).



**Kuva 10:** Poikkileikkauksen mitat ja vedenkorkeus yhdistetään oikaistuun vektoriai-neistoon, jolloin saadaan arvio virtaamasta. Kuvan uomassa näkyvä keltainen viiva on määritetty poikkileikkaus. Virtaama-arvo löytyy yläreunasta ( $Q$ ) (Patalano, García ja Rodríguez, 2017).



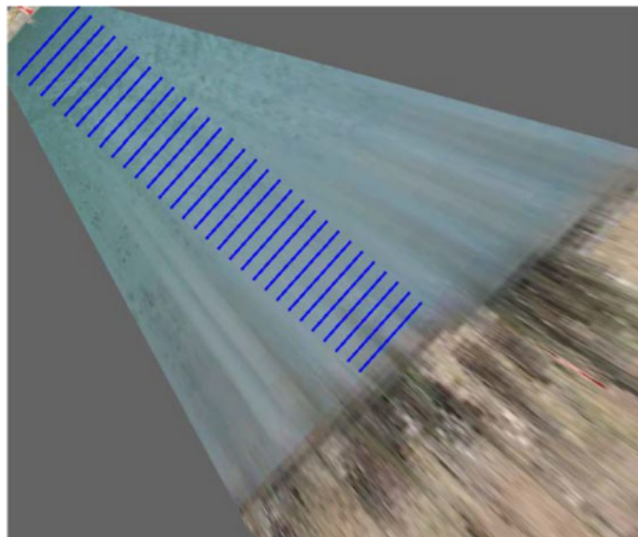
**Kuva 9:** Kuvan uomassa näkyvät värilliset pisteet ovat neljä määritettävää referenssi-pistettä ja värilliset viivat ovat niiden väliset etäisyydet, jotka kuvaavat yhtälön (2)  $H_i$  tuntemattomia muuttujia (Patalano, García ja Rodríguez, 2017).

LSPIV-menettelyn soveltamiseen maastossa liittyy muutamia mittaustulosten epä-varmuutta aiheuttavia käytännön haasteita kuten kuvausalan tai kameran liike, merkkiaineen käyttö, referenssipisteiden määrittäminen ja maasto-olosuhteet, kuten muut-

tuva valaistus sekä virtausolosuhteet. Epävarmuutta aiheuttavia tekijöitä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

### 3.3 STIV - Space Time Image Velocimetry

Merkkiaineen käyttöön liittyviin hankaluuksien takia Fujita et al. (2007 ja 2018) ovat jatkokehittäneet STIV-menetelmän, jossa merkkiainetta ei tarvita. Periaatteeltaan STIV on hyvin samanlainen kuin LSPIV, mutta STIV hyödyntää ajassa tapahtuvan kirkkauden muutoksen avulla luotua aika-avaruus kuvaa (Space Time Image, STI). Muutosta mitataan tarkastelulinjoilla (searching line, kuva 11), jotka ovat samansuuntaisia päävirtaussuunnan kanssa (I. Fujita et al., 2018).



**Kuva 11:** Oikaistussa kuvassa näkyvät kirkkauden muutoksen tarkastelulinjat. Linjoja on yhteensä 30 kpl ja niiden pituus 23 metriä. Linjojen väli on 5,46 metriä (I. Fujita et al., 2018).

STIV-menetelmässä oleellinen vaatimus on, että mitattavassa virtauksessa on havaittavissa kirkkauden tai värin muutos. Sopivaa vaihtelua kirkkaudessa tai värissä voi aiheuttaa esimerkiksi veden pinnalla tapahtuva kuohuva pyörteisyys (Ichiro Fujita, Watanabe ja Tsubaki, 2007). Fujita et al. 2018 kehittivät uudenlaisen algoritmin kirkkauden muutoksen arvioimiseksi kuvista, jossa hyödynnetään kaksiuulotteista autokorrelaatiota. Merkittävin ero LSPIV-menetelmään on se, että STIV mittaa keskimääräistä nopeuskomponenttia alajuoksun suuntaan koko mittausjakson ajalta ja LSPIV mittaa kaksiuulotteisia hetkellisiä nopeuskomponentteja kahdessa kuvassa tapahtuvan siirtymän perusteella (Ichiro Fujita, Watanabe ja Tsubaki, 2007). Fujita et al. 2007 mukaan

STIV ei sovellu monimutkaisten virtausolosuhteiden arviointiin vaan suhteellisen suurien virtauksien virtaamanmittaukseen. Näin ollen tutkimukselle asetetut tavoitteet vaikuttavat sopivan menetelmän valintaan.

Fujita et al. [2018](#) mukaan STIV:n etuina suhteessa LSPIV-menetelmään ovat sen pohjautuminen kirkkauden muutokseen, joka sopii hyvin maasto-olosuhteisiin ja sen laskennallinen tehokkuus koska analysoidaan vain yhtä virtauskomponenttia. Lisäksi käsiteltävät aineistot ovat kooltaan pienempiä, koska STIV ei ole niin resoluutioherkkä kuin LSPIV ja analyysiin kelpaa myös laadultaan heikompi kuvasarja. STIV:llä on saatu luotettavia mittaustuloksia huonoissakin valaistusolosuhteissa (I. Fujita et al., [2018](#)). STIV-menetelmän käyttöön on kehitetty kaupallinen ohjelmisto nimeltä KU-STIV.

## 4. Pohdinta

Kuvatulkintamenetelmiä on hyödynnetty onnistuneesti monessa tutkimuksessa kustannustehokkaana virtaaman mittausmenetelmänä jokiuomissa (M. Muste, I. Fujita ja A. Hauet, 2008; Dramais et al., 2011; Lewis, Lindroth ja Rhoads, 2018), mutta syvällisempi arviointi menetelmän soveltuvuudesta eri virtausolosuhteisiin on ollut puutteellista. Selviä etuja suhteessa perinteisiin menetelmiin on mittauksen nopeus ja toistettavuus (Dramais et al., 2011; Koutalakis, Tzoraki ja Zaimes, 2019). Haittapuolena on mm. LSPIV-menetelmän riippuvuus valaistusolosuhteista (Ichiro Fujita, Watanabe ja Tsubaki, 2007), sääolosuhteista (Huang, Young ja Liu, 2018) sekä virtauksen jäljitykseen merkkiaineella liittyvät ongelmat (Tauro, Porfiri ja Grimaldi, 2016). Lisätyötä aiheuttavat poikkileikkauksen ja vedenkorkeuden määrittäminen, jotka pitää toistaiseksi mitata jollakin muulla menetelmällä. Vedenkorkeuden määrittämistä droonilla on myös tutkittu ja Ridolf & Manciola (2018) saivat lupaavia tuloksia droonilla kuvatulkintaan perustuvasta vedenkorkeuden määrittämisestä, jossa laskentaan käytettiin tunnettujen pisteiden (reference points) mittoja. Kuvatulkintamenetelmien huonona puolena on myös, että ne ei eivät tuota tietoa reaaliajassa verrattuna perinteisiin menetelmiin, joilla saa arvion virtaamasta mittauksen yhteydessä (Lewis ja Rhoads, 2018a). Fujitan et al. (2007) mukaan kuitenkin sekä LSPIV, että STIV ovat kuitenkin helposti automatisoitavissa esimerkiksi kiinteästi asennetun kameran kanssa siten, että ne tuottavat lähes jatkuvaa tietoa virtaamasta.

Samanaikaisesti LSPIV-menetelmän kehittyessä on droonien käyttö erilaisessa ympäristötutkimuksessa on kasvanut viime vuosien aikana merkittävästi. Drooneilla tutkimusta voidaan tehdä vaikeakulkuisissa paikoissa, kuten tulivuorissa (McGonigle et al., 2008) tai jäätiköillä (Knuth ja Cassano, 2014), ja poikkeuksellisten olosuhteiden, kuten tulvien (Abdelkader et al., 2013), aikaan. Droonien hyödyntäminen yhdessä LSPIV-menetelmän kanssa antaa mahdollisuudet tehdä virtaamamittauksia melkein missä tahansa lyhyellä varoitusajalla ilman erityisempi ennakkovalmisteluja. Droonien sisäänrakennetun lentovakaajan (gimbal) ansiosta virtausta voidaan kuvata kohtisuoraan virtauksen suuntaan nähden, joka vähentää tarvittavaa kuvankäsittelyä (kuvien oikaisuvaihe) (Lewis, Lindroth ja Rhoads, 2018).

Droonien (Tauro, Porfiri ja Grimaldi, 2016; Lewis ja Rhoads, 2018b; Koutalakis, Tzoraki ja Zaimes, 2019) lisäksi LSPIV-menetelmää on hyödynnetty tutkimuksessa



sekä kiinteästi asennetuissa kohteissa, kuten silloissa (Tauro, Petroselli et al., 2016) ja patorakenteissa (Huang, Young ja Liu, 2018), siirrettävissä olevissa kiinteissä kohteissa, kuten kamerajalustalle tai vaijerilla (Lewis ja Rhoads, 2018a) jokiuoman ylle tai autoon (Kim et al., 2008) asennetussa kamerassa. Myös ennalta olemassa olevia kamera-asennuksia, kuten valvontakameroita (Tsubaki, Ichiro Fujita ja Tsutsumi, 2011), on sovellettu kuva-analyysiin perustuvissa virtaamamittaustutkimuksessa. Kuvatulkintamenetelmiä on hyödynnetty myös jokiuomien risteämäkohdassa syntyvien jääpatojen muodostumisen tutkimuksessa (Ichiro Fujita, Marian Muste ja Kruger, 1998).

## 4.1 Mittausepävarmuutta tuottavat tekijät

Kuvatulkintamenetelmien soveltamiseen liittyy muutamia mittaustulosten epävarmuutta aiheuttavia käytännön haasteita kuten kuvausalustan tai kameran liike, käytettävä kuvakulma sekä kuvausetäisyys, kameran linssin aiheuttamat vääristymät, merkkiaineen käyttö, referenssipisteiden määrittäminen ja sää-, valaistus- sekä virtausolosuhteet.

### 4.1.1 Kuvausalusta, kamera ja kuvakulma

Kaupallisten droonien leijuntavakautta on arvioitu useammassa tutkimuksessa (esim. Tauro, Porfiri ja Grimaldi (2016) ja Lewis ja Rhoads (2018a)), joissa se on todettu riittäväksi luotettavien mittaustuloksien saamiseksi. Droonien sisäänrakennettu lennonvakaaja (gimbal) kompensoi tuulen aiheuttamat liikkeet tiettyyn rajaan asti ja pidentämällä kuvausaikaa sekä valitsemalla analyysiin sellaiset kuvat joiden välillä ei ole liikettä havaittavissa, voi droonin liikkeiden vaikutukset minimoida analyysivaiheessa (Lewis, Lindroth ja Rhoads, 2018). Asentamalla kameran kiinteisiin kohteisiin eli rakennuksiin saa kameran liikkeet eliminoitua, kun taas esimerkiksi vaijeri- (Lewis ja Rhoads, 2018a) tai tolppa-asennukset (Lewis, Lindroth ja Rhoads, 2018) ovat alttiita tuulelle.

Lewis ja Rhoads (2018a) mukaan virtausta kuvaavan kameran linssi voi aiheuttaa kuvaan geometriavääristymiä, jota ei ole otettu huomioon useimmissa tehdyissä tutkimuksissa. Useimpien droonien kameroiden linssit ovat suoraviivaisia, mutta joidenkin kameralinssien aiheuttama kalansilmäefekti pitää korjata ennen kuvien analyysiä. Esimerkiksi yleisesti drooneissa olevan GoPro kameravalmistajan kameroiden mukana tulee ohjelmisto, jolla kalansilmäefektin saa poistettua helposti. Riippuen linssin polttovälistä, saattaa se muuttaa kuvan perspektiiviä siten, että pikselikoko ei ole yhteneväinen kuvassa (Lewis ja Rhoads, 2018a). Simuloimalla tehdyssä tutkimuksessa Hauet

et al. (2008) totesivat kameran kallistuskulman suhteessa virtaukseen aiheuttavan merkittävää hajontaa lopputuloksissa, koska kuvan laatu kärsii kuvien oikaisuvaiheessa ja kallistuskulma kannattaakin pyrkiä pitämään mahdollisimman pienenä. Kim et al. (2008) mukaan kallistus saisi olla maksimissaan 10 astetta virheiden minimoimiseksi.

#### 4.1.2 Kuvausetäisyys ja merkkiaineen syöttö

Droonin käyttö mahdollistaa kuvaamisen useilla eri lentokorkeuksilla, jolloin tutkimusalue voi olla hyvinkin laaja, mutta kuvan resoluutio heikkenee (pikselien määrä vesipinta-alayksikköä kohden) korkeuden noustessa (Lewis ja Rhoads, 2018a). Lentokorkeudessa pitää ottaa huomioon myös merkkiaineen minimikoko eli merkkiaineen hiukkasen pitää olla kooltaan isompi kuin yksittäisen pikselin kuvassa, jotta se erottuu kuva-analyysissä (Lewis ja Rhoads, 2018a).

Merkkiaineen tulisi olla riittävän kevyttä, jotta se seuraa mitattavan virtauksen virtausominaisuuksia mahdollisimman tarkasti (Ichiro Fujita, Marian Muste ja Kruger, 1998). Laboratorio-oloissa virtausta jäljittävä merkkiaine valmistetaan tarpeen mukaan ja se johdetaan automaattisesti virtaukseen optimaalisen merkkiaineen jakauman saavuttamiseksi (Adrian, 1991). Lewisin ja Rhoadsin (2018a) mukaan maastotutkimuksissa merkkiaineeksi sopii ekologisesti passiivinen aines, jolla pystyy kattamaan 10 neliömetristä jopa tuhanteen neliömetriin kokoisen alueen tasaisesti ja siksi virtauksen jäljittäminen on suurin haaste LSPIV-menettelyn käytössä. Lewis ja Rhoads (2018a) käyttivät tutkimuksessaan merkkiaineena hienojakoista mäntylastua, jossa yksittäisen lastun koko vaihteli 2-5 senttimetrin välillä.

Riittävän nopean virtauksen tai tulvan aikana virtaus itsessään voi tuottaa luontaisesti merkkiainetta mittaukselle, sillä nopeassa virtauksessa on todennäköistä, että vesi muodostaa erilaisia pyörteitä ynnä muita vesipinnan epätasaisuuksia, joista auringon valo heijastuu toimien merkkiaineena (M. Muste, I. Fujita ja A. Hauet, 2008). Myös virran mukana kulkeva materiaali, joko sedimentti tai irtonaiset lehdet, oksat tai muu materiaali, voivat toimia virtausta jäljittelevänä merkkiaineena (M. Muste, I. Fujita ja A. Hauet, 2008).

Merkkiaineen kattavuuden, kuvaresoluution ja kuvausetäisyyden välinen vuorovaikutus vaikuttaa mittaustulosten tarkkuuteen, sillä ne vaihtelevat jonkin verran kuvausalueen pienenkin liikkeen takia.

### 4.1.3 Sää-, valaistus- ja virtausolosuhteet

Maastossa tapahtuvissa mittauksissa haasteita aiheuttaa muuttuvat valaistusolosuhteet kuten Auringon valon kirkkaus ja kulma sekä sen aiheuttamat heijastukset (Lewis ja Rhoads, 2018a). Veden pinnan heijastukset ja varjot voivat aiheuttaa virheellisiä tai puuttuvia vektoreita kuva-analyysissä ja siksi mittaukset kannattaa tehdä hajaantuneen valon alla keskipäivällä virheiden vähentämiseksi (M. Muste, I. Fujita ja A. Hauet, 2008). Infrapunakameroita hyödyntämällä voidaan kuvatulkintamenetelmiä käyttää myös yöaikaan (Kinzel ja Legleiter, 2019). Tuuli voi aiheuttaa veden pinnalle pieniä aaltoja, jotka saattavat kulkea virtauksen suhteen vastakkaiseen suuntaan ja tuottaa virheellisiä virtausvektoreita analyysivaiheessa (Lewis, Lindroth ja Rhoads, 2018). Myös sade voi aiheuttaa veden pinnan väreilyä, jonka seurauksena on virheellisiä virtausvektoreita (Huang, Young ja Liu, 2018).

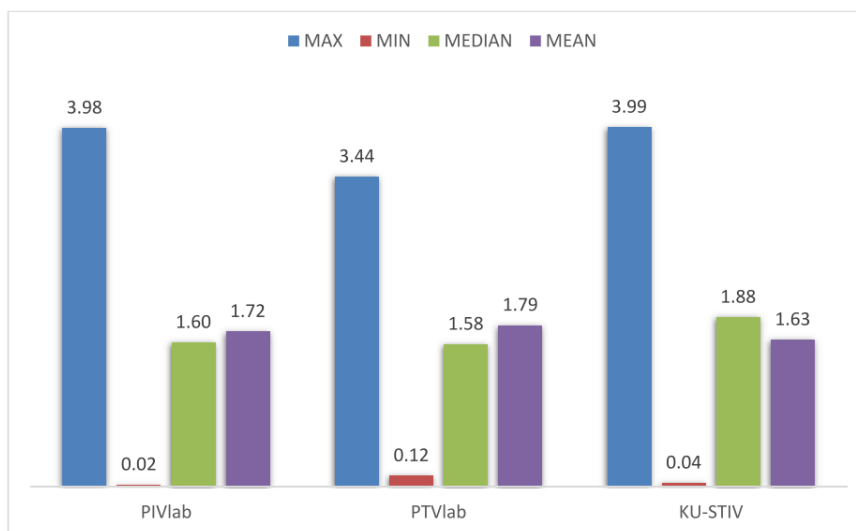
Virtausolosuhteet aiheuttavat epävarmuutta LSPIV-menetelmällä tehdyissä virtaamamittauksissa. Monet muuttujat kuten veden pinnan taso, pintanopeudet, poikkileikkaus, virtauskerroin yms. sisältävät itsessään epävarmuutta ja voivat muuttua mittauksen aikana (Lewis, Lindroth ja Rhoads, 2018). Esimerkiksi Dramais et al. (2011) mukaan virtauskerroimen aiheuttama kertaistuva virhe on suurin virtausolosuhteisiin hajontaa aiheuttava tekijä erityisesti nopean virtauksen mittauksessa, sillä virtauskerroimen vaihtelevuus on 10-15% riippuen virtausolosuhteista.

### 4.1.4 Mittaustarkkuuden arviointi

Useissa tutkimuksissa (esim. Bradley et al. (2002), Alexandre Hauet, Creutin ja Belleudy (2008), Huang, Young ja Liu (2018) ja Lewis, Lindroth ja Rhoads (2018)) on todettu LSPIV-menetelmän olevan riittävän tarkka verrattuna perinteisiin virtaamanmittausmenetelmiin. Lewis et al. (2018) havaitsivat omassa tutkimuksessaan LSPIV-menetelmän tuottamien virtaama-arvojen erojen vertailumenetelmiin (ADCP, siivikkomittaus ja purkautumiskäyrä) johtuvan satunnaisesta virheestä eikä systemaattisesta virheestä. Toistetuissa mittauksissa havaittiin vain pientä laitteesta aiheutuvaa sisäistä virhettä, joka on samaa luokkaa kuin muissa mittausmenetelmissä. LSPIV-menetelmän tarkkuus, toistettavuus ja kustannustehokkuus osoittaa, että se on varteenotettava tutkimusmenetelmä monenlaiseen tutkimukseen, jossa tarvitaan tietoa virtaamasta (Lewis, Lindroth ja Rhoads, 2018).

Koutalakis et al. 2019 vertailivat tutkimuksessaan eroja LSPIV-, LSPTV- ja STIV-menetelmien välillä soveltaen samaa droonilla kuvattua aineistoa kaikkiin kolmeen menetelmään. He havaitsivat, että LSPIV ja LSPTV tuottivat hyvin samankaltaisen

tuloksen, koska menetelmien algoritmit ovat samankaltaiset (kuva 12). STIV eroaa kahdesta muusta menetelmästä siten, että se ei tuota kokonaisia virtauskenttiä, mutta sillä saa nopeasti hyvän arvion virtaaman suuruusluokasta. Koutalakis et al. (2019) mukaan STIV-menetelmän selvin etu verrattuna kahteen muuhun on sen nopeasti tuottama arvio virtaaman suuruusluokasta.



**Kuva 12:** Vertailu eri kuvatulkitamien välillä käyttäen samaa aineistoa. LSPIV ja LSPTV tuottivat hyvin samankaltaisen tuloksen virtaamasta (mittausten keskiarvoa kuvaava violetti palkki) (Koutalakis, Tzoraki ja Zaimes, 2019).

## 5. Johtopäätökset

Kuvatulkintaan perustuvat virtaaman mittausmenetelmät vaikuttaisivat olevan hyvä uusi kustannustehokas työkalu perinteisen mittausmenetelmien rinnalle ja tueksi. Sopiva kuvatulkintamenetelmä voidaan valita tutkimuksen tavoitteiden mukaan. STIV vaikuttaisi olevan potentiaalisin menetelmä kun tarkoituksena on mitata pelkästään virtausnopeutta tai virtaamaa. LSPIV soveltuu paremmin tutkimuksiin, joissa tarvitaan yksityiskohtaista tietoa virtausolosuhteista, esimerkiksi paikallisemmassa ekologisessa sedimentaatioon, kalojen kulkuun tai lisääntymiseen liittyvässä tutkimuksessa. Menetelmien perustuminen kuva-analyysiin on käyttäjäystävällisempää kuin perinteisten menetelmien (esim. ADCP:n signaalianalyysi), joka laajentaa sen käyttäjäryhmää. Droonien avulla tutkimusta voi tehdä melkein missä tahansa, lyhyellä käyttökoulutuksella. Erityisen hyvin kuvatulkintamenetelmät soveltuvat sellaisten virtauksien mittaamiseen, johon perinteiset menetelmät eivät sovellu, kuten tulvien aikaisen ja hyvin pienten virtaamien mittaamiseen. Kuvatulkintamenetelmät soveltuvat hyvin myös eri vesirakenteiden (esim. betoniset kalatiet ja padot) virtauksen arviointiin, koska niiden poikkileikkaukset ovat tiedossa ja pysyvät yleensä stabiileina pitkiäkin aikoja. Niiden yhteydessä voisi esimerkiksi soveltaa kiinteästi asennettua kameraa ja automatisoitua toistuvaa tai lähes jatkuvaa mittausta. Kuvatulkintamenetelmiä voisi mahdollisesti soveltaa myös jäidenlähden yhteydessä virtausolosuhteiden tai virtaaman määrittämiseen, sillä ajelehtiva jäämurska voisi toimia luontaisena virtausta jäljittelevänä merkkiaineena.

Kuvatulkintamenetelmien soveltamista maastossa rajoittaa ainakin toistaiseksi poikkileikkauksen sekä vedenkorkeuden määrittäminen, jotka joudutaan mittaamaan jollakin muulla menetelmällä. Droonin avulla urbaanissa ympäristössä vedenkorkeus, esimerkiksi tulvan aikana, on mahdollista määrittää jonkin tunnetun rakenteen korkeuden mukaan tai jonkin vesirakenteen kuten kanavan tai padon yhteydessä, joiden syvyys tunnetaan. Erityisesti LSPIV-menetelmän käyttöä rajoittaa jonkin verran vaatimus virtauksen jäljityksestä jollakin merkkiaineella, joka voi olla hankala toteuttaa maasto-olosuhteissa. Kuvan resoluution, kuvausetäisyyden tai lentokorkeuden ja merkkiaineen levittäytymisen välisen vuorovaikutuksen vaikutus mittaustuloksiin on monimutkaista, sillä ne vaihtelevat jonkin verran mittausprosessin aikana riippuen olosuhteista. Tutkimuksissa kiinnitettiin vähän huomioita kameran resoluutioon, linssin ominaisuuksiin

sekä kuvien pakkausformaattiin. Käyttämällä järjestelmäkameraa saadaan kuvan resoluutiota huomattavasti kasvatettua ja tallentamalla kuvat pakkaamattomaan formaattiin saadaan kaikki kuvan tieto tallennettua, sillä kuvan pakkaamisessa (kuten tavallisesti käytettävässä jpg-formaatissa) katoaa aina jonkin verran tietoa. Useimpien järjestelmäkameroiden valokuvausnopeus riittänee kuvatulkintamenetelmien hyödyntämiseen. Lisäksi käyttämällä linssiin kiinnitettäviä suotimia, voitaisiin kuvien laatua parantaa. Esimerkiksi polarisaatiosuotimella on mahdollista poistaa kokonaan veden pinnasta tulevat suorat heijastukset ja harmaasuotimella voi vähentää kameran kennolle tulevan valon määrää. Keinotekoisella valonlähteillä, kuten salamavaloilla tai valonheittimillä voisi vaikuttaa ainakin jonkin verran tutkimusalueen valaistusolosuhteisiin, riippuen toki alueen koosta. Infrapunakameralla voisi kuvatulkintamenetelmiä käyttää myös yöaikaan.

Ilmastonmuutoksen myötä virtausolosuhteet ja virtaamat tulevat muuttumaan ja tietoa virtaamista tarvitaan vesistömallien ja tulvaennusteiden kalibroimiseksi. Suomessa talvisateet lisääntyvät lisäten talviaikaan esiintyvien tulvien todennäköisyyttä ja virtaaman vuodenaikainen jakauma muuttuu, jolloin tarvitaan luotettavaa tietoa virtaamista vesistömallien kalibroimiseksi. Kuvatulkinnalla voidaan tuottaa samalla mittauksella tietoa monella eri menetelmällä. Esimerkiksi yhdistämällä fotogrammetrialla tai LiDAR-menetelmällä tuotettua tietoa voisi samalla kertaa saada tietoa uoman virtausolosuhteista sekä uoman ympäristöstä. Droonien tai kiinteiden kamera-asennusten avulla voitaisiin matalin kustannuksin kerätä tietoa virtausolosuhteista ja virtaamista maissa, joissa ei ole vakiintunutta hydrologista seurantajärjestelmää esimerkiksi juuri ilmastonmuutoksen myötä lisääntyvien tulvien mallintamiseksi ja ennustamiseksi. Tekniikan, menetelmien ja ohjelmistojen kehittymisen myötä tulevaisuudessa voi olla mahdollista mitata virtaamaa ja muita hydrologisia muuttujia pelkästään kaukokartoituksella. Itseohjautuvat droonit voitaisiin ohjelmoida lentämään ennalta ohjelmoituja reittejä tiettyihin aikoihin halutulla tutkimusalueella keräten samalla tietoa sekä kuvien, että erilaisten sensoreiden avulla.

## Lähdeluettelo

- Abdelkader, Mohamed et al. (2013). "A UAV Based System for Real Time Flash Flood Monitoring in Desert Environments Using Lagrangian Microsensors". Teoksessa: *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Atlanta, GA, USA: IEEE, s. 25–34.
- Adrian, Ronald J. (1991). "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", s. 45.
- Adrian, Ronald J. (2005). "Twenty Years of Particle Image Velocimetry". *Experiments in Fluids* 39.2, s. 159–169.
- Akan, A. Osman (2006). *Open Channel Hydraulics*. English. Amsterdam; Boston: Elsevier/BH.
- Baldassarre, G. Di ja A. Montanari (2009). "Uncertainty in River Discharge Observations: A Quantitative Analysis". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, s. 9.
- Bradley, A. Allen et al. (2002). "Flow Measurement in Streams Using Video Imagery: FLOW MEASUREMENT USING VIDEO IMAGERY". *Water Resources Research* 38.12, s. 51-1-51–8.
- Dramais, Guillaume et al. (2011). "Advantages of a Mobile LSPIV Method for Measuring Flood Discharges and Improving Stage–Discharge Curves". *Journal of Hydro-environment Research* 5.4, s. 301–312.
- Elena Ridolfi ja Piergiorgio Manciola (2018). "Water Level Measurements from Drones: A Pilot Case Study at a Dam Site". *Water* 10.3, s. 297.
- Fujita, I. et al. (2018). "Efficient and Accurate Estimation of Water Surface Velocity in STIV". *Environmental Fluid Mechanics*.
- Fujita, Ichiro, Marian Muste ja Anton Kruger (1998). "Large-Scale Particle Image Velocimetry for Flow Analysis in Hydraulic Engineering Applications". *Journal of Hydraulic Research* 36.3, s. 397–414.
- Fujita, Ichiro, Hideki Watanabe ja Ryota 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, s. 105–114.
- Fulton, John ja Joseph Ostrowski (2008). "Measuring Real-Time Streamflow Using Emerging Technologies: Radar, Hydroacoustics, and the Probability Concept". *Journal of Hydrology* 357.1-2, s. 1–10.
- Hauet, Alexandre, Jean-Dominique Creutin ja Philippe Belleudy (2008). "Sensitivity Study of Large-Scale Particle Image Velocimetry Measurement of River Discharge Using Numerical Simulation". *Journal of Hydrology* 349.1-2, s. 178–190.
- Hrachowitz, M. et al. (2013). "A Decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a Review". *Hydrological Sciences Journal* 58.6, s. 1198–1255.
- Huang, Wei-Che, Chih-Chieh Young ja Wen-Cheng Liu (2018). "Application of an Automated Discharge Imaging System and LSPIV during Typhoon Events in Taiwan". *Water* 10.3, s. 280.

- Kantoush, Sameh A. et al. (2011). "LSPIV Implementation for Environmental Flow in Various Laboratory and Field Cases". *Journal of Hydro-environment Research* 5.4, s. 263–276.
- Kim, Y. et al. (2008). "Stream Discharge Using Mobile Large-Scale Particle Image Velocimetry: A Proof of Concept: MOBILE LARGE-SCALE PIV". *Water Resources Research* 44.9.
- Kinzel, Paul ja Carl Legleiter (2019). "sUAS-Based Remote Sensing of River Discharge Using Thermal Particle Image Velocimetry and Bathymetric Lidar". *Remote Sensing* 11.19, s. 2317.
- Knuth, Shelley L. ja John J. Cassano (2014). "Estimating Sensible and Latent Heat Fluxes Using the Integral Method from in Situ Aircraft Measurements". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 31.9, s. 1964–1981.
- Korhonen, Johanna (2007). *Suomen Vesistöjen Virtaaman Ja Vedenkorkeuden Vaihtelut*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus Edita Publishing [jakaja].
- Koskinen, Jarkko (2018). *Virtaaman Mittaaminen*. <<https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B2A03895F-DE4B-47E1-B579-8F3C89B7F5E5%7D/76336>>.
- Koutalakis, Paschalis, Ourania Tzoraki ja George 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, s. 14.
- Le Coz, J. et al. (2010). "Performance of Image-Based Velocimetry (LSPIV) Applied to Flash-Flood Discharge Measurements in Mediterranean Rivers". *Journal of Hydrology* 394.1-2, s. 42–52.
- Lewis, Quinn W., Evan M. Lindroth ja Bruce L. Rhoads (2018). "Integrating Unmanned Aerial Systems and LSPIV for Rapid, Cost-Effective Stream Gauging". *Journal of Hydrology* 560, s. 230–246.
- Lewis, Quinn W. ja Bruce L. Rhoads (2018a). "LSPIV Measurements of Two-Dimensional Flow Structure in Streams Using Small Unmanned Aerial Systems: 1. Accuracy Assessment Based on Comparison With Stationary Camera Platforms and In-Stream Velocity Measurements". *Water Resources Research* 54.10, s. 8000–8018.
- Lewis, Quinn W. ja Bruce L. Rhoads (2018b). "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, s. 7981–7999.
- Maa- ja metsätalousministeriö (2017). *Hydrologisen Seurannan Järjestäminen*. Valmisteluryhmän Raportti. Maa- ja metsätalousministeriö.
- McGonigle, A. J. S. et al. (2008). "Unmanned Aerial Vehicle Measurements of Volcanic Carbon Dioxide Fluxes". *Geophysical Research Letters* 35.6, s. L06303.
- Mueller, David S. et al. (2013). *Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat*. Techniques and Methods. US Geological Survey, s. 1–116.
- Muste, M., I. Fujita ja A. Hauet (2008). "Large-Scale Particle Image Velocimetry for Measurements in Riverine Environments: LARGE-SCALE PARTICLE VELOCIMETRY". *Water Resources Research* 44.4.
- Mustonen, Seppo, toim. (1986). *Sovelletty Hydrologia*. Vesiyhdistyksen Julkaisuja 1. Helsinki: Vesiyhdistys r.y.
- Patalano, Antoine, Carlos Marcelo García ja Andrés 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, s. 323–330.



- Planchon, Olivier et al. (2005). "An Automated Salt-Tracing Gauge for Flow-Velocity Measurement". *Earth Surface Processes and Landforms* 30.7, s. 833–844.
- Plant, W.J., W.C. Keller ja K. Hayes (2005). "Measurement of River Surface Currents with Coherent Microwave Systems". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43.6, s. 1242–1257.
- Suomen Ympäristökeskus, Hydrologisen seurannan ryhmä (2017). *Hydrologisen Seurannan Kenttätöiden TOIMINTAKÄSIKIRJA*.
- Tarpanelli, Angelica et al. (2013). "River Discharge Estimation by Using Altimetry Data and Simplified Flood Routing Modeling". *Remote Sensing* 5.9, s. 4145–4162.
- Tauro, Flavia, Andrea Petroselli et al. (2016). "A Novel Permanent Gauge-Cam Station for Surface-Flow Observations on the Tiber River". *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 5.1, s. 241–251.
- Tauro, Flavia, Maurizio Porfiri ja Salvatore Grimaldi (2016). "Surface Flow Measurements from Drones". *Journal of Hydrology* 540, s. 240–245.
- Tazioli, A. (2011). "Experimental Methods for River Discharge Measurements: Comparison among Tracers and Current Meter". *Hydrological Sciences Journal* 56.7, s. 1314–1324.
- Thielicke, William ja Eize J. Stamhuis (2014). "PIVlab – Towards User-Friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB". en. *Journal of Open Research Software* 2.
- Thielicke, William ja Eize J. Stamhuis (2019). *PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB*.
- Tsubaki, Ryota, Ichiro Fujita ja Shiho Tsutsumi (2011). "Measurement of the Flood Discharge of a Small-Sized River Using an Existing Digital Video Recording System". *Journal of Hydro-environment Research* 5.4, s. 313–321.
- US Geological Survey, USGS (ei julkaisupäivää). *For a Century, USGS Measured Steam Discharge Using Current Meters*. <<https://www.usgs.gov/media/images/a-century-usgs-measured-steam-discharge-using-current-meters>>.
- Vesihallitus, toim. (1984). *Hydrologiset Havainnot- Ja Mittausmenetelmät*. Vesihallituksen Julkaisuja 47. Helsinki: Vesihallitus.
- Yorke, Thomas H ja Kevin A Oberg (2002). "Measuring River Velocity and Discharge with Acoustic Doppler Profilers". *Flow Measurement and Instrumentation* 13.5-6, s. 191–195.