

Bruk av bildemateriale fra dronebaserte opptak for hastighetsberegning i elver med frispeilstrømning med Large-scale Particle Image Velocimetry

Maren Benjaminsen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: august 2018

Hovedveileder: Nils Rüther, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

MSc Thesis in Hydraulic Engineering

Candidate: Maren Benjaminsen

Title:

Using UAV based picture material to determine the flow velocity in open channel flows by means of large scale particle image velocimetry (LSPIV)

1. Background

The use of UAVs are mostly used in engineering surveys but has recently become very popular in the field of hydraulic and river engineering. Besides the measurement of the topography, habitat structures and vegetation covers, there are several other application. This study will apply a freely available computer program for LSPIV to existing UAVs movie footage in order to determine the surface velocities of open channel flows. In combination with the cross section geometry, it will then be possible to estimate the discharge. Especially for high flows will that information be very valuable, since classical methods to measure the discharge are not longer applicable for high discharges. Future studies will show whether the uncertainty of calculated discharges based on UAV video footage will reduce the uncertainty in the flood prediction scenarios. This study will contribute to the knowledge of using LSPIV software to UAV movies both, in terms of practicability and quality of the results.

2. Main questions for the thesis

The thesis shall cover, but not necessarily be limited to the following main questions:

- Background and motivation of the study
- Short overview of the theory of LSPIV
- Applying a LSPIV software to several test cases of interest and post processing the results
- Interpretation of the results
- Discuss the results concerning of disadvantages or advantages of using this method for different flow pattern, velocities and river geometries.
-

3. Supervision, data and information input, reporting

Dr. Nils Ruther will supervise the thesis work and make relevant information available. The candidate is encouraged to discuss with colleagues and other research staff at NTNU. In addition, the thesis is co-supervised by Kordula Schwarzwälder, post doc at IBM, NTNU.

The data needed is provided by the supervisors.

4. Format and reference statements

It shall be typed using a word processing system on a computer.

Table of content, list of Figure and tables and a list of reference shall be included.

The candidate is requested to include a signed statement that the work presented in his own.

Department of Civil and Environmental Engineering, NTNU



Nils Rüther

Associate professor

Sammendrag

Denne masteroppgaven, utført i samarbeid med FIThydro, har som formål å teste ut beregningsmetoden Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) for overflatehastighet i elver. Ved utbygging av vassdrag endres elveløpet og andre forhold i vassdraget. Som et verktøy for å vurdere påvirkningen av disse endringer brukes numeriske simuleringer hvor vannets hastighet og vannføringen er essensielle inngangsdata.

Målinger av både vannhastighet og vannføring utføres i dag med måleinstrumenter som akustisk dopplerinstrument og strømningsmåler. Disse metodene er velprøvde og gode, men har begrensninger ved ekstreme vannføringer som flom, eller svært lave vannføringer, som minstevannføring. LSPIV er i motsetning godt egnet i slike situasjoner. Metodikk som krever at måleinstrumenter og/eller operatør må nært opptil, eller ut i selve elva, kan være både vanskelig og risikofyllt. LSPIV-basert hastighetsmåling utføres fra land og droneføringen kan stå på trygg avstand til elva. Ved stor vannføring eller dersom lokaliteten har vanskelig tilkomst, representerer dette klare fordeler ved LSPIV. Markørbruk er nødvendig for å utføre hastighetsberegninger med LSPIV og er i denne oppgaven vurdert ut fra erfaringer gjort under feltarbeid i Shiffmühle.

En vesentlig del ved masteroppgaven er sensitivitetsanalysen hvor forholdet mellom tidssteget, Δt og størrelsen av *Interrogation Area* (IA) ble analysert for et allerede eksisterende bildemateriale. Fem parametersett ble testet mot hverandre og vurdert på grunnlag av fordeling av korrelasjonsfaktoren, R , for hvert av settene. Fordelingen viste at mindre Δt og IA ga en fordeling med en høyere andel av R mot 1, noe som er ønskelig. Valg av forhold for videre vurdering av resultatene ble i tillegg gjennomgått med hensyn på sammenhengen mellom hastighetsvektoren i hovedretningen til strømmingen og visuell vurdering av de øyeblikkelige vektorfeltene for hastighet.

På grunnlag av sensitivitetsanalysen ble forhold for Δt og IA valgt for hvert bildemateriale og hastighetsberegning for hver av lokalitetene gjennomført. Utvalgte parametre ble så testet med hensyn til hvordan disse påvirket hastighetsresultatet. Hovedfokus for denne testingen var utstrekningen av *Search Area* (SA), størrelse av IA og turbulens.

Resultatene i denne oppgaven viser at beregning av overflatehastighet ved bruk av LSPIV kan gi avvik under 10 prosent (10 %) i forhold til målte verdier forutsatt gode valg av parametre og gode bildedata. Dette er innafor akseptabelt avvik og tilnærmet likt resultater fra tidligere studier.

Large-scale Particle Image Velocimetry bør i videre arbeid testes for mer ekstreme vannføringer, både lave, som ved minstevannføring, og ved flom hvor andre metoder er uaktuelle. Skalering ved endret oppløsning av bildematerialet bør også testes.

Abstract

The main objective of this MSc thesis, carried out in collaboration with FIThydro, is to test usage of Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) as a method for estimating water surface velocity in rivers. Hydroelectric power development causes changes of rivers and their environment, and in order to evaluate such changes numerical simulations are very useful. Discharge and water velocity are essential input data for these simulations.

Currently, discharge as well as water velocity, is measured using acoustic Doppler instruments or current meters. These are good and well-established methods but have technical limitations under extreme conditions such as flooding or extreme low water flows. Similar limitations are not encountered using LSPIV. Methods requiring equipment or operators in, or close to the river also imply risks under such circumstances whereas LSPIV can be carried out keeping safe distance from a flooding river. LSPIV is also better when the location is difficult to reach. These are thus additional advantages to the more direct measuring techniques. Tracers are necessary when using LSPIV and the current thesis evaluates the use of such markers during a field campaign in Shiffmühle, a FIThydro test case location.

A main part of the MSc thesis is a sensitivity analysis during which the relationship between time-step Δt and the size of *Interrogation Area* (IA) was evaluated for already existing sets of footages. Five parameter sets were tested against each other and assessed based on the distribution of the correlation factor, R , obtained for each of the sets. The distribution showed that smaller Δt and IA led to higher ratios of R , moving towards 1, which is what is desired. The choices of other conditions to assess when evaluating the results, were considered based on relationships between the velocity vector in the main current direction and visual inspection of the immediate velocity vector fields.

Based on the sensitivity analysis, suitable Δt and IA relationships were chosen for each set of footages, and water velocities for each location calculated. Parameters were chosen in order to test how these would influence the velocity results. The main parameters tested were Search Area (SA), IA size and turbulence.

The results that emerged through the master thesis revealed that calculations of the water surface velocity based on LSPIV might, given that image data are good and the parameters are chosen wisely, deviate less than 10 percentage (10 %). Such results are well within an acceptable range and approximately similar to what has been found in previous studies.

Large-scale particle Image Velocimetry should in future work be tested when water flow is more extreme, both as low as minimum water flow and at flooding situations. Scaling using different pixel resolutions should also be investigated.

Forord

Denne masteroppgaven er den avsluttende delen av studiet mitt på bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven «Metoder for UAV-basert hastighetsmålinger». Den praktiske delen av arbeidet ble utført i samarbeid med FITHydro som takkes for å ha stilt med case Schiffmühle.

Jeg vil takke veileder, førsteamanuensis Nils Rüter for muligheten til å jobbe med en interessant masteroppgave. Takk til førsteamanuensis Kaspar Vereide som var medveileder på prosjektoppgaven og som stilte seg til rådighet på masteroppgaven om det trengtes. Takk til forsker Kordula Schwarzwälder for veiledning på feltarbeid og godt samarbeid med tanke på alt som ikke har vært lett å skjønne. Takk til Ismail Albayrak, Daniel Gubser og Gereon Höfkes for et muntert feltarbeid og til Martin Detert for oppgaven med å kaste ut puffede maismarkører fra en betongkant i Limmat-elva. Takk til Nils Reidar Boe Olsen for interesse for å høre hvordan oppgaven har gått og oppmuntrende smil i gangene på Valgrinda.

Jeg vil rette en stor takk til familie for støtte gjennom en arbeidsom prosess, både til Pål Alfred Larsen (papzen) og Marit Larsen (storbytantan) for hjelp til gjennomlesing og gode råd i en stressende periode. Spesielt takk til Aud Larsen (marinbiologen) for all hjelp med struktur, språk og oppbygning og gode diskusjoner om ting en ikke er enige om. (Vi tar det igjen neste år). Jeg vil også rette en takk til Toril Benjaminsen (mamzen) for alltid god støtte.

Til slutt vil jeg takke mine medstudenter, da spesielt Bao og Dahl for gode stunder på Rust med mye klaging, spenning, store stykker med sjokoladekage, gode løsninger på dårlige løsninger (solskjerm) og masse latter. Også takk til Hege, Vilde og Delp. Takk til Håvard Takle Lindholm for å gjøre livet i sommervarmen mange timer lettere og mer effektive. Tusen takk til Gården, et fantastisk kollektiv, for det beste året.

Trondhjem, 31. august 2018



Maren Benjaminsen

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Hensikt.....	3
2	Teori	5
2.1	UAV-basert metodikk med fokus på Large-scale Particle Image Velocimetry for vannhastighetsmålinger.....	5
2.1.1	Innhenting av datamateriale	5
2.1.2	Terrengmodellering.....	6
2.1.3	Beregning av vannhastighet	6
2.1.4	Beregning av bunnruhet	7
2.1.5	Numerisk modellering av elvestrekning	7
2.1.6	Kalibrering av resultatene	7
2.2	Innhenting av datamateriale i felt	7
2.2.1	Datamateriale for SfM.....	8
2.2.2	Datamateriale for LSPIV	8
2.3	Hastighetsberegning basert på markørers forflytning	9
2.3.1	Transformerings av bilder til et 2D ikke-forvrent koordinatsystem	9
2.3.2	Bildeprosessering med Particle Image Velocimetry basert på bevegelsen til markører	10
2.3.3	Bruk av beregnet hastighetsdata i vannføringsberegning	12
2.3.4	Fudaa-LSPIV	13
2.3.5	Parametre i hastighetsberegning.....	14
3	Metode.....	17
3.1	Feltarbeid Schiffmühle, Sveits	17
3.2	Hastighetsberegning	19
3.2.1	Behandling av bildedata	19
3.2.2	Sensitivitetsanalyse	20

3.2.3	Analyse av hastighetsberegning	29
4	Resultater.....	37
4.1	Lokalitet 0003	37
4.2	Lokalitet 0004.....	40
4.3	Lokalitet 0009.....	44
4.4	Lokalitet 0004 ved turbulens	47
5	Diskusjon.....	49
5.1	Hastighetsberegning	49
5.2	Large-scale Particle Image Velocimetry	51
5.2.1	Bruksområder	51
5.2.2	Feltarbeid og bruk av markører	52
5.2.3	Preprosessering.....	54
5.2.4	Large-scale Particle Image Velocimetry og akustisk dopplerinstrument.....	55
6	Konklusjon og videre arbeid	57
7	Referanser.....	61

Vedlegg

Tabell med forkortelser

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
DGSP	Digital Grain Size Project
FITHydro	Fishfriendly Innovative Technologies for Hydropower
GCP	Ground Control Points
GPS	Global Positioning System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center River Analysis System
LSPIV	Large-scale Particle Image Velocimetry
PTV	Particle Tracking Velocimetry
STIV	Space-time Image Velocimetry
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Parameterliste

- a_{xy} Distribusjon av gråtoneintensitet
- A Lengste akse for måling av stein
- A_1 - A_3 Koeffisient for koordinater bestemt av minste kvadraters metode
- b_{xy} Distribusjon av gråtoneintensitet
- B Mellomliggende akse for måling av stein
- B_1 - B_3 Koeffisient for koordinater bestemt av minste kvadraters metode
- C Korteste akse for måling av stein
- C_1 - C_3 Koeffisient for koordinater bestemt av minste kvadraters metode
- d_{90} Kornstørrelse (siktestørrelse) hvor 90 % av materiale passerer
 - i Punkt i grid
- M Mannings tall
- MX Utstrekning av IA i x-retning
- MY Utstrekning av IA i y-retning
- n Konstant for streghet av filter
- R Korrelasjonsfaktoren (også kalt kryss-korrelasjonsfaktor)
- S_{im} Utstrekning av SA i negativ y-retning
- S_{jm} Utstrekning av SA i negativ x-retning
- S_{ip} Utstrekning av SA i positiv y-retning
- S_{jp} Utstrekning av SA i positiv x-retning
- x Bildekoordinat
- X Virkelig koordinat i terrenget (vanligvis øst/vest)
- y Bildekoordinat
- Y Virkelig koordinat i terrenget (vanligvis (nord/syd))
- Z Virkelig koordinat i terrenget (høyde)

Figurliste

Figur 2.1: Forhold mellom koordinatsystem i bildet og i virkeligheten	10
Figur 2.2: Konsept for analyse av forflytningen av markører i Large-scale Particle Image Velocimetry	11
Figur 2.3: Definisjon av Search Area (SA)	11
Figur 2.4: Prosedyre for Large-scale Particle Image Velocimetry-basert vannføringsberegning	12
Figur 3.1: Schiffmühle, lokalitet for feltarbeid i elva Limmat, Sveits	18
Figur 3.2: Plassering av utslippssted for markører for testrunde 2	19
Figur 3.3: Fordeling av korrelasjonsfaktor R for lokalitet 0004	21
Figur 3.4: Prosentvis fordeling av korrelasjonsfaktoren R for lokalitet 0004.....	21
Figur 3.5: Fordeling av korrelasjonsfaktor R for lokalitet 0009	22
Figur 3.6: Prosentvis fordeling av korrelasjonsfaktoren R for lokalitet 0009.....	23
Figur 3.7:Fordeling av korrelasjonsfaktor R for lokalitet 0003	23
Figur 3.8: Prosentvis fordeling av korrelasjonsfaktoren R for lokalitet 0003.....	24
Figur 3.9: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_040_128.....	25
Figur 3.10: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_020_064.....	25
Figur 3.11: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_012_032.....	26
Figur 3.12: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_008_016.....	27
Figur 3.13: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_004_008.....	27
Figur 3.14: Øyeblikkelig hastighetsfelt med null-vektorer	30
Figur 3.15: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0007 (Devoll, Albania).....	32
Figur 3.16: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for lokalitet 0007 (Devoll, Albania)	33
Figur 3.17: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet ved turbulens (lokalitet 0004) for $\Delta t = 0.12$ sekunder og $IA = 32$ piksler	33
Figur 4.1: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «REF» (lokalitet 0003).....	39
Figur 4.2: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «VY01R05» (lokalitet 0003).....	40
Figur 4.3: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «REF» (lokalitet 0004).....	42
Figur 4.4: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «VY01R05» (lokalitet 0004).....	43

Figur 4.5: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «REF» (lokalitet 0009).....	46
Figur 4.6: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «VX01R05» (lokalitet 0009).....	46
Figur 4.7: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet «VY01R05» ved kun synlige strukturer grunnet turbulens.....	48

Tabelliste

Tabell 3.1: Gjennomsnittlig, median og maksimums- og minimumsverdier for testsettene i sensitivitetsanalysen for lokalitetene 0003, 0004 og 0009.....	28
Tabell 3.2: Grensebetingelser for hastighetsanalysen	31
Tabell 3.3: Parameteroppsett for sensitivitetsanalysen	34
Tabell 3.4: Parameteroppsett for hastighetsberegningen	35
Tabell 4.1: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0003	37
Tabell 4.2: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0003 ved endring i utstrekning av SA. Hastigheten for VY01R05 er den samme som i tabell 4.2 (uten endringer i utstrekning) og er valgt som grunnlag for videre analyse av hvilken påvirkning valgte parametere har.....	38
Tabell 4.3: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0003 ved endring av bildesekvens	38
Tabell 4.4: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004	41
Tabell 4.5: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004 ved endring i utstrekning av SA ...	41
Tabell 4.6: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004 ved endring av bildesekvens	42
Tabell 4.7:Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004 med endring av SA	43
Tabell 4.8: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0009	44
Tabell 4.9: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0009 med endring i utstrekning av SA ..	44
Tabell 4.10: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0009 med endring i bildesekvens.....	45
Tabell 4.11: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0009 med endring av SA	47
Tabell 4.12: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004 ved turbulens uten kunstige markører	47

1 Introduksjon

Flyvende droner (eng. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)) er fjernstyrte luftfartøyer. De finnes i alle størrelser og brukes i dag på mange områder. Militært har større droner vært brukt til innhenting av informasjon og i senere tid til levering av våpen over lange avstander, uten å risikere tap av egne mannskaper. Etter hvert som det er utviklet mindre og rimeligere droner har de i stadig stigende grad blitt tatt i bruk til ulike sivile formål. De anvendes til filming av ulike arrangementer som sport, konserter, promoteringsvideoer og til privat bruk. Det satses også stort på bruk av drone på nye felt, for eksempel til frakt av post (Ramsdal, 2017) og andre varer (Haugstad, 2018a; Urke, 2018), industrielle oppdrag som sprøyting, lasting og lossing off-shore (Urke, 2018), overvåkning og inspeksjon av kraftlinjer (Haugstad, 2018b) og vasking og fjerning av is på vindturbiner (Klingenberg, 2018). Også innen fagfelt som vassdragsteknikk og arkeologi (Valle, 2017) tas droner i økende grad i bruk ved feltarbeid knyttet til ingeniørundersøkelser og prosjektering. Drone har i det siste blitt et populært hjelpemiddel innen hydraulikk og andre fagområder knyttet til elver og vassdrag. Drone brukes til både topografisk oppmåling, kartlegging av vegetasjonsdekke, overvåking av gyteområder for fisk (Kraabøl, Gregersen og Kiplesund, 2016), kartlegging av habitat for fisk (Stranzl *et al.*, 2017) og oppmåling av vanddekt areal ved ulike vannføringer (Skoglund *et al.*, 2016).

1.1 Bakgrunn

Når endringer gjøres i vassdrag påvirkes naturen i og nær vassdraget. Informasjon hentet og beregnet ved hjelp av UAV-baserte metoder kan brukes til vurdering av faktiske og potensielle hydrauliske og hydrologiske endringer. For å forvalte vassdragene godt er man avhengig av store datasett av høy kvalitet. Alle instanser som jobber med vassdrag og vannressurser må derfor hente inn data for å vurdere ulike aspekter ved vassdraget, som for eksempel beregning av avrenning, informasjon om fisk, dyre- og planteliv og vurdering av flomrisiko. Både forvaltere av vassdrag som Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Fylkesmannen, andre sektormyndigheter som Vegvesenet, kraftselskaper, forskningsinstitutter som Norsk institutt for naturforskning (NINA), Norsk institutt for vannforskning (NIVA) og Uni Research, samt frivillige naturvernorganisasjoner som Naturvernforbundet henter inn informasjon om vassdragene.

Innhenting kan både være tidkrevende, vanskelig og potensielt farlig å gjennomføre om omgivelsene er lite fremkommelig. UAV-baserte metoder kan benyttes til indirekte måling av vannføring ved bruk av Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), Particle Tracking

Velocimetry (PTV), Space-time Image Velocimetry (STIV) eller radar. Disse metodene er gode alternativer til direkte målemetoder som akustisk dopplerinstrument (ADCP) som måler vannhastighet, dybde og vannføring direkte (NVE, 2015). Spesielt for elver med stor vannføring er metoden veldig verdifull siden konvensjonelle målemetoder ikke er egnet når vannføring er høy. Økt sikkerhet og minsket tidsbruk er andre fordeler med en UAV-basert metodikk. Elvevannets overflatehastighet kombinert med elvas tverrsnittsprofil gir mulighet for utregning av vannføringen som kan brukes til å simulere eksempelvis strømningsmønstre eller flomsituasjoner. Reduksjon i usikkerheten knyttet til beregning av vannføringen som følge av bruk av UAV-basert bildemateriale, vil i slike tilfeller redusere usikkerheten i prediksjon av flomscenarier.

Produksjon av vannkraft kommer fort i konflikt med livet i vassdraget. Nye kraftutbygginger har langt strengere krav om å ta hensyn til livet i og ved vassdragene. Også ved revisjon av tidligere konsesjoner er det aktuelt å sette strengere vilkår. EU vedtok i 2000 Vannrammedirektivet (European Commission, 2016) som legger rammer for vannforvaltningen. Mange land har stort fokus på å ta vare på vassdragenes mangfold, spesielt er man opptatt av å bevare fiskebestandene. I mange elver reduseres eller forsvinner fiskebestanden helt, blant annet på grunn av energiutbygging. Som en del av en stor internasjonal satsning for å motvirke slike negative konsekvenser ble prosjektet FITHydro¹ etablert. FITHydro er et samarbeid mellom flere europeiske land (Tyskland, Sveits, Østerrike, Frankrike, Belgia, Portugal, Spania og Sverige) og ble startet opp i november 2016. Prosjektet har som hensikt å finne metoder som på best mulig måte legger til rette for samkjøring av driften av vannkraftverk, og forholdene for fisk i vassdraget. Man prøver derfor å fremskaffe kunnskap for bedre å vurdere om vannkraftanlegg bør bygges ut, og hvordan man best mulig kan ta vare på fiskehabitat og -populasjoner i områder der kraftverk allerede er etablert. Både eksisterende og nye innovative teknologier testes og prosjektet legger vekt på å evaluere metoder som er kost-effektive og miljøvennlige, og å finne fiskevennlige løsninger som kan gå hånd i hånd med utnytting av vannkraft i vassdragene. I prosjektet vurderes forhold oppstrøms og nedstrøms kraftverket med fokus på habitat for fisk og andre organismer i elva, sedimenttransport og påvirkning av fiskens levevilkår. Blant annet gjøres det undersøkelser av fiskepassasjer for ivaretagelse av fisken (FITHydro, u.å.-a). I Norge er det opprettet et senter for miljødesign av fornybar energi, Centre for Environmental Design of Renewable Energy (CEDREN), for blant

¹ FITHydro er et EU-finansiert prosjekt som jobber med forbedring av habitat- og fiskepopulasjoner i regulerte elver.

annet å forske på lignende problemstillinger. SINTEF, NTNU og NINA er sentrale forskningsinstitusjoner og flere kraftselskaper har bidratt med mye midler i finansieringen, blant annet Sira Kvina Kraftselskap.

1.2 Hensikt

I denne masteroppgaven undersøkes det hvordan anvendelse av data som er samlet inn med drone, påvirker og eventuelt forbedrer beregning av vannhastigheter i simuleringer. En gratis programvare (Fudaa-LSPIV) for hastighetsanalyse testes på eksisterende bildemateriale for å bestemme overflatehastighet for friskeilstrømning. Mer spesifikt bidrar dette studiet til økt kunnskap om bruk av programvare for LSPIV til hastighetsberegning ved å evaluere bildemateriale innhentet med drone med hensyn på egnethet og brukervennlighet i tillegg til kvalitet av resultater. Målet med masteroppgaven er å teste om metoden gir gode resultater og definere anvendelsesområdet, og å peke på utnyttet potensiale for bruk av drone.

Masteroppgaven er tilknyttet et prosjekt hvor denne teknikken kan være en nyttig ressurs for datainnsamling. I prosjektoppgaven som ble utført som et forprosjekt til masteroppgaven, ble fjerning av en terskel i elva Kvina ved Rafoss i Kvinesdal, Vest-Agder, i samarbeid med Sira Kvina Kraftselskap benyttet som case-studium. Terskelfjerningen var i en tidligere fase også tenkt som case for masteroppgaven. Etersom målinger som tidligere ble utført av NVE viste seg ikke å stemme, har Sira Kvina Kraftselskap bestemt at fjerning av terskel ikke lenger er nødvendig, og case-studie Rafoss er dermed ikke er like aktuelt. Masteroppgaven er derfor i stedet for knyttet til FITHydro.

Eksisterende data samlet inn med drone i elvene Devoll i Albania (Kokel) og en sideelv til elven Mangfall i Tyskland brukes til hastighetsanalysen og beregnede hastigheter vurderes mot målinger ved bruk av konvensjonelle metoder. Masteroppgaven har følgende målsetninger:

- I. Beskrive UAV-basert metode med fokus på Large-scale Particle Image Velocimetry
 - a. Bakgrunn og motivasjon for bruk av metoden
 - b. Presentasjon av teorien bak LSPIV
- II. Hente inn data for bestemmelse av overflatehastigheter ved bruk av Large-scale Particle Image Velocimetry
- III. Bruk av programvare (Fudaa-LSPIV) for hastighetsanalyse av friskeilstrømning ved flere test-lokaliteter og postprosessering av resultatene
 - a. Sensitivitetsanalyse
 - b. Hastighetsberegning

- IV. Vurdere resultatene opp mot konvensjonelle målinger med akustisk dopplerinstrument/strømningsmåler
- V. Diskutere resultatene med fokus på fordeler og ulemper ved bruk av metoden for ulike strømningsmønstre, hastigheter og elvegeometri

2 Teori

2.1 UAV-basert metodikk med fokus på Large-scale Particle Image Velocimetry for vannhastighetsmålinger

I dette kapittelet presenteres teorien som ligger til grunn for bruk av Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) for vannhastighetsmålinger basert på UAV-innhentet bildemateriale når hensikten er å simulere strømnings situasjoner ved ulike vannføringsnivåer. Følgende fem steg, som er kort oppsummert under (kapittel 2.1.1- 2.1.5), inngår i metoden (Lükö, Rütther og Baranya, u.å.):

1. Innhenting av datamateriale
2. Terrengmodellering ved bruk av Structure-from-Motion (SfM)
3. Beregning av vannhastighet ved hjelp av Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)
4. Digital substratanalyse for beregning av ruhet
5. Numerisk simulering av (vannføring i) elvestrekning

Ettersom denne oppgavens hovedfokus er selve hastighetsberegningen (LSPIV) basert på forflytning av markører, vil teorien bak stegene 1 og 3 bli presentert mer detaljert i egne kapitler (2.2 og 2.3), mens steg 2, 4 og 5 beskrives i vedlegg D-F. I vedlegget (C) beskrives det også hvordan resultatene fra LSPIV kalibreres for å kunne sammenlignes med andre målemetoder.

2.1.1 Innhenting av datamateriale

Innhenting av data gjøres ved hjelp av en drone med påmontert kamera som tar bilder eller video av området man ønsker å analysere. Dronen posisjoneres etter hva som er gunstig plassering og vinkel i forhold til hva som skal beregnes og modelleres. En vanlig dronetype for innmåling av data er DJI Phantom. Kamera kan være av typen GoPro eller lignende.

Både til konstruering av terrengmodellen og til beregning av vannhastighet benyttes kontrollpunkter eller «Ground Control Points» (GCP). For hastighetsberegningen (LSPIV) benyttes GCP til å georeferere² (Longley *et al.*, 2005) bildematerialet og ved terrengmodellering for å skalere modellen (Westoby *et al.*, 2012). GCP kan være objekter i naturen som skiller seg ut, eller utplasserte GCP som fargede merker av for eksempel plast eller tøyestykker. GCP har kjente koordinater (X,Y,Z) som måles inn med Global Positioning

² Georeferering er en metode for å gi punkter i et bilde en plassering i samsvar virkeligheten og med gitte koordinater.

System (GPS) (Muste, Fujita og Hauet, 2008). Innhenting av datamateriale er beskrevet videre i kapittel 2.2.

2.1.2 Terrengmodellering

For simulering av strømning i en elv trenger man en terrengmodell³ av elvestrekningen. Terrestrisk laserskanning⁴ (NGU, 2015) er en vanlig metode for å modellere terrenget for store områder. Høyoppløselig topografisk oppmåling av landskapet kan være kostbart å utføre, spesielt for små områder. Terrengmodellering med «Structure-from-Motion» (SfM), hvor data er hentet inn med drone, er billig og brukervennlig, og passer for små-prosjekter med lavt budsjett. I tillegg er det en praktisk og potensielt sikrere metode enn bakkebasert laserskanning når lokaliteten er utilgjengelig eller i ulendt terreng (Westoby *et al.*, 2012). Terrengmodellering er beskrevet videre i vedlegg D.

2.1.3 Beregning av vannhastighet

For beregning av vannhastighet⁵ benyttes LSPIV. Dette kan karakteriseres som en indirekte⁶ metode for måling av vannhastighet og vannføring. Vannføring beregnes ut fra vannhastigheten, tverrsnittets geometri og vannivået. LSPIV måler vannets overflatehastighet uten å påvirke strømningsforholdene og resultatet gis i form av et hastighetsfelt. Under typiske forhold, og målt sammen med andre nødvendige parametere for bildeprosessering, er det gjennom laboratoriestudier vist at feilen på beregnet gjennomsnittshastighet typisk er mindre enn 3.5 % (Muste, Xiong og Kruger, 1999) og 10 % ved feltobservasjoner (Muste *et al.*, 2004a).

Både LSPIV og radar-basert metodikk måler hastigheten på vannoverflaten, mens akustiske metoder, som bruk av akustisk dopplerinstrument (ADCP), beregner vertikal hastighet i tverrsnittet. Både LSPIV, radar og ADCP betegnes som «ikke-forstyrrende», selv om det nok er riktigere å kalle dem tilsynelatende (kvasi) ikke-forstyrrende. En ADCP har en sensor som føres under vann og måler lydbølger som spres av suspenderte partikler, mens radar og LSPIV er avhengig av markører på vannoverflaten (Muste, Fujita og Hauet, 2008). Mer om beregning av vannhastighet (og vannføring) i kapittel 2.3.

³ Terrengmodell eller digital høydemodell er en 3D-modell av terrenget basert på fotogrammetriske data.

⁴ Terrestrisk laserskanning er en bakkebasert fjernmålingsteknikk for innmåling av tre-dimensjonale høyoppløselige topografiske data.

⁵ Hastighet er definert som forflytningen av et objekt over et gitt tidsrom og er representert ved en vektor med en u- og v-komponent som beskriver retningen og en utstrekning (magnitudo) som beskriver størrelsen.

⁶ Med LSPIV beregnes vannets hastighet ut fra forflytning av markører og per definisjon måler ikke metoden en hastighet, derav en indirekte måling.

2.1.4 Beregning av bunnruhet

For å simulere hvordan en elvestrekning forandrer seg, både naturlig og som konsekvens av inngrep gjort i vassdraget, må man karakterisere ruheten til elvebunnen. Gjennom substratanalyse ønsker man å finne kornfordelingen til bunnmaterialet, og ved å anvende data innsamlet fra drone utføres fotogrammetrisk analyse⁷ (Dick, 2018) ved bruk av programmer som BASEGRAIN og Digital Grain Size Project (DGSP) til dette formålet. Den digitale substratanalysen kan sammenlignes med «Pebble Count», som innebærer telling av småsteinene som bunnmaterialet består av. Substratanalyse er beskrevet i vedlegg E.

2.1.5 Numerisk modellering av elvestrekning

Det siste steget i den UAV-baserte metodikken er å simulere strømmingen i den valgte elvestrekningen. Elvestrekningen kan modelleres to- eller tre-dimensjonalt alt etter hva som er hensiktsmessig, for eksempel detaljnivå i resultatene kontra beregningshastighet. Simuleringen kan gjøres for ulike vannføringer for å studere påvirkning på omgivelsene og livet rundt elva. Det finnes flere programmer med ulike numeriske modeller, i vedlegg F er HEC-RAS for to-dimensjonal og SSIIM for tre-dimensjonal simulering beskrevet nærmere.

2.1.6 Kalibrering av resultatene

De beregnede resultatene må kalibreres for å vurdere hvor gode resultater den UAV-baserte metoder gir i forhold til konvensjonelle metoder. For å kalibrere resultatene må vannhastighet og vannlinjer måles inn og substratanalyse av bunnmateriale utføres. Når resultatene sammenlignes, kan man velge å vurdere kun hastigheten eller selve vannføringen. Benyttes vannføring må denne regnes ut basert på tverrsnittsprofilen og høyden på vannflaten. Beregning av vannføring gir noe bedre resultater sammenlignet med vannhastighet (Muste *et al.*, 2004b). Kalibrering er beskrevet i vedlegg C.

2.2 Innhenting av datamateriale i felt

For innhenting av datamateriale må man ta stilling til hvilken høyde man vil fly dronen i. Resultatet blir bedre jo nærmere dronen er området som skal analyseres, og det er viktig at markørene og GCP er godt synlige på bildematerialet. I tillegg må man vurdere om det er hensiktsmessig å dele opp området som ønskes undersøkt i delområder og gjennomføre

⁷ Fotogrammetri er læren om målinger basert på fotografiske bilder for å bestemme et objekts geometriske egenskaper som størrelse, form og dets beliggenhet.

prosessen flere ganger dersom området er stort eller har varierende forhold (Westoby *et al.*, 2012).

Bildemateriale, og dermed resultatene, fra feltarbeidet påvirkes av værforhold. Ved vind kan det være vanskelig å fly dronen. Om dronen drifter under innsamling kan resultere i større unøyaktighet i resultatene og det kan være nødvendig med preprosessering av bildematerialet før analysen. Avhengig av programmet som benyttes kan omfattende preprosessering være nødvendig dersom programmet er sensitivt for endring i orienteringen av kameraet i forhold til bakken. Bildekvaliteten påvirkes av lysforholdene og reduseres ved gjenskinn og skygger (Hauet *et al.*, 2008). Sollys gir sammen med bobler og virvler ved turbulent strømming, synlig mønster på vannflaten som kan detekteres og ved tilstrekkelige mengder kan slike mønstre benyttes som naturlige markører (Muste, Fujita og Hauet, 2008). Om kunstige markører benyttes kan de naturlige mønstrene feilaktig detekteres som markører og på den måten påvirke resultatene.

2.2.1 Datamateriale for SfM

Ved innsamling av bildemateriale til SfM, kan man fly dronen en valgt rute eller la den følge elvestrekningen. Det er viktig å kontrollere at den valgte høyden sikrer at dronen unngår objekter som trær eller høyspentledninger. Det er også viktig med god nok overlapp mellom bildene og bilder tatt fra ulike vinkler for riktigst mulig modell. I et forsøk gjort i Salmon River (Sandy River Basin, Oregon) var målet for generering av en god punktsky minimum 60 % overlapp for å sikre at hvert punkt dekkes av bilder fra flere forskjellige retninger (James og Robson, 2012). Overlapp bestemmes når man setter ønsket kjørerute for dronen som skal ta bilde av objektet. Det kan eventuelt tas ekstra bilder der det trengs (Shintani og Fonstad, 2017).

2.2.2 Datamateriale for LSPIV

Det fins etablerte regler for størrelse og konsentrasjon av markører i forhold til den ønskede forskyvning av disse i bildeserien (Adrian, 1991). I laboratorium fungerer disse reglene godt, men for forsøk i felt er det ofte nødvendig med justeringer, og man må finne posisjoner for opptak av data som reduserer visualiseringsutfordringene (Hauet *et al.*, 2008).

Den første utfordringen man må ta hensyn til er lysforholdene som kan være gode eller dårlige. Under forhold i laboratorium vil man kunne korrigere lysstyrke slik at lysforhold blir ideelle, mens naturlig belysning vil gi gjenskinn og skygger på vannoverflaten som kan påvirke bildekvaliteten (Hauet *et al.*, 2008).

Den andre potensielle utfordringen er utilstrekkelig partikkeldistribuering. Det er ønskelig å bruke naturmarkører som flytende rusk eller skum og bobler produsert ved turbulens⁸ (Chaudhry, 2008) i vannet (Muste, Fujita og Hauet, 2008), men dersom naturlige markører ikke finnes må man benytte kunstige av miljøvennlig og nedbrytbart materiale. Det er gjort vellykkede forsøk med stearinlys (Sukhodolov *et al.*, 2007), riskaker (Takehara *et al.*, 2002), økologisk skum (Jodeau *et al.*, 2008), treflis (Detert og Weitbrecht, 2014) og økologisk nedbrytbare fluoriserende partikler (Tauro, 2016). Uavhengig av om markørene er naturlige eller kunstige, er det en forutsetning at de ikke påvirker strømmingen men følger strømningsmønsteret i elva (Muste, Fujita og Hauet, 2008).

2.3 Hastighetsberegning basert på markørers forflytning

Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) tar utgangspunkt i Particle Image Velocimetry (PIV), en laboratoriebasert metode (Adrian, 1991) for hastighetsberegning som så er videreført til storskala. Det første fullskalaforsøket ble utført i Japan på midten av 1990-tallet (Aya, Fujita og Yagyū, 1995). LSPIV-metoden generelt, og programvaren Fudaa-LSPIV benyttet i denne oppgaven, presenteres nedenfor.

Metoden, som gir en vannhastighetsdistribusjon for den frie overflaten, består av tre steg (Lükö, Rüther og Baranya, u.å.):

1. Video/bilder blir tatt av vannoverflaten med markører som følger strømmen i vannet (kapittel 2.2 og mer spesifikt i 2.2.2)
2. Transformering av bilder til et 2D ikke-forvrengt koordinatsystem (kapittel 2.3.1)
3. Bildeprosessering med Particle Image Velocimetry (PIV) basert på bevegelsen til markørene (kapittel 2.3.2)

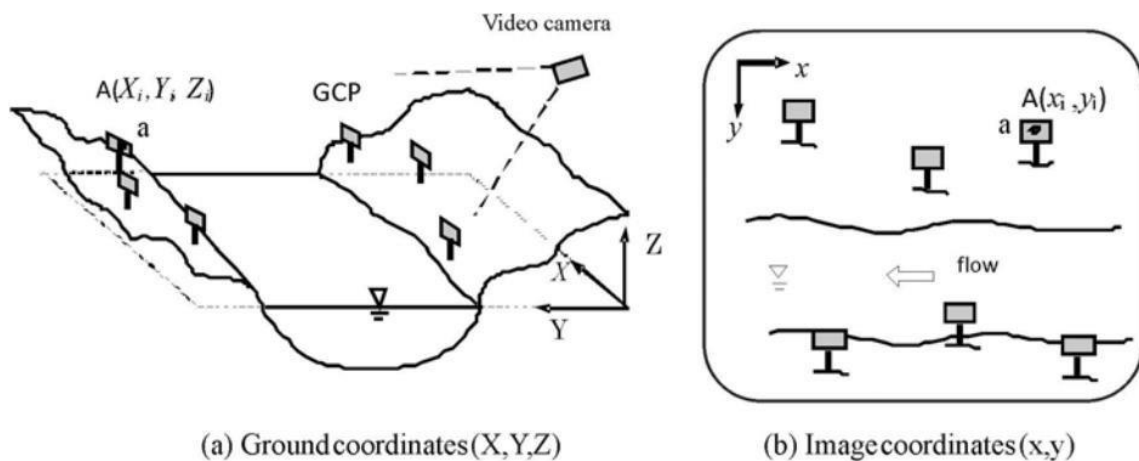
2.3.1 Transformering av bilder til et 2D ikke-forvrengt koordinatsystem

Bildene som skal brukes til å beregne hastigheten må konverteres til ortofoto gjennom konvensjonell fotogrammetrisk relasjon ved bruk av kjente GCP i det virkelige (X, Y, Z) og bildets (x, y) koordinatsystem (figur 2.1). Forholdet mellom de to koordinatsystemene er gitt av formel (1) (Fujita, Muste og Kruger, 1998):

$$x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad y = \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad (1)$$

⁸ Turbulent strømming er definert som strømming hvor partikkelbevegelsen er uordnet, veien partiklene beveger seg er ikke lik med hensyn til tid og rom.

hvor koeffisientene A_1 - C_3 bestemmes ved minste-kvadraters metode ved å bruke koordinatene til de valgte GCP. Minimum seks koordinater er nødvendig for transformasjon av bilder, og effekten av radiell linseforvringning i bildet må korrigeres før man kan etablere forholdet beskrevet med likning (1). Størrelsen på det ikke-forvrengete bildet bør være tilnærmet lik størrelsen på det originale bildet. Både en geometrisk transformasjon og en rekonstruksjon av pikslenes intensitetsfordeling i bildet blir laget for å sikre et bilde som ikke er forvrent (Muste, Fujita og Hauet, 2008).



Figur 2.1: Forhold mellom koordinatsystem i bildet og i virkeligheten (Muste, Fujita og Hauet, 2008)

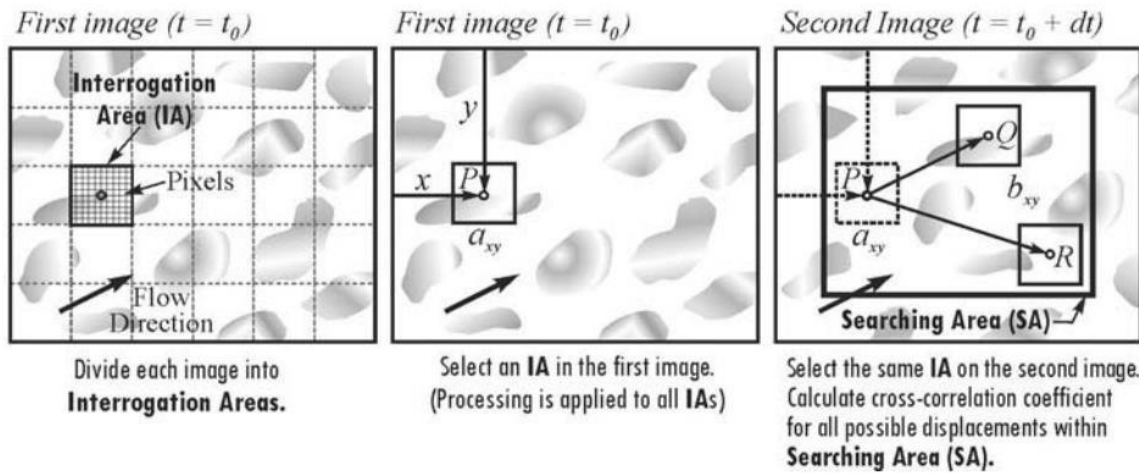
2.3.2 Bildeprosessering med Particle Image Velocimetry basert på bevegelsen til markører

Forflytningen av markører (figur 2.2) beregnes med en teknikk for gjenkjenning av mønstre brukt på bildets fordeling av lysintensitet. For et avgrenset område kalt «Interrogation Area» (IA)⁹, definert i det første bildet, beregnes en likhetsindeks for mønstre i et tilsvarende stort område i et større søkeområde kalt «Search Area» (SA)¹⁰ (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013) i neste bilde (Muste, Fujita og Hauet, 2008). Mønsterets mest sannsynlige forflytning er gitt av avstanden mellom de to områdene med størst likhetsindeks. Hastigheten regnes ut som

⁹ Definerer et lite område på $x \cdot x$ piksler hvor man regner ut forflytningen av markører ved hjelp av krysskorrelasjon. Hvert bilde deles inn i n antall IA og det regnes ut en (uavhengig) hastighetsvektor for hvert IA.

¹⁰ Definerer et område som henter inn informasjon til IA. SA er et rektangel definert av parameterne S_{im} , S_{ip} , S_{jm} og S_{jp} (figur 2.3) rundt sentrum av IA og korresponderer til området hvor mønsteret for senteret regnes ut for påfølgende bilde.

distansen mellom senter i de representative små vinduene delt på tidsdifferansen Δt mellom bildene. Prosessen blir gjentatt for alle IA i bildet (Muste, Fujita og Hauet, 2008).

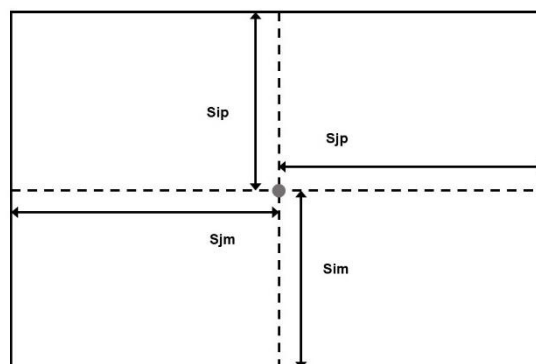


Figur 2.2: Konsept for analyse av forflytningen av markører i Large-scale Particle Image Velocimetry (Muste, Fujita og Hauet, 2008)

For å regne ut hastigheten benyttes samme algoritme som for prosessering av data i høy-tetthets PIV (Adrian, 1991). Som likhetsindeks i algoritmen anvendes en krysskorrelasjonsfaktor (Fujita, Muste og Kruger, 1998) gitt av formel (2):

$$R_{ab} = \frac{\sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} \{(a_{xy} - \bar{a}_{xy})(b_{xy} - \bar{b}_{xy})\}}{\left\{ \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (a_{xy} - \bar{a}_{xy})^2 \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (b_{xy} - \bar{b}_{xy})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

hvor MX og MY er størrelsen på IA og a_{xy} og b_{xy} er distribusjonen av gråtoneintensiteten, som spenner fra 0 til 255 for et 8-bits bilde, for de to områdene separert med tidsintervall Δt (Fujita, Muste og Kruger, 1998).

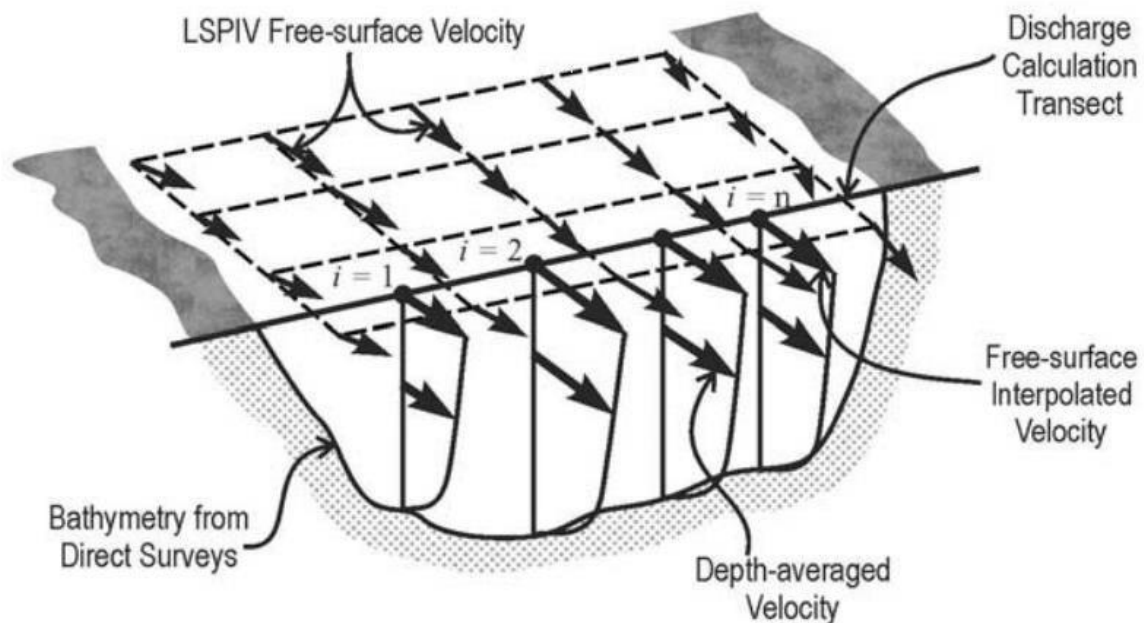


Figur 2.3: Definisjon av Search Area (SA) (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013)

Lagranges og Eulers analyse brukes på hastighetsfeltet for å bestemme egenskaper som gjennomsnittshastighet, strømningslinjer og dannelse av virvler i både tid og rom, samt andre egenskaper som belastningshastighet og fluks (Muste, Fujita og Hauet, 2008).

2.3.3 Bruk av beregnet hastighetsdata i vannføringsberegning

Vannhastigheten beregnet over kan videre brukes til beregning av vannføring. Kombinasjon av hastighet og batymetri¹¹ (Kjensmo, 2015) gir vannføringen i elva. Denne metoden for å estimere vannføringen kalles «Velocity Area Method» (VAM) og er illustrert i figur 2.4. Batymetrien måles før eller samtidig som hastighetsdataen innhentes med den antagelse at elvebunnens form ikke har forandret seg i tidsrommet (Rantz, 1982).



Figur 2.4: Prosedyre for Large-scale Particle Image Velocimetry-basert vannføringsberegning (Muste, Fujita og Hauet, 2008).

Hastigheten beregnes for flere punkter langs det undersøkte tverrsnittet ved lineær interpolering fra punkter i nabogridet til det PIV-estimerte overflatehastighetsfeltet. Det vertikale hastighetsprofilet antas å ha lik form for hvert punkt (figur 2.4), og den gjennomsnittlige hastigheten over dybden for hvert punkt i er relatert til overflatehastigheten

¹¹ Batymetri er målinger av dybde i hav, sjø eller elv og gir grunnlag for å lage dybdekart.

med en hastighetsindeks. For hver delseksjon av elva ($i, i+1$) kan vannføringen beregnes i henhold til VAM (Rantz, 1982).

Sammenlikning av hastighet estimert ved LSPIV og hastighet målt i lab i et forsøk hvor en vogn ble dradd over en fast overflate med grafiske mønstre, gav en gjennomsnittlig forskjell på 3.5 % (Muste, Xiong og Kruger, 1999). Vannføringshastighet estimert ved LSPIV og ADCP på samme lokalitet divergerte med opptil 10 % (Muste *et al.*, 2004a), mens forskjellen målt med LSPIV og mekanisk strømmåler var 16 % (Bradley *et al.*, 2002). Sammenlignes vannføring heller enn hastighet, blir resultatet noe bedre, ettersom det iboende romlige gjennomsnittet påvirkes under estimeringen av vannføring når VAM benyttes (Muste *et al.*, 2004b).

For feltmålinger kan dårlig overflatebelysning, dårlig partikkeldistribusjon eller vind som skaper vekslende forhold gi drastisk reduksjon i nøyaktigheten på målingene, og i verste fall forhindre at målinger kan gjennomføres. Dersom strømningsforholdene tilfredsstillende de nødvendige forutsetningene for LSPIV, gir metoden nøyaktige målinger sammenlignet med punktbaserte og profilbaserte metoder som er mer krevende metoder. I ekstreme situasjoner som flomhendelser eller veldig sakterennende elver med lite vann kan LSPIV være eneste mulige metode for vannhastighet- og vannføringsmåling (Muste, Fujita og Hauet, 2008).

2.3.4 Fudaa-LSPIV

Fudaa-LSPIV er valgt ut som programvare for testing av hastighetsberegning. LSPIV-analysen i Fudaa-LSPIV består av fem steg (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013):

1. Innhenting av bildemateriale
2. Ekstraksjon av bilder i en tidssekvens
3. Ortorektifisering
4. Analyse av forflytning
5. Beregning av vannføring

Fudaa-LSPIV følger metoden beskrevet i kapittel 2.3 og bruker krysskorrelasjonen gitt av formel (2) for beregning av forflytningen til markørene. Dette resulterer i et to-dimensjonalt overflatehastighetsfelt. Programmet benytter filtre for korrelasjonsfaktoren og for absoluttverdien av hastighetsvektorene for å korrigere urealistiske og uønskede verdier. Gjennomsnittlig hastighet beregnes så på grunnlag av filtrerte øyeblikshastigheter (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

Markører er ikke nødvendige dersom bevegelsen i vannet er synlig i bildesekvensen, noe som ofte er tilfelle ved flom da den turbulente strømmingen danner synlige mønstre som er mulige å detektere. Dersom det ikke finnes naturlig, brukes kunstige markører (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

Ortorektifisering av bilde gjøres ved å sette inn GCP i bildet. GCP markeres og får koordinater i bildet (I, J) og knyttes til de virkelige koordinatene (X, Y, Z). Fudaa-LSPIV krever at det er minst seks GCP for å gjøre analyse. Det er i nyere versjoner av programvaren lagt til en ortorektifiseringsmodus hvor det legges inn en referanselengde som krever at lengden mellom to punkter er kjent eller at en målestokk er lagt til i bildet (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

Koordinatene skal ikke ligge på linje, men være spredt rundt i bildet. Man ønsker helst å ha minimum 10 koordinater, da dette gir bedre resultater og gjør ortorektifiseringen enklere (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

2.3.5 Parametre i hastighetsberegning

Under presenteres kort utvalgte parametre og funksjoner i Fudaa-LSPIV brukt i analysene av bildedataene i denne oppgaven, og det testes i det påfølgende hvordan disse påvirker hastighetsberegningresultatene. Følgende parametre inngår i analysen: Interesseområde, størrelse av IA (*Interrogation Area*) og SA (*Search Area*), samt bildets oppløsning. Ettersom parameterne avhenger av bildedataene er de valgt for hvert sett med data. Passende tidssteg og tilhørende IA er bestemt ut fra hastigheten på vannet. I de tilfellene analysen viser at tidssteget ikke er passende, velges bildesekvensen ut på nytt fra tilgjengelig videomateriale.

Interesseområdet kan være en spesiell del av elva eller hele strekningen. Bildene dekker ofte et større område enn det som er av interesse. Eksempelvis er elvebanker eller områder med trær eller andre forstyrrende objekter i bildemateriale ikke av interesse og bør fjernes fra analysen. Unødvendig informasjon forlenger beregningstiden og er utelatt også av den grunn. I analysen defineres først et observasjonsområde definert av $X_{\min}/X_{\max}/Y_{\min}/Y_{\max}$ som avgrenser området som skal analyseres. Videre tegnes et grid opp manuelt eller det importeres et allerede eksisterende grid (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

For *skalering* av bildematerialet er det to alternativer: skalering og ortorektifisering. Ved skalering markeres et objekt med en kjent lengde/målestokk i bildet, med en gitt lengde i piksler. Lengden tilegnes sin virkelige lengde og man får ut et forhold mellom meter og piksler. Ved ortorektifisering markeres kontrollpunkter (GCP) med kjente koordinater i bildet og forholdet over regnes ut (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

Tidssteg velges avhengig av vannets hastighet. Basert på bildefrekvensen, altså hvor mange bilder som tas per sekund, og hvilket antall bilder man ønsker ut, bestemmes tidssteget. Har man en bildefrekvens på 25 bilder per sekund og velger x lik 5 (tar ut hvert femte bilde), får man et bilde hvert 0.2 sek, det vil si et tidssteg på 0.2 sekunder. Tidssteget velges slik at bevegelsen til markørene er synlige i bildeparet. For høy vannhastighet må tidssteget være lite nok til at forflytningen kan detekteres (markøren må kunne observeres i SA), og tilsvarende stort ved lave hastigheter (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

Størrelsen på *Interrogation Area* (IA) er avhengig av tidssteget og velges til å være så lite at hastighetsgradienten ikke påvirker resultatet i særlig grad (Raffel *et al.*, 2007) og representerer størrelsen på strømmen. Det er på den annen side viktig at IA er stort nok til å detektere forflytningen av markørene og samtidig jevne ut resultatene (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

Når vannet har en dominant strømningsretning er det hensiktsmessig at *Search Area* (SA) utvides i den dominerende retningen (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013). SA må være større enn IA for å kunne beregne hastigheter. Som i prosessen beskrevet i kapittel 2.3.2, må IA i det andre bildet av bildeparet ha mulighet til å forflytte seg rundt i et gitt område (SA), hvis ikke vil ikke beregningen gi mening.

Bildeoppløsning før transformering kan også velges. Den kan bestemmes basert på skaleringen av bildet, men kan også velges manuelt. Høyere oppløsning (mindre piksler) gir større beregningstid uten å gi bedre resultater. Lavere oppløsning forenkler derimot påvisningen av markørene ved å tydeligere framheve markørene med større piksler og vil paradoksalt nok forbedre resultatene ved å redusere støyen (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013).

Når de øyeblikkelige hastighetene er beregnet, velges grenseverdier eller *grensebetingelser* for hastighetens størrelse, og verdier som er åpenbart lavere eller høyere enn den egentlige, fjernes. For å bestemme den virkelige hastigheten gjøres en grov vurdering ved inspeksjon av strømmen. Altså er det den sannsynlige hastigheten basert på skjønn hos den som utfører analysen, og den er en subjektiv vurdering og ikke en målt verdi. For lave verdier kan være resultat av områder uten markører slik at hastigheten beregnes til å være svært lav eller null, mens for høye verdier kan forekomme i beregningene dersom det er turbulens i undersøkelsesområdet. Turbulens kan også gi vektorer i negativ strømningsretning når virvler oppstår. For tilfellene over ønsker man å fjerne vektorene slik at filtrerte øyeblikkshastigheter og den gjennomsnittlige hastigheten ikke beregnes på feil grunnlag.

Korrelasjonsfaktoren R beregnes fra ligning (2) og kan være mellom 0 og 1. Det er ønskelig å ha høyest mulig korrelasjonsfaktor. En øvre og nedre grense for R bestemmes og Jodeau, Hauet og Le Cos (2013) anbefaler en grense på henholdsvis 1 og 0.6.

3 Metode

Dette kapittelet tar for seg masteroppgavens hastighetsanalyse, hvor det først ble gjennomført en sensitivitetsanalyse av parameterne tidssteg (Δt) og størrelsen av «Interrogation Area» (IA) (kapittel 3.2.2). Videre ble det testet hvordan andre parametre (grensebetingelser, utstrekning av «Search Area» (SA), plassering og størrelse av IA, turbulens) påvirker beregningsresultatene (kapittel 3.2.3). Feltarbeidet som ble gjennomført i samarbeid med FITHydro beskrives kort. Spesielle hensyn som er tatt er også presentert.

3.1 Feltarbeid Schiffmühle, Sveits

I tilknytning masteroppgaven ble det gjennomført et feltarbeid i Schiffmühle (figur 3.1) i distriktet Baden, Sveits. Feltarbeidet ble utført i elva Limmat, som huser 26 ulike fiskearter, ved et av kraftverkene til Limmatkraftwerke AG (FITHydro, u.å.-b). For Schiffmühle fokuseres det i FITHydro på nedstrøms fiskevandring, feltovervåkning, numerisk 3D-modellering, kartlegging av fiskeforflytning ved telemetri¹² (Lied, 2018) og teknikker for PIT-tagging¹³ (Gibbons og Andrews, 2004).

Formålet med feltarbeidet, som ble utført i mars 2018, var å samle inn bildemateriale ved bruk av drone (UAV) og det ble utført i samarbeid med Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Technische Universität München (TUM) og prosjektet FITHydro. Det ble samlet inn både bildemateriale for LSPIV-hastighetsberegninger (a), gjennomført feltmålinger for kalibreringsdata (ADCP og substratanalyse) (b).

a.

1. Video av markører i elvestrekning for beregning av vannhastighet
2. Bilder for beregning av bunnruhet og Mannings tall

b.

1. Vannlinjer ved bruk av differensial-GPS
2. Vannhastigheter ved bruk av ADCP
3. Bunnruhet ved «Pebble Count» og siling i laboratorium

¹² Telemetri eller fjernmåling er en metode for automatisk overføring av data ved telekommunikasjon.

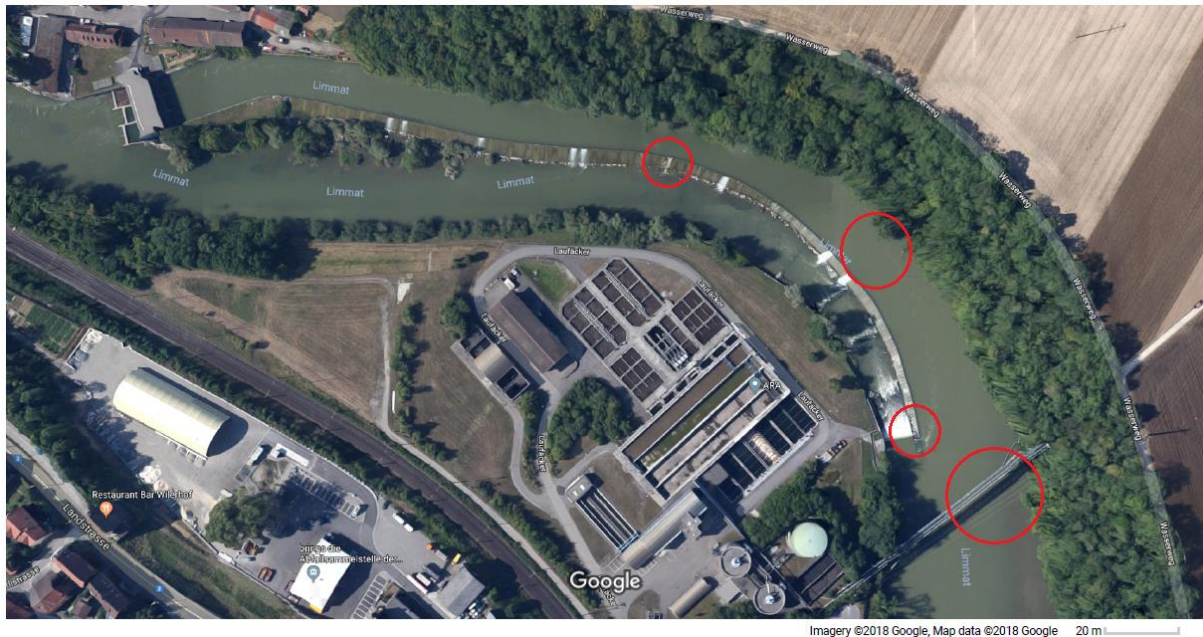
¹³ PIT-tagging (Passive Integrated Transponder) er en metode som bruker en elektronisk mikrochip (innkapslet i biokompatibelt glass) innsatt under huden på dyr for å identifisere, kartlegge og følge individet.



Figur 3.1: Schiffmühle, lokalitet for feltarbeid i elva Limmat, Sveits (FITHydro, u.å.-b).

Under feltarbeid ble markørutkastingen foretatt i to omganger. I første runde ble markørene kastet ut kun fra broen nederst til høyre i figur 3.2, og markørene fulgte da strømmen til den ene siden av kanalen. For å unngå opphopning på den ene siden og få et mer fullstendig bilde av hastigheten i kanalen, ble markørene i andre runde sluppet ut flere steder, fra broen, fra båt i kanalen og fra to steder langs kanalkanten som vist i figur 3.2.

Da bildematerialet innhentet i Schiffmühle viste seg å bli for stort og krevende med hensyn på preprosessering i forhold til formål og forventet arbeidsmengde i masteroppgaven, ble det i istedenfor valgt å benytte allerede tilgjengelig bildemateriale fra to andre lokaliteter (Mangfall, Tyskland og Devoll, Albania), og feltarbeidet ble i denne sammenhengen (masteroppgaven) en demonstrasjon av markørutplassering og datainnhenting.



Figur 3.2: Plassering av utslippssted for markører for testrunde 2 (Google, 2018).

3.2 Hastighetsberegning

Fudaa-LSPIV (Jodeau, Le Cos og Hauet, 2018), valgt ut blant mange programvarer til testing av Large-scale Particle Image Velocimetry for beregning av vannhastighet, ble testet mot hastighetsmålinger gjort med akustisk dopplerinstrument (ADCP) og strømningsmåler. Som beskrevet i kapittel 2.3.4 er analysen av markørforflytningen avhengig av flere parametre som velges basert på bildematerialet som evalueres. Valg av parametre ble her gjort på grunnlag av hastighet, markørtetthet og bildeoppløsning, og bildematerialet behandles som beskrevet under (kapittel 3.2.1) før analyse i Fudaa-LSPIV. For sensitivitetsanalysen ble de ufiltrerte dataene fra mappen *vel_real* for hvert parametersett brukt til vurderingen av fordelingen av korrelasjonsfaktoren og hastighetskomponentene. Til hastighetsberegningen ble filen *average_vel* benyttet for sammenligningen med målte verdier.

3.2.1 Behandling av bildedata

Den droneinnhentede videoen forelå i .MOV-format og måtte konverteres til .avi-format. Til konvertering av fil-format ble gratisprogrammet GoPro Studio benyttet og hele filen ble konvertert uten noen annen form for bearbeiding.

For å velge ut de delene av videoen som er av interesse for videre bruk, ble programmet VirtualDub brukt. Antall bilder som ble hentet ut er basert på bildefrekvensen til videoen og valg av tidssteg som beskrevet i kapittel 2.3.4. En oversikt over valgte parametre for hver

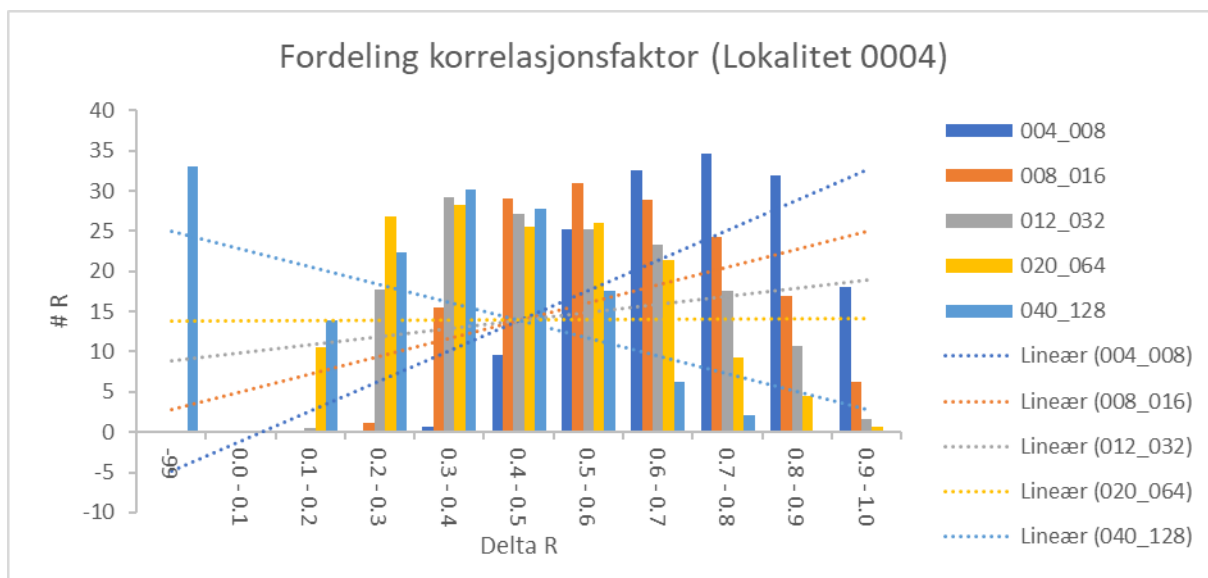
testkjøring er gitt i tabell 3.3 og 3.4. Bildeserien må lagres i ønsket bildeforformat, og i denne oppgaven ble JPG-formatet valgt.

3.2.2 Sensitivitetsanalyse

Til sensitivitetsanalysene er tre videoer fra tre forskjellige lokaliteter valgt ut. Lokalitetene er nummerert etter nummeret på videoen, 0003, 0004 og 0009. Videoene er fra elva Mangfall i Tyskland. En oversikt over parametersett og benyttede grensebetingelser for de ulike testoppsettene er gitt i tabell 3.3. Hver test er navngitt basert på hvilken lokalitet videoen er fra, tidssteget og størrelsen på IA, på formen 000X_ Δt _IA. For det grå testsettet i figur 3.3 vil dette tilsvare 0004_012_032, altså lokalitet 0004, $\Delta t = 0.12$ sekunder og IA = 32 piksler. Datasettene i de to fordelingene av korrelasjonsfaktoren kommer i motsatt rekkefølge i grafene under.

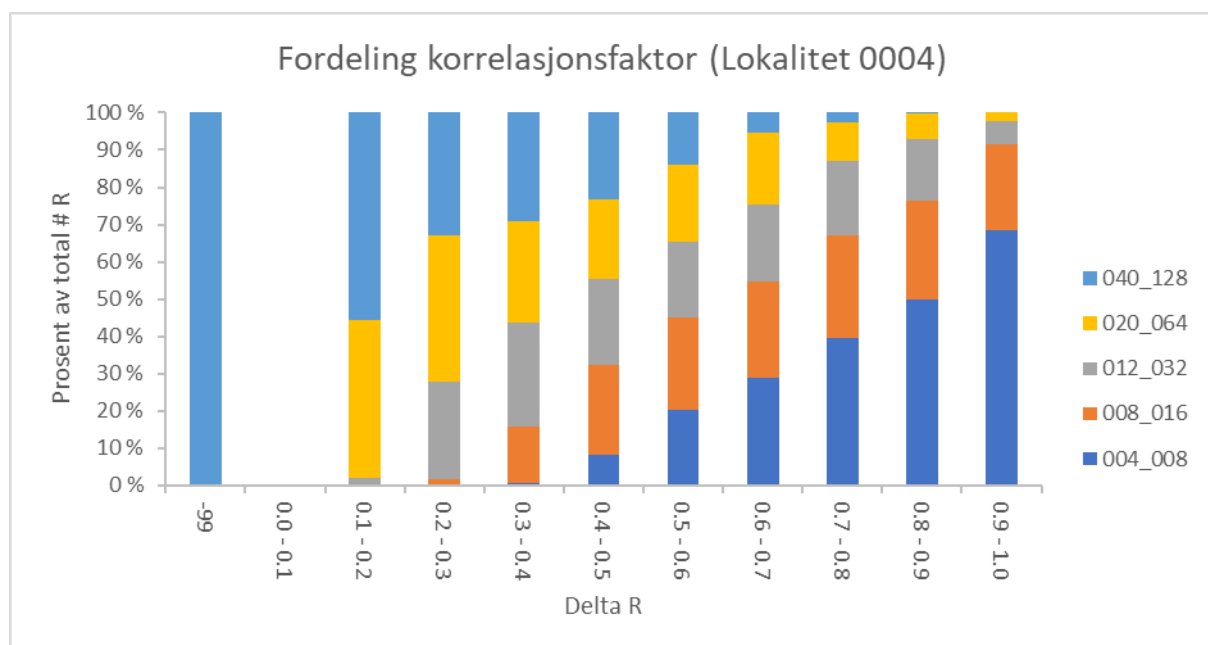
I denne oppgaven testes først hvordan forholdet mellom størrelsen på IA og lengden på tidssteget påvirker hastighetsresultatene. Fem sett med parametre (tabell 3.3) ble valgt ut og testet for samme bildemateriale for hver lokalitet og sammenlignet med mål om å finne et ideelt forhold mellom de to overnevnte parameterne.

For sensitivitetsanalysen vurderes resultatene basert på korrelasjonsfaktoren R, og første steg er utprøving av hvordan forholdet mellom lengde på tidssteg og størrelse på IA påvirker fordelingen av R. Dette forholdet representerer første trinn i beregningen av hastigheten og har stor påvirkning på resultatene. R-fordelingen for de fem parametersettene testet her er vist i figur 3.3-3.8, og viser hvordan større IA og lengre tidssteg gir en større andel av R i det lavere sjiktet, og omvendt for kort tidssteg og lite IA. Ønsket tendens om en normalfordeling for hvert intervall over $R = 0.5$ var ikke tilfellet og det kan ikke velges Δt og IA kun basert på fordelingen av R. Ønsket tendens hadde vært at både stor Δt og IA og lite Δt og IA hadde gitt en større andel av R i det lave sjiktet. Resultatene vist i figur 3.3, 3.5 og 3.8 illustrerer at forholdet mellom IA og Δt ikke har et ideelt forhold ut fra dette vurderingskriteriet alene.



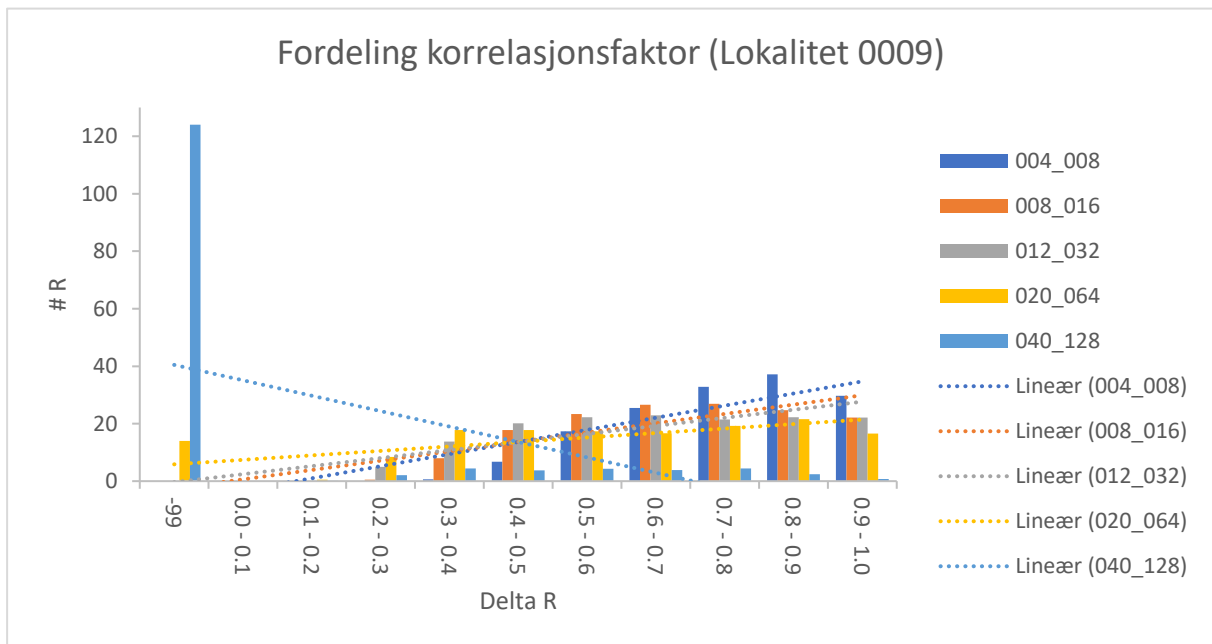
Figur 3.3: Fordeling av korrelasjonsfaktor R for lokalitet 0004. Grafen viser den gjennomsnittlige fordelingen av R (totalt antall R over antall bildepar) for de fem utvalgte forholdene for Δt og IA

Grafen over (figur 3.3) viser fordelingen av korrelasjonsfaktoren, R , i gyldighetsområdet $[0,1]$ for lokalitet 0004. X-aksen representerer gjennomsnittlig antall R (totalt antall R over antall bildepar) for hvert intervall på 0.1 gitt på y-aksen. Hvert av testsettene er gitt som Δt og IA . Fordelingen viser en tydelig tendens mot at mindre tidssteg og mindre IA gir en større andel av R med en verdi mellom 0.5 og 1.



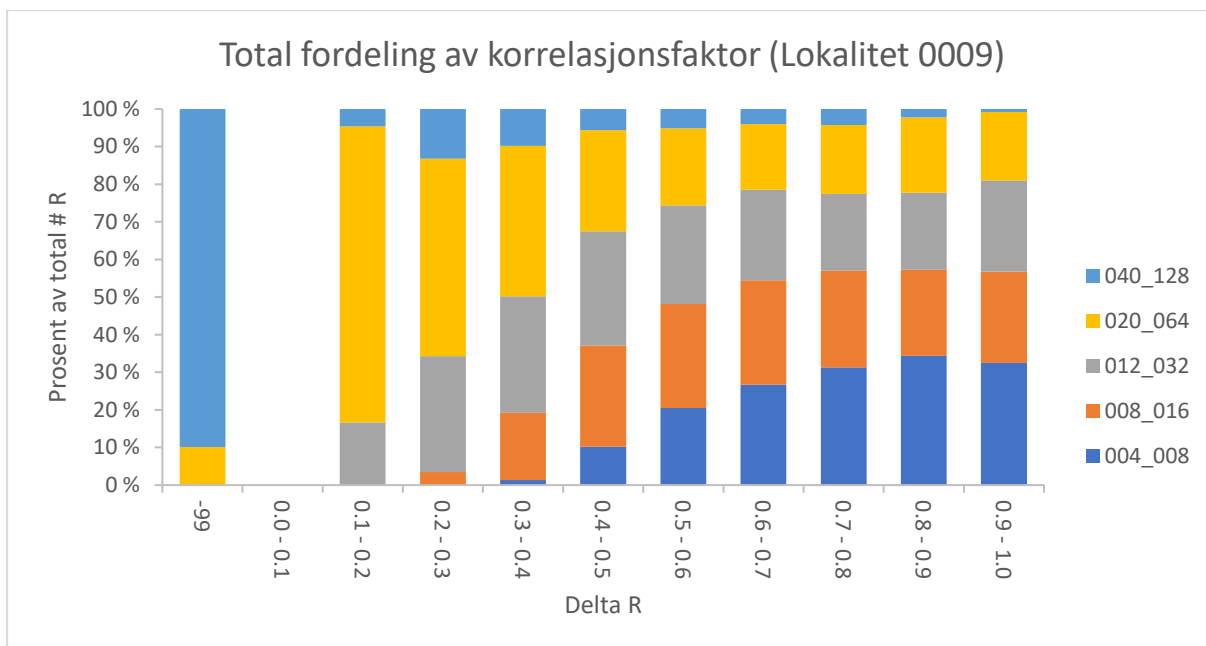
Figur 3.4: Prosentvis fordeling av korrelasjonsfaktoren R for lokalitet 0004 Δt og IA .

For video 0004 med $\Delta t = 0.40$ sekunder og $IA = 128$ piksler er fordelingen av R for nedre (0-0.5) og halvdel øvre (0.5-1.0) del av gyldighetsområdet 61/17 (22 % har verdi -99), mens for $\Delta t = 0.12$ sekunder og $IA = 32$ piksler er fordelingen tilnærmet 50/50 mellom øvre og nedre halvdel (figur 3.4). For $\Delta t = 0.04$ sekunder og $IA = 8$ piksler er 93 % i øvre halvdel. Man ønsker å oppnå en høy andel i øvre halvdel på minst 50 %. Den ekstreme andelen (93 %) for $\Delta t = 0.04$ sekunder og $IA = 8$ piksler skyldes trolig at størrelsen på IA er for lite i forhold til størrelsen på markøren og gir et høyt utslag for korrelasjonsfaktoren.



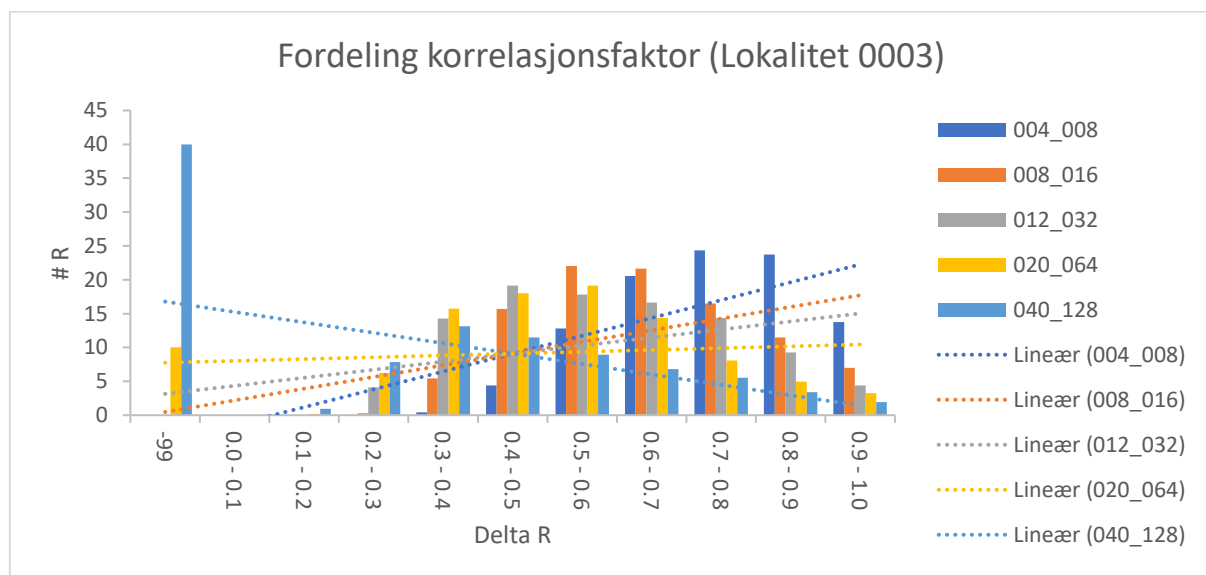
Figur 3.5: Fordeling av korrelasjonsfaktor R for lokalitet 0009

Fordelingen av korrelasjonsfaktoren for lokalitet 0009 (figur 3.5) viser en stor andel verdier utenfor gyldighetsområdet $[0,1]$. Tendensen for resten av fordelingen er som for figur 3.3, men noe mer forskjøvet mot øvre halvdel for $\Delta t = 0.12$ sekunder og $IA = 32$ piksler.



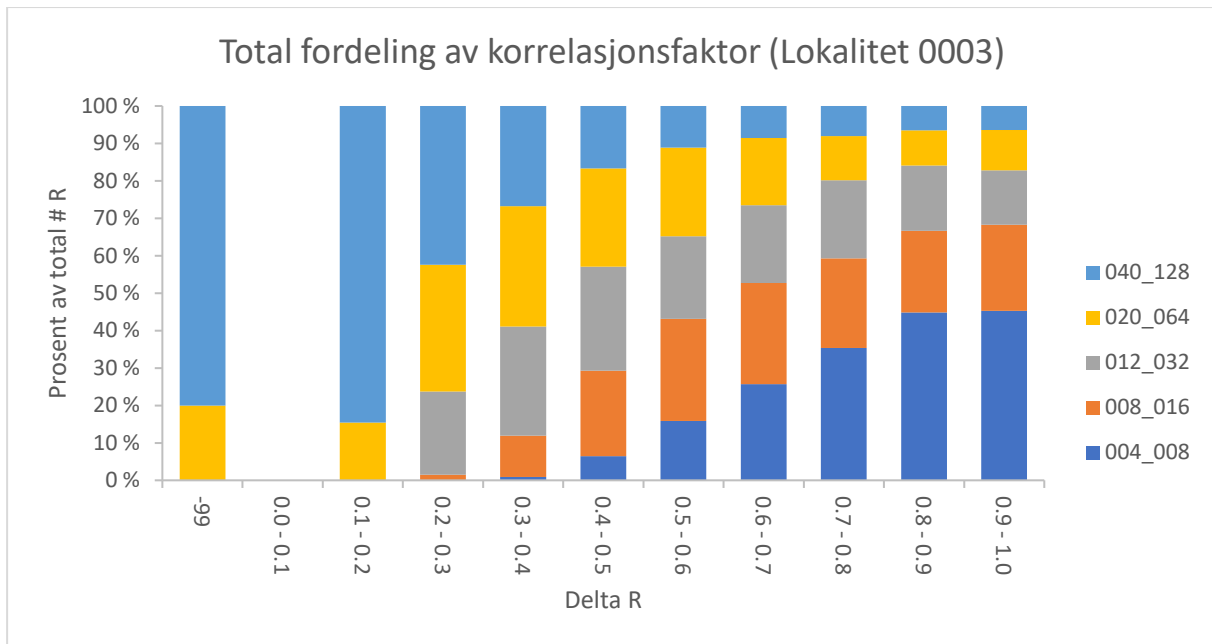
Figur 3.6: Prosentvis fordeling av korrelasjonsfaktoren R for lokalitet 0009 Δt og IA.

For video 0009 med $\Delta t = 0.40$ sekunder og IA = 128 piksler er fordelingen av R for nedre (0-0.5) og halvdel øvre (0.5-1.0) del av gyldighetsområdet 7/10/(83), altså har 17 % en korrelasjonsfaktor innen gyldighetsområdet og 83 % har en verdi på -99 (figur 3.6). Dette indikerer at oppsettet for testen ikke er egnet for bildematerialet. For $\Delta t = 0.12$ sekunder og IA = 32 piksler er fordelingen tilnærmet 25/75. For $\Delta t = 0.04$ sekunder og IA = 8 piksler er 95 % i øvre halvdel.



Figur 3.7: Fordeling av korrelasjonsfaktor R for lokalitet 0003

Fordelingen av korrelasjonsfaktoren for lokalitet 0003 (figur 3.7) viser også en betydelig andel verdier utenfor gyldighetsområdet [0,1]. Tendensen for resten av fordelingen er som for figur 3.5, men ikke like mye forskjøvet mot øvre halvdel for $\Delta t = 0.12$ sekunder og IA = 32 piksler.



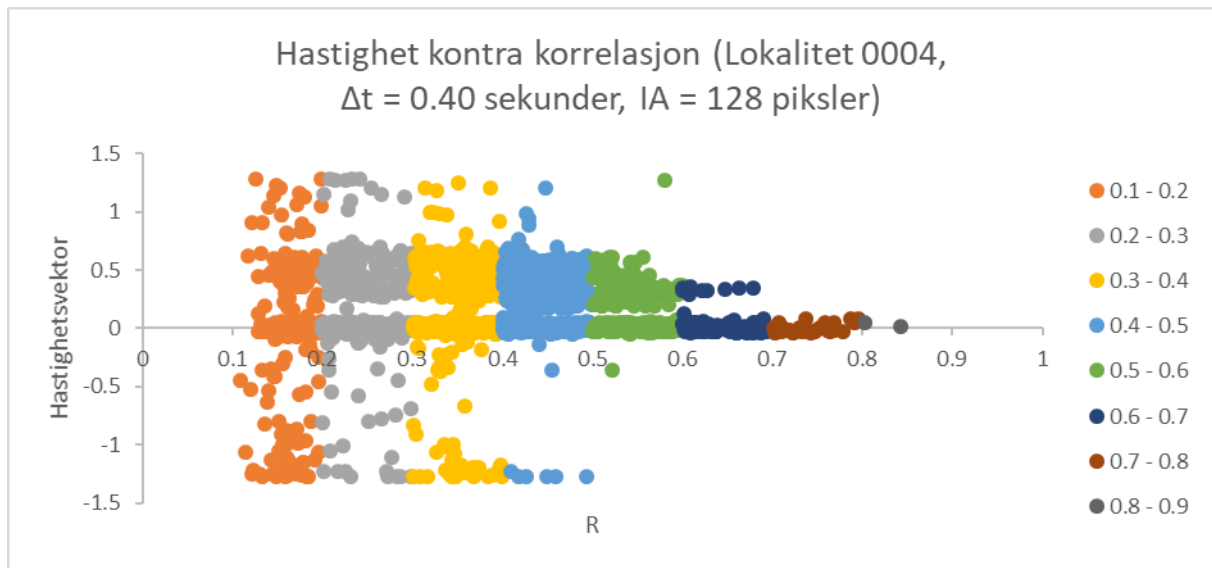
Figur 3.8: Prosentvis fordeling av korrelasjonsfaktoren R for lokalitet 0003 Δt og IA.

For video 0003 med $\Delta t = 0.40$ sekunder og IA = 128 piksler er fordelingen av R for nedre (0-0.5) og halvdel øvre (0.5-1.0) del av gyldighetsområdet 30/30/(40), altså har 60 % en korrelasjonsfaktor innen gyldighetsområdet og 40 % har en verdi på -99 (figur 3.8). Tilsvarende som for lokalitet 0009 indikerer dette at oppsettet for testen ikke er egnet for bildematerialet. For $\Delta t = 0.12$ sekunder og IA = 32 piksler er fordelingen tilnærmet 40/60. For $\Delta t = 0.04$ sekunder og IA = 8 piksler er 95 % i øvre halvdel.

Fordelingen av korrelasjonsfaktoren for alle lokalitetene viser at en stor andel punkter har verdien -99. Sannsynligvis skyldes dette at ved stort IA og SA hentes informasjon ut fra kanten av bildet som undersøkes, eller at gridet er plassert slik at noe av sideterrenget til elva hvor markørene ikke opptrer tas med og resulterer i dårlige data. Dette viser igjen at stort IA og Δt ikke er egnet.

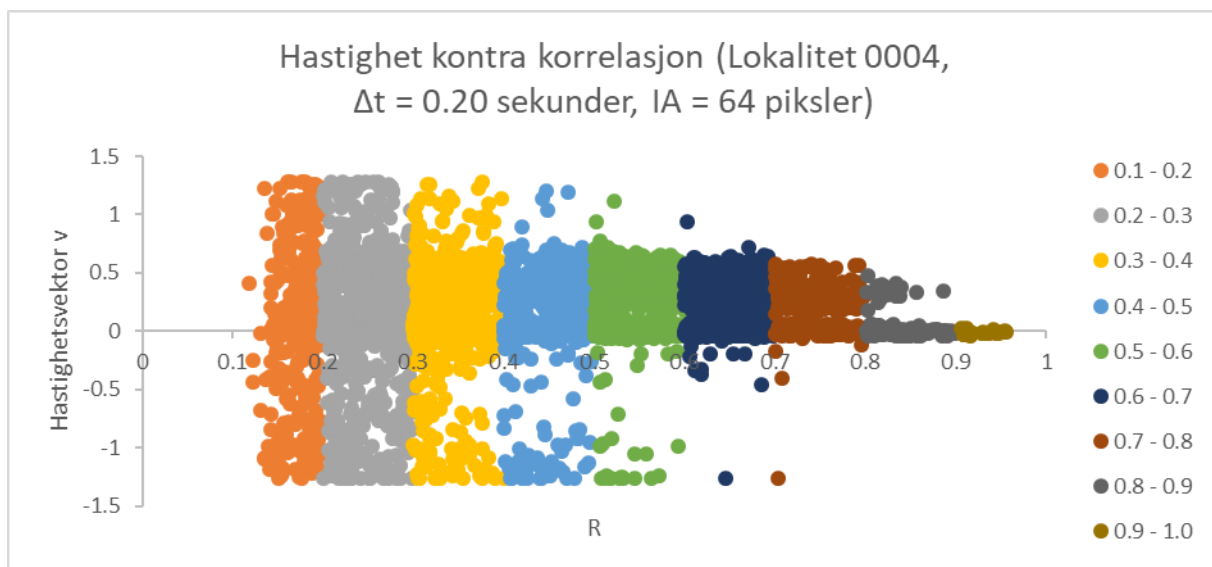
For hvert av de fem parametersettene ble også sammenhengen mellom de øyeblikkelige hastighetsvektorene og korrelasjonsfaktoren (figur 3.9-3.13) vurdert for å se om høy korrelasjonsfaktor svarte til ønskede hastighetsverdier. Ønsket tendens for mindre IA og Δt er en forskyvning av korrelasjonsfaktoren mot 1 (større andel mot R = 1) og hastigheter høyere

enn 0, dvs. hvorvidt høy korrelasjonsfaktor samsvarer med positive hastighetsverdier i grafene vist under. Man ønsker også ønsker man minst mulig støy i det ufiltrerte resultatet.



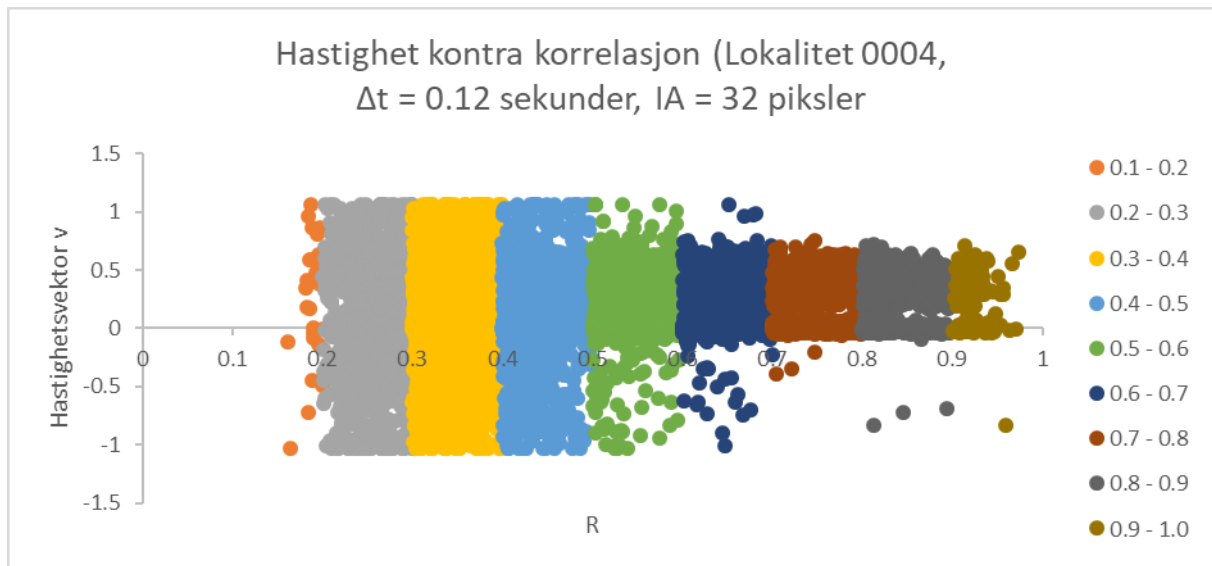
Figur 3.9: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_040_128.

Tidssteg på 0.40 sekunder og $IA = 128$ piksler (figur 3.9) gav en fordeling av hastighetsvektorkomponenter med korrelasjonsfaktor hovedsakelig under 0.5. Noe støy forekom i form av vektorkomponenter med avvikende hastigheter (både positive og negative punkter som ligger utenfor kjernen av grafen) og en jevn andel av komponenter tilnærmet null ble også observert. Andelen av «nær-null-komponenter» kunne ses for alle parametersettene og kunne spores som et resultat av områder hvor markører ikke var tilstede i bildet.



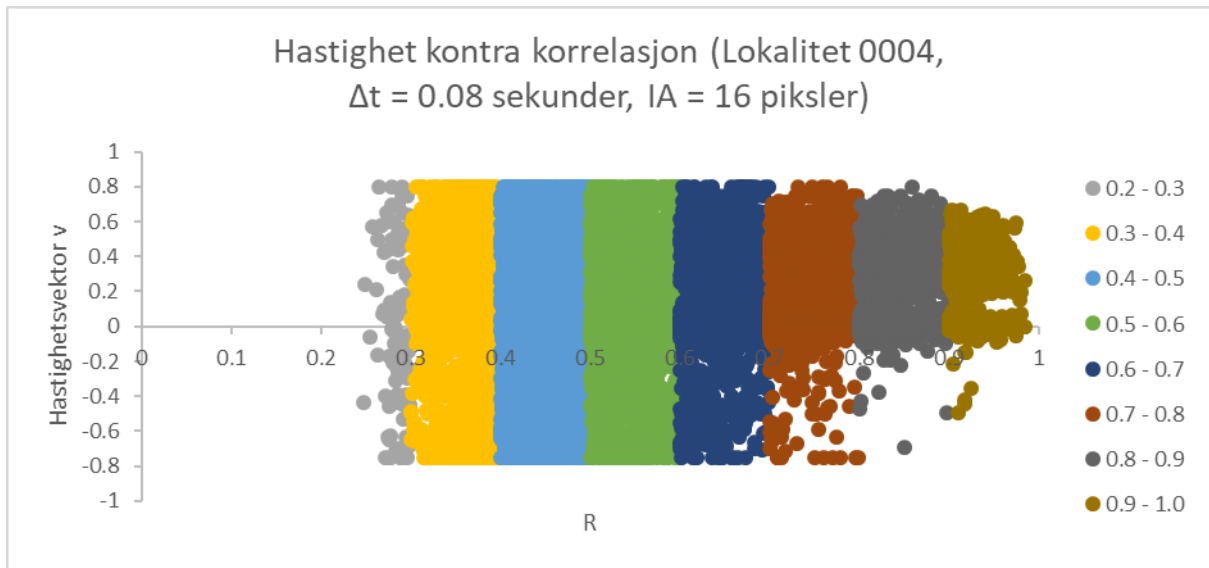
Figur 3.10: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_020_064

$\Delta t = 0.20$ sekunder og $IA = 64$ ga samme tendenser som 0.40/128-parametersettet (figur 3.9) for fordelingen av korrelasjonsfaktoren, men figur 3.10 viser at 0.20/64-kombinasjonen gav en forskyvning mot høyere R samtidig som noe mer støy forekom. En større andel av vektorkomponentene ligger i kjernen av fordelingen (hastighetskomponenter som er mer representative for størrelsen på strømmen som vist i figur 3.14) og hastigheten så ut til å øke noe.



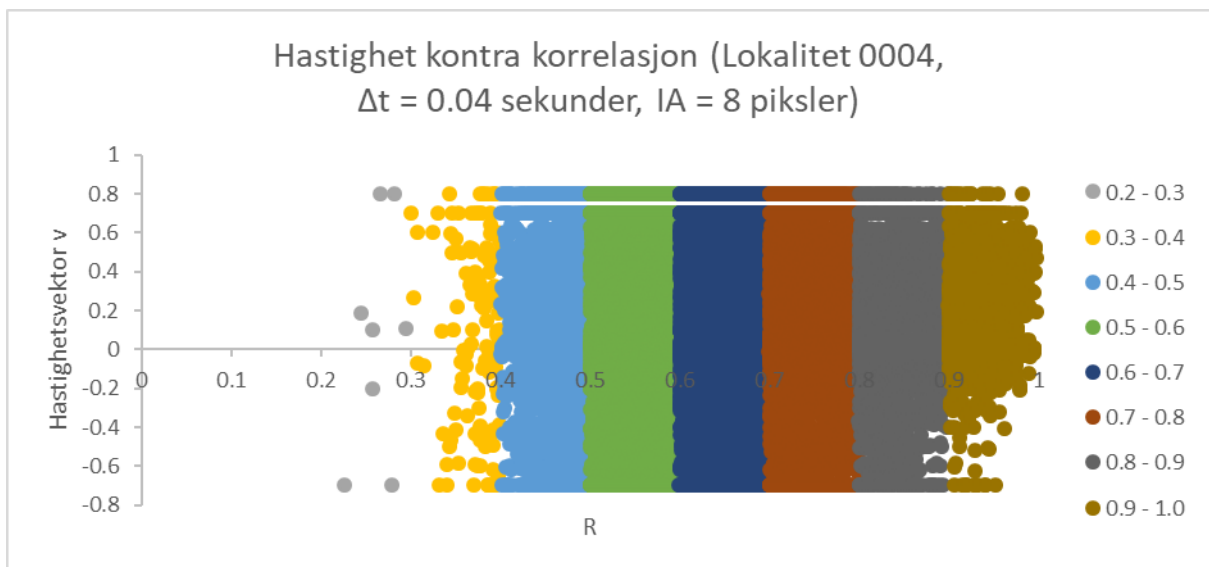
Figur 3.11: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_012_032.

Når Δt ble valgt så lavt som 0.12 sekunder med IA på 32 piksler (figur 3.11) startet en jevn fordeling av vektorkomponenter med R mellom 0.2 og 0.5 over hele hastighetsintervallet, fra minimum til maksimum. Andelen komponenter med R høyere enn 0.5 hadde i tillegg en liten andel urealistiske verdier.



Figur 3.12: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_008_016.

For de to siste parametersettene 0.08 sekunder, 16 piksler (figur 3.12) og 0.04 sekunder, 8 piksler (figur 3.13) viste resultatene en større andel vektorer med høy korrelasjonsfaktor, men ikke den ønskede tendens for faktisk hastighet. Analysen resulterte i en høyere andel vektorkomponenter med høy korrelasjon, men et dårligere resultat grunnet mye støy.



Figur 3.13: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0004_004_008.

Beregnete verdier av median, gjennomsnittlig, min- og maksverdi for hele datasettet er vist i tabell 3.1. Tallene viser samlet en tendens til økte verdier for mindre Δt og IA fram til 0.12 sekunder og IA = 32 piksler og deretter en utjevning mot $\Delta t = 0.04$ sekunder og IA = 8 piksler. For lokalitet 0003 starter utjevningen mellom 020_064 og 012_032. For lokalitet 0009 er det et større avvik fra 0.40 til 0.20 sekunder hvor minimums- og maksimumsverdien er lave

sammenlignet med de tilsvarende verdiene fra de resterende datasettene. Visuell vurdering av figur A.1-A.4 indikerer at avviket skyldes at parameterne valgt for analysen resulterer i vektor som ikke representerer den faktiske hastigheten. Store deler av vektorene er tilnærmet nullvektorer og noen få områder viser vektorer med stor hastighet (figur A.1).

Tabell 3.1: Gjennomsnittlig, median og maksimums- og minimumsverdier for testsettene i sensitivitetsanalysen for lokalitetene 0003, 0004 og 0009.

	Δt IA				
	040_128	020_064	012_032	008_016	004_008
Lokalitet 0003					
Gjennomsnitt [m/s]	0.10	0.23	0.17	0.12	0.11
Median [m/s]	0.0069	0.041	0.0071	0.011	0.029
Max [m/s]	1.22	1.28	1.24	0.99	1
Min [m/s]	-1.08	-1.21	-1.22	-0.92	-0.87
Lokalitet 0004					
Gjennomsnitt [m/s]	0.093	0.095	0.12	0.10	0.11
Median [m/s]	0.021	0.023	0.022	0.025	0.037
Max [m/s]	1.08	1.18	1.04	0.80	0.80
Min [m/s]	-1.25	-1.23	-1.00	-0.74	-0.70
Lokalitet 0009					
Gjennomsnitt [m/s]	0.0079	1.16	0.22	0.21	0.22
Median [m/s]	0	0.0095	0.049	0.085	0.13
Max [m/s]	0.85	2.96	2.69	2.14	2.18
Min [m/s]	-0.14	-2.57	-2.56	-2.00	-1.91

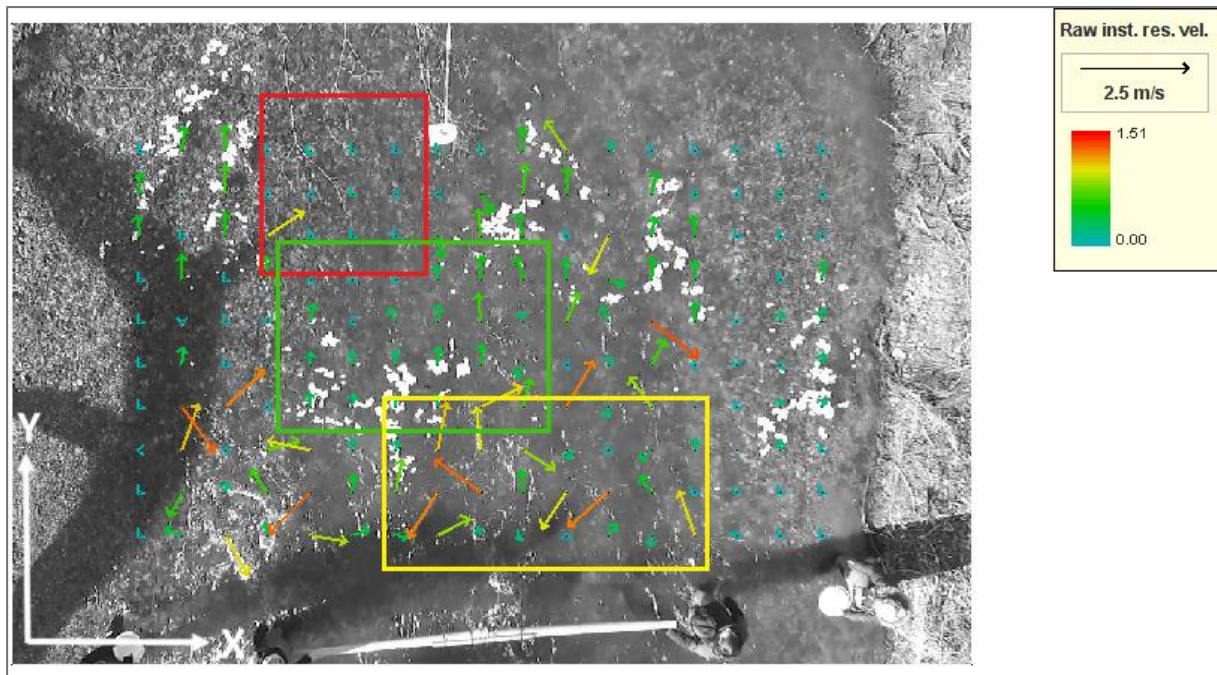
Totalt sett viste sensitivitetsanalysen at stort tidssteg og stort IA ga en uønsket fordeling av korrelasjonsfaktoren, mens reduksjon i størrelsen til Δt og IA ga en mer ønskelig fordeling (høyere andel med R over 0.5) til et visst punkt. Velger man for lite IA, vil ikke forflytningen av markørene bli representert. På den andre siden viste analysen at andelen støy øker om forholdet blir for lite og et større forhold ga et jevnere resultat (som også beskrevet i kapittel 2.3.4). Visuell vurdering av øyeblikkelige (rå) hastighetsvektorer (Vedlegg A: Bildene fra hastighetsanalysen brukt i den visuelle vurderingen) viste at mindre Δt og IA ga mer støy i hastighetsvektorene. Støy forekommer som vektorer med avvikende retninger fra strømningsretningen og større utstrekning enn realistisk hastighet.

Fordelingen av korrelasjonsfaktoren (første del av sensitivitetsanalysen) viste at $\Delta t = 0.12$ sekunder og $IA = 32$ piksler var den beste kombinasjonen. Den andre delen av analysen (hastighet kontra korrelasjon) støttet opp under at en slik kombinasjon gav best resultater. Parameterkombinasjonen $\Delta t = 0.12$ sekunder og $IA = 32$ piksler (012_032) ble derfor valgt for selve hastighetsanalysen. Denne parameterkombinasjonen viste gode tendenser der hvor markørene opptrådte med fornuftige hastighetsverdier og gav få urealistiske hastighetsvektorer. Forholdet $\Delta t = 0.08$ sekunder, $IA = 16$ piksler ble også testet for å se på påvirkningen av tidssteget og IA for video 0004 og 0009 da resultatene for 012_032 ga noe større avvik enn ønsket.

3.2.3 Analyse av hastighetsberegning

I hastighetsanalysen ble vektorfeltene postprosessert ved å benytte grensebetingelser for minimum og maksimum hastigheten, både i x/y-retning og omfang (magnitudo), og en grundig vurdering av hva grensebetingelsene¹⁴ (SNL, 2009) skal representere ble foretatt. Resultatet skal gjengi de virkelige forholdene best mulig. I analysen som vurderer Fudaa-LSPIV sin egnethet for beregning av vannets overflatehastighet er flere parametre testet i denne oppgaven. Datasettene fra sensitivitetsanalysen ble videre postprosessert ved å sette grensebetingelser for minimums- og maksimumshastighet, nedre grense for korrelasjonsfaktor og en kombinasjon av disse to. Minimum hastighet er valgt til 0.1 m/s for å fjerne vektorer tilnærmet lik null (se eksempel figur 3.14) og nedre grense for R til 0.5 basert på sensitivitetsanalysen. Jodeau, Hauet og Le Cos (2013) anbefaler en nedre grense på 0.6 for R . Det ble også gjort en vurdering av hvordan størrelsen på SA , plassering av IA og bildeoppløsning påvirker resultatet.

¹⁴ Definerer en funksjons verdi ved grensen i et område hvor funksjonen varierer for at funksjonen i området skal stemme overens med en bestemt fysisk situasjon.



Figur 3.14: Øyeblikkelig hastighetsfelt med null-vektorer. Vektorene markert i det røde rektangelet skyldes at ingen markører passerer gjennom området og resulterer i vektorer med svært liten hastighet. Vektorene fjernes fra analysen ved å sette en nedre grense for tillatt hastighet. Vektorene markert i det grønne rektangelet er det som kalles representative vektorer. Det gule rektangelet viser til områder der turbulens fører til støy (vektorer med avvikende retning).

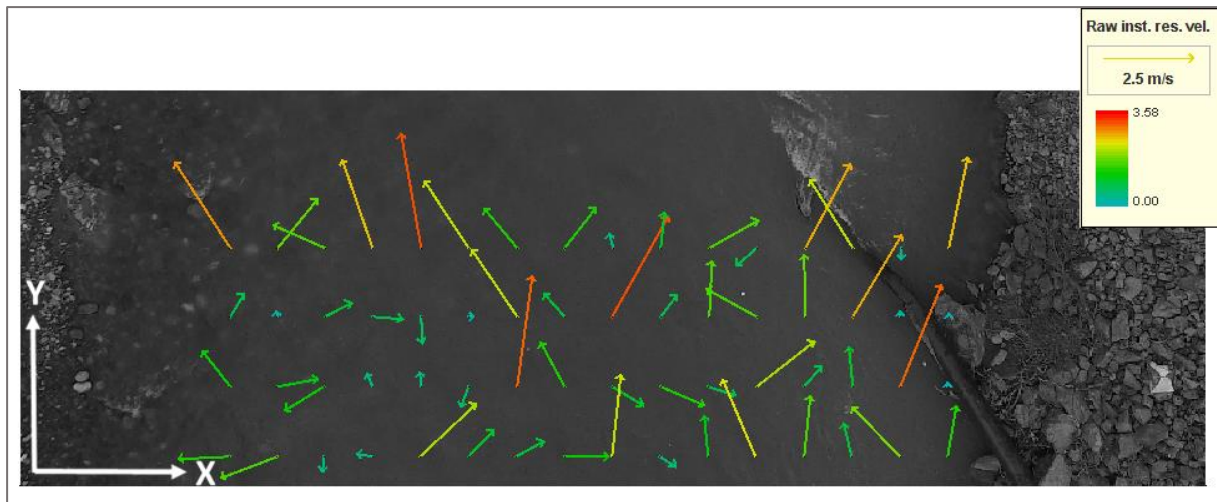
De valgte grenseverdiene for hastighetsanalysen er gitt i tabell 3.2. Det er viktig å være oppmerksom på at hovedretningen på strømmen er avhengig av orienteringen av dronen ved innsamling, den kan både være i x- og y-retning (for video 0003 og 0004 er hovedretningen i positiv y-retning og for 0009 i positiv x-retning). Øvre grense for hastigheten ble satt ut fra den innmålte verdien for lokalitet 0004. For lokalitet 0003 og 0009 ble samme øvre grense benyttet, selv om den egentlig bør velges individuelt for hvert datasett. Den øvre grenseverdien må bestemmes ut ifra den egentlige hastigheten på strømmen slik som beskrevet i kapittel 2.3.5. Grunnen til at det likevel ble benyttet samme øvre grense for alle lokalitetene var at resultatet fra denne individuelle analysen ikke ble brukt videre til å teste de andre parameterne, noe som måtte ha vært gjort for å få riktige individuelle verdier.

Tabell 3.2: Grensebetingelser for hastighetsanalysen. Hovedretningen for strømmen varierer med orienteringen av kameraet under innsamling av bildemateriale. For video 0003 og 0004 er hovedretningen i positiv y-retning, hvor i er gitt som Y , mens for video 0009 er $i = X$. Retningen er definert ut fra koordinatsystemet i figurene. M er utstrekningen av hastighetsvektoren.

Navn	Betingelser
REF	Ingen endringer i grenseverdier (satt til standardverdier for programmet)
V _i 01	Nedre grense for $V_i = M_{\text{nedre}} = 0.1$ m/s
R05	Nedre grense på 0.5 for R
V _i 01R05	Kombinasjon av grensebetingelsene til V _i 01 og R05
V _i 01099R05	Kombinasjon av grensebetingelsene til V _i 01R05 med en øvre grense for $V_i = M_{\text{øvre}} = 0.99$ m/s

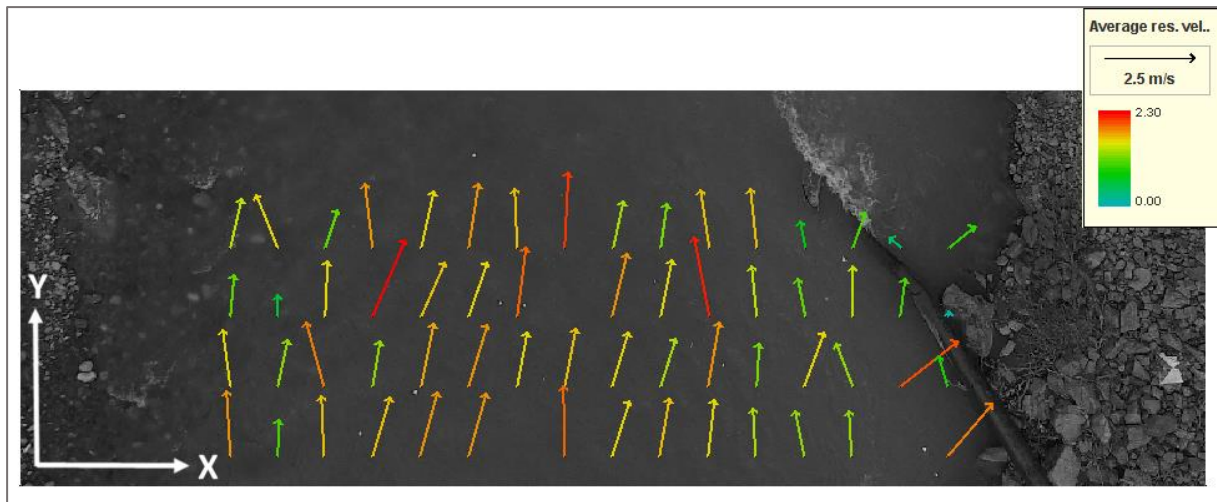
I Fudaa er det en mulig å velge *plasseringen av IA* i undersøkelsesområdet. Prosessen beskrevet i kapittel 2.3.2 gjentas for hvert punkt i gridet uavhengig av de andre punktene i rå-formatet og plasseringen av IA burde da ikke påvirke beregningen av hastighetsvektorene. For å teste om så var tilfellet ble bildemateriale fra video 0004 testet for forskyvning av plasseringen vertikalt og horisontalt i rutenettet, og for plassering utenfor rutenettet. Det ble også sjekket om hvordan plassering av IA hvor markører opptrer kontra hvor de uteblir kan påvirke resultatene. De øyeblikkelige vektorfeltene i vedlegg N viste ved visuell vurdering at plasseringen av IA ikke påvirker resultatet. Dette stemmer overens med tolkningen av teorien (Muste, Fujita og Hauet, 2008).

For videre testing av parametere ble det valgt å gå videre med testsett VY01R05, med $V_{y_nedre} = 0.1$ m/s = M_{nedre} og $R_{\text{nedre}} = 0.5$ (tabell 3.2). Jodeau, Hauet og Le Cos (2013) anbefaler at *utstrekningen* i strømningsretningen er større enn resten av retningene, og i sensitivitetsanalysen ble det valgt SA med lik utstrekning i alle retninger. For datasettene 0003, 0004 og 0009 ble utstrekningen av SA endret. For VY01R05_64 ble SA endret i hovedretningen til strømmen ($S_{ip} = 64$ piksler) og for VY01R05_64161616 ble i tillegg resterende retninger ($S_{jp}/S_{im}/S_{jm} = 16$ piksler, $S_{ip} = 64$ piksler) endret. Resultatet av testingene er behandlet i kapittel 4.



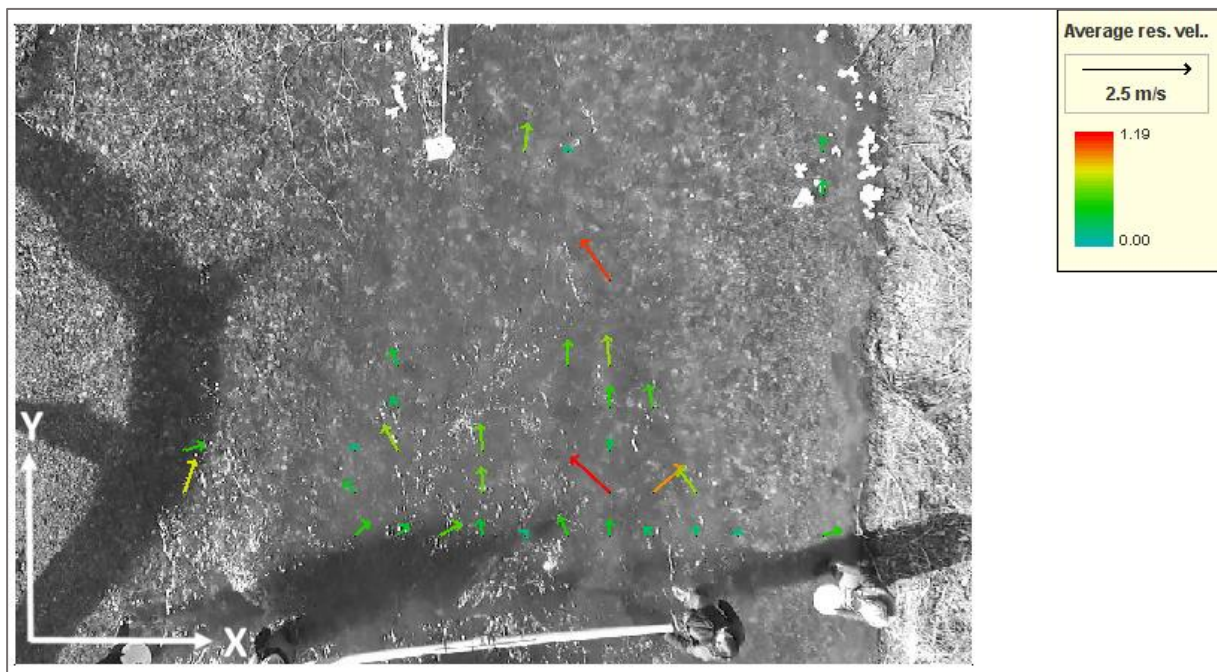
Figur 3.15: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0007 (Devoll, Albania). Markørtettheten i videomaterialet er lav.

I hastighetsanalysen ble det i tillegg til de tre videoene (0003, 0004 og 0009) fra Mangfall, Tyskland, testet på videomaterialet (0007) fra elven Devoll i Albania. I denne videoen er det lav tetthet av markører og dette ga utslag i analysen. Få markører å detektere førte til at resultatene for parametersettene over ga resultater med lite representative vektorer og store mengder støy (figur 3.15). Det ble testet for ulike utstrekninger av SA og ett parametersett (tabell 3.4) ga et resultat på 1.36 m/s og et avvik på 3.1 % (målt verdi 1.32 m/s). Resultatet er i dette tilfellet regnet som gjennomsnittsverdien for hele gridet. Det gjennomsnittlige hastighetsfeltet er vist i figur 3.16. Resultater viste en god beregnet verdi for hastigheten, men grunnet lite representative øyeblikkelige hastighetsfelt og for lav markørtetthet, ble det valgt å ikke testet videre på dette videomaterialet.



Figur 3.16: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for lokalitet 0007 (Devoll, Albania). Markørtettheten i videomaterialet er lav.

Turbulens fører til synlige mønstre og formasjoner på vannoverflaten og disse er detekterbare ved bruk av LSPIV. For lokalitet 0004 ble det testet om slike naturlige, synlig mønstre (figur 3.15) gir like gode resultater for hastighetsberegningen som det man oppnår ved bruk av kunstige markører. Testen tok utgangspunkt i VY01R05 og ble testet for både 0.12 sekunder, 32 piksler og 0.08 sekunder, 16 piksler.



Figur 3.17: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet ved turbulens (lokalitet 0004) for $\Delta t = 0.12$ sekunder og $IA = 32$ piksler

Tabell 3.4: Parameteroppsett for hastighetsberegningen

Navn	Δt [sek]	IA [piksler]	SA* [piksler]	Mmin [m/s]	Mmaks [m/s]	Vxmin [m/s]	Vxmaks [m/s]	Vymin [m/s]	Vymaks [m/s]	Rmin [1]	Rmaks [1]	OpplysningBildefrekvens x
0003_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor												
VY01	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,0	1,0	0,005
R05	0,12	32	32	0,0	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,5	1,0	0,005
VY01R05	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,005
VY01099R05	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	0,99	0,5	1,0	0,005
0003_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor og SA												
VY01R05_64	0,12	32	32/64/32/32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,005
VY01R05_64161616	0,12	32	16/64/16/16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,005
0003_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor, SA og bildesekvens												
VY01R05(M)	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,005
VY01R05_64(M)	0,12	32	32/64/32/32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,005
VY01R05_64161616(M)	0,12	32	16/64/16/16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,005
0004_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor												
VY01	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,0	1,0	0,004
R05	0,12	32	32	0,0	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
VY01R05	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
VY01099R05	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	0,99	0,5	1,0	0,004
0004_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor og SA												
VY01R05_64	0,12	32	32/64/32/32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
VY01R05_64161616	0,12	32	16/64/16/16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
0004_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor, SA og bildesekvens												
VY01R05(M)	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
VY01R05_64(M)	0,12	32	32/64/32/32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
VY01R05_64161616(M)	0,12	32	16/64/16/16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
0004_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor, SA og bildesekvens												
VY01R05	0,08	16	16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
VY01R05_32	0,08	16	16/32/16/16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004
VY01R05_32888	0,08	16	8/32/8/8	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004

Tabell 3.4: Parameteroppsett for hastighetsberegningen (forts.)

Navn	Δt [sek]	IA [piksler]	SA* [piksler]	Mmin [m/s]	Mmaks [m/s]	Vxmin [m/s]	Vxmax [m/s]	Vymin [m/s]	Vymaks [m/s]	Rmin [1]	Rmaks [1]	Oppløsning	Bildefrekvens x
0009_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor													
VX01	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,0	1,0	0,011	25
R05	0,12	32	32	0,0	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
VX01R05	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
VX01099R05	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	0,99	0,5	1,0	0,011	25
0009_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor og SA													
VX01R05_64	0,12	32	32/32/32/64	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
VX01R05_64161616	0,12	32	16/16/16/64	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
0009_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor, SA og bildesekvens													
VX01R05(M)	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
VX01R05_64(M)	0,12	32	32/32/32/64	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
VX01R05_64161616(M)	0,12	32	16/16/16/64	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
0009_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor, SA og bildesekvens													
VX01R05	0,08	16	16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
VX01R05_32	0,08	16	16/16/16/32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
VX01R05_32888	0,08	16	8/8/8/32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,011	25
0004_Turbulens_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor, SA og bildesekvens													
VY01R05	0,08	16	16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004	25
VY01R05_32	0,08	16	16/32/16/16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004	25
VY01R05_32888	0,08	16	8/32/8/8	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004	25
0004_Turbulens_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor, SA og bildesekvens													
VY01R05	0,12	32	32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004	25
VY01R05_64	0,12	32	32/64/32/32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004	25
VY01R05_64161616	0,12	32	16/64/16/16	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,004	25
0007_Endring av grenseverdier for magnitudo, hastighet og korrelasjonsfaktor													
VY01R05_64161616	0,2	32	16/64/32/32	0,1	1,00E+30	-1,00E+30	1,00E+30	0,1	1,00E+30	0,5	1,0	0,010	30

4 Resultater

Dette kapitlet viser i hovedsak resultater fra hastighetsanalysene av drone/UAV-innhentet video-materiale fra tre ulike lokaliteter; 0003: Mangfall, Tyskland, 0004: Mangfall, Tyskland, og 0009: Mangfall, Tyskland. Med bakgrunn i sensitivitetsanalysene ble parameterforholdet $\Delta t = 0.12$ sekunder og $IA = 32$ piksler valgt for videre beregning av vannhastighetene, og grenseverdier (kapittel 3.2.3) er valgt som vist i tabellen for forsøksoppsett (tabell 3.4). For lokalitet 0004 og 0009 viste forholdet over dårligere resultater og ble derfor videre testet for $\Delta t = 0.08$ sekunder og $IA = 16$ piksler. For alle lokalitetene er kun den vektorkomponenten som ligger nærmest hovedstrømningsretningen vurdert (0003/0004: y-komponenten; 0009: x-komponenten). Alle testene er navngitt som beskrevet i kapittel 3.2.2 og valg av parametre og grensebetingelser for hver test er gitt i tabell 3.4.

4.1 Lokalitet 0003

I testene (tabell 4.1 og 4.2) for lokalitet 0003 lot man markørene passere gjennom hele gridet i bildeserien. Andre kolonne («Måling») i tabellen viser til referansemålingen utført med strømningsmåler. Tredje kolonne («REF») er referanseberegningen med standardverdier for grenseverdiene. Kolonne fire til syv har endringer i grenseverdier for hastighetsvektoren og korrelasjonsfaktoren. For endring i nedre verdi for hastighetskomponenten er utstrekningen (M) av hastighetsvektoren satt til samme verdi og tilsvarende for endring i øvre verdi. For hver test er avviket fra målingen beregnet i både eksakte verdier (m/s) og prosent.

Tabell 4.1: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0003. REF = ingen endring i grenseverdier (satt til standardverdi, tabell 3.4), VY01 = nedre grense for $V_y = M_{nedre} = 0.1$ m/s, R05 = nedre grense på 0.5 for R, VY01R05 = kombinasjon av grensebetingelsene for VY01 og R05 og VY01099R05 = kombinasjon av grensebetingelsene til VY01R05 med en øvre grense for $V_y = 0.99$ m/s.

Navn	Måling	REF	VY01	R05	VY01R05	VY01099R05
VY [m/s]	1.01	0.20	0.77	0.27	0.80	0.81
Avvik [m/s]	-	0.81	0.24	0.74	0.21	0.20
Avvik [%]	-	-80.3	-23.6	-73.2	-20.8	-19.5

Hastighetsanalysen av bildemateriale fra lokalitet 0003 (tabell 4.1) viser at bruk av standardverdier for utstrekning, hastighetskomponentene og korrelasjonsfaktoren gir størst avvik i forhold til de målt verdi (1.01 m/s) med 0.81 m/s tilsvarende -80.3 % avvik mens kombinasjonen av nedre hastighetsgrense på 0.1 m/s, øvre grense på 0.99 m/s og R = 0.5 gav

resultater tettetst opptil målte (0.81 m/s tilsvarende et avvik på 0.20 m/s eller -19.5%). Kombinasjonen av nedre hastighetsgrense på 0.1 m/s og R = 0.5 gav et avvik på -20.8 %.

For de videre analysene ble analyseoppsettet («VY01R05») (tabell 3.2) valgt for alle lokalitetene.

Tabell 4.2: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0003 ved endring i utstrekning av SA. Hastigheten for VY01R05 er den samme som i tabell 4.2 (uten endringer i utstrekning) og er valgt som grunnlag for videre analyse av hvilken påvirkning valgte parametere har.

Navn	VY01R05	VY01R05_64	VY01R05_64161616
VY [m/s]	0.80	0.92	0.97
Avvik [m/s]	0.21	0.09	0.04
Avvik [%]	-20.8	-8.6	-4.0

Sammenlignet med («VY01R05») (avvik på 0.21 m/s, -20.8 %) ga endring i utstrekning av SA (tabell 4.2) en betydelig reduksjon i avvik, både for endring i strømningsretningen fra 32 til 64 piksler (0.09 m/s, -8.6 %) og ved endring av alle retninger (0.04 m/s, -4.0 %).

Ved å la alle markørene passerer gjennom hele gridet testene (tabell 4.1 og 4.2) ble bildepar hvor markørene ikke passerer målepunktet også tatt med i beregningen. For å undersøke hvordan dette påvirket resultatet ble bilder hvor markørene faktisk passerte målepunktet valgt ut og analysen gjennomført på nytt (tabell 4.3) med de samme betingelser som for beregningene fra tabell 4.2.

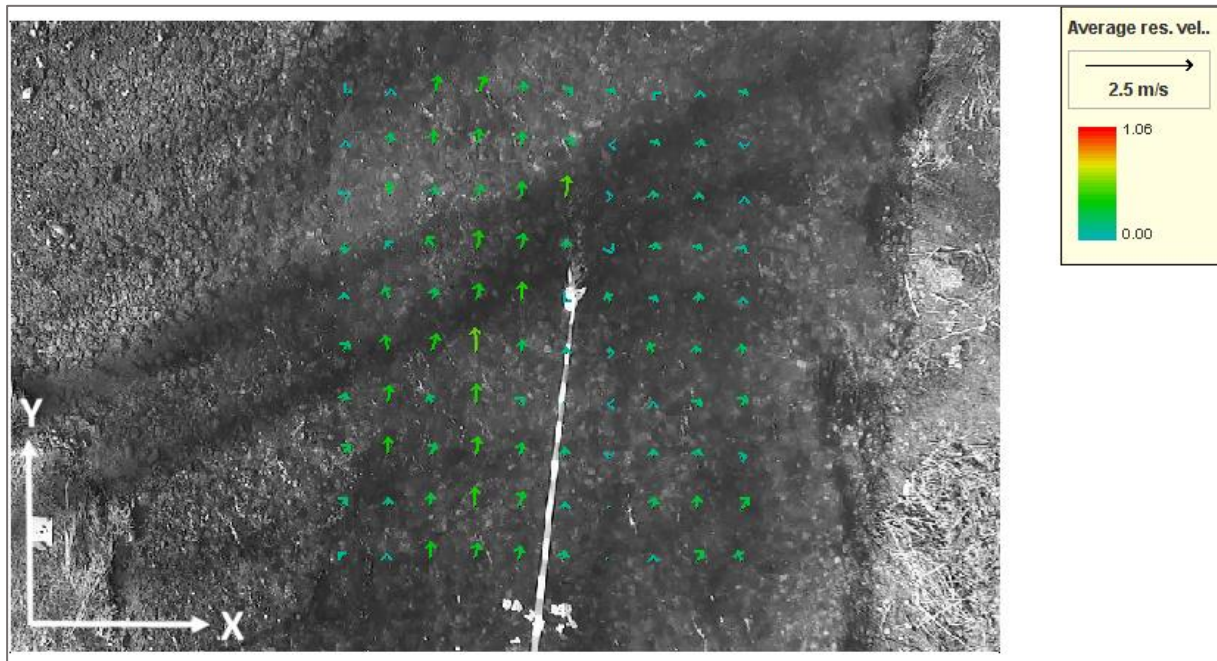
Tabell 4.3: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0003 ved endring av bildesekvens. I bildesekvensen for «(MA)», er kun bilder hvor markørene passerer målingspunktet er brukt i beregningen.

Navn	VY01R05(MA)	VY01R05_64(MA)	VY01R05_64161616(MA)
VY [m/s]	0.82	0.95	0.99
Avvik [m/s]	0.19	0.06	0.02
Avvik [%]	-18.7	-6.2	-1.6

De faktiske verdiene varierte fra 0.82 til 0.99 m/s (målt verdi: 1.01 m/s). Denne testen viste at utvelging av bildesekvens kun hvor markørene passerte målepunktet gav størst (0.19 m/s = -18.7 % tilsvarende -20.8 % for alle bildene) og minst avvik (0.02 m/s = -1.6 % tilsvarende -4.0 % for alle bildene).

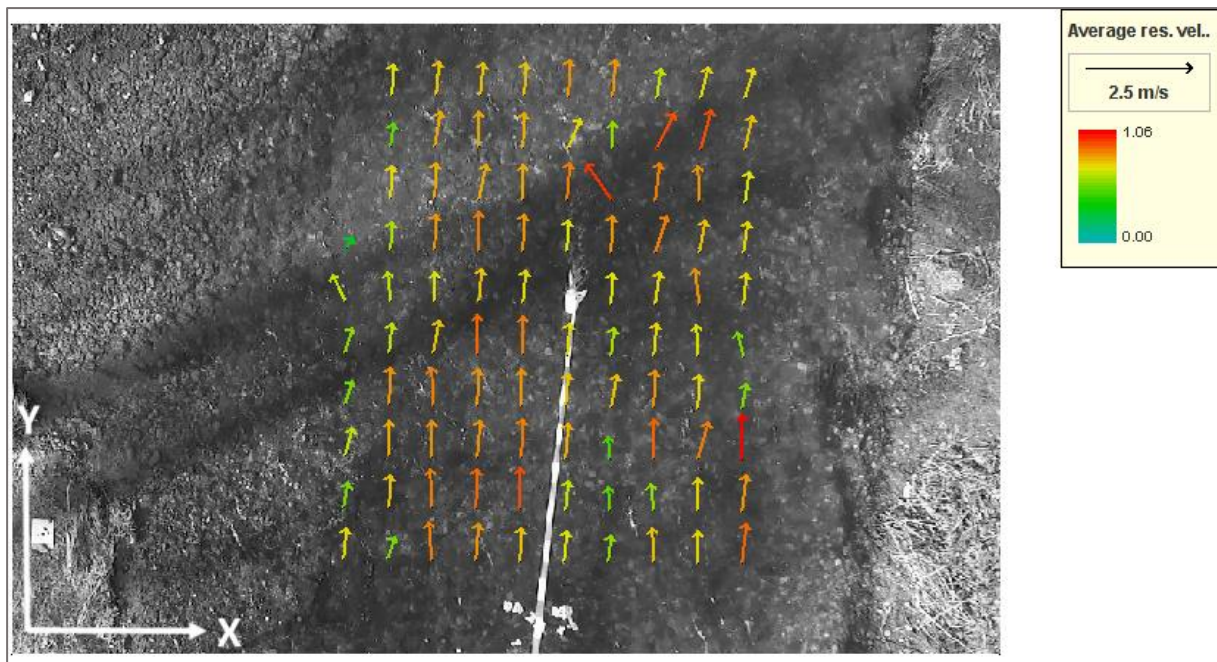
Hvert av bildene under viser gjennomsnittlig vektorfelt for den representative hastigheten. Lengden og fargen på vektoren viser størrelsen på vektoren, altså hastigheten.

Det gjennomsnittlige hastighetsfeltet («REF») (figur 4.1) med standardverdier for grensebetingelsene viser små hastighetsvektorer over hele feltet. Største vektoren er på 0.51 m/s, som er langt under målt hastighet.



Figur 4.1: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «REF» (lokalitet 0003)

Hastighetsfeltet for («VY01R05») (figur 4.2) viser vektorer med tydelig utstrekning (røde/oransje) og en tydelig endring fra («REF») (figur 4.1). Det er få korte vektorer og øverst til venstre er tre vektorer fjernet (grensebetingelser). Største hastighet er 1.06 m/s.



Figur 4.2: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «VY01R05» (lokalitet 0003)

4.2 Lokalitet 0004

Tilsvarende som for lokalitet 0003, passerte markørene gjennom hele gridet for testene (tabell 4.4 og 4.5) for lokalitet 0004. Andre kolonne («Måling») i tabellen viser til referansemålingen utført med strømningsmåler. Tredje kolonne («REF») er referanseberegningen med standardverdier for grenseverdiene. Kolonne fire til syv har endringer i grenseverdier for hastighetsvektoren og korrelasjonsfaktoren. For endring i nedre verdi for hastighetskomponenten er utstrekningen (M) av hastighetsvektoren satt til samme verdi og tilsvarende for endring i øvre verdi. For hver test er avviket fra målingen beregnet i både eksakte verdier (m/s) og prosent.

Tabell 4.4: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004. REF = ingen endring i grenseverdier (satt til standardverdi, tabell 3.4), VY01 = nedre grense for $V_y = M_{nedre} = 0.1$ m/s, R05 = nedre grense på 0.5 for R, VY01R05 = kombinasjon av grensebetingelsene for VY01 og R05 og VY01099R05 = kombinasjon av grensebetingelsene til VY01R05 med en øvre grense for $V_y = 0.99$ m/s.

Navn	Måling	REF	VY01	R05	VY01R05	VY01099R05
VY [m/s]	0.87	0.15	0.48	0.27	0.48	0.48
Avvik [m/s]	-	0.72	0.39	0.60	0.39	0.39
Avvik [%]	-	-82.9	-45.0	-68.5	-45.2	-45.2

Hastighetsanalysen av bildemateriale fra lokalitet 0004 (tabell 4.4) viser at bruk av standardverdier for utstrekning, hastighetskomponentene og korrelasjonsfaktoren gir størst avvik i forhold til de målt verdi (0.87 m/s) med 0.72 m/s tilsvarende -82.9% avvik mens kombinasjonen av nedre hastighetsgrense på 0.1 m/s og R = 0.5 gav resultater tettest opptil målte (0.48 m/s tilsvarende et avvik på 0.39 m/s eller -45.2%).

Tabell 4.5: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004 ved endring i utstrekning av SA. Hastigheten for VY01R05 er den samme som i tabell 4.4 (uten endringer i utstrekning) og er valgt som grunnlag for videre analyse av hvilken påvirkning valgte parametere har.

Navn	VY01R05	VY01R05_64	VY01R05_64161616
VY [m/s]	0.48	0.50	0.49
Avvik [m/s]	0.39	0.37	0.38
Avvik [%]	-45.2	-42.8	-44.1

Sammenlignet med («VY01R05») (avvik på 0.39 m/s, -45.2 %) ga endring i utstrekning av SA (tabell 4.2) tilnærmet ingen reduksjon i avvik, både for endring i strømningsretningen fra 32 til 64 piksler (0.37 m/s, -42.8 %) og ved endring av alle retninger (0.38 m/s, -44.1 %).

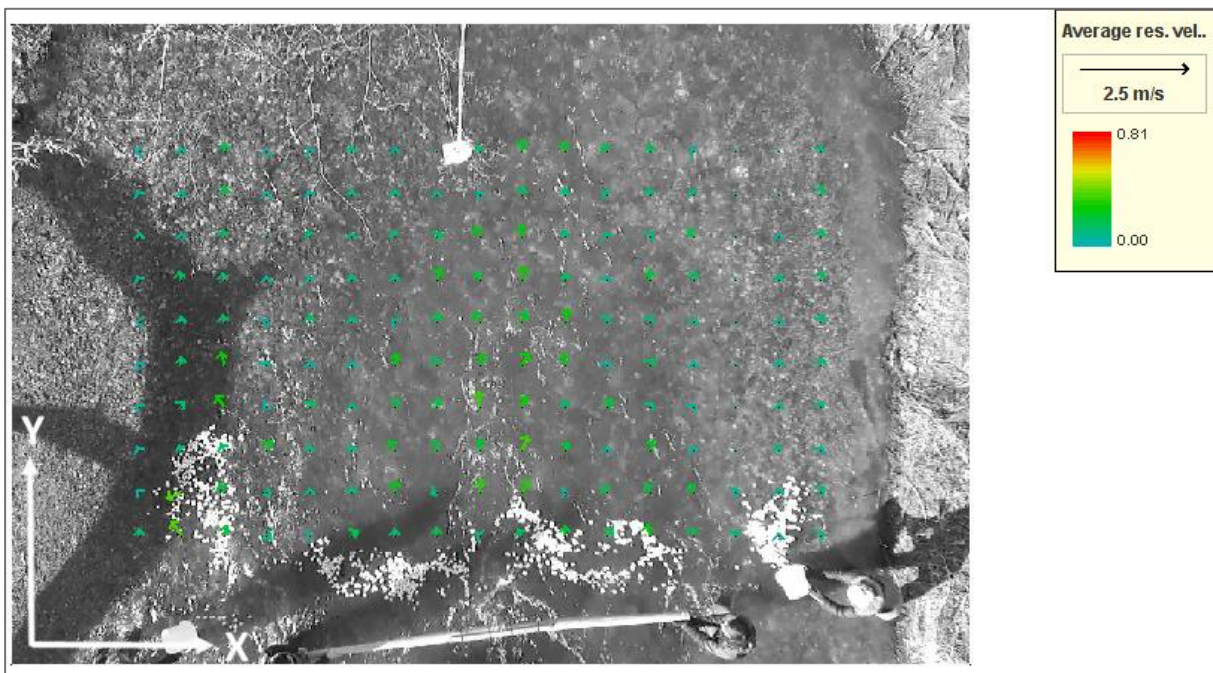
Tilsvarende som for lokalitet 0003, ble det testet for en utvalgt bildesekvens hvor markørene kun passerte målingspunktet (tabell 4.6) for testene i tabell 4.5.

Tabell 4.6: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004 ved endring av bildesekvens. I bildesekvensen for «(MA)», er kun bilder hvor markørene passerer målingspunktet er brukt i beregningen.

Navn	VY01R05(MA)	VY01R05_64(MA)	VY01R05_64161616(MA)
VY [m/s]	0.48	0.50	0.49
Avvik [m/s]	0.39	0.37	0.38
Avvik [%]	-45.2	-42.8	-44.1

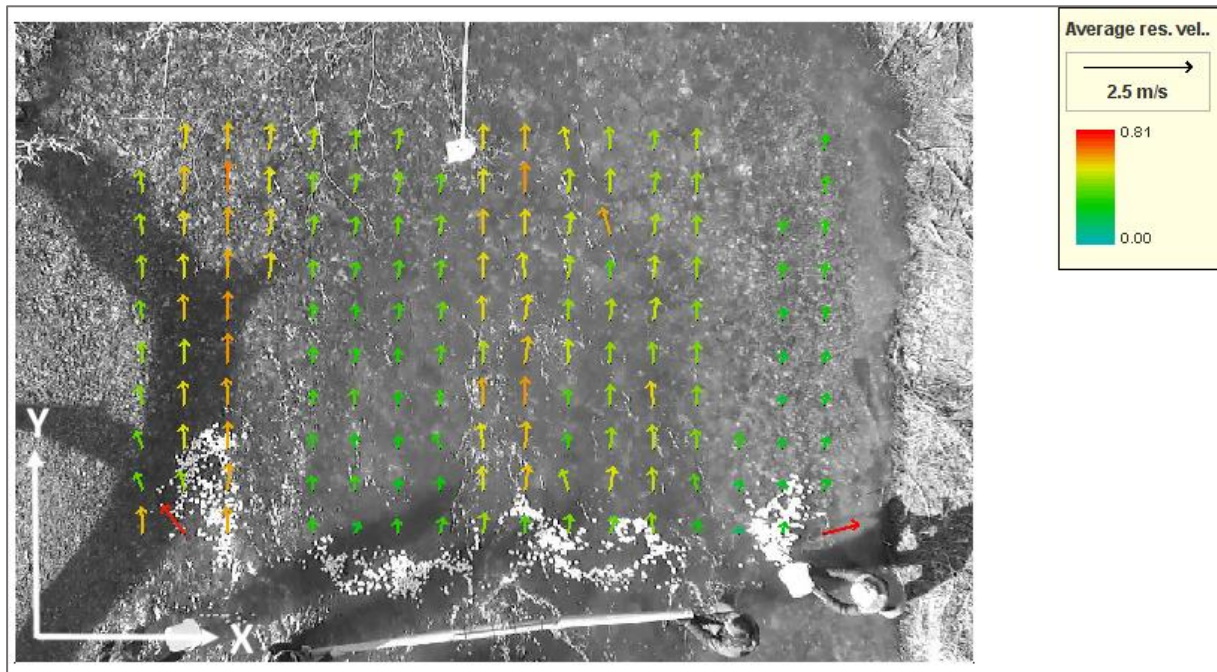
De faktiske verdiene varierte fra 0.48 til 0.50 m/s (målt verdi: 0.87 m/s). Testen viste for denne lokaliteten at utvelging av bildesekvens kun hvor markørene passerte målepunktet ikke ga noen endring i beregnede hastigheter.

Gjennomsnittlige hastighetsfelt for («REF») (figur 4.3) med standardverdier for grensebetingelsene viser små hastighetsvektorer over hele feltet. Største vektoren er på 0.37 m/s, godt under målt hastighet.



Figur 4.3: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «REF» (lokalitet 0004)

Vektorene i hastighetsfeltet for («VY01R05») (figur 4.4) har tydelig utstrekning (gul/oransje/grønn) og viser tydelig endring fra («REF») (figur 4.3). Det er noen korte vektorer (høyre del av gridet) og noen vektorer er fjernet (grensebetingelser). Største hastighet er 0.81 m/s og ligger under målt verdi (0.87 m/s).



Figur 4.4: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «VY01R05» (lokalitet 0004)

Ved endring av tidssteg og størrelse på IA fra 0.12 sekunder og 32 piksler til 0.08 sekunder og 16 piksler (tabell 4.7), ble avvikene for lokalitet 0004 redusert noe. Med nedre grense for hastigheten på 0.1 m/s og $R = 0.5$ gikk avviket fra -45.2 til -49.5, mens for nedre hastighetsgrense på 0.1 m/s, $R = 0.5$ og utstrekningen av SA (S_{ip} , S_{jp} , S_{im} , S_{jm}) endret fra 32 piksler i alle retninger til 64 piksler i strømningsretningen er avviket redusert til -30.7 %.

Tabell 4.7: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004 med endring av SA Hastighetsanalysen har blitt gjort for $\Delta t = 0.08$ sek og IA = 16 piksler.

Navn	VY01R05	VY01R05_32	VY01R05_32888
VY [m/s]	0.44	0.60	0.54
Avvik [m/s]	0.43	0.27	0.33
Avvik [%]	-49.5	-30.7	-37.9

4.3 Lokalitet 0009

Tilsvarende som for lokalitet 0003 og 0004, passerte markørene gjennom hele gridet for testene (tabell 4.8 og 4.9) for lokalitet 0009. Andre kolonne («Måling») i tabellen viser til referansemålingen utført med strømningsmåler. Tredje kolonne («REF») er referanseberegningen med standardverdier for grenseverdiene. Kolonne fire til syv har endringer i grenseverdier for hastighetsvektoren og korrelasjonsfaktoren. For endring i nedre verdi for hastighetskomponenten er utstrekningen (M) av hastighetsvektoren satt til samme verdi og tilsvarende for endring i øvre verdi. For hver test er avviket fra målingen beregnet i både eksakte verdier (m/s) og prosent.

Tabell 4.8: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0009. REF = ingen endring i grenseverdier (satt til standardverdi, tabell 3.4), VX01 = nedre grense for $V_x = M_{nedre} = 0.1$ m/s, R05 = nedre grense på 0.5 for R, VX01R05 = kombinasjon av grensebetingelsene for VY01 og R05 og VY01099R05 = kombinasjon av grensebetingelsene til VX01R05 med en øvre grense for $V_x = 0.99$ m/s.

Navn	Måling	REF	VX01	R05	VX01R05	VX01099R05
VX [m/s]	0.98	0.23	0.72	0.21	0.70	0.76
Avvik [m/s]	-	0.75	0.26	0.77	0.28	0.22
Avvik [%]	-	-76.6	-26.3	-78.8	-28.6	-22.1

Hastighetsanalysen av bildemateriale fra lokalitet 0009 (tabell 4.8) viser at bruk av standardverdier for utstrekning, hastighetskomponentene og korrelasjonsfaktoren gir størst avvik i forhold til de målt verdi (0.98 m/s) med 0.75 m/s tilsvarende -76.6% avvik mens kombinasjonen av nedre hastighetsgrense på 0.1 m/s og R = 0.5 gav resultater på 0.70 m/s tilsvarende et avvik på 0.28 m/s eller -28.6%.

Tabell 4.9: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0009 med endring i utstrekning av SA. Hastigheten for VY01R05 er den samme som i tabell 4.8 (uten endringer i utstrekning) og er valgt som grunnlag for videre analyse av hvilken påvirkning valgte parametere har.

Navn	VX01R05	VX01R05_64	VX01R05_64161616
VX [m/s]	0.70	0.75	0.69
Avvik [m/s]	0.28	0.22	0.29
Avvik [%]	-28.6	-22.1	-29.1

Sammenlignet med («VY01R05») (avvik på 0.28 m/s, -28.6 %) ga endring i utstrekning av SA (tabell 4.2) en noe reduksjon i avvik for endring i strømningsretningen fra 32 til 64 piksler (0.22

m/s, -22.1 %), mens ved endring av alle retninger (0.29 m/s, -29.1 %) økte avviket med 0.01 m/s.

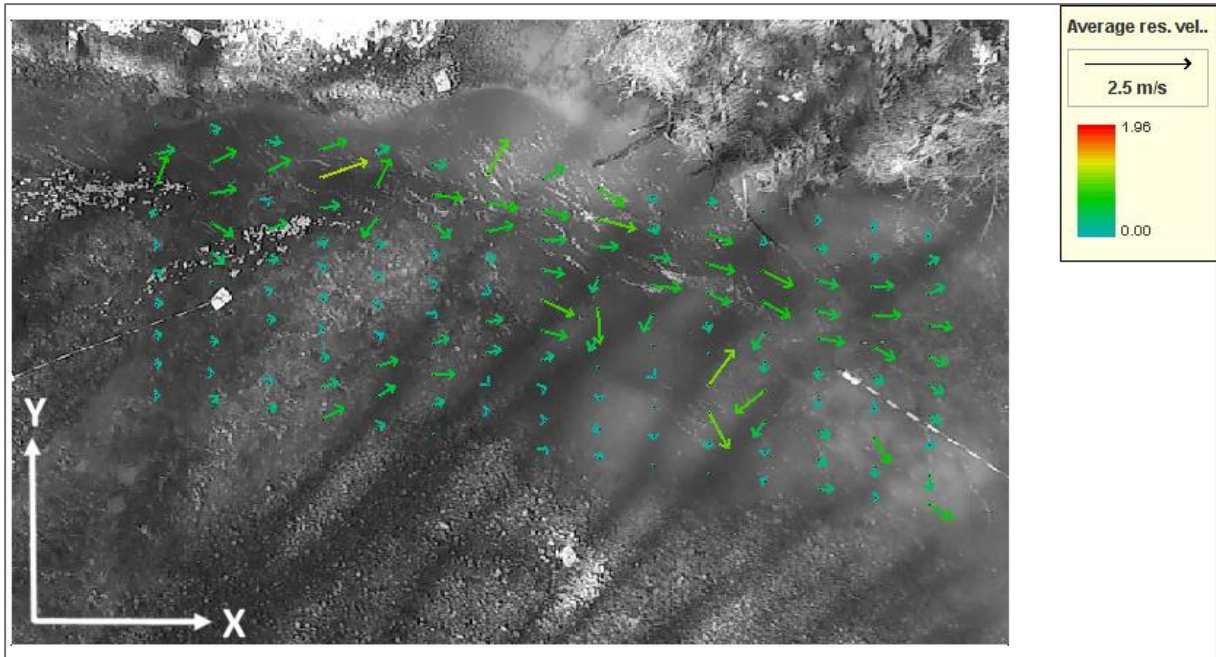
Også for lokalitet 0009 ble analysen utført ved redusert antall bilder hvor kun markørene passerte målingspunktet (tabell 4.10).

Tabell 4.10: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0009 med endring i bildesekvens. I bildesekvensen for «(MA)», er kun bilder hvor markørene passerer målingspunktet er brukt i beregningen.

Navn	VX01R05(M)	VX01R05_64(M)	VX01R05_64161616(M)
VX [m/s]	0.85	0.74	0.70
Avvik [m/s]	0.13	0.24	0.28
Avvik [%]	-13.4	-24.6	-28.7

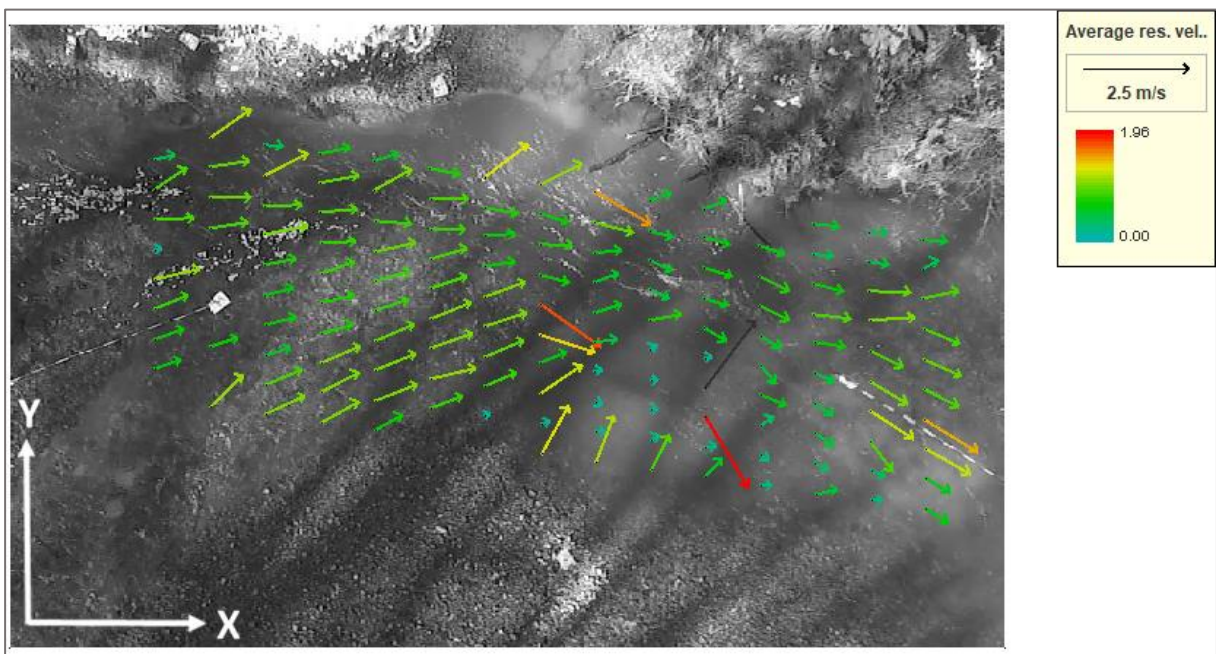
De faktiske verdiene varierte fra 0.70 til 0.85 m/s (målt verdi: 0.98 m/s). Denne testen viste at utvelging av bildesekvens kun hvor markørene passerte målepunktet gav størst (0.28 m/s = -28.7 % tilsvarende -29.1 % for alle bildene) og minst avvik (0.13 m/s = -13.4 % tilsvarende -28.6 % for alle bildene).

Gjennomsnittlige hastighetsfelt for («REF») (figur 4.5) med standardverdier for grensebetingelsene viser et noe mer representativt resultat for («REF») sammenlignet med vektorfeltene for lokalitet 0003 og 0004. Noen små hastighetsvektorer i deler av feltet, men klare tendenser hvor hastigheten er stor eller hvor vannet står tilnærmet stille. Den største vektoren er på 1.14 m/s, litt over målt hastighet (0.98 m/s).



Figur 4.5: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «REF» (lokaltet 0009)

Vektorene i hastighetsfeltet for («VX01R05») (figur 4.6) har tydelig utstrekning (grønn) og viser tydelig endring fra («REF») (figur 4.5). Vektorfeltet representerer strømmingen i feltet godt med få vektorer som avviker (støy). Det er noen korte vektorer (nedre del av gridet) hvor hastigheter er lav. Største hastighet er 1.96 m/s.



Figur 4.6: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet for «VX01R05» (lokaltet 0009)

For tidssteg og IA på henholdsvis 0.08 sekunder og 16 piksler (tabell 4.11), ble avvikene for lokalitet 0009 redusert betydelig. For nedre hastighetsgrense på 0.1 m/s, $R = 0.5$ og utstrekningen av SA (S_{ip} , S_{jp} , S_{im} , S_{jm}) endret fra 16 til 32 piksler i strømningsretningen ble avviket redusert til -11.8 %.

Tabell 4.11: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0009 med endring av SA. Hastighetsanalysen har blitt gjort for $\Delta t = 0.08$ sek og $IA = 16$ piksler.

Navn	VX01R05	VX01R05_32	VX01R05_32888
VX [m/s]	0.70	0.86	0.73
Avvik [m/s]	0.28	0.22	0.25
Avvik [%]	-28.1	-11.8	-25.7

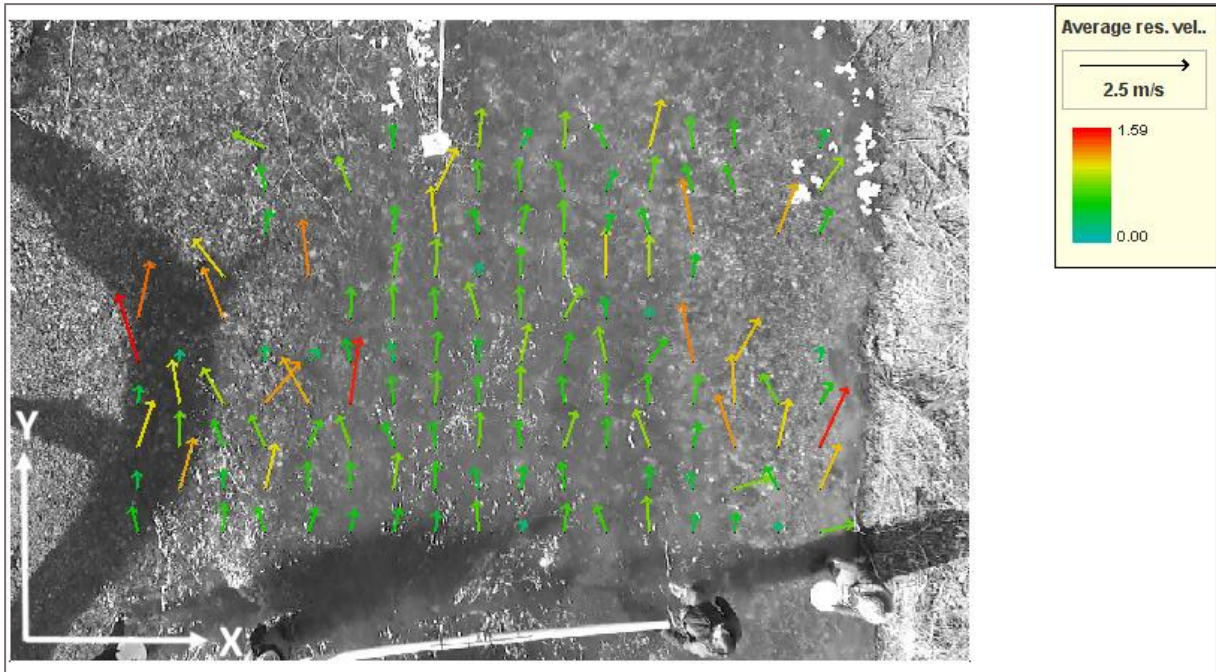
4.4 Lokalitet 0004 ved turbulens

For lokalitet 0004 var strukturelle mønstre på grunn av turbulens synlig og ble testet for $\Delta t = 0.08$ sekunder og $IA = 16$ piksler. Resultatet fra analysen er vist i tabell 4.12. Hastigheten med nedre grense for hastighetskomponenten 0.1 m/s og $R = 0.5$ på 0.40 m/s har et avvik fra målt verdi (0.87 m/s) på 0.47 m/s eller -54.5 % sammenlignet med tilsvarende verdi på -45.2 % for analyse med markører. Ved endring i utstrekningen av SA i strømningsretningen (S_{ip}) fra 16 til 32 piksler reduserte avviket til -20.7 % (0.18 m/s).

Tabell 4.12: Resultat fra hastighetsanalyse for video 0004 ved turbulens uten kunstige markører.

Navn	VY01R05	VY01R05_32	VY01R05_32888
VY [m/s]	0.40	0.69	0.63
Avvik [m/s]	0.47	0.18	0.24
Avvik [%]	-54.5	-20.7	-27.0

Det gjennomsnittlige hastighetsfeltet for («VY01R05») (figur 4.7) viser vektorer med tydelig utstrekning ved analyse av strukturelle mønstre på vannoverflaten og vektorene har en jevn fordeling (grønne) over hele tverrsnittet med kun små områder hvor hastigheten ikke har blitt beregnet. Det er noe støy i form av lengre vektorer som går tydelig på tvers av strømningsretningen. Høyeste hastighet er på 1.59 m/s.



Figur 4.7: Vektorfelt for gjennomsnittlig hastighet «VY01R05» ved kun synlige strukturer grunnet turbulens

5 Diskusjon

I diskusjonsdelen av oppgaven diskuteres sensitivitetsanalysen (kapittel 3) og hastighetsberegningene (kapittel 4). For hastighetsberegningen vurderes kvaliteten av resultatene ved sammenligning av beregnede hastigheter mot målinger gjort med strømningsmåler og akustisk dopplerinstrument (ADCP). Metodikken (LSPIV) diskuteres med hensyn til egnethet og brukervennlighet basert på egne erfaringer og tidligere studier, samt en diskusjon rundt hvilke hensyn som må tas ved bruk av LSPIV og fordeler og ulemper med metoden og programvaren.

5.1 Hastighetsberegning

I *sensitivitetsanalysen* ble forholdet mellom Δt og IA vurdert mot fordelingen av korrelasjonsfaktoren R. Resultatene (figur 3.3-3.8) viser at kortere tidssteg og mindre IA gir en bedre fordeling av R, noe som betyr at i dette tilfellet bør man velge lite IA med tilhørende kort tidssteg, selv om større IA kan gi et mer robust resultat (resultatet påvirkes mindre ved endringer i parametre og/eller bildemateriale i analysen) (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013). Den visuelle vurderingen i sensitivitetsanalysen (vedlegg A) viser at mindre IA gav mer støy, altså et mer ujevnt vektorfelt med vektorer som går i alle retninger. Årsaken til denne støyen kan være at programmet kun detekterer at markøren er tilstede i området og får et utslag representert ved en intensitetstopp, mens selve forflytningen ikke detekteres når IA ikke er stort nok. Potensielt skyldes den høye andelen R ved lite IA at markørene fyller IA fullstendig og gir en høy verdi for intensitetstoppen som samsvarer med en høy verdi for R. Man kan dessuten tenke seg at vektoren blir et resultat av vilkårlig valg av forflytning når markøren helt eller delvis fyller IA, og at vektorene derfor får mer vilkårlige retninger, noe som fører til økt støy. Ikke bare fordeling av R, men også beregningsresultatet påvirkes i stor grad av valg av Δt og IA. Dessuten tydeliggjør resultatene at hvert enkelt datasett må vurderes uavhengig da ikke ett parametersett er riktig for alle tilfeller.

De *beregnete hastighetene* fra LSPIV sammenlignet med målinger gjort med ADCP og strømningsmåler er vist i tabell 4.1-4.12. For lokalitet 0003 ble det oppnådd et avvik på 20.8 % fra målt verdi når V_y og M_{nedre} var satt til 0.1 m/s og en nedre grense for R på 0.5. Endring av utstrekning av SA i strømningsretningen førte til at avviket ble redusert til 8.6 %. Ved å korte ned utstrekningen av SA i de andre retningene ble avviket redusert noe ytterligere. Ved slik endring kreves en nøyere vurdering av strømmen og det er større risiko for å få påvirke resultatet i feil retning. Ved bruk av kun bilder hvor markørene passerte punktet for måling ble avviket

noe ytterligere redusert (-6.2 %). Sammenlignet med resultater fra tidligere studier som rapporterer avvik på opptil 10 % for målinger i felt i forhold til ADCP-målinger (Muste *et al.*, 2004a), kan avviket for lokalitet 0003 vurderes som bra når $\Delta t = 0.12$ sek og IA = 32 piksler brukes. For lokalitet 0004 er avviket oppe i størrelsesorden 40 %, som kan skyldes at forholdet mellom tidssteget og IA ikke er tilsvarende bra som når benyttet for lokalitet 0003. Dette bygger opp under at hvert bildesett må vurderes individuelt. Ved å benytte 0.08 sekunder og 16 piksler ble avviket redusert noe, til rundt 30 % (tabell 4.7). En mulig løsning for å redusere avviket til en mer ønskelig størrelse er å endre kun IA i forhold til tidssteget. Resultatene for lokalitet 0009 var bedre enn for lokalitet 0004 med avvik i størrelsesorden 30-10 %. Også for lokalitet 0009 ble det testet for $\Delta t = 0.08$ sek og IA = 16 piksler, men resultatene viste avvik tilsvarende de for $\Delta t = 0.12$ sek og IA = 32 piksler. Sammenlignes avvikene for alle tre lokaliteter, ser man at resultatene for lokalitet 0003 er klart best. Den sannsynlige grunnen til dette er at markørene er jevnere, fordelt opptrer en og en, mens de var mer samlet for lokalitet 0004 og 0009.

Resultatene viser også (tabell 4.2, 4.5 og 4.9) at endring i SA, da spesielt i hovedretningen til strømmen, har stor betydning for resultatet av hastighetsanalysen. For både video 0003 og 0004 er strømmen uten retningsendring av betydning, hovedretningen for strømmen er i positiv y-retning. Endring i SA (Sip/Sjp/Sim/Sjm) vil her være enklere siden endringene kan gjøres symmetrisk i tverrgående retning. For video 0009 er hovedretningen i positiv x-retning, men strømmen skifter noe i y-retningen, fra positiv til negativ. Om gridet er plassert slik at begge endringene er representert, kan det være mer komplisert å endre tverrgående retning i SA og plassering av grid for å unngå retningsendringen kan derfor være lurt for å unngå påvirkning av beregningen.

Noe reduksjon i avviket ble i tillegg oppnådd når kun bildeparene hvor markørene passerte målingspunktet ble anvendt i analysen. Ved vurdering av opprinnelig datasett (bildene hvor markørene passerte hele gridet og ikke bare målingspunktet) ser man at det er lurt å velge ut kun bilder hvor markørene passerer målingspunktet for å unngå lavere verdier pga. ingen deteksjon og på den måten få best mulig resultat før postprosessering med grenseverdier.

Generelt kan man konkludere med at de beregnede hastighetsverdiene (tabell 4.1-4.12) er gode sammenlignet med verdier fra tidligere studier ((Muste, Fujita og Hauet, 2008) og referanser i denne) basert på avvik fra referansemålingen når enkle endringer i grenseverdier gjøres. Ved å endre bildesekvensen for beregningen endres verdiene ytterligere. Hvorvidt endringen er positiv, varierer for lokalitetene. Parametere som turbulens og størrelsen av forholdet IA/SA, innvirker dessuten på resultatet og må vurderes grundig både i forkant og underveis i analysen.

Resultatene fra testing av bildemateriale uten markører viser at naturlige markører også kan benyttes. Hastighetsverdier for lokalitet 0004 viste at resultatet for valgte parametersett ga mindre avvik ved beregning basert på kun synlig mønstre på vannoverflaten (tabell 4.11). Resultatet bygger opp under metodens egnethet ved ekstrem vannføring ved flom. Metoden er ikke testet for ekstrem vannføring i denne omgang, men tidligere studier har vist at metoden både er godt egnet og potensielt eneste mulige metode for hastighetsmåling (Muste, Fujita og Hauet, 2008). Turbulens vil også påvirke resultatet når kunstige markører er tilstede i bildedataene. Dette ble ikke testet i denne oppgaven, men basert på visuell vurdering av bildematerialet fra lokalitet 0004 (det gule området markert i figur 3.14) er det sannsynlig at turbulens fører til mer støy i de øyeblikkelige vektorfeltene.

5.2 Large-scale Particle Image Velocimetry

Large-scale Particle Image Velocimetry har, sammenlignet med konvensjonelle metoder som akustisk dopplerinstrument (ADCP), både fordeler og ulemper. Metoden er allsidig med tanke på bruksområde, både når det gjelder elvas utforming og vannføringsnivå (kapittel 5.2.1). Med hensyn til programvare er noen program bedre egnet enn andre, og det er en stor fordel om man kan unngå unødvendig prosessering av data før hastighetsanalysen, da dette er krevende både tidsmessig og med hensyn til mengden teori man må sette seg inn i ved bruk av metoden. Preprosessering av bildemateriale er diskutert i kapittel 5.2.3.

5.2.1 Bruksområder

En fordel med LSPIV er at metoden kan brukes ved ekstreme vannføringer (lave og høye). Ved lave vannstander vil det være vanskelig å gjøre målinger med ADCP på grunn av at måleinstrumentet ikke gir stort nok spillerom (vannivået er for lavt til å gjøre målinger). Ved lav vannstand vil LSPIV klare å gjøre beregninger gitt at vannføringen er stor nok til at markørene flyter.

For høye vannføringer er det problematisk og potensielt farlig dersom operatøren må ut i elva for å gjøre målingene. LSPIV er bedre egnet for slike situasjoner med hensyn på sikkerhet og gjennomførbarhet. Måling av ekstrem vannføring ved flom vil ikke være forsvarlig med ADCP, men fullt gjennomførbart ved LSPIV. Operatøren kan gjennomføre målingene uten å være i kontakt med elva (Muste, Fujita og Hauet, 2008).

En fordel med ADCP kontra LSPIV er at ADCP enkelt gjør det mulig å måle hastigheten for hele tverrsnittet, forutsatt at omstendighetene tillater det. Dersom ADCP er festet til en båt vil det imidlertid være problematisk om elveløpet er kupert med store steiner. Det vil også

potensielt være vanskelig å komme til langs elvekanten om vannstanden er lav (Muste, Fujita og Hauet, 2008). Gitt en god plassering av markørene vil LSPIV-metodikken være like godt og potensielt bedre egnet for «måling» av vannhastigheten for slike tilfeller. LSPIV er også godt egnet til målinger for lokaliteter som er vanskelige å nå eller utilgjengelige. Utstyret er enkelt å frakte med seg og lett å håndtere. Gitt at er mulig å slippe ut markører i elva om nødvendig, kan operatøren fly dronen til ønsket sted innen dronens rekkevidde. Markørutslippet kan være utfordrende, og som vist i kapittel 3.1 og videre diskutert nedenfor, er en fordel å være flere under feltarbeid for å sikre at markørene blir jevnt fordelt.

5.2.2 Feltarbeid og bruk av markører

Resultatet av hastighetsberegninger utført ved bruk av LSPIV er avhengig av kvaliteten på bildematerialet som analyseres. Under feltarbeid (kapittel 3.2) ble det gjort erfaringer rundt hvilke valg som må tas før og under innsamling av bildemateriale for å få et godt resultat. Et av de viktigste punktene er knyttet til markører, hvor to hovedhensyn må tas: 1) valg av markørenes materiale, størrelse, farge og kontrast i forhold til omgivelsene og 2) fordeling av markørene i elveløpet.

Det er ønskelig å bruke naturlige markører som flytende rusk, eller skum og bobler som produkt av turbulens i vannet (Muste, Fujita og Hauet, 2008). Om naturlige markører er tilstede, kreves det mindre forarbeid og metoden har ingen negativ påvirkning på naturen. Når dette ikke er tilfelle, må det benyttes kunstige markører. Det første man da må ta hensyn til er at materialet som brukes er biologisk nedbrytbart slik at markørene ikke påvirker omgivelsene eller blir liggende for lenge i vannet, både for å unngå skadevirkninger på naturen og av estetiske hensyn. Man ønsker heller ikke markører som man må samle inn etter forsøk, eller som gir skade på naturen på grunn av materialvalg. Av disse årsaker vil markører av for eksempel plast være et dårlig valg. Materialer som derimot oppfyller kravene, og tidligere har blitt benyttet, er stearinlys (Sukhodolov et al., 2007), riskaker (Takehara et al., 2002), økologisk skum (Jodeau et al., 2008), treflis (Detert og Weitbrecht, 2014) og økologisk nedbrytbare fluoriserende partikler (Tauro, 2016). I feltarbeidet knyttet til denne oppgaven ble det benyttet nedbrytbare puffede maismarkører som løste seg opp til skum. Disse var godt synlige, fløt lett oppå vannoverflaten, og ga et representativt strømningsmønster uten å påvirke strømmingen. Siden analysen av markørenes forflytning baserer seg på fordeling av lysintensitet bør markørene ha størst mulig kontrast til bakgrunnen (vannoverflaten eller elvebunnen om den er synlig gjennom vannet), for at programmet skal klare å detektere markørene enklere (Muste, Fujita og Hauet, 2008). Bildene som analyseres forekommer i PGM-format som er i svart-hvitt og markørene

bør derfor være lysere heller enn mørke. Når bildemateriale vurderes er det viktig at størrelsen på markørene legges til grunn for valg av størrelse på IA. Det er ikke hensiktsmessig å ha for lite IA, da risikerer man at markørene (enkeltmarkører eller samlinger) fyller hele IA og fører til et mer vilkårlig resultat.

Det andre hensynet var å få distribuert markørene jevnt i tverrsnittprofilen under innsamling av bildemateriale. For hvert punkt i gridet beregnes en hastighetsvektor basert på prosessen beskrevet i kapittel 2.3.2. Hvis det for et punkt i gridet ikke passerer markører, vil programmet ikke detektere noen forflytning i punktet og vektoren vil settes lik null (figur 3.14). Nullvektorer fjernes ved å sette en nedre grense for hastigheten og er et viktig steg i postprosesseringen av de øyeblikkelige råe hastighetsdataene. Også hastigheter som er lavere eller høyere enn faktisk hastighet, og som for eksempel kan skyldes detektering av turbulens og/eller gjenskinn i vannet, fjernes ved grensebetingelser i programmet. Det kan være utfordrende å sette en øvre grense for hastigheten, og man må passe på at den ikke settes for lav da det påvirker resultatet. For analysen i kapittel 3.2.3 ble det testet for en øvre grense på 0.99 m/s for lokalitet 0004 med innmålt hastighet på 0.87 m/s. Denne grensen ble også brukt for lokalitet 0003 og 0009, men var ikke individuelt valgt basert på innmålte hastigheter for disse lokalitetene (målte verdier: 1.01 og 0.98 m/s). Det ble valgt å ikke endre denne grensen da det ble vurdert at bruk av en øvre grense krever mer presis vurdering av den egentlige hastigheten enn kun en nedre grense. Om grenseverdien velges for liten, vil grunnlaget for hastighetsberegningen bli dårlig da det fører til utelatelse av verdier som ligger i det faktiske hastighetsområdet. Det ble derfor her valgt å fortsette med kun en nedre begrensning for hastighetskomponentene. Det er ønskelig å oppnå en homogen fordeling av markører i tverrsnittet for et jevnere resultat, men vektorer som ikke er representative vil sannsynligvis opptre og må fjernes fra beregningen.

Det er ikke nødvendig at distribusjonen av markører ligger på en linje jevnt over tverrsnittet. Feltarbeidet viste også at det er vanskelig å oppnå både pga. at det er forskjellige hastigheter i tverrsnittet og med hensyn på faktisk utførelse. Analysene i etterkant illustrerte at det viktigste er at markører passerer gjennom hele tverrsnittet slik at alle punktene i gridet er dekket. Ved feltarbeidet er det derfor hensiktsmessig å studere strømningsmønstre og omgivelsene rundt elva for å optimalisere utleggingen av markørene. Har elva en dominant strømningsretning vil markørene samles på ett sted. For å få et representativt hastighetsfelt er det best å slippe markører ut flere steder, slik som vist under feltarbeidet i Schiffmühle (figur 3.2). Feltarbeidet viste også at det kan være hensiktsmessig å foreta en testkjøring eller dele opp elva i flere

seksjoner slik at resultatene blir best mulig. En annen mulighet er å fly dronen langs strekningen mens markørene forflytter seg, men da kreves mer preprosessering av bildedataene før de kan prosesseres i programvaren. Dette var en avgjørende faktor for at bildemateriale fra feltarbeidet ikke ble brukt ved hastighetsberegningen i denne oppgaven. Plasseringen av gridet i bildematerialet bør være litt nedstrøms slippstedet for markørene slik at de får fordelt seg i tverrsnittet.

5.2.3 Preprosessering

Bildemateriale til beregning av hastigheter er følsomt for forholdene under innsamling. Værforhold som vind, sol eller skyer påvirker bildematerialet med hensyn på kvaliteten og kan føre til at preprosessering av bildene blir nødvendig. Om værforholdene ikke er gode for innsamling kan det være hensiktsmessig å utsette feltarbeidet til forholdene er mer passende. Preprosessering av bildemateriale er tidkrevende og det er en stor fordel å bruke programmer, som for eksempel Fudaa-LSPIV (Jodeau, Le Cos og Hauet, 2018), hvor dette ikke er nødvendig. I tillegg må man korrigere for andre forstyrrende elementer som gjenskinns/refleksjon og skygger. Det er også hensiktsmessig å unngå trær, fugler eller operatører/feltarbeidere i bildematerialet. Preprosessering kan i noen tilfeller unngås dersom forholdene under datainnsamling er gode og det er gjort godt forarbeid med posisjonering av dronen.

I tidlig fase av oppgaven ble PIVlab (Thielicke og Stamhuis, 2014), et annet program for beregning av hastighet, vurdert for testing av LSPIV. Fudaa-LSPIV kan benyttes uten større preprosessering av bildematerialet og takler små forskyvninger i bildet uten synlig påvirkning av resultatene. PIVlab ble testet for tilsvarende datasett som i Fudaa-LSPIV og viste seg, ut fra visuell vurdering av vektorfelt og størrelsen på beregnede verdier, å være for sensitivt til vårt bruksområde. I tillegg til forflytning av markørene detekterte PIVlab forskyvning av dronens orientering og posisjon i forhold til bakken, forårsaket av drift. For å korrigere for forskyvningen av posisjonen må bildematerialet preprosessere og først da kan PIVlab testes for egnethet til utregning av hastighet.

Et annet program som kan testes for vårt formål er PTVlab (Brevis, Niño og GH, 2011), et program som er basert på PIVlab. Mens PIVlab er basert på testing i lab med et fast oppsett og

middels tetthet¹⁵ (Raffel *et al.*, 2007) av markører, er PTVlab egnet for lav tetthet av markører som kan være bedre egnet for vår skala av markørbruk.

5.2.4 Large-scale Particle Image Velocimetry og akustisk dopplerinstrument

LSPIV er sammenlignet med ADCP noe mer subjektiv for måling av vannhastigheter. Ved valg av parametre er det ikke en eksakt fasit på riktig forhold mellom Δt og IA, størrelsen på SA eller bildeoppløsningen. Disse valgene, sammen med valg av grensebetingelser for korrelasjonsfaktoren og magnituden for hastighetskomponentene, må gjøres av utførende basert på teorien og ved skjønn. Valgene baserer seg på vurdering av bildematerialet hvor blant annet overflatehastigheten og markørtetthet definerer størrelsen på parameterne. For høye hastigheter vil Δt og størrelsen av IA være større enn for lave hastigheter. For store hastigheter må tidssteget være lite nok til at forflytningen blir detektert og tilsvarende stort for lave hastigheter (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013)/kapittel 3.2.2. Antall bilder som prosesseres er avhengige av bildefrekvensen og valgt tidssteg og fordelingen av markører i gridet. Man må finne en balansegang mellom hastighet, tidssteg, IA og antall bilder sammen med størrelsen av SA og rutenett individuelt for hver beregning.

Ved bruk av LSPIV må den som utfører beregningen, velge antall bilder, tidssteget, IA med mer basert på en subjektiv vurdering med grunnlag i teorien. Metoden krever god kjennskap til hvilke hensyn som må tas, valg som gjøres før og under feltarbeid påvirker i stor grad resultater av analysen. Postprosessering av beregningsdataene krever kunnskap om parametervalgene i programmet som også påvirker resultatene i stor grad. Sammenlignet med ADCP, som i tillegg til hastighetsmåling har den fordel at den måler dybde og vannføring direkte, er det mer krevende å utføre beregningen av hastigheter og det kreves mer kunnskap for å bruke drone og LSPIV. Til gjengjeld er metoden allsidig og tryggere med hensyn på vannføring i elva. Metoden kan også benyttes om lokaliteten er utilgjengelig ved at man for eksempel ikke kan komme ned i elva. Altså kan man konkludere med at UAV-basert metode for hastighetsmåling er god under gitte forhold, men at det ligger svakheter knyttet til værforhold og nærliggende objekter. Det er en allsidig metode med hensyn til lokalitet, vanskelig tilkomst og ekstreme forhold som flom.

¹⁵ Metoden for hastighetsberegning kan deles i tre nivåer basert på tettheten av markører, lav (Particle Tracer Velocimetry – PTV), middels (Particle Image Velocimetry – PIV) og høy (Laser Speckle Velocimetry).

6 Konklusjon og videre arbeid

I denne masteroppgaven har den bildebaserte metoden for hastighetsberegning, Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), blitt testet for vannhastighetsberegning for vassdrag. Programmet Fudaa-LSPIV har blitt benyttet for LSPIV-analysen av bildemateriale fra flere lokaliteter. Beregnede resultater er blitt sammenlignet med målinger tatt med strømningsmåler og nøyaktigheten av metoden har blitt vurdert. Egnethet og bruksområde er blitt vurdert basert på egne beregninger og resultater fra andre studier.

Nøkkelen til gode resultater ved bruk av bildebaserte hastighetsberegninger er valg av parameterne og gode valg forutsetter at den som utfører beregningene, kjenner til teorien bak beregningen og hvordan bildemateriale gir grunnlag for valg av parameterne. Det er ingen fasit for forholdet mellom parameterne og hvert datasett må vurderes individuelt. To hovedpunkter har spesielt påvirkning av kvaliteten av beregningene; feltarbeid med valg av markører og valg av parametre i PIV-analysen. Man kan si at metoden er subjektiv i den forstand at den som utfører analysen må vurdere bildemateriale før, under og etter analysen.

Resultatene i kapittel 4 viser at LSPIV-analysen kan, med gode valg av parametre, gi avvik for beregnet vannhastighet på under 10 % sammenlignet med verdier målt med konvensjonelle måleapparater. Selv om metoden kan kreve noe mer forarbeid, med hensyn til valg av markører og planlegging av selve feltarbeidet, viste feltarbeid og testing at hastighetsmålingene er av like høy kvalitet som målinger gjort med ADCP. LSPIV (og UAV-basert metode) har i tillegg flere fordeler med hensyn til brukervennlighet og et større anvendelsesområde. Metoden er spesielt egnet i ekstreme situasjoner som flom med høye vannføringer, eller ved lave vannføringer. Metoden er rimelig og kan benyttes for vanskelig tilgjengelige lokaliteter. LSPIV og UAV-basert metode er et godt verktøy for innsamling av data fra vassdrag til simulering av elvers oppførsel ved ulike vannføringer.

Videre arbeid

For videre arbeid anbefales det å teste metoden for flere elvetyper og ulike vannføringer. Spesielt bør den testes for høy vannføring ved flom. LSPIV kan om den har tilstrekkelig gode resultater, brukes ved ekstreme situasjoner hvor det til nå har vært vanskelig eller umulig å gjøre hastighetsmålinger. Ved flom vil målinger som gjøres i elva være farlig å utføre og her har LSPIV og drone et stort fortrinn ved at innhenting av data kan gjøres på sikker avstand til elva. For å vurdere egnetheten ved stor vannføring kan det gjennomføres forsøk hvor kjent

vannføring blir sluppet ut i en elv slik at turbulente forhold oppstår. Ved å kjenne til elvas geometri kan man beregne en gjennomsnittlig hastighet og vurdere resultatene opp mot denne.

Hastighetsberegningene fra LSPIV kan testes i numeriske simuleringer sammen med terrengmodellering med Structure-from-Motion og digital substratanalyse av bunnmateriale. Bruk av drone til andre vassdragstekniske formål kan også undersøkes for å utnytte potensialet til UAV-baserte metoder.

Tidligere studier har vist at LSPIV-metoden gir noe bedre resultater om man sammenligner beregnet vannføring istedenfor vannhastighet. Studiet til Muste *et al* (2008) ved måling av vannføring ga et avvik på 2 % for en liten elv og 5.6 % for en stor elv sammenlignet med målinger med ADCP, mens hastighetsmålinger har vist avvik på så mye som 10 % (Muste *et al.*, 2004a). Denne forskjellen i kvaliteten av resultatene skyldes det iboende romlige gjennomsnittet ved estimeringen av vannføring. I denne oppgaven er det kun overflatehastighet beregnet og videre arbeid kan teste metoden ved beregning av vannføring.

Det bør også testes grundigere for nøyaktigheten av hastighetsberegningen ved bruk av bildemateriale hvor naturlige markører som skum eller strukturelle mønster, er synlig og teste dette opp mot bildemateriale hvor kunstige markører er brukt. Det kan gjøres en vurdering og testes hvor mye skum eller mønster som må være synlig for å få et representativt resultat. Det kan testes for elvestrekninger som er turbulente ved normal vannføring som stryk. Naturlige markører er den ideelle løsningen både med tanke på miljøet, det økonomiske aspektet og at man slipper å legge ut markørene selv dersom det er vanskelig å få lagt dem ut tilstrekkelig. Det er en forutsetning at det må være tilstrekkelig mengder markører tilstede.

I Fudaa-LSPIV er det to metoder for ortorektifisering av bildemateriale. I denne oppgaven er skalering brukt ved å legge inn to punkter og en kjent avstand. Det andre alternativet er ortorektifisering hvor koordinater, minst seks stykk, markeres i ett bilde (Jodeau, Hauet og Le Cos, 2013). Noen interessante spørsmålsstillinger er:

- Kan denne metoden i tilfeller hvor videoen har blitt filmet med en vinkel ha en potensiell fordel ved å gi en mer nøyaktig skalering av materialet eller er dette neglisjerbart?
- Gir metoden også mindre avvik dersom dronen forflytter seg, både horisontalt og vertikalt når preprosessering skal unngås?
- Ved testing av ortorektifisering må man plassere ut GCP i tilstrekkelig antall og ta hensyn til hvordan disse plasseres i forhold til hverandre, men dersom området er lite

kan det være vanskelig å praktisere en tilstrekkelig distribusjon i bildet. Kan de to metodene for ortorektifisering benyttes til hvert sitt formål?

- Er det slik at om området som analyseres er en lang elv hvor dronen flyr høyt så kan GCP benyttes, mens om området er lite, eller man ønsker å filme fra bakken med stativ, er det mer egnet og enklere å benytte skalering ved en kjent lengde?

7 Referanser

- Adrian, R. J. (1991) Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), s. 261-304. doi: org/10.1146/annurev.fl.23.010191.001401
- Aya, S., Fujita, I. og Yagyu, M. (1995) Field-Observation of Flood in a River by Video Image Analysis, *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 39, s. 447-452. doi: 10.2208/prohe.39.447.
- Bradley, A. A. *et al.* (2002) Flow measurement in streams using video imagery, *Water Resources Research*, 38(12), s. 51-51-51-58. doi: 10.1029/2002WR001317.
- Brevis, W., Niño, Y. og GH, J. (2011) Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry, *Experiments in Fluids*, 50(1), s. 135-147. doi: 10.1007/s00348-010-0907-z.
- Chaudhry, M. H. (2008) *Basic Concepts Open-Channel Flow*. Boston, MA: Springer US, s. 86-117.
- Detert, M. og Weitbrecht, V. (2014) Helicopter-based surface PIV experiments at Thur River, i Schleiss, A. J., *et al.* (red.) *River Flow 2014*. London, England: Taylor & Francis Group, s. 2003-2008.
- Dick, Ø. B. (2018) *Fotogrammetri*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/fotogrammetri> (Hentet: 06.03 18).
- European Commission (2016) *The EU Water Framework Directive - integrated river basin management for Europe*. Tilgjengelig fra: http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html (Hentet: 28.08 2018).
- FIThydro (u.å.-a) *Introduction*. Tilgjengelig fra: <http://www.fithydro.eu/introduction/> (Hentet: 12.02 18).
- FIThydro (u.å.-b) *Schiffmühle*. Tilgjengelig fra: <http://www.fithydro.eu/schiffmuhle/> (Hentet: 12.02 18).
- Fujita, I., Muste, M. og Kruger, A. (1998) Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic applications, *Journal of Hydraulic Research*, 38(3), s. 397-414. doi: org/10.1080/00221689809498626.
- Gibbons, W. J. og Andrews, K. M. (2004) PIT Tagging: Simple Technology at Its Best, *BioScience*, 54(5), s. 447-454. doi: org/10.1641/0006-3568(2004)054[0447:PTSTAI]2.0.CO;2.
- Google (2018) *Schiffmühle*. Tilgjengelig fra: <https://www.google.no/maps/@63.4851324,18.0929409,3097m/data=!3m1!1e3?hl=en> (Hentet: 12.02 18).
- Hauet, A. *et al.* (2008) Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method, *Journal of Hydrological Engineering*, 13(2), s. 105-110. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699[2008]13:2(105).
- Haugstad, T. (2018a) *Oslo Universitetssykehus vil frakte blodprøver og livsviktig biologisk materiale med droner*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/oslo-universitetssykehus-vil-frakte-blodprover-og-livsviktig-biologisk-materiale-med-droner/441111> (Hentet: 20.08 2018).
- Haugstad, T. (2018b) *Dette prøveprosjektet kan bety enormt mye for dyr inspeksjon av kraftlinjer*. Tilgjengelig fra: https://www.tu.no/artikler/dette-proveprosjektet-kan-bety-enormt-mye-for-dyr-inspeksjon-av-kraftlinjer/433135?utm_source=newsletter-2018-04-05&utm_medium=email&utm_campaign=newsletter (Hentet: 24.04 2018).
- James, M. R. og Robson, S. (2012) Straightforward Reconstruction of 3D Surfaces and Topography with a Camera: Accuracy and Geoscience Application, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117, s. 1-17. doi: 10.1029/2011JF002289.

- Jodeau, M. *et al.* (2008) Application and Evaluation of LSPIV Technique for the Monitoring of River Surface Velocities in High Flow Conditions, *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2), s. 117-127. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.004.
- Jodeau, M., Hauet, A. og Le Cos, J. (2013) *FUDAA-LSPIV 1.3.2 User guide*. Tilgjengelig fra: <https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/files> (Hentet: 05.03 18).
- Jodeau, M., Le Cos, J. og Hauet, A. (2018) *Fudaa-LSPIV (1.6.2. utg.)*. Tilgjengelig fra: <https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/files>.
- Kjensmo, J. (2015) *Batymeter*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/batymeter> (Hentet: 06.03 18).
- Klingenberg, M. (2018) *Denne dronen løfter 200 kilo - vasker og fjerner is fra vindturbiner*. Tilgjengelig fra: https://www.tu.no/artikler/denne-dronen-lofter-200-kilo-vasker-og-fjerner-is-fra-vindturbiner/433528?utm_source=newsletter-2018-04-03&utm_medium=email&utm_campaign=newsletter (Hentet: 24.04 2018).
- Kraabøl, M., Gregersen, F. og Kiplesund, G. H. (2016) *Restaurering av gyteområde for storørret ved Harpe bru i Gudbrandsdalslågen. Situasjonsbeskrivelse og forslag til restaureringsplan*. (NINA Rapport 1224). BRAGE: Norsk institutt for naturforskning. Tilgjengelig fra: <http://hdl.handle.net/11250/2375904> (Hentet: 14.08.2018).
- Lied, F. (2018) *Telemetri*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/telemetri> (Hentet: 11.08 2018).
- Longley, P. A. *et al.* (2005) *Geographical Information Systems and Science*. 2nd. utg. New York: Wiley.
- Lükö, G., Rüther, N. og Baranya, S. (u.å.) UAV Based Hydromorphological Mapping of a River Reach to Improve Hydrodynamic Numerical Models, i universitet, N. t. n. og Union, E. G. (red.).
- Muste, M., Xiong, Z. og Kruger, A. (1999) *Error estimation in PIV applied to large-scale flows*. Upublisert paper presentert på 3rd International Workshop on Particle Image Velocimetry. Univ. of Calif., Santa Barbara, Calif.
- Muste, M. *et al.* (2004a) Validation and Extension of Image Velocimetry Capabilities for Flow Diagnostics in Hydraulic Modeling, *Journal of hydraulic engineering*, 130(3), s. 175-185. doi: 10.1061/~ASCE!0733-9429~2004!130:3~175!
- Muste, M. *et al.* (2004b) Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II: Fixed-vessel measurements, *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(1), s. 17-28. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2003.09.002.
- Muste, M., Fujita, I. og Hauet, A. (2008) Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, *Water Resources Research*, 44(4). doi: org/10.1029/2008WR006950.
- NGU (2015) *Terrestrisk laserskanning*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/terrestrisk-laserskanning> (Hentet: 22.05 2018).
- NVE (2015) *Målinger og metoder*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/hydrologi/vannstand-ogvannfoering/maalinger-og-metoder/> (Hentet: 05.07 17).
- Raffel, M. *et al.* (2007) *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer. Tilgjengelig fra: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72308-0>.
- Ramsdal, R. (2017) *Skal teste drone på ordinær postrute*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/skal-teste-drone-pa-ordinaer-postrute/367412> (Hentet: 20.08 2018).
- Rantz, S. E. (1982) *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*. (2175): U.S. Geological Survey Water-Supply paper. Tilgjengelig fra: https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2175/pdf/WSP2175_vol1a.pdf (Hentet: 10.05.2018).
- Shintani, C. og Fonstad, M. A. (2017) Comparing remote-sensing techniques collecting bathymetric data from a gravel-bed river, *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), s. 2883-2902. doi: 10.1080/01431161.2017.1280636

- Skoglund, H. *et al.* (2016) *Fiskebiologiske undersøkelser i Årøyelva - årsrapport for 2016*. (294). uni.no: Uni Research Miljø. Tilgjengelig fra: uni.no/media/manual_upload/LFI_294.pdf (Hentet: 28.05.2018).
- SNL, S. n. l. (2009) *Grensebetingelse*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/grensebetingelse> (Hentet: 22.05 2018).
- Stranzl, S. *et al.* (2017) *Kanalisert strekning i Audna; bonitering og drivtelling av gytefisk som grunnlag for restaureringstiltak*. (Laboratorium for ferskvannøkologi og innnlandsfiske (LFI) 293). uni.no: Uni Research Miljø. Tilgjengelig fra: uni.no/media/manual_upload/LFI_293.pdf (Hentet: 28.05.18).
- Sukhodolov, A. N. *et al.* (2007) Quantative Visual Method for Natural Streams: Examples and Perspectives *Proceedings of 32nd IAHR Congress*. Venice, Italy, s. 68-78.
- Takehara, K. *et al.* (2002) An Attempt of Field Measurement of Surface Flow on a River by Helicopter Aided Image Velocimetry, *Journal of the Visualization Society of Japan*, 46, s. 809-814. doi: 10.2208/prohe.46.809.
- Tauro, F. (2016) Particle Tracers and Image Anasysis for Surface Flow Observations *WIRES Water*, 3(1), s. 25-39. doi: 10.1002/wat2.1116.
- Thielicke, W. og Stamhuis, E. J. (2014) PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (1.42. utg.). doi: <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>.
- Urke, E. H. (2018) *Den lille fabrikkens enorme droner kan være starten på et nytt norsk industrieventyr* (Hentet: 24.04 2018).
- Valle, M. (2017) *Han bruker droner for å gjøre arkeologi-arbeidet lettere*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/han-bruker-droner-for-a-gjore-arkeologi-arbeidet-lettere/377938> (Hentet: 05.08 2017).
- Westoby, M. *et al.* (2012) 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, s. 300-314. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

Vedlegg

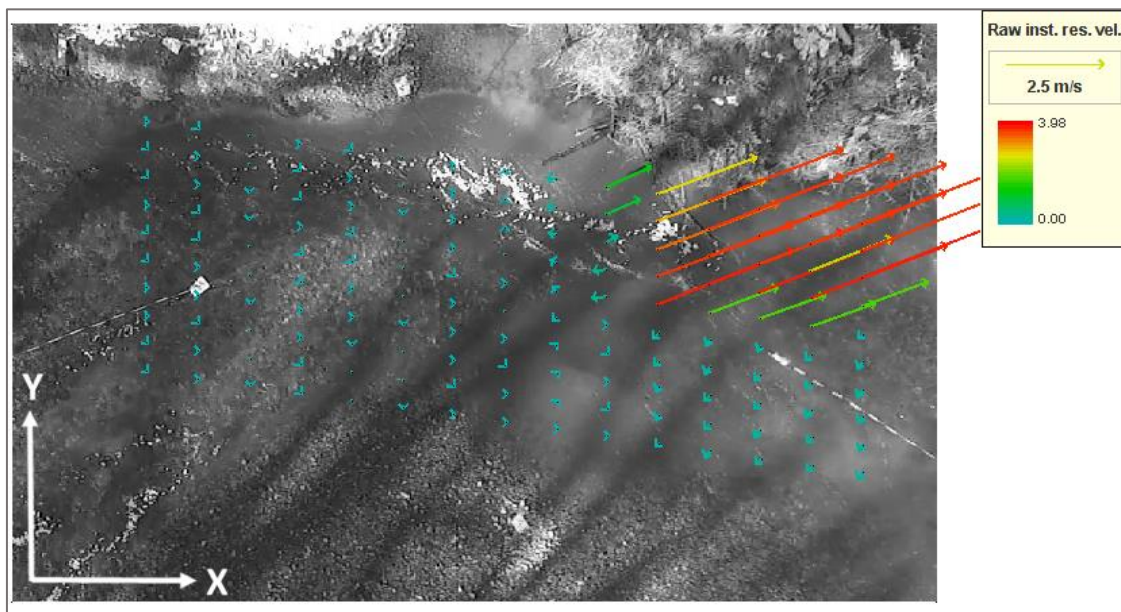
- A. Bildemateriale fra video 0009 for visuell vurdering i sensitivitetsanalyse
- B. Sammenheng mellom hastighet og korrelasjonsfaktor
- C. Kalibreringsdata
- D. Terrengmodell ved hjelp av «Structure from Motion»
- E. Bunnruhet basert på bildeanalyse av bunnmateriale
- F. Programvare for strømmingssimulering (numerisk)

Referanser

A. Bildemateriale fra video 0009 for visuell vurdering i sensitivitetsanalyse

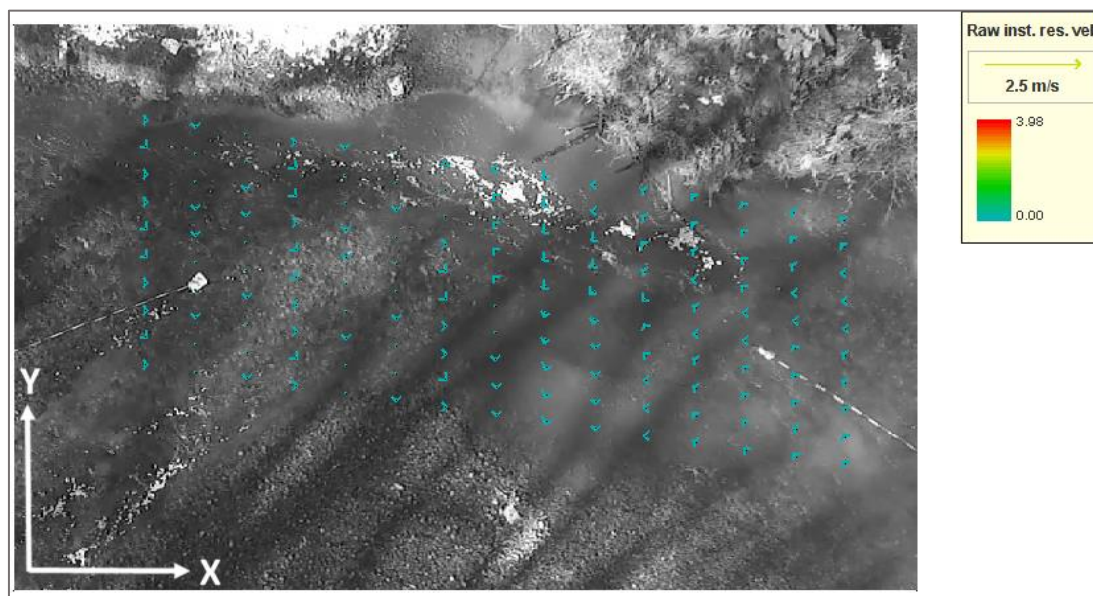
Som en del av sensitivitetsanalysen (kapittel 3.2.2) ble hvert av parametersettene analysert ved visuell vurdering av de øyeblikkelige hastighetsfeltene (rå-format). Under er det valgt ut to vilkårlige øyeblikkelige hastighetsfelt for hvert av de fem parametersettene (0.40/128, 0.20/64, 0.12/32, 0.08/16 og 0.04/8). Det er valgt ut resultater slik at markørene skal være på tilnærmet lik plass for alle settene. Det er kun valgt å legge ved bilder fra lokalitet 0009, men den visuelle vurderingen har blitt gjennomført for alle lokalitetene.

Det første hastighetsfeltet (figur A.1) viser resultat 11 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 11/12) for $\Delta t = 0.40$ sek og IA = 128 piksler. Vektorene viser tilnærmet bare null-vektorer og noen ekstreme verdier oppe til høyre. Resultatene fra bildeparene er grunnlaget for de filtrerte øyeblikkelige hastighetsfeltene for beregning av gjennomsnittlig hastighet.



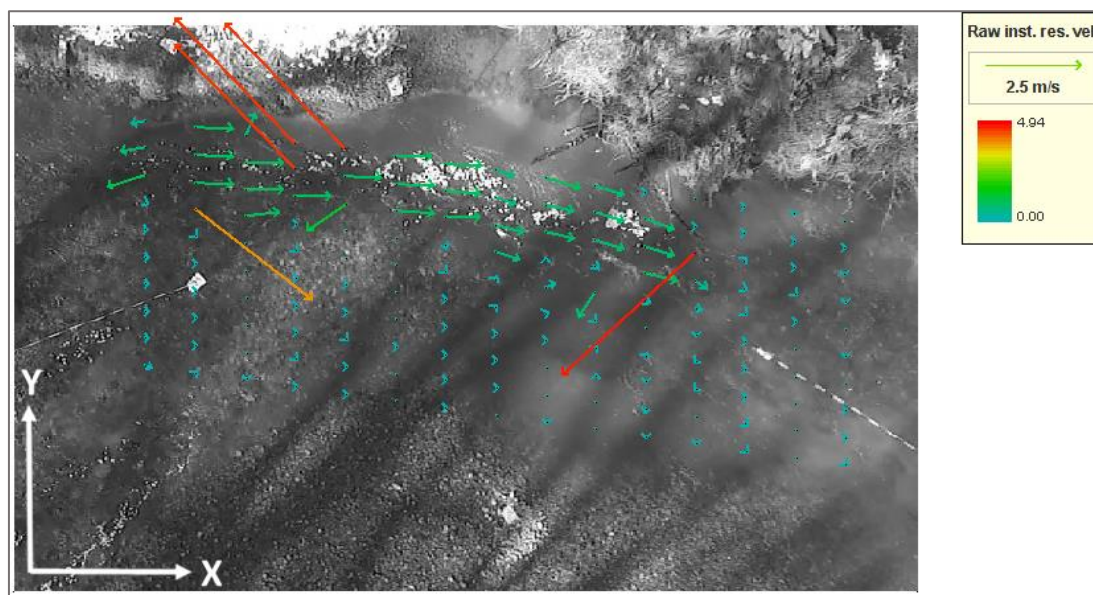
Figur A.1 Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.2) viser resultat 12 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 12/13) for $\Delta t = 0.40$ sek og IA = 128 piksler. Vektorene viser tilnærmet bare null-vektorer.



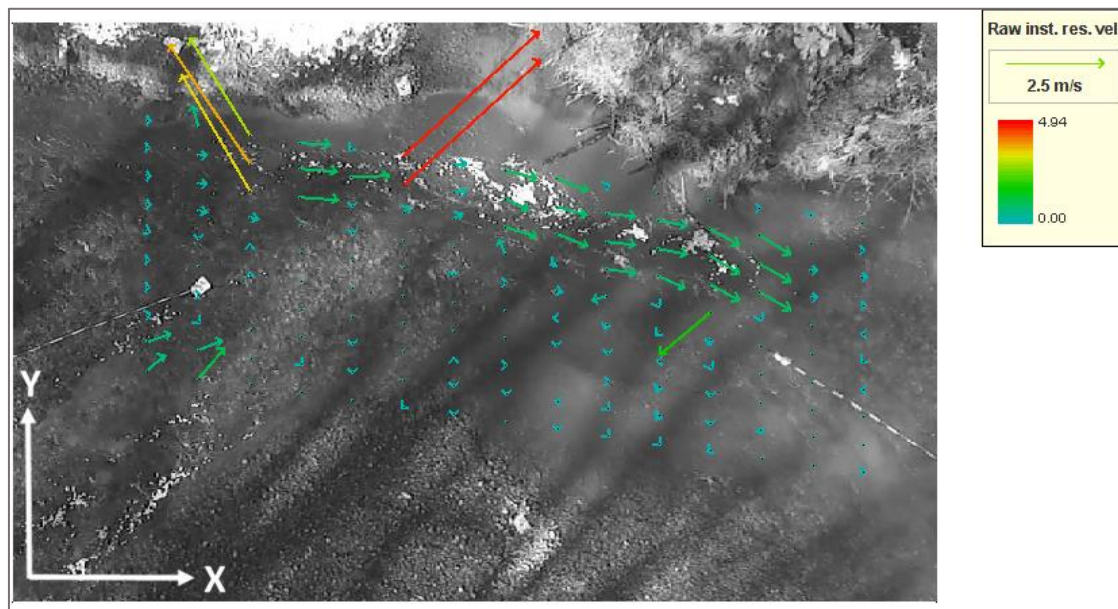
Figur A.2: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.3) viser resultat 19 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 19/20) for $\Delta t = 0.20$ sek og IA = 64 piksler. Vektorene viser noen ekstreme verdier, en del null-vektorer i tillegg til realistiske verdier i øvre del av gridet.



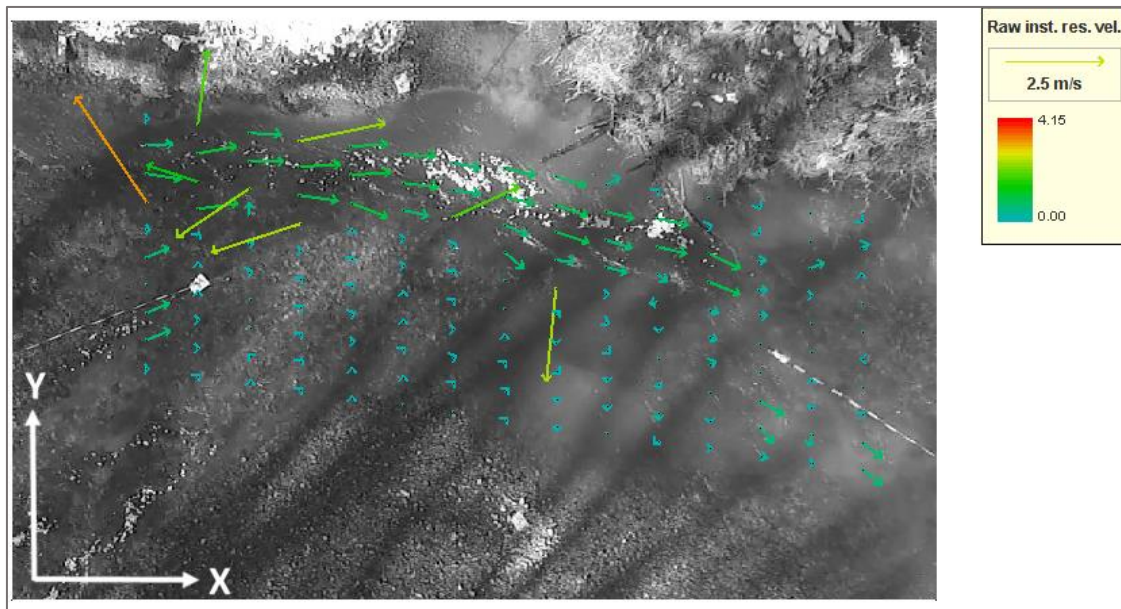
Figur A.3: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.4) viser resultat 23 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 23/24) for $\Delta t = 0.20$ sek og IA = 64 piksler. Vektorene viser noen ekstreme verdier, en del null-vektorer i tillegg til realistiske verdier i øvre del av gridet.



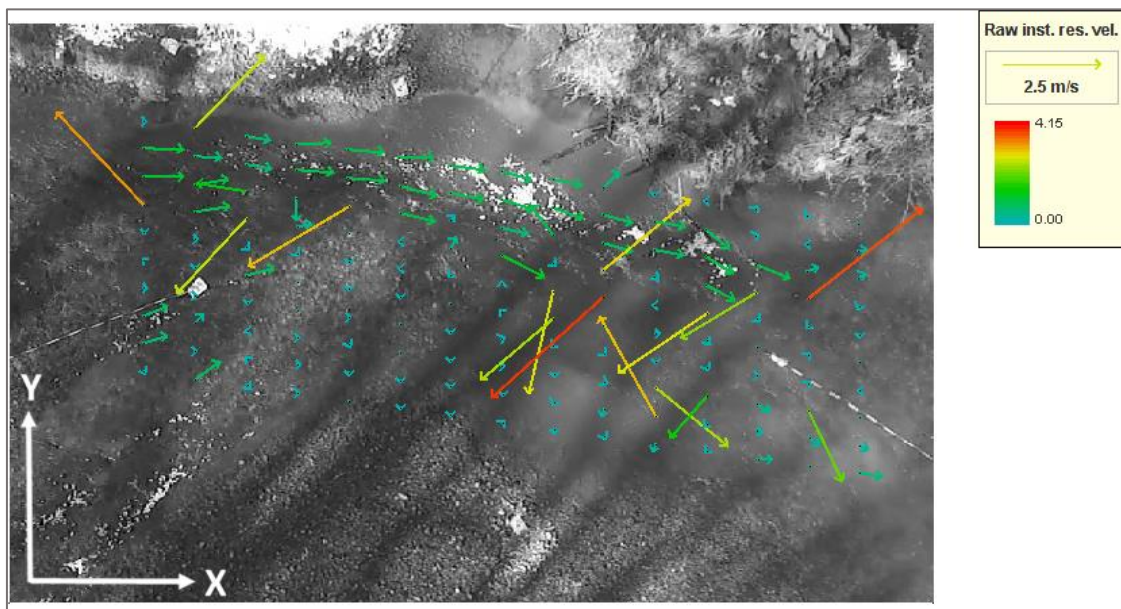
Figur A.4: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.5) viser resultat 34 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 34/35) for $\Delta t = 0.12$ sek og IA = 32 piksler. Vektorene viser noen ekstreme verdier, en del null-vektorer i tillegg til realistiske verdier i øvre del av gridet.



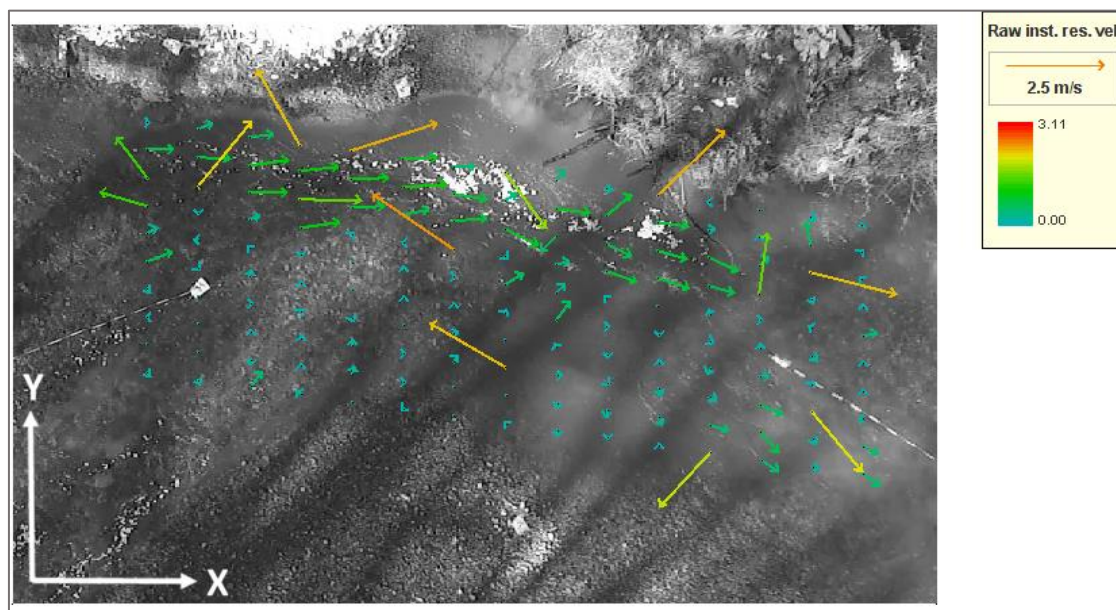
Figur A.5: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.6) viser resultat 38 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 38/39) for $\Delta t = 0.12$ sek og IA = 32 piksler. Vektorene viser noen ekstreme verdier, en del null-vektorer i tillegg til realistiske verdier i øvre del av gridet.



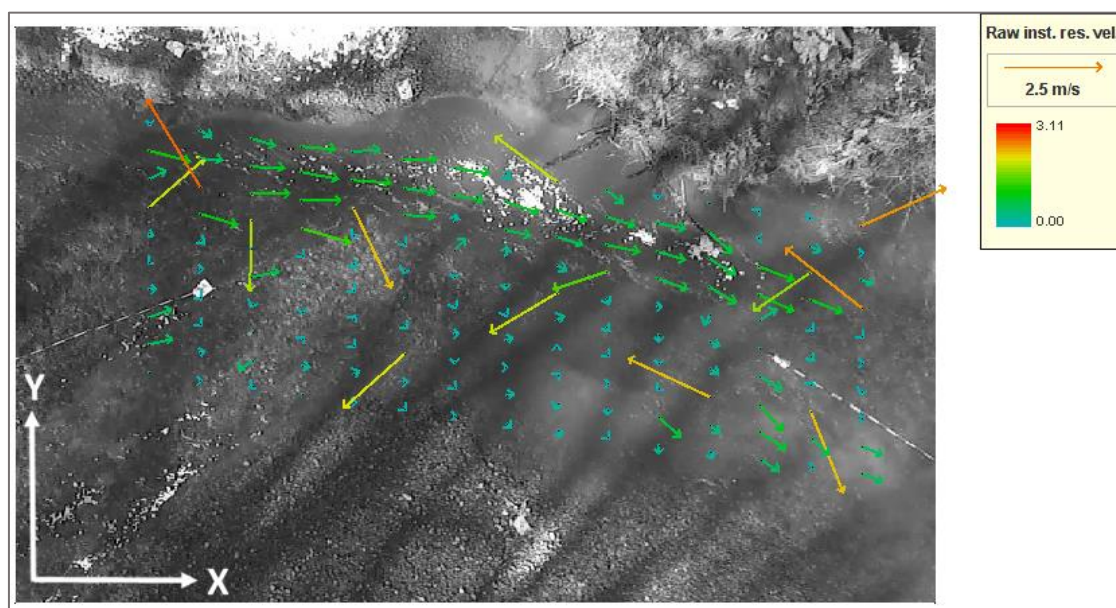
Figur A.6: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.7) viser resultat 49 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 49/50) for $\Delta t = 0.08$ sek og IA = 16 piksler. Vektorene viser lite støy og små hastighetsverdier.



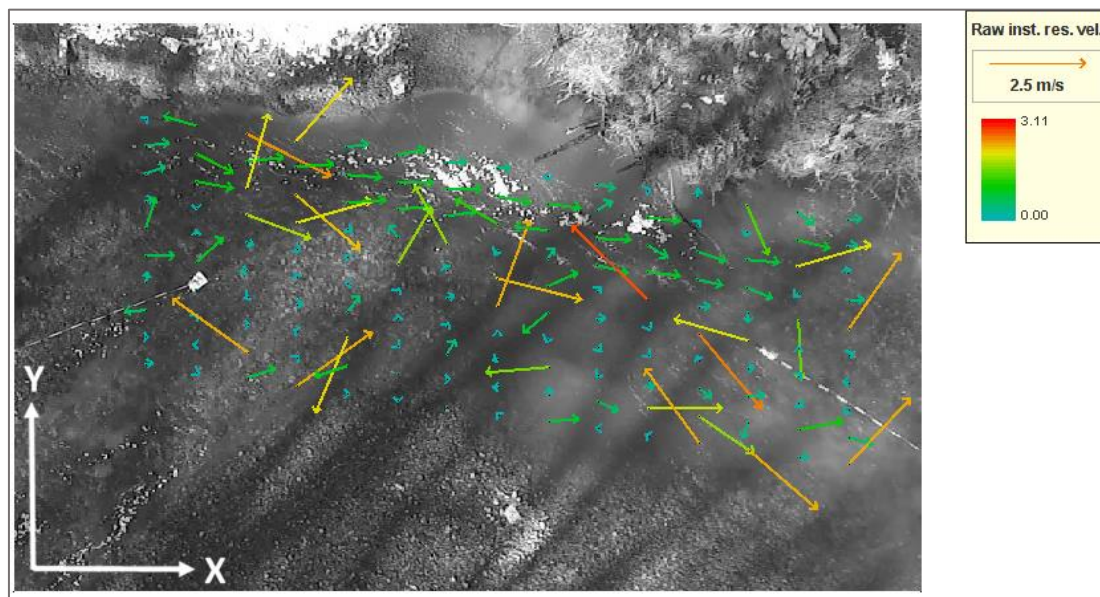
Figur A.7: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.8) viser resultat 57 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 57/58) for $\Delta t = 0.08$ sek og IA = 16 piksler. Vektorene viser lite støy og små hastighetsverdier.



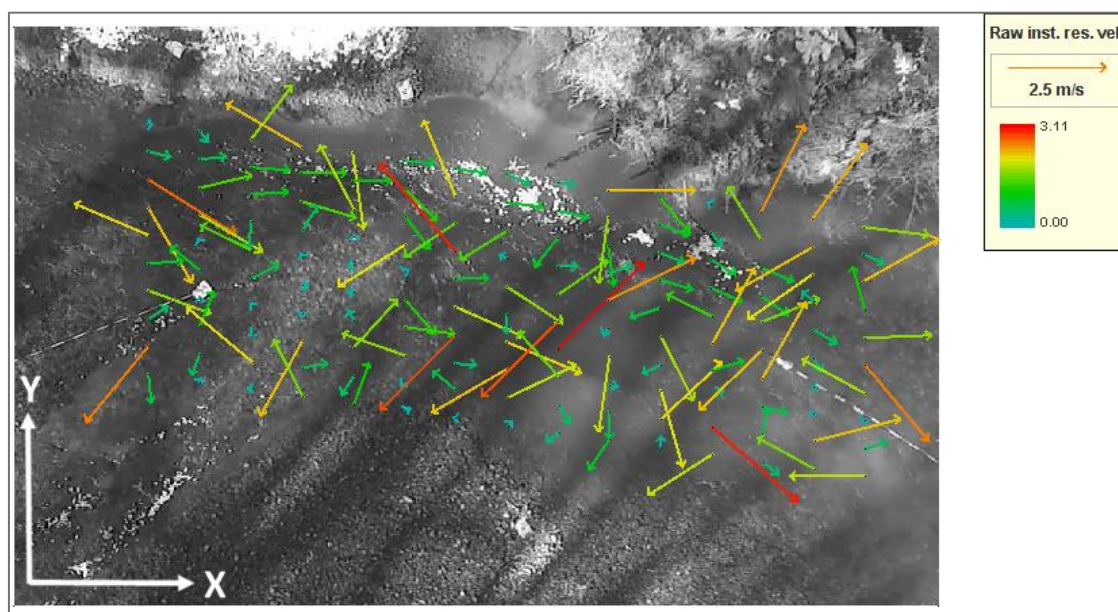
Figur A.8: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.9) viser resultat 97 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 97/98) for $\Delta t = 0.04$ sek og IA = 8 piksler. Vektorene viser store mengder støy.



Figur A.9: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering.

Hastighetsfeltet (figur A.10) viser resultat 112 (øyeblikkelig hastighetsfelt for bildepar 112/113) for $\Delta t = 0.04$ sek og IA = 8 piksler. Vektorene viser store mengder støy.



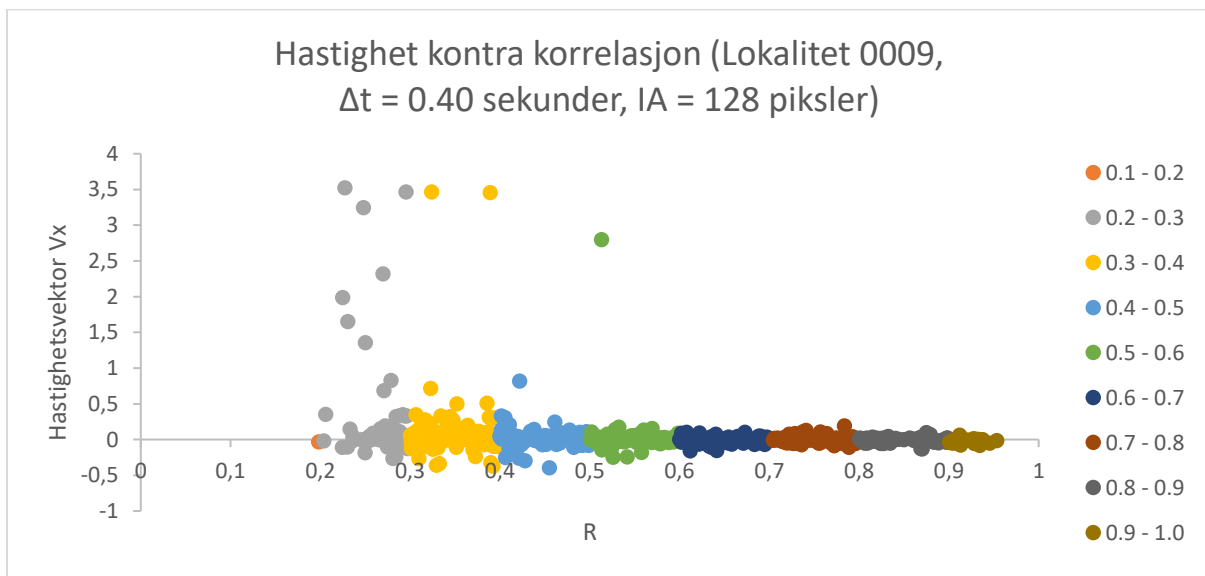
Figur A.10: Vektorfelt for øyeblikkelig hastighet for lokalitet 0009 for visuell vurdering

B. Sammenheng mellom hastighet og korrelasjonsfaktor

For hvert av de fem parametersettene er sammenhengen mellom de øyeblikkelige hastighetsvektorene og korrelasjonsfaktoren (figur B.1-B.10) vurdert for å se om høy korrelasjonsfaktor svarte til ønskede hastighetsverdier som beskrevet i kapittel 3.2.2. Ønsket tendens for mindre IA og Δt er en forskyvning av korrelasjonsfaktoren mot 1 (større andel mot $R = 1$) og hastigheter høyere enn 0, dvs. hvorvidt høy korrelasjonsfaktor samsvarer med positive hastighetsverdier i grafene vist under. Man ønsker også ønsker man minst mulig støy i det ufiltrerte resultatet.

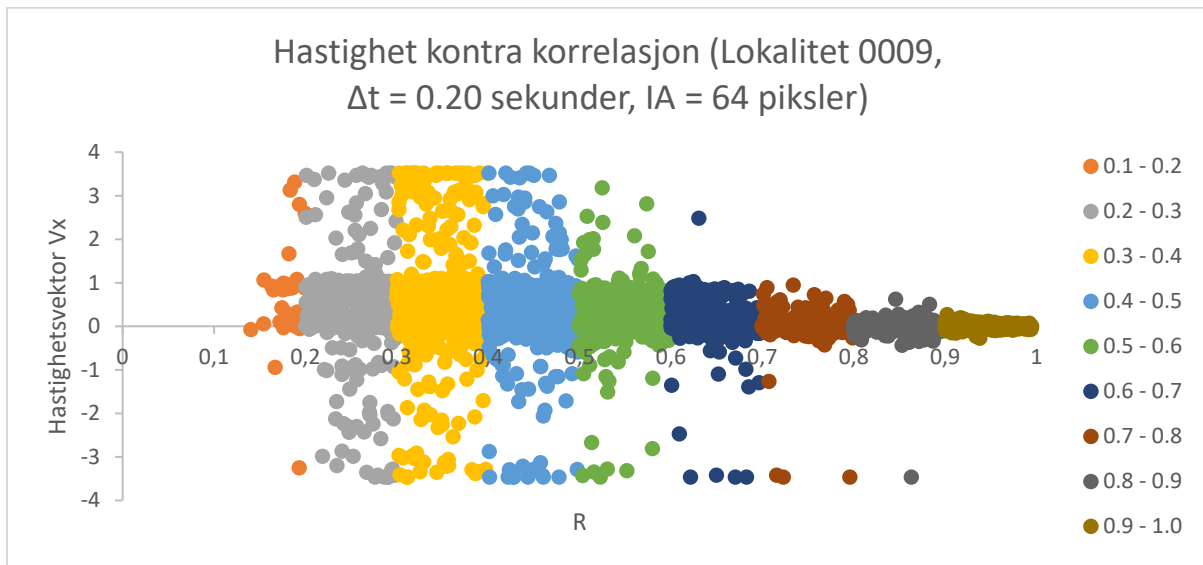
Grafene for lokalitet 0009 og 0003 har samme tendenser som tilsvarende grafer for lokalitet 0004 (figur 3.9-3.13) som beskrevet i kapittel 3.2.2. For stort Δt og IA har en mindre andel av hastighetsvektorene høy korrelasjonsfaktor, mens for minkende størrelse øker andelen. Andelen støy øker ved mindre Δt og IA.

Fordeling av hastighetskomponenten i x-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.40$ sekunder og IA = 128 piksler.



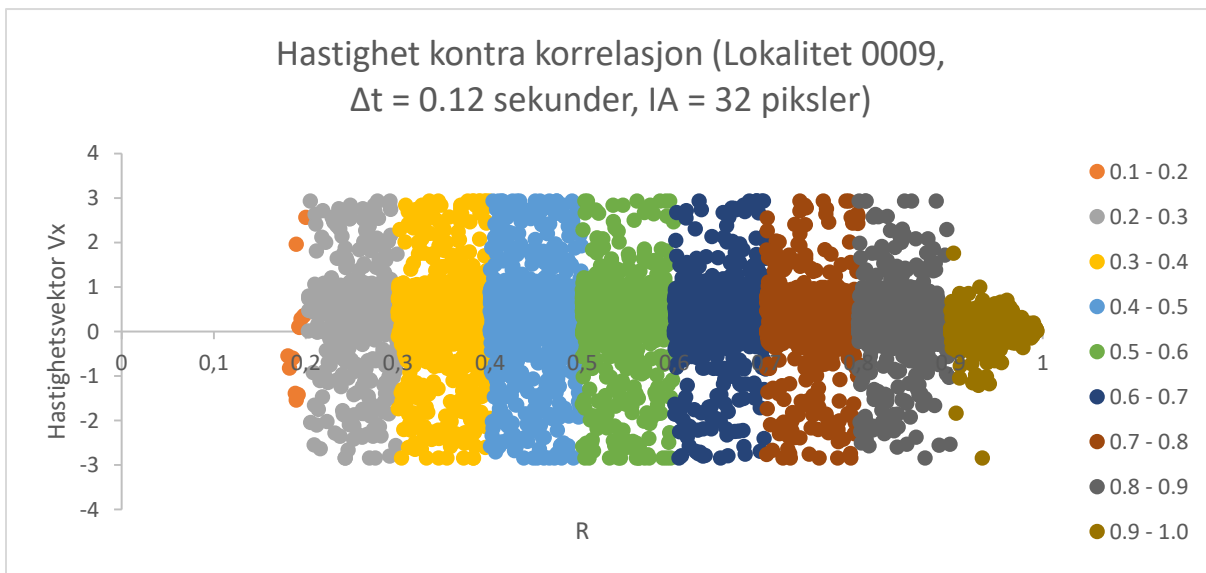
Figur B.1: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_x for 0009_040_128

Fordeling av hastighetskomponenten i x-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.20$ sekunder og IA = 64 piksler.



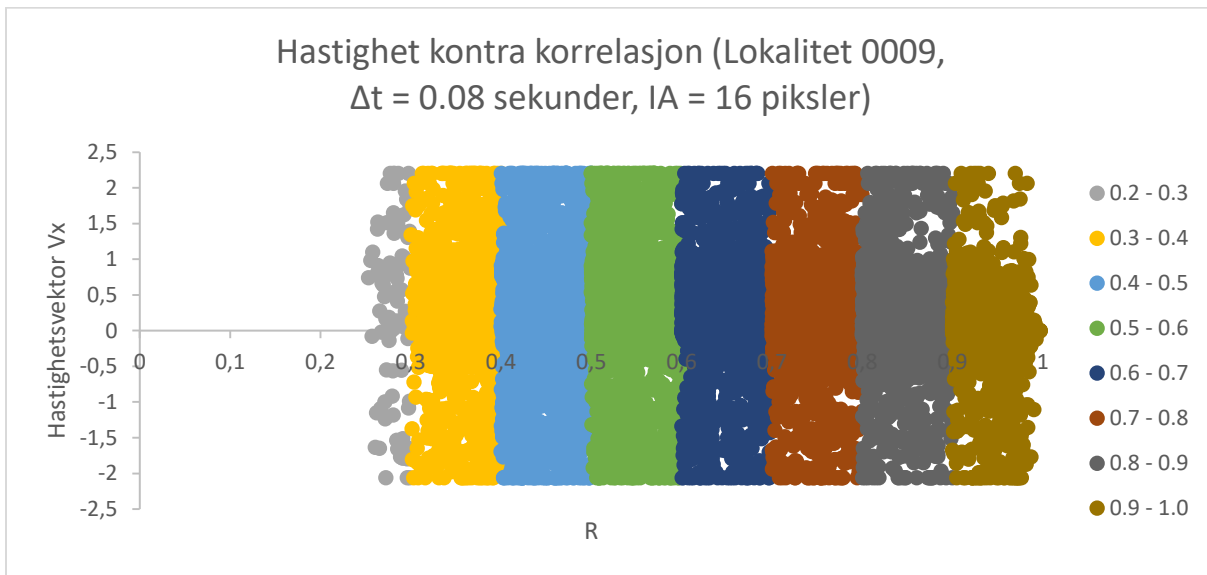
Figur B.2: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_x for 0009_020_064

Fordeling av hastighetskomponenten i x-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.12$ sekunder og IA = 32 piksler.



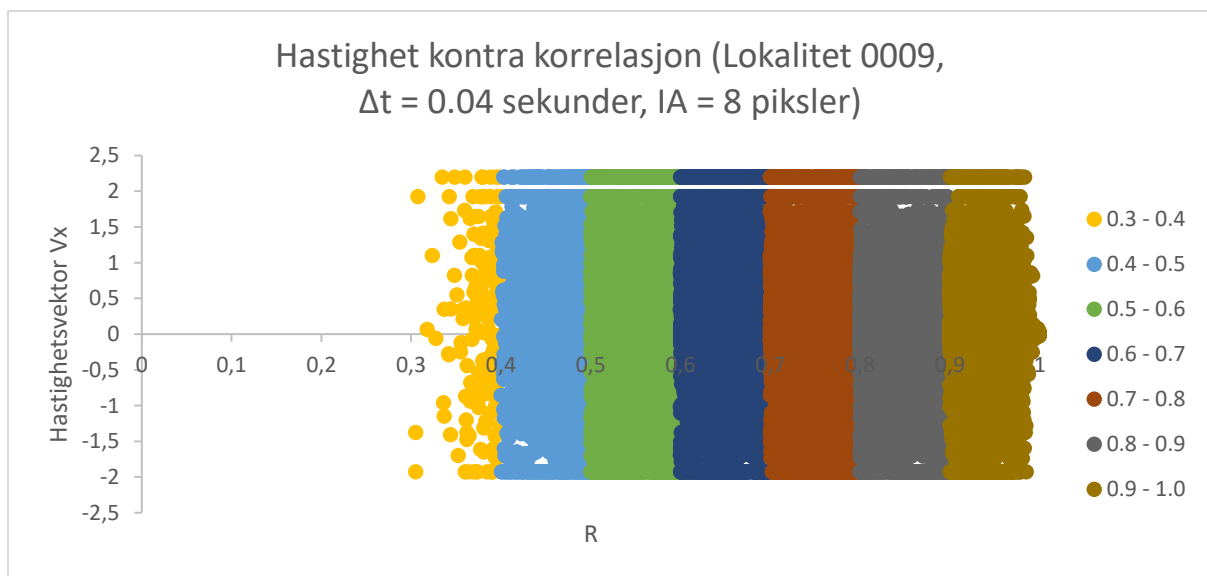
Figur B.3: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_x for 0009_012_032

Fordeling av hastighetskomponenten i x-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.08$ sekunder og IA = 16 piksler.



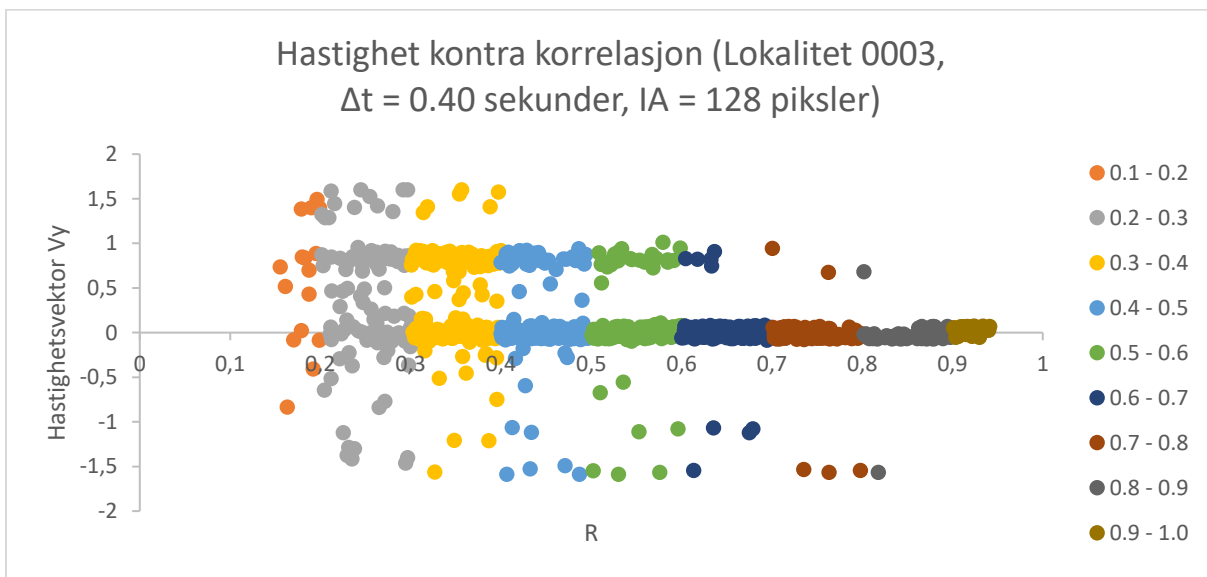
Figur B.4: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_x for 0009_008_016

Fordeling av hastighetskomponenten i x-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.04$ sekunder og IA = 8 piksler.



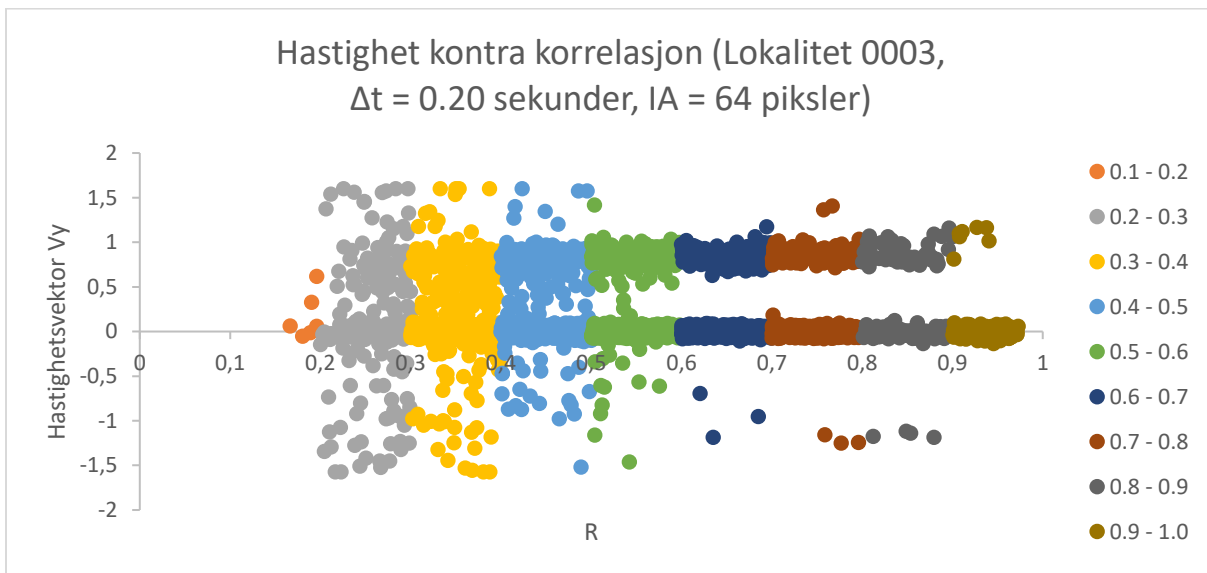
Figur B.5: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_x for 0009_004_008

Fordeling av hastighetskomponenten i y-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.40$ sekunder og IA = 128 piksler.



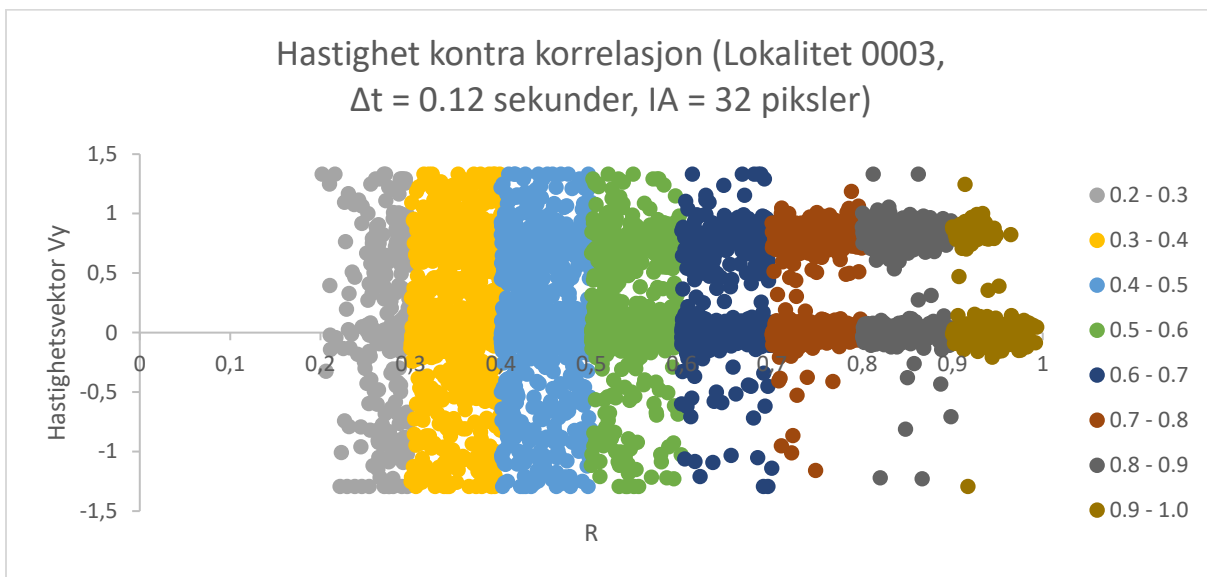
Figur B.6: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0003_040_128

Fordeling av hastighetskomponenten i y-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.20$ sekunder og IA = 64 piksler.



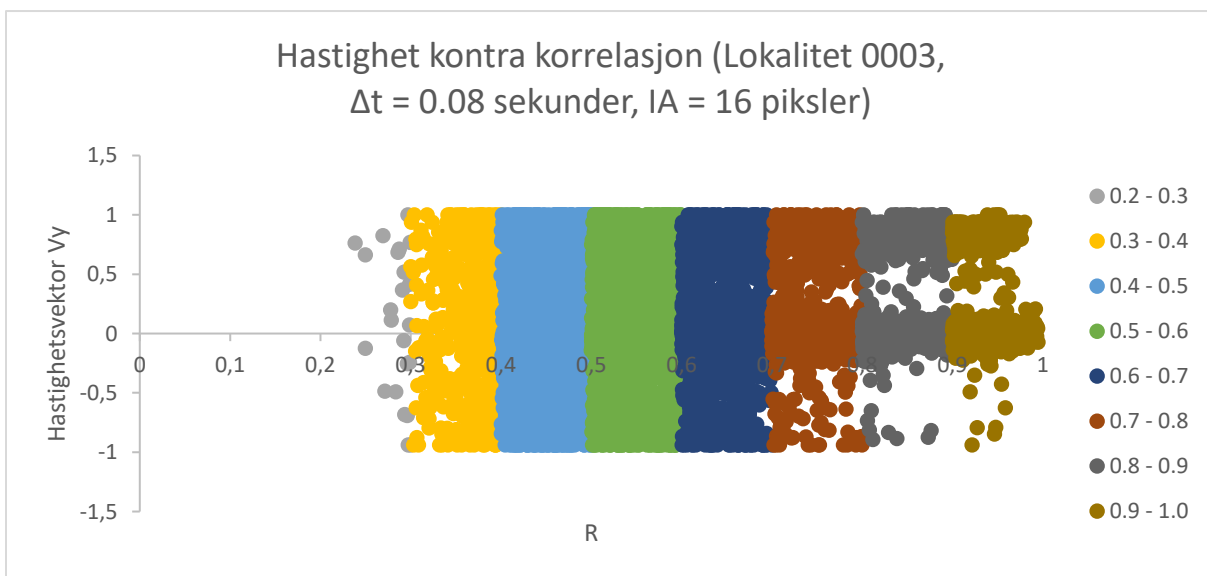
Figur B.7: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0003_020_064

Fordeling av hastighetskomponenten i y-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.12$ sekunder og IA = 32 piksler.



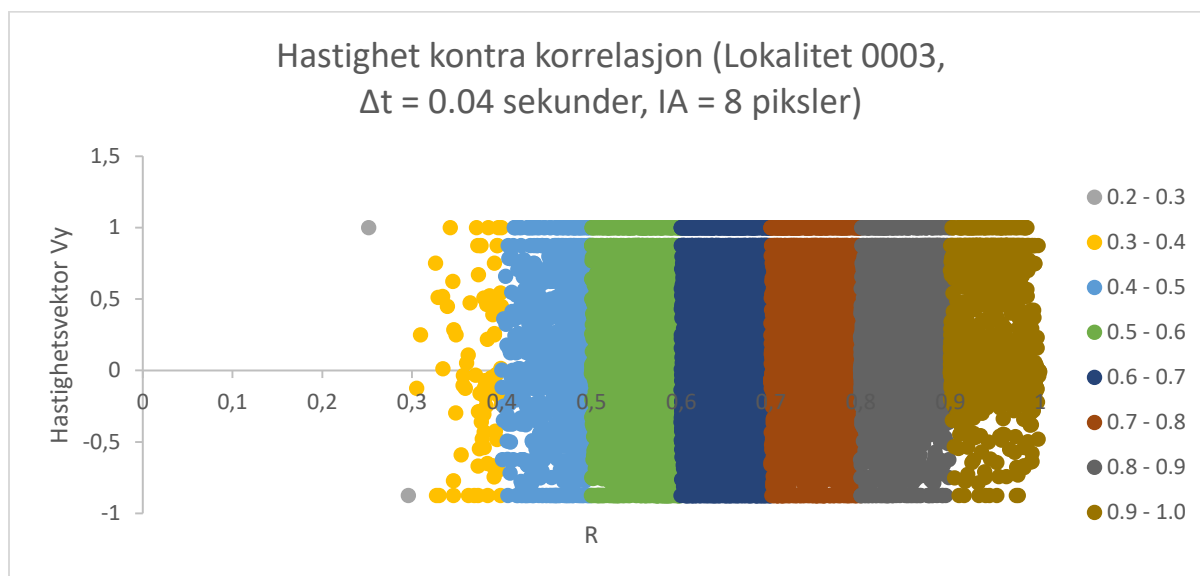
Figur B.8: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0003_012_032

Fordeling av hastighetskomponenten i y-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.08$ sekunder og IA = 16 piksler.



Figur B.9: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0003_008_016

Fordeling av hastighetskomponenten i y-retning kontra korrelasjonsfaktoren for $\Delta t = 0.04$ sekunder og IA = 8 piksler.



Figur B.10: Sammenheng mellom korrelasjonsfaktor R og hastighetsvektor V_y for 0003_004_008

C. Kalibreringsdata

Akustisk dopplerinstrument (ADCP) kan benyttes til måling av kalibreringsdata for vannhastigheten. ADCP måler vannføringen direkte ved å finne *vannhastigheten* på partikler som er suspendert i vannet sammen med dybden i tverrsnittet (NVE, 2015). ADCP festes på en båt som kjøres langs valgte tverrsnitt for elvestrekningen og tverrsnittene bør representere elvestrekningen og dens sammensetning av formasjoner inkludert stryk, kulper og renner.

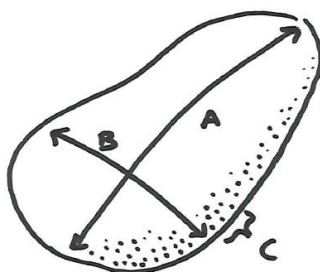
Vannlinjer er høyden på vannoverflaten langs tverrsnittet av elva og brukes til beregning av vannføring. Vannlinjer kan finnes ved å benytte *differensial-Global Positioning System* (differensial-GPS). Vannlinjene brukes sammen med elvas profil, funnet ved å bruke ADCP, til å beregne høyden på profilet. Både elvas profil og vannlinjene kan finnes samtidig dersom ADCP har GPS.

Det fins flere metoder for å finne *bunnrugheten*, hvorav en av disse er Wolmans «*Pebble Count*» (Wolman, 1954), hvor man teller antall småsteiner for et representativt areal. For hver stein måles mellomliggende akse (figur C.1) og noteres i et skjema. Wentworths skala benyttes dersom ikke diameter er av interesse for å sette grenser for hver størrelsesklasse. Når alle småsteinene er klassifisert, plottes en kornfordelingskurve som kan brukes til å hente ut ønskede parametre til beregning av for eksempel Mannings tall ved d_{90} (Wolman, 1954).

Metoden utføres manuelt av to personer, hvor den ene står i elva og måler steinstørrelsen og den andre noterer resultatet i et skjema. Metoden baserer seg på representativt areal dekket istedenfor vekt av korn. Et system etableres med for eksempel en metallramme for å avgrense og velge ut hvilke steiner som skal måles. Størrelsen på rutenettet avhenger av lengden til elvestrekningen som skal undersøkes. Det er viktig at områdene som velges er representativt for elvestrekningen (Wolman, 1954).

Metoden er anvendbar for elver som har grovkornet materiale med en nedre partikkelgrense på 2-4 mm og er vadbare ved lave vannstander. Det velges ut et bestemt antall småstein inne i rutenettet. For å gjøre metoden objektiv velger man steinen som ligger akkurat under skotuppen, og markerer området med linjer. Består store deler av elvebunnen av fint materiale må det tas hensyn til metodens svakheter (vanskelig å måle fint materiale med målestokk) ved for eksempel å bruke et kalibrert forstørrelsesglass under innmåling av kornstørrelse (Wolman, 1954).

Det er viktig at undersøkelsesområdene representerer elvas sammensetning av ulike formasjoner som stryk, renner og små basseng og kulper (Wolman, 1954). Sammensetning av bunnmateriale brukes for å se på karakteristikkk av strømningsforhold, hvordan elveløpet former seg (både formasjoner og hydrauliske forhold) og sedimenttransport (erosjon og avsetning). Bunnruheten er en viktig parameter i studier av fiskehabitat, økosystemer langs elvebredden.



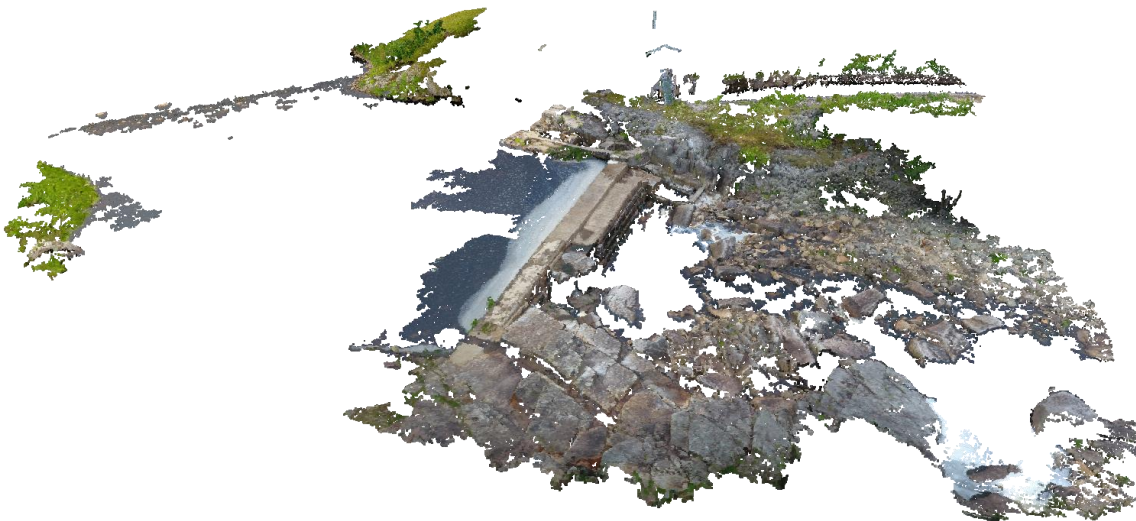
Figur C.1: Definisjon av en steins akser. A: Lengste akse; B: Mellomliggende akse; C: Korteste akse. Mellomliggende akse måles inn for metoden «Pebble Count» (Wolman, 1954).

D. Terrengmodell ved hjelp av «Structure from Motion»

Terrengmodellering gjøres ved hjelp av «Structure from Motion» (SfM) som benytter georefererte bilder tatt med drone. Utarbeidelse av terrengmodell gjøres i fem steg¹ (Lükö, Rüter og Baranya, u.å.):

1. Innsamling av data – video tatt med drone
2. Konvertering av videoformat, MOV til AVI (GoPro Studio)
3. Klippe ønsket seksjon fra video til bilder (VirtualDub)
4. Rekonstruering av objekt (VisualSFM)
5. Skalering/georeferering (Meshlab)

Prosessen gir ut en georeferert 3D-modell av terrenget. Terrengmodellen (figur D.1) kan brukes i den numeriske modellen av den valgte elvestrekningen.



Figur D.1: Punktsky. Dam Rafoss rekonstruert i programmet VisualSFM.

SfM er en fotogrammetrisk metode for utarbeidelse av terrengmodell (3D-modell) av elveløpet. Metoden gir ut et ortofoto² (Kartverket, 2016), et georeferert bilde tatt med drone, fly eller satellitt. Georefererte bilder innehar informasjon om hvor det ligger i forhold til virkelig terreng, noe som skjer gjennom en prosess der bildet tilpasses til en modell av terrenget. Dette forutsetter

¹ Eksempel på programvare som kan benyttes for prosessene er gitt i parentes.

² Ortofoto er et bilde som innehar samme geometriske egenskaper som et kart og kan knyttes opp til et referansesystem. Ortofoto kan brukes til 3D-visualisering sammen med terrengdata.

koordinater slik at pikslene i bildet kan tildeles en posisjon med gitt lengde, bredde og høyde (Westoby *et al.*, 2012).

SfM baserer seg på å lage 3D-strukturer av overlappende bilder. Mens geometri, kameraets posisjon og orientering må bestemmes på forhånd ved bruk av tradisjonelle fotogrammetriske metoder, gjøres dette automatisk ved bruk av SfM. For bestemmelse av overnevnte parametre benyttes et nettverk av objekter med kjent posisjon (koordinater), og god overlapp mellom bildene. For å sikre en god punktsky av terrenget er det viktig at bildene tas fra ulike vinkler. For å oppnå den nødvendige overlappen brukes det man kaller for «moving sensor» (Westoby *et al.*, 2012) og bildene tas enten som en sirkel rundt objektet, eller et rutenett over området som skal modelleres (Westoby *et al.*, 2012). Det er også mulig å filme mens man kjører langs elvestrekningen for så å hente ut bilder fra videoen da det kan være vanskelig å dekke området ved et bestemt mønster.

Posisjonen for punkter i et bilde kan bestemmes enten basert på 3D-lokalitet og vinklingen til kamera eller 3D-lokalitet av en serie med kontrollpunkter (GCP), noe som forenkles ved å benytte SfM. Kameraposisur og geometri rekonstrueres da samtidig gjennom automatisk identifisering av overlappende egenskaper i bildene. Fellestrekkene gjenkjennes i hvert bilde og gjør det mulig å estimere kameraets posisjon og koordinater til objekter. Estimatet løses iterativt ved hjelp av en ikke-lineær minste-kvadraters metode for minimering. 3D-modellen genereres i et «relativt bilde-rom»-koordinatsystem som må justeres til et virkelig «objektivt-rom»-koordinatsystem, ved bruk av GCP som har objektivt-rom koordinater for transformasjon (Westoby *et al.*, 2012).

GCP kan avledes i ettertid, og i praksis er dette lettere dersom kontrastfylte merker i undersøkelsesområdet markeres før bildedata samles inn. Koordinater til merkene finnes da ved innmåling med f.eks. Global Positioning System (GPS). Det er viktig at slike merker fordeles jevnt i området da dette gjør det mulig å vurdere potensielle ikke-lineære strukturelle feil i rekonstruksjonen. GCP brukes til å skalere modellen slik at den får samme forhold som det virkelige terrenget (Westoby *et al.*, 2012).

For at punktskyen skal gi best mulig resultat er det viktig at bildene har høy oppløsning og egnet tekstur. Dette gir flere «nøkkelpunkt», noe som igjen gir bedre resultater. Kvaliteten på punktskyen er avhengig av fotoserien (tetthet, skarphet og oppløsning) og spekteret av naturlig tekstur i objektet det tas bilde av. Avstanden mellom kamera og objekt har også innvirkning på kvaliteten. Kortere avstand gir økt romlig oppløsning som igjen forbedrer den romlige tettheten og

oppløsningen for punktskyen. Det er ikke oppgitt et eksakt antall bilder nødvendig for et godt resultat, men generelt gjelder det at jo flere bilder jo bedre resultat. Minimum tre overlappende bilder av det som skal modelleres er nødvendig. Sluttproduktet ved bruk av SfM er en fullstendig georeferert, høyoppløsnings- og fotorealistisk terrengmodell (Westoby *et al.*, 2012).

Ved terrengmodellering av en elv vil det ikke være mulig å generere en overflate av vannspeilet. Bevegelsen i vannet fører til at punkter i bildene ikke overlapper, noe som er nødvendig for å generere punkter i punktskyen. Dette vil være et problem i områder der elvebunnen ikke er synlig gjennom vannet, for eksempel hvis vannet er for dypt eller ugjennomsiktig. Problemet kan ses som det hvite området mellom de to røde sirklene i figur D.2. For grunnere områder som for eksempel langs elvebredden eller i grunne elver hvor bunnen er godt synlig gjennom vannet, er det mulig å generere en overflate som vist i figur D.2. For områdene hvor man ikke får generert overflater, må andre metoder benyttes. ADCP kan brukes til å modellere tverrsnittet under vann.



Figur D.2: Vanskelige områder for rekonstruering. Terrengmodell hvor bunnen i elveløpet er synlig i områder markert med rød ring. Det hvite området mellom de røde ringene er en elvestrekning hvor bunnen ikke har vært tilstrekkelig synlig til å generere en overflate av vannspeilet i modellen.

E. Bunnruhet basert på bildeanalyse av bunnmateriale

Digital substratanalyse er basert på fotogrammetrisk analyse av bilder av elvebunnen. Digital substratanalyse er en fotogrammetrisk analyse av geometriske strukturer på elvebunnen og brukes til å finne kornstørrelsesdistribusjon, framstilt ved en kornfordelingskurve³. For å beregne ruheten av elvebunnen benyttes verdier fra kornfordelingskurven til å beregne Mannings tall⁴. Mannings tall kan estimeres fra den empiriske formelen (Meyer-Peter og Müller, 1948):

$$M = \frac{26}{(d_{90})^{\frac{1}{6}}} \quad (3)$$

Mannings tall gir informasjon om friksjonen på elvebunnen og er viktig for riktig simulering av strømmingen. Når man skal finne Mannings tall for elvestrekningen er det viktig at områdene som undersøkes representerer elvas karakteristikk. Elva kan bestå av stryk, renner og små basseng og kulper. Mannings tall brukes når vannføringen skal beregnes.

For å vurdere hvordan elvebunnen oppfører seg og endres med tid er det viktig å vite hvordan elvebunnen er bygd opp. Dette kan gjøres ved å analysere materialet som elvebunnen er bygd opp av. Ruheten benyttes ved modellering og beregning av hydraulikk og sedimenttransport. Kornfordelingskurven kan også brukes ved klassifisering av akvatiske habitat eller til evaluering av geologiske avsetninger (Detert og Weitbrecht, 2012). Ruheten kan brukes til modellering av strømningsforholdene i elva, vurdering av sedimenttransport, klassifisering av habitat og geologisk avleiring (Detert og Weitbrecht, 2013).

Det fins flere programmer for digital substratanalyse, to av disse er BASEGRAIN (Detert og Weitbrecht, 2014) og the Digital Grain Size Project (Buscombe, 2014). BASEGRAIN er opprinnelig laget for evaluering av tørrlagt elv, men kan også analysere bilder tatt under vann såfremt man tar hensyn til lysbrytning. Billedata av elvebunnen brukes som input til vurderingen, og man kan benytte seg av enkle digitalkameraer eller nyere mobiltelefoner (Detert og Weitbrecht, 2013). Sammenlignet med konvensjonelle metoder som sikting av prøver er automatisk objektgjenkjennelse en billig, brukervennlig og lite tidkrevende metode. (Detert og Weitbrecht, 2012).

³ Kurve som viser fordelingen av størrelse på kornene for et valgt test-område.

⁴ Numerisk beskrivelse av elvebunnens ruhet.

F. Programvare for strømningsmodellering (numerisk)

En numerisk simulering er det siste steget i UAV-basert metode. Simuleringen tar inn data fra metodene beskrevet i kapittel 2.3-2.5. Simuleringer kan være to-dimensjonal eller tre-dimensjonal. To programmer som brukes til numerisk simulering er HEC-RAS (2D) og SSIIM (3D). Numeriske modeller brukes for å simulere ulike situasjoner i vassdraget ved ulike vannføringer. Hvordan omgivelsene blir påvirket ved de ulike vannføringer kan vurderes.

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) er en programvare utviklet av US Army Corps of Engineers for bruk innen hydrologi og planlegging og håndtering av vannressurser (HEC-USACE, u.å.). For å vurdere hva som skjer i en elv må man kjenne til ulike parametere som påvirker strømmingen. Dette inkluderer materialet i elvebunnen, ruhet, helning, vegetasjon. Endringer i vannveien, som bygging av kulverter, broer eller lignende kan komplisere simuleringen (Polo, 2015).

Programmet brukes til å gi en visualisering av ulike situasjoner i vassdraget slik at man kan evaluere eventuell ombygging. Situasjoner som kan simuleres kan være endringer i vassdrag med hensyn til geometri og strømningsforhold, endring i dynamikk/strømning som vil påvirke elvebunnen (forhold). Man kan også lage hydrauliske modeller som simulerer overnevnte hendelser. Man kan se på forhold i tverrsnitt eller lengdesnitt og i utstrekning (HEC-USACE, u.å.). Dataene kan brukes i kartprogrammer som ArcGIS til å lage flomkart og etablere risikosoner for å studere flomutsatte områder.

Simuleringsverktøyet *SSIIM* (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option) brukes til simulering av elver, sedimentering, miljømessige og hydrauliske forhold. Innen hydraulikk kan man bruke programmet til modellering av overløp, falltap i tunneler, forholdet mellom vannføring og vannivå for elver og turbiditet. Programmet kan brukes både til å simulere hvordan elvebunnen forandrer seg over tid og til å finne strømningsmønstre på vannoverflaten (Olsen, 2014).

En stor fordel med *SSIIM* sammenlignet med andre CFD-programmer, er kapasiteten til modellering av sedimenttransport i elver med bevegelig bunn og med kompleks geometri. Programmet skiller mellom kornstørrelsen ved bruk av flere algoritmer og kan sortere, dele inn i bunnlast og suspendert last, og ta hensyn til formasjoner i elva og effekten av helning. Hovedsakelig ble *SSIIM* laget for å simulere sedimenttransport, men det brukes også til f.eks. å studere habitat for fisk i elva (Olsen, 2014).

Referanser

- Buscombe, D. (2014) The Digital Grain Size Project: Automated Estimates of Grain Size from Images of Sediment (5.2. utg.). Tilgjengelig fra: <https://github.com/dbuscombe-usgs/DGS>.
- Detert, M. og Weitbrecht, V. (2012) *Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains - a free stand-alone tool*. London: Taylor & Francis Group.
- Detert, M. og Weitbrecht, V. (2013) *User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN*. London: Taylor & Francis Group.
- Detert, M. og Weitbrecht, V. (2014) BASEGRAIN (2.2. utg.). Tilgjengelig fra: <http://www.basement.ethz.ch/download/tools/basegrain.html>.
- HEC-USACE (u.å.) *About HEC*. Tilgjengelig fra: <http://www.hec.usace.army.mil/about/> (Hentet: 06.02 18).
- Kartverket (2016) *Ortofoto*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/geodataarbeid/flyfoto/ortofoto/> (Hentet: 02.06 2018).
- Lükö, G., Rüther, N. og Baranya, S. (u.å.) UAV Based Hydromorphological Mapping of a River Reach to Improve Hydrodynamic Numerical Models, i universitet, N. t. n. og Union, E. G. (red.).
- Meyer-Peter, E. og Müller, R. (1948) *Formulas for Bed-Load transport*. Tilgjengelig fra: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7?collection=research>.
- NVE (2015) *Målinger og metoder*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/hydrologi/vannstand-ogvannfoering/maalinger-og-metoder/> (Hentet: 05.07 17).
- Polo, R. B. (2015) *What is HEC-RAS and what is it useful for?* Tilgjengelig fra: <http://www.giscourse.com/what-is-hec-ras-and-what-is-it-useful-for/> (Hentet: 06.02 2018).
- Westoby, M. *et al.* (2012) 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, s. 300-314. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- Wolman, M. G. (1954) A Method of Sampling Coarse River-bed Material, *Transactions of the American Geophysical Union*, 35(6), s. 951-956. doi: 10.1029/TR035i006p00951.

