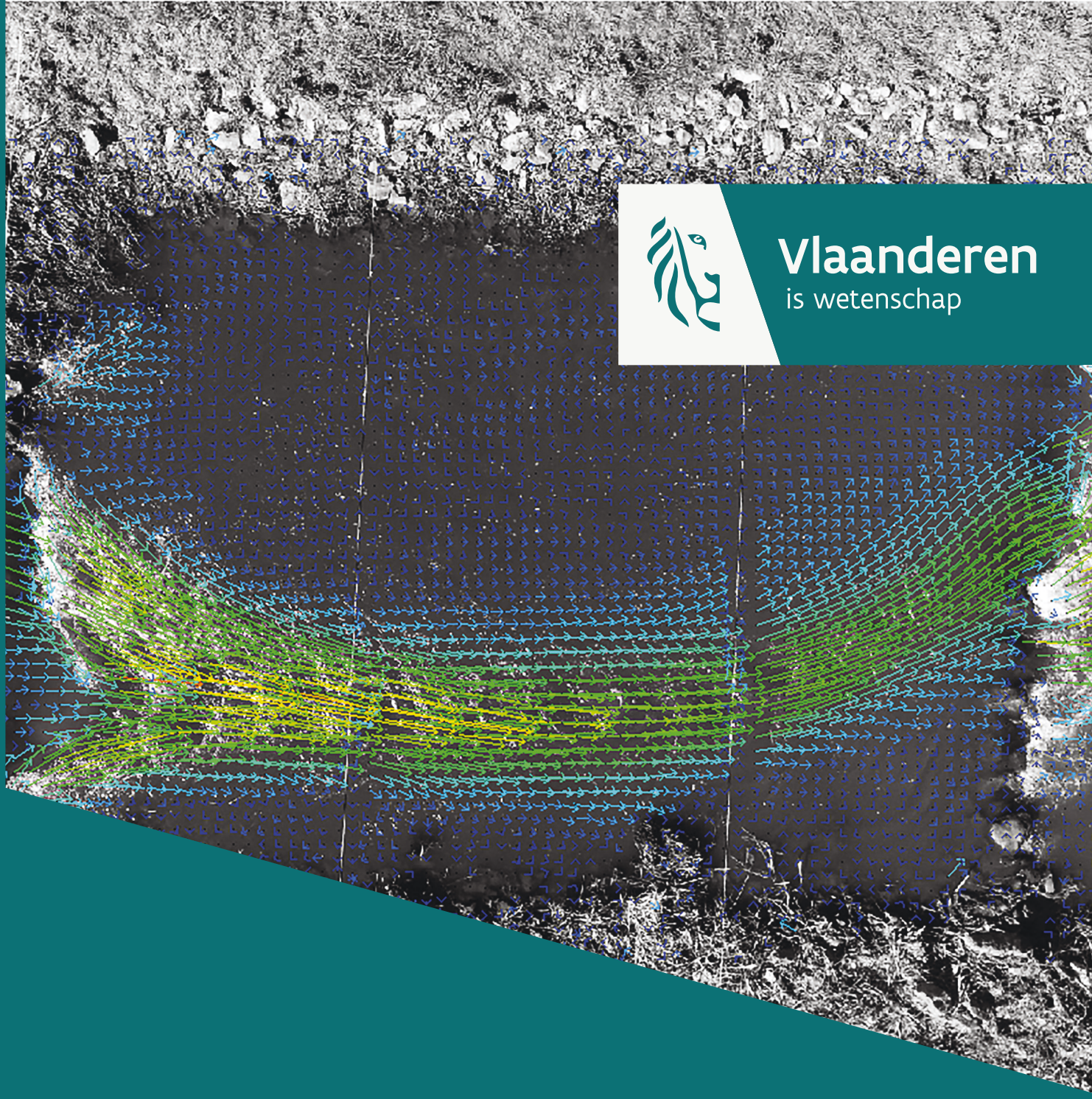


Vlaanderen
is wetenschap

21_079_2
WL rapporten

Validatie LSPIV techniek voor in situ opmetingen

Metingen vispassage Kerkhove

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Validatie LSPIV techniek voor in situ opmetingen

Metingen vispassage Kerkhove

Malschaert, J.; Depreiter, D.; Vercruysse, J.; Meire, D.

Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaanderen is wetenschap

Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2026
D/2026/3241/010

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Malschaert, J.; Depreiter, D.; Vercruysse, J.; Meire, D. (2026). Validatie LSPIV techniek voor in situ opmetingen: Metingen vispassage Kerkhove. Versie 4.0. WL Rapporten, 21_079_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2026R21_079_2
Trefwoorden (3-5):	Vispassage, stroompatronen, LSPIV, oppervlaktesnelheden		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden en patronen > In situ metingen Waterbouwkundige Constructie > Vispassage > Nevengeul > In situ metingen		
Tekst (p.):	38	Bijlagen (p.):	22
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Malschaert, J.; Depreiter D.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vercruysse J.	Getekend door:Jeroen Vercruysse (Signa Getekend op:2026-01-27 08:56:40 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed Vercruysse Jeroen Vlaamse overheid
Projectleider:	Meire D.	Getekend door:Dieter Meire (Signature) Getekend op:2026-01-27 20:54:45 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed Meire Dieter Vlaamse overheid

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Bellafkih Abdelkarim Getekend op:2026-01-26 19:53:59 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed Bellafkih Abdelkarim Vlaamse overheid

Abstract

In project 21_079 worden de mogelijkheden en restricties van Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) voor het visualiseren van stroompatronen nagegaan. In dit rapport worden de metingen in de vispassage te Kerkhove als testcase voor de meettechniek gebruikt. Validatiemetingen werden uitgevoerd door het INBO met een elektromagnetische snelheidsmeter (EMS). Dronebeelden werden gemaakt door ATO en verwerkt met behulp van de Fudaa software. Op de drempels tussen de verschillende bekkens onderschat de LSPIV techniek de in situ opgemeten snelheden. In de bekkens zelf is de overeenkomst tussen LSPIV en EMS beter. Er werd eveneens een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij de frame rate en duurtijd van de geanalyseerde beelden werd gevarieerd.

Inhoudstafel

Abstract III
Inhoudstafel V
Lijst van de tabellen VII
Lijst van de figuren VIII
1 Inleiding 1
1.1 Doel van het rapport 2
2 Beschrijving en verwerking LSPIV meting 3
2.1 Opzet van de metingen 3
2.2 Input data 5
2.2.1 Camerabeelden 5
2.2.2 Grond controlepunten (GCP) 5
2.2.3 Puntsnelheidsmetingen 6
2.3 Fudaa LSPIV (v1.9.2) 6
3 Analyse 11
3.1 Effect van de pixelgrootte en frame rate op het resultaat 11
3.2 Effect van de duur/aantal beelden op het resultaat 13
3.2.1 Convergentie analyse 13
3.2.2 Transecten 15
3.2.3 Verschilkaarten 18
4 Validatie van de resultaten 20
4.1 LSPIV resultaten vergeleken met in situ gemeten stroomsnelheden 20
4.1.1 Bekken 1 – streefpeil + 10 cm 22
4.1.2 Bekken 1 – streefpeil - 10 cm 24
4.1.3 Bekken 5 – streefpeil + 10 cm 26
4.1.4 Bekken 5 – streefpeil – 10 cm 28
4.1.5 Vergelijking van de resultaten 30
4.1.6 Discussie 30
5 Conclusie 36
6 Referenties 38
Bijlage 1 Coördinaten Grondcontrolepunten (GCP's) B1
Bijlage 2 Overzicht beschikbare opnames B3
Bijlage 3 Resultaten LSPIV analyse – vector plots B5

Bijlage 4 Resultaten pixel en resolutie B7
Bijlage 5 Resultaten aantal beelden B9
Bijlage 6 Resultaten convergentie analyse B12
Bijlage 7 Transecten B14
Bijlage 8 Verschilkaarten B18
Bijlage 9 Vergelijking tussen verschillende software pakketten (Wijava et al. 2013) B21

Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Instellingen LSPIV-analyse en post-processing filters 7
Tabel 2 - Overzicht van de verschillende instellingen voor de LSPIV verwerking 11
Tabel 3 - Afwijking LSPIV metingen t.o.v. INBO metingen ter hoogte van Bekken 1 bij verhoogd streefpeil. 23
Tabel 4 - Afwijking LSPIV metingen t.o.v. INBO metingen ter hoogte van Bekken 1 bij verlaagd streefpeil .. 25
Tabel 5 - Afwijking LSPIV metingen t.o.v. INBO metingen ter hoogte van Bekken 5 bij verhoogd streefpeil. 27
Tabel 6 - Afwijking LSPIV metingen t.o.v. INBO metingen ter hoogte van Bekken 5 bij verlaagd streefpeil .. 29
Tabel 7 - Coördinaten en beschrijving van de Grondcontrolepunten (GCP's) B2
Tabel 8 - Overzicht beschikbare camerabeelden B3

Lijst van de figuren

Figuur 1 - Overzichtsfiguur van het sluiscomplex te Kerkhove (WL_22_030_1)..... 1

Figuur 2 - Detailbeeld van de vispassage in het sluiscomplex te Kerkhove met aanduiding van de 4 LSPIV meetzones. De symbolen en cijfers duiden de drempels aan (Vercruysse et al., 2024)..... 3

Figuur 3 - Origineel kleurenbeeld van bekken 5 met de vier GCP's rood omcirkeld. 5

Figuur 4 - Puntsnelheidsmetingen uitgevoerd op 6 oktober 2022, ter hoogte van de drempel van bekken 5 6

Figuur 5 - Georthorectificeerd beeld met aanduiding van de vier GCP's (in rode cirkel) op beide oevers. De groene rechthoek in de gele cirkel is de grootte van de interrogation area (IA). De rode punten vormen het raster (60x100) waarvoor voor elk punt een snelheidsvector wordt bepaald..... 8

Figuur 6 - Resultaat PIV analyse van het 1e beeldenpaar (boven). Gefilterd resultaat PIV analyse van het 1e beeldenpaar (midden). Resultaat na uitmiddeling van alle gefilterde resultaten (onderaan) 10

Figuur 7 - Resultaten LSPIV analyse o.b.v verschillende framerate en resolutie: 30 f/s & 0.01m (links boven), 10 f/s & 0.01m (rechts boven), 3 f/s & 0.01m (links onder), 10 f/s & 0.05m (rechts onder)..... 12

Figuur 8 - LSPIV analyse op basis van 30 beelden of 1s beeldmateriaal (links boven), 150 beelden of 5s beeldmateriaal (rechts boven), 300 beelden of 10s beeldmateriaal (links onder), 600 beelden of 20s beeldmateriaal (rechts onder)..... 13

Figuur 9 - Snelheden in Bekken 5 met de 4 locaties (zwarte kruisjes) voor de convergentie analyse..... 14

Figuur 10 - Resultaat van de convergentieanalyse voor 4 locaties in Bekken 5, zoals aangegeven in Figuur 9. 15

Figuur 11 - Locatie van de dwarstransecten (D1, D2, D3) en langstransecten (L1, L2, L3) in Bekken 5..... 16

Figuur 12 - Snelheden langsheen de 3 dwarstransecten en 3 langstransecten in Bekken 5 17

Figuur 13 - Verschilkaarten Bekken 5 18

Figuur 14 - Lokalisatie van de in-situ metingen in bekken 1 21

Figuur 15 - Lokalisatie van de in-situ metingen in bekken 5 21

Figuur 16 - Zoom t.h.v de drempel van bekken 1, hoge waterstand 22

Figuur 17 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 1, hoge waterstand 23

Figuur 18 - Zoom t.h.v de drempel van bekken 1, lage waterstand..... 24

Figuur 19 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 1, lage waterstand 25

Figuur 20 - Zoom t.h.v de drempel van bekken 5, hoge waterstand 26

Figuur 21 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 5, hoge waterstand 27

Figuur 22 - Zoom t.h.v de drempel van bekken 5, lage waterstand..... 28

Figuur 23 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 1, lage waterstand 29

Figuur 24 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 1, hoge waterstand met aanduiding (rode cirkels) van de metingen ter hoogte van de zwarte pijlen in Figuur 25 31

Figuur 25 - LSPIV Stromingsveld, bekken 1, hoge waterstand 32

Figuur 26 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 5, lage waterstand met aanduiding (rode cirkels) van de metingen ter hoogte van de zwarte pijlen in 33

Figuur 27 - LSPIV Stromingsveld, bekken 5, lage waterstand 34

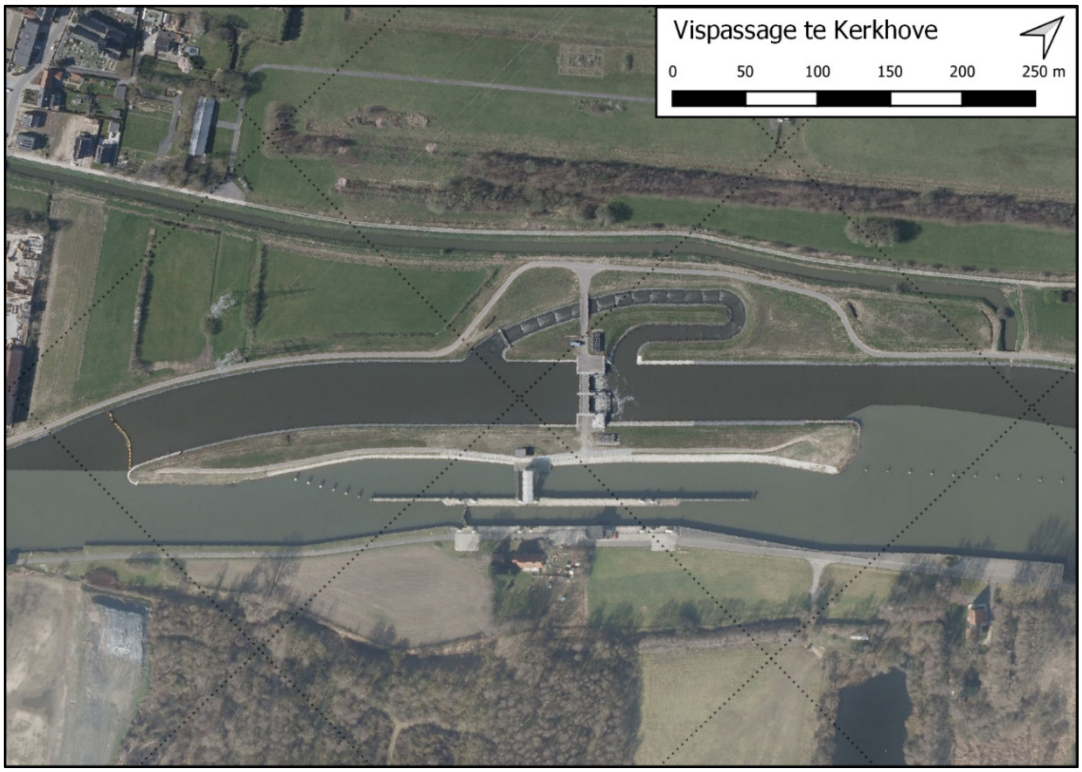
Figuur 28 – Stationaire schaduwzone ter hoogte van de afsluitconstructie van de vistrap waarbij tracers niet meer waarneembaar zijn in de schaduwzone (links). 36

1 Inleiding

In project 21_079 worden de mogelijkheden en restricties van Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) voor het visualiseren van stroompatronen nagegaan. Dit gebeurt op basis van terreinmetingen, met specifieke stroompatronen en traditionele snelheidsmetingen als validatie. Zo worden ook de metingen te Kerkhove als testcase voor de meettechniek gebruikt.

Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) heeft, in samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO), afgelopen jaren een groot aantal vispassage-ontwerpen uitgevoerd, waaronder ook de aanpassing van de vispassage op de Bovenschelde te Kerkhove (WL project 16_045).

Met het oog op toekomstige ontwerpen van dergelijke vispassages en de optimalisatie van de toegepaste ontwerpmethodiek (WL project 16_045), is het wenselijk het functioneren van de vispassage op de Bovenschelde te Kerkhove te evalueren. Hiertoe werden, na ingebruikname van de vispassage in april 2021, al enkele debietmetingen uitgevoerd (WL project 21_041). Uit deze metingen volgde dat peilmetingen in de bekkens nodig zijn om de vereiste debietscoëfficiënten voor breukstenen V-vormige overlaten te kunnen bepalen. Ook zijn stroomsnelheidsmetingen van belang om de passeerbaarheid (voor vissen) te kunnen evalueren.



Figuur 1 - Overzichtsfiguur van het sluiscomplex te Kerkhove (WL_22_030_1).

1.1 Doel van het rapport

Na een uitgebreide meetcampagne op 5, 6 en 7 oktober 2022 volgt een analyse van de hydraulische werking van de vispassage te Kerkhove (WL_22_030_1, Vercruysse et al. (2024)).

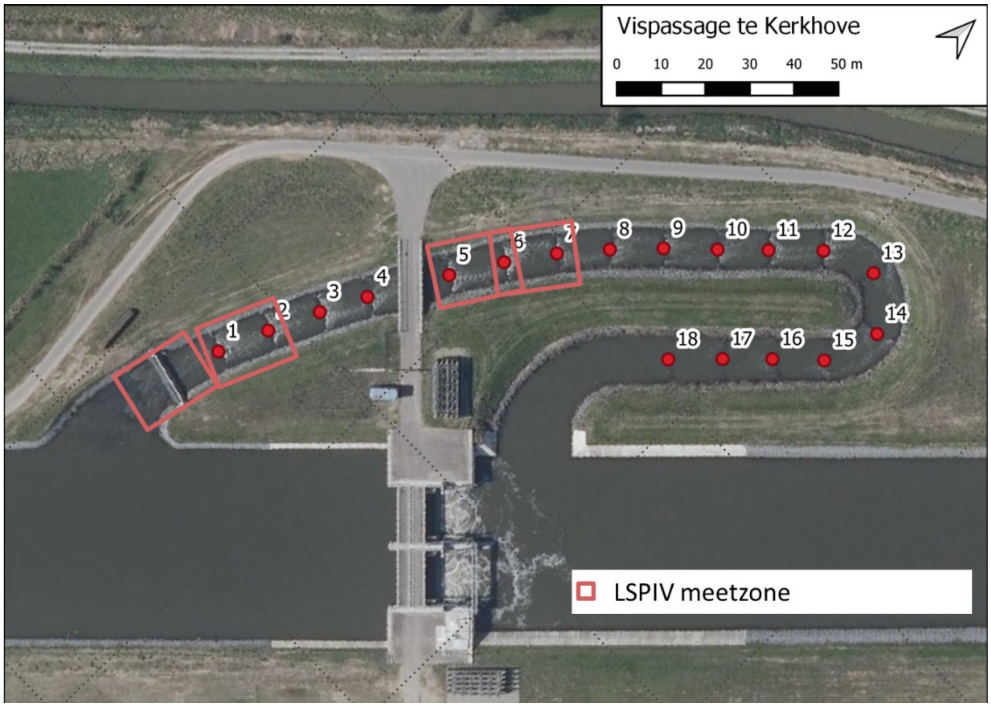
In dit rapport wordt de toepasbaarheid van de LSPIV-techniek (Large Scale Particle Image Velocimetry) voor het in kaart brengen van stromingspatronen ter hoogte van het wateroppervlak beoordeeld en meer specifiek als validatie-instrument voor de beoordeling van vispassages. Dit rapport richt zich enkel op de rapportage van de toegepaste LSPIV techniek. Een meer uitgebreid verslag van alle uitgevoerde metingen en analyse is terug te vinden in Vercruysse et al. (2024).

2 Beschrijving en verwerking LSPIV meting

LSPIV of Large Scale Particle Image Velocimetry is een techniek om op basis van minstens 1 beeldenpaar met gekende tussentijd de snelheid van een stroming in een 2D vlak (hier het wateroppervlak) te bepalen. Deze techniek is hier toegepast op basis van beelden die met een drone werden opgenomen.

2.1 Opzet van de metingen

De interessezone voor de LSPIV metingen is op voorhand bepaald en betreft bekkens 1 en 5 met de op- en afwaartse drempel (zodat drempel 1 en 5 in beeld zijn), zie Figuur 2. Ook voor de afsluitconstructie en bekken 6 werden de snelheden bepaald aan de hand van de LSPIV techniek.



Figuur 2 - Detailbeeld van de vispassage in het sluiscomplex te Kerkhove met aanduiding van de 4 LSPIV meetzones. De symbolen en cijfers duiden de drempels aan (Vercruysse et al., 2024).

De LSPIV metingen zijn uitgevoerd bij 3 condities: streefpeil, en een verhoging en verlaging met 10 centimeter ten opzichte van dit peil. Uiteindelijk werd de conditie met verhoogd peil niet geanalyseerd o.w.v. het ontbreken van een betrouwbare debietsmeting.

Tijdens het terreinbezoek van ATO en WL op 17 juni, 2022 is een testopname gemaakt met een drone (type DJI Phantom 4 RTK) met vaste 4K camera. De vlieghoogte van de drone bedroeg ca. 20 meter. De resolutie van de opname was 3840 x 2160 pixels, de framerate bedroeg 30 fps (frames per seconde). De resolutie komt overeen met een pixelgrootte van 4 mm. Bij de maximale snelheid, ongeveer 1,4 m/s, bedraagt de verplaatsing 0,04 m per beeld of 10 pixels.

Op deze beelden werd vanuit project 21_079 een beperkte PIV verwerking uitgevoerd. Uit de analyse van de resultaten volgt:

- de framerate, 30 fps (frames per seconde), is voldoende hoog;
- de verhouding tracergrootte, gepofte mais, ten opzichte van pixelgrootte is OK;
- de ingezette tracer, gepofte mais, zorgt voor een goed contrast;
- de zones waarin geen stroming of tracers aanwezig zijn hebben een hoge(re) onzekerheid;
- voor de zones met terugstroom resulteerde dit in een zone met lage snelheid waarbij de oriëntatie niet altijd duidelijk is;
- voor de drempels lijken de kernen met hoogste debiet goed door te komen. De hierbuiten liggende zones worden mogelijk onderschat. Voor deze zones is seeding noodzakelijk;
- de reflecties zorgen voor een overbelichting maar dit komt niet naar voren uit het uitgemiddeld (1 seconde) resultaat.
- In het verlengde van de kern van de jet treden staande golven op. Deze beïnvloeden het resultaat.

Op basis van bovenstaande inzichten zijn de LSPIV metingen als volgt georganiseerd:

- De LSPIV metingen zijn uitgevoerd op bekkens 1, 5 en 6 (zie Figuur 2) incl. de op- en afwaartse drempel. Deze bekkens zijn zo gekozen dat ook de drempels waarop de puntsnelheidsmetingen zijn uitgevoerd ook opgemeten worden d.m.v. LSPIV;
- Er is ook een LSPIV meting uitgevoerd over de afsluitconstructie (Figuur 2) zodat de aan- en afstroom in beeld wordt gebracht, en het effect op oppervlaktestroming kan gekwantificeerd worden;
- De metingen zijn uitgevoerd met een 4K-camera met een resolutie van 3840 x 2160 pixels en framerate van 30 fps;
- Het bereik van de drone omvat over de breedte de zone met steenbestorting en wordt in lengte gecentreerd ten opzichte van het midden van het bekken. Dit laat toe om de automatische beeldcorrectie voor bewegende beelden tijdens de verwerking o.b.v. de oevers te optimaliseren.
- Als referentie zijn vier grond controlepunten (GCP's) duidelijk in beeld gebracht. Twee op linkeroever en twee op rechteroever, ter hoogte van de op- en afwaartse drempel.
- De stroming overheen de drempels en specifiek de zone naar de randen toe werden geseed aangezien er een gebrek aan natuurlijke tracers is. Hiervoor werd gepofte mais en cacao doppen gebruikt. Uit de testmeting volgt dat gepofte mais naar detecteerbaarheid en grootte een goed resultaat geeft.
- De LSPIV metingen zijn gelijktijdig met de debietmeting uitgevoerd (aangezien geen belemmering van het beeld optreedt). De stroomsnelheidsmetingen kunnen niet gelijktijdig gebeuren.

2.2 Input data

In Tabel 2 is een overzicht weergegeven van de beschikbare beelden die gebruikt kunnen worden voor de verwerking van de ruwe videobeelden naar stroomsnelheden ter hoogte van het wateroppervlak.

2.2.1 Camerabeelden

Per bekken werd 10 seconden (of ca. 300 beelden) beeldmateriaal geselecteerd voor verdere verwerking. Een optimaal window van 10 seconden is geselecteerd op basis van volgende vereisten:

- Maximale hoeveelheid en verspreiding van de tracers;
- Ontbreken van schaduw;
- Maximale stabiliteit van de drone en dus de beelden;
- Maximale stabiliteit van het stromingsregime;
- Minimale hoeveelheid glinstering van het zonlicht op het wateroppervlak;
- In beeld zijn van de vier GCP's (grondcontrolepunten).

Tabel 2 in Bijlage 2 geeft een overzicht van alle beschikbare camerabeelden met vermelding van de verwerkte frames en eventuele bijzonderheden, voor de verschillende beelden.

2.2.2 Grond controlepunten (GCP)

Per bekken zijn door een landmeter van de Afdeling Technische Ondersteuning (ATO) van MOW-Vlaanderen vier GCP's ingemeten aan de hand van een RTK GNSS meting. De 4 GCP's liggen elk op een uithoek van het bekken en dus van het beeld (zie o.a. Figuur 3 en Figuur 5). Bijlage 1 geeft een overzicht van alle ingemeten GCP's, met bijhorende coördinaten.



Figuur 3 - Origineel kleurenbeeld van bekken 5 met de vier GCP's rood omcirkeld.

2.2.3 Puntsnelheidsmetingen

In bekken 1 en 5 zijn op verschillende plaatsen en dieptes (mobiele) puntsnelheidsmetingen uitgevoerd door INBO met een EMS snelheidsmeter (type Valeport 801). Door de sterke stroming is ervoor gekozen om de metingen uit te voeren vanuit een hoogtewerker (zie Figuur 4). Over het wateroppervlak werden telkens drie meetlinten gespannen dwars op de stroming. Een eerste meetlint werd boven de drempel gespannen. De overige twee meetlinten werden met een gelijke tussenafstand verdeeld over de lengte van het bekken. Markeringen op de meetlinten deden dienst als referentie voor de meetlocaties. Op elke positie/diepte wordt gedurende 1 minuut gemeten. Deze metingen zijn onder andere gebruikt ter validatie van de LSPIV snelheden (zie paragraaf 4.1). Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de puntsnelheidsmetingen wordt verwezen naar het rapport van Vercruysse et al. (2024).



Figuur 4 - Puntsnelheidsmetingen uitgevoerd op 6 oktober 2022, ter hoogte van de drempel van bekken 5

2.3 Fudaa LSPIV (v1.9.2)

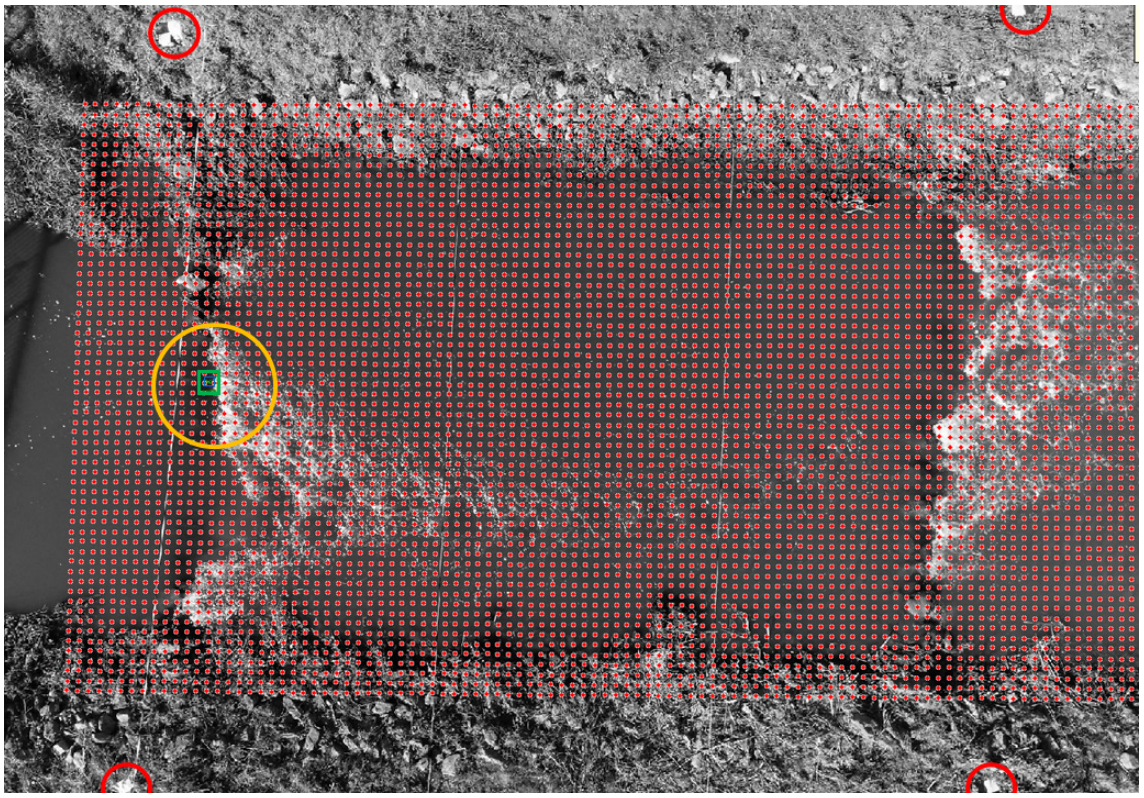
De verwerking van de videobeelden en LSPIV-analyse werd uitgevoerd met het softwarepakket Fudaa LSPIV (Le Coz et al., 2014), versie 1.9.2. De volgende verwerkingsstappen werden doorlopen:

- Inladen geselecteerde videobeelden en converteren van aparte RGB-beelden naar grijswaarden;
- Alle beelden werden gecorrigeerd voor ongewenste bewegingen van de dronecamera. Hiervoor werd het *automatische correctie-algoritme* in de Fudaa-LSPIV software gebruikt. Dit algoritme maakt gebruik van referentiepunten met een sterke verandering in intensiteit (b.v.b. randen, hoeken) op de verschillende beelden. Op de beelden is de waterloop gemaskeerd.
- Ortho-rectificatie van de beelden: Op alle beeldpixels is een geometrische correctie toegepast om afstanden te kunnen bepalen op het beeld. Op ieder beeld zijn vier topografisch ingemeten locaties zichtbaar (zie Figuur 5). Van deze vier locaties, of grond controle punten (GCP's), is de tussenafstand bepaald. De beeldpixel van de ingemeten GCP's zijn handmatig geselecteerd in de software en de berekende tussenafstanden ingevoerd. Aan de hand van deze gegevens is een 2D-ortho-rectificatie uitgevoerd op alle beelden.

- Definitie van een rechthoekig raster van 60 x 100 punten welke handmatig ingetekend werd in de software.
- LSPIV-analyse: op de gestabiliseerde en geortho-rectificeerde beelden is een LSPIV-analyse uitgevoerd. De verplaatsing van een groep tracers tussen opeenvolgende beelden is bepaald door het toepassen van een cross correlatie op basis van de pixelintensiteiten binnen een door de gebruiker gedefinieerde zone, het *Interrrogation Area (IA)*. In een door de gebruiker vooraf gedefinieerde zone rond het IA, het *Search Area (SA)* wordt naar hetzelfde patroon van intensiteiten gezocht op het volgende beeld. Er wordt aangenomen dat de locatie binnen het SA met de hoogst berekende correlatiecoëfficiënt de meest waarschijnlijke is die de verplaatsing vertegenwoordigd. Door deze berekening te herhalen voor elk rasterpunt wordt een volledig snelheidsveld bekomen (zie Figuur 6 bovenaan). De gebruikte instellingen zijn terug te vinden in onderstaande tabel:

Tabel 1 - Instellingen LSPIV-analyse en post-processing filters

Resolutie van de beelden	0,01 m/pixel
Rastergrootte	60 x 100 punten
Tussenafstand rasterpunten	0,18 x 0,18m
Interrogation Area (IA)	0,3 x 0,3m (of 30 pixels)
Search Area (SA)	+X (Sjp): 3,0m/s (of 10 pixels) -X (Sjm): 2,1m/s (of 7 pixels) +Y (Sip): 2,1m/s (of 7 pixels) -Y (Sim): 2,1m/s (of 7 pixels)
Post-processing filters	
Absolute snelheden	Min: 0,01 m/s Max: 2m/s
Correlatie	Min: 0,40 Max: 0,98



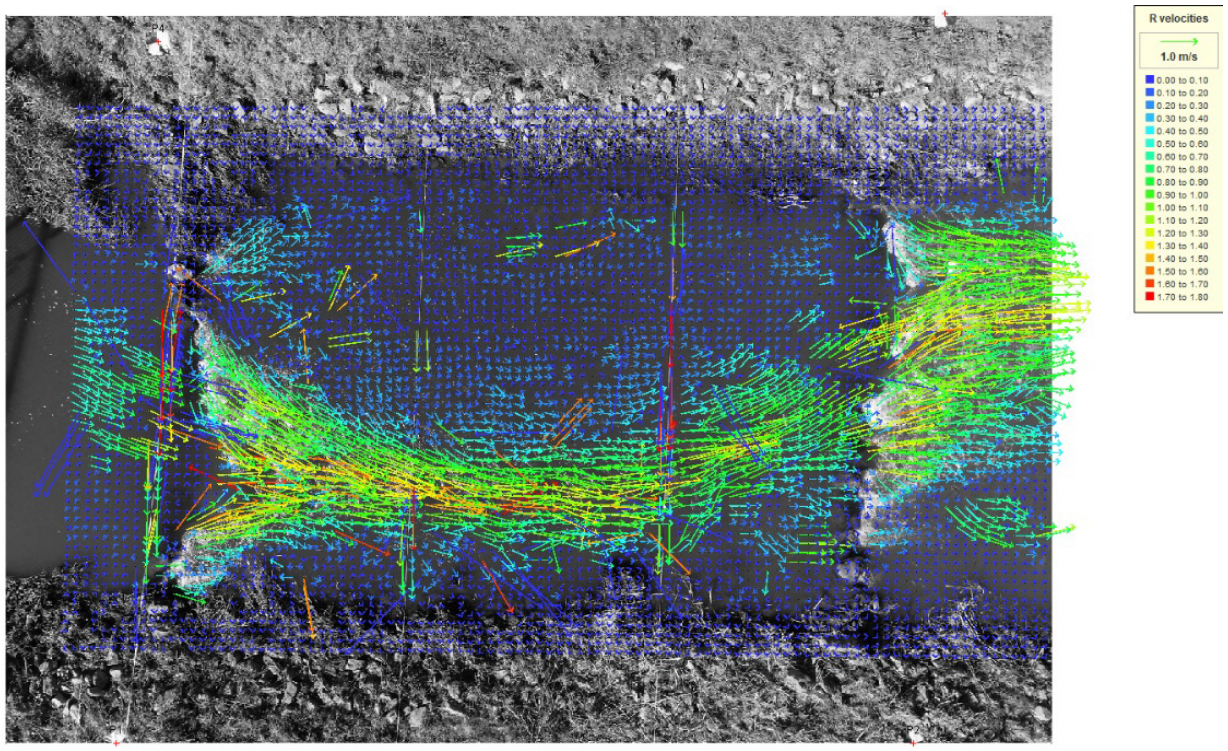
Figuur 5 - Georthorectificeerd beeld met aanduiding van de vier GCP's (in rode cirkel) op beide oevers. De groene rechthoek in de gele cirkel is de grootte van de interrogation area (IA). De rode punten vormen het raster (60x100) waarvoor voor elk punt een snelheidsvector wordt bepaald.

- Post-processing:
    - Filters:
        - De berekende snelheden zijn gefilterd op basis van verwachte maximale snelheden in de X (langs richting) en Y (dwars richting)-component.
        - De resultaten zijn gefilterd op basis van de berekende minimale en maximale correlatie coëfficiënt van de cross correlatie (zie Figuur 6 in het midden). Door een maximale waarde toe te passen is het mogelijk om foutieve snelheden ter hoogte van statische objecten (b.v.b. de oevers, grote stenen,…) zoveel als mogelijk te verwijderen.
    - Uitmiddelen van de resultaten over een dataset van 10 seconden of 300 beelden. Het resultaat is één raster per bekken met snelheidsvectoren op vaste rasterpunten (Figuur 6 onderaan).

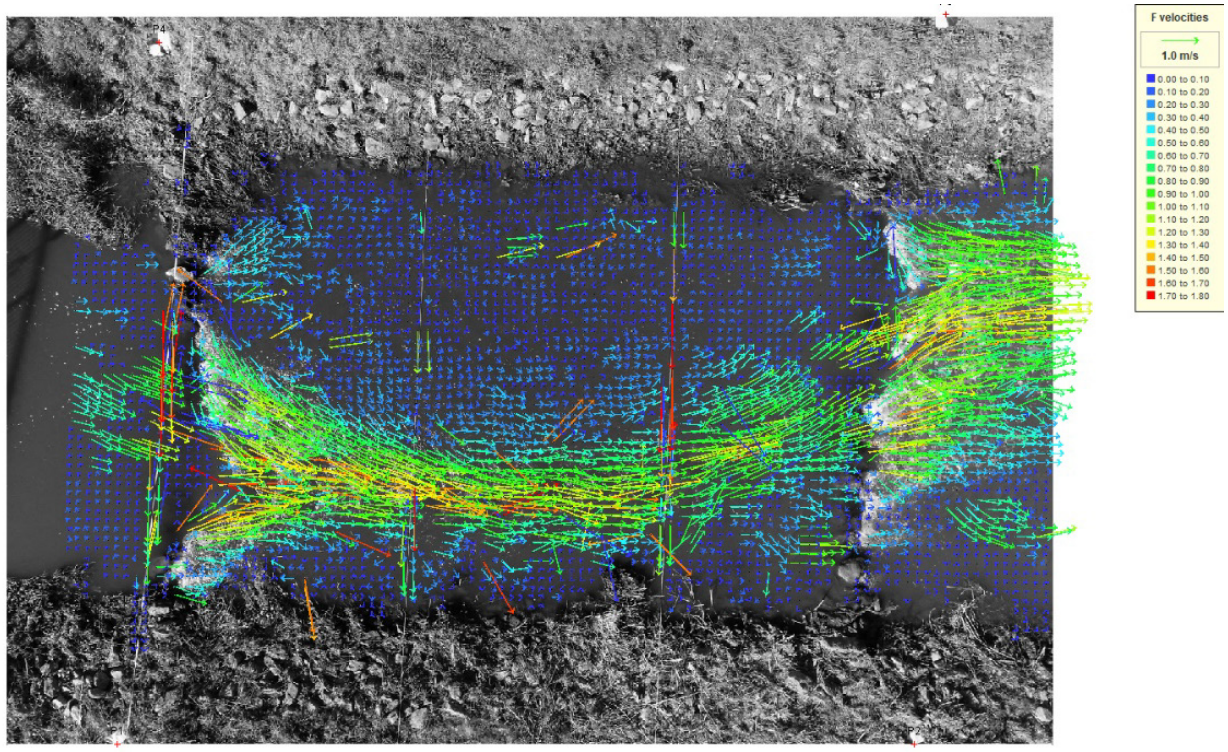
Verdere analyse gebeurde door de resultaten uit Fudaa-LSPIV verder te analyseren aan de hand van eigen Matlab scripts.

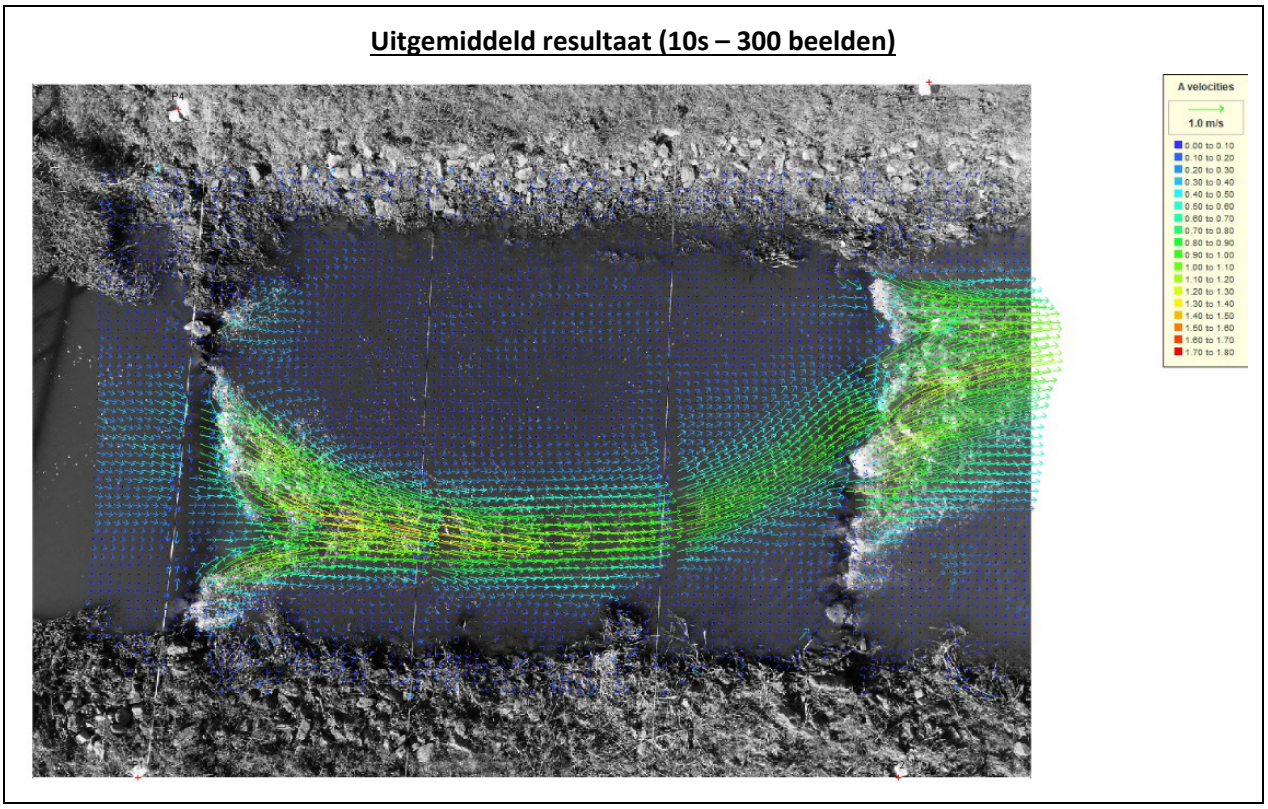
Voor elk bekken werd het finale raster uit de Fudaa-LSPIV software geëxporteerd en in het softwarepakket QGIS ingeladen. In QGIS werden de LSPIV-rasters getransformeerd naar een lokaal referentiestelsel om validatie met de puntsnelheidsmetingen mogelijk te maken.

ongefilterd resultaat



Gefilterd resultaat





Figuur 6 - Resultaat PIV analyse van het 1e beeldenpaar (boven). Gefilterd resultaat PIV analyse van het 1e beeldenpaar (midden). Resultaat na uitmiddeling van alle gefilterde resultaten (onderaan)

3 Analyse

3.1 Effect van de pixelgrootte en frame rate op het resultaat

De LSPIV verwerking in Bekken 5 aan de hand van opname *vis221007_02_B5_5.MOV* (zie Bijlage 2 Overzicht beschikbare opnames) werd een aantal keren opnieuw uitgevoerd waarbij de frame rate en resolutie van de originele beelden werd aangepast om het effect ervan op het resultaat te bepalen. Tabel 2 geeft een overzicht van de verschillende instellingen per verwerkingsscenario. Andere instellingen werden constant gehouden. De resultaten voor de verschillende scenario's zijn weergegeven in Figuur 7.

De *pixelgrootte van de beelden* kan worden aangepast in de verwerkingssoftware Fudaa-LSPIV bij de ortho-rectificatie van de beelden. Het is echter onduidelijk welke methode hiervoor wordt toegepast. Een *verlaging van de frame rate* werd gesimuleerd door het sub-samplen van de beelden. Om een frame rate van 10 fps te bekomen, werd telkens het eerste van 3 opeenvolgende beelden geselecteerd. Om een frame rate van 3 fps te bekomen, werd telkens het eerste van 10 opeenvolgende beelden geselecteerd.

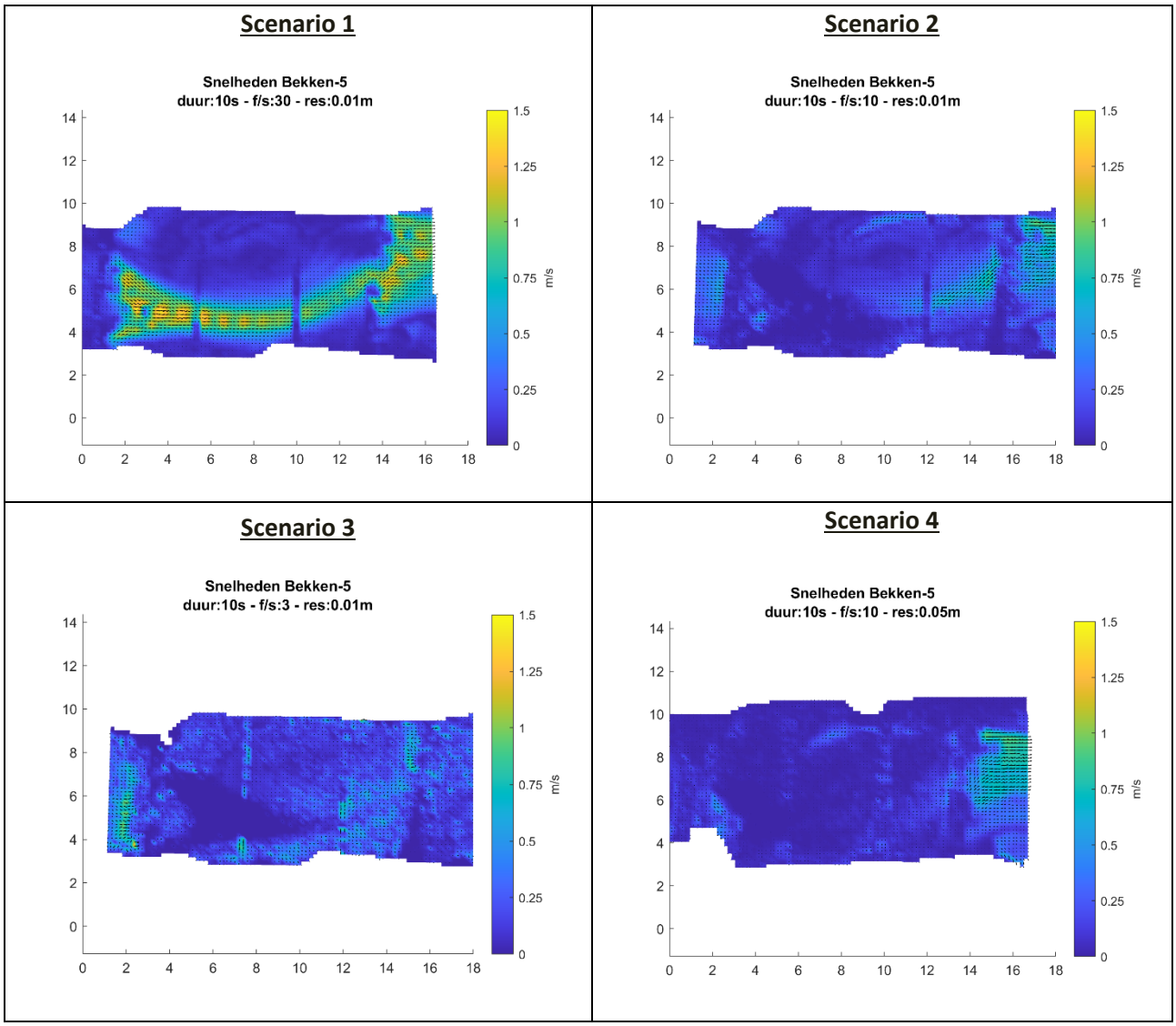
Tabel 2 - Overzicht van de verschillende instellingen voor de LSPIV verwerking

	Scenario 1 (Standaard)	**Scenario 2**	**Scenario 3**	**Scenario 4**	**Scenario 5**
Resolutie (pixelgrootte)	0,01m	0,01m	0,01m	0,05m	0,10m
Frame rate	30 fps	10 fps	3 fps	10 fps	3 fps
Totaal aantal beelden	300	100	30	100	30
duurtijd	10s	10s	10s	10s	10s

Uit de resultaten blijkt dat voor deze dataset zowel het aanpassen van de pixelgrootte van de beelden als de frame rate een significant effect hebben. De resolutie van de beelden staat in directe relatie met de grootte van de tracers. Tracers moeten voldoende groot zijn om nog detecteerbaar te zijn. Dit was een groot probleem bij Scenario 5. Het LSPIV-algoritme slaagde er niet in om snelheden te genereren. Hoogstwaarschijnlijk doordat de beeldresolutie (10 cm) te grof is om de tracers (popcorn met een diameter van ca. 1 – 1,5 cm) te detecteren. In Scenario 4 werden wel resultaten gegenereerd maar deze waren van een beduidend mindere kwaliteit dan bij het standaard scenario met een resolutie van 1 cm (zie Figuur 7).

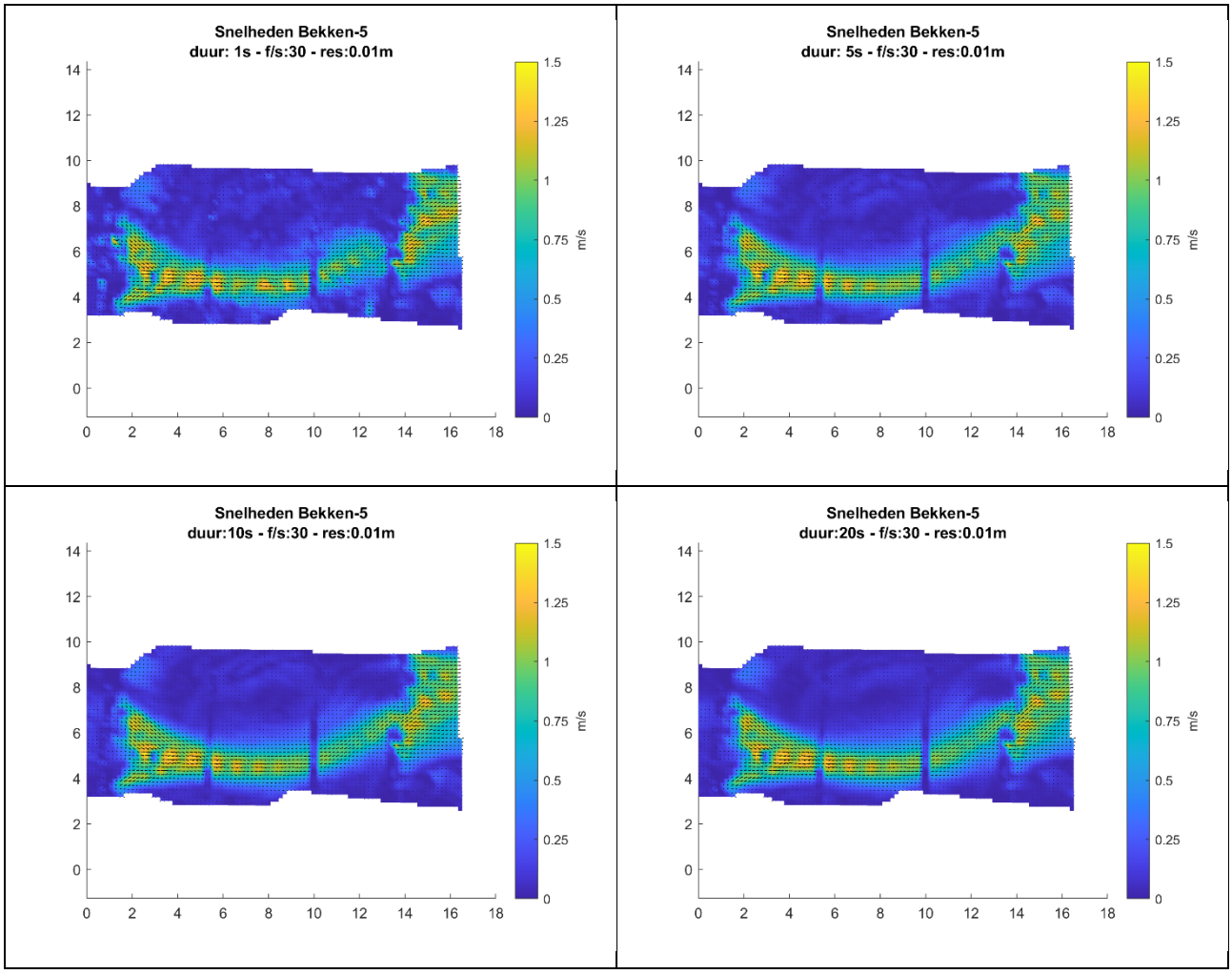
De frame rate staat in directe relatie met de snelheid van het water en tracers aan het wateroppervlak. Een (cluster) tracer(s) dient voldoende afstand af te leggen om een verplaatsing te detecteren, maar niet te ver om nog detecteerbaar te zijn in het volgende beeld. Uit de resultaten blijkt dat voor deze dataset het verlagen van de frame rate van 30 fps naar 10 fps een negatieve invloed heeft op de kwaliteit van het resultaat. Opmerkelijk zijn de hogere snelheden net voor de eerste drempel en de hogere snelheden nabij de bovenste oever van Bekken 5 (zie Figuur 7 en Bijlage 3). Scenario 3 (Figuur 7, linksonder) presteert ronduit ondermaats. Mogelijks kan het verlengen van de duurtijd, en dus een verhoging het aantal verwerkte beelden bij gelijke frame rate hiervoor een oplossing bieden.

De resultaten van de verschillende scenarios zijn terug te vinden in Figuur 7 en Bijlage 3.



Figuur 7 - Resultaten LSPIV analyse o.b.v verschillende framerate en resolutie: 30 f/s & 0.01m (links boven), 10 f/s & 0.01m (rechts boven), 3 f/s & 0.01m (links onder), 10 f/s & 0.05m (rechts onder)

3.2 Effect van de duur/aantal beelden op het resultaat

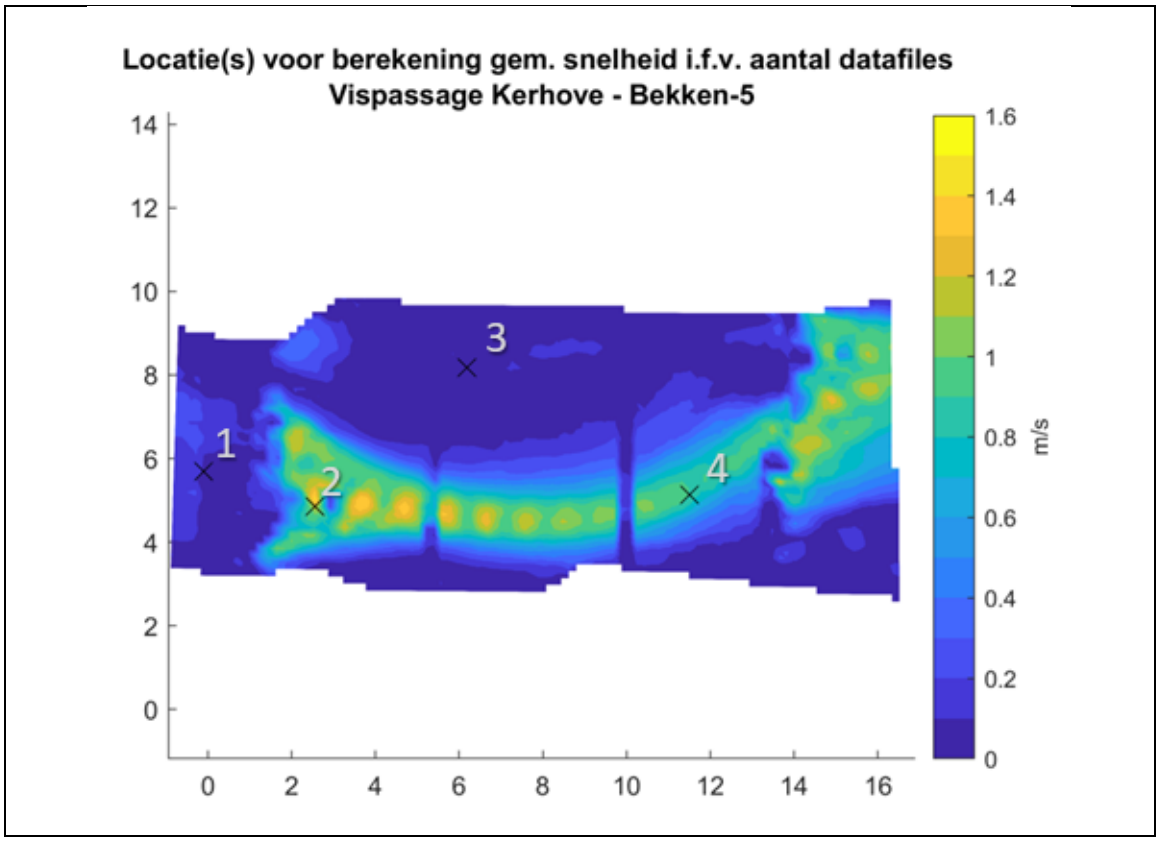


Figuur 8 - LSPIV analyse op basis van 30 beelden of 1s beeldmateriaal (links boven), 150 beelden of 5s beeldmateriaal (rechts boven), 300 beelden of 10s beeldmateriaal (links onder), 600 beelden of 20s beeldmateriaal (rechts onder)

3.2.1 Convergentie analyse

Tijdens de verwerking van de beelden dienen een aantal keuzes gemaakt te worden die een mogelijke impact hebben op het resultaat van de LSPIV analyse. Een van deze keuzes is het aantal te verwerken beelden dat in beschouwing wordt genomen bij het finaal uitmiddelen van de individuele LSPIV resultaten. Om het optimaal aantal beelden te bepalen werd een convergentie analyse uitgevoerd. Voor vier verschillende locaties in Bekken 5 van de vispassage werd de snelheid bepaald door opeenvolgens 1,2,3 tot en met 600-1 beeldenparen uit te middelen tot een finale snelheid voor elk punt in het raster. Deze snelheden werden uitgezet in functie van het aantal gebruikte beelden bij het uitmiddelen (zie Figuur 10). Die vier gekozen locaties in het bekken worden elk gekenmerkt door een apart stroomregime (zie Figuur 9):

- Locatie 1 bevindt zich centraal vlak voor de eerste drempel met stoorstenen;
- Locatie 2 bevindt zich in de centrale stroomzone vlak na de eerste drempel ongeveer ter hoogte van de V-vormige uitsparing in de drempel;
- Locatie 3 bevindt zich in een stromingsluwe zone nabij de oever;
- Locatie 4 bevindt zich in de centrale stroomzone vlak voor de achterste drempel.



Figuur 9 - Snelheden in Bekken 5 met de 4 locaties (zwarte kruisjes) voor de convergentie analyse

De gemiddelde stroomsnelheid ter hoogte van locatie 1 (linksboven in Figuur 10) bereikt een stabiele waarde rond 0,1 m/s vanaf de verwerking van ca. 500 beelden of 16,6 seconden.

De gemiddelde stroomsnelheid ter hoogte van locatie 2 (rechtsboven in Figuur 10) bereikt een stabiele waarde rond 1,18 m/s vanaf de verwerking van ca. 300 beelden of 10 seconden.

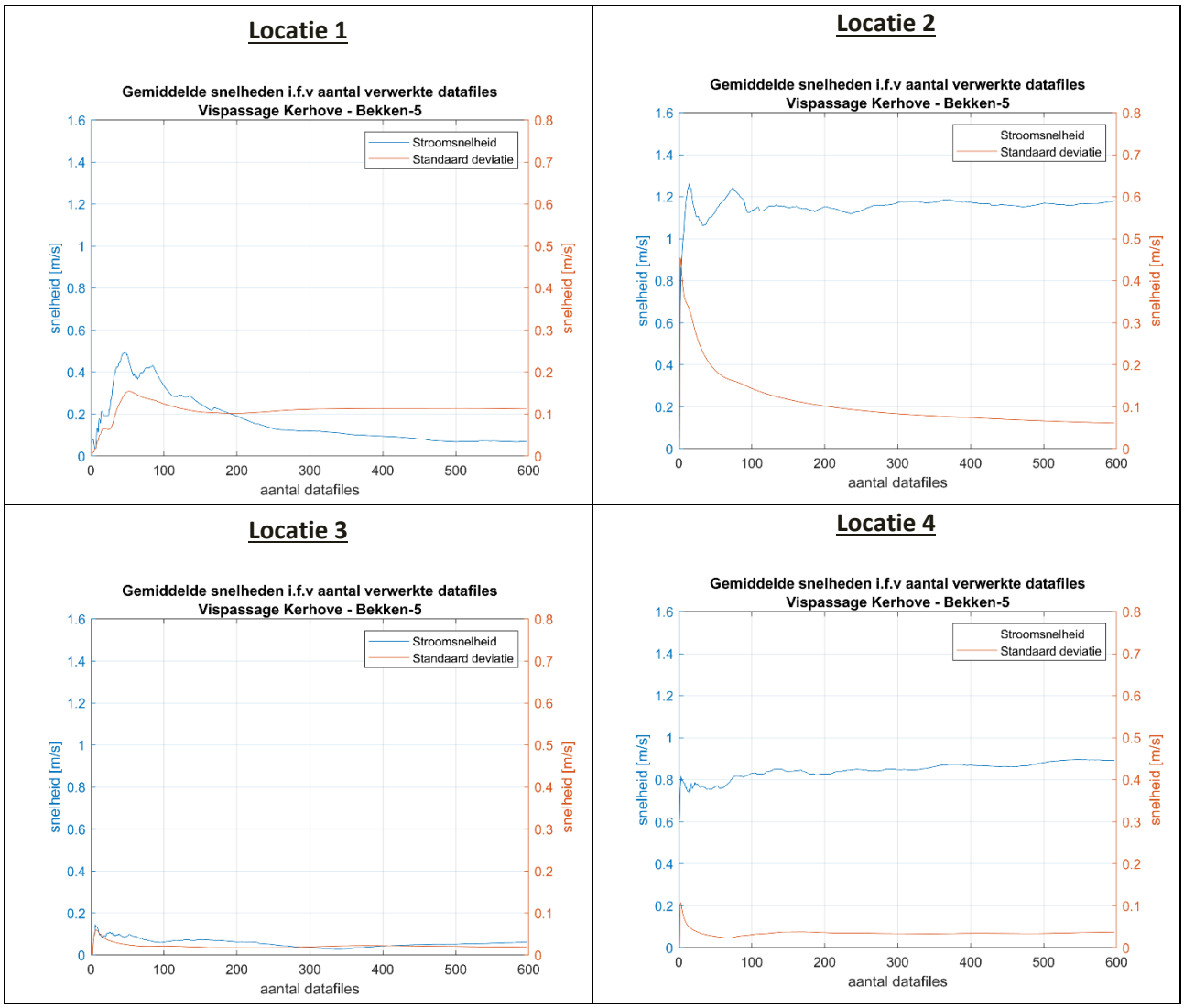
De gemiddelde stroomsnelheid ter hoogte van locatie 3 (linksonder in Figuur 10) bereikt een stabiele waarde rond 0,08 m/s vanaf de verwerking van ca. 100 beelden of 3,3 seconden

De gemiddelde stroomsnelheid ter hoogte van locatie 4 (rechtsonder in Figuur 10) bereikt een stabiele waarde rond 0,85 m/s vanaf de verwerking van ca. 100 beelden of 3,3 seconden.

Voor zowel locatie 2 als 4 lijken de snelheden zeer beperkt maar blijvend toe te nemen tot na de verwerking met 600 beelden. Dit zou mogelijks kunnen wijzen op een niet stabiel stroomregime en/of waterpeil.

Aan de hand van deze convergentie analyse blijkt dat het aangeraden is om een LSPIV analyse uit te voeren aan de hand van minstens 300 beelden, of 10 seconden aan beeldmateriaal voor deze dataset. Het gebruik van meer beelden zal geen significant verschillend resultaat opleveren, althans voor de 4 onderzochte locaties in het bekken. Een hoger aantal beelden zou slechts meer rekenkracht vragen van de verwerkingscomputer en dus een langere verwerkingstijd.

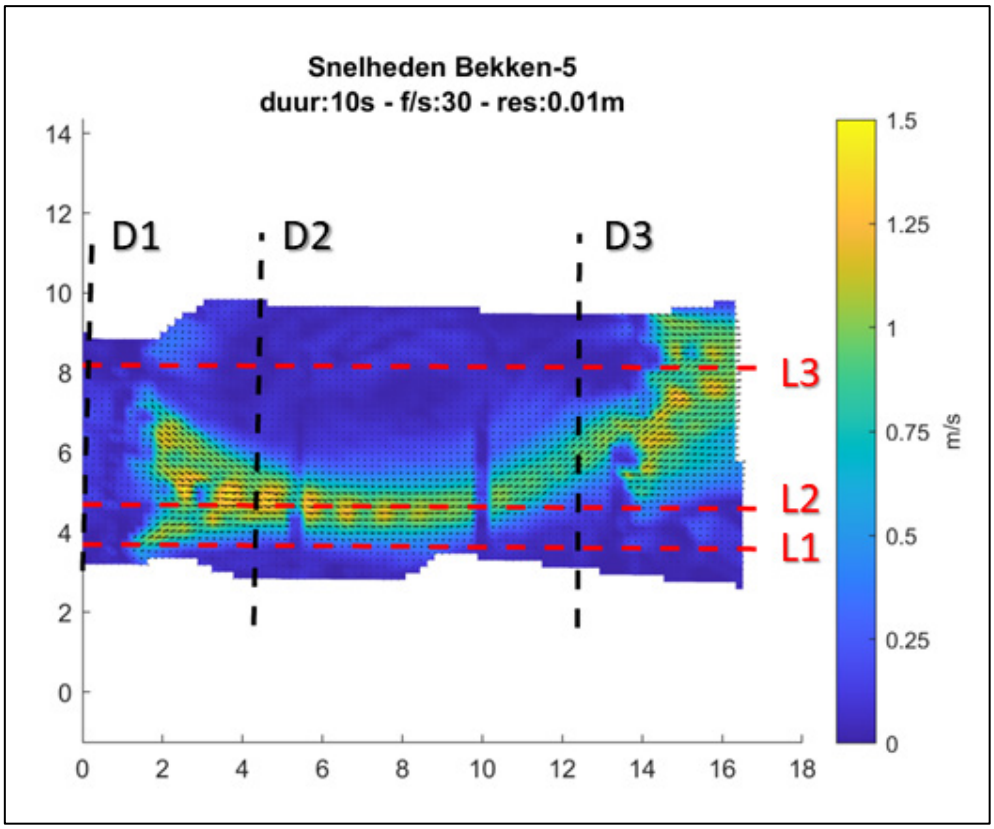
De verschillende figuren zijn ook terug te vinden in Bijlage 5.



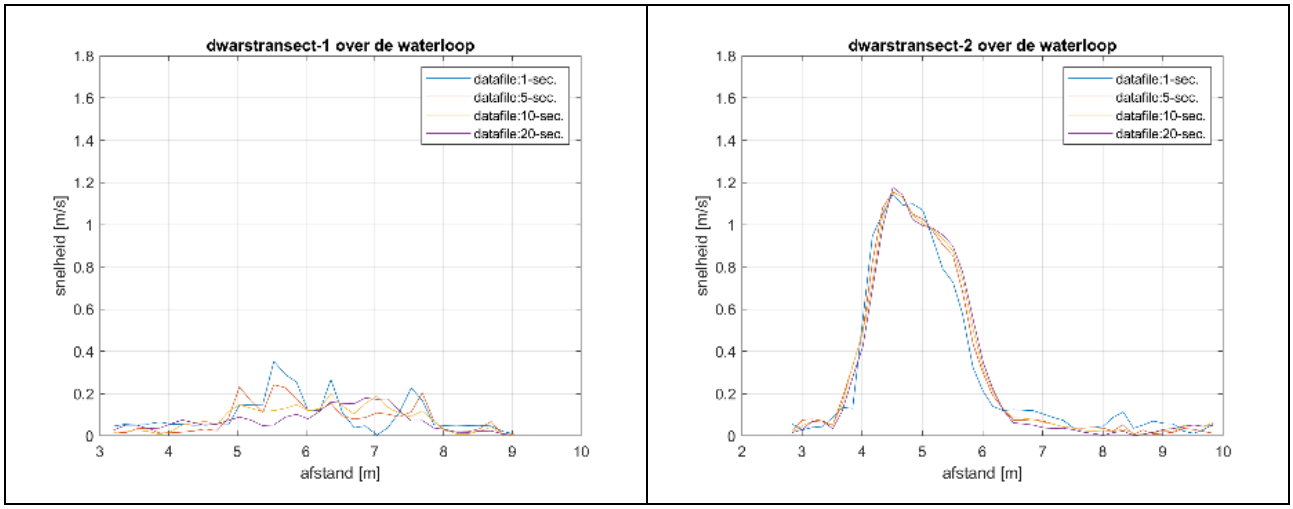
Figuur 10 - Resultaat van de convergentieanalyse voor 4 locaties in Bekken 5, zoals aangegeven in Figuur 9.

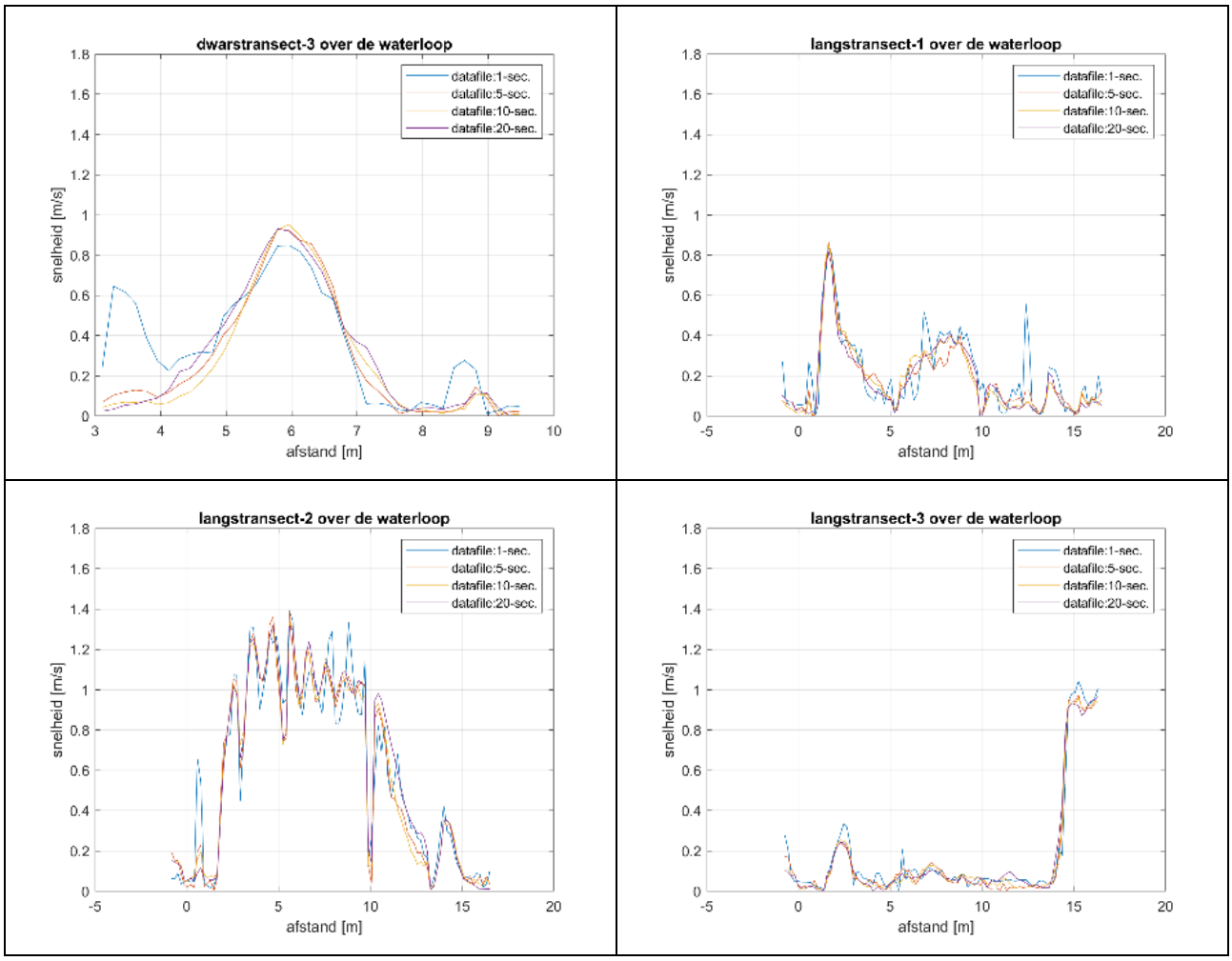
3.2.2 Transecten

Een alternatieve manier voor het beoordelen van de LSPIV analyse kan gebeuren aan de hand van het weergeven van dwars- en langstransecten. Figuur 11 geeft de ligging van 3 dwarstransecten (zwarte stippellijn) en 3 langstransecten (rode stippellijn) weer doorheen Bekken 5 van de vispassage. De snelheden langsheen deze zes transecten worden weergegeven in Figuur 12. Per transect worden de snelheden geplot van vier verschillende LSPIV analyses telkens met een verschillend aantal verwerkte beelden: 30 (1s), 150 (5s), 300 (10s) en 600 (20s).



Figuur 11 - Locatie van de dwarstransecten (D1, D2, D3) en langstransecten (L1, L2, L3) in Bekken 5





Figuur 12 - Snelheden langsheen de 3 dwarstransecten en 3 langstransecten in Bekken 5

De snelheden langsheen dwarstransect 1, net voor de voorste drempel van bekken 5 vertonen een vrij grote variabiliteit tussen de verschillende curves. Centraal zijn de snelheden iets hoger, tot ca. 0,2 m/s. Nabij de oevers vallen de snelheden terug tot quasi 0 m/s.

Ter hoogte van dwarstransect 2 vertoont de 1s-snelheidscurve een kleine afwijking ten opzichte van de andere drie curves die quasi hetzelfde verloop kennen. De maximale watersnelheid bedraagt ca. 1,15 m/s en is ongeveer dezelfde voor alle vier curves. Nabij beide oevers valt de watersnelheid terug tot ca. 0,05 m/s.

Ter hoogte van dwarstransect 3 vertoont het 1s-snelheidscurve een vrij grote afwijking ten opzichte van de andere drie resultaten. De maximale watersnelheid bedraagt ca. 0,95 m/s en is dezelfde voor het 5s-, 10s- en 20s-transect. Met uitzondering van de 1s-snelheidscurve wordt de 20s-snelheidscurve gekenmerkte door net iets hogere snelheden dan de andere, behalve nabij de oevers. Daar valt de snelheid van de 20s-snelheidscurve terug tot bijna 0 m/s.

Langstransect 1 bevindt zich onderaan Figuur 11 en wordt gekenmerkt door een piek in de snelheden van ca. 0,85 m/s net stroomafwaarts van de voorste drempel. Alle vier de curves tonen hier hetzelfde beeld. Elders langs het transect is de variabiliteit hoger voornamelijk van de 1s-snelheidscurve. De 10s- en 20s-snelheidscurves tonen een zeer gelijkaardig verloop.

Langstransect 2 wordt hoofdzakelijk gekenmerkt door een golvend patroon in het midden van het transect. Watersnelheden variëren hier tussen 0,9- en 1,4 m/s. Deze variaties komen overeen met de staande golven die goed waarneembaar zijn in de 2D-snelheidsplots (Figuur 9) en in de (video)beelden.

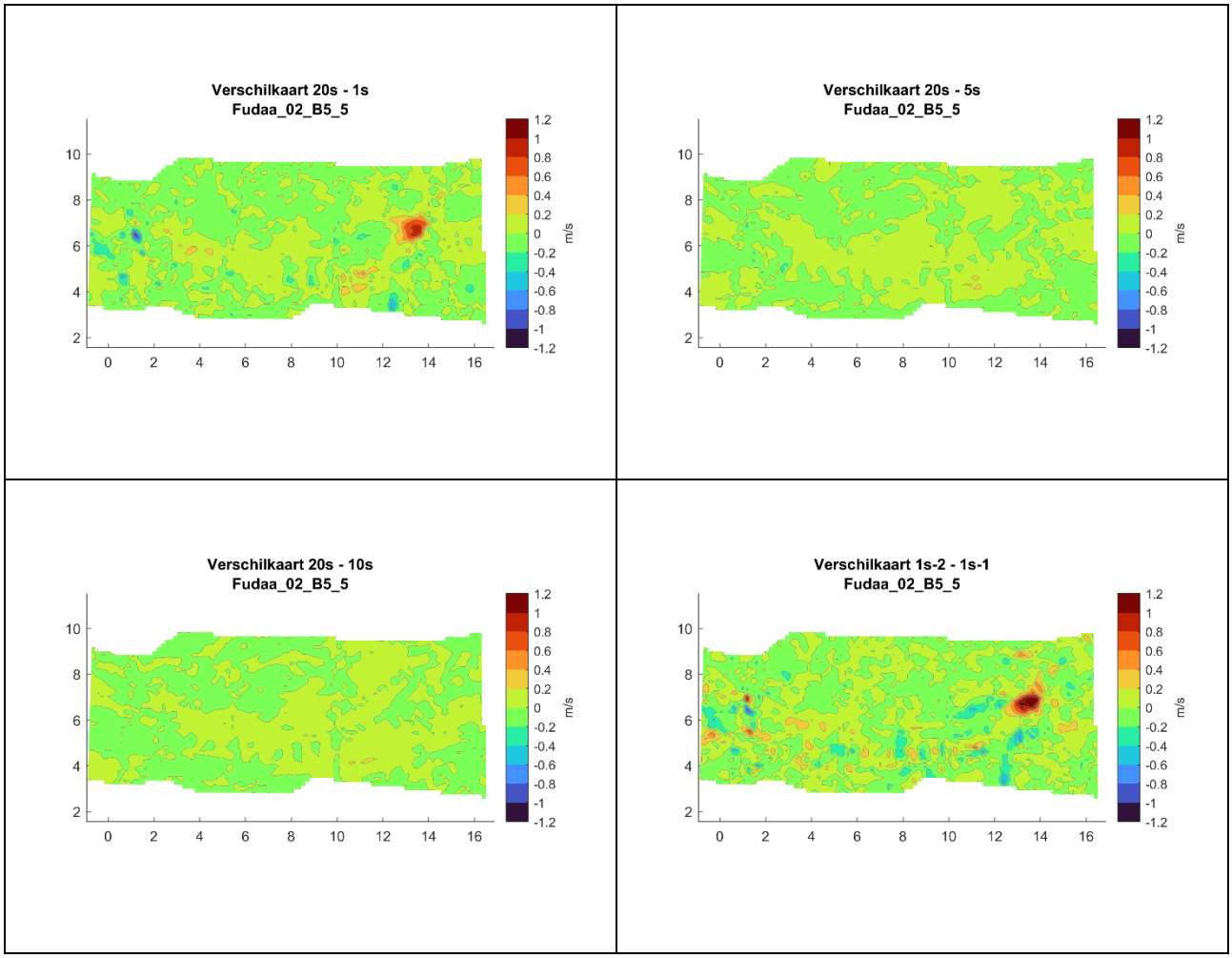
Ze mogen niet geïnterpreteerd worden als de horizontale watersnelheid aan het wateroppervlak. Dit patroon is hetzelfde voor alle vier de curves. Het effect van staande golven kan met andere woorden niet teniet gedaan worden door voldoende uit te middelen over een voldoende grote dataset.

Langstransect 3 doorkruist een zone met lage snelheden (< 0,2m/s). Enkel net na de voorste drempel (ca. 0,25m/s) maar voornamelijk net na de achterste drempel (0,95 m/s) lopen de snelheden op. Net zoals bij de bovenstaande transecten wijkt vooral de 1s-curve af ten opzicht van de drie andere. Enkel bij zeer lage snelheden (< 0,1 m/s) wijken de snelheden hier ook wat af van mekaar.

De verschillende figuren zijn eveneens terug te vinden in Bijlage 6.

3.2.3 Verschilkaarten

Een ruimtelijk beeld van de verschillen tussen snelheden bekomen door het uitmiddelen van een verschillend aantal beelden over een volledig bekken wordt bekomen door het opmaken van verschilkaarten. Hiervoor werden de individuele resultaten van een LSPIV analyse van Bekken 5 uitgemiddeld over respectievelijk 30, 150, 300 en 600 beelden. Aan een frame-rate van 30 frames per second (fps) betekent dit respectievelijk 1, 5, 10 en 20s aan beeldmateriaal. Onderstaande figuur toont de verschilkaart voor volgende uitgemiddelde datesets:



Figuur 13 - Verschilkaarten Bekken 5

Verschillen tussen de verwerking met 30 (1s) en 600 (20s) beelden tonen een verschil tot +- 1,0 m/s voornamelijk ter hoogte van beide drempels (linksboven Figuur 13). Verschillen tot ca. 0,6m/s zijn terug te vinden ter hoogte van de centrale hoofdstroom. Op andere plaatsen in het bekken zijn de verschillen beperkt tot +- 0,2 m/s.

Verschillen tussen de verwerking met 150 (5s) en 600 (20s) beelden blijven beperkt tot +- 0,2 m/s verspreid over het hele bekken (rechtsboven in Figuur 13). Slechts op enkele lopen de verschillen op tot ongeveer +- 0,4m/s.

Verschillen tussen de verwerking met 300 (10s) en 600 (20s) beelden blijven beperkt tot +- 0,2 m/s verspreid over het hele bekken (linksonder in Figuur 13). Er kan besloten worden dat 0,2 m/s de gemiddelde variatie is over het hele bekken.

Verschillen tussen de verwerking van twee opeenvolgende seconden (elk 30 beelden) toont een maximaal verschil tot 1.2 m/s net voor de achterste drempel. De grootste verschillen zijn terug te vinden in de stroomzone met verhoogde snelheden (rechtsonder in Figuur 13).

4 Validatie van de resultaten

De meting bij het streefpeil was niet geheel succesvol. Het effectieve waterpeil was lager dan het streefpeil, en niet stabiel. De gelijktijdige debietmeting was tevens niet succesvol. Verdere validatie in dit hoofdstuk heeft slechts betrekking op de metingen op 7 oktober tijdens verhoogd en verlaagd streefpijl.

4.1 LSPIV resultaten vergeleken met in situ gemeten stroomsnelheden

INBO heeft op drempel 1 en 5 van de vispassage, en op 2 afwaarts liggende raaien in het achterliggende bekken, in situ stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd. In het bekken werden metingen uitgevoerd tegen de bodem, in het midden van de waterkolom en nabij het oppervlak. Op de drempel werden bij voldoende waterdiepte een meting nabij het oppervlak en een meting nabij de bodem uitgevoerd. Verder naar de oevers toe werd een enkele puntsnelheidsmetingen uitgevoerd. Uit deze dataset kunnen de metingen nabij het oppervlak vergeleken worden met de LSPIV data.

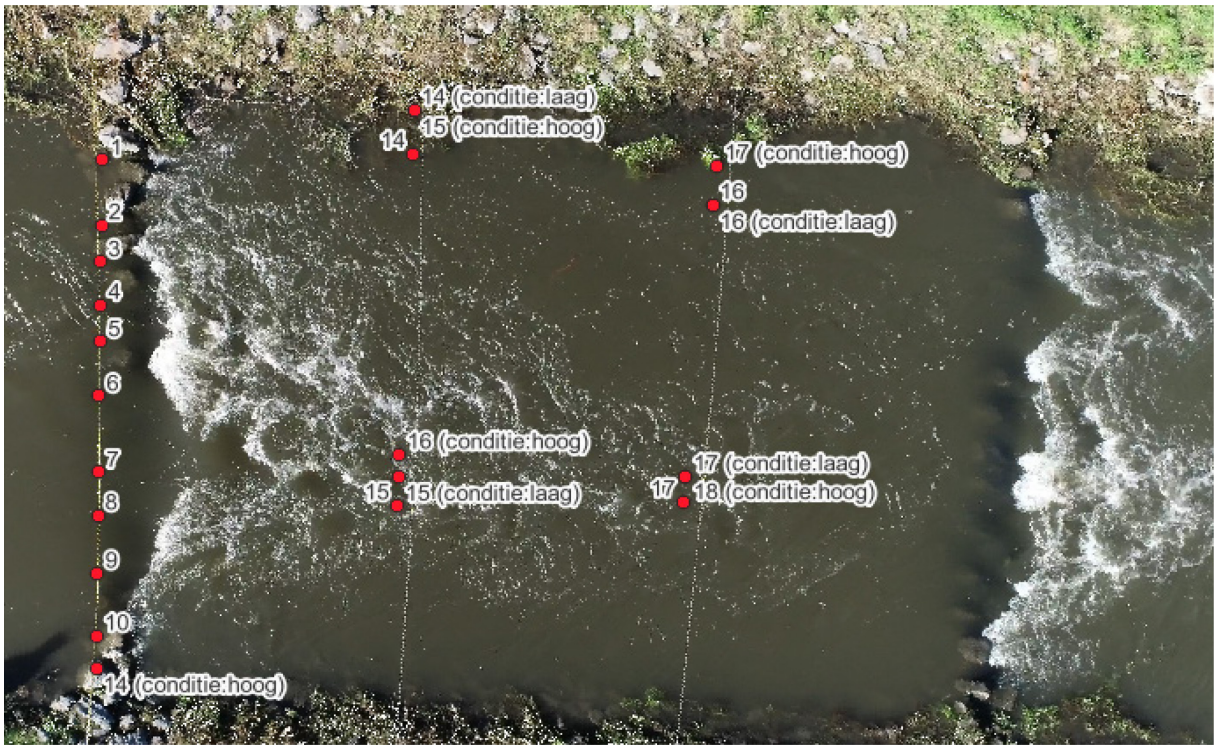
Er is voor elke drempel een meting uitgevoerd bij verhoogde en verlaagde debietcondities.

Een complicerende factor voor de analyse is dat er meetlinten ter hoogte van de meetraaien aanwezig zijn die de LSPIV resultaten lokaal verstoord hebben. Bij de verwerking van de snelheden is hiermee rekening gehouden door:

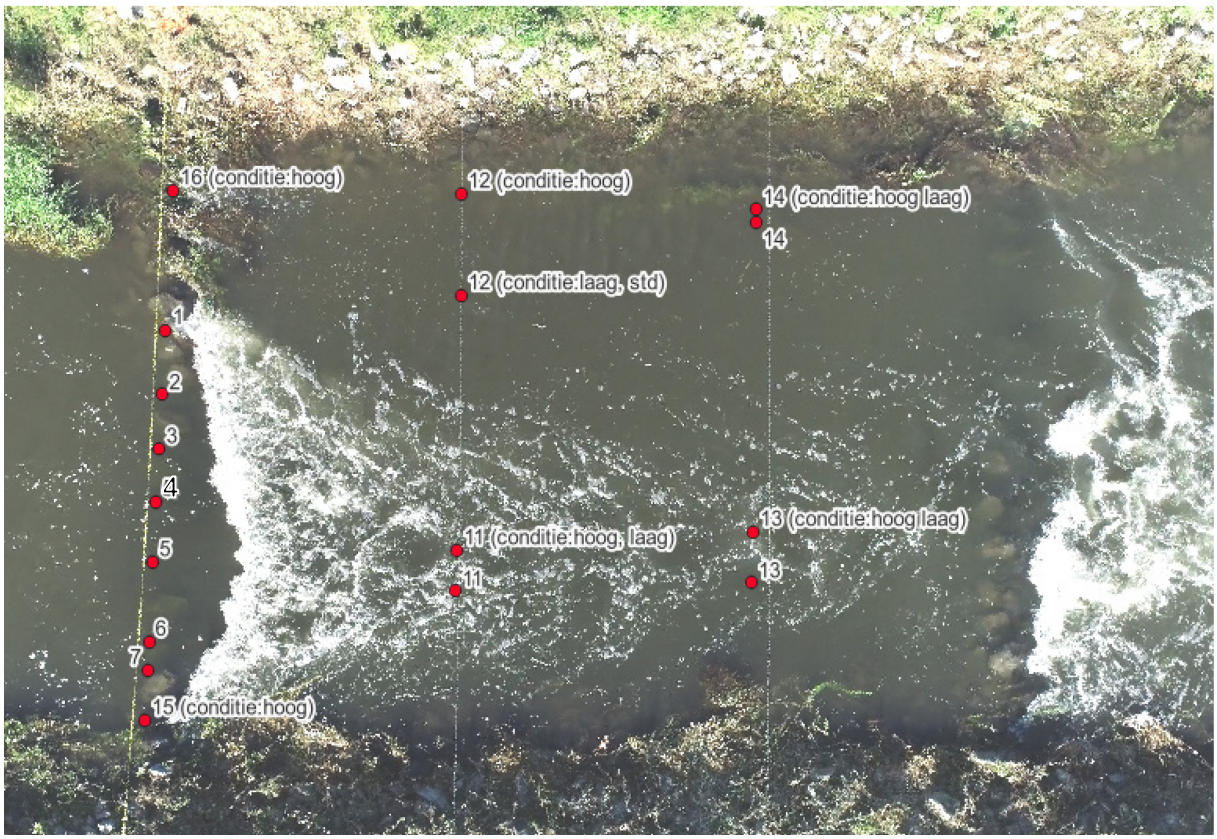
- de geaffecteerde punten – deze vertonen over het algemeen een zeer lage snelheid – uit de analyse te verwijderen;
- te werken met de punten die op- en afwaarts gelegen zijn en niet geaffecteerd lijken in een rechthoek van 1m lang en 0.5m breed rond het INBO meetpunt; op basis van deze puntenselectie wordt een regressie uitgevoerd om ter hoogte van het meetpunt een snelheid af te leiden.

De locaties van de metingen worden hieronder weergegeven in Figuur 8 en Figuur 9.

In onderstaande grafieken (Figuur 17, Figuur 19, Figuur 21 en Figuur 23) worden de LSPIV gebaseerde snelheden weergegeven als zwarte symbolen, de puntsnelheidsmetingen in het oranje.



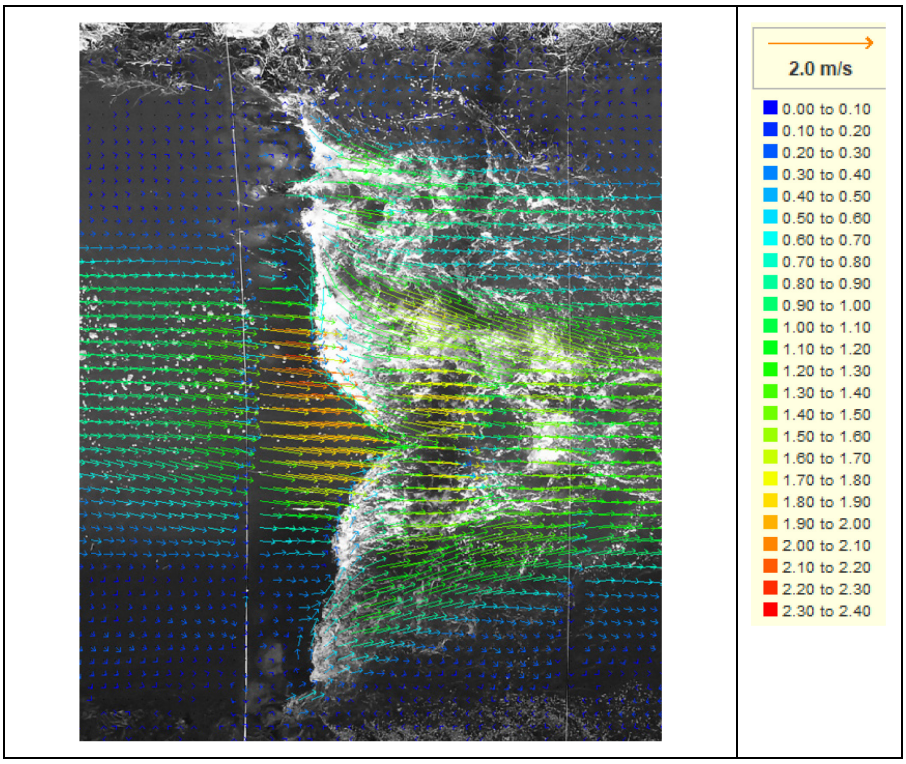
Figuur 14 - Lokalisatie van de in-situ metingen in bekken 1



Figuur 15 - Lokalisatie van de in-situ metingen in bekken 5

4.1.1 Bekken 1 – streefpeil + 10 cm

Tijdens de metingen bij een verhoogd peil (vrijdag 7/10 voormiddag) zijn er in bekken nr. 1 door INBO 11 stroommeetpunten op de drempel en 4 punten in het bekken zelf, met 2 punten in de hoofdstroom, en 2 punten in de luwte aan de linkeroever opgemeten.



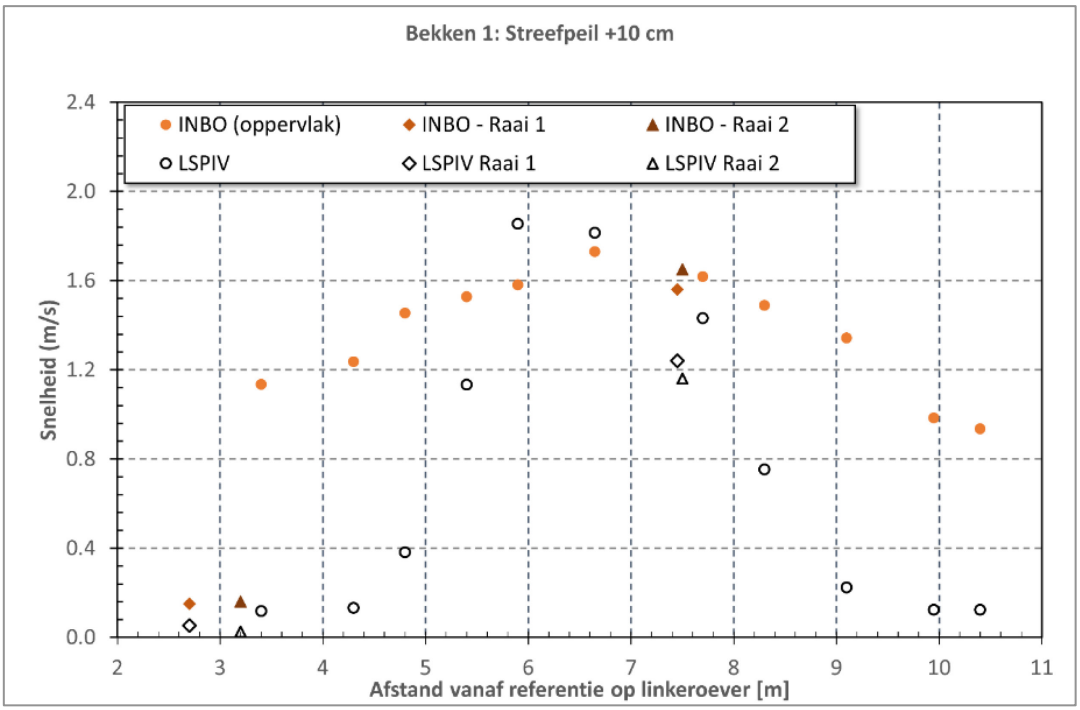
Figuur 16 - Zoom t.h.v de drempel van bekken 1, hoge waterstand

De in situ metingen op de drempel en aan het oppervlak vertonen, met uitzondering van de punten in de luwe keerstroom, een snelheid van 0,9 tot 1,2 m/s aan de randen en een toename van de snelheden in de richting van de centrale as, waar een snelheid van 1,7 m/s wordt opgemeten.

De LSPIV gebaseerde metingen op de drempel vertonen aan de randen een snelheid van 0,1 tot 0,4 m/s en 1,1 tot 1,8 m/s in de centrale as van de stroom. In de overgang tussen rand en centrum nemen de snelheden sterk toe.

De LSPIV methode blijkt dus in staat om in de goed ontwikkelde centrale stroom de snelheid vrij betrouwbaar (zie Tabel 3) in beeld te brengen, maar dit is niet het geval voor de zijkanten waar de LSPIV verwerking gestoord lijkt te worden wordt door de aanwezigheid van stenen. Daar bedraagt de afwijking tussen de in situ metingen en de LSPIV resultaten meer dan 100% (zie Tabel 3).

Op de raaien in het bekken zijn de stroomsnelheden wat lager dan in situ gemeten, maar minstens qua grootte-orde vergelijkbaar (1,2 m/s t.o.v. 1,6 m/s in de hoofdstroom, en 0,05 m/s t.o.v. 0,15 m/s in de luwe keerstroom). De grote afwijking t.h.v. punt 15 en 17 hebben betrekking op zeer lage absolute snelheden (LSPIV snelheden van 0,05 en 0,03 m/s ten opzicht van 0,15 en 0,16 m/s voor de in situ metingen).

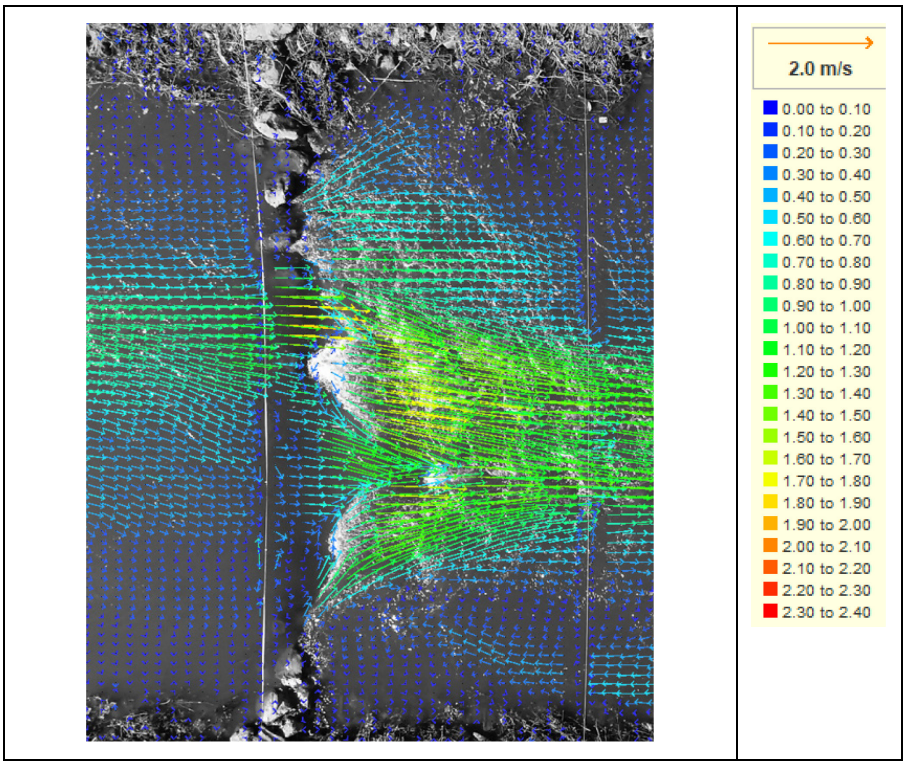


Figuur 17 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 1, hoge waterstand

Tabel 3 - Afwijking LSPIV metingen t.o.v. INBO metingen ter hoogte van Bekken 1 bij verhoogd streefpeil

Punt ID	Locatie	Afwijking [%]	Afwijking [m/s]
1	drempel	-863%	1,02
2	drempel	-841%	1,10
3	drempel	-282%	1,07
4	drempel	-35%	0,39
5	drempel	15%	-0,27
6	drempel	5%	-0,09
7	drempel	-13%	0,19
8	drempel	-98%	0,74
9	drempel	-500%	1,12
10	drempel	-696%	0,86
14	drempel	-657%	0,81
15	raai 1	-183%	0,10
16	raai 1	-26%	0,32
17	raai 2	-540%	0,14
18	raai 2	-42%	0,49

4.1.2 Bekken 1 – streefpeil - 10 cm

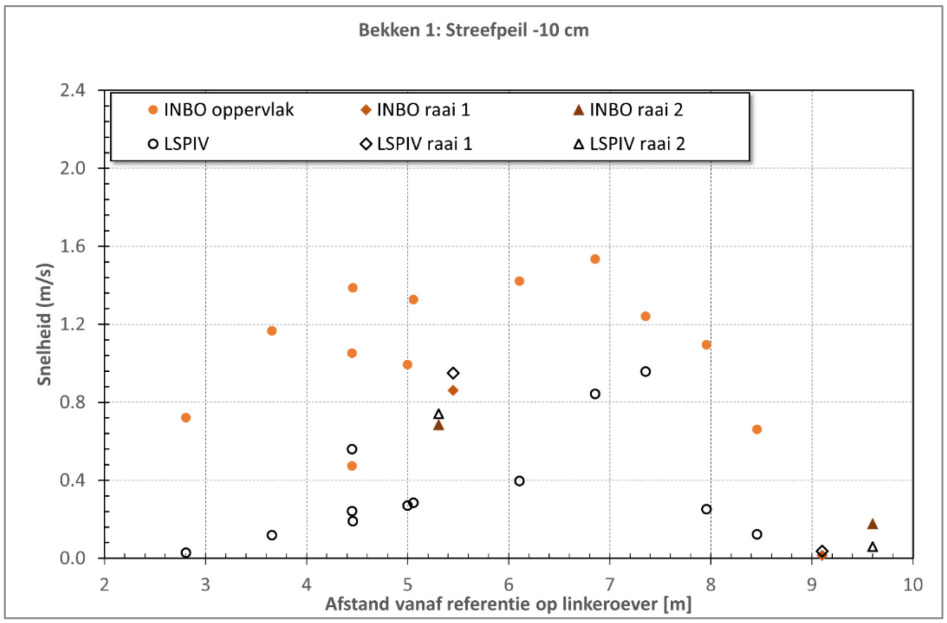


Figuur 18 - Zoom t.h.v de drempel van bekken 1, lage waterstand

De in situ metingen op de drempel en aan het oppervlak geven snelheden aan van 1,0 tot 1,6 m/s alhoewel ook enkele lagere meetwaarden voorkomen, van 0,5 à 0,7 m/s. Dit zijn snelheden die wellicht *tussen de stenen* zijn gemeten. In tegenstelling tot de conditie met hoge waterstand, is hier geen duidelijk ontwikkelde centrale hoofdstroom zichtbaar.

De LSPIV gebaseerde metingen op de drempel geven snelheden aan van 0,1 tot 1,0 m/s. De laagste meetwaarden worden aan de uiteinden van de drempel gemeten, en de hoogste snelheden worden ook in het midden waargenomen, al is dit beeld minder duidelijk ontwikkeld dan bij de conditie met hoge waterstand.

Op de raaien in het bekken zijn de LSPIV stroomsnelheden vrij vergelijkbaar met de in situ gemeten snelheden (0,7 m/s à 1,0 m/s in de hoofdstroom, en 0 tot 0,20 m/s in de luwe keerstroom). De grote afwijking tussen de INBO en LSPIV metingen t.h.v. punt 15 en 17 hebben betrekking op zeer lage absolute snelheden (LSPIV snelheden van 0.04 en 0.06 m/s ten opzichte van 0.02 en 0.17 m/s voor de in situ metingen).



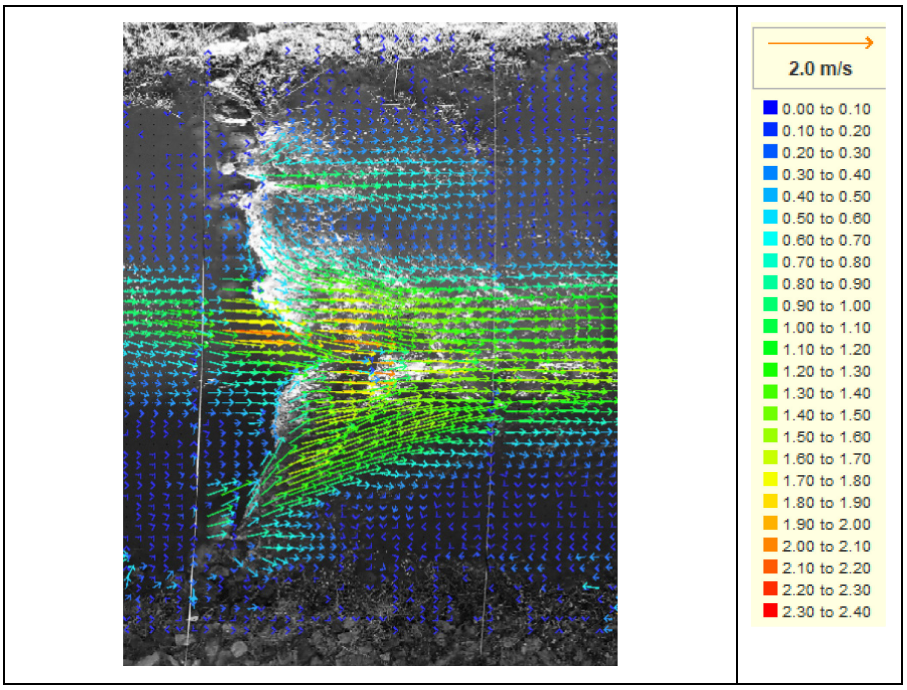
Figuur 19 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 1, lage waterstand

Tabel 4 - Afwijking LSPIV metingen t.o.v. INBO metingen ter hoogte van Bekken 1 bij verlaagd streefpeil

Punt ID	Locatie	Afwijking [%]	Afwijking [m/s]
1	drempel	-	-
2	drempel	-442%	0,54
3	drempel	-335%	0,84
4	drempel	-30%	0,28
5	drempel	-82%	0,69
6	drempel	-259%	1,02
7	drempel	-367%	1,04
8	drempel	-629%	1,20
9	drempel	-890%	1,05
10	drempel	-2490%	0,69
11	drempel	-268%	0,72
12	drempel	-337%	0,81
13	drempel	15%	-0,09
15	raai 1	59%	-0,02
16	raai 1	9%	-0,09
17	raai 2	-193%	0,12
18	raai 2	8%	-0,06

4.1.3 Bekken 5 – streefpeil + 10 cm

Tijdens de metingen in bekken nr. 5 zijn er 7 INBO stroommeetpunten op de drempels en 4 punten in het achtergelegen bekken, met 2 punten in de hoofdstroom, en 2 punten in de luwte aan de linkeroever.

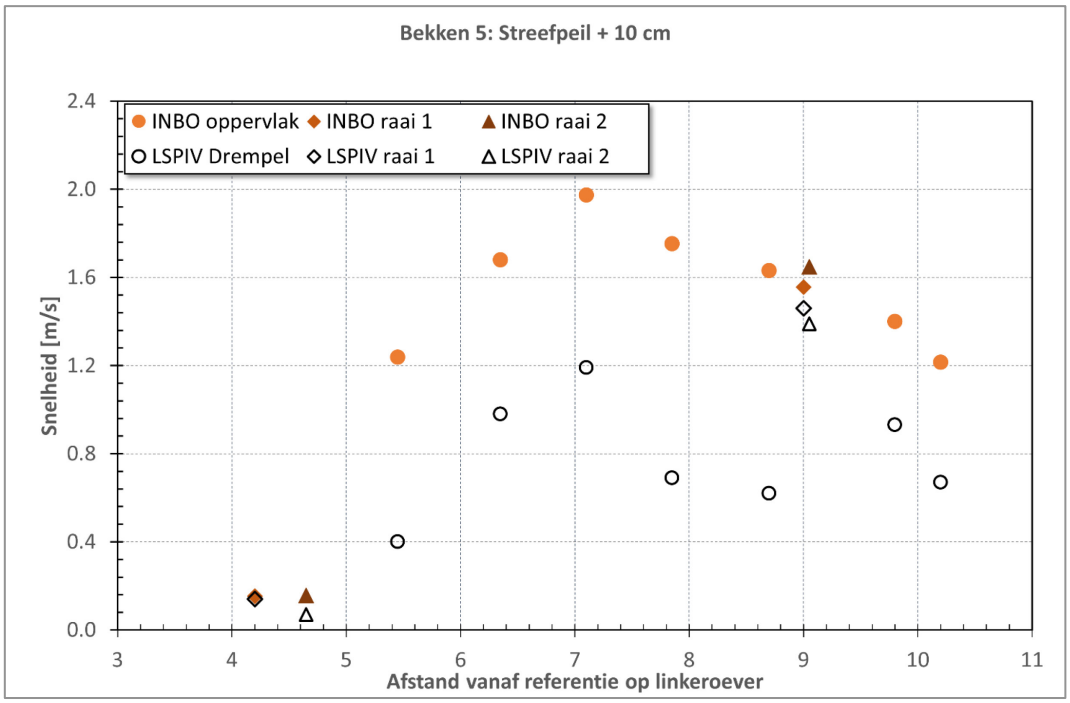


Figuur 20 - Zoom t.h.v de drempel van bekken 5, hoge waterstand

De in situ metingen op de drempel en aan het oppervlak geven snelheden aan van 1,2 tot 2,0 m/s. Bij de verhoogde waterstand is een brede piek in stroomsnelheid in het midden van de stroom aanwezig.

De LSPIV gebaseerde metingen op de drempel geven snelheden aan van 0,4 tot 1,2 m/s. Er is een minder duidelijk ontwikkelde piek aanwezig, maar het patroon van toe- en afname dat aanwezig is in de in situ metingen lijkt wel enigszins gevolgd.

Op de raaien in het bekken zijn de LSPIV stroomsnelheden vrij vergelijkbaar met de in situ gemeten snelheden (1,5 m/s in de hoofdstroom, en 0,10 m/s in de luwe keerstroom).

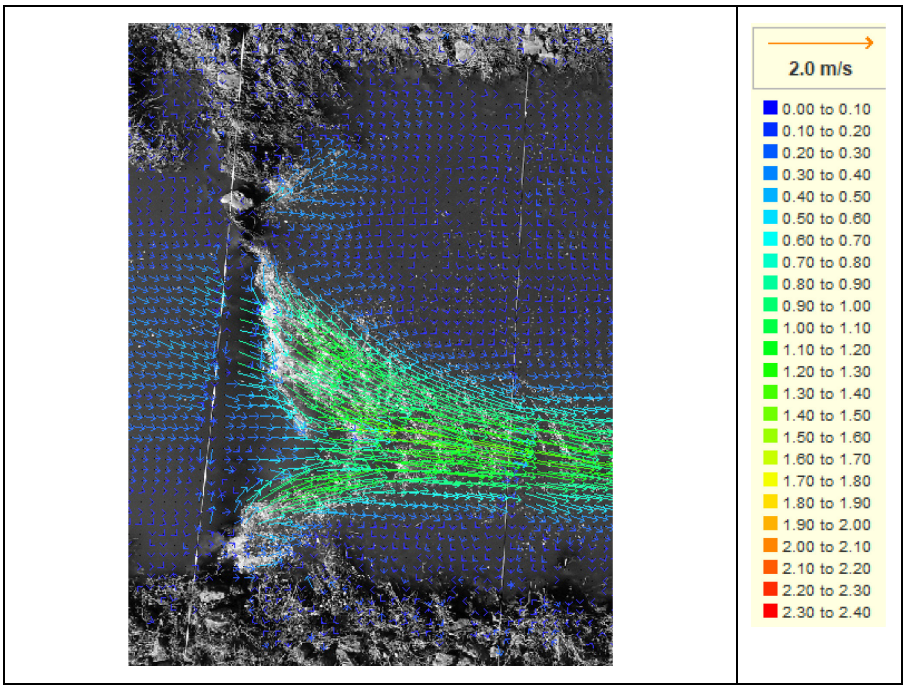


Figuur 21 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 5, hoge waterstand

Tabel 5 - Afwijking LSPIV metingen t.o.v. INBO metingen ter hoogte van Bekken 5 bij verhoogd streefpeil

Punt ID	Locatie	Afwijking [%]	Afwijking [m/s]
1	drempel	-209%	0,84
2	drempel	-71%	0,70
3	drempel	-66%	0,78
4	drempel	-154%	1,06
5	drempel	-163%	1,01
6	drempel	-51%	0,47
7	drempel	-81%	0,54
11	raai 1	-9%	-0,14
12	raai 1	-7%	-1,46
13	raai 2	-123%	-0,07
14	raai 2	-19%	-1,39
15	drempel	-	-
16	drempel	-	-

4.1.4 Bekken 5 – streefpeil – 10 cm

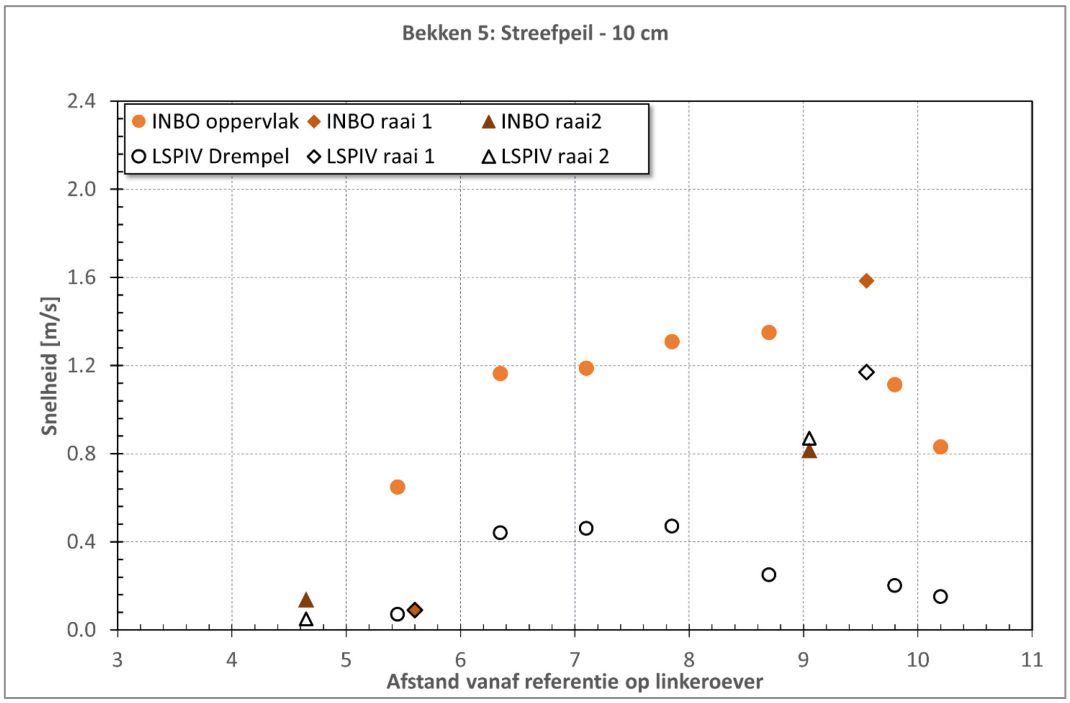


Figuur 22 - Zoom t.h.v de drempel van bekken 5, lage waterstand

De in situ metingen op de drempel en aan het oppervlak geven snelheden aan van 0,6 à 0,8 m/s aan de randen en 1,2 m/s tot 1,4 m/s in een brede zone centraal.

De LSPIV gebaseerde metingen op de drempel geven snelheden aan van 0,1 tot 0,2 m/s aan de randen en 0,4 à 0,5 m/s in het centrale deel.

Op de raaien in het bekken zijn de LSPIV stroomsnelheden redelijk vergelijkbaar met de in situ gemeten snelheden (0,8 tot 1,6 m/s in de hoofdstroom, en 0 tot 0,20 m/s in de luwe keerstroom).



Figuur 23 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 1, lage waterstand

Tabel 6 - Afwijking LSPIV metingen t.o.v. INBO metingen ter hoogte van Bekken 5 bij verlaagd streefpeil

Punt ID	Locatie	Afwijking [%]	Afwijking [m/s]
1	drempel	-825%	0,58
2	drempel	-164%	0,72
3	drempel	-158%	0,73
4	drempel	-178%	0,84
5	drempel	-440%	1,10
6	drempel	-457%	0,91
7	drempel	-453%	0,68
11	raai 1	-3%	0,00
12	raai 1	-35%	0,41
13	raai 2	-176%	0,09
14	raai 2	6%	-0,06
15	drempel	-	-
16	drempel	-	-

4.1.5 Vergelijking van de resultaten

Er valt een onderscheid te maken tussen de metingen uitgevoerd op de drempels en in de achterliggende bekkens (raai 1 en raai 2). Op de drempels is de overeenkomst tussen de snelheden over het algemeen zwak:

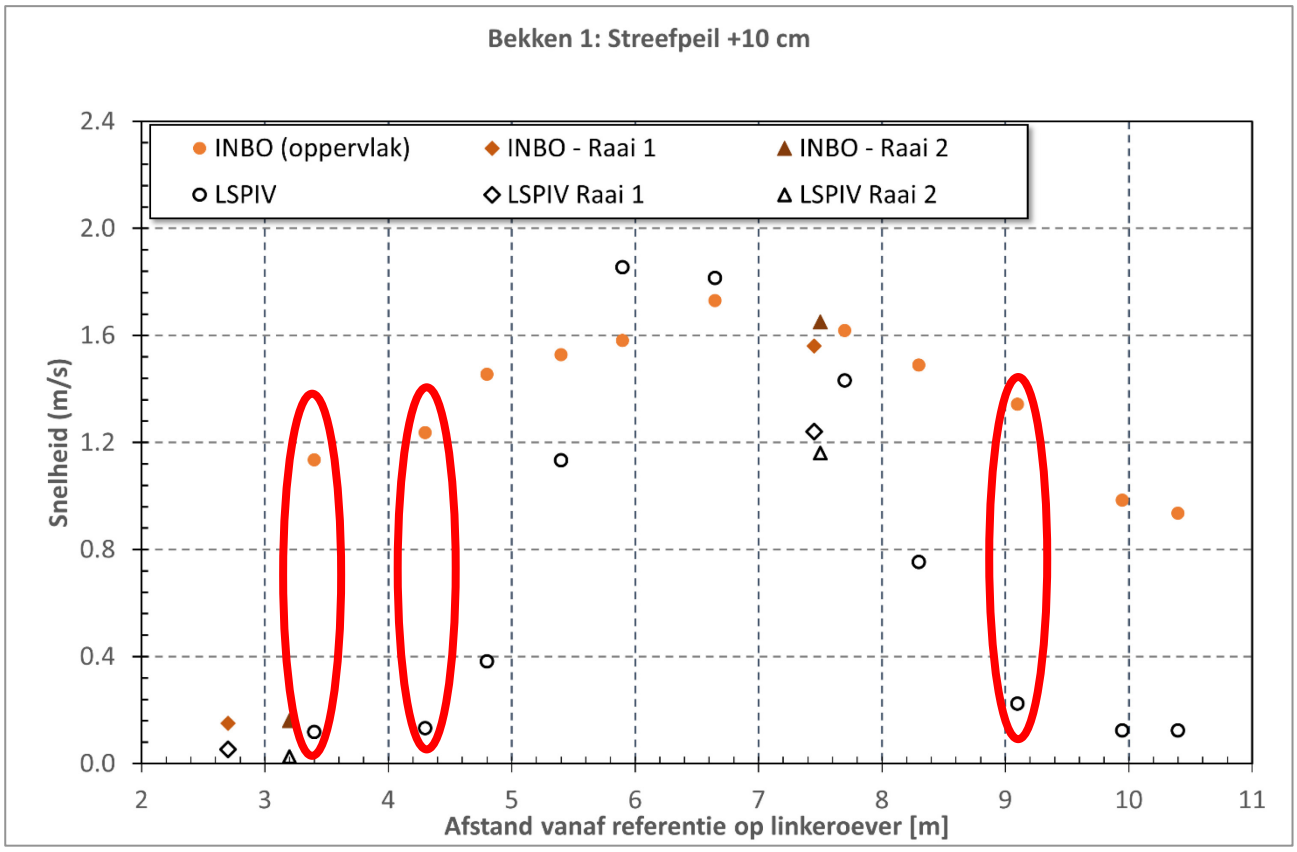
- Op drempel 1 is bij hoge waterstand een centrale stroom ontwikkeld, die voor beide methoden vergelijkbare snelheden oplevert; naar de randen toe slaagt de LSPIV methode echter niet om de in situ metingen te benaderen.
- Bij lage waterstand op drempel 1 is de LSPIV gebaseerde snelheid beduidend lager dan de in situ metingen, over de gehele breedte van de drempel.
- Op drempel 5 is bij zowel bij hoge als lage waterstand ook een lagere snelheid gemeten met LSPIV dan met de in situ metingen. Het verschil is het grootst bij de lage waterstand.

De van de LSPIV afgeleide snelheidswaarden zijn voor de drempelzones dus niet betrouwbaar: de waarden zijn over het algemeen beduidend lager dan de in situ meetwaarden, vaak minder dan de helft van de in situ meetwaarde. Enkel wanneer er een goed ontwikkelde doorstromende zone is, zoals bij drempel 1 bij hoge waterstand, komen de snelheden overeen. In alle andere gevallen slaagt de LSPIV methode er niet in om de in situ gemeten snelheid te benaderen.

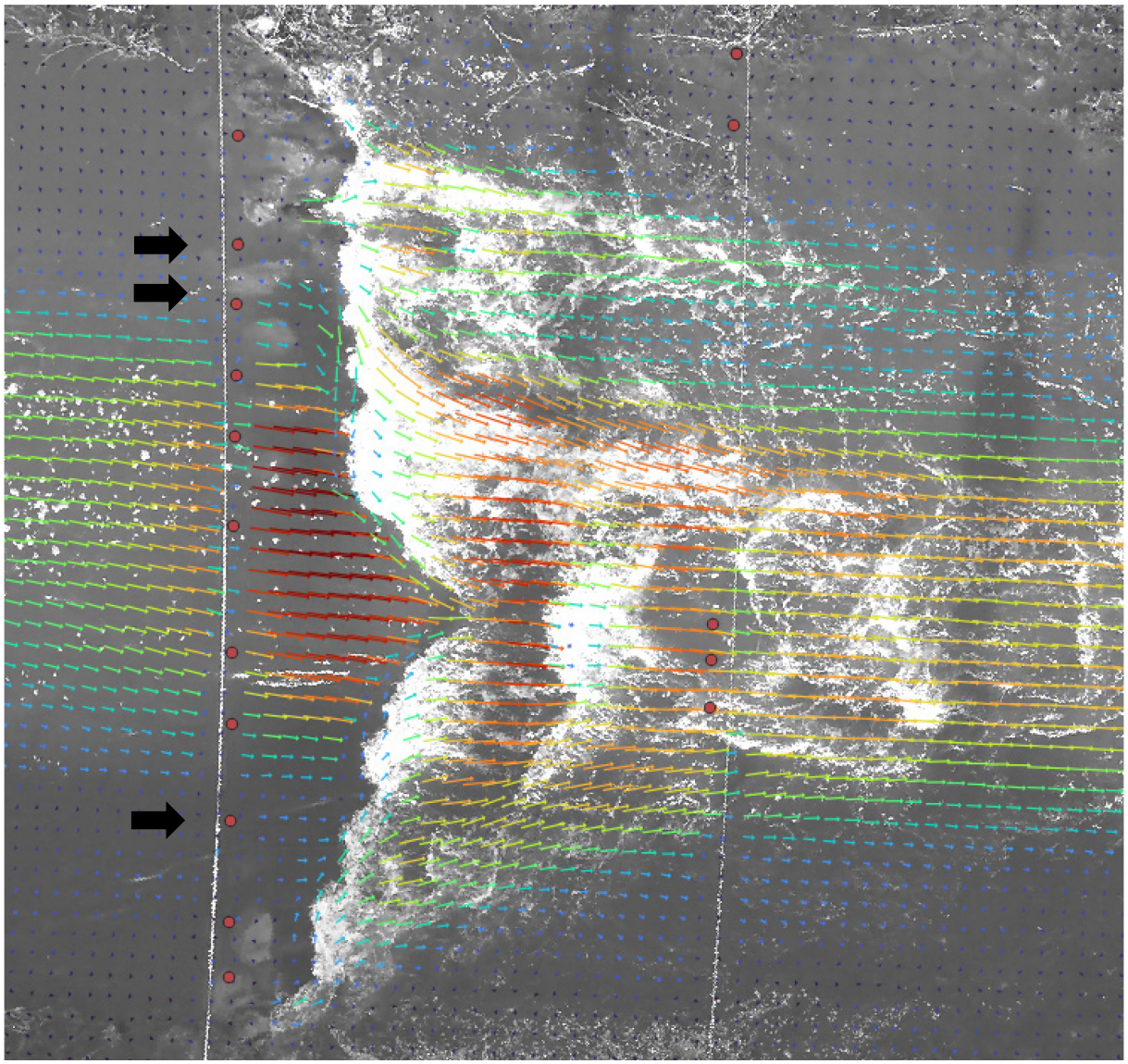
Op de raaien in de bekkens komen de gemeten en berekende snelheden vrij goed overeen, en wordt de snelheid van zowel de hoofdstroom als de luwe keerstroom, gelijkaardig in kaart gebracht.

4.1.6 Discussie

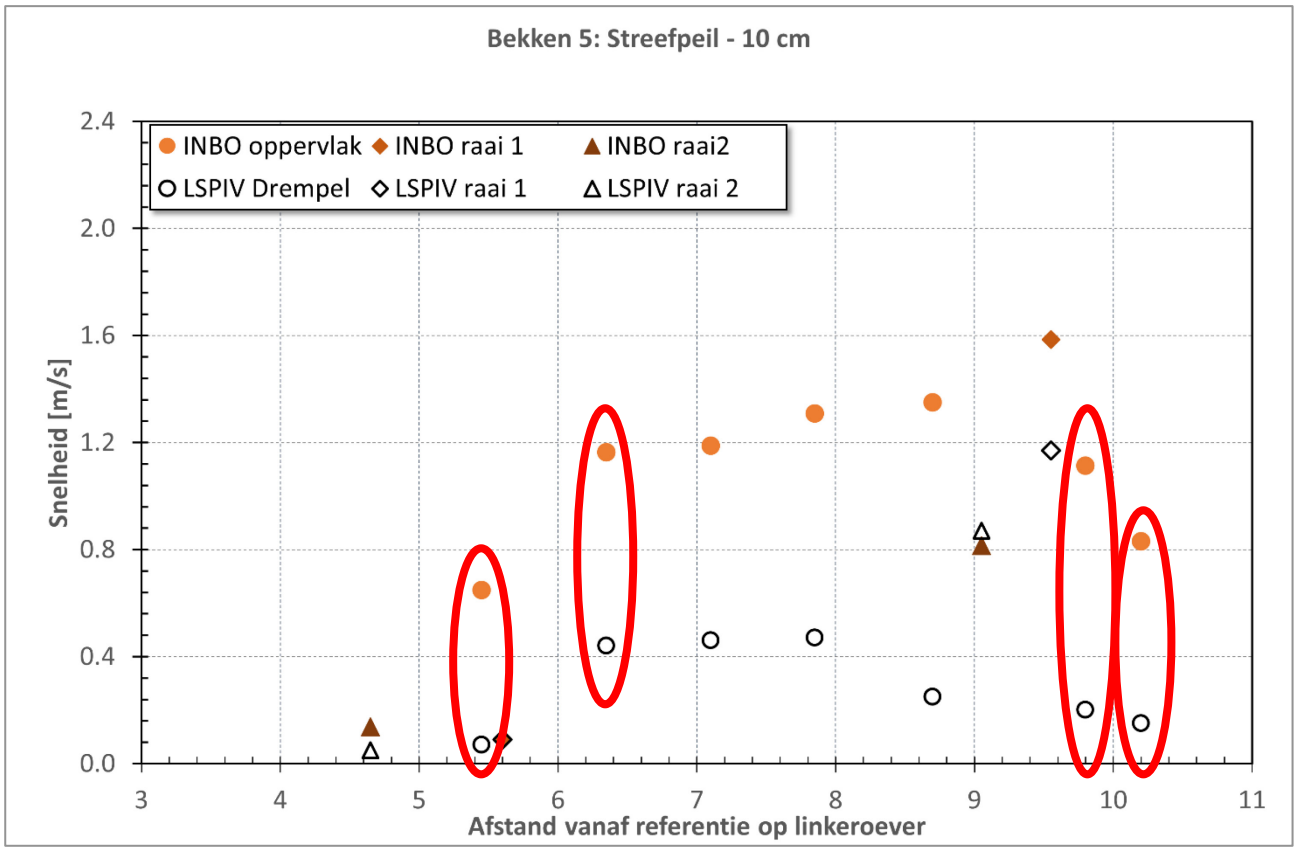
De stroming over de drempels kent een onderbreking door de aanwezigheid van stoorstenen. Deze structuren zorgen voor een discontinuïteit in het snelheidsveld, en een opsplitsing in zones met verhoogde snelheid (tussen de stenen) en verlaagde snelheid voor of boven de stoorstenen. Ook de discontinuïteit in het beeld, veroorzaakt door het meetlint over de passage, kan een invloed hebben (alhoewel dit opgelost is door de geaffecteerde meetpunten niet mee te nemen in de analyse). Dit alles wordt geïllustreerd in Figuur 25 van het snelheidsveld zoals bekomen met de LSPIV methode, voor bekken 1 bij hoge waterstand. De centrale stroomzone heeft een goed ontwikkeld snelheidsveld, maar de hoge snelheid tussen de stenen aan de rand worden niet of onvoldoende als hogere snelheid weergegeven (zwarte pijlen).



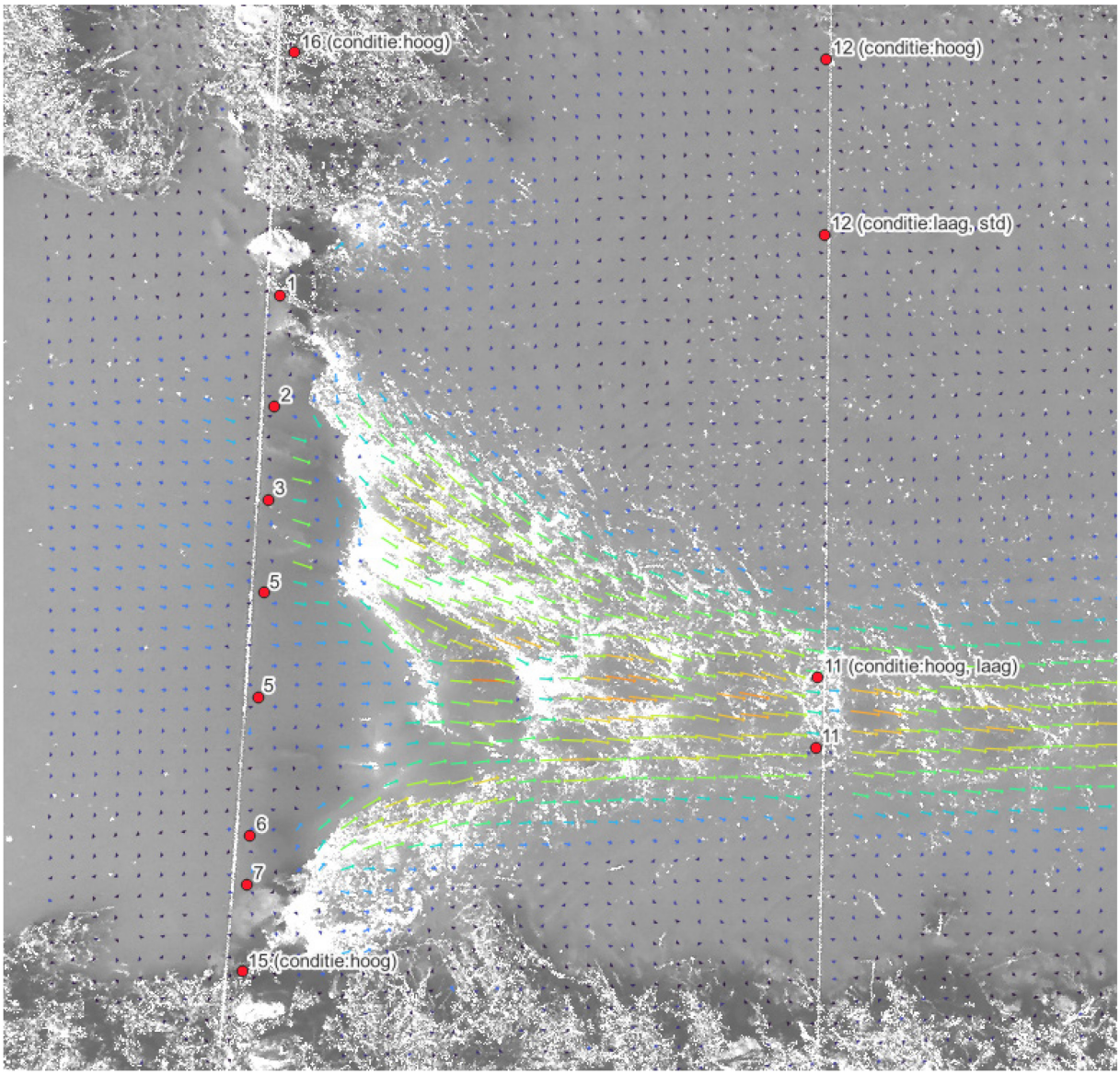
Figuur 24 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 1, hoge waterstand met aanduiding (rode cirkels) van de metingen ter hoogte van de zwarte pijlen in Figuur 25



Figuur 25 - LSPIV Stromingsveld, bekken 1, hoge waterstand



Figuur 26 - LSPIV vs in situ stroommetingen, bekken 5, lage waterstand met aanduiding (rode cirkels) van de metingen ter hoogte van de zwarte pijlen in



Figuur 27 - LSPIV Stromingsveld, bekken 5, lage waterstand

De resultaten in het bekken zijn, ondanks het mogelijke probleem van de meetlinten en het tijdverschil, nog steeds vrij betrouwbaar. Dit toont aan dat de LSPIV methode op zich wel werkt. De oorzaak van de lagere snelheden op de drempels, kan dan te maken hebben met:

- de configuratie van Fudaa, of de methodiek die achter de Fudaa software zelf schuil gaat.
  De berekende stroomvelden zien er namelijk vrij glad uit. Mogelijk zijn er verwerkingskeuzes die er toe leiden dat fijne details niet of onvoldoende tot uiting komen: snelle stroombanen tussen de stenen worden dan niet voldoende onderscheiden van zones zonder stroming (of waar stenen uitsteken), wat een soort ruimtelijk uitgemiddelde waarde oplevert;
- de aanwezigheid van de meetlinten over de stroombaan zorgt er voor dat de LSPIV routine hier foutieve waarden oplevert en dus dat moet gewerkt worden met interpolatie van omliggende stroomsnelheidswaarden. Hier kan ook een fout ontstaan. De work-around die werd toegepast blijkt echter boven de bekkens te werken, wat doet vermoeden dat de bijdrage van deze fout beperkt is.

- onvoldoende *seeding* of onvoldoende data om de LSPIV verwerking op uit te voeren, waardoor de details in het stroombeeld onvoldoende in kaart gebracht worden.
- er zijn tijdsafhankelijke fluctuaties in de opwaartse waterstand (bvb. door verschuttingen die plaatsvinden) en heeft een effect op de waterstand en dus stroomsnelheden in de bekkens. De opname van de LSPIV beelden en de metingen konden omwille van de verstoring van het beeld niet op een zelfde moment uitgevoerd worden.

5 Conclusie

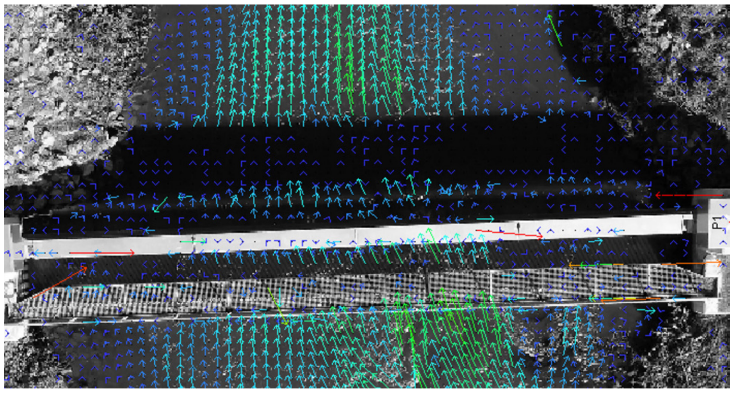
In project 21_079 worden de mogelijkheden en restricties van Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) voor het visualiseren van stroompatronen nagegaan. In dit rapport worden de bevindingen van deze techniek gerapporteerd voor de metingen ter hoogte van de vispassage te Kerkhove. In situ metingen werden uitgevoerd door het INBO op verschillende locaties binnen een bekken en op de overlaat tussen bekkens. Door ATO werden dronebeelden gemaakt, die in dit rapport werden geanalyseerd en vergeleken met de traditionele in-situ metingen.

De verwerkte beelden werden geselecteerd op basis van zo min mogelijk verstoring van het beeld. Ondanks deze selectie kunnen een aantal zaken niet vermeden of weggefiltered worden zoals bewegende schaduwen van personeel in het beeld, rondvliegende tracers, slechte camerainstelling, etc… . Extra aandacht dient daarom te gaan naar deze zaken tijdens het moment van opname.

Een stabiel stroomregime is noodzakelijk voor vergelijken/validatie met andere methoden. Zeker als beide methoden niet exact gelijktijdig kunnen meten, bijvoorbeeld door obstructie van het beeld. Door de intensieve werking van de nabijgelegen sluis was dit tijdens de beschreven meetcampagne niet steeds mogelijk.

Ondanks vrij gunstige weersomstandigheden tijdens de meetcampagne waren er momenten met windvlagen waardoor er zich windgolven vormden op het wateroppervlak. Het PIV-algoritme kan deze windgolven niet onderscheiden van de ‘echte’ tracers, waardoor foutieve snelheden worden bekomen. Staande golven zijn een probleem om horizontale watersnelheden te bepalen. Dit fenomeen is ook bijna niet uit de resultaten te filteren.

De impact van schaduwzones in het beeld kan variëren naargelang het type schaduw. Indien de tracers binnen de schaduwzone nog te detecteren zijn zal de impact op de resultaten binnen deze zone eerder beperkt zijn. Wanneer het contrast tussen de tracers en de achtergrond te klein wordt, wordt het onmogelijk om goede resultaten te verkrijgen in deze schaduwzone. Een extra contrastfilter kan hier mogelijks een oplossing bieden. Bij een zwakke stationaire schaduw is de impact dus eerder beperkt. Bij een mobiele schaduw, bvb voorbijtrekkende wolk(en) is de impact veel groter. Dit dient vermeden te worden.



Figuur 28 - Stationaire schaduwzone ter hoogte van de afsluitconstructie van de vistrap waarbij tracers niet meer waarneembaar zijn in de schaduwzone (links).

Extra seeding is noodzakelijk in de stromingsluwe zones buiten de hoofdstroom.

Ter hoogte van drempels met ondiepe of uitstekende stoorstenen, is het beeld dat de LSPIV methodiek met Fudaa-LSPIV toegepast op dronebeelden, onvoldoende gedetailleerd om een betrouwbaar snelheidsveld te produceren. De aanwezigheid van de meetlinten over de sectie, zorgt voor een lokale verstoring van de metingen. Boven de bekkens (en zonder de aanwezigheid van de meetlinten) is de performantie van de LSPIV techniek zoals hier toegepast vrij goed. De snelheden komen vrij goed overeen met de in situ metingen.

Een convergentie analyse toont aan dat 300 beelden (of 10 seconden beeldmateriaal) bij een framerate van 30 fps het minimaal aantal te verwerken beelden zijn voor deze dataset. Dit wordt ook bevestigd door de verschilkaarten. Meer specifiek tussen de verschilkaart met een verwerking van 300 en 600 beelden waar de verschillen beperkt zijn tot 0,2 m/s en verspreid over het hele bekken.

Uit de resultaten blijkt dat voor deze dataset zowel het verhogen van de pixelgrootte van de beelden als het verlagen van de frame-rate een significant negatief effect hebben op de kwaliteit van de resultaten.

Bijkomende onderzoeksmogelijkheden liggen onder meer bij:

- Verder uitdiepen van de invloed van seeding op het eindresultaat;
- het vergelijken van snelheden bekomen met verschillden LSPIV software voor deze dataset. Een vergelijkende studie is onder meer door Wijava et al. (2023) ondernomen op een dataset van een waterweg in Taiwan. Een korte samenvatting is terug te vinden in Bijlage 9.

De bevindingen van dit onderzoek zijn enkel van toepassing op de in beschouwing genomen data en toegepaste methodiek. Ze zijn geen garantie op succes voor andere LSPIV-analyses.

6 Referenties

Cavazzini G. (2012). Post-Processing Methods of PIV Instantaneous Flow Fields for Unsteady Flows in Turbomachines.

Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B., Le Boursicaud, R. (2014) Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software. River Flow 03/09/2014-05/09/2014, Lausanne, Switzerland. 7 p.

Vercruysse, J.; Visser, K.P.; Goormans, T.; Depreiter, D.; Claeys, S.; Vereecken, H.; Buysse, D. (2024). Vispassage Kerkhove: Validatiemeting en optimalisatie ontwerpmethodiek bekkenvormige vispassage. Versie 4.0. WL Rapporten, 22_030_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Wijaya F, Liu W-C, Suharyanto, Huang W-C. Comparative Assessment of Different Image Velocimetry Techniques for Measuring River Velocities Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery. Water. 2023; 15(22):3941

Bijlage 1 Coördinaten Grondcontrolepunten (GCP's)

Tabel 7 - Coördinaten en beschrijving van de Grondcontrolepunten (GCP's)

Puntnr	X – Lambert 72	Y– Lambert 72	Z - mTAW	Opmerkingen
7000	88226.820	164791.460	11.660	GCP drempel 2 RO
7001	88227.455	164792.057	11.798	kruis gele verf drempel 2 RO
7002	88222.863	164780.781	11.845	GCP drempel 1 RO
7003	88223.150	164781.252	11.836	kruis gele verf drempel 1
7004	88219.845	164769.853	13.889	kruis met tape op inoxbeschermbak RO
7006	88206.645	164771.216	12.199	geel kruis met verf op betonconstructie LO
7007	88207.385	164772.798	13.945	kruis met tape op inoxbeschermbak LO
7008	88211.163	164785.162	11.949	GCP drempel 1 LO
7009	88210.805	164784.703	11.955	kruis gele verf drempel 1
7010	88215.754	164796.553	11.802	GCP drempel 2 LO
7011	88215.388	164796.132	11.801	kruis gele verf drempel 2 LO
7005	88219.731	164768.121	12.144	geel kruis met verf op betonconstructie RO
7020	88235.410	164835.558	11.352	GCPdrempel 5 LO
7021	88242.220	164848.124	11.446	GCP drempel 6 LO
7022	88249.481	164857.750	11.382	GCP drempel 7 LO
7023	88259.643	164849.982	11.366	GCP drempel 7 RO
7024	88253.325	164840.908	11.397	GCP drempel 6 RO
7025	88245.973	164828.432	11.532	GCP drempel 5 RO

Bijlage 2 Overzicht beschikbare opnames

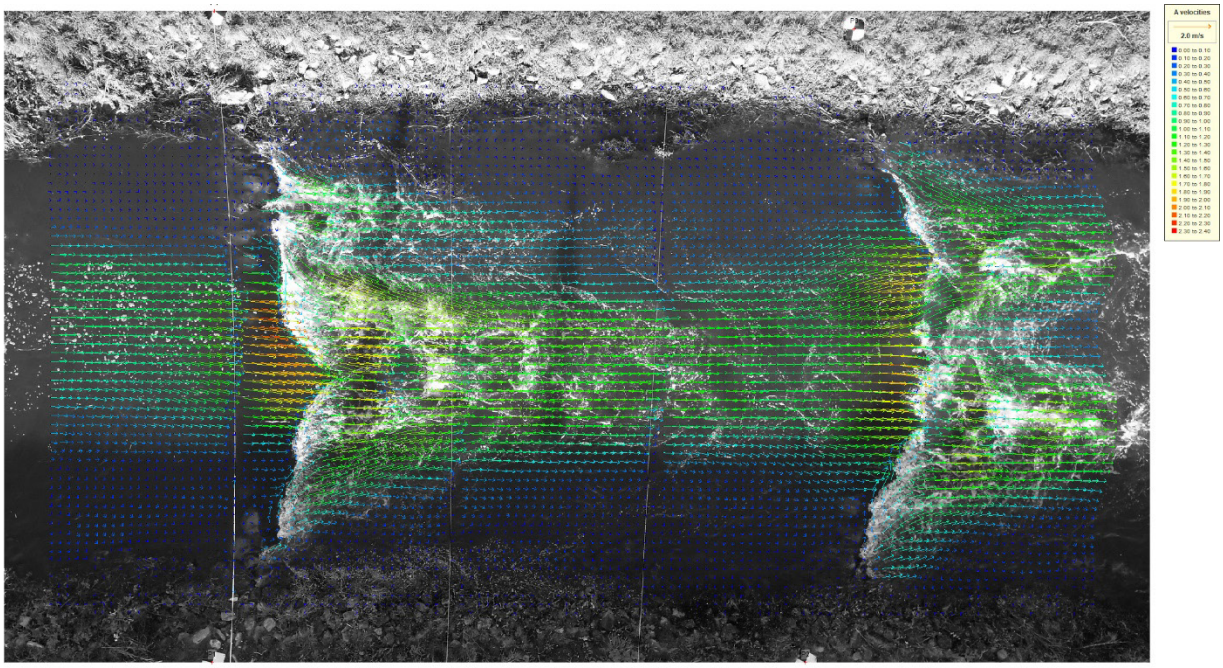
Tabel 8 - Overzicht beschikbare camerabeelden

Datum	bestand	Bekken	verwerkt	duur-analyse [s]	analyse interval [s]	Opmerkingen
6/10/2022	vis221006_B0_h12_3.mov	B0				
	vis221006_B0_h20_1.mov	B0	x	10	120 - 130	
	~~vis221006_B0_h20_2.mov~~	B0				slechts 1s film
	vis221006_B1_h17_1.mov	B1				
	vis221006_B1_h17_2.mov	B1				
	vis221006_B1_h17_3.mov	B1				
	vis221006_B1_h17_4.mov	B1	x	10	30 - 40	veel wind (linten bewegen veel), stenen thv overloop zichtbaar onder water
	vis221006_B5_h165_1.MOV	B5				@25s draaien camera, weinig/geen tracers in de dode zones
	vis221006_B5_h165_2.MOV	B5				ok, maar weinig tracers in dode zone
	vis221006_B5_h165_3.MOV	B5	x	10	5 - 15	meer tracers, iets hogere snelheden (staande golfjes)
	vis221006_B6_h165_1.MOV	B6				
	vis221006_B6_h165_2.MOV	B6	x	10		
	vis221006_B6_h165_3.MOV	B6				
7/10/2022	vis221007_01_B0.MOV	B0	x	10		continu veel schaduwen (onderaan + personen), zones met weinig tracers (1:55 - einde ok)
	vis221007_01_B1_1.MOV	B1				continu veel schaduwen (onderaan + personen), er wordt quasi continu geseed, af en toe beweging drone
	vis221007_01_B1_2.MOV	B1	x	10	0 - 10	idem bovenstaande, maar geen actieve seeding
	vis221007_01_B1_3.MOV	B1				idem als 1.mov

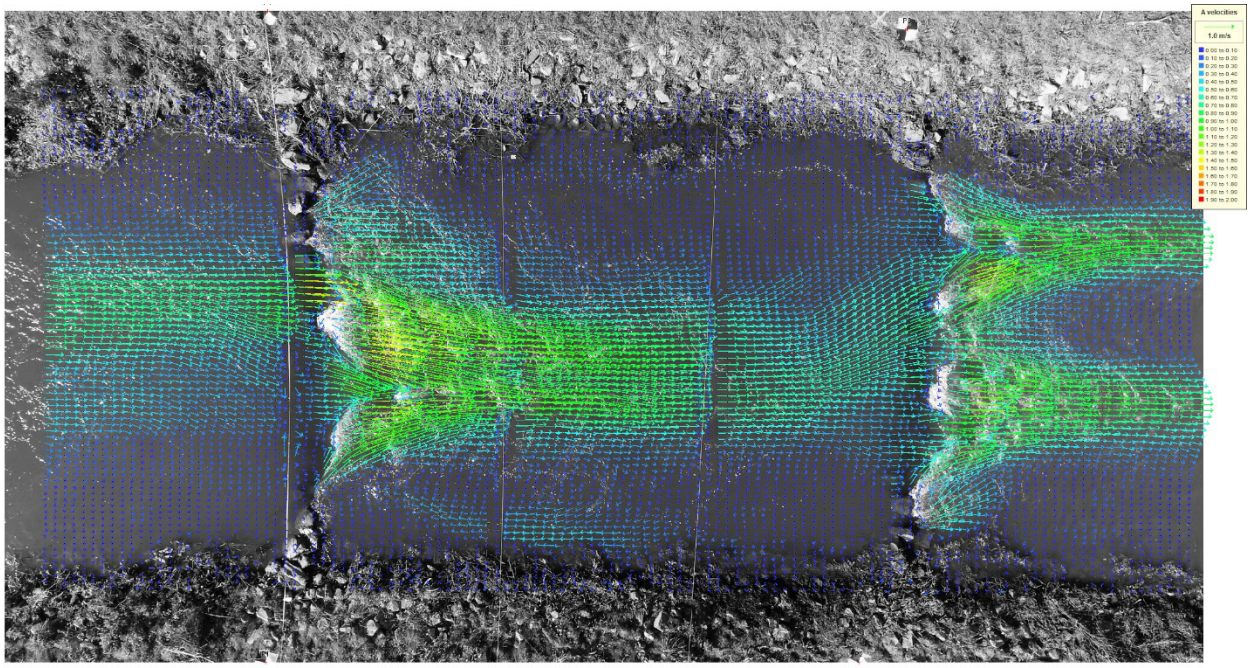
Datum	bestand	Bekken	verwerkt	duur-analyse [s]	analyse interval [s]	Opmerkingen
	vis221007_01_B5_1.MOV	B5	x	10	10 - 20	
	~~vis221007_01_B5_2.MOV~~	B5				GCP 3 (7021) niet in beeld
	~~vis221007_01_B5_3.MOV~~	B5				GCP 3 (7021) niet in beeld
	vis221007_01_B6_1.MOV	B6	x	10	135 - 145	
	vis221007_01_B6_2.MOV	B6				
	vis221007_02_B0_1.MOV	B0				enkel tss 47 en 57 geen seeding; veel sun glint
	vis221007_02_B0_2.MOV	B0	x	10	10-20	geen extra seeding tijdens filmen; veel sun glint; veel wind
	vis221007_02_B1_1.MOV	B1	x	10	42 - 52	enige 'lang' moment zonder seeding en/of shaduwen
	vis221007_02_B1_2.MOV	B1				9 - 19s mogelijk
	~~vis221007_02_B5_1_distor.MOV~~	B5				Dat zijn beelden waarbij de optie ‘distortion’ niet was aangevinkt waardoor de distorties van de lens minder weggewerkt zijn. Bij voorkeur niet te gebruiken.
	~~vis221007_02_B5_2_distor.MOV~~	B5				Dat zijn beelden waarbij de optie ‘distortion’ niet was aangevinkt waardoor de distorties van de lens minder weggewerkt zijn. Bij voorkeur niet te gebruiken.
	vis221007_02_B5_3.MOV	B5				weinig extra seeding, op einde wat extra
	vis221007_02_B5_4.MOV	B5				na, 33s: relatief veel seeding, geen schaduwen of personen, goed gemixt tegen einde
	vis221007_02_B5_5.MOV	B5	x	10	0-10	relatief veel seeding, geen schaduwen of personen, goed gemixt
			x	5	0-5	
			x	1	0-1	
			x	20	0-2	
	vis221007_02_B6_1.MOV	B6				continu seeding/beweging
	vis221007_02_B6_2.MOV	B6	x	10	0-10	0 - 13s ok, vanaf 32s niet alle gcp's in beeld
	vis221007_02_B6_3.MOV	B6				slechts 3 gCP's in beeld

Bijlage 3 Resultaten LSPIV analyse – vector plots

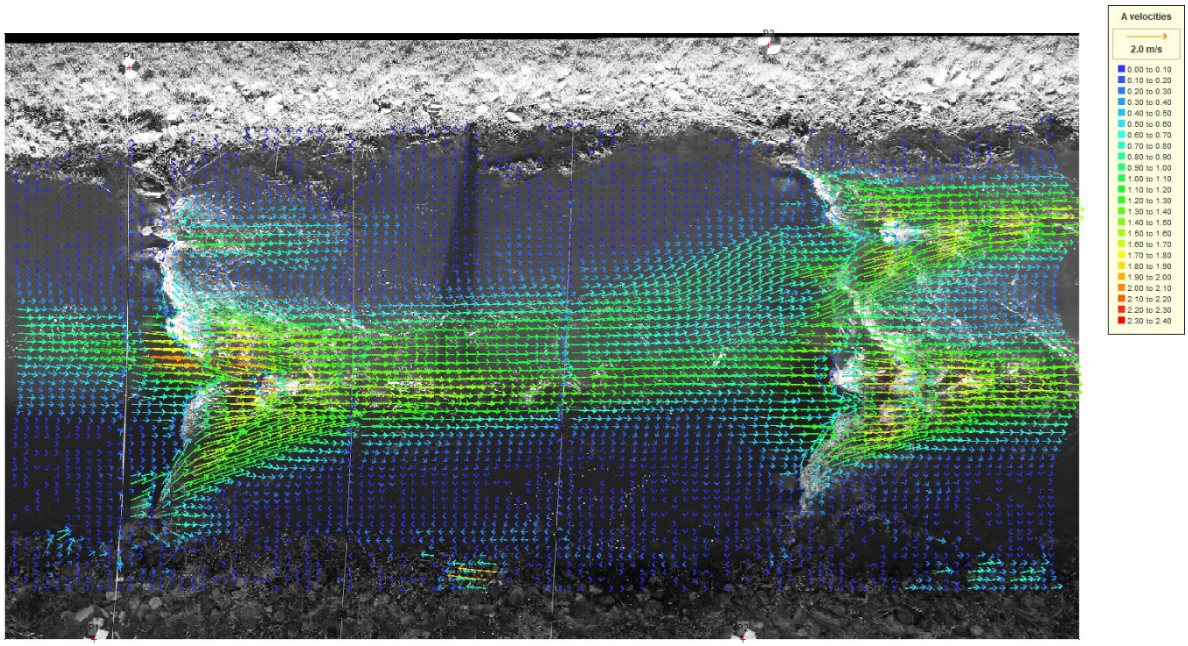
Bekken 1 – Streefpeil +10cm



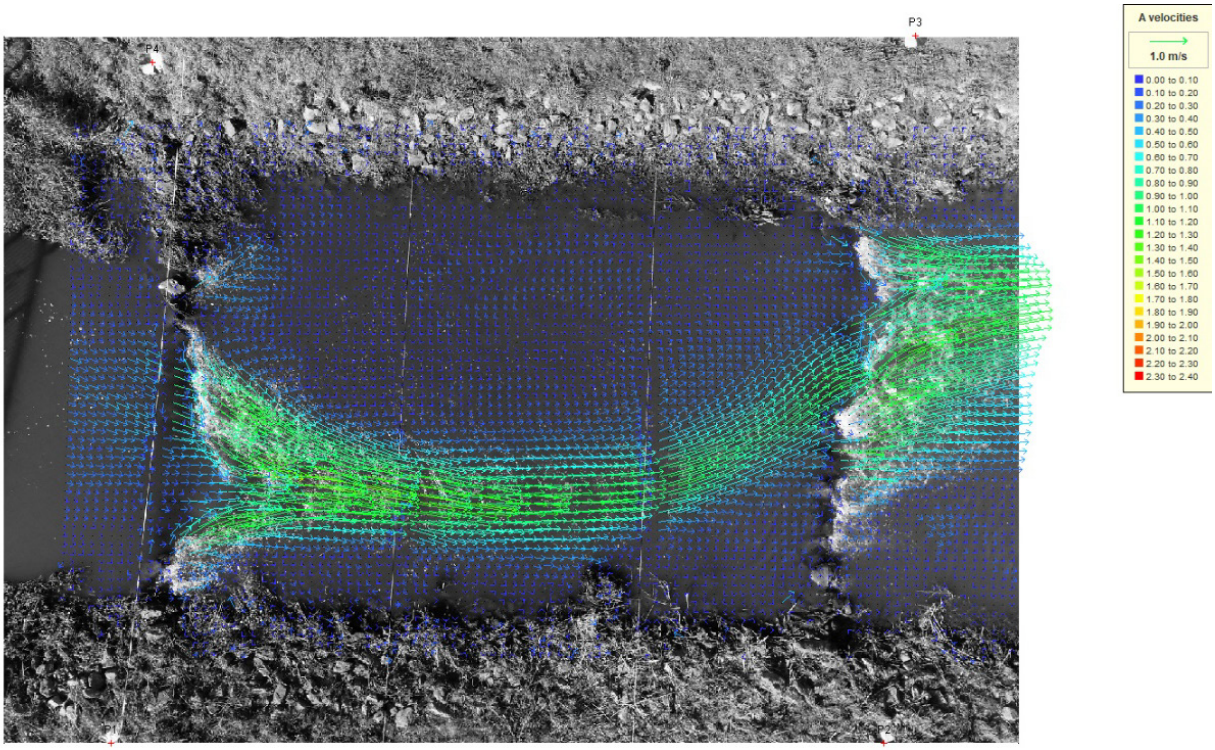
Bekken 1 – Streefpeil -10cm



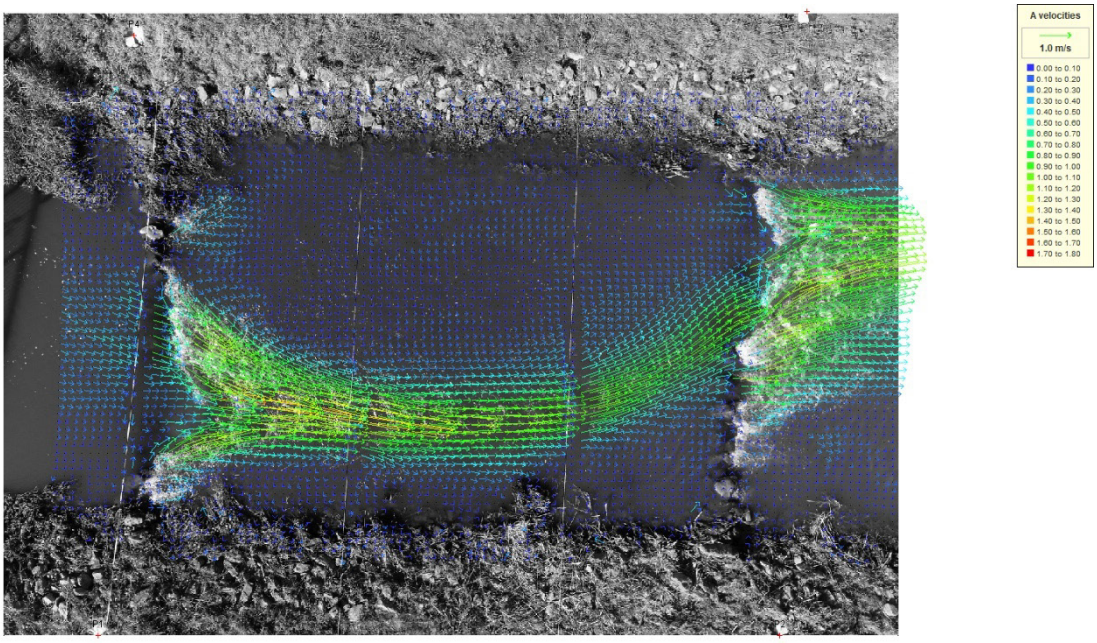
Bekken 5 – Streefpeil +10cm



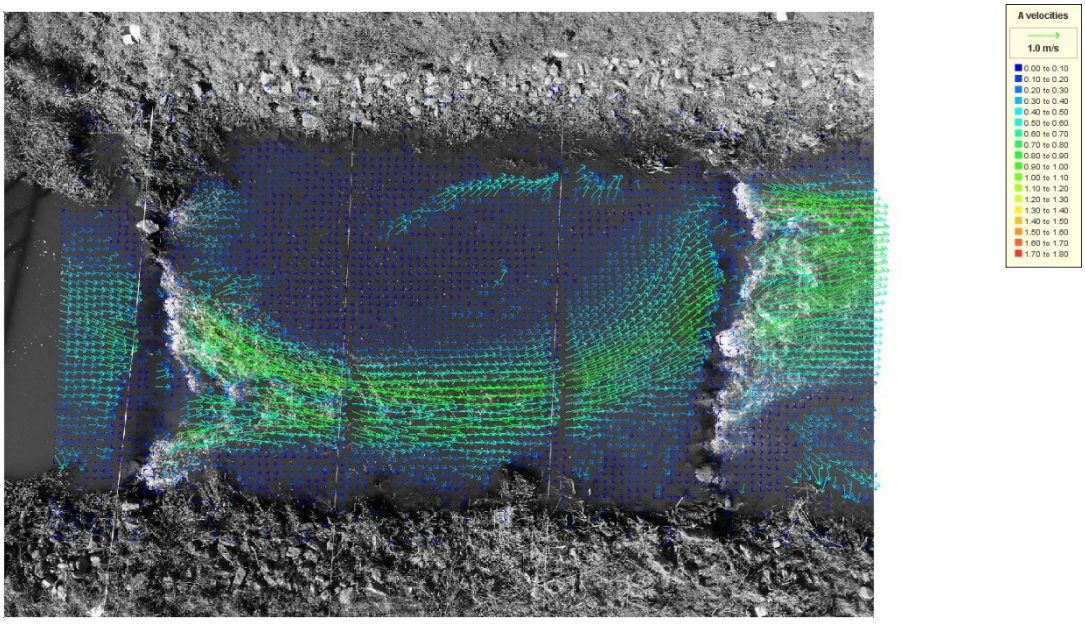
Bekken 5 – Streefpeil -10cm



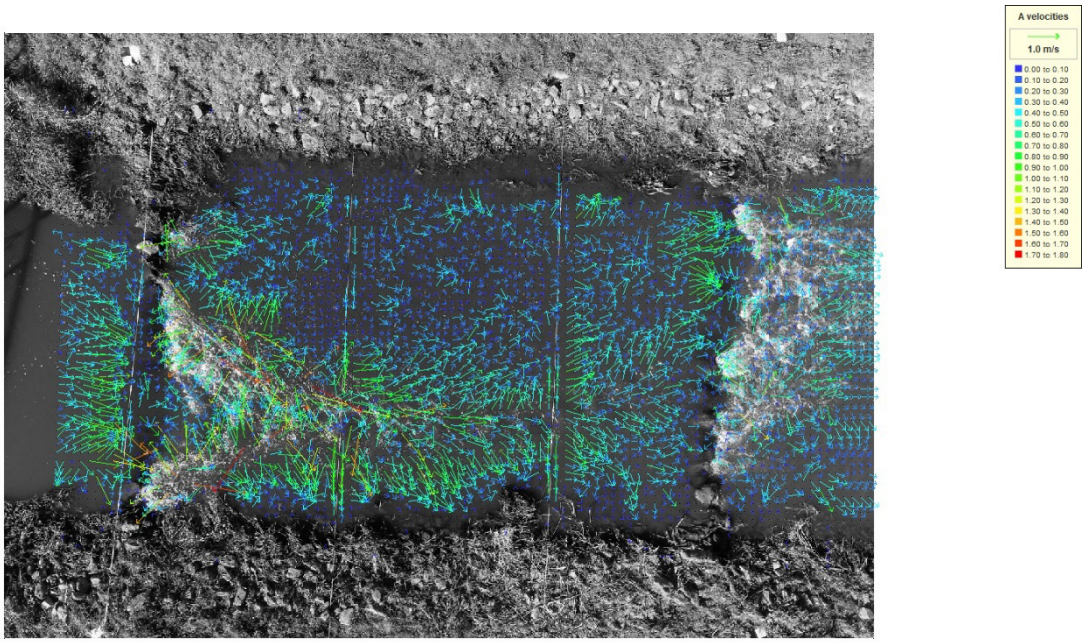
Bijlage 4 Resultaten pixel en resolutie



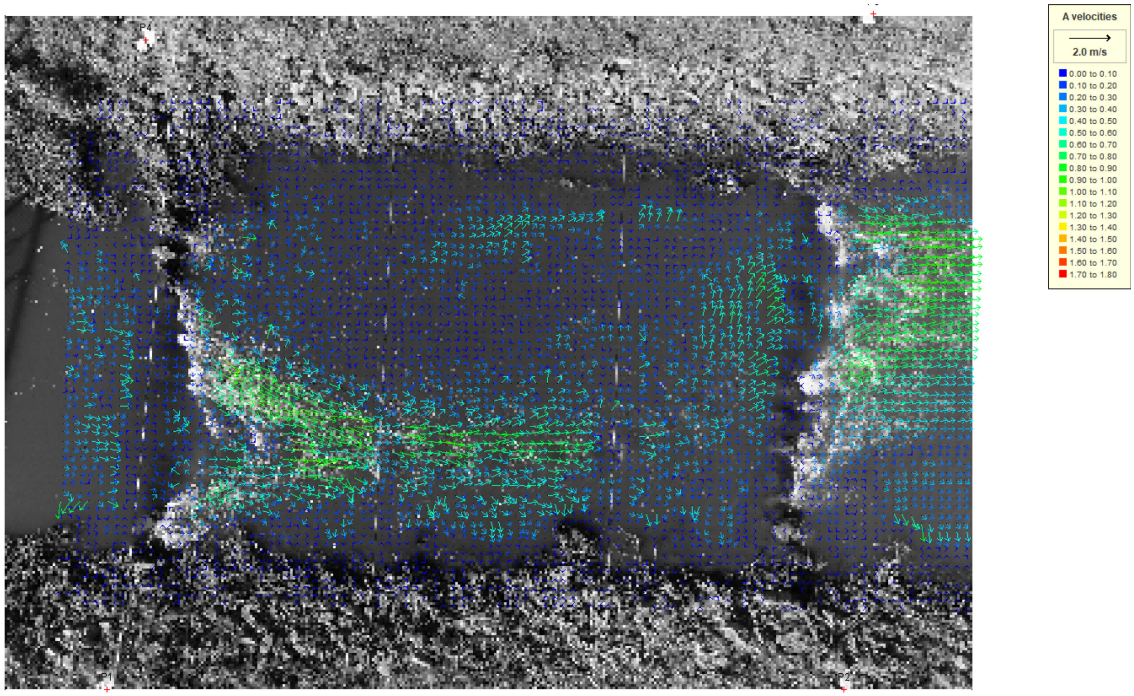
Scenario 1: 30 f/s, resolutie: 0.01m



Scenario 2: 10 f/s, resolutie: 0.01m

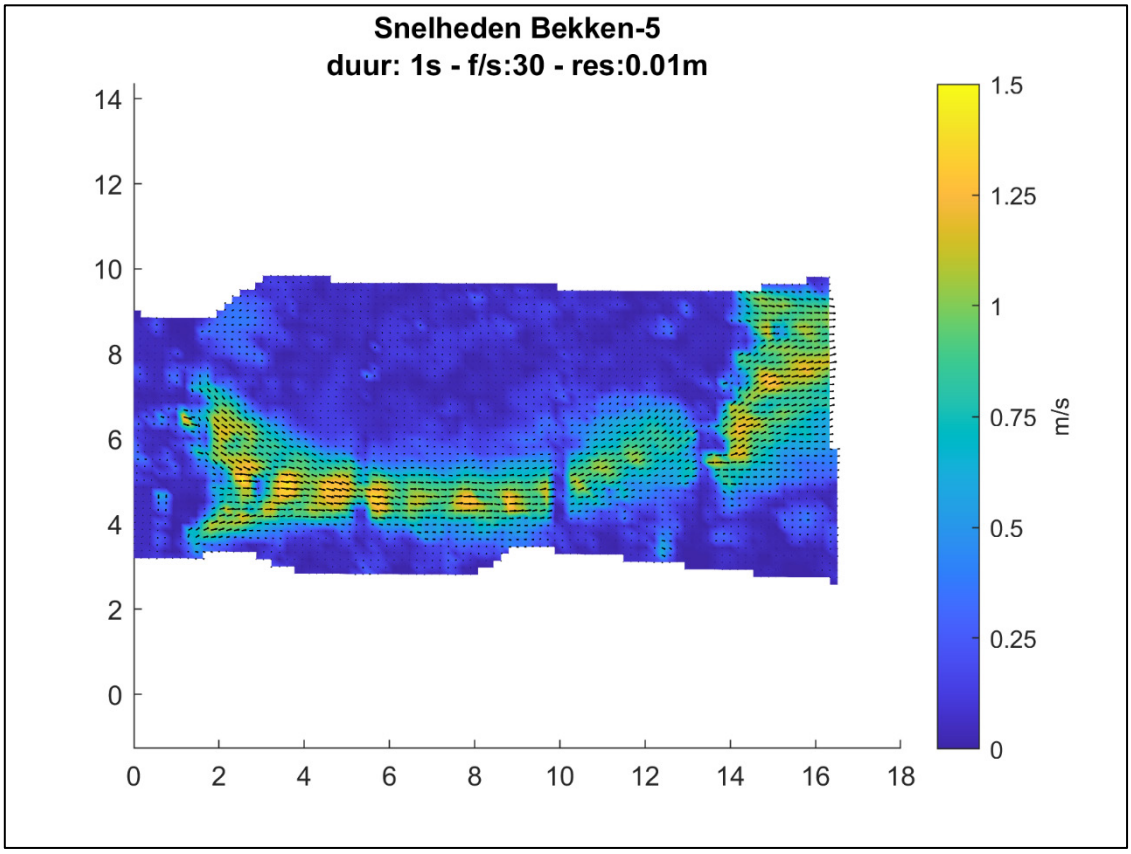


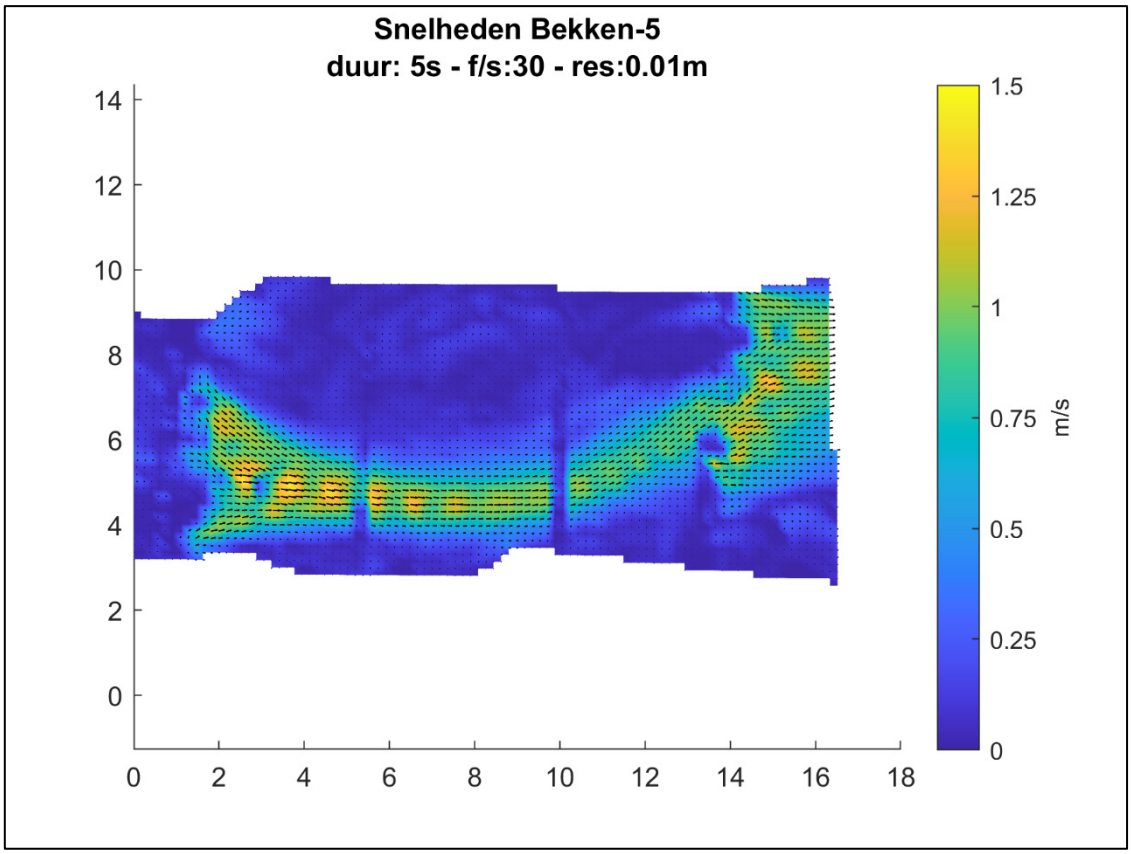
Scenario 3: 3f/s, resolutie: 0.05m

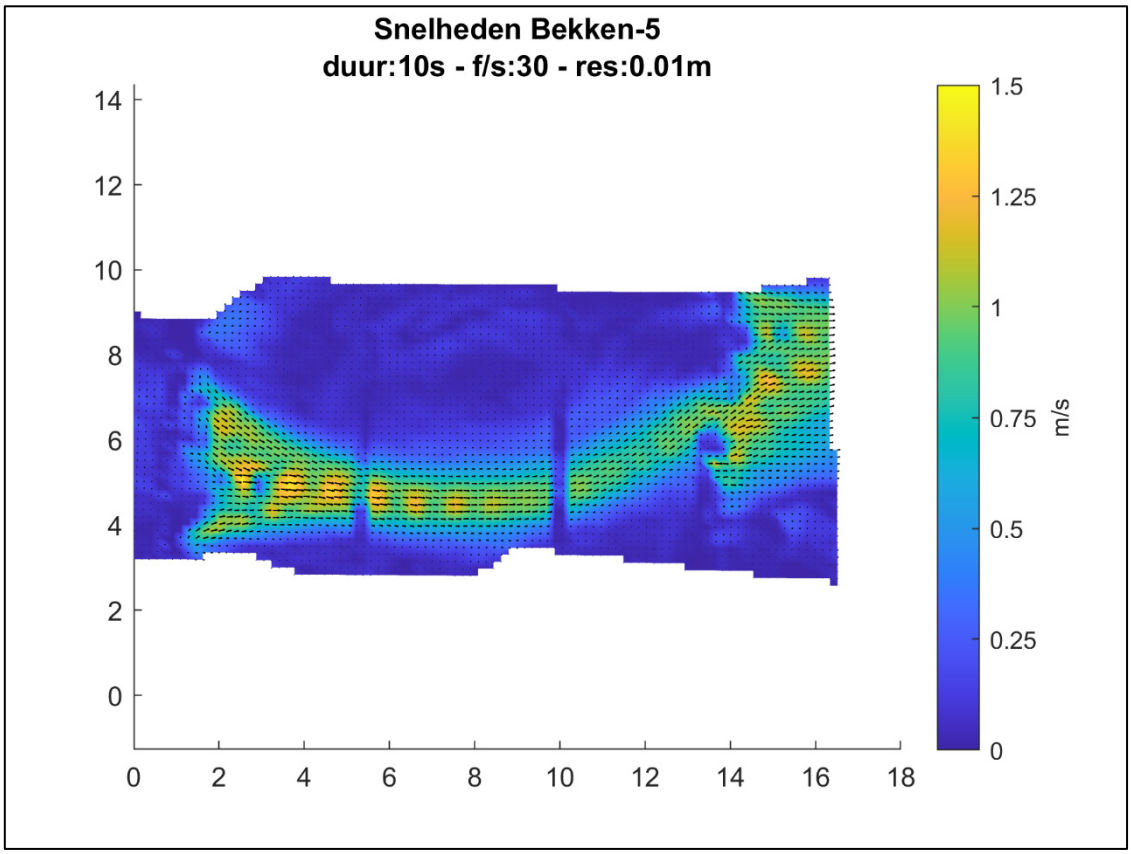


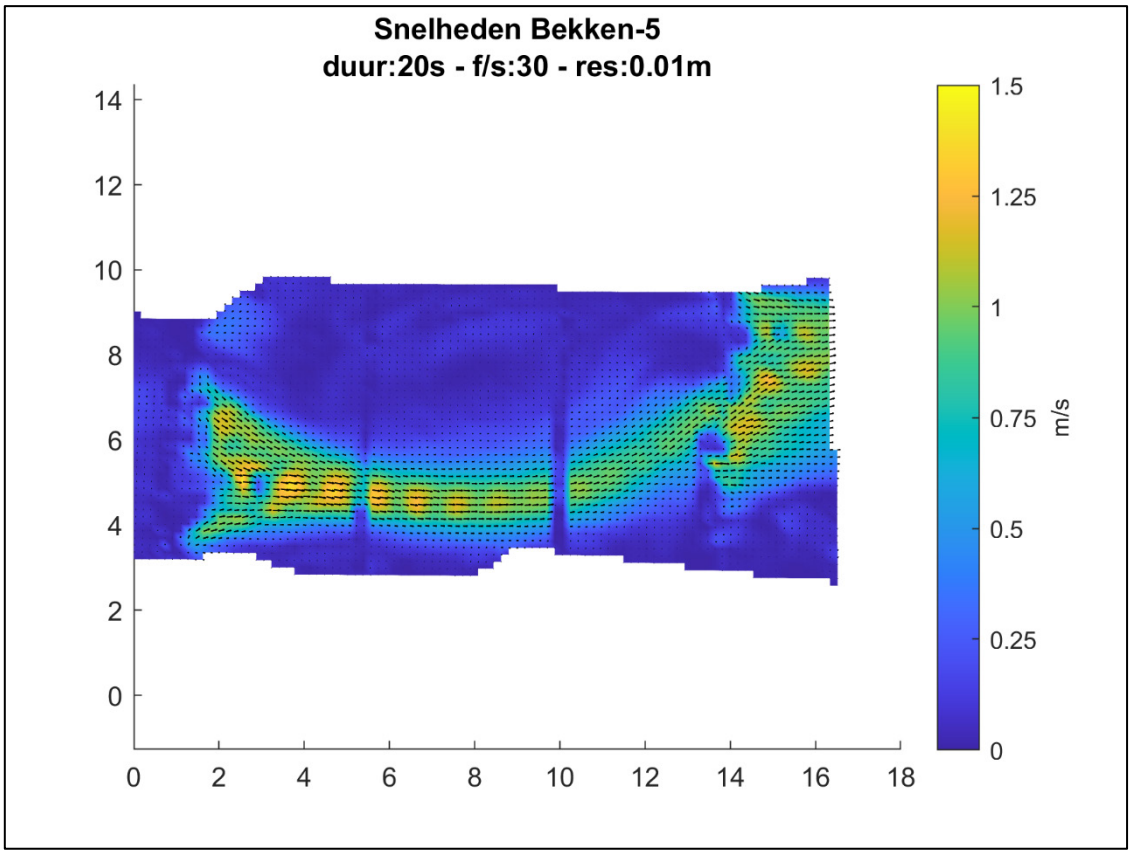
Scenario 4: 10f/s, resolutie: 0.05m

Bijlage 5 Resultaten aantal beelden

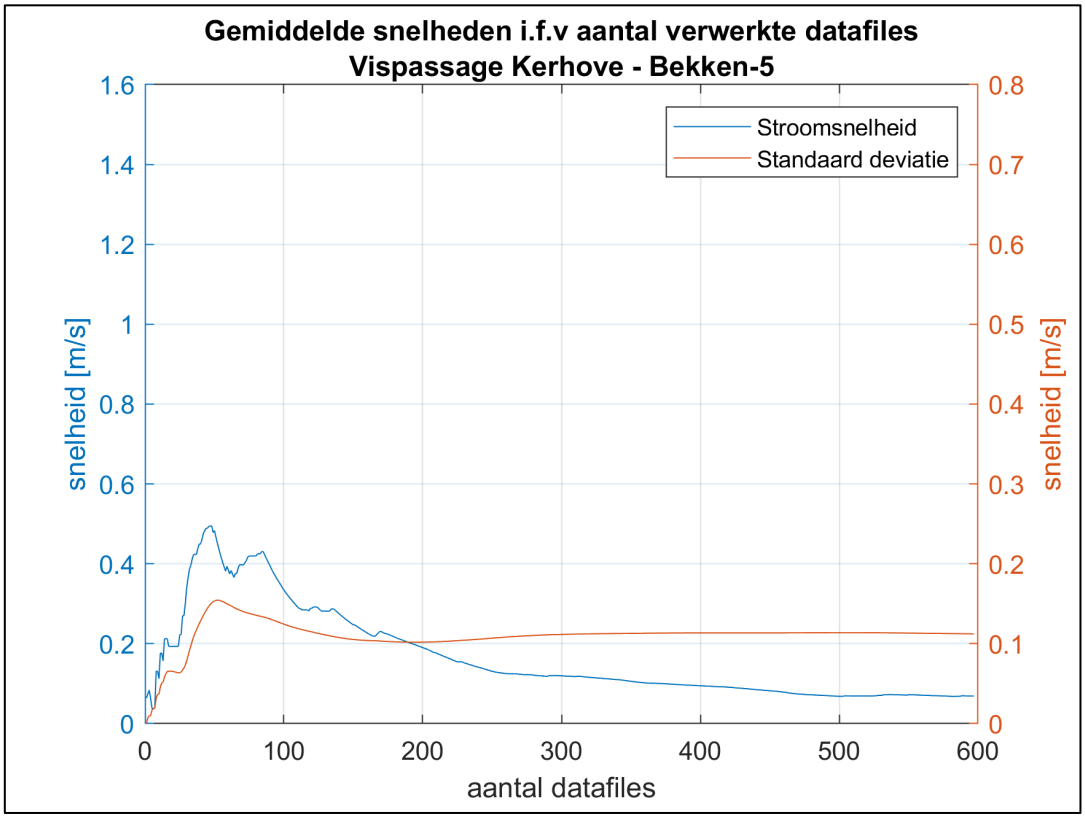


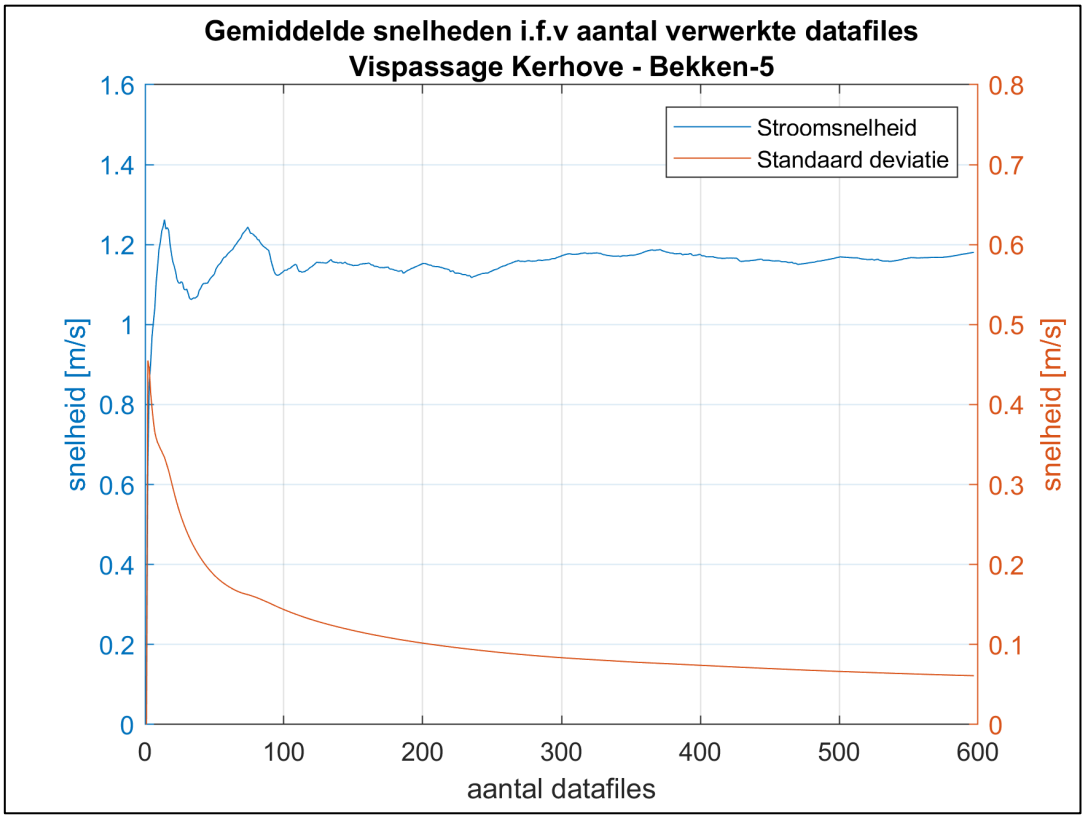

Snelheden Bekken-5
duur: 5s - f/s:30 - res:0.01m
14
12
10
8
6
4
2
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
1.5
1.25
1
0.75
0.5
0.25
0
m/s

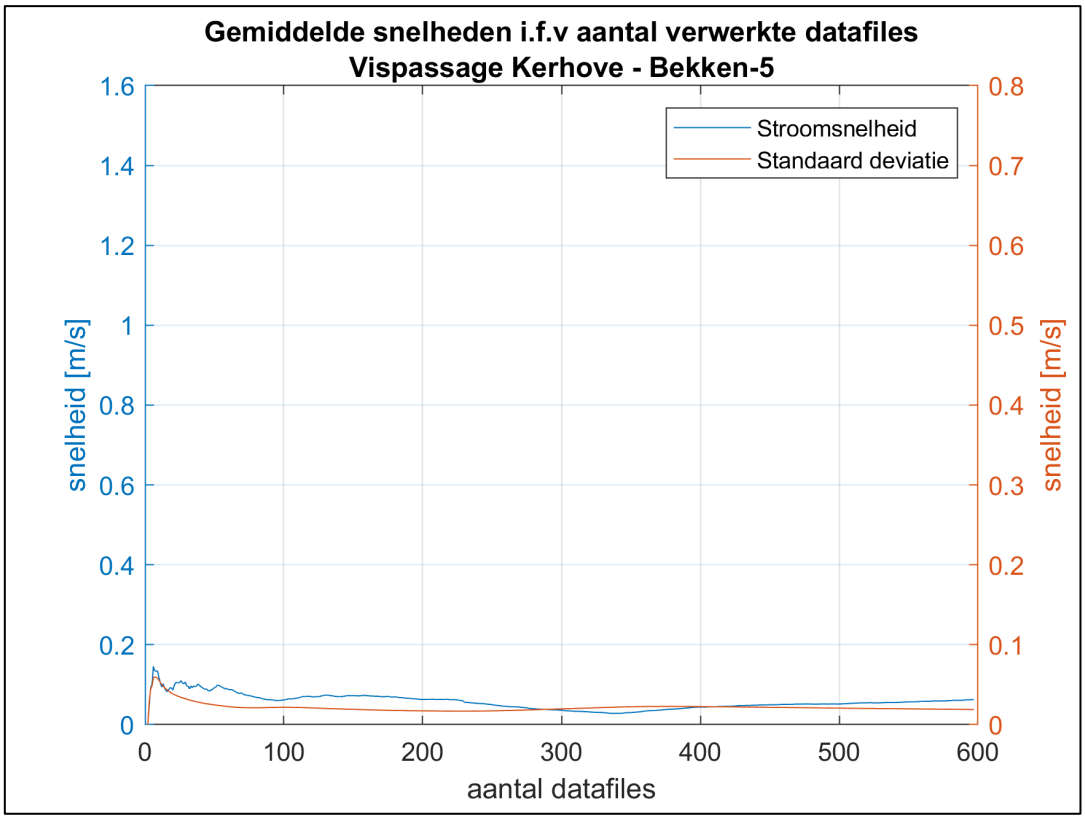

Snelheden Bekken-5
duur:10s - f/s:30 - res:0.01m
14
12
10
8
6
4
2
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
1.5
1.25
1
0.75
0.5
0.25
0
m/s

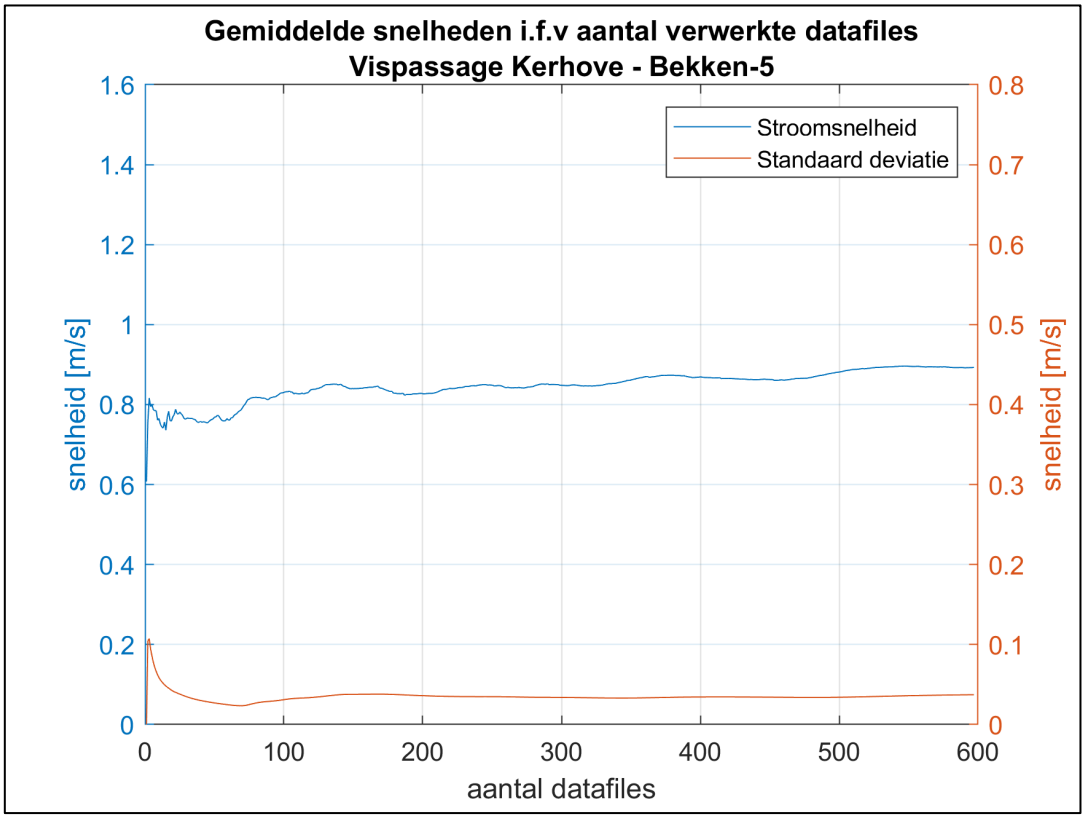

Snelheden Bekken-5
duur:20s - f/s:30 - res:0.01m
14
12
10
8
6
4
2
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
1.5
1.25
1
0.75
0.5
0.25
0
m/s

Bijlage 6 Resultaten convergentie analyse

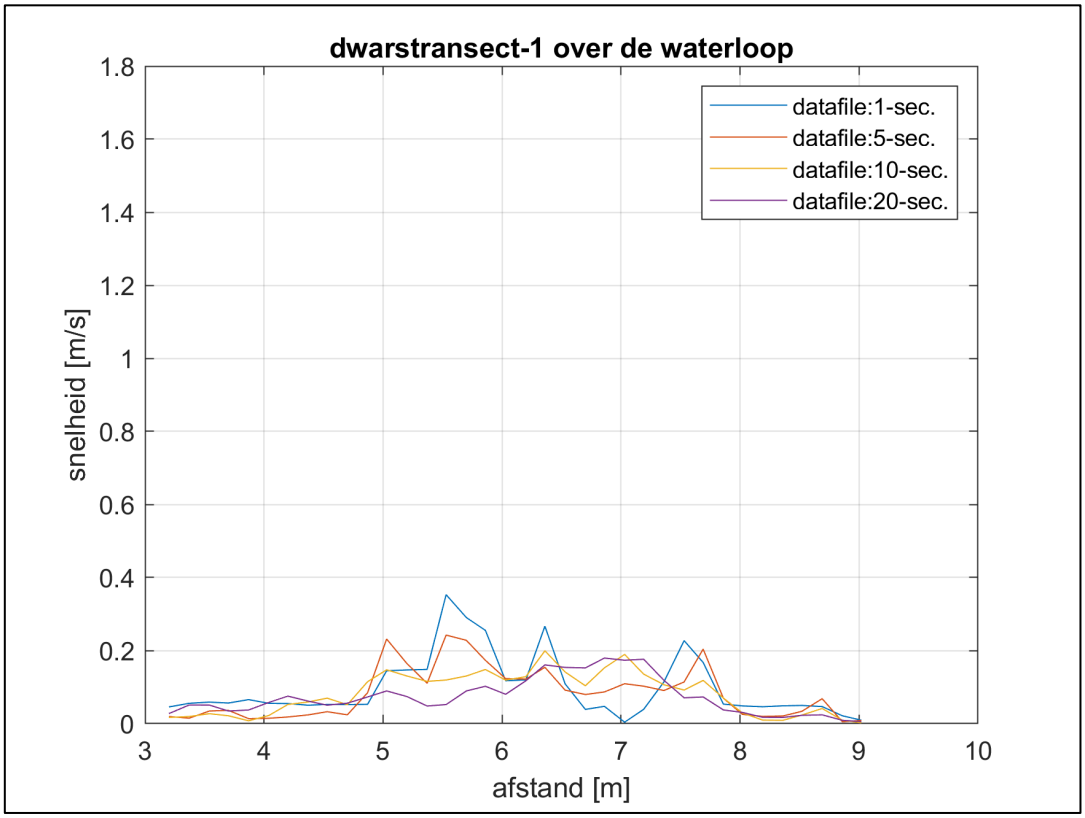


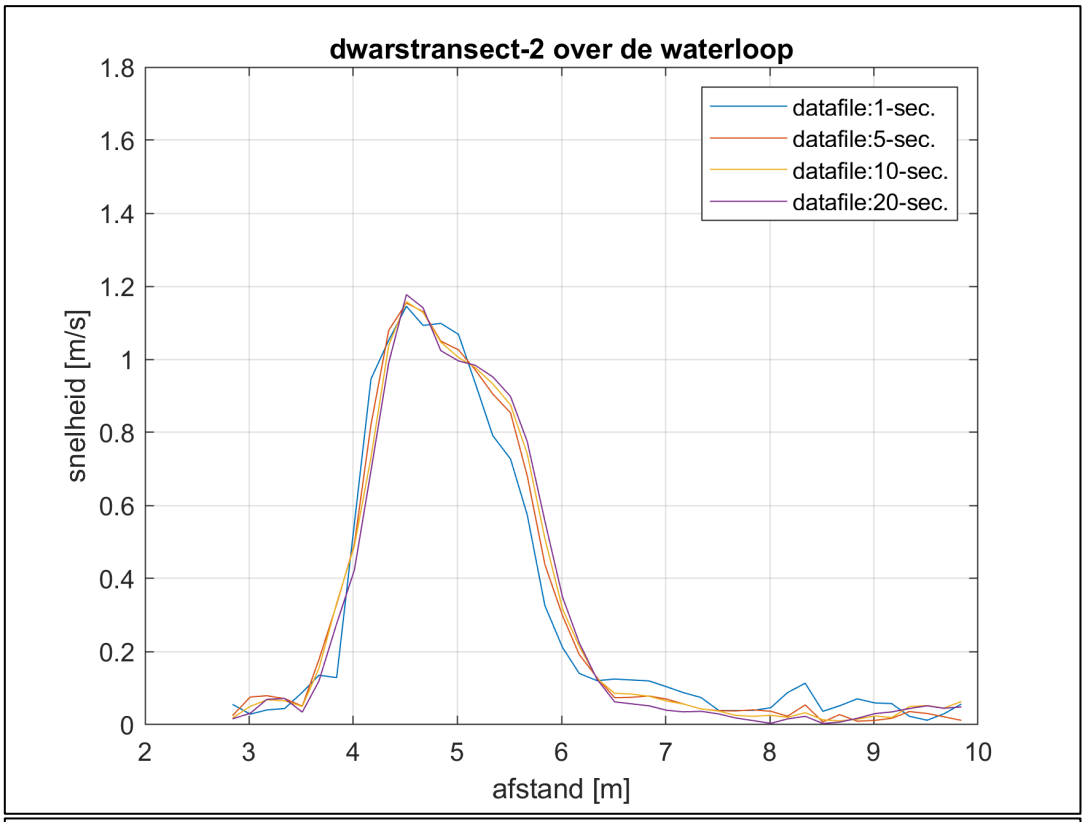


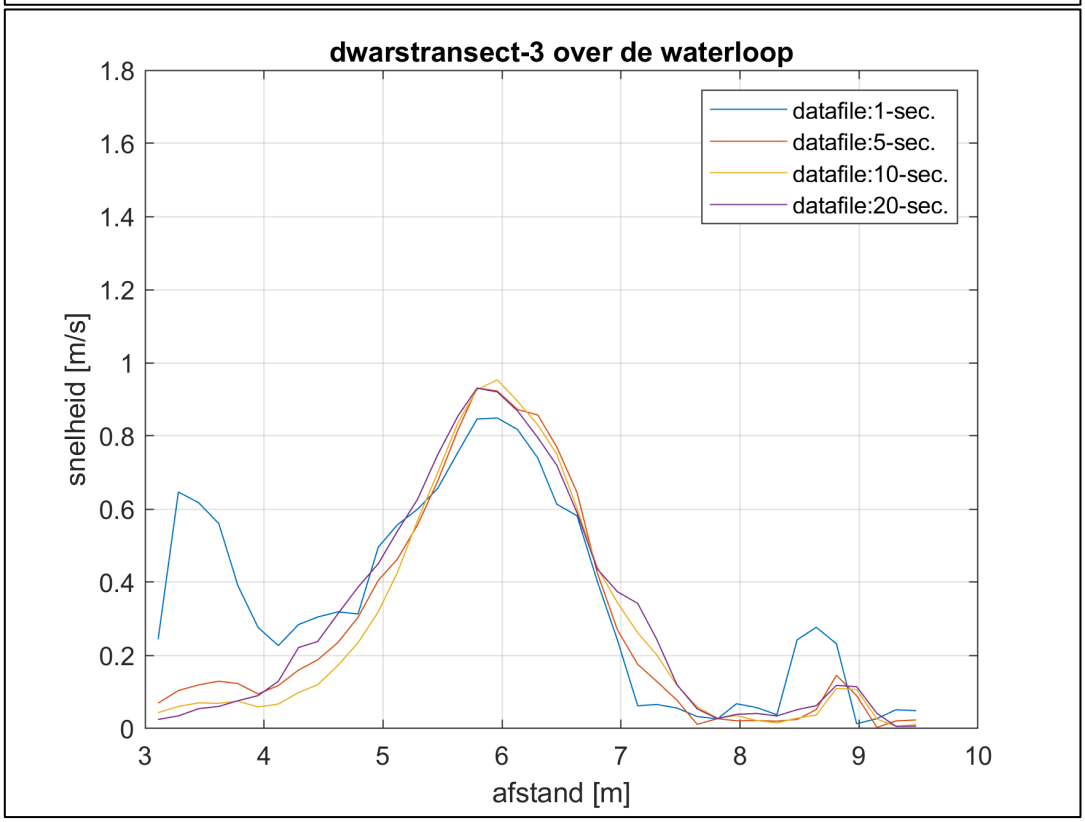

Gemiddelde snelheden i.f.v aantal verwerkte datafiles
Vispassage Kerhove - Bekken-5
Stroomsnelheid
Standaard deviatie
snelheid [m/s]
snelheid [m/s]
aantal datafiles
0
100
200
300
400
500
600
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
0.1
0.3
0.5
0.7

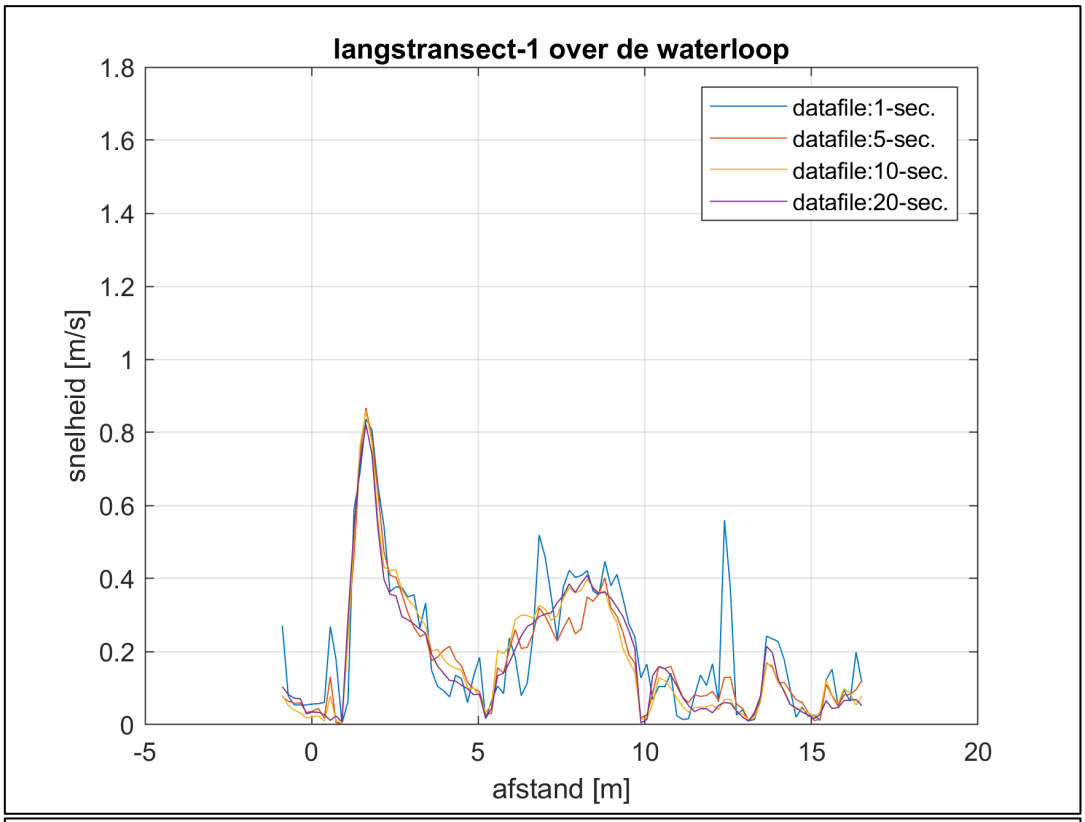

Gemiddelde snelheden i.f.v aantal verwerkte datafiles
Vispassage Kerhove - Bekken-5
Stroomsnelheid
Standaard deviatie
snelheid [m/s]
snelheid [m/s]
aantal datafiles
0
100
200
300
400
500
600
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
0.1
0.3
0.5
0.7

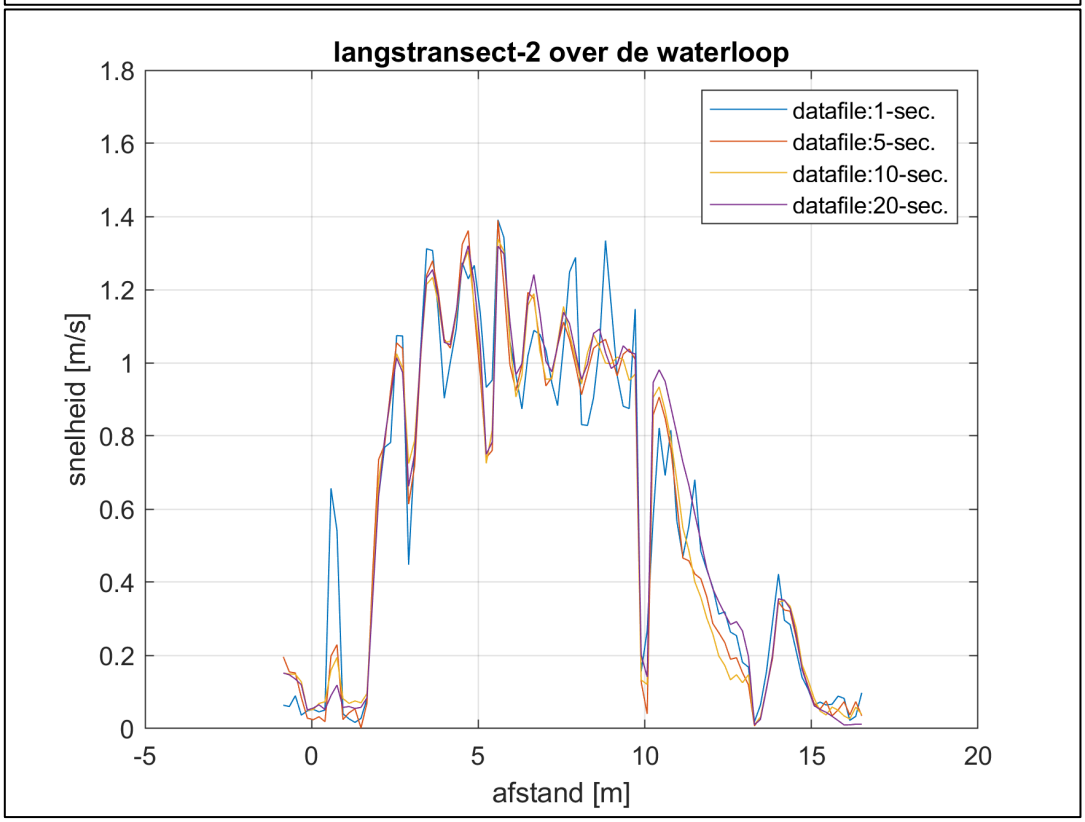
Bijlage 7 Transecten

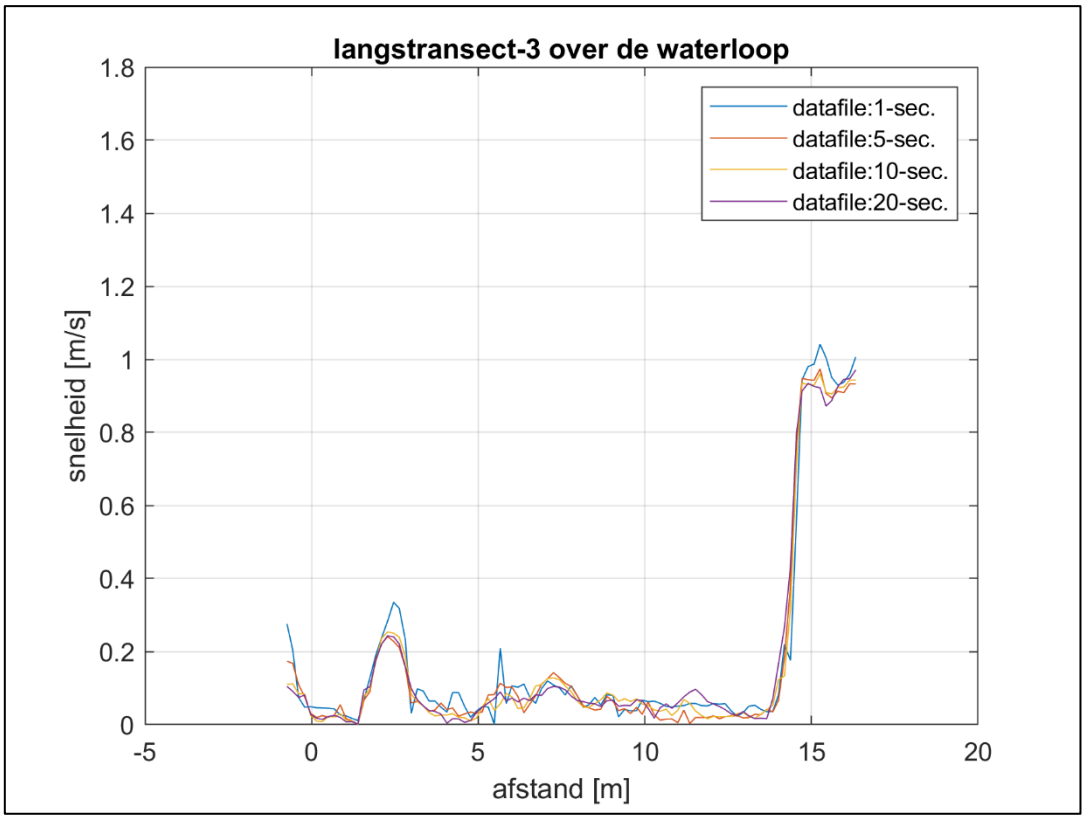



dwarstransect-2 over de waterloop
datafile:1-sec.
datafile:5-sec.
datafile:10-sec.
datafile:20-sec.
snelheid [m/s]
afstand [m]
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
2
3
4
5
6
7
8
9
10

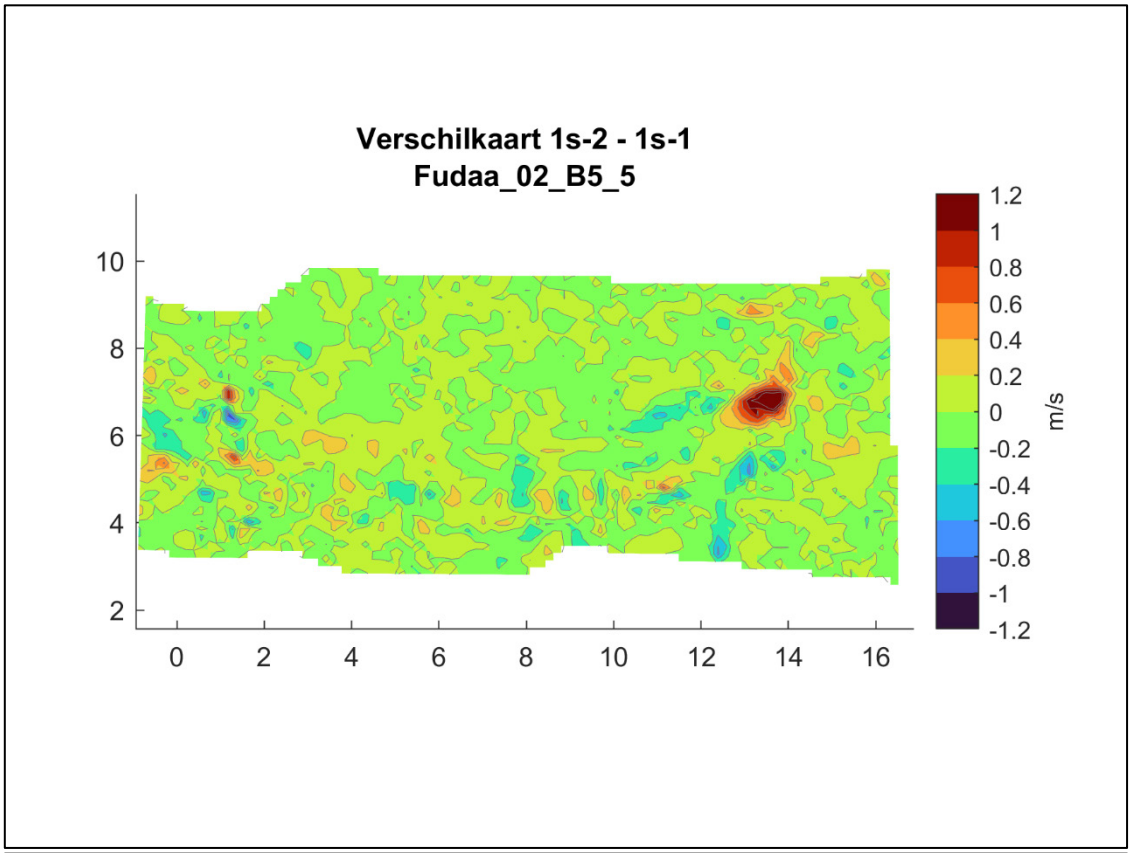

dwarstransect-3 over de waterloop
datafile:1-sec.
datafile:5-sec.
datafile:10-sec.
datafile:20-sec.
snelheid [m/s]
afstand [m]
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
3
4
5
6
7
8
9
10

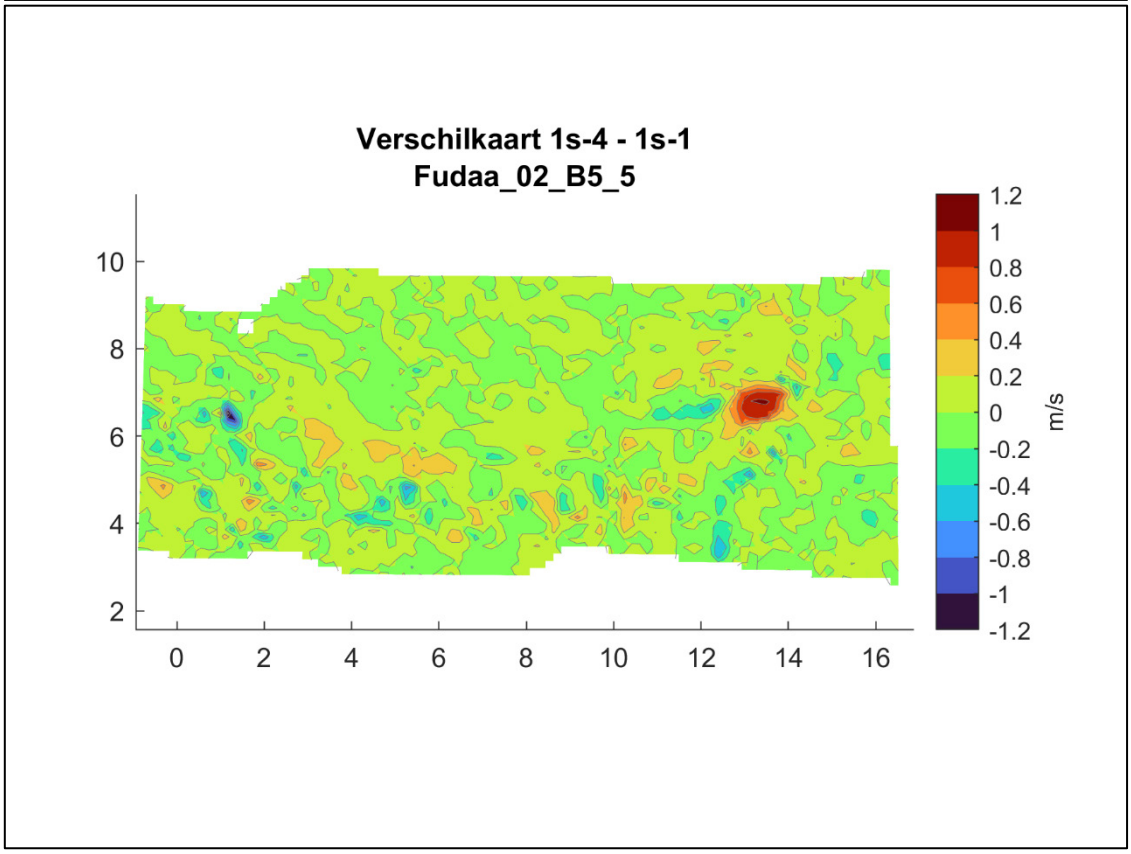

langstransect-1 over de waterloop
datafile:1-sec.
datafile:5-sec.
datafile:10-sec.
datafile:20-sec.
snelheid [m/s]
afstand [m]
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
-5
0
5
10
15
20

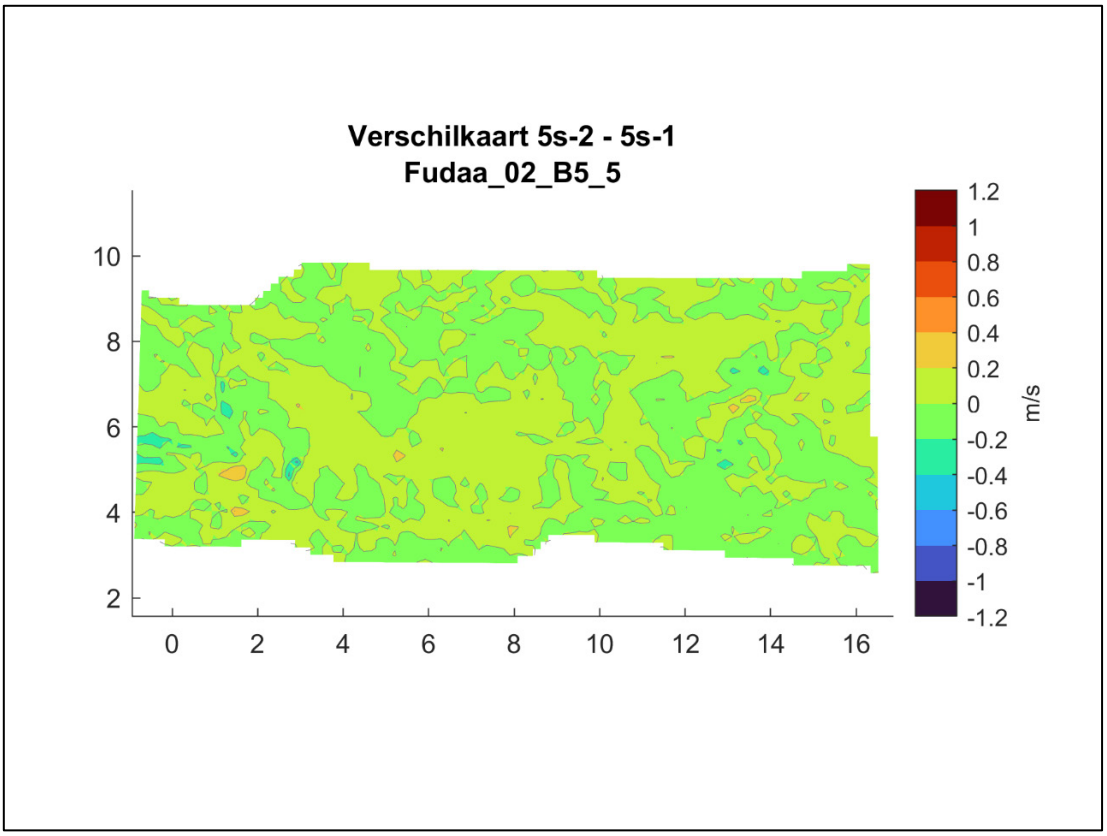

langstransect-2 over de waterloop
datafile:1-sec.
datafile:5-sec.
datafile:10-sec.
datafile:20-sec.
snelheid [m/s]
afstand [m]
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
-5
0
5
10
15
20

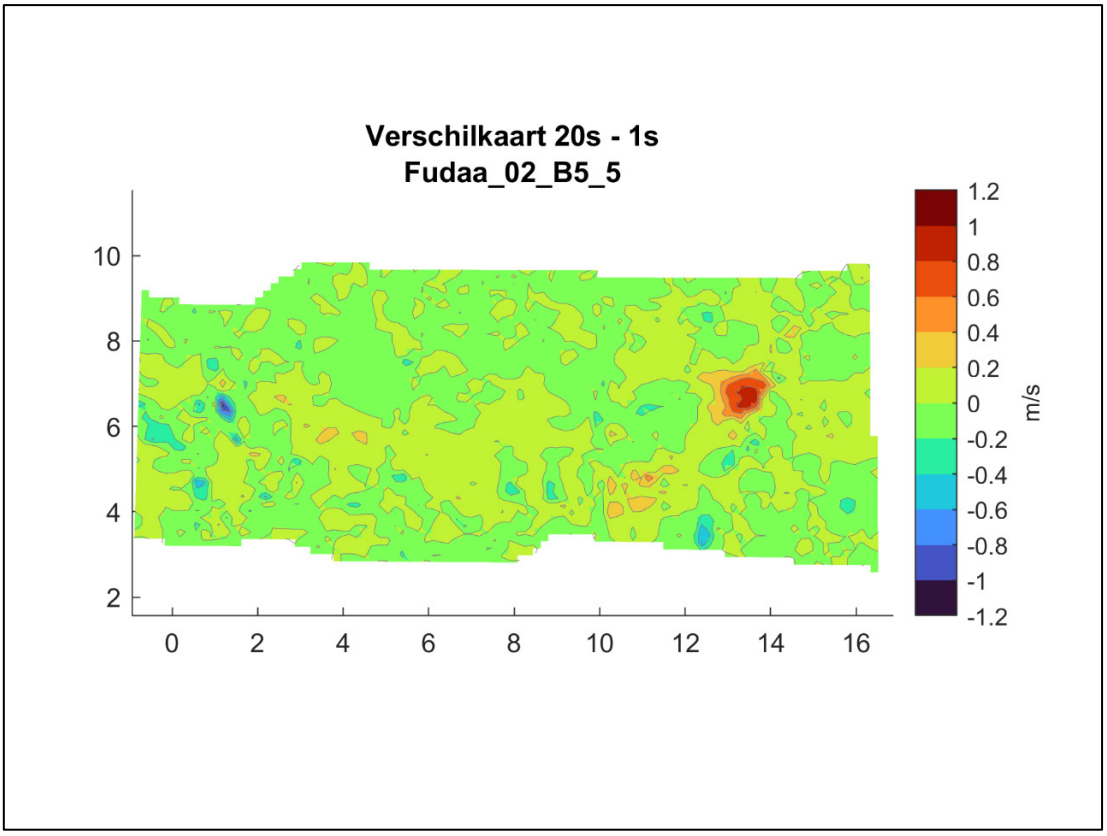

langstransect-3 over de waterloop
datafile:1-sec.
datafile:5-sec.
datafile:10-sec.
datafile:20-sec.
snelheid [m/s]
afstand [m]
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-5
0
5
10
15
20

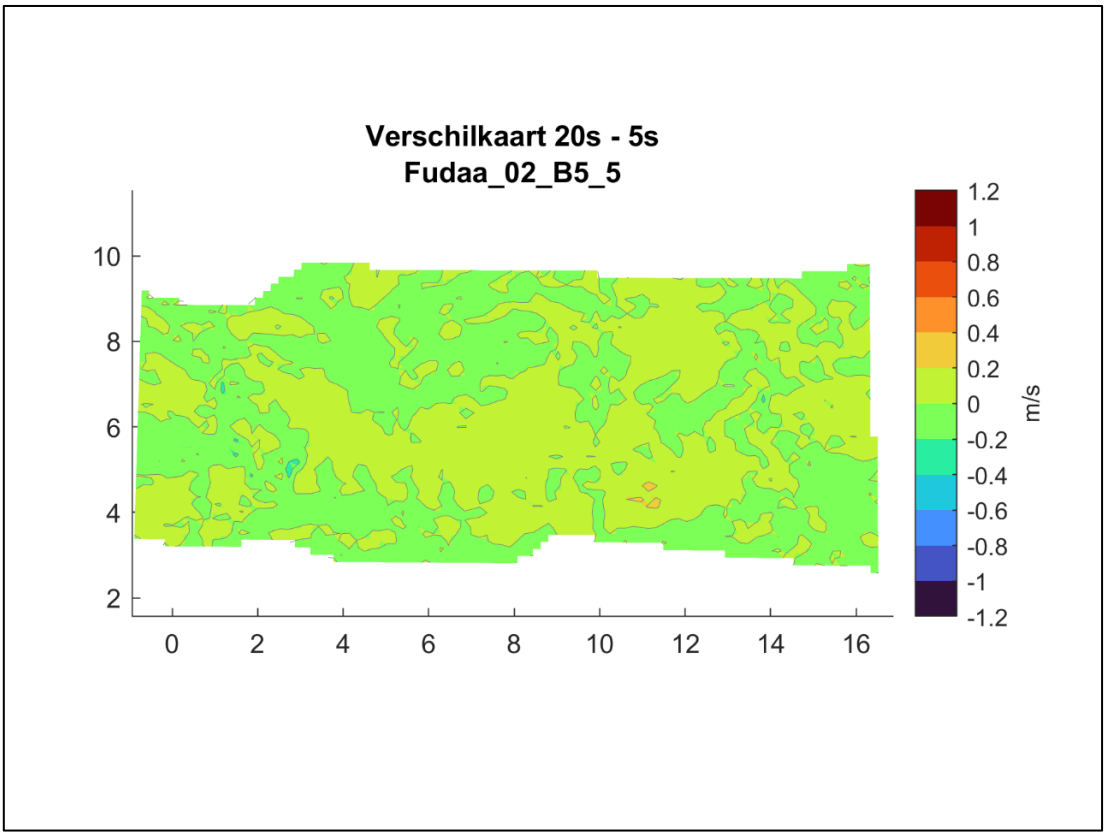
Bijlage 8 Verschilkaarten

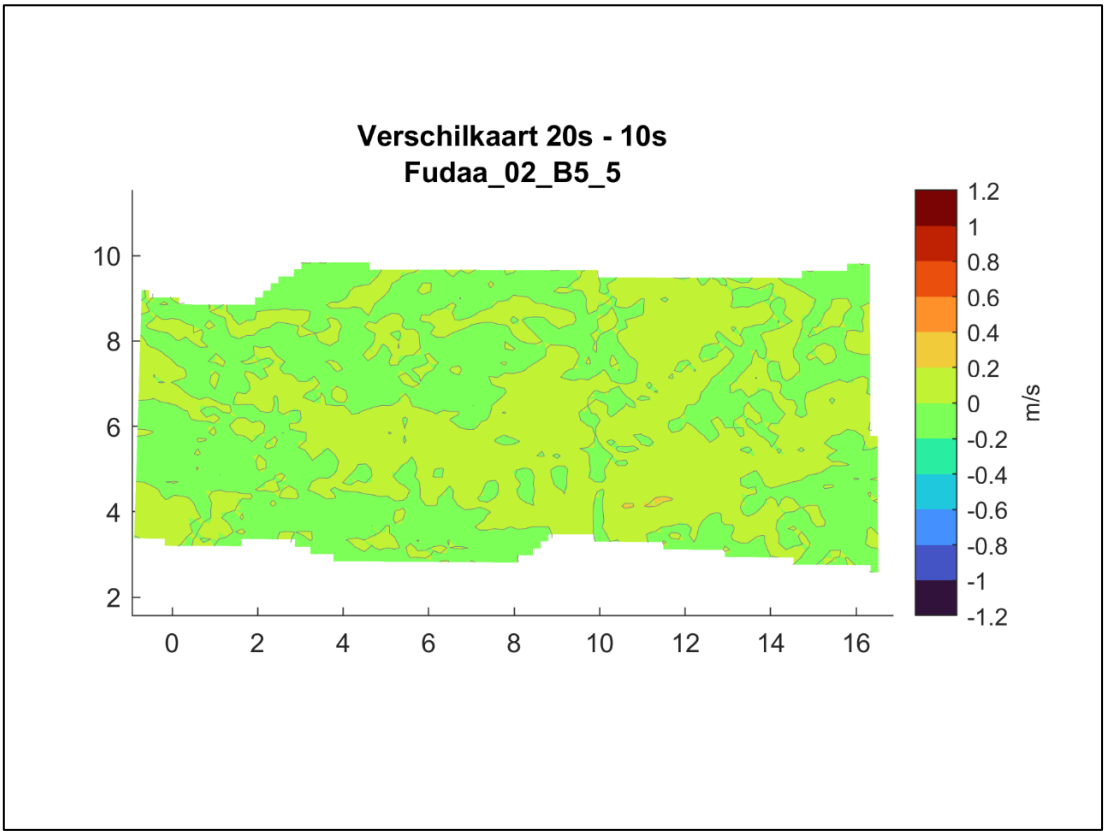





Verschilkaart 5s-2 - 5s-1
Fudaa_02_B5_5
10
8
6
4
2
0
2
4
6
8
10
12
14
16
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-1.2
m/s


Verschilkaart 20s - 1s
Fudaa_02_B5_5
10
8
6
4
2
0
2
4
6
8
10
12
14
16
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-1.2
m/s


Verschilkaart 20s - 5s
Fudaa_02_B5_5
10
8
6
4
2
0
2
4
6
8
10
12
14
16
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-1.2
m/s


Verschilkaart 20s - 10s
Fudaa_02_B5_5
10
8
6
4
2
0
2
4
6
8
10
12
14
16
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-1.2
m/s

Bijlage 9 Vergelijking tussen verschillende software pakketten (Wijava et al. 2013)

Wijava et al. (2023) hebben een vergelijkende studie uitgevoerd van 5 verschillende softwarepaketten voor de bepaling van snelheidsvelden uit beeldopnames. Drie van deze paketten pasten een LSPIV analyse toe: Fudaa-LSPIV, PIVlab, OpenPIV. Het pakket KLT-IV paste een particle tracking velocimetry (PTV) analyse toe en het pakket RIVeR-STIV past een Space Time Image Velocimetry (STIV) toe.

Er werden beelden geregistreerd met behulp van een drone (type DJI Phantom 4 Pro). Het studieopbject betrof een waterweg (Xihu River in Taiwan) met, afhankelijk van de waterstand, een breedte varierend tussen de 12 en 21 meter. De resulaten van de LSPIV analyse werden vergeleken met de meetwaarden van een Surface Velocitry Radar (SVR, type SVR 3D van Decatur Electronics). Er werden data vergeleken van in totaal 2 campagnes. Gedurende beide campagnes werden de camerainstellingen constant gehouden. Ook bij de verwerking werden de gebruikte instellingen constant gehouden over de verschillende verwerkingspakketten.

De studie toont aan dat alle programma's acceptabele resultaten produceerden in vergelijking met de SVR metingen, maar de drie softwarepakketten die gebruik maken van de PIV-methode (Fudaa-LSPIV, PIVlab en OpenPIV) vertonen een lagere afwijking ten opzichte van de radarmetingen. Van de vijf geteste programma's vertoonde Fudaa-LSPIV consequent de laagste ME- en RMSE-waarden in beide campagnes.

Software	Advantages	Limitations
PIVlab	• Visualizes full field vector information • Has pre-processing and post-processing, which enhances the images • Can choose to perform single passes or multiple passes • Does not require a lot of ground control points • The process of analyzing the velocity of the water surface is fast	• Sensitive to changes in the IA (Interrogation Area). • Sensitive to particles on the surface of the water • Users have to perform trial and error to obtain more accurate results
Fudaa-LSPIV	• Visualizes full field vector information • Has clear information about the stabilization parameters and orthorectification • Has a grid so that the visualized vector is clear and neat	• Sensitive to changes in the IA. • Sensitive to particles on the surface of the water • The analysis process takes longer
OpenPIV	• Visualizes full field vector information • The process of analyzing the velocity of the water surface is fast • The simple GUI display makes it easy for the user to understand the process	• Sensitive to changes in the IA. • The parameter S/N value must be carried out via trial and error to obtain the best results
KLT-IV	• Changing block size does not influence the water surface velocity analysis	• Sensitive to changes in the extraction rate; even a small change will change the trajectory intensity

	• Many options for different camera and field conditions • Clearly visualizes the trajectories of the flow field	• For conditions requiring GCPs, camera shake affects the resulting trajectories • User experience is needed to adjust the KLT-IV parameters and hydrological environmental conditions
STIV	• The analysis process is fast because the analysis is only one-dimensional • Allows flexibility to adapt to different flow conditions	• Limitations in analyzing wide areas because it is limited to only one cross section • Sensitive to changes in the IA and length of the search line • Although there is a filter to adjust the illumination of the image, it still requires trial and error to obtain acceptable results

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen
T +32 (0)3 224 60 35
F +32 (0)3 224 60 36
waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be
www.waterbouwkundiglaboratorium.be