

2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Het gebruik van PTV voor het bepalen van de in situ valsnelheden  
van sediment in een troebele omgeving

PROMOTOR :

De heer Yves PLANCKE

**Wim Schroyen**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



**KU LEUVEN**



**KU LEUVEN**

2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Het gebruik van PTV voor het bepalen van de in situ valsnelheden van sediment in een troebele omgeving

PROMOTOR :

De heer Yves PLANCKE

**Wim Schroyen**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde





## Woord vooraf

Vanwege mijn interesse in de waterbouwkundige wereld was de keuze om hierover mijn masterproef uit te voeren dan ook snel gemaakt. Tijdens eerdere stages heb ik reeds kennis kunnen maken met baggerwerkzaamheden, welke een interessant toepassingsgebied vormen voor het onderwerp van dit onderzoek. Dankzij het Waterbouwkundige Laboratorium heb ik een zeer aangename en leerrijke ervaring kunnen opdoen. Tijdens dit onderzoek kon ik de theoretische kennis uit verschillende vakken van mijn opleiding praktisch toepassen.

Vooreerst wil ik graag ir. Yves Plancke bedanken voor zijn goede begeleiding en feedback doorheen het verloop van de masterproef. Daarnaast bedank ik ook graag ing. Ben Wolput voor alle hulp met de opnameapparatuur, proefopstellingen en technische problemen.

Vervolgens wil ik ook graag alle medewerkers van het sedimentlaboratorium bedanken voor de hulp die ze mij geboden hebben met de laboratoriumapparatuur.

Voor het ter beschikking stellen van een licentiecode voor Streams en enkele aanbevelingen omtrent analyseproblemen wil ik ook prof. dr. Roger Nokes van de universiteit van Canterbury bedanken.

Ten slotte wil ik graag mijn familie en vriendin bedanken voor alle morele steun die ze mij doorheen dit proces geboden hebben.

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een  
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



# Inhoud

Woord vooraf .....	1
Lijst van tabellen.....	5
Lijst van figuren .....	7
Abstract .....	9
Abstract in English .....	11
1    Introductie.....	13
2    Literatuurstudie.....	15
2.1    PIV en PTV .....	15
2.2    Beperkende parameters.....	16
2.2.1    Beperkingen op vlak van de opnameapparatuur .....	16
2.2.2    Beperkingen op vlak van belichting.....	17
2.3    Theoretische benadering .....	18
3    Materialen en methoden .....	19
3.1    Sedimentpartikels.....	19
3.2    Waterreservoir .....	21
3.3    Opnameapparatuur.....	21
3.4    Opnamesoftware.....	23
3.5    Analysesoftware .....	23
3.6    Toedieningswijze .....	27
3.7    Proevenreeksen.....	28
4    Resultaten .....	31
4.1    Parameteronderzoek opnamesoftware.....	31
4.2    Parameteronderzoek van de analysesoftware.....	32
4.3    Invloed belichtingswijze .....	34
4.4    Invloed toedieningswijze.....	37
4.5    Snelheidsproeven met gewone belichting.....	37
4.6    Snelheidsproeven met laserbelichting.....	41
5    Besluit.....	45
Bibliografie .....	47
Bijlagelijst .....	49

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een  
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



## Lijst van tabellen

Tabel 1 - Parameters opnameapparatuur .....	22
Tabel 2 - Michiels' algoritme .....	25
Tabel 3 - Parameteronderzoek opnamesoftware .....	31
Tabel 4 - Parameteronderzoek analysesoftware .....	33
Tabel 5 - Intensiteitsalgoritme .....	34
Tabel 6 - Invloed belichtingswijze .....	35
Tabel 7 - Snelheidsproeven met spleetbelichting .....	38
Tabel 8 - Snelheidsproeven met laserbelichting .....	42



De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een  
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



## Lijst van figuren

Figuur 1 - Principe van PTV en PIV .....	15
Figuur 2 - Principe van multiple light scattering.....	16
Figuur 3 - Principe van crossed structured illumination (xSI).....	18
Figuur 4 - Krachtwerking op een sedimentpartikel.....	18
Figuur 5 - Grote watertank en kleine watertank.....	21
Figuur 6 - Flowchart PTV-analyse .....	23
Figuur 7 - Visueel voorbeeld PTV-analyse .....	26
Figuur 8 - Opstelling met spleetbelichting en zonder spleetbelichting .....	27
Figuur 9 - Beeldopname van slibpartikels .....	28
Figuur 10 - Gebruikte mixer en magnetische mixer.....	29
Figuur 11 - Beelden belichtingswijzen 1, 2 en 3 .....	36
Figuur 12 - Vergelijking proef B - 9 met theoretische modellen.....	39
Figuur 13 - PDF's valsnelheden met spleetbelichting .....	40
Figuur 14 - Snelheidsverloop proef B - 14.....	41
Figuur 15 - Origineel beeld proef C - 3 .....	42
Figuur 16 - Beeld van de paden uit proef C - 3.....	43
Figuur 17 - Invloed locatie laservlak op 3 mm.....	44
Figuur 18 - Invloed locatie laservlak op 8 mm.....	44

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een  
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



## Abstract

Om een veilige scheepvaart te garanderen en tijdig onderhoudsbaggerwerken uit te voeren, is het nodig om een goed inzicht te hebben in het sedimenttransport van waterlopen. Dit sedimenttransport wordt beschreven door formules waarbij de valsnelheid van sedimentpartikels een belangrijke parameter is.

Deze masterproef onderzoekt hoe de valsnelheden van sedimentdeeltjes met behulp van PTV in een troebele omgeving bepaald kunnen worden, welke parameters hierop een invloed hebben en ten slotte de in situ toepasbaarheid van deze methode. Door uitvoering van verschillende proeven wordt het analyseproces geoptimaliseerd, om ten slotte een methode te ontwikkelen welke toelaat de valsnelheden in troebele omgeving te bepalen. Deze proeven handelen onder andere over parameterinstellingen voor de beeldopname- en verwerkingssoftware, toedieningswijzen van partikels en de belichtingswijze.

Dit onderzoek toont aan dat de invloed van lichtverstrooiing beperkt kan worden door gebruik van een geconcentreerde belichting en dat de scherpte van de beelden de identificeerbaarheid van de partikels sterk beïnvloedt. Met de methoden uit dit onderzoek worden de theoretische valsnelheden goed benaderd, maar om een nauwkeurige bepaling te verkrijgen dient een andere toedieningswijze gezocht te worden. Met gebruik van een laserbelichting werkte de PTV-analyse correct in troebele omgevingen tot een concentratie van 2250 mg/l. Deze concentratie ligt hoger dan welke in de realiteit optreedt, wat een goede indicatie is van de in situ toepasbaarheid.

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een  
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



## Abstract in English

To guarantee a safe navigation of waterborne vessels and to plan maintenance dredging works in waterways, a good understanding of sediment transport is necessary. This process is described by formulae, in which the settling velocity of sediment particles is an important parameter.

This thesis researches how the settling velocity of small sediment particles can be determined in a turbid environment with the use of PTV, which parameters have a big influence on the ability to do so and whether this method can be implemented for in situ measurements. By conducting several experiments the analysis process is optimised in order to develop a method for the determination of settling velocities in turbid environments. These experiments deal with parameter sets for the image capturing and processing software, methods for administering the particles and lighting methods.

This research shows that the influence of light scattering can be limited by using a concentrated lighting source and that the image sharpness strongly influences the identifiability of the particles. Using the methods from this research theoretical settling velocities are well approximated, but in order to get an accurate determination another method for administering the particles is needed. With the use of laser light, the PTV analysis worked correctly in a turbid environment up to a concentration of 2250 mg/l. This is a good indication of the in situ applicability of the method, since this concentration is higher than the one found in reality.

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een  
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



# 1 Introductie

De stroming van een waterlichaam verplaatst niet enkel het water op zich, maar zal ook een zekere hoeveelheid sedimenttransport met zich meebrengen. Om een veilige scheepvaart te kunnen garanderen en tijdig baggerwerken kunnen uit te voeren, is het belangrijk meer inzicht te krijgen in dit sedimenttransport. Om dit in te schatten worden vaak numerieke computermodellen ingezet om het sedimenttransport en de daarmee gerelateerde morfologische veranderingen te voorspellen. Dergelijke modellen maken gebruik van formules die het sedimenttransport beschrijven. Een van de parameters die hierin belangrijk zijn, is de valsnelheid van de sedimentpartikels. Eerder onderzoek (Havermans, 2017) heeft aangetoond dat met behulp van camera's de bezinking van sedimentdeeltjes in beeld gebracht kan worden in een proefopstelling. Uit deze beelden kunnen vervolgens, met behulp van digitale beeldverwerkingssoftware, de valsnelheden van de partikels bepaald worden.

Hoewel voorgaand onderzoek plaats vond in een testopstelling met helder water, zal men in de realiteit geconfronteerd worden met troebele condities. Deze masterproef zal op het bestaande onderzoek verder bouwen om uiteindelijk een methode te bekomen waarmee men in situ de valsnelheden van het sediment kan bepalen. Om het onderzoek succesvol af te ronden zal op de volgende vragen een antwoord gezocht moeten worden:

- Wat zijn de beperkende parameters om valsnelheden in een troebele omgeving te bepalen?
- Hoe kan de invloed van deze parameters gereduceerd worden?
- Kan met behulp van PTV de valsnelheid in situ bepaald worden?

Om een antwoord op deze vragen te zoeken worden, na het bestuderen van de nodige literatuur, enkele deelproeven uitgevoerd welke in dit document verder beschreven worden.



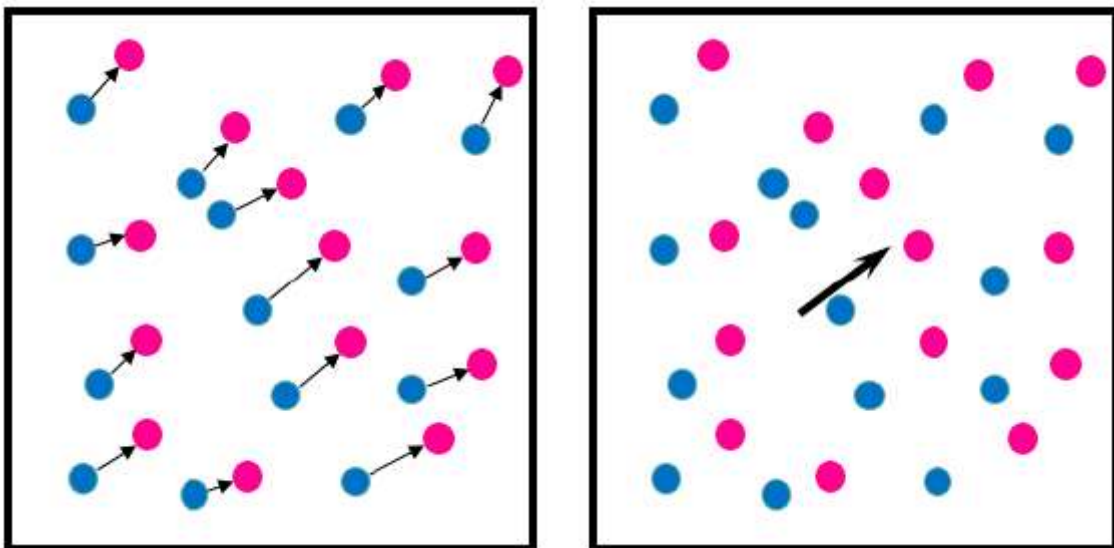
De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een  
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



## 2 Literatuurstudie

### 2.1 PIV en PTV

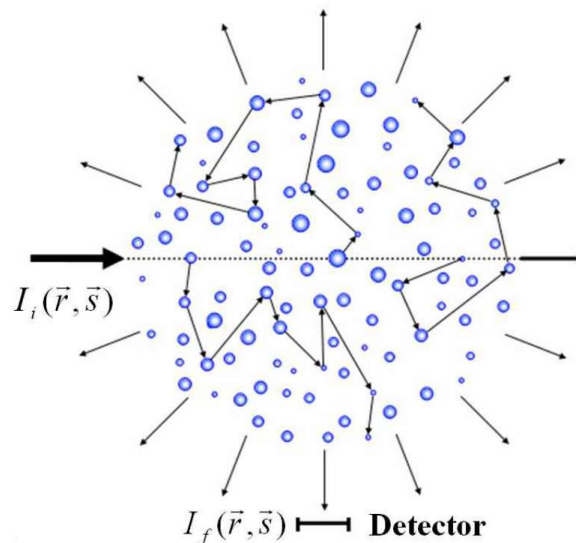
Hoewel de bewegingen van sedimentpartikels op verschillende wijzen kunnen gemeten worden, zoals bijvoorbeeld akoestisch met behulp van het dopplereffect, hebben *particle image velocimetry* (PIV) en *particle tracking velocimetry* (PTV) meestal de voorkeur. Het grote voordeel van het gebruik van PIV is dat niet enkel de snelheden bepaald kunnen worden, maar dat men daarenboven de afgelegde baan van de partikels volledig in beeld kan brengen. Het basisprincipe van PIV en PTV wordt in figuur 1 weergegeven en is grotendeels hetzelfde, bewegende partikels worden belicht en er worden beeldopnamen gemaakt aan een bepaalde *frame rate* oftewel hoeveelheid beelden per seconden. Het verschil zit echter in de verwerking van deze beelden. Bij PIV verkrijgt men een Euleriaans snelheidsveld van de stroming doordat men hier de volledige concentratie volgt en er dus een resultante beweging van het gehele beeld ontstaat. Bij PTV worden de partikels echter individueel gevolgd en verkrijgt men een Lagrangiaans veld van paden. Met behulp van analysesoftware worden vervolgens de partikels per beeld aan elkaar gekoppeld waardoor uiteindelijk de banen van de partikels visueel voorgesteld kunnen worden. Aangezien de frame rate van de camera gekend is, en de software de afstand tussen de locaties van een partikel op twee achtereenvolgende beelden weet, kan de afgelegde weg per tijdseenheid oftewel de valsnelheid van het partikel bepaald worden.



Figuur 1 - Principe van PTV (links) en PIV (rechts) (Ergin, 2018)

## 2.2 Beperkende parameters

Voorgaand onderzoek (Havermans, 2017) heeft aangetoond dat de valsnelheden van sedimentpartikels met behulp van *particle tracking velocimetry* (PTV) bepaald kunnen worden, maar dat deze methode bij een verhoogde graad van troebelheid niet meer in staat is correct te functioneren. Dit komt voornamelijk door het fenomeen *multiple light scattering* waarbij de invallende elektromagnetische lichtstralen meerdere malen met de partikels zullen reageren. Hierdoor zal de scherpte van de momentopnamen afnemen, er minder contrast optreden tussen de partikels en de achtergrond en zullen ook de intensiteitsniveaus incorrect bepaald worden (Kristensson, 2018). Figuur 2 geeft het principe van multiple light scattering weer.



Figuur 2 - Principe van multiple light scattering (Berrocal, 2006)

Bij dit fenomeen doen zich dus twee grote problemen voor, waarop men kan inspelen door aanpassingen te maken in de proefopstelling. Enerzijds kan de combinatie van het camera- en lenstypen niet goed op de partikels afgestemd zijn waardoor deze onvoldoende zichtbaar zijn voor de gebruikte analysesoftware. Anderzijds kan een ongeschikte belichtingswijze voor een onder- of overbelichting van het proefsample in het beeldveld zorgen.

### 2.2.1 Beperkingen op vlak van de opnameapparatuur

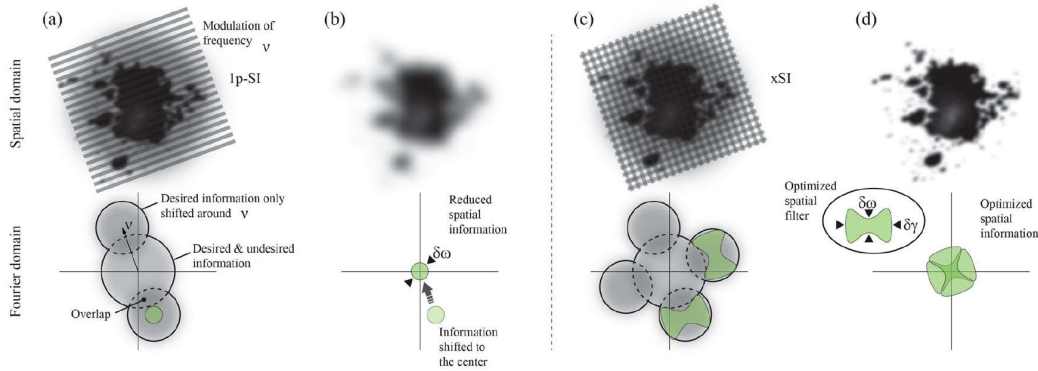
Opdat de sedimentdeeltjes voldoende zichtbaar zijn voor de camera, dienen enkele effecten in rekening gebracht te worden tijdens het inwinnen van de beeldopnamen. Wanneer een te klein aantal aan partikels in de beelden is opgenomen, zullen er ook weinig paden geanalyseerd worden door de analysesoftware waardoor de invloed van extrema in de resultaten vergroot kan worden. Het beeldveld van de proefopstelling dient daarom voldoende groot te zijn. Bijkomend zorgt onscherpte ervoor dat de intensiteitswaarden aan de randen van de partikels geleidelijk afnemen waardoor deze randen niet nauwkeurig bepaald kunnen worden en de partikeldiameter mogelijk incorrect geanalyseerd wordt.

Deze ongunstige effecten kunnen vermeden worden door er op in te spelen met de keuze van de beeldopname-instrumenten. Door de lens aan te passen kan een hogere uitvergrotingsgraad en een groter beeldveld bekomen worden, hierbij is het belangrijk te onthouden dat ook de werkafstand en het diepteveld zullen veranderen. Een aanpassing van de camera zal dan weer zorgen voor een verhoogde resolutie door middel van een grotere sensor. Uiteraard moet bij de combinatie van de lens en de camera de mechanische compatibiliteit gecontroleerd worden zodat ze in elkaar passen, daarbuiten zijn er echter nog enkele belangrijke parameters die waarborging vergen. Om vignettering tegen te gaan dient de diameter van de beeldcirkel van de lens groter te zijn dan de diagonaal van de beeldsensor die in de camera zit. Bij vignettering neemt de lichtintensiteit van de beeldopname af aan de randen, aangezien de beeldsensor dan groter is dan de beeldcirkel van de lens zullen de hoekpunten niet belicht worden en zullen deze zwart en afgerond afgebeeld worden. Verder moet ook de pixelgrootte voldoende klein zijn om ervoor te zorgen dat elk sedimentpartikel uit meerdere pixels opgemaakt kan worden, hiervoor moeten de beeldresolutie van de beeldsensor en de uitvergrotingsgraad van de lens voldoende groot zijn. Ten slotte moet de frequentie, of het aantal beelden per seconde, van de camera voldoende hoog zijn om ervoor te zorgen dat de analyse-software gemakkelijk de partikels aan elkaar kan linken tussen de verschillende beelden.

### 2.2.2 Beperkingen op vlak van belichting

De keuze van de belichtingswijze heeft ook een invloed op de zichtbaarheid van de sedimentdeeltjes. Wanneer het licht op de partikels wordt uitgezonden zullen er zich twee reacties voordoen. Enerzijds wordt het licht door de partikels weerkaatst, vanwege de oppervlakte van de deeltjes zal dit een diffuse weerkaatsing veroorzaken. Deze weerkaatste lichtstralen reageren vervolgens verder met de andere partikels die in het sample op hun pad liggen, wat door figuur 2 eerder werd weergegeven. Hierdoor zal de beeldsensor van de camera niet enkel de lichtintensiteit van de gewenste partikels waarnemen, maar ook een bepaalde hoeveelheid aan lichtintensiteit aan de pixels toekennen omwille van de lichtverstrooiing door de partikels op de voor- en achtergrond van het beeldveld. Anderzijds wordt het invallende licht ook gedeeltelijk geabsorbeerd door de sedimentdeeltjes, wat bij geconcentreerde belichtingswijzen voor een te lage waargenomen intensiteit in de beeldopnamen kan zorgen. In het eerste geval is er dus sprake van overbelichting, terwijl er zich in het tweede geval onderbelichting voordoet. In beide gevallen zorgen de waargenomen intensiteitswaarden voor onvoldoende contrast tussen de individuele partikels en de achtergrond. Dit leidt tot het incorrect onderscheiden of het niet waarneembaar zijn van de individuele partikels tijdens de PTV-analyse.

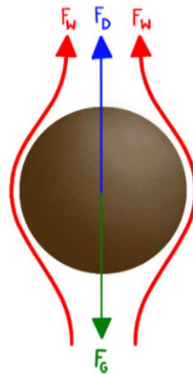
Door een gepaste belichtingswijze te gebruiken verminderd de invloed van multiple light scattering. Voorgaand onderzoek (Havermans, 2017) stelde gepolariseerd licht of het gebruik van laserlicht voor als alternatieven. Uit verder onderzoek (Kristensson, 2018) blijkt een gestructureerde belichtingswijze met gekruist patroon een goede oplossing te bieden. Crossed Structured Laser Illumination Planar Imaging (xSLIPI) zorgt namelijk voor een verhoogd contrast en een betere ruimtelijke resolutie terwijl de belichtingsopstelling relatief goedkoop en simpel blijft. Figuur 3 toont het werkingsprincipe waarbij een normale gestructureerde belichting (a) wel voor een minder wazige achtergrond zal zorgen, maar de spatiale frequentie enkel in een richting zal verwerken. De gekruiste gestructureerde belichting (c) zal deze informatie echter in twee richtingen verwerken waardoor een aanzienlijk hoger contrast en dus een betere ruimtelijke resolutie bekomen wordt. Hierbij kan een enkele laser in combinatie met een straalplitser gebruikt worden om de twee verschillende invalshoeken te verkrijgen.



Figuur 3 - Principe van crossed structured illumination (xSI) (Kristensson, 2018)

## 2.3 Theoretische benadering

Ten slotte is het belangrijk om de uitkomsten van de proeven naar correctheid te controleren door ze te vergelijken met theoretische waarden. Deze vergelijking zal gebeuren ten opzichte van de terminale snelheid van de partikels, welke zal optreden wanneer er een evenwicht is tussen de drijfkraft, weerstandskraft en de zwaartekraft die op de partikels inwerken conform figuur 4.



Figuur 4 - Krachtwerking op een sedimentpartikel

De meest courante methode hiervoor is het gebruik van de wet van Stokes, deze aanpak is gebaseerd op een Reynoldsgetal ( $Re$ )  $\leq 1$  en perfect sferische partikels. Hoewel de stroming laminair zal verlopen tijdens de proeven zijn de sedimentpartikels echter niet sferisch, waardoor de wet van Stokes niet gebruikt kan worden. Uit onderzoek (Fentie, 2004) is gebleken dat voor partikels in de grootteorde die in dit onderzoek gebruikt zullen worden de formule van Cheng (Cheng, 1997) het meest betrouwbaar en toepasbaar is. De andere beschouwde formules worden in bijlage A weergegeven. Hieronder wordt de formule weergegeven met  $\nu$  de kinematische viscositeit van het fluïdum,  $d$  de diameter van de partikels,  $\rho$  de massadichtheid van het fluïdum,  $\rho_s$  de massadichtheid van de partikels,  $g$  de valversnelling en  $w_{s,Cheng}$  de valsnelheid van de partikels volgens Cheng's formule.

$$w_{s,Cheng} = \frac{\nu}{d} \cdot \left( \sqrt{25 + 1,2 \cdot \left( \left( \frac{(\rho_s - \rho) \cdot g}{\rho \cdot \nu^2} \right)^{1/3} \cdot d \right)^2} - 5 \right)^{3/2} \quad (2.3.1)$$

## 3 Materialen en methoden

### 3.1 Sedimentpartikels

Dit onderzoek maakt gebruik van sedimentstalen uit de Schelde die vervolgens gedroogd en gezeefd werden. Er kunnen twee typen sediment onderscheiden worden: sedimenttype 1 omvat zeer kleine slibdeeltjes, sedimenttype 2 bestaat uit fijne zandkorrels. Omdat deze partikels niet exact even groot zijn en de verdeling per diameter niet gekend is, wordt de korrelverdeling van de partikels bepaald. Hierbij gebeurt de voorbereiding van de sedimentstalen door een Malvern Hydro 2000, die door middel van een ultrasoon systeem samenhangende deeltjes uit elkaar zal scheiden, waarna een Malvern Mastersizer 2000 met behulp van laserdiffractie de diameter van alle partikels zal bepalen. Hierbij worden de sedimentdeeltjes met behulp van een rode en blauwe laserbron belicht. Vervolgens wordt het licht door de deeltjes onder een bepaalde hoek verstrooid, deze hoek is afhankelijk van de partikeldiameter. De Mastersizer bezit tweeënvijftig sensoren die in staat zijn het bekomen verstrooiingspatroon per deeltje op te meten. Met behulp van theoretische modellen stelt de software daarna een korrelverdeling van de geteste partikels op in de vorm van een *probability density function* oftewel PDF. Deze kunnen vervolgens naar een PDF van de valsnelheid omgevormd worden door ze te combineren met de formule van Cheng (Cheng, 1997) die eerder werd vermeld. De PDF van de diameters uit sample 1 is terug te vinden in bijlage B.

Uit literatuur over de Schelde (Vandenbruwaene, 2020) blijkt dat de concentratie aan sedimentdeeltjes in sommige locaties van het estuarium een jaarlijks gemiddelde waarde van 600 mg/l kan bereiken. In Weert liggen de maximale concentraties zelfs rond 1000 mg/l, waardoor deze waarde het gewenste streefdoel is voor de proefopstelling in dit onderzoek. In het voorgaande onderzoek van Havermans (Havermans, 2017) werkte de opstelling goed tot een troebelheid van 40 NTU bereikt werd. Deze waarde kan van 40 *nephelometric turbidity units* (NTU) naar ongeveer 80 SSC oftewel *suspended sediment concentration* (mg/l) omgezet worden aan de hand van de kalibratierelaties tussen SSC en turbiditeit uit het MONEOS-jaarrapport (Vandenbruwaene, 2020). De waarden van Weert en Schellebelle worden hierbij gebruikt omdat deze metingen worden uitgevoerd met behulp van YSI multiparametertoestellen, welke ook in dit onderzoek gebruikt wordt ter controle tijdens de proeven.

Om met de keuze van de opnametoestellen goed op de partikels in te kunnen spelen kan de grootteorde van de valsnelheid theoretisch ingeschat worden met behulp van formule 2.3.1. Hoewel de massadichtheid van het te testen materiaal in eerste instantie nog niet gekend was kon hiervoor het soortelijk gewicht van primaire slibdeeltjes genomen worden, namelijk  $2650 \text{ kg/m}^3$ . Door de samples tijdens de proeven te onderzoeken is gebleken dat sample 1 uit partikels van diameter  $2 \mu\text{m}$  tot  $31 \mu\text{m}$  met  $d(0,5)$  gelijk aan  $10 \mu\text{m}$  bestaat en bevat sample 2 partikels tussen  $116 \mu\text{m}$  en  $248 \mu\text{m}$  met  $d(0,5)$  gelijk aan  $170 \mu\text{m}$ . Met behulp van een pyknometer werd de massadichtheid per sample bepaald als zijnde  $2041 \text{ kg/m}^3$  voor sample 1 en  $2223 \text{ kg/m}^3$  voor sample 2.

Voor het berekenen van de valsnelheden wordt de formule van Cheng (Cheng, 1997) gebruikt. Hierin is de kinematische viscositeit  $\nu$  van water gelijk aan  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , de valversnelling  $g$  heeft een waarde van  $9,81 \text{ m/s}^2$  en de massadichtheid van het water wordt aangenomen als  $998 \text{ kg/m}^3$ . Hierdoor worden onderstaande valsnelheden bekomen met partikeldiameter  $10 \mu\text{m}$  voor sample 1 en diameter  $170 \mu\text{m}$  voor sample 2.

$$w_{s,sample 1} = 0,045 \text{ mm/s}$$

$$w_{s,sample 2} = 11,566 \text{ mm/s}$$

De valsnelheden blijken dus zeer klein te zijn, wat natuurlijk logisch is vanwege de kleine diameter van de partikels. Nu de grootteorde gekend is kan hierop geanticipeerd worden tijdens het maken van de proefopstelling bij het instellen van het aantal beelden per seconden en dergelijke.

## 3.2 Waterreservoir

Om een goed zicht te krijgen op de vallende partikels in het waterlichaam wordt gebruik gemaakt van een doorzichtige watertank met binnenafmetingen 100x200x450 mm en een wanddikte van 15 mm. Deze afmetingen zorgen ervoor dat het water in de tank op een gebruiksvriendelijke wijze vervangen kan worden en er ruimte is om een turbiditeitsmeter te voorzien.

Omdat tijdens de laserproeven het volledige waterlichaam troebel gemaakt werd bleek deze watertank echter te groot te zijn om de turbiditeit van het waterlichaam gemakkelijk te manipuleren. Daarom werd een kleinere watertank uit plexiglas vervaardigd. Door de inhoud ervan net iets groter dan 1 liter te maken kan de turbiditeit gecontroleerd geregeld worden in een waterlichaam van 1 liter. Beide watertanks worden in figuur 5 afgebeeld.



Figuur 5 - Grote watertank (links) en kleine watertank (rechts)

## 3.3 Opnameapparatuur

De beelden worden opgenomen met behulp van een digitale camera, hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de UI3080CP-C-HQ Rev2 en UI3200SE-C-HQ camera's van Industrial Development Systems GmbH (IDS) waarvan de technische gegevens terug te vinden zijn in bijlagen C en D. De UI3080CP-C-HQ Rev2 is een 5 Mpix camera met een resolutie van 2456 x 2054 pixels. Hierin zit een IMX250LQR-C type 2/3" beeldsensor verwerkt met een resolutie van 8,473 x 7,086 mm waardoor de uiteindelijke pixelgrootte 3,45  $\mu\text{m}$  bedraagt. De UI3200SE-C-HQ is een 12 Mpix camera en bezit een IMX304LQR-C type 1,1" beeldsensor met resolutie 4104 x 3006 Mpix waardoor de pixelgrootte eveneens 3,45  $\mu\text{m}$  is. De technische informatie van deze beeldsensoren kan in bijlagen E en F teruggevonden worden. Omdat de afmetingen van de afbeeldingen van de UI3200SE-C-HQ groter zijn heeft ze echter een kleinere frame rate van 24 fps in *free-run mode* ten opzichte van 77 fps bij de UI3080CP-C-HQ Rev2. Tijdens de voorgaande studie werden beelden opgenomen aan 40 fps, maar aangezien de te analyseren partikels in dit onderzoek veel kleiner zijn en dus ook de valsnelheid lager zal liggen is de kleinere frame rate voldoende.



Om goede beelden op te nemen heeft de camera een lens nodig. Een eerste beschikbare lens is een bi-telecentrische 100-BTC-005 lens van Opto, welke met de 5Mpix camera verbonden is. Enkele belangrijke parameters hiervan zijn de uitvergrotingsfactor van 0,05x alsook de werkafstand van 415,7 mm en de scherptediepte van 253 mm. De tweede lens is een telecentrische TC4M009-C van Opto Engineering met een uitvergrotingsfactor van 2x, een werkafstand van 63,3 mm en een scherptediepte van 0,4 mm. Deze lens kan met beiden camera's verbonden worden. De technische fiches van beide lenzen zijn in bijlagen G en H terug te vinden. Beide camera's zijn telecentrisch waardoor de lichtstralen evenwijdig invallen en er geen bijkomende vergroting mogelijk is ten gevolge van lichtbuiging die voortvloeit uit verschillen in brekingsindexen van materialen.

Alvorens met de proeven te starten is het belangrijk om in te schatten welke combinatie van apparatuur de beste resultaten zal opleveren, tabel 1 geeft een overzicht van de meest belangrijke parameters van de toestellen waarbij de parameters van de geselecteerde lens en camera in vet worden aangeduid. Hieruit valt af te leiden dat de bitelecentrische lens met de 5Mpix camera niet bruikbaar is voor het onderzoeken van kleine slibdeeltjes. Door de partikeloppervlakte in pixels uit te rekenen kan namelijk bepaald worden dat elk slibpartikel van 10  $\mu\text{m}$  slechts door 0,016 pixels zal worden voorgesteld. Dit betekent dat de lichtintensiteit van het partikel niet voldoende contrast zal bieden in de pixels en er geen analyse op uitgevoerd kan worden. Voor beide camera's in combinatie met de TC4M009-C lens kan de partikeloppervlakte herleid worden tot 26,39 pixels per partikel, wat wel voor voldoende contrast zal zorgen. Omdat de 100-BTC-005 lens al gebruikt werd in combinatie met zandpartikels in het voorgaande onderzoek en de zandpartikels door hun diameter slechts 4 tot 5 beelden zichtbaar zouden zijn in het beeldveld van de TC4M009-C lens werd besloten verder geen rekening te houden met de zandpartikels en het onderzoek enkel uit te voeren op de kleine slibdeeltjes. Hierbij dient de frame rate niet hoog te liggen vanwege de kleine partikeldiameter en zal de 12 Mpix camera het interessantste zijn om de proeven mee uit te voeren, de beeldopnamen gebeuren daarom met de UI3200SE camera en de TC4M009-C lens.

Tabel 1 - Parameters opnameapparatuur

Parameters	UI3080CP	UI3200SE	Parameters	100-BTC-005	TMC4M009-C
Resolutie	2456x2054 pixels	<b>4104x3006</b> <b>pixels</b>	Werkafstand	415,7 mm	<b>63,3 mm</b>
Pixelgrootte	3,45 $\mu\text{m}$	<b>3,45 <math>\mu\text{m}</math></b>	Scherptediepte	253 mm	<b>0,4 mm</b>
Frame rate	77 fps	<b>24 fps</b>	Uitvergroting	x0,05	<b>x2</b>

Tijdens de beeldopnamen dienen de partikels belicht te worden, hiervoor werden eerst gewone spotlights gebruikt. Ook werd een rode Z-LASER Z5M18B-F-635-lp30 laser gehuurd met een intensiteit van 5 mW en een openingshoek van 30° om na te gaan of deze belichtingswijze de beeldkwaliteit zou verbeteren. Omdat dit een klasse 2M laser is zijn bij gebruik bijkomende veiligheidsmaatregelen nodig. Bijlage I geeft meer technische informatie over deze laser. De verschillende belichtingswijzen worden in hoofdstuk 4.3 van dit document besproken.

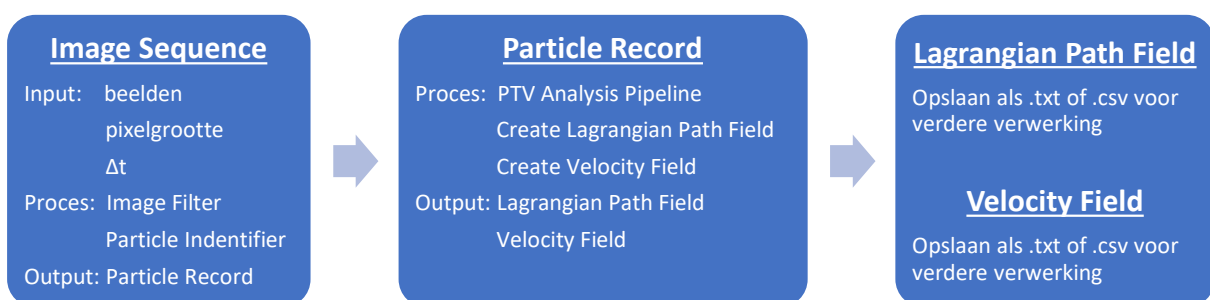
### 3.4 Opnamesoftware

Om de beelden op te nemen is ook software nodig, (Michiels, 2017) en (Havermans, 2017) toonden aan dat de metingen op basis van twee softwarepakketten uitgevoerd kunnen worden. Als eerste is er de uEye Cockpit Suite welke bij IDS camera's meegeleverd wordt. In dit programma kunnen de camera-instellingen ingevoerd worden zoals de sluitertijd en het aantal beelden per seconde, deze instellingen kunnen dan opgeslagen worden in een parameterbestand welke vervolgens in de andere software geladen kan worden. De tweede software WL Cam Triggered werd in het Waterbouwkundig Laboratorium zelf ontwikkeld en zal aan de hand van het parameterbestand de opnamen uitvoeren. uEye wordt niet voor de opnamen gebruikt omdat dit programma een videobestand aanmaakt terwijl WL Cam Triggered een reeks beelden opneemt. Aangezien de PTV-analyse op een beeldenreeks dient uitgevoerd te worden en niet op een video-opname, kan men na gebruik van de WL Cam Triggered software onmiddellijk met de beeldverwerking van start gaan.

### 3.5 Analysesoftware

Nadat het beeldmateriaal opgenomen is dient dit verder verwerkt te worden, hiervoor wordt gebruik gemaakt van de software Streams die door professor Roger Nokes van de University of Canterbury ontwikkeld werd. Deze software kan gratis gebruikt worden na het aanvragen van een licentiecode. In deze paragraaf worden de basisprincipes aangehaald, verdere informatie kan teruggevonden worden in de handleidingen van Streams (Nokes, Streams 3.02 - Theory and design, 2019), (Nokes, Streams 3.02 - Users guide core, 2019) en (Nokes, Streams 3.02 - Users guide fields, 2019).

In Streams wordt het PTV-analyseproces verdeeld in verschillende onderdelen welke in deze paragraaf verder toegelicht worden. Een eerste onderdeel zijn de objecten, dit zijn virtuele entiteiten waarop bepaalde handeling uitgevoerd kunnen worden. Enkele voorbeelden van objecten die tijdens dit onderzoek gebruikt worden zijn de *image sequence*, *particle record*, *lagrangian path field* en *eulerian velocity field*. Nadat een object bekomen is kan hierop een of meerdere processen uitgevoerd worden, waarbij een opeenvolging van processen een *pipeline* vormt. Zulke pipelines zorgen voor het ontstaan van nieuwe objecten. Figuur 6 geeft aan de hand van een flowchart de PTV-analyse weer.



Figuur 6 - Flowchart PTV-analyse

De image sequence is het geheel van beelden dat tijdens een beeldopname opgenomen wordt en zal dusdanig het eerste object zijn waarmee de analyse van start gaat. Bij het aanmaken van de image sequence dient de tijdsprong tussen de verschillende beelden alsook de pixelgrootte ingevuld te worden om een accuraat resultaat te verkrijgen. De pipeline die op de image sequence wordt toegepast bestaat uit twee processen namelijk de *remove background filter* en *particle identifier*.

De remove background filter bepaalt binnen een vierkant met zelf te kiezen afmetingen rondom elke pixel een gemiddelde intensiteit waarna deze gemiddelde waarde van de desbetreffende pixel afgetrokken wordt. *Subtract image* is een andere nuttige filter waarbij de intensiteit van een achtergrondfoto in elke frame van de beeldenreeks in mindering gebracht wordt. Omdat de proeven met grote troebelheidsgraad echter veel lichtverstrooiing kunnen opleveren is er gekozen om de remove background filter te gebruiken. Als tweede onderdeel uit deze pipeline zal de particle identifier de individuele partikels in alle beelden identificeren aan de hand van enkele parameters die door de gebruiker ingevoerd dienen te worden. Dit identificatieproces kan gebeuren volgens *single threshold*, *dual treshhold* en *Gaussian dual threshold* waarbij telkens een piekintensiteit ingevoerd wordt. Bij *single threshold* worden alle aangrenzende pixels met intensiteit groter of gelijk aan de piekintensiteit gebundeld en zullen ze samen een partikel voorstellen. *Dual threshold* werkt volgens een bijkomende parameter die het intensiteitspercentage zal aangeven dat de randpixels hebben ten opzichte van de centerpixel. Een cluster van pixels wordt hierbij beschouwd waarvan elke pixel een intensiteit groter of gelijk aan de piekintensiteit heeft, waarvan de centerpixel door de software bepaald wordt als zijnde de pixel met de grootste intensiteit binnen die cluster. Bij het gebruik van de *Gaussian dual threshold* verloopt de identificatie vrijwel hetzelfde, enkel zal de centerpixel bepaald worden met behulp van een Gausscurve. Na het uitvoeren van deze pipeline op de image sequence zal het particle record ontstaan.

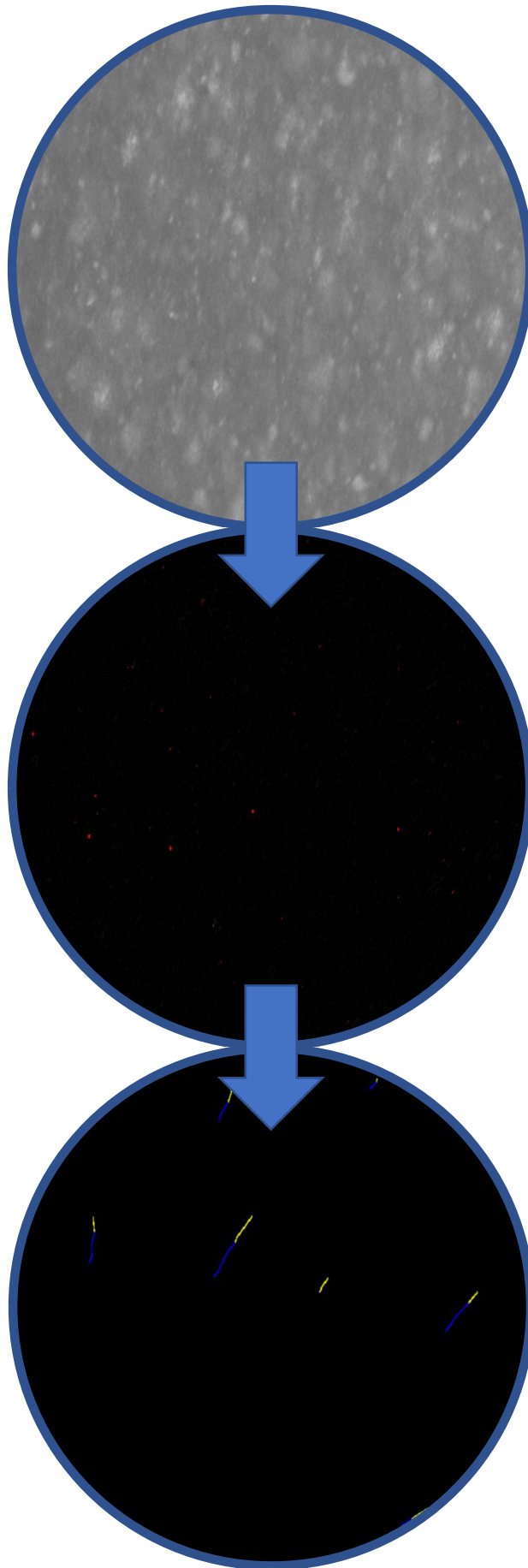
Het particle record bevat alle informatie van de geïdentificeerde partikels waaronder de nummering, locatie, vorm, intensiteit en afmetingen. De volgende stap bestaat uit het *matchen* van de geïdentificeerde partikels tussen de verschillende beelden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een reeks analyses met daaraan telkens een bepaalde maximale kost gekoppeld. De opeenvolgende analyses zullen voor een optimalisatie van de matches zorgen door steeds de partikels met de laagste *matchingcost* aan elkaar te koppelen. De analyses bestaan uit het *analysetype*, de *costing* waaraan de matches onderworpen worden en de verdere optimalisatie. De vier analysetypes zijn de *global optimisation*, *local optimisation*, *residual optimisation* en *clean up*. *Global optimisation* zal de partikels matchen door de laagste *matchingcost* te bepalen over de gehele beeldenreeks, terwijl dit bij *local optimisation* tussen opeenvolgende beelden gebeurt. Met behulp van *residual optimisation* worden vervolgens matches gezocht voor de partikels waar er nog geen matches voor werden gevonden. *Clean up* verwijdert ten slotte alle inconsistente en ongewenste matches waardoor de matches verder geoptimaliseerd worden. De *costings* worden onderverdeeld in zogenaamde *state-based costings* en *match-based costings* waarbij het koppelen van de partikels respectievelijk gebeurt aan de hand van informatie over de partikels zelf (kleur, vorm, intensiteit, ...) en anderzijds volgens informatie die uit de mogelijke match zou voortvloeien (snelheid, lengte van het pad, ...). De verdere optimalisatie heeft betrekking tot de maximale *matchingcost* die aan de desbetreffende *costing* gekoppeld wordt alsook een zoekvenster waarbinnen de software naar matches zoekt. Tijdens dit onderzoek zal voor de analyses een algoritme als basis gebruikt worden dat door Michiels (Michiels, 2017) opgesteld werd, tabel 2 geeft dit algoritme weer.

Tabel 2 - Michiels' algoritme (Michiels, 2017)

Analysis	Analysis type	Costing	Maximum matching cost
1	Local optimisation	Colour and/or Shape	2
2	Clean up	Polynomial velocity + Time-average velocity	0,5
3	Global optimisation	Polynomial velocity + Time-average velocity	1
4	Clean up	Path length	0,3
5	Residual optimisation	Colour and/or Shape	2
6	Clean up	Polynomial velocity + Time-average velocity	0,5
7	Global optimisation	Polynomial velocity + Time-average velocity	1
8	Clean up	Path Length	0,3

Nadat de partikels gematcht zijn kan een Lagrangiaans veld van de paden opgemaakt worden met behulp van het *create Lagrangian 2D path field* proces. Dit object stelt de paden van de gelinkte partikels visueel voor per frame en bevat onder andere info over de lengtes van de paden en de snelheden van de partikels in de horizontale en verticale richting. Er kan ook een Euleriaans snelheidsveld gemaakt worden door gebruik van het *create velocity 2D field* proces. Dit object laat bijvoorbeeld toe het snelheidsverloop doorheen de tijd te analyseren. De informatie uit deze objecten wordt opgeslagen als een tekstbestanden waardoor de datasets met behulp van Matlab en Excel verder verwerkt kunnen worden.

In figuur 7 wordt de PTV-analyse visueel weergegeven door de verschillende analysestappen op eenzelfde beeld toe te passen. De figuur omvat een beeld van de image sequence, het particle record en het Lagrangian path field uit een proef met laserbelichting. Hierbij is het belangrijk te onthouden dat in de middelste afbeelding sommige partikels slechts in het rood aangeduid kunnen worden wanneer de afbeelding voldoende uitvergroet wordt.



*Figuur 7 - Visueel voorbeeld PTV-analyse*

### 3.6 Toedieningswijze

Tijdens de proeven dient rekening gehouden te worden met factoren die de bepaling van de valsnelheden kunnen beïnvloeden. Een van deze factoren zijn de randeffecten ter hoogte van de wanden van de watertank, waarbij de invloed ervan afhankelijk is van de afstand tussen de partikels en de tankwand. Havermans (Havermans, 2017) toonde echter aan dat de invloed hiervan bij deze watertank zeer klein is ten opzichte van andere factoren.

Een andere storende factor zijn wervels, welke voor turbulente stromingen zorgen. Door deze turbulente stromingen krijgen de vallende partikels niet enkel een verticale, maar ook een horizontale component in hun pad en zal de valsnelheid dusdanig beïnvloed worden. Tijdens voorgaand onderzoek (Havermans, 2017) werd aangetoond dat de impact van deze wervels afneemt in de tijd, maar dat al het sediment al bezonken is wanneer ze uitdoven en er dus rekening gehouden moet worden met de invloed van wervels tijdens de analyse.

Om de impact van deze factoren te beperken worden enkele toedieningswijzen uitgetest. Hoewel de invloed van randeffecten relatief klein is worden de partikels, rekening houdend met de werkafstand van de lens, zo ver mogelijk naar het midden van de watertank in het water aangebracht om deze ongunstige effecten te minimaliseren. Met behulp van een schepje kunnen de partikels net boven het oppervlak in het water vallen, waarbij wervels gecreëerd worden. Tijdens de proeven werd vastgesteld dat de kleinste partikels echter een te kleine massa hebben waardoor ze niet door de oppervlaktespanning van het wateroppervlak kunnen breken en erop blijven drijven. Om dit probleem op te lossen wordt het sediment op voorhand met water gemengd en vervolgens met behulp van een spuit in het water aangebracht. Hierbij valt op te merken dat de intensiteit van de wervels toeneemt naarmate de druk van het inspuiten verhoogt, de partikels een grotere neerwaartse snelheid bezitten wanneer ze onder druk ingespoten worden en dat het contact van de spuit met het wateroppervlak het water in beweging zal brengen. Om de impact van deze fenomenen te verkleinen werd een rietje aan de proefopstelling vastgemaakt. Hierdoor kan het sediment aangebracht worden terwijl de verstoring van het wateroppervlak en de invloed van de spuitdruk geminimaliseerd worden. Ten slotte worden de camera en lens op een lage hoogte ingesteld ten opzichte van de watertank zodat de partikels volgens een zo lineair mogelijk pad doorheen het beeldveld vallen. Figuren 8 en 9 geven een overzicht van de gebruikte opstellingen.



*Figuur 8 - Opstelling met spleetbelichting (links) en zonder spleetbelichting (rechts)*



*Figuur 9 - Beeldopname van slibpartikels*

### 3.7 Proevenreeksen

Om de proefopstelling te optimaliseren wordt het onderzoek in verschillende proevenreeksen opgedeeld. Een eerste reeks handelt over de parameterinstellingen van de uEye Cockpit software. Hierbij wordt nagekeken welke parameterwaarden voor de software en camera gebruikt kunnen worden om de analyseerbaarheid van de beeldopnamen te bevorderen. De volgende proevenreeks heeft hetzelfde doeleinde, maar handelt over de parameterinstellingen en analysemethoden van de Streams software. Daarna worden verschillende belichtingswijzen onderzocht om na te gaan in welke mate deze een invloed hebben op het verloop van de PTV-analyse. In deze proevenreeks is het belangrijk dat de partikels in het beeldveld voldoende belicht worden terwijl de hoeveelheid lichtverstrooiing beperkt blijft. Vervolgens wordt de toedieningswijze behandeld in een vierde proevenreeks om na te gaan op welke manier de partikels in het water aangebracht kunnen worden. Daarbij dienen de verstoring van het watervolume en de verstoring van de valsnelheden van de partikels geminimaliseerd te worden. Ten slotte worden de valsnelheden van de partikels beproefd. In hoofdstuk 4.5 worden de valsnelheden van een troebel sample in helder water gemeten met behulp van een spleetbelichting door spotlights, waarbij wordt nagekeken of de valsnelheden correct bepaald kunnen worden en in welk turbiditeitsdomein deze methode bruikbaar is. Hoofdstuk 4.6 onderzoekt daarentegen of deze valsnelheden correct bepaald kunnen worden in een volledig troebele omgeving, om zo na te gaan of laserbelichting het bruikbaarheidsdomein met betrekking tot turbiditeit kan verhogen.

Voor het parameteronderzoek van de uEye cockpit en Streams software, die in hoofdstukken 4.1 en 4.2 behandeld worden, is de concentratie aan partikels minder van belang omdat hier de beeldkwaliteit het belangrijkste is. Daardoor werden de sedimentdeeltjes met een kleine hoeveelheid water gemengd, wat resulteerde in een willekeurige concentratie aan toegediende partikels.

Tijdens het uitvoeren van de snelheidsproeven dient de concentratie aan deeltjes wel goed gecontroleerd te worden alvorens het sample in het water te spuiten. Door een welbepaalde hoeveelheid aan partikels in een waterlichaam van 1 liter aan te brengen wordt de gewenste bovengrens aan concentratie aangemaakt, een mixer zorgt hierbij voor een zo goed mogelijke verdeling van de partikels. Vervolgens wordt een klein subsample uit dit mengsel in de heldere watertank ingespoten om de beeldopname uit te voeren. Daarna wordt er een bepaalde hoeveelheid van het mengsel verwijderd en wordt dezelfde hoeveelheid aan helder water toegevoegd, door deze verdunning wordt de volgende te beproeven concentratie bereikt en gebeuren alle proeven met hetzelfde monster. Hierbij is het belangrijk te onthouden dat de ingespoten concentratie sterk verdund door het heldere water in de watertank, daarom worden de verwijderde hoeveelheden mengsel per stap opgeslagen in flessen en door het Waterbouwkundig Laboratorium onderzocht naar werkelijke concentratie. Er is gekozen om het mengsel in helder water toe te dienen omdat spleetbelichting met spotverlichting geen resultaat oplevert indien het waterlichaam volledig troebel is. Deze werkingmethode is tevens in situ praktisch toepasbaar op een meetschip.

Omdat zowel de laserbelichting als de focusdiepte slechts in een zeer smal veld actief zijn werd er geopteerd om de snelheidsproeven met laserbelichting uit te voeren zonder toediening met de spuit, maar het volledige waterlichaam van de kleine watertank troebel te maken. Dit komt overeen met de condities in situ. Bij de eerste reeks snelheidsproeven bleken de sedimentdeeltjes niet goed van elkaar gescheiden te worden door de gewone mixer en bleven veel grote partikels daarom niet in suspensie waardoor ze op de bodem ophoopten en niet in de watertank toegediend werden. Daarom werd tijdens de snelheidsproeven met laserbelichting het mengsel met behulp van een magnetische mixer aangemaakt, waarbij een magnetische staaf aan een gewenst toerental op de bodem van het mengsel ronddraait en dus in staat is de samenhangende deeltjes van elkaar te scheiden. Dit zorgde voor een grote verhoging in de homogeniteit van het mengsel. Figuur 10 geeft de proefopstelling weer voor de laserproeven met het troebele waterlichaam.



*Figuur 10 - Gebruikte mixer en magnetische mixer*





## 4 Resultaten

Dit onderzoek werd uitgevoerd door middel van enkele deelonderzoeken welke in deze sectie behandeld worden. De deelonderzoeken bestaan uit:

- parameteronderzoek van de opnamesoftware;
- parameteronderzoek van de analysesoftware;
- invloed van de belichtingswijze;
- invloed van de toedieningswijze;
- snelheidsproeven met gewone belichting;
- snelheidsproeven met laserbelichting.

### 4.1 Parameteronderzoek opnamesoftware

Om te bepalen welke parameterinstellingen in de opnamesoftware de meest bruikbare beelden opleveren werden enkele beeldopnamen uitgevoerd met verschillende parametersets. Voor een nauwkeurige snelheidsbepaling is het belangrijk dat in de beelden voldoende partikels geïdentificeerd kunnen worden en deze voldoende lang zichtbaar zijn. Deze proeven werden uitgevoerd op vallende slibdeeltjes uit sample 1. Tabel 3 geeft de gebruikte parameterinstellingen en hun respectievelijke resultaten weer na de beeldverwerking in Streams. Hierin geeft de frame rate het aantal beelden weer dat per seconde opgenomen wordt, de exposure time is de belichtingstijd en geeft weer hoelang de beeldsensor van de camera aan licht blootgesteld wordt per beeldopname. De volgende belangrijke parameter is de master gain welke aangeeft in welke mate de intensiteit van elke pixel vergroot wordt door de software, hierbij komen de waarden tussen 0 en 100 steeds overeen met een bepaalde vermenigvuldigingsfactor (59 = x6; 67 = x8; 75 = x10; 79 = x12). De gemiddelde valsnelheid van de partikels wordt per proef weergegeven onder  $w_{s,gem}$  met daarnaast de bijhorende standaarddeviatie  $\sigma$ .

Hoewel de camera een frame rate van 24 fps toelaat werden er bij de beeldopnamen verschillende beelden gedropt, dit is een fenomeen waarbij er sommige beelden overgeslagen worden en de desbetreffende beeldopname dus niet meer bruikbaar is voor analyse omwille van een onregelmatig tijdsverschil tussen de individuele beelden. Na verschillende tests en zelfs het vervangen van de computer door een nieuwer model met betere harde schijf bleek het probleem aan te houden, vermoedelijk zit er dus een bottleneck in de software. Door dit probleem werd de maximaal bruikbare frame rate verlaagd tot 12 fps.

Tabel 3 - Parameteronderzoek opnamesoftware

Proef	Instellingen			Resultaten				
	Frame rate [fps]	Exposure time [ms]	Master gain [-]	Gemiddelde partikels/frame [st]	Gemiddelde matches/frame [st]	Gemiddelde padlengte [frames/pad]	$w_{s,gem}$ [mm/s]	$\sigma$ [mm/s]
A - 1	10	5	67	109	47	43	0,129	0,118
A - 2	10	2	67	441	132	68	0,020	0,042
A - 3	10	10	75	8	3	64	0,266	0,059
A - 4	10	10	79	43	19	57	0,125	0,087
A - 5	10	5	59	79	37	39	0,112	0,062
A - 6	12	5	67	195	70	53	0,107	0,153

Uit de waarden van tabel 3 valt af te leiden dat de scherpte van de vastgelegde partikels en het contrast een belangrijke invloed hebben op de analyseerbaarheid van de beeldopnamen. Zo bezit proef A - 2 met de laagste belichtingstijd wel het grootst aantal geïdentificeerde partikels, maar blijkt deze belichtingstijd, en dus ook de intensiteitswaarden van de pixels, te laag te zijn omdat deze partikels allemaal dezelfde diameter bezitten en ze dus foutief geïdentificeerd werden. Proeven A - 3 en A - 4 leveren het minst aantal partikels op door de combinatie van een lange belichtingstijd met een lage frame rate.

Het verschil in het gemiddelde aantal geïdentificeerde en gematchte partikels per beeld tussen proeven A - 1 en A - 6 duidt aan dat het vergroten van de frame rate, waarbij tevens ook de scherpte van de partikels vergroot, de beeldopnamen positief beïnvloedt. Door vergelijking van proeven A - 5 met A - 1 en A - 3 met A - 4 blijkt dat het verhogen van de master gain resulteert in meer geïdentificeerde partikels. Wanneer een beeld helderder gemaakt dient te worden is het dus beter om de master gain te verhogen in plaats van de exposure time, omdat de aanwezigheid van meer achtergrondruis ten behoeve van de kunstmatige intensiteitsverhoging een relatief kleinere impact heeft dan de geïntroduceerde onscherpte door verhoging van de belichtingstijd.

De gemiddelde valsnelheden liggen, op deze uit proef A - 2 na, allemaal in dezelfde grootteorde. In proef A - 3 is wel een verdubbeling van de gemiddelde valsnelheid op te merken, wat te wijten valt aan het lage aantal geïdentificeerde partikels. Dit komt doordat voornamelijk de grotere partikels het meest helder afgebeeld worden. Aangezien de PTV-analyse op basis van intensiteit uitgevoerd wordt blijven hoofdzakelijk deze grotere deeltjes over, welke de grootste massa en dus ook de grootste valsnelheid bezitten.

Zoals net werd aangehaald werden de partikels in proef A - 2 foutief geïdentificeerd, waardoor de instellingen uit proef A - 6 zowel het grootst aantal partikels als matches oplevert. Bovendien is ook de gemiddelde padlengte voldoende groot. Daarom werd gekozen om de parameterinstellingen uit proef A - 6 te gebruiken tijdens dit onderzoek.

## 4.2 Parameteronderzoek van de analysesoftware

Nadat de beelden opgenomen zijn dienen ze verwerkt te worden door de analysesoftware. Alvorens Streams in staat is om de analyse uit te voeren dienen enkele belangrijke parameters ingevuld te worden. Voor de identificatie van de partikels kunnen, zoals in hoofdstuk 3.5 werd besproken, meerdere methoden gebruikt worden. In dit onderzoek worden de dual threshold en single (monochroom) threshold toegepast. In troebele situaties kan de lichtverstrooiing voor veel achtergrondruis zorgen op de beelden, hierbij is het remove background filterproces dus zeer handig. Verschillende combinaties van deze processen worden toegepast op de twee beste beeldopnamen uit de eerste deelproef, zijnde proeven A - 1 en A - 6. Deze procescombinaties bestaan uit single threshold (monochroom), dual threshold, single threshold (monochroom) + remove background filter en dual threshold + remove background filter. Tabel 4 geeft per procescombinatie de gemiddelde resultaten van de twee beeldopnamen weer, de proeven met filter werden geanalyseerd op een intensiteitsniveau van 30 terwijl dit voor de proeven zonder filter intensiteitsniveau 80 was.

Doordat er zich *framedrops* voordeden werd de frame rate begrensd tot 12 fps. Hierbij moest de te verwerken hoeveelheid data per seconde nog verder verlaagd worden door monochroom 8 bit beelden op te nemen. Dit wil zeggen dat de pixels geen intensiteiten in de RGB-kleuren, maar wel 256 verschillende grijstinten kunnen bevatten. Het Michiels algoritme (Michiels, 2017) maakt gebruik van de color en shape gebaseerde state-based costings, door het gebruik van monochroom beeldopnamen is de costing op basis van kleur dus niet bruikbaar. Vanwege de platte vorm van kleideeltjes hebben de partikels dus een onregelmatige vorm waardoor de costing op basis van de vorm ook niet meer interessant blijkt. Voor dit onderzoek werd daarom conform tabel 5, welke op de volgende pagina wordt afgebeeld, gebruik gemaakt van de intensity state-based costing om de PTV-analyse in Streams uit te voeren.

Nadat de beelden door Streams verwerkt zijn wordt de verkregen data geanalyseerd door middel van een Matlab-script. Dit script is gecodeerd om uit de databestanden de individuele partikels te identificeren en hun horizontale, werkelijke verticale en theoretische verticale snelheden alsook hun padlengten in een Excel-bestand als output te geven. Om de PTV-analyse te optimaliseren worden in het script enkele filters toegevoegd, door filter 1 worden partikels met een padlengte kleiner dan 5 beelden niet in rekening gebracht en worden in filter 2 eventuele stilstaande partikels die foutief geïdentificeerd werden en partikels die door turbulente stromingen omhoog stijgen verwijderd. De verhouding van het aantal paden na elke filterstap ten opzichte van het originele aantal paden uit Streams geeft conversieratio's die het beoordelen van de verschillende procescombinaties zullen beïnvloeden.

Tabel 4 - Parameteronderzoek analysesoftware

Proces-combinatie	Gemiddelde ratio filter 1 [%]	Gemiddelde ratio filter 2 [%]	Gemiddelde padlengte [frames/pad]	Gemiddelde hoev. paden na filters [st]	$W_{s,gem}$ [mm/s]	$\sigma$ [mm/s]
Single M	66	53	21	71	0,222	0,126
Dual	71	63	20	39	0,201	0,113
Single M + filter	65	10	39	57	0,118	0,117
Dual + filter	64	9	48	82	0,117	0,136

De waarden uit tabel 4 tonen aan dat beide identificatieprocessen eenzelfde gemiddelde padlengte bezorgen wanneer geen filterproces van kracht is. Echter produceert het proces op basis van de single threshold gemiddeld 82% meer paden dan het dual threshold proces (71 t.o.v. 39) terwijl het verschil in conversieratio's relatief beperkt blijft, waardoor de single threshold aanbevolen is wanneer er geen achtergrond-filter in de analyse gebruikt wordt.

Bij gebruik van een remove background filterproces zijn de eerder besproken conversieratio's na elke filterstap gelijk voor beide soorten thresholds, maar produceert de dual threshold gemiddeld 44% meer paden (82 t.o.v. 57) na beide filterstappen terwijl het verschil in padlengte vrij beperkt blijft. Hierdoor is het gebruik van de dual threshold in combinatie met de remove background filter in troebele omgeving aanbevolen.

Hoewel de valsnelheid voor deze deelproef minder van belang is valt op te merken dat de gemiddelde valsnelheden vrijwel gelijk blijven wanneer het wel en niet gebruiken van de achtergrondfilter apart bekeken wordt, maar dat ze sterk verschillen wanneer de twee gevallen met elkaar vergeleken worden. Zoals eerder in dit document werd aangehaald werden deze proeven uitgevoerd door een hoeveelheid slibdeeltjes vooraf met water te mengen en dit mengsel met

behulp van een spuit in het water toe te dienen. Hierbij bleven sommige deeltjes aan elkaar hangen waardoor enkele “grotere partikels” in de vorm van kleine klonters zich voordeden. Wanneer geen achtergrondfilter gebruikt werd, werden deze grotere partikels door de software aanschouwd als een cluster van kleine partikels die zich naast elkaar bewegen. Deze fictieve kleine partikels bezitten echter wel de valsnelheid van het grote partikel, waardoor de valsnelheid incorrect bepaald werd. Bij gebruik van de achtergrondfilter bleek de software hier geen probleem van te ondervinden en waren er geen geïdentificeerde partikels waar te nemen die zich als een cluster voortbewogen. Het gebruik van het remove background filterproces is daarom aanbevolen wanneer men de maximale partikeldiameter op voorhand niet kent.

Tabel 5 - Intensiteitsalgoritme

Analysis	Analysis type	Costing	Maximum matching cost
1	Local optimisation	Intensity	2
2	Clean up	Polynomial velocity + Time-average velocity	0,5
3	Global optimisation	Polynomial velocity + Time-average velocity	1
4	Clean up	Path length	0,3
5	Residual optimisation	Intensity	2
6	Clean up	Polynomial velocity + Time-average velocity	0,5
7	Global optimisation	Polynomial velocity + Time-average velocity	1
8	Clean up	Path Length	0,3

### 4.3 Invloed belichtingswijze

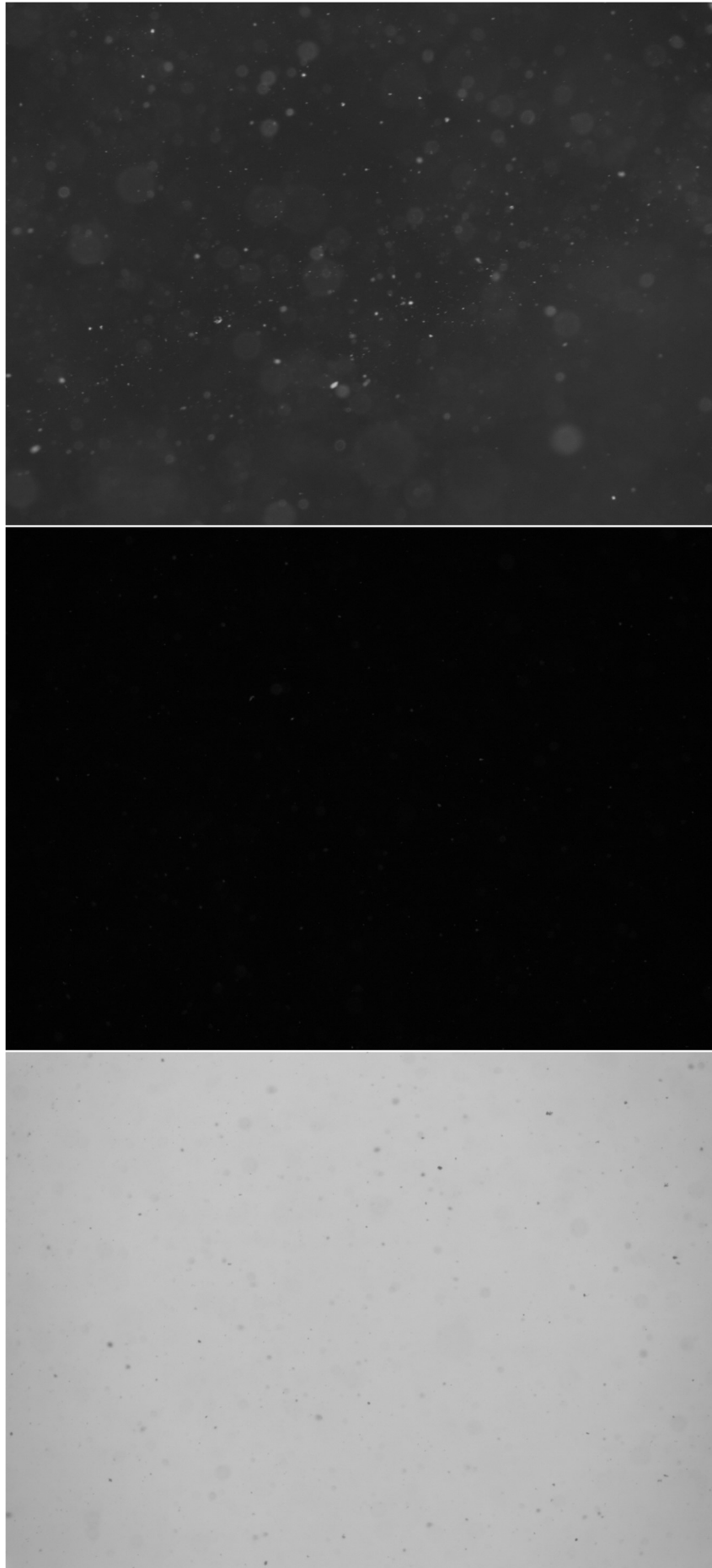
Zoals in de literatuurstudie werd aangetoond is lichtverstrooiing een van de meest impactvolle factoren bij gebruik van PTV in een troebele omgeving. Hierdoor werden enkele gewone belichtingsmethoden beproefd. Een eerste methode bestaat uit een opstelling waarbij de volledige inhoud van de watertank door drie gewone spotlights langs weerszijden belicht wordt. Bij methode twee wordt de watertank slecht langs één zijde belicht door twee spotlights met bijkomend een afdichtingsscherm met een spleet in, hierdoor wordt een spleetbelichting nagebootst. Hoewel de twee voorgaande methoden beeldopnamen met lichte partikels op een donkere achtergrond produceren, gebeurt met belichtingswijze drie net het omgekeerde. Methode drie gebruikt namelijk een diffuse achtergrond-verlichting om donkere partikels op een lichte achtergrond af te beelden en om te trachten de scherpte van de partikels te vergroten. Deze beelden kunnen vervolgens in Streams geconverteerd worden door middel van het *invert filter* proces, wat de intensiteiten van de pixels omkeert en het intensiteitsalgoritme uit tabel 5 in staat stelt de partikels op basis van een gewenst intensiteitsniveau te identificeren. Hieronder geeft tabel 6 aan de hand van enkele beeldopnamen weer hoeveel paden er per belichtingswijze identificeerbaar waren. De methoden worden in deze tabel aangeduid in de vorm x.y waarbij x de belichtingsmethode voorstelt zoals hierboven beschreven werd en y een set van parameterinstellingen voorstelt.

Tabel 6 - Invloed belichtingswijze

Methode	Instellingen		Resultaten				
	Exposure time [ms]	Master gain [-]	Initiële paden [st]	Paden na filters [st]	Gemiddelde padlengte [frames/pad]	$w_{s,gem}$ [mm/s]	$\sigma$ [mm/s]
2.a	5	67	612	66	44	0,129	0,118
1.a	5	67	34	26	6	0,142	0,052
2.b	5	67	1411	98	54	0,107	0,153
1.b	5	67	37	23	11	0,221	0,045
2.c	5	59	497	37	39	0,112	0,062
1.c	5	59	22	13	22	0,311	0,118
3.d	6,5	0	5915	2521	37	0,737	0,087

De grote hoeveelheid lichtverstrooiing door het volledige waterlichaam te belichten resulteert in een padlengte die gemiddeld 69% korter is dan bij spleetbelichting en levert gemiddeld 67% minder geïdentificeerde paden op. Deze waarden zijn aanzienlijk hoog, waardoor het gebruik van belichtingsmethode 1 niet aangeraden wordt bij de uitvoering van dergelijke beeldopnamen met deze proefopstelling. Hieruit blijkt dan ook dat een belichting die in een vlak geconcentreerd wordt de identificatie van partikels bevordert en voor minder lichtverstrooiing zorgt. De snelheidsproeven met gewone belichting werden dan ook, net zoals de proeven uit de voorgaande deelonderzoeken, uitgevoerd met de nagebootste spleetverlichting uit belichtingswijze 2. Op de volgende pagina toont figuur 11 een reeks beelden van belichtingswijze 1, 2 en 3. In het middelste beeld hiervan zijn slechts enkele zeer kleine donkergrijze partikels te onderscheiden, maar de meeste deeltjes zijn pas zichtbaar wanneer het beeld sterk uitvergroot wordt. Vanwege de montagemethode van de camera vallen de partikels in alle beelden uit dit onderzoek van rechts naar links.

De waarden uit tabel 6 tonen aan dat de diffuse achtergrondbelichting in staat is de partikels zodanig te belichten dat er een groot aantal paden geanalyseerd kunnen worden. Na het vergelijken van de werkelijke beelden met de bijhorende gefilterde beelden en geïdentificeerde partikels bleek dat er een groot aantal partikels foutief geïdentificeerd werd met behulp van de parameterinstellingen uit dit onderzoek. Daarom is deze proef niet representatief en worden haar waarden niet verder behandeld.



*Figuur 11 - Beelden belichtingswijzen 1, 2 en 3 (boven naar onder)*

## 4.4 Invloed toedieningswijze

Voor het bepalen van de valsnelheid bewegen de partikels idealiter perfect verticaal naar beneden, maar wanneer bijvoorbeeld wervels in het waterlichaam geïntroduceerd worden zullen de valsnelheden van de partikels heirdoor beïnvloed worden. Om de hoeveelheid wervels te minimaliseren werden enkele proeven uitgevoerd met verschillende toedieningswijzen.

In een eerste reeks proeven werden de partikels met de hand verstrooid boven het oppervlak of vielen de partikels vanuit een kleine lepel net boven het oppervlak in het water. Hierbij bleken kleine partikels niet in staat te zijn om de oppervlaktespanning van het water te doorbreken waardoor ze bleven drijven. Een ander fenomeen wat zich voordeed was het samenklonteren van een aantal deeltjes aan het wateroppervlak, waarna ze samen naar de bodem vielen. Daarbij werden zeer veel turbulente stromingen in het waterlichaam gegenereerd die de andere partikels sterk beïnvloedden. Het toedienen met behulp van het lepeltje leverde wel enkele geïdentificeerde partikels op, maar hiervan bleven er ofwel geen over na het filteren of anderzijds werden de partikels dermate verkeerd geïdentificeerd dat elk partikel exact dezelfde afmeting had. Deze toedieningswijze leverde geen resultaten op en is dus niet bruikbaar in dergelijke proeven.

Vervolgens werden proeven uitgevoerd waarbij de sedimentpartikels op voorhand met water gemengd werden alvorens ze met behulp van een spuit in het waterlichaam aan te brengen, waarna de toedieningswijze geoptimaliseerd werd met behulp van een rietje zoals in sectie 3.6 besproken werd. Deze methode resulteert in beelden die goed verwerkbaar zijn door de analysesoftware en werd daarom gebruikt tijdens de proeven van dit onderzoek. Wel dient opgemerkt te worden dat de gemiddelde zijwaartse snelheid tijdens de snelheidsproeven met gewone belichting 0,115 mm/s bedroeg, wat voor partikels van bijvoorbeeld 10  $\mu\text{m}$  groter is dan de theoretische valsnelheid. Hoewel deze toedieningsmethode dus een verbetering biedt worden de valsnelheden nog steeds beïnvloedt door geïntroduceerde wervels bij het inspuiten van de partikels.

## 4.5 Snelheidsproeven met gewone belichting

Na het bepalen van de meest gunstige belichtingswijze, toedieningswijze en parametersinstellingen voor de verschillende software worden deze geïmplementeerd tijdens het uitvoeren van de snelheidsproeven. Volgens de werkingmethode uit hoofdstuk 3.6 werd een mengsel aangemaakt van 4 mg sediment in een waterlichaam van 1 liter, waarna stapsgewijs na elke beeldopname 250 ml mengsel verwijderd werd voor analyse door het laboratorium en vervolgens 250 ml helder water toegevoegd werd om zo telkens 75% van de concentratie over te houden tot een ondergrens van 71 mg/l. Bijlage J geeft een flowchart weer van het volledige proces dat tijdens deze proeven gevolgd werd. Tabel 7 op de volgende pagina geeft per beproefde concentratie de hoeveelheden aan geïdentificeerde paden weer, zowel voor als na de filters uit het Matlab-script. Ook worden hierin de gemiddelde valsnelheden  $w_{s,\text{gem}}$  met hun bijhorende standaardafwijking  $\sigma$  weergegeven. Daarnaast staat de afwijking van de gemiddelde geanalyseerde valsnelheid ten opzichte van de theoretische valsnelheid  $\Delta w_{s,\text{gem}}$  en de gemiddelde zijwaartse snelheid  $v_{h,\text{gem}}$  vermeld waaraan de partikels uit elke proef onderhevig waren. De gemiddelde zijwaartse snelheid wordt hierin bepaald als absolute waarde aangezien elke afwijking van nul ongunstig is, ongeacht de verplaatsing naar links of rechts plaatsvindt, en anders snelheden in verschillende richtingen zichzelf mogelijk opheffen.



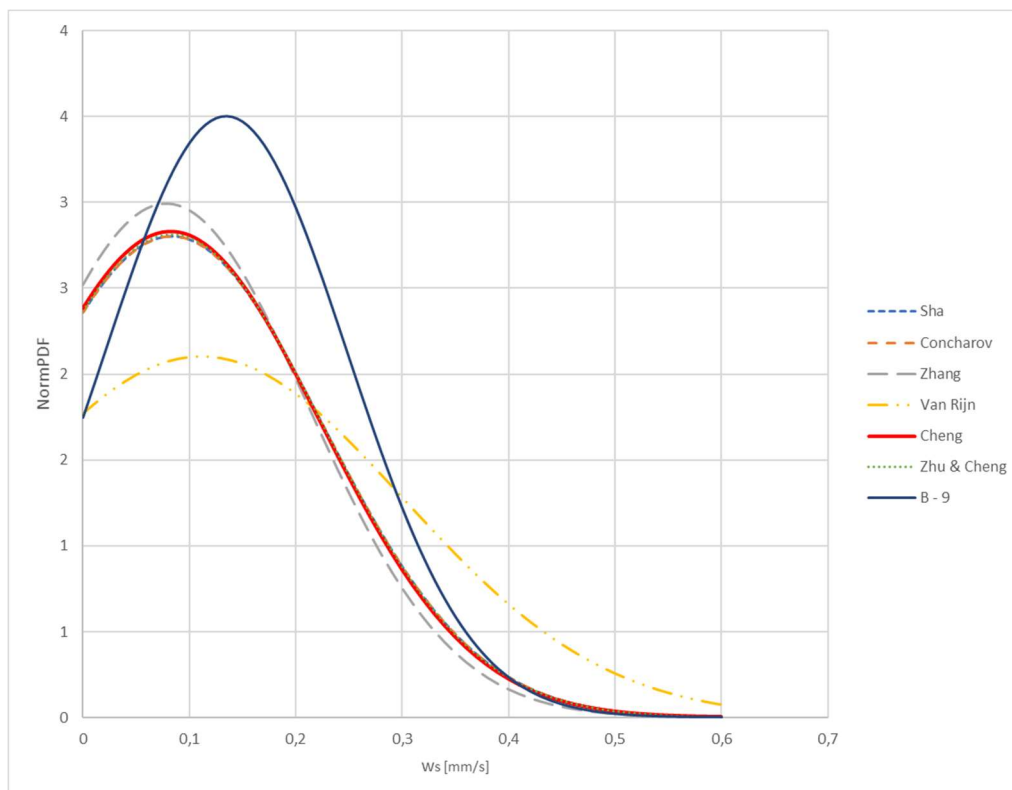
Tabel 7 - Snelheidsproeven met spleetbelichting

Proef	Initiële paden [st]	Paden na filters [st]	Gemiddelde padlengte [frames/pad]	$w_{s,gem}$ [mm/s]	$\sigma$ [mm/s]	$\Delta w_{s,gem}$ [mm/s]	$v_{h,gem}$ [mm/s]	Turbiditeit mengsel [mg/l]	Turbiditeit controlesample [mg/l]
B - 1	74	0	-	-	-	-	-	4000	1874,7
B - 2	772	252	37	0,204	0,114	+0,109	0,391	3000	1260,8
B - 3	1262	322	-	-	-	-	-	2250	859,4
B - 4	577	58	-	-	-	-	-	1688	671,8
B - 5	264	17	-	-	-	-	-	1266	641,8
B - 6	390	38	-	-	-	-	-	949	478,9
B - 7	884	116	50	0,134	0,114	+0,052	0,173	712	419,4
B - 8	318	23	72	0,084	0,026	+0,055	0,152	534	364,1
B - 9	549	75	76	0,179	0,207	+0,109	0,089	400	289,3
B - 10	406	67	79	0,215	0,161	+0,196	0,127	300	255
B - 11	468	43	88	0,039	0,058	-0,002	0,086	225	165,8
B - 12	694	95	75	0,049	0,028	-0,012	0,098	169	125,9
B - 13	437	41	-	-	-	-	-	127	140,2
B - 14	557	83	72	0,057	0,055	-0,018	0,102	95	88,6
B - 15	418	41	43	0,071	0,081	-0,085	0,096	71	181,5

Zoals door tabel 7 aangetoond wordt bleef er in proef B - 1 na de dataverwerking geen enkel pad over omdat de geïdentificeerde paden een padlengte kleiner dan 5 frames/pad bezaten. In proeven B - 3, 4, 5, 6 en 13 was Streams niet in staat om de partikels correct te identificeren en bestond het volledige particle record uit partikels met eenzelfde diameter waardoor ook deze proeven niet bruikbaar waren. Het bruikbaarheidsdomein van deze proefopstelling heeft dan ook een bovengrens tussen proeven B - 7 en 8, wat overeenstemt met een analyseerbare concentratie van minstens 419,4 mg/l.

Binnen het bruikbaarheidsdomein bezitten de partikels een gemiddelde zijwaartse snelheid van 0,115 mm/s ten gevolge van wervels, wat voor de beschouwde partikeldiameter relatief hoog is. Zoals in hoofdstuk 4.4 besproken werd is de toediening met de spuit en het rietje niet in staat de partikels in het water aan te brengen zonder enige turbulente stromingen te veroorzaken. Hoewel het sample druppelsgewijs met de spuit wordt toegediend zal er steeds een kleine spuitkracht aanwezig zijn die wervels veroorzaakt in de watertank. Dit beïnvloedt de nauwkeurigheid waarmee de valsnelheden bepaald kunnen worden.

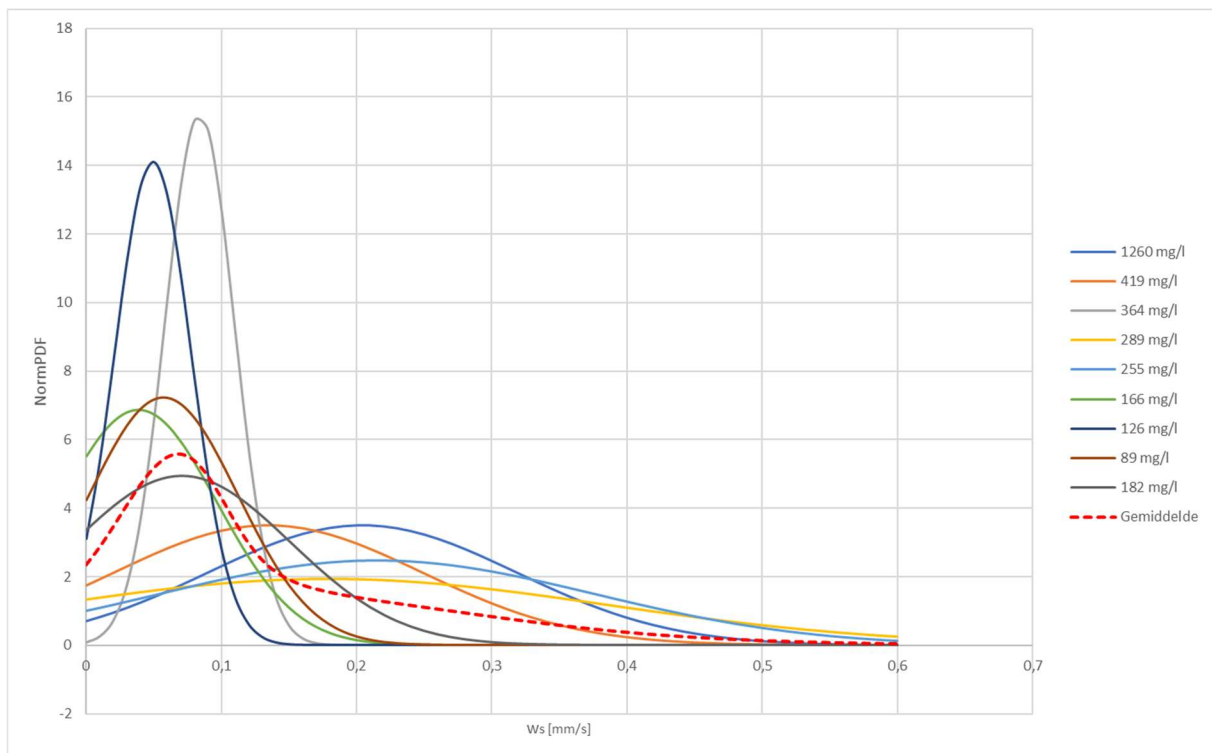
De gemiddelde afwijking van de werkelijke valsnelheid ten opzichte van de theoretische benadering volgens formule 2.3.1 wordt in kolom 7 van tabel 7 weergegeven. Hierin valt op dat de proeven met concentraties boven 200 mg/l telkens een afwijking bezitten waarbij de valsnelheid groter is dan de theoretische waarde, terwijl proeven met concentraties kleiner dan 200 mg/l systematisch resulteren in een valsnelheid kleiner dan de theoretische benadering. De absolute gemiddelde afwijking binnen het bruikbaarheidsdomein bedraagt 0,059 mm/s. Partikels met diameter 10  $\mu\text{m}$  verplaatsen zich gemiddeld dus tweemaal zo snel dan verwacht wordt uit het theoretische model van Cheng (Cheng, 1997). Hierbij dient rekening gehouden te worden dat het theoretische model een benadering is en werd opgesteld onder bepaalde randvoorwaarden. Figuur 12 geeft een overzicht van de PDF van de valsnelheden in proef B - 9 en de verschillende theoretische benaderingsmodellen waarbij de concentratie 289,3 mg/l bedroeg.



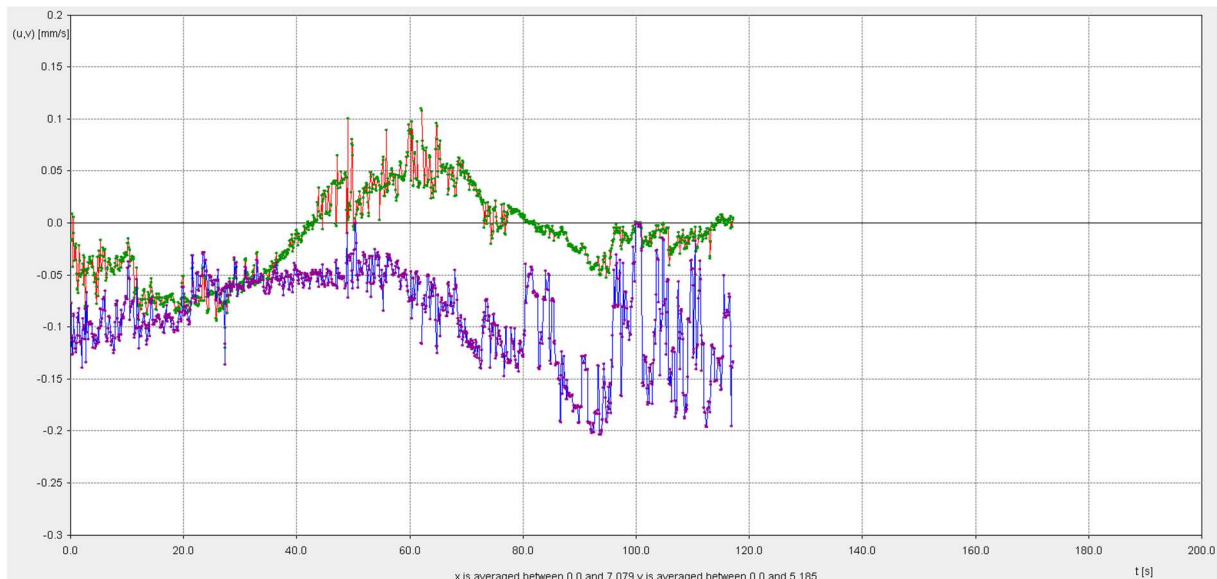
Figuur 12 - Vergelijking proef B - 9 met theoretische modellen

Figuur 13 toont de snelheidsdichtheitscurves van de verschillende proeven. Het verloop van de individuele curves verschilt soms sterk van elkaar. Hoewel getracht werd om de hoeveelheid aan geïnduceerde wervels te minimaliseren tijdens de toediening van de samples, blijkt echter dat deze nog steeds aanwezig zijn en het snelheidsverloop van de partikels soms sterk beïnvloeden. Normaliter vallen eerst de grootste partikels voorbij het beeldveld gevolgd door de kleinere partikels, waardoor de valsnelheid van een maximale waarde in het begin van de opname zou moeten afnemen naar een kleine waarde op het einde. Door het snelheidsverloop in Streams te analyseren kan afgeleid worden dat dit niet altijd het geval is tijdens deze proeven. Zo toont figuur 14 bijvoorbeeld het snelheidsverloop van proef B - 14 met concentratie 89 mg/l. Deze grafiek toont aan dat zowel de verticale valsnelheid als de horizontale snelheid van de partikels gelijkmatig veranderen doorheen de tijd en de partikels in de helft van de opname zelfs een opwaartse beweging ondergaan. De sedimentdeeltjes worden hier dus sterk beïnvloed door de aanwezigheid van wervels in het watervolume.

Rekening houdend met de korrelverdeling uit de Mastersizer 2000 welke een piekwaarde aangaf van 10  $\mu\text{m}$ , wat resulteert in een theoretische valsnelheid van 0,045 mm/s, ligt de piekwaarde van gemiddelde curve die in het rood aangeduid wordt wel vrij dicht rond de theoretische waarde. Deze methode is dus in staat om de grootteorde van de valsnelheden te benaderen, maar niet om de valsnelheden consistent en met grote nauwkeurigheid te bepalen.



Figuur 13 - PDF's valsnelheden met spleetbelichting



Figuur 14 - Snelheidsverloop proef B - 14 (valsnelheid in rood, zijwaartse snelheid in blauw)

## 4.6 Snelheidsproeven met laserbelichting

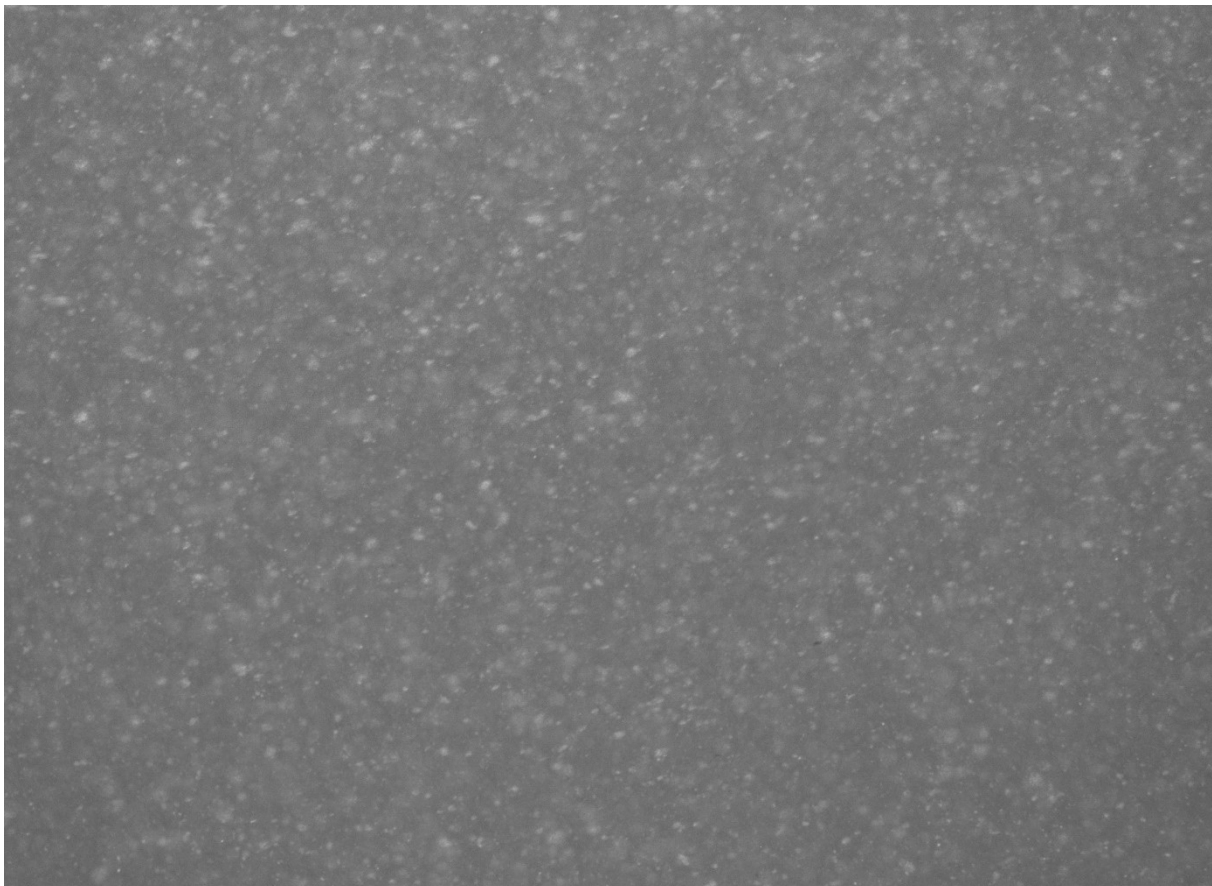
Om na te kijken in welke maten laserbelichting een verbetering oplevert voor het bepalen van de valsnelheden werden enkele proeven uitgevoerd volgens hetzelfde verdunningsprincipe, enkel werd het volledige waterlichaam van de kleine watertank troebel gemaakt naargelang de gewenste sedimentconcentratie. Door het mixen van het te testen troebele waterlichaam in de kleine watertank was er een zijwaartse stroming in het mengsel aanwezig, maar omdat het doel van deze deelproeven voornamelijk over het bruikbaarheidsdomein handelt zijn de gemeten valsnelheden minder van belang. Voor deze beeldopnamen werd een belichtingstijd van 50 ms en een master gain van 80 gebruikt in tegenstelling tot de andere proeven. Omdat het dual threshold en remove background filter proces resulteerde in een groter aantal foutief geïdentificeerde paden werd voor de laserproeven gekozen om de single threshold en remove background filter te gebruiken.

Tabel 8 geeft een overzicht van de resultaten uit deze proeven en toont aan dat het gebruik van laserbelichting een gunstig effect heeft op de analyseerbaarheid van de beeldopnamen. In proeven C - 1 en C - 2 was de troebelheid te hoog en werden de partikels foutief geïdentificeerd waardoor ze allemaal dezelfde diameter bezaten. In proef C - 11 gebeurde hetzelfde door een te lage sedimentconcentratie gecombineerd met het smalle belichtingsvlak en de kleine focusdiepte van de lens. Het bruikbaarheidsdomein met de laser ligt hierdoor minstens tussen 40 mg/l en 2250 mg/l wat een aanzienlijke verbetering is ten opzichte van de bovengrens van 419,4 mg/l uit proevenreeks B.

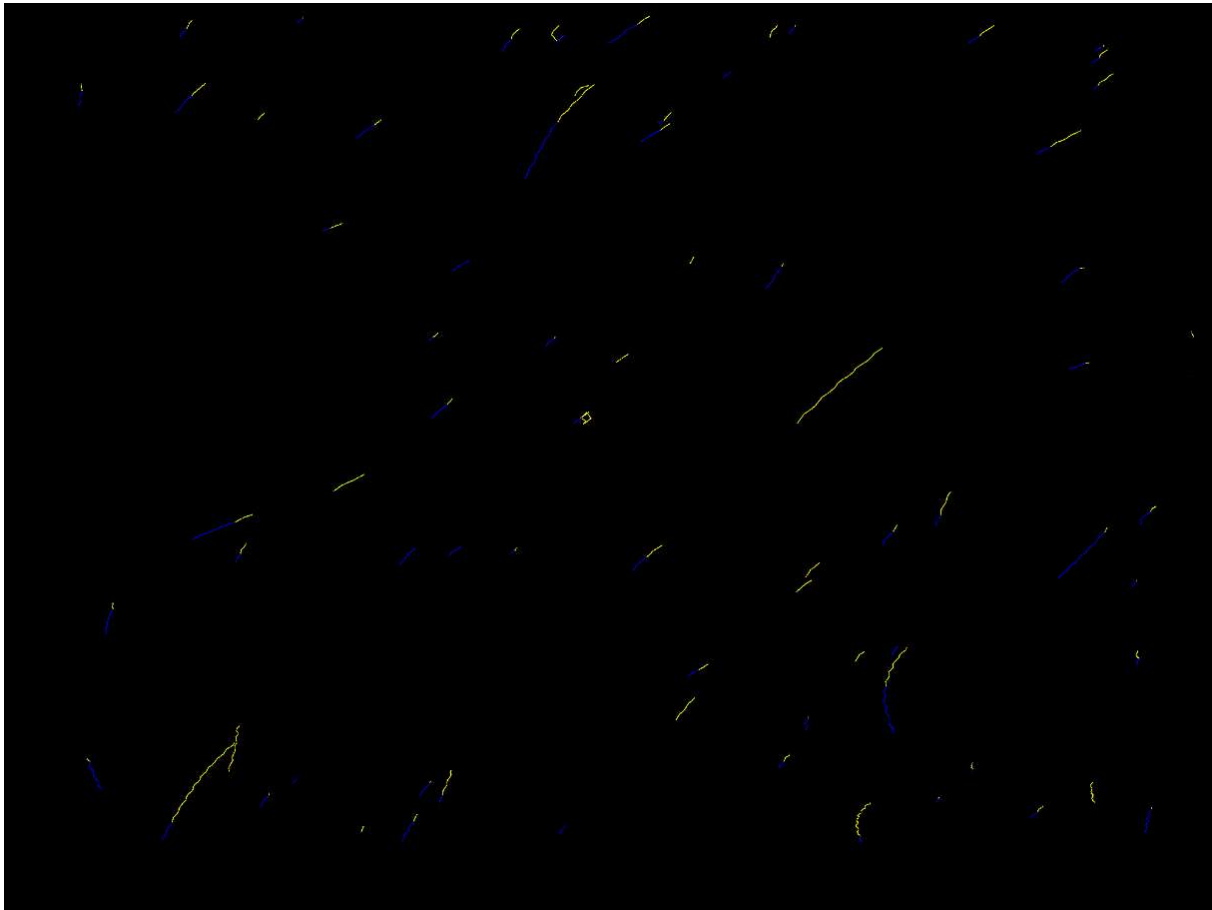
Tabel 8 - Snelheidsproeven met laserbelichting

Proef	Initiële paden [st]	Paden na filter 1 [st]	$W_{s,gem}$ [mm/s]	$\sigma$ [mm/s]	Gemiddelde padlengte [frames/pad]	Turbiditeit waterlichaam [mg/l]
C - 1	585	138	-	-	-	4000
C - 2	237	129	-	-	-	3000
C - 3	9301	4773	-0,145	0,111	22,93	2250
C - 4	4498	2251	-0,085	0,087	16,54	1266
C - 5	51753	31145	-0,142	0,110	15,50	712
C - 6	3845	16706	-0,170	0,122	18,85	400
C - 7	47198	26844	-0,209	0,131	15,39	300
C - 8	30083	18761	-0,044	0,045	26,04	225
C - 9	14259	8270	-0,014	0,019	38,23	95
C - 10	3217	2013	-0,077	0,056	67,95	40
C - 11	2757	1689	-	-	-	23

Figuren 15 en 16 geven een opgenomen beeld uit proef C - 3 en het bijhorende beeld van het lagrangian path field weer uit de verwerking van Streams. Door het smalle belichtingsveld, de kleine focusdiepte en de aanwezige turbulente stroming zijn er hier veel korte paden aanwezig, deze worden zoals eerder besproken door filter 1 verwijderd indien hun padlengte korter is dan 5 beelden.



Figuur 15 - Origineel beeld proef C - 3



*Figuur 16 - Beeld van de paden uit proef C - 3*

Proeven C - 1 tot en met C - 11 werden uitgevoerd op een diepte van 3 mm ten opzichte van de tankwand, waardoor de randeffecten een grote invloed kunnen hebben op de partikels. Om na te gaan welke invloed deze afstand heeft op de beeldkwaliteit werden bij een concentratie van 1226 mg/l, 949 mg/l en 712 mg/l enkele beelden opgenomen op de oorspronkelijke 3 mm en vervolgens op 8 mm en 13 mm afstand van de tankwand. Figuren 17 en 18 tonen de beelden op respectievelijk 3 mm en 8 mm afstand van de tankwand, in het beeld op 13 mm afstand nam het contrast zodanig af dat niets meer zichtbaar was vanwege de grote hoeveelheid aan partikels tussen het laservlak en de lens, alsook het absorberen en de weerkaatsing van het laserlicht door de partikels. Vanwege het smalle belichtingsvlak en de kleine focusdiepte van de lens, is het dus zeer belangrijk dat er een goede locatie van het beeldveld gekozen wordt. Om een goede beeldopname te maken dient ook de nodige aandacht gespendeerd te worden aan het correct uitlijnen van het laservlak en het beeldveld om te vermijden dat partikels niet of onscherp zichtbaar zijn. Indien de afstand tussen het laservlak en de lens vergroot dient te worden is een laser nodig met een hogere intensiteit, dit zorgt mogelijk wel voor bijkomende veiligheidsrisico's.



*Figuur 17 - Invloed locatie laservlak op 3 mm*



*Figuur 18 - Invloed locatie laservlak op 8 mm*

## 5 Besluit

Om dit onderzoek af te sluiten dienen nog de conclusies gemaakt te worden om zo de verschillende onderzoeksvragen te beantwoorden. Uit deze conclusies vloeien ook enkele aanbevelingen voort die in verdere onderzoeken kunnen geïmplementeerd worden.

- Wat zijn de beperkende parameters om valsnelheden in een troebele omgeving te bepalen?

De opgenomen beelden dienen voldoende contrast te bezitten zodat de analysesoftware in staat is om de individuele deeltjes van de achtergrond te onderscheiden. Hierbij is het ook belangrijk dat de partikels voldoende scherp afgebeeld worden, een heel hoge belichtingstijd of een zeer lage frame rate verlagen de analyseerbaarheid van de beelden. Verder hebben de toedienings- en belichtingswijze ook een zeer belangrijke invloed op de beeldkwaliteit en bruikbaarheid van de beeldopnamen.

- Hoe kan de invloed van deze parameters gereduceerd worden?

Door het gebruik van een geconcentreerde belichtingswijze wordt de hoeveelheid lichtverstrooiing verminderd en verbetert de beeldkwaliteit. Het inspuiten van het sample zorgt voor een vermindering in de hoeveelheid turbulente stromingen, door het waterlichaam zo weinig mogelijk te manipuleren vermindert de hoeveelheid onscherpe partikels.

- Kan met behulp van PTV de valsnelheid in situ bepaald worden?

Het toedienen van een troebel sample in helder water met spleetbelichting kan in situ toegepast worden indien men op voorhand weet dat de maximale troebelheidsgraad zich rond 420 mg/l bevindt. Indien de troebelheidsgraad hoger ligt kan een laserbelichting gebruikt worden. Hierbij moet rekening gehouden worden met bijkomende veiligheidsmaatregelen die ook ter plaatse opgevolgd moeten worden. De in situ troebelheid dient hierbij tussen 40 mg/l en 2250 mg/l te liggen om een snelheidsbepaling met laserbelichting uit te voeren.

Hoewel de proefopstellingen uit dit onderzoek in staat zijn de valsnelheden volgens hun grootteorde te benaderen, zijn ze niet in staat een nauwkeurige bepaling uit te voeren. Belangrijk hierbij is de inconsistentie van de valsnelheidsbepalingen ten gevolge van de geïnduceerde wervels tijdens het toedienen van de sedimentdeeltjes. Hierdoor is een andere toedieningswijze nodig waarmee het waterlichaam zeer weinig tot niet gemanipuleerd wordt bij het aanbrengen van de samples. Er zou bijvoorbeeld een methode gezocht kunnen worden om de samples onder een zeer lage en gecontroleerde druk door een kleine buis in het water te spuiten of door middel van een verticaal sluisstelsel onder het wateroppervlak aan te brengen.

Aangezien er in situ een mengsel van verschillende sedimenten in het waterlichaam aanwezig is, zal de proefopstelling uitgebreid moeten worden om de grotere zandpartikels ook in rekening te brengen. Hiervoor zou bijkomende opnameapparatuur naast de camera uit deze proefopstelling gemonteerd kunnen worden, waarvan de camera- en lensparameters specifiek op de grotere sedimentdeeltjes afgestemd worden. De proefopstelling met de huidige camera en lens was in dit onderzoek in staat valsnelheden te bepalen van 0,002 mm/s tot 0,438 mm/s.





## Bibliografie

- Berrocal, E. (2006). Multiple scattering of light in optical diagnostics of dense sprays and other complex turbid media. Cranfield, Verenigd Koninkrijk: Cranfield University.
- Chen, M. S. (2005). Suspended matter in the Scheldt estuary. *Hydrobiologia*, 540, 79-104.
- Cheng, N. S. (1997). A simplified settling velocity formula for sediment particle. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132(2), 149-152.
- Ergin, F. G. (2018). A review of planar PIV systems and image processing tools for lab-on-chip microfluidics. *Sensors*, 1-23.
- Fentie, B. e. (2004). Comparison of seven particle settling velocity formulae for erosion modelling. *13th International Soil Conservation Organisation Conference*. Brisbane: International Soil Conservation Organisation.
- Havermans, G. (2017). *Feasibility study on measuring settling velocity of sediment by using Particle Tracking Velocimetry*. Antwerpen: Waterbouwkundig Laboratorium.
- Industrial Development Systems. (2020, December 9). *UI-3080CP Rev. 2*. Retrieved from IDS-imaging: <https://en.ids-imaging.com/store/ui-3080cp-rev-2.html>
- Industrial Development Systems. (2020, December 9). *UI-3200SE*. Retrieved from IDS-imaging: <https://en.ids-imaging.com/store/ui-3200se.html>
- Joensuu, M. e. (2018). Sediment properties, biota, and local habitat structure explain variation in the erodibility of coastal sediments. *Limnology and oceanography*, 63, 173-186.
- Kristensson, E. &. (2018). Crossed patterned structured illumination for the analysis and velocimetry of transient turbid media. *Science Reports* 8.
- Michiels, J. (2017). *Feasibility study of the visualization of sandy bottom transport by using particle tracking velocimetry*. UGent & KU Leuven.
- Nokes, R. (2019, Juni). *Streams 3.02 - Theory and design*. Christchurch, Canterbury, Nieuw-Zeeland: University of Canterbury.
- Nokes, R. (2019). *Streams 3.02 - Users guide core*. Christchurch: University of Canterbury.
- Nokes, R. (2019). *Streams 3.02 - Users guide fields*. Christchurch: University of Canterbury.
- Opto. (2021, Februari 17). *Telecentric objectives*. Retrieved from Opto: [https://www.opto.de/en/optics/telecentric-objectives/?search\\_highlighter=100-BTC-005](https://www.opto.de/en/optics/telecentric-objectives/?search_highlighter=100-BTC-005)
- Opto Engineering. (2020, December 9). *TC4M009-C*. Retrieved from Opto Engineering: <https://www.opto-e.com/products/large-detector-telecentric-lens-model-TC4M009-C>
- Sony. (2020, December 9). *Sony Image Sensor Business*. Retrieved from Roseek: [http://www.roseek.com/en/agency/agency\\_sony.html](http://www.roseek.com/en/agency/agency_sony.html)
- Sterckx, S. e. (2007). Retrieval of suspended sediment from advanced hyperspectral sensor data in the Scheldt estuary at different stages in the tidal cycle. *Marine Geodesy*, 30, 1-12.
- Vandenbruwaene, W. e. (2020). *Monitoring Effecten Ontwikkelingsschets (MONEOS) – Jaarboek monitoring 2019: Factual data rapportage van monitoring waterbeweging en fysische parameters in het Schelde estuarium in 2019*. Antwerpen: Waterbouwkundig Laboratorium.

Z-LASER. (2021, maart 29). *Productomschrijving*. Retrieved from  
<https://mk0sensorpartneuooa8.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2020/03/manual-z-laser-zm18-1625.pdf>

## Bijlagelijst

Bijlage A - Beschouwde theoretische modellen.....	50
Bijlage B - Korrelverdeling slibpartikels.....	51
Bijlage C – Technische informatie UI3080CP-HQ.....	52
Bijlage D – Technische informatie UI3200SE-C-H.....	54
Bijlage E – Technische informatie IMX250LQR-C.....	56
Bijlage F – Technische informatie IMX304LQR-C.....	57
Bijlage G – Technische informatie 100-BTC-005.....	59
Bijlage H – Technische informatie T4MC009-C.....	60
Bijlage I - Technische informatie Z5M18B-F-635-lp30.....	61
Bijlage J - Flowchart snelheidsproeven.....	62

## Bijlage A: Beschouwde theoretische modellen

Theoretische valsnelheden		
Onderzoek	Geldigheid	Formule
Sha	$d < 0,01 \text{ cm}$	$w = \frac{1}{24} \frac{\Delta g d^2}{v}$
Concharov	$d < 0,015 \text{ cm}$	$w = \frac{1}{24} \frac{\Delta g d^2}{v}$
Zhang	-	$w = \sqrt{(13.95 \frac{v}{d})^2 + 1.09 \Delta g d} - 13.95 \frac{v}{d}$
Van Rijn	$d < 0,01 \text{ cm}$	$w = \frac{1}{18} \frac{\Delta g d^2}{v}$
Cheng		$\frac{wd}{v} = (\sqrt{25 + 1.2 d_*^2} - 5)^{1.5} \quad \text{met } d_* = (\frac{\Delta g}{v^2})^{\frac{1}{3}} d$
Zhu & Cheng	-	$\frac{wd}{v} = \frac{-24 \cos^3 \alpha + \sqrt{576 \cos^6 \alpha + (18 \cos^3 \alpha + 3.6 \sin^2 \alpha) d_*^3}}{9 \cos^3 \alpha + 1.8 \sin^2 \alpha}$

Bijlage A - Beschouwde theoretische modellen (Fentie, 2004)

# Bijlage B: Korrelverdeling slibpartikels



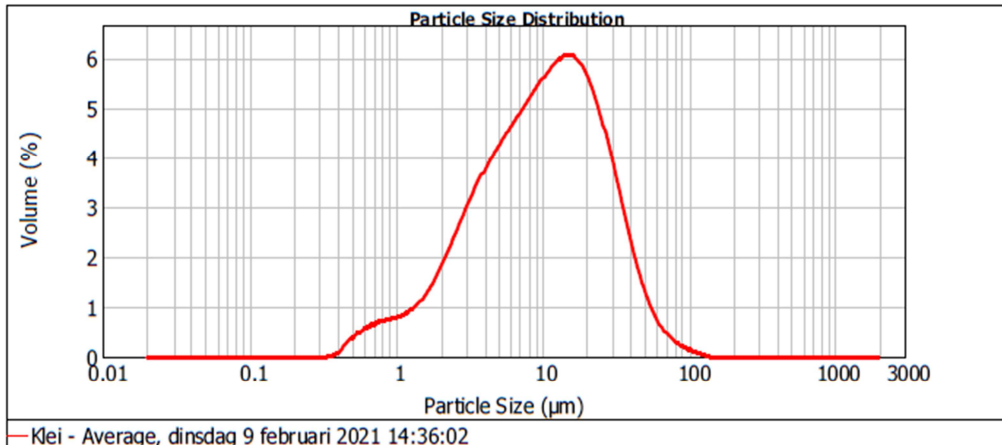
# MASTERSIZER



## Result Analysis Report

<b>Sample Name:</b> Klei - Average	<b>SOP Name:</b>	<b>Measured:</b> dinsdag 9 februari 2021 14:36:02	
<b>Sample Source &amp; type:</b>	<b>Measured by:</b> sedlab	<b>Analysed:</b> dinsdag 9 februari 2021 14:36:04	
<b>Sample bulk lot ref:</b> 20210209	<b>Result Source:</b> Averaged		
<b>Particle Name:</b> Default	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000S (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 1.520	<b>Absorption:</b> 0.1	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 14.81 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 1.221 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.0116 %Vol	<b>Span :</b> 2.839	<b>Uniformity:</b> 0.921	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 1.2 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 5.005 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 14.345 um	

d(0.1): 2.261 um                      d(0.5): 10.240 um                      d(0.9): 31.335 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.79	11.482	5.35	120.226	0.03	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.91	13.183	5.46	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.09	15.136	5.45	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.35	17.378	5.29	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.66	19.953	4.96	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	2.01	22.909	4.46	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.38	26.303	3.83	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.75	30.200	3.14	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	3.10	34.674	2.44	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	3.42	39.811	1.80	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.06	4.365	3.70	45.709	1.27	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.37	5.012	3.96	52.481	0.85	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.58	5.754	4.20	60.256	0.56	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.49	6.607	4.44	69.183	0.36	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.64	7.586	4.68	79.433	0.23	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.68	8.710	4.92	91.201	0.14	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.72	10.000	5.16	104.713	0.09	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.72	11.482	5.16	120.226	0.09	1258.925	0.00		

Operator notes: Met US

## Bijlage C: Technische informatie UI3080CP-HQ



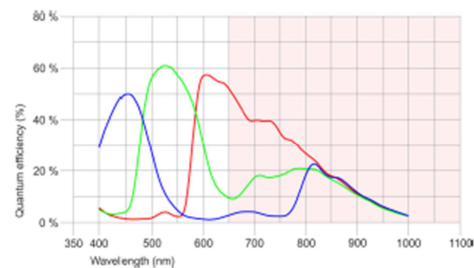
UI-3080CP-C-HQ Rev.2 (AB00849)



### Specification

#### Sensor

Sensor type	CMOS Color
Shutter	Global Shutter
Sensor characteristic	Linear
Readout mode	Progressive scan
Pixel Class	5 MP
Resolution	5.04 Mpix
Resolution (h x v)	2456 x 2054 Pixel
Aspect ratio	5:4
ADC	12 bit
Color depth (camera)	12 bit
Optical sensor class	2/3"
Optical Size	8.473 mm x 7.086 mm
Optical sensor diagonal	11.05 mm (1/1.45")
Pixel size	3.45 µm
Manufacturer	Sony
Sensor Model	IMX250LQR-C
Gain (master/RGB)	24x/4x
AOI horizontal	same frame rate
AOI vertical	increased frame rate
AOI image width / step width	256 / 8
AOI image height / step width	4 / 2
AOI position grid (horizontal/vertical)	4 / 2
Binning horizontal	same frame rate
Binning vertical	same frame rate
Binning method	M/C automatic
Binning factor	2
Subsampling horizontal	same frame rate
Subsampling vertical	increased frame rate
Subsampling method	M/C automatic
Subsampling factor	2, 4, 6, 8, 16





UI-3080CP-C-HQ Rev.2 (AB00849)

**Model**

Pixel clock range	80 MHz - 474 MHz
Frame rate freerun mode	77
Frame rate trigger (continuous)	77
Frame rate trigger (maximum)	86
Exposure time (minimum - maximum)	0.019 ms - 999 ms
Long exposure (maximum)	30000 ms
Power consumption	1.6 W - 3.7 W
Image memory	128 MB
Special features	IDS line scan mode, Sensor source gain, Multi-AOI

**Ambient conditions**

The temperature values given below refer to the outer device temperature of the camera housing.

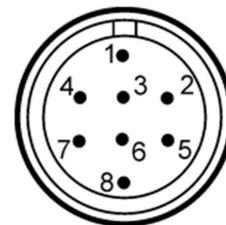
Device temperature during operation	0 °C - 55 °C / 32 °F - 131 °F
Device temperature during storage	-20 °C - 60 °C / -4 °F - 140 °F
Humidity (relative, non-condensing)	20 % - 80 %

**Connectors**

Interface connector	USB 3.0 micro-B, screwable
I/O connector	8-pin Hirose connector (HR25-7TR-8PA(73))
Power supply	USB cable

**Pin assignment I/O connector**

1	Ground (GND)
2	Flash output with optocoupler (-)
3	General Purpose I/O (GPIO) 1
4	Trigger input with optocoupler (-)
5	Flash output with optocoupler (+)
6	General Purpose I/O (GPIO) 2
7	Trigger input with optocoupler (+)
8	Output supply voltage, 5 V (100 mA)



Camera rear view

**Design**

Lens Mount	C-Mount
IP code	IP30
Dimensions H/W/L	29.0 mm x 29.0 mm x 29.0 mm
Mass	50 g

Bijlage A – Technische informatie UI3080CP-HQ deel 2 (Industrial Development Systems, 2020)



## Bijlage D: Technische informatie UI3200SE-C-HQ



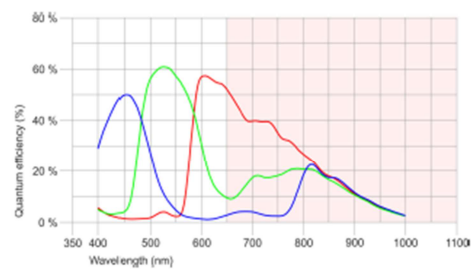
UI-3200SE-C-HQ (AB02348)



### Specification

#### Sensor

Sensor type	CMOS Color
Shutter	Global Shutter
Sensor characteristic	Linear
Readout mode	Progressive scan
Pixel Class	12 MP
Resolution	12.34 Mpix
Resolution (h x v)	4104 x 3006 Pixel
Aspect ratio	4:3
ADC	12 bit
Color depth (camera)	12 bit
Optical sensor class	1.1"
Optical Size	14.158 mm x 10.370 mm
Optical sensor diagonal	17.55 mm (1/0.91")
Pixel size	3.45 µm
Manufacturer	Sony
Sensor Model	IMX304LQR-C
Gain (master/RGB)	24x/4x
AOI horizontal	same frame rate
AOI vertical	increased frame rate
AOI image width / step width	256 / 8
AOI image height / step width	2 / 2
AOI position grid (horizontal/vertical)	4 / 2
Binning horizontal	same frame rate
Binning vertical	same frame rate
Binning method	M/C automatic
Binning factor	2
Subsampling horizontal	same frame rate
Subsampling vertical	increased frame rate
Subsampling method	M/C automatic
Subsampling factor	2, 4, 6, 8, 16



# IDS

## UI-3200SE-C-HQ (AB02348)

### Model

Pixel clock range	99 MHz - 395 MHz
Frame rate freerun mode	24
Frame rate trigger (continuous)	24
Frame rate trigger (maximum)	24
Exposure time (minimum - maximum)	0.027 ms - 999 ms
Long exposure (maximum)	30000 ms
Power consumption	1.6 W - 3.8 W
Image memory	128 MB
Special features	IDS line scan mode, Overlap trigger, Sensor source gain

### Ambient conditions

The temperature values given below refer to the outer device temperature of the camera housing.

Device temperature during operation	0 °C - 55 °C / 32 °F - 131 °F
Device temperature during storage	-20 °C - 60 °C / -4 °F - 140 °F
Humidity (relative, non-condensing)	20 % - 80 %

### Connectors

Interface connector	USB Type-C, screwable
I/O connector	8-pin Hirose connector (HR25-7TR-8PA(73))
Power supply	USB cable

### Pin assignment I/O connector

1	Ground (GND)
2	Flash output with optocoupler (-)
3	General Purpose I/O (GPIO) 1, 3.3 V
4	Trigger input with optocoupler (-)
5	Flash output with optocoupler (+)
6	General Purpose I/O (GPIO) 2, 3.3 V
7	Trigger input with optocoupler (+)
8	Voltage output (USB Power Delivery), 5-15 V



Camera rear view

### Design

Lens Mount	C-Mount
IP code	IP30
Dimensions H/W/L	34.0 mm x 44.0 mm x 47.0 mm
Mass	111 g

Bijlage B – Technische informatie UI3200SE-C-HQ deel 2 (Industrial Development Systems, 2020)

## Bijlage E: Technische informatie IMX250LQR-C

<Table 1> Device Structure

Item	IMX250LLR/LQR	IMX252LLR/LQR
Image size	Diagonal 11.1 mm (Type 2/3) progressive scan mode Diagonal 7.7 mm (Type 1/2.35) Full-HD mode	Diagonal 8.9 mm (Type 1/1.8) progressive scan mode Diagonal 7.7 mm (Type 1/2.35) Full-HD mode
Number of effective pixels	2464 (H) × 2056 (V) approx. 5.07M pixels	2064 (H) × 1544 (V) approx. 3.19M pixels
Unit cell size	3.45 μm (H) × 3.45 μm (V)	3.45 μm (H) × 3.45 μm (V)
Optical blacks	Horizontal	Front : 0 pixels, rear : 0 pixels
	Vertical	Front : 10 pixels, rear : 0 pixels
Input drive frequency	37.125 MHz / 54.0 MHz / 74.25 MHz	37.125 MHz / 54.0 MHz / 74.25 MHz
Package	226-pin LGA	226-pin LGA
Supply voltage V <sub>DD</sub> (Typ.)	3.3 V / 1.8 V / 1.2 V	3.3 V / 1.8 V / 1.2 V

<Table 2> Image Sensor Characteristics

Item		IMX250	IMX252	Remarks
sensitivity (black-and-white)	Typ.[F8]	915 mV	915 mV	3200 K, 706 cd/m <sup>2</sup> , 1/30s accumulation
Sensitivity (color)	Typ.[F5.6]	1146 mV	1146 mV	
Saturation signal	Min.	1001 mV	1001 mV	T <sub>j</sub> = 60 °C

<Table 3> Basic Drive Mode

Product name	Drive mode	Recommended number of recording pixels	ADC [bit]	Frame rate (Max.) [frame/s]
IMX250LLR/LQR	Progressive scan	2448 (H) × 2048 (V) approx. 5.01M pixels	12	89.5
			10	144.7
			8	163.4
	Full-HD	1920 (H) × 1080 (V) approx. 2.07M pixels	12	120.0
10			120.0	
8			118.5	
IMX252LLR/LQR	Progressive scan	2048 (H) × 1536 (V) approx. 3.15M pixels	12	191.5
			10	216.2
			8	120.0
	Full-HD	1920 (H) × 1080 (V) approx. 2.07M pixels	12	120.0
10			120.0	

Bijlage E – Technische informatie IMX250LQR-C (Sony, 2020)

## Bijlage F: Technische informatie IMX304LQR-C

# SONY

## [Product Information]

Ver. 1.1

# IMX304LQR

Diagonal 17.6 mm (Type 1.1) CMOS solid-state Image Sensor with Square Pixel for Color Cameras

### Description

The IMX304LQR is a diagonal 17.6 mm (Type 1.1) CMOS active pixel type solid-state image sensor with a square pixel array and 12.37 M effective pixels. This chip features a global shutter with variable charge-integration time. This chip operates with analog 3.3 V, digital 1.2 V, and interface 1.8 V triple power supply, and has low power consumption. High sensitivity, low dark current and low PLS characteristics are achieved.  
(Applications: FA cameras, ITS cameras)

### Features

- ◆ CMOS active pixel type dots
- ◆ Built-in timing adjustment circuit, H/V driver and serial communication circuit
- ◆ Global shutter function
- ◆ Input frequency  
37.125 MHz / 74.25 MHz / 54 MHz
- ◆ Number of recommended recording pixels: 4096 (H) × 3000 (V) approx. 12.29 M pixels
  - Readout mode
  - All-pixel scan mode
  - Vertical / Horizontal 1 / 2 Subsampling mode
  - ROI mode
  - Vertical / Horizontal - Normal / Inverted readout mode
- ◆ Readout rate
  - Maximum frame rate in
  - All-pixel scan mode: 12 bit: 23.4 frame/s
- ◆ 12-bit A/D converter
- ◆ CDS / PGA function
  - 0 dB to 24 dB: Analog Gain (0.1 dB step)
  - 24.1 dB to 48 dB: Analog Gain: 24 dB + Digital Gain: 0.1 dB to 24 dB (0.1 dB step)
- ◆ I/O interface
  - Low voltage LVDS (150 mVp-p) serial (4 ch / 8 ch switching) DDR output
- ◆ Recommended lens F number: 2.8 or more (Close side)
- ◆ Recommended exit pupil distance: -100 mm to  $-\infty$

*Bijlage F – Technische informatie IMX304LQR-C deel 1 (Sony, 2020)*

SONY

IMX304LQR

### Device Structure

◆ CMOS image sensor			
◆ Image size	Diagonal 17.6 mm (Type 1.1)	Approx. 12.37 M pixels	All-pixel
◆ Total number of pixels	4112 (H) × 3018 (V)	Approx. 12.41 M pixels	
◆ Number of effective pixels	4112 (H) × 3008 (V)	Approx. 12.37 M pixels	
◆ Number of active pixels	4112 (H) × 3008 (V)	Approx. 12.37 M pixels	
◆ Number of recommended recording pixels	4096 (H) × 3000 (V)	Approx. 12.29 M pixels	All-pixel
◆ Unit cell size	3.45 μm (H) × 3.45 μm (V)		
◆ Optical black	Horizontal (H) direction: Front 0 pixel, rear 0 pixel Vertical (V) direction: Front 10 pixels, rear 0 pixel		
◆ Package	226 pin LGA		

### Image Sensor Characteristics

(T<sub>j</sub> = 60 °C)

Item		Value	Remarks
Sensitivity (F5.6)	Typ.	1146 mV	1/30 s accumulation
Saturation signal	Min.	1001 mV	

### Basic Drive Mode

Drive mode	Recommended number of recording pixels	Maximum frame rate [frame/s]	Output interface	ADC [bit]
All pixel	4096 (H) × 3000 (V) approx. 12.29 M pixels	23.4	Serial LVDS 8 ch	12
All pixel (Vertical / Horizontal 1/2 subsampling)	2048 (H) × 1500 (V) approx. 3.07 M pixels	46.3	Serial LVDS 8 ch	12

Bijlage D – Technische informatie IMX304LQR deel 2 (Sony, 2020)

## Bijlage G: Technische informatie 100-BTC-005

100-BTC-005

FACTSHEET



### Bi-telecentric lens 0.05x Bi-telezentrisches Objektiv 0,05x *Objectif bi-télécentrique 0,05x*



### Specification

Article number 100-BTC-005		
Bi-telecentric		object and image side
Magnification	mm	0.05 x
Field of View (with 1/2" chip)	mm	125 x 94.1
Field of View (with 1/1.8" chip)	mm	139 x 104
Field of View (with 2/3" chip)	mm	167 x 125 (slightly vignetting possible)
Distortion	%	< 0.07
Telecentric failure	*	< 0.08
Resolution (MTF@70LP/mm)	%	50
Aperture	F/#	8
Depth of focus	mm	253
Working Distance	mm	415.7
Diameter x length	mm	205 x 502
Clamp diameter	mm	110
Clamp length	mm	120.7
Camera thread		C-Mount

Bijlage G – Technische informatie 100-BTC-005 (Opto, 2021)

# Bijlage H: Technische informatie TC4M009-C

## PRODUCT DATASHEET

Home | Optics | Telecentric lenses | TC1MHR-TC4MHR series | TC4M009-C



OPTO ENGINEERING

# TC4M009-C

Telecentric lens for 4/3" detectors, magnification 2.000 x, C-mount

### SPECIFICATIONS

Magnification	(x)	2.000
Image circle Ø	(mm)	22.0

#### Object field of view(8)

with KAI-2020 14.8 mm diagonal w x h 11.84 x 8.88	(mm x mm)	5.9 x 4.4
with KAI-04050 16 mm diagonal w x h 12.8 x 9.6	(mm x mm)	6.4 x 4.8
with KAI-4022/4021 21.5 mm diagonal w x h 15.2 x 15.2	(mm x mm)	7.6 x 7.6
with KAI-08050 22.6 mm diagonal w x h 18.1 x 13.6(7)	(mm x mm)	9.1 x 6.8

#### Optical specifications

Working distance (1)	(mm)	63.3
wF/# (2)		22
Telecentricity typical (max) (3)	(deg)	<0.08 (0.10)
Distortion typical (max)(4)	(%)	<0.05 (0.10)
Field depth (5)	(mm)	0.4
CTF@ 70 lp/mm	(%)	> 30

#### Mechanical specifications

Mount		C
Length (6)	(mm)	170.0
Diameter	(mm)	45
Mass	(g)	180

Last update: 2018-06-12

### NOTES

1. Working Distance: distance between the front end of the mechanics and the object. Set this distance within +/- 3% of the nominal value for maximum resolution and minimum distortion.
2. Working F/#: the real F/# of a lens when used as a macro. Lenses with smaller apertures can be supplied on request.
3. Maximum slope of chief rays inside the lens: when converted to milliradians, it gives the maximum measurement error for any millimeter of object displacement. Typical (average production) values and maximum (guaranteed) values are listed.
4. Percent deviation of the real image compared to an ideal, undistorted image: typical (average production) values and maximum (guaranteed) values are listed.
5. At the borders of the field depth the image can be still used for measurement but, to get a very sharp image, only half of the nominal field depth should be considered. Pixel size used for calculation is 4.8 µm.
6. Measured from the front end of the mechanics to the camera flange.
7. With KAI-08050 (22.6 mm diagonal) detectors, the FOV of TC4Myyy lenses may show some vignetting at the image corners, as these lenses are optimized for 1.2" detectors (21.5 mm)
8. For the fields with the indication "Ø =", the image of a circular object of such diameter is fully inscribed into the detector.



All product specifications and data are subject to change without notice to improve reliability, functionality, design or other. Photos and pictures are for illustration purposes only.

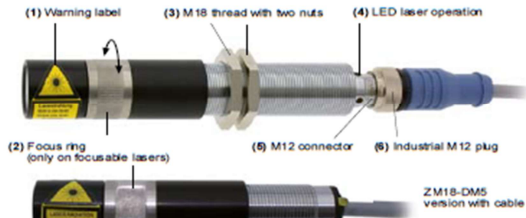
Bijlage H – Technische informatie T4MC009-C (Opto Engineering, 2020)

# Bijlage I: Technische informatie Z5M18B-F-635-1p30

Thank you for purchasing a Z-LASER product!

**Z-LASER**  
 Precise. Reliable. In Light.  
 www.Z-LASER.com

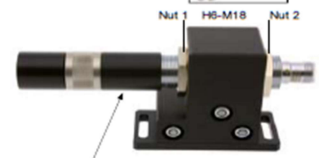
Welcome to the ZM18 laser series!



Avoid direct eye exposure to laser beam!

- Warning label is enclosed (or attached in advance) and should be well visible. Please pay attention to the laser classes! Laser class 3R, 3B and 4 are intended for integration into complex systems and are not approved for stand-alone operation. They require a laser protection officer who will decide on the necessary legal measures of training, hazard control and use.
- By rotating the focus ring, the laser projection can be focused (from 100mm up to ∞).
- M18 thread with two nuts for a simple installation in a mounting or a mounting angle.
- LED light = Laser on / No LED light = Laser off  
 • LED blinking orange/green (only ZM18-S/H) = internal temperature of 65°C is reached. At 85°C, the laser turns off, but the LED still blinks. - Attention: After cooling down below 85°C the laser turns on automatically!
- M12 connector to provide fixed and secure connection to power supply, cable or customized solution (also see configuration scheme with ZM18-S/H). Version with flying leads connection is also available (ZM12DM5).
- Fit industrial plug to laser, screw softly by hand (without tool). About 2mm of the screw thread must be visible, do not fix it any further!

- Installation into a mount**  
 - On the side example with a H6-M18 (alternative angle mounting)
- Spin nut 1 on to the M18 laser thread.
  - Screw the laser into the mount until you reach nut 1 (alternative: put into mounting angle).
  - Spin nut 2 from behind and fix softly both nuts with a M18 device.



- Installation into a mount with Ø 20mm, as example H2-20**  
 Please do not fix the mount on to the front of the laser body as pressure can cause damage to the optics. Please fix the mount behind the focusing adjustment.

- Troubleshooting:**
- No laser light. Is the plug and/or power supply connected, supply voltage available?
  - No laser light. Is the cable damaged / broken or is the power supply/power socket defective?
  - No laser light. Are the pins connected correctly?
  - Diffuse projection: (if focusable) readjust focus ring.
  - Diffuse projection: if the optic appears "dirty" - carefully, clean with a cotton bud and split.
- If the above troubleshoots do not solve your problems, it is possible that there is a fault with the electronics or laser diode. If the laser diode is faulty, as per split or weak beam, please return the laser to our headquarters.

ZM18 series is available with different features \*  
 Die Serie ZM18 ist mit unterschiedlichen Merkmalen verfügbar \*  
 La Serie ZM18 est disponible avec des caractéristiques différentes \*  
 La serie ZM18 è disponibile con varie caratteristiche \*  
 La serie ZM18 está disponible con distintas características \*  
 ZM18 シリーズは異なる特徴と利用できる \*

Configuration scheme and modulation		Connection options with cable (KB4)	
<p><b>ZM18B (Basic)</b>  <b>ZM18DM5(6, 63)*</b></p> <p>Pin 1: Voltage supply +                      Pin 2: TTL modulation n.c. [ZM18DM5: up to 100 kHz @ black cable]                      Pin 3: Voltage supply -                      Pin 4: Analog modulation n.c.; Continuous wave</p>	<p><b>ZM18S, ZM18S3 (Standard)</b>                      Voltage levels below -2V are interpreted as logic 0 or "light off", voltage levels above -2V are interpreted as logic 1 or "light on".                      Please note that the switching threshold can vary slightly.</p>	<p><b>ZM18H, ZM18H3 (High-End)</b>                      Applying a DC voltage between 0-1V @ ZM18H / 0-2V @ ZM18H3 at pin 4, the laser intensity is controlled.                      0V means the laser power is &lt; 10% of the nominal power.                      1V @ ZM18H / 2V @ ZM18H3 and above means the laser will achieve 100% of the nominal laser power.</p>	<p>brown white blue black</p>
<p>Pin 2: TTL</p>	<p>Applying a DC voltage between 0-1V at pin 4, the laser intensity is controlled.</p>		<p>Applying a DC voltage between 0-1V @ ZM18H / 0-2V @ ZM18H3 at pin 4, the laser intensity is controlled.</p>
<p>Pin 4: Analog</p>	<p>0V means the laser power is &lt; 10% of the nominal power.                      1V and above means the laser will achieve 100% of the nominal laser power.</p>		<p>1V @ ZM18H / 2V @ ZM18H3 and above means the laser will achieve 100% of the nominal laser power.</p>
<p>Modulation</p>	<p>Analog intensity control (up to 32 steps) and digital TTL Trigger up to 1 kHz                      ZM18S3: TTL up to 500 kHz</p>	<p>ZM18H: APC: TTL up to 1 MHz; sinusoidal waves up to 5 MHz; ACC: up to 20 MHz (diode depending)                      ZM18H3: TTL up to 1 MHz; sinusoidal waves up to 5 MHz; ACC: up to 20 MHz (diode depending)</p>	<p>ZM18H3: APC: TTL up to 1 MHz; sinusoidal waves up to 5 MHz; ACC: up to 20 MHz (diode depending)</p>
<p>General rule</p>	<p>Note that there is a linear characteristic between the two voltages! Both control inputs are tolerant to DC voltages up to 25V, therefore, by applying 24V to the laser, it can easily be switched on to 100% by bridging pins 1, 2 and 4. There is no need for an extra supply of 1V. You cannot destroy the laser in a 24 Volt system by wrong connections of input pins.                      * Attention: Laser type ZM18DM53 with 4-wired cable must be supplied only with 4.6VDC (applies also for old ZM18DM5)</p>		

CE-Conformity according to the directives 2004/108/EC and 73/23/EEC excluding connection type.

	ZM18DM5 (discontinued model) ZM18B (Basic), ZM18DM5(63)	ZM18S (discontinued model) ZM18S3 (Standard)	ZM18H (discontinued model) ZM18H3 (High-End)
<b>Mechanical specifications *</b>			
Max. Dimensions ZM18DM5(63) with cable	76mm x Ø 20mm (fixed focus version) 91mm x Ø 20mm (focusable version)	-	-
Max. Dimensions ZM18B-green	136mm x Ø 20mm (focusable and fixed focus version)	-	-
Max. Dimensions	91mm x Ø 20mm (fixed focus version) 108mm x Ø 20mm (focusable version)	112mm x Ø 20mm (fixed focus version) 128mm x Ø 20mm (focusable version)	123mm x Ø 20mm (fixed focus version) 139mm x Ø 20mm (focusable version)
Protection category	IP 67, dust-proof and water-proof		
Connection	ZM18B: M12 plug, 4-pin ZM18DM5(63): integrated cable		M12 plug, 4-pin
M18 industry housing	Chromed brass, with optic head: anodised aluminium		Gold plated brass, with optic head: anodised aluminium
<b>Electrical specifications *</b>			
Supply voltage	5-30VDC +/- 5% ZM18DM5(63): 4-6VDC	5-30VDC +/- 5%	5-30VDC +/- 5%
Power consumption		< 4VA	
Mode of operation	APC with current limiting (or CC)	APC with current limiting	APC with current limiting or CC
Modulation	ZM18B: Continuous wave ZM18DM5(6, 63): TTL modulation up to 100 kHz	Analog intensity control (up to 32 steps) and digital TTL Trigger up to 1 kHz ZM18S3: digital TTL Trigger up to 500 kHz	APC: TTL up to 1 MHz; sinusoidal waves up to 5 MHz ACC: Up to 20 MHz (diode depending) ZM18H3 Blue: Analog and TTL modulation up to 200 kHz ZM18H3 Green: Analog and TTL modulation up to 100 kHz
Protection	Reverse polarity and transient / ESD	Reverse polarity and transient / ESD, over temperature protection	Reverse polarity and transient / ESD, over temperature protection
<b>Optic specifications *</b>		1-200mW (depending on wavelength and model)	
Output power			
Wavelength	635nm - 980nm ZM18B-green: 632nm	635nm - 980nm	ZM18H: 405nm - 980nm ZM18H3: 405nm, 450nm, 520nm
<b>Environmental conditions *</b>			
Case temperature	-10°C up to +50°C (depending on wavelength, heat dissipation e.g. with mounting H8-M18)		
Storage temperature	-10°C up to +80°C		
Humidity	Max. 90%, non condensing		
MTTF @ 25°C	> 30.000h on red wavelengths (635 - 785nm) > 5.000h on green and blue wavelengths		

\* For further information please take a look on the data sheets. Do you need help? Please contact your country representative or visit us on [www.z-laser.com](http://www.z-laser.com).  
 \* Weitere Informationen finden Sie auf den Datenblättern. Benötigen Sie Hilfe? Kontaktieren Sie Ihre Landesvertretung oder besuchen Sie uns auf [www.z-laser.com](http://www.z-laser.com).  
 \* Vous trouverez de plus amples informations sur les fiches techniques. Avez-vous besoins d'aide ? Contactez votre distributeur national, ou rendez nous visite sur le site [www.z-laser.com](http://www.z-laser.com).  
 \* Per maggiori informazioni consultare il foglio tecnico specifico. Per ulteriore supporto contattate l'agente o la nostra sede. Potrete trovare tutte le informazioni sul nostro sito [www.z-laser.it](http://www.z-laser.it).  
 \* Por favor, revise las fichas técnicas para más información. ¿Necesita ayuda? Por favor contacte con el distribuidor de su país o visite [www.z-laser.com](http://www.z-laser.com).  
 \* 白色レーザー M18 シリーズ等の詳細についてはホームページを参照下さい。ご不明な点がございましたら、弊社代理店、または直接 [www.z-laser.com](http://www.z-laser.com) にお問い合わせ下さい。

**Accessories • Zubehör • Accessoires • Accessori • Accesorios • アクセサリー**

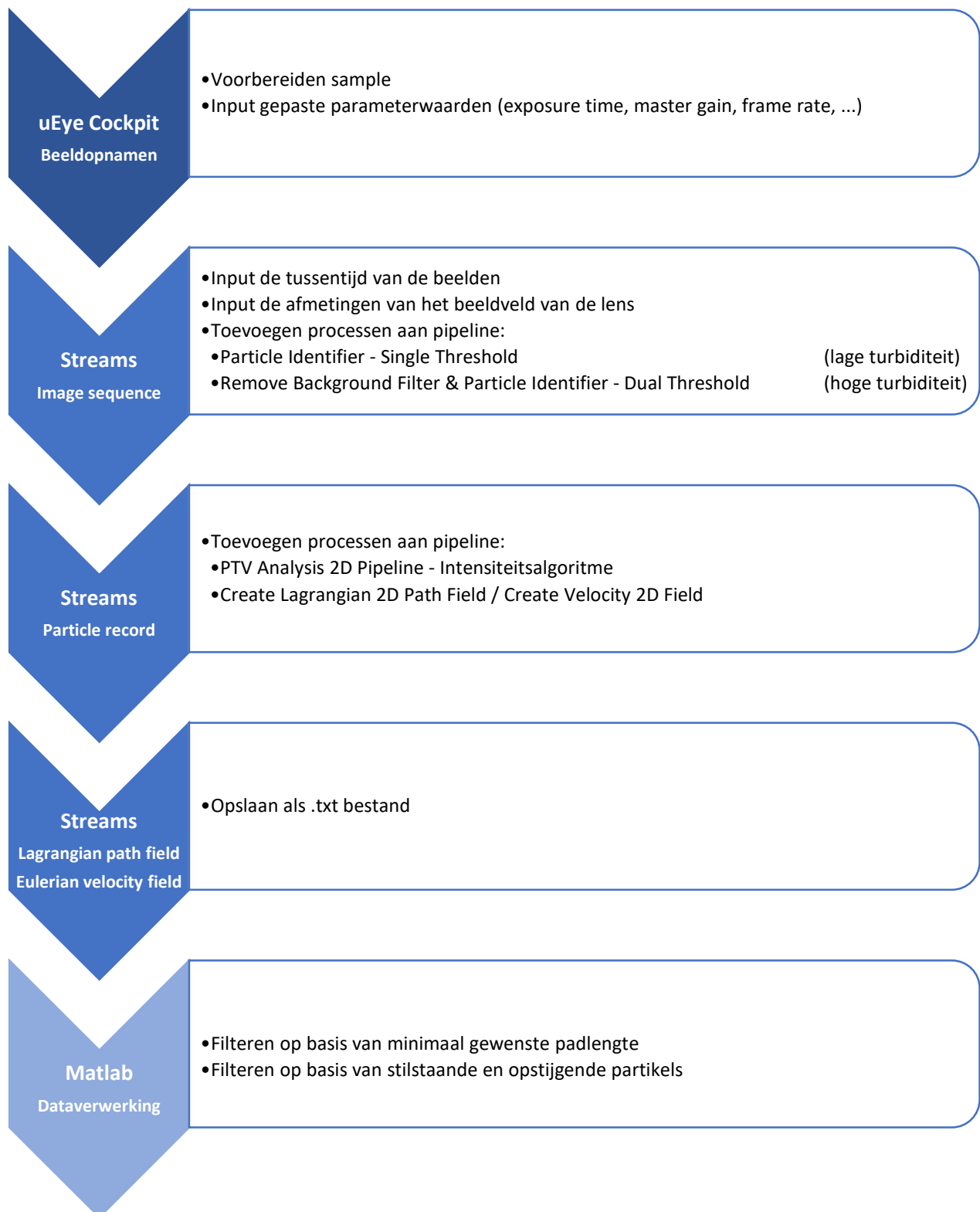
Some available optics • einige erhältlich Optiken • quelques optiques disponibles • alcune ottiche disponibili • alcune ottiche disponibili • 取替パターン

<p>90° Optic head 90° Optikkopf 90° Tête optique 90° Cabezal óptico 90° レンズヘッド</p>	<p>Power supply Netzteil Alimentation Alimentatore Alimentación 電源装置 WPS-S-M12 (UK)</p>	<p>Cable Kabel Cable Cabo ケーブル KB4</p>
--	---	--

Bijlage I - Technische informatie Z5M18B-F-635-1p30 (Z-LASER, 2021)



## Bijlage J: Flowchart snelheidsproeven



Bijlage J - Flowchart snelheidsproeven