



**Vlaanderen**  
is wetenschap



22\_030\_1  
WL rapporten

## Vispassage Kerkhove

Validatiemeting en optimalisatie ontwerpmethodiek  
bekkenvormige vispassage

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

[waterbouwkundiglaboratorium.be](http://waterbouwkundiglaboratorium.be)

# Vispassage Kerkhove

## Validatiemeting en optimalisatie ontwerpmethodiek bekkenvormige vispassage

Vercruyse, J.; Visser, K.P.; Goormans, T.; Depreiter, D.; Claeys, S.; Vereecken, H.; Buysse, D.

### Juridische kennisgeving

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

### Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2024  
D/2024/3241/293

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruyse, J.; Visser, K.P.; Goormans, T.; Depreiter, D.; Claeys, S.; Vereecken, H.; Buysse, D. (2024). Vispassage Kerkhove: Validatiemeting en optimalisatie ontwerpmethodiek bekkenvormige vispassage. Versie 4.0. WL Rapporten, 22\_030\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen





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

### Documentidentificatie

Oprachtgever:	De Vlaamse Waterweg nv - Afdeling Regio West	Ref.:	WL2024R22_030_1
Trefwoorden (3-5):	Fishway; In Situ Measurements; Bovenschelde;		
Kennisdomeinen:	Vispassages > Bekkentrap > In situ metingen Vispassages > Bekkentrap > Literatuur en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	79	Bijlagen (p.):	21
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruyse, J.; Visser, K.P.; Goormans, T.; Depreiter, D.; Claeys, S.; Vereecken, H.; Buysse, D.
------------	---

### Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K.P.	Getekend door:Klaas Visser (Signature) Getekend op:2024-12-13 16:03:45 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Vercruyse, J.	Getekend door:Jeroen Vercruyse (Signa) Getekend op:2024-12-13 08:56:30 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  

### Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op:2024-12-12 13:07:00 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	--

# Abstract

Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) heeft, in samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO), afgelopen jaren verschillende ontwerpen uitgevoerd voor vispassages op de Bovenschelde, Leie en Dender, waaronder ook de aanpassing van de vispassage op de Bovenschelde te Kerkhove. Dit aangepaste ontwerp betreft een V-vormige breukstenen bekkentrap bestaande uit 18 asymmetrische drempels. Aan opwaartse zijde bevindt zich een automatisch gestuurde brede hefschuif om de vispassage met oog op peilbeheer of onderhoud te kunnen sluiten. De monding bestaat uit een loodrechte uitstroom met knijpconstructie net afwaarts van de stuwen.

Met het oog op toekomstige ontwerpen van dergelijke vispassages en de optimalisatie van de toegepaste ontwerpmethodiek wordt het functioneren van de vispassage te Kerkhove geëvalueerd. Hiertoe werden verschillende hydraulisch maatgevende parameters bemeaten doormiddel van een uitgebreide meetcampagne die uitgevoerd werd van 5 tot en met 7 oktober 2022. Deze meetcampagne betrof een samenwerking tussen WL, INBO en de cel fotogrammetrie en topografie van de afdeling Algemene Technische Ondersteuning (ATO).

In kader van deze meetcampagne werden de oevers en de kruinen van de eerste 7 drempels in detail opgemeten aan de hand van 3D LiDAR scans aangevuld met puntmetingen. Tevens werden waterpeilen continu opgemeten op verschillende plaatsen in de stuwgeul, in de instroom van de vispassage op- en afwaarts de afsluitconstructie, in de eerste 13 bekkens en bij de uitstroom. Vervolgens werden op de voornoemde dagen debietmetingen, stroomsnelheidsmetingen en LSPIV-opnames uitgevoerd in drie reeksen van een halve dag bij een verschillend opwaarts peil.

De evaluatie van de vispasseerbaarheid van de drempels werd uitgevoerd aan de hand van een grid van puntsnelheidsmetingen boven de kruin van twee drempels, de gemeten drempelhoogtes en de continue waterpeilmetingen op- en afwaarts van de drempel. Het oppervlakte snelheidspatroon in de instroom en in 3 bekkens werd in beeld gebracht en geëvalueerd door middel van LSPIV opnames met behulp van een drone.

Uit de resultaten bleek dat het debiet door de vispassage hoger ligt als werd berekend tijdens het ontwerp. Dit wordt mogelijk verklaard door afwijkende drempelhoogtes en -vormen, en een onderschatting van de debietcoëfficiënt tijdens de ontwerpfasen. Een optimalisatie van de overlaatformule voor V-vormige bekkentrappen werd voorgesteld.

Voor de bemeeten scenario's bleek de passeerbaarheid in de vispassage op de meeste plaatsen voldoende. Er waren echter ook een aantal drempels waar stroomsnelheden over het algemeen te hoog liggen en drempels waar bij lagere opwaartse waterpeilen niet voldoende doorzwemdiepte gehandhaafd blijft. Daarnaast werd een relatief groot verval in de instroom van de vispassage vastgesteld. Dit leidt tot ongewenst lage doorzwemdieptes en relatief hoge stroomsnelheden in de instroom. Dit grotere verval wordt vermoedelijk veroorzaakt door een te ondiepe aanleg van de instroom.



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren .....	VIII
1 Inleiding .....	1
2 Beschrijving meting .....	3
2.1 Metingen .....	3
2.1.1 Aanvullende topografische metingen.....	3
2.1.2 Metingen uit meetnet.....	4
2.1.3 Diver-metingen .....	5
2.1.4 Debietmeting .....	8
2.1.5 Puntsnelheidsmeting .....	11
2.1.6 Oppervlakte-stroomvelden.....	12
2.1.7 Monitoring vuilrooster.....	13
2.2 Logboek.....	13
3 Verwerking meting .....	16
3.1 Topografische opmetingen .....	16
3.2 Metingen uit meetnet.....	21
3.3 Diver-metingen .....	22
3.3.1 Verwerkingstappen.....	22
3.3.2 Validatie.....	23
3.4 Debietmeting .....	24
3.4.1 Opzet.....	24
3.4.2 Aantal kolommen .....	25
3.4.3 Bepalen midden van de sectie.....	26
3.4.4 Weging met de waterdiepte.....	28
3.4.5 Uitmiddeling over de tijd .....	28
3.4.6 Resulterende debietstijdreeks.....	29
3.5 Puntsnelheidsmetingen .....	30
3.6 Oppervlakte stroomvelden .....	31
3.6.1 LSPIV basisverwerking .....	31
3.6.2 Uniformisering assenstelsels en contourkaarten .....	31

3.6.3	Vergelijking LSPIV en stroomsnelheidsmetingen .....	32
3.7	Wildcamera .....	35
3.8	Events .....	36
4	Hydraulische evaluatie .....	40
4.1	Debiet .....	40
4.2	Hoogte en verval .....	42
4.3	Passeerbaarheid drempels.....	50
4.3.1	Doorzwemdiepte en -breedte .....	50
4.3.2	Stroomsnelheden .....	53
4.3.3	Samenvatting .....	57
4.4	Passeerbaarheid bekkens.....	57
4.4.1	Doorzwemdiepte en -breedte .....	57
4.4.2	Stroomsnelheden en -patronen .....	58
4.4.3	Samenvatting .....	65
4.5	Passeerbaarheid instroom en afsluitconstructie .....	65
4.5.1	Ondiepe instroom .....	66
4.5.2	Vuilrooster .....	67
5	Debiet-waterhoogte-relatie drempels .....	68
5.1	Formules.....	68
5.2	Bepaling coëfficiënten.....	72
6	Conclusies .....	76
6.1	Vispassagedebiet.....	76
6.2	Evaluatie passeerbaarheid .....	76
6.2.1	Drempels.....	76
6.2.2	Bekken.....	76
6.2.3	Instroom .....	77
6.2.4	Vuilrooster .....	77
6.2.5	Algemeen .....	77
6.3	Rekenmethode en debietcoëfficiënt .....	77
6.4	Aanbevelingen (ontwerp toekomstige passages) .....	78
7	Referenties .....	79
8	Bijlage A – Inschatting doorzwemvensters .....	B1
9	Bijlage B – snelheidsplots LSPIV metingen .....	B6
9.1	B.1. Snelheidscontouren .....	B7
9.2	B.2. Snelheidsvectoren.....	B13
9.3	B.3. Vergelijking contouren streefpeil en streefpeil -20 cm .....	B19

## Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Divermetingen .....	6
Tabel 2 – Instellingen Divers.....	8
Tabel 3 – Logboek meetreeks 1 donderdag 6/10 namiddag.....	14
Tabel 4 – Logboek meetreeks 2 vrijdag 7/10 voormiddag.....	14
Tabel 5 – Logboek meetreeks 3 vrijdag 7/10 namiddag.....	15
Tabel 6 – Drempel- en bekkenbodempeilen en openingshoeken V-vorm drempels.....	20
Tabel 7 – Verwerkte opnames.....	31
Tabel 8 – Opdelen meetreeksen 7/10/2022 in events.....	37
Tabel 9 – Vergelijking gemeten debiet t.o.v. ontwerpwaarden bij gemeten opwaarts waterpeil.....	40
Tabel 10 – Overzicht maatgevende parameters uit de overlaat formule per drempel en per event.....	49
Tabel 11 – Inschatting doorzwemvensters.....	52
Tabel 12 – Cd-coëfficiënten V-vormige overlaat voorontwerp studie vispassage Kerkhove.....	69



# Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzichtsfiguur van het sluiscomplex te Kerkhove.....	1
Figuur 2 – Detailbeeld van de vispassage in het sluiscomplex te Kerkhove. De symbolen en cijfers duiden de drempels aan. ....	2
Figuur 3 – Zicht op drempel 1 tot en met 4 bij gesloten vispassage (05/10/2022). ....	3
Figuur 4 – Opstelling 3D LiDAR in vispassage. ....	4
Figuur 5 – Continue metingen op- en afwaarts stuwsluiscomplex Kerkhove (bron www.waterinfo.be).....	5
Figuur 6 – Overzichtskaart peilmetingen korte en lange termijn.....	6
Figuur 7 – Plaatsing Divers aan ballastblok. ....	7
Figuur 8 – Miniprisma gemonteerd op XPS vlotter. ....	8
Figuur 9 – Boven: het kabel-katrolsysteem met daaraan de Remote Surface Water Vehicle (RSWV) bevestigd; beneden: RSWV met daarop het aDcp -toestel (witte cilinder achteraan).....	10
Figuur 10 – Overzichtskaart met aanduiding van de locatie van de debietmeettraaien. ....	11
Figuur 11 – Uitvoering snelheidsmeting vanuit platform hoogtewerker.....	12
Figuur 12 – Beeld testopname stromingspatroon met drone.....	12
Figuur 13 – Overzichtskaart met aanduiding van de 4 LSPIV meetzones. ....	13
Figuur 14 – Schermafbeeldingen uit CloudCompare. Links: As-built dataset 2019; Rechts: 3D-LiDAR 2022. ....	17
Figuur 15 – Schermafbeelding uit CloudCompare: weergave van het gebied vanaf de afsluitconstructie van de vispassage (onderaan in beeld) tot bekken 9 (achter de kleurschaal). ....	18
Figuur 16 – Geometrie en cumulatief doorstroomoppervlak van de eerste 7 drempels (o.b.v. terreinopmeting 2022).....	19
Figuur 17 – Afwijking oppervlakte bepaling CF methode (DTM 2022) ....	21
Figuur 18 – Verloop van de luchtdruk zoals opgemeten door beide barodivers.....	22
Figuur 19 – Principe van de referentie van de Divers. ....	23
Figuur 20 – Overzicht verschil individuele hoogte metingen (m) t.o.v. gemiddelde voor de bekkens met redundant uitgevoerde metingen. ....	24
Figuur 21 – Voorbeeld bekomen snelheidsprofiel uit een raaimeting (verticale as= hoogte; horizontale as, gevaren afstand).....	25
Figuur 22 – Huber-regressie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid uitgemiddeld over de 7 centrale kolommen met het debiet.....	26
Figuur 23 – Overzicht verschil in gebruikte kolommen, gebaseerd op methode 1 ('mid col- mid measurement') en op basis van maximale diepte ('mid col- depth') voor verschillende raaimetingen op dezelfde locatie... ..	27
Figuur 24 – Huber-regressie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid vermenigvuldigd met de waterdiepte, uitgemiddeld over de 7 centrale kolommen met het debiet. ....	28
Figuur 25 – Invloed van een uitmiddeling over de tijd. Links: voortschrijdend gemiddelde (30 sec); rechts: gemiddelde per 30 sec. ....	29
Figuur 26 – Berekende debietstijdreeks gedurende meetdag 2.....	29

Figuur 27 – Stroommeetpunten op bekken 5 voor en na correctie van raai 1. ....	30
Figuur 28 – Vergelijking snelheidscontouren bekken 5 en bekken 6 .....	32
Figuur 29 – Verstoring LSPIV meting door meetlint (bekken 5 streefpeil – 16cm)) – rechts zoom .....	33
Figuur 30 – Vergelijking puntsnelheidsmeting met LSPIV – bekken 1 .....	34
Figuur 31 – Vergelijking puntsnelheidsmeting met LSPIV – bekken 1. ....	34
Figuur 32 – Vb. snelheids vectoren LSPIV bekken 5, derde meetreeks. ....	35
Figuur 33 – Vuilophoping vuilrooster afsluitconstructie. ....	35
Figuur 34 – Opnames vuilrooster met wildcamera. ....	36
Figuur 35 – Opgemeten peil in de instroom en de opwaartse bekken en het debiet. ....	37
Figuur 36 – Verloop waterpeil en debiet tijdens event nr. 1 .....	38
Figuur 37 – Verloop waterpeil en debiet tijdens event nr. 2 .....	38
Figuur 38 – Verloop waterpeil en debiet tijdens event nr. 3 .....	39
Figuur 39 – Verloop waterpeil en debiet tijdens event nr. 4 .....	39
Figuur 40 – Debiet vispassage in functie van afwijking t.o.v. streefpeil.....	41
Figuur 41 – Waterpeilen en vervallen in de instroom naast debietreeks .....	42
Figuur 42 – Zoom in meetpunten in de instroom en het opwaarts gedeelte van de vispassage .....	42
Figuur 43 – Waterpeilen en vervallen over drempels naast debietreeks .....	43
Figuur 44 – Langsprofiel van de vispassage. De horizontale as geeft de drempelnummers weer; de op- en afwaartse onderdelen van de passage zijn eveneens aangeduid. ....	46
Figuur 45 – Verschil tussen twee opeenvolgende drempelpeilen. ....	47
Figuur 46 – Verval per drempel langsheen de vispassage. ....	47
Figuur 47 – Vergelijking drempelverval , hydraulisch verval, overstorthoogte en doorstroomsectie voor drempel 1 t.e.m. drempel 7.....	50
Figuur 48 – Doorzwemdiepte ten opzichte van het diepste punt van de V.....	51
Figuur 49 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 3. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm). ....	52
Figuur 50 – Berekende maximale stroomsnelheid over de drempels op basis van het gemeten hydraulische verval. ....	53
Figuur 51 – Gemeten stroomsnelheid t.h.v. drempel 1, bij streefpeilsituatie.. Verschil opwaarts waterpeil en diepste punt bedraagt 69 cm, verval over de drempel bedraagt 12 cm.....	55
Figuur 52 – Gemeten stroomsnelheid t.h.v. drempel 1, bij situatie streefpeil – 20 cm. Verschil opwaarts waterpeil en diepste punt bedraagt 41 cm, verval over de drempel bedraagt 8 cm. ....	55
Figuur 53 – Gemeten stroomsnelheid t.h.v. drempel 5, bij streefpeilsituatie. Afstand is uitgedrukt t.o.v. het referentiepunt op linkeroever. Verschil opwaarts waterpeil en diepste punt bedraagt 71 cm, verval over de drempel bedraagt 16 cm. ....	56
Figuur 54 – Gemeten stroomsnelheid t.h.v. drempel 5, bij situatie streefpeil – 20 cm. Afstand is uitgedrukt t.o.v. het referentiepunt op linkeroever. Verschil opwaarts waterpeil en diepste punt bedraagt 45 cm, verval over de drempel bedraagt 12 cm. ....	56

Figuur 55 – Bekkentiepte ten opzichte van de bekkenbodem zoals bepaald uit de terreinopmeting d.d. 22/10/2019.....	58
Figuur 56 – Stroomsnelheidsvectoren o.b.v. LSPIV in de beschouwde bekkens. De zone in elk bekken, omhuld door de contour “0.0 m/s”, geeft een indicatie van de recirculatiezone.....	60
Figuur 57 – Ligging hoofd- en retourstroom. De zone in elk bekken, omhuld door de contour “0.0 m/s”, geeft een indicatie van de recirculatiezone.....	61
Figuur 58 – Stroomsnelheidscontouren. ....	62
Figuur 59 – Gemeten stroomsnelheid in bekken 1, bij streefpeilsituatie. Waterdiepte in het bekken 110 cm. ....	63
Figuur 60 – Gemeten stroomsnelheid in bekken 1, bij situatie streefpeil – 20 cm. Waterdiepte in het bekken 86 cm. ....	64
Figuur 61 – Gemeten stroomsnelheid in bekken 5, bij streefpeilsituatie. Waterdiepte in het bekken 107 cm. ....	64
Figuur 62 – Gemeten stroomsnelheid in bekken 5, bij situatie streefpeil – 20 cm. Waterdiepte in het bekken 84 cm. ....	65
Figuur 63 – Ondiepte ter hoogte van de instroom (foto 6/10/2022). ....	66
Figuur 64 – LSPIV verwerking stromingspatroon instroom en bekken 0 6/10 13:18 – peil opwaarts 11.38 m TAW (=streefpeil – 8 cm).....	67
Figuur 65 – Asymmetrische V-vormige drempel verklaring symbolen. ....	68
Figuur 66 – Vergelijking formules reductiecoëfficiënt $C_r$ ten gevolge van verdrinking overlaat.....	71
Figuur 67 – Verdrinkingsgraad drempels. ....	71
Figuur 68 – Totale correctiecoëfficiënt in functie van debiet en drempel.....	72
Figuur 69 – Reductiecoëfficiënt verdrinkingsgraad, $C_r$ , volgens Villemonte en debietcoëfficiënt $C_d$ .....	73
Figuur 70 – Reductiecoëfficiënt verdrinkingsgraad, $C_r$ , volgens Krüger en debietcoëfficiënt $C_d$ .....	74
Figuur 71 – Debietcoëfficiënt ten opzichte van reductiecoëfficiënt verdrinkingsgraad (Villemonte en Krüger).....	75
Figuur 72 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 1. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm). ....	B2
Figuur 73 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 2. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm). ....	B2
Figuur 74 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 3. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm). ....	B3
Figuur 75 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 4. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm). ....	B3
Figuur 76 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 5. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm). ....	B4
Figuur 77 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 6. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm). ....	B4
Figuur 78 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 7. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm). ....	B5
Figuur 79 – LSPIV – Bekken 1 – streefpeil - snelheidscontouren .....	B7

Figuur 80 – LSPIV – Bekken 1 – streefpeil -20cm - snelheidscontouren .....	B8
Figuur 81 – LSPIV – Bekken 5 – streefpeil – snelheidscontouren.....	B9
Figuur 82 – LSPIV – Bekken 5 – streefpeil -20 cm – snelheidscontouren.....	B10
Figuur 83 – LSPIV – Bekken 6 – streefpeil – snelheidscontouren.....	B11
Figuur 84 – LSPIV – Bekken 6 – streefpeil -20 cm - snelheidscontouren .....	B12
Figuur 85 – LSPIV– Bekken 1 – streefpeil – snelheidsvectoren .....	B13
Figuur 86 – LSPIV – Bekken 1 – streefpeil -20 cm – snelheidsvectoren .....	B14
Figuur 87 – LSPIV – Bekken 5 – streefpeil – snelheidsvectoren .....	B15
Figuur 88 – LSPIV – Bekken 5 – streefpeil -20 cm – snelheidsvectoren .....	B16
Figuur 89 – LSPIV – Bekken 6 – streefpeil – snelheidsvectoren .....	B17
Figuur 90– LSPIV – Bekken 6 – streefpeil -20 cm – snelheidsvectoren .....	B18
Figuur 91 – LSPIV – Bekken 1 – snelheidscontouren – vergelijking streefpeil met streefpeil -20 cm.....	B19
Figuur 92 – LSPIV – Bekken 5 – snelheidscontouren – vergelijking streefpeil met streefpeil -20 cm.....	B20
Figuur 93 – LSPIV – Bekken 6 – snelheidscontouren – vergelijking streefpeil met streefpeil -20 cm.....	B21

# 1 Inleiding

Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) heeft, in samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO), afgelopen jaren verschillende ontwerpen uitgevoerd voor vispassages op de Bovenschelde, Leie en Dender, waaronder ook de aanpassing van de vispassage op de Bovenschelde te Kerkhove (Visser et al., 2016, 2017, 2019; Vanderkimpfen et al., 2019). Een bovenaanzicht van de vispassage te Kerkhove wordt gegeven in Figuur 1. Bemerkt dat de vispassage te Kerkhove eerst ontworpen werd als een nevengeul. Omwille van erosieproblemen vastgesteld bij de ingebruikname van de vispassage van Asper (Verelst et al., 2014), gelegen afwaarts Kerkhove, werd besloten om het ontwerp aan te passen naar een V-vormige bekkentrap.



Figuur 1 – Overzichtsfiguur van het sluiscomplex te Kerkhove.

De vispassage te Kerkhove betreft een V-vormige breukstenen bekkentrap bestaande uit 18 asymmetrische drempels. Aan opwaartse zijde bevindt zich een brede hefschuif als afsluitconstructie, met als doel het beheer van het waterpeil. Deze hefschuif wordt automatisch aangestuurd op basis van metingen van het opwaartse waterpeil. Direct opwaarts van de afsluitconstructie bevindt zich eveneens een vuilrooster dat bij opwaarts streefpeil circa 20 cm diep onder het wateroppervlak steekt met circa 40 cm vrije doorstroomruimte onder het rooster. Aan de afwaartse zijde komt de vispassage net afwaarts de nieuwe stuwen uit door middel van een brede monding haaks op de stroming. De nieuwe stuwen worden gescheiden van de oude stuw en de sluis door middel van een midden-eiland. Dit midden-eiland heeft een lengte van ca. 550 m.



Figuur 2 – Detailbeeld van de vispassage in het sluiscomplex te Kerkhove. De symbolen en cijfers duiden de drempels aan.

Met het oog op toekomstige ontwerpen van dergelijke vispassages en de optimalisatie van de toegepaste ontwerpmethodiek, is het wenselijk het functioneren van de vispassage te evalueren. Hiertoe werden na ingebruikname van de vispassage in april 2021 al enkele debietmetingen uitgevoerd (Visser et al., 2022). Uit deze metingen bleek dat het noodzakelijk is peilmetingen in de bekkens uit te voeren om de vereiste debietscoëfficiënten voor breukstenen V-vormige overlagen te kunnen bepalen. Ook zijn stroomsnelheidsmetingen van belang om de passeerbaarheid (voor vissen) te kunnen evalueren.

Onderhavig rapport beschrijft de van 5 tot 7 oktober 2022 uitgevoerde metingen in de vispassage van Kerkhove. Het rapport is als volgt opgebouwd:

- De beschrijving van de meting wordt gegeven in hoofdstuk 2.
- De verwerking van de meetdata wordt beschreven in hoofdstuk 3.
- De hydraulische evaluatie van de werking van de vispassage wordt beschreven in hoofdstuk 4.
- In hoofdstuk 5 wordt de rekenmethode voor het debiet besproken en zijn voor de eerste zeven drempels op basis van de metingen de debietcoëfficiënten afgeleid.
- De conclusies worden samengevat in hoofdstuk 6.

## 2 Beschrijving meting

De uitgevoerde metingen worden beschreven in Paragraaf 2.1. De meting werd uitgevoerd over een periode van 3 dagen waarbij de eerste 1.5 dag de apparatuur werd geïnstalleerd en de hierop volgende 1.5 dag metingen werden uitgevoerd. Het verloop van de metingen wordt beschreven in paragraaf 2.2.

### 2.1 Metingen

#### 2.1.1 Aanvullende topografische metingen

Na constructie van de vispassage werd door de aannemer een topografische opmeting uitgevoerd door middel van een LiDAR-toestel gemonteerd op een drone. Voor deze opmeting werd ter hoogte van de drempel tussen bekkens nr. 15-16 een aarden dam aangelegd zodat de constructie voor een groot deel droog kwam te liggen. Een digitaal hoogtemodel werd opgemaakt met een roosterresolutie van 0.1 m x 0.1 m. Als verificatie van de hoogte wordt vergeleken met een RTK GPS-meting van de drempel van de afsluitconstructie uitgevoerd in kader van project 21\_041. Uit de RTK GPS-meting volgde een drempelpeil 10.85 m TAW. Op basis van het hoogtemodel werd een bovenpeil van deze drempel vastgesteld tussen 10.75 en 10.85 m TAW. Het is belangrijk op te merken dat de drempel niet volledig werd ingemeten tijdens de drone-vlucht, waardoor een exacte punt-tot-puntvergelijking niet mogelijk is.

Op woensdag 5/10/2022 werd de afsluitconstructie gesloten en werden de oevers gemaaid waarna ATO met een Leica 3D LiDAR scanner, zie Figuur 4, een hoogteopmeting heeft uitgevoerd vanaf de afsluitconstructie tot drempel 7. Bemerkt dat het niet mogelijk was om de afsluitconstructie volledig dicht te zetten en dat er ook in de bekkens nog water stond. De drempels steken, met uitzondering van een enkele dieperliggende zone, boven het wateroppervlak uit tot en met +/- drempel 7 (zie Figuur 3). Naast de LiDAR-metingen werd van drempels 1 tot en met 6 het profiel opgemeten door middel van een totaalstation.



Figuur 3 – Zicht op drempel 1 tot en met 4 bij gesloten vispassage (05/10/2022).



Figuur 4 – Opstelling 3D LiDAR in vispassage.

### 2.1.2 Metingen uit meetnet

Voor het debiet doorheen de vispassage is het opwaartse peil maatgevend. Voor het opwaarts peil wordt het station 'MOW-HIC | Kerkhove Opwaarts/Bovenshelde (bos04o-1066)' uit het meetnet van het Hydrologisch Informatie Centrum (HIC) gebruikt. Dit meetpunt is gelegen opwaarts het middeneiland tussen de oude en nieuwe stuw. Bemerkt dat er ook door De Vlaamse Waterweg (DVW) continue peilmetingen worden uitgevoerd van zowel het opwaartse als afwaartse waterpeil. Dit betreffen meetpunten voor de sturing van de sluis en de stuw.





Figuur 5 – Continue metingen op- en afwaarts stuwsluiscomplex Kerkhove (bron [www.waterinfo.be](http://www.waterinfo.be)).

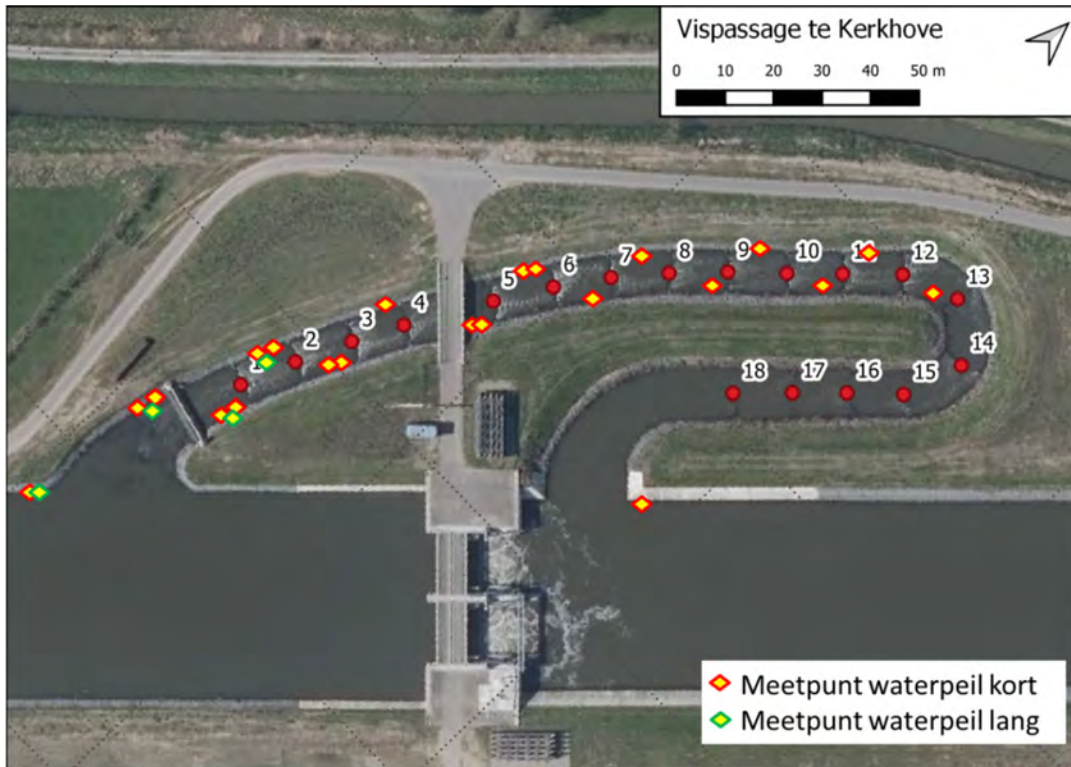
### 2.1.3 Diver-metingen

Gekozen wordt om voor de meetcampagne de bekkenpeilen op te meten waar een significant, meetbaar, verval verwacht wordt. Dit betreft tot en met ca. bekken 12. Let op dat de nummering van de bekken start bij "0", en dat bekken 1 overeenkomt met het bekken dat zich stroomafwaarts van drempel 1 bevindt.

Er werden twee bekken geselecteerd, waarbij waterpeilen (zie verder "waterpeil kort"), in het op- en afwaarts bekken redundant worden bemeaten met druksensoren (van het type "Divers"). Dit zijn de eerste en vijfde drempel. De eerste drempel wordt gekozen omdat wordt verwacht dat deze maatgevend is voor het debiet, in mindere mate aangevuld door de 2 à 3 opvolgende drempels. Ook het waterpeil in de bekken op- en afwaarts van de tweede 'focus'-drempel, drempel 5, wordt redundant bemeaten, aangezien visueel een relatief groter verval werd vastgesteld dan bij andere drempels.

Bijkomend wordt ook nog een set peilmeters ingezet om de invloed van de verstopping van het vuilrooster op het debiet op te meten. Hiervoor wordt op de twee meetlocaties opwaarts en de twee meetlocaties afwaarts van de afsluitconstructie een peilmeting over langere duur, met verminderde meetfrequentie, uitgevoerd met druksensoren (van het type "Divers"). De focus van de langdurige metingen ligt op het opmeten van een eventuele afname van het debiet ten gevolge van verstopping van het vuilrooster in plaats van het verval over de drempels. Een overzichtskarta met de locatie van de drukmetingen wordt gegeven in Figuur 6. Een overzicht van de ingezette divers per locatie wordt gegeven in Tabel 1.

Ten slotte wordt ook het opwaarts peil net opwaarts de vispassage bemeaten met druksensoren. Deze metingen kunnen worden vergeleken met de continue metingen uit het HIC-meetnet beschreven in de voorgaande paragraaf. Aangezien het opwaartse waterpeil ook van belang is voor het verval over de afsluitconstructie en ook voornamelijk het debiet door de vispassage bepaalt, wordt deze ook langdurig bemeaten.



Figuur 6 – Overzichtskaart peilmetingen korte en lange termijn.

Tabel 1 – Divermetingen

positie	naam	sensor	termijn	positie	naam	sensor	termijn
stuwgeul LO	SOPL-1	CA413	KT	bekken 4 RO	B04R-1	AK658	KT
	SOPL-2	AK705	KT		B04R-2	A0402	KT
	SOPL-3	DU350	LT	bekken 5 LO	B05L-1	AK657	KT
opwaarts afsluitconstructie LO	IN01L-1	DU337	KT		B05L-2	F7234	KT
	IN01L-2	F7230	KT	bekken 6 RO	B06R-1	AK649	KT
	IN01L-3	BD003	LT	bekken 7 LO	B07L-1	W6097	KT
bekken 0 RO (opw drempel 1)	B00R-1	AZ733	KT	bekken 8 RO	B08R-1	R2425	KT
	B00R-2	J1849	KT	bekken 9 LO	B09L-1	U1636	KT
	B00R-3	AZ717	LT	bekken 10 RO	B10R-1	J7554	KT
bekken 1 LO	B01L-1	AK669	KT	bekken 11 LO	B11L-1	H9363	KT
	B01L-2	J7539	KT	bekken 12 RO	B12R-1	H9345	KT
	B01L-3	AK663	LT	Schelde afwaarts LO	SAFL-1	G7453	KT
bekken 2 RO	B02R-1	AK662	KT	barodiver	BARO-1	F4431	LT
	B02R-2	G5626	KT		BARO-2	C6586	LT
bekken 3 LO	B03L-1	AK661	KT				

### Kortlopende metingen

De kortlopende metingen zijn in verschillende bekken van de vispassage uitgevoerd. In totaal zijn 22 druksensoren voor kortlopende metingen uitgezet, zie Figuur 6. De druksensoren zijn geplaatst in de stuwgeul net opwaarts de instroom van de vispassage, opwaarts en afwaarts (bekken 0) aan de schuif, in de vispassage zelf van bekken 1 t/m 12, en terug in de Bovenschelde ter hoogte van de uitmonding in de stuwgeul. In de meest opwaartse locaties werden twee druksensoren per meetlocatie voorzien, met als doel redundantie. De druksensoren werden in het water geplaatst op 05/10/2022 vanaf 12:00 (lokale tijd, UTC+2) en werden gerecupereerd op 07/10/2022 tussen 15:00 en 16:00.

### Langlopende metingen

De druksensoren voor de langlopende metingen zijn op vier locaties geplaatst: aan de instroom van de vispassage in de Bovenschelde, opwaarts de schuif in de waterloop en in bekken 0 en 1 (zie Figuur 6). De druksensoren werden eveneens op 05/10/2022 vanaf 12:00 (lokale tijd, UTC+2) in het water geplaatst, en gerecupereerd op 21/10/2022 rond 09:30. Na uitvoering van de kortlopende metingen (7/10/2022 16:00) zijn geen stuwhandelingen specifiek voor de metingen uitgevoerd, en is het reguliere peilbeheer toegepast.

Het waterpeil wordt opgemeten door middel van Divers©. Deze loggen autonoom druk en temperatuur vanaf een ingesteld starttijdstip tegen een bepaalde frequentie. De ingezette druksensoren zijn van het type 501 (Mini Diver), 601 (MicroDiver), 701 (Cera Diver) en 801 (TD Diver) alle met een maximaal bereik tot 10 m. Druksensoren worden bevestigd aan een ballastblok die wordt afgezonken op de bodem, zie Figuur 7. Bemerk dat op de ene ballastblok de druksensoren voor de kortdurende meting en op de tweede ballastblok de druksensor voor de langdurige meting bevestigd is. De druksensoren worden in de luwte geplaatst, i.c. de zone tegenover het center van de V-vormige insnoering. De reden hiervoor is om de stromingsimpact op de ballastblokken, waaraan de druksensoren bevestigd zijn, te minimaliseren, maar ook om de dynamische invloed (snelheidshoogte) op de opgemeten waterhoogte te beperken. Naast de in het water geplaatste druksensoren worden nog twee druksensoren (redundantie) ingezet voor het opmeten van de barometrische druk.



Figuur 7 – Plaatsing Divers aan ballastblok.

Na plaatsing van de druksensoren werd het peil in de bekken opgemeten door middel van een totaalstation en een microprisma op een XPS-vlotter, zie Figuur 8. Door het hoogteverschil, tussen center van het prisma en de onderzijde van de XPS-vlotter, af te trekken van het opgemeten peil wordt het waterpeil in het bekken bekomen.



Figuur 8 – Miniprisma gemonteerd op XPS vlotter.

De instellingen van de kortlopende, langlopende en de barometrische metingen worden gegeven in Tabel 2.

Tabel 2 – Instellingen Divers.

	Type	start	Einde	interval
Kortlopende Divers	CERA en TD	2022/10/05 09:00:00.0	2022/10/08 03:39:55.0 (CERA)  2022/10/09 12:59:55.0 (TD)	5 s
Langlopende Divers	TD	2022/10/05 09:00:00.0	2022/10/30 08:59:30.0	30 s
Barometrische meting	Mini-Diver	2022/10/05 09:00:00.0	2022/10/22 00:59:00.0	60 s

#### 2.1.4 Debietmeting

Het debiet wordt opgemeten door middel van het overtrekken van een aDcp-toestel (Sontek RiverSurveyor M9, kortweg M9) die ook in beperkte waterdieptes (vanaf 20 cm) stroomsnelheden kan meten. De M9 kan de snelheid over de diepte van een waterkolom meten met een celgrootte van minimaal 2 cm.

Het aDcp -toestel werd met behulp van een rQPOD Remote Surface Water Vehicle (RSWV, zonder motoren) via een kabel-katrol-systeem in positie gebracht. De reden hiervan is om steeds zo dicht mogelijk langs dezelfde raai te varen, en om he aDcp -toestel eenvoudiger op een vaste positie te houden. Figuur 9 toont een foto van de opstelling.

Op de eerste meetdag (6/10/2022) werd het aDcp -toestel in de instroom ingezet. Tijdens de meting werd echter vastgesteld dat de waterhoogte (minimaal 30 cm) onvoldoende was waardoor de RSWV soms bij momenten vastzat op stenen of andere uitstulpingen. Daarop werd besloten om op de tweede meetdag (7/10/2022) het aDcp -toestel in te zetten aan de stroomafwaartse zijde, in bekken 16 (zie Figuur 10).

Om tot een betrouwbaar meetresultaat te komen werden bij de start van elke waterstandsconditie een twee- tot viertal **raaimetingen** uitgevoerd. De kwaliteit en betrouwbaarheid van de metingen werd in het veld ingeschat. Na deze raaimetingen werd het aDcp -toestel in het midden van de sectie geplaatst en zo stabiel mogelijk gehouden om gedurende het vervolg van de metingen in de bekkens, een **continue snelheidsmeting te hebben op een ‘vast’ punt**. Het doel van deze bijkomende meting is om een inschatting te kunnen maken van het debiet tijdens het vervolg van de meting.



---

Figuur 9 – Boven: het kabel-katrolsysteem met daaraan de Remote Surface Water Vehicle (RSWV) bevestigd;  
beneden: RSWV met daarop het aDcp -toestel (witte cilinder achteraan).

---



Figuur 10 – Overzichtskaart met aanduiding van de locatie van de debietmeetraaien.

### 2.1.5 Puntsnelheidsmeting

Stroomsnelheidsmetingen op maatgevende punten boven enkele drempels en op maatgevende punten in enkele bekkens werden uitgevoerd door INBO. Omdat de stroming in Kerkhove te sterk is om de metingen met een waadpak uit te voeren werden de metingen uitgevoerd vanaf het platform van een hoogtewerker, zie Figuur 11. De ingezette snelheidsmeter betrof een elektromagnetische stroomsnelheidsmeter van Valeport, Model 801. Het toestel was zo ingesteld dat elke seconde een meting werd uitgevoerd die om de 5 s als een gemiddelde werden opgeslagen. Per punt werd +/- 60 s gemeten. De gemiddelde waarde overheen de meetduur wordt gebruikt voor de analyse.

Voor de puntsnelheidsmetingen werd gekozen voor drempels 1 en 5 (zie keuze 'focus-drempels' in paragraaf 2.1.3). Voor de locatiebepaling van de snelheidsmetingen werd boven drempels 1 en 5 een meetlint gespannen. Overheen de drempel werden op kenmerkende locaties snelheidsmetingen uitgevoerd. Afhankelijk van de lokale waterdiepte werd op elke locatie op één of twee hoogtes een snelheidsmeting uitgevoerd: een eerste snelheidsmeting nabij de bodem en een tweede snelheidsmeting nabij het oppervlak. De metingen nabij het wateroppervlak zijn uitgevoerd op een diepte 5-10 cm onder het wateroppervlak. De metingen onderin de waterkolom zijn uitgevoerd tussen twee stoorstenen, op 10 cm boven de bodem. Aangenomen wordt dat deze 10 cm representatief is voor de zogenaamde snout velocity, de snelheid die over de bodem/drempel zwemmende vissen dienen te encounteren.

Naast de snelheidsmeting boven de drempels werden op 2 raaien in bekken 1 en bekken 5 op een punt in de kern van de stroming en op een punt in de retourstroming nog bijkomende snelheidsmetingen uitgevoerd. Hiervoor werden nog twee meetlinten gespannen. Op deze plaatsen werd de snelheid op drie hoogtes in de waterkolom gemeten. Een eerste punt werd gemeten op ca. 10 cm boven de bodem, het tweede punt op halve hoogte en het laatste punt werd opgemeten net onder de waterlijn.



Figuur 11 – Uitvoering snelheidsmeting vanuit platform hoogtewerker

### 2.1.6 Oppervlakte-stroomvelden

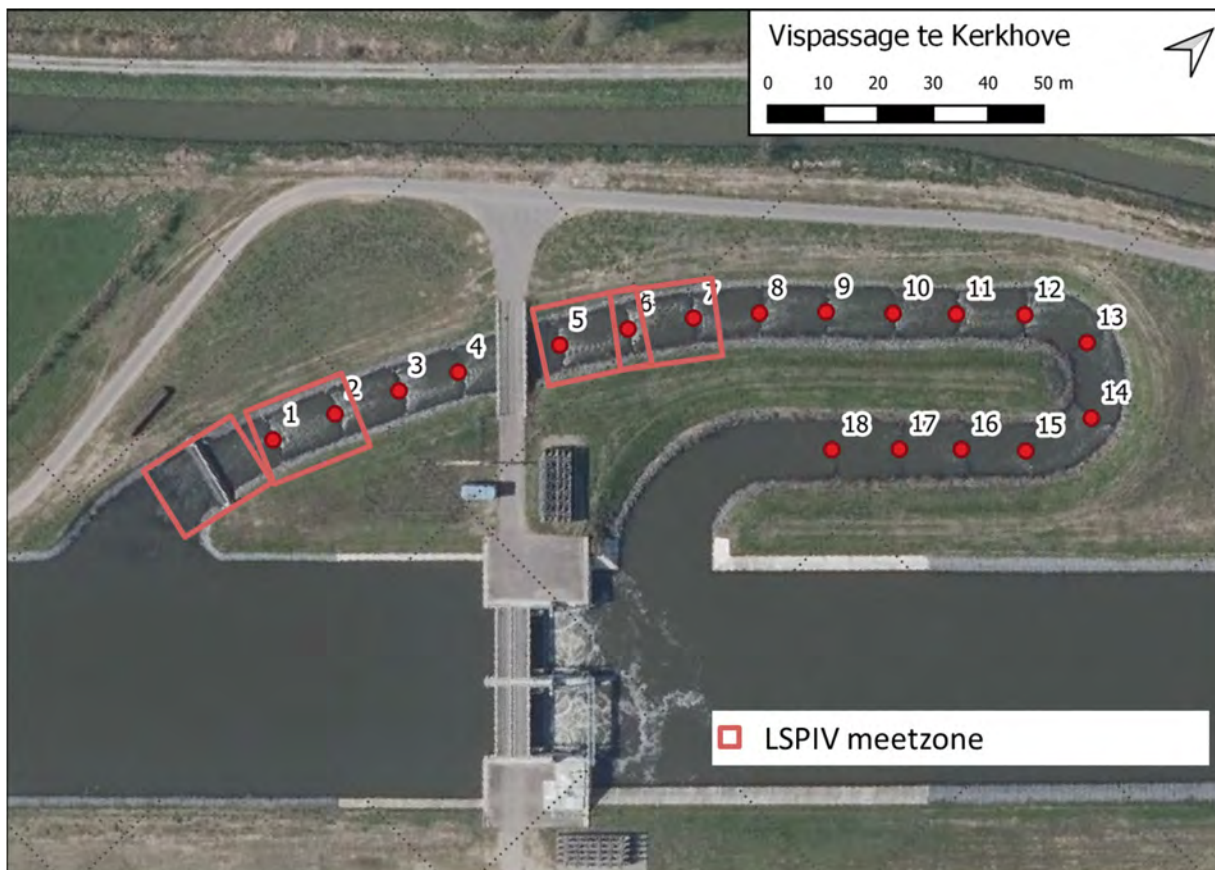
De oppervlakte-stroomvelden in de bekkens en overheen de drempels werden opgemeten door middel van LSPIV-opnames met behulp van een camera onder een drone. LSPIV of Large Scale Particle Image Velocimetry is een techniek om op basis van filmbeeld-verwerking de snelheid van een stroming in 2D (hier het oppervlak van het water) te bepalen. Deze LSPIV metingen worden uitgevoerd overheen bekkens 1, 5 en 6 en overheen de afsluitconstructie (drempels 1 en 5 worden namelijk gezien als de ‘focus-drempels’, zie paragraaf 2.1.3). De LSPIV zones worden aangegeven in Figuur 13.

Voorafgaand aan de metingen werd een test uitgevoerd (op 17/06/2022) met een drone met resolutie 3840 × 2160 en popcorn als tracer. Een voorbeeldopname en zoom worden gegeven in Figuur 12. De pixelresolutie bedroeg +/- 4 mm. Uit de verwerking van de testmetingen werden goede resultaten bekomen waarna besloten werd om deze set-up ook toe te passen voor de uiteindelijke metingen.



Figuur 12 – Beeld testopname stromingspatroon met drone.





Figuur 13 – Overzichtkaart met aanduiding van de 4 LSPIV meetzones.

### 2.1.7 Monitoring vuilrooster

Voor de langdurige metingen werd de mate van vuilophoging aan het vuilrooster van de afsluitconstructie in de tijd opgevolgd door middel van een wildcamera. Gedurende de periode van de metingen werd elk half uur een opname gemaakt.

## 2.2 Logboek

De metingen werden uitgevoerd van woensdag 5 oktober tot en met vrijdag 7 oktober 2022.

Op woensdag 5 oktober werd de afsluitconstructie dichtgezet en werden de spleten afgedicht door middel van doeken. Vervolgens werd de begroeiing aan de oevers gemaaid door middel van een bosmaaier. Dit werd gedaan voor de benodigde visuele toegang voor de LiDAR- en LSPIV-meting. Na het maaien van de zijkant werden LiDAR-metingen uitgevoerd vanaf de afsluitconstructie tot en met bekken nr. 7. Ook werden de druksensoren geplaatst en ingemeten. Tot slot werden de rijplaten geplaatst voor de hoogtewerker die ingezet zal worden voor de puntsnelheidsmetingen.

Donderdag 6 oktober in de voormiddag werd de meting verder voorbereid. Het uitvoeren van puntsnelheidsmetingen vanuit de hoogtewerker werd ingeëfend door INBO en de operator. Door ATO werden door middel van een totaalstation de drempelpeilen van drempels 1 tot en met 6 puntsgewijs ingemeten, en werden verdere LiDAR-metingen uitgevoerd. Door HIC werd de debietmeting voorbereid.

Het logboek van de eerste meetreeks wordt gegeven in Tabel 3. Bemerkt dat scheepvaart enkele dagen voor het uitvoeren van de metingen onderbroken was geweest. Tijdens de metingen op donderdag 6/10 werd daardoor veelvuldig geschut met de sluis te Kerkhove waardoor in het opwaarts pand aanzienlijke peilschommelingen optraden en het gemiddelde peil lager was dan het streefpeil. Tijdens uitvoeren van de debietmeting werd vastgesteld dat de waterdekking bij momenten onvoldoende was. De waarde van de metingen werd als beperkt beschouwd, enerzijds door het fluctuerende peil en anderzijds door het ontbreken van een betrouwbare debietmeting.

Tabel 3 – Logboek meetreeks 1 donderdag 6/10 namiddag.

Tijdstip (UTC+2)	Activiteit
06/10/2022 13:15	afsluitconstructie geopend open, en vervolgens start debietmetingen
06/10/2022 13:20	start uitvoeren puntsnelheidsmetingen bekken 5
06/10/2022 13:35	start LSPIV-metingen bekken 1
06/10/2022 13:55	daling streefpeil opgemerkt, schip geschut, stuwen komen droog
06/10/2022 14:45	einde uitvoeren puntsnelheidsmetingen bekken 5
06/10/2022 15:10	peil stabiel en daarna terug stijgend
06/10/2022 15:45	start LSPIV-metingen bekken 5
06/10/2022 15:17	start puntsnelheidsmetingen bekken 1
06/10/2022 16:25	einde puntsnelheidsmetingen bekken 1
06/10/2022 17:00	einde meetreeks

Voor de tweede meetreeks werd een peilverhoging van het opwaarts pand van 20 cm ten opzichte van het streefpeil gevraagd. Voor aanvang van de metingen werd opgemerkt dat de peilverhoging beperkt was tot 10 cm. Om meteen te kunnen meten werd besloten om de afgesproken peilen streefpeil, streefpeil + 20 cm en streefpeil – 20 cm te wijzigen naar streefpeil +10 cm en streefpeil -10 cm. Het logboek van de tweede meetreeks op vrijdag 7 oktober in de voormiddag wordt gegeven in Tabel 4.

Tabel 4 – Logboek meetreeks 2 vrijdag 7/10 voormiddag.

Tijdstip (UTC+2)	Activiteit
07/10/2022 08:35	start debietmetingen en puntsnelheidsmetingen INBO bekken 5
07/10/2022 10:02	einde uitvoeren puntsnelheidsmetingen INBO bekken 5
07/10/2022 10:50	start uitvoeren LSPIV-metingen bekken 1
07/10/2022 10:47	start uitvoeren puntsnelheidsmetingen INBO bekken 1
07/10/2022 10:47	start uitvoeren LSPIV-metingen bekken 5
07/10/2022 12:07	einde uitvoeren puntsnelheidsmetingen INBO bekken 1
07/10/2022 12:07	einde meetreeks

Voor de derde meetreeks werd een streefpeil -10 cm gevraagd. De verlaging werd ingezet meteen na het einde van de puntsnelheidsmetingen om 12:07, waarna om 12:40 de derde meetreeks aangevangen werd.

Tabel 5 – Logboek meetreeks 3 vrijdag 7/10 namiddag.

<b>Tijdstip (UTC+2)</b>	<b>Activiteit</b>
07/10/2022 12:40	start debietmetingen
07/10/2022 12:45	ca. start LSPIV-metingen bekken 1
07/10/2022 13:01	start puntsnelheidsmetingen INBO bekken 1
07/10/2022 13:00	ca. start LSPIV-metingen bekken 5
07/10/2022 13:55	einde puntsnelheidsmetingen INBO bekken 1
07/10/2022 14:20	droogval stuwen, peil zakt geleidelijk tijdens meting
07/10/2022 14:36	start puntsnelheidsmetingen INBO bekken 5
07/10/2022 15:00	sterke fluctuaties debietmeting
07/10/2022 15:15	terug overstort overheen stuwen
07/10/2022 15:18	sterke toename debiet vastgesteld. Op dit moment werden de laatste puntsnelheidsmetingen in het bekken achter drempel 5 uitgevoerd door INBO.
07/10/2022 15:30	einde meetreeks

## 3 Verwerking meting

Onderhavig hoofdstuk bevat per type meting een beschrijving van de verwerking en een beoordeling van de kwaliteit. De topografische opmetingen worden beschreven in paragraaf 3.1. De continue waterpeilmetingen worden besproken in paragraaf 3.2. De projectspecifieke waterpeilmetingen respectievelijk debietmetingen worden behandeld in paragraaf 3.3 respectievelijk paragraaf 3.4. De door INBO uitgevoerde puntsnelheidsmetingen worden beschreven in paragraaf 3.5. Paragraaf 3.6 geeft een korte samenvatting van de door ATO uitgevoerde LSPIV-opnames met behulp van een drone. Dit betreft een samenvatting aangezien de volledig verwerking van deze opnames kadert binnen het WL-onderzoeksproject 21\_079. De verstopping van het vuilrooster tijdens de langlopende metingen wordt opgevolgd aan de hand van een wildcamera, zie paragraaf 3.7.

De metingen werden uitgevoerd tijdens drie reeksen gespreid over twee dagen (zie paragraaf 2.2). Op basis van de analyse van de waterpeilen en debieten werd besloten om voor de verdere analyse enkel de op 7/10/2023 uitgevoerde meetreeksen te beschouwen. Uitgaande van de mate van stabiliteit van het waterpeil in het opwaarts pand werden uit de twee meetreeksen uitgevoerd op 7/10/2023 een 5-tal events geselecteerd die gebruikt zullen worden voor de verdere analyse in hoofdstuk 4 en hoofdstuk 5. Deze 5 events worden beschreven in paragraaf 3.8.

Op het moment van uitvoeren van de metingen was het zomertijd. Afhankelijk van de uitvoerder zijn de metingen in wintertijd (UTC+1) of in zomertijd (UTC+2) opgeslagen. De resultaten in dit rapport worden steeds weergegeven in zomertijd (UTC+2).

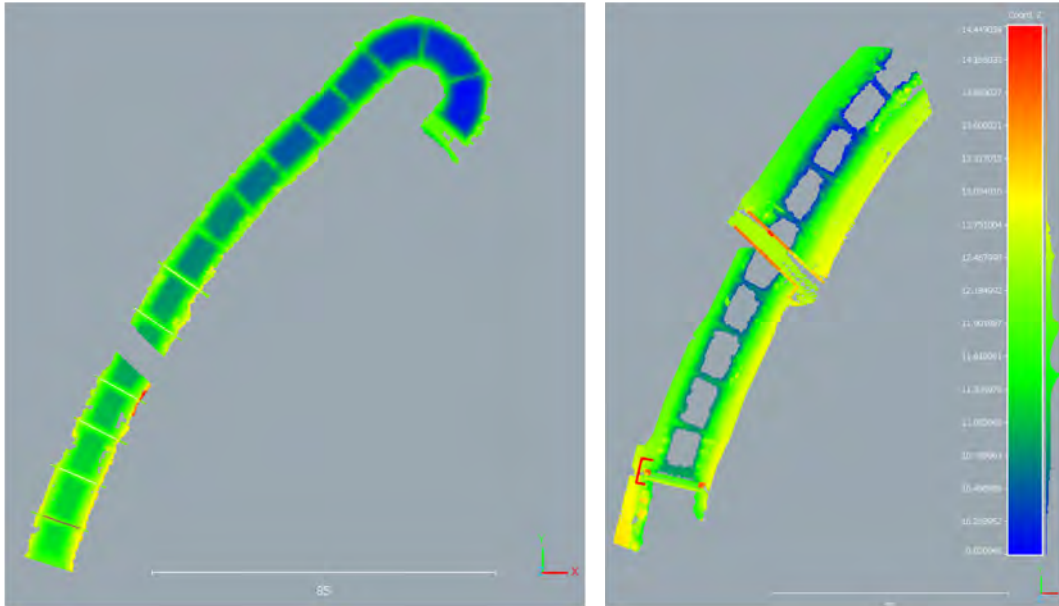
### 3.1 Topografische opmetingen

Er zijn twee datasets beschikbaar:

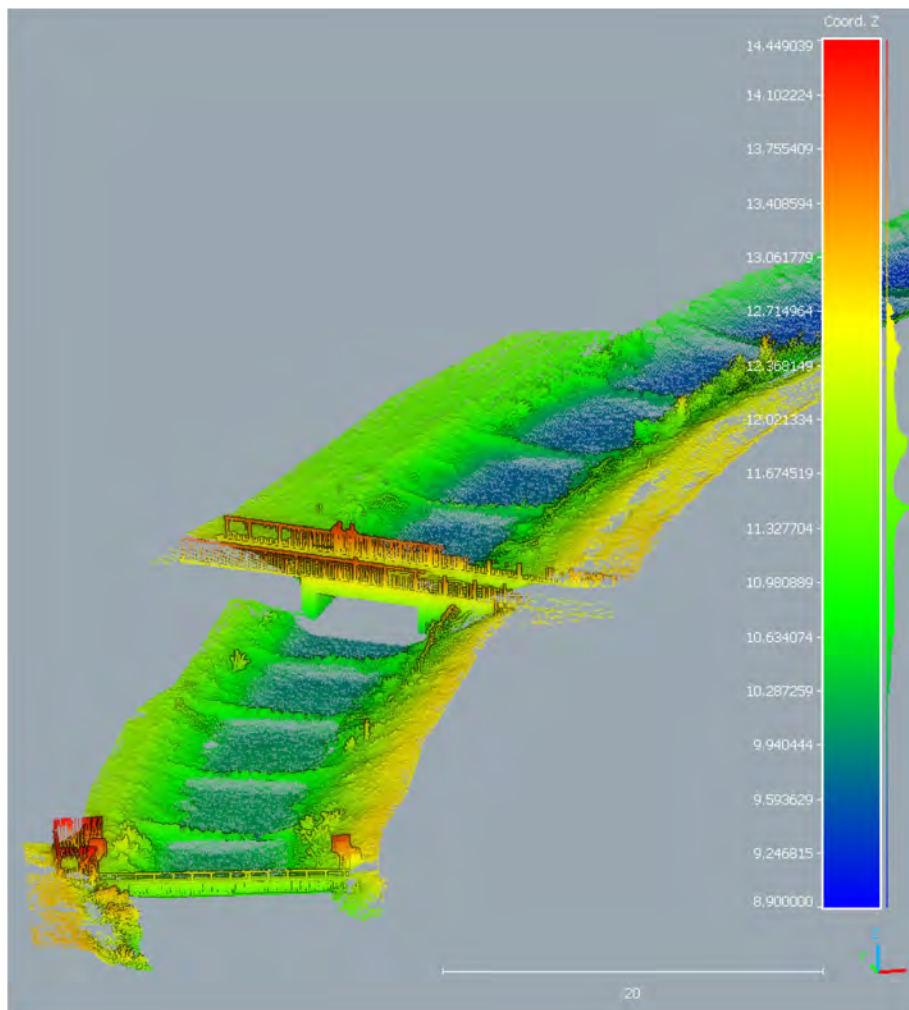
1. As-built dataset van de topografie, opgemeten aan de hand van een dronevlucht. Het is niet geweten of de metingen uitgevoerd werden door middel van LiDAR of doormiddel van fotogrammetrie. De data, uitgevoerd op 22/10/2019, werd opgeleverd in een XYZ-rooster met een resolutie van 10 cm × 10 cm. Omdat de opmeting gebeurde voordat water door de passage stroomde (een aarden dam was aangelegd ter hoogte van drempel 15), strekt deze meting zich uit tot aan de bodem van de bekkens.
2. LiDAR (2022): Een op 5/10/2022 en 6/10/2022 uitgevoerde 3D-laserscanning door Afdeling Technische Ondersteuning (ATO) van DMOW (merk op niet met behulp van een drone, maar vanaf de grond). Deze opname werd uitgevoerd bij verlaagd waterpeil zodat de drempelstenen mee in kaart gebracht werden. Omdat enkel opwaarts de afsluitconstructie gesloten werd, was de bodem van de bekkens niet zichtbaar en was het bereik beperkt tot een kwalitatieve meting van drempel nr. 1 tot en met drempel nr. 7. Daarbij werden discrete puntmetingen van de diepe delen van de drempels die nog onder water stonden uitgevoerd, teneinde een volledig en gedetailleerd profiel van de drempels te kunnen opstellen.

Een voorstelling van de in kader van het as-built dossier opgemeten topografie en de in oktober 2022 opgemeten topografie wordt gegeven in Figuur 14. Het verwerken van de datasets is uitgevoerd in CloudCompare v2.12.1. Een 3D-beeld van de twee datasets wordt gegeven in Figuur 15.

Bij het verwerken werd de overeenkomst tussen beide datasets onderzocht. Hieruit bleek dat de dataset uit 2022 een veel fijnere resolutie heeft (waarschijnlijk omdat de dataset uit 2019 al verwerkt was tot een raster met een bepaalde gridresolutie). Aangezien voor de dataset uit 2022 ook een aantal puntmetingen werden uitgevoerd ter validatie, is er meer zekerheid ten aanzien van de dataset uit 2022. Deze dataset beslaat echter alleen de eerste zeven drempels en bekkens, waardoor voor het karakteriseren van de verdere drempels de dataset uit 2019 benodigd blijft.

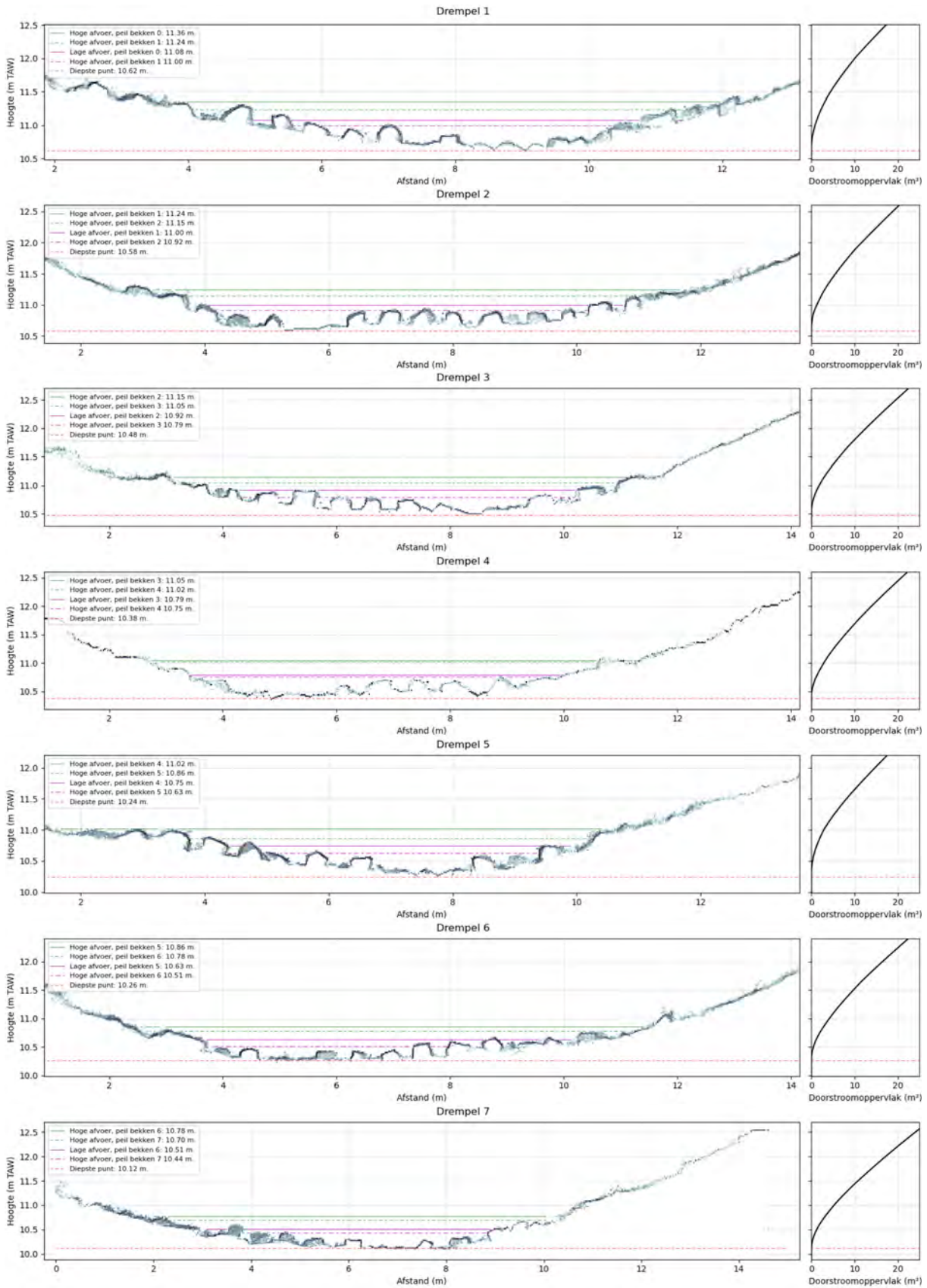


Figuur 14 – Schermafbeeldingen uit CloudCompare. Links: As-built dataset 2019; Rechts: 3D-LiDAR 2022.



Figuur 15 – Schermafbeelding uit CloudCompare: weergave van het gebied vanaf de afsluitconstructie van de vispassage (onderaan in beeld) tot bekken 9 (achter de kleurschaal).

In de dataset van 2022 werd visueel de locatie van de kruinlijn bepaald voor drempels 1 tot en met 7. Overheen deze kruinlocatielijnen zijn vervolgens in een strook van 20 cm breed datapunten geëxtraheerd. Deze punten zijn vervolgens loodrecht op de kruinlijn geprojecteerd. Dit levert 2D-profielen, en hieruit is ook de natte oppervlakte in functie van de waterhoogte opgesteld (deze worden in de rechterpanelen van Figuur 16 weergegeven) voor verder gebruik bij de hydraulische beschrijving en drempelanalyse. Deze bepaling van de kruinlijnen werd zowel uitgevoerd op dataset uit 2019 als op de dataset uit 2022.



Figuur 16 – Geometrie en cumulatief doorstroomoppervlak van de eerste 7 drempels (o.b.v. terreinopmeting 2022)

Voor de hydraulische evaluatie wordt op de uit de profielen afgeleide natte oppervlakte een driehoek gefit. Dit werd zowel gedaan op de in 2019 uitgevoerde as-built opmeting als op de in 2022 uitgevoerde 3D LiDAR opmeting. Voor maximale representativiteit wordt de curve-fitting uitgevoerd vanaf het laagste punt op de drempel (zie rode stippellijn) tot aan de maximale waterhoogte in het opwaartse bekken. Uit de metingen volgt dat de maximale hoogte in het bekken ten opzichte van het laagste punt op de drempel oploopt tot 0.70 m. Hierom wordt besloten om de curvefitting uit te voeren over een bereik 0 m tot 0.70 m. De 'curve fitting methode' (CF) werd ook toegepast op de dataset uit 2019 om zo de drempelpeilen voor de overige drempels te kunnen bepalen. Deze zijn nodig voor de hydraulische evaluatie van de vispassage in hoofdstuk 4. De resultaten worden gegeven in Tabel 6.

Ter vergelijking wordt ook het laagste punt op de drempel bepaald (V), zoals ook werd gedaan in *Visser et al.*, 2019). Bemerkt dat bij toepassen van de CF fitting methode het afgeleide drempelpeil obv de opmeting uit 2019 binnen een range +/- 0.12 m ligt ten opzichte van de opmeting uit 2022. Ten opzichte van de visuele interpretatie liggen de op basis van de curve fitting methode 0.09 m hoger tot 0.14 m lager. Ten opzichte van het absolute drempelpeil ligt de CF methode een 0.08 m hoger tot ca. gelijk, met een enkele uitschieter tot 0.04 m lager. Voor de analyses met betrekking tot debiet en verval wordt gekozen voor de CF methode omdat deze binnen het meetbereik de beste voorstelling van de natte doorstroomsectie geeft. Waar beschikbaar wordt het drempelpeil bepaald uit de metingen van 2022 gehanteerd omdat deze data set een grotere dichtheid en een hogere betrouwbaarheid heeft door de verificatie met de totaalstation opstelling waarmee ook de peilen werden ingemeten.

Ook de uit de curve-fitting volgende openingshoeken worden gegeven in Tabel 6. Bemerkt dat de openingshoek van de drempels vrij constant is en tussen 160 en 165° ligt zowel voor de dataset uit 2022 als voor de dataset uit 2019.

Tabel 6 – Drempel- en bekkenbodempeilen en openingshoeken V-vorm drempels.

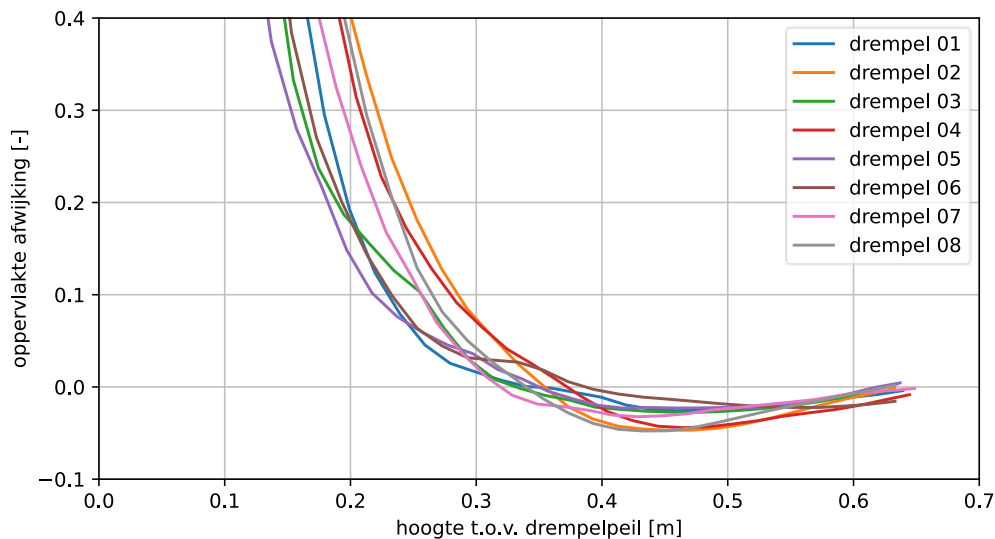
Drempel	Hoek [°]*		Drempelpeil [m TAW] (diepste punt V-vorm)				Gemiddeld bekken bodempeil [m TAW] (DTM 2019)
	DTM 2022 (CF**)	DTM 2019 (CF**)	DTM 2022 (CF**)	DTM 2019 (CF**)	DTM 2022 (V)	DTM 2019 (V)	
1	161.5	161.8	10.71	10.76	10.65	10.68	10.14
2	164.2	165.6	10.64	10.61	10.59	10.60	10.09
3	164.4	164.8	10.49	10.60	10.48	10.55	9.98
4	163.3	164.1	10.44	10.45	10.38	10.40	9.87
5	160.1	161.3	10.27	10.31	10.25	10.30	9.79
6	164.8	165.8	10.34	10.22	10.27	10.23	9.69
7	162.6	162.0	10.11	10.07	10.06	10.06	9.67
8	/	165.6	/	9.94	/	9.98	9.57
9	/	160.4	/	9.87	/	9.87	9.44
10	/	162.9	/	9.87	/	9.85	9.35
11	/	162.2	/	9.75	/	9.77	9.36
12	/	163.8	/	9.70	/	9.71	9.18
13	/	163.9	/	9.64	/	9.60	9.16
14	/	162.5	/	9.49	/	9.50	9.02

\* openingshoek horende bij een symmetrische V vormige drempel met een gelijke doorstroomsectie

\*\* CF = diepste punt V-vorm doormiddel van 'curve-fitting', V diepste punt



In Figuur 17 wordt het verschil gegeven tussen de oppervlakte volgend uit de topografische opmeting en oppervlakte volgend uit de hierboven bepaalde openingshoek en drempelpeil. Over de eerste 0.10 m tot 0.20 m kan de afwijking aanzienlijk zijn. Voor de voorkomende range van overstorthoogtes (0.30 m tot 0.70 m) ligt de afwijking binnen de range + 7 % tot – 5%.



Figuur 17 – Afwijking oppervlakte bepaling CF methode (DTM 2022)

### 3.2 Metingen uit meetnet

Uit de vergelijking van de projectspecifieke peilmetingen in de stuwgeul met de continue peilmetingen van DMOW en De Vlaamse Waterweg opwaarts de stuw volgde een afwijking. Navraag bij het Hydrologisch Informatiecentrum leerde dat bij de afregeling van de nieuwe stuwen de volgende afwijking werd vastgesteld op de continue peilmetingen van De Vlaamse Waterweg:

- opwaarts meet dVW 0.069 m hoger dan HIC,
- afwaarts meet dVW 0.020 m lager dan HIC.

Op moment van opvragen van de data (26/10/2022) was deze correctie nog niet doorgevoerd. In de postprocessing wordt hierom van de opwaartse meetpost van De Vlaamse Waterweg 0.069 m afgetrokken en bij de afwaartse meetpost van De Vlaamse Waterweg 0.020 m bijgeteld. Zie rapport (Vereecken & Vanderkimpfen, 2022).

Ook werd in 2022 een controlemeting uitgevoerd van de peilschaal die gebruikt wordt als referentie voor de opwaartse continue peilmeting van DMOW. Uit deze opmeting volgde dat de peilschaal 0.040 m te hoog geïnstalleerd was. De correctie werd bij opvragen van de data (26/10/2022) nog niet doorgevoerd. De continue peilmeting van DMOW opwaarts Kerkhove wordt hierom in de postprocessing met 0.040 m verlaagd.

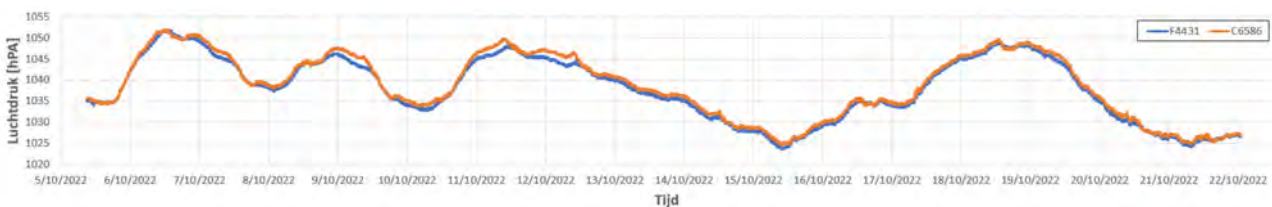
### 3.3 Diver-metingen

De waterpeilen in de bekkens werden opgemeten door middel van Divers bevestigd aan ballastblokken. De uitgevoerde verwerkingsstappen worden beschreven in paragraaf 3.3.1. Na verwerking wordt op basis van de redundant uitgevoerde metingen een controle uitgevoerd, zie paragraaf 3.3.2.

#### 3.3.1 Verwerkingstappen

##### Luchtdruk-correctie

Ter hoogte van de stuurkast aan de schotbalken werden twee druksensoren voor de opmeting van de luchtdruk opgehangen (twee omwille van redundantie). Het verschil tussen beide luchtdrukmetingen is beperkt tot gem 0.72 hPa met stdev van 0.54hPa en max van 2.78 hPa (zie Figuur 18). Wegens de verwaarloosbare verschillen wordt besloten om voor de luchtdruk compensatie één van beide druksensoren te gebruiken. Het omzetten van de opgemeten totale druk (lucht + water) naar een opgemeten waterdruk betreft de eerste stap in verwerking van de waterpeilmetingen.



Figuur 18 – Verloop van de luchtdruk zoals opgemeten door beide barodivers

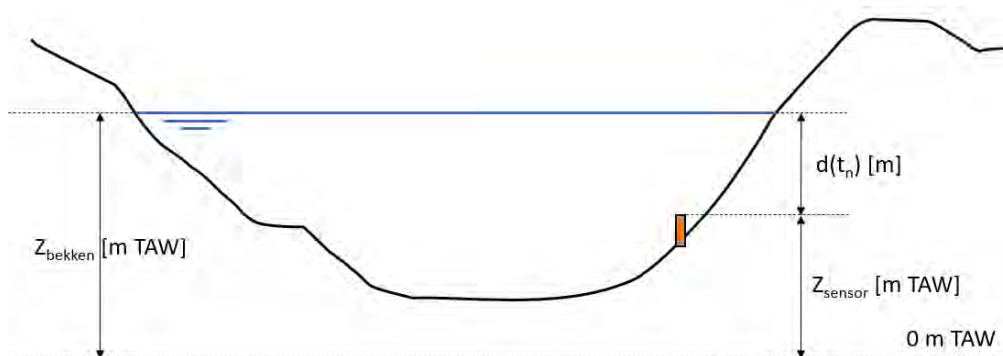
##### Justering

Voorafgaand het inzetten van de toestellen op terrein werd op WL een lineaire justering opgesteld. Hierbij werden 5 waterhoogtes opgelegd tussen ca. 0.15 m en 1.10 m. De luchtdrukcompensatie werd uitgevoerd door het aftrekken van de eerste meting op het moment dat er nog geen water aanwezig is. Op basis van de 5 opgemeten waterhoogtes te vergelijken met de met een meetnaald opgemeten waterhoogte werd een justering voor de druksensoren opgesteld. Het doorvoeren van deze justering op de luchtdruk gecompenseerde drukken betreft de tweede stap in de verwerking van de druksensoren.

##### Referentie

Om de druksensoren te installeren werd de afsluitconstructie van de vispassage gesloten. Een klein lekdebiet werd waargenomen maar de waterpeilschommelingen in de bekkens waren minimaal. Na plaatsing van de Divers werd het waterpeil per locatie door ATO ingemeten, zie paragraaf 2.1.3. Het refereren van de peilmetingen op basis van de ingemeten waterhoogte wordt als volgt uitgevoerd:

1. Op een bekend moment ( $t_n$ ) is het absolute waterpeil  $Z_{\text{bekken}}(t_n)$  ingemeten.
2. In de meetresultaten van de Diver wordt op dit tijdstip de gemeten diepte  $d(t_n)$  afgelezen.
3. Aan de hand van de gemeten diepte  $d(t_n)$  en het absolute waterpeil  $Z_{\text{bekken}}(t_n)$  kan het sensorpeil  $Z_{\text{sensor}}$  bepaald worden:  $Z_{\text{sensor}} = Z_{\text{bekken}}(t_n) - d(t_n)$
4. De metingen van de diver kunnen nu omgezet worden naar absolute peilen.



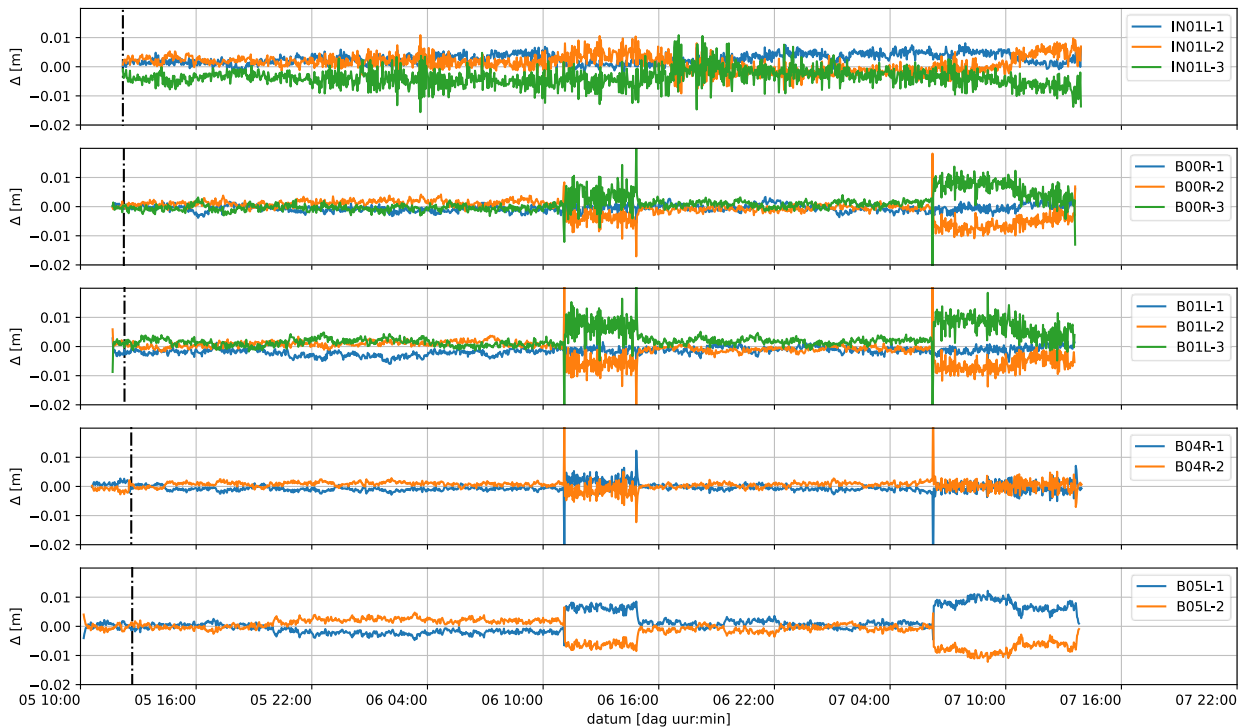
Figuur 19 – Principe van de referentie van de Divers.

### 3.3.2 Validatie

Na doorvoeren van de luchtdrukcorrectie, de justering en de omzetting van hoogte naar een peil, kan gecontroleerd worden in hoeverre de redundant uitgevoerde drukmetingen onderling verschillen. Hiervoor werd het verschil van de individuele metingen ten opzichte van het gemiddelde bepaald. Om zowel de lange-termijn- als de korte-termijndruksensoren te kunnen gebruiken werd, door uitmiddeling, de data van de korte-termijndruksensoren herberekend naar een tijdstap van 30 s. Voor de 5 locaties met een redundante meting wordt het resultaat gegeven in Figuur 20. Omdat de hoogfrequente fluctuaties minder relevant zijn, worden in deze figuur de data nog geresampled naar een tijdstap 120 s. Het startpunt betreft het punt na plaatsing vanaf wanneer de druksensoren niet meer zichtbaar verschoven zijn. Kort hierop werd de referentiemeting uitgevoerd.

Voor de metingen aan de instroom (IN01L) volgt dat kort na de referentiemeting een beperkte offset van ca. -4 mm lijkt op te treden van de lange-termijn-sensor (IN01L-3).

Voor de metingen in de bekkens is er een duidelijk verschil waar te nemen tussen de momenten zonder stroming en de momenten met stroming. Op de momenten met stroming treedt er een duidelijke toename van het verschil op. Het verschil tussen beide meetpunten loopt hierbij op tot 1 à 2 cm. Enkel voor bekken 4 (B04) is het verschil merkbaar lager. Ook valt op dat het verschil lijkt toe te nemen bij een toename van debiet. Bij het hogere debiet gedurende de tweede meetreeks (7/10 tot ong. 12:00) is het verschil het grootste, om af te nemen bij het overgaan naar de derde meetreeks (vanaf ong. 12:40). Volgend op het sluiten van de afsluitconstructie na de eerste meetreeks, en dus op een moment zonder stroming, neemt het verschil terug af tot een waarde < 5 mm. Na aflopen van de derde meetreeks werd onmiddellijk na sluiten van de afsluitconstructie aangevangen met demobilisatie van de drukmetingen. Voor bekken 5 lijkt het verschil tussen beide punten terug naar 0 te evolueren. De afwijkingen worden toegeschreven aan dynamische verschijnselen. Bij de verdere verwerking worden voor de redundant uitgevoerde metingen het gemiddelde toegepast en wordt een onzekerheid van 1 à 2 cm gehanteerd op de peilmetingen voor de verdere analyse in hoofdstuk 4 en hoofdstuk 5.



Figuur 20 – Overzicht verschil individuele hoogte metingen (m) t.o.v. gemiddelde voor de bekken met redundant uitgevoerde metingen.

Na afloop van meetreeks 1 en voor aanvang van meetreeks nr. 2 is de meting van de in bekken 11 geïmplementeerde Divers verstoord geraakt. Om deze reden wordt het meetpunt in bekken 11 niet verder beschouwd voor meetreeks nr. 2 en meetreeks nr. 3.

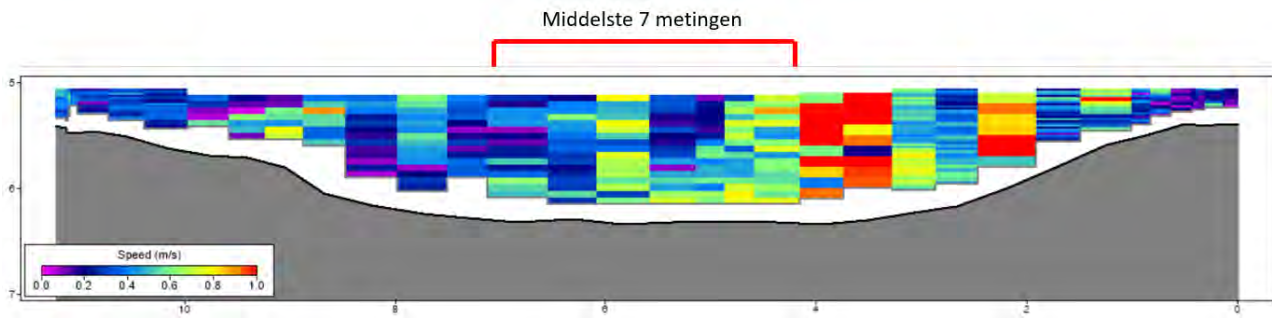
### 3.4 Debietmeting

Tijdens meetreeks 1 op 6 oktober 2022 werd de meting van het debiet doorheen de vispassage uitgevoerd opwaarts de afsluitconstructie. De waterdiepte opwaarts de afsluitconstructie was echter geregeld zeer klein, wat de nauwkeurigheid van de debietmeting sterk verminderde en bij momenten zelfs verhinderde. Bijkomend was het opwaarts peil niet stabiel. Hierom werd besloten om de op 6 oktober uitgevoerde meetreeks 1 niet te weerhouden voor de verwerking. Op 7 oktober werd overgegaan naar een debietmeting in een afwaarts gelegen bekken in de vispassage, nl. bekken nr. 16, zie paragraaf 2.1.4.

#### 3.4.1 Opzet

Twee soorten snelheidsmetingen zijn uitgevoerd: (i) 'raaimetingen' waarbij het aDcp -toestel van de ene naar de andere oever werd getrokken, met als doel een goede inschatting van het debiet te krijgen, en (ii) 'stationaire metingen' waarbij het aDcp -toestel gedurende langere tijd op een vaste locatie werd gehouden, met als doel het tijdsverloop op te meten. Als uit de raaimetingen bleek dat het debiet ongeveer stabiel bleef, werd overgegaan naar een stationaire meting, in het 'midden' van de sectie.

De raaimeting meet de snelheid over de gehele dwarsdoorsnede van de waterloop, zie bijvoorbeeld Figuur 21. Met behulp van de software RiverSurveyor Live kan het debiet tijdens de raaimeting berekend worden. Per raaimeting is het totale debiet en de diepteafhankelijke snelheid bekend.



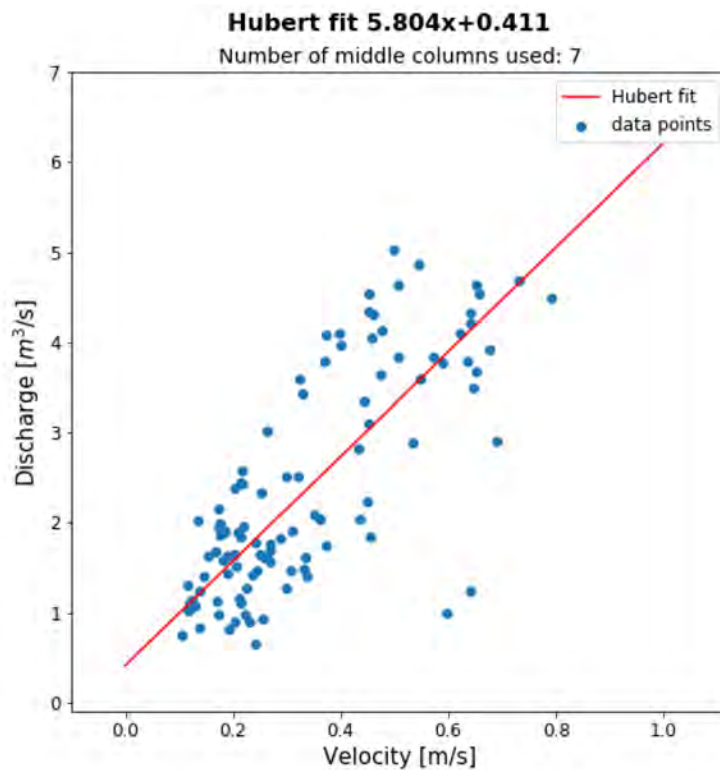
Figuur 21 – Voorbeeld bekomen snelheidsprofiel uit een raaimeting (verticale as= hoogte; horizontale as, gevaren afstand).

Om vanuit de stationaire snelheidsmetingen ( $v$ ) een debiet ( $Q$ ) te bepalen, moet er eerst een  $Q$ - $v$ -relatie opgesteld worden. Dit zal gebeuren op basis van de raaimetingen, waarbij het debiet uit een raaimeting kan uitgezet worden tegenover de snelheidsmeting uit (een selectie van) het snelheidsprofiel. Zie bijvoorbeeld Figuur 21, waarin de bekomen gemiddelde stroomsnelheid over de middelste 7 metingen overeenkomt met één datapunt in Figuur 22. Wanneer voldoende raaimetingen worden beschouwd, kan een regressiecurve (in dit geval een rechte) worden opgesteld. Deze regressiecurve wordt bepaald door het minimaliseren van een zgn. verliesfunctie. Bij de ‘traditionele’ kleinste kwadratenmethode wordt deze verliesfunctie gedefinieerd door de som van de gekwadrateerde residuen. Bij een Huber-regressie bestaat de verliesfunctie uit een combinatie van de gekwadrateerde residuen (‘squared error loss’, SEL) en absolute residuen (‘absolute error loss’, AEL). Door de SEL te gebruiken bij een kleine afwijking en de AEL bij een grotere afwijking is de regressiecurve minder gevoelig voor uitschieters waardoor de bekomen regressie robuuster is. Hoewel de verschillen tussen de kleinste kwadraten- en de Huber-regressie in deze studie relatief klein bleken, wordt verder gewerkt met de Huber-regressie omwille van de robuustheid.

### 3.4.2 Aantal kolommen

Als slechts 1 kolom van cellen (verticaal snelheidsprofiel) wordt gebruikt om de snelheid te bepalen dan is deze gevoelig aan onzekerheden en lokale omstandigheden, het is dus van belang om een aantal kolommen (verticale profielen) rondom het midden van de raai te gebruiken. Dit is verantwoord omdat het aDcp-toestel tijdens de stationaire metingen heen en weer beweegt, omwille van de flexibiliteit in de kabels en variaties in het stromingspatroon. Op basis van een gevoeligheidsanalyse voor het aantal kolommen, werd besloten om de gemiddelde stroomsnelheid over zeven kolommen te gebruiken in de analyse. De kolombreedte is afhankelijk van de snelheid van overtrekken, een 7 kolommen komt overeen met een breedte 2 à 3 m. Dit bleek tevens (ongeveer) overeen te stemmen met de breedte waarover het aDcp-toestel heen en weer beweegt.

Figuur 22 toont de Huber-regressie van de dieptegemiddelde snelheid, gemiddeld over de middelste 7 kolommen, over alle bruikbare raaimetingen gemeten tijdens de tweede meetdag op 7 oktober 2023.



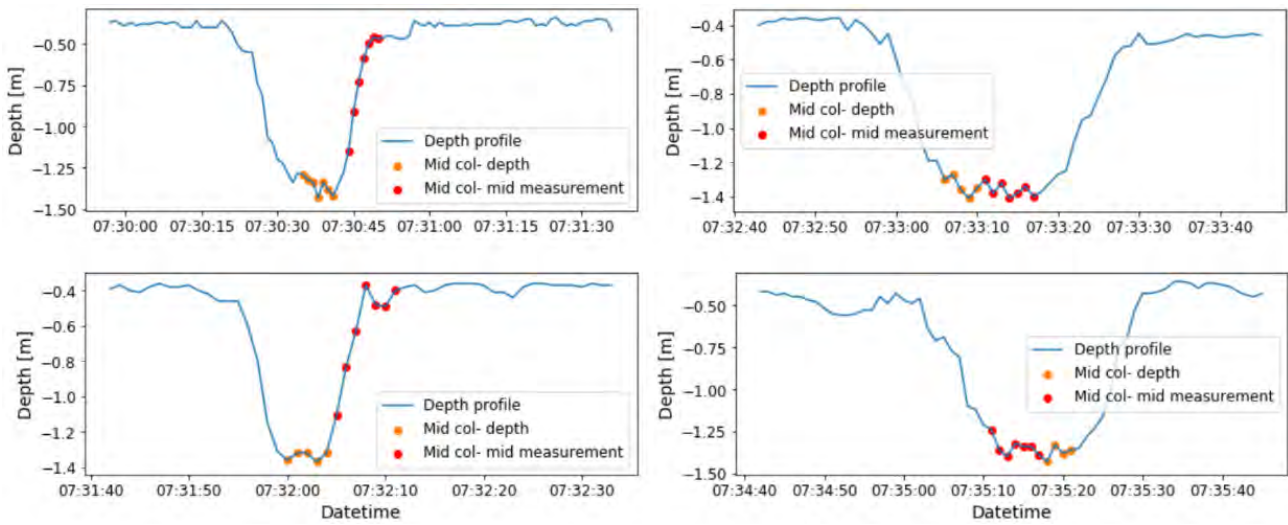
Figuur 22 – Huber-regressie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid uitgemiddeld over de 7 centrale kolommen met het debiet.

### 3.4.3 Bepalen midden van de sectie

Aangezien het aDcp-toestel niet uitgerust was met een GNSS-ontvanger (reden: slechte GNSS ontvangst in de bekken, die resulteert in grote onzekerheid van de positie), zijn zowel de raaien als de stationaire metingen uitgevoerd zonder absolute coördinaten. Bovendien begint elke raai niet van exact hetzelfde startpunt, omdat dit in praktijk niet haalbaar is (o.a. omwille van stroming, wind, het overspannen van de waterloop met kabels i.p.v. een starre constructie etc.). De locatie van de stationaire snelheidsmetingen in de dwarssectie is dus in principe bij elke meting verschillend, en niet exact bekend. Om uit de raaimetingen een snelheidswaarde te halen die toch zo representatief mogelijk is voor de positie van de stationaire metingen, zijn twee methoden gebruikt; een methode op basis van het midden van de meting en een methode op basis van de maximale diepte:

- Methode 1: Per raaimeting wordt vertrokken van de middelste kolom in het snelheidsprofiel. Hierbij wordt impliciet verondersteld dat elke raai ongeveer even lang is, en dat het aDcp-toestel telkens met een constante snelheid werd overgetrokken. Immers de breedte van de cellen hangt af van deze snelheid: hoe sneller het aDcp-toestel werd getrokken, hoe groter de afstand die werd afgelegd tussen zenden en ontvangen, en hoe breder de cellen worden. Op basis hiervan wordt aangenomen dat het punt halverwege de dwarsdoorsnede overeenkomt met ongeveer het midden van de meetdata (zie “mid col- mid measurement” in Figuur 23).
- Methode 2: Niet alle cellen zijn echter even breed, wat zichtbaar is in het voorbeeld uit Figuur 21. Er kan redelijkerwijze vanuit gegaan worden dat, voor de vispassage van Kerkhove althans, die is uitgegraven in den droge en bekleed met gefixeerde breuksteen, het diepste punt in de sectie overeenstemt met de bemeten dwarssectie. In methode 2 wordt de meting met de diepste bodemligging als ‘middelste’ kolom beschouwd. Op basis van dit diepste punt wordt dan een aantal cellen rechts en links van dit punt geassocieerd met het midden van de meetdata (zie “mid col- depth” in Figuur 23).

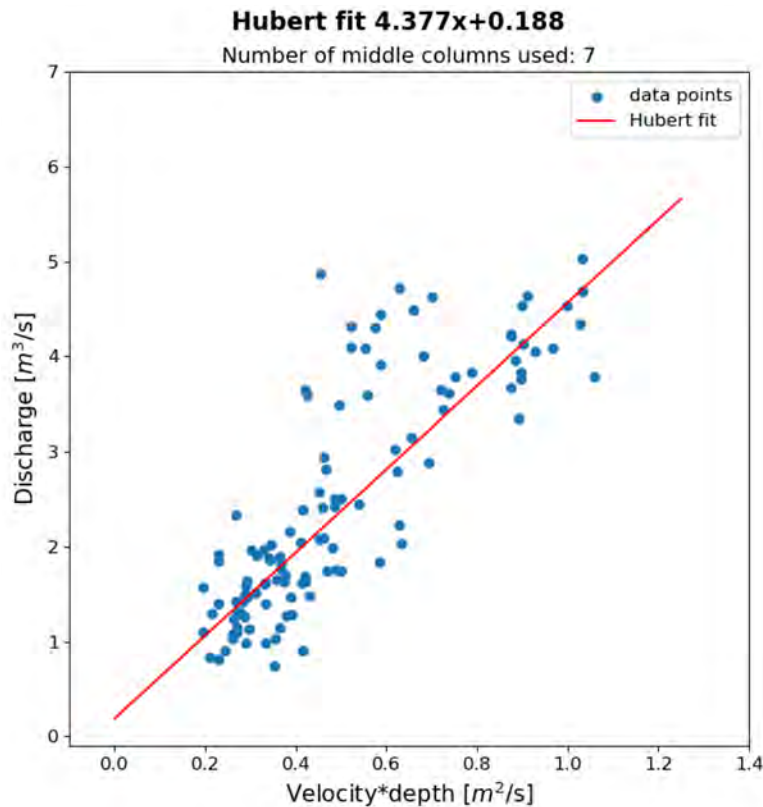
In de resultaten in Figuur 23 is te zien dat de selectie op basis van de diepte een beter resultaat geeft, in die zin dat de methode niet afhankelijk is van de lengte van de raai. De analyse wordt verder uitgevoerd met methode 2.



Figuur 23 – Overzicht verschil in gebruikte kolommen, gebaseerd op methode 1 ('mid col- mid measurement') en op basis van maximale diepte ('mid col- depth') voor verschillende raaimetingen op dezelfde locatie

### 3.4.4 Weging met de waterdiepte

Omdat niet alleen de gemiddelde snelheid van belang is maar ook de waterdiepte, wordt in deze paragraaf bekeken wat het effect is van het bijkomend beschouwen van de diepte per verticale, vooraleer dit uit te middelen over de ruimte (aantal kolommen). Daartoe wordt per meting van het aDcp-toestel (verticale puls) de gemiddelde snelheid over de verticale vermenigvuldigt met de waterdiepte horend bij die puls. Het product van beide kan beschouwd worden als een debiet per eenheidsdoorsnede (eenheid  $m^2/s$ ). Figuur 24 toont dat de spreiding in datapunten hierdoor (enigszins) vermindert.

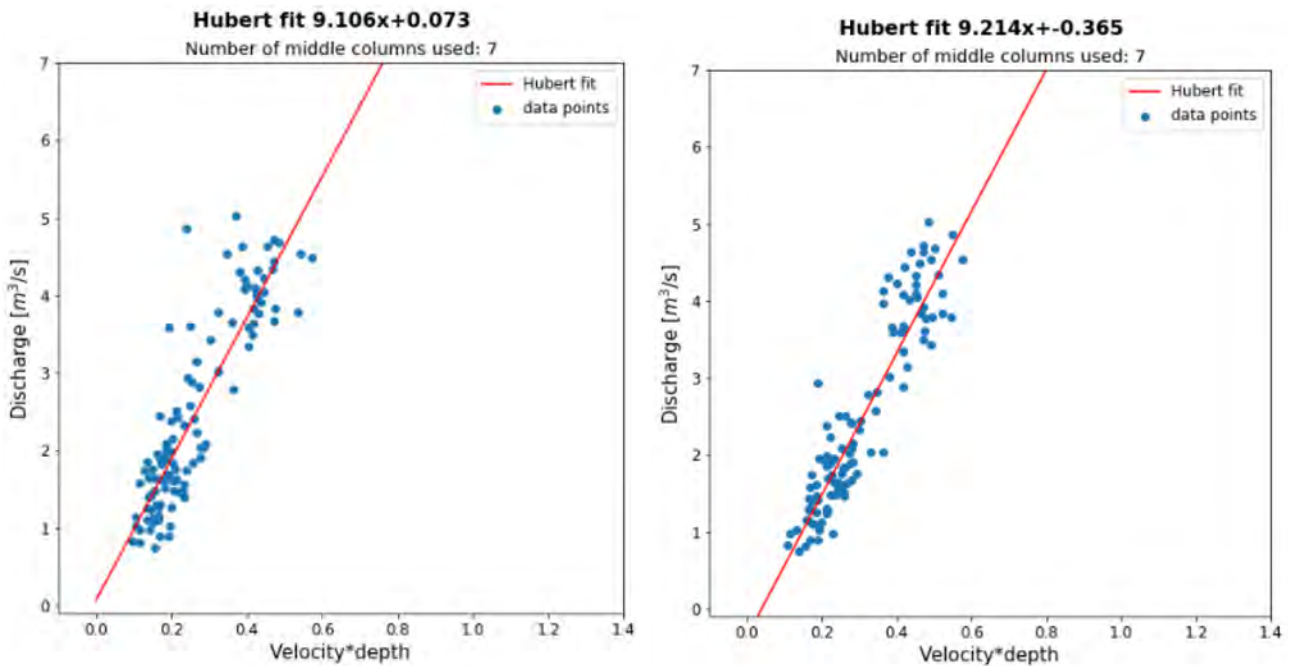


Figuur 24 – Huber-regressie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid vermenigvuldigd met de waterdiepte, uitgemiddeld over de 7 centrale kolommen met het debiet.

### 3.4.5 Uitmiddeling over de tijd

Om de spreiding nog verder te reduceren wordt in een volgende stap een uitmiddeling over de tijd bekeken. Hierbij wordt het signaal, zoals bekomen in paragraaf 3.4.4, op twee manieren uitgemiddeld: (i) via het toepassen van een voortschrijdend gemiddelde met een vensterbreedte van 30 sec; (ii) via het toepassen van een gemiddelde van de voorbije 30 sec. Deze laatste methode is eigenlijk een ‘resampling’. Het verschil tussen beide methoden is beperkt qua uiteindelijke regressiecurve, al geeft het gemiddelde per 30 sec iets minder spreiding (zie Figuur 25). Aangezien een raaimeting zelf enige tijd (40 à 60 sec) duurt, stemt deze methode ook meer overeen met hoe uit de raaimetingen een debietswaarde wordt bepaald.

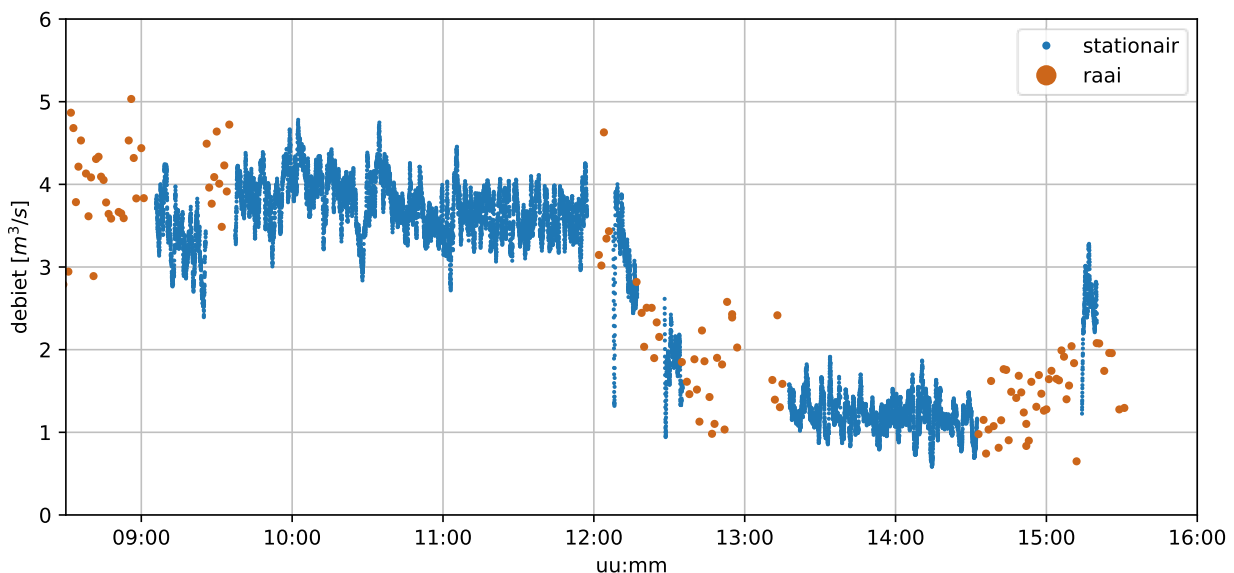




Figuur 25 – Invloed van een uitmiding over de tijd. Links: voortschrijdend gemiddelde (30 sec); rechts: gemiddelde per 30 sec.

### 3.4.6 Resulterende debietstijdsreeks

Met de uiteindelijke regressievergelijking (Figuur 25 rechts) kan het debietsverloop gedurende een stationaire meting berekend worden uit het bewerkte 'signaal' (dieptegemiddelde snelheid vermenigvuldigd met de diepte, gemiddeld over de zeven middelste kolommen en uitgemiddeld over 30 sec). Het resultaat voor meetdag 2 is te zien in Figuur 26. Merk op dat de raaimetingen nog een zekere spreiding kennen vooraleer een stationaire meting werd aangevat, en dat deze spreiding dezelfde grootteorde heeft als die van de stationaire metingen.

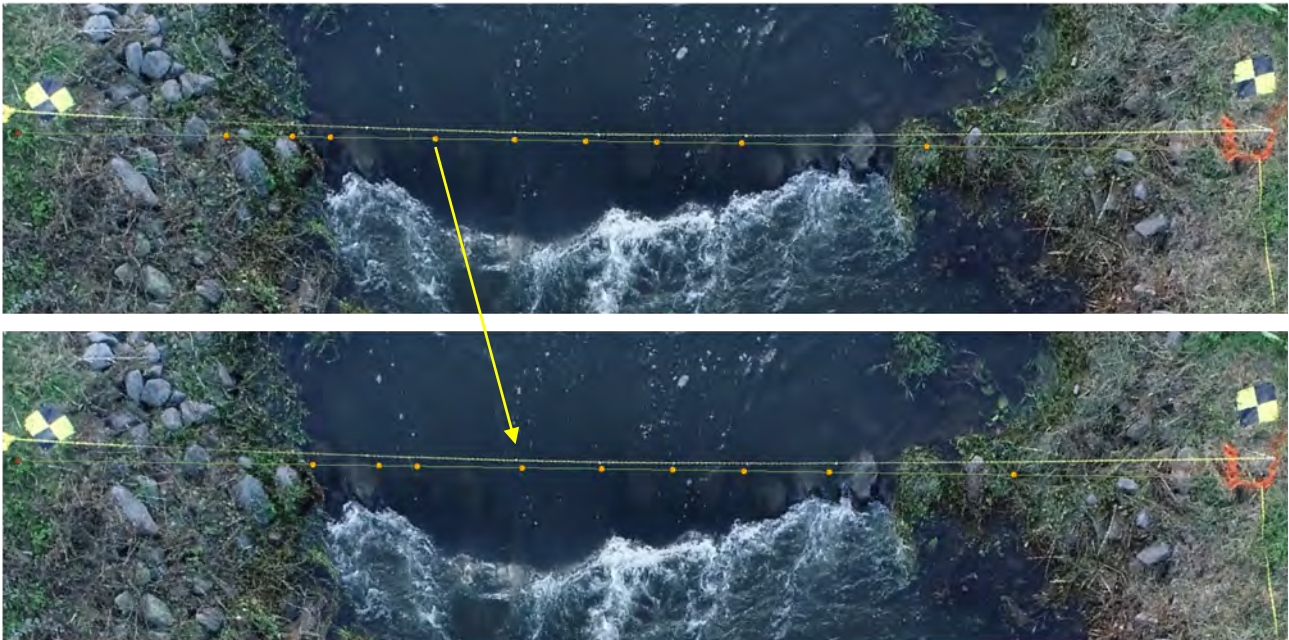


Figuur 26 – Berekende debietstijdsreeks gedurende meetdag 2.

### 3.5 Puntsnelheidsmetingen

Het ingezette snelheidsmeettoestel meet de snelheid in langs- en dwarsrichting. Voor de analyse wordt enkel gekeken naar de totale snelheidscomponent. De metingen per punt werden uitgevoerd overheen een tijdspanne van 30 tot 60 seconden. Per 5 seconden werd de gemiddelde snelheid geregistreerd. Voor de verdere analyse wordt de gemiddelde waarde over de meetperiode gehanteerd.

Op basis van de afstanden van de puntsnelheidsmeetpunten tot een referentiepunt op de linkeroever van de passage, is de werkelijke geografische positie van de meetpunten bepaald. Deze punten worden weergegeven in Figuur 27. Voor de eerste raai van bekken 5 (dit is de raai op de drempel zelf) bleek er een afwijking te zitten tussen de posities bepaald aan de hand van de beschrijving in veldnota's en de visuele ligging van de punten zoals te identificeren op de drone luchtfoto. Omdat de afwijking constant is (85 cm), is er gekozen om de ligging van de punten te corrigeren in lijn met de luchtfoto. Op deze manier wordt de ligging van de meetpunten ook consistent met de ligging van de hoofdstroom zoals beschreven in de veldnota's. De correctie wordt hieronder visueel weergegeven: het bovenste paneel toont de oorspronkelijke toestand, en het onderste paneel de toestand na correctie.



De gele pijl toont de verschuiving van punt 5, dat volgens de beschrijving in de hoofdstroom gelegen is. Na de verschuiving is dit effectief het geval.

Figuur 27 – Stroommeetpunten op bekken 5 voor en na correctie van raai 1.

De meetsnelheden per punt en conditie zijn berekend door INBO en zijn zonder verdere verwerking gebruikt in de vergelijkende analyse, zie paragraaf 3.6.3.

## 3.6 Oppervlakte stroomvelden

### 3.6.1 LSPIV basisverwerking

Het toepassen van de LSPIV verwerkingsmethodiek werd uitgevoerd in het kader van een onderzoeksproject naar innovatieve meettechnieken waaronder LSPIV.

De door middel van LSPIV verwerkte reeksen worden gegeven in Tabel 7.

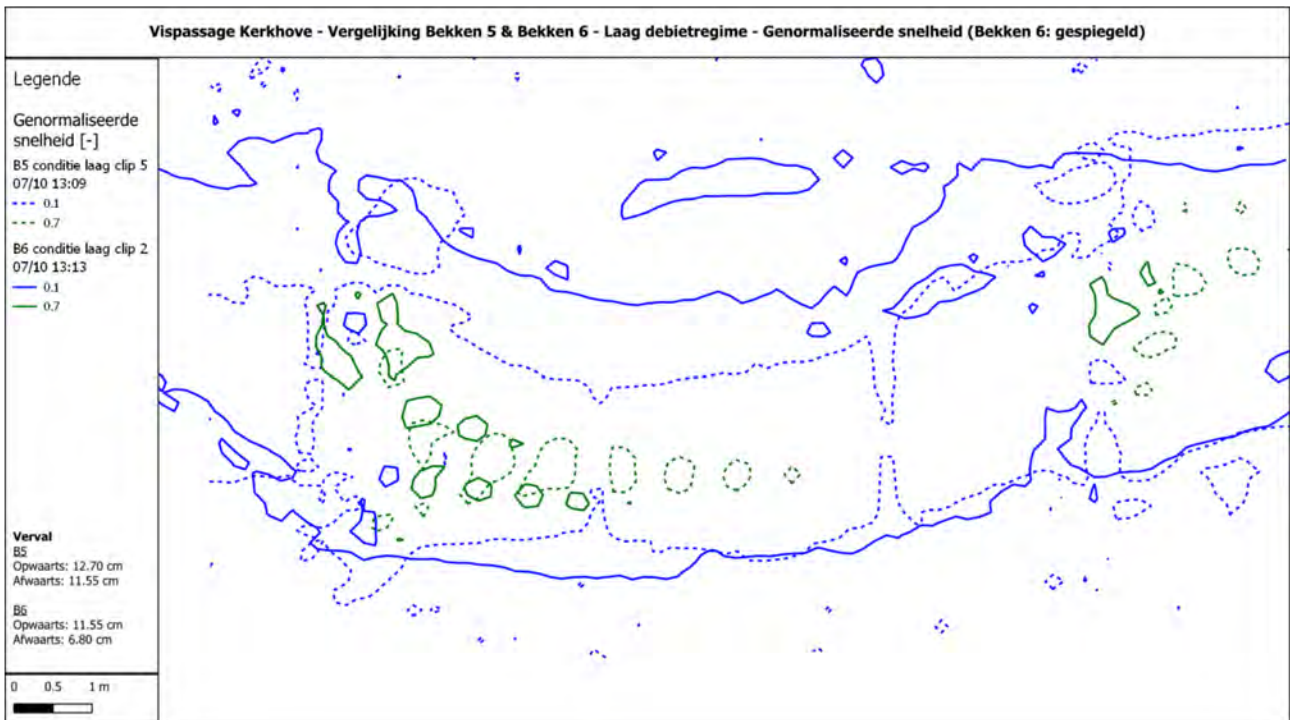
Tabel 7 – Verwerkte opnames.

meetreeks	bekken	duur-analyse	Start	Stop
2	B1	10s	9:24:41	9:24:51
	B5	10s	10:52:35	10:52:45
	B6	10s	11:00:02	11:00:12
3	B0	10s	12:41:43	12:41:53
	B1	10s	12:43:50	12:44:00
	B5	10s	13:08:39	13:08:49
		5s	13:08:39	13:08:44
		1s	13:08:39	13:08:40
		20s	13:08:39	13:08:59
	B6	10s	13:12:45	13:12:55

### 3.6.2 Uniformisering assenstelsels en contourkaarten

Om een vergelijking van de stroomvelden tussen de drempels toe te laten, zijn de LSPIV data geprojecteerd in lokale stelsels, waarbij het nulpunt (0,0) 5 meter opwaarts van de drempel is gelegen, volgens een X-as die loodrecht staat op een dwarslijn (Y=5m lijn) over de drempel. Een 'vrijheid' hierbij is op welke plaats exact die dwarslijn wordt gelegd daar elke drempel enigszins anders is gevormd.

De achterliggende reden van deze uniformisering van de assenstelsel is om een snelle vergelijking mogelijk te maken tussen de verschillende bekken en tussen de verschillende debieten. Hiervoor dient een normalisering doorgevoerd te worden van de snelheidsvectoren. Gekozen wordt om de normalisering uit te voeren op basis van de theoretische maximum snelheid afgeleid uit het momentaan verval volgend uit de Diver metingen in het bekken op- en afwaarts van de drempel. Bij het vergelijken van verschillende bekken dienen de resultaten ook nog gespiegeld te worden zodat het diepste punt van de V aan dezelfde oever ligt. Een vergelijking tussen het zo bekomen stromingspatroon voor bekken 5 en bekken 6 wordt gegeven in Figuur 28. Bemerkt dat om deze figuur inzichtelijk te maken de geometrie van het bekken ontbreekt. Voor een correcte en waardevolle analyse dient hiervoor van elk bekken een geschematiseerde vorm opgesteld te worden rekening houdend met minimum de breedte, lengte en kromming van de aslijn. Op basis van een projectie van deze vorm en hierbij ook de snelheidsvectoren op eenzelfde type bekken kan vervolgens een goede vergelijking uitgevoerd worden. Tijdens het traject werd vastgesteld dat deze verwerking complex is en dat de meerwaarde beperkt zal zijn. Hierop werd besloten om dit niet verder uit te werken.



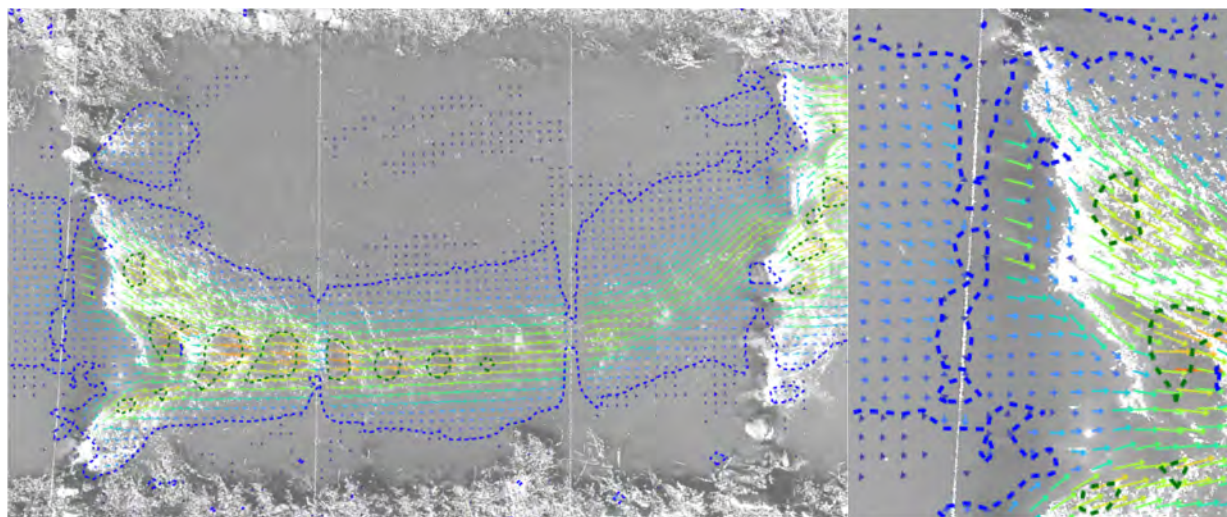
Figuur 28 – Vergelijking snelheidscontouren bekken 5 en bekken 6

### 3.6.3 Vergelijking LSPIV en stroomsnelheidsmetingen

Op basis van de snelheidsmetingen in de waterkolom die door INBO zijn uitgevoerd (zie paragraaf 2.1.5 en paragraaf 3.5) en de snelheid afgeleid uit het verval, kan een validatie uitgevoerd worden van de LSPIV metingen. In het center van de overlaat wordt een goede overeenkomst verwacht tussen de LSPIV metingen, de puntsnelheidsmetingen van INBO en de snelheid afgeleid uit het verval. Het is belangrijk op te merken dat elke van deze meettechnieken gepaard gaat met een bepaalde mate van onzekerheid.

Uit de visualisatie van de stroomvectoren afkomstig uit de LSPIV analyse blijkt dat ter hoogte van de locatie van de meetlinten die over het water zijn gespannen, 1 à 2 roostercellen breed, een foute waarde ontstaat door de invloed van het meetlint, waarbij de stroomsnelheid veel te laag is. In onderstaand beeld van bekken 1 wordt dit weergegeven. Bij de vergelijking mogen deze punten dus niet in de berekening meegenomen worden. Omdat INBO stroommeetpunten per definitie langsheen de meetlinten liggen, moet er geïnterpoleerd worden tussen de opwaartse en afwaartse LSPIV roosterpunten. Dit is gedaan door alle roosterpunten te nemen in een rechthoek van 1 m lang en 0.5 m breed rond het INBO meetpunt.

Een illustratie van deze verstoring van de LSPIV meting door het meetlint wordt gegeven in Figuur 29.



Figuur 29 – Verstoring LSPIV meting door meetlint (bekken 5 streefpeil – 16cm)) – rechts zoom

Ook dient opgemerkt te worden dat de LSPIV en puntsnelheidsmetingen achtereenvolgens zijn uitgevoerd en dat tussen beide metingen en in geval van de puntsnelheidsmetingen ook gedurende het verloop van de meting het opwaarts peil en dus debiet en snelheid enigszins varieerden. De variatie van peil en debiet tijdens meetreeks 2 en meetreeks 3 wordt in detail besproken paragraaf 3.8. Bemerkt hierin dat tijdens de tweede meetreeks het opwaarts peil relatief constant is maar dat de afwijkingen in peil wel gecorreleerd zijn aan afwijkingen in debiet. Het opgemeten debiet bevindt zich in de band  $+ 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  tot  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Waarbij de hogere kortdurende variaties te wijten kunnen zijn aan de meetmethodiek, zie paragraaf 3.4. Tijdens de derde meetreeks werd op het moment van de LSPIV metingen het debiet opgemeten aan de hand van raaimetingen. De onderlinge variatie van deze raaimetingen is vrij groot. Vanaf 13:15 is het debiet stabiel en bedraagt ca.  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  om vanaf ca. 14:45 terug toe te nemen tot  $\pm 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bemerkt dat op het moment van de toename van het debiet de puntsnelheidsmetingen in bekken 5 nog liepen.

### Bekken 1

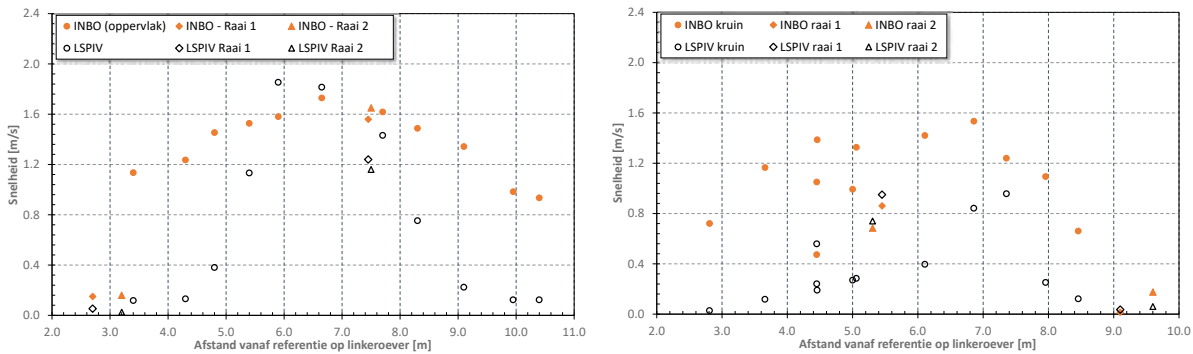
Tijdens de tweede meetreeks (vrijdag 7/10 voormiddag) zijn er in bekken nr. 1 door INBO 11 stroommeetpunten op de drempel en 4 punten in het bekken zelf, met 2 punten in de hoofdstroom, en 2 punten in de luwte aan de linkeroever zijde opgemeten.

Uit de vergelijking blijkt dat in en nabij de hoofdstroom op de drempel (waar de drempel het diepst is) de overeenkomst van de (geïnterpoleerde) LSPIV-resultaten en de puntmeting vrij goed is. Op een afstand van 6 à 8 m van de linkeroever gemeten, liggen de oppervlakkige meetpunten slechts een paar tiental cm/s af van de LSPIV-waarden. Op een totale snelheid van 1.5 tot 2.0 m/s, kan dit als acceptabel worden beoordeeld.

Verder af van de hoofdstroom zijn de resultaten echter veel minder goed: de LSPIV snelheden liggen hier rond 0.1 à 0.4 m/s terwijl de INBO metingen *tussen de stenen* wijzen op snelheden van 1 tot 1.5 m/s. De LSPIV-methode slaagt er wellicht niet in om in de zones met vaste elementen, stenen, in beeld de snelheid correct te bepalen.

Bij derde meetreeks met verlaagd peil vallen de meest ondiepe LSPIV meetpunten weg. De meetwaarden in de ondiepere delen zijn, net zoals bij het hogere peil, onbetrouwbaar. In de hoofdstroom zijn de overeenkomsten echter ook wat minder goed, met grotere afwijkingen tussen beide datasets.

De resultaten in het achtergelegen bekken, in de hoofdstroom, zijn zinvoller: in beide raaien stemmen de meetwaarden zeer goed overeen (verschil is kleiner dan 0.10 m/s). Ook in de luwte houdt deze overeenkomst stand.



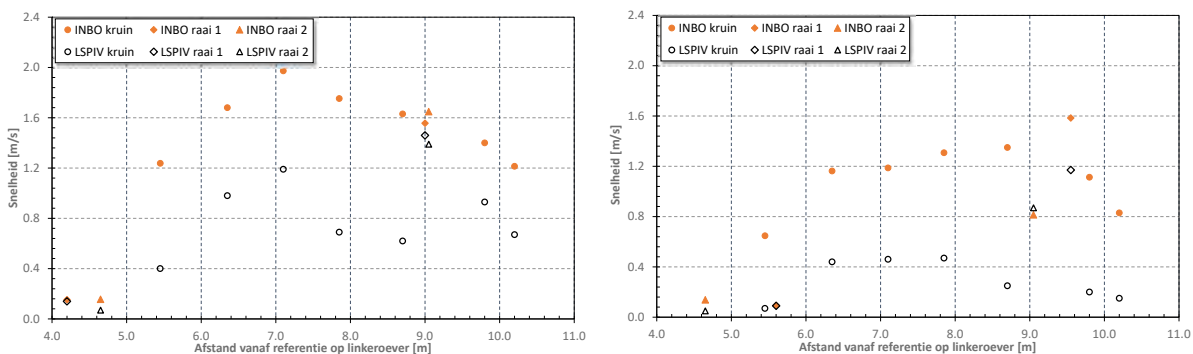
links: meetreeks 2 / rechts: meetreeks 3

Figuur 30 – Vergelijking puntsnelheidsmeting met LSPIV – bekken 1

### Bekken 5

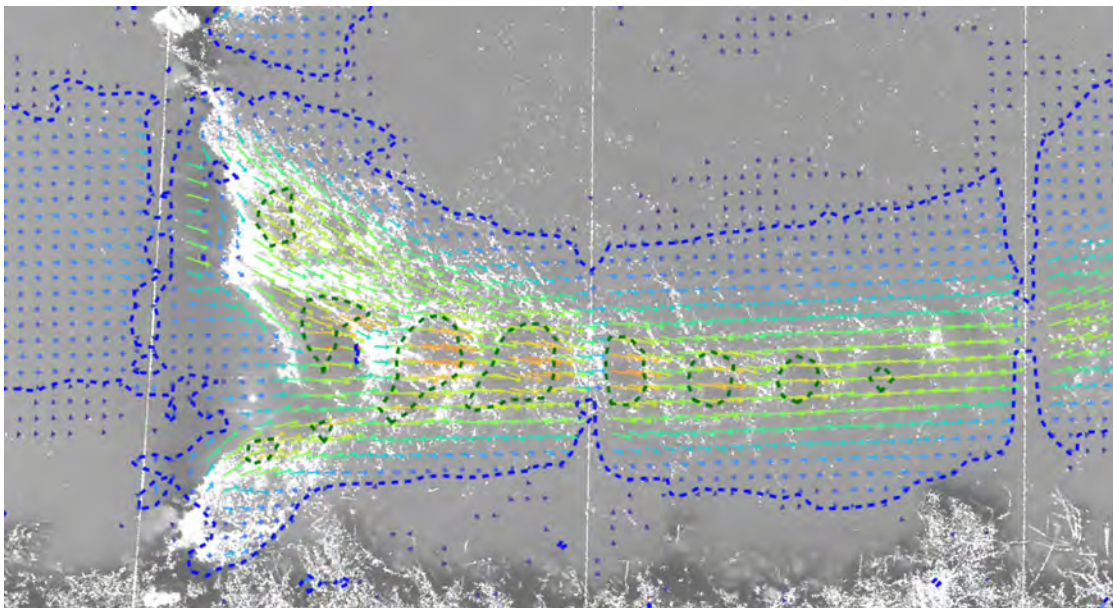
Voor meetreeks 2 en meetreeks 3 zijn er 7 INBO stroommeetpunten op de drempels en 4 punten in het achtergelegen bekken, met 2 punten in de hoofdstroom, en 2 punten in de luwte aan de linkeroever zijde.

Uit de vergelijking blijkt dat de uit de LSPIV verwerking afgeleide snelheidsmetingen over de volledige drempelbreedte lager zijn dan de door INBO uitgevoerde puntsnelheidsmetingen. Op een enkel meetpunt na is er voor de metingen in bekken 5 wel een goede overeenkomst tussen de puntsnelheidsmeting en de LSPIV verwerking. Een zoom van het snelheidspatroon wordt gegeven in Figuur 31. Bemerkt hierin dat ter hoogte van de kern van de stroming overheen de drempel de LSPIV een onderschatting lijkt. De vermoedelijke oorzaak is de onvoldoende versterking van het wateroppervlak.



links: meetreeks 1 / rechts: meetreeks 2

Figuur 31 – Vergelijking puntsnelheidsmeting met LSPIV – bekken 1.



Figuur 32 – Vb. snelheids vectoren LSPIV bekken 5, derde meetreeks.

### 3.7 Wildcamera

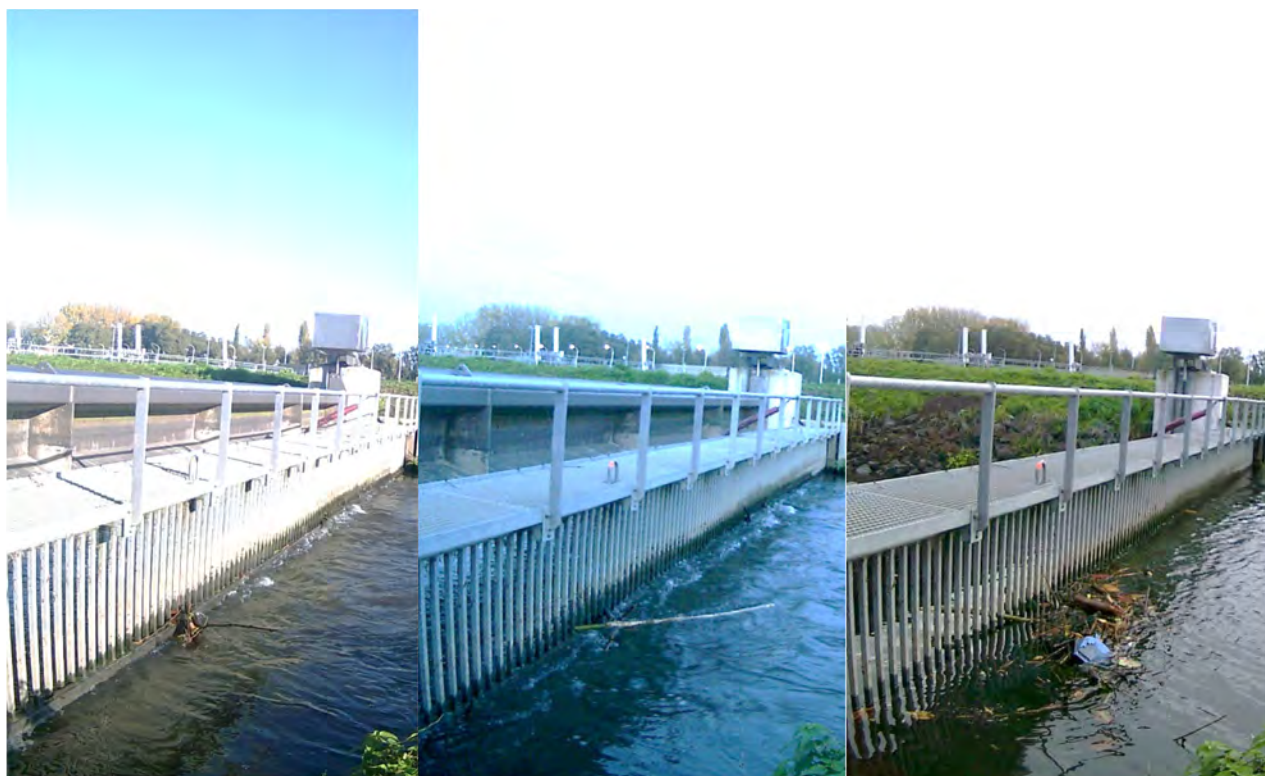
De opnames van de wildcamera werden geanalyseerd om te bepalen of vuilophoping een mogelijke invloed heeft gehad op het verval overheen de inlaatconstructie opgemeten tijdens de meetperiode van de LT divers. Figuur 33 toont een foto van het vuilrooster tijdens een terreinbezoek op 31 augustus en één op 5 oktober voor de reiniging voorgaand aan de metingen. Merk in de foto's op dat tijdens het voorgaand terreinbezoek drijfhout met plantengroei werd waargenomen, terwijl voorgaand de meting het voornamelijk rietopeenhoping betreft.



Links: 31/08/2022, rechts 5/10/2022 voor reiniging rooster

Figuur 33 – Vuilophoping vuilrooster afsluitconstructie.

Na uitvoeren van de metingen werd een wildcamera gericht op het vuilrooster die periodiek een opname maakte. Enkele van deze opnames worden weergegeven in Figuur 34. Bemerkt dat tot 18/10, 11 dagen na het einde van de meting, de vuilophoping beperkt is tot 1 tak. Op 19/10 raakt een langere tak klem waarna op 21/10, het moment van ophaling, mogelijk beginnende vuilophoping optreedt rondom de geklemde tak. De vuilinklemming tijdens de langdurige metingen is evenwel nihil waardoor analyse van de langdurige metingen niet zinvol is. Wel bevestigen deze beelden dat vuilophoping niet altijd een gestaag proces is. De vuillast zal allicht doorheen het jaar variëren naargelang de seizoenen (riet, takken, bladeren). Ook stormen of wassen kunnen de vuillast beïnvloeden.



Links: 18/10 16:27, midden 19/10/2022 19:00, rechts 21/10/2022 9:33

---

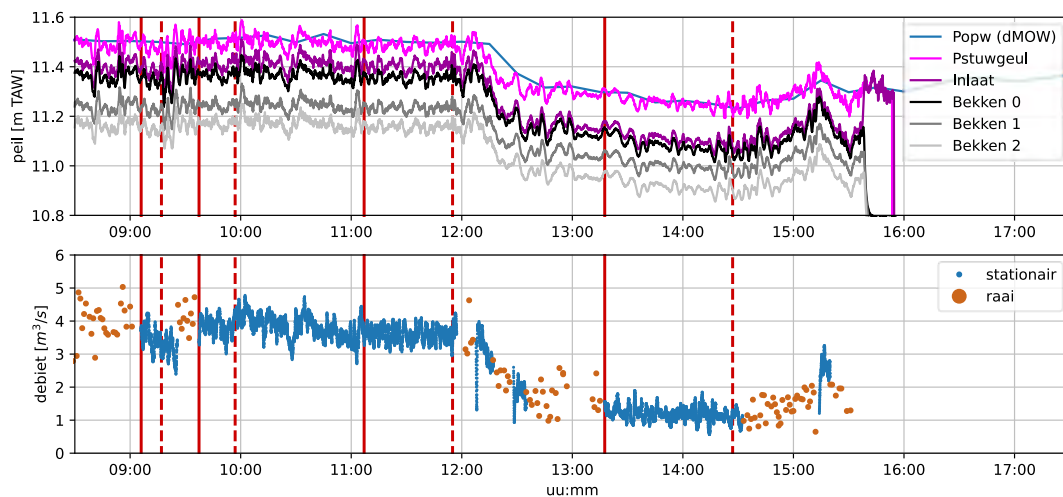
Figuur 34 – Opnames vuilrooster met wildcamera.

---

### 3.8 Events

Zoals aangegeven in paragraaf 2.2 werden waarden van de metingen op de eerste meetdag (6 oktober) als beperkt bruikbaar beschouwd, enerzijds door het fluctuerende peil en anderzijds door het ontbreken van een betrouwbare debietmeting. Daarom worden voor de verdere verwerking enkel de twee meetreeksen, uitgevoerd op de tweede meetdag (7 oktober), beschouwd. Het opgemeten waterpeil opwaarts, in de instroom en in de eerste drie bekkens, en het debiet volgend uit de stationaire en de raaimetingen, wordt gegeven in Figuur 35.





Figuur 35 – Opgemeten peil in de instroom en de opwaartse bekken en het debiet.

Idealiter wordt een Q-h verband afgeleid op basis van het gemeten waterpeil in het opwaartse pand en het debiet door de vispassage. Er blijkt echter een vertraging te zijn tussen het opwaartse waterpeil en het vispassagedebiet aangezien dit debiet aan de afwaartse zijde van de vispassage werd opgemeten. Dit betekent ook dat het debiet niet één op één kan worden gekoppeld aan de waterpeilen en vervallen ter plaatse van elk van de drempels.

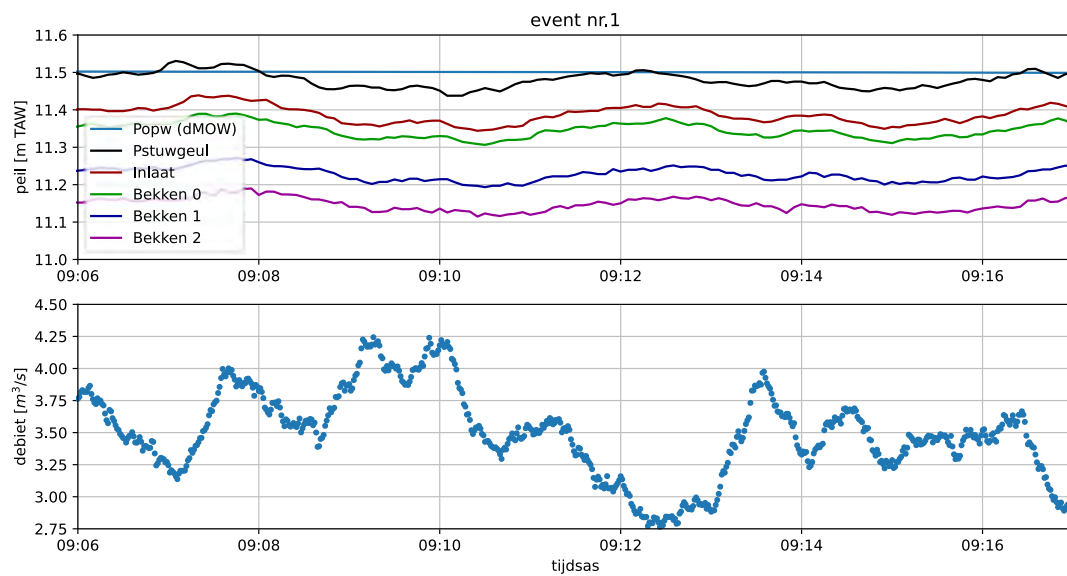
Voor de verdere analyse wordt daarom gekozen voor het selecteren van events waarbij het opwaartse waterpeil en gemeten debiet over een voldoende lange periode relatief constant waren. Vier events werden geselecteerd, zie Figuur 35. Elke event begint met een rode volle lijn en eindigt bij de rode stippellijn. Tabel 8 geeft een overzicht van deze events met bijbehorende gemiddelde waterpeilen en debieten.

Event 1 t/m 3 zijn relatief gelijk en komen overeen met de situatie van het opwaarts streefpeil. Event 4 komt overeen met de situatie van een opwaarts waterpeil van circa 20 cm onder het streefpeil.

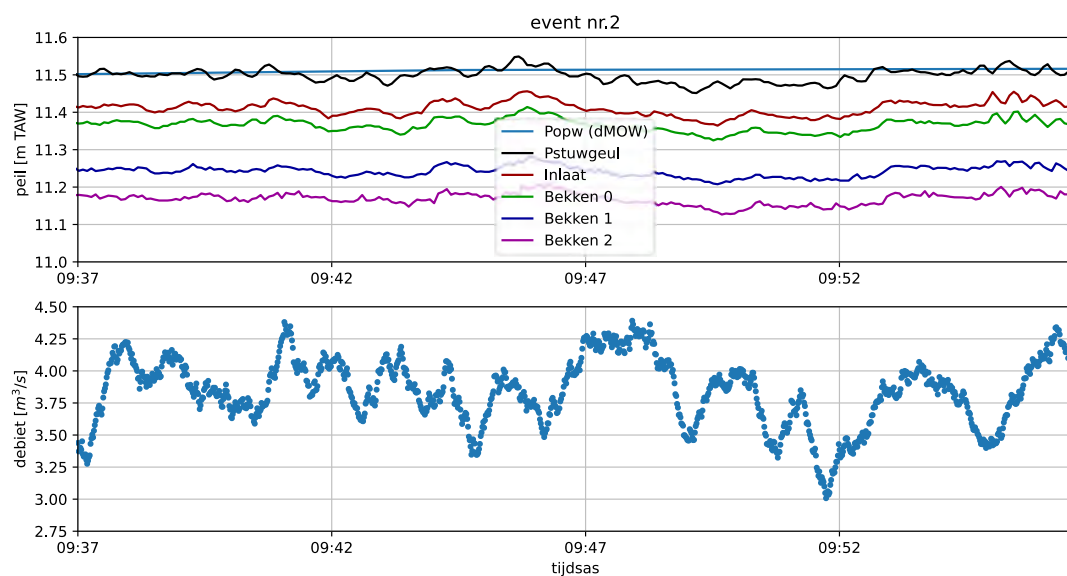
Tabel 8 – Opdelen meetreeksen 7/10/2022 in events.

Event	Tijd op 7/10/2023			Debiet vis-passage [m <sup>3</sup> /s]	Gemiddeld waterpeil opwaarts [m TAW]				Verschil met streefpeil opwaarts [m]			
	start	eind	duur		DMOW	DVW	stuw-geul	bekken 0	DMOW	DVW	stuw-geul	bekken 0
1	09:06	09:17	00:11	3.49	11.50	11.47	11.48	11.35	0.04	0.01	0.02	-0.11
2	09:37	09:57	00:19	3.85	11.51	11.49	11.50	11.37	0.05	0.03	0.04	-0.09
3	11:07	11:55	00:48	3.60	11.50	11.48	11.49	11.36	0.04	0.02	0.03	-0.10
4	13:17	14:27	01:09	1.21	11.27	11.25	11.26	11.08	-0.19	-0.21	-0.20	-0.38

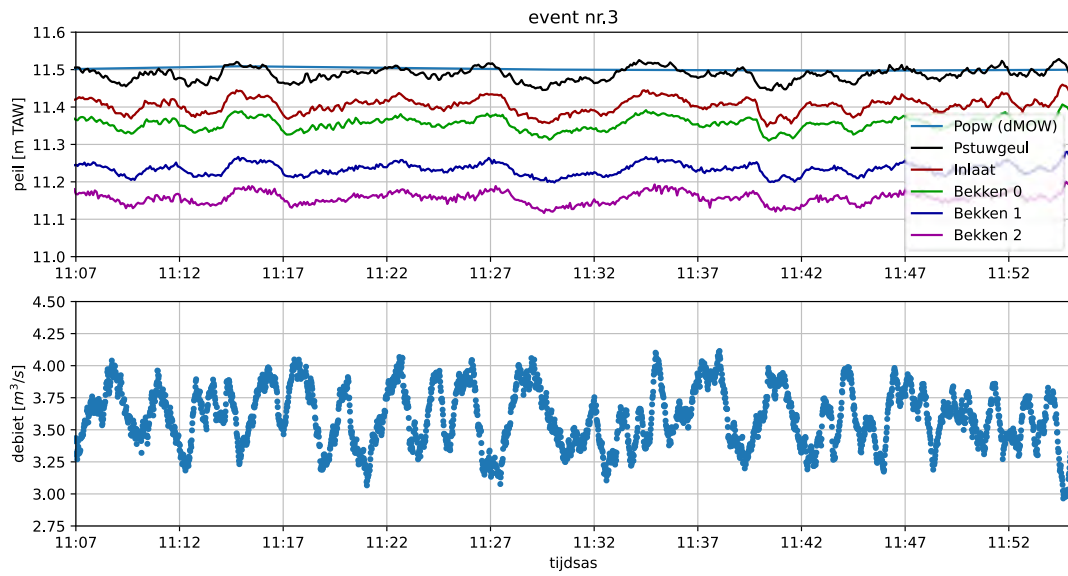
\* Het verschil tussen de DMOW- en DVW-meting van het opwaarts peil wordt mogelijk verklaard door het tijdsinterval van 15 min van de DMOW-meting.



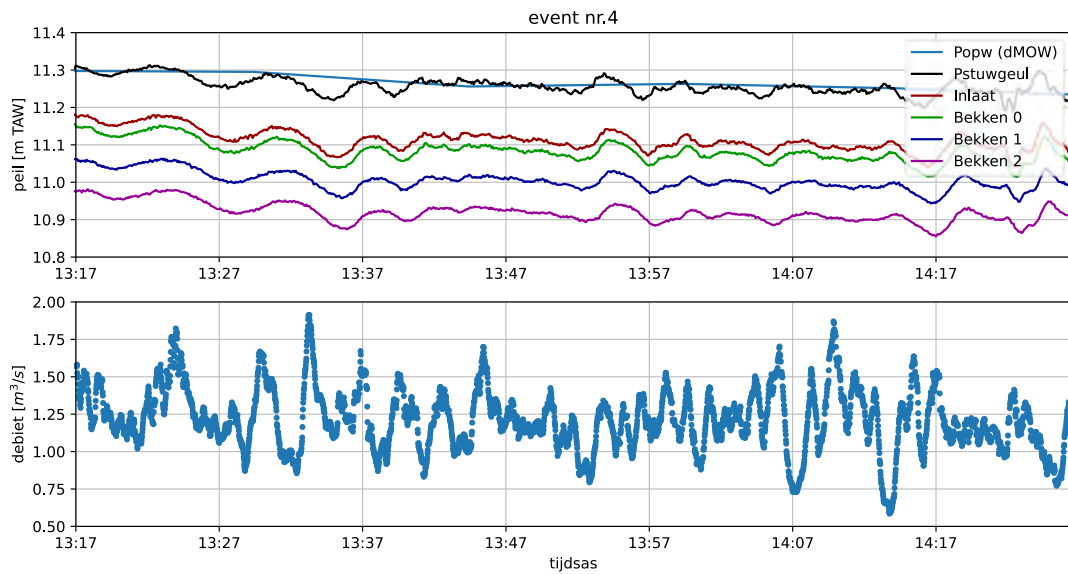
Figuur 36 – Verloop waterpeil en debiet tijdens event nr. 1



Figuur 37 – Verloop waterpeil en debiet tijdens event nr. 2



Figuur 38 – Verloop waterpeil en debiet tijdens event nr. 3



Figuur 39 – Verloop waterpeil en debiet tijdens event nr. 4

## 4 Hydraulische evaluatie

In dit hoofdstuk wordt de hydraulische werking van de vispassage voor elk van de vier geselecteerde events uit paragraaf 3.8 geëvalueerd aan de hand van de ontwerpcriteria zoals toegepast in de oorspronkelijke ontwerpstudie (Visser et al., 2017). Door specifiek de stroomsnelheden, doorzwemdiptes, doorzweembreedtes en stroompatronen te beoordelen kan de vispasseerbaarheid ingeschat worden vanuit hydraulisch oogpunt.

### 4.1 Debiet

Het debiet door de vispassage wordt vooral bepaald door het opwaartse waterpeil en de vormgeving van de drempels. In de ontwerpfase werd ervan uitgegaan dat de vormgeving van vooral de meest opwaartse drempels bepalend is voor het optredende debiet gegeven een bepaald waterpeil. In de ontwerpfase werd er vanuit gegaan dat, in de theoretische situatie van exact aangelegde drempels, het debiet berekend kan worden door toepassing van een overlaatformule voor de meest opwaartse drempel gegeven het hydraulische verval en het opwaarts peil van deze drempel. Normale schommelingen in het afwaartse waterpeil (circa +/- 50 cm ten opzichte van streefpeil) hebben geen invloed op het verval over de opwaartse drempels en daarmee dus ook geen invloed op de grootte van het debiet.

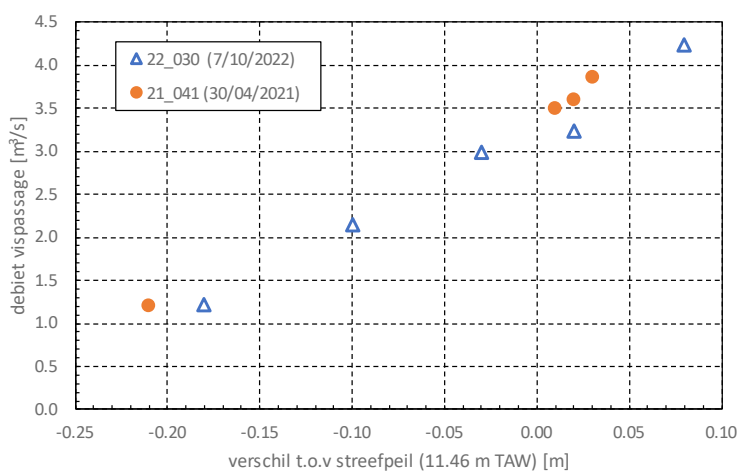
Zoals aangegeven in paragraaf 3.8 kan er op basis van de gegevens geen directe Q-h relatie (per tijdstap) worden gelegd tussen het opwaarts waterpeil en het vispassagedebiet vanwege de relatief sterk schommelende waterstanden en de vertraging die werd waargenomen tussen de opwaartse waterstand en het afwaarts gemeten debiet. Dit maakt dat er ook geen directe relatie (op een geven tijdstip) gelegd kan worden tussen het debiet en de op- en afwaartse waterstanden per drempel. Daarom worden gemiddelde debieten ten opzichte van gemiddelde opwaartse waterstanden geëvalueerd voor de vier geselecteerde events.

Tabel 9 toont de vergelijking tussen het gemeten gemiddelde debiet en de waarden berekend tijdens de ontwerpfase voor elk van de geselecteerde events (bij gemiddeld opwaarts waterpeil) en overeenstemmende ontwerpscenario's. Events 1 t/m 3 zijn qua opwaarts peil en debiet door de vispassage onderling zeer gelijkaardig. Op enkele centimeters na komen de opwaartse peilen overeen met het streefpeil (van 11.46 m TAW). Tijdens event 4 was het opwaartse waterpeil gemiddeld circa 20 cm lager dan het streefpeil. Metingen bij verhoogd opwaarts waterpeil bleken niet mogelijk vanwege de relatief lage beschikbare afvoer op de Bovenschelde en een relatief grote hoeveelheid schuttingen (zie ook paragraaf 2.2). Er zijn daarmee twee scenario's te onderscheiden: bij opwaarts streefpeil en bij opwaarts streefpeil – 20 cm.

Tabel 9 – Vergelijking gemeten debiet t.o.v. ontwerpwaarden bij gemeten opwaarts waterpeil.

Event	Opwaarts waterpeil [m TAW]				Event/ontwerpscenario	Debiet [m <sup>3</sup> /s]		
	DMOW	DVW	Stuwgeul	Bekken 0		Vispassage	Ontwerp	% verschil meting – ontwerp
1	11.50	11.47	11.48	11.35	Streefpeil (= 11.46)	3.49	2.29	52
2	11.51	11.49	11.50	11.37	Streefpeil	3.85	2.43	58
3	11.50	11.48	11.49	11.36	Streefpeil	3.60	2.36	52
4	11.27	11.25	11.26	11.08	Streefpeil – 20 cm	1.21	1.04	16%

Het eerste dat opgemerkt kan worden is dat het gemeten debiet bij streefpeil (event 1-3) meer dan circa 55% hoger ligt dan het debiet berekend tijdens ontwerp voor dit scenario. In 2021 (Visser *et al.*, 2022) werden verkennende debietsmetingen uitgevoerd waarbij bij een 5 verschillende opwaartse peilen het debiet werd gemeten. Het debiet in functie van de afwijking ten opzichte van het streefpeil voor de metingen uitgevoerd in 2021 en de metingen uitgevoerd in 2022 wordt gegeven in Figuur 40. Bemerkt dat omdat voor de metingen van 2021 de opwaartse peilmeter van DVW werd gebruikt deze ook voor de metingen van 2022 wordt gebruikt. Het verschil tussen de peilmeting van DVW en deze van DMOW is beperkt tot enkele cm, zie Tabel 9. Uit de vergelijking van beide metingen valt op dat vanaf een streefpeil - 10 cm de overeenkomst goed is. Bij de twee metingen met sterk verlaagd peil (- 18 cm resp. - 21 cm t.o.v. streefpeil) wordt twee keer een debiet 1.2 m<sup>3</sup>/s opgemeten. Verwacht wordt dat het debiet bij een streefpeil -21 cm echter nog beduidend afneemt ten opzichte van een streefpeil -18 cm. Dit kan mogelijk verklaard worden doordat de debietmeting in 2021 werd uitgevoerd met een andere meettoestel, namelijk een StreamPro (met een ander bijhorend vaartuig), en dat de metingen in 2021 opwaarts in de vispassage werden uitgevoerd (net opwaarts van de afsluitconstructie) in plaats van afwaarts in de vispassage in 2022.



Figuur 40 – Debiet vispassage in functie van afwijking t.o.v. streefpeil

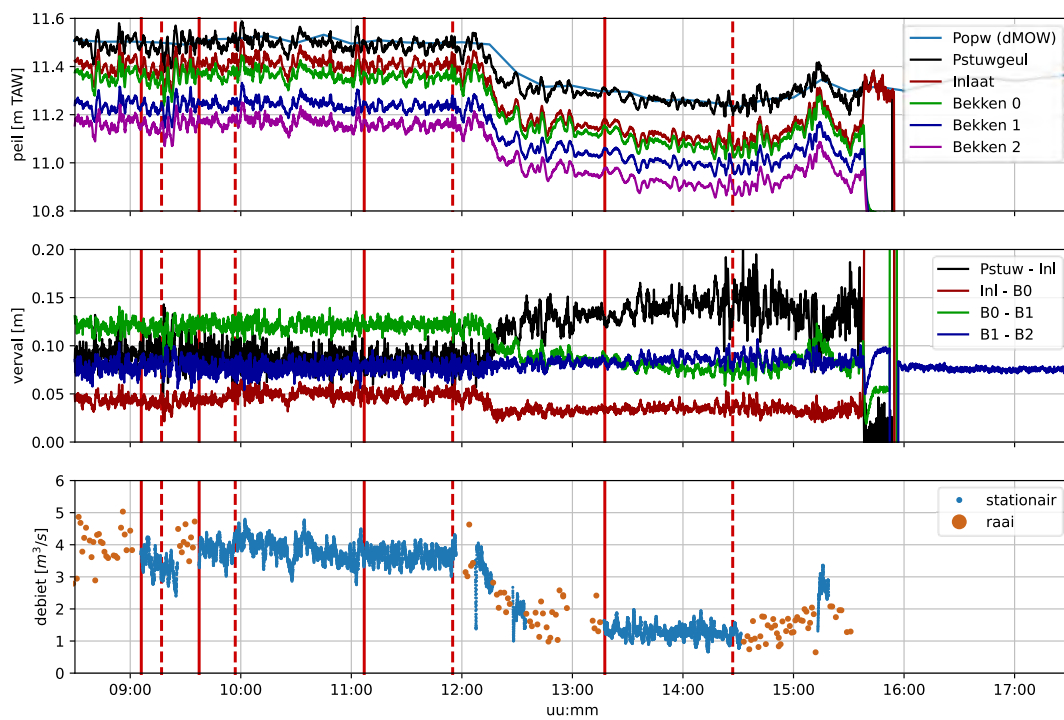
Er worden twee mogelijke oorzaken voor het hogere gemeten debiet naar voor geschoven:

- Afwijkende aanleg van de drempels (vispassage als geheel). Vooral werkelijke drempelhoogtes en vormgeving van de drempels kunnen hier een rol spelen.
- Daarnaast werd de debietscoëfficiënt in de ontwerpberekeningen als vereenvoudiging constant aangenomen en grof geschat op basis van handboeken ( $C_d = 0,5$ ). Verwacht wordt echter dat deze kan variëren op basis van o.a. waterdiepte, verval en verdrinkingsgraad. Ook is de werkelijke ruwheid van breukstenen drempels lastig in te schatten en kan deze verschillen op basis van de aanleg. De mogelijke invloed van de verliescoëfficiënten in de berekeningen wordt besproken in hoofdstuk 5.

Het hogere vispassage debiet hoeft in dit geval niet nadelig te zijn. Gezien de gemiddelde afvoer op de Bovenschelde op circa 30 m<sup>3</sup>/s binnen de beschikbare meetperiode lag (zie waterinfo.be), wordt het risico op een te hoog sluitingspercentage van de vispassage vanwege waterpeilbeheer klein geacht. Het hogere debiet heeft zelfs het bijkomend voordeel dat de lokstroom hierdoor iets wordt versterkt. Wel wordt in de volgende paragrafen bekeken of stroomsnelheden in de vispassage voldoende laag blijven vanuit oogpunt passeerbaarheid (vooral maximaal toelaatbare stroomsnelheden). Ook wordt aanbevolen om het risico op sluiting in drogere periodes in een vervolgstudie wel nog te controleren. Aangezien de vispassage over het gehele tracé bekleed is met breuksteen wordt er geen verhoogd risico verwacht op erosie.

## 4.2 Hoogte en verval

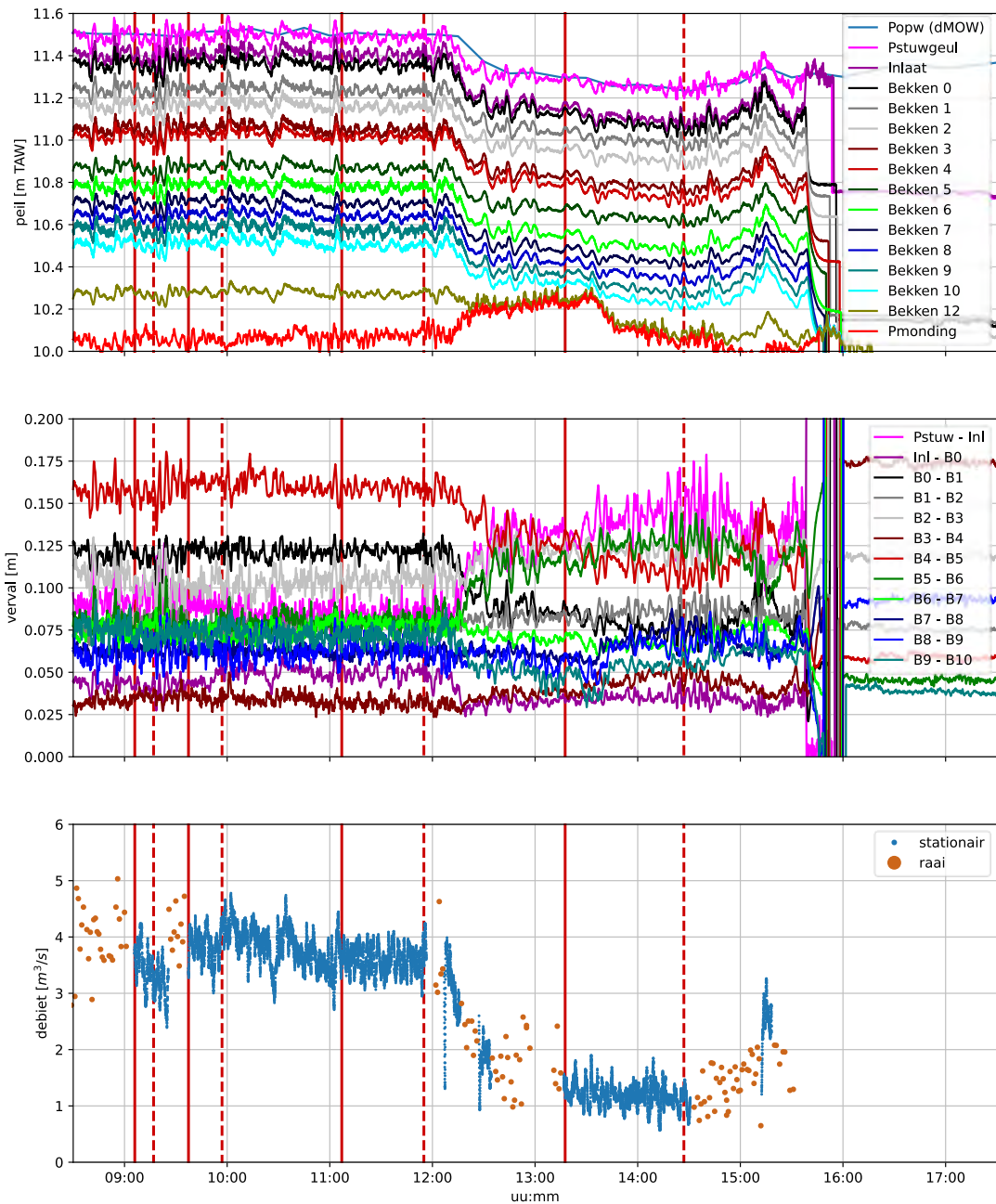
In deze paragraaf worden waterpeilen, drempelpeilen en vervallen (in relatie tot het debiet) geanalyseerd. Voordat dit wordt gedaan voor de geselecteerde events kunnen er enkele opvallende observaties worden gedaan in de totale waterstandreeksen van 7 oktober. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de instroom enerzijds (zie Figuur 41 en Figuur 42) en de drempels en bekkenen anderzijds (zie Figuur 43).



Figuur 41 – Waterpeilen en vervallen in de instroom naast debietreeks



Figuur 42 – Zoom in meetpunten in de instroom en het opwaarts gedeelte van de vispassage



Figuur 43 – Waterpeilen en vervallen over drempels naast debietreeks

In Figuur 41 (ten aanzien van de instroom) kan het volgende worden opgemerkt:

- Er treedt een verhang op over de instroom (tussen meetpunt Pstuw en Pinstroom), waar in de ontwerpberekening geen rekening mee werd gehouden. Dit verhang bedraagt een 9 à 10 cm in de streefpeilsituatie (events 1 t.e.m. 3), en loopt op tot bijna 15 cm in de situatie streefpeil – 20 cm (event 4). De grootte van het verhang neemt dus toe met lagere waterpeilen en dieptes in de instroom. Dit verhang treedt niet enkel op t.g.v. wrijving maar ook t.g.v. een toename in snelheidshoogte (en dus een afname van de drukhoogte). Bovendien werd visueel vastgesteld dat een bodemverhang aanwezig is over de instroom. Het verhoogde verhang bij lage waterdieptes (event 4) kan verklaard worden door een relatieve toename van de wrijving in het totale verschil.

- Het verval over het vuilrooster en openstaande afsluitconstructie (meetpunt instroom – B0) is circa 4 cm tijdens events 1 t/m 3 (= bij streefpeil), terwijl het afneemt tot circa 3 cm bij event 4 (streefpeil – 20 cm).
- Ook het verval over drempel 1 (meetpunt B0 – B1) neemt op dezelfde wijze af bij het lagere peil tijdens event 4, terwijl het verval over drempel 2 (meetpunt B1-B2) tijdens alle events relatief constant blijft.
- Het verval over de instroom en de passeerbaarheid van de instroom wordt verder behandeld in paragraaf 4.5.

Bij Figuur 43 (ten aanzien van de drempels) kan het volgende worden opgemerkt:

- Het grootste hydraulische verval treedt op over drempel 5 (meetpunt B4 – B5, zie rode grafiek).
- Het laagste hydraulische verval treedt op over drempel 4 (meetpunt B3 – B4, zie bruine grafiek).
- De meeste drempels hebben een relatief constant hydraulisch verval, ongeacht van het opwaartse waterpeil, enkel drempels 5 en 6 laten een duidelijke wijziging in verval zien bij het lagere opwaartse waterpeil tijdens event 4 (streefpeil – 20cm). Opvallend genoeg zijn deze effecten tegengesteld voor elk van de drempels: bij drempel 5 neemt het verval af bij lager opwaarts waterpeil, terwijl bij drempel 6 het verval juist toeneemt.
- Het afwaartse waterpeil (zie meetpunt Pmonding; licht rode grafiek) heeft geen effect op de vervallen over de meeste bemeten drempels; enkel een licht effect wordt waargenomen bij de meest afwaartse bemeten drempel wanneer het afwaarts peil het opwaarts peil van de betreffende drempel bereikt bij een stijging van het afwaarts peil met circa 30 cm (zie drempel 12 tijdens event 4).
- De hydraulische vervallen zullen hieronder in meer detail worden bekeken in relatie tot het fysieke verval per drempel, de drempelvormgeving en het debiet.

Naast de waterpeilmetingen werden ook de drempelhoogtes en bekkenhoogtes bemeten. In Figuur 44 zijn de gemiddelde waterpeilen (in de bekkens) per event naast de gemeten bekkenpeilen en drempelpeilen weergegeven. Het drempelpeil betreft het diepste punt van de (theoretische) V-vorm en het bekkenpeil betreft de gemiddelde bodemhoogte van het bekken. De horizontale as geeft de drempelnummers weer, waarbij voor de duidelijkheid *parameters gelinkt aan de bekkens* (bekkenbodempeil, waterpeilen) worden weergegeven *tussen de drempelnummers*. De bekkennummers hebben daarbij steeds hetzelfde nummer als de opwaarts gelegen drempel.

De bepaling van het drempelpeil op basis van de opmeting van de drempels wordt beschreven in paragraaf 3.1. Bemerkt dat voor de bepaling van het drempelpeil van de eerste 7 bekkens de hogere resolutie metingen uit 2022 werden gebruikt. Voor de bepaling van de overige drempel- en de bekkenpeilen werden de opmetingen uit 2019 gebruikt. De gemiddelde ontwerpwaarden (zowel voor waterpeilen als voor drempel- en bekkenpeilen) zijn overgenomen uit Visser et al. (2019).

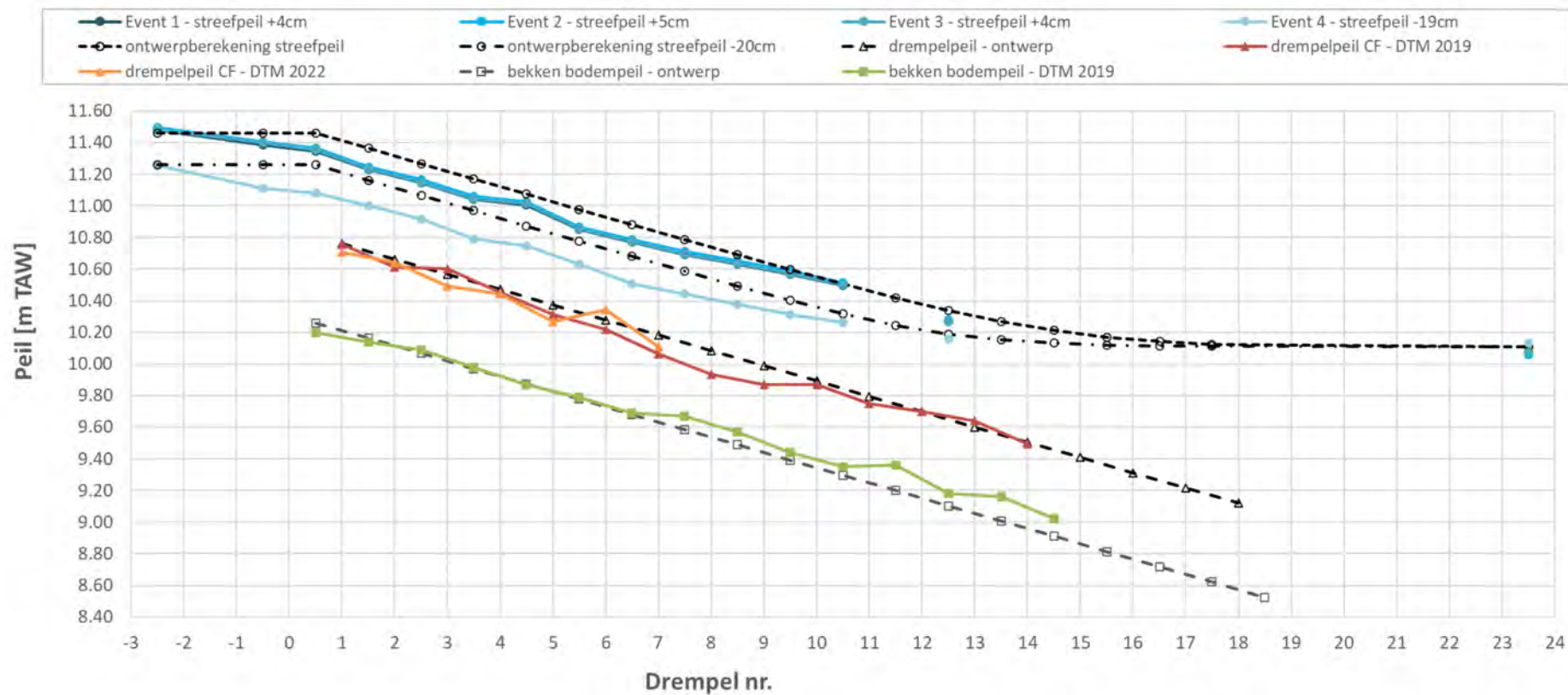
De combinatie van de absolute drempel- en bekkenpeilen met de daarbij optredende waterpeilen zijn nodig voor de evaluatie van de doorzwemdieptes, zie verder in paragraaf 4.3.1 en 4.4.1. In deze paragraaf wordt eerst het fysieke verval per drempel geanalyseerd. Verwacht wordt namelijk dat dit fysieke verval per drempel (voor een groot deel) het hydraulisch verval over de drempel zal bepalen, en daarmee de stroomsnelheden die ter plaatse van de drempel zullen optreden. De effectief gemeten stroomsnelheden worden vanuit het oogpunt van passeerbaarheid verder besproken in paragraaf 4.3.2.

Om het fysieke verval per drempel meer inzichtelijk te maken geeft Figuur 45 een visuele weergave per drempel. Dit verval bestaat uit het hoogteverschil tussen twee opeenvolgende drempels, waarbij steeds het drempelpeil van de afwaartse drempel wordt afgetrokken van de opwaartse drempel. Dit geeft dan het fysieke verval over de opwaartse drempel en wordt dus ook bij dit drempelnummer vermeld.

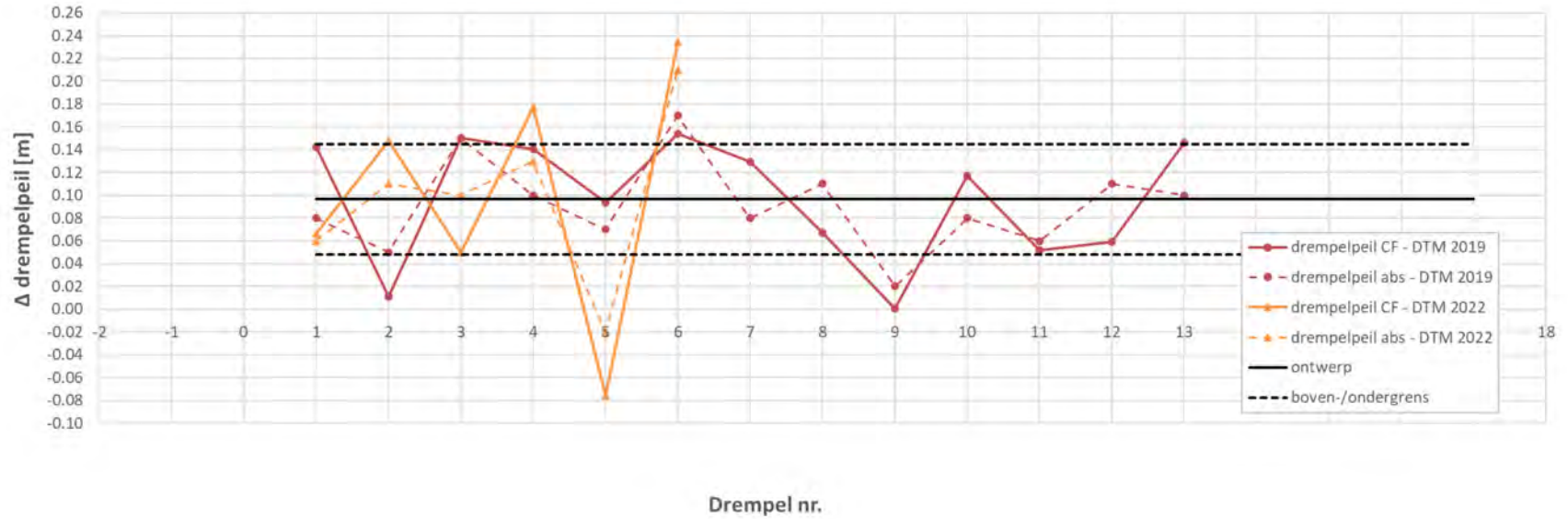


In Figuur 45 zijn tevens ook de boven- en ondergrens aangegeven met oog op nog toelaatbare afwijking voor het fysieke verval. De vispassage werd ontworpen voor een fysiek verval per drempel van circa 10 cm (9.6 cm om precies te zijn, Visser et al., 2017). Dit fysieke verval per drempel zou bij streefpeilen (en exact gelijke drempelvorm) tot ongeveer eenzelfde hydraulisch verval moeten leiden. Het hydraulische verval is hierbij het opwaarts waterpeil min het afwaartse waterpeil van de betreffende drempel. Merk echter op dat er vier bufferdrempels voorzien zijn. Hierdoor zullen hydraulische vervallen (en daarmee stroomsnelheden) op de afwaartse drempels lager zijn. Aangezien de exacte hoogtebepaling bij aanleg niet eenvoudig is voor breukstenen V-vormige drempels (de stenen zelf hebben namelijk een diameter van circa 10 tot 25 cm), wordt er in de praktijk gecontroleerd of het gemeten fysieke verval per drempel niet meer dan 50% afwijkt (circa 5 cm) afwijkt. Bij een hydraulisch verval hoger dan 15 cm is de kans namelijk groot dat stroomsnelheden over zo goed als de volledige drempel hoger worden dan de maximaal toelaatbare stroomsnelheid van de doelsoorten (1,5 m/s). Het verval per drempel is ook best niet meer dan 50% lager dan het gewenste verval aangezien dit 'verlies' aan verval dan gecompenseerd zal moeten worden op andere drempels.

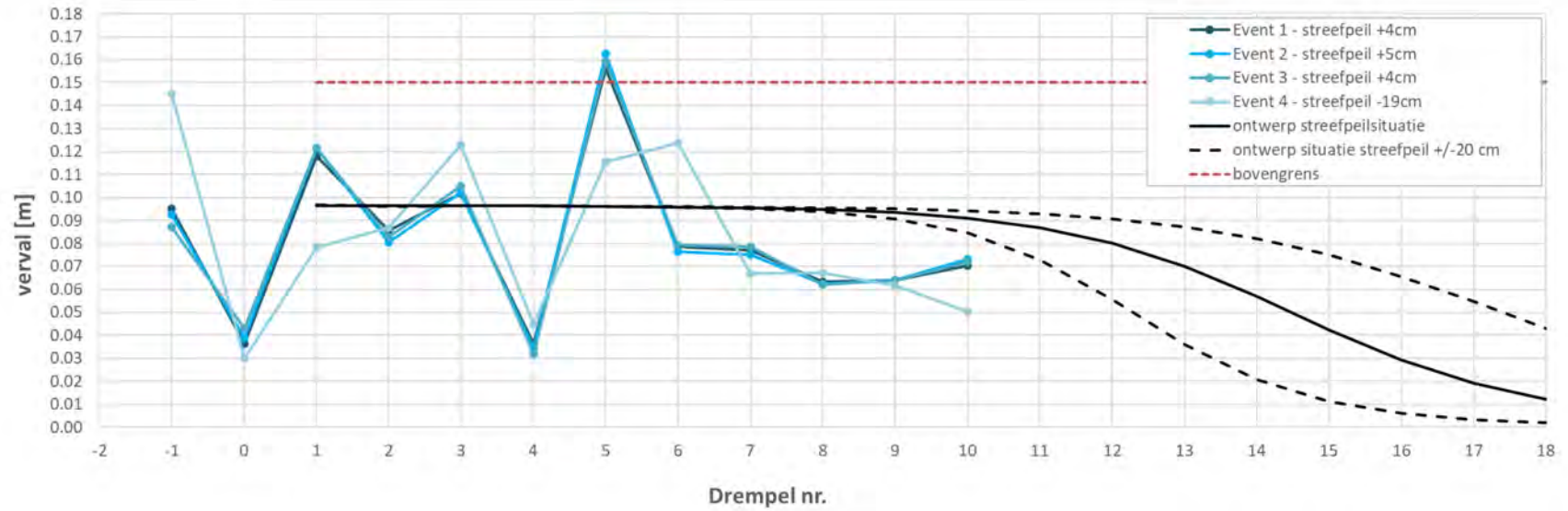
Figuur 46 geeft een soortgelijke weergave van het hydraulisch verval over elke bemeeten drempel (en ook over de onderdelen van de instroom) voor de verschillende events. Aangezien het om een verval over elke drempel gaat, wordt de waarde op het drempelnummer weergegeven. Om een indicatie te geven van de tijdens ontwerp verwachte variatie in vervallen, worden ook de berekende waarden voor de situaties bij een streefpeil +/- 20 cm weergegeven. Zoals aangegeven is de vispassage ontworpen met enkele bufferdrempels aan afwaartse zijde. Hierdoor neemt het verval per drempel in afwaartse richting af vanaf circa drempel 8. De laatste vier drempels hebben nauwelijks nog verval bij de beschouwde afwaartse randvoorwaarde, deze zijn immers voorzien om een verlaagd afwaarts waterpeil (of verhoogd opwaarts waterpeil) op te vangen.



Figuur 44 – Langsprofiel van de vispassage. De horizontale as geeft de drempelnummers weer; de op- en afwaartse onderdelen van de passage zijn eveneens aangeduid.



Figuur 45 – Verschil tussen twee opeenvolgende drempelpeilen.



Figuur 46 – Verval per drempel langsheen de vispassage.

Bij deze figuren kan het volgende worden opgemerkt:

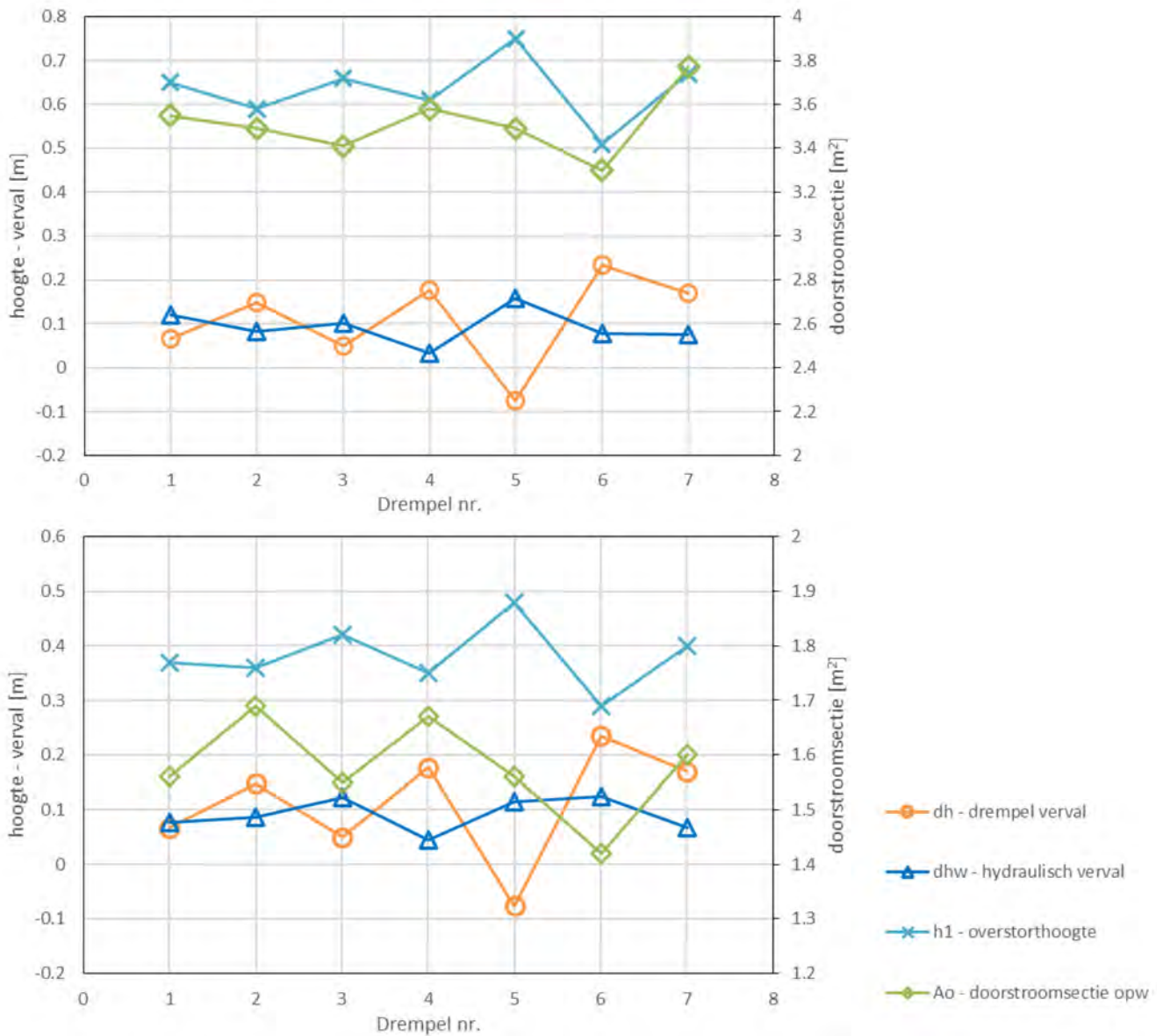
- Van de meest opwaartse 10 drempels zijn zo goed als alle drempels systematisch lager aangelegd dan voorzien in het ontwerp. Alleen drempel 6 is duidelijk te hoog aangelegd waardoor er ook een negatief fysiek verval ( $dh$ ) wordt vastgesteld over drempel 5.
- Ook de gemeten waterpeilen boven de drempels zijn systematisch lager dan voorzien in de ontwerpberekeningen. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat er een verhang optreedt over de instroom en de afsluitconstructie (zie Figuur 41), waar in de ontwerpberekening geen rekening mee werd gehouden. Dit verhang bedraagt een 9 à 10 cm over de instroom en 4 cm over de afsluitconstructie in de streefpeilsituatie (events 1 t.e.m. 3), en bijna 15 cm resp. 3 cm in de situatie streefpeil – 20 cm (event 4). Ook de lagere drempelpeilen kunnen mee zorgen voor de lagere waterpeilen.
- Het hydraulisch verval overheen drempel 5 bedraagt ca. 16 cm en is hiermee groter dan de vooropgestelde bovengrens. Enkel overheen drempel 4 wordt met 3 cm een zeer laag hydraulisch verval opgemerkt. Voor de overige drempels bedraagt het hydraulisch verval tussen 6 cm en 12 cm. Voor drempels 1, 5 en 6 wordt opgemerkt dat het hydraulisch verval in streefpeilsituatie (events 1 t.e.m. 3) afwijkt ten opzichte van het event bij streefpeil - 20 cm (event 4).
- Er wordt geen constante correlatie vastgesteld tussen het fysieke verval per drempel en het hydraulisch verval. Een mogelijke verklaring is dat de afleiding van de opgemeten DTM's naar een drempelpeil en een openingshoek een te grote vereenvoudiging betreft. Het is hierbij ook relevant om in hoofdstuk 5 de spreiding op de coëfficiënten te vergelijken. Bij een grote spreiding spelen mogelijks nog andere parameters mee zoals het stromingspatroon in de bekkens en de lokale stromingspatronen tussen de stoorstenen.
- Bij event 4 wijkt de wijziging in verval af voor verschillende drempels ten opzicht van het 'patroon' bij event 1-3. Zeker de sterke toename op drempel 6 is afwijkend en onverwacht. Daarnaast heeft drempel 1 dan een veel sterkere afname dan te zien is op andere drempels.

Om de oorzaak van de onverwachte effecten op enkele drempels te kunnen achterhalen, worden de maatgevende parameters (uit de overlaatformules, zie ook paragraaf 5.1) op elk van de drempels met elkaar vergeleken. Dit betreft het fysieke verval ( $dh$ ), het hydraulische verval ( $dhw$ ), de opwaartse waterdiepte boven de drempel ( $h_o = h_1$ ) en de daaraan verbonden natte sectie ( $A_o$ ). Tabel 10 geeft een overzicht van deze maatgevende (gemeten) parameters. Merk op dat de coëfficiënten met oog op debiet en verdrinkingsgraad hier nog buiten beschouwing worden gelaten, deze worden afgeleid en verder besproken in paragraaf 5.2. Hier wordt nu vooral gekeken naar de hydraulische effecten ten gevolge van de geometrische vormgeving van de drempels. Hierbij wordt gekeken naar de verhouding van de maatgevende parameters uit de overlaatformules.

Tabel 10 – Overzicht maatgevende parameters uit de overlaat formule per drempel en per event

Drempel	Event	Q	Ho	Ha	Hd	Hd- ontw	$\Delta H_d$	h1	Ao	dhw	dh	S	Ao/Ao- gem
		[m <sup>3</sup> /s]	[mTAW]	[mTAW]	[mTAW]	[m]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	[-]	[-]
1	1-3	3.64	11.36	11.24	10.71	10.76	-0.05	0.65	3.55	0.120	0.067	0.81	1.01
2	1-3	3.64	11.24	11.15	10.64	10.66	-0.02	0.59	3.49	0.083	0.148	0.86	0.99
3	1-3	3.64	11.15	11.05	10.49	10.57	-0.08	0.66	3.41	0.103	0.050	0.84	0.97
4	1-3	3.64	11.05	11.02	10.44	10.47	-0.03	0.61	3.58	0.034	0.177	0.94	1.02
5	1-3	3.64	11.02	10.86	10.27	10.37	-0.1	0.75	3.49	0.159	-0.076	0.79	0.99
6	1-3	3.64	10.86	10.78	10.34	10.28	0.06	0.51	3.30	0.078	0.235	0.85	0.94
7	1-3	3.64	10.78	10.70	10.11	10.18	-0.07	0.67	3.77	0.077	0.172*	0.89	1.07
<b>Gem</b>							<b>-0.04</b>	<b>0.63</b>	<b>3.51</b>				
1	4	1.21	11.08	11.00	10.71	10.76	-0.05	0.37	1.56	0.078	0.067	0.79	0.99
2	4	1.21	11.00	10.92	10.64	10.66	-0.02	0.36	1.69	0.087	0.148	0.76	1.07
3	4	1.21	10.92	10.79	10.49	10.57	-0.08	0.42	1.55	0.123	0.050	0.71	0.98
4	4	1.21	10.79	10.75	10.44	10.47	-0.03	0.35	1.67	0.045	0.177	0.87	1.06
5	4	1.21	10.75	10.63	10.27	10.37	-0.1	0.48	1.56	0.115	-0.076	0.76	0.99
6	4	1.21	10.63	10.51	10.34	10.28	0.06	0.29	1.42	0.124	0.235	0.57	0.90
7	4	1.21	10.51	10.44	10.11	10.18	-0.07	0.40	1.60	0.067	0.172*	0.83	1.01
<b>Gem</b>							<b>-0.04</b>	<b>0.38</b>	<b>1.58</b>				

Het drempel verval, hydraulisch verval, overstorthoogte en opwaartse doorstroomsectie bij streefpeil en bij streefpeil -20 cm wordt gegeven in Figuur 47.



Boven bij streefpeil ; onder bij streefpeil -20 cm

Figuur 47 – Vergelijking drempelverval , hydraulisch verval, overstorthoogte en doorstroomsectie voor drempel 1 t.e.m. drempel 7.

### 4.3 Passeerbaarheid drempels

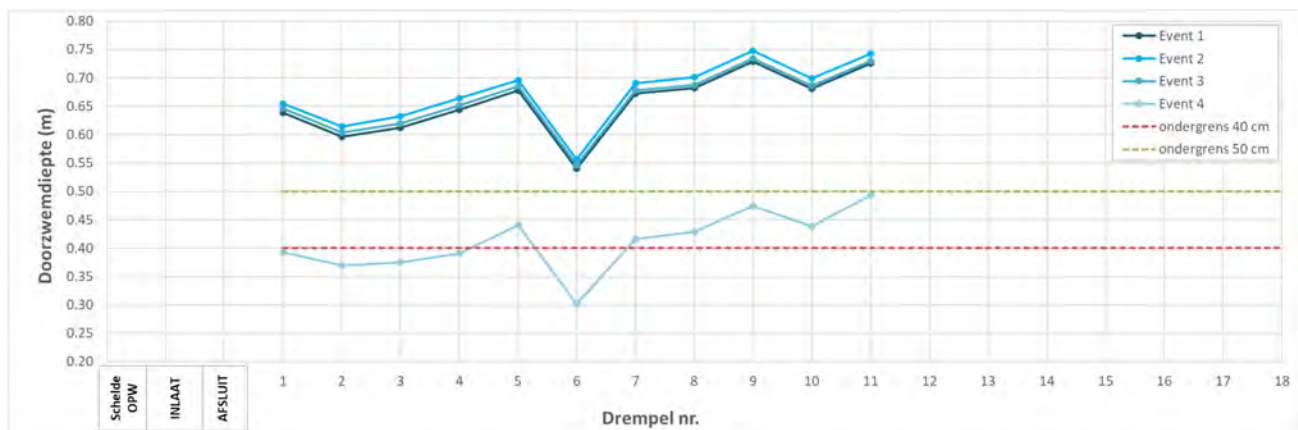
Voor de passeerbaarheid van de drempels worden zowel de doorzwemdiepte en -breedte, als de stroomsnelheden over de drempel geëvalueerd.

#### 4.3.1 Doorzwemdiepte en -breedte

In de ontwerpstudie werd voor de minimale doorzwemdiepte op korte afstand als richtlijn een diepte van minimaal 50 cm vooropgesteld (Visser et al., 2017). Aangezien rekening moest worden gehouden met een maximale opwaartse waterpeildaling van 20 cm werd een ontwerpdiepte bij streefpeil van 70 cm aangehouden.

In principe betekent dit dat in strikte zin niet voldaan kan worden aan de minimale ondergrens van 50 cm bij peildaling van 20 cm wanneer gekeken wordt naar de waterdiepte vanuit het afwaarts waterpeil, dat zou dan namelijk 40 cm worden vanwege het verval over de drempel. Maar gezien het basisdebiet door de vispassage bij V-drempels 1:7 relatief sterk toeneemt bij grotere waterdieptes, zou een verdere verdieping bij streefpeil tot een minder optimaal groot basisdebiet leiden. Een te hoog basisdebiet geeft namelijk verhoogd risico op sluiting van de vispassage bij te lage beschikbare afvoer op de rivier. De waarde van 40 cm werd daarom gekozen als absolute ondergrens voor de doorzwemdiepte (ten opzichte van afwaarts peil) aangezien hogere ontwerpwaterdiepten in het midden van de V-vorm zouden leiden tot relatief hoge vispassagedebieten, wat vervolgens weer zou kunnen leiden tot een hoger sluitingspercentage van de vispassage in drogere perioden.

Figuur 48 geeft de doorzwemdiepte boven elke drempel, berekend als het verschil tussen enerzijds het gemiddelde van de waterpeilen gemeten in het op- en afwaartse bekken, en anderzijds het drempelpeil van de drempel. Met de stippellijnen zijn de twee maatgevende waarden voor de ondergrens van minimale waterdiepte weergegeven, namelijk 50 cm (richtlijn) en 40 cm (absolute ondergrens).



Diepste punt V drempel nr. 1 -7 DTM 2022; drempel nr. 8 - 11 DTM 2019

Figuur 48 – Doorzwemdiepte ten opzichte van het diepste punt van de V

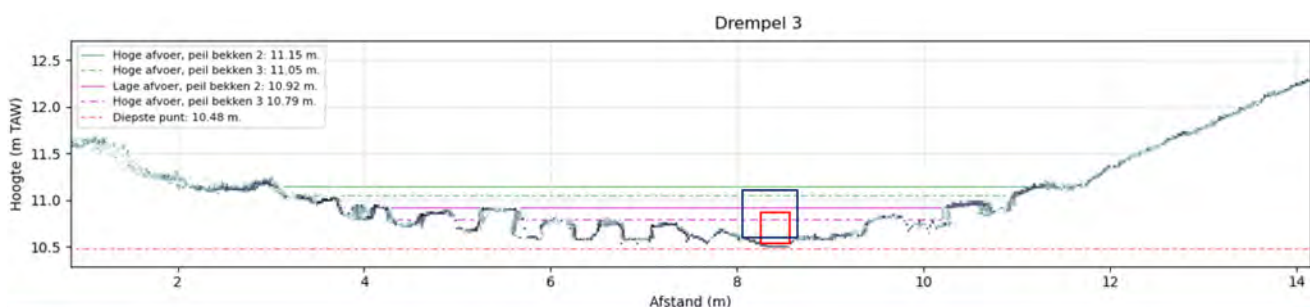
Uit Figuur 48 blijkt dat in de streefpeilsituatie alvast drempels 1 t.e.m. 13 voldoen. Bovendien kan redelijkerwijs worden aangenomen dat, aangezien in bekken 12 het waterpeil nog slechts een 16-17 cm verschilt van het afwaartse streefpeil in de Bovenschelde (i.c. +10.11 m TAW), en dit verval over nog 5 drempels wordt verspreid, de doorzwemdiepte boven de afwaartse drempels 14 t.e.m. 18 ook voldoende hoog is.

In de situatie streefpeil – 20 cm bedraagt de maximale doorzwemdiepte overheen drempel 1 tot en met drempel 6 35 à 39 cm, met een minimum van 30 cm boven drempel 6, wat lager is dan de vooropgestelde minimale waarde van 40 cm; voor drempel 5 en vanaf drempel 7 t.e.m. drempel 11 ligt de doorzwemdiepte weliswaar boven de minimale waarde van 40 cm maar blijft ze onder de 50 cm. Het is duidelijk dat het opwaartse gedeelte van de vispassage te lage doorzwemdieptes kent boven de drempels, in de situatie streefpeil – 20 cm.

Figuur 48 zegt niet alles over de beschikbare ruimte voor vissen; immers het zou kunnen dat de diepte (berekend tot het diepste punt van de V-vorm) wel voldoende groot is, maar dat dit in een te smalle sectie is. Daarom wordt ook gekeken naar de doorzweembreedte. Aangezien de doorzweembreedte onder normale omstandigheden meestal niet bepalend is in het geval van bekkentrappen werden in de ontwerpstudie enkel voorwaarden gegeven voor de minimale breedte tussen de stoorstenen, namelijk een minimale afstand tussen de stoorstenen van 30 cm. In ontwerpstudie voor vispassages op bevaarbare waterlopen wordt echter een minimale breedte over korte afstand van 50 cm aangehouden (Visser et al., 2023).

Net als bij de minimale doorzwembdiepte, worden dus twee waarden gehanteerd: minimaal 50 cm als richtlijn, en 30 cm als absolute ondergrens. De minimaal beschikbare doorzwembdiepte wordt ingeschat aan de hand van het opgemeten dwarsprofiel, waarbij het gemiddelde op- en afwaartse waterpeil van events 1, 2 en 3 wordt genomen voor de streefpeilsituatie, en het op- en afwaartse waterpeil voor de situatie streefpeil – 20 cm.

De doorzwembdiepte wordt vervolgens afgeleid door rond het diepste punt van het dwarsprofiel een rechthoek in te passen met een minimale diepte van 50 cm, zonder dat de rechthoek het dwarsprofiel snijdt. De breedte van de also bekomen rechthoek wordt als beschikbare doorzwembdiepte beschouwd. In de situatie streefpeil – 20 cm wordt zelfs de absolute ondergrens van 40 cm voor de diepte meestal niet bereikt (zie Figuur 48); dan wordt gezocht of een rechthoek met een minimale breedte van 50 cm en een zo groot mogelijke diepte ergens in de dwarssectie past. Wanneer dat niet lukt, wordt teruggevallen op de absolute ondergrens van 30 cm voor de breedte. Bij wijze van voorbeeld wordt in Figuur 49 het dwarsprofiel van drempel 3 getoond, met de twee typen “doorzwemvensters”.



Figuur 49 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 3. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm).

De visuele weergave van de bepaalde doorzwemvensters voor alle beschouwde drempels (1 t.e.m. 7) zijn te vinden in BIJLAGE A. Tabel 11 vat de resultaten samen. Er kan opgemerkt worden dat de weergegeven doorzwembdiepte nu lager is dan die uit Figuur 48. In streefpeilsituatie kan steeds een voldoende breed doorzwemvenster gevonden worden bij de minimaal vereiste waterdiepte van 50 cm, alleszins voor drempels 1 t.e.m. 5 en drempel 7. Bij drempel 6 moet naar de ondergrens van de doorzwembdiepte (40 cm) teruggerepen worden om voldoende doorzwembdiepte te verkrijgen (> 50 cm). In de situatie streefpeil – 20 cm kan nog voldaan worden aan de absolute ondergrens voor de doorzwembdiepte (30 cm), weliswaar steeds bij een te kleine doorzwembdiepte.

Tabel 11 – Inschatting doorzwemvensters.

Drempel	Streefpeilsituatie		Streefpeilsituatie – 20 cm	
	Doorzwemb- breedte [m]	Doorzwemb- diepte [m]	Doorzwemb- breedte [m]	Doorzwemb- diepte [m]
1	1.32	0.50	0.50	0.30
2	1.03	0.50	0.57	0.32
3	0.58	0.50	0.30	0.33
4	1.82	0.50	0.30	0.32
5	1.52	0.50	0.30	0.33
6	0.54	0.40	0.44	0.22
7	1.18	0.50	0.61	0.31



### 4.3.2 Stroomsnelheden

De stroomsnelheden over de drempels worden op twee manieren geëvalueerd. Enerzijds wordt gekeken naar de uit het verval afgeleide maximaal optredende snelheid over de drempel, en anderzijds naar het gemeten snelheidsprofiel in de dwarsdoorsnede van de twee maatgevende drempels (nr. 1 en 5).

#### Berekende snelheden op basis van het gemeten verval

Bij verwaarlozen van de snelheidshoogte in het bekken wordt de maximale stroomsnelheid overeen de drempel  $v_{max,th}$  [m/s] als volgt afgeleid uit het verval:

$$v_{max,th} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \tag{1}$$

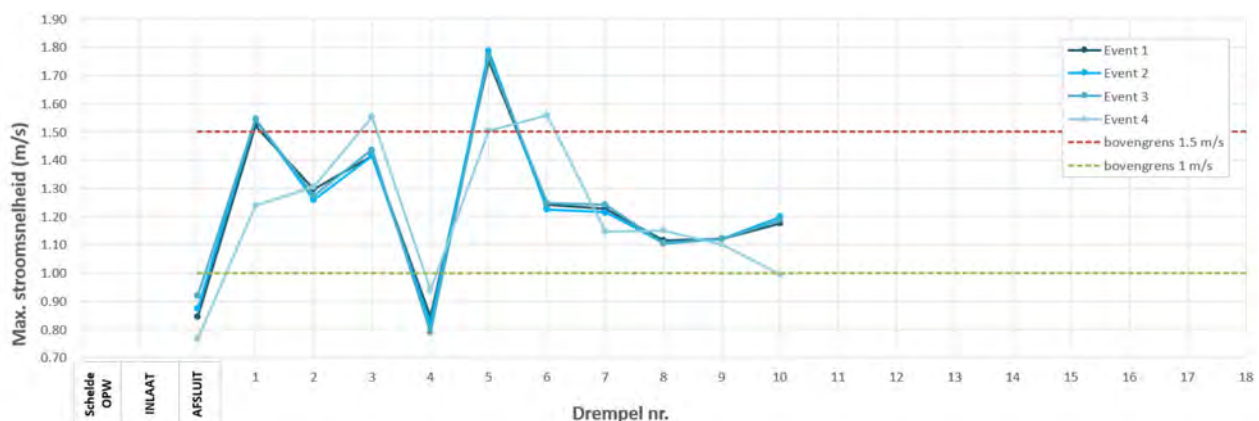
Met:

- $g$  = Valversnelling = 9.81 m/s<sup>2</sup> [m/s<sup>2</sup>]
- $\Delta h$  = hydraulisch verval over de drempel [m]

Dit aspect van passeerbaarheid is een direct gevolg van het hydraulisch verval over de drempels, zoals besproken in paragraaf 4.2. De toelaatbare bovengrens van het hydraulisch verval hangt – uiteraard – af van de toelaatbare stroomsnelheid.

De toelaatbare stroomsnelheid over de drempel hangt af van de zwemcapaciteit van de doelsoorten. In de ontwerpstudie werd op basis van de doelsoorten een sprintsnelheid van 1 à 1.5 m/s aangehouden. Dit is de maximale snelheid die vissen korte tijd kunnen aanhouden bij bijvoorbeeld het nemen van een hindernis. Hoewel dit een toelaatbare range aangeeft, is de maximale stroomsnelheid onder normale omstandigheden (lees bij op- en afwaarts streefpeil) eerder dicht tegen 1 m/s maximaal om zo voldoende bufferruimte over te houden voor de effecten van waterpeilfluctuaties. Ook wanneer een vispassage uit relatief veel drempels bestaat (bijv. meer dan circa 10) is het beter om eerder te richten naar de 1 m/s aangezien vissen dan ook veel hindernissen achter elkaar moeten nemen.

Figuur 50 toont de berekening per drempel en per event. Merk op, dit zijn dus geen gemeten waarden maar snelheden afgeleid uit het hydraulische verval (zie ook Figuur 46).



Figuur 50 – Berekende maximale stroomsnelheid over de drempels op basis van het gemeten hydraulische verval.

Bij streefpeilsituatie wordt meteen duidelijk dat drempels 1 en 5 te hoge maximale stroomsnelheden (> 1.5 m/s) vertonen, wat logischer wijze overeenkomt met de te hoge hydraulische vervallen (zie Figuur 46). De andere drempels blijven wel onder de uiterste bovengrens van 1.5 m/s, maar liggen (op drempel 4 na) allemaal boven 1 m/s. Drempels 6 t.e.m. 10 vertonen ietwat lagere stroomsnelheden. Alvast dit segment van de vispassage lijkt te voldoen aan het criterium om zo dicht mogelijk tegen de lagere bovengrens te liggen voor een groter aantal bekkens. De opeenvolgende drempels 1 t.e.m. 5 daarentegen kunnen moeilijk zijn voor sommige soorten om te passeren. Ten slotte kan opgemerkt worden dat er weinig marge lijkt te zijn om een situatie met hogere peilen dan streefpeil op te vangen, aangezien de stroomsnelheden reeds aan de hoge kant zijn.

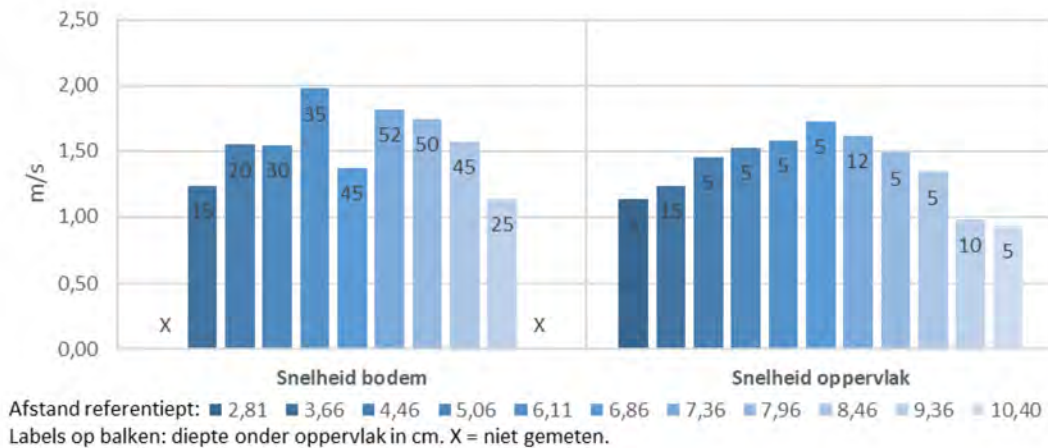
Bij de situatie streefpeil – 20 cm vertonen drempels 3, 5 en 6 te hoge stroomsnelheden. Dit toont aan dat een situatie met hogere opwaartse peilen, en dus een groter debiet door de vispassage, op drempelniveau niet per se nadeliger hoeft te zijn qua stroomsnelheden. Het verschil in kritische drempels tussen streefpeil en streefpeil -20 cm valt mogelijks te verklaren door de vormgeving van de drempels. De invloed van de vormgeving van de drempels zorgt er waarschijnlijk ook voor dat drempels 7 t.e.m. 9 zeer gelijkaardige stroomsnelheidswaarden vertonen ten opzichte van de situatie bij streefpeil (event 1 t.e.m. 3), ondanks het verschil in debiet. Het hydraulisch verval over drempels blijft dan ook nagenoeg gelijk in elk van de events (zie Figuur 46).

#### Stroomsnelheidsmetingen boven drempel 1 en 5

O.b.v. de puntsnelheidsmetingen (zie paragraaf 3.5) kan een beeld verkregen worden van de variatie in het snelheidsprofiel overheen een V-vormige breukstenen drempel. Figuur 51 toont de metingen boven drempel 1 bij streefpeilsituatie.

Een eerste observatie: de theoretisch maximaal optredende stroomsnelheid voor het gemiddeld verval tijdens de puntmetingen (i.c. 12 cm) werd berekend op 1.54 m/s, wat lager is dan sommige gemeten waarden. Voornamelijk op enkele punten net boven de drempel worden merkkelijk hogere snelheden opgemeten tot en met zelfs een uitschieter tot 2.0 m/s. Tijdens de puntsnelheidsmetingen schommelde het verval tussen 10 à 14 cm, de theoretisch maximale snelheid moet dus in principe op het grootste verval berekend worden aangezien elke puntmeting slechts over een korte periode liep. Dit geeft een theoretisch maximale waarde van 1.66 m/s, wat nog steeds lager is dan sommige opmetingen. Bij een hydraulische scherpe overlaat neemt de snelheid boven de overlaat naar boven in de waterkolom af omwille van de afname van de druk. Het is bijgevolg logisch dat de snelheid tussen de stenen hoger kan zijn dan de snelheid onder het wateroppervlak. Het is evenwel niet duidelijk wat de verklaring is dat de opgemeten bodem nabije snelheid hoger is dan de theoretische maximale snelheid.

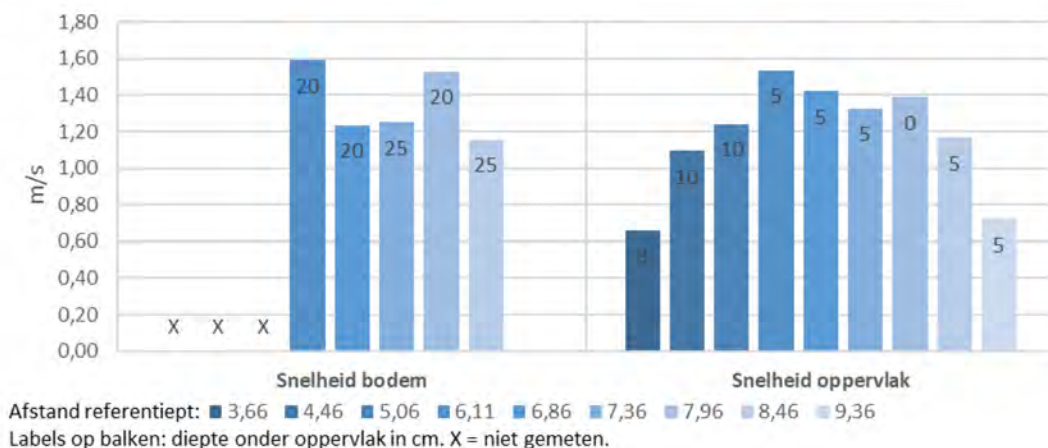
De snelheid zowel dicht bij de bodem als aan het oppervlak is nagenoeg overal > 1 m/s, op veel punten zelfs > 1.5 m/s. Een afname naar de oevers toe is duidelijk zichtbaar. Wellicht dat dicht tegen de oevers snelheden < 1 m/s optreden – daar is echter niet kunnen gemeten worden.



Figuur 51 – Gemeten stroomsnelheid t.h.v. drempel 1, bij streefpeilsituatie.. Verschil opwaarts waterpeil en diepste punt bedraagt 69 cm, verval over de drempel bedraagt 12 cm.

Figuur 52 geeft de gemeten stroomsnelheden boven drempel 1 in de situatie streefpeil – 20 cm. De theoretisch maximale stroomsnelheid werd berekend op 1.24 m/s (gemiddeld verval 8 cm). Rekening houdend met een schommeling tot 2 cm, is de theoretische limiet eerder 1.4 m/s; ook nu weer worden hogere waarden aangetroffen. Net als bij streefpeilsituatie worden dicht bij de bodem gelijkaardige (en soms hogere) stroomsnelheden gemeten dan aan het oppervlak. Algemeen zijn de stroomsnelheden wat lager dan in streefpeilsituatie, maar ondanks de reductie van het verval van 12 cm naar 8 cm zijn de waarden nog steeds hoog, meestal > 1 m/s; dicht tegen de oevers en aan het oppervlak worden wel lagere snelheden aangetroffen.

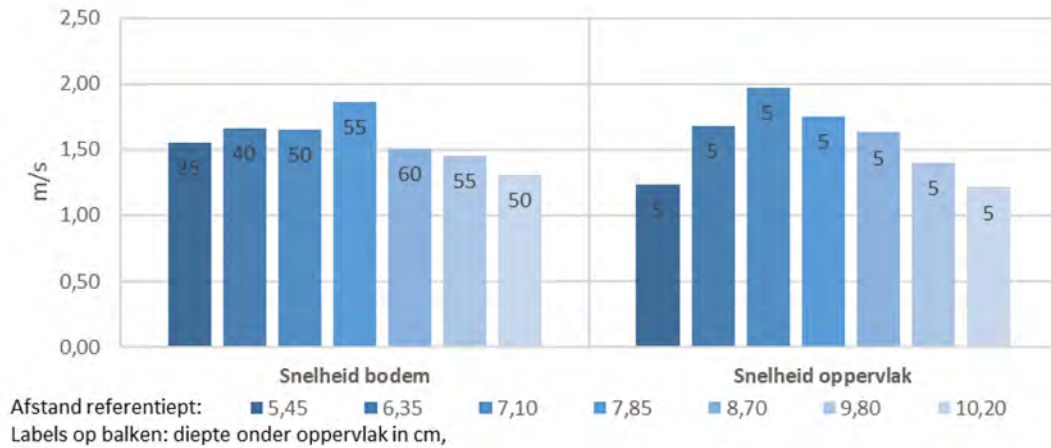
Qua stroomsnelheden lijkt deze situatie beter passeerbaar dan de streefpeilsituatie. Hierbij dient opgemerkt te worden dat een situatie met verlaagd opwaarts peil in principe slechts een beperkte periode in de tijd optreedt; de stuw tracht immers steeds het streefpeil te handhaven.



Figuur 52 – Gemeten stroomsnelheid t.h.v. drempel 1, bij situatie streefpeil – 20 cm. Verschil opwaarts waterpeil en diepste punt bedraagt 41 cm, verval over de drempel bedraagt 8 cm.

In Figuur 53 worden de opgemeten stroomsnelheden getoond boven drempel 5 bij streefpeilsituatie. De theoretisch maximale snelheid werd berekend op 1.75 m/s (gemiddeld verval 16 cm); rekening houdend met schommelingen tussen 14 à 18 cm komt dit op 1.88 m/s. Eén waarde hoger dan deze theoretische limiet wordt teruggevonden, met al bij al een beperkte overschrijding (oppervlak op 7.10 m: 1.97 m/s).

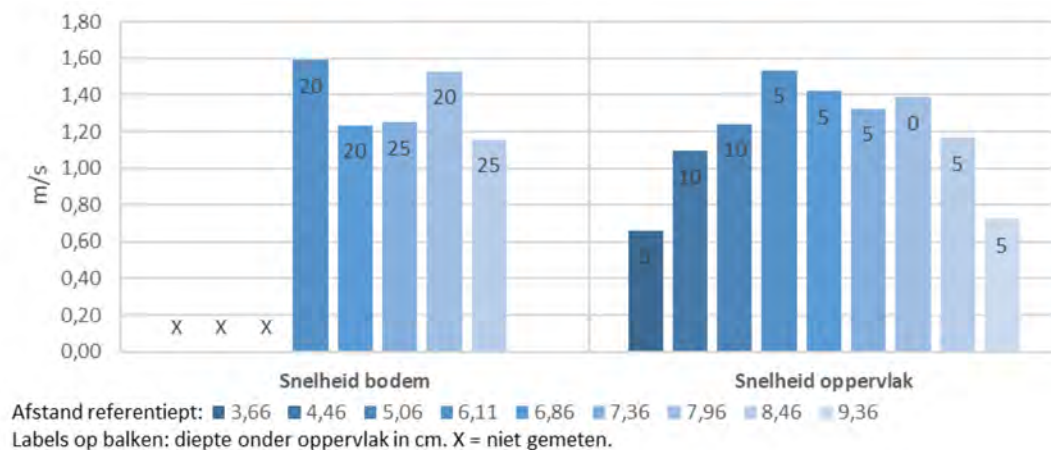
Net als bij drempel 1 worden bij de bodem gelijkaardige of zelfs grotere snelheden opgemeten dan aan het oppervlak. Alleszins, naar passeerbaarheid toe liggen de stroomsnelheden aan de hoge kant (schommelend rond 1.5 m/s), en dit op de meeste locaties in het bemeten profiel. Naar de oevers toe dalen de stroomsnelheden aan het oppervlak.



Figuur 53 – Gemeten stroomsnelheid t.h.v. drempel 5, bij streefpeilsituatie. Afstand is uitgedrukt t.o.v. het referentiepunt op linkeroever. Verschil opwaarts waterpeil en diepste punt bedraagt 71 cm, verval over de drempel bedraagt 16 cm.

Figuur 54 ten slotte toont de opgemeten stroomsnelheden bij drempel 5 in de situatie streefpeil – 20 cm. De theoretisch maximale snelheid werd berekend op 1.5 m/s (gemiddeld verval 12 cm); rekening houdend met schommelingen in het verval van +/- 2 cm wordt een theoretisch maximale snelheid van 1.66 m/s verwacht. Deze keer liggen alle gemeten waarden onder deze theoretische limiet. De snelheid neemt af t.o.v. streefpeilsituatie, en ligt op de meeste punten onder 1.5 m/s.

De minder hoge snelheden zijn gunstig voor de passeerbaarheid, met die kanttekening dat de situatie streefpeil – 20 cm in principe relatief weinig voorkomt.



Figuur 54 – Gemeten stroomsnelheid t.h.v. drempel 5, bij situatie streefpeil – 20 cm. Afstand is uitgedrukt t.o.v. het referentiepunt op linkeroever. Verschil opwaarts waterpeil en diepste punt bedraagt 45 cm, verval over de drempel bedraagt 12 cm.

Bij de snelheden nabij het oppervlak is er een duidelijke kern waarneembaar met een afname van de snelheid naar de oevers toe. De maximale snelheid nabij het oppervlak is hierbij gelijk of net hoger dan de theoretische maximale snelheid. Het verloop van de bodem nabij de snelheid is grilliger maar in alle gevallen vrij hoog. Er is dus geen sprake van een 'rustige' doorgang op ca. 20 cm boven de bodem. Bij de locaties met iets lagere snelheid spelen vermoedelijk vormeffecten van de stoorstenen. Bij de locaties met hogere snelheid is de snelheid hoger dan de snelheid opgemeten aan het wateroppervlak tot zelfs op sommige punten beduidend hoger dan de theoretische maximale snelheid. Een mogelijke verklaring hiervoor is het niet meenemen van de snelheidshoogte in de bepaling van de maximale snelheid.

#### 4.3.3 Samenvatting

Bij streefpeilcondities wordt op alle drempels voldaan aan de richtlijnen voor het minimale doorzwemvenster: er blijft op alle drempels een minimale doorzwemdiepte van 50 cm (in midden V-vorm) en voor een diepte van 50 cm een minimale breedte van circa 0,5 tot 1,5 m. Deze breedte is afhankelijk van de werkelijke vormgeving van de drempel (de 'V-vorm' en plaatsing stoorstenen).

Bij een daling tot 20 cm onder streefpeil zakken de beschikbare waterdieptes boven de opwaartse zes drempels tot onder de richtlijn van minimaal 50 cm en daalt deze voor sommige drempels zelfs tot onder de ondergrens van minimaal 40 cm waterdiepte. Ook de beschikbare doorzwembreedtes nemen daarbij af tot circa 30 cm (= breedte beschikbaar tussen de stoorstenen). In het ondergrensscenario kan dus niet voldaan worden aan de criteria voor minimale waterdiepte en zijn ook de doorzwembreedte beperkt.

Stroomsnelheden boven de vijf meest opwaartse drempels liggen in beide maatgevende scenario's (streefpeilsituatie en streefpeil – 20 cm) relatief hoog met een gemiddelde van 1,3 m/s. Drempels 1 en 5 bleken meest kritisch en werden uitvoeriger bemeaten/ geanalyseerd. Op deze drempels lagen stroomsnelheden in de as tussen de circa 1,7 a 2 m/s, wat hoger is dan de bovengrens van de sprintsnelheid van de doelsoorten (1 tot 1,5 m/s). Aan de zijkanten van de drempels liggen stroomsnelheden iets lager maar nog altijd rond de 1 m/s. Hierbij wordt opgemerkt dat de gemeten stroomsnelheden in de as hoger liggen als men zou verwachten op basis van het hydraulische verval dat er op dat moment over de drempels werd gemeten.

## 4.4 Passeerbaarheid bekkens

In paragraaf 4.3.2 is de vispasseerbaarheid beoordeeld op basis van snelheden over de drempels. Daarnaast hebben de snelheid en het stroompatroon (recirculatiepatroon) in de bekkens ook invloed op de passeerbaarheid. De bekkens hebben als hoofdtaak het dissiperen van energie en het creëren van luwe zones waar vissen tussentijds kunnen rusten voordat ze over de drempel naar het volgende bekken zwemmen.

#### 4.4.1 Doorzwemdiepte en -breedte

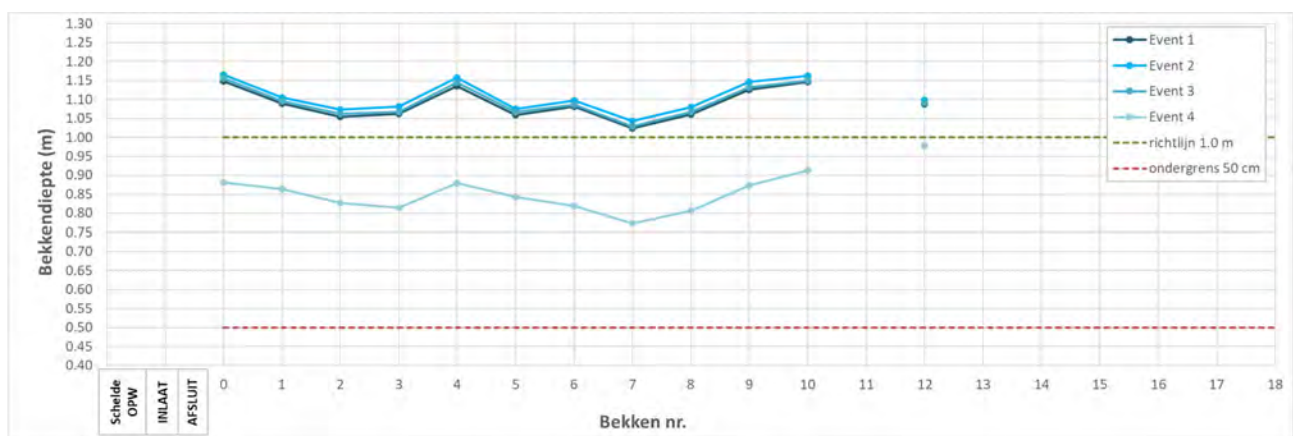
De ondergrens voor minimale waterdiepte op korte afstand is 50 cm (zie paragraaf 4.3.1). Deze minimale diepte wordt in kleinere waterlopen ook voorgeschreven voor nevengeulen (AMINAL 2005). Echter in bekkenpassages moet ook rekening worden gehouden met het risico op predatie. Daarnaast dienen in bekkens ook voldoende rustzones met lagere stroomsnelheden te zijn om te kunnen rusten na het nemen van de hindernissen. Ook heeft het van het oogpunt van vismigratie een voordeel om de waterdieptes in de vispassage niet teveel te laten afwijken van de waterdieptes in de waterloop waarin deze wordt toegepast.

Daarom werd er voor de minimale waterdiepte in bekkenpassages in Visser et al. (2023) een richtlijn voor de minimale waterdiepte in bekkens toegepast van 1 tot 1,5 m. Hierbij richt de bovengrens van 1,5 m zich meer op het type vertical slot vanwege de relatief kortere bekkenlengtes, terwijl de ondergrens van 1 m eerder bedoeld is voor bekkentrappen met relatief grotere bekkenlengtes. In het bekkentrap ontwerp wordt tevens rekening gehouden met de situatie van een gesloten vispassage (vanwege o.a. peilbeheer). Daarom werd er ook in het ontwerp te Kerkhove een minimale drempelhoogte (= diepste punt V ten opzichte van opwaartse bekkenbodem) van 0,5 m toegepast (Visser et al., 2017). Dit zorgt ervoor dat er bij een gesloten vispassage nog altijd de minimale waterdiepte van 0,5 m wordt behouden en vissen dus niet droogkomen te liggen en sterven.

Op basis van het voorgaande worden de waterdieptes in de bekkens geëvalueerd op twee richtlijnen: 1 m als wenselijke richtlijn en 0,5 m als absolute ondergrens. Bij de metingen tijdens de meetcampagne in 2022 kon de bekkenbodem niet apart worden opgemeten omwille van het aanwezige water, en kan dan dus ook niet uit de 3D Laser Scanning afgeleid worden. In Figuur 55 wordt daarom de bekkendiepte voor elk event berekend ten opzichte van de bekkenbodem zoals bepaald uit de terreinopmeting van 22/10/2019, zie Tabel 6.

Uit de figuur kan afgeleid worden dat de waterdiepte in de bekkens altijd ruim boven de minimale ondergrens van 50 cm blijven, en in de streefpeilsituatie ook boven de richtlijn van 1 m waterdiepte. Enkel bij de situatie van streefpeil – 20 cm zakken waterdieptes onder de richtlijn van 1m, maar blijven met een gemiddelde van circa 85 cm waterdiepte nog altijd ruim boven de absolute ondergrens van 50 cm.

Uit de figuur kan opgemaakt worden dat voor de streefpeilsituatie de waterdiepte in elk bekken minstens 1 m bedraagt. Bij de situatie streefpeil – 20 cm varieert de diepte langsheen de bekkens tussen 75 en 90 cm. Zoals hierboven al aangehaald, kunnen de ondergrenswaarden hier allicht minder strikt geïnterpreteerd worden.



Figuur 55 – Bekkendiepte ten opzichte van de bekkenbodem zoals bepaald uit de terreinopmeting d.d. 22/10/2019.

#### 4.4.2 Stroomsnelheden en -patronen

De drempels in een bekkentrap worden aangelegd op een zodanige manier dat het diepste punt van de V-vorm afwisselend links en rechts in het drempelprofiel ligt, om zo een ‘meanderend’ stroompatroon te creëren. Dit stroompatroon zorgt in elk bekken voor een hoofdstroom en een recirculatiezone. De recirculatiezones vormen rustzones voor de vissen. Daarnaast zorgt deze zigzaggende beweging ook voor voldoende energiedemping.

De toelaatbare stroomsnelheid in de bekkens is lager dan deze over de drempels. Immers hier gaat het over een ‘langere afstand’ en de locatie voor de rustzones. Er moet dus gekeken worden naar de kruissnelheid van de vissen i.p.v. de sprintsnelheid. De kruissnelheid van de doelsoorten in de Bovenschelde ligt op 0,5 m/s.

Figuur 56 toont de stroomsnelheidsvectoren in de bekken 1, 5, en 6, bij enerzijds het scenario van het opwaartse peil gelijk aan streefpeil en anderzijds het scenario bij streefpeil – 20 cm. De zone in elk bekken, omhuld door de contour “0.0 m/s”, geeft een indicatie van de recirculatiezone (met terugstroom), vanaf die contour wordt de X-component van de stroomsnelheid negatief. Een eerste observatie is dat bij de stroming in bekken 1, bij streefpeilsituatie – 20 cm, de hoofdstroom zich centraal in het bekken bevindt, terwijl er tegen beide oevers een kleine recirculatiezone ontstaat.

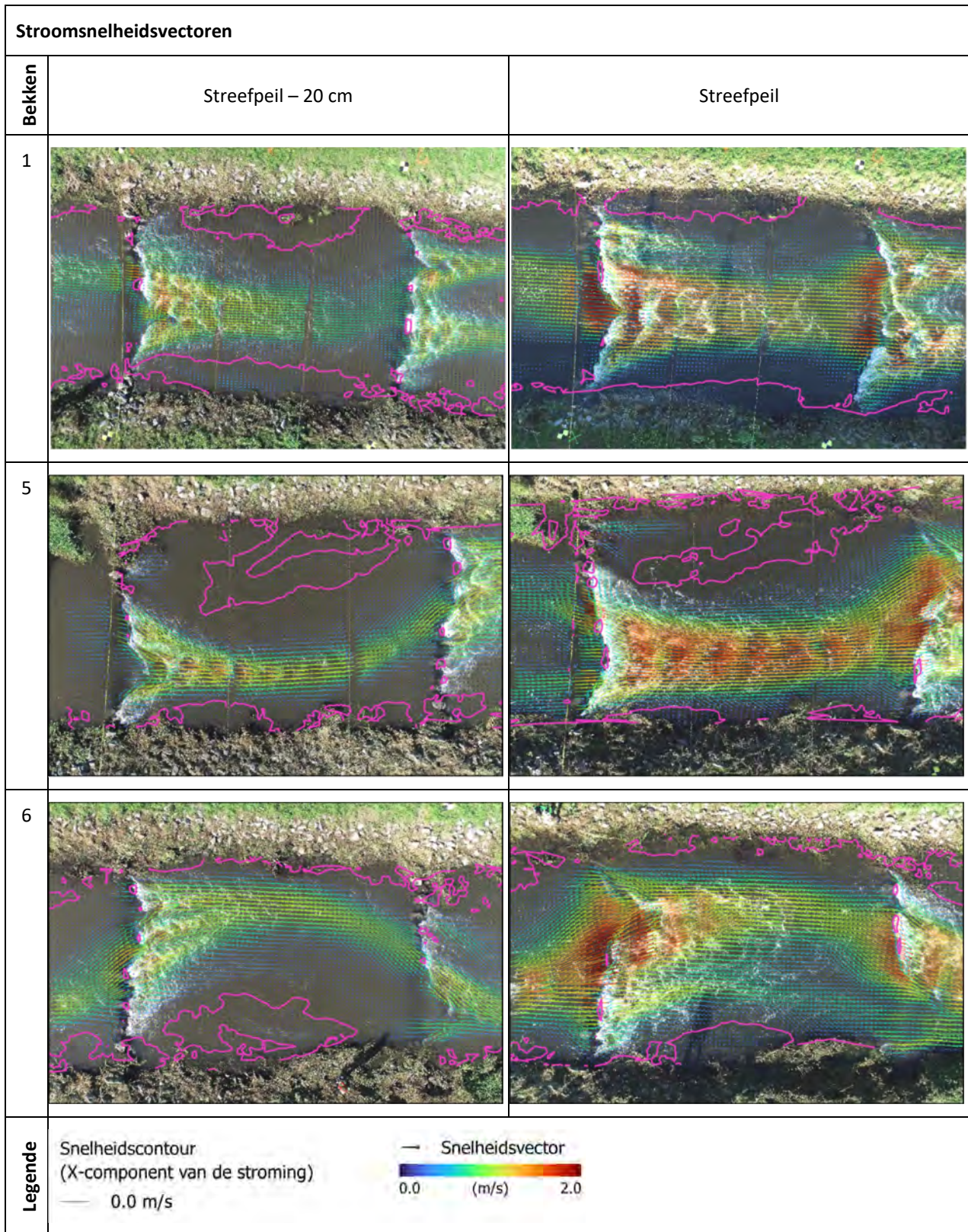
Figuur 57 maakt dit nog meer inzichtelijk, door de 0.5- en 0.0-contour te plotten bovenop een beeld van het bekken. In de situatie met laag opwaarts peil wordt duidelijk dat het laagste punt van drempel 1 (linkse in beeld) wel asymmetrisch ligt, maar dat drempel 2 (rechts in beeld) eigenlijk twee punten heeft waarlangs water wegstroomt. Hierdoor moet de stroming in het bekken zich verdelen over deze twee punten, en kan de bocht in de stroming zich niet instellen. Wat allicht ook meespeelt, is dat drempel 1 de meest opwaartse drempel is, en dus geen andere drempel heeft die een asymmetrische aanstroming kan ‘opleggen’, die mogelijks zou doorwerken in het bekken. Deze asymmetrische aanstroming is wel duidelijk zichtbaar ter hoogte van drempel 6 (zie Figuur 57, bekken 5 en 6), en zet zich door in het afwaartse bekken. De contourplots van bekken 5 en 6 tonen wél een duidelijke recirculatiezone met lage stroomsnelheden.

Nog bij streefpeilsituatie – 20 cm (Figuur 58) blijkt uit de stroomsnelheidscontouren dat de stroomsnelheid aan het oppervlak in de kern van de hoofdstroom, in alle drie de beschouwde bekken, tussen 1 en 1.5 m/s blijft (belangrijk in relatie tot sprintsnelheid). Weg van de kern, maar nog steeds in de hoofdstroom, worden stroomsnelheden  $\leq 0.5$  m/s gevonden (belangrijk in relatie tot kruissnelheid). Hierbij geldt de opmerking dat het om oppervlakte-snelheden gaat.

Bij streefpeilsituatie worden, in bekken 1, de stromingsluwe zones tegen beide oevers verder “plat gedrukt” (zie Figuur 56). De hoofdstroom blijft centraal liggen, en ook afwaarts drempel 2 blijven de twee uitstroompunten zichtbaar (Figuur 57). In tegenstelling tot de situatie met laag opwaarts peil komt nu ook opwaarts drempel 1 de stroming centraal toe. In bekken 5 blijft een duidelijke recirculatiezone bestaan, terwijl deze in bekken 6 tegen de rechteroever wordt gedrukt (gelijkaardig aan wat in bekken 1 gebeurt).

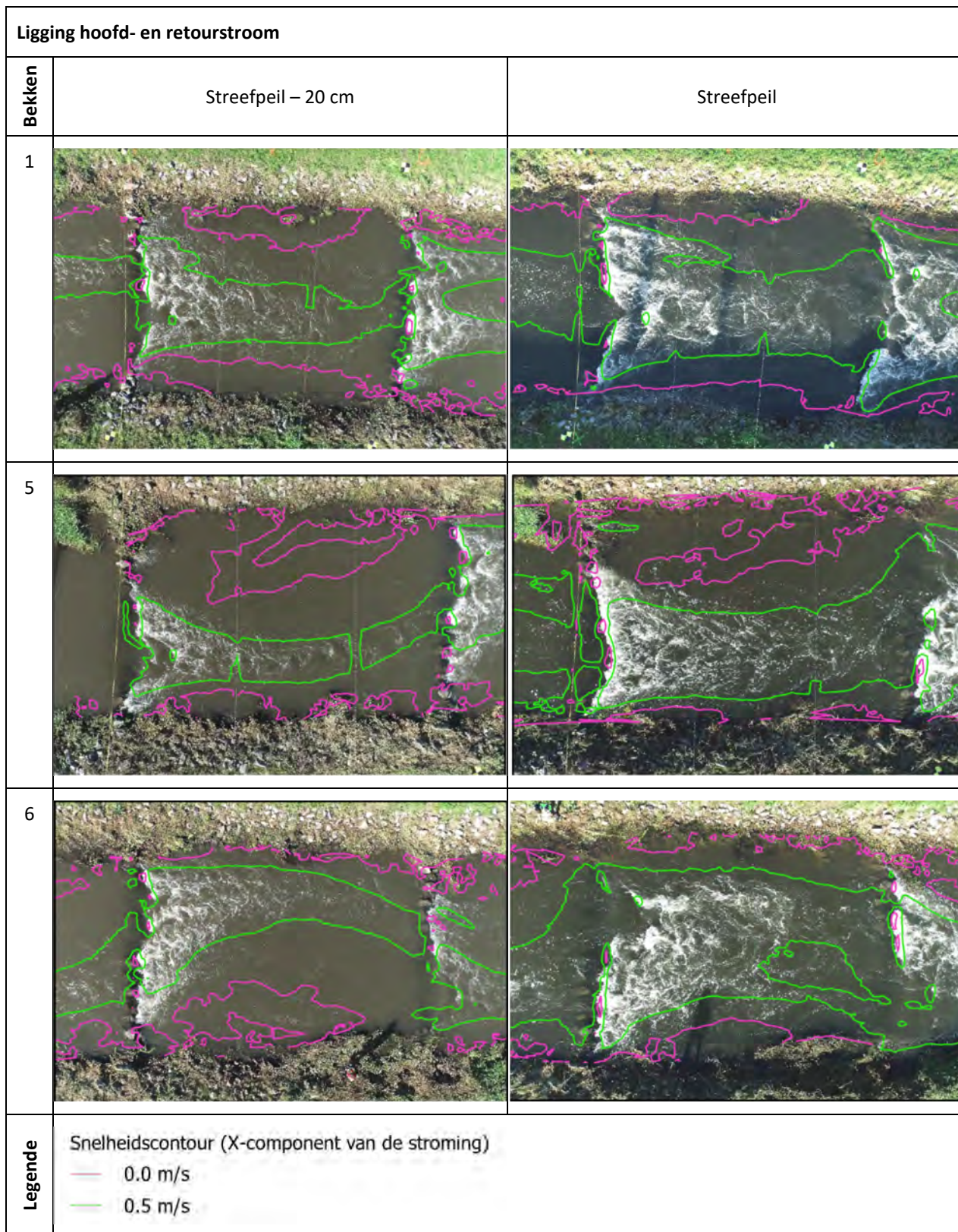
Het belang van de geometrie van een afwaartse drempel voor het bekomen van een gebogen hoofdstroom in een bekken wordt duidelijk bij bekken 5. Hoewel in de streefpeilsituatie opwaarts drempel 5 twee stromen toekomen (Figuur 57), wordt in het afwaartse bekken toch een gebogen hoofdstroom waargenomen (zie Figuur 56). Echter ook de opwaartse drempel beïnvloedt het stromingspatroon in een bekken. Zo kan opgemerkt worden dat, hoewel gesplitst, de toekomende stroming aan drempel 5 al een zekere hoek maakt ten opzichte van de drempel, wat er zeker toe bijdraagt dat de hoofdstroom gebogen wordt. De invloed van de opwaartse drempel wordt ook duidelijk wanneer gekeken wordt naar de stroomsnelheidsvectoren bij bekken 6 (Figuur 56). Daarin is te zien dat de stroming gesplitst wordt in twee stromen, die zich doorzetten tot aan drempel 7. Ook nu weer kan dit niet los gezien worden van de geometrie van deze afwaartse drempel, omdat ook bij de situatie met laag opwaarts waterpeil er duidelijk twee stromen zichtbaar zijn ter hoogte van drempel 7.

De stroomsnelheidscontouren van de streefpeilsituatie uit Figuur 58 tonen duidelijk stroomsnelheden boven 1.5 m/s in de kern van de hoofdstroom (bekken 5), en zeker bovenop de drempels (alle bekken). Bij bekken 1 en 6 zetten deze hoge stroomsnelheden zich niet door tot aan de volgende drempel, net omdat er hier stroomsplitsing plaats vindt. De zone met hoge stroomsnelheden ( $> 0.5$  m/s) neemt in het geval van bekken 6 nagenoeg de gehele breedte in. Bij bekken 1 is dit minder het geval, en zijn langs beide oevers duidelijk zones met lagere stroomsnelheden aanwezig. Bekken 5 ten slotte vertoont het meest uitgesproken hoofdstroom-retourstroom-patroon, met (zeer) hoge snelheden ( $> 1.5$  m/s) langsheen de gehele, relatief smalle, hoofdstroom (ca. helft van de bekkenbreedte). De relatief steile snelheidsgradiënt in dwarse richting betekent echter dat de hoofdstroom in dwarszin snel wordt opgevolgd door een zone met lage stroomsnelheden ( $< 0.5$  m/s) en zelfs een recirculatiezone, die voldoende breed blijft.

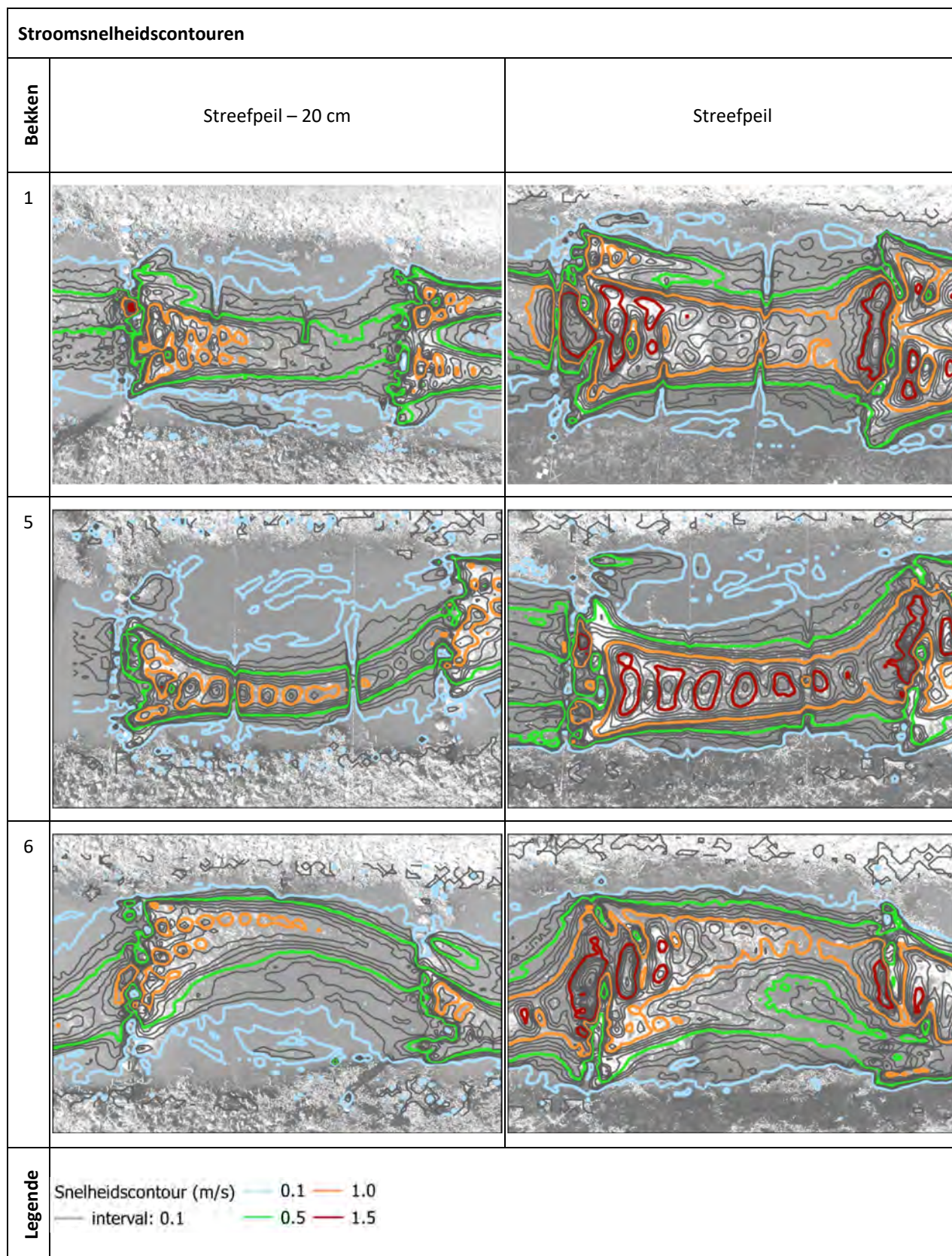


Figuur 56 – Stroomsnelheidsvectoren o.b.v. LSPIV in de beschouwde bekkens. De zone in elk bekken, omhuld door de contour “0.0 m/s”, geeft een indicatie van de recirculatiezone.





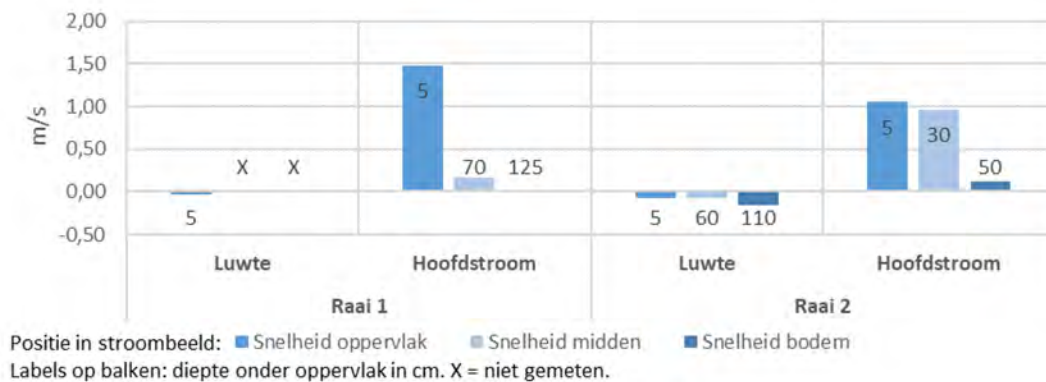
Figuur 57 – Ligging hoofd- en retourstroom. De zone in elk bekken, omhuld door de contour “0.0 m/s”, geeft een indicatie van de recirculatiezone.



Figuur 58 – Stroomsnelheidscontouren.

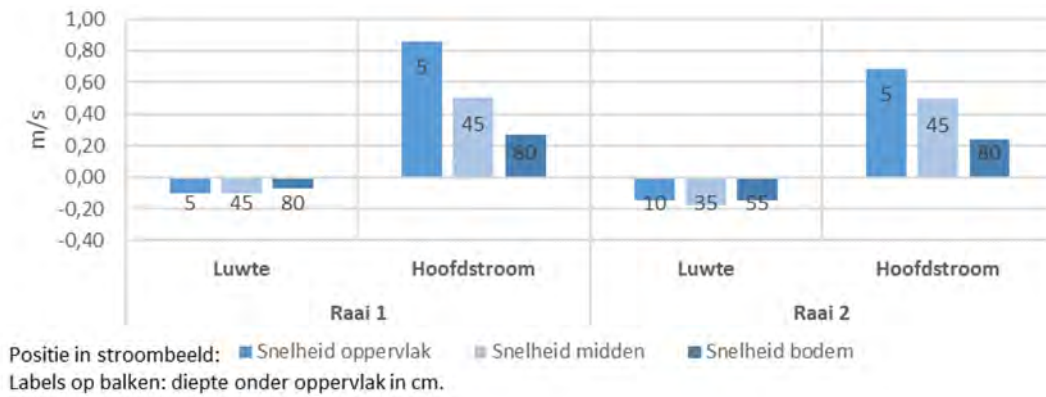
In de bekken afwaarts de drempels zijn eveneens puntmetingen uitgevoerd van de stroomsnelheid (zie paragraaf 3.5). Figuur 59 t.e.m. Figuur 62 tonen de resultaten. Merk op dat de waterdiepte in het bekken (110 cm) kleiner is dan de diepte van sommige meetpunten. Herinner dat de bodem van de bekken bepaald is o.b.v. de terreinopmeting van 22/09/2019. Gezien de grillige vorm van de bekkenbodem omwille van de breuksteen, en gezien de bodem werd bepaald aan de hand van één dwarssectie, hoeft een verschil in waterdiepte en diepte van de meetpunten niet te verbazen. In de metingen ligt raai 1 op ongeveer 1/3 van de bekkenlengte, raai 2 op ongeveer 2/3.

In bekken 1 bij streefpeilsituatie (Figuur 59) wordt aan het oppervlak in raai 1 nog een stroomsnelheid van 1.5 m/s opgemeten, maar dieper in de waterkolom (70 cm dieper) zakt de snelheid al tot 0.16 m/s. Tegen de bodem, op 125 cm diepte, is de snelheid nagenoeg nul (0.02 m/s). In raai 2 ligt de snelheid aan het oppervlak al lager (1 m/s). 30 cm dieper is de snelheid nog niet veel afgenomen, 50 cm dieper echter wel. Buiten aan de oppervlakte zijn de stroomsnelheden dus voldoende laag (< 0.5 m/s). In de luwe zone worden zeer lage snelheden opgemeten, 0.04 à 0.17 m/s, die bovendien een tegenstelde stromingszin hebben. De retourstroom is dus voelbaar over de gehele waterkolom.



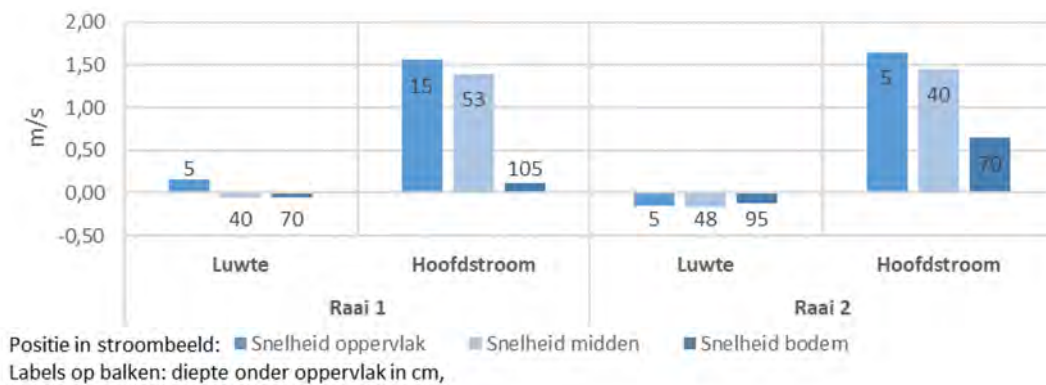
Figuur 59 – Gemeten stroomsnelheid in bekken 1, bij streefpeilsituatie. Waterdiepte in het bekken 110 cm.

In bekken 1 in de situatie streefpeil – 20 cm worden duidelijk lagere stroomsnelheden aangetroffen (< 1 m/s). Een opvallende vaststelling is dat in raai 1, op een diepte van 80 cm, en dus vlak bij de bodem, een hogere snelheid wordt aangetroffen in deze situatie dan op 70 cm diepte in streefpeilsituatie (een 40 cm boven de bodem). Dit kan erop wijzen dat, door de relatief ondiepere ligging van de bekkenbodem, deze laatste een grotere invloed heeft op het snelheidsprofiel dan wanneer een grotere waterdiepte beschikbaar is. Hoe turbulenter de stroming, hoe uniformer het snelheidsprofiel. Verderaf van drempel 1, in raai 2, worden op dezelfde diepte als in raai 1 systematisch lagere stroomsnelheden gevonden. De luwe zone heeft ook nu voldoende lage snelheden om als rustzone te fungeren. Omdat de retourstroom meer uitgesproken is dan in streefpeilsituatie (zie Figuur 57) worden hogere snelheden gemeten (0.07-0.18 m/s).



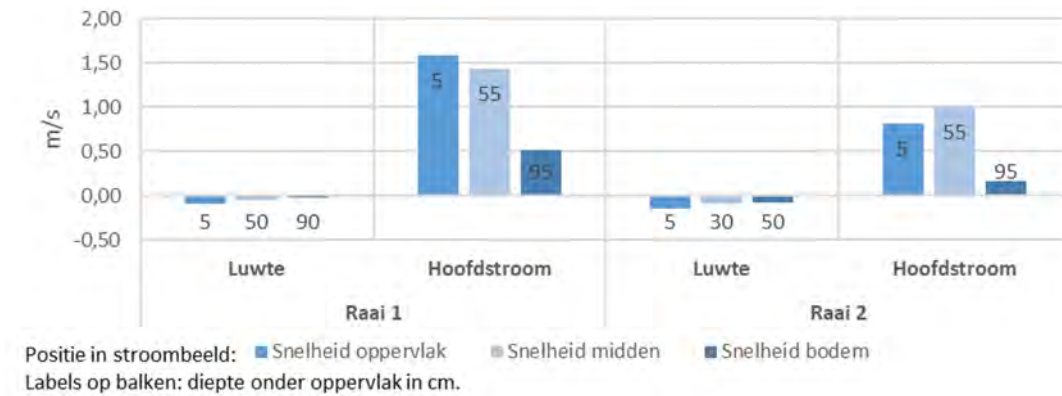
Figuur 60 – Gemeten stroomsnelheid in bekken 1, bij situatie streefpeil – 20 cm. Waterdiepte in het bekken 86 cm.

Figuur 61 geeft de resultaten voor bekken 5 in streefpeilsituatie weer. Zowel in raai 1 als in raai 2 worden hoge stroomsnelheden gemeten aan het oppervlak en op een zekere diepte. Dichter bij de bodem in raai 1 (105 cm) zakt de snelheid onder de vooropgestelde limiet van 0.5 m/s. In raai 2 wordt nog minstens tot voorbij de helft van de diepte (70 cm) een hoge snelheid aangetroffen (0.65 m/s); allicht dat dichterbij de bodem de snelheid voldoende laag wordt. In de luwe zone zijn de snelheden voldoende laag (0.12-0.17 m/s) over de gehele waterkolom. In raai 1 wordt nog een positieve snelheid opgemeten aan de oppervlakte. De diepere snelheden zijn wel negatief, maar kleiner dan in raai 2 (ong. 0.05 m/s). Dit werd ook teruggevonden in bekken 1.



Figuur 61 – Gemeten stroomsnelheid in bekken 5, bij streefpeilsituatie. Waterdiepte in het bekken 107 cm.

In Figuur 62 ten slotte worden de metingen getoond voor bekken 5 in de situatie streefpeil – 20 cm. Aan de oppervlakte en op 55 cm van de oppervlakte worden zeer gelijkaardige snelheden gevonden als in streefpeilsituatie (ca. 1.5 m/s). Op ong. 1 m van het oppervlak bedraagt de snelheid 0.52 m/s, terwijl dit in streefpeilsituatie slechts 0.12 m/s is. Dit is gelijkaardig aan wat werd waargenomen in bekken 1 (zie hoger). De bodemnabije snelheid op raai 1 in de kern van de stroming is namelijk lager bij streefpeil dan bij streefpeil – 20 cm. Zowel door de toename in debiet als door de toename van de verdringingsgraad bij hogere opwaarts peilen zal de kern van de jet verder weg van de drempel de bodem raken. Ook de zone met retourstroom is duidelijker ontwikkeld dan in streefpeilsituatie, de snelheid aan de oppervlakte in raai 1 is nu immers ook negatief.



Figuur 62 – Gemeten stroomsnelheid in bekken 5, bij situatie streefpeil – 20 cm. Waterdiepte in het bekken 84 cm.

De puntmetingen in beide raaien van beide bekken laten zien dat vooral in de bovenste lagen van de hoofdstroom hoge snelheden optreden, maar dat de stroomsnelheid duidelijk afneemt met de diepte. M.a.w. het snelheidsprofiel in de hoofdstroom vertoont een goed ontwikkeld snelheidsprofiel. In beide onderzochte bekken worden, in beide situaties, voldoende lage stroomsnelheden gevonden (< 0.5 m/s) om als passeerbaar te worden beschouwd, al is dat ter hoogte van de kern van de stroming pas (ongeveer) in het diepste kwart van de waterkolom. Ook de luwe zone heeft voldoende lage stroomsnelheden om als rustzone te fungeren.

#### 4.4.3 Samenvatting

Waterdieptes in de bekken zijn in beide bemeeten scenario's voldoende. Bij het scenario van opwaartse streefpeil ligt de waterdiepte in de meest kritische opwaartse 5 bekken gemiddeld rond de 1.1 meter, wat boven de richtlijn van minimaal 1 m is; bij het scenario streefpeil -20 cm wordt deze richtlijn niet gehaald (gemiddelde waterdiepte in dat geval rond 0.85 m), maar ligt nog altijd ruim boven de ondergrens van 50 cm.

Met oog op de stroomsnelheden wordt onderscheid gemaakt tussen de hoofdstroom (stroombaan met hogere stroomsnelheden tussen de diepste punten van de drempels) en de rustzones (recirculatiezones naast de hoofdstroom). In de hoofdstroom worden over de volledige lengte relatief hoge stroomsnelheden gemeten in de bemeeten bekken, waarbij stroomsnelheden tussen de 1 en 1,5 m/s liggen. Stroomsnelheden nemen wel af met de diepte. Hoewel stroomsnelheden in de hoofdstroom relatief hoog zijn, liggen stroomsnelheden in de naastgelegen recirculatiezones laag genoeg om te kunnen dienen als rustzones (tussen 0 en 0,2 m/s).

Een goed asymmetrisch ontwerp zorgt ervoor dat er één groter gebied met lagere stroomsnelheden ontstaat, terwijl bij een meer symmetrisch ontwerp er twee kleinere gebieden als rustzone aan weerszijden van de hoofdstroom ontstaan.

## 4.5 Passeerbaarheid instroom en afsluitconstructie

In de instroom worden twee knelpunten vastgesteld:

- Er treedt een te groot verhang op over de instroom door een te hoge bodemligging, wat voor lagere doorzwemdieptes op de opwaartse drempels zorgt, alsook in de instroom zelf.
- Het vuilrooster werkt momenteel als vuilvang doordat deze te ver in de instroom is geplaatst.

#### 4.5.1 Ondiepe instroom

Uit de analyse van de waterpeilmetingen werd in paragraaf 4.2 vastgesteld dat er een relatief groot en ongewenst verval over de instroom ontstaat. Dit wordt vooral veroorzaakt doordat de instroom te ondiep is. Vooral opwaarts in de instroom zijn zeer ondiepe delen te zien waar bij lagere waterpeilen zelfs stenen van de bodembescherming te zien zijn die door het wateroppervlak heen komen, zie Figuur 63. Het is dan ook de vraag of het opwaartse deel van de instroom mogelijk zelfs hoger ligt dan betonhoogte van de afsluitconstructie (er zijn hier geen metingen van bekend), wat ook de eigenlijke bodemhoogte van de instroom zou moeten zijn.

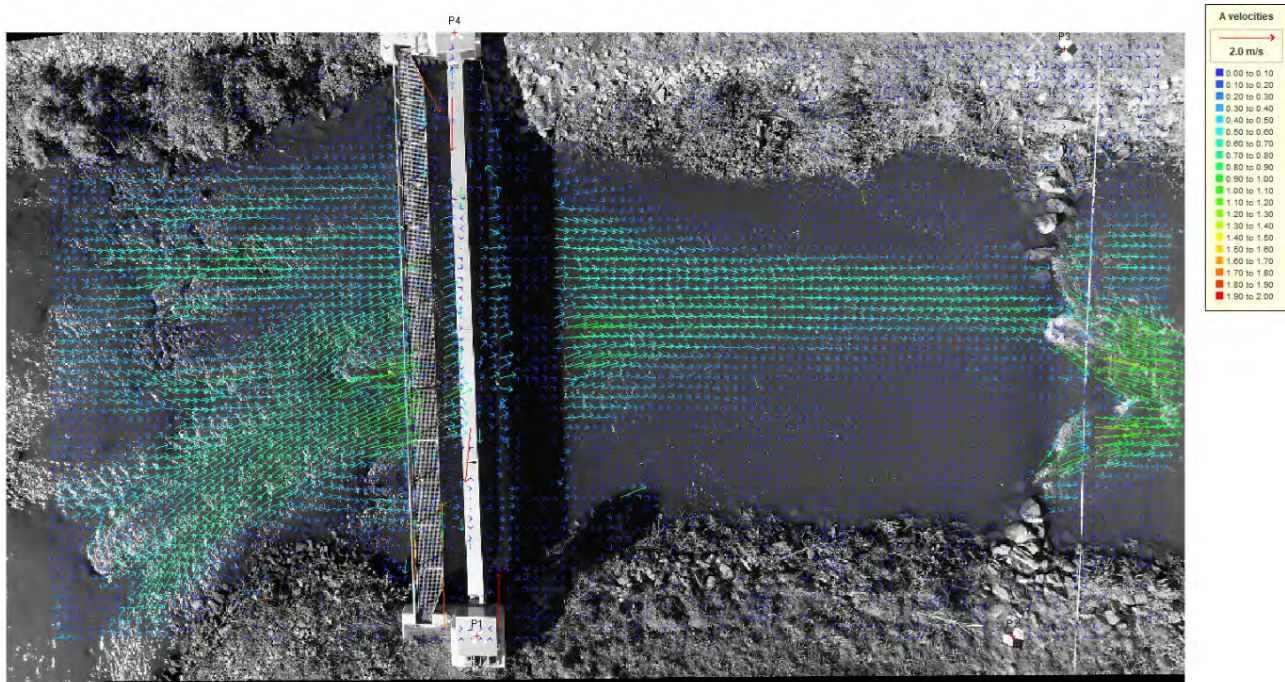


Figuur 63 – Ondiepte ter hoogte van de instroom (foto 6/10/2022).

Een LSPIV-verwerking van het stromingspatroon op 6/10 wordt gegeven in Figuur 66. Ook hierin valt op dat de stroming lokaal sterk verstoord wordt door de beperkte waterdiepte. De figuur toont een sterke stroming in de instroom komende vanuit de richting van de stuw. Dit is mogelijk doordat op het moment van de opname er geen debiet overheen de stuw ging. Bij een toename van het waterpeil en/of bij stroming overheen de stuw zal het stromingspatroon in de instroom wijzigen.

De stroomsnelheid in de instroom loopt op tot ca. 1.0 m/s. Dit zijn te hoge stroomsnelheden voor in de instroom aangezien deze eigenlijk ontworpen werd voor stroomsnelheden niet hoger dan circa 0,5 m/s (kruissnelheid doelsoorten). De combinatie van zeer beperkte doorstroombreedtes en relatief hoge stroomsnelheden zijn niet goed met oog op de passeerbaarheid. Hoe groot het effect op de migratiemogelijkheden van doelsoorten werkelijk is, kan alleen vastgesteld worden doormiddel van monitoring van de vissen zelf. Dit is in ieder geval een belangrijk aandachtspunt om verder te onderzoeken, naast de relatief hoge stroomsnelheden en beperkte dieptes bij lagere waterstanden op de vijf meest opwaartse drempels.

Bij vervolgotwerpen voor vispassages wordt aangeraden om wat betreft instroom en afsluitconstructie eerder te kiezen voor een smallere en diepere instroom dan een bredere ondiepe. Naast voordelen voor de passeerbaarheid heeft dit namelijk ook voordelen voor de werking van de afsluitconstructie. Een brede en dus lange hefschuif is eerder defect gevoelig. Zo bleek ook al uit een eerdere studie aan de nevengeulen in Asper en Oudenaarde dat de dubbele aandrijving van de huidige hefschuif (één aan enkel oever) meer gevoelig is voor schranken en daarmee defecten. Daarnaast heeft dit ook een bijkomend voordeel dat ook een minder lange drijfvuilbalk benodigd is, die dan mogelijk ook eenvoudiger meer opwaarts in de instroom geplaatst kan worden, zie volgende paragraaf.



Figuur 64 – LSPIV verwerking stromingspatroon instroom en bekken 0 6/10 13:18 – peil opwaarts 11.38 m TAW (=streefpeil – 8 cm)

#### 4.5.2 Vuilrooster

De huidige situering van het vuilrooster zorgt dat deze als een vuilvang werkt (zie foto's in paragraaf 3.7), wat niet alleen relatief veel onderhoud vergt maar ook kan zorgen voor opstuwning. In plaats van een rooster wordt in nieuwe ontwerpen beter gekozen voor een drijfvuilbalk helemaal opwaarts in de instroom. Als de instroom diep genoeg ontworpen wordt kan dit zowel een vaste als een drijvende balk zijn, maar in principe heeft een drijvende balk de voorkeur aangezien deze met waterpeil stijgingen mee stijgt waardoor er altijd zo veel mogelijk van de waterkolom beschikbaar blijft voor migratie. Een drijfvuilbalk dient altijd minimaal 15 cm in de waterkolom te steken om voldoende vuil te kunnen keren.

Een drijfvuilbalk wordt ook best helemaal opwaarts in de instroom geplaatst en zo parallel mogelijk aan de hoofdstroom op de rivier. Op deze manier wordt het drijfvuil zo efficiënt mogelijk weggeleid en buiten de vispassage gehouden. Op deze wijze is er ook zo goed als geen onderhoud nodig.

Tijdens de ontwerpstudie in 2016 kon het ontwerp van de afsluitconstructie en de instroom niet meer worden aangepast aangezien deze in een eerdere fase al waren vastgelegd. De ontwerpstudie uit 2016 richtte zich dan ook op het 'omvormen' van het oorspronkelijke ontwerp voor de vispassage (nevengeul) naar een bekkentrap. Dit was nodig vanwege ernstige erosie in de al eerder aangelegde en soortgelijke nevengeul te Asper.

Doordat de instroom niet meer kon worden aangepast was deze in het ontwerp al relatief ondiep (zie ook voorgaande paragraaf), namelijk 60 cm bij streefpeil (Visser et al., 2017). Aangezien ook de locatie van het vuilrooster al vastlag betekende dit dat er een compromis moest worden gevonden met oog op de hoogte van de onderkant van het rooster. In overleg met INBO werd gekozen om de onderkant van het rooster zo te plaatsen dat deze niet dieper dan 1/3 van de waterhoogte bij streefpeil in het water steekt. De onderkant van het vuilrooster zit daarbij op een hoogte van 11.26 m TAW, terwijl het streefpeil 11,46 mTAW is en het betonnen bodempeil ter hoogte van het rooster op 10,86 mTAW. Op deze wijze blijft er dus nog 40 cm passeerbare diepte onder het rooster beschikbaar, wat eigenlijk al niet voldoet aan de minimale doorzwemdiepte. Aan de andere kant betekent dit dat het rooster bij een peildaling van meer dan 20 cm niet meer in het water steekt en dus ook niet de minimale diepte van 15 cm haalt. Bij de metingen met een verlaagd opwaarts peil raakte de stroming het vuilrooster soms dan ook niet.

## 5 Debiet-waterhoogte-relatie drempels

Voor de bepaling van de debiet-waterhoogte-relatie wordt gebruik gemaakt van formules voor V-vormige overlaten. Deze formules bevatten een aantal coëfficiënten om rekening te houden met vormverliezen, aannames m.b.t. de hydraulische condities (verwaarlozen van aanstroomsnelheidshoogte en veronderstellen van hydrostatische doorsnede), en verdrinking. Deze coëfficiënten zijn behept met een onzekerheid. De formuleringen voor de debiet-waterhoogte-relatie overheen V-vormige drempels worden beschreven in paragraaf 5.1. Door invoegen van het opgemeten debiet en waterhoogte in deze formuleringen kunnen de coëfficiënten worden afgeleid, zie hiervoor paragraaf 5.2.

### 5.1 Formules

De formule voor een V-vormige overlaat wordt afgeleid startend van de formule van Poleni. Bij vrije uitstroming onder hydrostatische druk wordt de snelheid op een gegeven diepte volgens de formule van Poleni als volgt bepaald:

$$V_{(y)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot y}$$

Na integratie over de breedte en hoogte wordt een debiet bekomen:

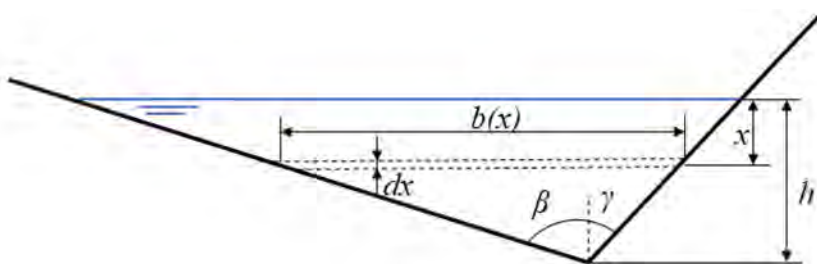
$$dQ_{(y)} = b_{(y)} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot y} \cdot dy$$

$$Q = \int_0^y b_{(y)} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot y} \cdot dy$$

Om rekening te houden met de snelheidshoogte in het opwaartse bekken en loslating van de stroming wordt nog de coëfficiënt  $C_d$  toegevoegd:

$$Q = C_d \cdot \int_0^h b_{(y)} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot y} \cdot dy$$

In geval van een V-vormige overlaat met rechte zijden, zie Figuur 65, is de verhouding tussen breedte en hoogte constant. Door vermenigvuldigen van de hoogte met de som van de tangens van beide hoeken,  $\beta$  en  $\gamma$ , wordt de breedte bekomen.



Figuur 65 – Asymmetrische V-vormige drempel verklaring symbolen.

Na bepaling van de breedte aan het oppervlak uit de hoogte wordt volgende vergelijking bekomen:

$$Q = C_d \int_0^{h_e} (h_e - x) \cdot (\tan \beta + \tan \gamma) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot x} \cdot dx$$



Na integratie wordt volgende relatie bekomen:

$$Q = C_d \cdot \left(\frac{4}{15}\right) \cdot \sqrt{2g} \cdot (\tan \beta + \tan \gamma) \cdot h_e^{2,5}$$

Bemerk dat de op deze wijze bepaalde formule overeenstemt met de formule voor een V vormige driehoekige overlaat uit (Bos, 1989):

$$Q = C_d \cdot \left(\frac{4}{15}\right) \cdot \sqrt{2g} \cdot \frac{B_c}{H_b} \cdot (h_e)^{2,5} \text{ [Bos, 1989]}$$

Met

- Bc      Breedte ter hoogte van waterlijn [m]
- Hb      Hoogte ten opzichte van waterlijn [m]

De formule van Ackers et al. (1978) wijkt hier enigszins van af:

$$Q = \left(\frac{4}{5}\right) \cdot C_{de} \cdot \sqrt{g} \cdot n \cdot (h_e)^{2,5} \text{ [Ackers et al., 1978]}$$

Invullen van  $n = \frac{B_c}{2H_b}$  in de formule van Ackers en herrekenen geeft:

$$Q = \left(\frac{4}{10\sqrt{2}}\right) \cdot C_{de} \cdot \sqrt{2g} \cdot \frac{B_c}{H_b} \cdot (h_e)^{2,5}$$

Bemerk dat bij gelijke Cd-coëfficiënt het debiet volgens de formule van Ackers *et al.* (1978) 7.6% hoger is ten opzichte van het debiet volgens Bos (1989). Dit verschil wordt gevonden in een verschillende uitwerking van de numerieke constante: (4/15) in Bos (1989) ten opzichte van 4/(10√2) in Ackers et al. (1978). De reden voor dit verschil is niet duidelijk. In deze studie wordt de voorkeur gegeven aan de formule uit Bos (1989) omdat dit een rechtstreekse afleiding betreft van de formule van Poleni.

Literatuurwaarden voor de coëfficiënt  $C_d$  in geval van V-vormige overlaten worden gegeven in Tabel 12.

Tabel 12 – Cd-coëfficiënten V-vormige overlaat voorontwerp studie vispassage Kerkhove.

Bron	type	Cd [-]	
(Bos, 1989)	balk (scherpe overlaat)	0.6	
	Driehoekige V-overlaat (1:2 bij 1:5)	0.66	
	Driehoekige V-overlaat (1:2 bij 1:2)	0.71	
(DVWK, 2002)	breuksteen	0.5-0.6	
	afgeronde stenen	0.6-0.8	
(DWA, 2014)	breuksteen	0.65	0.68-0.72**
	afgeronde stenen	0.70	0.77-0.80**
(ANIMAL, 2005)	balk (korte overlaat)	0.633*	

\* herrekend naar de debietsformule uit (Bos, 1989) en (DVWK, 2002)

\*\* deze waarden zijn vermenigvuldigd met een coëfficiënt f die rekening houdt met de stroming tussen de stenen

De in Tabel 12 gegeven coëfficiënten zijn alle opgesteld voor een V vormige overlaat. De  $C_d$ -coëfficiënt uit Bos voor een scherpe overlaat (balk) ligt tussen de waarden voor een drempel uit breuksteen en de waarden voor een drempel uit afgeronde stenen in (zie Cd-ranges uit DVWK (2002)).

Bemerk ook dat voor alle formules geldt dat bij een uit stenen opgebouwde drempel het niet eenvoudig is om de V-lijn van de kruin van de drempel vast te stellen. Verschillen worden hierbij mogelijk verdisconteerd in de Cd-coëfficiënt wat de vergelijking bemoeilijkt met de  $C_d$ -coëfficiënt voor een gladde rechte drempel.

In ANIMAL (2005) wordt voor de  $C_d$ -coëfficiënt een waarde 1.1 gegeven, een waarde die merkkelijk hoger ligt dan gegeven in Bos (1989) en DVWK (2002). De verklaring hiervoor is dat ANIMAL (2005) de debietformule gegeven in Boiten (1989) hanteert. Deze formule gaat uit van een korte overlaat met een relatief veel lagere numerieke constante. De reden voor de lagere waarde is niet gekend. Na omrekening naar de debietformule die gehanteerd wordt in Bos (1989) en DVWK (2002) valt de debietcoëfficiënt volgens ANIMAL (2005) samen met Bos (1989) en binnen de range gegeven in DVWK (2002).

In een recenter Duits handboek over vispassages (DWA, 2014) worden iets hogere waarden voor de  $C_D$  coëfficiënt gegeven. Bemerk dat in de in DWA (2014) gegeven formule nog een toeslag  $f$  toegekend wordt voor de doorlaatbaarheid van de stenen. De toeslag ten gevolg van de doorlaatbaarheid bedraagt 1.05 tot 1.10 voor breuksteen en 1.1 tot 1.15 voor afgeronde steen. Bemerk dat voor Kerkhove de drempels opgebouwd zijn rondom een rij aansluitende perkoenpalen en dat de keien gefixeerd zijn met beton waardoor de doorlaatbaarheid beperkt wordt geacht.

De geometrische vorm van de driehoekige V-overlaat met taluds 1:2 bij 1:2 in Bos (1989) en ook Ackers, et al. (1978) benaderen de vorm van de drempels te Kerkhove het beste.

Voorgaande formules zijn van toepassing voor volkomen overlaten, met andere woorden in de situatie waarbij het afwaarts peil voldoende laag is en hierdoor het debiet overheen de drempel niet beïnvloedt. In geval van de vispassage te Kerkhove zal het peil in het afwaartse bekken, op een enkele uitzondering na bij streefpeil -20 cm, zodanig hoog zijn dat het debiet wel beïnvloed wordt (onvolkomen overlaat).

Voor de bepaling van de reductie werd in eerdere studies gebruik gemaakt van de Villemonte-vergelijking (Villemonte, 1947):

$$C_r = \left[ 1 - \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^m \right]^{0,385} \quad (2)$$

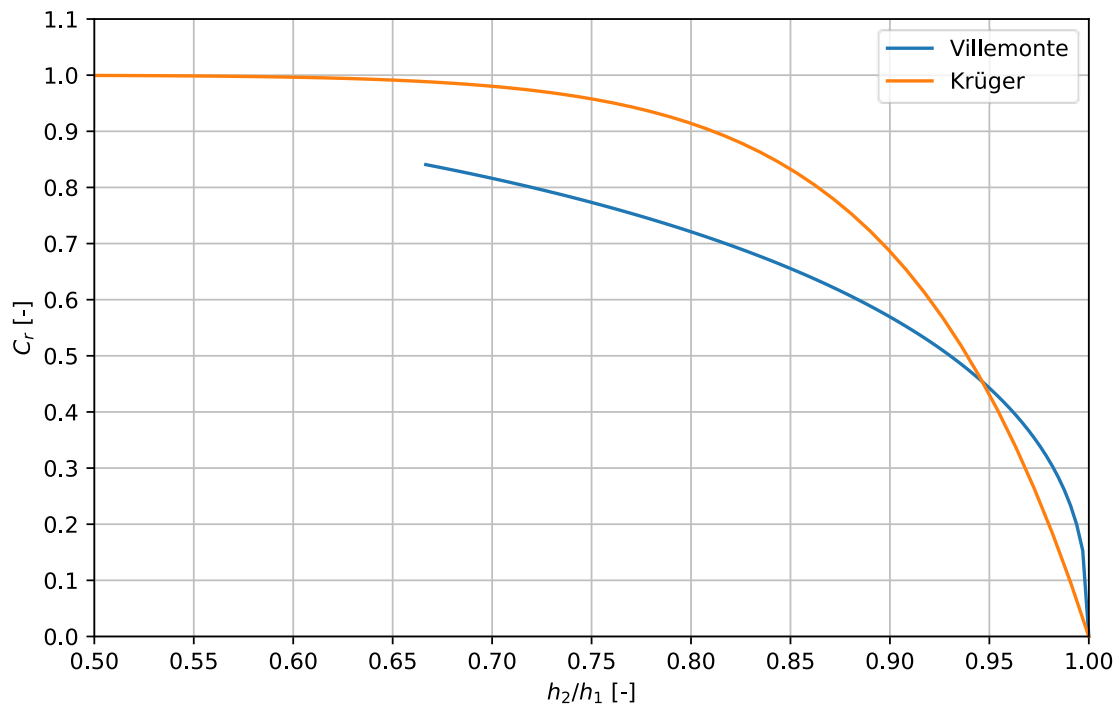
Met

- $C_r$  Reductiecoëfficiënt debiet t.g.v. onvolkomen overlaat [-]
- $h_1$  Waterhoogte opwaarts van de drempel (gemeten t.o.v. drempelpeil in midden V) [m]
- $h_2$  Waterhoogte afwaarts van de drempel (gemeten t.o.v. drempelpeil in midden V) [m]
- $m$  Exponent voor invloed geometrie (driehoekige overlaat = 2.5) [-]

De Villemonte-vergelijking is van toepassing voor een korte verdrongen overlaat (voorwaarde:  $h_2/h_1 > 2/3$ ). In DWA (2014) wordt volgende reductieformule van Krüger gegeven voor het verdrongen zijn van een drempel:

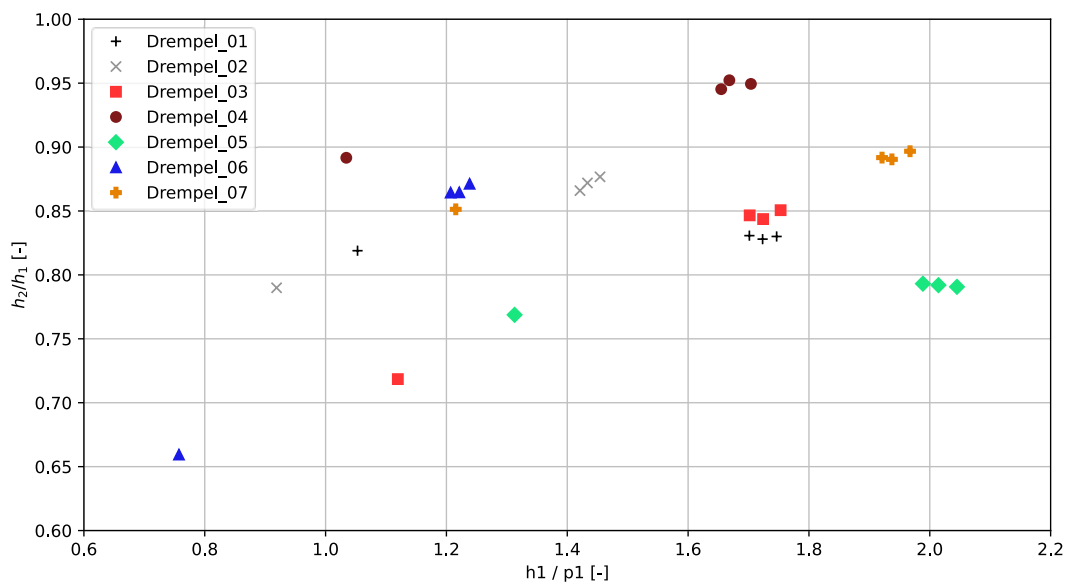
$$C_r = 1 - \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{11}$$

De figuur voor de reductiecoëfficiënt in functie van de verdrinkingsgraad gegeven in DWA (2014) start vanaf een verdrinkingsgraad 0.5. De reductiecoëfficiënt van Villemonte en deze van Krüger (DWA, 2014) worden gegeven in Figuur 66.



Figuur 66 – Vergelijking formules reductiecoëfficiënt  $C_r$  ten gevolge van verdrinking overlaat.

Bemerk dat tot een verdrinkingsgraad 0.95 de reductiecoëfficiënt volgens Villemonte merkkelijk lager is dan de reductiecoëfficiënt volgens Krüger. Tijdens de metingen lag voor de eerste 7 drempels de verdrinkingsgraad ( $h_2/h_1$ ) tussen 0.7 en 0.95, zie Figuur 67.



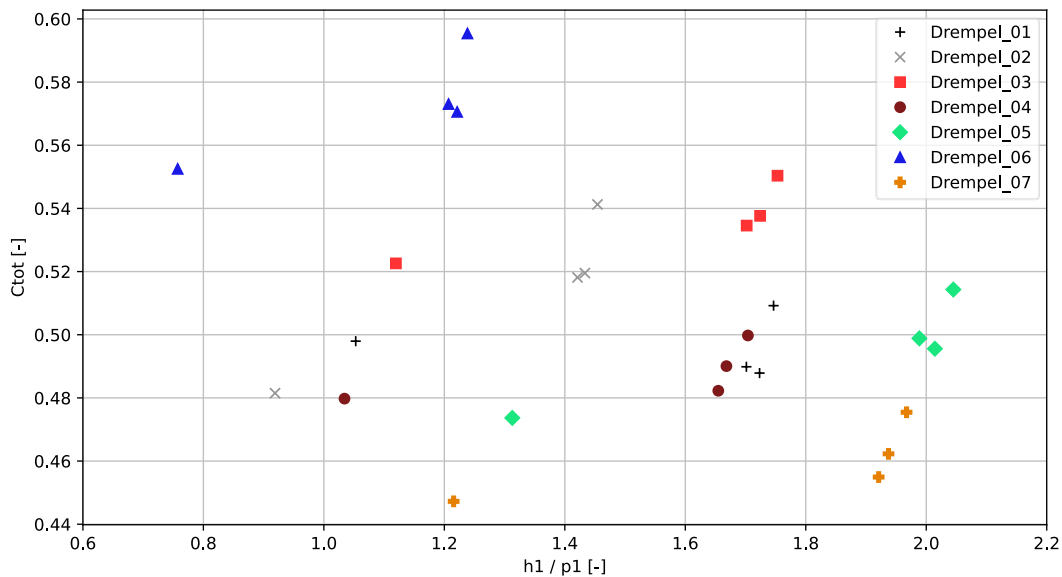
Figuur 67 – Verdrinkingsgraad drempels.

## 5.2 Bepaling coëfficiënten

De analyse wordt uitgevoerd op basis van de opgemeten topografie van de eerste 7 drempels, zie paragraaf 3.1, en het debiet en de peilen per event, zie paragraaf 3.8. Vertrekkende van de in paragraaf 5.1 afgeleide formule voor het debiet voor integratie wordt de totale correctiecoëfficiënt  $C_T$  als volgt bepaald:

$$C_T = C_r \cdot C_d = \frac{Q}{\int_0^h b(y) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot y} \cdot dy}$$

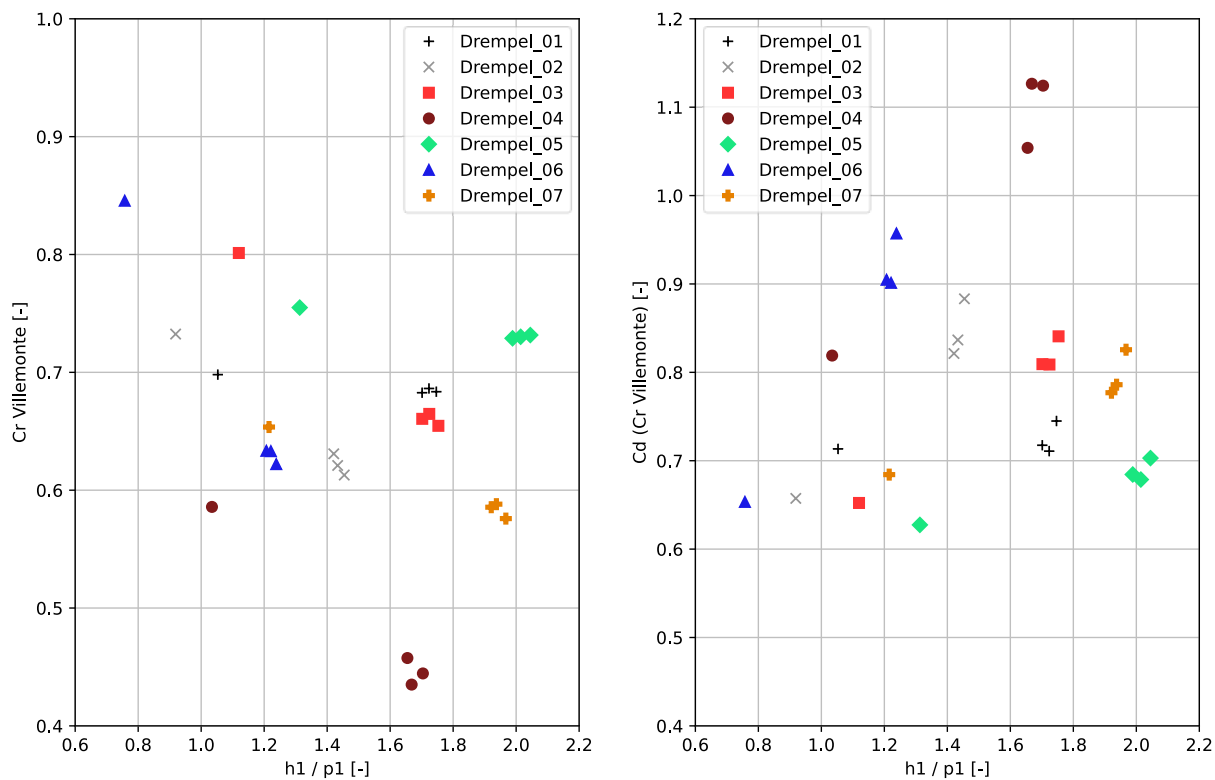
De totale correctiecoëfficiënt  $C_T$  betreft het product van de reductiecoëfficiënt  $C_r$ , ten gevolge van de verdrinking, en de reductiecoëfficiënt  $C_d$  die rekening houdt met vormverliezen en de snelheidshoogte. Figuur 68 geeft de totale correctiecoëfficiënt  $C_T$  voor de 7 beschouwde drempels en de 4 beschouwde events.



Figuur 68 – Totale correctiecoëfficiënt in functie van debiet en drempel.

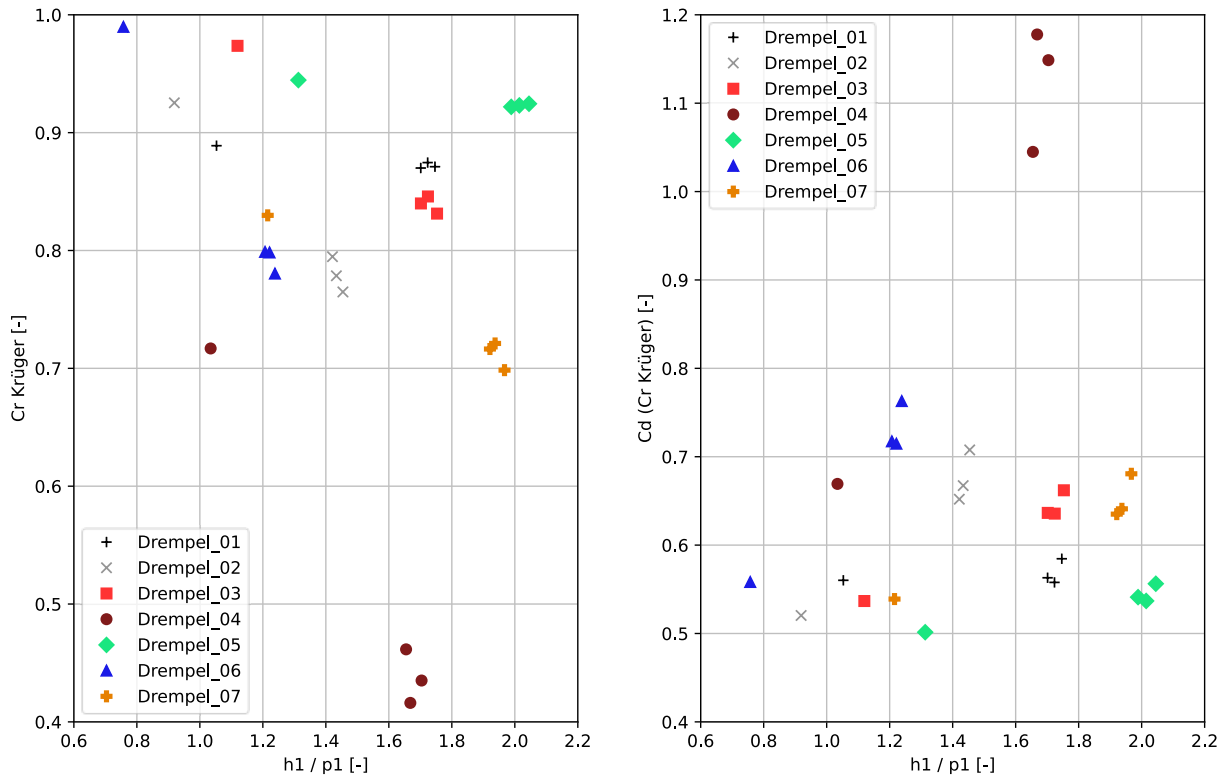
De reductiecoëfficiënt ten gevolge van het verdronken zijn van de drempels wordt bepaald op basis van Villemonte (1947) en Krüger (DWA, 2014). Zoals reeds aangegeven in Figuur 66 is de reductiecoëfficiënt ten gevolge van de verdrinking merklijk kleiner volgens Villemonte (1947) dan volgens Krüger (DWA, 2014). De bandbreedte van de reductiecoëfficiënt bedraagt ca. 0.20 met uitzondering van drempel 4 waarbij de reductiecoëfficiënt merklijk lager is. Door het delen van de totale correctiecoëfficiënt,  $C_T$ , door de reductiecoëfficiënt ten gevolge van een verdronken overlaat,  $C_r$ , volgens respectievelijk Villemonte (1947) en Krüger (DWA, 2014) wordt de debietcoëfficiënt  $C_d$  bekomen..

De reductiecoëfficiënt,  $C_r$ , voor een verdronken overlaat volgens Villemonte en de na toepassing van deze reductiecoëfficiënt bekomen debietcoëfficiënt,  $C_d$ , worden gegeven in Figuur 69.



Figuur 69 – Reductiecoëfficiënt verdrinkingsgraad,  $C_r$ , volgens Villemonte en debietcoëfficiënt  $C_d$

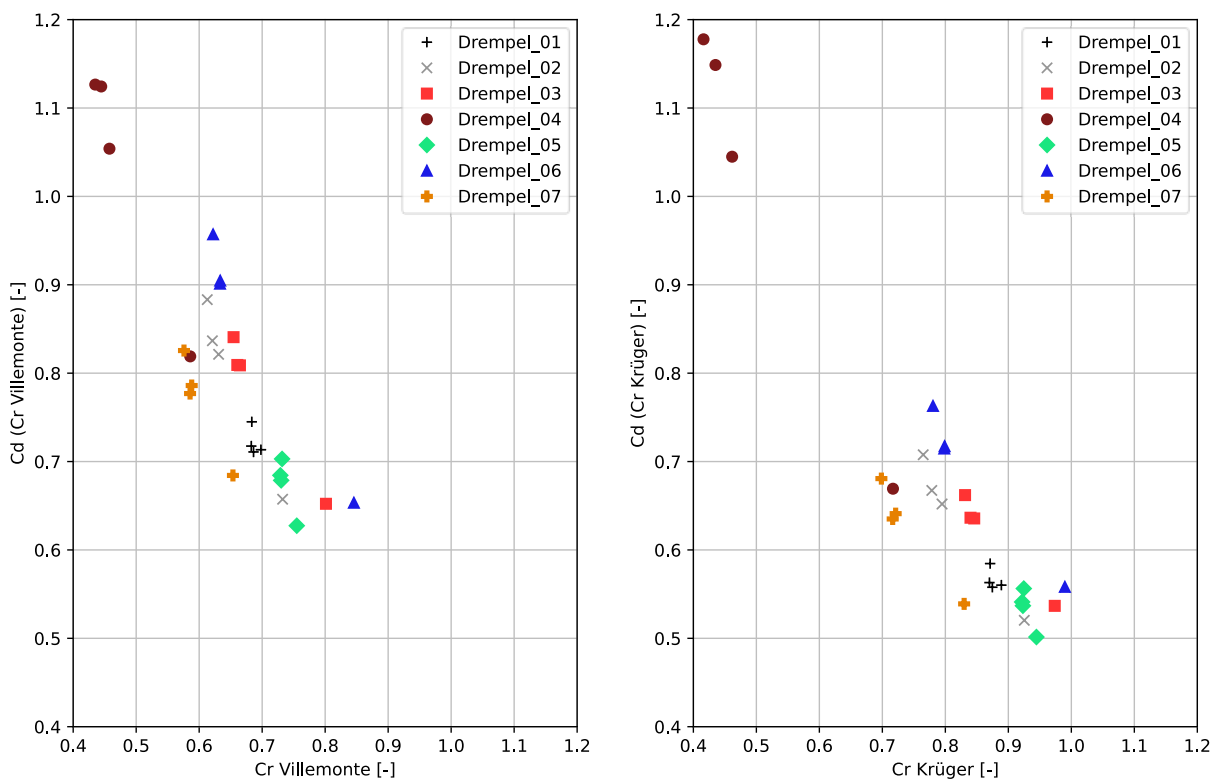
De reductiecoëfficiënt,  $C_r$ , voor een verdrongen overlaat volgens Krüger en de na toepassing van deze reductiecoëfficiënt bekomen debietcoëfficiënt,  $C_d$ , worden gegeven in Figuur 70.



Figuur 70 – Reductiecoëfficiënt verdrinkingsgraad,  $C_r$ , volgens Krüger en debietcoëfficiënt  $C_d$

Bemerk dat na toepassen van de reductiecoëfficiënt van Villemonte (1947) de debietscoëfficiënt  $C_d$  zich in de range 0.6 tot 1.0 bevindt. Deze waarden zijn hoger dan gevonden in de literatuur, zie Tabel 12. Bij toepassen van de reductiecoëfficiënt van Krüger (DWA, 2014) worden debietcoëfficiënten met een waarde tussen 0.5 en 0.7 bekomen, wat beter in lijn ligt met de waarden uit de literatuur. Enkel de resultaten van drempel 4 met een zeer hoge verdrinkingsgraad ( $h_2/h_1=0.95$  bij streefpeil) wijken merklijk af.

De debietcoëfficiënt ten opzichte van de reductiecoëfficiënt verdrinkingsgraad wordt gegeven in Figuur 71. Uit deze figuren volgt dat bij een afname van de reductiecoëfficiënt, en dus een toename van de verdrinkingsgraad, de debietcoëfficiënt toeneemt. De trend is dezelfde voor de twee beschouwde formuleringen voor de reductiecoëfficiënt. Bij Villemonte is de spreiding evenwel nog iets groter dan bij Krüger. Deze spreiding toont aan dat de beschouwde formuleringen voor de reductiecoëfficiënt verdrinkingsgraad suboptimaal zijn voor de breuksteendrempels van Kerkhove. Voor het optimaliseren van deze formulering zou voor één gegeven drempel meerdere verdrinkingsgraden beproefd moeten worden.



Figuur 71 – Debietcoëfficiënt ten opzichte van reductiecoëfficiënt verdrinkingsgraad (Villemonte en Krüger)

## 6 Conclusies

### 6.1 Vispassagedebiet

Uit de metingen blijkt dat het debiet door de vispassage duidelijk hoger ligt dan verwacht in de ontwerpstudie. In de ontwerpstudie werd een debiet berekend van circa 2.1 m<sup>3</sup>/s bij op en afwaarts streefpeil, terwijl het gemeten debiet bij streefpeil rond 3.5 m<sup>3</sup>/s lag. Bij een daling van 20 cm ten opzichte van het opwaartse streefpeil daalt het gemeten debiet tot circa 1.2 m<sup>3</sup>/s. Bij waterstanden hoger dan streefpeil konden geen metingen uitgevoerd worden.

Drie mogelijke oorzaken worden voorgesteld:

- Lagere drempelhoogtes van de opwaarts gelegen drempels;
- Afwijkende vormgeving drempel;
- Onderschatting van de debietcoëfficiënt.

Dit hogere debiet hoeft echter geen (grote) negatieve invloed te hebben op de stroomsnelheden in de vispassage zelf aangezien deze geen invloed heeft op het totale verval over de vispassage. Wel kan de combinatie van een hoger debiet met afwijkende drempelvorm lokaal tot hogere stroomsnelheden leiden. De bekkens hebben voldoende volume om het hogere debiet op te vangen, waardoor er voldoende rustzones blijven met lagere stroomsnelheden. Aangezien de volledige vispassage bekleed is met breuksteen wordt er ook geen risico verwacht op erosie. Voor de attractiviteit van de vispassage heeft het hogere debiet juist een positief effect aangezien dit de lokstroom versterkt zonder dat het leidt tot te hoge stroomsnelheden in de monding. Deze was namelijk al voldoende ruim gedimensioneerd (lees: geen knijpconstructie aanwezig).

### 6.2 Evaluatie passeerbaarheid

#### 6.2.1 Drempels

Bij streefpeilcondities wordt er bij alle drempels voldaan aan de minimale doorzwemdiëpte en breedte (> 50 cm) boven de drempels. Bij waterstanden tot 20 cm onder streefpeil (= ondergrens optimale werking) kunnen de waterdieptes boven de opwaartse zes drempels echter niet meer voldoen aan het criterium voor minimale doorzwemdiëpte. Daarnaast worden er zowel bij streefpeilcondities als verlaagde waterstanden tot 20 cm onder streefpeil relatief hoge stroomsnelheden gemeten. In de as van de stroom liggen deze zelfs boven de sprintsnelheid van de doelsoorten (> 1.5 m/s). Vooral drempels 1 en 5 kennen een relatief groot hydraulisch verval met snelheden in de as van de stroom rond 1.8 a 2 m/s. Aan de (ondiepere) zijkanen van de drempels liggen stroomsnelheden rond de 1 m/s.

#### 6.2.2 Bekkens

Hoewel ook de hoofdstroom in de bekkens relatief hoge stroomsnelheden kent in vooral de vijf meest opwaartse bekkens, liggen stroomsnelheden in de naast gelegen recirculatiezone(s) laag genoeg om te kunnen dienen als rustzones. De waterdieptes in de bekkens zijn in beide bemeeten scenario's voldoende. Bij het scenario van opwaartse streefpeil ligt de waterdiepte in de meest kritische opwaartse 5 bekkens gemiddeld rond de 1.1 meter, wat boven de richtlijn van minimaal 1 m is. Bij het scenario streefpeil -20 cm wordt deze richtlijn niet gehaald, maar liggen de gemiddelde waterdieptes rond de 0.85 m wat nog altijd ruim boven de ondergrens van 50 cm is.



### 6.2.3 Instroom

Er werd een relatief groot verval in de instroom van de vispassage vastgesteld van circa 10 cm bij opwaarts streefpeil en zelfs 15 cm bij het ondergrens scenario van streefpeil – 20 cm. Dit zorgt voor minder waterdiepte boven de (opwaartse) drempels en beïnvloedt de doorzwemdiepte negatief. Verwacht wordt dat dit veroorzaakt wordt doordat vooral het opwaartse deel van de instroom zeer ondiep is aangelegd. Bij lagere opwaartse waterpeilen steken de stenen van de bodembescherming zelfs door het wateroppervlak. Ook werden mede daardoor relatief hoge stroomsnelheden in de instroom vastgesteld (circa 0.8 tot 1 m/s).

### 6.2.4 Vuilrooster

Het toegepaste vuilrooster te Kerkhove zorgt voor een accumulatie van drijfvuil wat de werking van de vispassage nadelig beïnvloedt. Om dit tegen te gaan is frequente inspectie en reiniging vereist. Voorgesteld wordt om een test uit te voeren waarbij het vuilrooster verwijderd wordt. Hierbij dient nagegaan te worden in welke mate de vispassage zelfreinigend is bv. bij wascondities.

### 6.2.5 Algemeen

Voor de combinatie van de beperkte doorzwemdieptes met relatief hoge stroomsnelheden boven zowel de opwaartse drempels als de instroom vormen een belangrijk aandachtspunt ten aanzien van de passeerbaarheid voor vooral de zwakkere zwemmers en of de grotere vissoorten. Of deze invloeden te negatief zijn voor de passeerbaarheid kan alleen bepaald worden doormiddel van monitoring van de vismigratie zelf, deze resultaten geven enkel een hydraulische evaluatie van de ontwerpcriteria.

## 6.3 Rekenmethode en debietcoëfficiënt

Op basis van de onderhavige studie wordt voor de bepaling van het debiet over de V-vormige drempels van een bekkentrap voorgesteld om bij nieuwe ontwerpstudies de volgende algemene formule toe te passen:

$$Q = C_d \cdot C_r \cdot \left(\frac{4}{15}\right) \cdot \sqrt{2g} \cdot (\tan \beta + \tan \gamma) \cdot h_e^{2.5}$$

Met

- |                  |  |                     |
|------------------|--|---------------------|
| • Q              | Debiet   | [m <sup>3</sup> /s] |
| • C <sub>d</sub> | Algemene debietcoëfficiënt t.g.v. vorm en snelheidsverliezen                 | [-]                 |
| • C <sub>r</sub> | Reductiecoëfficiënt debiet volgens Krüger                                    | [-]                 |
| • g              | Valversnelling (9.81 m/s <sup>2</sup> )                                      | [m/s <sup>2</sup> ] |
| • β & γ          | Linker en rechterhoek ten opzichte van de verticale                          | [°]                 |
| • h <sub>e</sub> | Waterhoogte opwaarts bekken ten opzichte van diepste punt V vormige overlaat | [m]                 |

Deze formule betreft de uitwerking van het principe van Poleni voor uitstroming onder druk voor een asymmetrische V vormige overlaat en is mede gebaseerd op de formules uit (Bos, 1989) voor scherpe en driehoekige V-overlaten. Voorgesteld wordt om te werken met een algemene debietcoëfficiënt C<sub>d</sub> die zowel vormverliezen als snelheidsverliezen omvat naast een reductiecoëfficiënt C<sub>r</sub> voor de verdrinkingsgraad.

Voor de reductiecoëfficiënt werd zowel de formulering volgens Villemonte als Krüger beschouwd. Hieruit volgde dat bij toepassen van de formulering van Krüger, die ook aanbevolen wordt in DWA (2014), de bekomen algemene debietcoëfficiënten binnen de in literatuur gegeven range liggen. De debietcoëfficiënt op basis van een reductiecoëfficiënt volgens Krüger bevindt zich in de range 0.5 – 0.7, wat goed overeenkomt met waarden beschreven in Bos (1989) voor driehoekige V-vormige overlaten en waarden in DWA (2014) en DWVK (2002) voor breukstenen V-overlaten.

Wel werd ook een invloed van de verdrinkingsgraad op de debietcoëfficiënt opgemerkt wat lijkt aan te geven dat de formule voor de reductiecoëfficiënt nog suboptimaal is.

## 6.4 Aanbevelingen (ontwerp toekomstige passages)

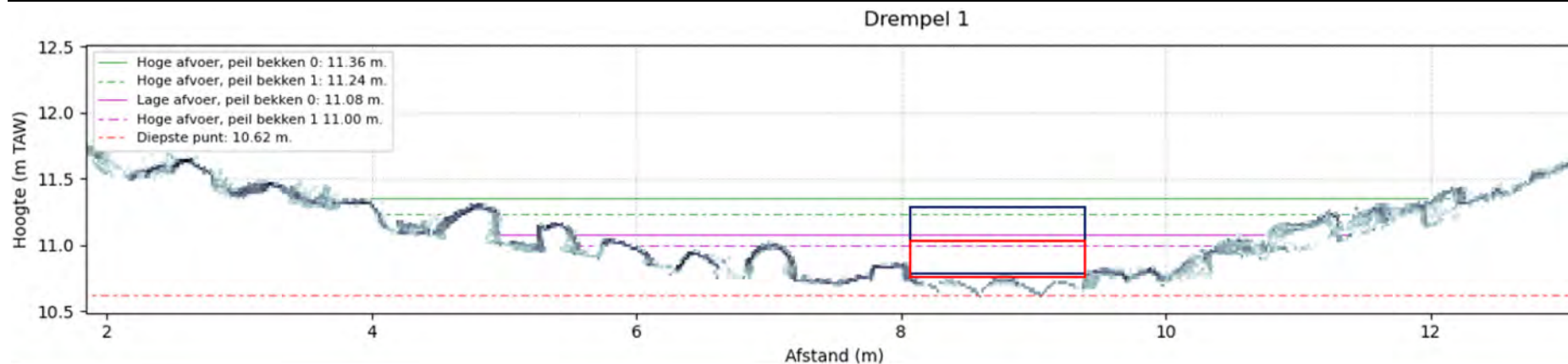
- Voor soortgelijke ruwe breuksteendrempels blijft het door INBO en WL aanbevolen ontwerpverval van 10 cm tot 12 cm behouden. Voor toekomstige ontwerpen is het evenwel noodzakelijk om een betere controle te bekomen op het werkelijk optredend hydraulisch verval per drempel en de doorzwemdieptes boven de drempel. Dit is vermoedelijk niet of moeilijk realiseerbaar met brede breuksteendrempels waardoor aanbevolen wordt om een combinatie met een breder en dieper slot in de drempel te onderzoeken. De (V-vormige) drempel kan hierbij uitgevoerd worden in breuksteen maar bijvoorbeeld ook een volledige prefab drempel met ingewerkte verruwingen kan onderzocht worden. Het voordeel van een dergelijk ontwerp is dat de vispassage hierdoor minder gevoelig wordt voor peilvariaties en voor eventueel afwijkende drempelhoogtes en drempelvormen door onzekerheden bij aanleg.
- De instroom wordt in vervolg ontwerpen beter dieper en smaller ontworpen. Dieper om verhang te voorkomen en passeerbaarheid te verhogen; smaller om oppervlak afsluitconstructie en breedte droogzetmogelijkheden te beperken (dit laatst kan ook doormiddel van versmalling ter plaatse van afsluitconstructie). Daarnaast maakt dit de inpassing van een opwaartse drijfvuilbalk ook eenvoudiger, zie volgend punt.
- Met oog op drijfvuil wordt beter gewerkt met een drijvende balk of scherm aan opwaartse zijde van de instroom. Het vuilrooster ter plaatse van de afsluitconstructie werkt momenteel namelijk als vuilvang wat veel onderhoud vergt en ook de hydraulische werking nadelig kan beïnvloeden. Een smallere en dieper instroom zou tevens zorgen voor optimale condities voor de toepassing van een opwaartse drijfvuil balk, namelijk een kortere lengte en een grotere diepte onder de balk waar vissen langs kunnen passeren. In dat geval kan zowel een vaste als een drijvende drijfvuilbalk worden toegepast, maar een drijvende blijft de voorkeur houden.
- Een belangrijke vraag is of de ondiepe instroom met relatief hoge stroomsnelheden effectief een probleem vormt voor de passeerbaarheid in de vispassage te Kerkhove. Om dit te kunnen vaststellen wordt een monitoringscampagne van vissen aangeraden. Indien nodig kan een voorstel voor de aanpassing van de instroom worden uitgewerkt.

## 7 Referenties

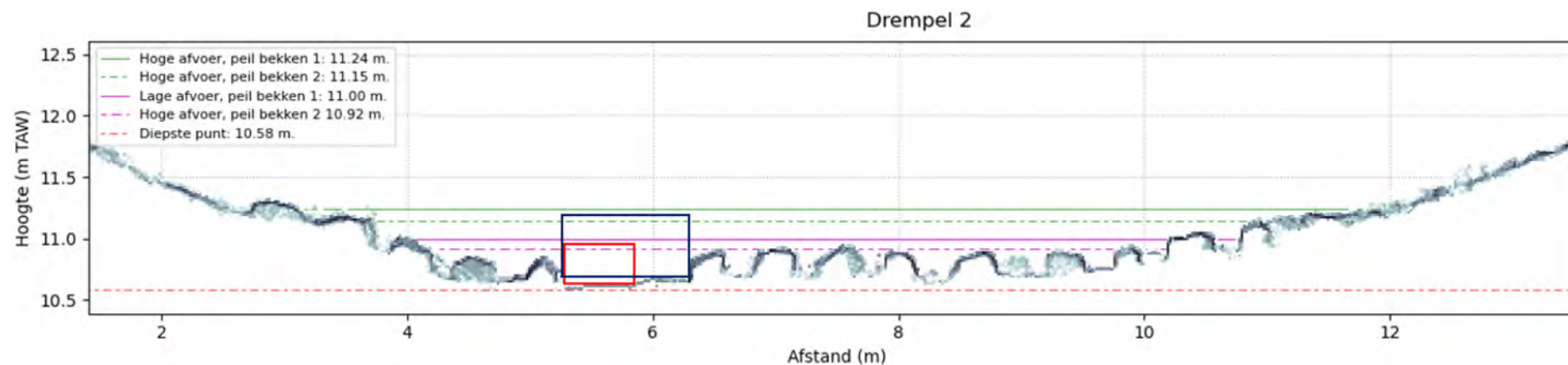
- Ackers, P., White, W. R., Perkins, J. A., & Harrison, A. J. M. (1978). *Weirs and flumes for flow measurement*. John Wiley & Sons.
- ANIMAL. (2005). *Vismigratie Een handboek voor herstel Vismigratie Vismigratie Een handboek voor herstel*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- Boiten, W. (1989). Meetstuw in de St. Kruiskreek, Zeeuws-vlaanderen Ontwerp en constructie van een lange overlaat. In *The British Medical Journal*.
- Bos, M. G. (1989). *Discharge measurement structures: Vol. Third rev (M. G. Bos (ed.); Issue 20)*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI).
- DVWK. (2002). *Fish passes – Design, dimensions and monitoring*.
- DWA. (2014). *M509 Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung*.
- Vanderkimpen, P., Visser, K. P., & Viaene, P. (2019). *Voorstel sturing vispassage Kerkhove. Versie 3.0. WL Memo's, 16\_045\_3*.
- Vereecken, H., & Vanderkimpen, P. (2022). *Debietmeting in kader van afijking stuw Kerkhove: Vol. 20\_050\_3 (Versie 3.0, WL Rapporten)*. Waterbouwkundig Laboratorium. <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=350835>
- Verelst, K., Visser, K. P., Viaene, P., Peeters, P., & Mostaert, F. (2014). *Erosieproblematiek stuwsluis Asper: deelrapport 2. Erosieproblematiek visnevengeul: Vol. 13\_045 (WL Rapporten)*. Waterbouwkundig Laboratorium.
- Villemonte. (1947). Submerged weir discharge studies. *Submerged Weir Discharge Studies, 866*, 54–57.
- Visser, K. P., Buysse, D., & Viaene, P. (2016). *Vispassage Kerkhove: uitgangspunten en randvoorwaarden bij het hydraulisch ontwerp. WL Memo's, 16\_045\_1*.
- Visser, K. P., Goormans, T., & Vereecken, H. (2022). *Debietmeting en Q-h-relatie V-vormige bekkentrap te Kerkhove. WL-Memo's, WL2022M21\_041\_1, Versie 1.0*.
- Visser, K. P., Goormans, T., Viaene, P., & Buysse, D. (2023). *Vispassages op de Dender - Hydraulische studie algemeen ontwerp [CONCEPT]*.
- Visser, K. P., Viaene, P., & Buysse, D. (2017). *Hydraulisch ontwerp V-vormige bekkentrap Kerkhove. WL Memo's, 16\_045\_2*.
- Visser, K. P., Vos, G., & Viaene, P. (2019). *Analyse hoogtemeting V-vormige bekkentrap te Kerkhove. . Versie 3.0. WL Memo's, 16\_045\_4*.

## 8 Bijlage A – Inschatting doorzwemvensters

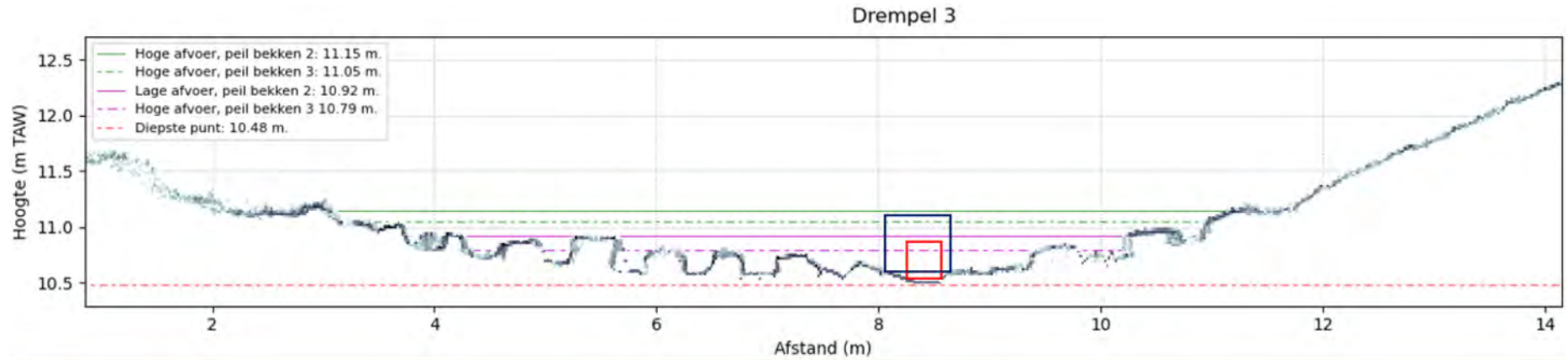
De figuren in deze bijlage geven voor drempel 1 tot en met 7 de grafische bepaling van het doorzwemvenster overheen de drempel. De blauwe rechthoek betreft het voor ontwerp gehanteerde minimum doorzwemvenster, de rode rechthoek betreft de ondergrens voor het doorzwemvenster.



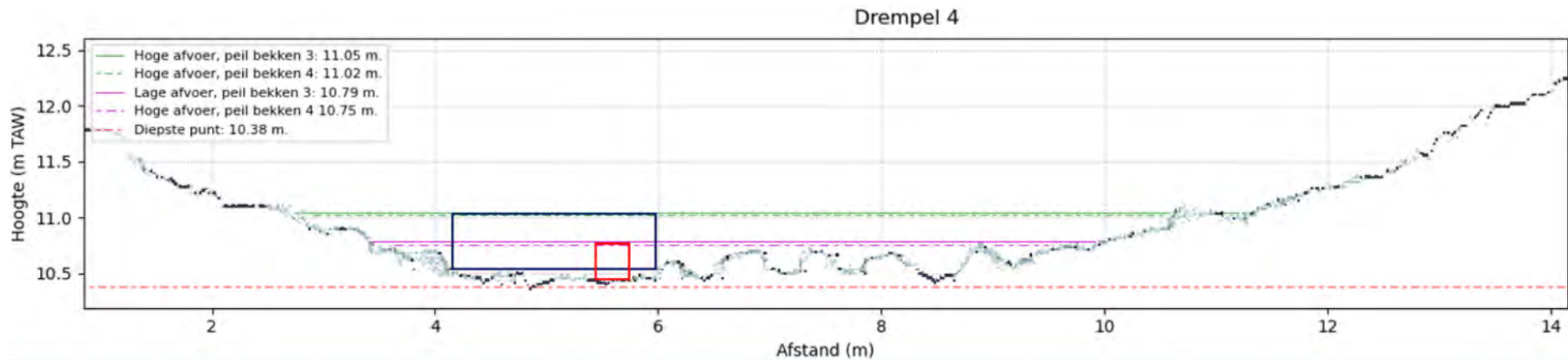
Figuur 72 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 1. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm).



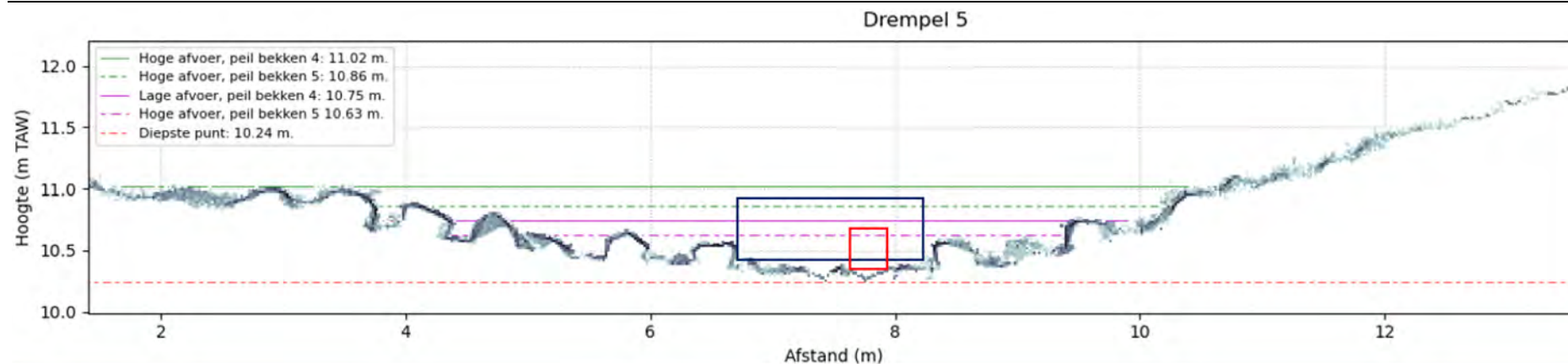
Figuur 73 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 2. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm).



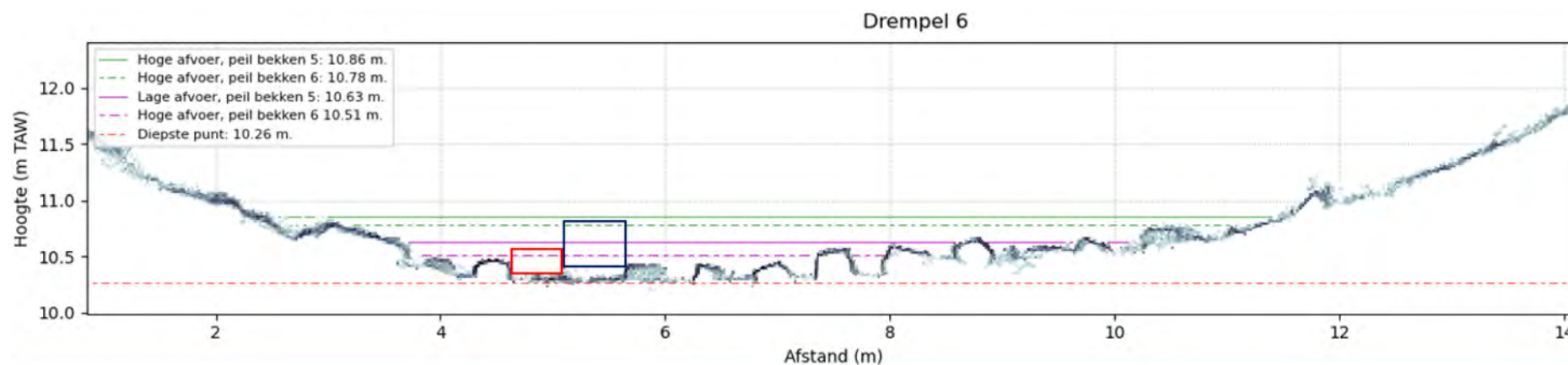
Figuur 74 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 3. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm).



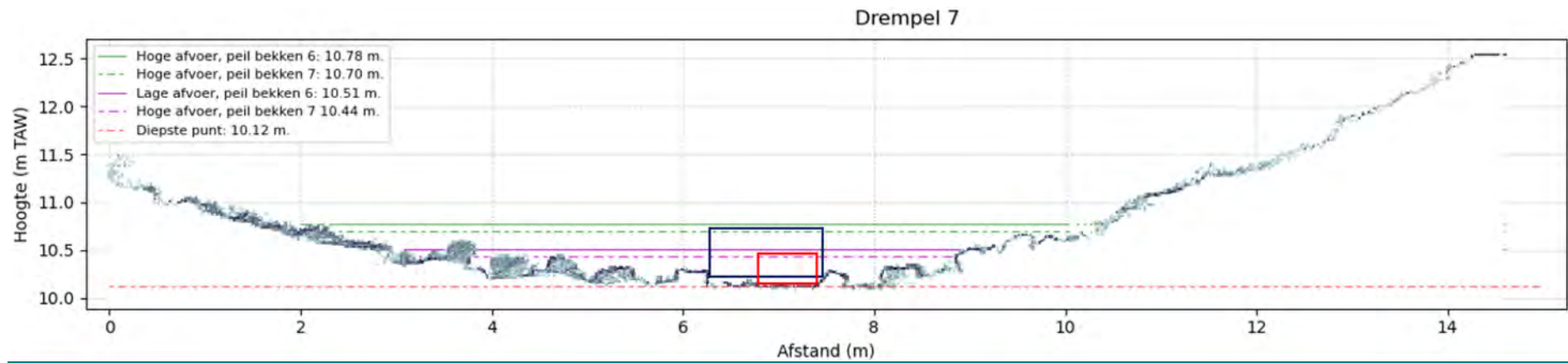
Figuur 75 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 4. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm).



Figuur 76 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 5. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm).



Figuur 77 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 6. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm).



Figuur 78 – Inschatting beschikbaar doorzwemvenster bij drempel 7. Blauw: bij hoge afvoer (streefpeilsituatie); rood: bij lage afvoer (streefpeilsituatie – 20 cm).

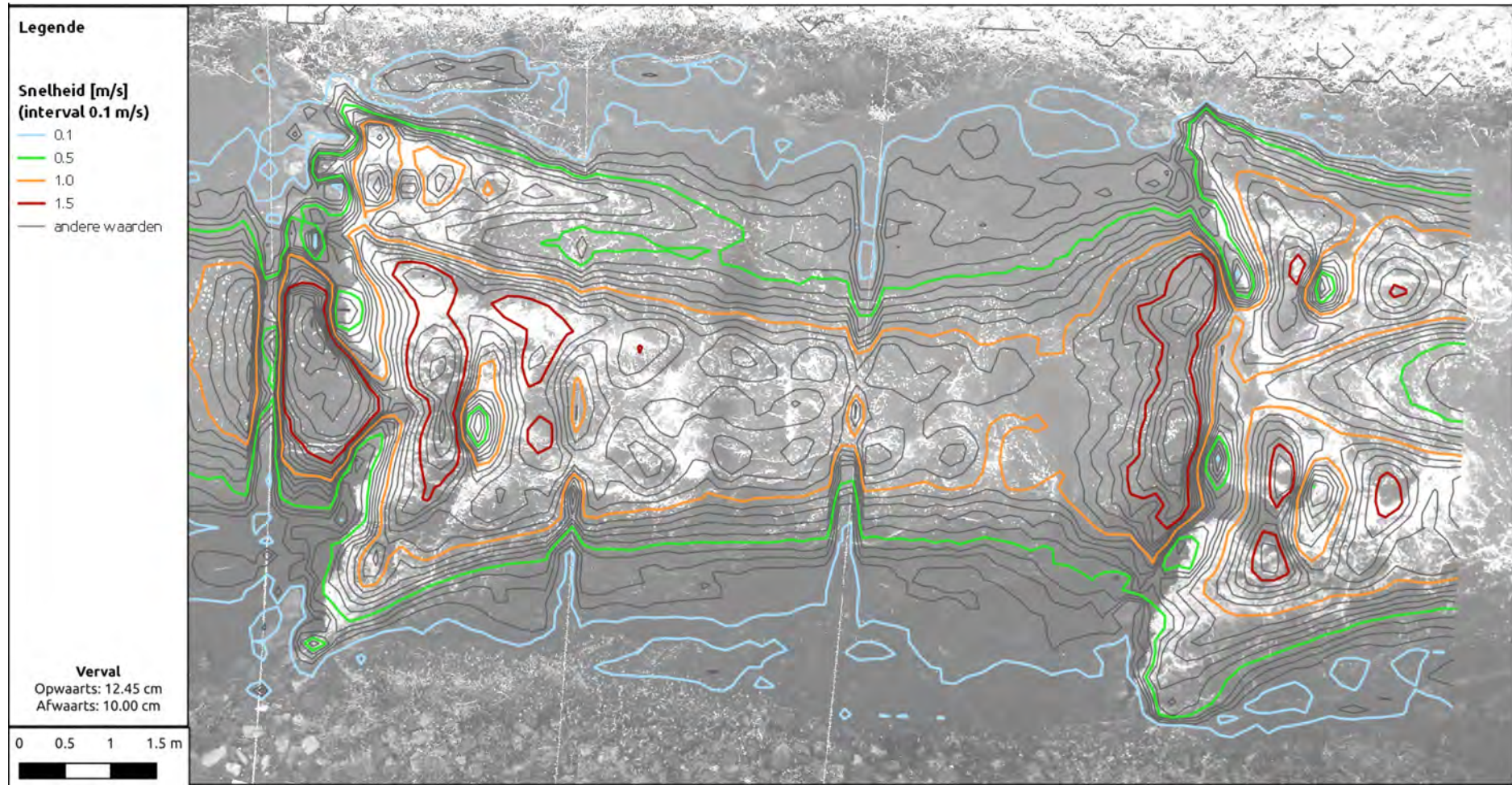


## 9 Bijlage B – snelheidsplots LSPIV metingen

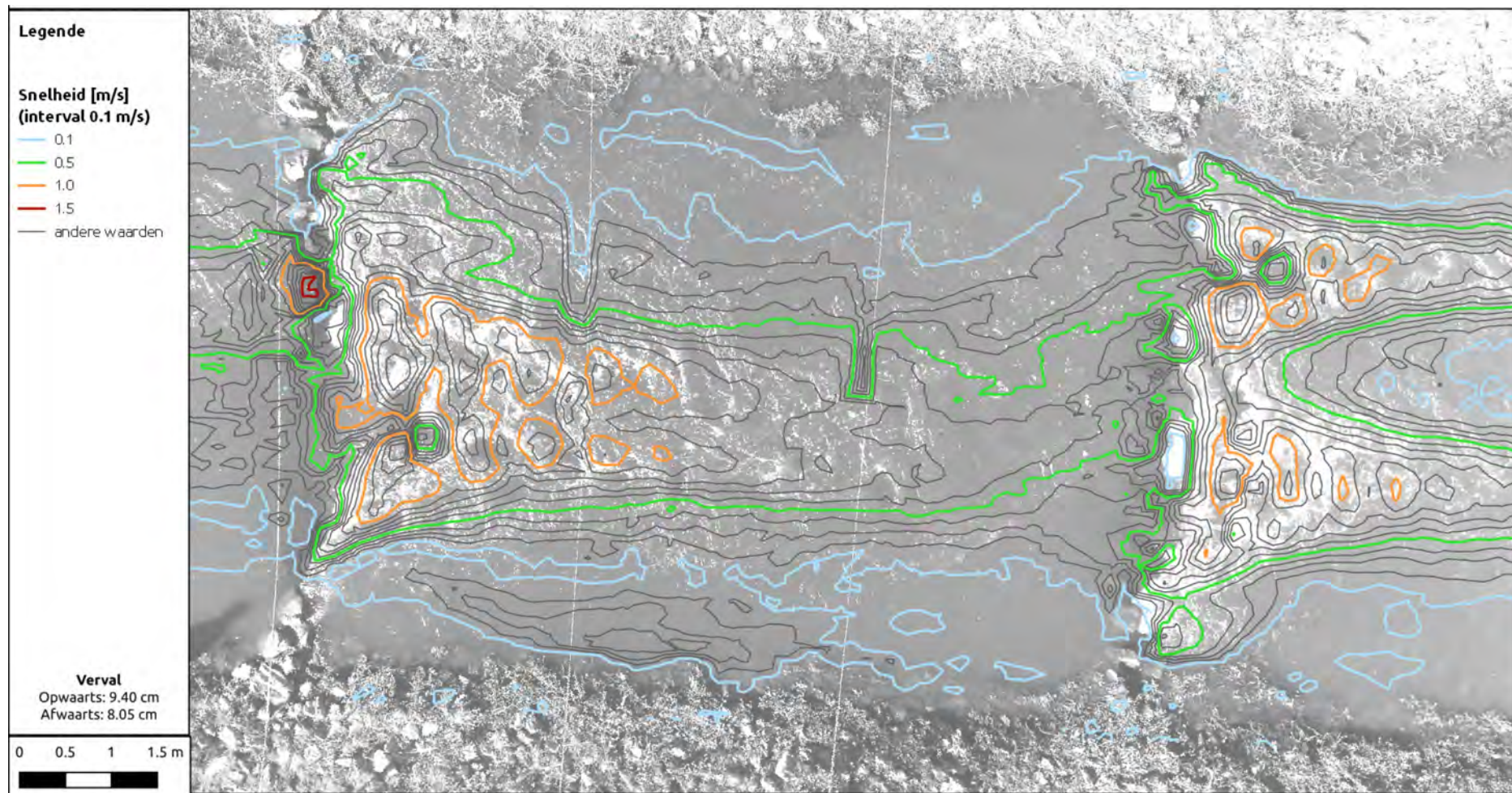
Deze bijlage bevat volgende snelheidsplots afgeleid uit de LSPIV metingen:

- Contouren lijnen van de snelheid worden gegeven in bijlage B.1
- Snelheidsvectoren worden gegeven in bijlage B.2
- Een vergelijking tussen de snelheid bij streefpeil en streefpeil -20cm per bekken wordt gegeven in bijlage B.3

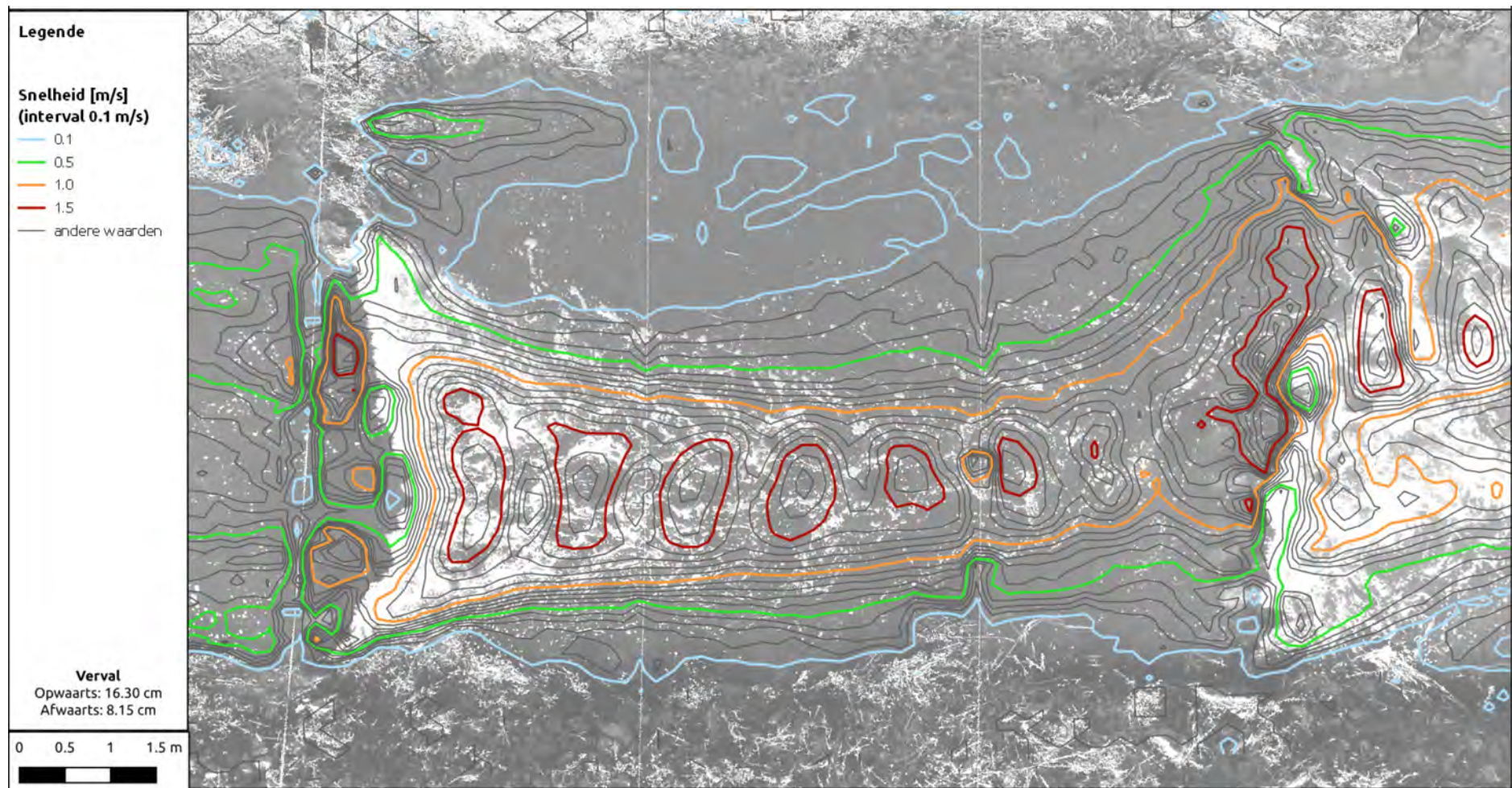
## 9.1 B.1. Snelheidscontouren



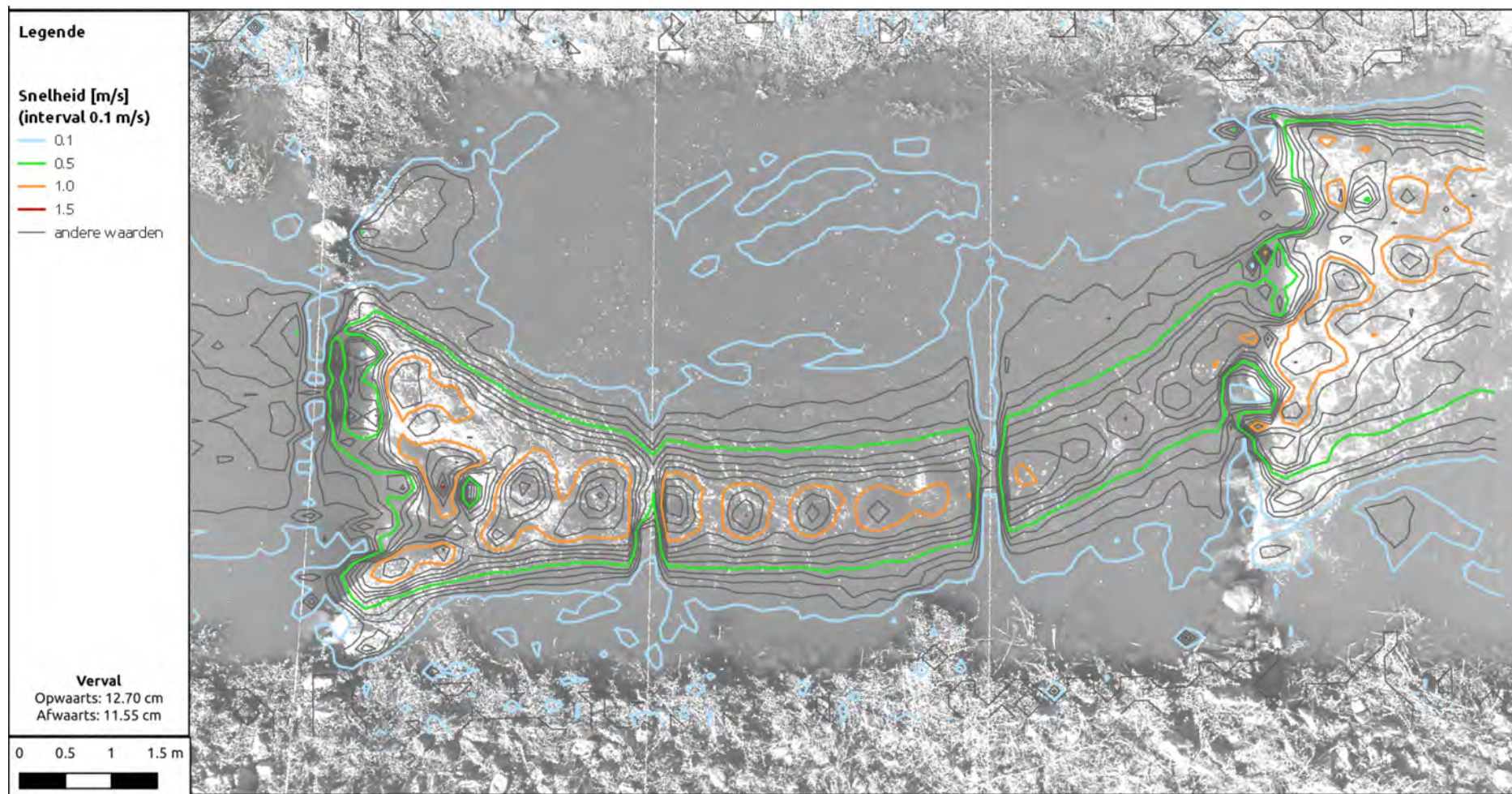
Figuur 79 – LSPIV – Bekken 1 – streefpeil - snelheidscontouren



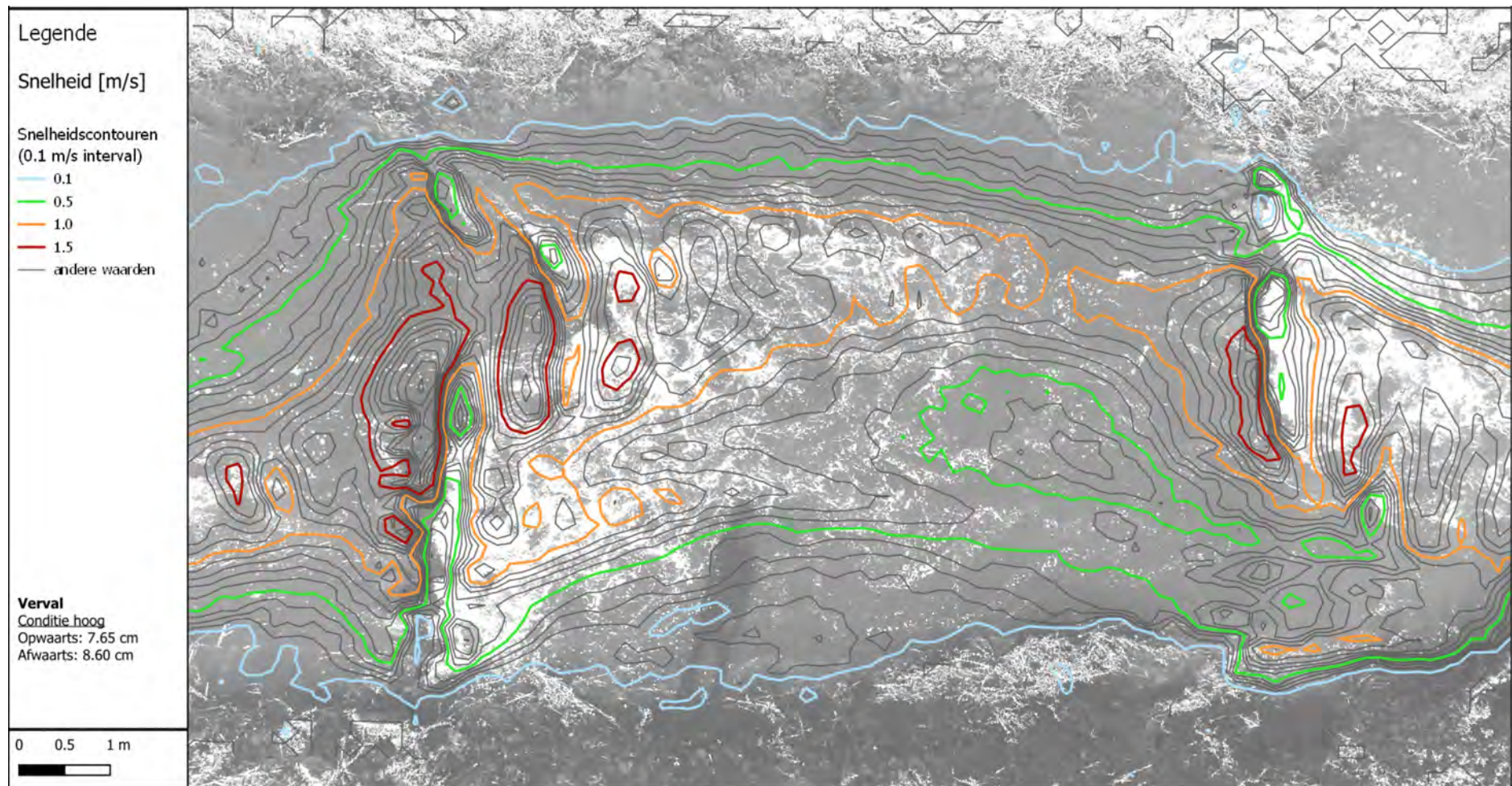
Figuur 80 – LSPIV – Bekken 1 – streefpeil -20cm - snelheidscontouren



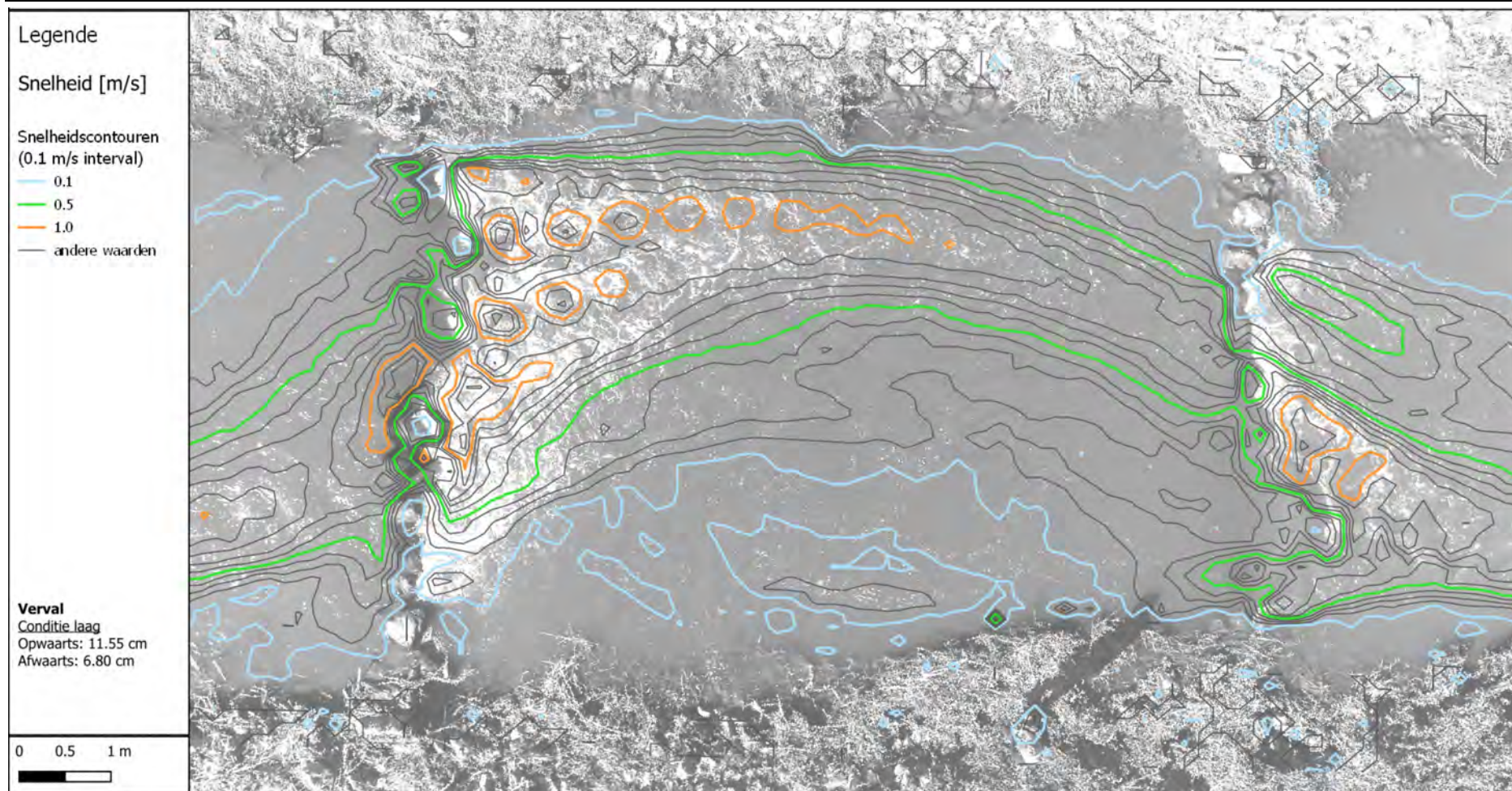
Figuur 81 – LSPIV – Bekken 5 – streefpeil – snelheidscontouren



Figuur 82 – LSPIV – Bekken 5 – streefpeil -20 cm – snelheidscontouren

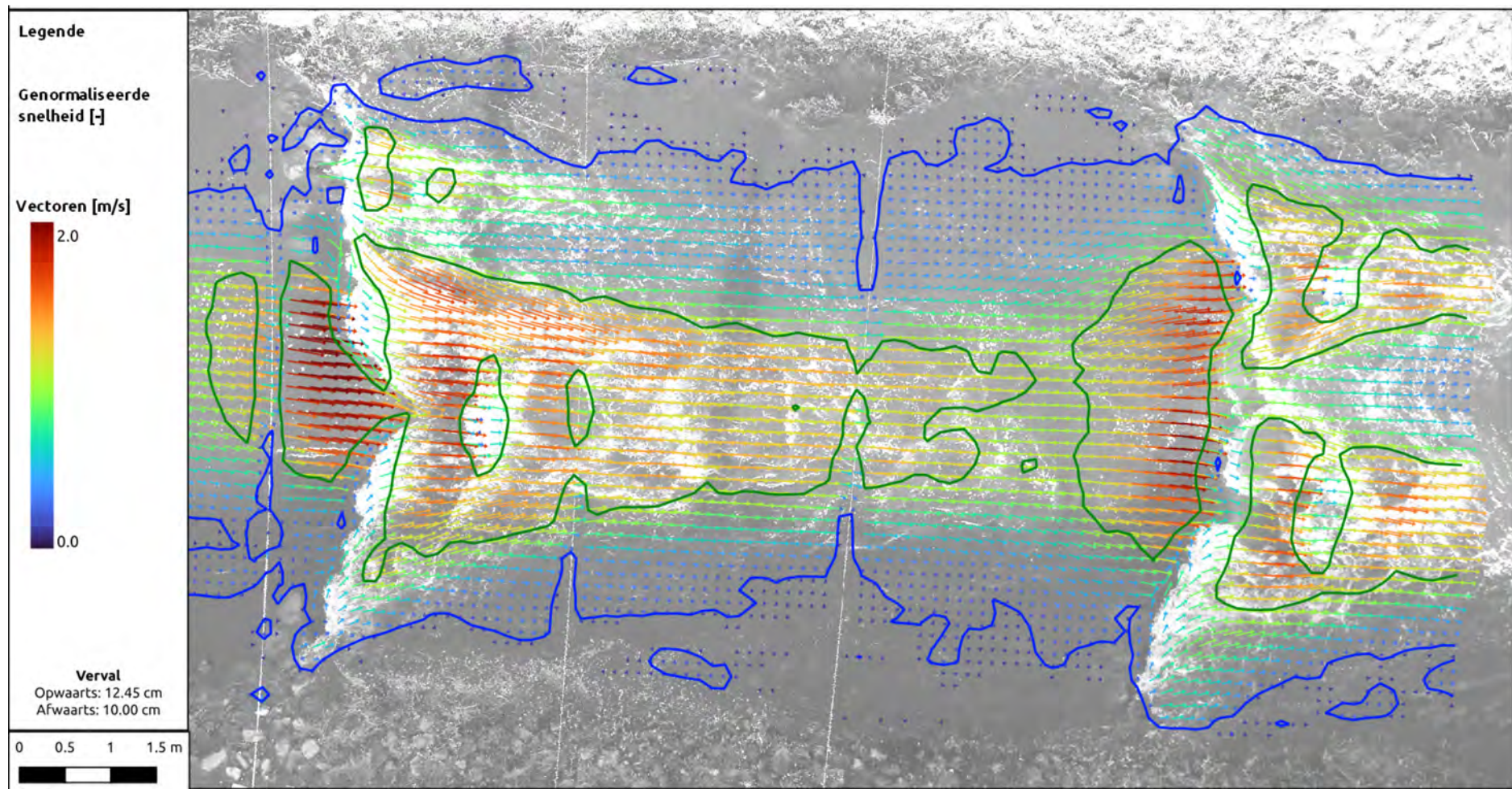


Figuur 83 – LSPIV – Bekken 6 – streefpeil – snelheidscontouren



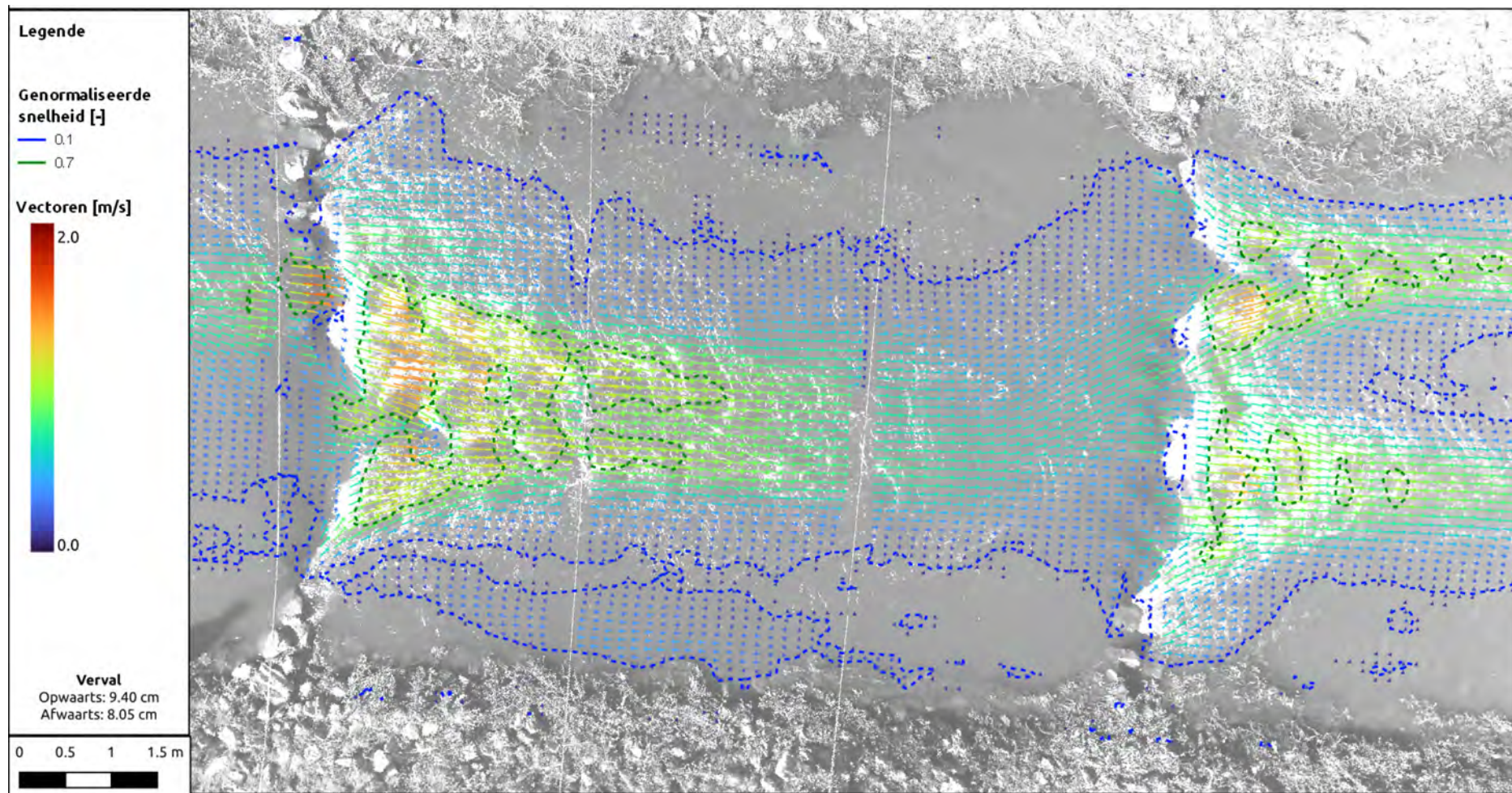
Figuur 84 – LSPIV – Bekken 6 – streefpeil -20 cm - snelheidscontouren

## 9.2 B.2. Snelheidsvectoren

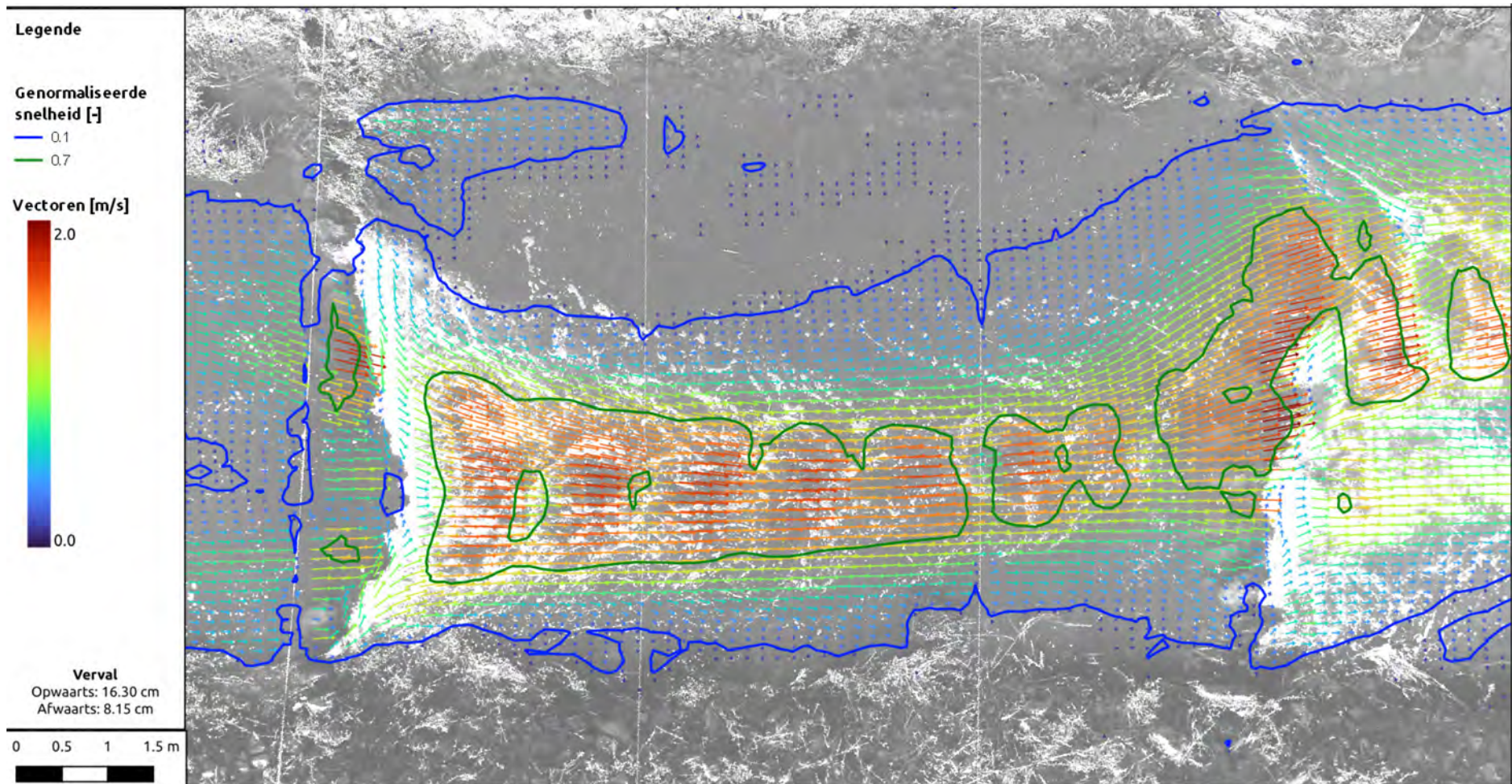


Figuur 85 – LSPIV- Bekken 1 – streefpeil – snelheidsvectoren

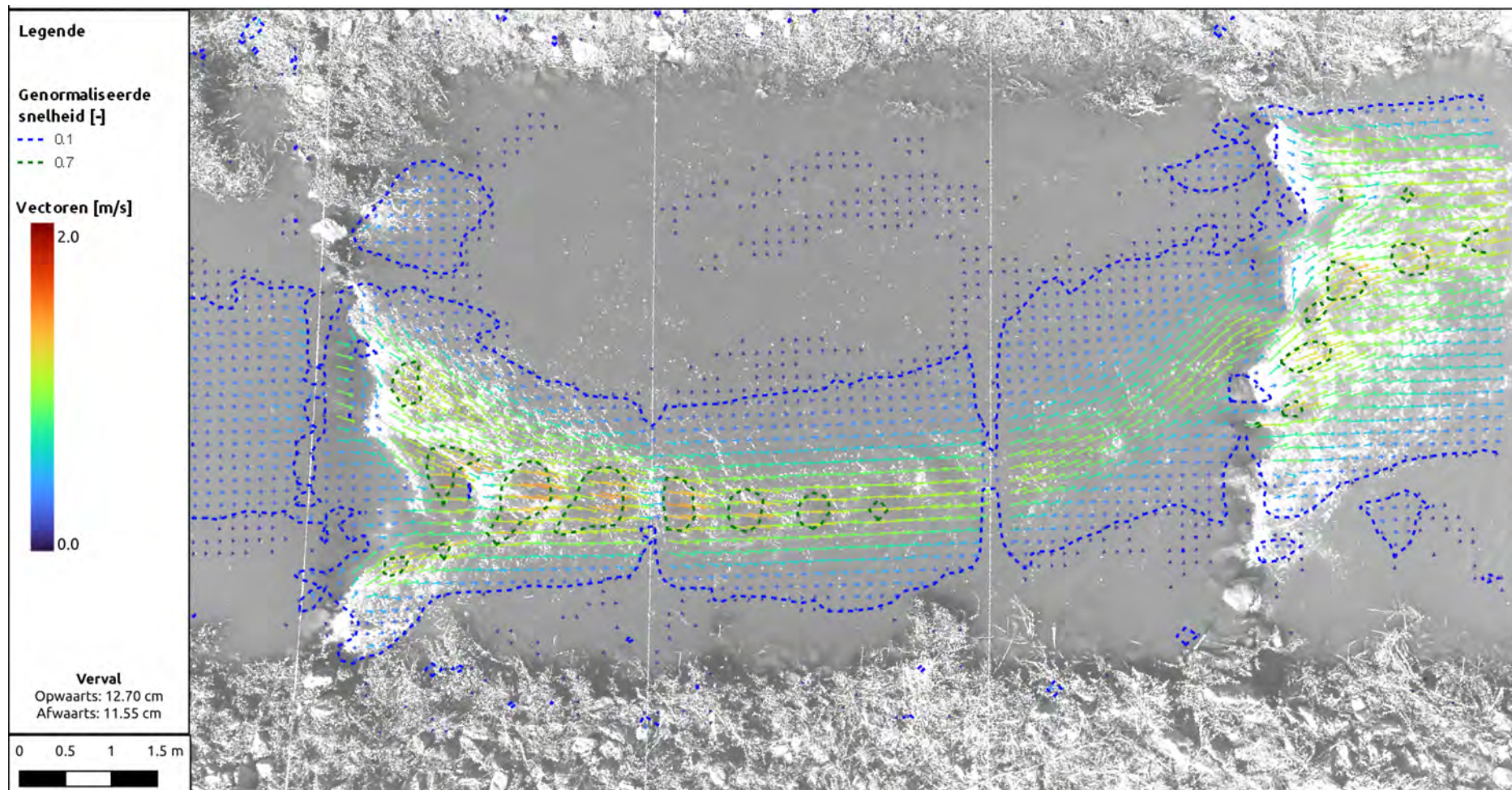




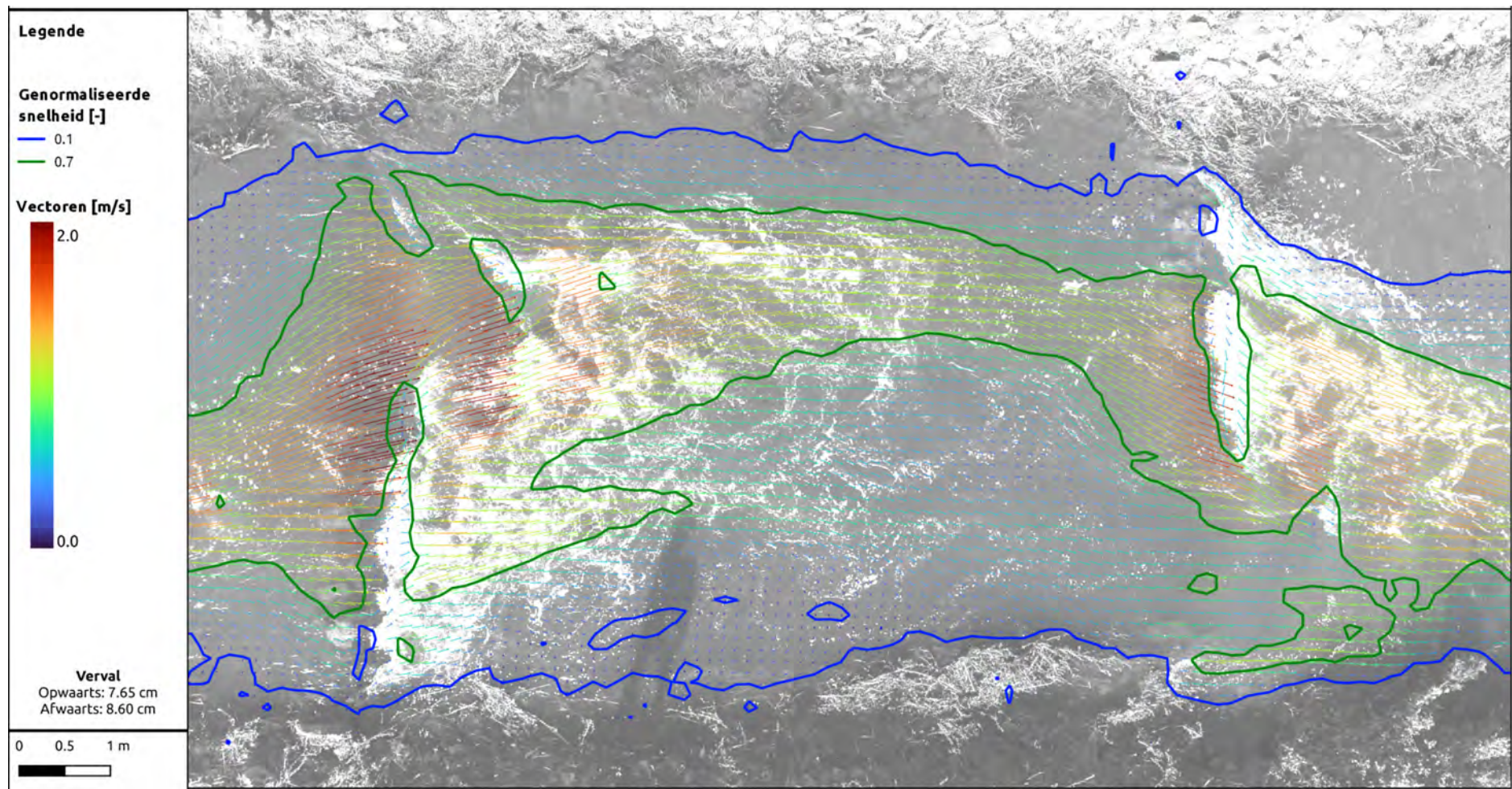
Figuur 86 – LSPIV – Bekken 1 – streefpeil -20 cm – snelheidsvectoren



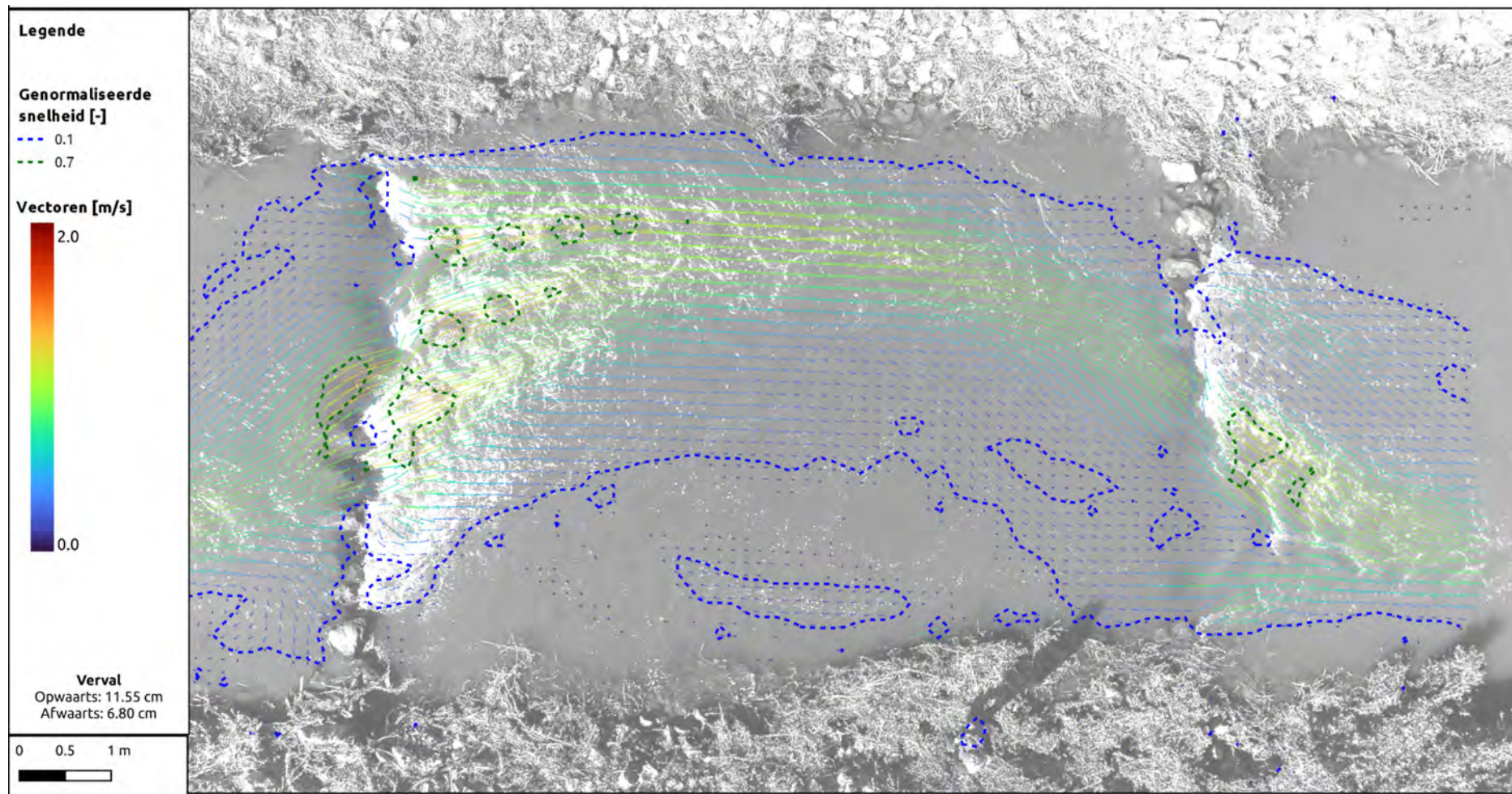
Figuur 87 – LSPIV – Bekken 5 – streefpeil – snelheidsvectoren



Figuur 88 – LSPIV – Bekken 5 – streefpeil -20 cm – snelheidsvectoren

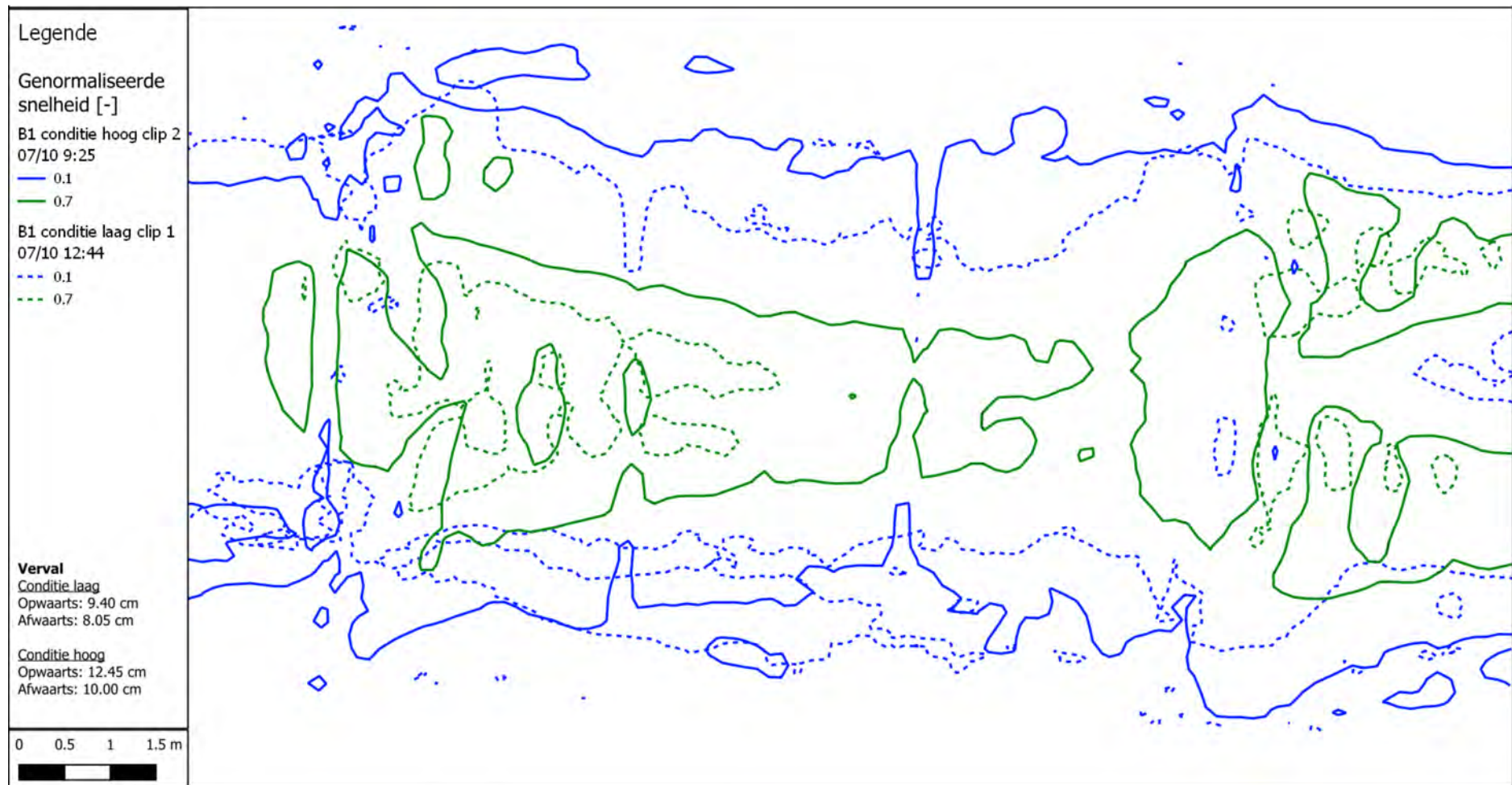


Figuur 89 – LSPIV – Bekken 6 – streefpeil – snelheidsvectoren

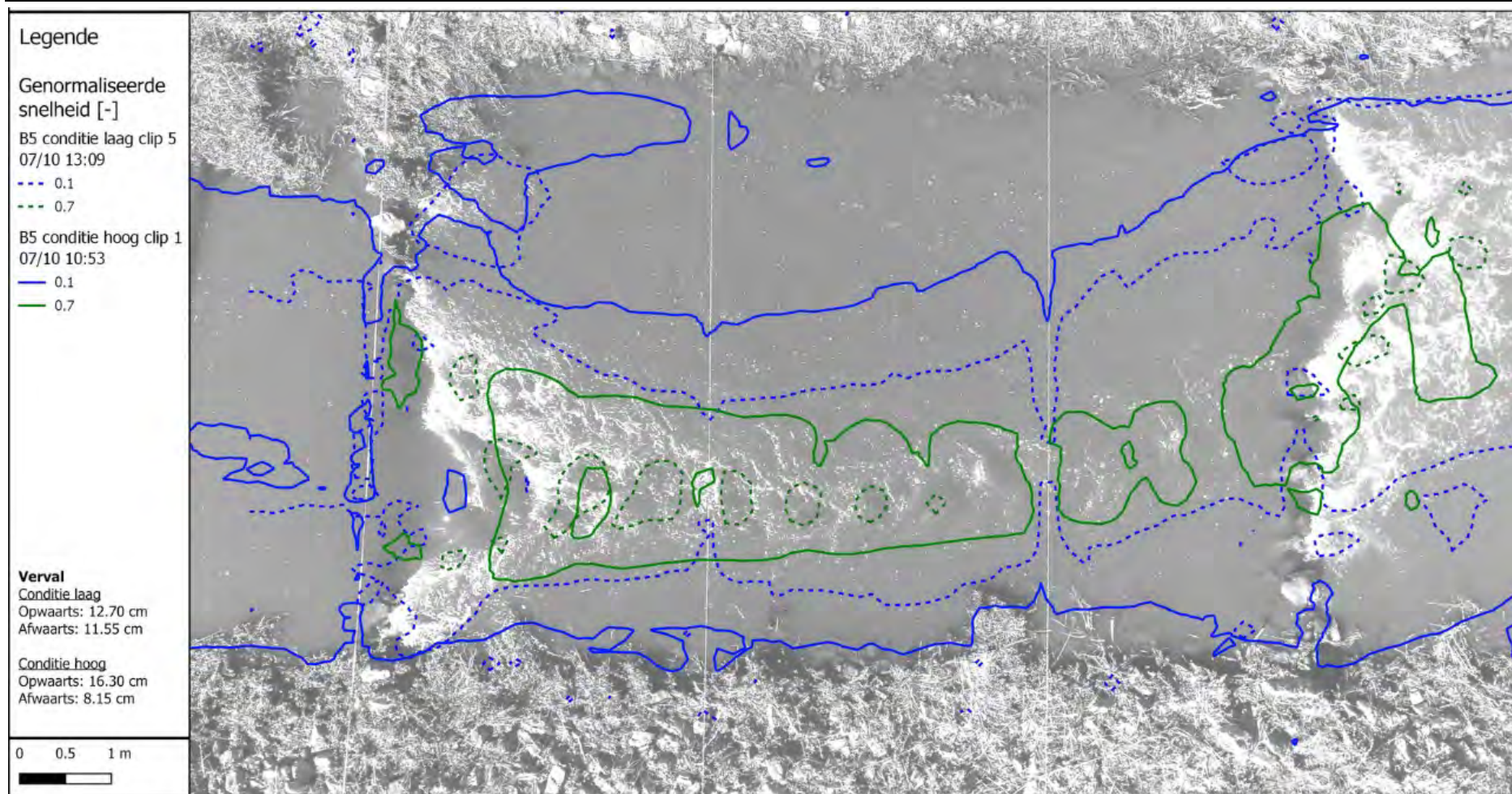


Figuur 90- LSPIV – Bekken 6 – streefpeil -20 cm – snelheidsvectoren

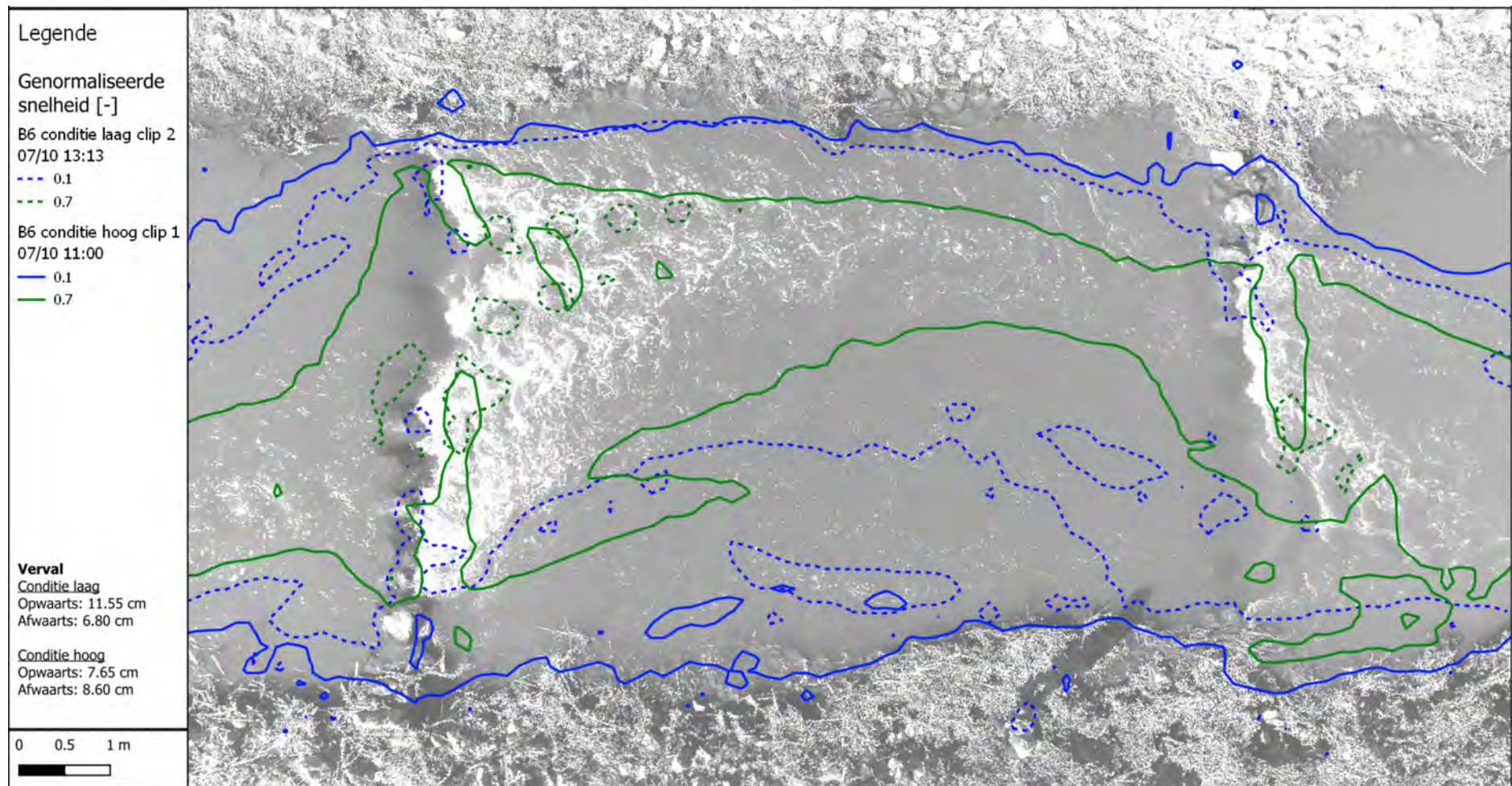
### 9.3 B.3. Vergelijking contouren streefpeil en streefpeil -20 cm



Figuur 91 – LSPIV – Bekken 1 – snelheidscontouren – vergelijking streefpeil met streefpeil -20 cm



Figuur 92 – LSPiV – Bekken 5 – snelheidscontouren – vergelijking streefpeil met streefpeil -20 cm



Figuur 93 – LSPiV – Bekken 6 – snelheidscontouren – vergelijking streefpeil met streefpeil -20 cm



DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**  
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

[waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)