



Vlaanderen
is wetenschap

20_050_3
WL rapporten

Debietmeting in kader van afijking stuw Kerkhove

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Debietmeting in kader van afijking stuw Kerkhove

Vereecken, H.; Vanderkimpen, P.

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 2022
D/2022/3241/011

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vereecken, H.; Vanderkimpfen, P. (2022). Debietmeting in kader van afijking stuw Kerkhove . Versie 3.0. WL Rapporten, 20_050_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Engie Solutions	Ref.:	WL2022R20_050_3
Keywords (3-5):	Stuw, Debiet, IJking		
Kennisdomeinen	Waterbouwkundige constructies > Stuwen > Hydraulisch ontwerp > In situ metingen Waterbouwkundige constructies > Stuwen > Hydraulisch ontwerp > Literatuur- en desktoponderzoek Vispassages > Nevengeul > In situ metingen		
Tekst (p.):	18	Bijlagen (p.):	1
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

Auteur(s):	Vereecken, H.; Vanderkimpfen, P.
------------	----------------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanderkimpfen, P.	Getekend door:Paul Vanderkimpfen (Sign) Getekend op:2022-03-21 15:31:14 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Paul Vanderkimpfen</i>
Projectleider:	Vereecken, H.	Getekend door:Hans Vereecken (Signatu) Getekend op:2022-04-01 08:54:49 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Hans Vereecken</i>

Goedkeuring

Verantwoordelijke HIC:	Deschamps, M.	Getekend door:Maarten Deschamps (Sig) Getekend op:2022-03-22 09:12:23 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Maarten Deschamps</i>
Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op:2022-03-22 09:05:04 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Abdelkarim Bellafkih</i>



Abstract

In Kerkhove langs de Bovenschelde zijn 2 nieuwe stuwen gebouwd van het type segmentstuw. Er zijn 2 formules bepaald om aan de hand van de stuwstand en het op- en afwaartse waterpeil het debiet te bepalen dat over en/of onder de stuw passeert: een overstortformule over de klep (Q_{klep}) en een onderstromingsformule wanneer het water onder het segment stroomt (Q_{seg}). In het bestek voor de bouw van de stuw werd een post voorzien "Ijking van de debietcurve over een stuw door een bekwame instantie" om deze formules te controleren. Aan het Hydrologisch Informatiecentrum van het Waterbouwkundig Laboratorium (WL-HIC) werd gevraagd om deze ijking uit te voeren.

De ijking werd opgesplitst in 2 delen: een afijking voor de normale dagdagelijkse debieten ($0-50 \text{ m}^3/\text{s}$) in de zomerperiode van 2020 en een afijking in het voorjaar van 2021 bij hogere debieten (ifv. beschikbaar debiet). Tegelijk met deze metingen werd ook een controle uitgevoerd van de gemeten waterpeilen.

Een controle van de tijdelijke peilmeters leerde dat de opwaartse peilen $0,069 \text{ m}$ te hoog worden gemeten, de afwaartse $0,020 \text{ m}$ te laag. Alle waterpeilen die werden opgevraagd voor de verdere analyse, werden vervolgens met deze waarden gecorrigeerd.

De door WL-HIC berekende debieten wijken af van de door WL-HIC gemeten debieten. Algemeen zijn de berekende debieten 30% lager dan de gemeten debieten. De berekende debieten over de klep zijn gemiddeld maar 3% hoger, de berekende debieten onder het segment gemiddeld 32% lager.

Op basis van literatuuronderzoek en gestaafd door de uitgevoerde metingen stellen we voor om de debietcoëfficiënt voor de klep te behouden op 1,86 en de debietcoëfficiënt voor het segment te verhogen van 0,58 tot 0,70 à 0,80. Daarnaast wordt gevraagd om de debietcoëfficiënten editeerbaar te maken.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	V
Lijst van de figuren	IV
1 Inleiding	1
2 Resultaten controle waterpeilen.....	7
3 Resultaten in situ meting – lage debieten.....	9
4 Resultaten in situ meting – hoge debieten	10
5 Verwerking	11
5.1 Vergelijking berekende debieten WL-HIC versus gemeten debieten WL-HIC	11
5.2 Evaluatie testen met enkel debiet over de klep.....	13
5.2.1 Evaluatie snelheidshoogte ter hoogte van de stuwen	13
5.2.2 Evaluatie debietcoëfficiënt gebruikt in de formule voor de debietbepaling over de klep	13
5.2.3 Literatuur omtrent debietcoëfficiënten	14
5.3 Evaluatie testen met enkel debiet onder het segment.....	16
5.3.1 Evaluatie debietcoëfficiënt gebruikt in de formule voor de debietbepaling onder het segment	16
5.3.2 Literatuur omtrent debietcoëfficiënten	16
6 Besluit.....	18
Bijlage 1 Referentielijst	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht van belangrijke niveaus (mTAW) te Kerkhove (bron: mail Mathias Calis)	1
Tabel 2 – Overzicht hoogtemetingen verkenmerken in mTAW nabij op- en afwaartse peilmeters nieuwe stuw Kerkhove.....	7
Tabel 3 – Overzicht controlemetingen waterpeil opwaarts en afwaarts aan de hand van mobiel radarpeiltoestel	8
Tabel 4 – Verschillende instellingen stuw 2 Kerkhove en gemeten debieten gedurende ijkingsmeting op 03/07/2020.....	9
Tabel 5 – Verschillende instellingen stuw 2 Kerkhove en gemeten debieten gedurende ijkingsmeting op 05/03/2021.....	10

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Stuw Kerkhove (bron: dVW)	1
Figuur 2 – Formule voor de debietberekening (breedte klep = 10,3m; breedte segment = 12,5m)	2
Figuur 3 – Ligging van de meetsectie (rode lijn) en de peilmeters (blauwe pijl) in de stuwgeul opwaarts de stuwen van Kerkhove.	3
Figuur 4 – Trimaran met Riogrande 1200 kHz ADCP	4
Figuur 5 – Ligging NGL altimetrische punten (blauw) en 3D-punt (oranje) nabij stuw Kerkhove	5
Figuur 6 – Carlson-BRx7 GNSS ontvanger.....	5
Figuur 7 – Mobiele radarpeilmeter waterpas gemonteerd naast afwaartse peilmeter nieuwe stuw Kerkhove	6
Figuur 8 – Opwaartse en afwaartse tijdelijke peilmeters ter hoogte van nieuwe stuw Kerkhove met de gewaterpaste hoogte van het aanwezige verkenmerk (in oranje cirkel).....	7
Figuur 9 – Vergelijking berekende debieten door WL-HIC (x-as) en gemeten debieten door WL-HIC (y-as) voor alle testen	11
Figuur 10 – Vergelijking berekende debieten door WL-HIC (x-as) en gemeten debieten door WL-HIC (y-as) voor debieten enkel over de klep.....	12
Figuur 11 – Vergelijking berekende debieten door WL-HIC (x-as) en gemeten debieten door WL-HIC (y-as) voor debieten enkel onder het segment.....	12
Figuur 12 – Berekende set coëfficiënten voor de testen met debiet enkel over de klep in functie van de gemeten debieten. De default waarde gebruikt in de formule is 1,86 (rode lijn).	13
Figuur 13 – Berekende set coëfficiënten voor de testen met debiet enkel onder het segment in functie van de gemeten debieten. De default waarde gebruikt in de formule is 0,58 (rode lijn).	16

Er zijn 2 formules bepaald om aan de hand van de stuwstand en het op- en afwaartse waterpeil het debiet te bepalen dat over en/of onder de stuw passeert: een overstortformule over de klep (Q_{klep}) en een onderstromingsformule wanneer het water onder het segment stroomt (Q_{seg}). Indien het water zowel overstort als onder het segment stroomt worden de formules opgeteld (Figuur 2). Deze formules dienen gecontroleerd te worden aangezien in het verleden reeds is gebleken dat het gebruik van deze formules niet altijd betrouwbare debieten oplevert (Vereecken et al. 2013). In het bestek voor de bouw van de stuw werd daartoe een post voorzien "Ijking van de debietcurve over een stuw door een bekwame instantie". Aan het Hydrologisch Informatiecentrum van het Waterbouwkundig Laboratorium (WL-HIC) werd daartoe gevraagd om deze ijking uit te voeren.

Het debiet over een stuw wordt berekend met volgende formule:

$$Q_{stuw} = Q_{seg} + Q_{klep}$$

Waarbij:

Q_{stuw} = Debiet over betreffende stuw
 Q_{seg} = Debiet onder segment
 Q_{reg} = Debiet over regelklep

$$Q_{klep} = 1,86 * b * h^{\frac{3}{2}}$$

Waarbij:

b = breedte klep
 h = overstort

$$Q_{seg} = 0,58 * b * h * \sqrt{2 * 9,81 * (OPW - AFW)}$$

Waarbij:

b = breedte segment
 h = segmentopening
 OPW = Opwaarts gemiddeld peil
 AFW = Afwaarts gemiddeld peil

Figuur 2 – Formule voor de debietberekening (breedte klep = 10,3m; breedte segment = 12,5m)

De ijking van de stuw moet idealiter gebeuren over een zo groot mogelijk debietbereik. Op basis van de opwaartse debietmeetpost te Helkijn weten we dat op de Bovenschelde debieten tot 200 m³/s kunnen optreden. Dergelijke hoge debieten doen zich vooral in het najaar of winter voor. Daarom wordt ervoor gekozen om de ijking in 2 delen op te splitsen: een afijking voor de normale dagdagelijkse debieten (0-50 m³/s) in de zomerperiode van 2020 en een afijking in het voorjaar van 2021 bij hogere debieten.

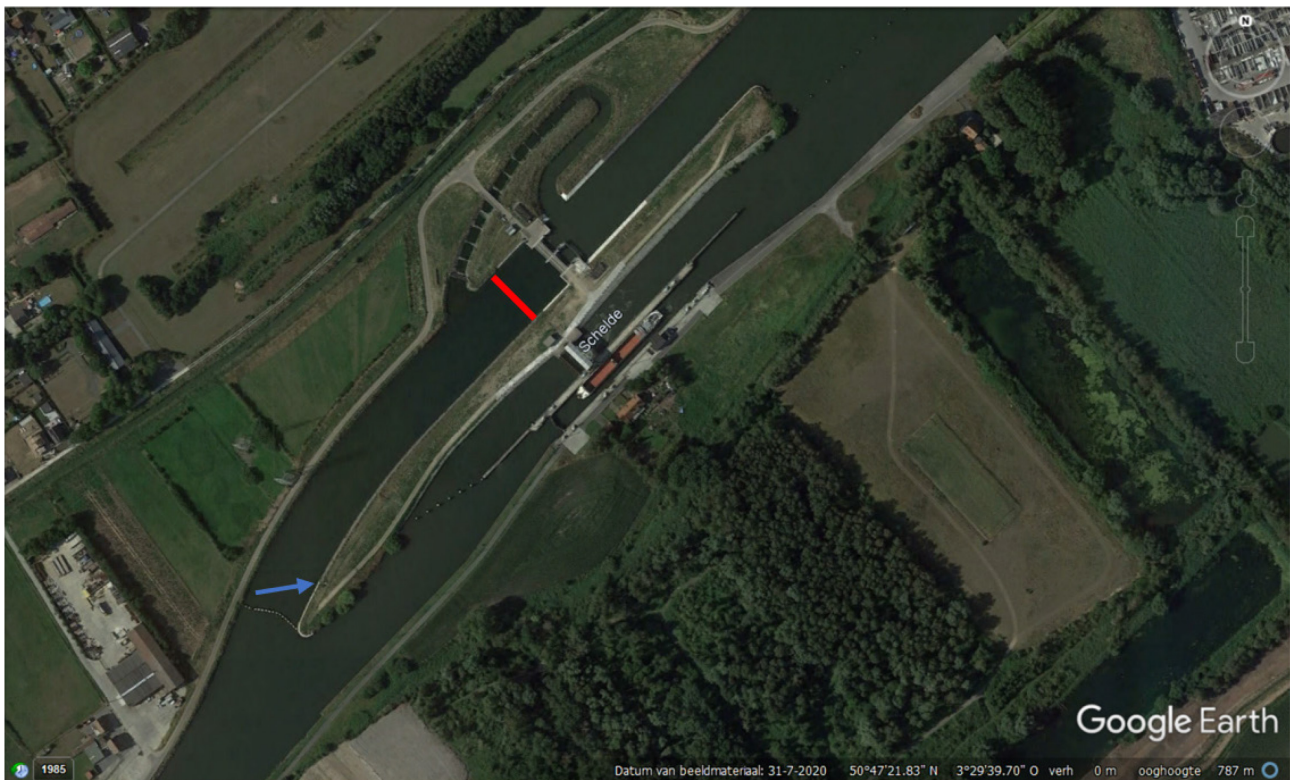
Om waterbesparend te werken, wordt ervoor gekozen maar 1 stuw af te ijken, in dit geval stuw 2 (meest zuidelijke stuw). Er wordt dan van uitgegaan dat deze ijking ook kan toegepast worden op de andere stuw. Toch duiden we erop dat bij het gebruik van beide stuwen tegelijk de verhanglijn opwaarts anders zal beïnvloed worden, waardoor het totale debiet over de 2 stuwen wellicht lager zal uitvallen dan de som van de debieten via de individuele stuwen op basis van de ijkingscurves. Hoe groot deze afwijking exact is is momenteel niet bekend en vormt geen deel van dit onderzoek. Wanneer enkel de kleppen in gebruik zijn is dit effect waarschijnlijk verwaarloosbaar klein.

De metingen werden uitgevoerd opwaarts de stuwen in de stuwgeul (Figuur 3 – rode lijn). Zo is er minimale invloed van het scheepvaartverkeer en wordt enkel het debiet gemeten dat over/onder de stuwen passeert.

De metingen worden uitgevoerd met behulp van een trimaran met ingebouwde Riogrande ADCP 1200 kHz (Figuur 4), overgetrokken met touwen. Dit toestel meet over de gehele diepte de stroomsnelheden op in cellen van 25 cm en meet ook het diepteprofiel op van de gevaren raai (bathymetrie). Door het toestel over te trekken wordt het volledige stromingsprofiel opgemeten, waarna het debiet in het toestel berekend wordt.

Deze ijking heeft 3 doelen:

1. Verifiëren of de door de opdrachtgever Engie Solutions (ES) berekende debieten via de formules overeenstemmen met deze berekend door WL-HIC
2. De WL-HIC berekeningen vergelijken met de gemeten debieten
3. Evalueren of de debietcoëfficiënten, respectievelijk 1,86 voor de klep en 0,58 voor het segment, goed gekozen zijn of deze verder verfijnd moeten worden.



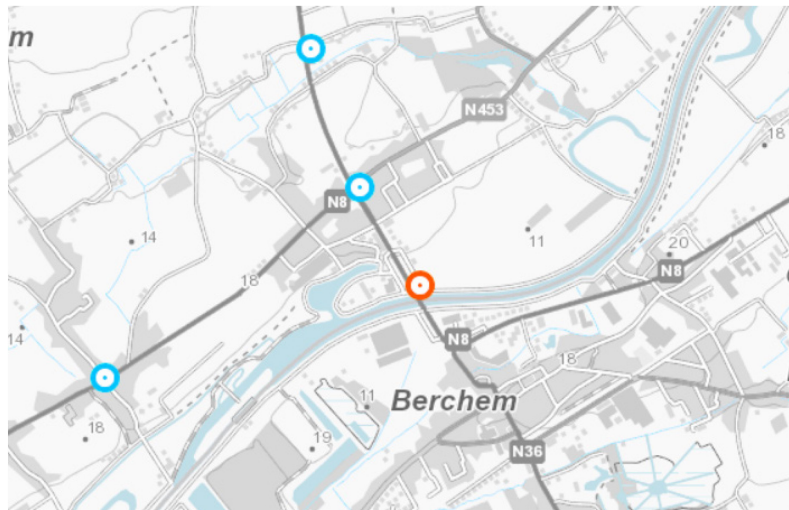
Figuur 3 – Ligging van de meetsectie (rode lijn) en de peilmeters (blauwe pijl) in de stuwgeul opwaarts de stuwen van Kerkhove.



Figuur 4 – Trimaran met Riogrande 1200 kHz ADCP

In het voorjaar van 2021 werden ook de op- en afwaartse waterpeilen in mTAW gecontroleerd. Deze peilen worden gemeten door een tijdelijke opstelling (Figuur 8), die is afgeregeld op de oude peilmeters aan de oude stuw. De hoogte van de waterpeilen werd gecontroleerd door een verkenmerk in de onmiddellijke omgeving te plaatsen en dit verkenmerk via enerzijds een waterpassing vanuit een NGI (Nationaal Geografisch Instituut) punt te verifiëren (uitgevoerd door DVW), anderzijds via een RTK-hoogtemeting (uitgevoerd door WL-HIC en door DVW). De NGI punten van waaruit de waterpassing werd uitgevoerd zijn weergegeven op onderstaande kaart (Figuur 5), waarop 3 altimetrische punten (blauw – Ehm 17, 8, 10) en 1 3D-punt (oranje - 29T701) te zien zijn. De altimetrische punten zijn door NGI opgemeten via optische waterpassing. De 3D punten zijn bepaald door twee reeksen statische GNSS metingen van 1 uur elk en verwerking van de waarnemingen met gespecialiseerde software, waardoor veel meetfouten kunnen weggewerkt worden. Daarnaast wordt het 3D punt ook nog gewaterpast naar de twee dichtstbijzijnde altimetrische punten. Uiteindelijk wordt de hoogte bekomen via GNSS gepubliceerd, op voorwaarde dat het verschil tussen beide hoogtewaarden beperkt blijft.

De RTK-hoogtemeting door WL-HIC werd uitgevoerd met een Carlson-BRx7 GNSS (Global Navigation Satellite System) ontvanger (Figuur 6). Hierbij werd gedurende een 30-tal seconden gemeten op het verkenmerk en dit werd meerdere keren (7-11) herhaald. Onmiddellijk na de RTK-opmeting van de verkenmerken werd ook het 3D-punt 29T701 opgemeten ter controle van de kwaliteit van de RTK-hoogtemetingen op dat moment.



Figuur 5 – Ligging NGI altimetrische punten (blauw) en 3D-punt (oranje) nabij stuw Kerkhove



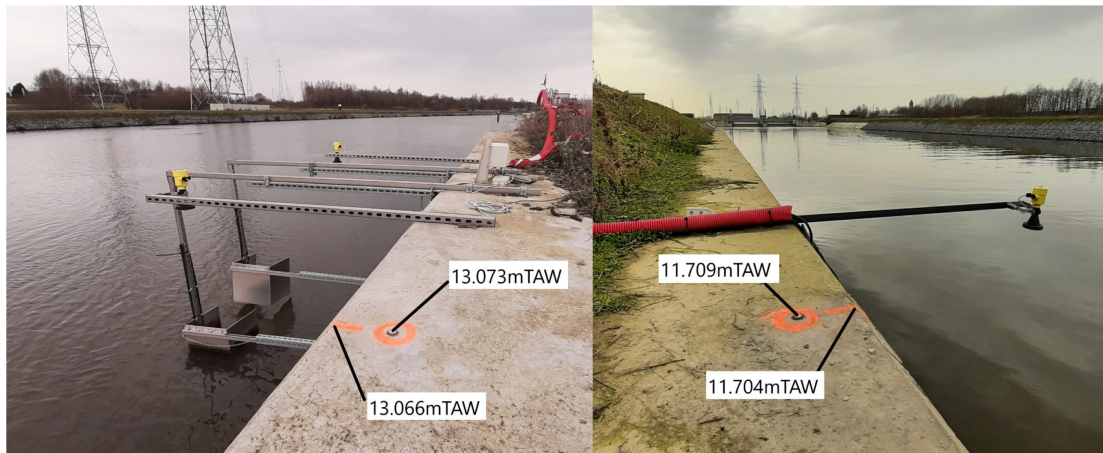
Figuur 6 – Carlson-BRx7 GNSS ontvanger

Nadien werd vanaf het verkenmerk het waterpeil gecontroleerd door een mobiele radarpeilmeter met display die waterpas gemonteerd werd (Figuur 7). Hier werd gedurende 6 reeksen van 10 seconden de afstand tot het water opgemeten en nadien vergeleken met de waarden van de tijdelijke peilmeters.



Figuur 7 – Mobiele radarpeilmeter waterpas gemonteerd naast afwaartse peilmeter nieuwe stuw Kerkhove

2 Resultaten controle waterpeilen



Figuur 8 – Opwaartse en afwaartse tijdelijke peilmeters ter hoogte van nieuwe stuw Kerkhove met de gewaterpaste hoogte van het aanwezige verkenmerk (in oranje cirkel)

Figuur 8 en tabel 2 tonen de gewaterpaste hoogte van de verkenmerken nabij de nieuwe tijdelijke peilmeters, waarbij vertrokken werd vanuit NGI punt Ehm10. Tevens worden de resultaten van de RTK-metingen door DVW en WL-HIC van diezelfde punten opgelijst. Gezien de verschillen tussen de RTK en de waterpassing, en mede gezien er ook op de waterpassing tussen de gebruikte NGI-punten onderling verschillen optraden van 1 à 2 cm, vastgesteld tijdens een nieuwe waterpassing op 1/4/21, werd hier gekozen om een gemiddelde waarde van de verschillende technieken te gebruiken.

Tabel 2 – Overzicht hoogtemetingen verkenmerken in mTAW nabij op- en afwaartse peilmeters nieuwe stuw Kerkhove

	RTK-meting DVW (24/2/21) (mTAW)	RTK-meting WL- HIC (5/3/21) (mTAW)	Waterpassing vanuit Ehm10 (DVW 24/2/21) (mTAW)	Gecorrigeerde waterpassing vanuit Ehm10 (DVW 24/2/21) obv waterpassing vanuit Ehm8 (DVW 1/4/21) (mTAW)	Gebruikte hoogte (gemiddelde) (mTAW)
Verkenmerk opwaarts	13,049	13,048	13,073 (*)	13,055	13,051
Verkenmerk afwaarts	11,675	11,669	11,709 (*)	11,692	11,679
3D-punt 29T701 (Hoogte: 13,108 mTAW)		13,116			

(*) – deze waarden werden niet meegenomen in de berekening van het gemiddelde

Op basis van de gekozen hoogte van de verkenmerken werd dus de controle van de waterpeilen uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de opwaartse peilen 0,069 m te hoog worden gemeten, de afwaartse 0,020 m te laag (tabel 3). Alle waterpeilen die werden opgevraagd voor de verdere analyse, werden vervolgens met deze waarden gecorrigeerd.

Tabel 3 – Overzicht controlemetingen waterpeil opwaarts en afwaarts aan de hand van mobiel radarpeiltoestel

OPWAARTS						
datum	tijd	opw peil (mTAW)	mob radar (m)	opw peil controle (mTAW)	verschil (m)	
5/03/2021	12:26:00	11,505	1,613	11,438	0,067	
5/03/2021	12:26:10	11,506	1,612	11,439	0,067	
5/03/2021	12:26:20	11,506	1,613	11,438	0,069	
5/03/2021	12:26:30	11,506	1,614	11,437	0,070	
5/03/2021	12:26:40	11,506	1,614	11,437	0,069	
5/03/2021	12:26:50	11,506	1,615	11,436	0,070	
5/03/2021	12:27:00	11,507	1,615	11,436	0,071	
					0,069	gemiddelde
AFWAARTS						
datum	tijd	afw peil (mTAW)	mob radar (m)	afw peil controle (mTAW)	verschil (m)	
5/03/2021	12:46:00	10,191	1,467	10,212	-0,020	
5/03/2021	12:46:10	10,190	1,467	10,212	-0,022	
5/03/2021	12:46:20	10,189	1,468	10,211	-0,021	
5/03/2021	12:46:30	10,190	1,468	10,211	-0,021	
5/03/2021	12:46:40	10,190	1,468	10,211	-0,020	
5/03/2021	12:46:50	10,193	1,469	10,210	-0,017	
5/03/2021	12:47:00	10,194	1,469	10,210	-0,016	
					-0,020	gemiddelde

3 Resultaten in situ meting – lage debieten

Op 03/07/2020 werden onderstaande 12 testen uitgevoerd, waarbij de stuw telkens op een andere stand werd ingesteld. Enkele minuten na een instelling werden de ijkingsmetingen uitgevoerd. De meeste instellingen werden 4 keer bemeten, wegens gebrek aan voldoende water werden enkele instellingen 2 keer bemeten (Tabel 4).

Tabel 4 – Verschillende instellingen stuw 2 Kerkhove en gemeten debieten gedurende ijkingsmeting op 03/07/2020

Testnr	Tijd begin (MET)	Tijd einde (MET)	peil opp_gem (mTAW)	stand klep_gem (mTAW)	peil afw_gem (mTAW)	opening segment_gem (m)	Qgemeten HIC (m³/s)
1a	03/07/2020 08:18:45	03/07/2020 08:23:35	11,39	11,00	10,05	0,00	2,980
1b	03/07/2020 08:27:25	03/07/2020 08:31:05	11,41	11,00	10,04	0,00	4,211
1c	03/07/2020 08:32:55	03/07/2020 08:36:25	11,41	11,00	10,03	0,00	3,807
1d	03/07/2020 08:37:45	03/07/2020 08:41:05	11,45	11,00	10,03	0,00	4,109
2a	03/07/2020 08:47:45	03/07/2020 08:50:55	11,41	10,80	10,02	0,00	9,309
2b	03/07/2020 08:51:15	03/07/2020 08:54:25	11,41	10,80	10,02	0,00	7,812
2c	03/07/2020 08:55:25	03/07/2020 08:58:25	11,42	10,80	10,02	0,00	8,338
2d	03/07/2020 08:59:05	03/07/2020 09:01:55	11,43	10,80	10,03	0,00	8,670
3a	03/07/2020 09:11:05	03/07/2020 09:15:05	11,39	10,60	10,03	0,00	11,902
3b	03/07/2020 09:16:45	03/07/2020 09:19:45	11,40	10,60	10,03	0,00	12,294
3c	03/07/2020 09:25:35	03/07/2020 09:28:45	11,46	10,60	10,02	0,00	12,940
3d	03/07/2020 09:29:35	03/07/2020 09:32:15	11,45	10,60	10,01	0,00	13,474
4a	03/07/2020 09:50:15	03/07/2020 09:53:45	11,39	10,77	10,08	0,19	16,378
4b	03/07/2020 09:54:35	03/07/2020 09:57:35	11,38	10,77	10,09	0,19	16,262
4c	03/07/2020 10:06:05	03/07/2020 10:09:35	11,39	10,77	10,08	0,19	15,936
4d	03/07/2020 10:10:05	03/07/2020 10:12:55	11,38	10,77	10,08	0,19	15,848
5a	03/07/2020 10:24:45	03/07/2020 10:28:15	11,42	10,94	10,10	0,39	21,864
5b	03/07/2020 10:29:15	03/07/2020 10:31:55	11,38	10,94	10,10	0,39	20,108
5c	03/07/2020 10:32:35	03/07/2020 10:35:55	11,35	10,94	10,12	0,39	18,946
5d	03/07/2020 10:37:05	03/07/2020 10:39:25	11,36	10,94	10,10	0,39	20,445
6a	03/07/2020 10:59:55	03/07/2020 11:02:45	11,38	11,63	10,11	0,40	17,055
6b	03/07/2020 11:03:35	03/07/2020 11:06:45	11,37	11,63	10,08	0,40	16,660
7a	03/07/2020 11:18:25	03/07/2020 11:21:05	11,33	11,95	10,09	0,80	36,720
7b	03/07/2020 11:21:25	03/07/2020 11:23:55	11,32	11,95	10,10	0,80	35,198
8a	03/07/2020 11:27:45	03/07/2020 11:30:15	11,31	11,79	10,12	0,60	24,686
8b	03/07/2020 11:30:45	03/07/2020 11:32:35	11,27	11,80	10,11	0,61	25,259
9a	03/07/2020 11:37:45	03/07/2020 11:40:05	11,31	11,45	10,07	0,19	7,608
9b	03/07/2020 11:40:45	03/07/2020 11:42:55	11,36	11,46	10,04	0,19	8,107
10a	03/07/2020 11:52:35	03/07/2020 11:54:55	11,37	10,81	10,03	0,11	12,156
10b	03/07/2020 11:55:45	03/07/2020 11:58:05	11,35	10,81	10,02	0,11	11,291
10c	03/07/2020 11:58:25	03/07/2020 12:00:25	11,35	10,81	10,01	0,11	10,077
10d	03/07/2020 12:01:05	03/07/2020 12:03:15	11,36	10,81	10,01	0,11	11,625
11a	03/07/2020 12:19:05	03/07/2020 12:21:25	11,34	11,58	9,96	0,09	1,157
11b	03/07/2020 12:22:15	03/07/2020 12:25:05	11,35	11,59	9,99	0,09	3,096
11c	03/07/2020 12:25:55	03/07/2020 12:28:55	11,36	11,59	9,98	0,09	3,063
11d	03/07/2020 12:29:35	03/07/2020 12:32:15	11,37	11,58	9,98	0,09	1,854
12a	03/07/2020 12:40:15	03/07/2020 12:43:55	11,31	11,20	9,98	0,00	0,412
12b	03/07/2020 12:44:35	03/07/2020 12:48:15	11,29	11,20	9,96	0,00	0,123
12c	03/07/2020 13:12:05	03/07/2020 13:15:45	11,36	11,20	10,02	0,00	0,455
12d	03/07/2020 13:17:05	03/07/2020 13:21:15	11,36	11,20	9,98	0,00	0,754

In de verwerking worden de testen opgesplitst in testen met enkel debiet over de klep (test 1, 2, 3, 12) en testen met enkel stroming onder het segment (test 6, 7, 8, 9), meer bepaald om de voorgestelde coëfficiënten aangehaald in figuur 2 te evalueren. De testen waar de combinatie van overstort en onderstroming geldt (test 4, 5, 10, 11) worden enkel besproken in vergelijking met de gemeten debieten.

4 Resultaten in situ meting – hoge debieten

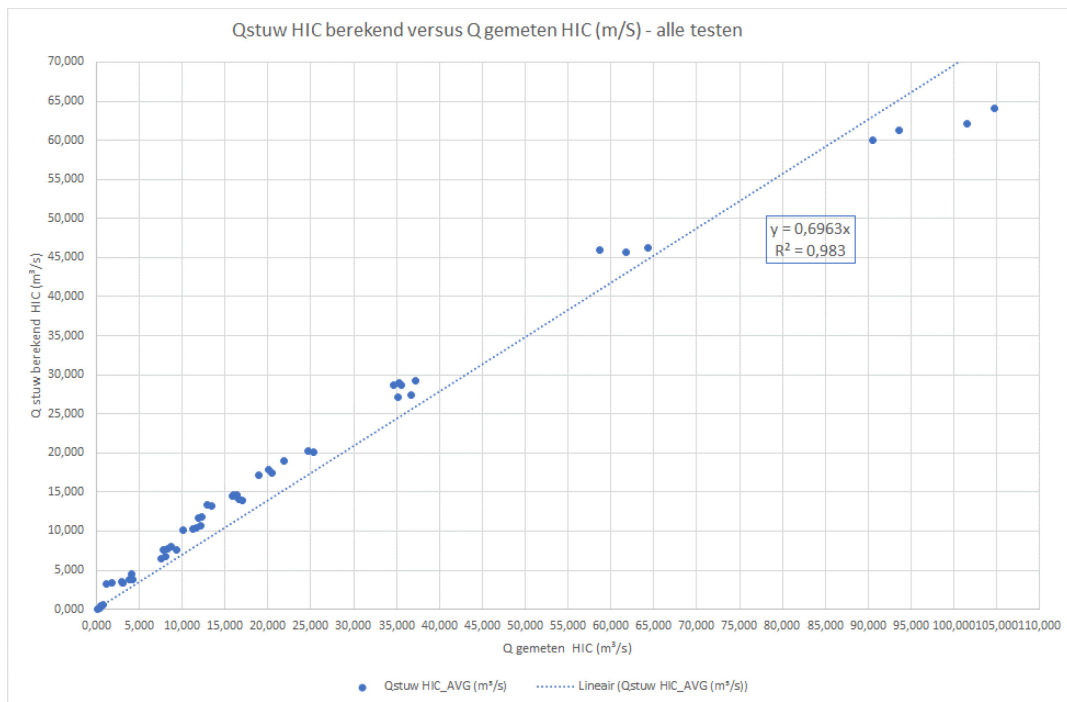
Op 05/03/2021 werden onderstaande 4 testen uitgevoerd, waarbij het segment telkens op een andere stand werd ingesteld. Het volledige debiet ging dan ook onder het segment en niet over de klep. Enkele minuten na een instelling werden de ijkingsmetingen uitgevoerd. De instellingen werden 2 tot 4 keer bemeaten, in functie van de beschikbare waterhoeveelheid (Tabel 5).

Tabel 5 – Verschillende instellingen stuw 2 Kerkhove en gemeten debieten gedurende ijkingsmeting op 05/03/2021

Testnr	Tijd begin (MET)	Tijd einde (MET)	peil opp_gem (mTAW)	stand klep_gem (mTAW)	peil afw_gem (mTAW)	opening segment_gem (m)	Qgemeten HIC (m³/s)
13a	5/03/2021 10:18:31	5/03/2021 10:21:09	11,38	12,11	10,23	0,84	37,212
13b	5/03/2021 10:21:23	5/03/2021 10:23:31	11,38	12,11	10,25	0,84	35,282
13c	5/03/2021 10:23:45	5/03/2021 10:25:44	11,35	12,11	10,25	0,84	34,651
13d	5/03/2021 10:25:53	5/03/2021 10:27:49	11,36	12,11	10,25	0,84	35,571
14a	5/03/2021 10:32:55	5/03/2021 10:34:34	11,34	12,55	10,29	1,39	64,312
14b	5/03/2021 10:34:47	5/03/2021 10:36:35	11,34	12,55	10,31	1,39	58,755
14c	5/03/2021 10:37:07	5/03/2021 10:38:44	11,34	12,55	10,32	1,39	61,765
15a	5/03/2021 10:45:12	5/03/2021 10:46:54	11,24	12,99	10,34	1,95	90,529
15b	5/03/2021 11:33:39	5/03/2021 11:35:18	11,22	12,99	10,28	1,94	93,621
16a	5/03/2021 11:38:02	5/03/2021 11:39:13	11,12	13,19	10,31	2,20	104,683
16b	5/03/2021 11:39:27	5/03/2021 11:40:32	11,09	13,19	10,33	2,20	101,585

5 Verwerking

5.1 Vergelijking berekende debieten WL-HIC versus gemeten debieten WL-HIC

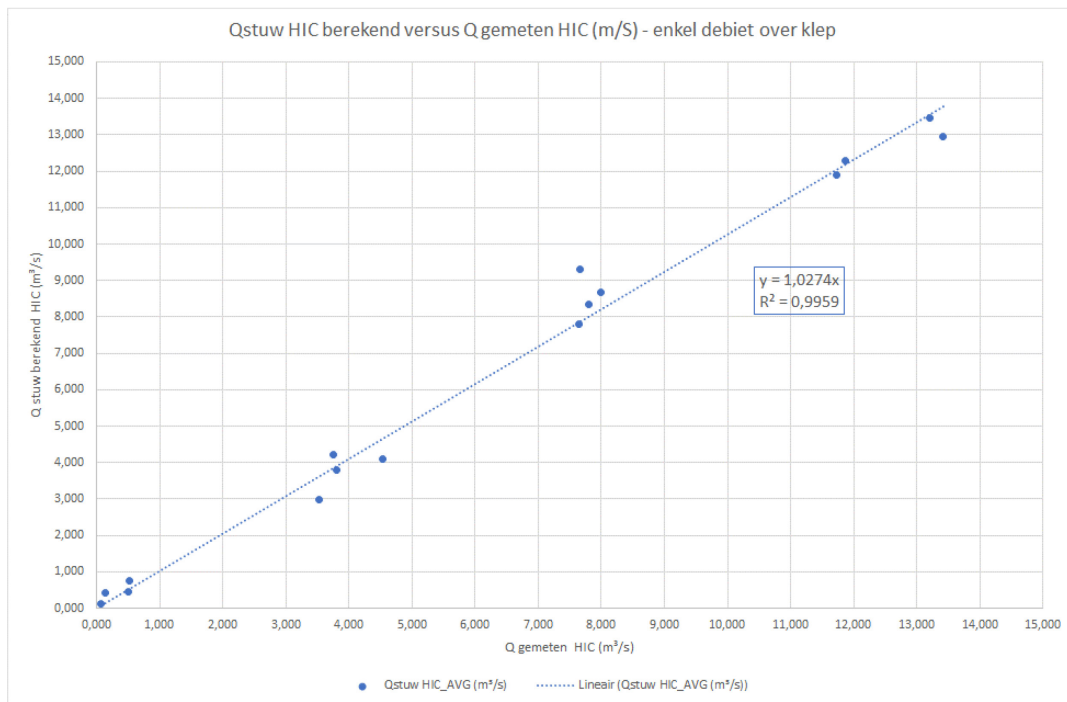


Figuur 9 – Vergelijking berekende debieten door WL-HIC (x-as) en gemeten debieten door WL-HIC (y-as) voor alle testen

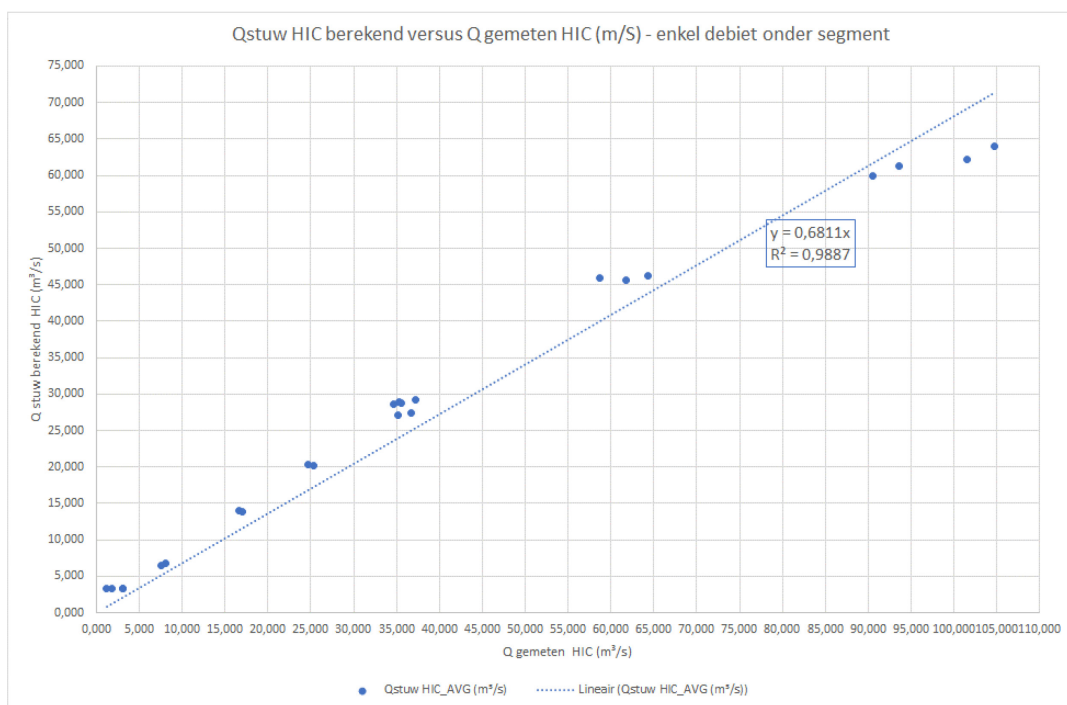
Figuur 9 toont de berekende debieten van WL-HIC versus de gemeten debieten, en dit voor alle testen uitgevoerd op 03/07/2020 en 05/03/2021. Hieruit blijkt dat in het meetbereik van deze testen de debieten globaal 30% onderschat worden.

In figuur 10 en 11 wordt deze analyse uitgesplitst voor enkel klepwerking, respectievelijk enkel segmentwerking. Hieruit blijkt dat de berekende debieten over de klep zeer vergelijkbaar zijn met de metingen, gemiddeld maar 3% overschatting. De berekende debieten onder het segment worden daarentegen gemiddeld 32% onderschat in vergelijking met de metingen.

In het volgende hoofdstuk wordt meer in detail ingegaan op de gebruikte coëfficiënten voor zowel de klep als het segment.



Figuur 10 – Vergelijking berekende debieten door WL-HIC (x-as) en gemeten debieten door WL-HIC (y-as) voor debieten enkel over de klep



Figuur 11 – Vergelijking berekende debieten door WL-HIC (x-as) en gemeten debieten door WL-HIC (y-as) voor debieten enkel onder het segment

5.2 Evaluatie testen met enkel debiet over de klep

5.2.1 Evaluatie snelheidshoogte ter hoogte van de stuwen

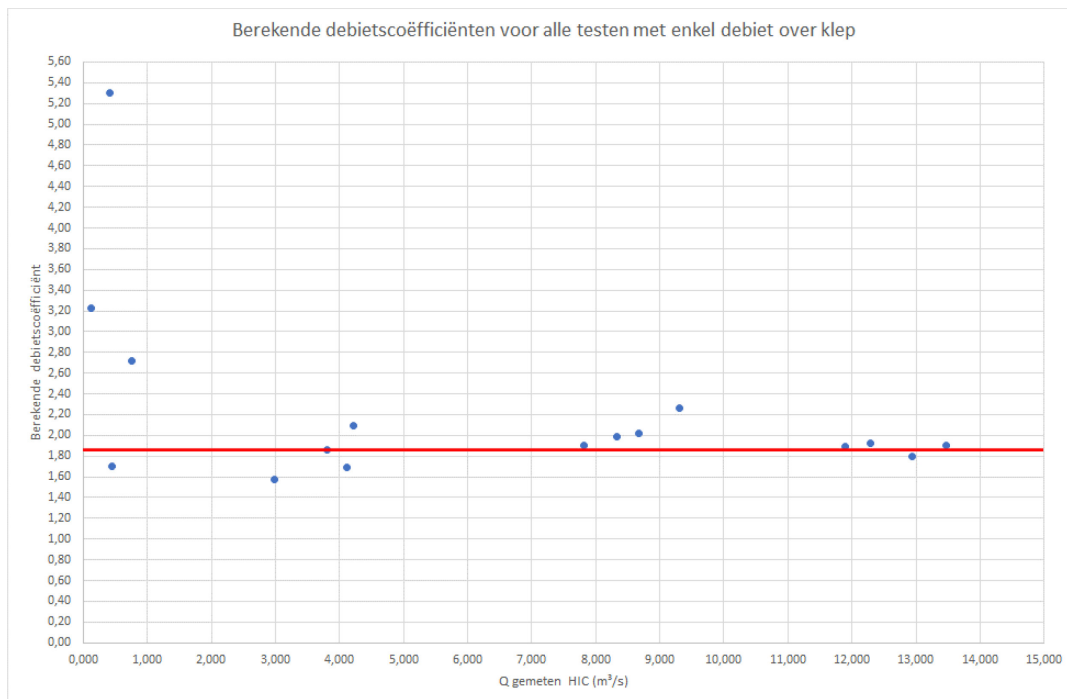
Het waterpeil ter berekening van de debieten over de klep werd gemeten ongeveer 200m opwaarts de stuwen. Omwille van sterke stroomsnelheden kan lokaal ter hoogte van de stuwen een bijkomende waterstandsdeling optreden, de zogenaamde snelheidshoogte, gedefinieerd als $v^2/2g$, met v de gemiddelde stroomsnelheid in m/s en g de valversnelling, $9,81 \text{ m/s}^2$.

Het hoogst gemeten debiet over de klep trad op bij test 3, namelijk gemiddeld $12,65 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit resulteert in een gemiddelde stroomsnelheid van $0,085 \text{ m/s}$ over het volledige dwarsprofiel ter hoogte van de debietmeetsectie van de ijking (rode lijn Figuur 3), die ongeveer 149 m^2 bedraagt. De stroomsnelheid ter hoogte van de peilmeting is waarschijnlijk nog iets lager. Dit levert een snelheidshoogte op van minder dan 1 mm , wat te verwaarlozen is.

Hieruit besluiten we dat de gemeten waterpeilen voldoende representatief zijn voor de debietberekeningen over de klep.

5.2.2 Evaluatie debietcoëfficiënt gebruikt in de formule voor de debietbepaling over de klep

Zoals in Figuur 10 getoond, worden de debieten over de klep slechts met 3% overschat. De goede match blijkt ook uit figuur 12, waar uit de debietmetingen afgeleide coëfficiënten zijn weergegeven ten opzichte van de in de formule gebruikte $1,86$ (rode lijn).



Figuur 12 – Berekende set coëfficiënten voor de testen met debiet enkel over de klep in functie van de gemeten debieten.
De default waarde gebruikt in de formule is $1,86$ (rode lijn).

De berekende coëfficiënten bij de test met de laagste debieten (test 12) wijken beduidend af van de oorspronkelijk gebruikte 1,86. We moeten ook stellen dat de debietmeting bij dergelijke omstandigheden ook niet geheel nauwkeurig verloopt. De gemiddelde stroomsnelheid gedurende test 12 over het gehele dwarsprofiel bedraagt 0,003 m/s. Rekening houdende met een nauwkeurigheid van 0,002 m/s op de gemeten stroomsnelheden (specificaties ADCP), moeten we rekening houden met een fout van 66% op de gemeten debieten, en dus ook op de berekende coëfficiënten.

Samengevat kan gesteld worden dat de coëfficiënt van 1,86 voor de berekening van debieten over de klep een goed gekozen waarde is en dat deze geldig is over het volledige geteste meetbereik van de klep, voor 1 stuw 0-14 m³/s.

5.2.3 Literatuur omtrent debietcoëfficiënten

In de literatuur kunnen debietcoëfficiënten gevonden worden voor een aantal standaard stuwtypes, waaronder de “sharp crested weir” (overlaat met dunne wand) en de “broad crested weir” (overlaat met brede drempel). Een gebogen klep in een schuine stand vormt een “short crested weir” (overlaat met smalle drempel). Voor een dergelijk type stuw moeten de debietcoëfficiënten op experimentele wijze bepaald worden. In verticale stand lijkt de klep enigszins op een sharp crested weir en in horizontale stand benadert ze een broad crested weir. De te verwachten range van de debietcoëfficiënten kan dan ook ruw ingeschat worden op basis van de formules voor beide types. Hierbij wordt uitgegaan van vrije stroming over de klep.

Voor een **broad crested weir** is de debietcoëfficiënt gelijk aan (Bos, 1989):

$$C_{ES} = C_d * C_v * (2/3) * (2/3 * g)^{0.5}$$

met C_{ES} = debietcoëfficiënt (zoals gedefinieerd door ES)

C_d = debietcoëfficiënt (zoals gedefinieerd in de meeste literatuur)

C_v = snelheidscoëfficiënt

De snelheidscoëfficiënt C_v is enkel van toepassing voor meetsecties waar de snelheidshoogte niet verwaarloosbaar is.

De debietcoëfficiënt C_d kan berekend worden als (Bos, 1989):

$$C_d = 0,93 + 0,1 * h/L$$

met h = dikte overstortende laag (m)

L = lengte drempel (m)

De klep van de stuw van Kerkhove heeft een lengte van 1,5 m. L bedraagt dus maximaal 1,5 m. De waarde van C_d varieert dan tussen 0,93 (voor $h/L = 0$) en 0,98 (voor $h/L = 0,5$ = grens om nog van een brede drempel te kunnen spreken). De corresponderende waarde voor C_{ES} varieert dan van 1,58 tot 1,67.

Voor een **sharp crested weir** is de debietcoëfficiënt gelijk aan (Bos, 1989):

$$C_{ES} = C_d \cdot (2/3) \cdot (2 \cdot g)^{0.5}$$

met C_{ES} = debietcoëfficiënt (zoals gedefinieerd door ES)

C_d = debietcoëfficiënt (zoals gedefinieerd in de meeste literatuur)

De debietcoëfficiënt C_d kan berekend worden als (Bos, 1989):

$$C_d = 0,602 + 0,075 \cdot h/p$$

met h = dikte overstortende laag (m)

p = positie kruin t.o.v. bodem (m)

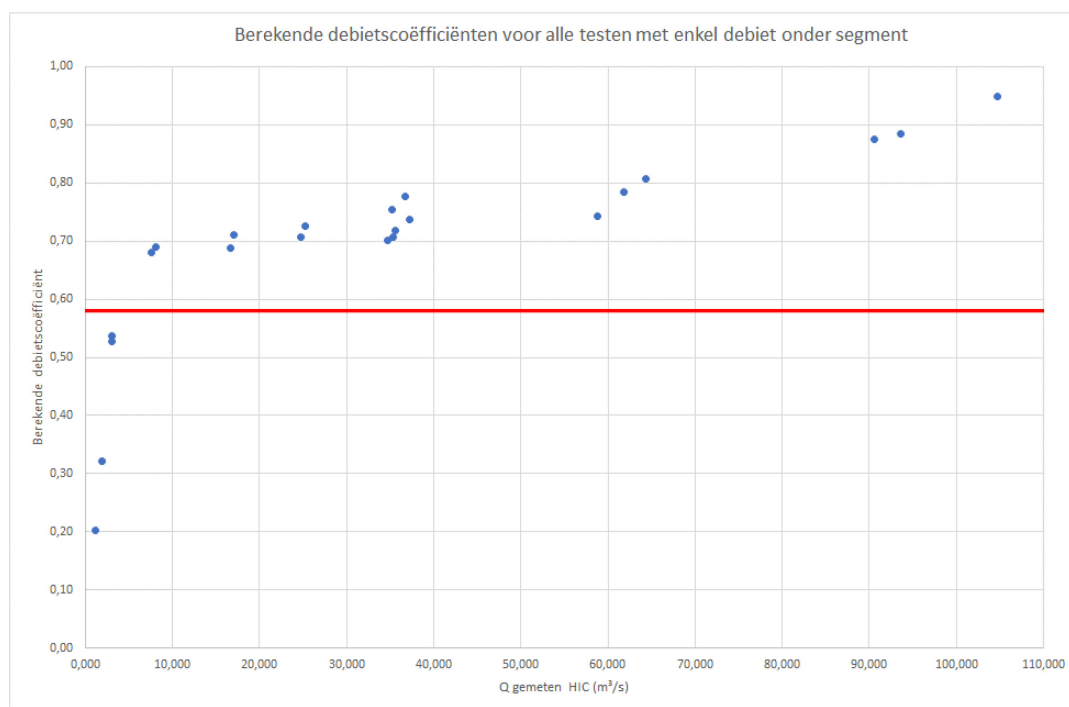
De as van de klep van Kerkhove bevindt zich 3,25 m boven de bodem van de stuwgeul. De hoogte van de kruin varieert van 3,55 m (klep horizontaal) tot 4,75 m (klep verticaal). De waarde van C_d varieert van 0,6 ($h/p = 0$) tot 0,63 ($h/p = 0,4$). De corresponderende waarde voor C_{ES} varieert dan van 1,78 tot 1,86. Om tot een waarde van h/p van 0,4 te komen moet de klep horizontaal liggen en dan is er eigenlijk geen sprake meer van een sharp crested weir. Als de klep schuin staat is de verhouding h/p eerder 0,1 en bedraagt C_{ES} ongeveer 1,80.

Op basis van literatuurgegevens voor aanverwante stuwtypes (sharp crested weir en broad crested weir) kan de verwachte range van de debietcoëfficiënt voor de klep in Kerkhove ingeschat worden als 1,6 à 1,8.

5.3 Evaluatie testen met enkel debiet onder het segment

5.3.1 Evaluatie debietcoëfficiënt gebruikt in de formule voor de debietbepaling onder het segment

Zoals in Figuur 11 getoond, worden de debieten onder het segment met 32% onderschat. Als we een nieuwe set coëfficiënten berekenen voor de debietberekening onder het segment, dan bekomen we de waarden die geplot zijn in figuur 13, met 0,58 als default waarde momenteel gebruikt in de formule.



Figuur 13 – Berekende set coëfficiënten voor de testen met debiet enkel onder het segment in functie van de gemeten debieten. De default waarde gebruikt in de formule is 0,58 (rode lijn).

De coëfficiënten bij de test met de laagste debieten (test 11) wijken beduiden af van de oorspronkelijk gebruikte 0,58. We moeten ook stellen dat de debietmeting bij dergelijke omstandigheden (1-3 m³/s) ook niet geheel nauwkeurig verloopt. De gemiddelde stroomsnelheid gedurende test 11 over het gehele dwarsprofiel bedraagt 0,015 m/s. Rekening houdende met een nauwkeurigheid van 0,002 m/s op de gemeten stroomsnelheden (specificaties ADCP), moeten we rekening houden met een fout van 13% op de gemeten debieten, en dus ook op de berekende coëfficiënten.

Samengevat kan gesteld worden dat de coëfficiënt van 0,58 voor de berekening van debieten onder het segment een te laag gekozen waarde is. De metingen tonen ook aan dat de coëfficiënt kan wijzigen in functie van het debiet.

5.3.2 Literatuur omtrent debietcoëfficiënten

In de literatuur kunnen debietcoëfficiënten gevonden worden voor “radial gates” (segmentstuwen). De te verwachten range van de debietcoëfficiënten kan dan ook ruw ingeschat worden op basis van de formules voor dat type stuw. Hierbij wordt uitgegaan van verdronken stroming onder het segment.

De debietcoëfficiënt voor het segment, zoals gedefinieerd door ES, stemt precies overeen met de debietcoëfficiënt voor een radial gate, zoals gedefinieerd in de literatuur.

De debietcoëfficiënt voor een **radial gate** kan berekend worden als (Bos, 1989):

$$C_e = \delta / (1 - (\delta w / y_1)^2)^{0.5}$$

met δ = contractiecoëfficiënt

w = opening onder het segment (m)

y_1 = waterdiepte opwaarts van de stuw (m)

De contractiecoëfficiënt δ is afhankelijk van de stand van het segment (Bos, 1989):

$$\delta = 1 - 0,75 (\theta/90^\circ) + 0,36 (\theta/90^\circ)^2$$

met θ = hoek tip segment t.o.v. horizontale (°)

Bovenstaande vergelijkingen zijn enkel geldig voor situaties waarbij de tip van het segment voldoende diep onder het opwaartse waterpeil gelegen is ($w/y_1 \leq 0,8$).

Bij lage afvoeren bedraagt de waterdiepte opwaarts van de stuw van Kerkhove ongeveer 4,5 m. Het verval bedraagt dan ongeveer 1,35 m. Bij hoge afvoeren kan de waterdiepte opwaarts van de stuw oplopen tot meer dan 5 m. Het verval neemt dan af tot minder dan 0,5 m. De hoek van de tip van het segment bedraagt ongeveer 50° wanneer het segment bijna gesloten is en ongeveer 90° wanneer het segment volledig geopend is. De corresponderende waarde voor C_e varieert dan van 0,69 voor een bijna gesloten segment bij lage afvoeren tot 0,70 voor een volledig geopend segment bij hoge afvoeren, waarbij nog net voldaan is aan de eis m.b.t. de minimale onderdamping van de tip.

Op basis van literatuurgegevens voor een gelijkaardig stuwtype (radial gate) kan de verwachte range van de debietcoëfficiënt voor het segment in Kerkhove ingeschat worden als ongeveer 0,7.

6 Besluit

Een controle van de tijdelijke peilmeters leert ons dat de opwaartse peilen 0,069 m te hoog worden gemeten, de afwaartse 0,020 m te laag. Alle waterpeilen die werden opgevraagd voor de verdere analyse, werden vervolgens met deze waarden gecorrigeerd.

De vervolgens door WL-HIC berekende debieten wijken af van de door WL-HIC gemeten debieten. Algemeen zijn de berekende debieten 30% lager dan de gemeten debieten. De berekende debieten over de klep zijn gemiddeld maar 3% hoger, de berekende debieten onder het segment gemiddeld 32% lager.

De debietrange die bij de kleptest met stuw 2 werd gebruikt, 0-14 m³/s, is zeer representatief voor de werking van de klep, aangezien verwacht wordt dat debieten tot een grootteorde van 30 m³/s enkel door klepwerking met beide stuwen zullen worden afgevoerd. Bij deze afvoeren merken we dat de gekozen debietcoëfficiënt van 1,86 voldoende is.

Op basis van literatuurgegevens voor aanverwante stuwtypes (sharp crested weir en broad crested weir) kan de theoretische onder- en bovengrens van de debietcoëfficiënt voor de klep ingeschat worden als 1,6 à 1,8.

De debietrange die bij de segmenttest met stuw 2 werd gebruikt, 0-105 m³/s, is vrij representatief voor de werking van het segment. Tijdens extreme gebeurtenissen kan het debiet onder een segment wel nog verder oplopen (hoogste geobserveerde waarde = 130 m³/s). Bij deze afvoeren merken we dat de gekozen debietcoëfficiënt van 0,58 te laag is en merken we ook dat deze coëfficiënt van waarde kan veranderen.

Op basis van literatuurgegevens voor een gelijkaardig stuwtype (radial gate) kan de debietcoëfficiënt voor het segment ingeschat worden als ongeveer 0,7.

In het licht van het voorgaande stellen we voor om de debietcoëfficiënt voor de klep te behouden op 1,86 en de debietcoëfficiënt voor het segment te verhogen van 0,58 tot 0,70 à 0,80.

Daarnaast stellen we voor om de debietcoëfficiënten editeerbaar te maken en afhankelijk van de stand van de klep/segment, door middel van een tabel met een 10-tal mogelijke waarden in functie van klepstand (hoek of hoogte (m)) en segmentstand (hoek of hoogte (m)). Dit moet toelaten om de debietcoëfficiënten verder te verfijnen naarmate meer gegevens beschikbaar komen.

Bijlage 1 Referentielijst

Vereecken, H.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2013). Controle ontwerpdebieten nieuwe stuw Asper. Versie 1_0. WL Rapporten, 13_107. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Bos, M.G. (1989). Discharge Measurement Structures. ILRI publication nr 20. International Institute for Land reclamation and Improvement. Wageningen, Nederland

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be