



Vlaanderen
is wetenschap

16_065_1
WL rapporten

Klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve

Optimalisatie ontwerp breekbalken

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve

Optimalisatie ontwerp breekbalken

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Mostaert, F.

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 2018
D/2018/3241/156

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2018). Klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve: Optimalisatie ontwerp breekbalken. Versie 6.0. WL Rapporten, 16_065_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

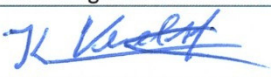
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

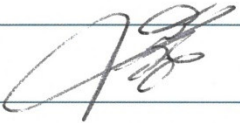
Opdrachtgever:	W&Z afdeling BovenSchelde	Ref.:	WL2018R16_065_1
Keywords (3-5):	Lock, Filling Emptying System, Design, Breaking logs		
Tekst (p.):	41	Bijlagen (p.):	13
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruysse, J.
------------	----------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.	
Projectleider:	Vercruysse, J.	

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	
-----------------	--------------	--



Abstract

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie door Waterwegen en Zeekanaal nv (W&Z) toegankelijk gemaakt voor schepen CEMT klasse Vb. Hiervoor dient te Sint-Baafs-Vijve een nieuwe sluis gebouwd te worden.

Door Grontmij werd een voorontwerp van een nieuwe CEMT klasse Vb-sluis met breedte 12.5 m uitgewerkt. Dit voorontwerp werd in maart 2013 aan W&Z, Afdeling Bovenschelde overgemaakt. In 2013-2014 werd door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) een hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem voor een kolk met breedte 12.5 m. Voorjaar 2016 nam W&Z de beslissing om de kolkbreedte van de sluis te vergroten tot 16.0 m. Voor deze bredere sluis heeft het Expertisecentrum Beton en Staal (EBS) een ontwerp van een set puntdeuren uitgewerkt met daarin als nivelleersysteem 6 rechthoekige openingen met elk een breedte van 1.89 m en hoogte gelijk aan 1.05 m voorzien van breekbalken. Initieel werden door WL met dit nivelleersysteem simulaties uitgevoerd met de programma's LOCKFILL en vul_sluis. Uit deze simulaties volgden de openingswet en de variatie van het kolkpeil en de langskracht in functie van de tijd.

In overleg met W&Z werd besloten om de voorgestelde geometrie breekbalken te beproeven in een schaalmodel. Het doel van de proeven is om na te gaan of breekbalken voordelig zijn voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve en indien positief om een optimale geometrie breekbalken te bepalen. Hierbij werden 4 geometrieën beproefd. Een eerste geometrie zonder breekbalken. Vervolgens werden drie geometrieën met breekbalken beproefd: 7 breekbalken met sectie 0.15 m x 0.15 m, 5 breekbalken met sectie 0.15 m x 0.15 m en 3 breekbalken met sectie 0.20 m x 0.20 m. Uit het schaalmodelonderzoek volgt dat breekbalken slechts een beperkte invloed hebben op het debiet doorheen de opening. Breekbalken zorgen wel voor een merkkelijk betere spreiding van de stroming in de kolk afwaarts de nivelleeropeningen. De snelheid in de kern van de jets afwaarts de nivelleeropeningen verlaagt met 40 % na het plaatsen van breekbalken. Bij een volledig geopende hefschuif worden de beste resultaten bekomen met de geometrie met drie breekbalken. Bij de hefschuif half open zijn de resultaten voor de drie geometrieën met breekbalken gelijkaardig. In overleg met de opdrachtgever en EBS werd besloten om de geometrie met drie breekbalken te weerhouden.

Met de weerhouden geometrie werden vervolgens nieuwe simulaties uitgevoerd. Op basis van de simulaties werden drie openingswetten opgesteld. Een openingswet voor nivelleren met de volledige kolk, een openingswet voor nivelleren met de op- of afwaartse deelkolk en een openingswet voor vullen met een recreatievaartuig. Uit de simulaties volgt dat de volledige kolk genivelleerd kan worden in 10.7 min zonder restverval. Het nivelleren van de opwaarts respectievelijk afwaartse deelkolk zonder restverval duurt 7.2 min respectievelijk 6.4 min. Uit de openingswet opgesteld voor vullen met recreatievaart volgt een nivelleertijd 16.1 min voor de volledige kolk, 11.7 min voor de opwaartse deelkolk en 10.4 min voor de afwaartse deelkolk. Voor vullen met recreatievaart werden bijkomende simulaties gedaan waarbij de standaard openingswet gebruikt wordt maar waarbij de stopstreepafstand toenam. Uit de simulaties volgt dat bij een stopstreepafstand van 16.0 m recreatievaart genivelleerd kan worden bij toepassing van de standaard openingswet.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Gegevens	3
2.1 Waterpeilen.....	3
2.2 Sluiskolk	3
2.3 Nivelleersysteem	4
2.4 Schepen	6
3 Criteria voor numerieke simulaties	8
4 Schaalmodelonderzoek	10
4.1 Schaalmodel	10
4.2 Beproefde geometrieën	13
4.3 Afvoercoëfficiënt	15
4.4 Snelheidspatroon.....	18
4.5 Visualisatie.....	23
4.6 Conclusies	26
5 Simulaties	27
5.1 LOCKFILL en vul_sluis.....	27
5.2 Wijzigingen ten opzichte van de initiële simulaties	28
5.3 Openingswetten	30
5.4 Resultaat.....	31
5.5 Besluit	37
6 Conclusies en aanbevelingen	38
6.1 Conclusies	38
6.2 Aanbevelingen	39
7 Referenties	40
Bijlage A – Resultaten Simulaties	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Op- en afwaartse peilen met het verval voor de simulaties.....	3
Tabel 2 – Horizontale kolkafmetingen en afstand boeg schip tot sluisdeur	4
Tabel 3 – Karakteristieken van de schepen gebruikt voor de hydraulische simulaties.....	7
Tabel 4 – Toegepaste criteria voor het ontwerp van het nivelleersysteem.....	8
Tabel 5 – Vergelijking geometrie ontwerp en schaalmodel.....	12
Tabel 6 – Stroomsnelheid en Reynoldsgetal in situ en op modelschaal	13
Tabel 7 – Beoordelen geometrieën breekbalken a.h.v. criteria Ontwerp van Schutsluizen.....	15
Tabel 8 – Gemiddelde afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte.....	16
Tabel 9 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte	18
Tabel 10 – Wijzigingen geometrie kolk ten opzichte van rapport 16_042.....	28
Tabel 11 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte	28
Tabel 12 – Openingswetten.....	30
Tabel 13 – Openingswet O1, O2 en O3	31
Tabel 14 – Uitgevoerde simulaties	32
Tabel 15 – Nivelleertijd en maximale stijg- daalsnelheid	35
Tabel 16 – Extremum langskracht uitgevoerde simulaties	36

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Bovenaanzicht nieuwe sluis Sint-Baafs-Vijve	3
Figuur 2 – Afwaarts aanzicht deur (mail EBS dd. 28/09/2016)	5
Figuur 3– Horizontale doorsnede deur ter hoogte van nivelleeropeningen (mail EBS dd. 28/09/2016)	5
Figuur 4 – Illustratie deurkamer met opening sluis Sint-Baafs-Vijve	6
Figuur 5 – Schaalmodel breekbalken	11
Figuur 6 – Geometrie deuropening in schaalmodel	12
Figuur 7 – Illustratie breekbalken.....	14
Figuur 8 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte.....	16
Figuur 9 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte vergelijking G1, G2, G3 en G4	17
Figuur 10 – Assenstelsel schaalmodel	19
Figuur 11 – Snelheid in horizontaal vlak op 1.7 m afwaarts van de opening – hefschuif 100 % open	20
Figuur 12 – Snelheid in verticaal vlak op de centerlijn van de kolk– hefschuif 100 % open	20
Figuur 13 – Snelheid in horizontaal vlak op 1.7 m afwaarts van de opening – hefschuif 50 % open	21
Figuur 14 – Snelheid in verticaal vlak op de centerlijn van de kolk – hefschuif 50 % open	21
Figuur 15 – Histogram snelheid x richting op 1.7 m afwaarts van de opening	22
Figuur 16 –Stromingspatroon hefschuif 100 % geopend	24
Figuur 17 – Stromingspatroon hefschuif 50 % geopend	25
Figuur 18 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte.....	29
Figuur 19 – Histogram snelheid 1.7 m afwaarts de opening Geometrie 4 hefschuif 100 % open.....	29
Figuur 20 – Openingswet O1, O2 en O3	31
Figuur 21 – Kolkpeil en debiet in functie van tijd	33
Figuur 22 – Langskracht en hefhoogte in functie van tijd	34

1 Inleiding

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie door Waterwegen en Zeekanaal nv (W&Z) toegankelijk gemaakt voor schepen CEMT klasse Vb. Hiervoor dient te Sint-Baafs-Vijve een nieuwe sluis gebouwd te worden en wordt ook het vismigratieknelpunt ter hoogte van het stuwsluiscomplex opgelost.

Door Grontmij werd een voorontwerp van de nieuwe klasse Vb-sluis uitgewerkt. Dit voorontwerp werd in maart 2013 aan W&Z Afdeling Bovenschelde overgemaakt (Grontmij, 2013). Uit dit ontwerp volgde een kolk lengte 257 m en een kolk breedte 12.5 m. De sluis beschikt over een middenhoofd zodat het mogelijk is om enkel te schutten met de op- of afwaartse deelkolk. Als nivelleersysteem werd gekozen voor openingen in de puntdeuren. De puntdeuren van het boven- midden en benedenhoofd zijn identiek. Hierdoor kunnen de middendeuren als reserve gebruikt worden voor de deuren in het boven- en benedenhoofd. Tijdens dit voorontwerp fungeerde het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) als klankbord en leverde zo input.

Voor het uitwerken van het finale ontwerp doet de Afdeling Bovenschelde (contactpersoon: ir. C. Beels) beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal (EBS), Elektromechanica en Telematica (EMT), Geotechniek en WL. Aan WL werd gevraagd ondersteuning te bieden aan het ontwerp, in het bijzonder wat betreft het ontwerp van het nivelleersysteem, het ontwerp van de oever- en bodemverdediging, de nautische aspecten en het ontwerp van de vispassage.

In 2013-2014 werd door WL een hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem voor een kolk met breedte 12.5 m (J B Vercruysse *et al.*, 2014). Voor dit ontwerp werden simulaties uitgevoerd met het programma vul_sluis. Op basis van deze simulaties werd een nivelleersysteem bestaande uit 6 cirkelvormige openingen in de deuren met een diameter 1.35 m afgesloten door hefschuiven weerhouden.

Voorjaar 2016 nam W&Z de beslissing om de kolk breedte van de sluis te vergroten tot 16.0 m. De kolk lengte en het bodempeil van de kolk blijven behouden. Hierop heeft EBS een voorontwerp uitgewerkt voor de puntdeuren van deze bredere sluis. Hierbij werd uitgegaan van het behoud van de doorstroomoppervlakte per meter kolk breedte in vergelijking met het in 2014 weerhouden ontwerp. Uit het constructief ontwerp volgde dat het interessanter is om het aantal openingen te behouden en over te gaan naar rechthoekige openingen. EBS heeft een ontwerp van een set puntdeuren uitgewerkt met daarin als nivelleersysteem 6 rechthoekige openingen met elk een breedte van 1.89 m en hoogte gelijk aan 1.05 m. WL heeft met dit ontwerp hydraulische simulaties uitgevoerd met het programma vul_sluis en LOCKFILL (J B Vercruysse *et al.*, 2016). In deze studie werd enkel vullen van de volledige kolk en de afwaartse deelkolk met beroepsvaart beschouwd. Uit deze eerste simulaties met het nivelleersysteem voor de 16 m brede sluis volgde een openingswet voor de hefschuiven, de nivelleerkromme en de langskrachten op het schip in de kolk. Naar dit rapport wordt verwezen met 16_042 (het WL projectnummer).

Op het WL loopt een intern onderzoeksproject naar de invloed van breekbalken op de stroming in de kolk. Voor dit onderzoek is een schaalmodel gebouwd waarin verschillende geometrieën van de nivelleeropening met verschillende geometrieën van de breekbalken beproefd kunnen worden. Tijdens het uitvoeren van de eerste simulaties met het nivelleersysteem voor de 16.0 m brede sluis werd in overleg met W&Z besloten om de voorgestelde geometrie voor Sint-Baafs-Vijve te beproeven in dit schaalmodel. Het doel van de proeven is om na te gaan of breekbalken voordelig zijn voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve en indien positief om een optimale geometrie breekbalken te bepalen. Het eerste deel van deze nieuwe studie betreft het uitvoeren van de schaalmodelproeven. Hierbij wordt een geometrie zonder breekbalken en drie geometrieën met breekbalken beproefd. In het tweede deel worden met de weerhouden geometrie vervolgens nieuwe simulaties uitgevoerd. Onderhavig rapport beschrijft deze studie. Het rapport is als volgt opgebouwd:

- De te hanteren peilen, de geometrie van de sluis kolk, het nivelleersysteem met de verschillende beproefde geometrieën breekbalken en de schepen voor de numerieke simulaties worden besproken in hoofdstuk 2.

- De gehanteerde criteria voor het beoordelen van het nivelleersysteem worden besproken in hoofdstuk 3.
- Het schaalmodelonderzoek wordt besproken in hoofdstuk 4.
- De simulaties met het nivelleersysteem worden besproken in hoofdstuk 5.

De conclusies worden samengevat in hoofdstuk 6.

2 Gegevens

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens de voor de simulaties gebruikte waterpeilen (paragraaf 2.1), de geometrie van de sluisolk (paragraaf 2.2), het nivelleersysteem (paragraaf 2.3) en de te verschutten schepen (paragraaf 2.4) besproken.

2.1 Waterpeilen

Door de opdrachtgever werden twee te beschouwen combinaties voor het opwaarts en afwaarts waterpeil opgegeven, zie Tabel 1. Door middel van simulaties in rapport 16_042 (J B Vercruysse *et al.*, 2016) werd beoordeeld dat variant 2 het meest kritisch is. In dit rapport wordt enkel variant 2 gebruikt.

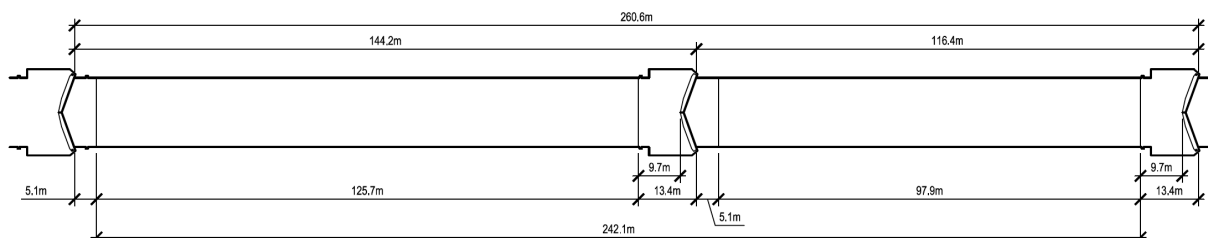
Tabel 1 – Op- en afwaartse peilen met het verval voor de simulaties

variant	opwaarts	afwaarts	verval
1	Opwaarts uitzonderlijk hoog TAW + 8.83 m	Afwaarts nominaal TAW + 5.61 m	3.22 m
2	Opwaarts nominaal TAW + 8.00 m	Afwaarts laag TAW + 5.11 m	2.89 m

2.2 Sluisolk

De nieuwe sluis van Sint-Baafs-Vijve op de Leie betreft een klasse Vb-sluis. Met deze sluis kan maximaal een tweebaksduwkonvooi CEMT klasse Vb verschut worden. De minimale kolkbreedte voor een dergelijk schip bedraagt 12.5 m, zoals bij het eerste ontwerp. Omdat exceptioneel duwbakken met een grotere breedte verschut worden naar een bedrijf gelegen in het pand Harelbeke - Sint-Baafs-Vijve werd in het voorjaar van 2016 door W&Z besloten om een ontwerp te maken voor een sluis met een kolkbreedte 16.0 m, analoog met de huidige kolkbreedte te Sint-Baafs-Vijve. De afmetingen van de kolk worden gegeven in Figuur 1 en Tabel 2. De voor de simulaties gehanteerde afstand tussen de boeg van het schip en de voor nivelleren gebruikte deur bedraagt 5.1 m voor vullen en 9.7 m voor ledigen.

Figuur 1 – Bovenaanzicht nieuwe sluis Sint-Baafs-Vijve



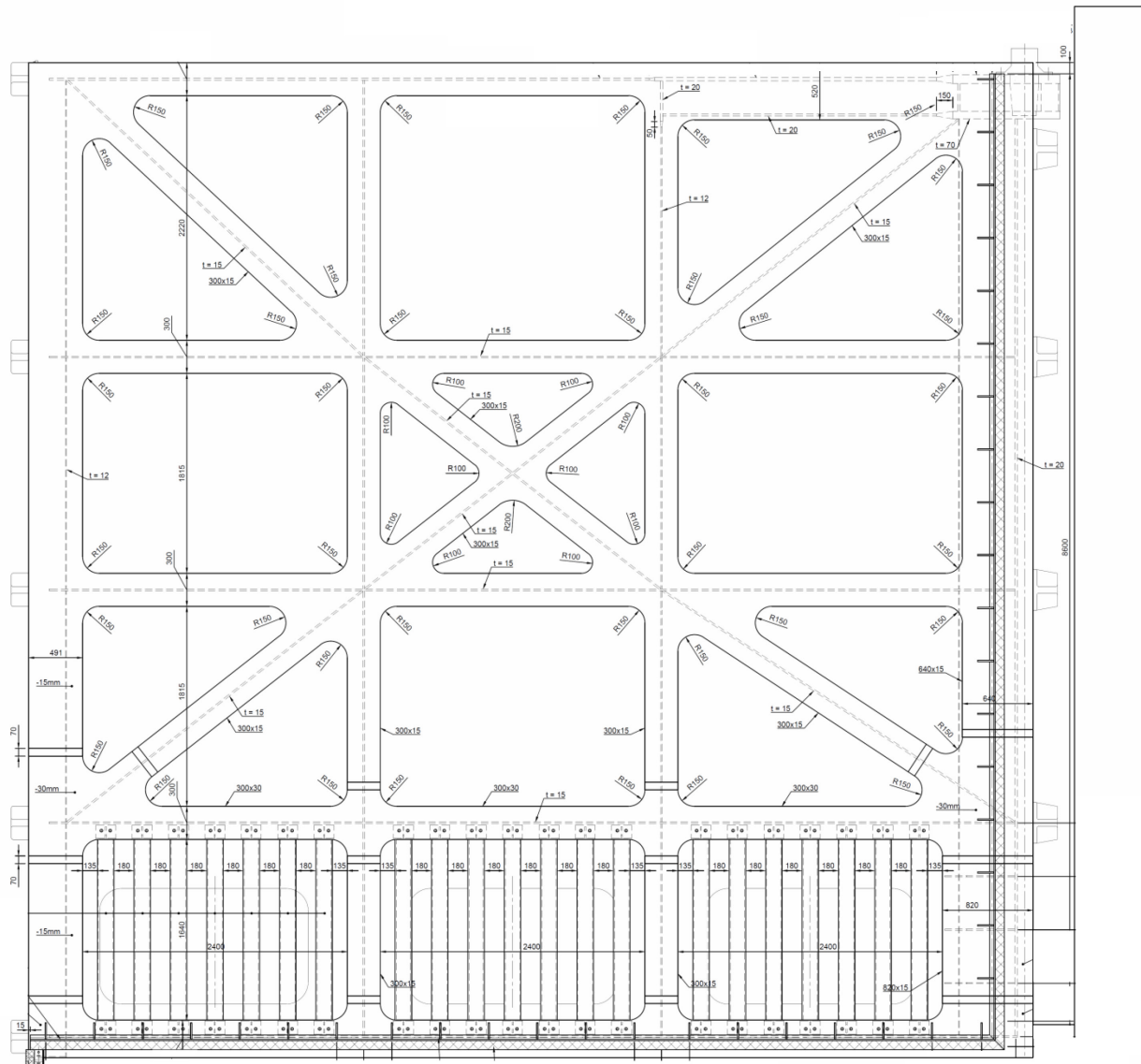
o.b.v. Expertise Beton en staal & W&Z nv Afdeling Bovenschelde (2017)

Tabel 2 – Horizontale kolkafmetingen en afstand boeg schip tot sluisdeur

		totale kolk	opwaartse deelkolk	afwaarts deelkolk
kolkbreedte		16.0 m		
bodempeil kolk		+0.91 m TAW		
kolk lengte		260.6 m	144.2 m	116.4 m
nuttige kolk lengte		242.1 m	125.7 m	97.9 m
afstand boeg schip tot sluisdeur	vullen	5.1 m	5.1 m	5.1 m
	ledigen	9.7 m	9.7 m	9.7 m

2.3 Nivelleersysteem

Het ontwerp van de puntdeuren werd uitgevoerd door EBS. Een afwaarts aanzicht van de deur wordt gegeven in Figuur 2. Een horizontale doorsnede van de deur ter hoogte van de hefschuiven wordt gegeven in Figuur 3. Bemerk hierin dat de deur bestaat uit een raster van verticale en horizontale platen. Aan de opwaartse zijde heeft de deur een volle waterdichte plaat. Aan de afwaartse zijde is het vakwerk open. De ruimte afgezonderd door naastliggende verticale en horizontale platen wordt in dit rapport een deurkamer genoemd. De deur bevat in het horizontale vlak drie naastliggende deurkamers en in het bovenliggende vlak 4 op elkaar liggende deurkamers. De nivelleeropeningen bevinden zich in de onderste rij deurkamers. Elk van de onderste deurkamers bevat een opening wat neerkomt op 3 nivelleeropeningen per deur en 6 per hoofd. Bij het boven-, midden en benedenhoofd wordt een identieke deur en dus ook identiek nivelleersysteem toegepast.



Technical drawing of a crane beam (Balken) showing dimensions and components. The drawing includes labels for 'breekbalken' (break beam) and 'hefschuif' (lifting slide). Dimensions are provided in millimeters (mm) and meters (m). The beam is divided into three sections, each 2400 mm long. The total length is 7200 mm. The distance between the main supports is 1890 mm. The beam is supported by a central roller and two end rollers. The angle of the beam is 7.63°.

Labels:

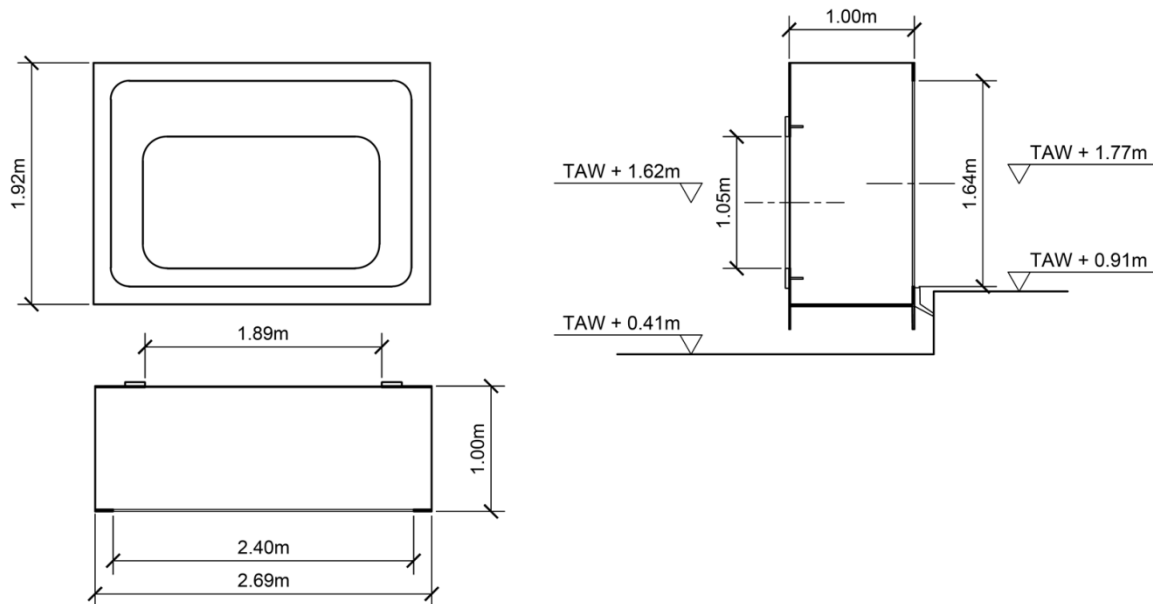
- breekbalken
- afwaarts
- hefschuif
- opwaarts

Dimensions:

- 2400 mm (three sections)
- 1890 mm (distance between main supports)
- 7.63° (angle)

Een hydraulische weergave van een deurkamer wordt gegeven in Figuur 4. De deurkamers waarin de nivelleeropeningen geplaatst worden hebben een hoogte 1.92 m, een breedte 2.69 m en een diepte 1.0 m. De opening in de opwaartse deurplaat heeft een breedte 1.89 m en een hoogte 1.05 m. Aan de afwaartse zijde heeft de opening een hoogte 1.64 m en een breedte 2.40 m.

Figuur 4 – Illustratie deurkamer met opening sluis Sint-Baafs-Vijve



boven links: vooraanzicht / boven rechts: verticale doorsnede / onder: horizontale doorsnede

De beproefde geometrieën breekbalken worden besproken in paragraaf 4.2.

2.4 Schepen

De numerieke simulaties in dit rapport worden uitgevoerd met een CEMT klasse Vb schip, een CEMT klasse Va schip een CEMT klasse I schip en een recreatievaartuig aangemeerd in de kolk. De karakteristieken van de voor de simulaties gebruikte schepen worden gegeven in Tabel 3. Bemerkt dat voor de opwaartse en afwaartse deelkolk een CEMT klasse Va schip met een verschillende lengte gebruikt wordt. De afwaartse deelkolk is eigenlijk ontworpen voor het verschutten van schepen CEMT klasse IV (lengte: 85.0 m, breedte: 9.5 m en diepgang: 2.50 m). In werkelijkheid kunnen met dezelfde sluis kolk ook schepen CEMT klasse Va verschut worden met een lengte van 95.0 m, een breedte van 11.4 m en een diepgang van 3.50 m. Om die reden wordt dit type als maatgevend beschouwd voor de afwaartse sluis kolk. Een CEMT klasse I schip heeft een breedte 5.05 m. In theorie kunnen drie CEMT klasse I schepen naast elkaar aangemeerd worden. Dit zal in praktijk vermoedelijk niet voorkomen. Voor de simulaties wordt de toestand beschouwd waarbij aan elke kolkwand één schip CEMT klasse I is aangemeerd met de boeg ter hoogte van de stopstreep. In LOCKFILL en vul_sluis wordt dit gesimuleerd door één enkel schip met een dubbele breedte en dubbele massa. Naast beroepsvaart dient de sluis ook ontworpen te worden voor recreatievaart. Voor het uitvoeren van de simulaties in deze studie wordt een traagloper met een lengte 12.0 m een breedte 3.4 m en een diepgang 1.40 m beschouwd.

Tabel 3 – Karakteristieken van de schepen gebruikt voor de hydraulische simulaties

		maatgevend schip			2 x CEMT I	recreatie vaartuig
		volledige kolk	opwaartse kolk	afwaartse kolk		
		CEMT klasse Vb	CEMT klasse Va	CEMT klasse Va		
lengte	[m]	185	110	95	38.5	12.0
breedte	[m]	11.4	11.4	11.4	10.1 (=2*5.05)	3.4
diepgang	[m]	3.5	3.5	3.5	2.2	1.40
blokcoëfficiënt	[-]	0.81	0.88	0.88	0.90	0.38
totale massa (schip + lading)	[ton]	6000	3862	3336	770 (=2*385)	21.7
hoek boeg in verticaal vlak	[°]	21.2	90	90	90	90
hoek boeg in horizontaal vlak	[°]	90	45	45	45	45

3 Criteria voor numerieke simulaties

Door de opdrachtgever wordt een totale schuttijd van een 20 min voorzien. Hiervoor dient de kolk in 10.0 min genivelleerd te zijn. Preferentieel bedraagt de nivelleertijd 8.0 min. Het is nog niet duidelijk of de puntdeuren geopend zullen worden onder een restverval. Gevraagd wordt om de nivelleertijd zowel zonder restverval als met een restverval van 0.10 m te bepalen. Naast dit criterium voor de nivelleertijd moet tegelijkertijd voldaan worden aan de criteria voor de maximale stijg- of daalsnelheid en aan de criteria voor de maximale waarde van de optredende langskrachten op het schip tijdens het nivelleren. Deze criteria worden samengevat in Tabel 4.

Tabel 4 – Toegepaste criteria voor het ontwerp van het nivelleersysteem

		eenheid	classificatie schip			
			CEMT klasse Vb	CEMT klasse Va	CEMT klasse I	recreatievaart
nivelleertijd		[min]	8	8	8	8
maximale stijgsnelheid		[mm/s]	17	17	17	10
	bron	-	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Lasard & Pulina, 1994)
langskracht	vullen met vaste bolders	[%]	0.75	0.85	1.50	3.00
	ledigen of vullen met drijvende bolders	[%]	0.75	1.15	2.00 / (1.50)	3.00
	bron	-	(Stichting Postacademisch Onderwijs, 2006)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)/ (Vrijburcht, 1992)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)

Merk in Tabel 4 op:

- Voor de stijgsnelheid van het kolkpeil vermeldt “Ontwerp van schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) dat drijvende bolders toegepast dienen te worden wanneer de maximale stijgsnelheid van het kolkpeil groter is dan 2 m/min (~33 mm/s), maar dat een stijgsnelheid van 1 m/min (~17 mm/s) realistischer is. Voor recreatievaart vermelden Lasard & Pulina (1994) een maximale waarde van de stijgsnelheid van het kolkpeil van 0.6 m/min (~10 mm/s).
- In de cursus “Hydraulische aspecten van waterbouwkundige constructies” (Stichting Postacademisch Onderwijs, 2006) wordt voor een CEMT klasse Vb schip een maximaal toegelaten langskracht op het schip van 0.75 % bij vullen en bij ledigen van de sluis kolk vermeld.
- Omdat de maximale toelaatbare waarde van de langskracht op het schip niet in verhouding toeneemt met de scheepsmassa zal bij een grotere scheepsklasse de, ten opzichte van het

scheepsgewicht uitgedrukte, toelaatbare langskracht op het schip lager zijn. In Vrijburcht (1992) wordt voor een CEMT klasse I schip een toelaatbare langskracht van 1.50 ‰ vermeld en “Ontwerp van schutsluizen”(Beem *et al.*, 2000) vermeld voor een CEMT klasse III schip een maximaal toelaatbare langskracht van 2.00 ‰. De maximaal toelaatbare langskracht neemt hier dus toe bij een toename van de scheepsmassa wat niet logisch is. Om die reden wordt in dit rapport voor een CEMT klasse I schip het criterium voor een CEMT klasse III schip bij ledigen overgenomen.

WL beschikt over een meetopstelling om de langshellingen in een kolk tijdens nivelleren op te meten. Deze langshellingen zijn een maat voor de langskracht. Uit de door WL uitgevoerde terreinmeting in de huidige sluis van Sint-Baafs-Vijve (Vercruysse *et al.*, 2013) en de terreinmeting uitgevoerd in de sluis van Evergem (J B Vercruysse *et al.*, 2011) volgt dat in deze beide sluizen langshellingen zijn opgemeten tot 1.5 ‰. In deze sluizen worden op dit ogenblik schepen CEMT klasse Va verschut. De opgemeten waarde voor de langshelling in de kolk, dewelke een maat is voor de langskracht op het schip, is merkkelijk hoger dan het criterium van 0.85 ‰ voor een schip CEMT klasse Va uit Tabel 4. Hieruit volgt dat voor deze schepen een beperkte overschrijding van het criterium uit de literatuur vermoedelijk toelaatbaar is. WL heeft tot op heden geen metingen uitgevoerd in een sluis die gebruikt wordt door CEMT klasse Vb schepen, waardoor dit niet kan gesteld worden voor deze types schepen.

4 Schaalmodelonderzoek

Het schaalmodel wordt beschreven in paragraaf 4.1. De beproefde geometrieën van het nivelleersysteem worden besproken in paragraaf 4.2. Tijdens deze proeven werd de afvoercoëfficiënt van de opening in functie van de hefhoogte van de schuif opgemeten, zie paragraaf 4.3. Om de invloed van de verschillende geometrieën breekbalken op het stromingspatroon in de kolk te beoordelen werden snelheidsmetingen uitgevoerd, zie paragraaf 4.4, en werd de jet in de kolk gevisualiseerd, zie paragraaf 4.5. Een samenvatting van de conclusies van het schaalmodelonderzoek wordt gegeven in paragraaf 4.6.

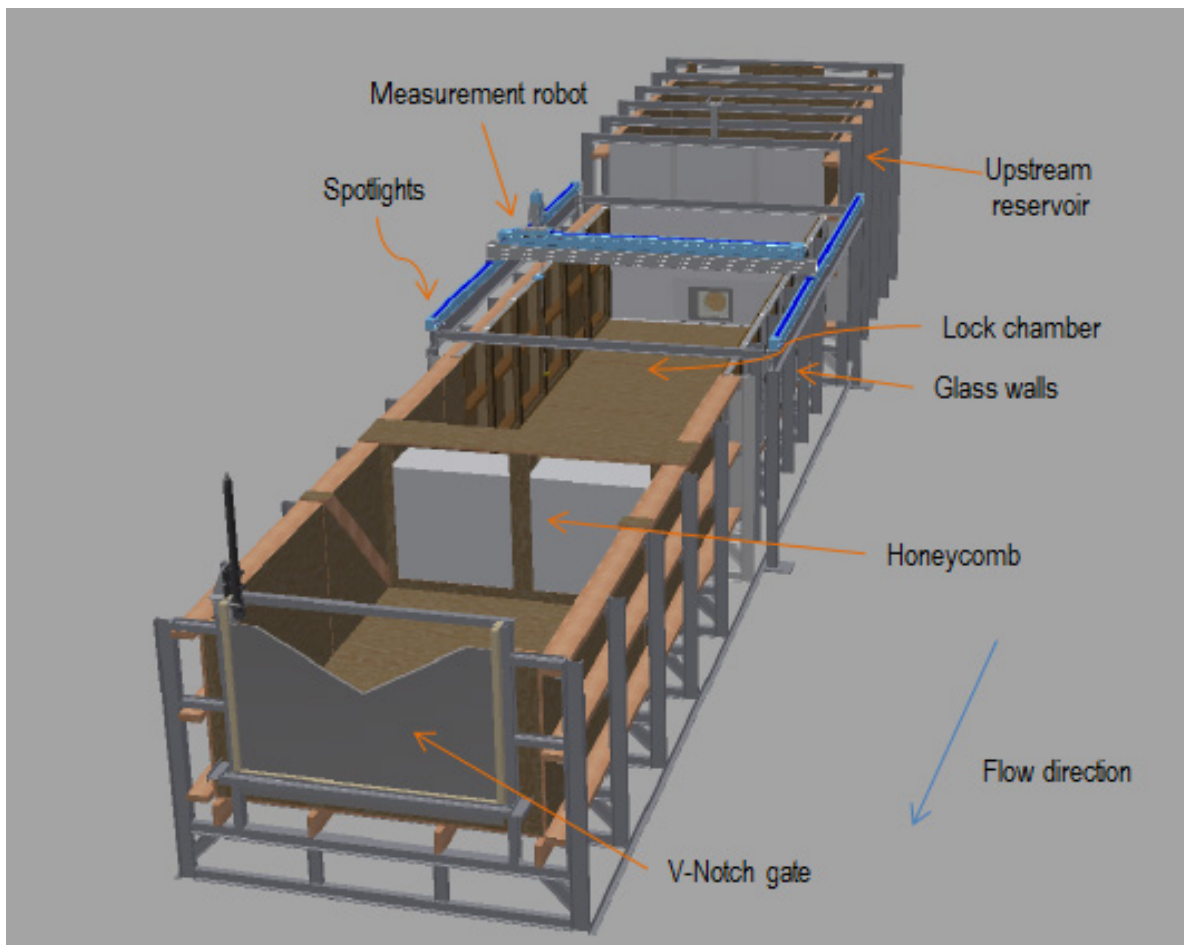
Tenzij expliciet vermeld, zijn de in dit rapport vermelde waarden steeds omgerekend naar eenheden natuur.

4.1 Schaalmodel

In deze paragraaf wordt een korte beschrijving gegeven van het schaalmodel. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van het schaalmodel wordt verwezen naar Ramos *et al.* (2016). Figuur 5 geeft een illustratie van het schaalmodel. Merk hierin op dat het schaalmodel bestaat uit een opwaarts en een afwaarts pand gescheiden door een sluisdeur die loodrecht op de kolkwanden staat. In deze sluisdeur bevindt zich één enkele nivelleeropening. Aan de opwaartse zijde van de nivelleeropening bevindt zich een hefschuif.

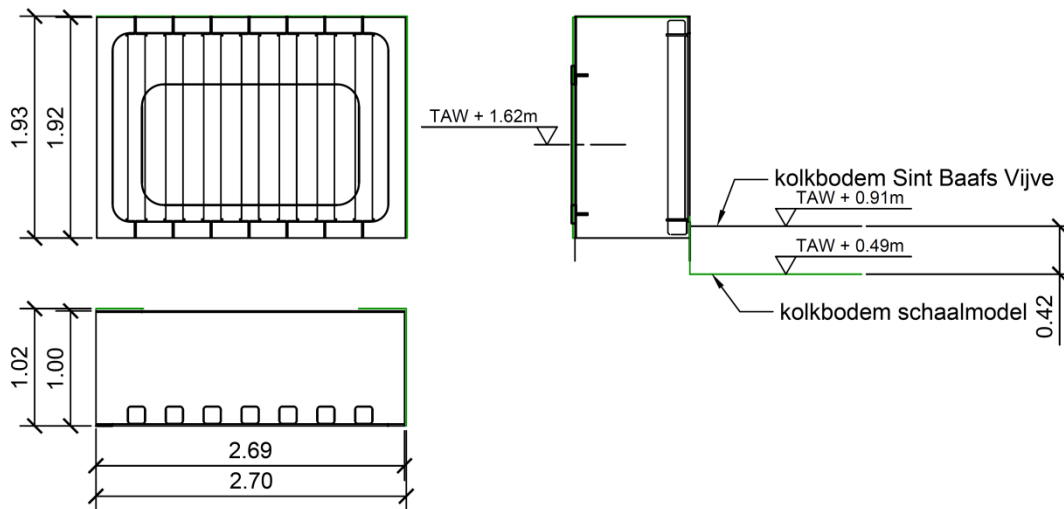
Met behulp van dit schaalmodel worden enkel stationaire proeven uitgevoerd, waarbij het opwaarts en het afwaarts waterpeil constant gehouden wordt. Tijdens de proeven worden het toegevoerd debiet in het opwaarts pand, de hefschuifhoogte en de opwaartse en afwaartse waterpeilen opgemeten. Met behulp van een puntsnelheidsmeter gemonteerd op een meetrobot wordt de stroomsnelheid op verschillende locaties afwaarts van de nivelleeropening opgemeten. Hiernaast wordt de jet gevisualiseerd door middel van het injecteren van kleurstof opwaarts de nivelleeropening. Het stromingspatroon in de kolk wordt vervolgens geregistreerd door middel van twee verticale en twee horizontale camera's. Voorafgaand aan het schaalmodelonderzoek voor Sint-Baafs-Vijve uit dit rapport werden proeven uitgevoerd met een ronde opening en verschillende geometrieën breekbalken.

Figuur 5 – Schaalmodel breekbalken



De schaalfactor voor de proeven van Sint-Baafs-Vijve dient zo gekozen te worden dat de nivelleeropening in de beschikbare ruimte in de sluisdeur past. De geometrie van de nivelleeropening wordt hiervoor verschaald met een factor 8.5. De breedte en dikte van de deurkamer komen hierbij overeen met de beschikbare breedte en diepte in het model, zie Figuur 6 en Tabel 5.

Figuur 6 – Geometrie deuropening in schaalmodel



Tabel 5 – Vergelijking geometrie ontwerp en schaalmodel

		ontwerp	schaalmodel	Δ
		[m]	[m]	[m]
deurkamer	breedte	2.69	2.70	0.01
	hoogte	1.92	1.93	0.01
	diepte	1.00	1.02	0.02
opening opwaarts	breedte	1.89	1.89	0.00
	hoogte	1.05	1.05	0.00
opening afwaarts	breedte	2.40	2.40	0.00
	hoogte	1.64	1.64	0.00

Bemerk in Figuur 6 en Tabel 5 dat bij een schaalfactor 8.5 de breedte en diepte van de deurkamer op 0.02 m na overeenkomen met de beschikbare afmetingen. Het was in het schaalmodel niet mogelijk om de deurkamer van de opening voldoende laag ten opzichte van de bodem van de kolk te plaatsen. Hierdoor bevindt het bodempeil van de kolk in het schaalmodel zich 0.42 m lager dan in prototype (0.49 m TAW i.p.v. 0.91 m TAW). Het verhogen van de bodem van het schaalmodel valt buiten de scope van het project. De invloed van de 0.42 m te lage bodem op de afvoercoëfficiënt wordt verwaarloosbaar geacht. Ook de invloed van de 0.42 m te lage bodem op de stroomsnelheid net na de opening en de stroomsnelheid in de kolk wordt voor het in dit project gewenste doel, een onderlinge vergelijking tussen verschillende geometrieën breekbalken, verwaarloosbaar geacht. De proeven worden steeds uitgevoerd met een verval 2.89 m. Dit is het verval horende bij opwaarts het normaal peil 8.00 m TAW en afwaarts het laag peil 5.11 m TAW, zie paragraaf 2.1. Het was niet mogelijk om het afwaarts peil in het schaalmodel voldoende laag in te stellen. Het minimum peil bedraagt 5.96 m TAW bij een 100 % geopende hefschuif en 5.62 m TAW bij een 50 % geopende hefschuif. Het bijhorende opwaarts peil bedraagt 8.85 m TAW bij een 100 % geopende hefschuif en 8.50 m TAW bij een 50 % geopende hefschuif. Het verlagen van het afwaarts peil van het schaalmodel valt buiten de scope van het project. Een vergelijking van de stroomsnelheid en het Reynoldsgetal in prototype en op modelschaal wordt gegeven in Tabel 6. Een stroomsnelheid in de opening van 1.55 m/s wordt aanvaardbaar geacht om correct te kunnen opgemeten te worden met het

gebruikte puntsnelheidsmeettoestel. Het Reynolds getal van 2.1×10^4 is hoog genoeg om nog turbulente stroming door de opening te bekomen.

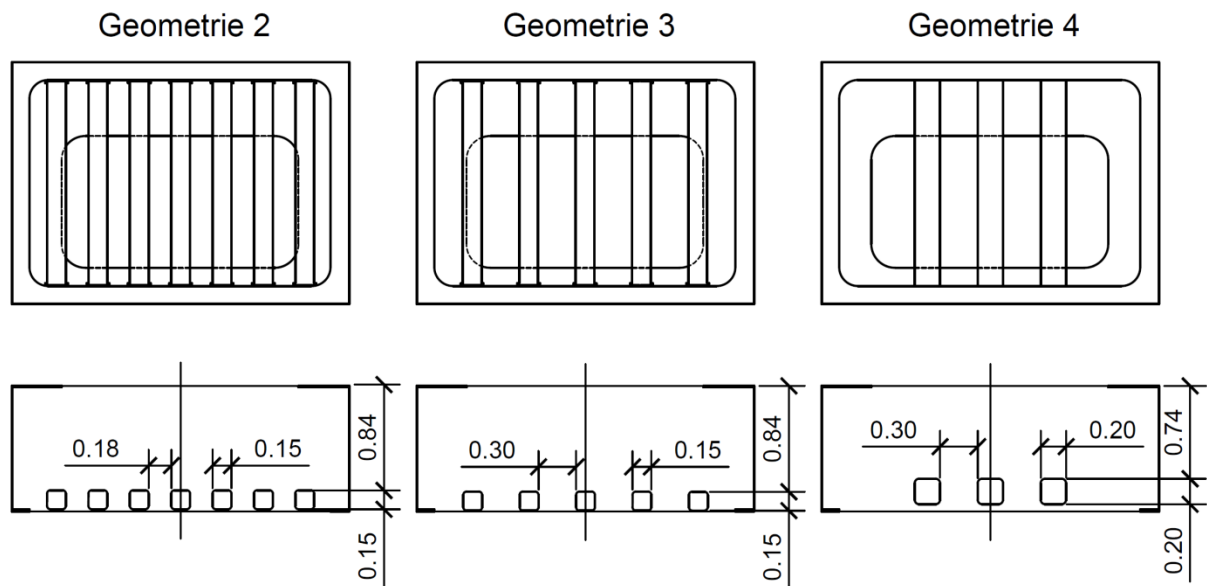
Tabel 6 – Stroomsnelheid en Reynoldsgetal in situ en op modelschaal

			in situ	model
schaal		[-]	1	8.5
verval	ΔH	[m]	2.89	0.34
afvoercoëfficiënt opening	μ	[-]	0.60	0.60
sectie gemiddelde stroomsnelheid in de opening	V	[m/s]	4.52	1.55
kinematische viscositeit	ν	[-]	1.30E-06	1.30E-06
breedte breekbalken	D	[m]	0.15	0.018
Reynoldsgetal	Re	[-]	5.2E+05	2.1E+04

4.2 Beproefde geometrieën

De geometrie zonder breekbalken wordt in dit rapport aangeduid met Geometrie 1. Naast de geometrie zonder breekbalken worden drie geometrieën met breekbalken beproefd, zie Figuur 7. Bij Geometrie 2 bevinden zich aan de stroomafwaartse zijde van de deur 7 breekbalken met een sectie 0.15 m x 0.15 m. De tussenafstand tussen de breekbalken bedraagt 0.18 m. Bij geometrie 3 wordt met behoud van de sectie van de breekbalken de tussenafstand tussen de breekbalken vergroot tot 0.30 m. Op basis van de resultaten van Geometrie 1 tot en met Geometrie 3 werd besloten om een Geometrie 4 te beproeven met drie breekbalken. De breedte tussen de breekbalken werd gelijkgesteld aan 0.30 m. Om de impact te vergroten werd de sectie van de breekbalken opgetrokken tot 0.20 m x 0.20 m.

Figuur 7 – Illustratie breekbalken



links geometrie 2 / midden geometrie 3 / rechts geometrie 4

Het handboek Ontwerp van Schutsluizen (Beem *et al.*, 2000) geeft drie ontwerpvoorwaarden voor verticale breekbalken. Deze worden in onderstaande oplijsting genummerd van criterium 1 tot en met 3. Vervolgens wordt in Tabel 7 vergeleken hoe de onderzochte geometrieën breekbalken zich verhouden ten opzichte van deze criteria.

- “De blokkering door de breekbalken moet tenminste 50% bedragen van het benedenstroomse oppervlak van de openingen zonder breekbalken.” – criterium 1
- “De totale benedenstroomse opening (d.w.z.) tussen de breekbalken moet groter zijn dan de totale bovenstroomse opening.” – criterium 2
- “De kleinste openingen tussen de breekbalken moeten tenminste 0.30 m bedragen. Drijvend en zwevend vuil blijft steken in te nauwe spleten.” – criterium 3

Tabel 7 – Beoordelen geometrieën breekbalken a.h.v. criteria Ontwerp van Schutsluizen

		eenheid	Geometrie			
			1	2	3	4
doorstroomsectie opwaarts		[m ²]	1.98	1.98	1.98	1.98
breedte breekbalken		[m]	/	0.15	0.15	0.20
aantal		[-]	/	7	5	3
sectie breekbalken		[m ²]	/	1.72	1.23	0.98
doorstroomsectie afwaarts		[m ²]	3.94	2.21	2.71	2.95
blokkage		[-]	/	0.44	0.31	0.25
sectie afwaarts / sectie opwaarts		[-]	1.98	1.12	1.36	1.49
Ontwerp van schutsluizen	criterium 1		/	N	N	N
	criterium 2		/	J	J	J
	criterium 3		/	N	J	J

Uit Tabel 7 volgt dat de beproefde geometrieën met breekbalken niet voldoen aan criterium 1 betreffende de blokkage van de afwaartse doorstroomsectie maar wel voldoen aan criterium 2 betreffende de verhouding van de afwaartse doorstroomsectie ten opzichte van de opwaartse doorstroomsectie. . Aan criterium 3 voor de tussenafstand tussen de breekbalken voldoen Geometrie 3 en 4.

4.3 Afvoercoëfficiënt

De afvoercoëfficiënt wordt enerzijds bepaald om na te gaan wat de invloed is van de breekbalken op het debiet. Anderzijds zal voor de weerhouden geometrie de afvoercoëfficiënt opgemeten in het schaalmodel gebruikt worden bij het uitvoeren van de nieuwe numerieke simulaties (hoofdstuk 5).

De afvoercoëfficiënt wordt als volgt berekend:

$$\mu = \frac{Q}{A \cdot \sqrt{2g\Delta H}} \quad (1)$$

Met:

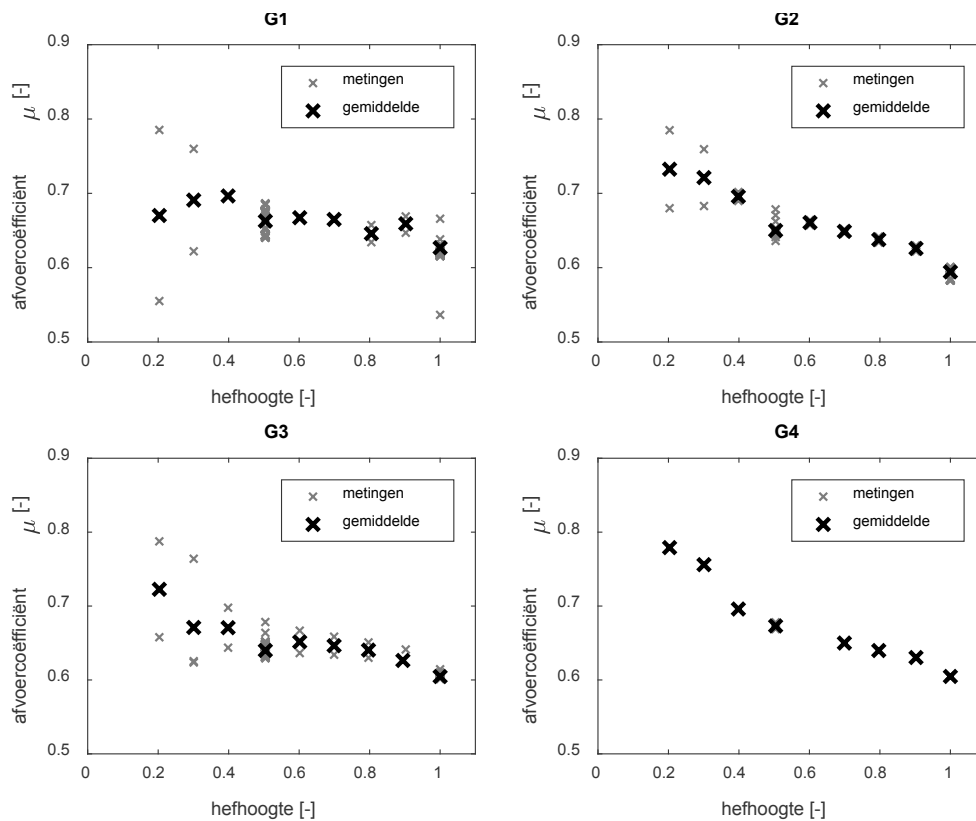
- μ Afvoercoëfficiënt [-]
- Q Debiet (opgemeten) [m³/s]
- A Doorstroomsectie = $B \times H_s$ [m²]
- B Breedte opening = 1.89 m [m]
- H_s Hoogte hefschuif (opgemeten) [m]
- g Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s² [m/s²]
- ΔH Verval (opgemeten) [m]

Bij het bepalen van de doorstroomsectie worden de afrondingen van de opening verwaarloosd.

De variatie van de afvoercoëfficiënt in functie van de hefhoogte wordt voor de 4 beproefde geometrieën gegeven in Figuur 8. Deze figuur bevat de berekende afvoercoëfficiënt afgeleid uit elke uitgevoerde meting. De afvoercoëfficiënt werd bepaald voor een relatieve hefhoogte 0.2 tot 1.0 met een staphoogte 0.1. Een hefhoogte 0.1 werd niet beproefd omdat het toevoerdebiet te klein was om betrouwbaar te kunnen opmeten. De snelheidsmetingen uit paragraaf 4.4 zijn uitgevoerd bij een hefhoogte 50 % en 100 %. Hierbij is voor elke periode van 3 min waarin een snelheidsmeting is uitgevoerd de afvoercoëfficiënt afgeleid.

Hierdoor zijn er bij een hefhoogte 50 % en 100 % veel meer meetpunten. Uit de metingen wordt een gemiddelde waarde voor de afvoercoëfficiënt bepaald. Deze wordt gegeven in Tabel 8.

Figuur 8 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte



Tabel 8 – Gemiddelde afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte

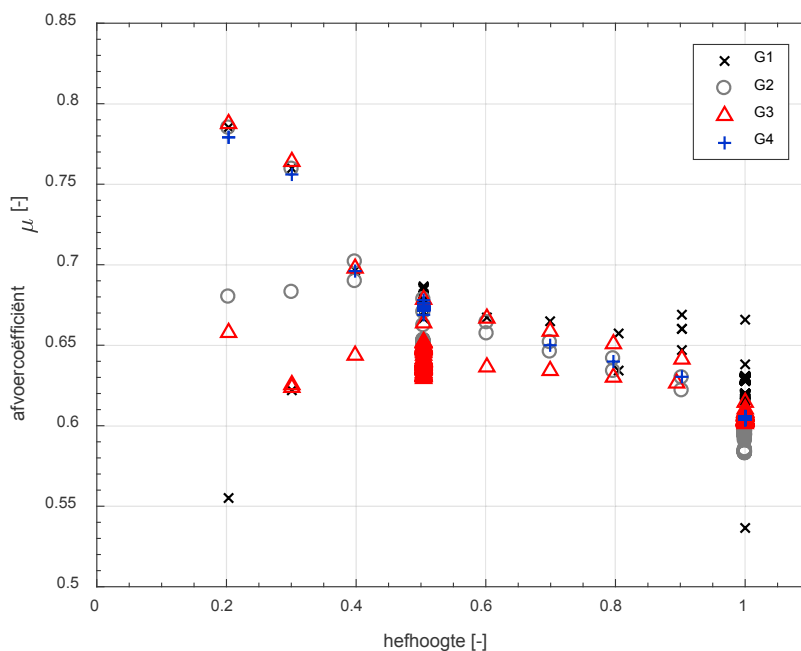
hefhoogte	afvoercoëfficiënt			
	G1	G2	G3	G4
0.20	0.670	0.732	0.723	0.779
0.30	0.691	0.721	0.671	0.756
0.40	0.696	0.696	0.671	0.696
0.50	0.663	0.650	0.640	0.673
0.60	0.667	0.661	0.652	0.662*
0.70	0.665	0.649	0.646	0.650
0.80	0.646	0.638	0.640	0.640
0.90	0.659	0.626	0.626	0.630
1.00	0.627	0.594	0.605	0.605

* Deze waarde werd niet opgemeten en betreft een lineaire interpolatie van de voorgaande en volgende waarde.

Merk op dat de afvoercoëfficiënten bepaald voor G1, G2 en G3 gekenmerkt worden door een zekere spreiding. Het merendeel van de metingen werd uitgevoerd met de hefschuif half open of de hefschuif volledig open. Bij G1, G2 en G3 en een hefhoogte kleiner of gelijk aan de halve hefhoogte divergeren de hoge en lage waarde van de afvoercoëfficiënt bij een afname van de hefhoogte. De verklaring is vermoedelijk meettechnisch. Om de oorzaak na te gaan werden de meettoestellen gecontroleerd en

werden een aantal analyses uitgevoerd. Hieruit volgde geen verklaring voor deze afwijking. Omdat geometrie 4 opgemeten werd door middel van één kortlopende meetreeks vertoont deze meetreeks geen spreiding. Bij een hefhoogte kleiner dan de halve hefhoogte valt de bovengrens van de afvoercoëfficiënt van de 4 beproefde geometrieën samen, zie Figuur 9. Een dergelijk verloop werd ook verwacht uit de literatuur en kan een indicatie zijn dat de bovenwaarden het meest betrouwbaar zijn. Algeheel kan gesteld worden dat de afvoercoëfficiënten van de 4 beproefde geometrieën voor een hefschuifhoogte boven 50 % slechts beperkt verschillen. De afvoercoëfficiënt voor een hefschuifhoogte boven 50 % is voor de geometrie zonder breekbalken beperkt hoger dan voor de geometrieën met breekbalken.

Figuur 9 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte vergelijking G1, G2, G3 en G4



Het verdient aanbeveling om de metingen voor het bepalen van de afvoercoëfficiënt opnieuw uit te voeren. Hierbij zouden de toestellen voor het opmeten van de waterhoogte gereinigd, gecontroleerd en geherkalibreerd moeten worden, dient de werking van de positiemeter van de hefschuif uitgebreid gecontroleerd te worden, dient een kalibratie uitgevoerd te worden van de afwaartse overlaat en wordt de debietmeter bij voorkeur vervangen door een ander exemplaar. Dit was helaas niet mogelijk binnen het tijdbestek van deze studie.

Voor het verder vervolg van de studie worden voor de hefhoogtes lager dan 50 % de bovengrens van de afvoercoëfficiënt uit Figuur 9 toegepast. Voor hefhoogtes groter of gelijk aan 50 % worden de waarden uit Tabel 8 toegepast. Dit geeft de waarden uit Tabel 9.

Tabel 9 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte

relatieve hefhoogte	afvoercoëfficiënt			
	G1	G2	G3	G4
0.20	0.785	0.785	0.788	0.779
0.30	0.760	0.759	0.764	0.756
0.40	0.697	0.702	0.698	0.696
0.50	0.663	0.650	0.640	0.673
0.60	0.667	0.661	0.652	0.662*
0.70	0.665	0.649	0.646	0.650
0.80	0.646	0.638	0.640	0.640
0.90	0.659	0.626	0.626	0.630
1.00	0.627	0.594	0.605	0.605

4.4 Snelheidspatroon

Met een Vectrino Profiler (producent Nortek AS) gemonteerd op een meetrobot wordt een raster van puntsnelheidsmetingen uitgevoerd. Het eerste raster betrof een verticaal vlak dwars op het de stroming op 1.7 m afwaarts van de opening. Het tweede raster betrof een verticaal vlak volgens het centerlijn van de opening. De afstand voor het dwarsvlak (1.7 m van de opening) werd gekozen naar analogie met eerder uitgevoerd onderzoek op het schaalmodel (Evens, 2016; Maes, 2016). De snelheden werden opgemeten met de hefschuif 100% en 50 % geopend. De opgemeten snelheden worden grafisch voorgesteld in Figuur 11 voor de hefschuif 100 % geopend en in Figuur 13 voor de hefschuif 50 % geopend. De snelheid in deze figuren wordt relatief uitgedrukt ten opzichte van de sectiegemiddelde snelheid in de opening:

$$V = \frac{v_{\text{meting}}}{v_{\text{gem}}} = \frac{v_{\text{meting}}}{Q/A} \quad (2)$$

De theoretische maximaal voorkomende snelheid wordt als volgt berekend:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{2g\Delta H} \quad (3)$$

Door middel van de formule van de afvoercoëfficiënt (1) kan de verhouding tussen de maximaal voorkomende snelheid en de sectiegemiddelde snelheid als volgt berekend kan worden:

$$V_{\text{max}} = \frac{v_{\text{gem}}}{\mu} \quad (4)$$

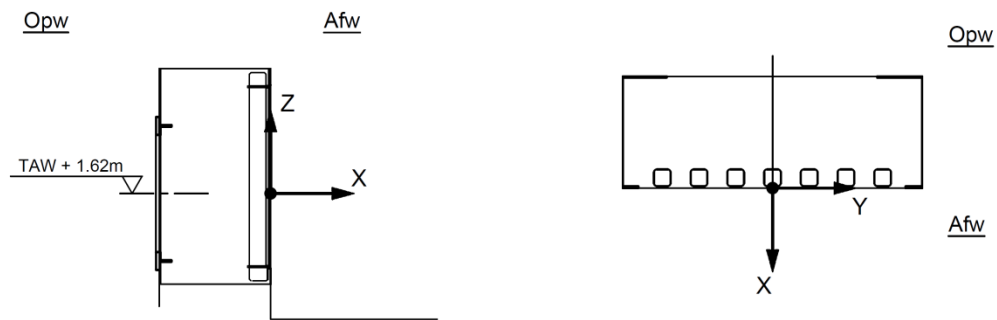
Met:

•	V	Relatieve snelheid	[-]
•	v_{meting}	Opgemeten snelheid	[m/s]
•	v_{gem}	Sectiegemiddelde snelheid onder de hefschuif	[m/s]
•	Q	Debiet (opgemeten)	[m ³ /s]
•	A	Oppervlakte onder de hefschuif = $B \cdot H$	[m ²]
•	B	Breedte opening = 1.89 m	[m]
•	H	Hoogte hefschuif (opgemeten)	[m]
•	v_{max}	Theoretisch maximale snelheid	[m/s]
•	ΔH	Verval (opgemeten)	[m]
•	g	Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s ²	[m/s ²]
•	μ	Afvoercoëfficiënt	[-]

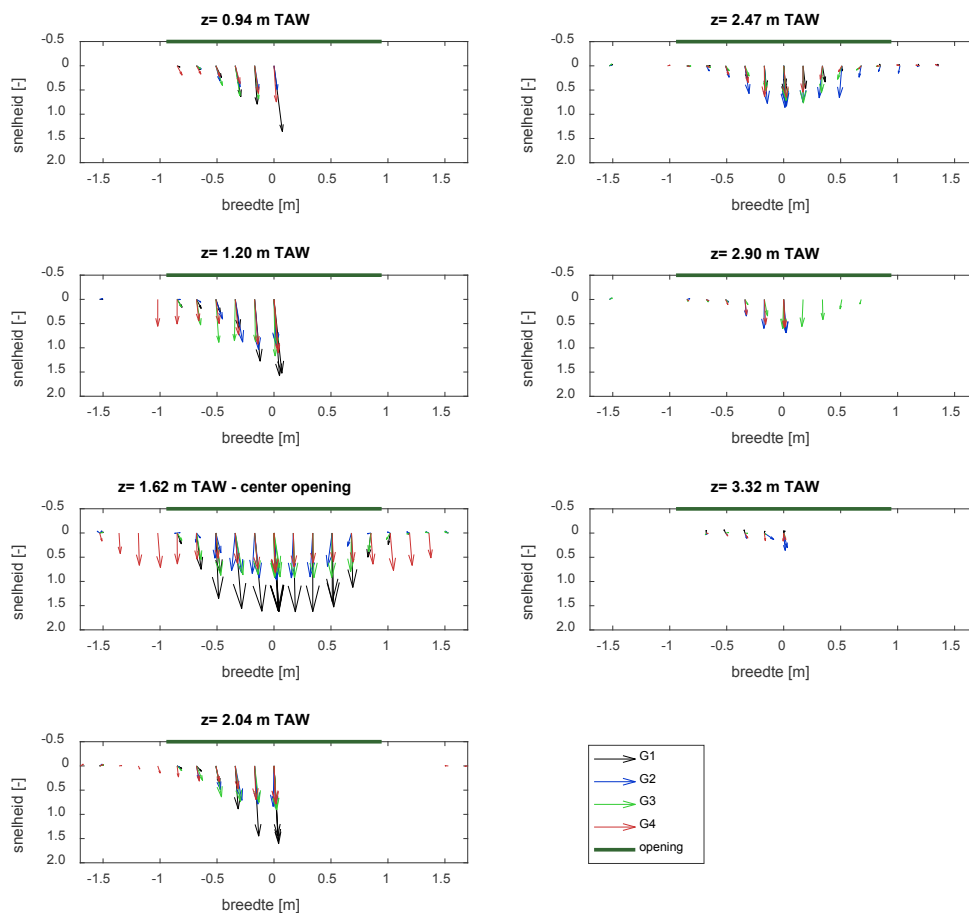
Hieruit volgt dat bij een afvoercoëfficiënt 0.6 de maximale snelheid 1.67 (=0.6⁻¹) keer de gemiddelde snelheid bedraagt.

Het gehanteerde assenstelsel wordt geïllustreerd in Figuur 10. Het nulpunt van het assenstelsel ligt in het afwaarts deurvlak in het verlengde van het center van de opwaartse opening. De x-as is positief gericht naar afwaarts toe en de z-as is positief gericht naar omhoog. Doordat een rechtsdraaiend assenstelsel wordt toegepast is de y-as positief gericht naar linkeroever.

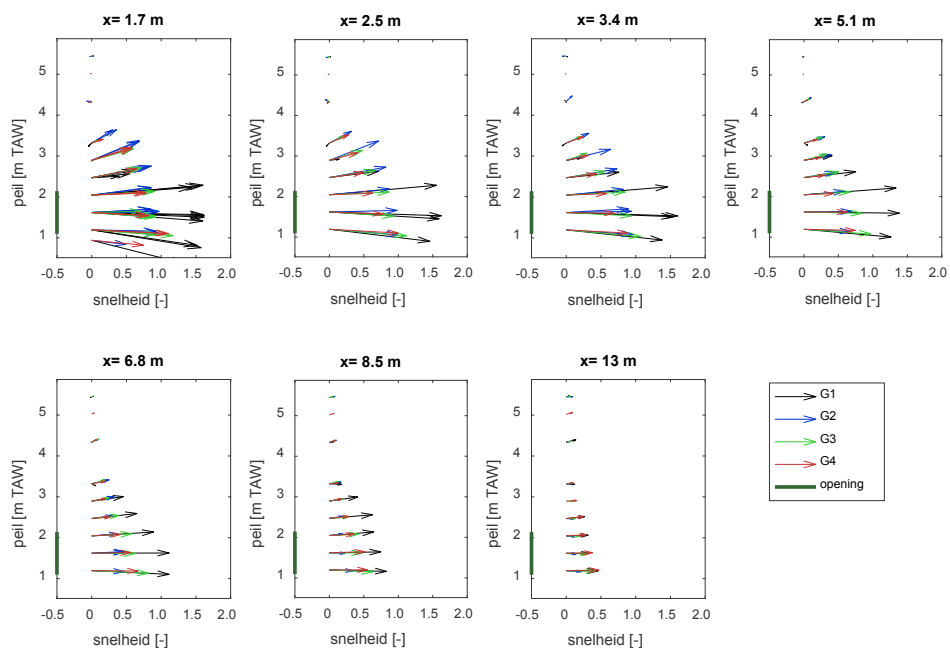
Figuur 10 – Assenstelsel schaalmodel



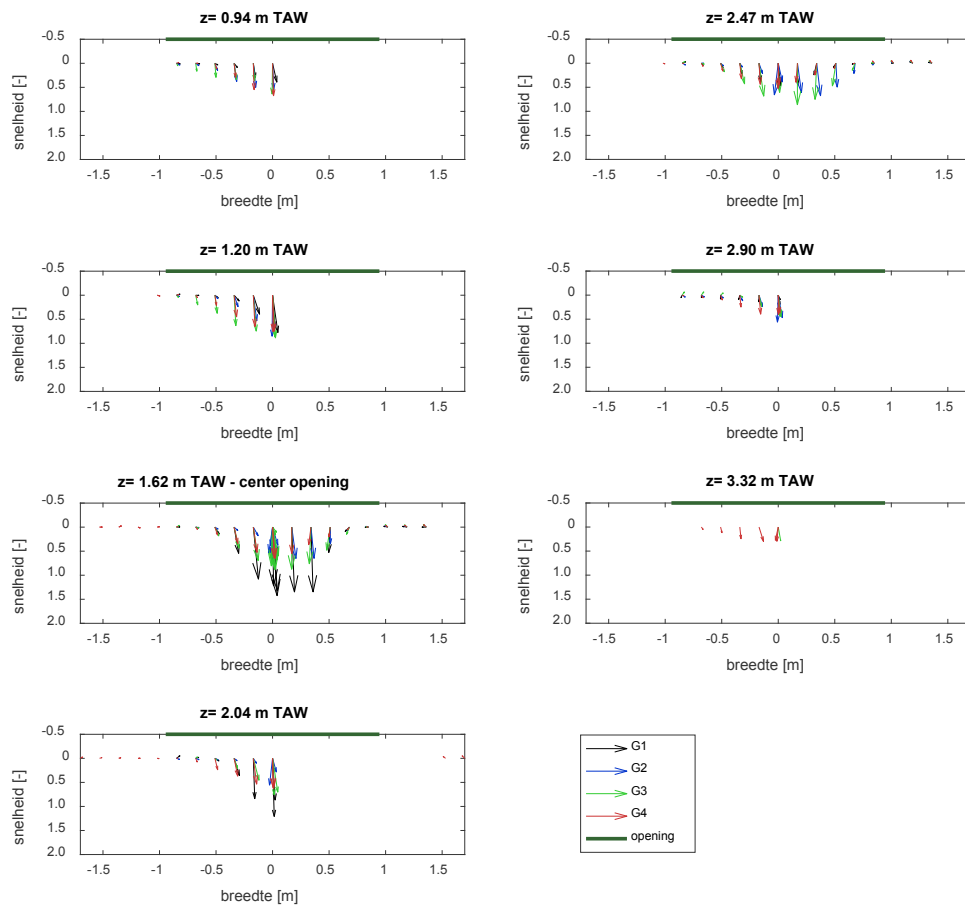
Figuur 11 – Snelheid in horizontaal vlak op 1.7 m afwaarts van de opening – hefschuif 100 % open



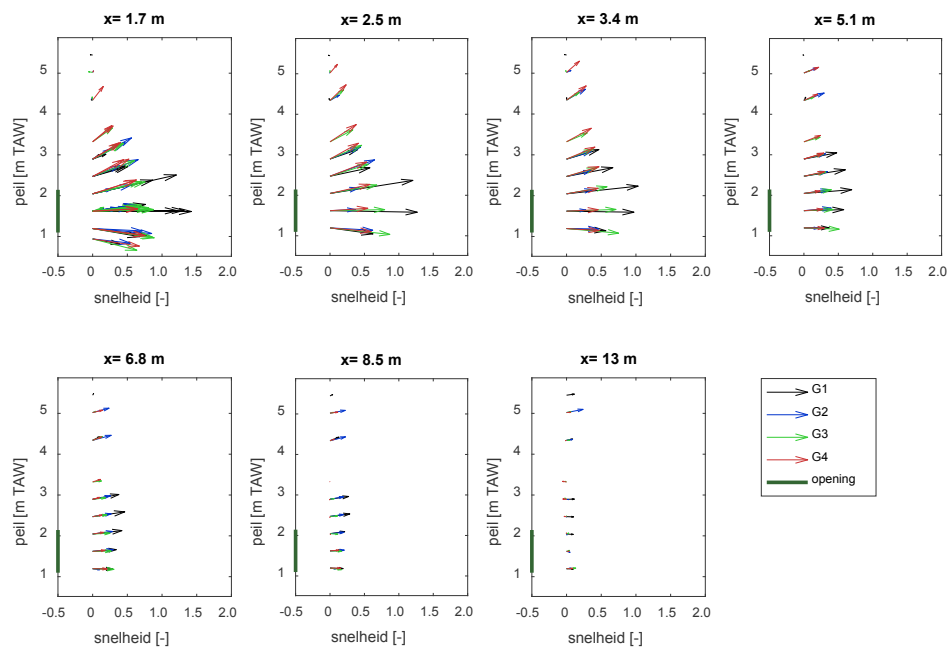
Figuur 12 – Snelheid in verticaal vlak op de centerlijn van de kolk– hefschuif 100 % open



Figuur 13 – Snelheid in horizontaal vlak op 1.7 m afwaarts van de opening – hefschuif 50 % open



Figuur 14 – Snelheid in verticaal vlak op de centerlijn van de kolk – hefschuif 50 % open

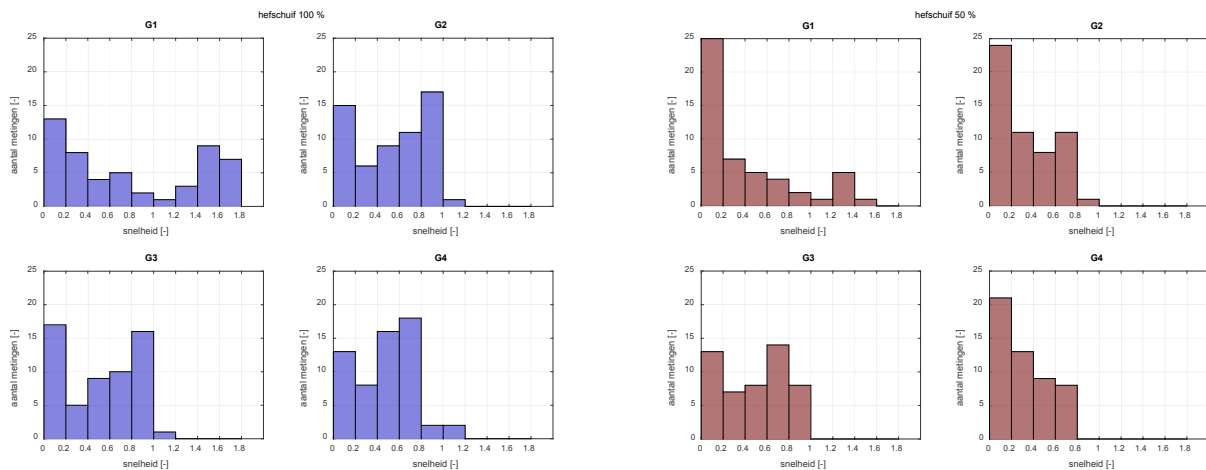


Uit Figuur 11 tot en met Figuur 14 wordt opgemerkt dat het plaatsen van breekbalken (Geometrie 2, 3 en 4) zorgt voor een merkbaar betere spreiding van de jet, dit zowel in de hoogte als in de breedte. Bij de metingen zonder breekbalken (Geometrie 1) is de kern van de jet duidelijk waarneembaar. Deze wordt gekenmerkt door een constante hoge snelheid, zowel in de hoogte als in de breedte. De snelheden in de naastliggende punten zijn beduidend lager. Bij de metingen met breekbalken vertoont de snelheid een meer geleidelijke opbouw. Bij de metingen zonder breekbalken bedraagt de maximale snelheid op 1.7 m van de opening ca. 1.6 keer de sectie gemiddelde snelheid in de opening. Dit komt ca. overeen met de theoretische maximale snelheid. Bij de metingen met breekbalken bedraagt de maximale opgemeten snelheid op 1.7 m van de opening ca. 1.0 keer de sectie gemiddelde snelheid in de opening. Hieruit volgt dat door de breekbalken de maximale snelheid op 1.7 m van de opening afgenomen is met ca. 40 %. De snelheid neemt merkkelijk sneller af bij een 50 % geopende hefschuif dan bij een 100 % geopende hefschuif. Deze conclusie is geldig met en zonder breekbalken.

Het snelheidspatroon voor Geometrie 2 en Geometrie 3 is gelijkaardig. Geometrie 2 heeft 7 breekbalken en geometrie 3 heeft 5 breekbalken beide met een zelfde sectie (0.15 m x 0.15 m). Niettegenstaande het grotere aantal breekbalken zorgt geometrie 2 niet voor een merkbaar betere spreiding van de jet. Bij een volledig geopende hefschuif wordt de beste spreiding bekomen door Geometrie 4 met 3 breekbalken met een iets bredere sectie (0.20 m x 0.20 m). Bij een 50 % geopende hefschuif is de spreiding van de jet voor de drie beproefde geometrie met breekbalken gelijkaardig.

In Figuur 15 wordt een histogram gegeven van de snelheid in de x richting. Dit histogram werd opgesteld op basis van de opgemeten snelheid in het verticaal vlak op 1.7 m van de opening. De grootte van dit vlak werd in horizontale richting begrensd tussen $y = \pm 1.5$ m en in verticale richting tussen 0.5 m TAW en 3.0 m TAW.

Figuur 15 – Histogram snelheid x richting op 1.7 m afwaarts van de opening



Uit Figuur 15 volgt dat bij een 100 % geopende hefschuif zonder breekbalken (Geometrie 1) in het histogram meer metingen waargenomen worden bij hoge snelheden (1.4 tot 1.8) en bij lage snelheden (0 tot 0.6). De minste metingen worden waargenomen bij tussenliggende snelheden (0.6 tot 1.4). Bij de geometrieën met breekbalken is de maximale snelheid lager en worden de minste metingen waargenomen bij lagere snelheden (0.2 tot 0.4). Bij een 50 % geopende hefschuif zonder breekbalken valt op dat de grootte van de zone met hoge snelheden (1.0 tot 1.6) afneemt en de zone met een 0 snelheid (0 tot 0.2) sterk toeneemt. Bij een 50 % geopende hefschuif en breekbalken Geometrie 2 en Geometrie 4 neemt in vergelijking met de 100 % geopende hefschuif de maximale snelheid af en worden meer metingen waargenomen bij lage snelheden (0 tot 0.2). Dit wordt niet waargenomen bij Geometrie 3. Uit de onderlinge vergelijking van de geometrieën met breekbalken valt op dat de maximale snelheid bij Geometrie 4 het laagste is. Op enkele uitzonderingen na zijn de snelheden bij Geometrie 4 beperkt tot 0.8, Bij Geometrie 2 en Geometrie 3 bedraagt de maximale snelheid, op een enkele uitzondering na, 1.0.

4.5 Visualisatie

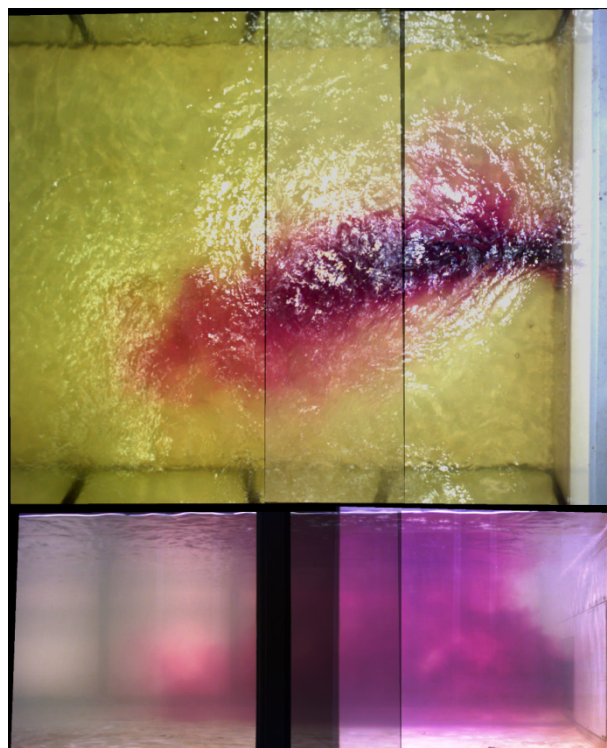
Naast snelheidsmetingen werd het stromingspatroon in de sluiskolk ook gevisualiseerd door toevoegen van kleurstof in de jet. Hiervan werden opnames gemaakt, zowel in het verticale als in het horizontale vlak. Het gevisualiseerde stromingspatroon wordt in Figuur 16 gegeven voor de hefschuif 100 % geopend en in Figuur 17 voor de hefschuif 50 % geopend.

Figuur 16 –Stromingspatroon hefschuif 100 % geopend

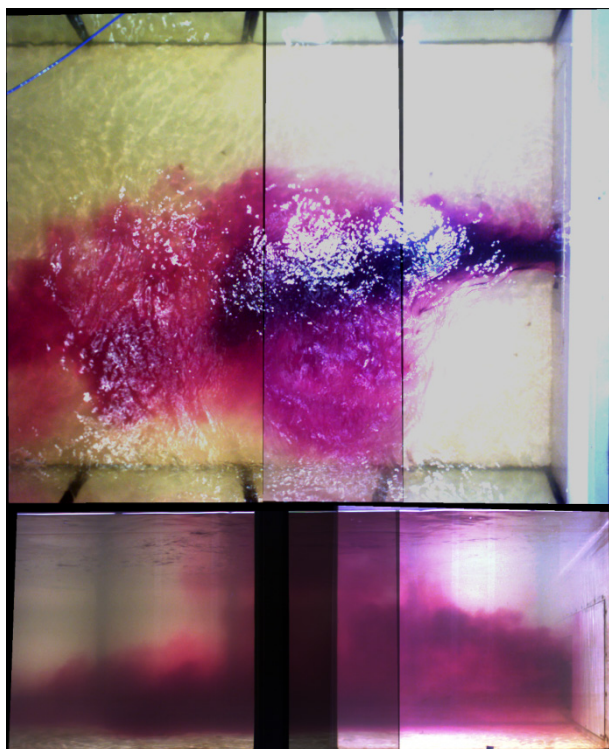
G1



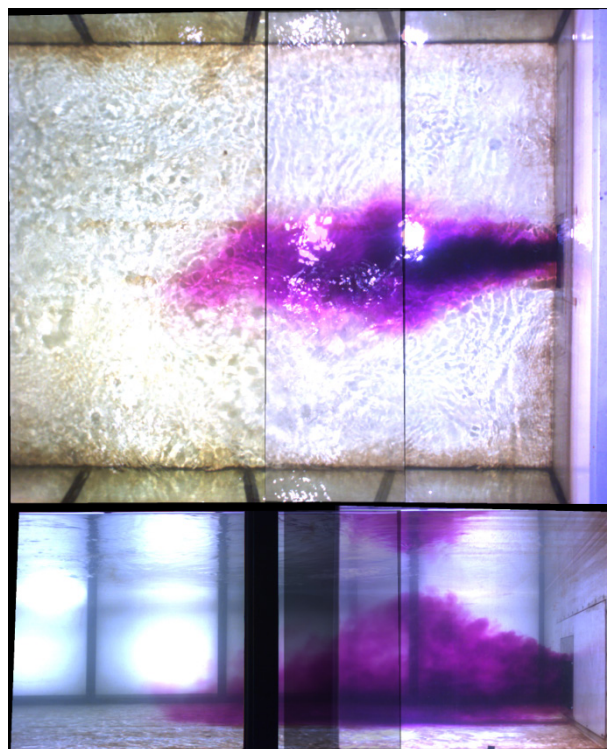
G2



G3

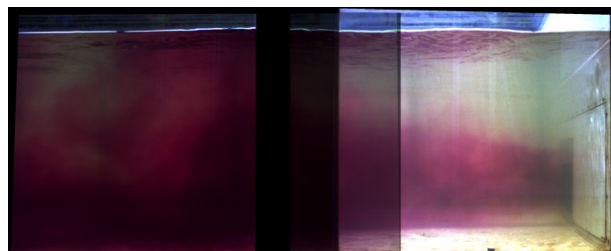
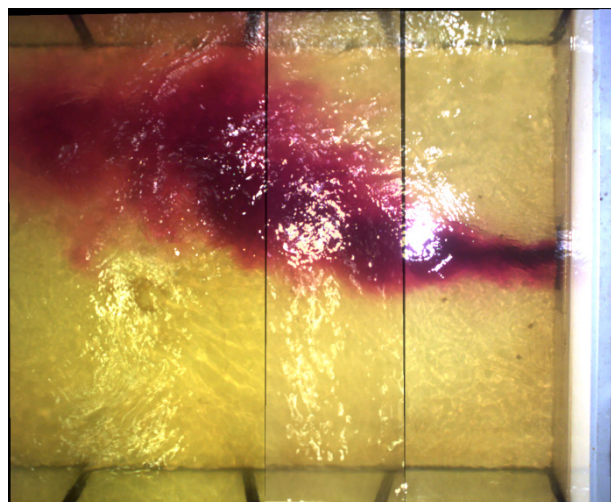


G4

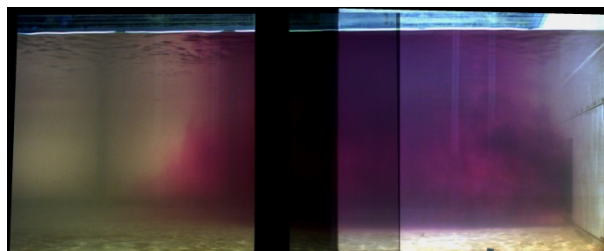
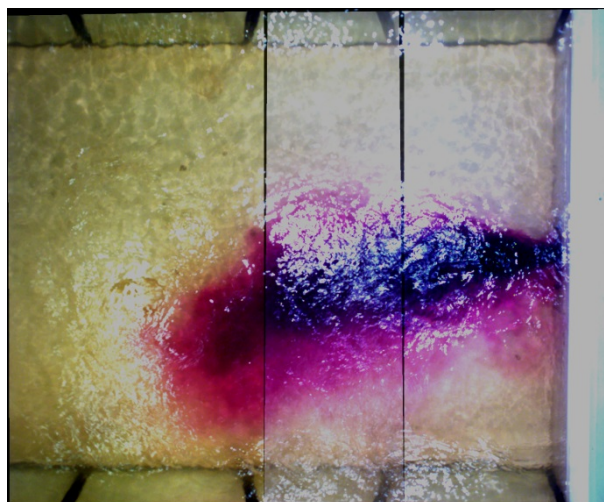


Figuur 17 – Stromingspatroon hefschuif 50 % geopend

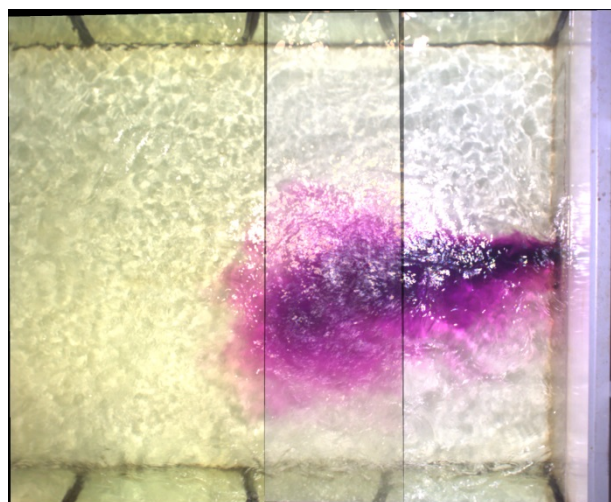
G1



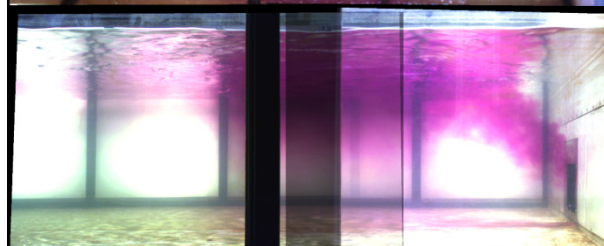
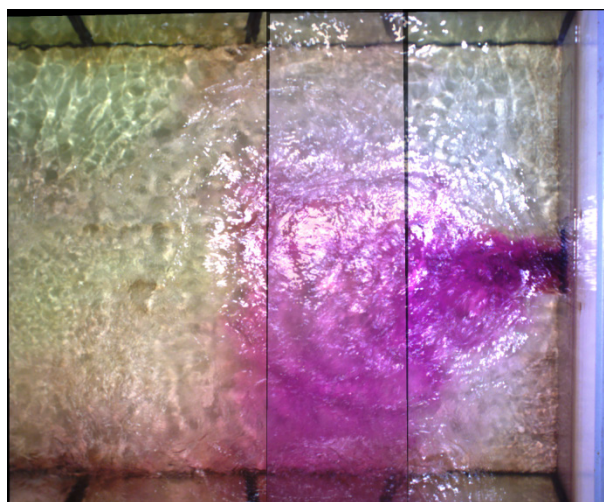
G2



G3



G4*



* Bij G4 is de onderste helft van de stroming vermoedelijk niet geïnjecteerd met kleurstof.

Uit de figuren volgt dat met breekbalken de jet merkbaar sneller uitspreidt in de hoogte dan bij afwezigheid van breekbalken. Dit was reeds waargenomen in het opgemeten snelheidspatroon in paragraaf 4.4. Bemerk dat bij het opgemeten snelheidspatroon enkel bij Geometrie 4 en een volledig geopende hefschuif de spreiding van de jet in de breedte merkelijk groter werd. Bij de geometrie zonder breekbalken valt op dat de uitstroming verder uitspreidt in de hoogte met een 50 % geopende hefschuif dan met een 100 % geopende hefschuif. Dit volgde ook uit het opgemeten snelheidspatroon. Ook bij gebruik breekbalken valt op dat de spreiding in de hoogte bij een 50 % geopende hefschuif groter is dan bij een 100 % geopende hefschuif. Bij een 100 % geopende hefschuif is de spreiding in de hoogte bij Geometrie 2 groter ten opzichte van Geometrie 3 en 4. Bij een 50 % geopende hefschuif zijn de verschillen tussen de geometrieën met breekbalken klein. In de horizontale opnames wordt opgemerkt dat de jet afwijkt van het midden en een zijde kiest. In 5 gevallen betreft dit de linkeroever, in 1 geval de rechteroever. Tot slot blijft de jet in 2 gevallen min of meer rechtdoor gaan.

4.6 Conclusies

Door middel van schaalmodelproeven werden voor het nivelleersysteem van de sluis te Sint-Baafs-Vijve 4 geometrieën beproefd. Een eerste geometrie zonder breekbalken. Vervolgens werden drie geometrieën met breekbalken beproefd: 7 breekbalken met sectie 0.15 m x 0.15 m, 5 breekbalken met sectie 0.15 m x 0.15 m en 3 breekbalken met sectie 0.20 m x 0.20 m. Uit het schaalmodelonderzoek volgt dat breekbalken slechts een beperkte invloed hebben op de afvoercoëfficiënt en dus het debiet beperkt beïnvloeden. Breekbalken zorgen wel voor een merkelijk betere spreiding van de jet afwaarts de opening. De snelheid in de kern van de jet verlaagt met 40 % na het plaatsen van breekbalken. Hierbij valt op dat de geometrie met 7 breekbalken niet voor een merkelijk betere spreiding zorgt dan de geometrie met 5 breekbalken. Bij een hefschuif volledig open worden de beste resultaten bekomen met de geometrie met drie breekbalken. Bij de hefschuif half open zijn de resultaten voor de drie geometrieën met breekbalken gelijkaardig. In overleg met de opdrachtgever en EBS werd besloten om de geometrie met drie breekbalken met sectie 0.20 m x 0.20 m te weerhouden.

Het handboek ontwerp van schutsluizen geeft een aantal voorwaarden met betrekking tot de blokkage van de breekbalken, de verhouding van de sectie onder de hefschuif tot de sectie tussen de breekbalken en de minimum afstand tussen de breekbalken. Aan de voorwaarde met betrekking tot de blokkage voldoet geen van de drie beproefde geometrieën met breekbalken. Uit het in kader van deze studie uitgevoerde schaalmodelonderzoek lijkt te volgen dat ook een goede dissipatie mogelijk is met een kleinere blokkage dan voorgeschreven in het handboek "Ontwerp van Schutsluizen".

5 Simulaties

In overleg met de opdrachtgever en EBS werd Geometrie 4 (3 breekbalken met sectie 0.20 m x 0.20 m) weerhouden voor het uitvoeren van de numerieke simulaties van het nivelleersysteem. In paragraaf 5.1 worden de programma's LOCKFILL en vul_sluis toegelicht. Ten opzichte van de initiële simulaties met het nivelleersysteem worden enkele wijzigingen aangebracht aan de input voor de simulaties, deze worden besproken in paragraaf 5.2. Daarna werd een openingswet voor de hefschuiven opgesteld waarbij enerzijds de nivelleertijd geminimaliseerd wordt en anderzijds de voorgeschreven criteria voor stijg- en daalsnelheid alsook langskracht niet overschreden worden. De bekomen openingswetten worden gegeven in paragraaf 5.3. Het resultaat van de simulaties wordt beschreven in paragraaf 5.4. Een besluit wordt geformuleerd in paragraaf 5.5.

5.1 LOCKFILL en vul_sluis

De programma's LOCKFILL (Deltares, 2015) en vul_sluis (K. Verelst *et al.*, 2014; 2016a; b; 2017) simuleren het vullen van een sluis door middel van openingen in de deur. Als input parameters worden de afmetingen van de sluis, opgegeven, de karakteristieken van het nivelleersysteem, het initieel waterpeil in de kolk, het opwaarts waterpeil en een aantal karakteristieken van het verschutte schip opgegeven. Beide programma's berekenen de nivelleerkromme, de debietskromme en de langskracht op het schip in de kolk. De langskracht is opgedeeld in volgende 5 componenten: langskracht ten gevolge van translatiegolven, langskracht ten gevolge van impulsafname, langskracht ten gevolge van vulstraalwerking, langskracht ten gevolge van wrijving en langskracht ten gevolge van dichtheidsverschillen. De component van de langskracht ten gevolge van dichtheidsverschillen kan enkel door LOCKFILL berekend worden. Deze is bij de ontwikkeling van vul_sluis niet beschouwd.

Sinds juli 2015 wordt door Deltares het programma LOCKFILL (Deltares, 2015) vrij ter beschikking gesteld. De berekeningsmethode van LOCKFILL is gebaseerd op schaalmodelonderzoek, desk studies en eerder ontwikkelde berekeningsprogramma's. Het programma was ontwikkeld door Deltares in de periode 1989-1993 in opdracht van Rijkswaterstaat. Voor de simulaties in dit rapport wordt release 5.2.3.0 van LOCKFILL gebruikt.

Het programma vul_sluis is een (Matlab-)programma dat door WL is ontwikkeld op basis van de beschikbare literatuur in verband met het programma LOCKFILL en gevalideerd met meetgegevens uit de literatuur en met bijkomende meetgegevens van WL. Hierbij moet opgemerkt worden dat het programma vul_sluis, vooral met betrekking tot de berekening van de krachten op een schip, nog steeds in ontwikkeling is. Dit maakt dat voor initiële simulaties met het nivelleersysteem twee verschillende versies van het programma zijn gebruikt (namelijk release 01.42.vA.08 en 01.42.vB.08, Verelst *et al.* (2014, 2016)). Deze beide releases gaven echter identiek dezelfde resultaten voor wat betreft het debiet door de vulopeningen, de variatie van het waterpeil in de sluis kolk en de optredende end-to-end waterspiegelhellingen. De verschillen tussen beide releases betreffen de formulering voor het berekenen van de langskrachten op het schip. Voor de simulaties in dit rapport wordt een nieuwe versie van het programma vul_sluis gebruikt (release 01.54.00). In deze release wordt nog slechts één methode gehanteerd voor het berekenen van de langskrachten op het schip.

In overleg met de opdrachtgever werd besloten om voor het opstellen van de openingswet het programma LOCKFILL te gebruiken. Bij de initiële simulaties werd een afzonderlijke openingswet opgesteld voor LOCKFILL en vul_sluis. Uit dit rapport dient echter een unieke openingswet te volgen die geïmplementeerd kan worden. Bemerkt dat zowel LOCKFILL als vul_sluis simulaties betreffen en dus gekenmerkt worden door een bepaalde onzekerheid. Voor het hydraulisch ontwerp van de opwaarts gelegen sluis te Harelbeke werd het programma LOCKFILL gebruikt (Deltares, 2012, 2014; Weiler & Yossef, 2012). Omwille van de

vergelijkbaarheid tussen Harelbeke en Sint-Baafs-Vijve wordt ervoor geopteerd om LOCKFILL te gebruiken voor het opstellen van de openingswet van de hefschuiven. De simulaties zelf worden echter zowel met LOCKFILL als met vul_sluis uitgevoerd.

5.2 Wijzigingen ten opzichte van de initiële simulaties

Ten opzichte van het model toegepast voor de initiële simulaties zijn er enkele wijzigingen. De afmetingen van de kolk worden aangepast naar het meest recente ontwerpplan. De afvoercoëfficiënt van de opening met breekbalken wordt overgenomen uit het schaalmodelonderzoek en gebruik makend van de in het schaalmodel uitgevoerde snelheidsmetingen wordt de parameter doorstroomsectie na breekbalken aangepast.

De bij de initiële simulaties en de in dit rapport gehanteerde kolk lengte en nuttige kolk lengte wordt vergeleken in Tabel 10. Bemerk dat er een beperkte toename is van de totale kolk lengte met 1.6 m, te verdelen over de opwaartse deelkolk (+ 0.7 m) en de afwaartse deelkolk (+ 0.9 m).

Tabel 10 – Wijzigingen geometrie kolk ten opzichte van rapport 16_042

		totale kolk	opwaartse deelkolk	afwaarts deelkolk
kolk lengte	16_042	259.0 m	143.5 m	115.5 m
	16_065	260.6 m	144.2 m	116.4 m
	Δ	1.6 m	0.7 m	0.9 m
nuttige kolk lengte	16_042	240.6 m	125.0 m	97.0 m
	16_065	242.1 m	125.7 m	97.9 m
	Δ	1.5 m	0.7 m	0.9 m

De afvoercoëfficiënt toegepast in de simulaties wordt gegeven in Tabel 11. Deze is overgenomen uit de resultaten van het schaalmodelonderzoek voor Geometrie 4 (paragraaf 4.3). In Figuur 18 wordt de afvoercoëfficiënt van Geometrie 4 vergeleken met de afvoercoëfficiënt gehanteerd in rapport 16_042.

Tabel 11 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte

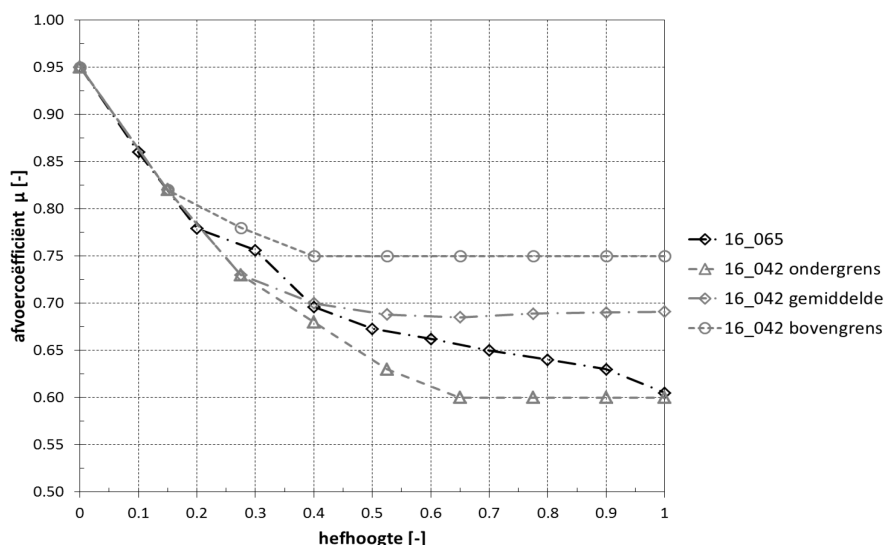
hefhoogte	afvoercoëfficiënt μ
0.00	0.95 ^[1]
0.10	0.86 ^[2]
0.20	0.780
0.30	0.76
0.40	0.70
0.50	0.67
0.60	0.66 ^[2]
0.70	0.65
0.80	0.64
0.90	0.63
1.00	0.60

[1] Niet opgemeten tijdens de proeven. Overgenomen van 16_042.

[2] Niet opgemeten tijdens proeven. Overgenomen van 16_042. Lineaire interpolatie hefhoogte 0.00 en 0.15.

[3] Niet opgemeten tijdens de proeven. Lineaire interpolatie hefhoogte 0.50 en 0.70.

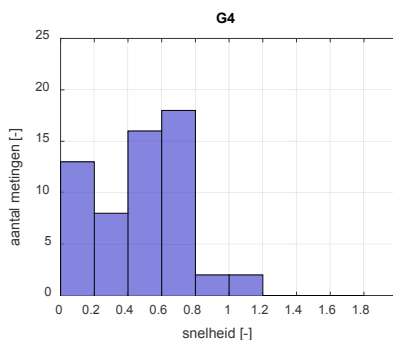
Figuur 18 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte



Bij rapport 16_042 neemt de afvoercoëfficiënt toe bij een afname van de hefhoogte. Bij een hefhoogte 0 werd een afvoercoëfficiënt 0.95 toegepast. Uit de metingen in het schaalmodel volgt ook een toename van de afvoercoëfficiënt bij een afname van de hefhoogte. In het schaalmodel werd een hefhoogte 0.10 niet opgemeten omdat het debiet in het schaalmodel te laag was voor een betrouwbare meting. Voor een hefhoogte 0.00 en 0.10 worden de waarden uit 16_042 overgenomen. Een beperkte overschatting van de afvoercoëfficiënt is conservatief omdat in werkelijkheid het debiet lager zal zijn.

In LOCKFILL en vul_sluis wordt de invloed van breekbalken beschouwd als een op te geven toename van de doorstroomsectie van de vulstraat afwaarts van de breekbalken. De doorstroomsectie is hierbij onafhankelijk van de hefhoogte. In rapport 16_042 werd een toename van de doorstroomsectie met 20 % toegepast ($11.91 \text{ m}^2 \rightarrow 14.29 \text{ m}^2$). Omdat het opgemeten raster snelheidsmetingen niet fijn genoeg is om een goed zicht te hebben op de werkelijke doorstroomsectie van de jet wordt de doorstroomsectie afgeleid op basis van een representatieve snelheid in de kern van de jet. In paragraaf 4.4 wordt een histogram opgesteld van de snelheid in het center van de opening. In Figuur 19 wordt hieruit het histogram voor Geometrie 4 met hefschuif 100 % overgenomen. Uit dit histogram volgt dat, op enkele uitschieters na, voor Geometrie 4 de maximaal voorkomende snelheden tussen 0.6 en 0.8 keer de sectiegemiddelde snelheid onder de hefschuif bedragen. Op basis hiervan wordt een maximale snelheid gelijk aan 0.7 keer de sectiegemiddelde snelheid gehanteerd voor de berekening van de doorstroomsectie. Een snelheid die 0.7 keer de sectiegemiddelde snelheid onder de hefschuif bedraagt komt overeen met een toename van de doorstroomsectie met 43 % ($=0.7^{-1}-1$). De doorstroomsectie na de hefschuif neemt hierbij toe van 11.91 m^2 naar 17.03 m^2 .

Figuur 19 – Histogram snelheid 1.7 m afwaarts de opening Geometrie 4 hefschuif 100 % open



In LOCKFILL en vul_sluis moet de bovenzijde van de doorstroomsectie na de breekbalken opgegeven worden. Uit de visualisatie van de jet met kleurstof (zie paragraaf 4.5) volgt dat de jet bij uitstroom de volledige hoogte van de afwaartse uitstroomopening bevat. In dit rapport wordt de bovenzijde van de doorstroomsectie na de breekbalken gelijk gesteld met de bovenzijde van de opening in het afwaarts dagvlak: 2.59 m TAW. In rapport 16_042 bedroeg de bovenzijde van de doorstroomsectie 2.14 m TAW.

5.3 Openingswetten

Voor het nivelleren van de sluis worden drie openingswetten beschouwd.

- Openingswet 1 nivelleren van de volledige kolk,
- Openingswet 2 nivelleren van de opwaartse of afwaartse deelkolk,
- Openingswet 3 uitzondering voor vullen van de volledige of een deelkolk met een recreatievaartuig.

De toegepaste openingswet per situatie wordt voorgesteld in Tabel 12.

Tabel 12 – Openingswetten

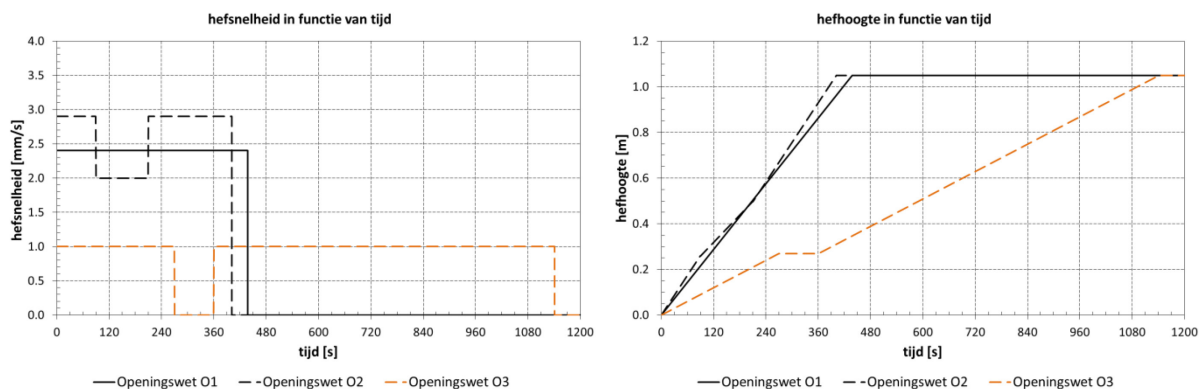
kolk	type	CEMT Vb	CEMT Va	CEMT I	recreatievaart
volledig	vullen	1	1	1	3
	ledigen	1	1	1	1
afwaarts	vullen	/	2	2	3
	ledigen	/	2	2	2
opwaarts	vullen	/	2	2	3
	ledigen	/	2	2	2

/ Een CEMT klasse VB schip kan enkel met de volledige kolk verschut worden

De openingswetten werden opgesteld door middel van LOCKFILL simulaties. Hierbij werd getracht om, door middel van het optimaliseren van de openingswet, een zo snel mogelijk nivellering te bekomen zonder overschrijding van het criterium voor de stijgsnelheid en het criterium van de langskracht op het verschutte schip. Uit overleg met de afdeling Elektromechanica en Telematica (EMT) werd besloten dat er geen minimum snelheid gehanteerd moet worden. In Nederland wordt dikwijls een minimum hefsnelheid van 0.003 m/s gehanteerd ter voorkoming van slip stick. Door het toepassen van UHMWPE glijders wordt verwacht dat slip stick niet voorkomt in de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve. Door EMT werd wel opgelegd dat het verschil tussen de snelste en traagste fase van de hefsnelheid maximaal een factor 3 dient te bedragen.

De uit de simulaties (zie paragraaf 5.4) volgende openingswetten worden voorgesteld in Figuur 20 en Tabel 13. De minimale hefsnelheid bedraagt 0.0010 m/s en de maximale hefsnelheid bedraagt 0.0029 m/s. De verhouding tussen de minimale en maximale hefsnelheid bedraagt dus een factor 3, zoals voorgeschreven. Voor openingswet O1 (nivelleren volledige kolk) wordt een openingswet bestaande uit één fase voorgesteld. Voor openingswet O2 wordt een openingswet uit drie fases voorgesteld. Voor openingswet O3 (vullen recreatievaart) wordt een openingswet met een constante hefsnelheid met een pauze voorgesteld. Merk op dat ten opzichte van rapport 16_042 hetzelfde bereik van hefsnelheden wordt toegepast (0.0010 m/s tot 0.0030 m/s). Wel wordt voor het vullen van de volledige kolk nu een hefsnelheid met constante hefsnelheid toegepast in plaats van een hefsnelheid uit drie fases.

Figuur 20 – Openingswet O1, O2 en O3



Tabel 13 – Openingswet O1, O2 en O3

openingswet O1			openingswet O2			openingswet O3		
tijd [s]	hefhoogte [m]	hef snelheid [m/s]	tijd [s]	hefhoogte [m]	hef- snelheid [m/s]	tijd [s]	hefhoogte [m]	hef- snelheid [m/s]
0 - 438	0 - 1.05	0.0024	0 – 90	0 – 0.26	0.0029	0.00 – 270	0.00 – 0.27	0.0010
			90 – 210	0.26 – 0.50	0.0020	270 – 360	0.27 – 0.27	0
			210 – 410	0.50 – 1.05	0.0029	360 – 1141	0.27 – 1.05	0.0010

5.4 Resultaat

De uitgevoerde simulaties worden samengevat in Tabel 14. De simulaties werden zowel met LOCKFILL als met vul_sluis uitgevoerd. De openingswet werd opgesteld op basis van simulaties met LOCKFILL. Hierdoor is het mogelijk dat de krachten volgend uit vul_sluis het opgegeven criterium overschrijden. De gehanteerde openingswet per configuratie komt overeen met Tabel 12. De voor de simulaties beschouwde schepen worden gegeven in paragraaf 2.4. Hierbij werd voor elk mogelijk type verschutting met het schip in kwestie een simulatie uitgevoerd. Hiernaast werden nog drie bijkomende simulaties uitgevoerd met vullen in aanwezigheid van een recreatievaartuig en behoud van de standaard openingswet. Om het criterium voor de langskracht op het recreatievaartuig niet te overschrijden werd de afstand tussen boeg en sluisdeur vergroot. Bemerkt dat bewust gekozen wordt voor een uniforme toegenomen afstand tussen boeg en sluisdeur in plaats van een per type vulling geoptimaliseerde afstand tussen boeg en sluisdeur.

Tabel 14 – Uitgevoerde simulaties

simulatie nr.	kolk / deelkolk	type	schip	afstand tussen boeg en sluisdeur [m]	openings wet
1	volledig	vullen	Vb	5.1	1
2			Va		
3			I x 2		
4		ledigen	Vb	9.7	
5			Va		
6			I x 2		
7			recreatie		
8	opwaarts	vullen	Va	5.1	2
9			I x 2		
10		ledigen	Va	9.7	
11			I x 2		
12			recreatie		
13	afwaarts	vullen	Va	5.1	2
14			I x 2		
15		ledigen	Va	9.7	
16			I x 2		
17			recreatie		
18	volledig	vullen	recreatie	5.1	3
19	opwaarts				
20	afwaarts				
21	volledig	vullen	recreatie	16.0	1
22	opwaarts				2
23	afwaarts				2

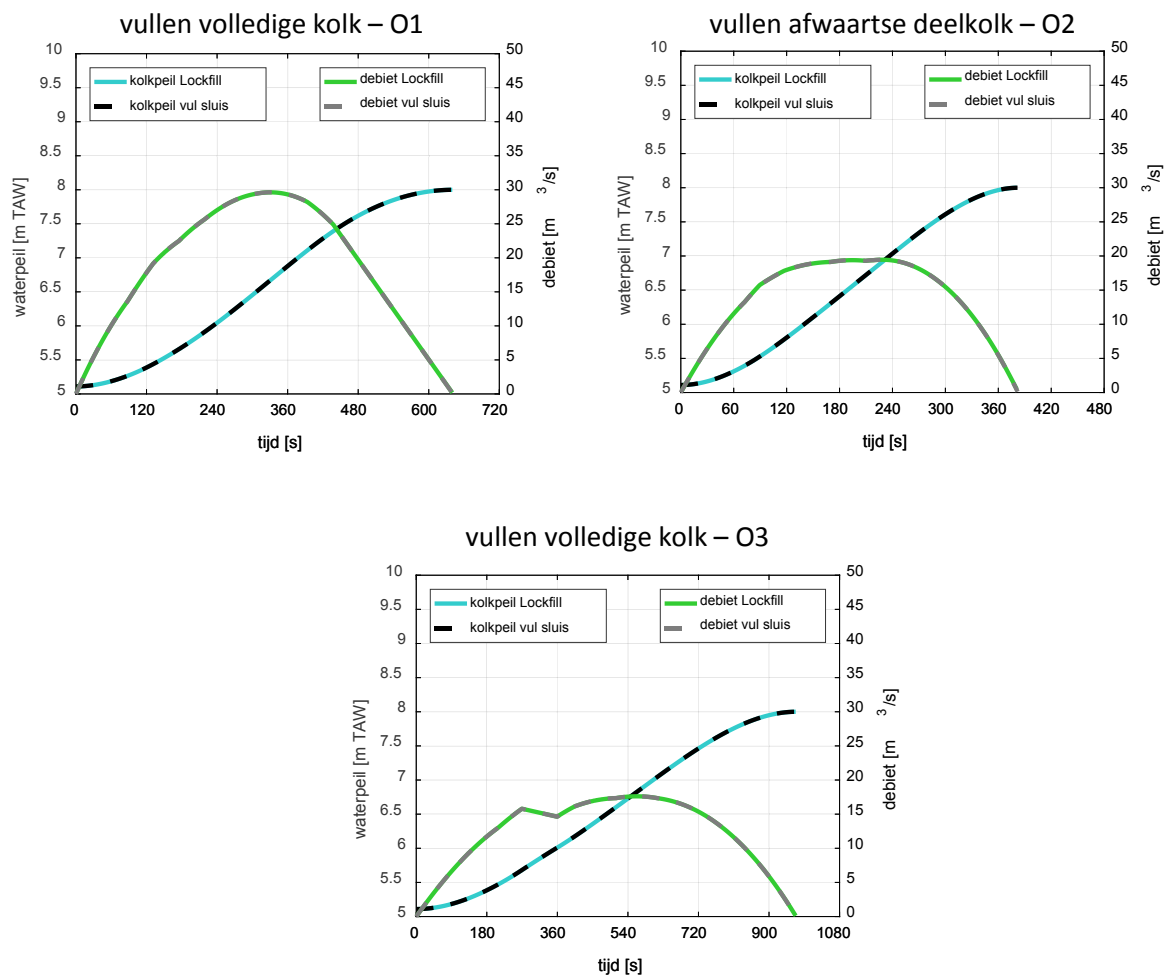
Per uitgevoerde simulatie wordt in Bijlage A een grafiek gegeven met hierin de nivelleerkromme, de variatie van debiet, langskracht en hefhoogte van de hefschuiven in functie van de tijd.

De drie openingswetten worden afgeregeld op de respectievelijke maatgevende simulatie:

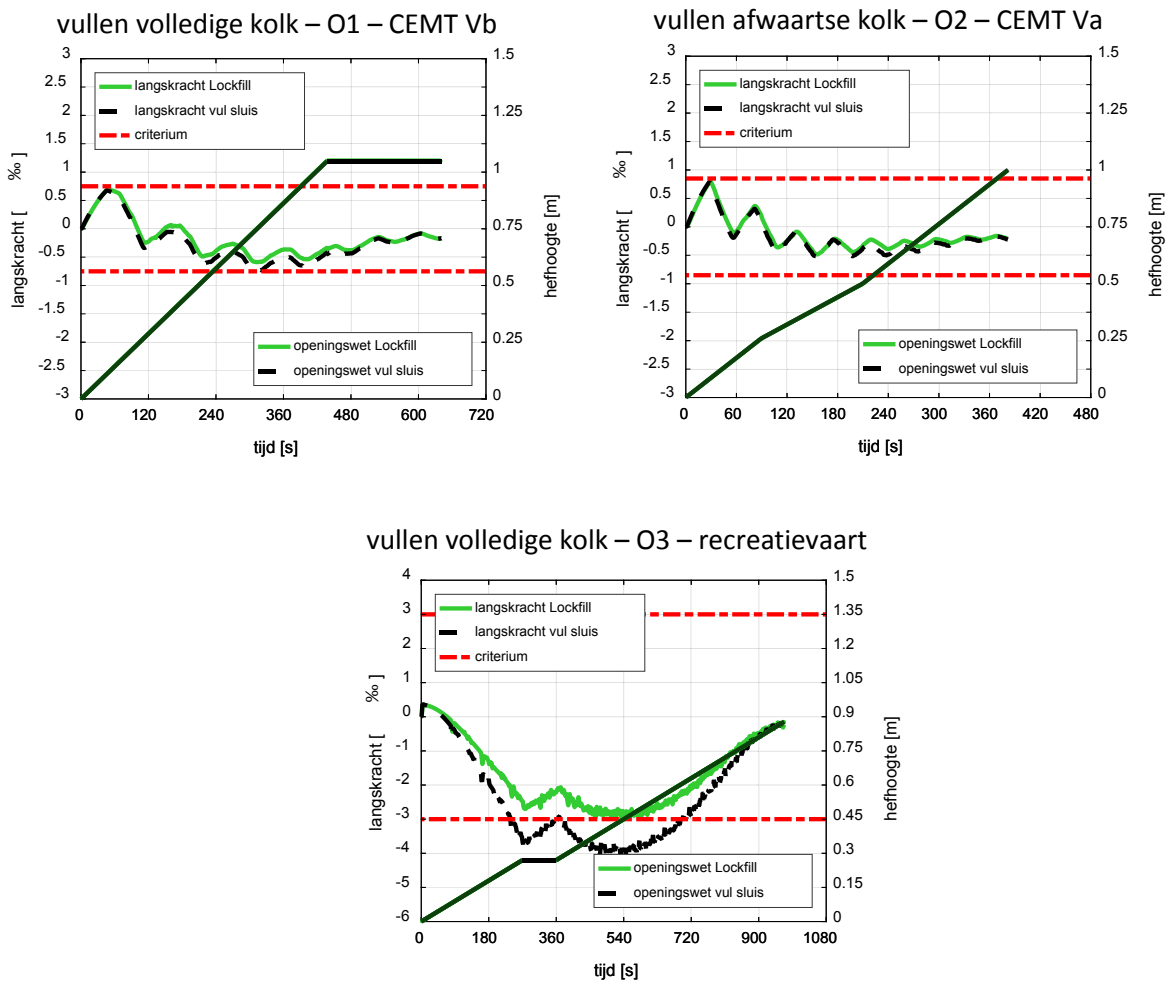
- O1: simulatie nr. 1 (vullen volledige kolk met een CEMT Vb),
- O2: simulatie nr. 8 (vullen afwaartse deerkolk met een CEMT Va),
- O3: simulatie nr. 18 (vullen volledige kolk met recreatievaartuig).

Voor deze maatgevende simulaties wordt in Figuur 21 de variatie van het kolkpeil en het debiet in functie van de tijd gegeven en in Figuur 22 wordt de variatie van de langskracht en hefhoogte in functie van de tijd gegeven. Bemerk hierin dat op vlak van kolkpeil, debiet en hefhoogte de resultaten van LOCKFILL en vul_sluis identiek zijn.

Figuur 21 – Kolkpeil en debiet in functie van tijd



Figuur 22 – Langskracht en hefhoogte in functie van tijd



Uit Figuur 21 volgt dat voor openingswet O1 (nivellering volledige kolk) de debietskromme toeneemt tot 330 s om vervolgens terug af te nemen. Voor openingswet O2 en vullen van de afwaartse kolk is de debietkromme tussen 120 s en 270 s afgevlakt. Deze afvlakking wordt verwezenlijkt door het verlagen van de hefsnelheid tussen 90 s en 210 s ($0.0029 \text{ m/s} \rightarrow 0.0020 \text{ m/s}$). Hierdoor werd de maximale stijg-/daalsnelheid van het kolkpeil beperkt tot 10 mm/s (zie Tabel 15), het criterium voor recreatievaart (Tabel 4). De tweede fase van de hefsnelheid van openingswet O2 wordt dus beperkt door het criterium van de stijg-/daalsnelheid en niet door het criterium van de langskracht (zie Figuur 22). Voor openingswet O1 was de langskracht het beperkende criterium. Met de ingestelde openingswet met constante hefsnelheid wordt zowel het positieve als negatieve criterium voor de langskracht bereikt. Een significante optimalisatie van openingswet O1 door het gebruik van drie fasen lijkt niet mogelijk. De langskracht volgend uit LOCKFILL en vul_sluis is quasi identiek voor openingswet O1 (volledige kolk CEMENT Vb) en openingswet O2 (afwaartse deelkolk CEMENT Va). Voor vullen met recreatievaart werd openingswet O3 opgesteld. Dit betreft een trage openingswet. Het verschil tussen de minimale en maximale hefsnelheid mag om elektromechanische redenen niet hoger zijn dan een factor 3. De maximale hefsnelheid komt voor bij openingswet O2 en bedraagt 0.0029 m/s . De minimale hefsnelheid is hierdoor 0.0010 m/s . Deze minimale hefsnelheid werd toegepast voor de eerste en derde fase van openingswet O3. Doordat het niet mogelijk was om tussenliggend een tragere hefsnelheid te hanteren wordt een pauze ingelast. Deze pauze is terug te zien in de vorm van de debietskromme bij openingswet O3 (een eerste piek en vervolgens een terugval). Door de tragere hefsnelheid van de schuiven met openingswet O3 is de translatiegolfcomponent kleiner ten opzichte van openingswet O1 en O2. Een recreatievaartuig aangemeerd op korte afstand van de deur is gevoeliger voor de impulsafname component van de langskracht. Dit valt op te merken door de grote negatieve component van de langskracht. De vorm van de curve is voor LOCKFILL en vul_sluis gelijklopend.

De grootte van de langskracht tussen LOCKFILL en vul_sluis verschilt sterker dan bij de getoonde simulaties met openingswet O1 en O2.

De nivelleertijd en extremum van de stijgsnelheid wordt gegeven in Tabel 15. Bemerkt dat bij gebruik van eenzelfde openingswet en nivelleersysteem de debietskromme en dus ook nivelleertijd identiek is bij vullen en ledigen van de kolk.

Tabel 15 – Nivelleertijd en maximale stijg- daalsnelheid

kolk / deerkolk	type	openings wet	nivelleertijd [min]		maximale stijg- /daalsnelheid [mm/s]
			restveral 0.0m	restveral 0.1 m	
volledige kolk	vullen/ledigen	O1	10.7	9.3	7
	vullen	O3	16.1	14.5	4
opwaartse deerkolk	vullen/ledigen	O2	7.2	6.4	10
	vullen	O3	11.7	10.5	6
afwaartse deerkolk	vullen/ledigen	O2	6.4	5.7	10
	vullen	O3	10.4	9.3	7

Voor nivelleren met de volledige kolk wordt een nivelleertijd 10.7 min bekomen. Dit is 0.7 min langer dan het criterium van 10.0 min en 2.7 min langer dan de preferentiële nivelleertijd van 8.0 min. Het nivelleren van de opwaartse respectievelijke afwaartse deerkolk gebeurt in 7.2 min respectievelijk 6.4 min. Deze waarden zijn korter dan de preferentiële nivelleertijd van 8.0 min. Het toepassen van de openingswet voor recreatievaart resulteert achtereenvolgens voor de volledige kolk, de opwaartse deerkolk en de afwaartse deerkolk in een nivelleertijd van 16.1, min, 11.7 min en 10.4 min. Deze waarden zijn groter dan het criterium van 10.0 min voor de nivelleertijd. Het criterium voor de maximale stijg-/daalsnelheid bedraagt voor beroepsvaart 17 mm/s en voor recreatievaart 10 mm/s. Om te voldoen aan het criterium voor de stijg-/daalsnelheid bij recreatievaart werd het debiet met openingswet O2 afgevlakt. Ter vergelijking: bij een terreinmeting uitgevoerd in de bestaande sluis te Sint-Baafs-Vijve werd uit de opgemeten nivelleerkromme een stijgsnelheid 10 mm/s afgeleid (J. B. Vercruysse *et al.*, 2014). In de huidige sluis zijn geen problemen gekend met betrekking tot de stijgsnelheid voor recreatievaart. De in Tabel 15 vermelde nivelleertijd en de maximale stijgsnelheid voor de volledige kolk en afwaartse deerkolk zijn quasi gelijk met de initiële simulaties.

Het positieve en negatieve extremum voor de langskracht wordt per simulatie samengevat in Tabel 16. De overschrijdingen worden in vet uitgedrukt en onderlijnd.

Tabel 16 – Extremum langskracht uitgevoerde simulaties

Simu- latie	kolk / deelkolk	type	open- ings- wet	schip	stopstreep afstand [m]	extremum langskracht [%]			
						LOCKFILL		vul_sluis	
						pos	neg	pos	neg
1	volledig	vullen	1	Vb	5.1	0.70	-0.59	0.68	-0.73
2				Va	5.1	0.83	-0.79	0.75	<u>-0.99</u>
3				I x 2	5.1	0.53	-1.47	0.50	<u>-2.01</u>
4		ledigen		Vb	9.7	0.33	-0.37	0.33	-0.38
5				Va	9.7	0.39	-0.47	0.39	-0.47
6				I x 2	9.7	0.30	-0.37	0.31	-0.37
7				recreatie	9.7	0.82	-0.73	0.94	-0.78
8	opwaarts	vullen	2	Va	5.1	0.84	-0.54	0.81	-0.59
9				I x 2	5.1	0.62	-0.83	0.58	-1.14
10		ledigen		Va	9.7	0.55	-0.34	0.55	-0.35
11				I x 2	9.7	0.45	-0.33	0.47	-0.34
12				recreatie	9.7	1.14	-0.68	1.27	-0.73
13	afwaarts	vullen	2	Va	5.1	0.81	-0.44	0.78	-0.52
14				I x 2	5.1	0.61	-0.80	0.57	-1.06
15		ledigen		Va	9.7	0.52	-0.33	0.56	-0.34
16				I x 2	9.7	0.50	-0.29	0.50	-0.29
17				recreatie	9.7	1.09	-0.66	1.31	-0.80
18	volledig	vullen	3	recreatie	5.1	0.35	<u>-3.03</u>	0.36	<u>-4.09</u>
19	opwaarts				5.1	0.35	-2.13	0.36	<u>-3.10</u>
20	afwaarts				5.1	0.35	-1.93	0.36	-2.68
21	volledig	vullen	1	recreatie	16.0	0.85	-2.60	1.12	<u>-3.50</u>
22	opwaarts		2		16.0	1.01	-1.59	1.03	-2.59
23	afwaarts		2		16.0	1.01	-1.50	1.02	-2.26

Merk op dat voor vullen van de volledige kolk met recreatievaart een overschrijding van het criterium met 1 % toegelaten wordt. Voor de overige simulaties wordt met LOCKFILL steeds voldaan aan het criterium voor de langskracht. De langskrachten bij ledigen zijn merkkelijk lager dan bij vullen. Voor de deuren in het benedenhoofd zou eventueel een afzonderlijke (snellere) openingswet opgesteld kunnen worden. Hiermee kan dan voor ledigen met de volledige kolk voldaan worden aan het criterium van de nivelleertijd. Bij de deelkolken is er nog enige marge tussen het negatieve extremum en het criterium. De verklaring hiervoor is dat de hefsnelheid van openingswet O2 afgetopt werd om het criterium voor de stijg-/daalsnelheid niet te overschrijden. De afwijking tussen LOCKFILL en vul_sluis is groter voor vullen dan bij ledigen. De verklaring hiervoor is dat de berekening van de krachten bij ledigen eenvoudiger is omdat de dissipatie van de vuljets niet meegenomen wordt in de berekening van de langskracht ten gevolge van de impulsafname. Voor de simulaties met vullen is de afwijking tussen LOCKFILL en vul_sluis groter voor het negatieve extremum en neemt de afwijking toe bij een afname van de scheepslengte. De verklaring hiervoor is eveneens de onnauwkeurigheid op de berekening van de dissipatie van de vuljets in de component van de impulsafname.

In werkelijkheid zal de langskracht ook beïnvloed worden door een reeds aanwezig golf in de kolk voor nivellering. Deze golf kan veroorzaakt worden door scheepsbewegingen, golfbewegingen op het op- of afwaarts pand en het sluiten van de deuren voorafgaand een nivellering. Deze golfbeweging kan de golfbeweging die ontstaat bij nivelleren versterken of afzwakken.

5.5 Besluit

Met de weerhouden geometrie, nl. 3 breekbalken met sectie 0.20 m x 0.20 m, werden de simulaties opnieuw uitgevoerd met LOCKFILL en vul_sluis. Op basis van de LOCKFILL simulaties worden drie openingswetten opgesteld, namelijk een openingswet voor nivelleren met de volledige kolk, een openingswet voor nivelleren met de op- of afwaartse deelkolk en een openingswet voor vullen met een recreatievaartuig. De bekomen openingswetten hebben een minimale hefsnelheid van 0.0010 m/s en een maximale hefsnelheid 0.0029 m/s. Uit de simulaties volgt dat de volledige kolk genivelleerd kan worden in 10.7 min zonder restverval. Het nivelleren van de op- en afwaartse deelkolk zonder restverval duurt respectievelijk 7.2 min en 6.4 min. Het criterium voor de nivelleertijd bedroeg 10.0 min en preferentieel 8.0 min. Voor een volledige kolk is de gesimuleerde nivelleertijd 0.7 min langer dan het criterium, voor de deelkolken wordt voldaan aan het preferentiële criterium voor de nivelleertijd. Indien gewenst kan voor de deuren in het benedenhoofd een afzonderlijke snellere openingswet ingesteld worden waardoor voor ledigen met de volledige kolk voldaan wordt aan het criterium van 10.0 min voor de nivelleertijd. Uit de openingswet opgesteld voor vullen met recreatievaart volgt een nivelleertijd van 16.1 min voor de volledige kolk, 11.7 min voor de opwaartse deelkolk en 10.4 min voor de afwaartse deelkolk. Voor vullen met recreatievaart werden bijkomende simulaties gedaan waarbij de standaard openingswet gebruikt wordt maar waarbij de stopstreepafstand toenam. Uit deze simulaties volgt dat bij een stopstreepafstand van 16.0 m recreatievaart genivelleerd kan worden met de standaard openingswet zonder overschrijding van het criterium van de langskracht.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie door Waterwegen en Zeekanaal nv (W&Z) toegankelijk gemaakt voor schepen CEMT klasse Vb. Hiervoor dient te Sint-Baafs-Vijve een nieuwe sluis gebouwd te worden en wordt ook het vismigratieknelpunt ter hoogte van het stuwsluiscomplex opgelost.

Door Grontmij werd een voorontwerp van een nieuwe klasse Vb-sluis met breedte 12.5 m uitgewerkt. Dit voorontwerp werd in maart 2013 aan W&Z, Afdeling Bovenschelde overgemaakt. In 2013-2014 werd door Waterbouwkundig Laboratorium (WL) een hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem voor een kolk met breedte 12.5 m. Voorjaar 2016 nam W&Z de beslissing om de kolkbreedte van de sluis te vergroten tot 16.0 m. Voor deze bredere sluis heeft het Expertisecentrum Beton en Staal (EBS) een ontwerp van een set puntdeuren uitgewerkt met daarin als nivelleersysteem 6 rechthoekige openingen met elk een breedte van 1.89 m en hoogte gelijk aan 1.05 m. Voor het boven, midden en benedenhoofd gaan identieke deuren en dus een identiek nivelleersysteem toegepast worden.

Door middel van schaalmodelproeven werden 4 geometrieën beproefd. Een eerste geometrie zonder breekbalken. Vervolgens werden drie geometrieën met breekbalken beproefd: 7 breekbalken met sectie 0.15 m x 0.15 m, 5 breekbalken met sectie 0.15 m x 0.15 m en 3 breekbalken met sectie 0.20 m x 0.20 m. Uit het schaalmodelonderzoek volgt dat breekbalken slechts een beperkte invloed hebben op de afvoercoëfficiënt en dus het debiet beperkt beïnvloeden. Breekbalken zorgen wel voor een merkkelijk betere spreiding van de jet afwaarts van de opening. De snelheid in de kern van de jet verlaagt met 40 % na het plaatsen van breekbalken. Hierbij valt op dat de geometrie met 7 breekbalken niet voor een merkkelijk betere spreiding zorgt dan de geometrie met 5 breekbalken. Bij een hefschuif volledig open worden de beste resultaten bekomen met de geometrie met 3 breekbalken. Bij de hefschuif half open zijn de resultaten voor de drie geometrieën met breekbalken gelijkaardig. In overleg met de opdrachtgever en EBS werd besloten om de geometrie met 3 breekbalken met sectie 0.20 m x 0.20 m te weerhouden.

Met de weerhouden geometrie zijn vervolgens nieuwe simulaties uitgevoerd met de programma's LOCKFILL en vul_sluis. Op basis van de simulaties met LOCKFILL zijn drie openingswetten opgesteld. Een openingswet voor nivelleren met de volledige kolk, een openingswet voor nivelleren met de op- of afwaartse deelkolk en een openingswet voor vullen met een recreatievaartuig. De bekomen openingswetten hebben een minimale hefsnelheid 0.0010 m/s en een maximale hefsnelheid 0.0029 m/s. Uit de simulaties volgt dat de volledige kolk genivelleerd kan worden in 10.7 min zonder restverval. Het nivelleren van de opwaarts deelkolk zonder restverval duurt 7.2 min en het nivelleren van de afwaartse deelkolk zonder restverval duurt 6.4 min. Het criterium voor de nivelleertijd bedroeg 10.0 min en preferentieel 8.0 min. Voor een volledige kolk is de gesimuleerde nivelleertijd 0.7 min langer dan het criterium, voor de deelkolken wordt voldaan aan het preferentiële criterium voor de nivelleertijd. Indien gewenst kan voor de deuren in het benedenhoofd een afzonderlijke snellere openingswet ingesteld worden waardoor voor ledigen met de volledige kolk voldaan wordt aan het criterium van 10.0 min voor de nivelleertijd. Uit de openingswet opgesteld voor vullen met recreatievaart volgt een nivelleertijd 16.1 min voor de volledige kolk, 11.7 min voor de opwaartse deelkolk en 10.4 min voor de afwaartse deelkolk. Voor vullen met recreatievaart werden bijkomende simulaties gedaan waarbij de standaard openingswet gebruikt wordt maar waarbij de stopstreepafstand toenam. Uit de simulaties volgde dat bij een stopstreepafstand van 16.0 m recreatievaart genivelleerd kan worden met de standaard openingswet zonder overschrijding van het criterium van de langskracht.

6.2 Aanbevelingen

Na ingebruikname van de sluis is het aanbevolen om een terreinmeting uit te voeren en na te gaan of de optredende langse waterspiegelhellingen aanvaardbaar zijn. Het WL beschikt over een meetopstelling waarmee de optredende langse waterspiegelhellingen, welke de belangrijkste component is van de langskracht, in situ opgemeten kunnen worden. Op basis van de in situ opgemeten langse waterspiegelhellingen en de (kwalitatieve) appreciatie van de betrokken sluismeester(s) en schipper(s), kan - indien nodig - een bijsturing voorgesteld worden.

De onzekerheden op de berekende langskrachten zijn hoger voor recreatievaart. Enerzijds zijn de programma's LOCKFILL en vul_sluis opgesteld en gevalideerd voor beroepsvaart. Anderzijds is er bij WL weinig praktische expertise beschikbaar over de huidige praktijk met betrekking tot recreatievaart. WL raad aan om bij ingebruikname van de sluis testnivellerings metingen uit te voeren met een recreatievaartuig. Tijdens deze testmetingen kan een inclinometer op het recreatievaartuig geplaatst worden. Vervolgens kan met dit recreatievaartuig een aantal nivellerings metingen uitgevoerd worden waarbij het schip telkens een stap dichterbij de vuldeur afgemeerd wordt.

7 Referenties

- Beem, R.C.A.; Boogaard, A.; Glerum, A.; de Graaf, M.A.; Henneberque, S.D.; Hiddinga, P.H.; Kranenburg, D.; van der Meer, M.T.J.; Nagtegaal, G.; Van der Paverd, M.; Smink, L.M.C.; Vrijburcht, A.; Weijers, J.** (2000). Ontwerp van schutsluizen: deel 1. Bouwdienst Rijkswaterstaat: Utrecht. ISBN 90-369-3305-6
- Deltares.** (2012). Stuw en sluis in de Leie te Harelbeke. Nivelleren van de nieuwe en de tijdelijke sluis
- Deltares.** (2014). Aanvullende LOCKFILL berekeningen van de nieuwe sluis te Harelbeke
- Deltares.** (2015). LOCKFILL. User and Technical manual. version 0.00 8 July 2015
- Evans, K.** (2016). Influence of breaking logs on flow patterns, flow rate and impulse for lock filling with gate openings. MSc Thesis. 105 pp.
- Expertise Beton en staal; W&Z nv Afdeling Bovenschelde.** (2017). Bouw van een nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve Grondplan definitieve toestand sluiskolk/sluishoofden EBS00082-201 19-05-2017
- Grontmij.** (2013). Leie te Sint-Baafs-Vijve Bouwen van een klasse Vb sluis Vul- en ledigingsysteem sluiskolk. 32 pp.
- Lasard, S.; Pulina, B.** (1994). Dimensioning and design of Boat passages and locks for boats for pleasure and entertainment, *in*: 28th International Navigation Congress (P.I.A.N.C.), Section I, subject 5,. Sevilla, Spain, May 1994
- Maes, D.** (2016). Internship at Flanders Hydraulics Research: Comparison of different configurations of breaking logs for navigation lock filling through gate openings. 49 pp.
- Ramos, P.X.; De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Hydraulic study of breaking logs in lock filling with gate openings: report on scale model research. *WL Rapporten*, 14_050. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- Stichting Postacademisch Onderwijs.** (2006). Hydraulische aspecten van waterbouwkundige constructies [CURSUS]: Delft
- Vercruysse, J.B.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2011). Ringvaart om Gent - Tweede sluis Evergem: verslag van terreinmeting inzake vullen- en ledigen. *WL Rapporten*, 760_13. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Ondersteuning ontwerp klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve: Deelrapport 3 – Ontwerp nivelleersysteem. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve: advies nivelleeropeningen en openingswet hefschuivenversie 4.0. *WL Adviezen*, 16_042. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen . versie 4.0.
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Meetvaart binnenschip MT Elise op traject Evergem-Kuurne: deelrapport 1. Metingen sluis Sint Baafs Vijve. *WL Rapporten*, 13_003. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; De Mulder, T.; Schindfessel, L.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Numerieke modellering van sluisvulling via openingen in deuren: Deelrapport 1 - Opmaak en eerste validatie van het programma vul_sluis. *WL Rapporten*, 00_077. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- Verelst, K.; De Mulder, T.; Schindfessel, L.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2017). Verdere ontwikkeling programma vul_sluis: Vergroten inzicht in code en formuleringen. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 15_007_1. (in opmaak): Antwerpen

Verelst, K.; Schindfessel, L.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016a). Numerieke modellering van sluisvulling via openingen in deuren: deelrapport 2. Verder testen en ontwikkelen programma vul_sluis. *WL Rapporten*, 00_077. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Schindfessel, L.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016b). Numerieke modellering van sluisvulling via openingen in deuren: deelrapport 3. Uitbreiding van het programma vul_sluis. *WL Rapporten*, 00_077. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vrijburcht, A. (1992). Hydraulisch voorontwerp van deurvul- en ledigingsopeningen. Waterloopkundig Laboratorium = Delft Hydraulics Laboratory: Delft

Weiler, O.; Yossef, M. (2012). Stuw en sluis in de Leie te Harelbeke. *Hydraulica van de Leie*, OF2; rekennota 1205215-HYE-0014. Deltares

Bijlage A – Resultaten Simulaties

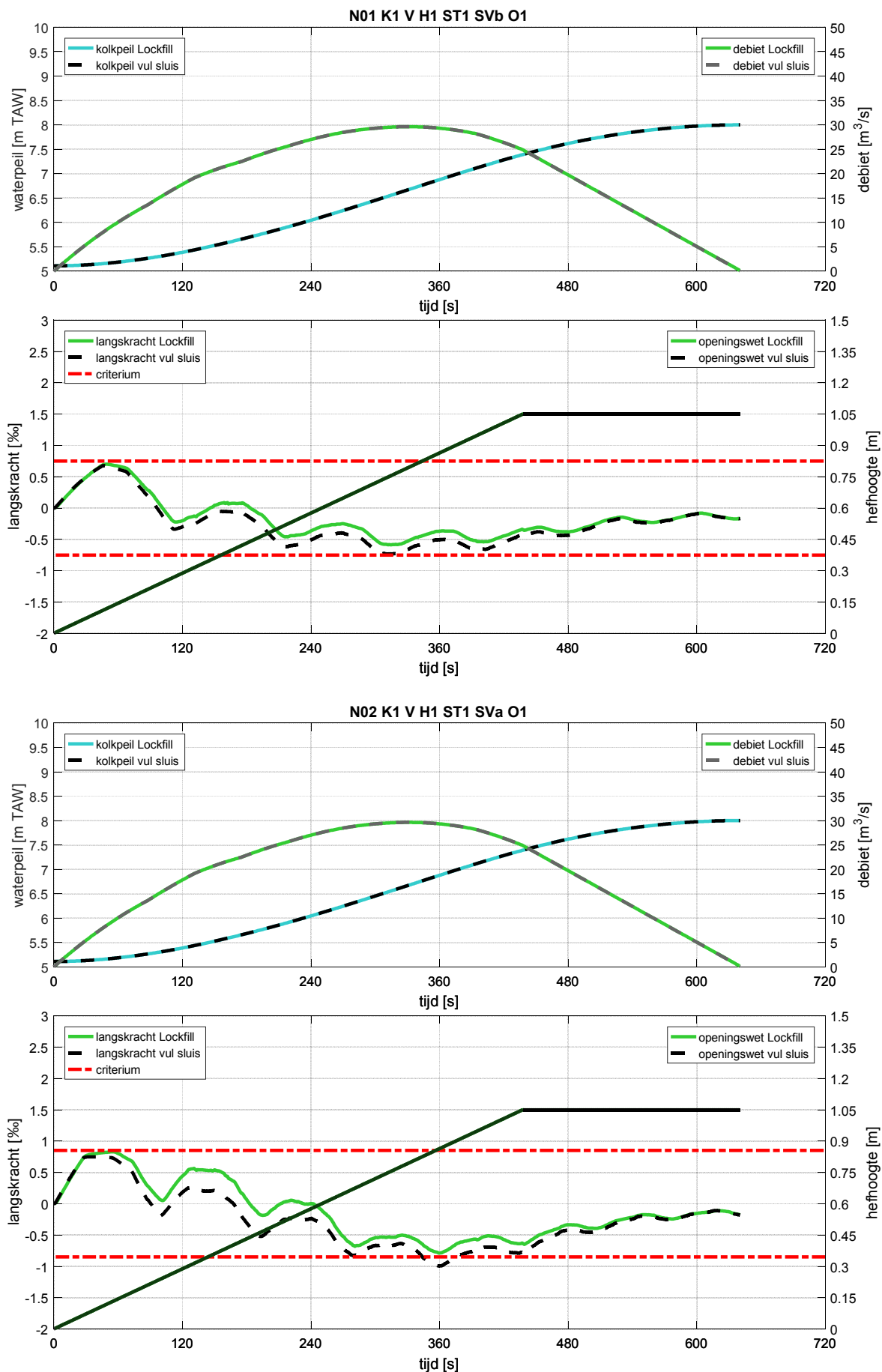
In deze bijlage wordt per simulatie een figuur gegeven met hierop:

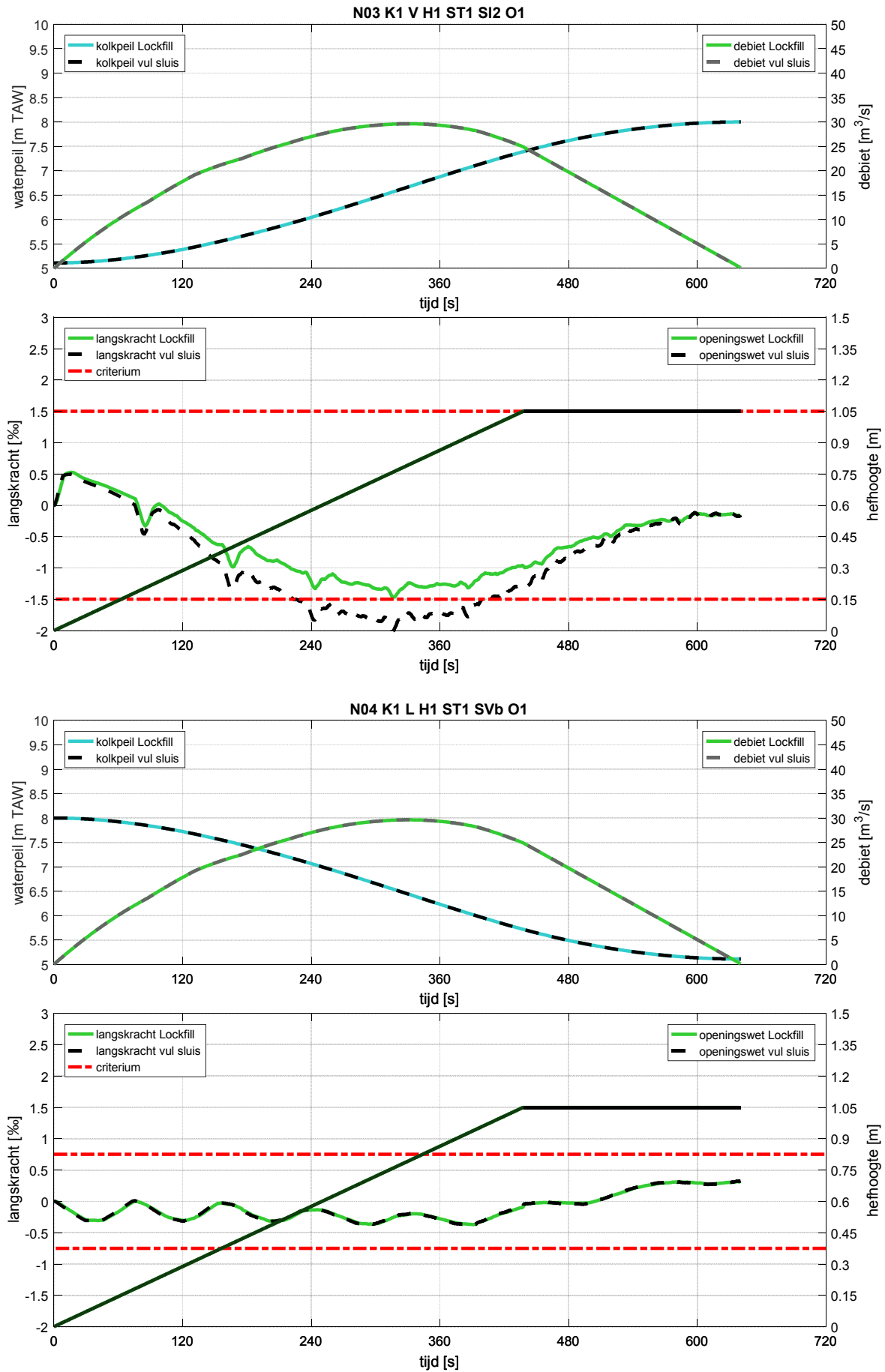
- de nivelleerkromme berekend met vul_sluis en LOCKFILL,
- de debietskromme berekend met vul_sluis en LOCKFILL,
- de variatie in de tijd van de langskracht op het schip berekend met vul sluis Va, vul sluis Vb en LOCKFILL,
- het geldende criterium voor de langskracht,
- de variatie in de tijd van de hefschuifhoogte.

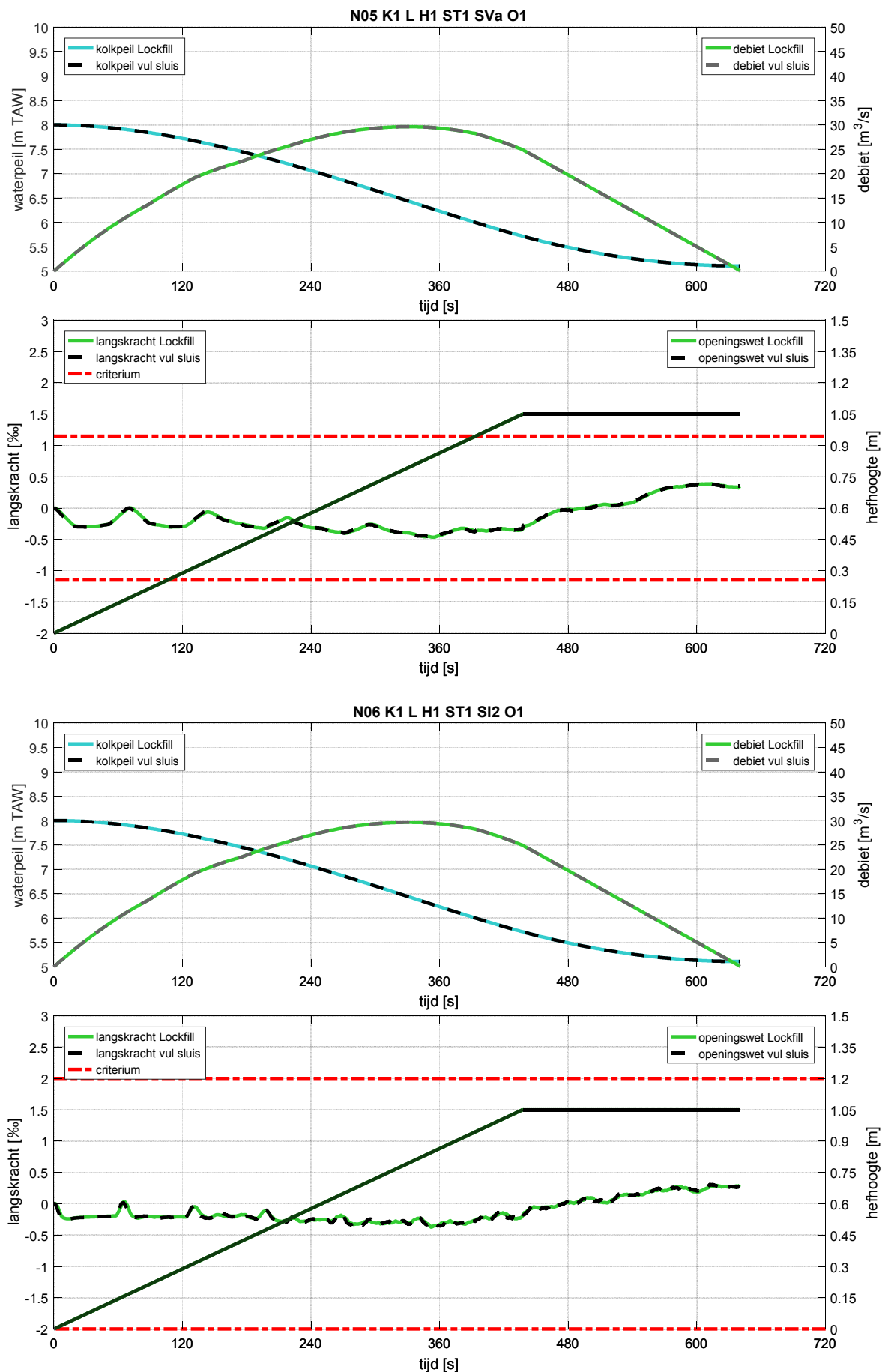
De simulaties worden aangeduid met volgende code:

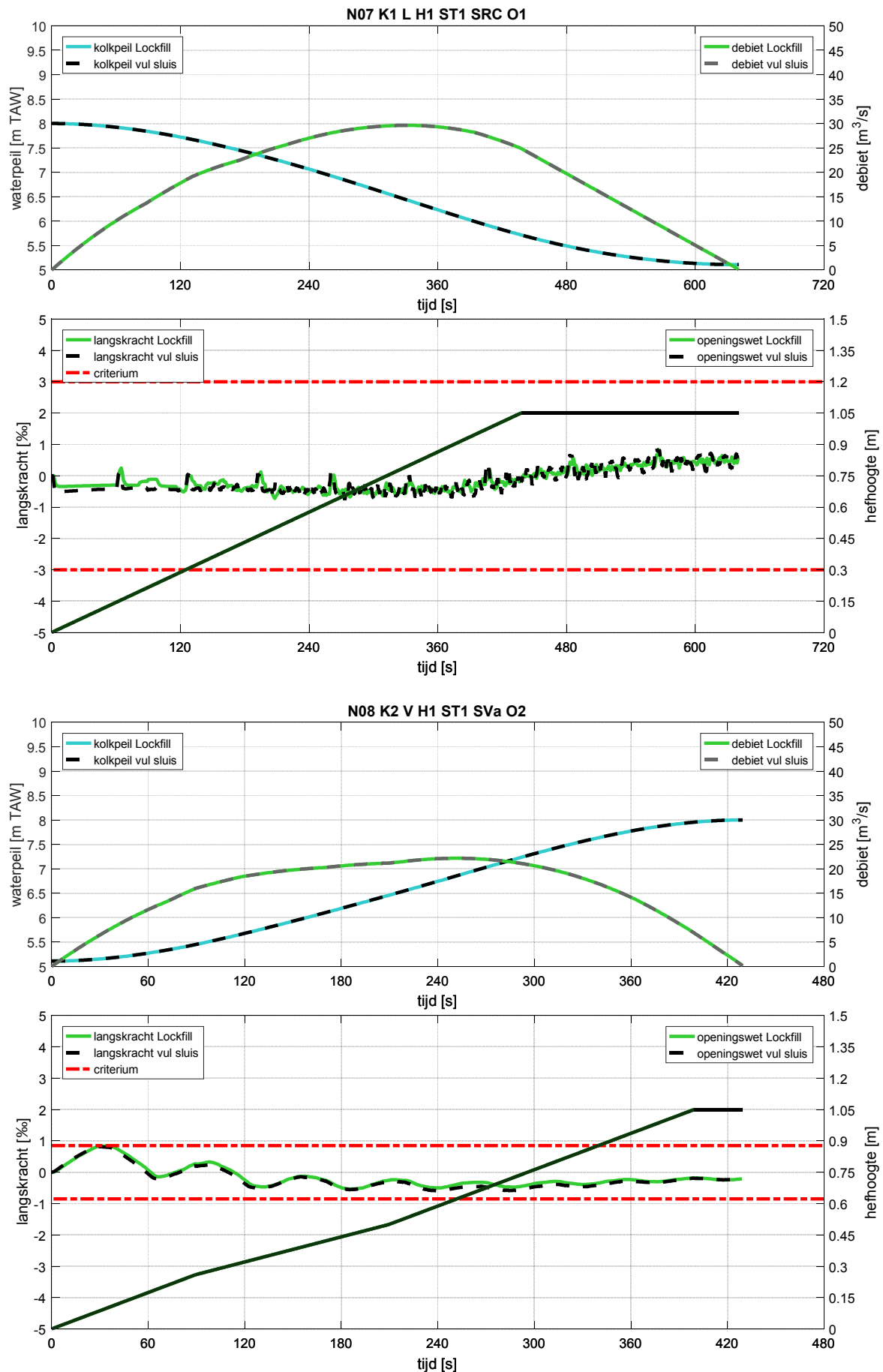
“N01_K1_V_H1_ST1_SVb_O1”

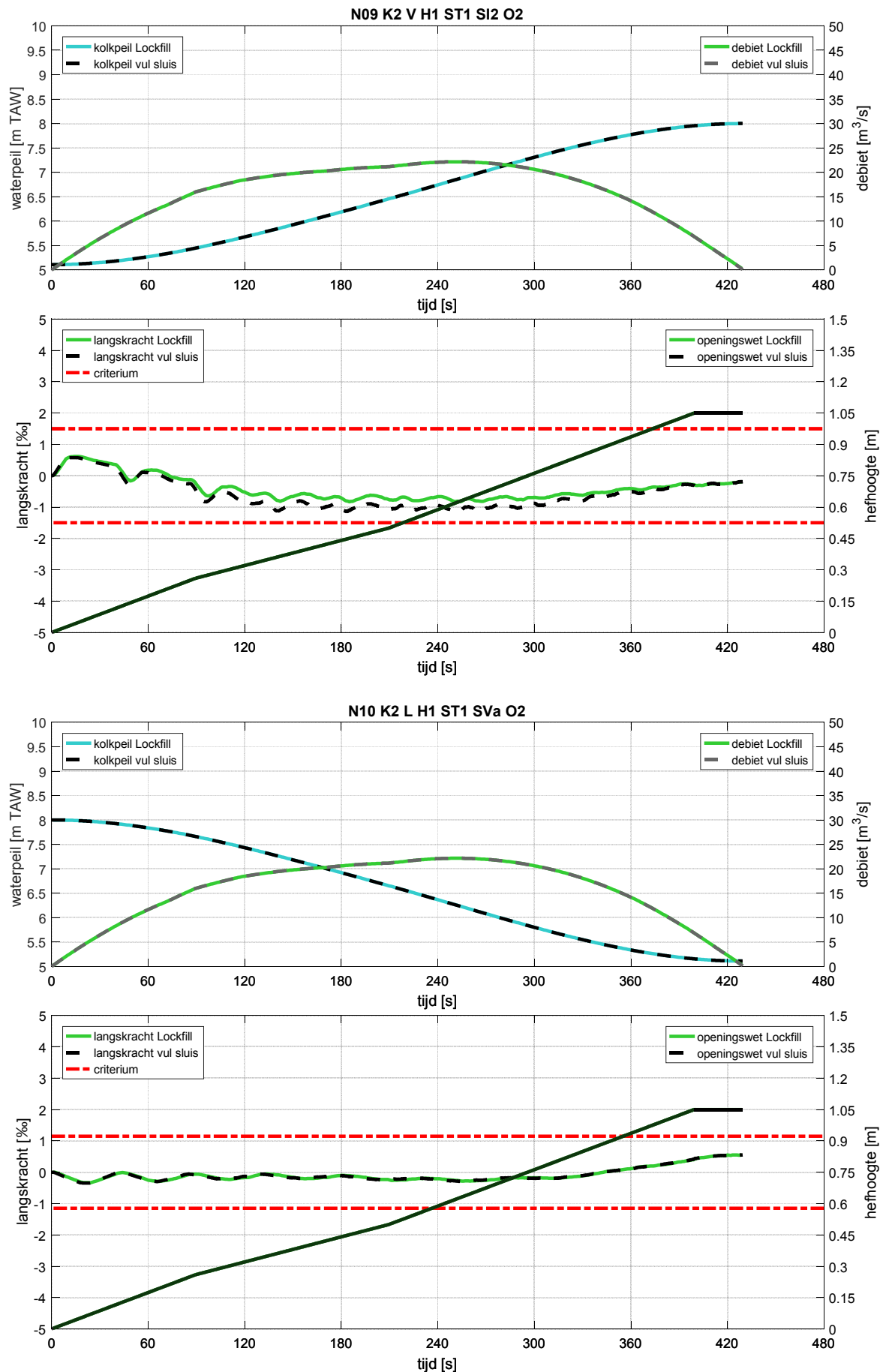
- N01 tot en met N23: Volgnummer van de simulatie
- K1/K2/K3 K1 = volledige kolk / K2 = opwaartse deelkolk / K3 = afwaartse deelkolk
- V/L Type V=vullen / L=ledigen
- H1 Waterpeilen H1 = opwaarts +8.00 m TAW / afwaarts +5.11 m TAW
- SVb/SVa/SI2/SRC Type schip SVb = CEMT klasse Vb / SVa = CEMT klasse Va / SI2 = 2 x CEMT klasse I / SRC = recreatievaartuig
- O1/O2/O3 Openingswet

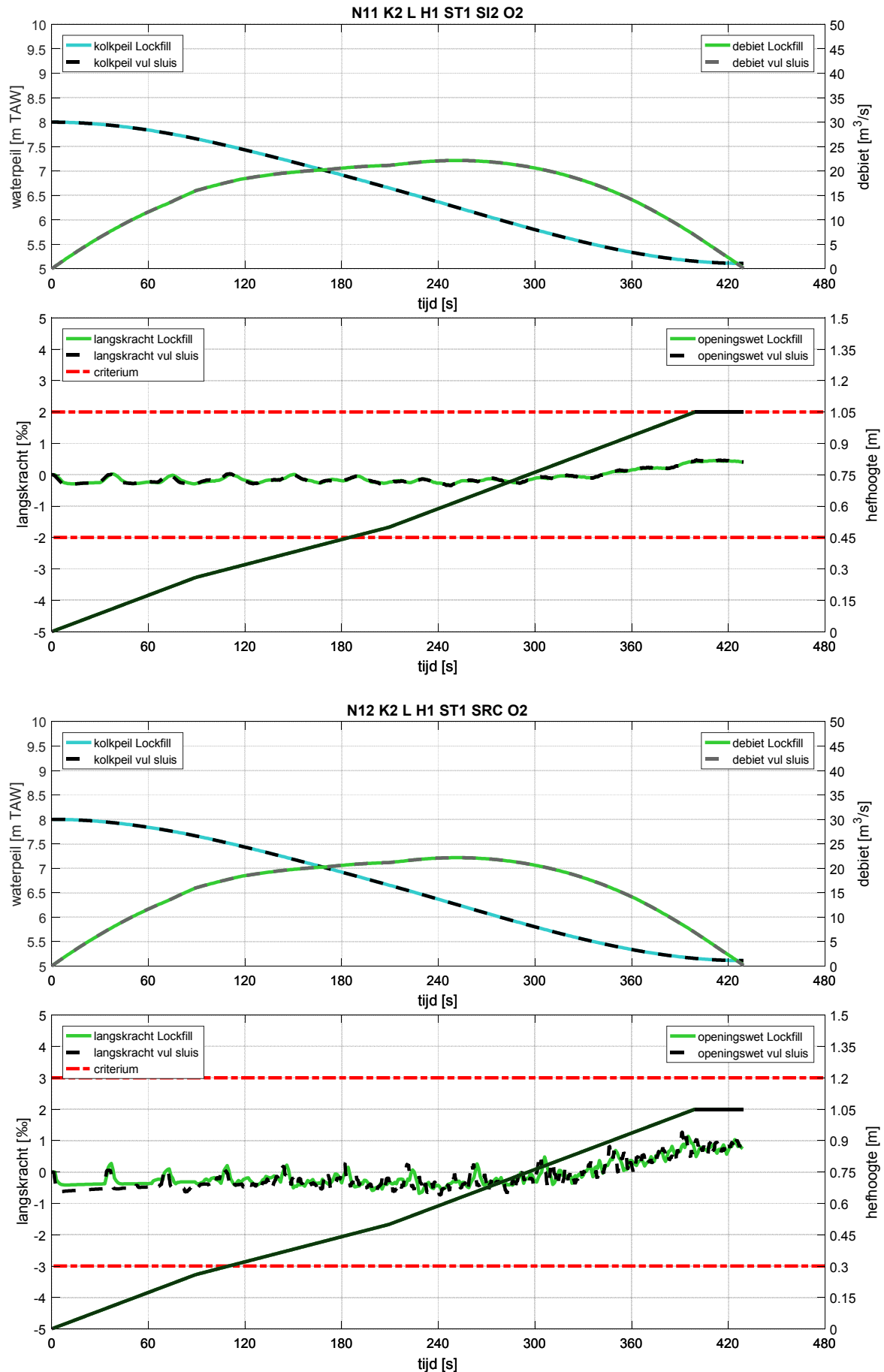


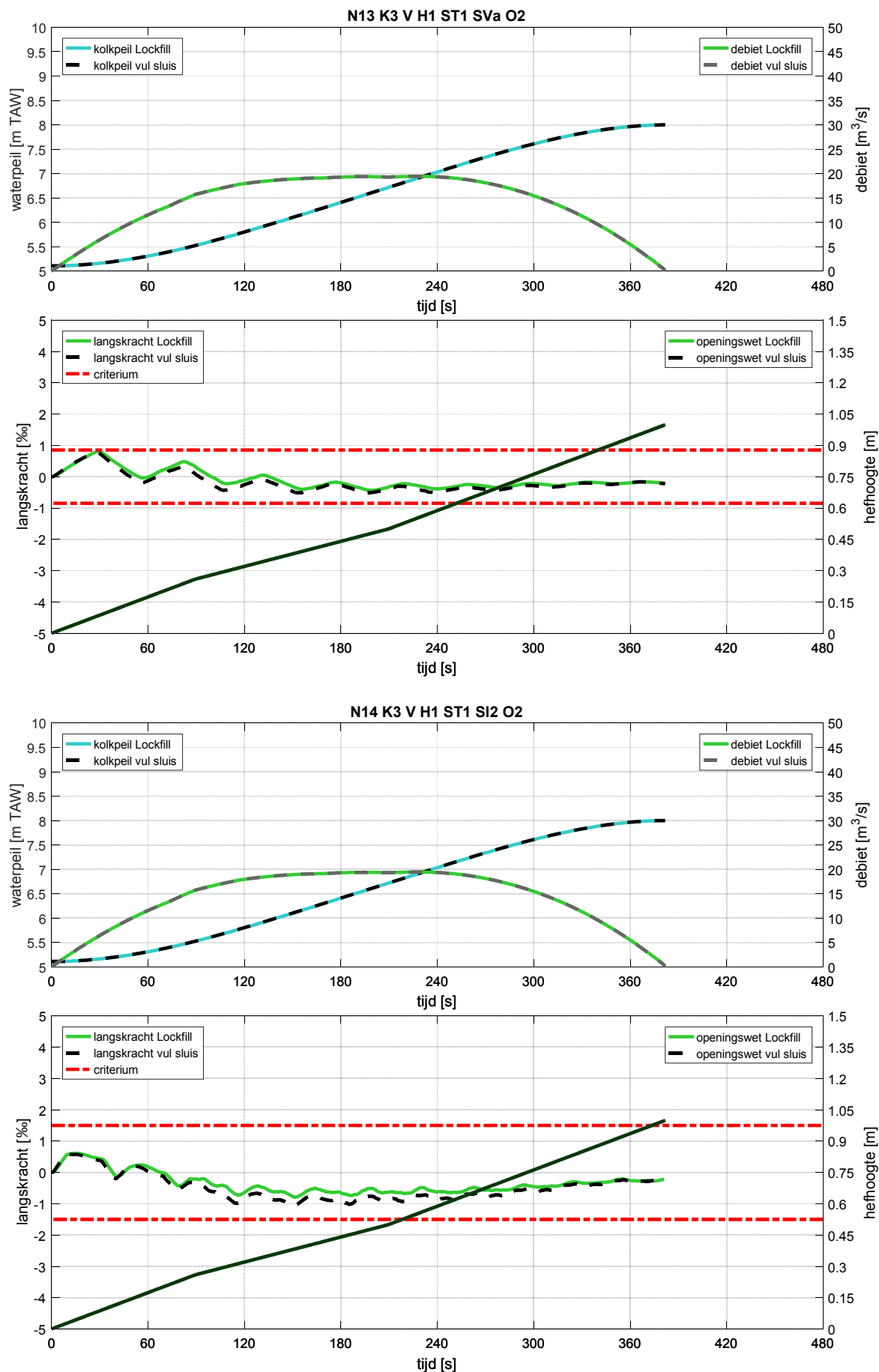


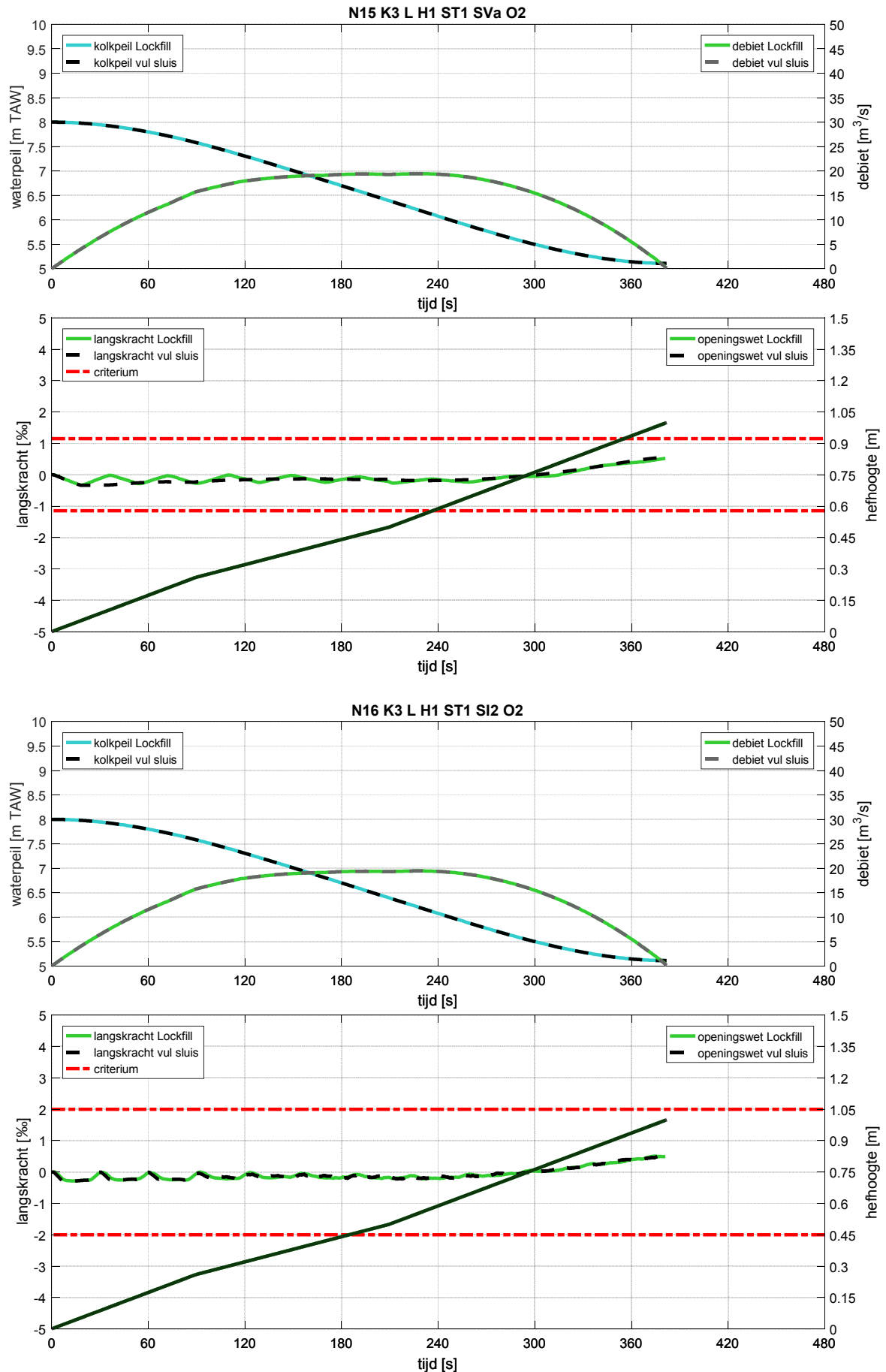


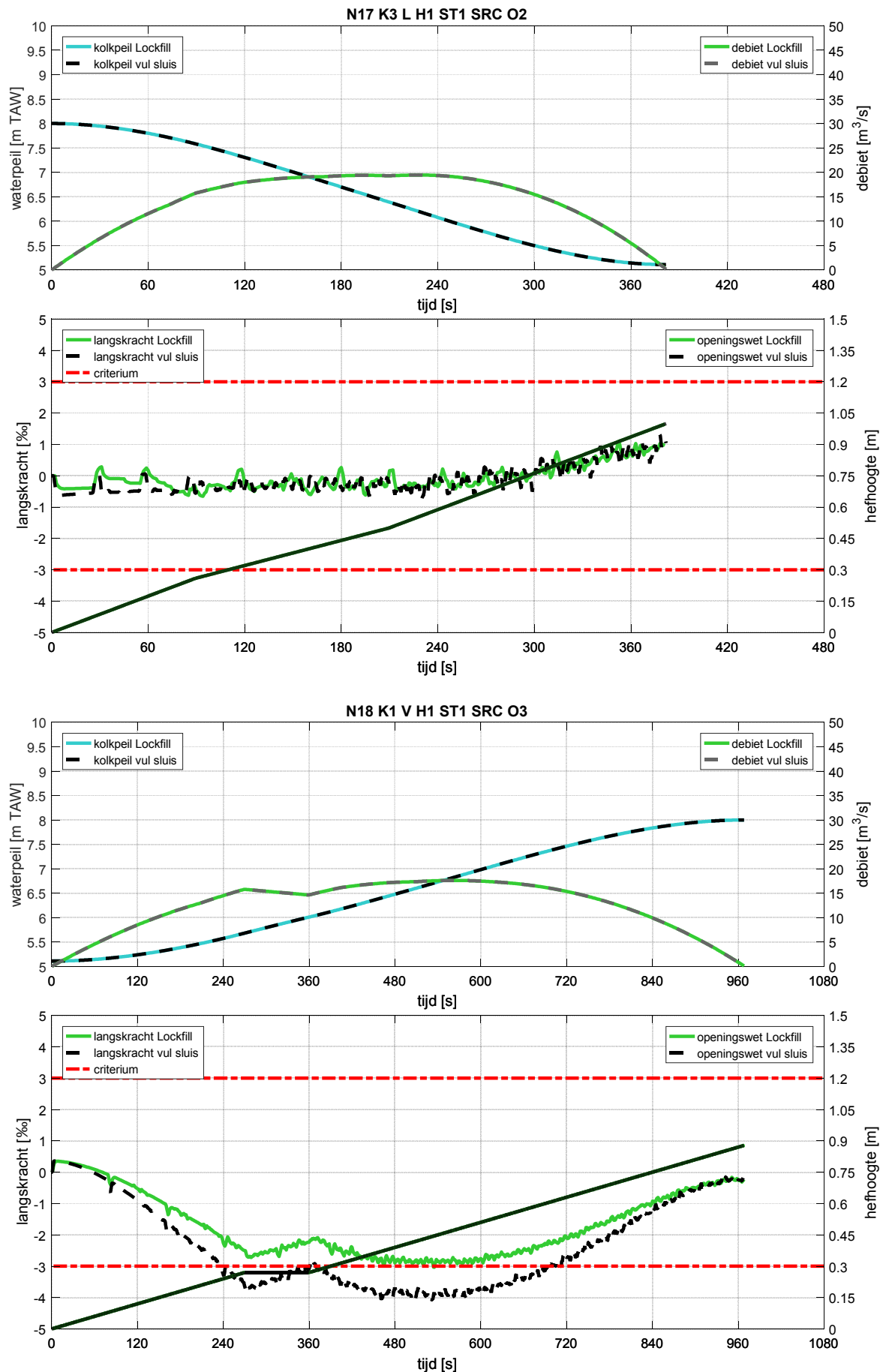


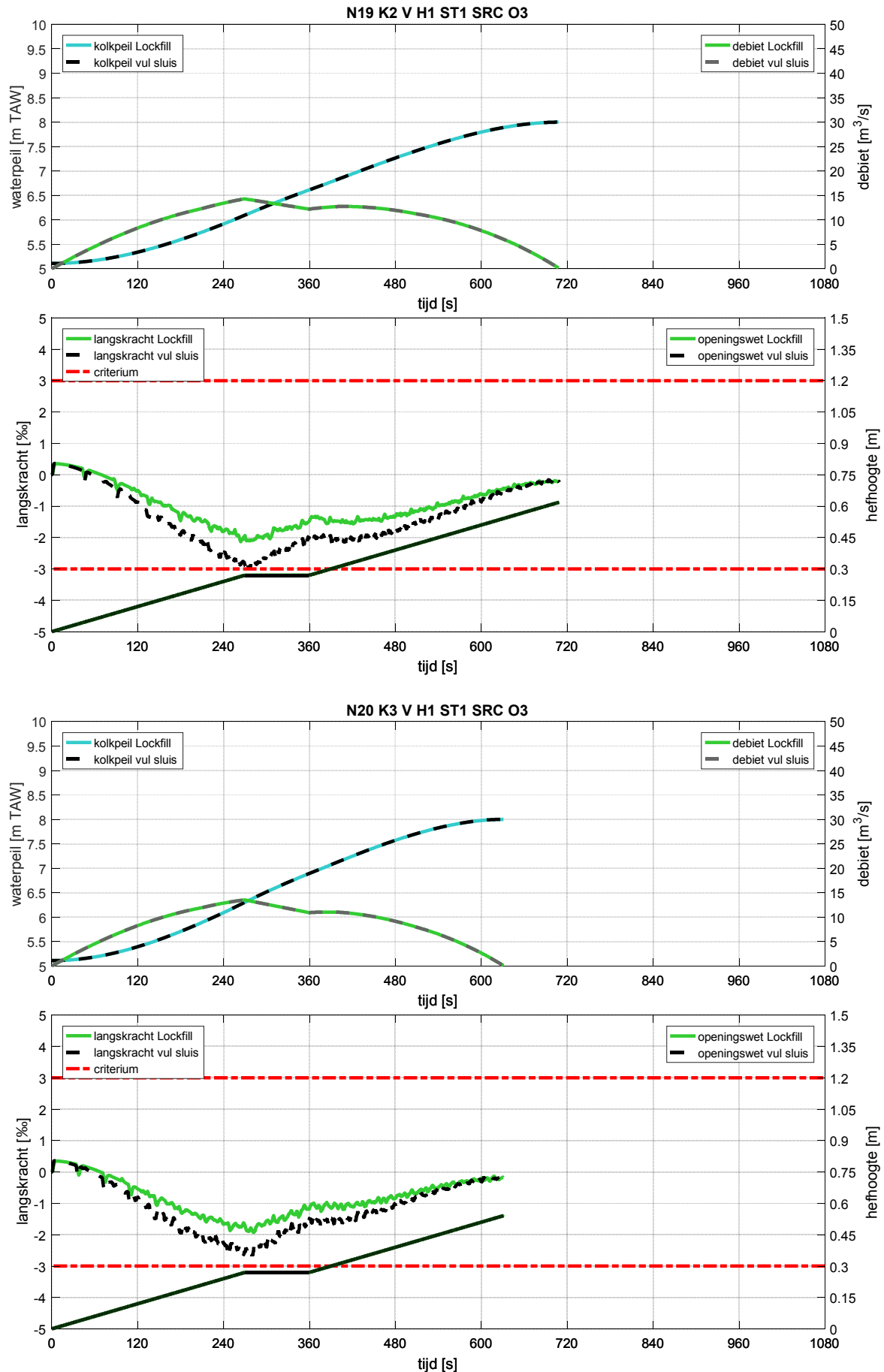


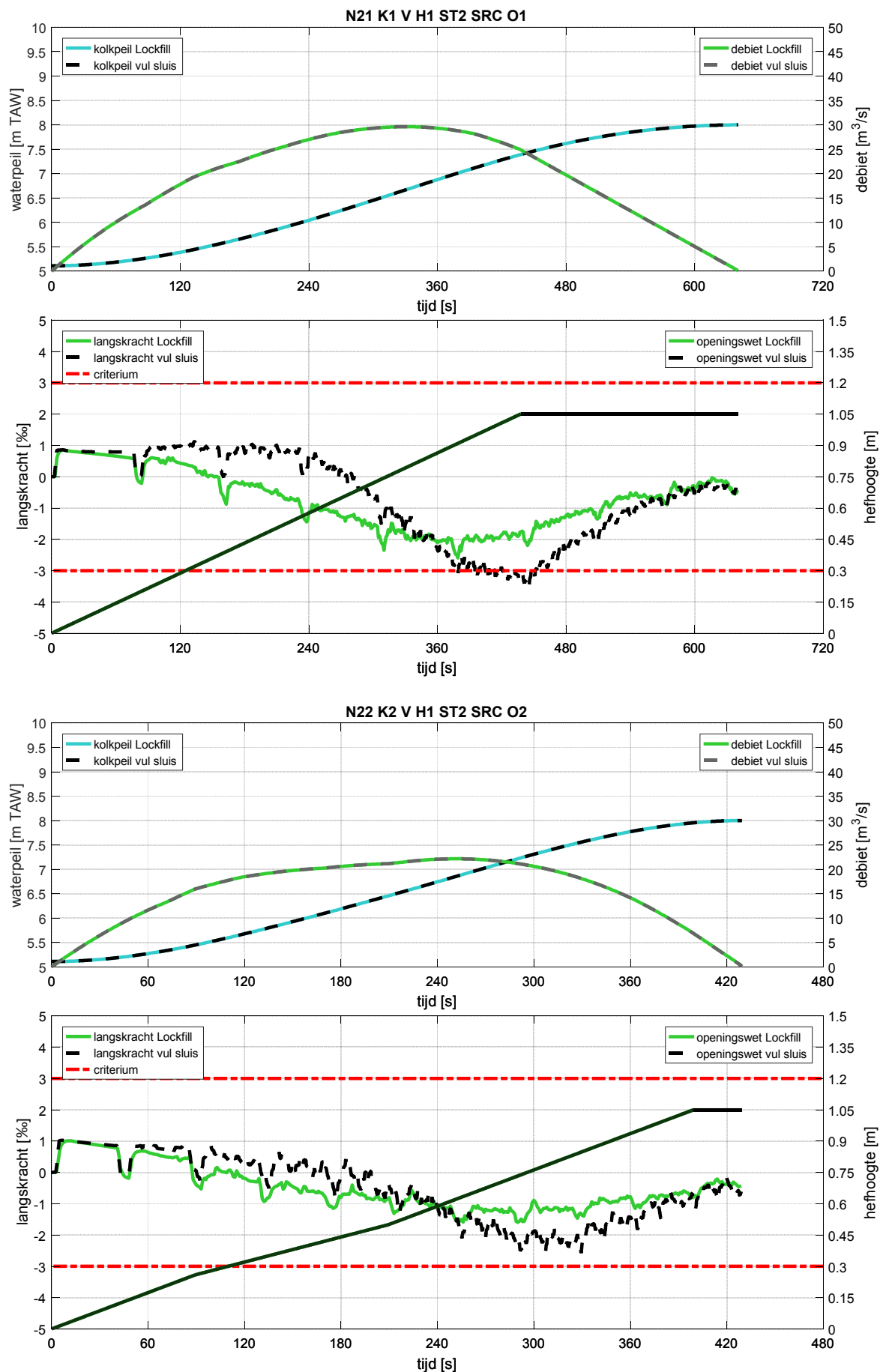


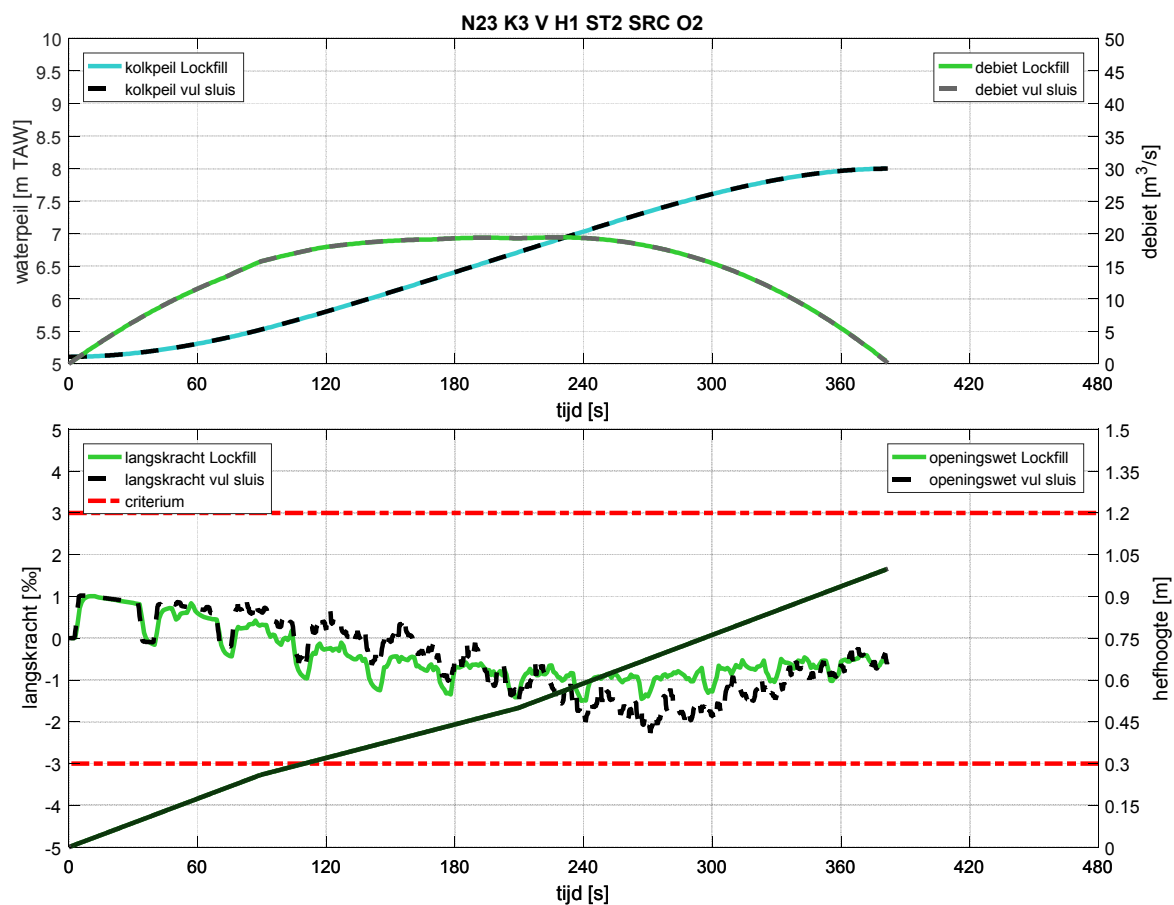












DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be