



Vlaanderen
is wetenschap

15_035_1
WL rapporten

Strategisch haveninfrastructuur project Zeebrugge

Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem
sluis met korte omloopriolen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Strategisch haveninfrastructuur project Zeebrugge

Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem sluis met korte omloopriolen

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Van Hoydonck, W.; 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 2017
D/2017/3241/272

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Van Hoydonck, W.; Mostaert, F. (2017). Strategisch haveninfrastructuur project Zeebrugge: Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem sluis met korte omloopriolen. Versie 3.0. WL Rapporten, 15_035_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2017R15_035_1
Keywords (3-5):	Lock, Filling Emptying System, design		
Tekst (p.):	63	Bijlagen (p.):	23
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.; Van Hoydonck, W.	 
Projectleider:	Vercruysse, J.	

Goedkeuring

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

Abstract

Voor het ontwerp van een nieuwe sluis te Zeebrugge heeft afdeling Maritieme Toegang (projectingenieur: Frederik Buffel) aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om het hydraulisch ontwerp uit te voeren van een nivelleersysteem met korte omloopriolen. Op het ogenblik van de onderzoeksvraag werd het concept uitgewerkt voor een sluis gelegen opwaarts de Visartsluis die aansluit op een open getijde dok. In de loop van de studie werd besloten om voor de nieuwe sluis te Zeebrugge de procedure voor een complex project op te starten. Hierdoor worden opnieuw alternatieve locaties voor de nieuwe sluis onderzocht. Op het ogenblik van deze beslissing was al een deel van het studiewerk voor het ontwerp van het nivelleersysteem voor een sluis gelegen opwaarts de Visartsluis voltooid en waren de uitbesteedde CFD simulaties al gegund. Dit rapport beschrijft de resultaten van het reeds uitgevoerde studiewerk en de uitbesteedde CFD simulaties. Het betreft dus geen definitief ontwerp van het nivelleersysteem voor een nieuwe sluis.

Door het studiebureau SBE werd een voorontwerp voor een nieuwe zeesluis uitgevoerd op basis van het ontwerp van de Antwerpse zeesluizen. De nieuwe sluis heeft een lengte 390.0 m tussen de uiterste roldeuren, een kolkbreedte 45.0 m en een kolkbodem op -12.5 m TAW. Per hoofd zijn er twee riolen met hoogte 4.5 m en breedte 4.5 m (doorstroomsectie 20.25 m²). Het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis wordt gedimensioneerd voor een dokpeil + 3.50 m TAW in combinatie met een peil 0.00 m TAW in de open getijzone. Het ontwerpschip in de kolk betreft de car carrier Tomar (LXBXD = 200.0 m x 32.26 m x 11.0 m). Het criterium voor de nivelleertijd bij deze ontwerppeilen bedraagt 18.0 min.

Op basis van het door het studiebureau uitgevoerde voorontwerp werd een hydraulisch netwerkmodel van het nivelleersysteem opgesteld. Uit de simulaties met dit hydraulisch netwerkmodel volgde dat het met een rioolhoogte en rioolbreedte 4.5 m mogelijk is om de kolk te vullen in 13.7 min tot 15.4 min. Hierop werd de geometrie van de riolen aangepast naar een hoogte en breedte 4.0 m (doorstroomsectie 16.0 m²), wat een nivelleertijd tussen 16.7 min en 18.2 min tot gevolg heeft voor vullen van de sluis. In overleg met de opdrachtgever werd besloten om de sectie met breedte 4.0 m en hoogte 4.0 m te weerhouden. Het ledigen met de ontwerppeilen en het ontwerpschip in de kolk duurt 18.9 tot 19.6 min.

Door het studiebureau ACTIFLOW werden 3D CFD-simulaties uitgevoerd van de stroming in de open getijzone, de riolen en de kolk. Hieruit volgt dat de uitstroomconstructie van de riolen in de kolk goed is vormgegeven. In het voorontwerp mondt de korte riool uit in het verlengde van de kolkmuur en mondt de lange omloopriool rechtstreeks uit in het aanliggende dok. Het naar elkaar toe richten van beide inlaten in het verlengde van de kolkmuur zorgt bij uitstroming voor een merkelijke betere dissipatie.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VIII
1 Inhoud.....	1
2 Gegevens	3
2.1 Geometrie.....	3
2.1.1 Voorontwerpgeometrie	3
2.1.2 Geometrie na wijzigen doorstroomsectie	6
2.2 Waterpeilen	9
2.3 Scheepsgegevens.....	10
3 Criteria	12
4 Bepalen benodigde doorstroomsectie	15
4.1 Hydraulisch netwerkmodel.....	15
4.2 Simulaties ter bepaling doorstroomsectie	18
4.3 Vergelijking	20
5 Simulaties hydraulisch netwerkmodel	22
5.1 Hydraulisch netwerkmodel.....	22
5.2 Simulaties.....	29
6 CFD simulaties	32
6.1 CFD model.....	32
6.2 Getalsmatige resultaten	34
6.3 Stromingspatroon in riolen.....	39
6.4 Stromingspatroon in kolk	46
6.5 Stromingspatroon in open getijzone	53
6.6 Conclusies	57
7 Positionering uitstroomconstructie.....	58
8 Conclusies en aanbevelingen	60
9 Referenties	62
Bijlage A – Openingswetten hefschuiven	B1
Bijlage B – Figuren LOCKSIM simulaties	B3
B.1 Simulaties hoofdstuk 4	B3
B.2 Simulaties hoofdstuk 5	B15

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Karakteristieke afmetingen kolk	4
Tabel 2 – Afmetingen en oppervlak mee te nivelleren deur en deurkamer	6
Tabel 3 – Karakteristieke waterpeilen Zeebrugge (Bron: Afdeling Kust - Vlaamse hydrografie)	9
Tabel 4 – Karakteristieke afmetingen car carrier Wallenius Wilhelmsen Tomar	10
Tabel 5 – Karakteristieke afmetingen schip Wallenius Wilhelmsen Tonsberg	11
Tabel 6 – Criterium langskracht	14
Tabel 7 – Doorstroomsectie omloopriolen	16
Tabel 8 – Netwerkmodel omloopriolen voor initiële simulaties nieuwe sluis in het kader van het SHIP-project	16
Tabel 9 – Netwerkmodel kolk	17
Tabel 10 – Initiële LOCKSIM simulaties vullen	18
Tabel 11 – Resultaat initiële LOCKSIM simulaties SHIP sluis nivelleertijd, heftijd, debiet, stijgsnelheid en langshelling over schip	19
Tabel 12 – Vergelijking afmetingen omloopriolen en uitstroomconstructie Antwerpse zeesluizen	20
Tabel 13 – Vergelijking ontwerpverval en nivelleertijd Antwerpse zeesluizen	21
Tabel 14 – Verliescoëfficiënt uitstroomconstructie	23
Tabel 15 – Ladingsverliezen horizontale bochten met afrondingstraal	23
Tabel 16 – Ladingsverliezen bochten zonder afrondingstraal	24
Tabel 17 – Hefschuifverliezen in functie van hefhoogte (op basis van (Idel’Cik, 1969) blz. 336)	25
Tabel 18 – Bijzondere en algemene ladingsverliezen korte omloopriool	26
Tabel 19 – Bijzondere en algemene ladingsverliezen lange omloopriool	27
Tabel 20 – Componenten kolk	28
Tabel 21 – Mee te nivelleren oppervlak per deurkamer [m ²]	29
Tabel 22 – Parameters LOCKSIM simulaties waarbij afgeweken wordt van de default waarde	29
Tabel 23 – Uitvoerde simulaties hydraulisch netwerkmodel versie 2	30
Tabel 24 – Steady state simulaties voor bepaling verliescoëfficiënt	30
Tabel 25 – Resultaat initiële LOCKSIM simulaties SHIP sluis nivelleertijd, heftijd, debiet, stijgsnelheid en langshelling over schip	31
Tabel 26 – Randvoorwaarden	34
Tabel 27 – Debietverdeling uitstroomopeningen bij vullen kolk	35
Tabel 28 – Debietverdeling uitstroomopeningen bij ledigen kolk	35
Tabel 29 – Vergelijking debiet lange omloopriool	36
Tabel 30 – Verliescoëfficiënt CFD simulatie case 1	37
Tabel 31 – Vergelijking verliescoëfficiënt LOCKSIM – CFD case 1	38

Tabel 32 – Verliescoëfficiënt CFD simulatie case 2, case 3-1 en case 3-2	38
Tabel 33 – Verliescoëfficiënt CFD simulatie vergelijking case 1-2 en case 4.....	39
Tabel 34 – Vergelijking verliescoëfficiënt LOCKSIM – CFD case4	39
Tabel 35 – Positie kiel schip ten opzichte van plafond uitstroomopeningen.....	58

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Beperkte open getijzone	1
Figuur 2 – Grondplan nieuwe sluis	3
Figuur 3 – Omloopriolen SHIP sluis	4
Figuur 4 – Geometrie benedenhoofd na reductie doorstroomsectie	7
Figuur 5 – Doorstroomsectie omloopriool	7
Figuur 6 – Detail inlaat.....	8
Figuur 7 – Detail - uitstroomconstructie	9
Figuur 8 – Car carrier Wallenius Wilhelmsen Tomar.....	10
Figuur 9 – Car Carrier Wallenius Wilhelmsen Tonsberg.....	11
Figuur 10 – Terreinmeting Vandammesluis – locatie waterstandmetingen en berekende langse waterspiegelhellingen	13
Figuur 11 – Opgemeten langse waterspiegelhellingen Vandammesluis – vullen bovenhoofd met groot verval	14
Figuur 12 – Hydraulisch netwerkmodel SHIP sluis voor nivelleren via bovenhoofd	15
Figuur 13 – Rekendomein voor case 1	33
Figuur 14 –Wijziging rekendomein case 3 ten opzichte van case 2	33
Figuur 15 – Nummering uitstroomopeningen.....	35
Figuur 16 – CFD simulatie – componenten case 1 voor bepalen verliescoëfficiënten.....	37
Figuur 17 – Stroombeeld - verticale doorsnede inlaat.....	40
Figuur 18 – Stroombeeld ter hoogte van de hefschuiven	41
Figuur 19 – Snelheid omloopriool op halve hoogte	42
Figuur 20 – Stroombeeld uitstroomconstructie	43
Figuur 21 – Stroombeeld uitstroomconstructie – korte en lange omloopriool.....	44
Figuur 22 – Snelheid in dagvlak uitstroomconstructie	45
Figuur 23 – Snelheid op halve hoogte omloopriolen	46
Figuur 24 – Snelheid op ¼ kolkbreedte	47
Figuur 25 – Verticaal stromingspatroon midden uitstroomopening 1 en 5 tot symmetrievalk	48
Figuur 26 – Waterpeil kolk simulaties lange omloopriool.....	49
Figuur 27 – Snelheid halve hoogte uitstroomopeningen	50
Figuur 28 – Snelheid in verticaal vlak volgens aslijn kolk	51
Figuur 29 – waterpeil kolk – simulatie beide omloopriolen.....	52
Figuur 30 – Geometrie uitmonding in open getijzone case 2 en case 3	53
Figuur 31 – Stroombeeld open getijzone - bovenaanzicht.....	54
Figuur 32 – Detail stroombeeld open getijzone - bovenaanzicht	55

Figuur 33 – Assenstelsel open getijzone	55
Figuur 34 – Snelheid dwars op open getijzone 250 m van sluishoofd	56
Figuur 35 – Snelheid langs oever oostzijde (16 m van kaaimuur)	56
Figuur 36 – Illustratie kolkinnname ontwerpschip en exceptioneel schip	58
Figuur 37 – Lokale verdieping van de bodem van de Boudewijns sluis ter hoogte van de uitstroomconstructie	59
Figuur 38 – Simulatie N1	B3
Figuur 39 – Simulatie N2	B4
Figuur 40 – Simulatie N3	B5
Figuur 41 – Simulatie N4	B6
Figuur 42 – Simulatie N5	B7
Figuur 43 – Simulatie N6	B8
Figuur 44 – Simulatie N7	B9
Figuur 45 – Simulatie N8	B10
Figuur 46 – Simulatie N9	B11
Figuur 47 – Simulatie N10	B12
Figuur 48 – Simulatie N11	B13
Figuur 49 – Simulatie N12	B14
Figuur 50 – Simulatie N13	B15
Figuur 51 – Simulatie N14	B16
Figuur 52 – Simulatie N15	B17
Figuur 53 – Simulatie N16	B18
Figuur 54 – Simulatie N17	B19
Figuur 55 – Simulatie N18	B20
Figuur 56 – Simulatie N19	B21
Figuur 57 – Simulatie N20	B22
Figuur 58 – Simulatie N21	B23

1 Inhoud

Het strategisch haveninfrastructuurproject (SHIP) Zeebrugge beaamde de verbetering van de nautische toegankelijkheid van de achterhaven van Zeebrugge door middel van het bouwen van een nieuwe zeesluis. Binnen dit project werden oorspronkelijk 3 alternatieven beschouwd die bestonden uit de combinatie van inrichtingsalternatieven voor de achterhaven van Zeebrugge. De alternatieven waren een snelle sluis ter hoogte van de huidige Visartsluis, een beperkte open getijzone en een open getijzone. Op 3 april 2009 besliste de Vlaamse Regering om het voorkeursalternatief “beperkte open getijzone” verder uit te werken. Dit alternatief is voorgesteld in Figuur 1. In dit alternatief wordt een open-getijzone gecreëerd tussen de locatie van de huidige Visartsluis en een nieuw te bouwen sluis (opwaarts van de huidige Visartsluis).

Figuur 1 – Beperkte open getijzone



In het kader van het SHIP-project heeft afdeling Maritieme toegang (projectingenieur Frederik Buffel) aan de afdeling Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om voor deze sluis het hydraulisch ontwerp van een niveleersysteem met korte omloopriolen uit te voeren.

Gedurende de uitvoering van deze studie (voorjaar 2016 tot voorjaar 2017) werd in het najaar van 2016 beslist om over te gaan tot de procedure voor een complex project. Hierdoor worden opnieuw een aantal alternatieve locaties voor de nieuwe sluis onderzocht. Op het moment dat de procedure voor het complex project Nieuwe Sluis Zeebrugge gestart is was de dimensionering van de omloopriolen voor de nieuwe sluis in het kader van het SHIP-project reeds uitgevoerd, was een eerste hydraulisch netwerkmodel opgesteld en waren de extern uitbesteedde CFD-simulaties al gegund. Dit rapport beschrijft het reeds uitgevoerde werk voor het nivelleersysteem van de nieuwe sluis in het kader van het SHIP-project en de resultaten van de uitbesteedde CFD studie. Omdat een aantal ontwerpaspecten afhankelijk zijn van de mogelijke ligging van een nieuwe sluis en omdat uit de procedure van het complex project mogelijk alternatieve randvoorwaarden zullen volgen werd het ontwerp van het nivelleersysteem niet verder uitgewerkt.

Voorafgaand aan deze studie heeft het WL in 2013 reeds een voorontwerp uitgevoerd voor een nivelleersysteem met openingen in de deur (Verelst *et al.*, 2012). Omwille van de specifieke geotechnische situatie te Zeebrugge werd initieel besloten om de bouwput zo klein mogelijk te houden en het nivelleersysteem in de roldeuren te integreren. Om te voldoen aan het criterium voor de nivelleertijd werd een ontwerp voor een nivelleersysteem uitgewerkt met een totale doorstroomsectie van de openingen in de deur van 45.3 m² (breedte 30.2 m hoogte 1.5 m). Bij het verder uitwerken van het geotechnisch ontwerp werd besloten dat het toch mogelijk was om een grotere bouwput te voorzien zodat een nivelleersysteem met korte omloopriolen, vergelijkbaar met de Antwerpse Zeesluizen, mogelijk was. Een nivelleersysteem met korte omloopriolen heeft volgende voordelen:

- De door middel van schuiven af te sluiten sectie is kleiner. Voor een gegeven nivelleertijd is de benodigde rioolsectie bij omloopriolen veelal lager dan bij openingen in de deur. Daarnaast moeten bij openingen in de deur beide deuren uitgerust worden met schuiven. Dit heeft nadelen op vlak van kostprijs en onderhoud.
- Het constructief ontwerp van de roldeuren is eenvoudiger. De roldeuren zijn sterker. En ook de kostprijs van de deuren is lager.
- Voor dubbelkerende hefschuiven in omloopriolen zijn referentieontwerpen beschikbaar. Voor openingen in de roldeuren is er geen gekend referentieontwerp met aan de buitenzijde geplaatste dubbelkerende hefschuiven.

Onderhavig rapport is als volgt opgebouwd:

De beschikbare gegevens worden samengevat in hoofdstuk 2. De criteria waaraan het nivelleren van de sluis dient te voldoen worden samengevat in hoofdstuk 3. Door middel van simulaties met een 1D-hydraulisch netwerkmodel werd de benodigde doorstroomsectie van de omloopriolen bepaald, zie hoofdstuk 4. Na het bepalen van de benodigde doorstroomsectie wordt de geometrie van de omloopriolen bijgewerkt. Op basis van de bijgewerkte geometrie werd het hydraulisch netwerkmodel opnieuw opgebouwd. De resultaten van de simulaties met dit aangepast hydraulisch netwerkmodel worden besproken in hoofdstuk 5. De resultaten van de CFD-simulaties worden besproken in hoofdstuk 6. De positionering van de schepen in de kolk ten opzichte van uitstroomconstructie wordt kort besproken in hoofdstuk 7. Conclusies en aanbevelingen worden gegeven in hoofdstuk 8.

2 Gegevens

De initiële geometrie en de bijgewerkte geometrie worden besproken in paragraaf 2.1. De voor de simulaties te beschouwen waterpeilen worden gegeven in paragraaf 2.2. De voor de simulaties relevante karakteristieken van het ontwerpschip en het exceptioneel schip worden gegeven in paragraaf 2.3.

2.1 Geometrie

Het studie bureau SBE heeft in opdracht van Afdeling Maritieme Toegang een initieel ontwerp uitgevoerd (paragraaf 2.1.1). Na het bepalen van de benodigde doorstroomsectie (zie hoofdstuk 4) heeft WL de door het studie bureau aangeleverde plannen bijgewerkt (paragraaf 2.1.2).

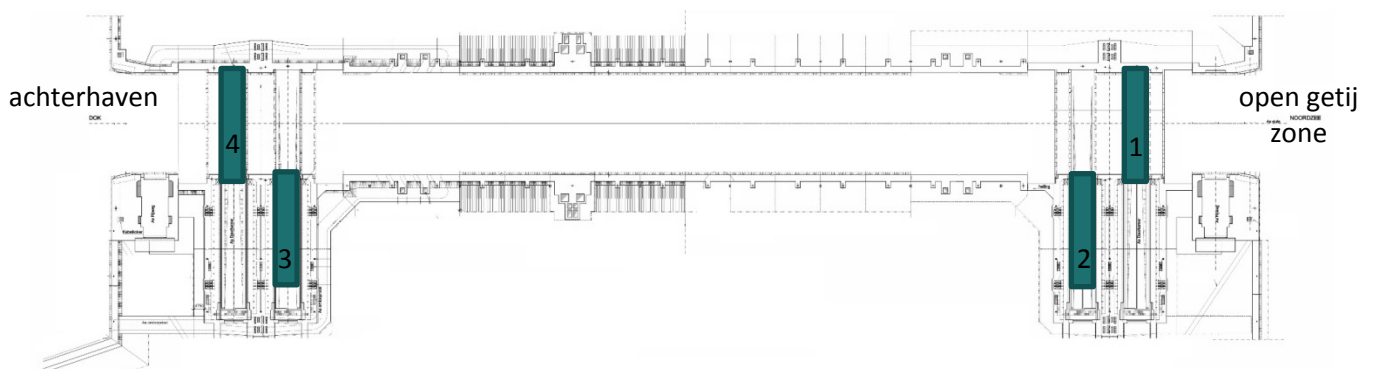
2.1.1 Voorontwerpgeometrie

WL heeft volgende plannen van de voorontwerpgeometrie (in pdf formaat) ontvangen:

- Afdeling Maritieme Toegang *et al.*, (2014a). SHIP - Ontwerp sluis - Bovenhoofd - korte omloopriool - snedes - details - dd. 25/06/2014
- Afdeling Maritieme Toegang *et al.*, (2014b). SHIP - Ontwerp sluis - Bovenhoofd - korte omloopriool - snedes - schuifputten - dd. 25/06/2014
- Afdeling Maritieme Toegang *et al.*, (2014c). SHIP - Ontwerp sluis - Bovenhoofd - lange omloopriool - schuifputten - snedes - details - dd. 28/04/2014
- Afdeling Maritieme Toegang *et al.*, (2014d). SHIP - Ontwerp sluis - Deurkamer / Lengte- en dwarsdoorsnedes - details - dd. 21/05/2014
- Afdeling Maritieme Toegang *et al.*, (2014e). SHIP Ontwerp sluis - sluis - Bovenaanzicht - Lengtedoorsnede - Details - dd. 25/06/2014

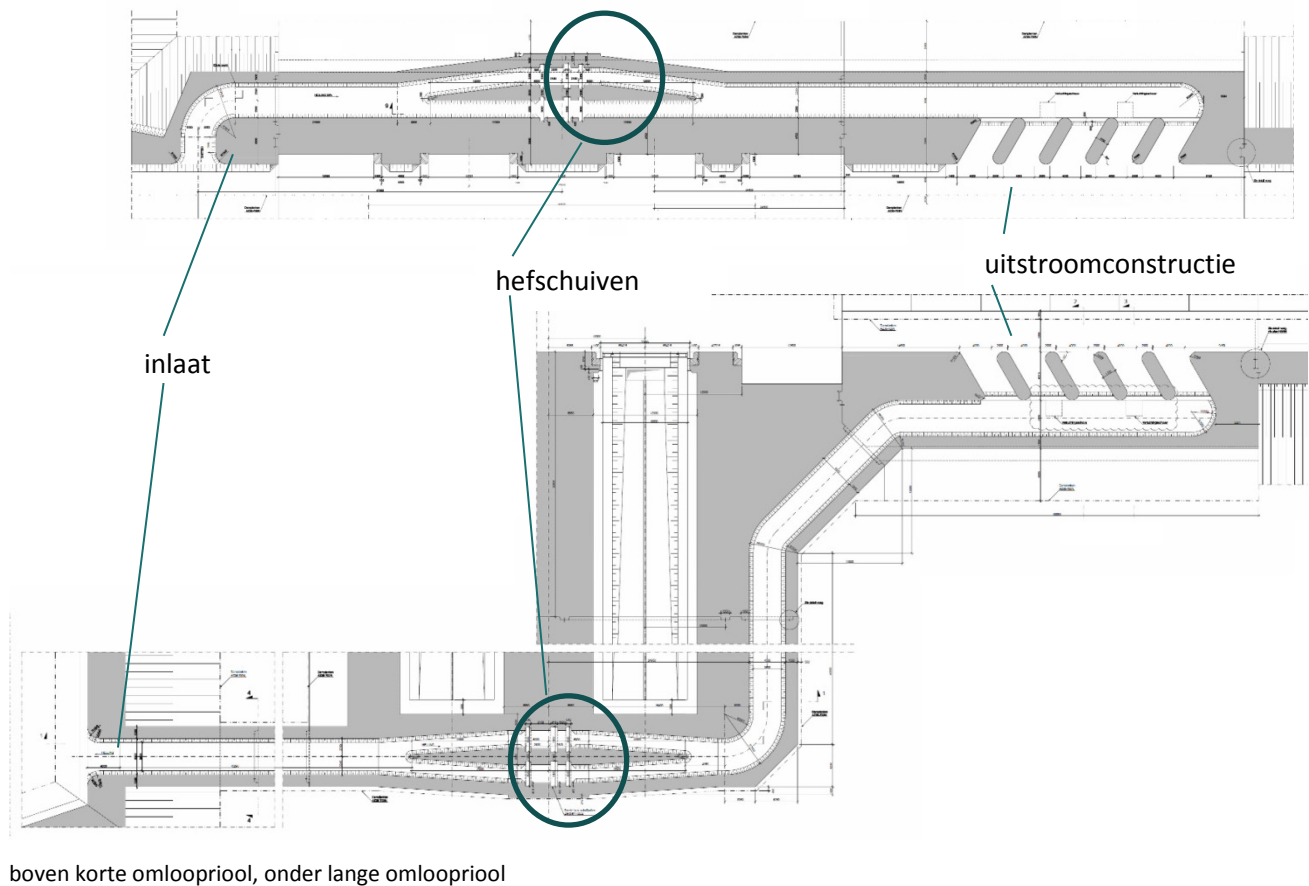
Op basis van deze plannen wordt in Figuur 2 een grondplan van de sluis gegeven en in Figuur 3 een illustratie van de korte en de lange omloopriool van het bovenhoofd. De afmetingen van de kolk worden samengevat in Tabel 1. De roldeuren worden in deze figuur aangeduid met een groene rechthoek. In de tekening zijn de buitenste roldeuren gesloten, dit komt overeen met de configuratie gebruikt voor de simulaties in dit rapport.

Figuur 2 – Grondplan nieuwe sluis



Nummering deuren oplopend van open getijzone naar achterhaven

Figuur 3 – Omloopriolen SHIP sluis



Tabel 1 – Karakteristieke afmetingen kolk

breedte kolk	45 m
lengte tussen buitenste roldeuren	390 m
lengte tussen binnenste roldeuren	342 m
kolkoppervlak (buitenste roldeuren)	17550 m ²
kolkoppervlak (binnenste roldeuren)	15390 m ²
peil kolkbodem	-12.5 m TAW

De kolk heeft een breedte van 45.0 m, een lengte tussen de buitenste roldeuren van 390 m en een kolkbodem op peil –12.5 m TAW. Het nivelleersysteem is gebaseerd op dat van de Antwerpse zeesluizen¹. Het benedenhoofd is identiek aan het bovenhoofd. De sluis wordt per hoofd gevoed door middel van twee omloopriolen. De riolen hebben een breedte en hoogte 4.5 m wat overeenkomt met een doorstroomsectie 20.25 m². Er is geen verbinding tussen de omloopriolen van het boven- en het benedenhoofd. Per hoofd zijn twee roldeuren voorzien. Aan de zijde van de deurkamers loopt het omloopriool hier rond. Hierdoor is er een verschil in lengte tussen de omloopriolen van hetzelfde hoofd. De langere omloopriool aan de zijde

¹ Dit type nivelleersysteem werd voor het eerste toegepast voor de Boudewijns sluis (1955). Vervolgens zijn ook de recentere zeevaartsluizen van de haven van Antwerpen (Zandvlietsluis (1967), Berendrecht sluis (1989), Kallo sluis (1979) en Kieldrecht sluis (2016)) met een dergelijk type nivelleersysteem uitgerust.

van de deurkamers wordt in dit rapport aangeduid met lange omloopriool en de kortere omloopriool aan de andere kolkwand wordt aangeduid met korte omloopriool². Per riool zijn twee hefschuiven in parallel aanwezig. De doorstroomsectie per hefschuif is de helft van de doorstroomsectie van de omloopriool. De omloopriolen monden uit in de kolk door middel van een uitstroomconstructie. Deze heeft als doel om het uitstromende water te spreiden. Hiernaast moet de uitstroomconstructie er ook voor zorgen dat de uitstroom loodrecht op de kolkas gericht is. De uitstroomconstructie is analoog als bij de zeesluizen in de haven van Antwerpen. Bij het definitieve ontwerp worden mogelijk nog het niveau van de inlaten geoptimaliseerd aan de peilen in de open getij zone respectievelijk achterhaven.

Ten opzichte van de zeesluizen in de haven van Antwerpen worden drie wijzigingen opgemerkt.

Inlaat lange omloopriool

De inlaten van de korte en lange omloopriolen worden niet naar elkaar toe gericht, zie Figuur 3. Bemerkt dat deze inlaten afhankelijk van de stroomrichting ook als uitlaat werken. Het naar elkaar toe richten van beide inlaten zorgt bij uitstroming vermoedelijk voor een betere dissipatie. Bij het standaard ontwerp mondt de uitlaat van de lange omloopriool tussen de kelder van de basculebrug en de deurkamer uit. Omdat in het scenario van de open getijzone de beschikbare lengte van de sluis beperkt is, is de brugkelder van de basculebrug naast de deurkamer geplaatst. Het rechtstreeks uitmonden van de lange omloopriool in de open getijzone of achterhaven geeft mogelijk een invloed op manoeuvres van schepen in de nabijheid van de sluis.

Schuiven korte omloopriool

De splitsing van de schuiven in de korte omloopriool gebeurt asymmetrisch. Bemerkt dat het debiet door de doorgaande tak hoger zal zijn dan door de tak onder een hoek. Hierbij dient evenwel opgemerkt te worden dat de schuiven van de lange omloopriool na een 90° bocht zijn geplaatst waardoor het debiet hier ook niet evenredig verdeeld kan zijn. Dit is ook zo bij de Antwerpse zeesluizen. Bij weten van WL zijn hier geen problemen gekend.

Bocht opwaarts uitstroomconstructie

Voor de uitstroomconstructie dient de omloopriool 90° gedraaid te worden (van loodrecht op kolkas naar evenwijdig met kolkas). Bij het voorontwerp gebeurt dit door middel van twee 45° bochten. Bij de overige sluizen wordt hier een 90° bocht geplaatst. Uit de CFD simulaties uitgevoerd voor de Royerssluis volgde dat aan de buitenzijde van deze 90° bocht de stroming zich opwerkt en een kurkentrekker vormig patroon ontstaat in de uitstroomconstructie. De invloed van de twee 45° bochten op het stromingspatroon zal volgen uit de CFD simulaties (zie hoofdstuk 6).

De kolk is uitgerust met roldeuren, namelijk twee roldeuren in elk sluishoofd. Bij gebruik van de buitenste roldeuren (nr. 1 en nr. 4) bedraagt de kolkoppervlakte 17550 m². Bij het nivelleren van de kolk met de buitenste roldeuren wordt ook de oppervlakte van de twee binnenste deurkamers mee genivelleerd en de deurkamer en het binnenoppervlak van de deur aan de zijde van het laagste peil. In deze studie wordt het oppervlak van het staal van de deur verwaarloosd en wordt de oppervlakte van de deurkamer en deur bepaald op basis van de breedte en lengte, zie Tabel 2. Het totaal te nivelleren oppervlak bij nivelleringen met de buitenste roldeuren bedraagt 20393 m² (=17550 m² + 790 m² x3 + 473 m²).

² Bemerkt dat hier een afwijkende definitie wordt gehanteerd ten opzichte van de literatuur. In de literatuur wordt een lange omloopriool gedefinieerd als een riool waarbij er een verbinding is tussen het beneden- en bovenhoofd en een korte riool als een riool waarbij er geen verbinding is tussen het benedenhoofd- en bovenhoofd. Volgens deze betekenis zijn beide riolen per hoofd van het type korte omloopriool.

Tabel 2 – Afmetingen en oppervlak mee te nivelleren deur en deurkamer

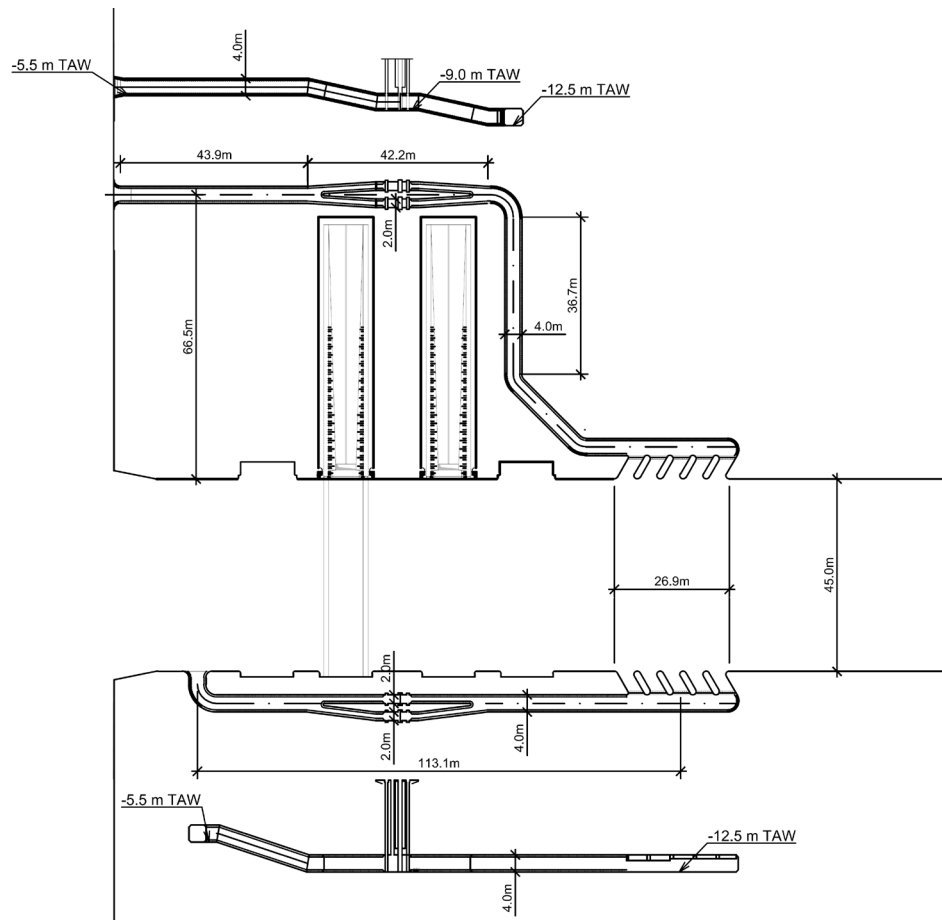
	lengte [m]	breedte [m]	oppervlak [m ²]
deur	61.3	12.9	790.0
deurkamer	45.0	10.5	472.5

2.1.2 Geometrie na wijzigen doorstroomsectie

Op basis van de resultaten van de initiële LOCKSIM simulaties (zie hoofdstuk 4) werd in overleg met aMT afgesproken om de doorstroomsectie van de omloopriolen te reduceren van 20.25 m² (breedte = 4.5 m; hoogte = 4.5 m) naar 16.00 m² (breedte = 4.0 m; hoogte = 4.0 m). Hierop heeft WL de door het studiebureau opgestelde plannen van het bovenhoofd overgenomen in Autocad en bijgewerkt. Een verticale en horizontale doorsnede van de bijgewerkte geometrie wordt gegeven in Figuur 4. Op een reductie van de doorstroomsectie na zijn er geen wijzigingen ten opzichte van de voorontwerpgeometrie. Omdat de CFD simulaties uitgevoerd worden voor het benedenhoofd werd door WL de geometrie voor het benedenhoofd uitgetekend door het spiegelen van het bovenhoofd.

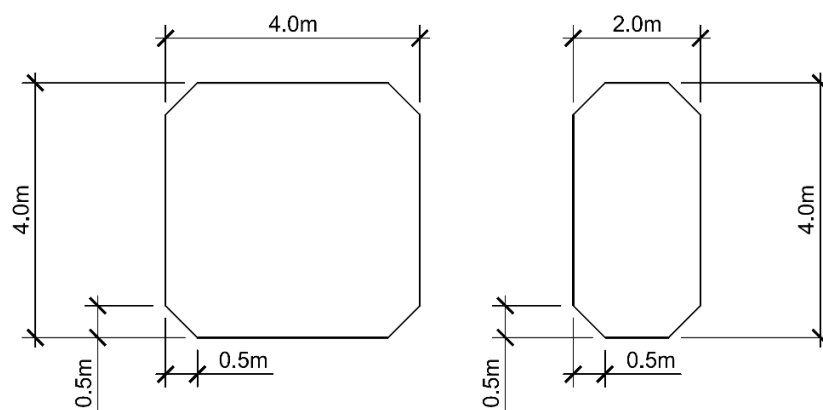
Het bodempeil van de inlaten ligt op -5.5 m TAW. In de omloopriool moet dit bodempeil met 7.0 m verlaagd worden naar het bodempeil van de kolk (-12.5 m TAW). In de lange omloopriool wordt dit opgedeeld in twee verlagingen van elk 3.5 m ter plaatse van de splitsing en samenvoeging ter hoogte van de hefschuiven. Dit gebeurt onder een hoek van 12°. In de korte omloopriool wordt de riool voorafgaand aan de splitsing met 7.0 m verlaagd. Dit gebeurt onder een hoek van 18°.

Figuur 4 – Geometrie benedenhoofd na reductie doorstroomsectie



De doorstroomsectie van de omloopriool en ter hoogte van de hefschuiven wordt gegeven in Figuur 5. Bemerk dat de hoeken afgeschuind zijn over een breedte en hoogte 0.5 m. Hierdoor neemt de doorstroomsectie van de riool af met 0.5 m². Deze afschuining wordt verwaarloosd in het hydraulisch netwerkmodel maar wordt wel meegenomen in de CFD simulaties.

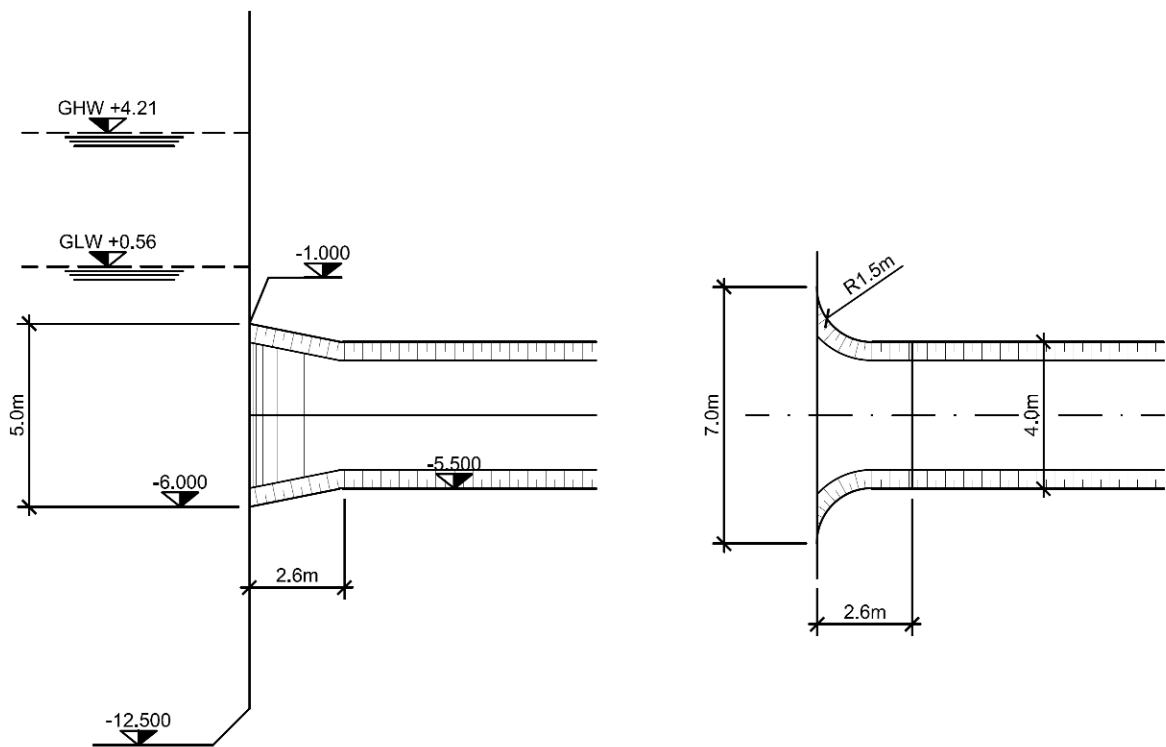
Figuur 5 – Doorstroomsectie omloopriool



links: volledige omloopriool; rechts: omloopriool ter plaatse van de hefschuiven

Een detail doorsnede van de inlaat wordt gegeven in Figuur 6. Bemerkt dat de inlaat van de korte en de lange omloopriool identiek zijn. In het horizontaal vlak wordt een overgang voorzien met een bochtstraal 1.5 m. Omdat een dergelijke overgang in het verticaal vlak niet te realiseren valt wordt hier een symmetrische afschuining naar een totale hoogte 5.0 m voorzien. Beide ingrepen dienen om de hydraulische verliezen van de inlaat bij vullen van de kolk te verlagen. Voor ledigen van de kolk, waarbij deze inlaten als uitlaat werken, zal de invloed van de verwijdingen in het dagvlak beperkt zijn.

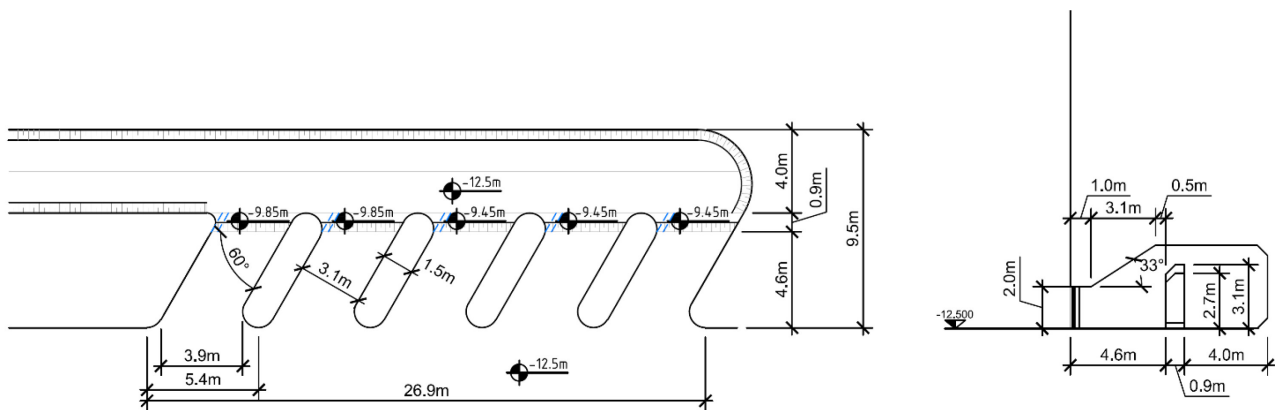
Figuur 6 – Detail inlaat



links verticale doorsnede, rechts horizontale doorsnede

Een horizontale en verticale doorsnede van de uitstroomconstructie wordt gegeven in Figuur 7. De uitstroomconstructie heeft 5 uitmondungen. Deze staan onder een hoek van 60° ten opzichte van de kolkas. Tussen de uitmondungen en de omloopriool bevindt zich een muur. Deze heeft voor de eerste twee openingen een hoogte 2.7 m en voor de laatste 3 openingen een hoogte 3.1 m. Ter hoogte van de 5 uitmondungen loopt het plafond onder een hoek 33°. Hierdoor zal het uitstromende water naar de bodem van de kolk toe geleid worden. Onderaan in de muur tussen de omloopriool en de uitmondungen van de uitstroomopeningen worden buisjes geplaatst met diameter 0.3 m. Deze buisjes komen overeen met de plannen van de Berendrechtssluis. In kader van het rapport van de Royerssluis werd een verklaring voor deze buisjes gezocht maar niet gevonden.

Figuur 7 – Detail - uitstroomconstructie



Links: bovenaanzicht; rechts: doorsnede

2.2 Waterpeilen

Voor het ontwerp van het nivelleersysteem van de sluis worden volgende waterpeilen beschouwd door de opdrachtgever:

- waterpeil achterhaven: +3.50 m TAW(= streefpeil),
- waterpeil open getijzone: +0.02 m TAW.

Tabel 3 geeft een overzicht van de karakteristieke waterpeilen voor de open getijzone. Hiervoor zijn de karakteristieke waterpeilen voor de voorhaven van Zeebrugge beschouwd.

Tabel 3 – Karakteristieke waterpeilen Zeebrugge (Bron: Afdeling Kust - Vlaamse hydrografie)

Gemiddeld hoogwater springtij	+ 4.58 m TAW
Gemiddeld hoogwater gemiddeld tij	+ 4.21 m TAW
Gemiddeld hoogwater doodtij	+ 3.73 m TAW
Gemiddeld laagwater doodtij	+ 0.92 m TAW
Gemiddeld laagwater gemiddeld tij	+ 0.56 m TAW
Gemiddeld laagwater springtij	+ 0.28 m TAW

Merk op dat het ontwerpwaterpeil voor de open getijzone een waterpeil betreft dat lager is dan het laagwater bij een gemiddeld springtij. Ter vereenvoudiging wordt voor de simulaties een waterpeil 0.00 m TAW in plaats van +0.02 m TAW toegepast in de open getijzone.

Het waterpeil in de achterhaven betreft het streefpeil (+3.50 m TAW). Het waterpeil van de achterhaven varieert tussen +3.30 m TAW en +3.70 m TAW. Een waterpeil +3.70 m TAW zou beperkt nadeliger zijn voor het overschrijden van de langskracht en een waterpeil +3.30 m TAW is nadeliger voor luchtaanzuiging in de riolen.

2.3 Scheepsgegevens

Als ontwerpschip en exceptioneel schip worden dezelfde schepen beschouwd als bij het ontwerp van het nivelleersysteem met openingen in de deuren (Verelst *et al.*, 2012).

Als ontwerpschip wordt de car carrier Wallenius Wilhelmsen Tomar (Figuur 8) beschouwd. Dit schip wordt aangeduid met **ontwerpschip**. Tabel 4 geeft een overzicht van de karakteristieke afmetingen van dit schip.

Figuur 8 – Car carrier Wallenius Wilhelmsen Tomar



Tabel 4 – Karakteristieke afmetingen car carrier Wallenius Wilhelmsen Tomar

Lengte	200.0 m
Breedte	32.26 m
Diepgang	11.00 m
Nuttig draagvermogen (Deadweight)*	22144 ton
Bruto tonnage	61328 ton
Blokcoëfficiënt	0.56
Gewichtsdisplacement	40000 ton

* Bron: www.marinetraffic.com

In uitzonderlijke situaties is het ook mogelijk dat grotere schepen via de nieuw te bouwen sluis de achterhaven bereiken. Hiervoor is het schip Wallenius Wilhelmsen Tonsberg (Figuur 9) voorgesteld als schip dat uitzonderlijk verschut moet kunnen worden. Dit schip wordt in deze studie aangeduid met **exceptioneel schip**. Tabel 5 geeft een overzicht van de karakteristieke afmetingen van dit schip.

Figuur 9 – Car Carrier Wallenius Wilhelmsen Tonsberg



Tabel 5 – Karakteristieke afmetingen schip Wallenius Wilhelmsen Tonsberg

Lengte	265.0 m
Breedte	32.26 m
Diepgang	12.30 m
Deadweight*	41820 ton
Bruto-tonnage	74622 ton
Blokcoëfficiënt	0.71
Gewichtsdisplacement	75000 ton

* Bron: www.marinetraffic.com

3 Criteria

Initieel werd door de opdrachtgever bij het ontwerpwaterpeil in de open getijzone (+0.02 m TAW) en in de achterhaven (+3.50 m TAW) een nivelleertijd van 15 minuten opgelegd, met een preferentiële waarde van 12 minuten. Na het overleg met de opdrachtgever op 30/03/2016 werd dit bijgesteld tot een nivelleertijd van 18 min bij het ontwerpverval. Bemerk hierbij dat tijdens de voorontwerpstudie van een nivelleersysteem met openingen in de deur (Verelst *et al.*, 2012) een nivelleertijd van 15 min werd gehanteerd als criterium.

Een criterium voor de stijg- en daalsnelheid van het kolkpeil werd niet opgegeven. Vanuit de literatuur zijn waarden gekend voor binnenvaart. Voor zeevaart is de auteurs van dit rapport geen waarde gekend. Voor de studie van de Kieldrechtsluis werd de Berendrechtsluis als benchmark gebruikt (De Mulder *et al.*, 2010b). Uit het hydraulisch netwerkmodel van de Berendrechtsluis volgde dat bij een verval 4.0 m de maximale stijgsnelheid 9 mm/s bedraagt en de maximale daalsnelheid 8 mm/s bedraagt. De uit de LOCKSIM volgende maximale stijg- en daalsnelheden zullen vergeleken worden met deze waarden.

Voor de langskracht worden drie verschillende criteria gehanteerd.

Een eerste criterium voor de langskracht is analoog met het in 2012 toegepaste criterium bij de voorontwerpstudie van een nivelleersysteem met openingen in de deur. Dit criterium wordt in Verelst *et al.* (2012) als volgt beschreven:

“Vrijer (1977) vermeldt waarden voor de maximale langskracht op een schip in functie van het deadweight en de voorspanning van de tros. Voor een schip met een deadweight van 20000 ton varieert de maximaal toegelaten waarde van de langskracht tussen 0.20 ‰ (lage voorspanning) en 0.35 ‰ (hoge voorspanning), waarbij de langskracht wordt uitgedrukt als een fractie (in ‰) van het gewichtsdisplacement. Voor het exceptioneel schip (deadweight: 40000 ton) worden maximale waarden van de langskracht tussen 0.15 ‰ (lage voorspanning) en 0.25 ‰ (hoge voorspanning) vermeld.

Initieel wordt in deze studie, om conservatieve redenen, een lage voorspanning verondersteld. Dit impliceert dat voor het ontwerpschip een maximaal toelaatbare waarde van de langskracht van 0.20 ‰ wordt beschouwd en voor het exceptioneel schip 0.15 ‰.”

De handleiding van het programma LOCKSIM (Schohl G.A., 1998) stelt het volgende over de langskrachten:

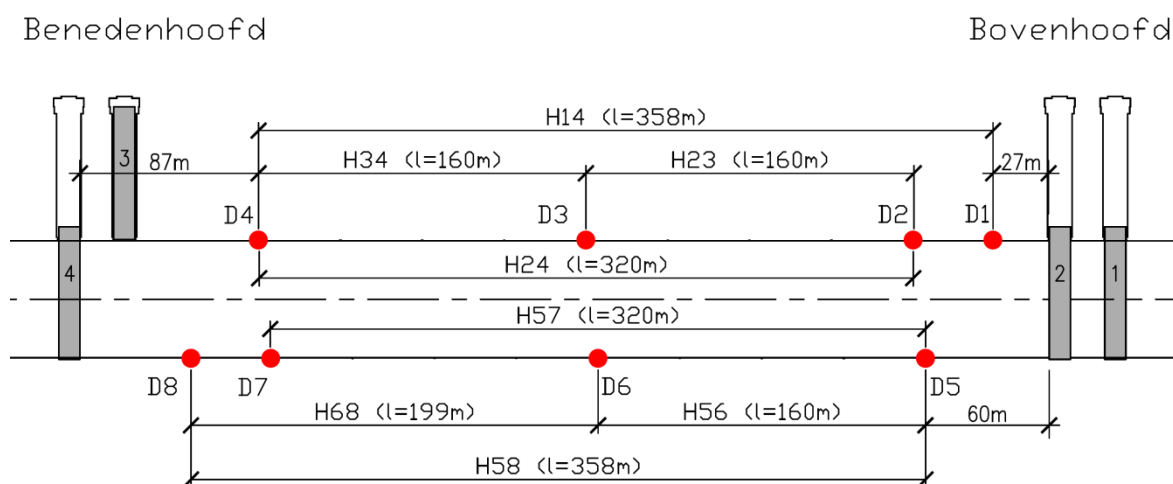
“Remember also that the computed forces are used primarily for comparison purposes rather than as accurate predictions of hawser forces.”

Om deze reden wordt een tweede criterium voor de langskracht bepaald op basis van simulaties met het ontwerpschip Tomar respectievelijk het exceptioneel schip Tonsberg in een soortgelijke sluis, de Berendrechtsluis. Het model voor de Berendrechtsluis werd opgesteld in kader van het ontwerp van de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a). Analoog met de simulaties voor de nieuwe sluis te Zeebrugge bevindt het schip de Tomar respectievelijk de Tonsberg zich in het midden van de sluis. Een vulling via het bovenhoofd met een verval 3.50 m (analoog met het ontwerpverval voor de nieuwe sluis te Zeebrugge) en een verval 4.10 m (gemiddeld laagwater in de Schelde naar het gemiddeld dokpeil in het rechterkanaaldok) werd gesimuleerd. Op basis van de simulaties met de Tomar in de Berendrechtsluis werd voor een verval 3.50 m respectievelijk een verval 4.10 m een maximale toelaatbare langse waterspiegelhelling van 0.30 ‰ respectievelijk 0.35 ‰ bekomen. Op basis van de simulaties met de Tonsberg in de Berendrechtsluis wordt voor een verval 3.50 m respectievelijk 4.10 m een maximale toelaatbare langse waterspiegelhelling van 0.32 ‰ respectievelijk 0.38 ‰ bekomen. Bemerk hierbij dat, op heden, een degelijk schip niet verschut wordt in de Berendrechtsluis. Bij het hanteren van dit criterium verdient het aanbeveling om na te gaan of een car carrier even grote krachten kan opnemen als een containerschip met dezelfde afmetingen. Na het opstellen van dit criterium werd de Kieldrechtsluis in

gebruik genomen. In deze sluis worden wel frequent car carriers verschut. Bij het verder uitwerken van het ontwerp voor de nieuwe sluis verdient het aanbeveling om dit criterium op te stellen aan de hand van geregistreerde passages van car carriers in de Kioldrechtssluis.

Een derde criterium wordt afgeleid uit metingen. In kader van het ontwerp van de nieuwe sluis te Zeebrugge heeft WL op 17 en 18 juli 2012 een terreinmeting uitgevoerd in de Vandammesluis (Vercruysse *et al.*, 2012). Tijdens deze terreinmeting werd op 8 plaatsen in de kolk de waterstand opgemeten. Uit deze waterstandmetingen worden vervolgens, de nivelleertijd, de stijgsnelheid, de afvoercoëfficiënt en de langse waterspiegelhellingen bepaald. De locaties van de waterstandmetingen in de Vandamme sluis en de hieruit berekende hellingen wordt gegeven in Figuur 10.

Figuur 10 – Terreinmeting Vandammesluis – locatie waterstandmetingen en berekende langse waterspiegelhellingen

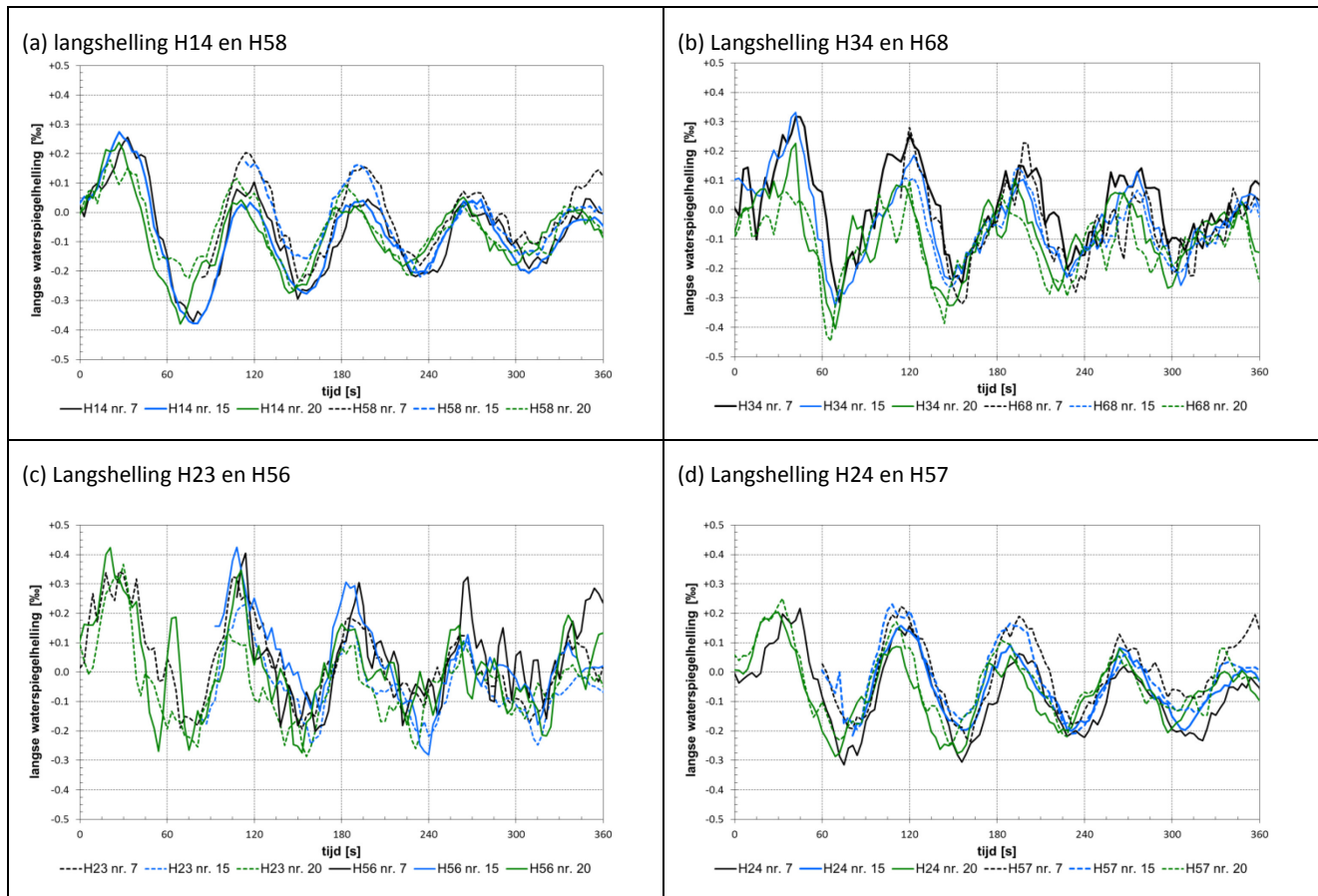


Uit de metingen volgde dat vullen via het bovenhoofd met een groot verval maatgevend is voor de optredende langse waterspiegelhellingen. Voor het bepalen van een criterium voor de maximale kracht op het schip worden de drie vullingen via het bovenhoofd met het grootste verval beschouwd. Dit zijn:

- nivellering nr. 7: peil achterhaven +3.58 TAW, peil voorhaven +0.71 m TAW, verval 2.86 m,
- nivellering nr. 15: peil achterhaven +3.60 m TAW, peil voorhaven +0.75 m TAW, verval 2.85 m,
- nivellering nr. 20: peil achterhaven +3.57 m TAW, peil voorhaven +1.02 m TAW, verval 2.55 m.

De waterpeilen werden gemeten met een tijdstap 3 s. Om de invloed van hoogfrequente fluctuaties te verminderen wordt een lopend gemiddelde over 3 tijdstappen (9 s) op de hellingen toegepast. De opgemeten langse waterspiegelhellingen worden gegeven in Figuur 11. Door de snelle opening van de vlinderkleppen in de Vandamme sluis (volledig open in ca. 40 s) dempen de langse waterspiegelhellingen na de eerste pieken uit. Hierom worden in de grafieken slechts de eerste 360 s van de nivellering voorgesteld.

Figuur 11 – Opgemeten langse waterspiegelhellingen Vandammesluis – vullen bovenhoofd met groot verval



Om na te gaan welke opgemeten langse waterspiegelhelling maatgevend is, wordt gekeken naar de tussenliggende lengte en de positie in de kolk. Bij een nivelleersysteem met openingen in de deur zal de kracht afnemen bij een toename van de afstand tot de vuldeur. Omdat een car carrier vermoedelijk op enige afstand van de deur wordt aangemeerd, wordt helling H14 met een afstand tot de vuldeur van 27.0 m en een tussenafstand van 358 m niet als representatief beschouwd. Het ontwerpschip, de Tomar, heeft een lengte 200 m. Om die reden wordt gekeken naar langse waterspiegelhellingen met een tussenafstand 160 m (i.e. H34, H23 en H56) en 200 m (i.e. H58). Voor het exceptioneel schip, de Tonsberg, met een lengte 260 m wordt gekeken naar de langse waterspiegelhelling met een tussenafstand 320 m (i.e. H24 en H57). Op basis van de in Figuur 11 gegeven langse waterspiegelhellingen wordt vervolgens voor de Tomar respectievelijk de Tonsberg een langse waterspiegelhelling van 0.40 % respectievelijk 0.30 % beschouwd als toelaatbare maximale langse waterspiegelhelling.

De verschillende criteria voor de langskracht worden samengevat in Tabel 6.

Tabel 6 – Criterium langskracht

schip	criterium 1		criterium 2		criterium 3	
	literatuur		LOCKSIM simulatie Berendrechtssluis		meting Vandamme sluis	
	waarde	oorsprong	waarde	oorsprong	waarde	oorsprong
Tomar	0.20 ‰	0.20 ‰ / 0.35 ‰	0.30 ‰	0.30 ‰ / 0.35 ‰	0.40 ‰	0.40 ‰
Tonsberg	0.15 ‰	0.15 ‰ / 0.20 ‰	0.30 ‰	0.32 ‰ / 0.38 ‰	0.30 ‰	0.30 ‰

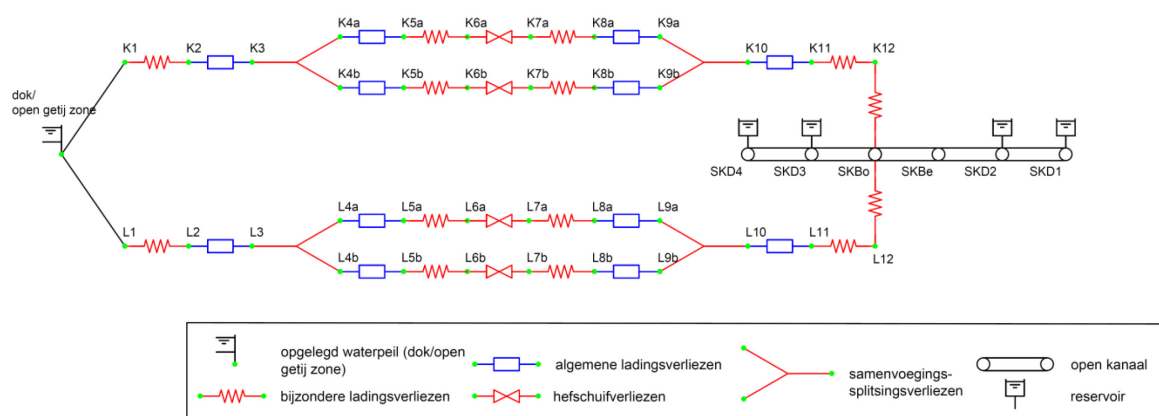
4 Bepalen benodigde doorstroomsectie

Voor het bepalen van de benodigde doorstroomsectie werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld van de voorontwerpgeometrie. Het hydraulisch netwerkmodel wordt besproken in paragraaf 4.1. De resultaten van de simulaties wordt gegeven in paragraaf 4.2. Een vergelijking van de dimensies van het nivelleersysteem met deze van de Antwerpse zeesluizen wordt gegeven in paragraaf 4.3.

4.1 Hydraulisch netwerkmodel

Het hydraulisch netwerkmodel bestaat uit een netwerkschema van gesloten leidingen, een open kanaal, lokale (tijdsafhankelijke) verliezen en splitsingen. Het netwerkschema voor de nieuwe sluis wordt gegeven in Figuur 12. WL heeft in het verleden een hydraulisch netwerkmodel opgesteld van de Zandvlietssluis, Berendrechtssluis, Kieldrechtssluis en de nieuwe Royerssluis in de haven van Antwerpen.

Figuur 12 – Hydraulisch netwerkmodel SHIP sluis voor nivelleren via bovenhoofd



Voor de geometrie van de omloopriolen en de sluiskolk wordt gebruik gemaakt van de door het studie bureau aangereikte voorontwerpplannen, zie paragraaf 2.1.1. Per component worden een aantal karakteristieken ingevuld. Voor de algemene ladingsverliezen (i.e. de wrijvingsverliezen in de omloopriolen) betreft dit de lengte, sectie, hydraulische diameter en wandruwheid. Voor de bijzondere ladingsverliezen (i.e. de verliezen ten gevolge van een bocht, sectiewijziging,...) wordt een waarde voor de verliescoëfficiënt (ξ) en een sectie opgegeven. De hefschuif component is gelijk aan een bijzonder ladingsverlies waarvan de verliescoëfficiënt een functie is van de hefhoogte. Voor het open kanaal wordt de breedte, de lengte en het aantal secties opgegeven. Ter hoogte van een schip wordt de vermindering van de natte sectie en de toename van de natte omtrek opgegeven aan de hand van de breedte en diepgang van het schip.

Het netwerkmodel van de korte en de lange omloopriool zijn identiek. De bijzondere ladingsverliezen en de algemene ladingsverliezen zijn evenwel verschillend. De sectie van de omloopriolen wordt gegeven in Tabel 7. De bijzondere en algemene ladingsverliezen van de omloopriolen worden samengevat in Tabel 8.

Tabel 7 – Doorstroomsectie omloopriolen

	breedte [m]	hoogte [m]	doorstroomsectie [m ²]	hydraulische diameter [m]
omloopriool	4.50	4.50	20.25	4.50
splitsing t.h.v. hefschuiven	2.25	4.50	10.13	3.00

Tabel 8 – Netwerkmodel omloopriolen voor initiële simulaties nieuwe sluis in het kader van het SHIP-project

knoop		type ladingsverlies	beschrijving	input ^[1]	
op- waarts	af- waarts			kort	lang
1	2	bijzonder	inlaat verliezen en bochten voor splitsing	$\xi_+ = 0.57 / \xi_- = 1.37$	$\xi_+ = 1.0 / \xi_- = 1.8$
2	3	algemeen	lengte leiding van inlaat tot splitsing	L = 31.9 m	L = 65.1 m
3	4	bijzonder	verliezen splitsen (of samenvoegen)	default ^[2]	default ≈ 0
4	5	algemeen	lengte leiding tussen splitsing en hefschuif	L = 22.0 m	L = 22.1 m
5	6	bijzonder	Verlies knik opwaarts hefschuif	$\xi = 0.0 / \xi = 0.06$ ^[3]	$\xi \approx 0.0$
6	7	bijzonder	hefschuifverliezen in functie van opening	$\xi(t)$	$\xi(t)$
7	8	bijzonder	Verlies knik afwaarts hefschuif	$\xi = 0.0 / \xi = 0.06$ ^[3]	$\xi \approx 0.0$
8	9	algemeen	lengte leiding tussen hefschuif en samenvoeging	L = 20.5 m	L = 20.7 m
9	10	bijzonder	verliezen samenvoegen (of splitsen)	default ≈ 0	default ≈ 0
10	11	algemeen	lengte leiding na samenvoeging t.e.m. halve lengte uitmonding	L = 18.4 m	L = 71.6 m
11	12	bijzonder	verliezen bochten tot uitmonding	$\xi = 0.0$	$\xi = 0.4$
12	SKBO ^[4]	bijzonder	verliezen uitmonding	$\xi_+ = 1.7 / \xi_- = 3.1$	$\xi_+ = 2.6 / \xi_- = 2.2$

[1] Sommige componenten hebben een verlies afhankelijk van de stroomrichting. Een “+” duidt op stroming van achterhaven of open getijzone naar de kolk (i.e. de normale stroomrichting bij sluisvulling) en een “-” duidt op stroming van de kolk naar achterhaven of open getijzone (i.e. de normale stroomrichting bij sluislediging).

[2] Standaardwaarden toegepast voor een splitsing of samenvoeging.

[3] Bemerk dat bij de korte omloopriool de splitsing asymmetrisch verloopt. Een van beide deelriolen loopt rechtdoor terwijl de andere langsij wordt gebracht, zie Figuur 3. Dit langsij brengen gebeurt door middel van een hoek in de splitsing/samenvoeging en hierop volgend een knik ter hoogte van de hefschuiven. Aan deze knik opwaarts en afwaarts de hefschuiven wordt een verlies $\xi = 0.06$ toegekend.

[4] SKBO = sluisolk bovenhoofd.

Bij Tabel 8 wordt het volgende opgemerkt:

- De inlaat heeft een verlies $\xi_+ = 0.2$ bij positieve stroming en bij het omkeren van de stroming een verlies $\xi_- = 1.0$. Dit zijn standaardwaarden voor een inlaat/uitlaat.
- De verliezen van bochten en knikken zijn begroot door middel van de diagrammen van Idel’Cik (1969), op basis van de geometrie uit het voorontwerpplan.
- Voor de splitsings- en samenvoegingsverliezen worden de default waarden uit LOCKSIM (bepaald op basis van Miller (1990)) overgenomen, hiervoor moeten de secties en de hoeken ingegeven worden.
- De verliezen van de uitstroomconstructie voor de korte en de lange omloopriool zijn overgenomen uit de studie voor de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2010a). Deze verliezen verschillen sterk tussen de korte en de lange omloopriool. Bij de korte omloopriool is de waarde voor ξ_- groter dan deze voor ξ_+ , terwijl dit bij de lange omloopriool omgekeerd is. De verliezen van de uitstroomconstructie zijn namelijk bepaald door het afregelen van de numerieke simulaties op opgemeten eenzijdige nivellerings in de Berendrechtsluis en verdisconteren hierdoor de modelon nauwkeurigheden (van het model van de Berendrechtsluis).
- Voor de omloopriolen en de kolk wordt een equivalente wandruwheid van 1.5 mm toegepast om de wrijvingsverliezen te begroten. In de literatuur wordt voor beton een waarde tussen 0.3 mm en 3.0 mm gevonden waarbij 0.3 mm van toepassing is voor nieuw glad beton en 3.0 mm voor oud beton (Munson *et al.*, 1990).

De kolk is uitgerust met roldeuren, namelijk twee roldeuren in elk sluishoofd. Bij gebruik van de buitenste roldeuren (met nrs. 1 en 4) bedraagt de kolkoppervlakte sensu strictu 17550 m². Bij het nivelleren van de kolk met de buitenste roldeuren wordt ook de oppervlakte van drie deurkamers mee genivelleerd en de binnen oppervlakte van de deur aan de zijde met het laagste peil. De oppervlakte van een deurkamer bedraagt 790. m² en de oppervlakte van een deur bedraagt 473 m². Bijgevolg bedraagt de totaal te nivelleren oppervlakte bij gebruik van de buitenste roldeuren 17550 m² + 3 x 790 m² + 473 m² = 20393 m². De extra te nivelleren oppervlakte per deur wordt ingebracht als een reservoir in het 1D netwerkmodel, zie Figuur 12.

De lengte van de “open kanalen” waaruit de kolk bestaat worden gegeven in Tabel 9. De kolkbodem ligt op -12.5 m TAW en de kolkbreedte bedraagt 45.0 m. De boeg van het ontwerpschip bevindt zich op knoop SB en het hek bevindt zich op knoop SH. De sectie met het schip wordt gekenmerkt door een reductie van de doorstroomsectie en een toename van de hydraulische omtrek.

Tabel 9 – Netwerkmodel kolk

knoop		lengte open kanaal [m]
opwaarts	afwaarts	
SKD4	SKD3	24.0
SKD3	SKBo	48.0
SKBo	SB	23.0
SB	SH	200.0
SH	SKBe	23.0
SKBe	SKD1	48.0
SKD1	SKD2	24.0

Dit hydraulisch netwerkmodel wordt gesimuleerd met het programma LOCKSIM (Schohl G.A., 1998). Dit programma werd ter beschikking gesteld van het WL door de ontwikkelaar Dr. G. Schohl (Tennessee Valley Authority, USA). LOCKSIM wordt courant gebruikt voor sluismodellering door de USACE (U.S. Army Corps of Engineers).

4.2 Simulaties ter bepaling doorstroomsectie

De simulaties voor het bepalen van de benodigde doorstroomsectie worden beperkt tot vullen via het bovenhoofd omdat dit de meest nadelige situatie is voor de optredende langskrachten. Enerzijds zijn de krachten tijdens vullen veelal groter dan tijdens ledigen. Anderzijds treedt het grootste verval en de kleinste kielspeling op tijdens vullen via het bovenhoofd. De uitgevoerde LOCKSIM simulaties worden samengevat in Tabel 10. Bemerk in deze tabel:

- De in hoofdstuk 2.1.1 voorgestelde geometrie met een doorstroomsectie 20.25 m^2 , wordt aangeduid met Geometrie 1. Daarnaast zijn drie variëte geometrieën gesimuleerd. Ten opzichte van geometrie 1 zijn volgende wijzigingen aangebracht:
 - Geometrie 2: Dit betreft een toename van de rioolsectie van 20.25 m^2 tot 25.00 m^2 . Deze wordt verwezenlijkt door zowel de breedte als de hoogte van omloopriolen met 0.5 m te laten toenemen tot 5.0 m.
 - Geometrie 3: De geometrie van de omloopriolen blijft behouden maar het bodempeil van de kolk wordt met 0.50 m verlaagd tot -13.0 m TAW .
 - Geometrie 4: Dit betreft een afname van de rioolsectie van 20.25 m^2 tot 16.00 m^2 . Dit wordt verwezenlijkt door zowel de breedte als de hoogte van de omloopriolen met 0.5 m te reduceren tot 4.0 m.
- De eerste set simulaties zijn beperkt tot het ontwerpverval (peil open getijzone $+3.5 \text{ m TAW}$ en een peil 0.0 m TAW in de achterhaven), de uiterste deurcombinatie (14) en het ontwerpschip in het midden van de kolk.
- De openingswet wordt zo aangepast dat het respectievelijke criterium voor de langskracht gerespecteerd blijft. Aangezien drie verschillende criteria voor de langskracht gedefinieerd zijn, worden per configuratie drie verschillende openingswetten opgesteld. De toegepaste openingswetten bestaan uit twee hefsnelheden: een eerste tragere hefsnelheid, gevolgd door een tweede snellere hefsnelheid. De openingswetten worden gegeven in bijlage A.

Tabel 10 – Initiële LOCKSIM simulaties vullen

simulatie nr.	geometrie	peil open getijzone [m TAW]	peil achterhaven [m TAW]	openingswet	deurcombinatie	criterium langskracht	schip
1	1	0.0	3.5	1	14	1	Tomar
2		0.0	3.5	2	14	2	Tomar
3		0.0	3.5	3	14	3	Tomar
4	2	0.0	3.5	4	14	1	Tomar
5		0.0	3.5	5	14	2	Tomar
6		0.0	3.5	6	14	3	Tomar
7	3	0.0	3.5	7	14	1	Tomar
8		0.0	3.5	8	14	2	Tomar
9		0.0	3.5	9	14	3	Tomar
10	4	0.0	3.5	10	14	1	Tomar
11		0.0	3.5	11	14	2	Tomar
12		0.0	3.5	12	14	3	Tomar

Voor elke simulatie wordt in bijlage B.1 een figuur gegeven met de nivelleerkromme, de variatie in de tijd van de openingswet, het debiet en de langse waterspiegelhelling (zowel tussen boeg en hek van het schip als de end-to-end waterspiegelhelling). De resultaten worden samengevat in Tabel 11, merk hierin op:

- Bij het toepassen van langskracht criterium nr. 1 bedraagt de nivelleertijd voor de voorontwerpgeometrie 15.4 min, wat beperkt hoger is dan de initieel door de opdrachtgever vooropgestelde waarde van 15.0 min.
- Bij het toepassen van langskracht criterium nr. 2 respectievelijk nr. 3 voor de voorontwerpgeometrie neemt de nivelleertijd af tot 14.5 min respectievelijk 13.7 min. Deze waarden zijn lager dan het initiële criterium voor de nivelleertijd van 15.0 min maar hoger dan de preferentiële maximale nivelleertijd van 12.0 min.
- Het vergroten van de doorstroomsectie van de omloopriolen van 20.25 m² tot 25.0 m², Geometrie 2, resulteert in een reductie van de nivelleertijd met 1.6 min tot 2.2 min (afhankelijk van het criterium voor de langskracht). Bij het toepassen van langskracht criterium nr. 2 wordt een nivelleertijd bekomen van 12.6 min wat nog beperkt hoger is dan de preferentiële nivelleertijd van 12 min. Bij het toepassen van langskracht criterium nr. 3 wordt een nivelleertijd bekomen van 11.5 min.
- Het verdiepen van de kolkbodem met 0.5 m tot -13.0 m TAW, Geometrie 3, zorgt voor een toename van de toelaatbare hefsnelheid en hierdoor een beperkte afname van de nivelleertijd met ca. 0.2 min.
- Het reduceren van de doorstroomsectie van de omloopriolen van 20.25 m² tot 16.0 m², Geometrie 4, resulteert in een toename van de nivelleertijd met ca. 3 min. Bij het toepassen van langskracht criterium nr. 1 wordt een nivelleertijd bekomen van 18.3 min wat nog beperkt hoger is dan het bijgestelde criterium van de nivelleertijd van 18 min. Bij het toepassen van langskracht criterium nr. 2 respectievelijk nr. 3 wordt een nivelleertijd bekomen van 17.4 min respectievelijk 16.8 min, deze waarden zijn lager dan het bijgestelde criterium van 18.0 min.

Tabel 11 – Resultaat initiële LOCKSIM simulaties SHIP sluis
nivelleertijd, heftijd, debiet, stijgsnelheid en langshelling over schip

simu- latie nr.	geometrie	criterium langs- kracht	verval	nivelleertijd		heftijd	debiet [m ³ /s]	stijg- snelheid [mm/s]	langshelling schip	
			[m]	[s]	[min]	[s]			min. [‰]	max. [‰]
1	1	1	3.5	925	15.4	450	134	6.4	0.20	-0.18
2		2	3.5	869	14.5	360	139	6.7	0.29	-0.25
3		3	3.5	822	13.7	240	152	7.3	0.38	-0.36
4	2	1	3.5	827	13.8	570	143	6.9	0.19	-0.20
5		2	3.5	755	12.6	390	162	7.7	0.28	-0.26
6		3	3.5	692	11.5	270	179	8.6	0.39	-0.38
7	3	1	3.5	916	15.3	420	137	6.5	0.19	-0.18
8		2	3.5	855	14.3	330	141	6.8	0.28	-0.25
9		3	3.5	815	13.6	225	153	7.3	0.39	-0.34
10	4	1	3.5	1097	18.3	390	115	5.5	0.20	-0.16
11		2	3.5	1041	17.4	270	122	5.9	0.27	-0.22
12		3	3.5	1008	16.8	210	125	5.9	0.38	-0.31

In overleg met de opdrachtgever werd besloten om geometrie 4 te weerhouden voor de simulaties.

4.3 Vergelijking

In deze paragraaf worden de dimensies vergeleken met de dimensies van de sluizen in de haven van Antwerpen. Om een vergelijking mogelijk te maken worden de eenheden dimensieloos gemaakt door deze te delen door een karakteristieke waarde. Volgende dimensieloze karakteristieke verhoudingen worden vergeleken:

- Verhouding van de doorstroomsectie van de omloopriolen tot het kolkoppervlak.
- Verhouding van de doorstroomsectie van de uitstroomopeningen tot de doorstroomsectie van de omloopriool.
- De hoogte/breedte verhouding van de uitstroomopeningen.
- Verhouding van de hoogte van de uitstroomopeningen tot de hoogte van de omloopriool.

De dimensies en de dimensieloze karakteristieke verhoudingen worden gegeven in Tabel 12. De gebruikte waarden van de Antwerpse zeesluizen worden overgenomen uit Verelst *et al.* (2015).

Tabel 12 – Vergelijking afmetingen omloopriolen en uitstroomconstructie Antwerpse zeesluizen

			Boude- wijn sluis	Zand- vliet sluis	Kallo- sluis	Beren- drecht- sluis	Kiel- drecht- sluis	vernieuwde Royers- sluis	nieuwe sluis Zeebrugge
kolk	lengte	m	360	500	360	500	500	250	390
	breedte	m	45	57	50	68	68	36	45
	oppervlak	m ²	16200	28500	18000	34000	34000	9000	17550
	bodempeil	TAW	-10.33	-13.58	-12.58	-13.58	-17.8	-6.41	-12.5
omloopriool	breedte	m	5.00	6.50	5.50	7.00	7.00	4.00	4.00
	hoogte	m	5.50	6.00	6.00	7.00	7.00	4.00	4.00
	doorstroomsectie	m ²	27.5	39	33	49	49	16	16
uitstroom- constructie	aantal	-	6	6	6	7	7	6	5
	breedte	m	4.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00	3.60
	hoogte	m	2.00	2.70	2.00	3.25	3.25	1.50	2.20
	doorstroomsectie	m ²	48	81	60	113.75	113.75	36	36
doorstroomsectie uitstroomopeningen kolkoppervlak		%	3.4	2.7	3.7	2.9	2.9	3.6	1.8
doorstroomsectie uitstroomopeningen doorstroomsectie omloopriool		-	1.75	2.08	1.82	2.32	2.32	2.25	2.25
hoogte uitstroomopening breedte uitstroomopening		-	0.50	0.54	0.40	0.65	0.65	0.38	0.56
hoogte uitstroomopening hoogte omloopriool		-	0.36	0.45	0.33	0.46	0.46	0.38	0.50

Uit Tabel 12 volgt dat de verhouding van de doorstroomsectie van de omloopriolen van de nieuwe sluis te Zeebrugge ten opzichte van het kolkoppervlak 1.8 % bedraagt. Dit is merklijk lager dan voor de sluizen in de haven van Antwerpen waar de doorstroomsectie van de omloopriolen tussen 2.7 % en 3.6 % bedraagt van het kolkoppervlak. De verklaring hiervoor is de gunstigere combinatie van ontwerpverval en nivelleertijd voor de nieuwe sluis in Zeebrugge. Het ontwerpverval en nivelleertijd voor de sluizen in de haven van Antwerpen en de nieuwe sluis in Zeebrugge wordt gegeven in Tabel 13. Bemerkt in deze tabel dat het WL geen gegevens heeft voor de Kallosluis en de Berendrechtssluis. Uit de tabel volgt dat het ontwerpverval voor de nieuwe sluis te Zeebrugge merklijk lager ligt (3.5 m ten opzichte van 5.0 m tot 5.4 m) en dat de toegelaten nivelleertijd bij het ontwerpverval hoger ligt (18 min ten opzichte van 12.0 min tot 16.2 min).

Tabel 13 – Vergelijking ontwerpverval en nivelleertijd Antwerpse zeesluizen

	ontwerpverval [m]	nivelleertijd bij ontwerpverval [min]	bron
Boudewijnsluis	5.0	15.0	(Lamoen, 1950)
Zandvlietsluis	5.0	15.0	(Smets & Sterling, 1961)
Kieldrechtssluis	5.5	16.2	(De Mulder <i>et al.</i> , 2010b)
vernieuwde Royerssluis	5.4	12.0	(Verelst <i>et al.</i> , 2013)
nieuwe sluis Zeebrugge	3.5	18.0	

In Tabel 12 worden ook drie dimensieloze verhoudingen voor de uitstroomconstructie gegeven. De verhouding van de doorstroomsectie van de uitstroomopeningen tot de doorstroomsectie van de omloopriool bedraagt 2.25 voor de nieuwe zeesluis Zeebrugge. Dit komt ongeveer overeen met de verhouding voor de Berendrechtssluis, Kieldrechtssluis en vernieuwde Royerssluis. De verhouding van de hoogte van de uitstroomopening tot de breedte van de uitstroomopening bedraagt 0.56 voor de nieuwe zeesluis Zeebrugge. Deze waarde ligt binnen de range van de overige sluizen (0.38 tot 0.65). Bemerkt dat voor de Royerssluis bewust werd gekozen voor een in verhouding lage hoogte van de uitstroomopening om het risico te beperken dat de stroming uit de opening in contact komt met de boeg van een schip aangemeerd voor de uitstroomconstructie. De hoogte van de uitstroomopening tot de hoogte van de omloopriool bedraagt 0.50 voor de nieuwe zeesluis Zeebrugge. Voor de overige sluizen ligt deze verhouding binnen de range 0.33 tot 0.46. De dimensieloze verhoudingen voor de uitstroomconstructie van de nieuwe sluis te Zeebrugge liggen in lijn met deze van de Antwerpse zeesluizen.

5 Simulaties hydraulisch netwerkmodel

Op basis van de simulaties uitgevoerd in hoofdstuk 4 werd in overleg met aMT de benodigde sectie van de omloopriolen bepaald: namelijk een rioolhoogte 4.0 m en een rioolbreedte 4.0 m. De door het studiebureau opgestelde voorontwerpgeometrie (met rioolbreedte 4.5 m en rioolhoogte 4.5 m) werd door WL aangepast naar deze sectie, zie paragraaf 2.1.2. Op basis van deze bijgewerkte geometrie werden de bijzondere ladingsverliezen van het hydraulisch netwerkmodel opnieuw opgesteld, zie paragraaf 5.1. Met dit bijgewerkte hydraulisch netwerkmodel worden vervolgens simulaties uitgevoerd, zie paragraaf 5.2.

5.1 Hydraulisch netwerkmodel

Om een goede vergelijking mogelijk te maken tussen de verliezen volgende uit de CFD studie en de verliezen uit het hydraulisch netwerkmodel worden de verliezen in deze paragraaf in detail opgesteld. Hiervoor wordt in deze paragraaf meer in detail ingegaan op de verliezen dan in paragraaf 4.1. Het schema van het nieuwe hydraulisch netwerkmodel komt overeen met het vorig schema, zie Figuur 12 in paragraaf 4.1.

Dit schema bestaat uit een aaneenschakeling van bijzondere ladingsverliezen en algemene ladingsverliezen. De algemene ladingsverliezen brengen de ladingsverliezen ten gevolge van wandwrijving en de inertie van water in rekening. De bijzondere ladingsverliezen brengen enkel een ladingsverlies in rekening en bevatten dus geen inertie. De bijzondere ladingsverliezen betreffen de inlaat, de bochten, de hefschuifverliezen, de splitsing en samenvoeging en de uitstroomconstructie. De lengte van de algemene ladingsverliezen wordt zo bepaald dat de massa in de bijzondere ladingsverliezen hierin ook meegenomen wordt. Het ladingsverlies van de bijzondere en algemene verliezen worden berekend als volgt:

$$\text{Bijzondere ladingsverliezen: } \Delta H = \xi \cdot \frac{Q^2}{2g \cdot A^2}$$

$$\text{Algemene ladingsverliezen: } \Delta H = \frac{f \cdot l}{D_H} \cdot \frac{Q^2}{2g \cdot A^2}$$

Met

- ΔH Ladingsverlies [m]
- ξ Verliescoëfficiënt [-]
- f Wrijvingsfactor [-]
- l Lengte leiding [m]
- D_H Hydraulische diameter (omloopriool = 4.0 m, ter plaatse van de hefschuiven = 2.67 m) [m]
- Q Debiet [m³/s]
- g Valversnelling = 9.81 m/s² [m/s²]
- A Doorstroomsectie (omloopriool = 8.0 m², ter plaatse van de hefschuiven = 4.0 m²) [m²]

Uitstroomconstructie

In kader van het ontwerp van de Kieldrechtssluis werd een LOCKSIM model opgesteld van de Berendrechtssluis en Zandvlietssluis. Voor de kalibratie van het netwerkmodel van de Berendrechtssluis werd gebruik gemaakt van opgemeten schuttingen waarbij eenzijdig genivelleerd werd. Op deze wijze kan een afzonderlijke kalibratie uitgevoerd worden van de korte en de lange omloopriool. Tijdens de kalibratie werden de verliezen van de uitstroomconstructie aangepast tot een goede overeenkomst werd bekomen tussen de opgemeten en gesimuleerde nivelleerkromme. De zo bekomen verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie verdisconteert ook de fouten op de overige begrootte verliescoëfficiënten. De voor

het hydraulisch netwerkmodel van de Berendrecht- en Kieldrechtssluis gehanteerde verliescoëfficiënten voor de uitstroomconstructie worden gegeven in Tabel 14. Deze worden overgenomen in de simulaties voor de nieuwe sluis.

Tabel 14 – Verliescoëfficiënt uitstroomconstructie

stroomrichting	korte omloopriool	lange omloopriool
positief (vullen kolk)	$\xi_+ = 1.7$	$\xi_+ = 2.6$
negatief (ledigen kolk)	$\xi_- = 3.1$	$\xi_- = 2.2$

Inlaat

Voor de inlaat zijn de verliezen bij instroming afhankelijk van de afrondingsstralen. In de handleiding van LOCKSIM (Schohl G.A., 1998) wordt een coëfficiënt $\xi = 0.20$ aanbevolen voor inlaatopeningen waarvan geen betrouwbare empirische gegevens beschikbaar zijn en waarbij enige afronding van de randen is aangebracht, met als doel de inlaatverliezen te beperken, en waarbij op basis van schaalmodelonderzoek is aangetoond dat wervelvorming te verwaarlozen is. Bij uitstroming gaat in principe alle kinetische energie verloren in warmte en is $\xi = 1$. Bij gebruik van een diffusor zou eventueel een lagere coëfficiënt toegepast kunnen worden.

In deze studie wordt voor de inlaat een waarde $\xi_+ = 0.20$ weerhouden bij instroming en $\xi_- = 1.00$ weerhouden bij uitstroming. Dit is analoog met het LOCKSIM model van de Berendrechtssluis. Doordat de verliezen van de uitstroomconstructie overgenomen worden van deze van het model van de Berendrechtssluis heeft het aanbeveling om ook de verliezen van de inlaat gelijk te houden.

Bochten

De ladingsverliezen in bochten zijn te wijten aan het loslaten van de stroming langs de binnenbocht en/of het ontstaan van een secundaire helicoïdale stroming. De bochten in het horizontaal vlak worden gekenmerkt door een afrondingstraal. De afrondingstraal van de buiten- en binnenbocht wordt getrokken vanuit hetzelfde centerpunt. De straal van de buitenbocht is hierdoor groter dan de binnenbocht. Voor het bepalen van de verliezen van een dergelijk type bocht worden in dit rapport de formules en diagrammen gegeven in Idel'Chik (1969) blz. 192 gebruikt. De verliezen voor de bochten in het horizontaal vlak met de input karakteristieken worden gegeven in Tabel 15. In de formule wordt rekening gehouden met een toeslag ten gevolge van het Reynoldsgetal en de wandruwheidslengte. De wandwrijving zelf wordt meegenomen in de algemene ladingsverliezen.

Tabel 15 – Ladingsverliezen horizontale bochten met afrondingstraal

riool	component	hoek [°]	R_0 [m]	D_H [m]	R_0/D_H [-]	a_0/b_0 [-]	k [m]	Re [-]	ξ_{bocht} [-]
kort	K1-K2	90	4.5	4.00	1.125	1.0	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.273
lang	L11-L12	90	5.25	4.00	1.125	1.0	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.248
lang	L11-L12	45	3.75	4.00	0.940	1.0	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.216

R_0 Bochtstraal op centerlijn
 D_H Hydraulische diameter ($=4 \cdot A/P$)
 A Rioolsectie = 8.0 m^2
 P Natte omtrek = 16.0 m
 a_0 Hoogte riool

[m] b_0 Breedte riool [m]
 [m] k Wandruwheid [m]
 [m²] Re Reynoldsgetal ($Re = (Q/A) \cdot D_H / \nu$) [m]
 [m] Q Debiet (volgend uit LOCKSIM) [m]
 [m] ν Kinematische viscositeit = $1.141 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [m²/s]

In tegenstelling tot de bochten in het horizontaal vlak hebben de bochten in het verticale vlak geen bochtstraal. Ook de knikken in het horizontaal vlak ter hoogte van de hefschuiven hebben geen bochtstraal. Voor het bepalen van de verliezen van een dergelijk type bocht worden in dit rapport de formules en diagrammen gegeven in Idel’Cik (1969) blz. 202 gebruikt. De ladingsverliezen voor de bochten zonder afrondingsstraal worden samen met de input karakteristieken gegeven in Tabel 16.

Tabel 16 – Ladingsverliezen bochten zonder afrondingstraal

omloopriool	component	aantal	hoek [°]	a0/b0 [-]	k [m]	Re [-]	ξ_{bocht} [-]
kort	K1-K2	2	18°	1.0	0.0015	$>4 \cdot 10^4$	0.150
kort	K5b-K6b	1	7°	2.0	0.0015	$>4 \cdot 10^4$	0.048
kort	K7b-K8b	1	7°	2.0	0.0015	$>4 \cdot 10^4$	0.048
lang	L1-L2	1	12°	1.0	0.0015	$>4 \cdot 10^4$	0.089
lang	L5a-L6a & L5b-L6b	1	12°	2.0	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.080
lang	L7a-L8a & L7b-L8b	1	12°	2.0	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.080
lang	L11-L12	1	12°	1.0	0.0015	$>4 \cdot 10^4$	0.089

a_0	Hoogte riool	[m]	Q	Debiet (volgend uit LOCKSIM)	[m]
b_0	Breedte riool	[m]	ν	Kinematische viscositeit = $1.141 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	[m ² /s]
k	Wandruwheid	[m]	A	Rioolsectie = 8.0 m^2 ; 4.0 m^2 (afhankelijk van locatie)	[m ²]
Re	Reynoldsgetal ($Re = (Q/A) \cdot D_H / \nu$)	[m]			

Hefschuifverliezen

De verliezen ten gevolge van de hefschuif worden bepaald volgens de formule voor een bijzonder ladingsverlies. De doorstroomsectie wordt constant gehouden en de verliescoëfficiënt is functie van de hefhoogte. Een gesloten hefschuif komt overeen met een oneindig hoog verlies en een open hefschuif komt overeen met geen verlies. Voor het simuleren van de troskrachten is het noodzakelijk dat de ingevoegde tabel met verliescoëfficiënt in functie van hefhoogte niet gekenmerkt wordt door plotse sprongen. In kader van het opstellen van het LOCKSIM model voor de Kieldrechtssluis (De Mulder *et al.*, 2007) werd de stapgrootte van de verliezen gegeven in (Idel’Cik, 1969) blz. 336 verfijnd door middel van extrapolatie en interpolatie. Deze aangepaste hefschuifverliezen worden ook hier toegepast. Zie Tabel 17.

Tabel 17 – Hefschuifverliezen in functie van hefhoogte (op basis van (Idel’Cik, 1969) blz. 336)

$\theta = \delta/H$	ξ_{schuif}	$\theta = \delta/H$	ξ_{schuif}	$\theta = \delta/H$	ξ_{schuif}
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.000	1000000	0.095	226	0.550	2.9
0.005	176000	0.100	193	0.575	2.46
0.010	36700	0.125	130	0.600	2.08
0.015	14700	0.150	87	0.625	1.74
0.020	7650	0.175	60	0.650	1.43
0.025	4620	0.200	44.5	0.675	1.16
0.030	3060	0.225	34.6	0.700	0.95
0.035	2160	0.250	27.3	0.725	0.776
0.040	1600	0.275	21.8	0.750	0.625
0.045	1220	0.300	17.8	0.775	0.497
0.050	964	0.325	14.6	0.800	0.390
0.055	777	0.350	11.9	0.825	0.295
0.060	638	0.375	9.78	0.850	0.208
0.065	533	0.400	8.12	0.875	0.138
0.070	450	0.425	6.79	0.900	0.090
0.075	385	0.450	5.68	0.925	0.0565
0.080	333	0.475	4.76	0.950	0.0277
0.085	290	0.500	4.02	0.975	0.00757
0.090	255	0.525	3.41	1.000	0.00100

Met θ = relatieve hefhoogte [-], δ = hefhoogte schuif [m], H = hoogte riool [m] (= 4.0 m)

Algemene ladingsverliezen

De algemene ladingsverliezen betreffen de verliezen ten gevolge van wandwrijving. Deze zijn een functie van de wandruwheid, de hydraulische diameter, het Reynoldsgetal en de snelheid. In de LOCKSIM simulatie worden de wrijvingsverliezen berekend door middel van volgende expliciete benadering van de algemene vergelijking van White-Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log_{10} \left[\frac{\varepsilon / D_H}{3.7} - \frac{5.02}{\text{Re}} \log_{10} \left(\frac{\varepsilon / D_H}{3.7} + \frac{13}{\text{Re}} \right) \right].$$

Met

f	Wrijvingsfactor	[-]
D_h	Hydraulische diameter (4.00 m of 2.67 m)	[m]
ε	Wandruwheid = 0.0015 m	[m]
Re	Reynoldsgetal $\text{Re} = \frac{(Q/A)D_H}{\nu}$	[m]
Q	Debiet (volgend uit LOCKSIM)	[m]
A	Doorstroomsectie (16.0 m ² of 8.0 m ²)	[-]
ν	Kinematische viscositeit = 1.141 10 ⁻⁶ m ² /s	[m ² /s]

Verliezen

De verliezen van de verschillende componenten van het hydraulisch netwerkmodel worden in Tabel 18 samengevat voor de korte omloopriool en in Tabel 26 voor de lange omloopriool. Deze verliezen zijn afgeleid uit de resultaten van een LOCKSIM simulatie. De algemene ladingsverliezen zijn onderhevig aan wandwrijving en inertie. Om de inertiecomponent niet mee te nemen is voor het bepalen van de verliezen een steady-state simulatie uitgevoerd. Uit de tabellen volgt dat de bijzondere ladingsverliezen de belangrijkste component zijn van de totale ladingsverliezen. Voor de lange omloopriool en vullen met de korte omloopriool betreffen de bijzondere ladingsverliezen ca. 80 % van de totale ladingsverliezen. Voor ledigen met de korte omloopriool betreffen de bijzondere ladingsverliezen 89 % van de totale ladingsverliezen.

Tabel 18 – Bijzondere en algemene ladingsverliezen korte omloopriool

component	type	beschrijving	doorstroom- sectie [m ²]	verliezen	
				positief	negatief
K1-K2	bijzonder	inlaat + bochten	16.0	0.77	1.57
K2-K3	algemene	inlaat tot splitsing	16.0	0.14	0.14
K3-K4a	bijzonder	splitsing	16.0 → 8.0	0.01	0.01
K3-K4b	bijzonder	splitsing	16.0 → 8.0	0.05	-0.09
K4a-K5a	algemene	splitsing tot hefschuiven	8.0	0.12	0.12
K4b-K5b	algemene	splitsing tot hefschuiven	8.0	0.12	0.12
K5a-K6a	bijzondere	knik 0°	8.0	0.00	0.00
K5b-K6b	bijzondere	knik 7°	8.0	0.05	0.05
K6a-K7a	bijzondere	hefschuifverliezen	8.0	0.00	0.00
K6b-K7b	bijzondere	hefschuifverliezen	8.0	0.00	0.00
K7a-K8a	bijzondere	knik 0°	8.0	0.00	0.00
K7b-K8b	bijzondere	knik 7°	8.0	0.05	0.05
K8a-K9a	algemene	hefschuiven tot samenvoeging	8.0	0.11	0.11
K8b-K9b	algemene	hefschuiven tot samenvoeging	8.0	0.11	0.11
K9a-K10	bijzondere	samenvoeging	8.0 → 16.0	0.01	0.01
K9b-K10	bijzondere	samenvoeging	8.0 → 16.0	-0.09	0.05
K10-K11	algemene	samenvoeging tot uitstroomconstructie	16.0	0.19	0.19
K11-K12	bijzondere	geen verliezen	16.0	0.00	0.00
K12-SK	algemene	uitstroomconstructie	16.0	1.70	3.10
Algemene verliezen			16.0	0.56	0.56
Bijzondere verliezen			16.0	2.51	4.71
Totaal			16.0	3.07	5.27

Tabel 19 – Bijzondere en algemene ladingsverliezen lange omloopriool

component	type	beschrijving	sectie	verliezen pos	verliezen neg
L1-L2	bijzonder	inlaat + bocht	16.0	0.29	1.09
L2-L3	algemene	inlaat tot splitsing	16.0	0.20	0.20
L3-L4b	bijzonder	splitsing	16.0 → 8.0	0.03	-0.03
L3-L4b	bijzonder	splitsing	16.0 → 8.0	0.03	-0.03
L4a-L5a	algemene	splitsing tot hefschuiven	8.0	0.14	0.14
L4b-L5b	algemene	splitsing tot hefschuiven	8.0	0.14	0.14
L5a-L6a	bijzondere	knik 12°	8.0	0.08	0.08
L5b-L6b	algemene	knik 12°	8.0	0.08	0.08
L6a-L7a	bijzondere	hefschuifverliezen	8.0	0.00	0.00
L6b-L7b	bijzondere	hefschuifverliezen	8.0	0.00	0.00
L7a-L8a	bijzondere	knik 12°	8.0	0.08	0.08
L7b-L8b	bijzondere	knik 12°	8.0	0.08	0.08
L8a-L9a	algemene	hefschuiven tot samenvoeging	8.0	0.13	0.13
L8b-L9b	algemene	hefschuiven tot samenvoeging	8.0	0.13	0.13
L9a-L10	bijzondere	samenvoeging	8.0 → 16.0	-0.03	0.03
L9b-L10	bijzondere	samenvoeging	8.0 → 16.0	-0.03	0.03
L10-L11	algemene	bochten na samenvoeging	16.0	0.38	0.38
L11-L12	bijzondere	samenvoeging tot uitstroomconstructie	16.0	0.77	0.77
L12-SKBo	algemene	uitstroomconstructie	16.0	2.60	2.20
Algemene verliezen			16.0	0.85	0.85
Bijzondere verliezen			16.0	3.82	4.22
Totaal			16.0	4.67	5.07

Kolk

De kolk is opgedeeld in open leiding componenten. De componenten waaruit de kolk is opgebouwd worden gegeven in Tabel 20. De component SKBe respectievelijk SKBo komt overeen met het midden van de uitstroomconstructie in het benedenhoofd respectievelijk het bovenhoofd. De component SKD1 tot en met SKD4 komt overeen met de kolkzijde van de respectievelijk roldeur. De component SB respectievelijk SH komt overeen met de boeg respectievelijk het hek van het in de kolk aangemeerd schip.

Tabel 20 – Componenten kolk

Tomar			Tonsberg		
component	lengte	lengte ruimtelijke stap (# stappen)	component	lengte	lengte ruimtelijke stap (# stappen)
SKD1- SKD2	24.0	8.0 m (3)	SKD1- SKD2	24.0	8.0 m (3)
SKD2- SKBe	49.1	9.8 m (5)	SKD2- SH	38.5	9.6 m (4)
SKBe- SH	21.9	7.3 m (3)	SH – SKBe	10.6	10.6 m (1)
SH- SB	200.0	10.5 m (19)	SKBe - SKBo	243.8	10.6 m (23)
SB- SKBo	21.9	7.3 m (3)	SKBo – SB	10.6	10.6 m (1)
SKBo- SKD3	49.1	9.8 m (5)	SB - SKD3	38.5	9.6 m (4)
SKD3- SKD4	24.0	8.0 m (3)	SKD3- SKD4	24.0	8.0 m (3)

In de LOCKSIM berekeningen wordt de lengte van de “open kanaal” componenten opgedeeld in een aantal ruimtelijke stappen Δx met een identieke lengte. Om redenen van nauwkeurigheid bedraagt de maximale lengte van een ruimtelijke stap:

$$\Delta x_{\max} = \Delta t \cdot \sqrt{g \left(\frac{A}{B} \right)_{\min}} \quad (\text{Schohl G.A., 1998})$$

Met:

- $\Delta x_{\max}$ Maximale stap [m]
- Δt Timestep simulaties = 1 s [s]
- g Valversnelling = 9.81 m/s² [m/s²]
- A Natte sectie bij minimum kolkpeil
= waterhoogte x kolkbreedte = (0.0 m TAW – –12.5 m TAW) x 45 m = 562 m² [m²]
- B Kolkbreedte = 45 m [m]

$$\Delta x_{\max} = 1 \cdot \sqrt{9.81 \cdot \left(\frac{562}{45} \right)} = 11.1 \text{ m}$$

De kolk is uitgerust met roldeuren, namelijk twee roldeuren in elk sluishoofd. Bij gebruik van de buitenste roldeuren (nr. 1 en nr. 4) bedraagt de kolkoppervlakte 17550 m². Bij het nivelleren van de kolk met de buitenste roldeuren wordt ook de oppervlakte van de twee binnenste deuren mee genivelleerd en de deurenkamer en het binnenoppervlak van de deur aan de zijde van het laagste peil. De in dit rapport uitgevoerde simulaties zijn alle voor een peil in de open getijzone lager dan het peil in de achterhaven. De mee te nemen oppervlakken per deurenkamer worden gegeven in Tabel 21.

Tabel 21 – Mee te nivelleren oppervlak per deurkamer [m²]

	open getijzone < peil achterhaven
D1	1262
D2	790
D3	790
D4	0

Nummering deuren oplopend van open getijzone naar achterhaven

Parameters LOCKSIM simulatie

De LOCKSIM simulaties worden uitgevoerd met een tijdstap van 1 s. Deze waarde volgde uit een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd bij het opstellen van de hydraulische netwerkmodellen in het kader van het ontwerp van de Kieldrechtssluis (De Mulder *et al.*, 2007). Tabel 22 geeft een overzicht van de waarden voor de variabelen uit de invoerfile van LOCKSIM, waarvoor afgeweken wordt van de default waarden. De gekozen waarden komen overeen met deze gebruikt voor de numerieke modellen in het kader van het ontwerp van de Kieldrechtssluis (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a; b).

Tabel 22 – Parameters LOCKSIM simulaties waarbij afgeweken wordt van de default waarde

kinematische viscositeit (voor zoet water bij een temperatuur 15°)		1.41 x 10 ⁻⁶ m ² /s
nauwkeurigheid voor beëindigen iteraties	Debiet (Dq_max)	0.001 m ³ /s
	Piëzometrische hoogte (Dh_max)	0.0001 m
	Lengte (Dx_max)	0.0001 m

5.2 Simulaties

De uitgevoerde simulaties met het aangepaste netwerkmodel worden samengevat in Tabel 23. Er zijn drie situaties gesimuleerd: het vullen van de kolk met het ontwerpschip Tomar bij het maatgevend verval, het vullen van de kolk met het aan het exceptioneel schip Tonsberg aangepaste verval, het ledigen van de kolk met het ontwerpschip en het maatgevend verval. Per situatie wordt per criterium voor de langskracht een simulatie uitgevoerd. Voor de simulaties met het ontwerpschip Tomar in de sluiskolk wordt de openingswet zo opgesteld dat het betreffende criterium voor de langskracht niet overschreden wordt. Voor de simulaties met het exceptioneel schip (de Tonsberg) in de sluiskolk wordt de openingswet opgesteld voor het ontwerpschip behouden maar wordt het peil in de open getijzone verhoogd. Op deze wijze kan met een nivelleersysteem geoptimaliseerd voor het ontwerpschip ook het exceptioneel schip genivelleerd worden. Merk hiernaast op dat bij het ontwerppeil in de open getijzone de kielspeling onder het exceptioneel schip slechts 0.20 m bedraagt.

Tabel 23 – Uitvoerde simulaties hydraulisch netwerkmodel versie 2

simulatie nr.	type	peil open getijzone [m TAW]	peil achter- haven [m TAW]	openings- wet	deur- combi natie	criterium langs kracht	schip
13	vullen	0	3.5	13	14	1	Tomar
14	vullen	0	3.5	14	14	2	Tomar
15	vullen	0	3.5	15	14	3	Tomar
16	vullen	1.0	3.5	13	14	1	Tonsberg
17	vullen	1.0	3.5	14	14	2	Tonsberg
18	vullen	1.0	3.5	15	14	3	Tonsberg
19	ledigen	0	3.5	16	14	1	Tomar
20	ledigen	0	3.5	17	14	2	Tomar
21	ledigen	0	3.5	18	14	3	Tomar

Naast bovenstaande simulaties worden ook drie steady-state simulaties uitgevoerd, zie Tabel 24. De opgelegde (constante) peilen en hefschuif positie komt overeen met de CFD simulaties zodat een rechtstreekse vergelijking mogelijk is. Uit deze simulaties worden ook de inertie onafhankelijke algemene ladingsverliezen en bijzondere ladingsverliezen bepaald die in Tabel 18 en Tabel 19 worden gegeven.

Tabel 24 – Steady state simulaties voor bepaling verliescoëfficiënt

Simulatie nr.	type	peil open getijzone [m TAW]	kolkpeil [m TAW]	peil achter- haven [m TAW]	hefhoogte [%]	deur combi- natie
22	vullen	/	0.06	3.50	20	14
23	vullen	/	0.83	3.50	100	14
24	ledigen	0.00	3.02	/	100	14

Voor elke simulatie wordt in bijlage B.2 een figuur gegeven met de nivelleerkromme, de variatie in de tijd van de openingswet, het debiet en de langse waterspiegelhelling (zowel tussen boeg en hek van het schip als de end-to-end waterspiegelhelling). De resultaten worden samengevat in Tabel 25. Merk hierin op dat voor vullen via het bovenhoofd met het ontwerpschip en de ontwerppeilen voor de drie langskracht criteria voldaan wordt aan de gewenste nivelleertijd van 18 min. Bij het respecteren van het meest strikte criterium (nr. 1) wordt een nivelleertijd 18.1 min bekomen, bij het soepelste criterium (nr. 3) wordt een nivelleertijd 16.6 min bekomen. Voor ledigen via het benedenhoofd met het ontwerpschip en de ontwerppeilen wordt voor de drie langskracht criteria niet voldaan aan de gewenste nivelleertijd van 18 min. Bij het respecteren van het meest strikte criterium (nr. 1) wordt een nivelleertijd 19.6 min bekomen en bij het soepelste criterium (nr. 3) wordt een nivelleertijd 18.9 min bekomen. Bij vullen worden de schuiven geopend in 3.5 min tot 6.5 min. Bij ledigen worden de schuiven geopend in 2.0 min tot 4.0 min. De schuiven openen dus relatief snel ten opzichte van de nivelleertijd van de sluis (17 min tot 20 min). Rekening houdend met de snellere opening van de schuiven bij ledigen is het overschrijden van het criterium voor de nivelleertijd bij ledigen te wijten aan de grotere verliezen in het hydraulisch netwerkmodel bij ledigen. Om ook bij de maatgevende lediging het criterium voor de nivelleertijd te halen dient de sectie van de riolen vergroot te

worden. Uit de simulaties volgt dat met behoud van de openingswet het exceptioneel schip de Tonsberg genivelleerd kan worden vanaf een peil + 1.0 m TAW in de open getijzone. Bij een peil +1.00 m TAW in de open getijzone bedraagt de kielspeling onder het exceptioneel schip 1.2 m. De maximale stijg- en daalsnelheid bedraagt ca. 6.0 mm/s. Dit is lager dan de waarde van 8 à 9 mm/s volgend uit de simulaties voor de Berendrechtsluis bij een verval van 4.0 m.

Tabel 25 – Resultaat initiële LOCKSIM simulaties SHIP sluis
nivelleertijd, heftijd, debiet, stijgsnelheid en langshelling over schip

simu- latie nr.	criteria langs- kracht	verval	nivelleertijd		heftijd	max. debiet [m ³ /s]	stijg- snelheid [mm/s]	langshelling schip	
		[m]	[s]	[min]	[s]			max. [‰]	max. [‰]
25	1	3.5	1089	18.2	390	112	5.5	0.19	-0.16
26	2	3.5	1035	17.3	270	119	6.0	0.22	-0.27
27	3	3.5	1003	16.7	210	122	6.0	0.31	-0.37
28	1	2.5	930	15.5	390	91	4.5	0.15	-0.12
29	2	2.5	873	14.6	270	98	5.0	0.20	-0.17
30	3	2.5	845	14.1	210	101	5.0	0.29	-0.23
31	1	-3.5	1177	19.6	240	103	5.1	0.07	-0.19
32	2	-3.5	1146	19.1	150	108	5.4	0.11	-0.29
33	3	-3.5	1136	18.9	120	109	5.5	0.12	-0.35

6 CFD simulaties

Met behulp van het in deze studie toegepaste hydraulische netwerkmodel is het niet mogelijk het complexe stromingspatroon in de open getijzone en in de uitstroomconstructie te simuleren. Dit is enkel mogelijk met behulp van schaalmodelonderzoek of Computational Fluid Dynamics (CFD). Gelet op het te korte tijdsbestek voor een schaalmodelstudie werd gekozen om de stroming in de riolen, de sluiskolk en de open getijzone te simuleren met 3D CFD-simulaties. De CFD-simulaties werden uitbesteed aan Actiflow B.V. In het verleden werden voor de Royerssluis CFD simulaties uitgevoerd van het gedeelte van de hefschuiven tot de uitstroomconstructie (Actiflow, 2014, 2015).

De opdracht betrof het uitrekenen van 4 cases:

- case 1: het simuleren van de stroming in de lange omloopriool bij vullen met gedeeltelijk en volledig geopende hefschuif en bij ledigen met volledig geopende hefschuif.
- case 2: het simuleren van de uitstroming van de lange en de korte omloopriool in de open getijzone.
- case 3: het simuleren van de uitstroming van twee variëte geometrieën voor de korte en de lange omloopriool in de open getijzone.
- case 4: het simuleren van vullen van de kolk door de lange en de korte omloopriool op het ogenblik van maximaal debiet.

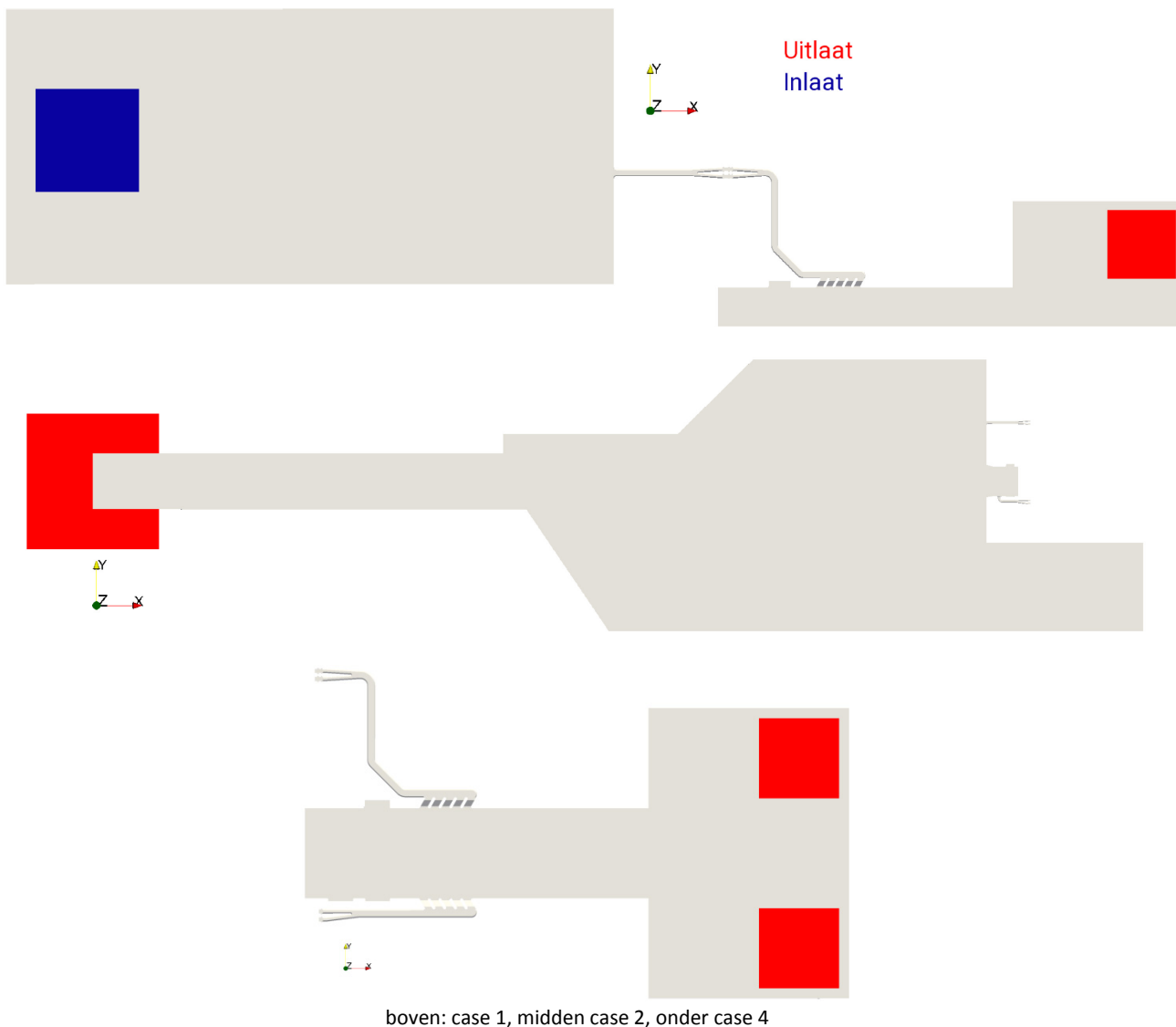
In dit hoofdstuk zal de focus gelegd worden op de uitkomst van de CFD simulaties. Voor meer details over de uitgevoerde simulaties wordt verwezen naar het door Actiflow opgestelde rapport (Fahner *et al.*, 2017).

De CFD-modellen voor de verschillende cases worden beschreven in paragraaf 6.1. De getalsmatige resultaten van de CFD simulaties worden besproken in paragraaf 6.2. De stroming in de omloopriolen, de kolk en de open getijzone wordt achtereenvolgens behandeld in paragraaf 6.3, 6.4 en 6.5. Conclusies worden geformuleerd in hoofdstuk 6.6.

6.1 CFD model

Het rekendomein van case 1, case 2 en case 4 wordt achtereenvolgens gegeven in Figuur 13. De geometrie komt overeen met het bijgewerkte ontwerp beschreven in paragraaf 2.1.2. De aanvoer en uitvoer van het debiet in het CFD model gebeurt door middel van in- en uitlaatvlakken in de bodem van het model of in de sectie van de hefschuiven. In de figuur worden de bodemvlakken voor toevoer aangeduid met rood en de bodemvlakken voor afvoer aangeduid met blauw. Voor case 3 worden twee varianten van dit ontwerp doorgerekend. De wijzigingen van deze twee varianten ten opzichte van case 2 worden gegeven in Figuur 14. Deze varianten zijn louter gebaseerd op hydraulische overwegingen. Merk op dat de variant waarbij de twee riolen uitmonden in het verlengde van de kolkmuur in het voorliggende ontwerp constructief niet mogelijk is (omwille van locatie kelder basculebrug).

Figuur 13 – Rekendomein voor case 1



Figuur 14 –Wijziging rekendomein case 3 ten opzichte van case 2



Links case 3-1: variante geometrie met korte en lange omloopriool rechtstreeks uitmondend in de open getijzone
 Rechts case 3-2: variante geometrie met korte en lange omloopriool uitmondend in het sluishoofd

Voor het uitvoeren van de simulaties worden de randvoorwaarden uit Tabel 26 gebruikt. Merk op dat het hydraulisch model hierna nog beperkt gewijzigd is. Hierdoor zijn er verschillen tussen het debiet gegeven in onderstaande tabel en het debiet gerapporteerd in hoofdstuk 5.

Tabel 26 – Randvoorwaarden

cases	vullen/ledigen	hoogte hefschuif	waterpeil		debiet LOCKSIM	
			kolk	open- getijzone	korte riool	lange riool
		[-]	[m TAW]	[m TAW]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
1-1	vullen	20 %	+0.06	+3.50	17.8	17.2
1-2 / 4	vullen	100 %	+0.84	+3.50	69.3	52.6
1-3 / 2 / 3-1 / 3-2	ledigen	100 %	+2.99	+0.00	-55.0	-53.4

Een rechtstreekse vergelijking tussen de debieten en de verliescoëfficiënten volgend uit de CFD simulaties en de LOCKSIM simulaties gebruikt voor Tabel 26 is niet mogelijk. De CFD simulaties gebruiken een constant peilverschil (steady state), terwijl de LOCKSIM simulaties dynamisch zijn waarbij het kolkpeil en de snelheid in de riolen varieert gedurende de simulatie en waarbij dus ook inertie een rol speelt. Om een rechtstreekse vergelijking te maken met de CFD simulaties werd met de randvoorwaarden uit Tabel 26 in paragraaf 5.2 ook een steady state berekening uitgevoerd (zie Tabel 24).

Het rekenrooster is opgebouwd met behulp van ANSA van Beta CAE systems. Het rooster is voornamelijk opgebouwd uit hexagonale cellen. Nabij het wateroppervlak is er een verfijning toegepast in verticale richting. Nabij de wanden en het wateroppervlak worden prismatische cellen gebruikt. Op deze prismatische cellen na is het volledig grid ongestructureerd. De zijden van de hexagonale cellen hebben een minimum lengte 17 mm (in de riolen) en een maximum lengte 2500 mm (in de open getijzone of de sluisolk).

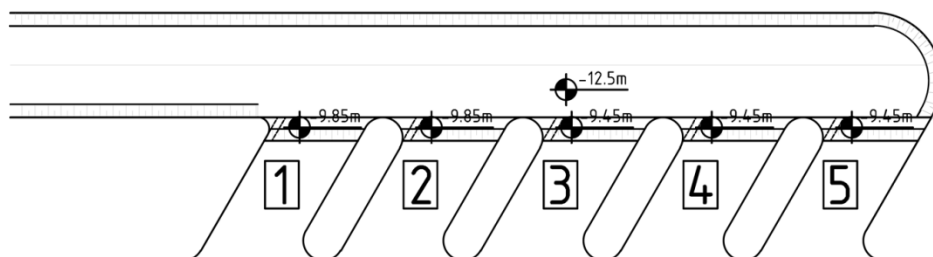
De simulaties worden uitgevoerd met een vrij vloeistofoppervlak. Dit om enerzijds het wateroppervlak te kunnen simuleren maar anderzijds ook om de resultaten niet te laten beïnvloeden door een kunstmatig opgelegd wateroppervlak. De simulaties worden uitgevoerd met de InterFoam Solver van OpenFoam (versie 3.0.x). Om de simulatietijd te reduceren wordt Local Time Stepping (LTS) toegepast. Hiermee is het niet mogelijk om fluctuerende stromingsverschijnselen (zoals bijvoorbeeld loslatende en terug aanhechtende neren) te simuleren. Het resultaat van de simulaties moet beschouwd worden als een tijdsgemiddelde. Het k- ω -SST turbulentie model wordt gebruikt om de RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) vergelijkingen sluitend te maken.

Meer details betreffende de simulaties worden gegeven in Fahner *et al.* (2017).

6.2 Getalsmatige resultaten

Het doel van de uitstroomconstructie is het debiet evenredig te verdelen over de 5 uitstroomopeningen. Om een gelijkmatige verdeling tussen de uitstroomopeningen te voorzien wordt een weerstand ingebouwd tussen de omloopriool en de verschillende uitstroomopeningen. Deze weerstand betreft een reductie van de doorstroomsectie door middel van een muur met hoogte 2.7 m of 3.1 m (de respectievelijke overblijvende doorstroomhoogte bedraagt 1.3 m en 0.9 m). De doorstroomhoogte van de eerste twee openingen bedraagt 1.3 m, deze voor de volgende drie openingen 0.9 m. De hoogte van deze muur werd gebaseerd op de Antwerpse zeesluizen. De uitstroomopeningen worden oplopend genummerd waarbij 1 het dichtst bij de voor nivelleren gebruikte deur is. Dit wordt verduidelijkt in Figuur 15.

Figuur 15 – Nummering uitstroomopeningen



De uit de CFD-simulaties volgende debietverdeling over de uitstroomopeningen wordt gegeven in Tabel 27 voor vullen en in Tabel 28 voor ledigen. Bemerk hierbij dat een perfecte verdeling neerkomt op een aandeel van 20 % per opening. Voor vullen ligt het debietsaandeel van de openingen tussen 17 % en 23 %. Het laagste debiet bij vullen wordt vastgesteld bij opening 1 en het hoogste debiet bij opening 2 of 5. Bij ledigen neemt het debiet af van opening 1 naar opening 5. Het debietsaandeel voor opening 1 bedraagt 31 % en het debietsaandeel voor opening 5 bedraagt 14 %. Doordat bij uitstroming de dissipatie van de stroming in de kolk gebeurt is een goede debietverdeling bij vullen belangrijker dan bij ledigen. Hieruit wordt besloten dat de geometrie van de uitstroomconstructie voldoet.

Tabel 27 – Debietverdeling uitstroomopeningen bij vullen kolk

		case 1-1	case 1-2	case 4	
		lange omloopriool	lange omloopriool	lange omloopriool	korte omloopriool
totaal debiet		15.6 m ³ /s	60.6 m ³ /s	52.6 m ³ /s	69.3 m ³ /s
debietverdeling per uitstroomopening	1	17 %	17 %	17 %	18 %
	2	23 %	22 %	21 %	23 %
	3	20 %	19 %	19 %	20 %
	4	20 %	21 %	22 %	19 %
	5	20 %	22 %	22 %	21 %

Tabel 28 – Debietverdeling uitstroomopeningen bij ledigen kolk

		case 3-1
		lange omloopriool
totaal debiet		61.7 m ³ /s
debietverdeling per uitstroomopening	1	31 %
	2	25 %
	3	16 %
	4	14 %
	5	14 %

Een vergelijking tussen het debiet voor case 1 op basis van de CFD simulaties en het op basis van de steady state LOCKSIM simulaties bekomen debiet, wordt gegeven in Tabel 29. Bemerk hierin dat voor de simulatie met de gedeeltelijk geopende hefschuiф (case 1-1) het debiet dat volgt uit de LOCKSIM simulatie hoger is en dat voor de cases met de volledig geopende hefschuiф (case 1-2 en case 1-3) het debiet volgende uit de LOCKSIM simulatie lager is.

Tabel 29 – Vergelijking debiet lange omloopriool

	case 1-1	case 1-2	case 1-3
LOCKSIM	18.7 [m ³ /s]	53.5 [m ³ /s]	54.4 [m ³ /s]
CFD	15.6 [m ³ /s]	60.6 [m ³ /s]	61.6 [m ³ /s]

In Fahner *et al.* (2017) wordt het verlies berekend tussen twee raaien. De gebruikte raaien en de volgnummers van de verliescoëfficiënten wordt gegeven in Figuur 16. Bemerkt dat de nummering van op-naar afwaarts loopt: de nummering voor vullen loopt op van de open getijzone de naar kolk toe (case 1-1 en case 1-2) terwijl de nummering voor ledigen oploopt van de kolk naar de open getijzone toe (case 1-3). De verliescoëfficiënten worden gegeven in Tabel 30. Bij het analyseren van de verliezen over een gegeven component moet bedacht worden dat de lijnen van de verschillende raaien kort op elkaar geplaatst zijn. De stroming is niet onmiddellijk na een verstoring (bv. een bocht) terug geüniformiseerd. Voor de verliezen ten gevolge van een verstoring zou in principe de volledige afstand beschouwd moet worden waarover de betreffende verstoring een invloed heeft. Door de snelle opeenvolging van componenten is dit echter niet mogelijk. Hierom zullen in dit rapport enkel de totale verliezen, de verliezen over de in- en uitlaat en de verliezen over de hefschuiven vergeleken worden met het LOCKSIM model.

Voor het berekenen van de verliezen uit de CFD simulaties en het LOCKSIM model worden volgende formuleringen gebruikt:

$$p_{tot} = \rho \cdot g \cdot h + 0.5 \cdot \rho \cdot U^2$$

$$\Delta h = \frac{\Delta p_{tot}}{\rho \cdot g}$$

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta h \cdot g \cdot A^2}{Q^2}$$

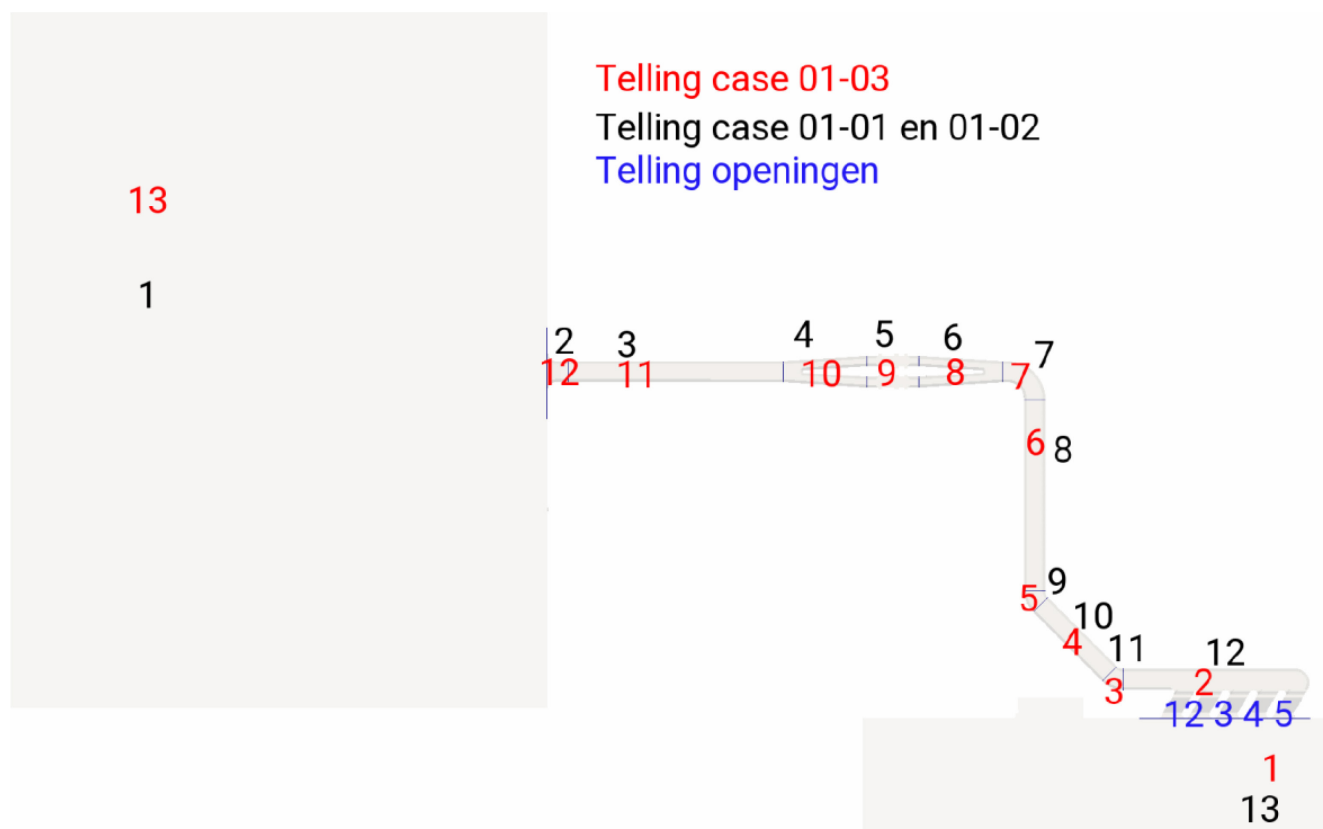
Met:

- P_{tot} Druk in een raai [N/m²]
- ρ Dichtheid [kg/m³]
- g Valversnelling (= 9.81 m/s²) [m/s²]
- U Snelheid [m/s]
- Δp_{tot} Drukverschil tussen raai opwaarts en afwaarts [N/m²]
- Δh Drukverschil tussen de raai opwaarts en afwaarts weergegeven in m waterkolom [m H₂O]
- A Doorstroomsectie = 16.0 m² [m²]
- Q Debiet doorheen raai [m³/s]

De druk op een raai wordt berekend als de som van de hydrostatische druk en de dynamische druk. Bemerkt dat de gebruikte formulering geen rekening houdt met de richting van de snelheid. Een vermoedelijk beperkte fout zal gemaakt worden wanneer de stroming niet loodrecht op het vlak uittreedt. Een grotere fout zal gemaakt worden wanneer terugstroming optreedt in de raai. Bij case 1-1 waarbij de hefschuif voor 20 % geopend is zal na de hefschuif een zone met hoge snelheid en een zone met terugstroming ontstaan, zie paragraaf 6.3. Doordat de snelheid in de terugstroming foutief voor een toename van de dynamische druk zorgt in plaats van een afname wordt in de componenten na de hefschuif een negatieve verliescoëfficiënt bekomen, zie Tabel 30.

Fahner *et al.* (2017) geeft aan dat voor de raaien in het dagvlak van de inlaat en uitlaat een sectie groter dan de opening werd gebruikt. De verliezen van component 2 en 12 bevatten hierdoor ook een deel van de verliezen van de aan- en uitstroming buiten de riolen. De sommatie van component 1 en 2 en de sommatie van component 12 en 13 geven een betere schatting voor de inlaatverliezen en uitlaatverliezen.

Figuur 16 – CFD simulatie – componenten case 1 voor bepalen verliescoëfficiënten



Tabel 30 – Verliescoëfficiënt CFD simulatie case 1

component	case 1-1	case 1-2	case 1-3
1	0.01	0.00	0.00
2	0.02	0.05	1.41
3	0.20	0.20	0.11
4	0.14	0.16	0.32
5	72.94	0.15	0.05
6	-3.86	0.16	0.31
7	-0.67	0.06	0.13
8	-0.43	0.27	0.18
9	0.03	0.03	0.21
10	0.10	0.14	0.17
11	0.03	0.02	0.19
12	2.06	2.31	0.78
13	0.07	0.07	0.08
totaal	70.69	3.64	3.95

Uit Tabel 30 volgt dat bij de simulatie met een gedeeltelijk geopende hefschuif (case 1-1) de verliezen over de hefschuif (component 5) dominant zijn. Bij de nivellerings met een volledig geopende hefschuif treden de grootste verliezen op in de uitstroomconstructie (voor vullen betreft dit component 12+13 en voor ledigen betreft dit component 1+2). Een vergelijking tussen de verliezen uit de LOCKSIM simulatie en het CFD model wordt gegeven in Tabel 31. Uit de vergelijking volgt dat bij een gedeeltelijk geopende schuif de totale verliezen voor het CFD model 44 % hoger zijn ten opzichte van de totale verliezen voor het LOCKSIM model. Bij de volledig geopende hefschuiven zijn de totale verliezen van het CFD model ca. 22 % lager dan de totale verliezen van het LOCKSIM model.

Tabel 31 – Vergelijking verliescoëfficiënt LOCKSIM – CFD case 1

	case 1-1		case 1-2		case 1-3	
	LOCKSIM	CFD	LOCKSIM	CFD	LOCKSIM	CFD
totaal	49.18	70.69	4.66	3.64	5.09	3.95
inlaat	0.20	0.03	0.20	0.05	1.00	1.40
riool opwaarts hefschuif	0.54	0.34	0.54	0.35	0.48	0.43
hefschuif	44.52	72.94	0.00	0.15	0.00	0.05
riool afwaarts hefschuif	1.33	-4.79	1.33	0.69	1.39	1.19
uitlaat	2.60	2.13	2.60	2.38	2.20	0.86

Voor de simulaties van case 2 en case 3 wordt in Tabel 32 de verliescoëfficiënt gegeven vanaf de hefschuiven tot en met de inlaat. Bemerk hierbij dat de verliezen bij de korte en de lange omloopriool groter zijn voor de situatie waarbij de omloopriool uitstroomt in het verlengde van de kolkmuren (lange omloopriool case 3-2; korte omloopriool case 2 en case 3-2). Voor case 2 kan de verliescoëfficiënt afgeleid worden uit de LOCKSIM simulatie. Hieruit volgt dat voor de lange omloopriool de verliescoëfficiënt bepaald uit de CFD simulaties 10 % hoger is dan de verliescoëfficiënt bepaald uit de LOCKSIM simulaties. Voor de korte omloopriool is de verliescoëfficiënt bepaald uit de CFD simulaties 5 % hoger dan de verliescoëfficiënt bepaald uit de LOCKSIM simulaties.

Tabel 32 – Verliescoëfficiënt CFD simulatie case 2, case 3-1 en case 3-2

	case 2	case 2	case 3-1	case 3-2
	LOCKSIM	CFD	CFD	CFD
lange omloopriool	1.48	1.34	1.31	1.73
korte omloopriool	1.81	1.73	1.51	1.65

De verliescoëfficiënten voor case 4 worden gegeven in Tabel 33 waarbij de nummering uit Figuur 16 is overgenomen. Component 6 betreft het deel opwaarts van de samenvoeging. Component 12 betreft de uitstroomconstructie. Bij de korte omloopriool is hiertussen slechts één component waardoor voor de korte omloopriool component 7 tot en met 11 samengenomen worden. De totale verliezen van de lange omloopriool zijn gelijk voor case 1-2 en case 4. Onderling zijn er wel wat verschillen, zo is bijvoorbeeld component 12 voor case 1-2 groter dan voor case 4 terwijl component 13 kleiner is. De verliezen van de uitstroomconstructie van de korte en de lange omloopriool zijn vrijwel identiek. Een vergelijking tussen de verliezen volgend uit LOCKSIM voor deze sectie en de verliezen volgend uit de CFD simulaties wordt gegeven in Tabel 34. Voor de lange omloopriool zijn de verliezen uit het LOCKSIM model hoger zijn dan die uit het CFD model terwijl dit voor de korte omloopriool omgekeerd is. Bij de verliezen bepaald uit LOCKSIM

geldt dat in de verliezen van de uitstroomconstructie de onder- en overschatte verliezen van de volledige leiding verdisconteert zijn. Dus ook de sectie opwaarts de hefschuiven die niet meegenomen wordt in het CFD model.

Tabel 33 – Verliescoëfficiënt CFD simulatie vergelijking case 1-2 en case 4

component	case 1-2	case 4	case 4
	lange omloopriool	lange omloopriool	korte omloopriool
6	0.16	0.18	0.15
7	0.06	0.07	0.11
8	0.27	0.28	
9	0.03	0.07	
10	0.14	0.07	
11	0.02	0.04	
12	2.31	2.09	2.09
13	0.07	0.28	0.24
Totaal	3.08	3.08	2.60

Tabel 34 – Vergelijking verliescoëfficiënt LOCKSIM – CFD case4

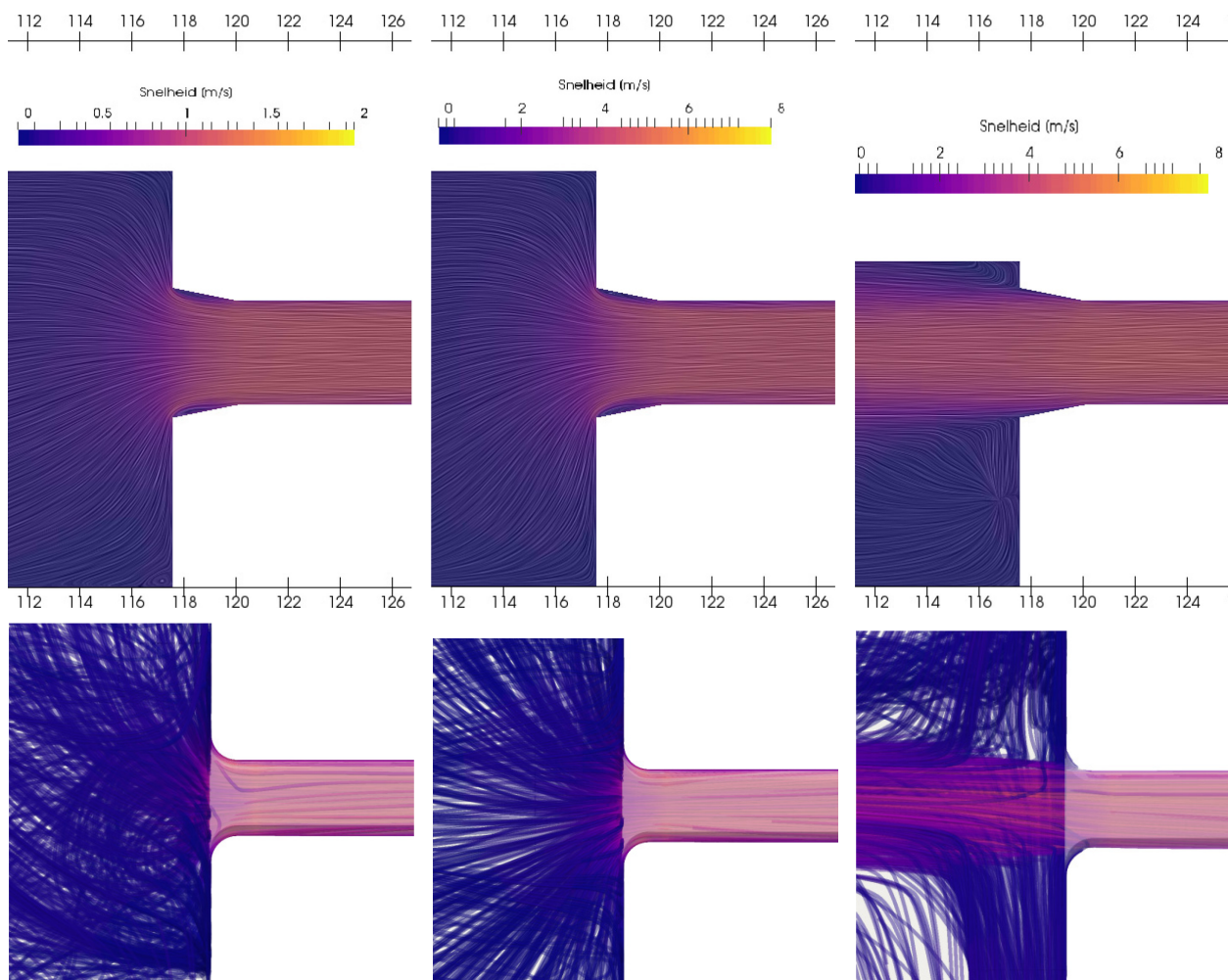
lang			kort	
LOCKSIM	case 1-2	case 4	LOCKSIM	case 4
3.93	3.08	3.08	1.99	2.60

6.3 Stromingspatroon in riolen

Het stromingspatroon in de riolen wordt besproken door middel van de figuren uit Fahner *et al.* (2017).

Een verticale en horizontale doorsnede van het stroombeeld in de inlaat wordt gegeven in Figuur 17. Het stromingspatroon voor beide simulaties van kolk vulling (case 1-1 en case 1-2) zijn gelijkaardig. Bij instroming toont de verticale doorsnede duidelijk loslating aan de inlaat. Dit zou geoptimaliseerd kunnen worden door de nu aanwezige afschuining in te korten of door een bijkomende afschuining te voorzien in het dagvlak van de opening. De horizontale doorsnede van de inlaat lijkt geen loslating te vertonen. Een dergelijke afronding van de inlaten is constructief moeilijk te verwezenlijken in het verticaal vlak. Uit de figuren volgt dat bij instroming de snelheid opwaarts geleidelijk opbouwt naar de inlaat toe. Bij uitstroming (case 1-3) heeft de sectieverwijding geen meerwaarde en blijft de hoge snelheid geconcentreerd. Indien de snelheid bij uitstroming verlaagd zou moeten worden dient dit te gebeuren door middel van een geleidelijke diffusor bij voorkeur met schoepen of door middel van een dissipatiestructuur (bv. een palenrij in de inlaat). Dergelijke oplossingen hebben een invloed op de verliezen en de sectie van de inlaat.

Figuur 17 – Stroombeeld - verticale doorsnede inlaat

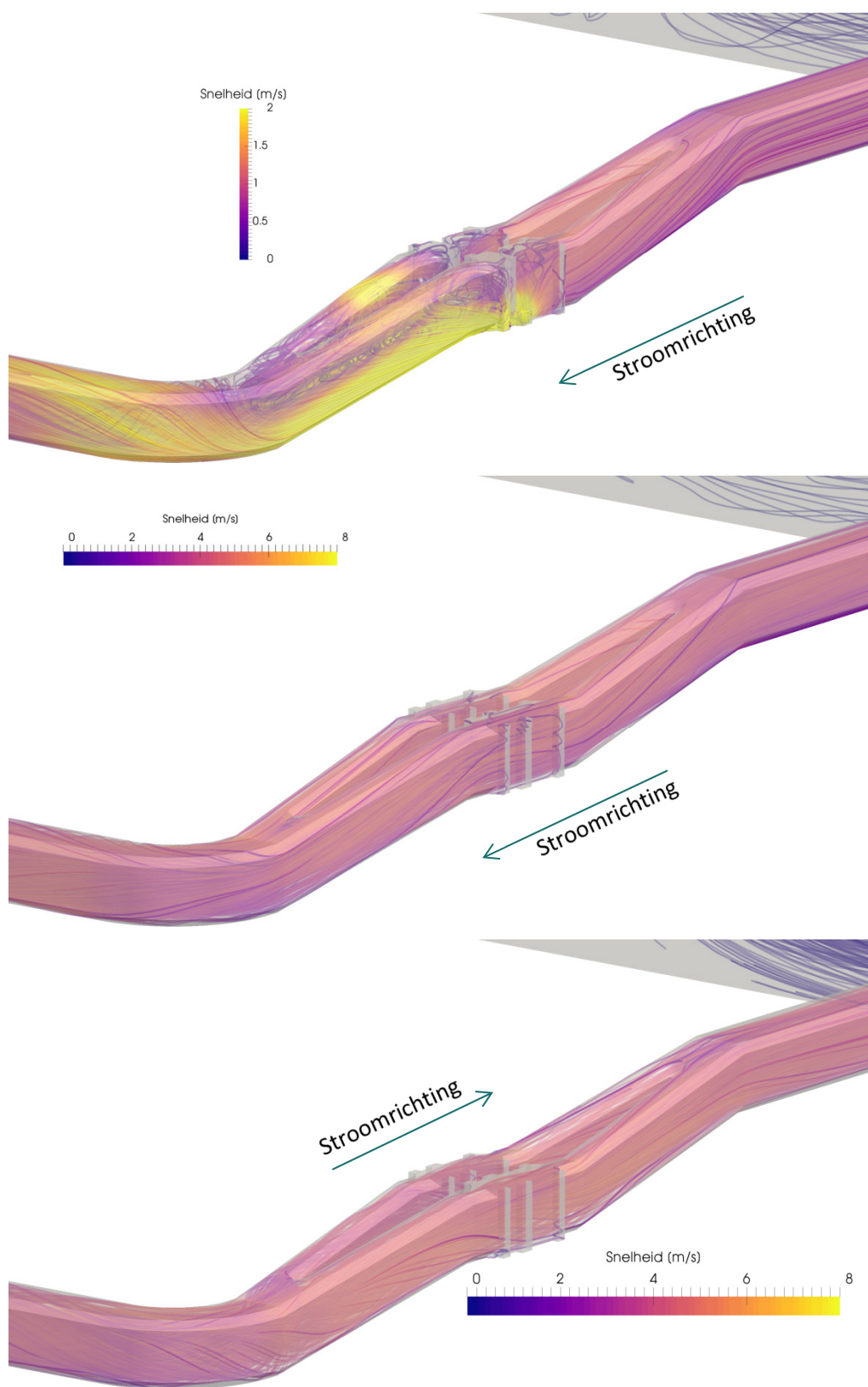


boven verticale doorsnede, onder horizontale doorsnede
links case 1-1, midden case 1-2, rechts case 1-3

Een illustratie van het stroombeeld ter hoogte van de hefschuiven in de lange omloopriool wordt gegeven in Figuur 18. Bij case 1-1 is de hefschuif geopend tot 20 %. De bovengrens van de schaalverdeling is bij case 1-1 te laag. De gele snelheden moeten hier geïnterpreteerd worden als een waarde tussen 2 m/s en 8.2 m/s³. Na de hefschuif is er een zone met hoge snelheid en een zone met terugstroming. Ter hoogte van de samenvoeging is de snelheid nog niet geüniformiseerd en klimt de bodemnabije stroming tegen de buitenzijde van de bocht op. Bij een volledig opgetrokken hefschuif zijn er minder grote variaties in snelheid.

³ Het verval bij case 1-1 bedraagt 3.44 m (=+3.50 m TAW – +0.06 m TAW). De hierbij horende maximale snelheid bedraagt $v_{max} = \sqrt{2g\Delta h} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 3.44} = 8.2 \text{ m/s}$

Figuur 18 – Stroombeeld ter hoogte van de hefschuiven

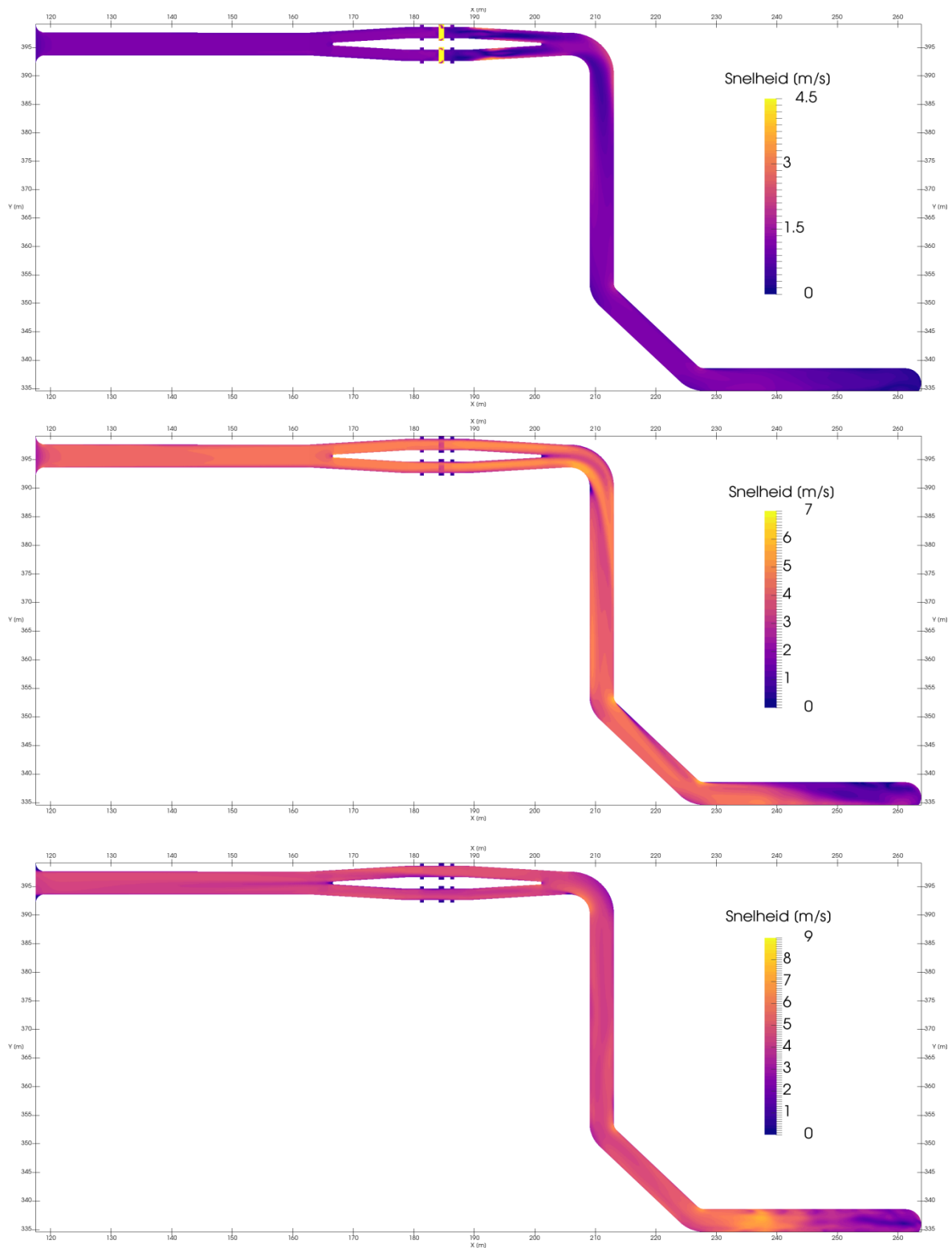


boven case 1-1, midden case 1-2, onder case 1-3

Figuur 19 geeft de snelheid op halve hoogte in de omloopriool voor case 1-1, case 1-2 en case 1-3. Bemerkt dat bij vullen de stroming loslaat in de 90° bocht na de hefschuiven en in de eerste 45° bocht. Ook bij

ledigen doet zich loslating voor in deze 90° bocht bij de hefschuiven. Ten gevolge van deze loslating zullen de verliezen verhogen en zal bij ledigen het debiet niet uniform verdeeld zijn over beide hefschuiven. Om het debiet bij ledigen gelijkmatiger te verdelen over beide hefschuiven kan de splitsing van de riolen verplaatst worden naar opwaarts de 90° bocht. Een andere optie om het debiet gelijkmatiger te verdelen bij ledigen is het vergroten van de afstand tussen de bocht en de splitsing.

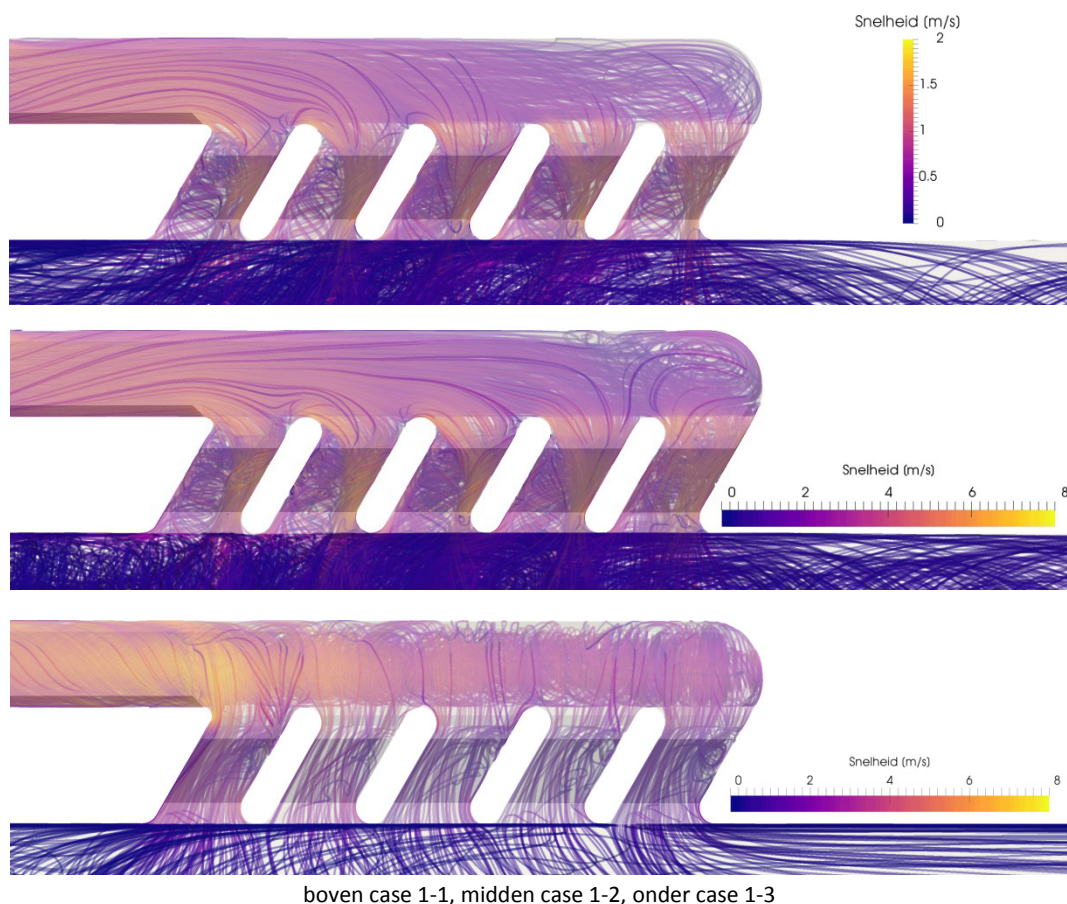
Figuur 19 – Snelheid omloopriool op halve hoogte



boven case 1-1, midden case 1-2, onder case 1-3

Het stroombeeld in de uitstroomconstructie worden gegeven in Figuur 20. Bij vullen van de kolk wordt de stroming afgebogen naar de buitenzijde van de schoepen, dit omwille van de stroomsnelheid in de omloopriool. De stroming in de openingen blijft geconcentreerd aan de buitenzijde van de schoepen. Analooog als bij de inlaat is het stromingspatroon voor case 1-1 en case 1-2 quasi gelijk. Bij instroming is de snelheid veel uniformer verdeeld over de breedte van de openingen. Bij instroming komt de stroming loodrecht op de stroomrichting aan de bovenzijde van de omloopriool binnen waardoor de stroming in de omloopriool een dwarse rotatiebeweging krijgt. Details over de instroming in de kolk worden gegeven in paragraaf 6.4.

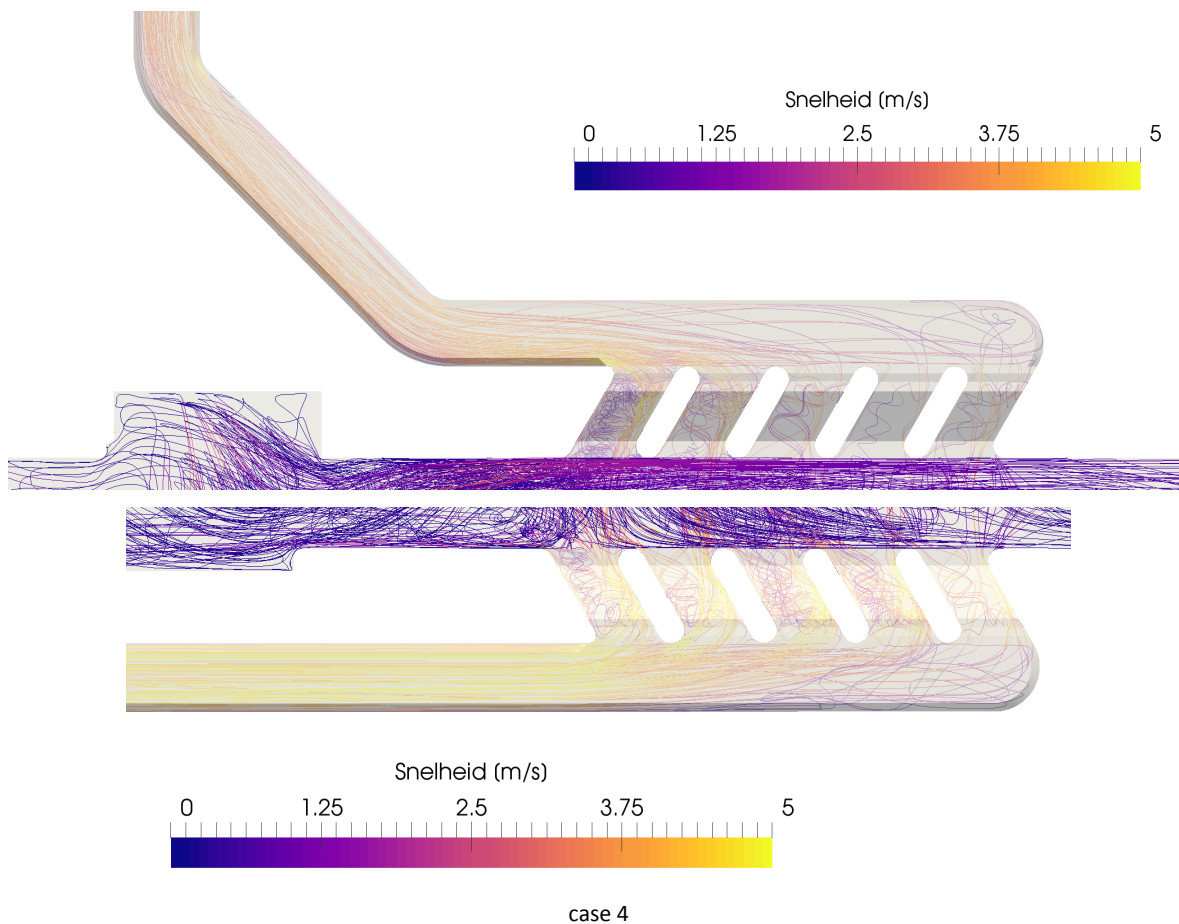
Figuur 20 – Stroombeeld uitstroomconstructie



boven case 1-1, midden case 1-2, onder case 1-3

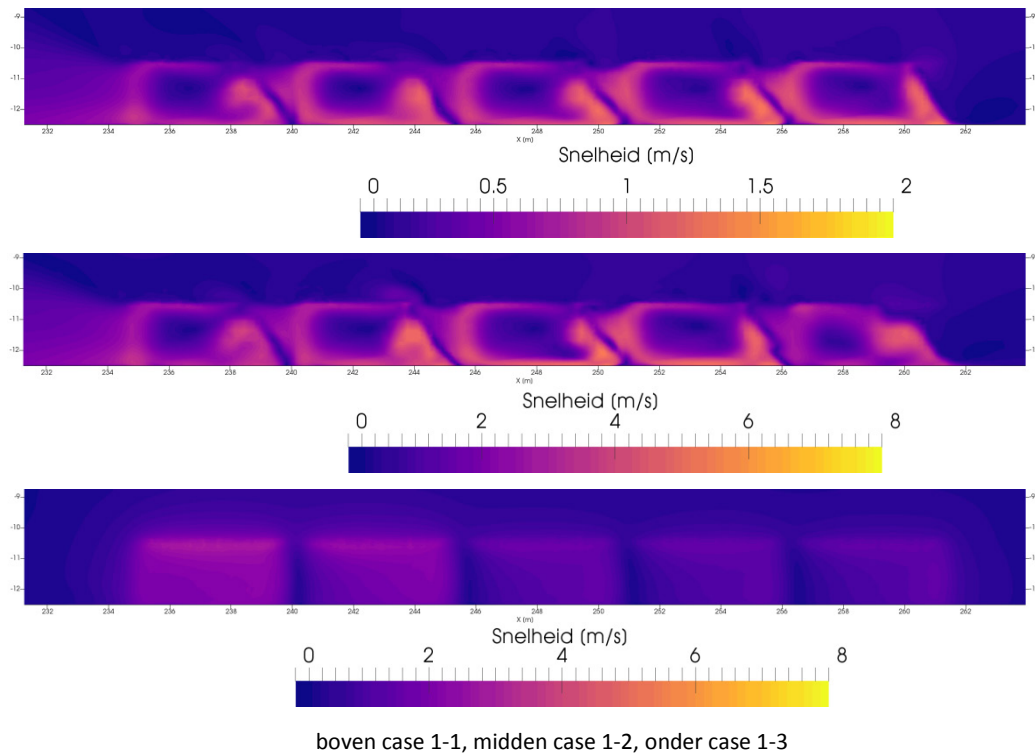
In case 4 wordt het vullen van de kolk gesimuleerd met de lange- en korte omloopriool vanaf de hefschuiven. Het stroombeeld in de uitstroomconstructies worden gegeven in Figuur 21.

Figuur 21 – Stroombeeld uitstroomconstructie – korte en lange omloopriool



De snelheid in het dagvlak van de uitstroomconstructie wordt gegeven in Figuur 22. Bij vullen van de kolk is een groot deel van de stroming (en dus uitgaand debiet) nog geconcentreerd tegen de buitenschoepen. Het overige deel van de stroming is geconcentreerd tegen de wanden van de uitstroomopening. Het herverdelen van de stroming tegen de buitenschoepen, gebeurt namelijk langsheen de wanden. Bij instroming valt op dat de snelheid in het dagvlak van de uitstroomconstructie veel uniformer is.

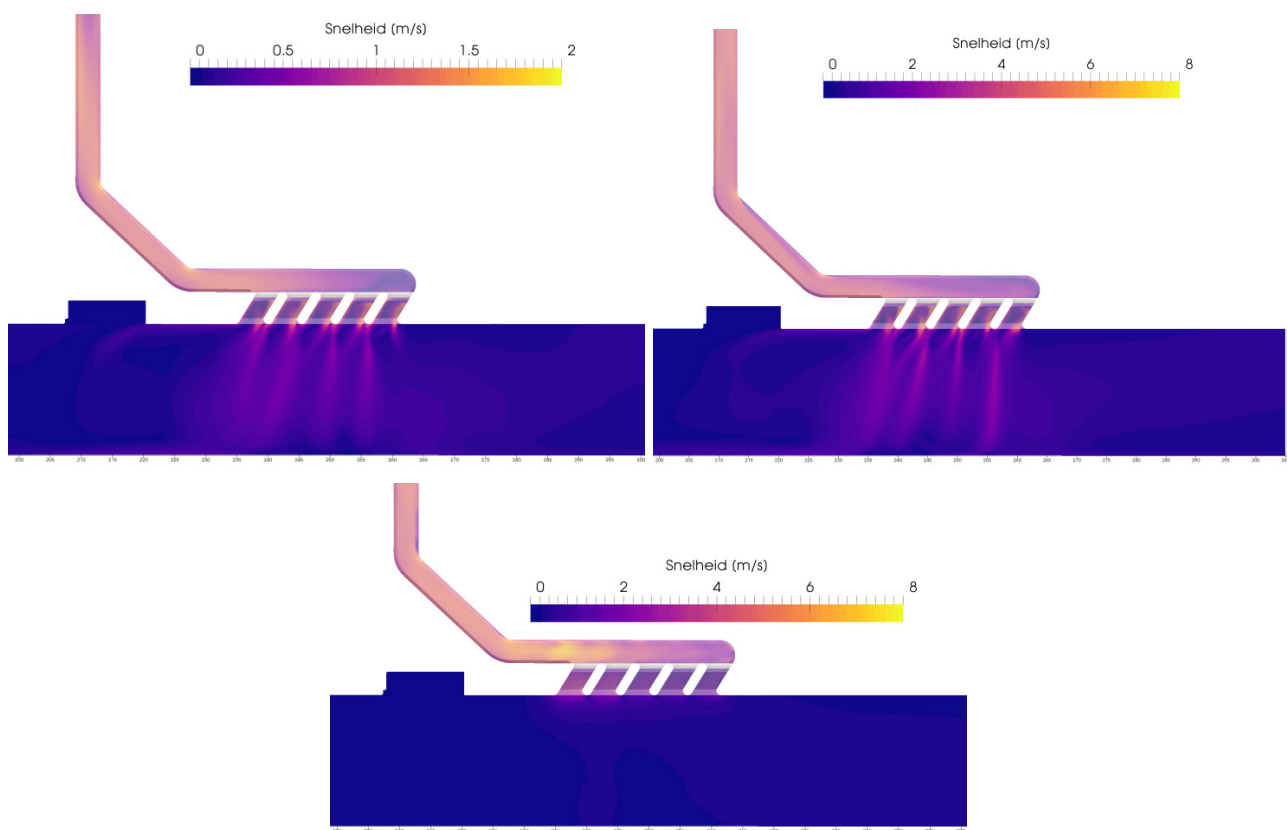
Figuur 22 – Snelheid in dagvlak uitstroomconstructie



6.4 Stromingspatroon in kolk

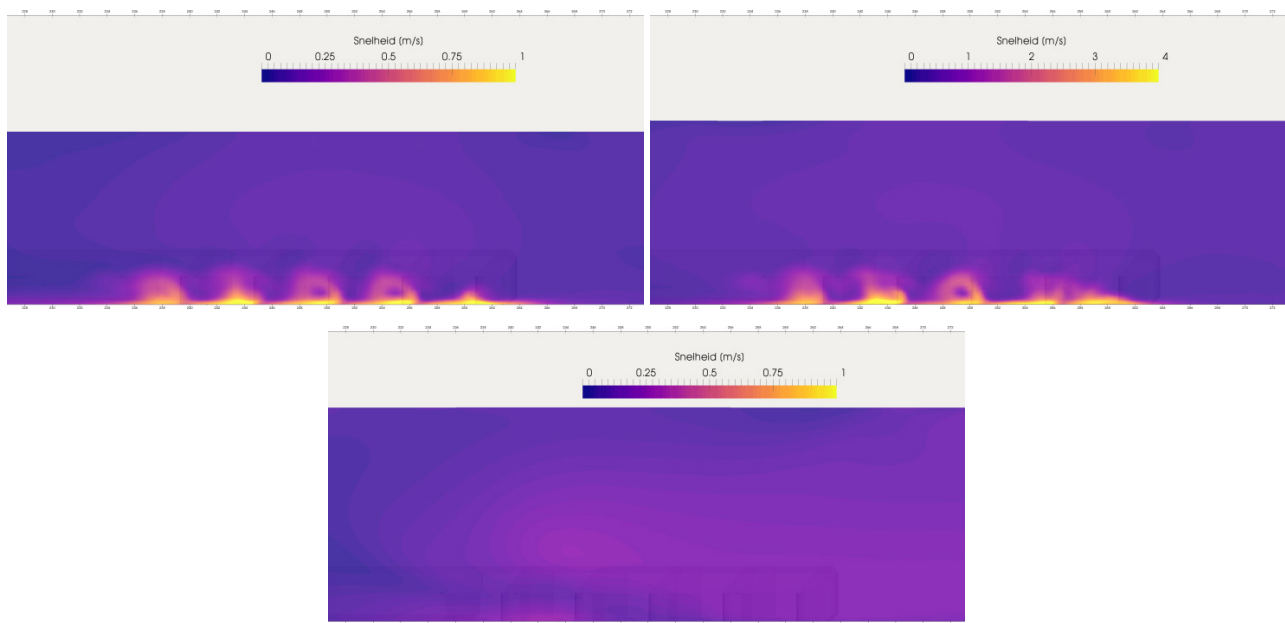
De uitstroming in de kolk op halve hoogte van de openingen voor case 1 wordt gegeven in Figuur 23. Voor vullen valt op dat de richting van de uitgaande stroming voor opening 1 tot en met 4 vrijwel gelijk is. De stroming is geconcentreerd aan de buitenschoep. De uitstroombouw zorgt ervoor dat de hoek tussen de uittredende stroming en de kolk-as bijna 90° bedraagt met een kleine afwijking naar de deur in het voor nivellieren gebruikte hoofd. Deze afwijking is groter bij de eerste uitstroombouwen en kleiner bij de laatste uitstroombouwen. In de kolk voegt de stroming van de buitenschoep zich samen met de stroming tegen de binnenschoep van de volgende opening. Bij vullen met volledig geopende hefschuiven (case 1-2) bedraagt de snelheid in de kolk op halve hoogte van de uitstroombouwen ca. 3 m/s. Bij ledigen (case 1-3) is de aanstroming uniform en zijn de snelheden in de kolk beperkt.

Figuur 23 – Snelheid op halve hoogte omloopriolen



linksboven case 1-1, rechtsboven case 1-2, onder case 1-3

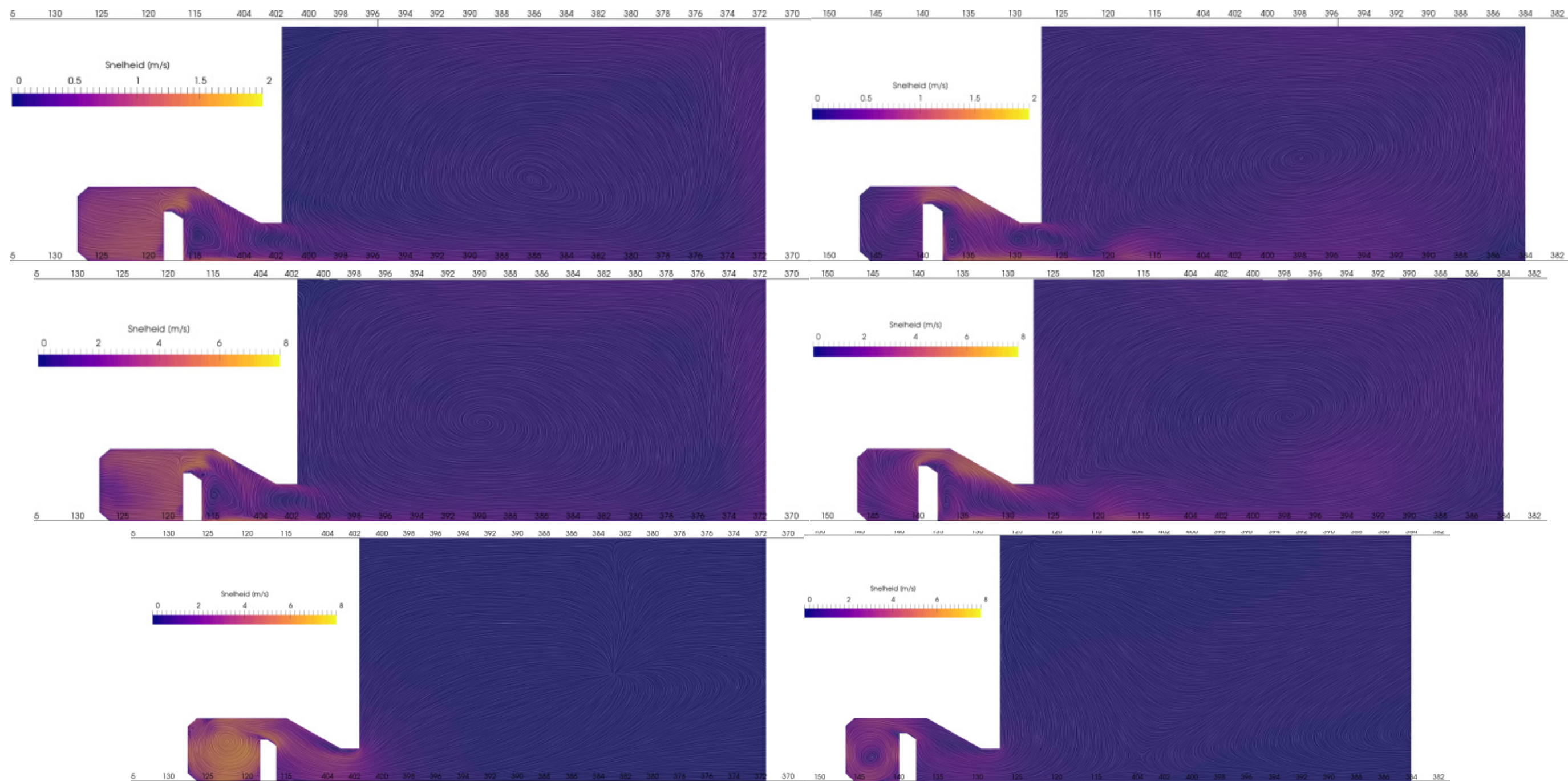
De snelheid op $\frac{1}{4}$ kolkbreedte wordt gegeven in Figuur 24. Bemerk dat bij case 1-2 nog zones met snelheden tot 4 m/s voorkomen maar dat deze beperkt zijn tot ca. 0.5 m boven de kolkbodem.

Figuur 24 – Snelheid op $\frac{1}{4}$ kolkbreedte

linksboven case 1-1, rechtsboven case 1-2, onder case 1-3

Voor opening 1 en 5 wordt het stromingspatroon in een verticaal vlak evenwijdig met de schoepen vanuit het center van de opening tot het symmetrievlak van de kolk gegeven in Figuur 25. Uit Figuur 22 en Figuur 23 volgde dat bij vullen de hoge snelheden geconcentreerd zijn tegen de buitenschoep. Voor het interpreteren van het stromingspatroon in de uitstroomopeningen bij vullen was het beter geweest dat deze figuur opgesteld was nabij de buitenschoep. Bemerkt dat het stromingspatroon voor de simulaties waarbij gevuld wordt gelijkaardig is (case 1-1 en case 1-2). Doordat bij vullen in de kolk een bodemnabije stroming dwars op de kolkas optreedt zal in de dwarssectie van de kolk de stroming een rotatie krijgen. Bij ledigen (case 1-3) valt op dat de aanzuiging geleidelijker verloopt. De stroming in de omloopriool krijgt een rotatie door het voeden van de omloopriool overheen de overstortmuur.

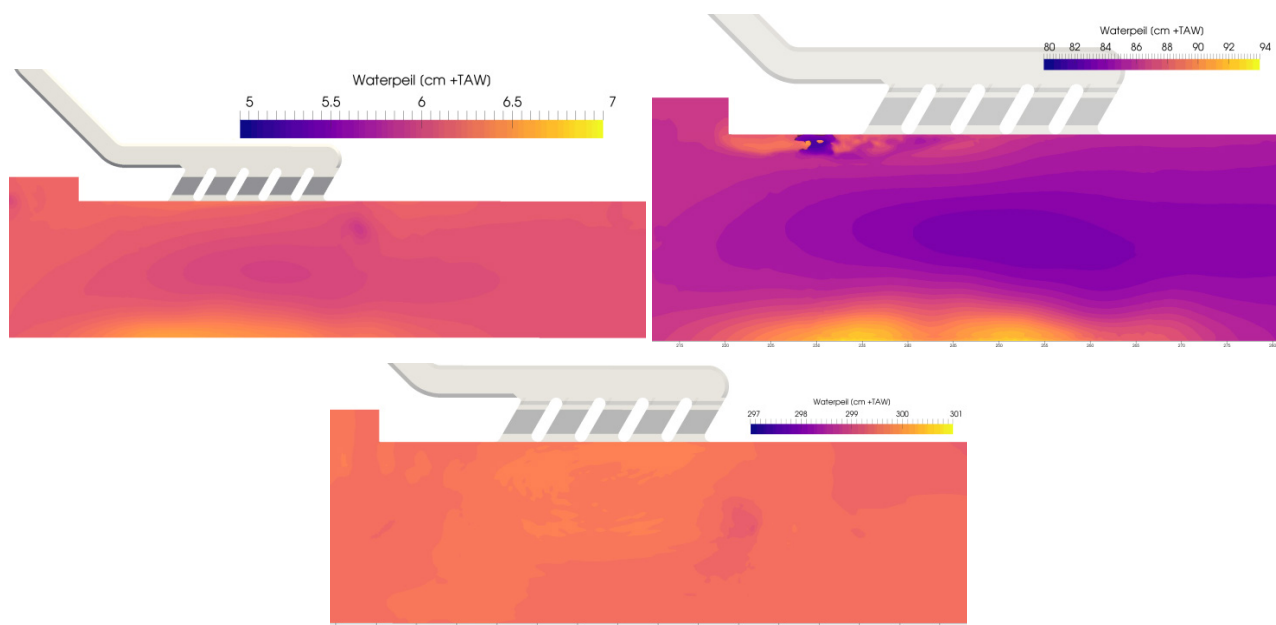
Figuur 25 – Verticaal stromingspatroon midden uitstroomopening 1 en 5 tot symmetrievalk



links opening 1, rechts opening 5
 boven case 1-1, midden case 1-2, onder case 1-3

Het peil van het wateroppervlak wordt gegeven in Figuur 26. Hierin valt op dat bij vullen het wateroppervlak stijgt ter hoogte van het symmetrievlak. Dit wordt verklaart doordat de bodemnabije stroming uit de uitstroomopeningen omhooggeleid wordt door het symmetrievlak vlak. Tussen het symmetrievlak en de uitstroomconstructie neemt het peil vervolgens af om terug wat te stijgen bij de uitstroomconstructie. Het verschil tussen het minimum en maximum waterpeil in de kolk bedraagt ca. 0.10 m voor case 1-2 en ca. 0.01 m voor case 1-1. Bij case 1-2 wordt links van de uitstroomconstructie een discontinuïteit opgemerkt in het stromingspatroon. Deze is te wijten aan het nog niet volledig geconvergeerd zijn van de CFD berekening. Bij ledigen (case 1-3) is een beperkte daling van het oppervlak (0.01 m) waarneembaar naar de uitstroomconstructie toe.

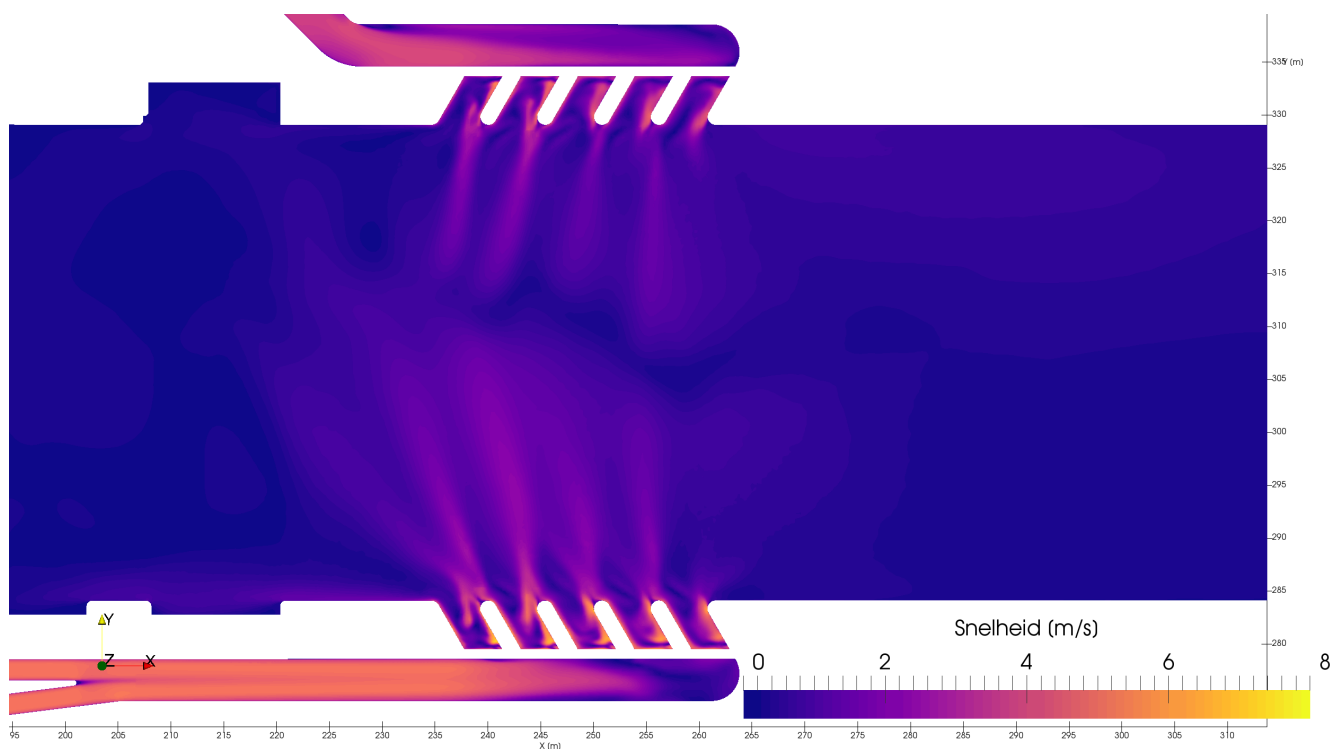
Figuur 26 – Waterpeil kolk simulaties lange omloopriool



linksboven case 1-1, rechtsboven case 1-2, onder case 1-3

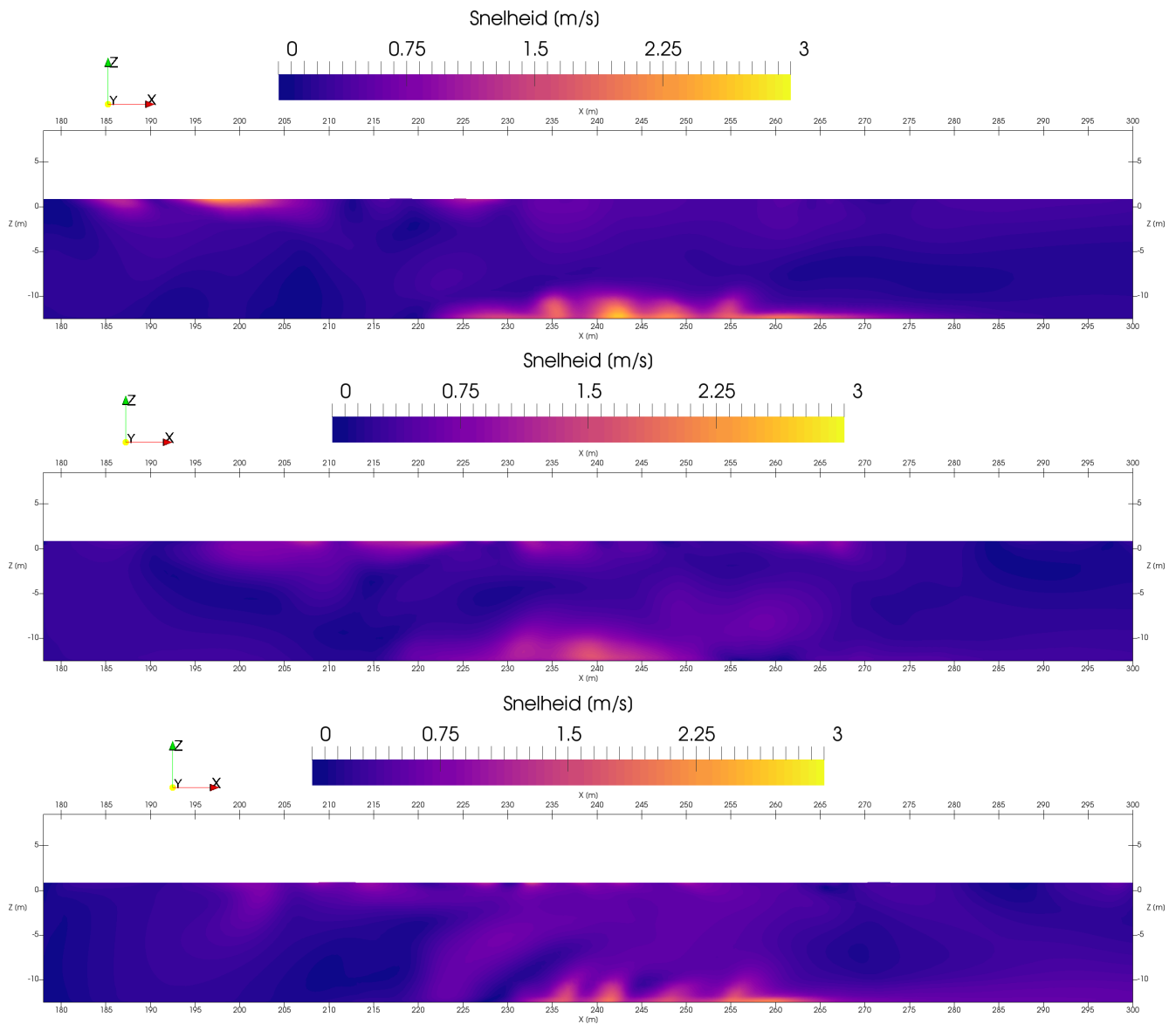
Voor case 4 (vullen van kolk met beide omloopriolen) wordt in Figuur 27 de snelheid gegeven op halve hoogte van de uitstroomopeningen. Uit de figuren volgt dat door het grotere debiet van de korte omloopriool het samenkomen van de stroming van beide uitstroomconstructies niet in het center van de kolk gebeurt maar dichtert tegen de uitstroomconstructie van de lange omloopriool. Analoog als bij de simulaties met de lange omloopriool volgt dat de uitstroomconstructie ervoor zorgt dat de hoek tussen de uittredende stroming en de kolkas bijna 90° bedraagt met een kleine afwijking naar de deur in het voor nivelleren gebruikte hoofd. Deze afwijking is groter bij de eerste uitstroomopeningen en kleiner bij de laatste uitstroomopeningen.

Figuur 27 – Snelheid halve hoogte uitstroomopeningen



Voor case 4 wordt de snelheid in een verticaal vlak op $\frac{1}{4}$ van de kolkbreedte, de centerlijn van de kolk en $\frac{3}{4}$ van de kolkbreedte gegeven in Figuur 28. De jets met hoge snelheid in de kolk blijven beperkt tot een hoogte 2.5 m boven de kolkbodem (TAW -10.0 m). Verspreid over de waterkolom komen zones met hogere snelheid voor (ca. 1.0 m/s). Aan het wateroppervlak komen terug hogere snelheden voor.

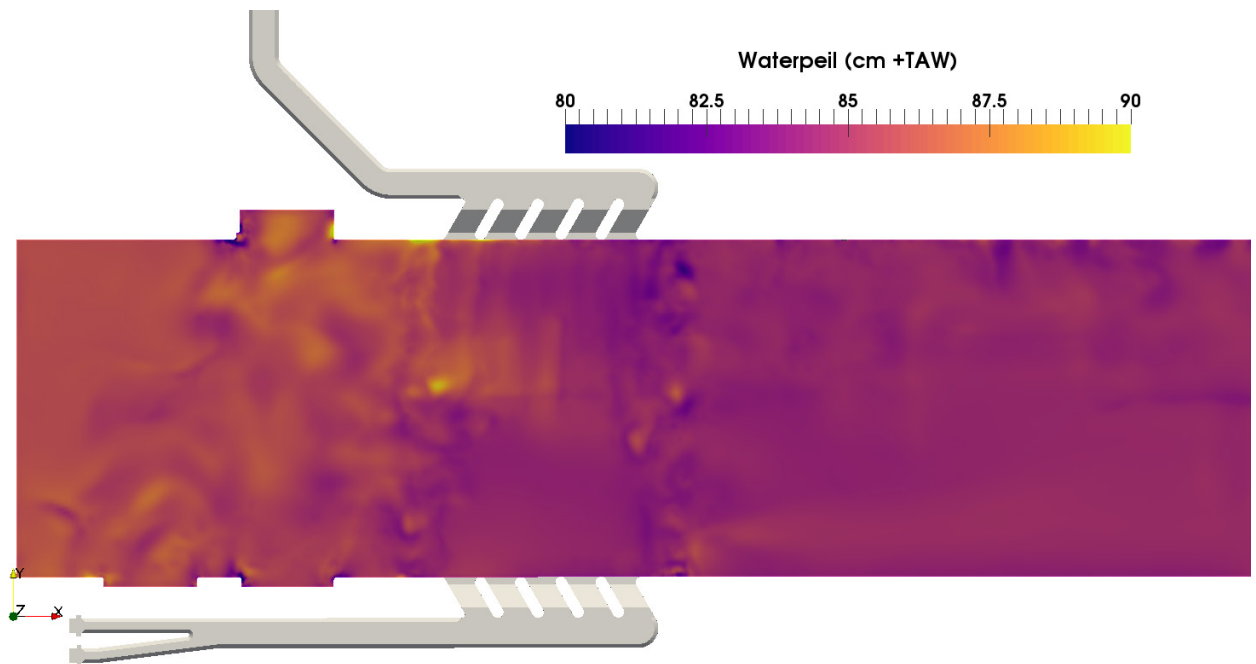
Figuur 28 – Snelheid in verticaal vlak volgens aslijn kolk



boven $\frac{1}{4}$ breedte, midden $\frac{1}{2}$ breedte / onder $\frac{3}{4}$ breedte

Het waterpeil in de kolk voor de simulatie met beide omloopriolen wordt gegeven in Figuur 29. Aan de zijde van de lange omloopriool richting de voor nivelleren gebruikte deur wordt een zone met hoger peil opgemerkt. Daarnaast wordt een verhoging opgemerkt op de locatie waar de stroming uit beide uitstroomconstructies samenkomt.

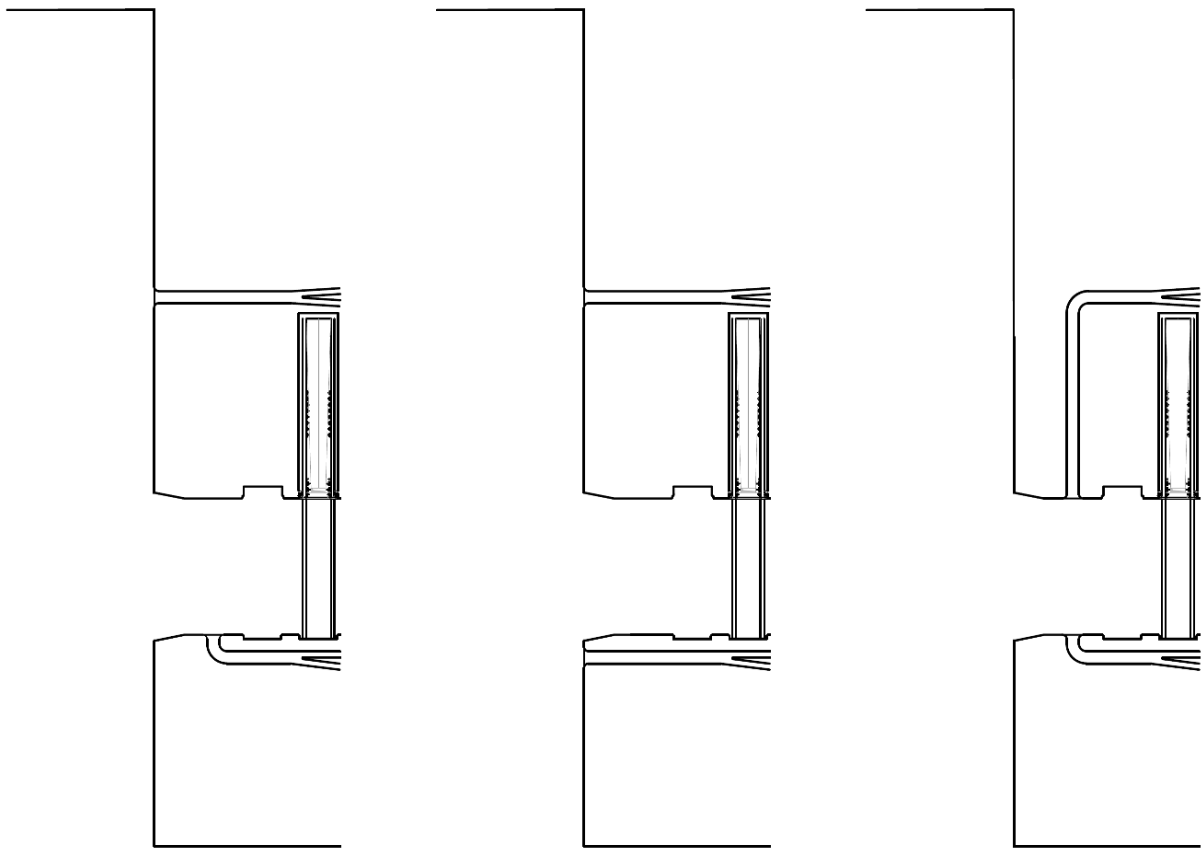
Figuur 29 – waterpeil kolk – simulatie beide omloopriolen



6.5 Stromingspatroon in open getijzone

Voor het stromingspatroon in de open getijzone zijn 3 cases gesimuleerd, zie Figuur 30. De eerste simulatie betreft de geometrie uit het voorontwerp, (zie paragraaf 2.1.2). Hierbij mondt de lange omloopriool rechtstreeks uit in de open getijzone terwijl de korte omloopriool uitmondt in het verlengde van de kolkmuur. Deze simulatie werd gedefinieerd als case 2. Vervolgens worden de simulaties herhaald met twee variërende geometrieën (case 3). Bij case 3-1 monden zowel de korte als de lange omloopriool rechtstreeks uit in de open getijzone. Bij case 3-2 monden beide riolen uit in het verlengde van de kolkmuur.

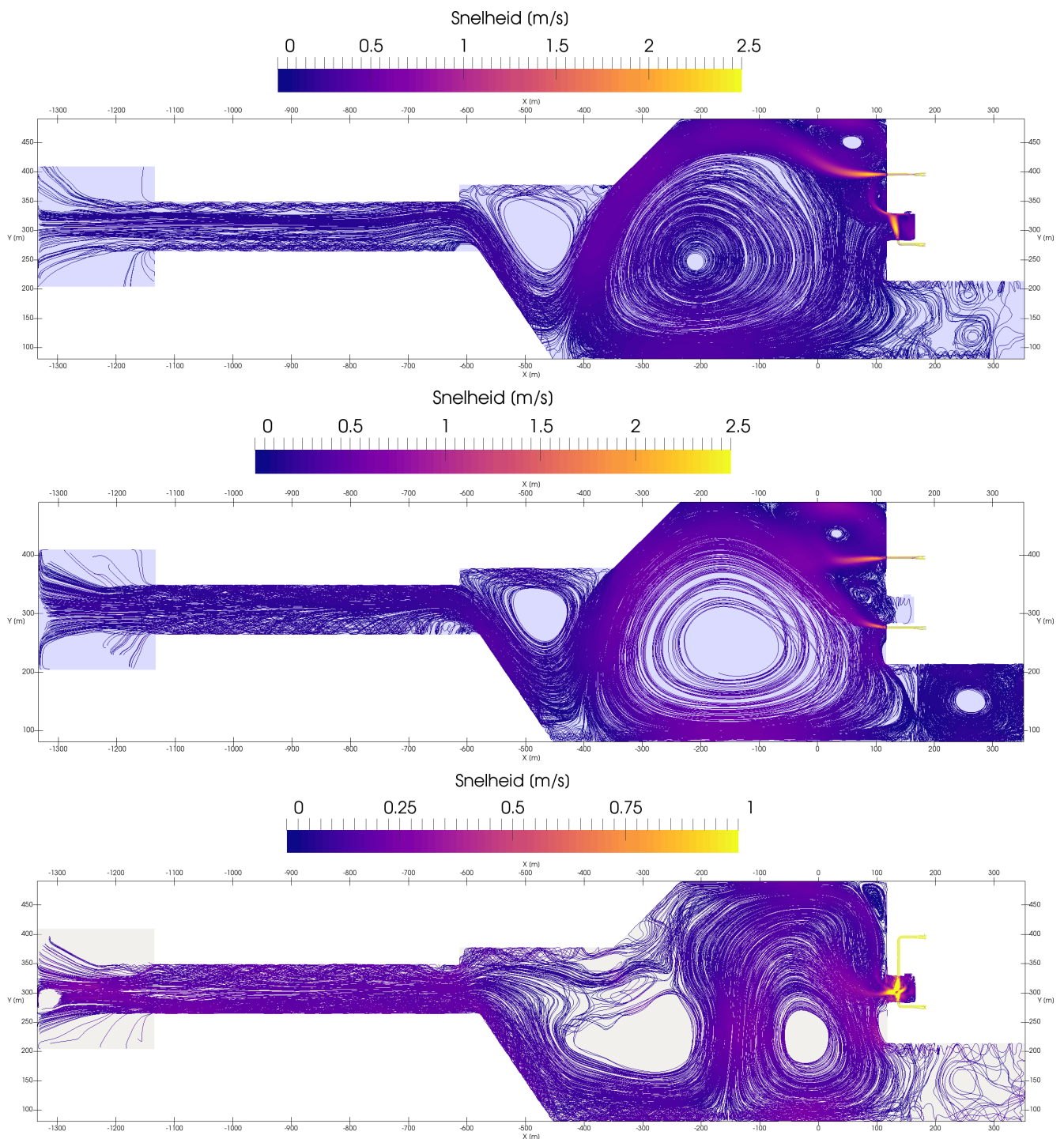
Figuur 30 – Geometrie uitmonding in open getijzone case 2 en case 3



links case 2, midden case 3-1, rechts case 3-2

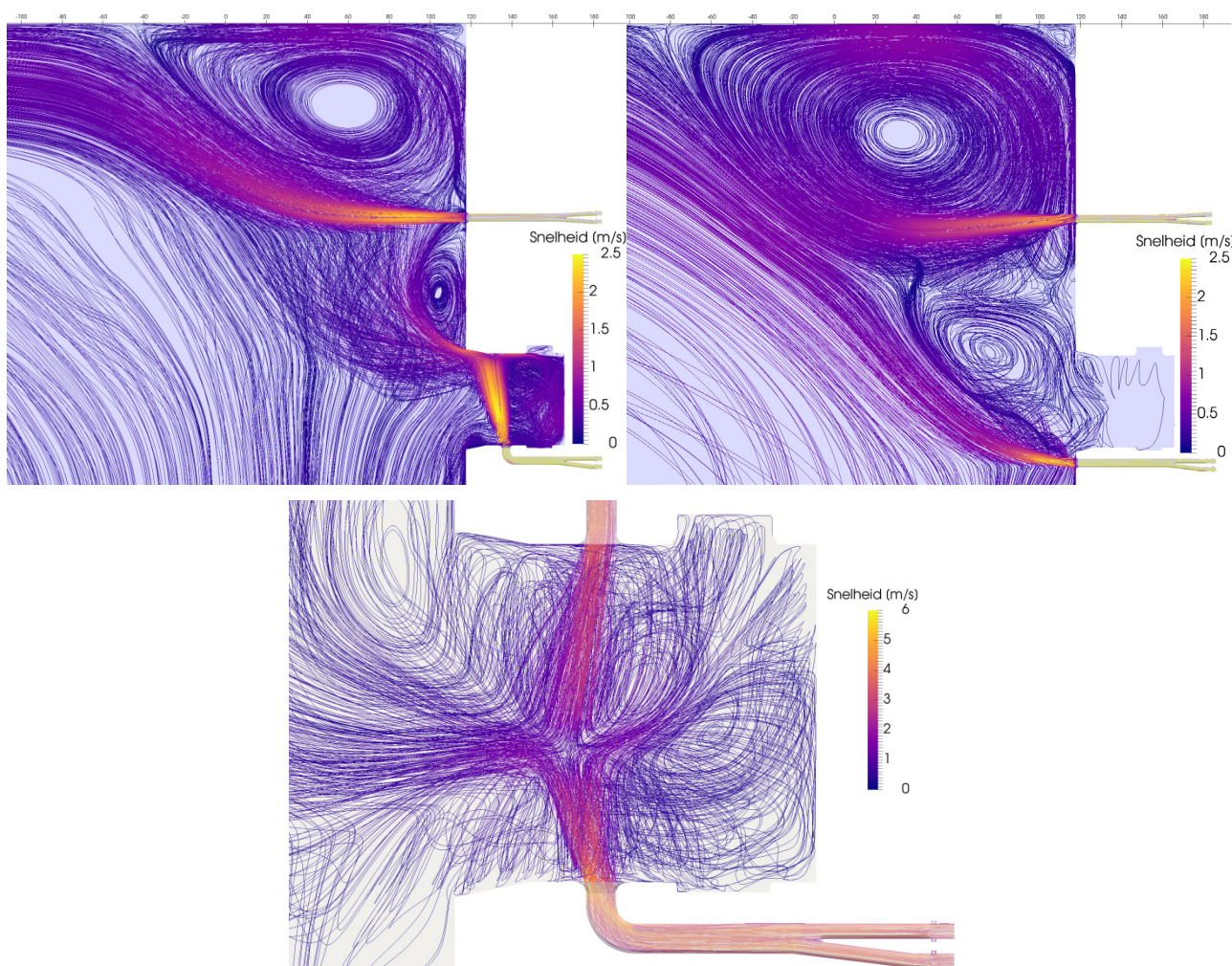
Het stroombeeld in de open getijzone voor de drie cases worden gegeven in Figuur 31. Een detail ter hoogte van de inlaten wordt gegeven in Figuur 32. Hieruit volgt dat het globale stromingspatroon in de open getijzone voor case 2 en case 3-1 gelijkaardig is. De stroming uit de twee inlaten komt samen en er vormt zich een grote centrale neer in de open getijzone. Bij case 2 botst de stroming uit de korte omloopriool op de tegenoverliggende muur waardoor de stroming sterk uitspreidt en de snelheid reduceert. Dit is niet het geval bij case 3-1. De snelheid in de open getijzone is hierdoor groter voor case 3-1 dan voor case 2. Bij case 3-2 waar beide jets op elkaar botsen vormt zich een merkkelijk kleinere neer in de open getijzone. Ook de snelheden zijn significant lager bij case 3-2.

Figuur 31 – Stroombeeld open getijzone - bovenaanzicht



boven case 2, midden case 3-1, onder case 3-2

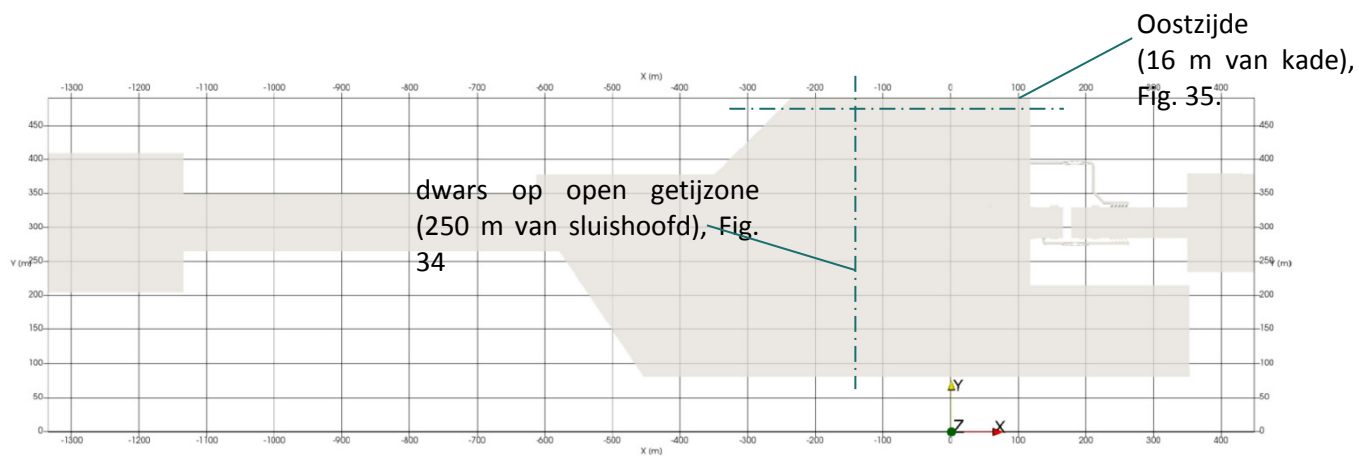
Figuur 32 – Detail stroombeeld open getijzone - bovenaanzicht



linksboven case 2, rechtsboven case 3-1, onder case 3-2

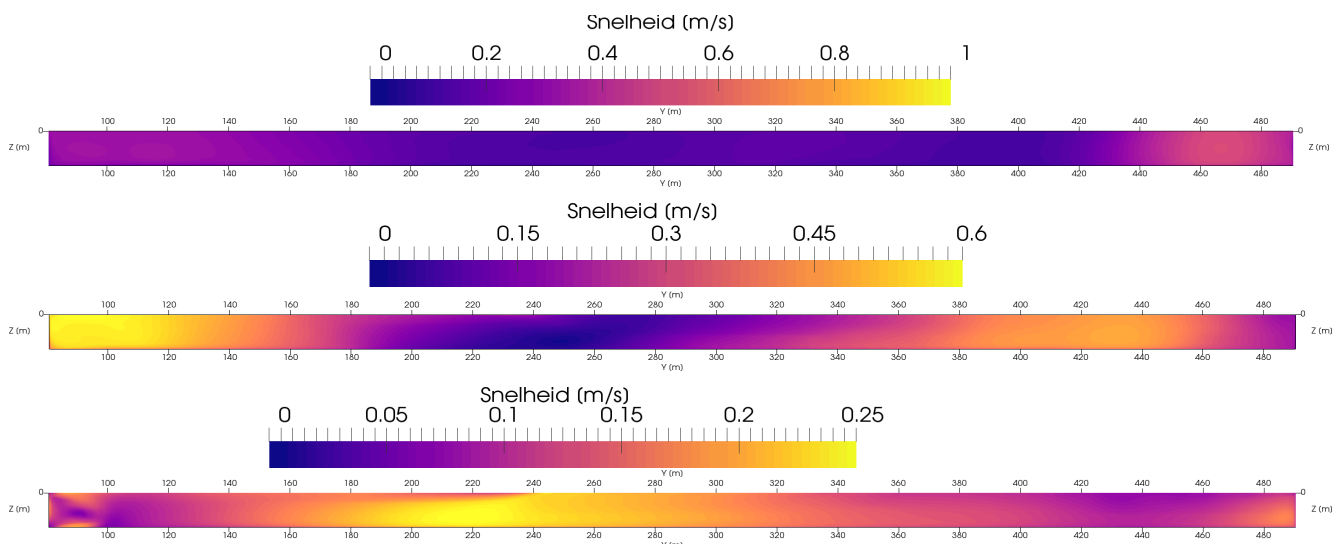
Het assenstelsel voor de CFD simulaties van de open getijzone wordt gegeven in Figuur 33.

Figuur 33 – Assenstelsel open getijzone



De snelheid dwars in de open getijzone op 250 m van het sluishoofd wordt gegeven in Figuur 34. De snelheden voor case 3-1 zijn hoger dan voor case 2. Dit komt doordat bij case 2 de uitgaande stroming uit de korte omloopriool botst op het verlengde van de kolkmuur. Bij case 3-1 treedt de maximale snelheid op aan de westzijde en bedraagt 0.6 m/s. Bij case 2 treedt de maximale snelheid op aan de oostzijde en bedraagt ca. 0.5 m/s. Bij case 3-2 bedraagt de maximale snelheid 0.25 m/s.

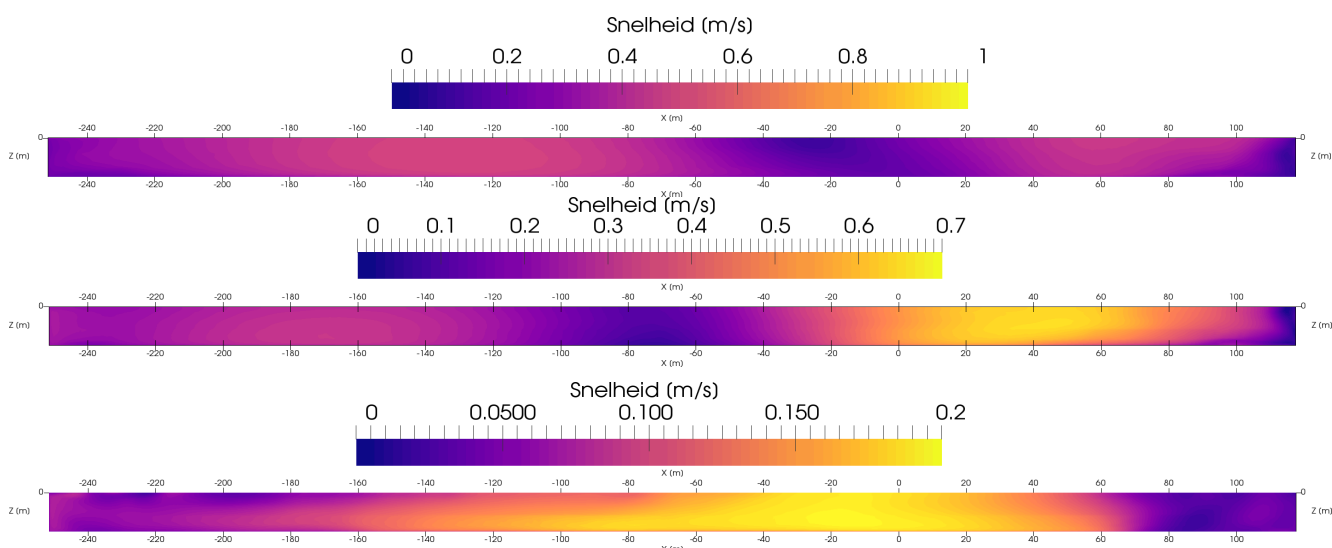
Figuur 34 – Snelheid dwars op open getijzone 250 m van sluishoofd



boven case 2, midden case 3-1, onder case 3-2

De snelheid op 16 m (= halve breedte car carrier) van de kaaimuur aan de oostzijde wordt gegeven in Figuur 35. Voor case 2 en case 3-1 valt in deze figuren op dat er stroming is aan linkerzijde stroming en aan rechterzijde met tussenin een zone met lage stroomsnelheid. Uit de figuur met het stroombeeld in de open getijzone (Figuur 31) volgt dat aan linkerzijde de stroming van de samengevoegde jet uit de openingen tegen de kaaimuur stroomt. Aan rechterzijde bevindt zich een neer met terugstroming. Voor case 2 bedraagt de maximale snelheid nabij de kaaimuur ca. 0.5 m/s en voor case 3-1 ca. 0.7 m/s. De maximale snelheid voor case 3-2 bedraagt ca. 0.2 m/s.

Figuur 35 – Snelheid langs oever oostzijde (16 m van kaaimuur)



boven case 2, midden case 3-1, onder case 3-2

6.6 Conclusies

Uit de simulaties volgt dat de uitstroomconstructie goed is vormgegeven. Bij vullen van de kolk wordt het debiet gelijkmatig verdeeld over de 5 openingen. De uitstroomconstructie zorgt ervoor dat de hoek tussen de uittredende stroming en de kolk-as bijna 90° bedraagt met een kleine afwijking naar de deur in het voor nivelleren gebruikte hoofd. Deze afwijking is groter bij de eerste uitstroomopeningen en kleiner bij de laatste uitstroomopeningen. De hoge stroomsnelheden uit de uitstroomconstructie blijven boven de kolkbodem.

Bij een gedeeltelijk gesloten hefschuif is de verliescoëfficiënt van de lange omloopriool uit het LOCKSIM model 44 % lager dan de verliezen uit het CFD model. Bij een volledig geopende hefschuif is de verliescoëfficiënt van de lange omloopriool uit het LOCKSIM model 22 % hoger dan de verliezen uit het CFD model. Om de verliezen van een gedeeltelijk geopende hefschuif uit de CFD modellering te gebruiken in LOCKSIM verdient het de aanbeveling om een simulatie te doen met een kleinere gridfijnheid ter hoogte van de hefschuif en om de geometrie van het loslaatpunt onder de hefschuif zo nauwkeurig mogelijk te modelleren. Door middel van een CFD simulatie van de Berendrechtssluis kan meer inzicht verkregen worden in de nauwkeurigheid van de verliescoëfficiënt volgend uit de CFD berekeningen.

Op enkele plaatsen in de omloopriool treedt loslating van de stroming op. Deze loslating zorgt voor bijkomende verliezen. Bij ledigen gebeurt de splitsing van de lange omloopriool net afwaarts van een 90° bocht. Door loslating in deze bocht zal de stroming niet evenredig verdeeld zijn over beide hefschuiven. Om een goede debietverdeling te bekomen kan de tussenmuur in de riool doorgetrokken worden tot voor de bocht of kan de afstand tussen de bocht en splitsing vergroot worden. Bij de inlaten is de afrondingsstraal in het horizontaal vlak voldoende. In het verticaal vlak is er enkel een afschuining en hier valt op dat de stroming loslaat. In praktijk zal er vermoedelijk nog een hoekprofiel geplaatst worden waardoor de loslating verminderd zal worden. Indien nieuwe simulaties uitgevoerd worden verdient het aanbeveling om dit mee te nemen.

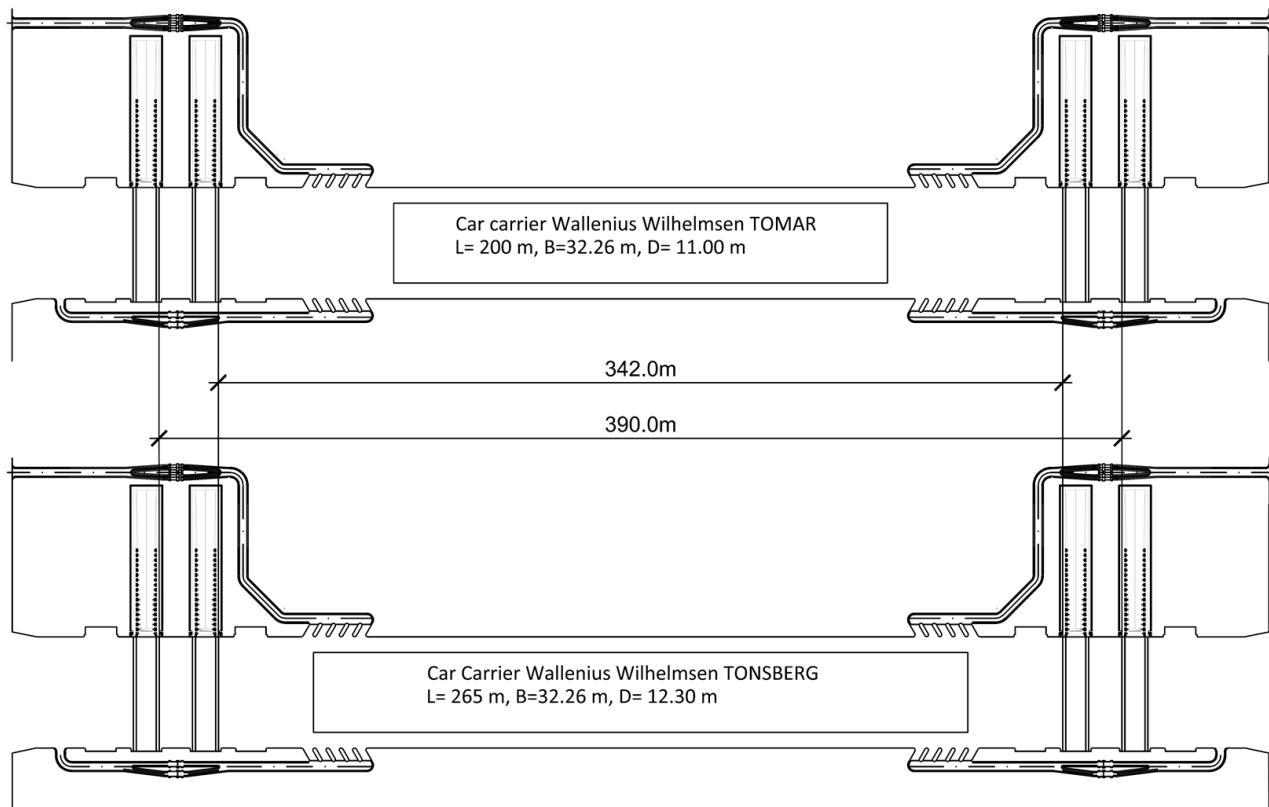
Voor de stroming in de kolk bij vullen worden verschillen opgemerkt tussen de simulaties met enkel de lange omloopriool en een symmetrievlak ter hoogte van het center en de simulatie met beide riolen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het stromingspatroon in de kolk ter hoogte van de uitstroomconstructie voornamelijk belangrijk wordt wanneer hier een schip aangemeerd is. De aanwezigheid van dit schip zal hierbij ook een invloed hebben op het stromingspatroon. Het uitvoeren van een tijdsafhankelijk simulatie met vrij oppervlak en een drijvend schip wordt op dit moment gekenmerkt door een zeer grote benodigde rekencapaciteit en onzekerheid. Dit zou onderzocht kunnen worden op een schaalmodel. WL adviseert om de Antwerpse zeesluizen als benchmark te gebruiken. De uitgevoerde bevraging bij het Havenbedrijf Antwerpen over de uitstroomconstructie (zie hoofdstuk 7) kan hiervoor nog uitgebreid worden naar de loodsen.

Bij de simulaties waarbij de lange omloopriool of beide omloopriolen rechtstreeks uitmonden in de open getijzone ontstaat een grote neer in de voorhaven. Bij de geometrie waar enkel de lange omloopriool rechtstreeks uitmond in de open getijzone zijn de snelheden lager. Dit komt doordat de uitstroming uit de korte omloopriool in aanraking komt met het verlengde van de overliggende kolkmuur en hierbij dissipatie optreedt. De snelheden in de open getijzone bedraagt ca. 0.7 m/s wanneer beide uitlaten rechtstreeks uitmonden in de open getijzone en ca. 0.5 m/s wanneer de inlaat van de lange omloopriool rechtstreeks uitmondt in de open getijzone. Het standaard ontwerp waarbij de inlaat van beide riolen uitmonden in het verlengde van de kolkmuuren zorgt voor een kleinere neer in de open getijzone en merkelijk lagere snelheden met een grootte tot ca. 0.2 m/s. De simulaties zijn uitgevoerd met een constante dichtheid. Uit studies voor het ontwerp van de nieuwe sluis van Terneuzen volgde dat een dichtheidsverschil ervoor dat het stromingspatroon beduidend wijzigt. Gedurende de sluislediging stijgt het debiet vanaf 0 naar het maximum debiet om vervolgens geleidelijk terug af te bouwen naar 0. De uitgevoerde steady state simulatie met het maximale debiet bij ledigen is hiervoor (te) conservatief. Ook het vullen en ledigen van de open getijzone met het getij zal mogelijks een belangrijke invloed hebben op de ligging van deze neer.

7 Positionering uitstroomconstructie

Een schets van de kolkinname met het ontwerpschip en het exceptioneel schip wordt gegeven in Figuur 36. Hieruit volgt dat het exceptioneel schip aangemeerd zal worden met de boeg boven de uitstroomconstructie.

Figuur 36 – Illustratie kolkinname ontwerpschip en exceptioneel schip



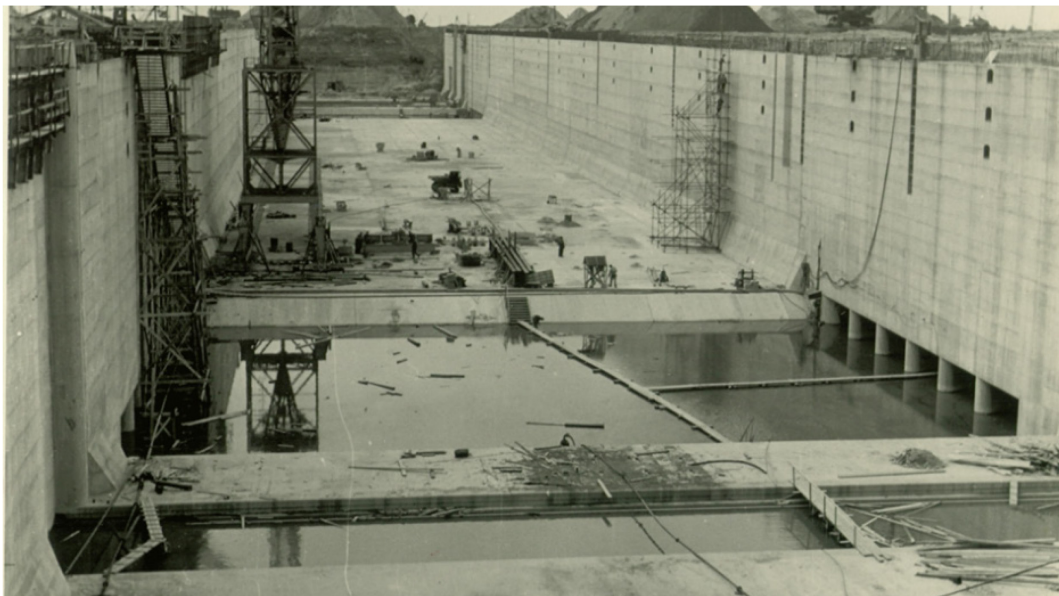
Een aandachtspunt bij de uitstroomconstructie is de positie van de kiel van het schip ten opzichte van het plafond van de uitstroomopeningen bij het begin van de nivellering, zie Tabel 35.

Tabel 35 – Positie kiel schip ten opzichte van plafond uitstroomopeningen

		ontwerpschip	
		Tomar	Tonsberg
bodempeil kolk	[m TAW]	-12.5	
ontwerp waterpeil	[m TAW]	+ 0.0	+ 1.0
waterhoogte kolk	[m]	12.5	13.5
diepgang	[m]	11.0	12.3
kielspeling	[m]	1.5	1.2
hoogte uitstroomopening	[m]	2.0	2.0
overlap kiel met uitstroomopening	[m]	0.5	0.8

Merk in Tabel 35 op dat de kiel van diepliggende schepen lager komt te liggen dan het plafond van de uitstroomopeningen. Dit resulteert mogelijks in grote dwarskrachten op de aangemeerde schepen, indien deze voor de uitstroomconstructies van de omloopriolen kunnen afmeren. Bij het ontwerp van de Boudewijnslus en de vernieuwde Royerssluis stelde zich een soortgelijke vraag. Uit de schaalmodelproeven van de Boudewijnslus volgde dat een overlap met 0.80 m resulteerde in grote dwarskrachten op het schip in de sluis. Hierop werd geopteerd om de bodem lokaal met 1.50 m te verlagen, zie Figuur 37. Bij het ontwerp van de vernieuwde Royerssluis werd een lokale bodemverdieping met 1.25 m toegepast. In beide gevallen zorgt een lokale bodemverdieping ervoor dat de kiel van het schip steeds hoger ligt dan het plafond van de uitstroomopeningen.

Figuur 37 – Lokale verdieping van de bodem van de Boudewijnslus ter hoogte van de uitstroomconstructie



Een dergelijke bodemverlaging werd niet toegepast bij de Zandvlietslus, Kalloslus, Berendrechtlsuis en Kieldrechtlsuis. Om in te schatten of problemen optreden wanneer zeeschepen afmeren met de boeg voor de uitstroomconstructie werd door WL navraag gedaan met betrekking tot de gangbare praktijk van afmeren van zeeschepen in de Zandvliet-, Berendrecht- en Kalloslus. Aan het Havenbedrijf Antwerpen werden volgende vragen gesteld:

- of er ervaring is met hinderlijke turbulenties/waterpeilvariaties in de zone van de uitstroomconstructie tijdens vullen.
- of zeeschepen aangemeerd worden met de boeg ter hoogte van de uitstroomconstructie. Indien ja, gebeurt dit ook bij vullen via het bovenhoofd met een laag Scheldepeil / bij diepliggende zeeschepen?

Het Havenbedrijf Antwerpen heeft op het ogenblik van schrijven van dit rapport geen weet van problemen met hinderlijke turbulenties/waterpeilvariaties in de zone van de uitstroomconstructie. Bij grote containerschepen is het vermoedelijk enkel de bulb die aangemeerd wordt ter hoogte van de uitstroomconstructie. Bij het inplannen van de schepen in de sluisen wordt dan ook geen rekening gehouden met de positie van de uitstroomconstructie. Het zou interessant zijn om ook aan de loodsen te vragen hoe zij de vullingen in de Antwerpse zeesluizen ervaren, of zij met de boeg ter hoogte van de uitstroomconstructie aanmeren en indien ja hoe zij de turbulente stroming ter hoogte van de uitstroomconstructie ervaren.

8 Conclusies en aanbevelingen

Voor het ontwerp van een nieuwe sluis te Zeebrugge heeft afdeling Maritieme Toegang (projectingenieur: Frederik Buffel) aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om het hydraulisch ontwerp uit te voeren van een nivelleersysteem met korte omloopriolen. Deze vraag kaderde in het Strategisch HavenInfrastructuur Project (SHIP). In het SHIP project werd een nieuwe sluis gelegen opwaarts de Visartsluis beschouwd met afwaarts een open getijde dok. Tijdens de uitvoering van de studie werd besloten om voor de nieuwe sluis te Zeebrugge de procedure voor een complex project op te starten. Hierdoor worden terug meerdere alternatieve locaties voor de nieuwe sluis onderzocht. Op het moment dat dit beslist werd was al een deel van het studiewerk voltooid en waren de uitbesteedde CFD simulaties al gegund. Dit rapport beschrijft de resultaten van het reeds uitgevoerde studiewerk en de uitbesteedde CFD simulaties. Het betreft dus geen definitief ontwerp van een nivelleersysteem voor de nieuwe sluis. Uit de resultaten volgen enkele aanbevelingen voor de geometrie die nog verder geanalyseerd moeten worden. Er zijn nog geen toetsingen uitgevoerd voor het beoordelen van luchtaanzuiging (ter hoogte van de schuiven en inlaten). Het hydraulisch netwerkmodel voor het bepalen van de nivelleertijd, de openingswet en de langskracht op een schip kan nog bijgewerkt worden met de verliescoëfficiënten die volgen uit de CFD studie.

Door het studiebureau SBE werd een voorontwerp van een nivelleersysteem van een nieuwe zeesluis uitgevoerd op basis van het ontwerp van het nivelleersysteem van de Antwerpse zeesluizen. De nieuwe sluis heeft een lengte van 390.0 m tussen de uiterste roldeuren, een kolkbreedte van 45.0 m en een kolkbodem op -12.5 m TAW. Per hoofd zijn twee riolen met hoogte 4.5 m en breedte 4.5 m (doorstroomsectie 20.25 m²) voorzien. De nieuwe sluis wordt gedimensioneerd voor een peil in de achterhaven van +3.50 m TAW in combinatie met een peil van +0.02 m TAW in de open getijzone. Het ontwerpschip in de kolk betreft de car carrier Tomar (LXBXD = 200.0 m x 32.26 m x 11.0 m). Het criterium voor de nivelleertijd bedroeg initieel 15.0 min. Nadien werd dit bijgesteld naar 18.0 min. Voor de toelaatbare langskracht worden drie criteria gehanteerd. In volgorde van oplopende toelaatbare langskracht: een criterium op basis van de literatuur (0.20 ‰), een criterium op basis van opgemeten langse waterspiegelhellingen in de Vandamme sluis (0.30 ‰) en een criterium op basis van hydraulische netwerksimulaties met het ontwerpschip in de Berendrechtsluis (0.40 ‰).

Op basis van het voorontwerp van het studiebureau werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld. Uit de simulaties volgde dat het mogelijk was om de kolk te nivelleren in 13.7 tot 15.4 minuten afhankelijk van het beschouwde criterium voor de langskracht. Met dit hydraulisch netwerkmodel werden een aantal varianten gesimuleerd, waarbij enkel de secties van de riolen gewijzigd werden. De dimensieloze verliescoëfficiënten van de verschillende componenten werden niet opnieuw opgesteld. Een eerste variant betrof het vergroten van de rioolbreedte en rioolhoogte tot 5.0 m (doorstroomsectie 25.0 m²). Hiermee was het mogelijk om de nivelleertijd te reduceren tot een waarde tussen 11.5 en 13.8 minuten (afhankelijk van het criterium van de langskracht). Uit de simulaties met een tot -13.0 m TAW verdiepte kolkbodem volgde dat dit zo goed als geen effect had op het sneller kunnen openen van de schuiven. Na het bijstellen van het criterium van de nivelleertijd op 18.0 minuten werd een variant beschouwd met een rioolbreedte en rioolhoogte 4.0 m (doorstroomsectie 16.0 m²). Afhankelijk van het criterium voor de langskracht bedroeg de nivelleertijd 16.7 tot 18.3 minuten. In overleg met de opdrachtgever werd besloten om de sectie met breedte 4.0 m en hoogte 4.0 m te weerhouden voor het verdere ontwerp.

De dimensies van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis werden vervolgens vergeleken met de nivelleersystemen voor de Antwerpse zeesluizen. Hieruit volgde dat de verhouding van de doorstroomsectie van de omloopriolen tot het kolkoppervlak voor de nieuwe sluis te Zeebrugge 1.8 ‰ bedraagt. Dit is merkbaar lager dan voor de sluizen in de haven van Antwerpen waar de sectie van de omloopriolen tussen 2.7 ‰ en 3.6 ‰ bedraagt van het kolkoppervlak. De verklaring hiervoor is de gunstigere combinatie van ontwerpverval en nivelleertijd voor de nieuwe sluis te Zeebrugge. Ook voor de

uitstroomconstructie werden een aantal kenmerkende relatieve afmetingen vergeleken met de Antwerpse zeesluizen. Hieruit volgde dat de dimensies van de uitstroomconstructie in lijn ligt met de Antwerpse zeesluizen.

De door het studiebureau opgestelde geometrie werd vervolgens door WL bijgewerkt naar een rioolbreedte en rioolhoogte van 4.0 m (doorstroomsectie 16.0 m²). Voor de aangepaste geometrie werd het hydraulisch netwerkmodel opnieuw opgebouwd. Uit de simulaties met het nieuwe hydraulisch netwerkmodel volgt dat de nivelleertijd bij vullen met de ontwerppeilen en het ontwerpschip afhankelijk van het criterium voor de langskracht 16.7 min tot 18.2 min bedraagt. Het ledigen met de ontwerppeilen en het ontwerpschip in de kolk duurt 18.9 min tot 19.6 min. De verklaring hiervoor is dat de verliezen bij ledigen hoger zijn dan bij vullen. Normaal kan dit gecompenseerd worden doordat bij ledigen de hefschuiven sneller geopend kunnen worden. Door de relatief kleine doorstroomsectie van de openingen worden de hefschuiven bij ledigen al snel geopend waardoor hier geen winst meer mogelijk is. Bij een peil +1.00 m TAW en hoger kan het exceptioneel schip verschut worden met behoud van de openingswet.

Met de bijgewerkte geometrie werden vervolgens 3D CFD simulaties uitgevoerd door het studiebureau Actiflow. Bij deze simulaties werd gefocust op de stroming in de riolen, de uitstroomconstructie, de kolk en de open getijzone. Uit de simulaties volgt dat de uitstroomconstructie goed is vormgegeven. Op enkele plaatsen in de omloopriool treedt loslating van de stroming op. Deze loslating zorgt voor bijkomende verliezen. Bij ledigen zal ten gevolge van loslating het debiet niet gelijkmatig verdeeld zijn over beide hefschuiven van de lange omloopriool. Ten opzichte van het LOCKSIM model zijn de verliezen volgend uit de CFD simulatie hoger voor een gedeeltelijk (20%) geopende hefschuif en lager bij een volledig geopende hefschuif. Ook werden simulaties uitgevoerd van de uitstroming in de open getijzone. Om de lengte van de sluis te reduceren mondt de inlaat van de lange omloopriool rechtstreeks uit in de open getijzone. De geometrie waarbij de lange omloopriool rechtstreeks uitmondt in de open getijzone zorgt voor een grote neer in de open getijzone. Uit de simulaties volgde dat de snelheden in de open getijzone merkelijk lager zijn wanneer beide riolen tegenover elkaar uitmonden in het verlengde van de kolkmuur. Voor de opties waarbij de riolen rechtstreeks uitmonden in de open getijzone kan de snelheid in de open getijzone verlaagd worden door het aanpassen van de geometrie van de inlaten. Voor verder CFD onderzoek van de stroming in de open getijzone wordt het volgende opgemerkt. De steady-state simulatie van de open getijzone is conservatief omdat hierbij uitgegaan wordt van een situatie waarbij continu het maximum debiet uitstroomt terwijl in werkelijkheid het debiet opbouwt en afbouwt tijdens het nivelleren. Het vullen en ledigen van de open getijzone met het getij zal mogelijks een belangrijke invloed hebben op de ligging van de neer.

De studie werd uitgevoerd uitgaande van zoet water met een constante dichtheid van 1000 kg/m³. Het meenemen van dichtheid kan een grote invloed hebben op het nivelleren en de stroming in de open getijzone bij ledigen. Doordat in de huidige situatie de achterhaven op peil gehouden wordt met zeewater wordt aangenomen dat het dichtheidsverschil over de sluis verwaarloosbaar is. Indien de mogelijkheid bestaat dat in de toekomst de dichtheid van het water in de achterhaven verlaagd wordt dient dit bij het ontwerp van de nieuwe sluis al meegenomen te worden.

9 Referenties

- Actiflow.** (2014). CFD-studie naar de stroming in de nieuwe Royerssluis: gridgevoeligheidsstudie. versie 1.2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Actiflow.** (2015). CFD-studie naar stroming door de omloopriolen van de nieuwe Royerssluis: eindrapportage. versie 1.1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Afdeling Maritieme Toegang; Technum; SBE.** (2014a). SHIP - Ontwerp sluis - Bovenhoofd - korte omloopriool - snedes - details - dd. 25/06/2014
- Afdeling Maritieme Toegang; Technum; SBE.** (2014b). SHIP - Ontwerp sluis - Bovenhoofd - korte omloopriool - snedes - schuifputten - dd. 25/06/2014
- Afdeling Maritieme Toegang; Technum; SBE.** (2014c). SHIP - Ontwerp sluis - Bovenhoofd - lange omloopriool - schuifputten - snedes - details - dd. 28/04/2014
- Afdeling Maritieme Toegang; Technum; SBE.** (2014d). SHIP - Ontwerp sluis - Deurkamer - Lengte- en dwarsdoorsnedes - details - dd. 21/05/2014
- Afdeling Maritieme Toegang; Technum; SBE.** (2014e). SHIP - Ontwerp sluis - sluis - Bovenaanzicht - Lengtedoorsnede - Details - dd. 25/06/2014
- De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2007). Tweede sluis Waaslandhaven: opmaak numeriek modelinstrumentarium voor vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten*, 760/03A-2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2010a). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 4. Aanpassing numeriek modelinstrumentarium voor vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten*, 760_03a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2010b). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 5. Evaluatie van hydraulische performantie ontwerp vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten*, 760_03a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Fahner, T.; Terry, E.; Maas, R.** (2017). CFD-studie naar de stroming bij ledigen en vullen van een sluis - Eindrapportage. 63 pp.
- Idel’Cik, I.E.** (1969). Mémento des pertes de charge: coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement. *Collection du centre de recherches et d’essais de Chatou*, 13. Eyrolles: Paris. 494 pp.
- Lamoën, J.** (1950). Modelproeven voor het vullen en ledigen van de kolk der Boudewijns sluis (troskrachten, aanslibbingen, golven). *WL Rapporten*, 90. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Miller, D.S.** (1990). Internal Flow Systems, 2nd edition, Gulf Publishing Co.: Houston, Texas.
- Munson, B.R.; Young, D.F.; Okiishi, T.H.** (1990). Fundamentals of fluid mechanics. Wiley: New York. ISBN 0-471-85526-X
- Schohl G.A.** (1998). User’s Manual for LOCKSIM – Hydraulic simulation of navigation lock filling and emptying systems
- Smets, E.; Sterling, A.** (1961). Nieuwe zeesluis te Zandvliet: verslag der modelproeven. *WL Rapporten*, 186_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2012). Haven van Zeebrugge - SHIP: terreinmeting nivelleren Vandammesluis. *WL Rapporten*, 12_036. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2012). Haven Zeebrugge - SHIP: deelrapport 2. Ontwerp nivelleersysteem. *WL Rapporten*, 12_036. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2013). Haven van Antwerpen - Royerssluis: voorontwerp nivelleersysteem vernieuwde Royerssluis. *WL Rapporten*, 12_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; De Mulder, T.; Fahner, T.; De Cock, W.; Pauwels, H. (2015). Hydraulic design of a filling emptying system for the new Royers lock in the port of Antwerp in E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June – 3 July: The Hague, the Netherlands.

Bijlage A – Openingswetten hefschuiven

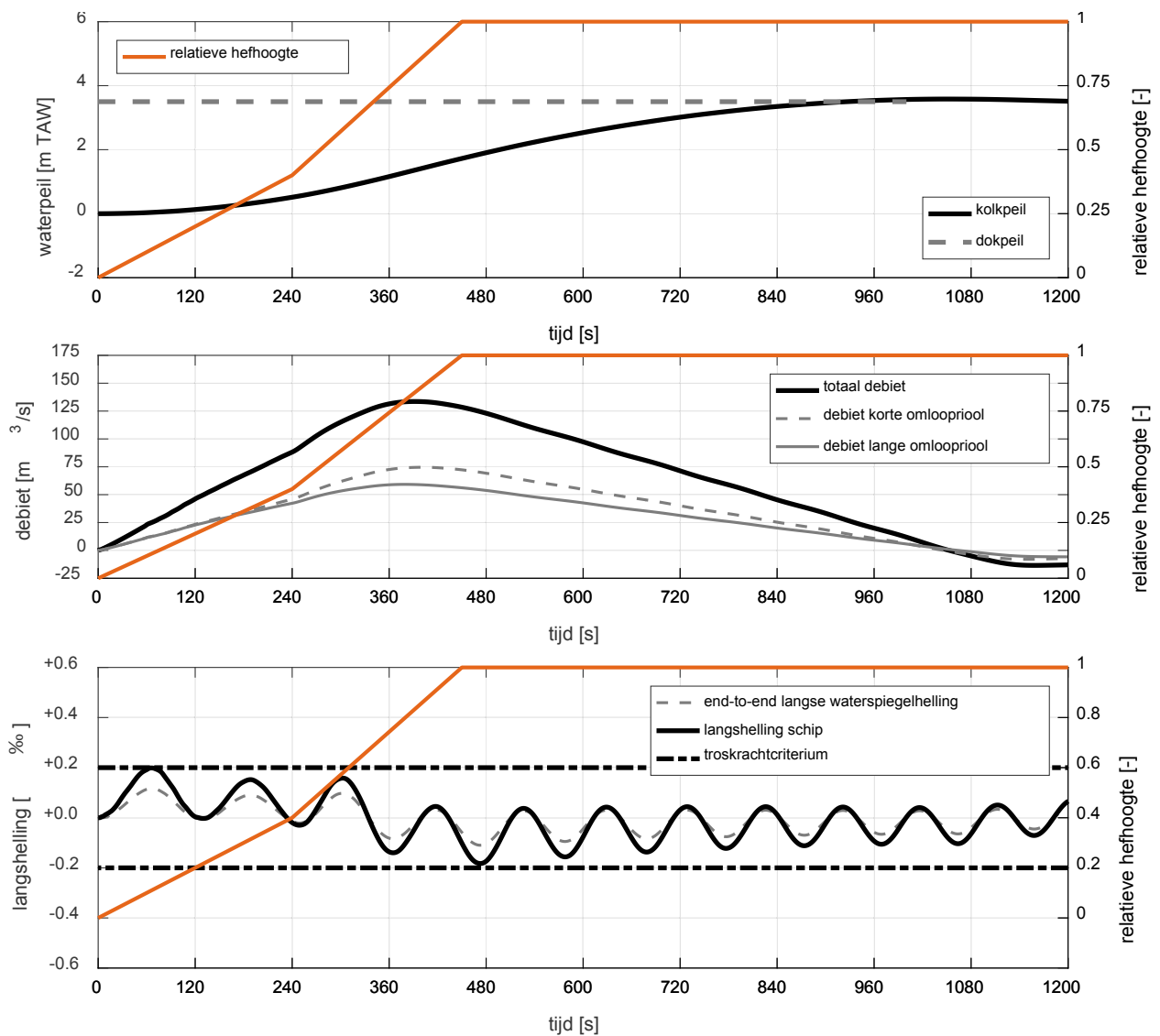
openingswet nr.	tijd	relatieve hefhoogte	hefhoogte	hefsnelheid
	[s]	[-]	[m]	[m/s]
1	0	0	0	0.007
	240	0.4	1.6	0.011
	450	1	4	0.000
2	0	0	0	0.010
	240	0.6	2.4	0.013
	360	1	4	0.000
3	0	0	0	0.013
	120	0.4	1.6	0.020
	240	1	4	0.000
4	0	0	0	0.005
	240	0.32	1.28	0.008
	570	1	4	0.000
5	0	0	0	0.008
	240	0.47	1.88	0.014
	390	1	4	0.000
6	0	0	0	0.011
	120	0.33	1.32	0.018
	270	1	4	0.000
7	0	0	0	0.007
	240	0.42	1.68	0.013
	420	1	4	0.000
8	0	0	0	0.011
	240	0.66	2.64	0.015
	330	1	4	0.000
9	0	0	0	0.015
	120	0.45	1.8	0.021
	225	1	4	0.000
10	0	0	0	0.008
	240	0.5	2	0.013
	390	1	4	0.000
11	0	0	0	0.012
	120	0.35	1.4	0.017
	270	1	4	0.000
12	0	0	0	0.017
	120	0.5	2	0.022
	210	1	4	0.000

openingswet nr.	tijd	relatieve hefhoogte	hefhoogte	stijgsnelheid
	[s]	[-]	[m]	[m/s]
13	0	0	0	0.008
	240	0.5	2	0.013
	390	1	4	0.000
14	0	0	0	0.012
	120	0.35	1.4	0.017
	270	1	4	0.000
15	0	0	0	0.017
	120	0.5	2	0.022
	210	1	4	0.000
16	0	0	0	0.017
	240	1	4	0.000
17	0	0	0	0.027
	150	1	4	0.000
18	0	0	0	0.033
	120	1	4	0.000

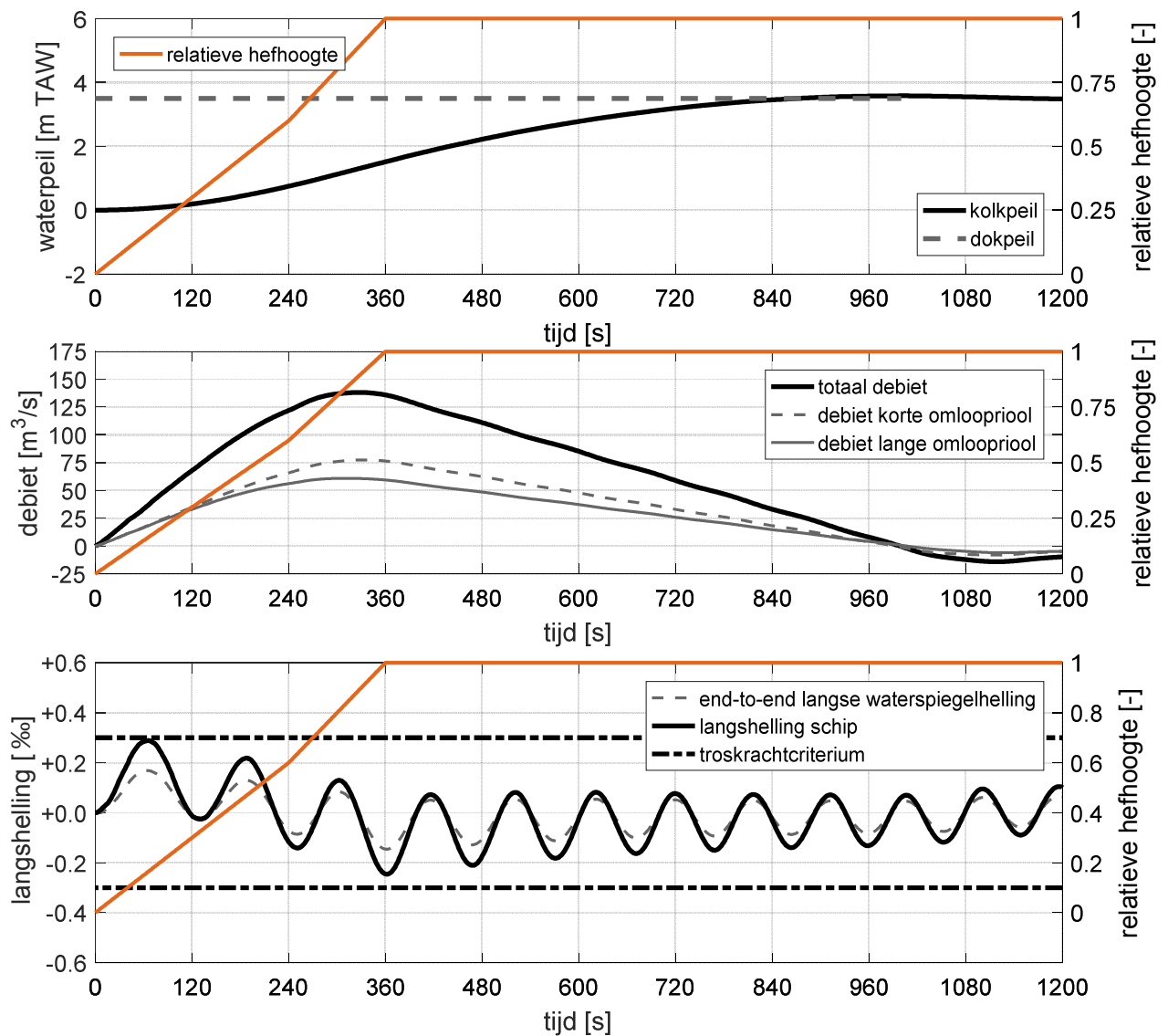
Bijlage B – Figuren LOCKSIM simulaties

B.1 Simulaties hoofdstuk 4

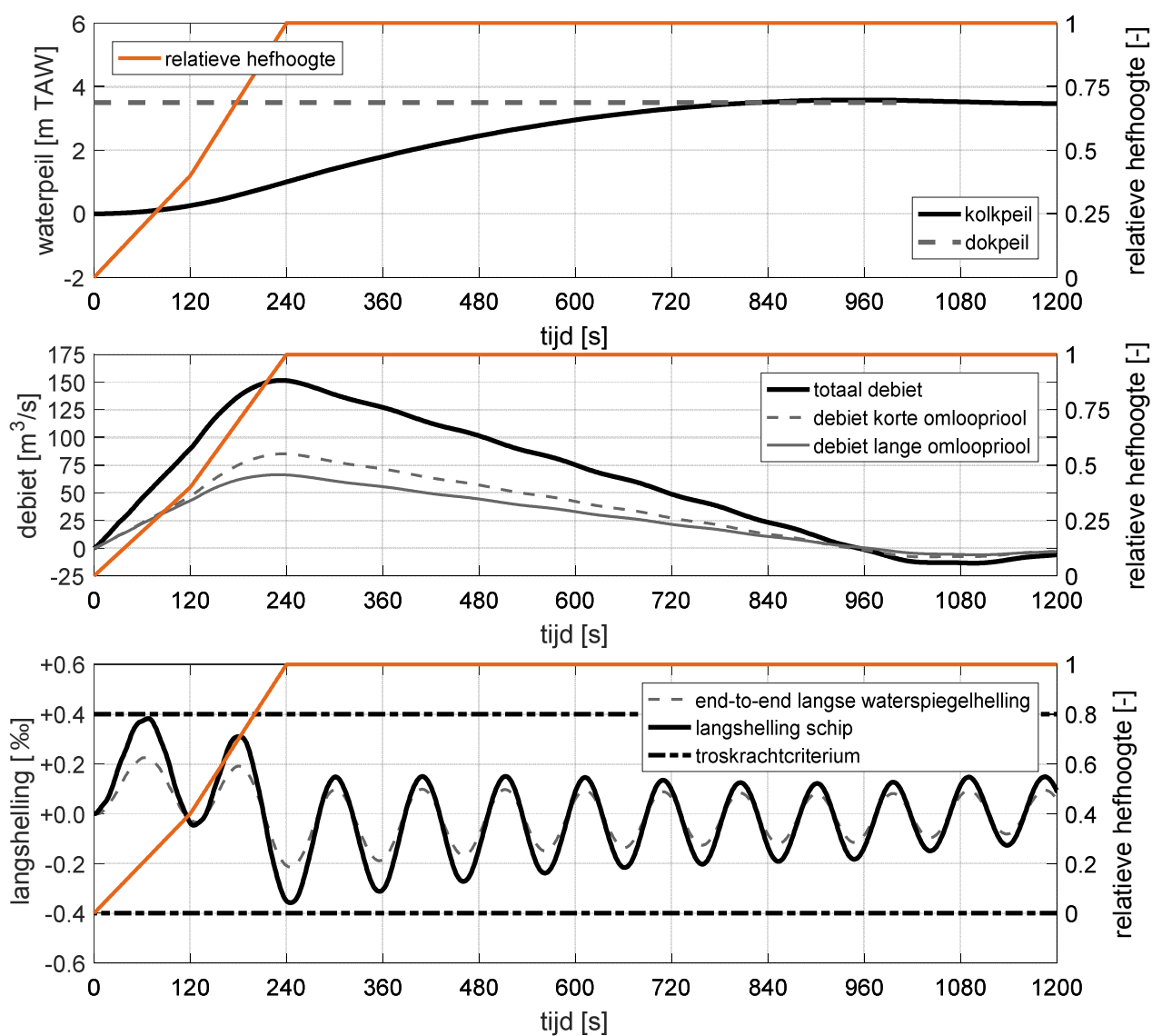
Figuur 38 – Simulatie N1



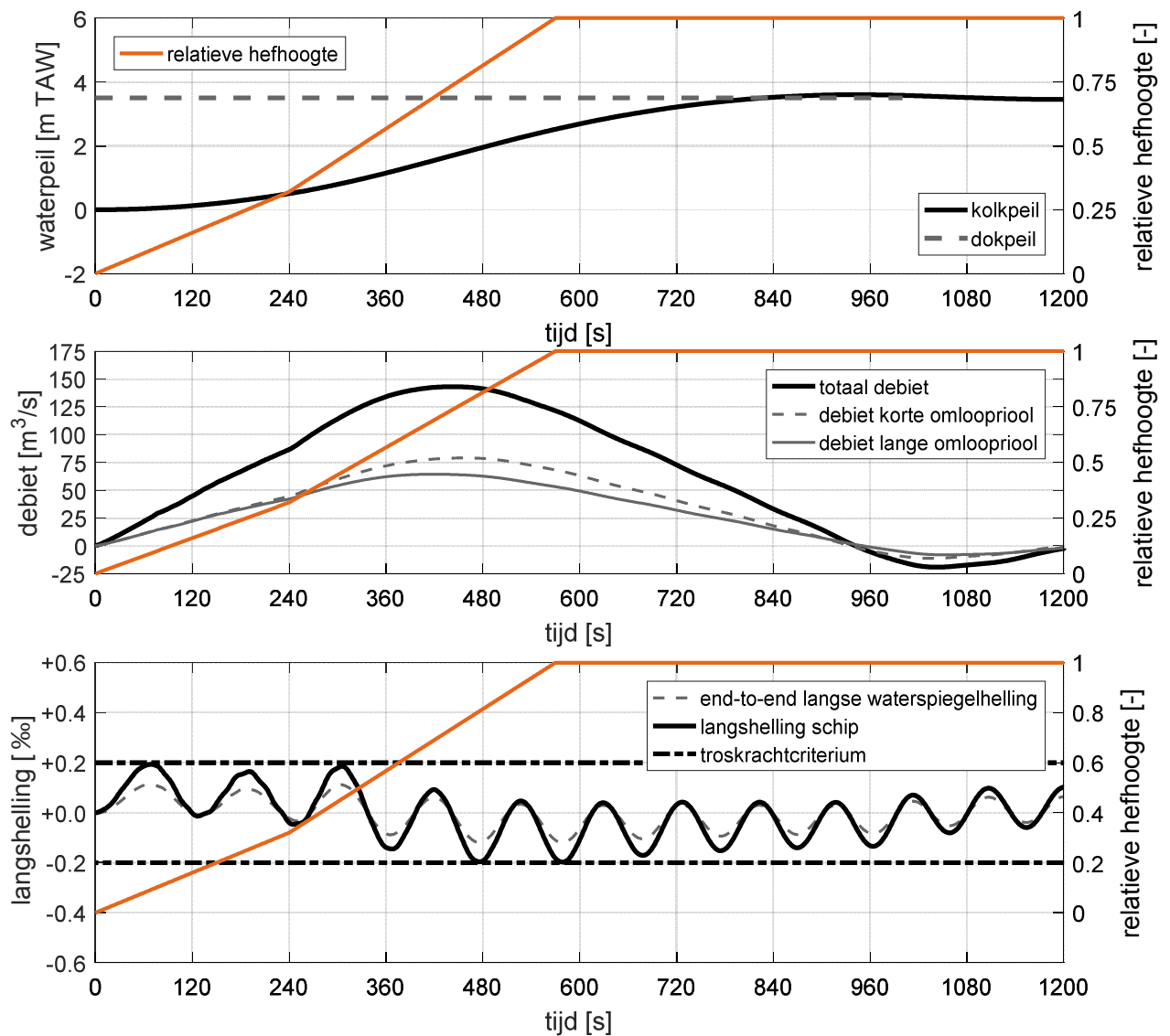
Figuur 39 – Simulatie N2



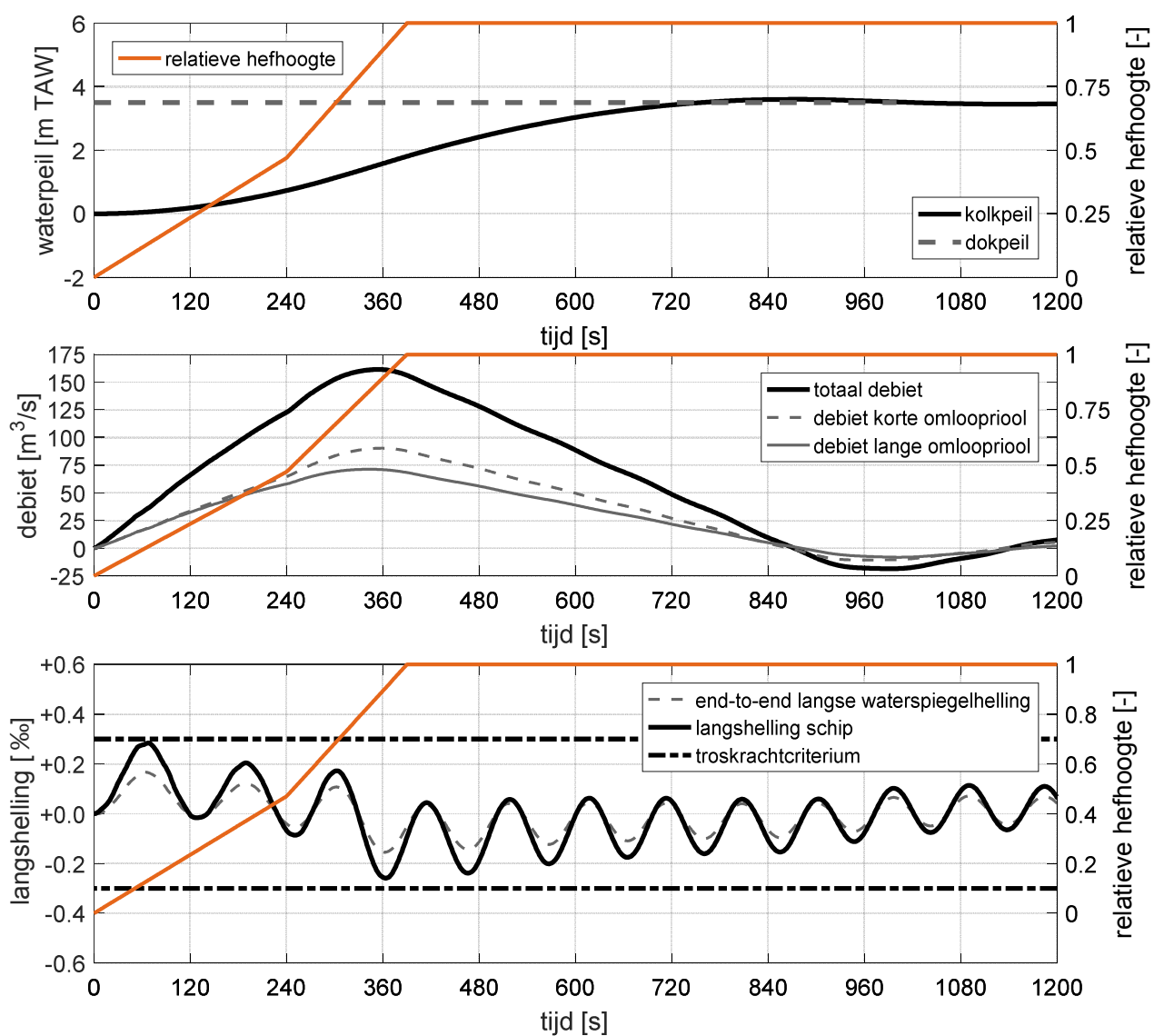
Figuur 40 – Simulatie N3



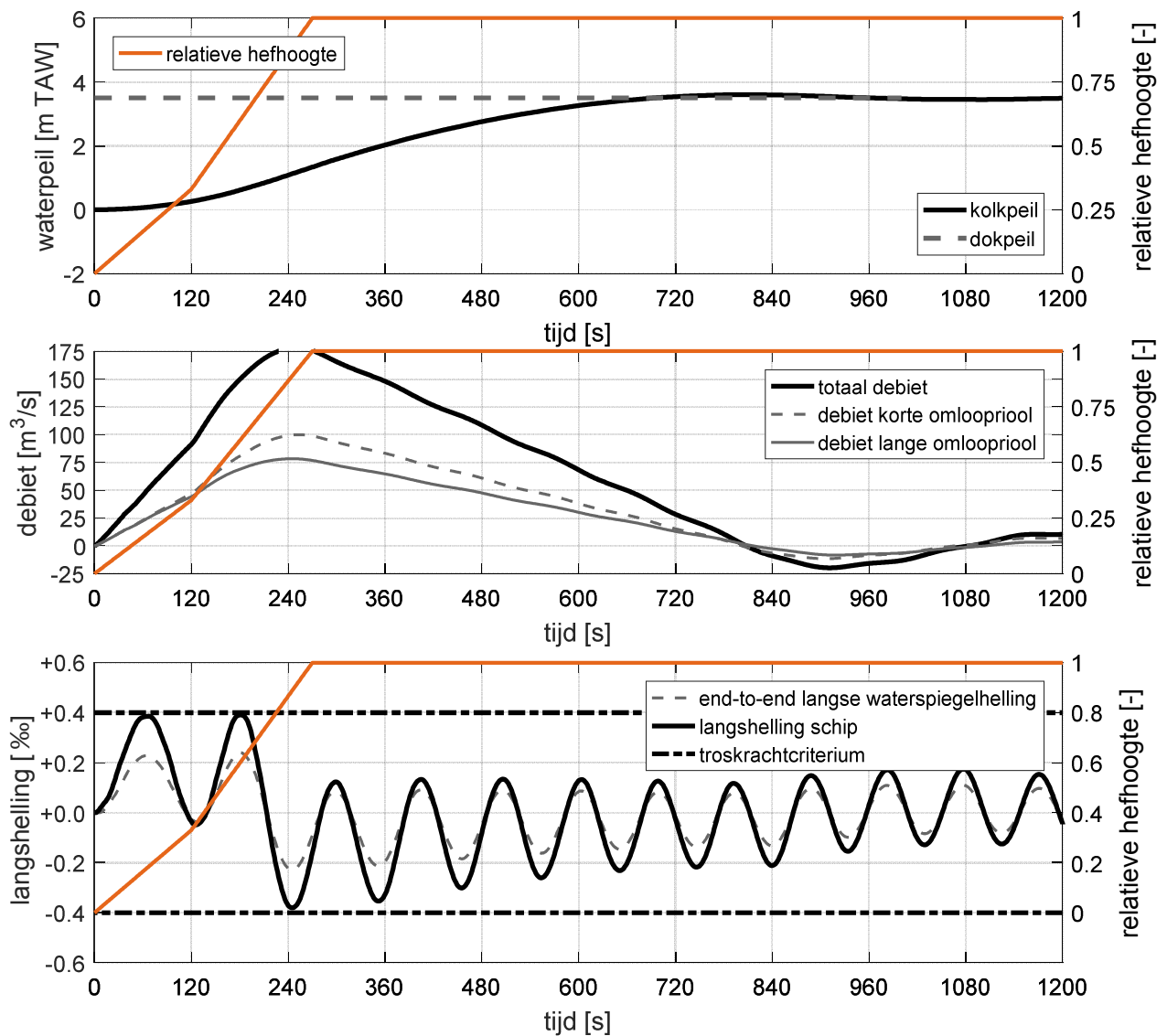
Figuur 41 – Simulatie N4



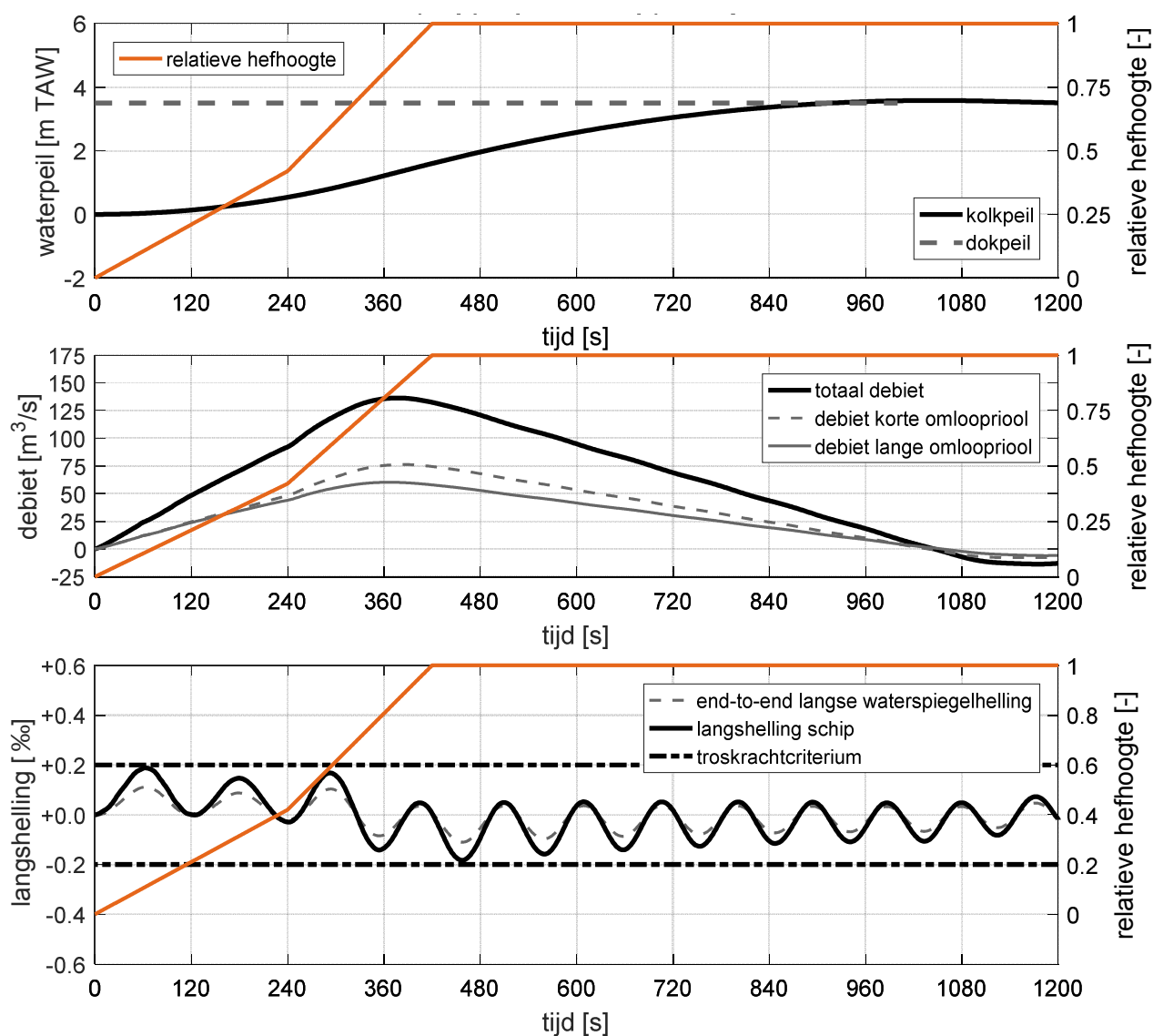
Figuur 42 – Simulatie N5



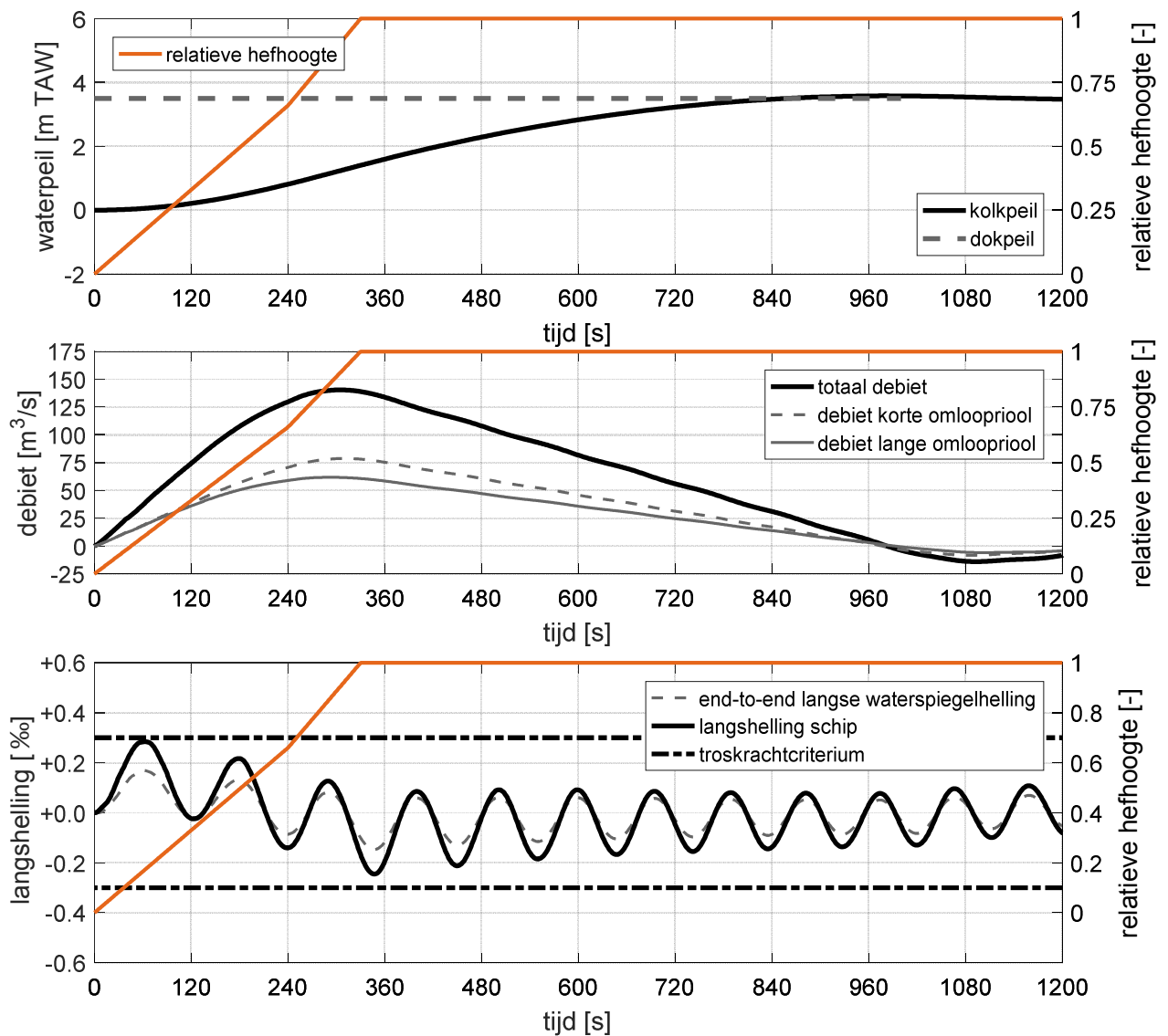
Figuur 43 – Simulatie N6



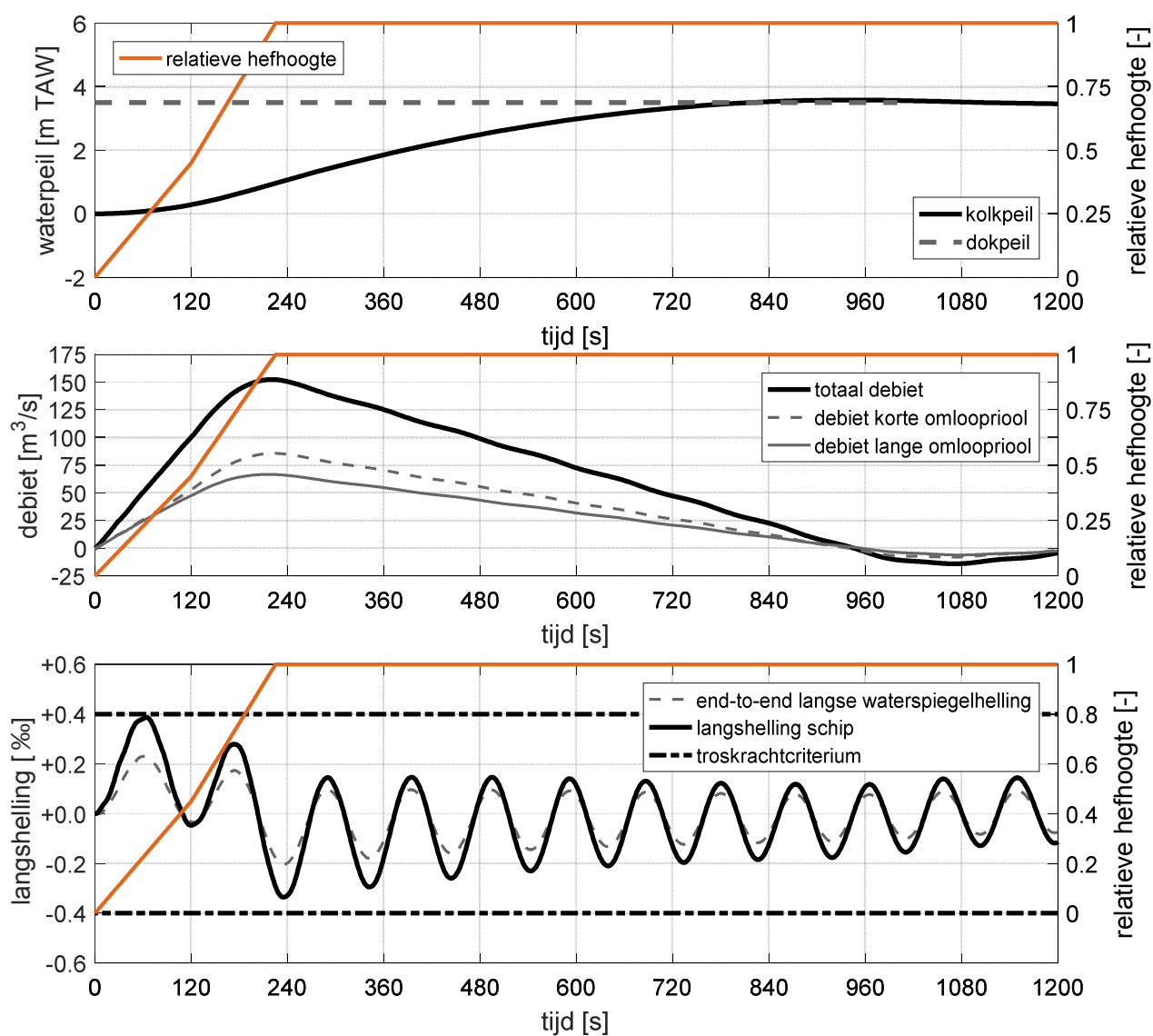
Figuur 44 – Simulatie N7



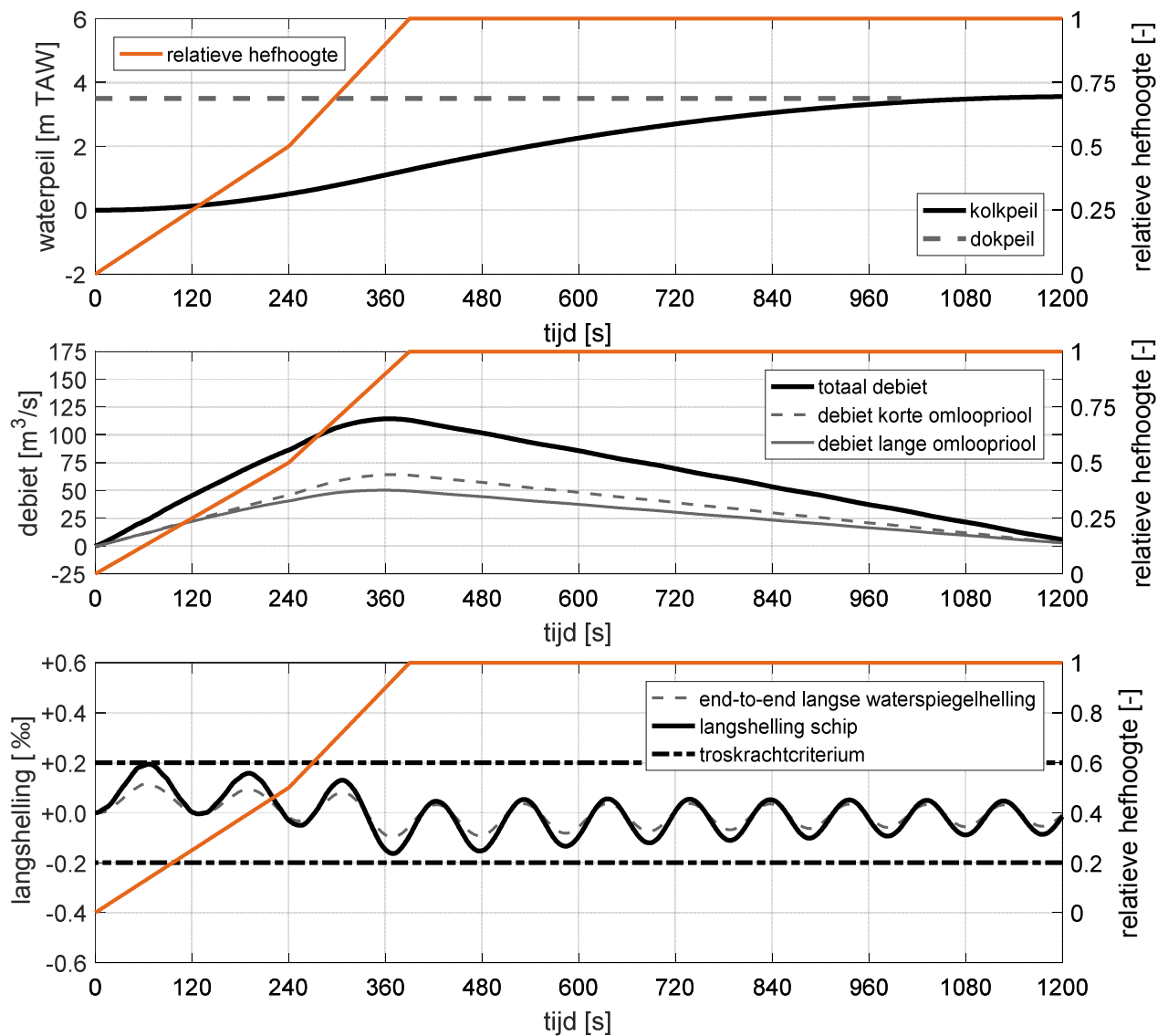
Figuur 45 – Simulatie N8



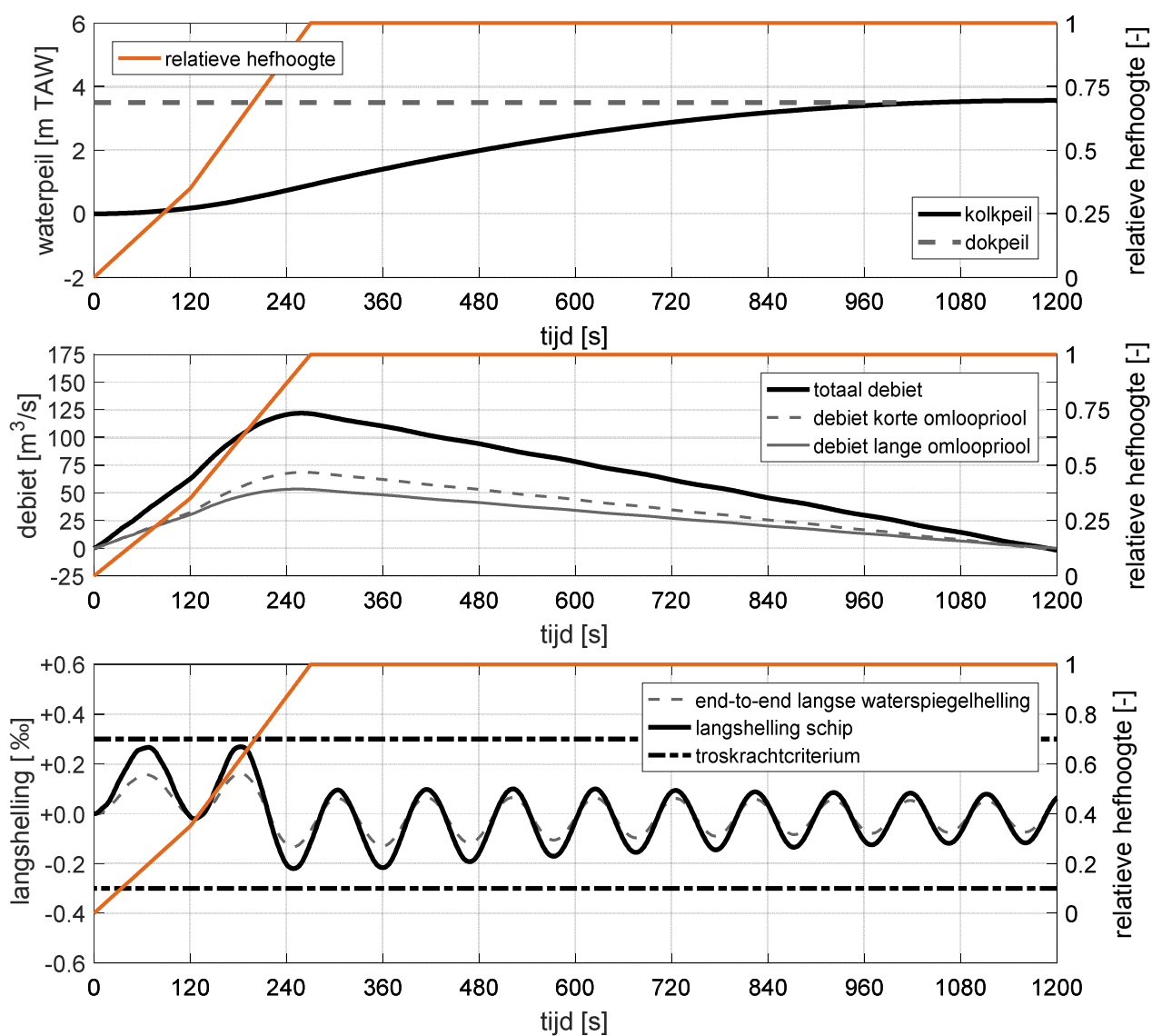
Figuur 46 – Simulatie N9



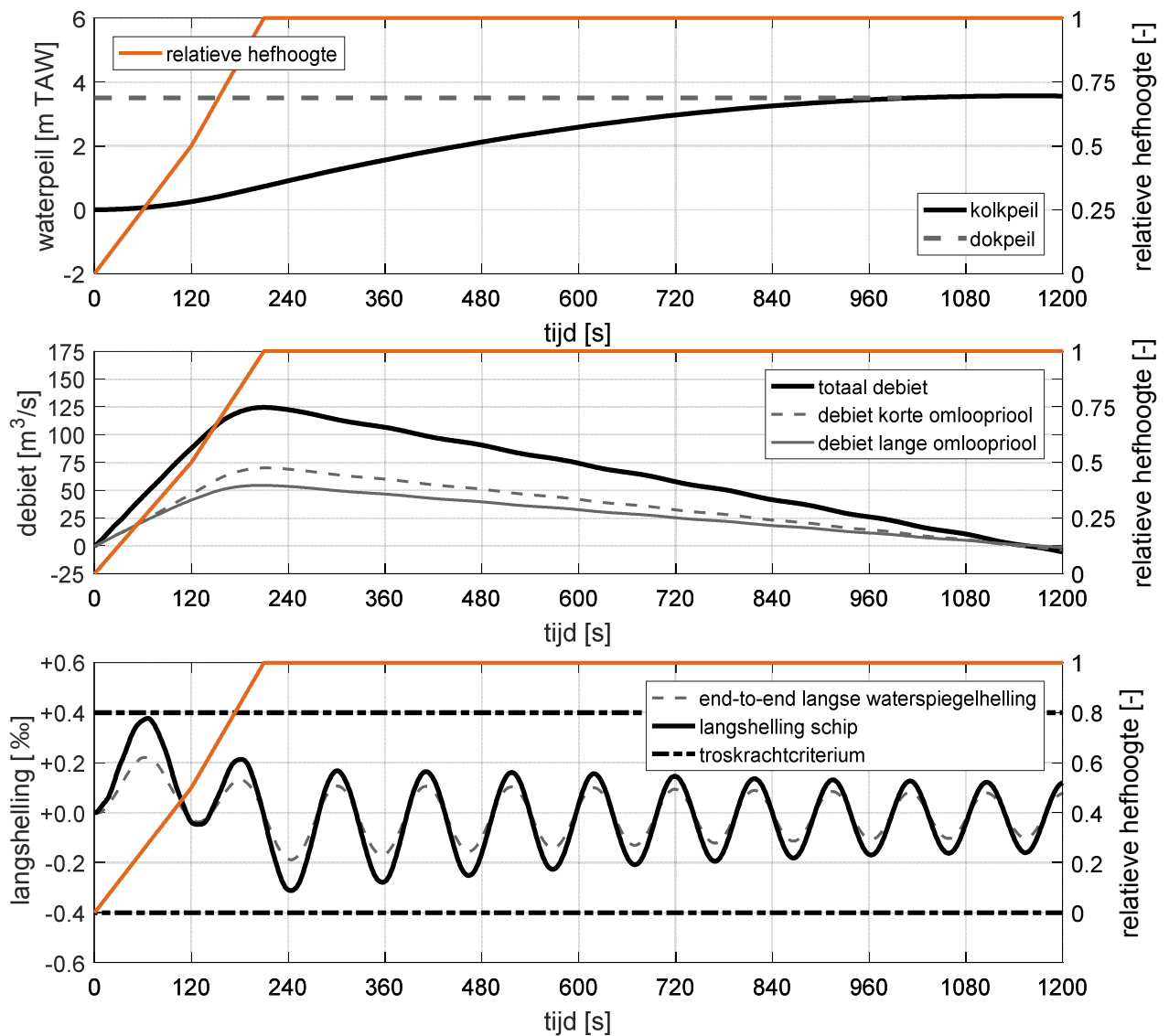
Figuur 47 – Simulatie N10



Figuur 48 – Simulatie N11

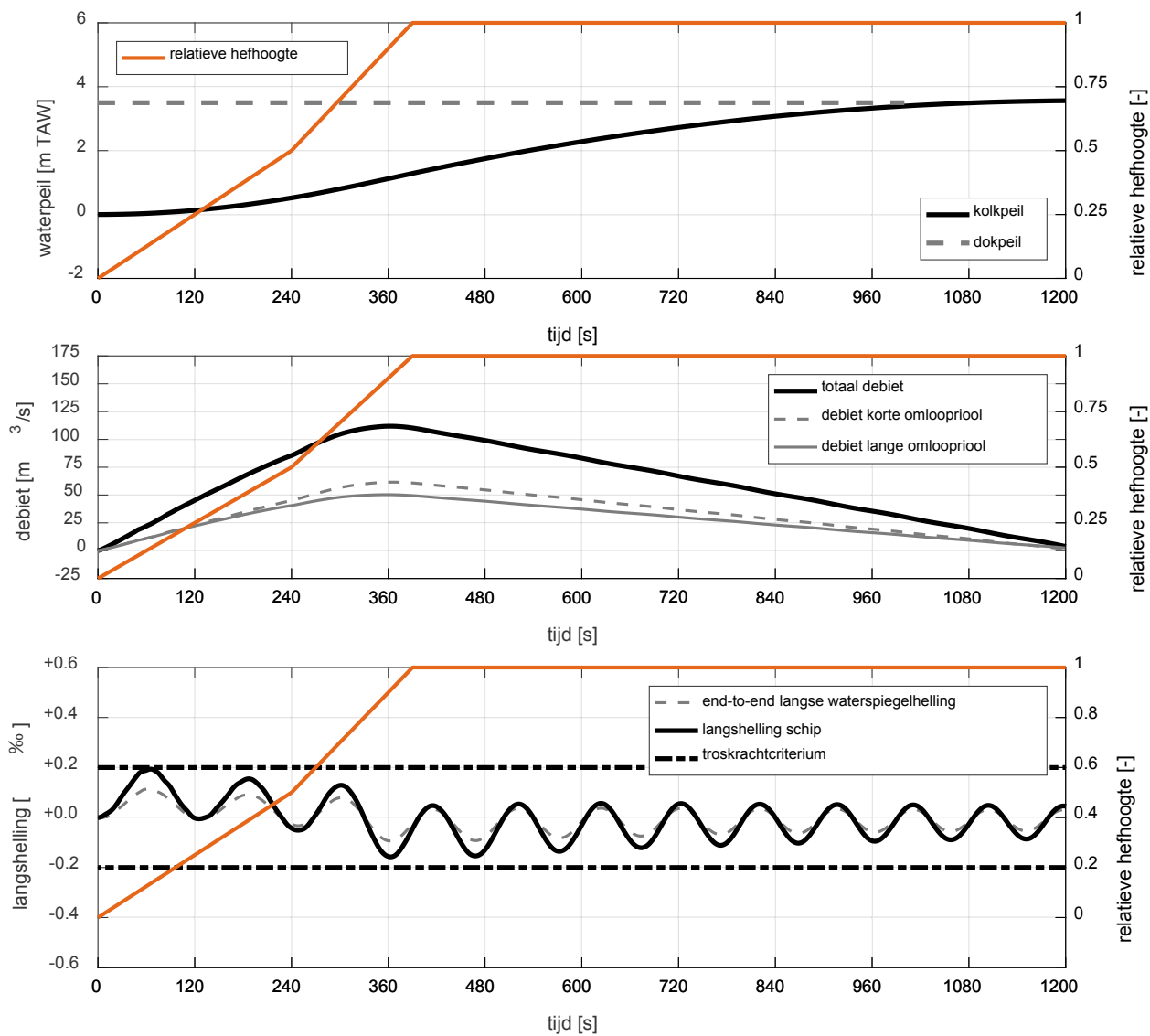


Figuur 49 – Simulatie N12

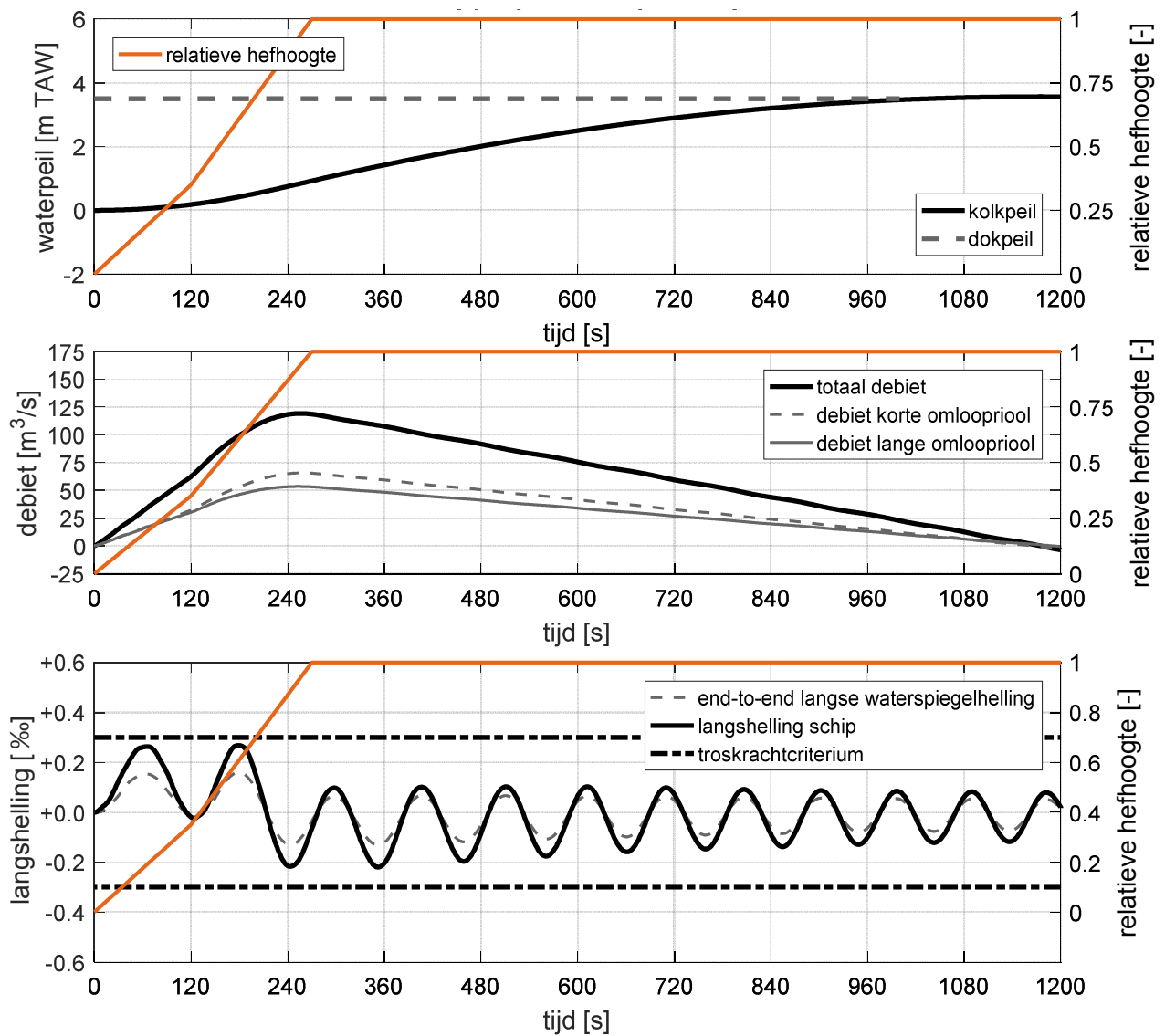


B.2 Simulaties hoofdstuk 5

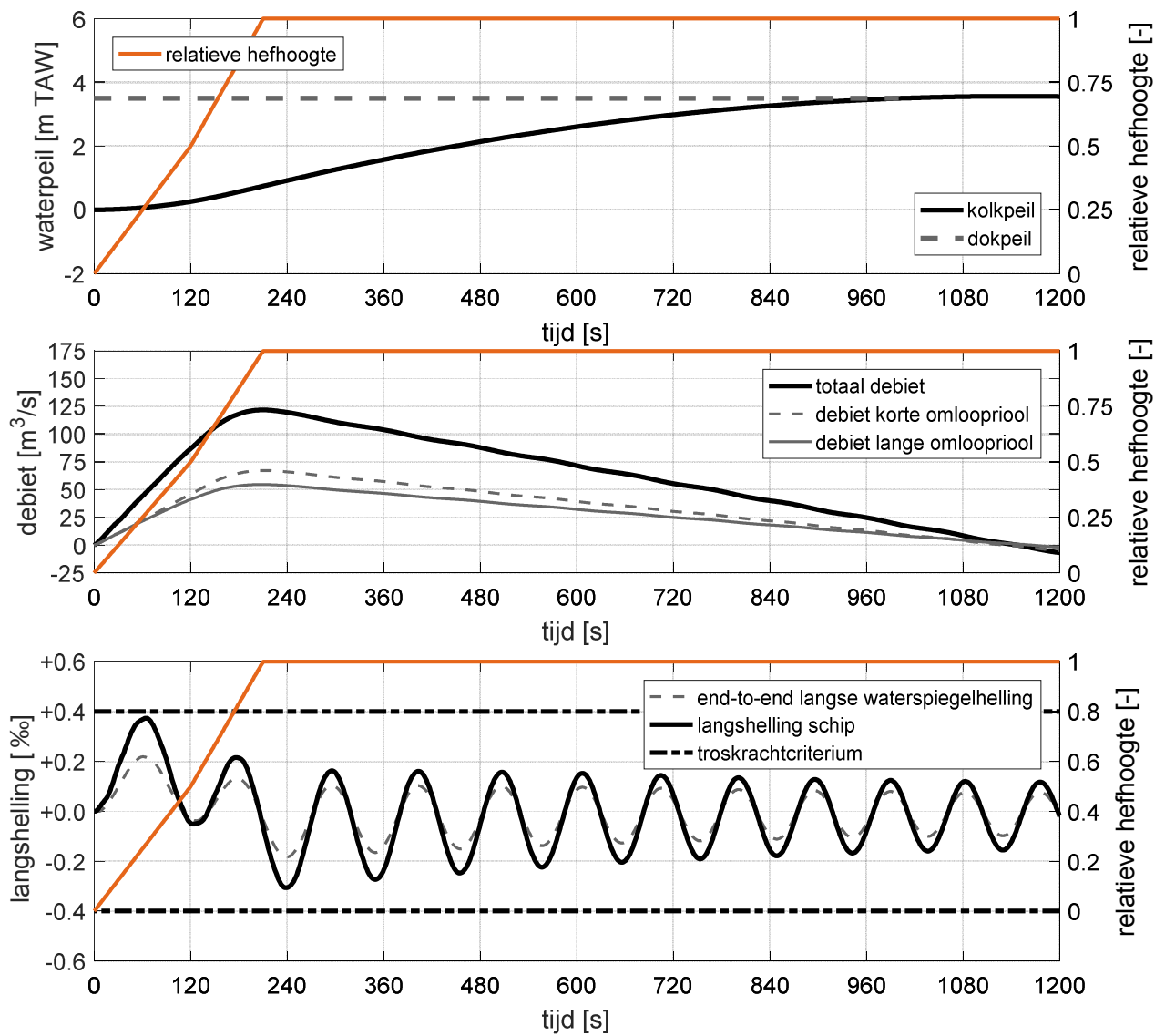
Figuur 50 – Simulatie N13



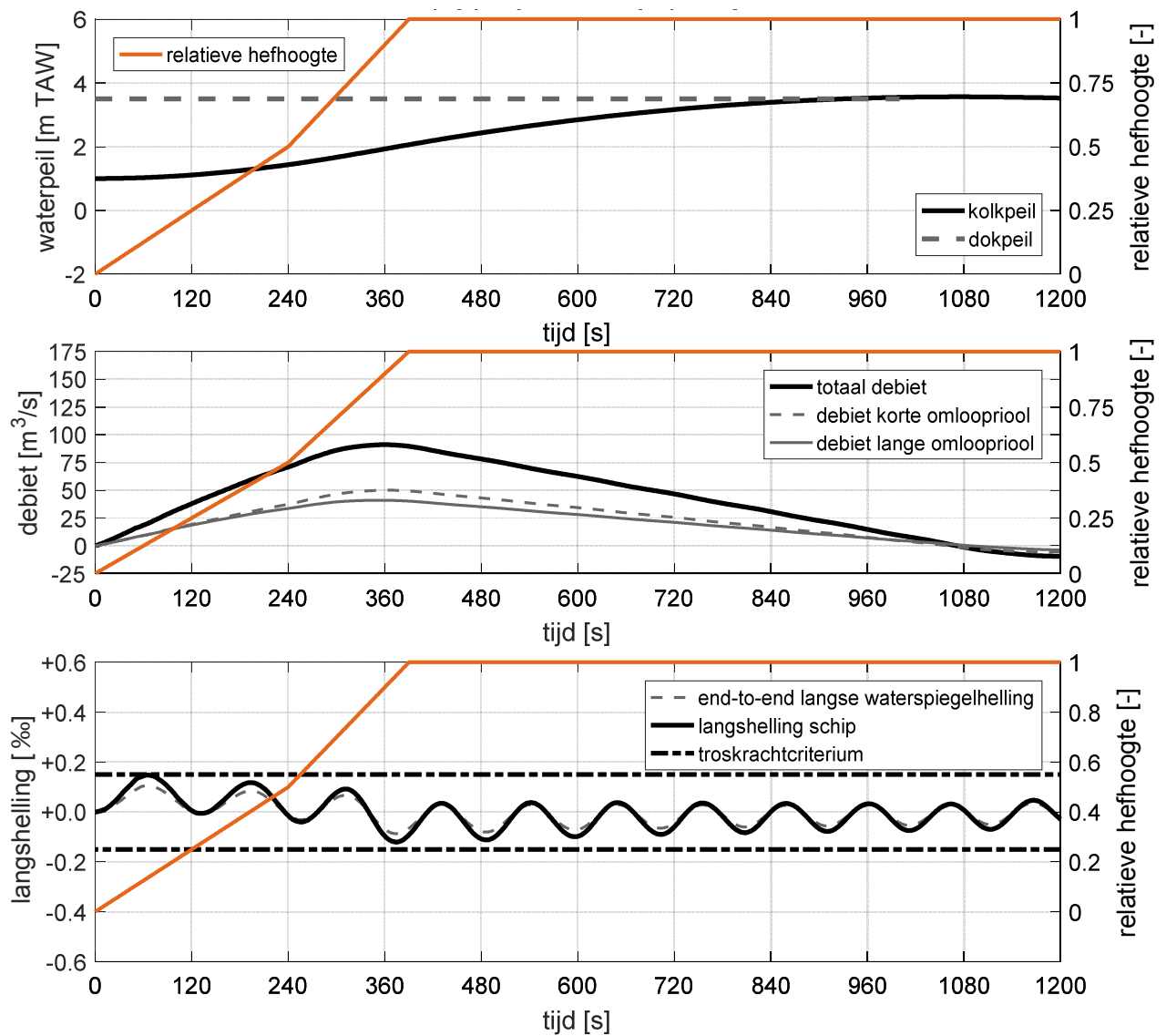
Figuur 51 – Simulatie N14



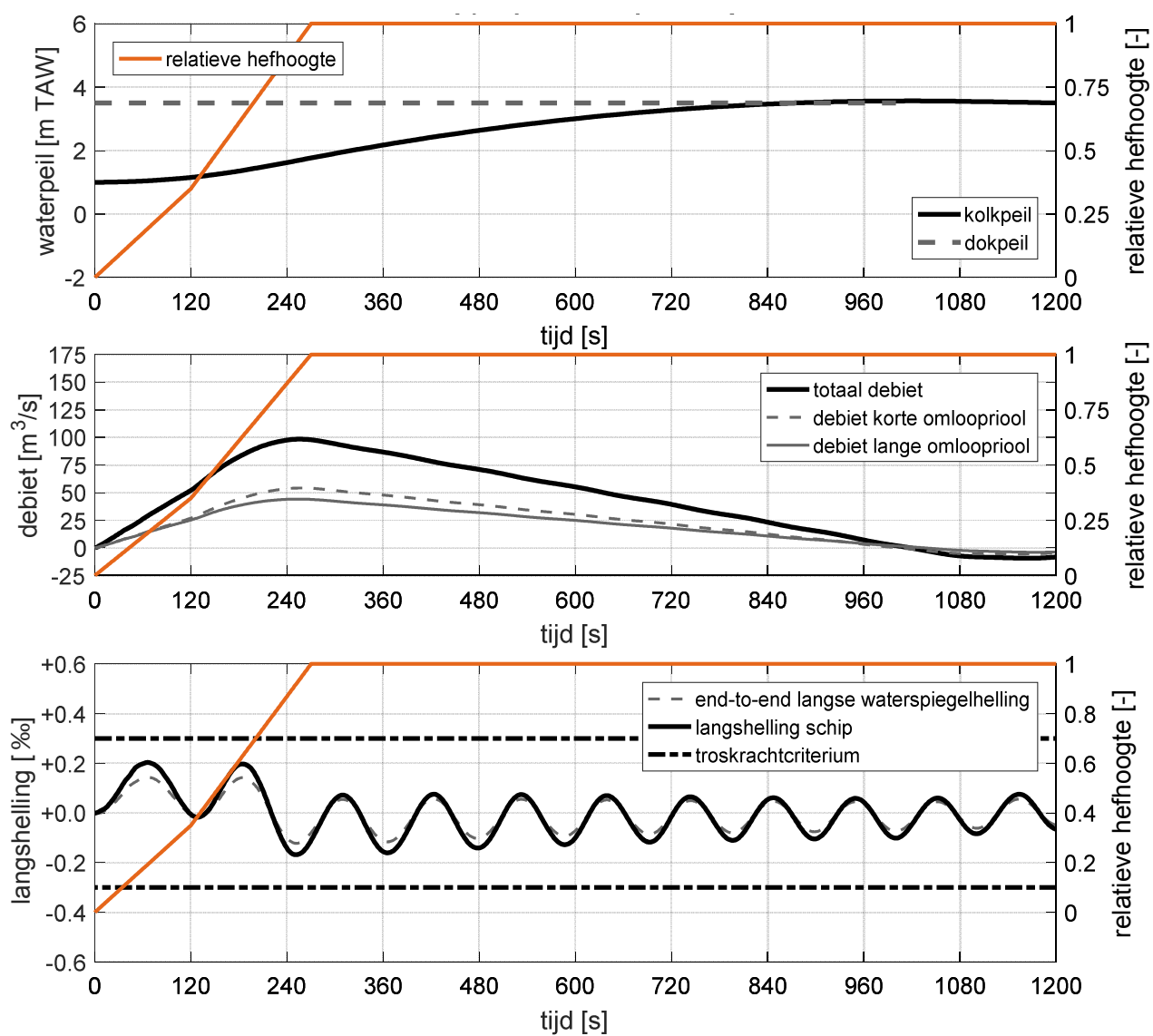
Figuur 52 – Simulatie N15



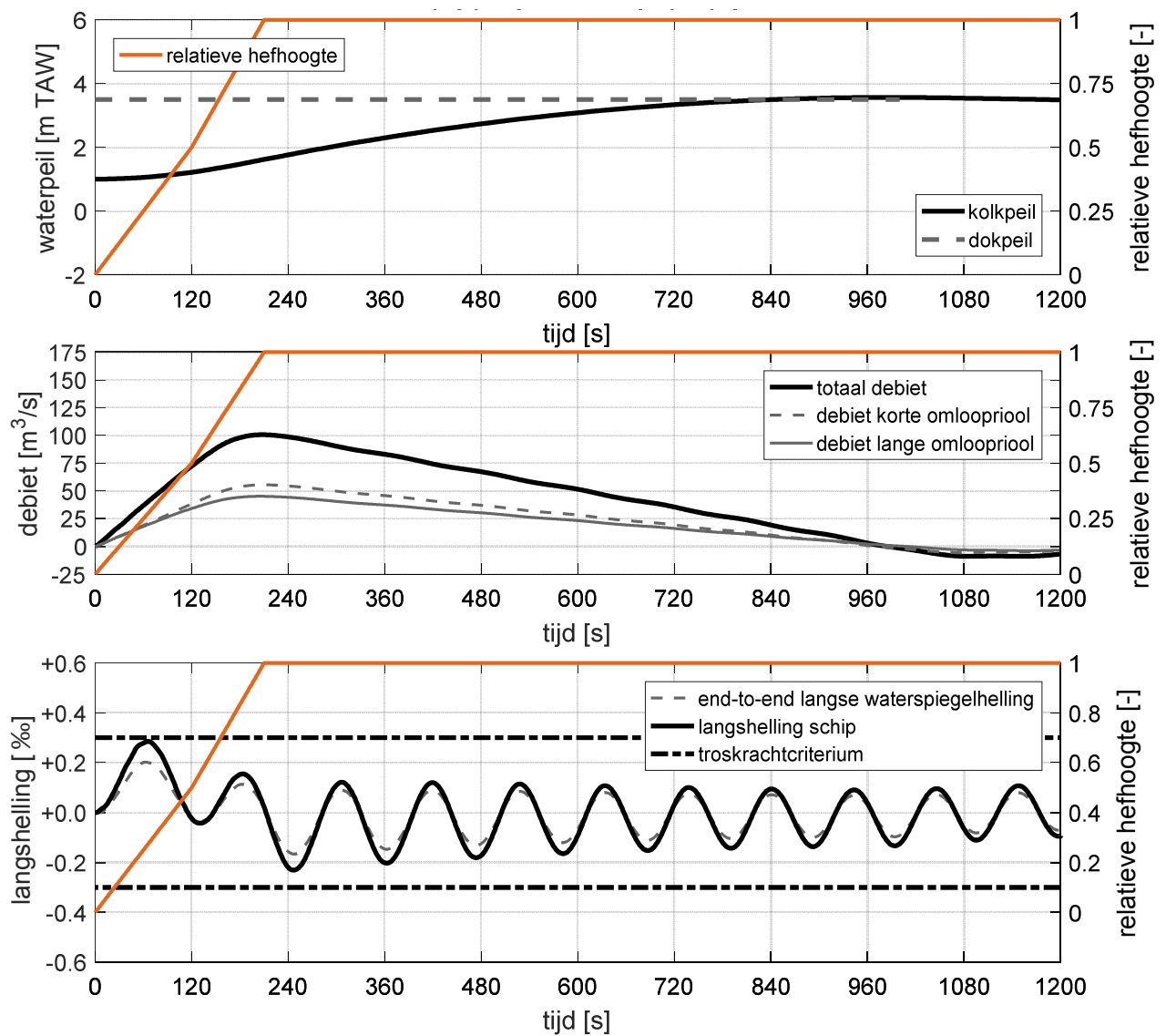
Figuur 53 – Simulatie N16



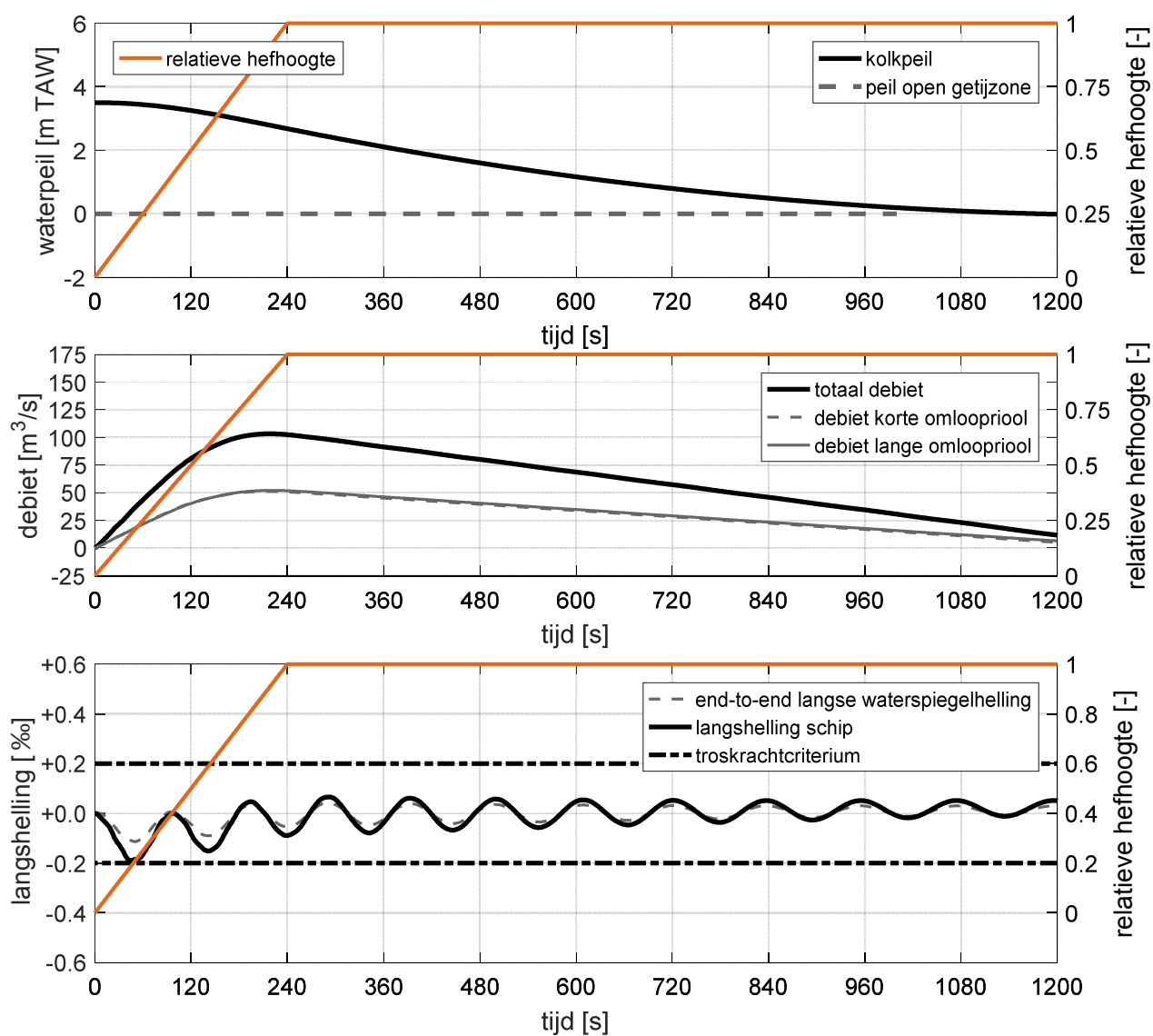
Figuur 54 – Simulatie N17



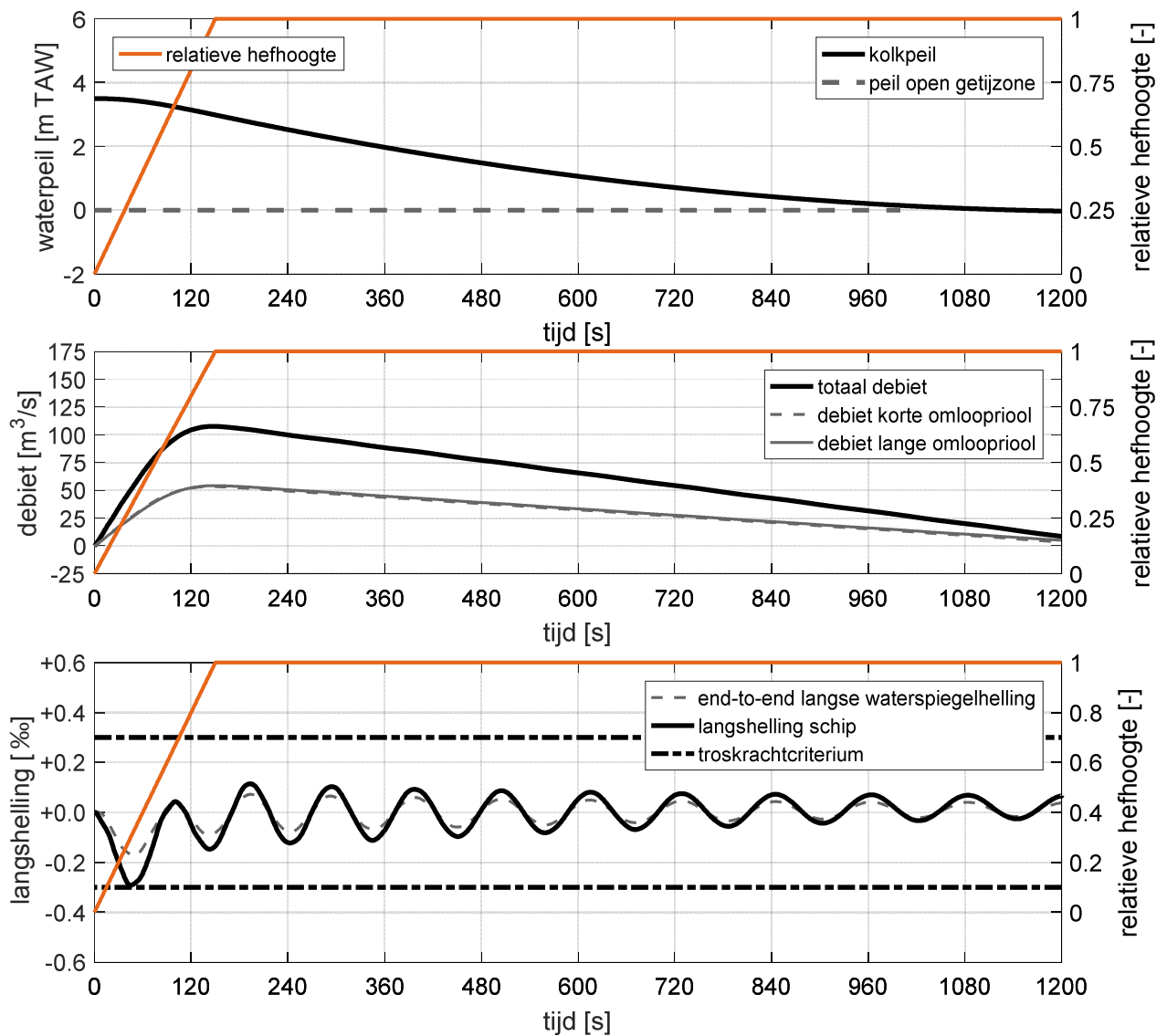
Figuur 55 – Simulatie N18



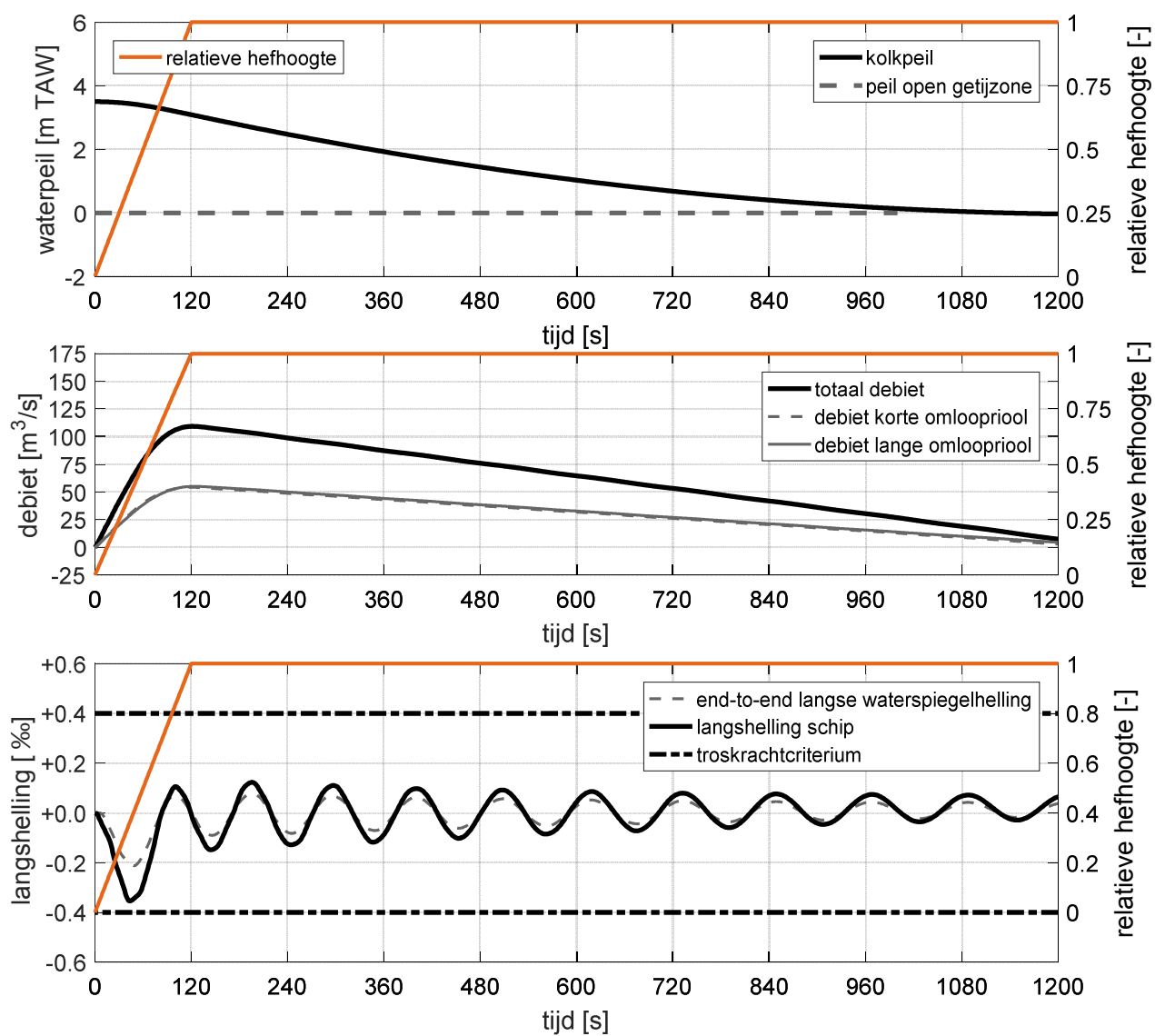
Figuur 56 – Simulatie N19



Figuur 57 – Simulatie N20



Figuur 58 – Simulatie N21



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