

WATERBOUWKUNDIG LABORATORIUM



Vlaanderen
is wetenschap

20_054_1
WL rapporten

Complex project Nieuwe Sluis Zeebrugge

Voorontwerp Nivelleersysteem

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Complex project Nieuwe Sluis Zeebrugge

Voorontwerp Nivelleersysteem

Vercruysse, J.; Lopez Castaño, S.; Verelst, K.; Verwilligen, J.

Juridische kennisgeving

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2022
D/2022/3241/062

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Lopez Castaño, S.; Verelst, K.; Verwilligen, J. (2022). Complex project Nieuwe Sluis Zeebrugge: Voorontwerp Nivelleersysteem. Versie 3.0. WL Rapporten, 20_054_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Oprachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2022R20_054_1
Trefwoorden (3-5):	lock, simulation, filling emptying system		
Kennisdomeinen:	Sluizen > Nivelleersysteem > Literatuur- en desktoponderzoek Sluizen > Nivelleersysteem > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	54	Bijlagen (p.):	13
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruysse, J.; Lopez Castaño, S.
------------	-----------------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.; Verwilligen, J.	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2022-03-14 17:18:41 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Kristof Verelst</i>
Projectleider:	Vercruysse, J.	Getekend door: Jeroen Vercruysse (Signa) Getekend op: 2022-03-10 08:50:49 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Jeroen Vercruysse</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K..	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2022-03-10 08:45:46 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Abdelkarim Bellafkih</i>
-----------------	----------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Abstract

Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) geeft afdeling Maritieme Toegang (aMT) ondersteuning met betrekking tot het complex project nieuwe sluis Zeebrugge. Dit rapport beschrijft het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis in de voorontwerpfase.

De nieuwe sluis heeft een lengte 427 m (tussen de uiterste roldeuren), een breedte 55 m en een bodempeil -15.1 m TAW. In het verleden heeft WL reeds een hydraulisch ontwerp uitgevoerd voor het nivelleersysteem van een nieuwe zeesluis te Zeebrugge in kader van het Strategisch Haven Infrastructuur Project (SHIP). Doordat voor de nieuwe sluis zowel de dimensies als de locatie gewijzigd zijn diende dit ontwerp geactualiseerd te worden. Als eerste zijn de randvoorwaarden opgesteld en werden criteria gedefinieerd voor de nivelleertijd, stijgsnelheid en langskracht tijdens het nivelleren.

Voor de nieuwe sluis te Zeebrugge wordt een nivelleersysteem met korte omloopriolen beschouwd analoog met het nivelleersysteem van de Antwerpse zeesluizen. Voor een dergelijk nivelleersysteem werd een bepaling uitgevoerd van de benodigde doorstroomsectie. Hieruit volgde een doorstroomsectie 33.0 m² per riool. Door afdeling Expertise Beton en Staal werd dit vertaald naar een vierkante sectie met zijde 5.75 m.

Vervolgens wordt een desktop geometrie uitgewerkt voor het nivelleersysteem op basis van de geometrie van de Antwerpse zeesluizen, literatuur en eerder uitgevoerde studies. Hierbij wordt per component ook de hydraulische verliescoëfficiënt bepaald. Aan de hand van deze geometrie en de hydraulische verliescoëfficiënten is een hydraulisch netwerkmodel opgesteld.

Dit hydraulisch netwerkmodel wordt gesimuleerd met het programma LOCKSIM. Uit deze simulaties volgt het debiet doorheen de riolen, het kolkpeil en de langse waterspiegelhellingen in de kolk. Aan de hand van simulaties met dit hydraulisch netwerkmodel werd een openingswet opgesteld voor het bovenhoofd en voor het benedenhoofd bij de maatgevende peilcombinatie voor de langskracht. Vervolgens wordt de maatgevende peilcombinatie voor nivelleren alsook een range aan hogere peilen in de voorhaven gesimuleerd. Uit deze simulaties volgt dat voldaan wordt aan het criterium van 12 min voor de nivelleertijd alsook aan de criteria voor de stijgsnelheid en de langskracht.

De nieuwe sluis dient ook ontworpen te worden op spuien van voorhaven naar achterhaven. Met het hydraulisch netwerkmodel wordt zowel voor het bovenhoofd als het benedenhoofd met verschillende schuifcombinaties de hydraulische afvoercoëfficiënt bepaald. Aan de hand van deze afvoercoëfficiënt kan de performantie van het nivelleersysteem bij spuien beoordeeld worden.

Bij nivelleren van de sluis zal een stromingspatroon in respectievelijk de voor- en achterhaven opgewekt worden. Vooral ledigen van de sluis doorheen het benedenhoofd wordt maatgevend geacht omdat de ingang naar de vissers- en recreatiehaven aansluit op het benedenhoofd van de kolk. Hiervoor werd door het studie bureau IMDC een CFD simulatie uitgevoerd. Uit deze simulatie volgt dat de dissipatie bij ledigen niet optimaal is maar dat de snelheden in de voorhaven ten gevolge van het ledigen van de sluis niet als potentieel hinderlijk beschouwd worden.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Gegevens	3
3 Bepaling doorstroomsectie	9
3.1 Inschatting doorstroomsectie aan hand van literatuurformules	9
3.2 Hydraulische simulaties nivelleersysteem.....	10
4 Voorontwerp nivelleersysteem	12
4.1 Hydraulisch netwerkmodel	12
4.2 Componenten.....	13
4.2.1 Doorstroomsectie	13
4.2.2 Algemene ladingsverliezen.....	14
4.2.3 Inlaten.....	15
4.2.4 Bochten in het horizontaal vlak.....	21
4.2.5 Verlaging vloerpeil omloopriolen	23
4.2.6 Hefschuiven	24
4.2.7 Splitsing en samenvoegen t.h.v. hefschuiven.....	25
4.2.8 Uitstroomconstructie	26
4.2.9 Kolk	31
4.3 Samenvatting parameters per component	33
5 Numerieke modellering nivellering	35
5.1 Nivelleren	35
5.2 Spuien	38
6 Stromingspatroon voorhaven tgv nivelleren.....	41
6.1 Uitgevoerde simulatie	41
6.2 Bespreking resultaten.....	43
6.2.1 Dissipatie stroming uit nivelleeropeningen.....	43
6.2.2 Invloed uitstroming op scheepvaart.....	45
6.3 Conclusies.....	50

7 Conclusies 51

8 Referenties 53

Bijlage A - Resultaten numerieke modellering B1

8.1 Tabel B2

8.2 Figuren B3

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Randvoorwaarden hydraulisch ontwerp nieuwe sluis Zeebrugge.....	3
Tabel 2 – Te beschouwen peilen achterhaven voor hydraulisch ontwerp nivelleersysteem	4
Tabel 3 – Te beschouwen peilen voorhaven voor hydraulisch ontwerp nivelleersysteem	5
Tabel 4 – Densiteitsverschil tussen voor- en achterhaven.....	5
Tabel 5 – Criterium langskracht.....	8
Tabel 6 – Nivelleersysteem met korte omloopriolen – doorstroomsectie	10
Tabel 7 – Uitgevoerde simulaties voor bepaling benodigde doorstroomsectie	10
Tabel 8 – Toegepaste openingswet hefschuiven	11
Tabel 9 – Resultaten simulaties ter bepaling van benodigde doorstroomsectie.....	11
Tabel 10 – Parameters LOCKSIM simulaties waarbij afgeweken wordt van de default waarde	13
Tabel 11 – Doorstroomsectie	14
Tabel 12 – Vergelijking positie inlaten in bovenhoofd.....	16
Tabel 13 – Voorstel positie inlaten in hoogte nieuwe sluis Zeebrugge.....	20
Tabel 14 – Toegepaste verliescoëfficiënt inlaat	21
Tabel 15 – Ladingsverliezen horizontale bochten met afrondingstraal	22
Tabel 16 – Verlaging vloerpeil omloopriolen	23
Tabel 17 – Ladingsverliezen overgangen in het verticaal vlak	24
Tabel 18 – Hefschuifverliezen in functie van hefhoogte	25
Tabel 19 – Vergelijking uitstroomconstructie ten opzichte van kolk en riolafmetingen voor bestaande sluizen en het voorstel voor de nieuwe sluis Zeebrugge	28
Tabel 20 – Vergelijking hoogte tussenmuur en hoek plafond uitstroomconstructie	29
Tabel 21 – Verliezen uitstroomconstructie Berendrecht en Kieldrechtsluis.....	31
Tabel 22 – Verliescoëfficiënt uitstroomconstructie nieuwe sluis Zeebrugge	31
Tabel 23 – Componenten kolk.....	32
Tabel 24 – Mee te nivelleren oppervlak per deurkamer bij gebruik van de uiterste roldeuren [m ²].....	33
Tabel 25 – Doorstroomsectie omloopriolen	33
Tabel 26 – Netwerkmiddel omloopriolen bovenhoofd nieuwe sluis Zeebrugge	34
Tabel 27 – Beschouwde peilcombinaties voor nivelleren	35
Tabel 28 – Openingswet	37
Tabel 29 – Afvoer en verliescoëfficiënt voor spuien met het nivelleersysteem	39
Tabel 30 – Peilcombinaties.....	B1

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Concept nivelleersysteem Antwerpse Zeesluizen	1
Figuur 2 – Terreinmeting Vandammesluis – locatie waterstandmetingen en berekende langse waterspiegelhellingen	7
Figuur 3 – Opgemeten langse waterspiegelhellingen Vandammesluis – vullen bovenhoofd met groot verval	7
Figuur 4 – Hydraulisch netwerkmodel nieuwe sluis Zeebrugge voor nivelleren via bovenhoofd	12
Figuur 5 – Doorsnede omloopriolen.....	14
Figuur 6 – Peilplan Boudewijnsluis – t.h.v. inlaat bovenhoofd	16
Figuur 7 – Boudewijnsluis – lange omloopriool – doorsnede t.h.v. inlaat bovenhoofd.....	17
Figuur 8 – Bathymetrie metingen Bovenhoofd Zandvlietsluis	17
Figuur 9 – Aanstroming inlaat korte omloopriool Berendrechtssluis vullen via bovenhoofd – Scheldepeil TAW - 0.27 m naar Dokpeil TAW + 4.17 m	18
Figuur 10 – Peilplan Vandammesluis dd. 30/03/2021	19
Figuur 11 – Inlaat omloopriolen	20
Figuur 12 – Hydraulisch verlies bocht in het horizontaal vlak in functie van de bochtstraal.....	22
Figuur 13 – Voorstel uitstroomconstructie	26
Figuur 14 – Voorstelling uitstroomconstructie nieuwe sluis Zeebrugge.....	30
Figuur 15 – Vullen bovenhoofd bij de voor de langskracht maatgevende peilcombinatie.....	36
Figuur 16 – Ledigen benedenhoofd bij voor de langskracht de maatgevende peilcombinatie	36
Figuur 17 – Variatie van nivelleertijd, maximale waarde stijgsnelheid en extremum langskracht in functie van peil voorhaven	37
Figuur 18 – Overvulling/overlediging in functie van peil voorhaven	38
Figuur 19 – Spuidebiet in functie van peil voorhaven in functie van gebruikte schuifcombinatie	39
Figuur 20 – Inrichtingsplan voorhaven met bodemdieptes versie dd. 16/12/2020	41
Figuur 21 – Opgelegde debieten CFD modellering.....	42
Figuur 22 – Domein CFD model.....	42
Figuur 23 – Stromingspatroon bij uitstroming volgend uit de CFD modelering	44
Figuur 24 – Maximum snelheid tijdens duur simulatie op 5 vlakken liggend tussen het oppervlak en 2.0 m onder het oppervlak.....	45
Figuur 25 – Trajecten voor analyse dieptegemiddelde snelheid	46
Figuur 26 – Traject 1 over een diepte 10 m gemiddelde langs- en dwarssnelheid in functie van de tijd.....	47
Figuur 27 – Traject 2 over een diepte 2 m gemiddelde langs- en dwarssnelheid in functie van de tijd	48
Figuur 28 – Traject 3 over een diepte 2 m gemiddelde langs- en dwarssnelheid in functie van de tijd.....	49
Figuur 29 – Vectorplot van de 2 m-dieptegemiddelde stroomsnelheden (maximum gedurende de volledige simulatietijd).....	50

1 Inleiding

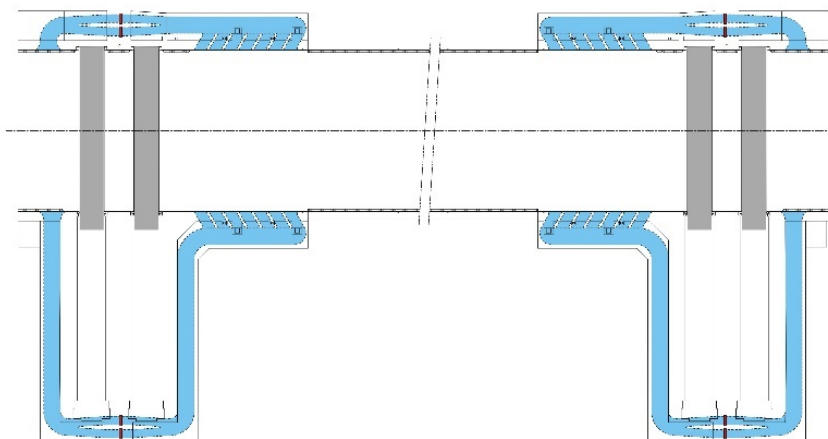
Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) geeft afdeling Maritieme Toegang (aMT) ondersteuning met betrekking tot het complex project nieuwe sluis Zeebrugge. Een van de onderwerpen waarop ondersteuning gegeven wordt betreft het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem. Onderhavig rapport beschrijft het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis in de voorontwerpfase.

In het verleden heeft WL reeds een hydraulisch ontwerp uitgevoerd voor het nivelleersysteem van een nieuwe zeesluis te Zeebrugge in kader van het Strategisch Haven Infrastructuur Project (SHIP). Hiervoor werd een nivelleersysteem met openingen in de deur beschouwd (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2012; Verelst *et al.*, 2012) en een nivelleersysteem met korte omloopriolen (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2017b).

Voor de nieuwe sluis in kader van het complex project nieuwe sluis Zeebrugge is het niet mogelijk om het nivelleersysteem uit een van de hydraulische ontwerpen uitgevoerd in kader van SHIP één op één over te nemen. Het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis in kader van het complex project verschilt onder meer op volgende punten ten opzichte van het ontwerp uitgevoerd in kader van SHIP:

- de kolkafmetingen en kolkdiepte zijn toegenomen,
- de nieuwe sluis komt op een andere locatie te liggen, waardoor het ontwerp van het benedenhoofd aangepast dient te worden.

Voor de bepaling van het type nivelleersysteem werd door WL een bepaling van de benodigde doorstroomsectie uitgevoerd voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen en voor een nivelleersysteem met openingen in de deuren: (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2020). Op basis van de hieruit volgende doorstroomsecties heeft afdeling Expertise Beton en Staal (EBS) een constructieve afweging gemaakt tussen een ontwerp met korte omloopriolen en een ontwerp met openingen in de deuren waarna door aMT werd besloten om een nivelleersysteem met korte omloopriolen te weerhouden voor het verdere ontwerp. Het beschouwde nivelleersysteem met korte omloopriolen is gebaseerd op dat van de Antwerpse Zeesluizen. Een illustratie van dit type nivelleersysteem wordt gegeven in Figuur 1.



Figuur 1 – Concept nivelleersysteem Antwerpse Zeesluizen

Dit rapport beschrijft de verdere uitwerking van het voorontwerp voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen. Het rapport is als volgt opgebouwd:

De randvoorwaarden voor het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem worden gegeven in hoofdstuk 2. Een korte beschrijving van de bepaling van de doorstroomsectie wordt gegeven in

hoofdstuk 3. De geometrie van het nivelleersysteem inclusief de begroting van de hydraulische ladingsverliezen per component en de opbouw van het hydraulisch netwerkmodel worden gegeven in hoofdstuk 4. Met dit hydraulisch netwerkmodel wordt vervolgens zowel nivelleren als spuien gesimuleerd. De resultaten hiervan worden besproken in hoofdstuk 5. Door een studie bureau werden CFD-simulaties uitgevoerd van de stroming in de voorhaven bij ledigen van de sluis kolk. De resultaten van deze CFD-simulaties worden besproken in hoofdstuk 6. De conclusies worden gegeven in hoofdstuk 7.

2 Gegevens

De gegevens beschouwd voor het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis worden samengevat in Tabel 1 en vervolgens punt per punt besproken.

Tabel 1 – Randvoorwaarden hydraulisch ontwerp nieuwe sluis Zeebrugge

dimensies kolk				
kolk lengte voorontwerp nivelleersysteem	[m]	427		
kolk breedte	[m]	55		
kolk oppervlakte	[m ²]	23485		
oppervlakte deurkamers + 1 roldeur	[m ²]	3337		
te nivelleren oppervlakte	[m ²]	26822		
bodempeil	[m TAW]	-15.1		
ontwerpschip				
type	[-]	car carrier		
naam		carCar_265_400_NSZ		
lengte	[m]	265		
breedte	[m]	40		
diepgang	[m]	9.5		
blockcoëfficiënt	[-]	0.63		
dwt	[ton]	63441		
afstand boeg schip tot sluisdeur	[m]	50		
maatgevende waterpeilen en dichtheidsverschil				
		Max. nivelleertijd	Max. langskracht	Luchtaanzuiging
peil achterhaven	[m TAW]	3.40	3.90	3.00
peil voorhaven	[m TAW]	0.00	-0.58	-0.58
verval	[m]	3.40	4.48	3.58
dichtheidsverschil tussen voor- en achterhaven	[kg/m ³]	≈ 0	≈ 0	≈ 0
criteria nivelleren				
Nivelleertijd	[min]	12 tot 13 min	n.v.t.	n.v.t.
maximale stijg- daalsnelheid kolkpeil	[m/s]	vullen 0.014 ledigen 0.012	vullen 0.014 ledigen 0.012	n.v.t.
extremum langskracht op schip	[‰]	0.40 ‰	0.40 ‰	n.v.t.

Kolkdimensies

De kolkdimensies worden afgeleid uit EBS (2021). De kolkbreedte bedraagt 55 m. De kolk lengte bedraagt 427 m, gemeten tussen de buitenste roldeuren, en 377 m, gemeten tussen de binnenste roldeuren. In de voorontwerpfase worden enkel simulaties waarbij de sluis afgesloten wordt door de buitenste roldeuren uitgevoerd. Voor het verdere detailontwerp van de openingswetten verdient het aanbeveling om ook simulaties uit te voeren met een sluis kolk afgesloten door de binnenste roldeuren. Hierbij dient er mogelijk een beperkte aanpassing van de openingswet doorgevoerd te worden om te voldoen aan de criteria voor stijgsnelheid en langskracht. Het bodempeil van de kolk ligt op -15.1 m TAW. Voor het bovenhoofd zou in de toekomst dit bodempeil nog verhoogd kunnen worden naar -12.5 m TAW. Een eventuele verhoging van het bodempeil van het bovenhoofd heeft geen invloed op het hydraulisch voorontwerp van het nivelleersysteem.

Maatgevend schip

Het maatgevend schip betreft een nog niet bestaande Car Carrier. De karakteristieken van deze Car Carrier zijn overgenomen uit Vos *et al.* (2017b). Aangenomen wordt dat de maatgevende schepen met de boeg 50 m voor de deur in het voor nivelleren gebruikte hoofd aangemeerd worden. Occasioneel dient ook een exceptioneel schip verschut te worden. Voor het hydraulisch voorontwerp wordt geen rekening gehouden met deze exceptionele schepen. Voor dergelijke exceptionele schepen zal case per case nagegaan worden of het schutvenster en/of de openingswet aangepast dient te worden.

Maatgevende peilen en dichtheidsverschil

Een overzicht van de beschouwde peilen in de achterhaven wordt gegeven in Tabel 2. Een overzicht van de kenmerkende hoog- en laagwaters in de voorhaven wordt gegeven in Tabel 3. In deze tabel wordt ook de voor het hydraulisch ontwerp beschouwde toename van het hoogwater ten gevolge van de zeespiegelstijging gegeven. Bemerkt dat voor het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem laagwater in de voorhaven maatgevend is. Dit omdat de vervallen hoger zijn bij laag water maar ook omdat bij een gelijk verval de krachten hoger zijn bij laagwater dan bij hoogwater (omwille van de mindere waterdekking bij laagwater). De voor het hydraulisch voorontwerp van het nivelleersysteem beschouwde peilen worden samengevat in Tabel 4. Voor het hydraulisch voorontwerp van het nivelleersysteem worden twee maatgevende peilcombinaties beschouwd. De eerste peilcombinatie gaat uit van een hoog peil in de achterhaven, +3.90 m TAW, en het minimum peil in de voorhaven waarbij nog geschut wordt, -0.58 m TAW. Deze peilcombinatie wordt aangehouden voor het controleren van de maximale langskracht en maximale stijg- of daalsnelheid. Een tweede peilcombinatie betreft het normaal peil in de achterhaven, +3.40 m TAW, en een laagwater in de voorhaven dat ca. 3 % van de getijden onderschreden wordt, +0.00 m TAW. Deze tweede peilcombinatie wordt gebruikt voor het toetsen van het criterium voor de nivelleertijd. Hiernaast worden in hoofdstuk 5 de simulaties ook uitgevoerd voor een reeks peilen startend vanaf een peil +0.00 m TAW in de voorhaven en met een stapgrootte 1.0 m toenemend tot een peil +7.00 m TAW.

Tabel 2 – Te beschouwen peilen achterhaven voor hydraulisch ontwerp nivelleersysteem

Minimaal	3.00 m TAW
Normaal	3.40 m TAW
maximaal	3.90 m TAW

Mail Wim de Cock dd. 05/06/2020

Tabel 3 – Te beschouwen peilen voorhaven voor hydraulisch ontwerp nivelleersysteem

	Waterpeilen op ogenblik van ontwerp Getijtafels 2020		Zeespiegelstijging 2125 Masterplan Kustveiligheid		
	<i>peil voorhaven [m TAW]</i>	Verval tov normaalpeil achterhaven [m]	Zeespiegelstijging 2125 [m]	<i>peil voorhaven [m TAW]</i>	Verval tov normaalpeil achterhaven [m]
HHW	5.95	2.55	1.06	7.01	3.61
GHWS	4.60	1.20	1.06	5.66	2.26
GHW	4.23	0.83	1.06	5.29	1.89
GHWD	3.74	0.34	1.06	4.8	1.40
GLWD	0.98	2.42	/	0.98	2.42
GLW	0.63	2.77	/	0.63	2.77
GLWS	0.33	3.07	/	0.33	3.07
LLW	-0.58	3.98	/	-0.58	3.98
LAT (Zeebrugge)	-0.23	3.63	/	-0.23	3.63

Mail Wim de Cock dd. 05/06/2020

Voor het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem van een zeeluis is het optredend dichtheidsverschil een belangrijke parameter. De achterhaven wordt op dit moment op peil gehouden door bij hoogwater vanuit de voorhaven naar de achterhaven te spuien. Dit zal niet wijzigen in de toekomst. Door het op peil houden van de achterhaven met zeewater is het saliniteitsverschil tussen voor- en achterhaven beperkt. Voor het kwantificeren van dit dichtheidsverschil werd door WL zowel een analyse gedaan van de beschikbare metingen alsook werden nieuwe metingen uitgevoerd (J. B. Vercruyse *et al.*, 2019a). Het dichtheidsverschil volgend uit deze metingen wordt samengevat in Tabel 4. Bemerkt hierin dat de eerste drie metingen representatief zijn voor het dichtheidsverschil tussen voor en achterhaven. De continue meting van de VMM aan zijde achterhaven betreft een meting nabij het oppervlak halverwege het Boudewijnkanaal. Uit de uitgevoerde profielmetingen volgde dat in het Boudewijnkanaal de saliniteit lager kan zijn en dat hier een gradiënt over de waterkolom optreedt. Op basis van de expertise opgedaan bij het hydraulisch voorontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis Terneuzen volgt dat bij een dichtheidsverschil van 4 à 6 kg/m³ zich lage langskrachten op het schip ten gevolge van de dichtheidsstroming zullen voordoen. Voor het hydraulisch voorontwerp van de nieuwe sluis wordt ervan uitgegaan dat ook in de toekomst de langskrachten op het schip ten gevolge van het dichtheidsverschil verwaarloosbaar zullen blijven.

Tabel 4 – Dichtheidsverschil tussen voor- en achterhaven

Metingen	Dichtheidsverschil [kg/m ³]
Profielmetingen WL 2018	2.0 / 3.0
Profielmetingen IMDC 2008	1.0 / 2.5
Continue metingen WL 7/2018 tot 1/2019	max. 4 à 6
Oppervlakte metingen VMM 2007-2018	tussen 2 en 10 enkele uitschieters tot max. 16

(J. B. Vercruyse *et al.*, 2019a)

Criteria

Voor vullen en ledigen met het maatgevend schip in de kolk bij de maatgevende waterpeilen voor nivelleren wordt als criterium voor de nivelleertijd 12 à 13 minuten opgegeven door aMT.

In het kader van SHIP werden criteria voor de stijg- en daalsnelheid opgesteld op basis van metingen en simulaties in de Berendrechtsluis. Sinds het opstellen van de randvoorwaarden voor het ontwerp in het kader van SHIP zijn in situ metingen uitgevoerd in de Kieldrechtsluis en werd door middel van deze metingen een kalibratie van het hydraulisch netwerkmodel van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis uitgevoerd (J. B. Vercruyse *et al.*, 2017a, 2019b). Uit de metingen in de Kieldrechtsluis volgde dat de hefschuiven in de Kieldrechtsluis ca. 2 keer sneller geopend worden dan in de Berendrechtsluis wat resulteert in hogere stijg- en daalsnelheden van het kolkpeil. Voor de stijg- en daalsnelheid wordt, op basis van simulaties met het gekalibreerde model van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis, een criterium 0.014 mm/s bij vullen en 0.012 mm/s bij ledigen aangehouden.

Voor de langskracht wordt, analoog als bij het ontwerp van het nivelleersysteem in het kader van SHIP, een criterium uit de literatuur, een criterium op basis van simulaties van een vergelijkbare sluis en een criterium op basis van metingen gehanteerd. Omwille van het toegenomen formaat van het schip, de sedertdien uitgevoerde metingen in de Kieldrechtsluis en de kalibratie van het hydraulisch netwerkmodel van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis worden de criteria uit het SHIP ontwerp geactualiseerd.

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

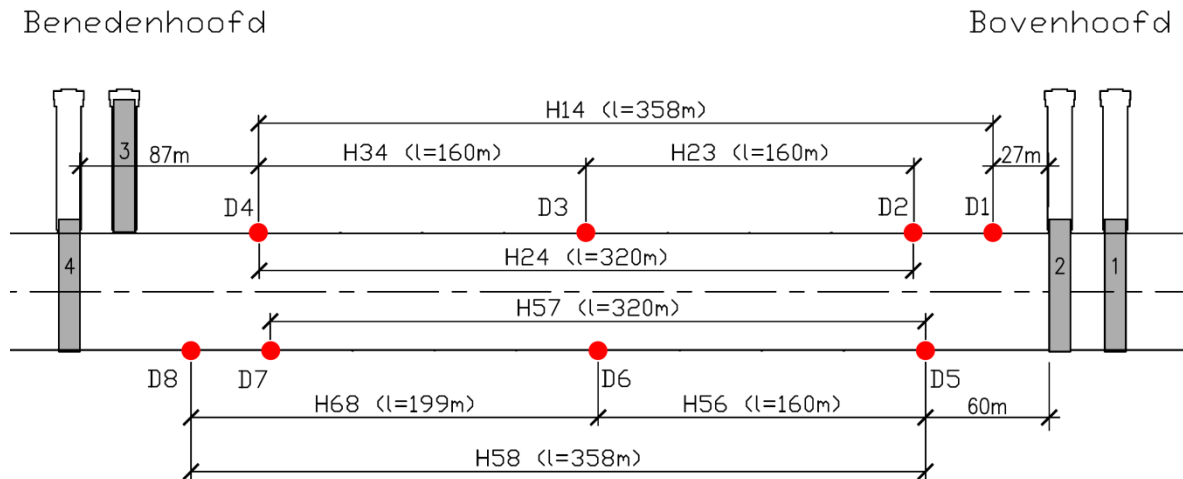
“Remember also that the computed forces are used primarily for comparison purposes rather than as accurate predictions of hawser forces.”

Om deze reden wordt een tweede criterium voor de langskracht bepaald op basis van simulaties met het maatgevend schip in een soortgelijke sluis, zijnde de Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis. Het model voor het nivelleersysteem van de Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis werden opgesteld in kader van het ontwerp van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a). De hydraulische verliezen van beide modellen zijn gekalibreerd aan de hand van in situ metingen (De Mulder *et al.*, 2008; De Mulder & Vercruyse, 2007; J. B. Vercruyse *et al.*, 2017a, 2019b). Een vulling via het bovenhoofd en een lediging via het benedenhoofd werd gesimuleerd voor beide sluisen. Analoog met de simulaties voor de nieuwe sluis te Zeebrugge werd het ontwerpschip met de boeg op 50 m van de voor nivelleren gebruikte deur gepositioneerd. Aan Scheldezijde werd het gemiddeld laagwater (0.10 m TAW voor de Berendrechtsluis en 0.11 m TAW voor de Kieldrechtsluis, bron www.waterinfo.be) beschouwd en aan dokzijde het gemiddeld dokpeil (4.17 m TAW voor het rechterkanaaldok en 3.50 m TAW voor de Waaslandhaven). Het resultaat van deze simulaties wordt gegeven in Bijlage A. Uit deze simulaties volgt een maximale langshelling van 0.38 ‰ voor de Berendrechtsluis en 0.43 ‰ voor de Kieldrechtsluis. Op basis hiervan wordt een criterium 0.40 ‰ aangehouden.

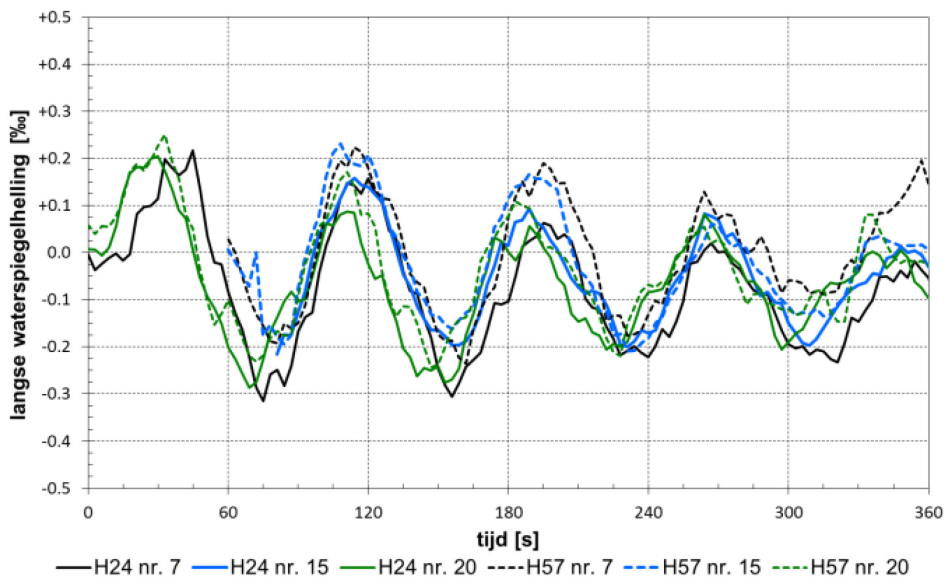
Een tweede criterium wordt afgeleid uit opgemeten langse waterspiegelhellingen tijdens nivelleringen van de Vandammesluis (J. B. Vercruyse *et al.*, 2012) en de Kieldrechtsluis (J. B. Vercruyse *et al.*, 2017a). Tijdens deze metingen werd op verschillende plaatsen in de kolk de waterstand opgemeten waarna vervolgens de langse waterspiegelhellingen bepaald werden. Deze langse waterspiegelhellingen zijn een maat voor de langskracht op het schip. Voor het opstellen van het criterium worden enkel langse waterspiegelhellingen weerhouden waarbij de afstand tussen de meetpunten groter of gelijk is aan de lengte van het maatgevend schip (265 m). Voor de metingen in de Vandammesluis betreft dit helling H24 en H57 gemeten over een afstand 320 m, zie Figuur 2. Uit het opgemeten verloop van de langshellingen H24 en H57, zie Figuur 3, volgt een maximale langse waterspiegelhelling 0.30‰.

Bij het ontwerp van de nieuwe sluis Terneuzen werd voor het ontwerpschip, een bulkcarrier, een criterium van 0.24 ‰ gehanteerd voor de langskracht en een criterium van 0.16 ‰ gehanteerd voor de dwarskracht. Door middel van statische berekeningen met het troskrachtprogramma SCHAT (Rietveld & De Loor, 2016) werd dit criterium gecontroleerd en nagegaan of de toelaatbare kracht verhoogd kon worden door het gebruiken van bijkomende trossen. Hieruit volgde dat het gehanteerde criterium representatief is voor het afmeren met 4 trossen. Uit de berekeningen met bijkomende trossen volgde dat het criterium voor de

langskracht verhoogd kan worden tot 0.35 ‰ bij het toepassen van 6 trossen en tot 0.40 ‰ bij het toepassen van 8 trossen. Bemerk dat deze resultaten alleen geschikt zijn voor de beschouwde bulkcarrier. Voorgesteld wordt om ook voor de nieuwe sluis te Zeebrugge dergelijke simulaties uit te voeren. Omdat het ontwerpschip voor de nieuwe sluis te Zeebrugge een car carrier betreft wordt aanbevolen om hierbij ook windbelasting in rekening te nemen. Bemerk dat de uitkomst van deze simulaties ook gebruikt kan worden voor een optimalisatie van de procedures en voor het dimensioneren van de bolders.



Figuur 2 – Terreinmeting Vandammesluis – locatie waterstandmetingen en berekende langse waterspiegelhellingen



Figuur 3 – Opgemeten langse waterspiegelhellingen Vandammesluis – vullen bovenhoofd met groot verval

Voor de Kieldrechtssluis werd het peil opgemeten ter hoogte van de uitstroomconstructie (J. B. Verduyven *et al.*, 2017a), de tussenliggende afstand bedraagt 385 m. Een 27 nivelleringen werden opgemeten. Bij een 3 vullingen via het bovenhoofd werd een extreme langshelling van 0.34 ‰ à 0.37‰ opgemeten zowel aan linkeroever als aan rechteroever. Op basis van de metingen van de Vandammesluis en Kieldrechtssluis wordt een criterium 0.35 ‰ beschouwd.

De gehanteerde criteria voor de langskracht worden samengevat in Tabel 5. Bemerkt hierin dat het criterium volgend uit de simulaties van hoger is als het criterium volgend uit metingen. Gelet op de goede ervaringen met de Berendrechtsluis, Vandammesluis en Kieldrechtsluis wordt gekozen om een criterium op basis van simulaties en metingen verder te beschouwen.

Tabel 5 – Criterium langskracht

schip	criterium 1		criterium 2	
	LOCKSIM simulatie Berendrechtsluis / Kieldrechtsluis		meting Vandamme sluis / Kieldrechtsluis	
	waarde	oorsprong	waarde	oorsprong
Tomar	0.40 ‰	0.38 ‰ / 0.44 ‰	0.35 ‰	0.30 ‰ / 0.37 ‰

Bemerkt dat voor deze studie alleen vergeleken wordt met de langskracht ten gevolge van nivelleren. Door middel van de vereenvoudigde 1D berekeningen is het niet mogelijk om de dwarskracht te bepalen uit de simulaties. Doordat het ontwerp voor de nieuwe sluis overgenomen wordt van dit van de Berendrechtsluis en van de Kieldrechtsluis worden op vlak van dwarskracht geen bijzonderheden verwacht. Het maatgevend schip betreft een Car Carrier. Dergelijke schepen worden gekenmerkt door een hoge windbelasting. De invloed van de windbelasting op de kracht in de trossen wordt in deze studie niet beschouwd. Wel wordt opgemerkt dat ook in de referentiesluizen, Vandammesluis en Kieldrechtsluis, Car Carriers verschut worden.

Bij een nivelleersysteem met omliepriolen zal naar het einde van de nivellering toe overvulling/overlediging optreden. Uit een analyse van de nivellingen in de Kieldrechtsluis volgde dat “het startsignaal deuren” gegeven wordt op het moment dat de roldeur loskomt (peilverschil < 0.05 m). Op het moment dat de deur werkelijk in beweging komt ontstaat ten gevolge van overvulling/overlediging een beperkt verval over de roldeur. Voor de Kieldrechtsluis heeft WL hiervoor metingen en simulaties uitgevoerd. Hieruit volgde een maximale waarde voor overvulling/overlediging van 0.10 m tot 0.16 m. In overleg met de opdrachtgever werd afgesproken om geen criterium voor de overvulling/overlediging te hanteren. Bij het ontwerp van de roldeur dient wel rekening gehouden worden met de optredende overvulling en overlediging.

3 Bepaling doorstroomsectie

Voor de nieuwe sluis in kader van het complex project werd een eerste bepaling uitgevoerd van de doorstroomsectie op basis van een nivelleertijd gelijk aan 18 min (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2020). De gewenste nivelleertijd werd later bijgesteld naar 12 à 13 min. Hierom wordt de bepaling van de doorstroomsectie geactualiseerd. Deze actualisatie is beschreven in een memo (J. Vercruyssen & Verelst, 2020). Uit deze memo wordt in paragraaf 3.1 de formulematige bepaling overgenomen en in paragraaf 3.2. de vereenvoudigde modellering.

3.1 Inschatting doorstroomsectie aan hand van literatuurformules

Voor deze eerste inschatting van de doorstroomsectie van het nivelleersysteem wordt een uitdrukking voor het begroten van de nivelleertijd van een sluiskolk toegepast. US Army Corps of Engineers (2006) vermeldt voor het berekenen van de nivelleertijd van een sluiskolk bij verwaarlozen van inertie in de leidingen volgende vergelijking :

$$t_{niv} = \frac{S \cdot \sqrt{2g\Delta H}}{g \cdot \mu \cdot A_o} + k \cdot t_h$$

$$A_o = \frac{S \cdot \sqrt{2g\Delta H}}{g \cdot \mu \cdot (t_{niv} - k \cdot t_h)}$$

Met:

-	t_{niv}	Nivelleertijd	[s]
-	S	Te nivelleren oppervlak (kolk, deurkamers en één deur), zie Tabel 1	[m ²]
-	g	Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s ²	[m/s ²]
-	μ	Afvoercoëfficiënt nivelleersysteem (bij volledig geopende schuiven)	[-]
-	A_o	Minimale doorstroomsectie (bij volledig geopende schuiven)	[m ²]
-	k	Klep of schuifcoëfficiënt range 0.4 tot 0.6.	[-]
-	t_h	Openingstijd schuiven	[s]

Het verval in de bovenstaande uitdrukking is voor het ontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis in het kader van het complex project hetzelfde als dit voor het ontwerp van het nivelleersysteem in het kader van SHIP.

Voor deze eerste inschatting van de doorstroomsectie van het nivelleersysteem wordt als referentiecasse een geometrie uit het SHIP-project beschouwd waarbij de kolk genivelleerd werd in ca. 12 min. Dit betreft geometrie 2 uit Vercruyssen *et al.* (2017b). Op deze wijze is ook de nivelleertijd in bovenstaande uitdrukking gelijk aan deze voor het ontwerp in kader van SHIP. Voor deze initiële inschatting worden ook de klep of schuifcoëfficiënt, de openingstijd van de schuiven en de afvoercoëfficiënt gelijk gesteld. Vervolgens kan vertrekkende van bovenstaande vergelijking de benodigde doorstroomsectie voor het nivelleersysteem van de nieuwe sluis in het kader van het complex project als volgt berekend worden:

$$A_{cp} = \frac{S_{cp}}{S_{SHIP}} \cdot A_{SHIP} = \frac{26822}{20395} \cdot A_{SHIP} = 1.32 \cdot 25 \text{ m}^2 = 33 \text{ m}^2$$

Met:

-	A_{cp}	Benodigde doorstroomsectie omloopriool sluis complex project	[m ²]
-	A_{SHIP}	Doorstroomsectie omloopriool volgend uit ontwerp nivelleersysteem SHIP = 25 m ²	[m ²]
-	S_{cp}	Te nivelleren oppervlak sluis complex project, zie Tabel 1	[m ²]
-	S_{SHIP}	Te nivelleren oppervlak sluis SHIP = 20395 m ²	[m ²]

Uit bovenstaande volgt dat de benodigde doorstroomsectie met 32 % dient toe te nemen ten opzichte van het ontwerp van het nivelleersysteem in het kader van SHIP. Voor een nivelleertijd 12.0 min volgde uit het ontwerp van het nivelleersysteem in het kader van SHIP een doorstroomsectie van 25.0 m². Voor de sluis in kader van het complex project neemt dit toe tot 33 m².

3.2 Hydraulische simulaties nivelleersysteem

Door middel van de formulematige verschaling wordt in paragraaf 3.1 een doorstroomsectie 33.0 m² per riool bekomen. Voor deze voorgestelde doorstroomsectie wordt in Tabel 6 een indicatie gegeven van de bijhorende breedte en hoogte van de omloopriool. Deze doorstroomsectie wordt doorgevoerd in het hydraulisch netwerkmodel dat gebruikt is geweest voor de initiële bepaling van de benodigde doorstroomsectie. Dit hydraulisch netwerkmodel werd overgenomen uit het onderzoek voor SHIP (J. B. Vercruyse *et al.*, 2017b) en aangepast naar de kolkdimensies en het maatgevend schip voor het complex project. Dit wordt voldoende betrouwbaar geacht voor de bepaling van de benodigde doorstroomsectie.

Tabel 6 – Nivelleersysteem met korte omloopriolen – doorstroomsectie

	sectie	breedte	hoogte	hydraulische straal
	[m ²]	[m]	[m]	[m]
riool	33.0	6.0	5.5	5.7
ter hoogte van schuiven	16.5	3.0	5.5	3.9

Met het aangepaste hydraulisch netwerkmodel wordt vullen via het bovenhoofd (zijde achterhaven) en ledigen via het benedenhoofd (zijde voorhaven) gesimuleerd met het maatgevend schip in de kolk. De openingswetten worden opgesteld voor de maatgevende peilcombinatie voor de langskracht en stij- en daalsnelheid (P1). Vervolgens worden met deze openingswetten de maatgevende peilcombinatie voor nivelleren gesimuleerd (P2). De uitgevoerde simulaties worden samengevat in Tabel 7.

Tabel 7 – Uitgevoerde simulaties voor bepaling benodigde doorstroomsectie

	Simulatie nr.	sluishoofd	Peilen	openingswet
R1_sim001_G1_BO_P1_O1	1	Bovenhoofd	P1	O1
R1_sim002_G1_BE_P1_O1	2	Benedenhoofd		O1
R1_sim003_G1_BE_P1_O2	3	Benedenhoofd		O2
R1_sim004_G1_BO_P2_O1	4	Bovenhoofd	P2	O1
R1_sim005_G1_BE_P2_O1	5	Benedenhoofd		O1
R1_sim006_G1_BE_P2_O2	6	Benedenhoofd		O2

*P1= peilcombinatie maatgevend voor langskracht en stijgsnelheid/P2= peilcombinatie maatgevend voor nivelleertijd, zie Tabel 1.

Beide opgestelde openingswetten hebben een constante hefsnelheid. De tijd tot volledige opening van de schuiven wordt gegeven in Tabel 8.

Tabel 8 – Toegepaste openingswet hefschuiven

openingswet	openingsduur
O1	480 s
O2	270 s

De resultaten van de simulaties worden samengevat in Tabel 9. Per simulatie wordt in bijlage een figuur met de variatie in de tijd van het kolkpeil, de debieten door de omloopriolen, de openingswet en de extreme waarden van de berekende langskracht op het schip gegeven.

Tabel 9 – Resultaten simulaties ter bepaling van benodigde doorstroomsectie

simulatie	peil-combinatie*	type**	openingswet	nivelleer tijd	extremum stijg of daalsnelheid	langskracht		max. overtravel
						max.	min.	
				[min]	[m/s]	[%]	[%]	[m]
1	P1	VBO	O1	13.6	0.009	0.29	-0.18	0.11
2		LBE	O1	15.5	0.008	0.08	-0.16	0.08
3		LBE	O2	14.2	0.009	0.10	-0.28	0.08
4	P2	VBO	O1	12.2	0.007	0.23	-0.13	0.11
5		LBE	O1	13.8	0.007	0.08	-0.15	0.08
6		LBE	O2	12.6	0.008	0.10	-0.26	0.08

*P1= peilcombinatie maatgevend voor langskracht en stijgsnelheid/P2= peilcombinatie maatgevend voor nivelleertijd, zie Tabel 1.

** VBO= Vullen BOvenhoofd / LBE = Ledigen BEnedenhoofd

De extrema van de langskracht en deze van de stijg- daalsnelheid zijn bij de maatgevende peilcombinatie voor de langskracht en de stijg- daalsnelheid, P1, lager of gelijk aan de respectievelijke criteria. Voor vullen via het bovenhoofd met de peilcombinatie maatgevend voor de nivelleertijd, P2, wordt een nivelleertijd 12.2 min bekomen. Bij toepassen van de openingswet opgesteld voor vullen bovenhoofd bij ledigen benedenhoofd, met de peilcombinatie maatgevend voor de nivelleertijd, wordt een nivelleertijd 13.8 min bekomen. Bij optimaliseren van de openingswet voor ledigen wordt een nivelleertijd 12.6 min bekomen.

De maximale waarde voor de overtravel bedraagt 0.11 m. Deze waarde kan aangehouden worden als voorlopige waarde voor het constructief ontwerp van de roldeur.

4 Voorontwerp nivelleersysteem

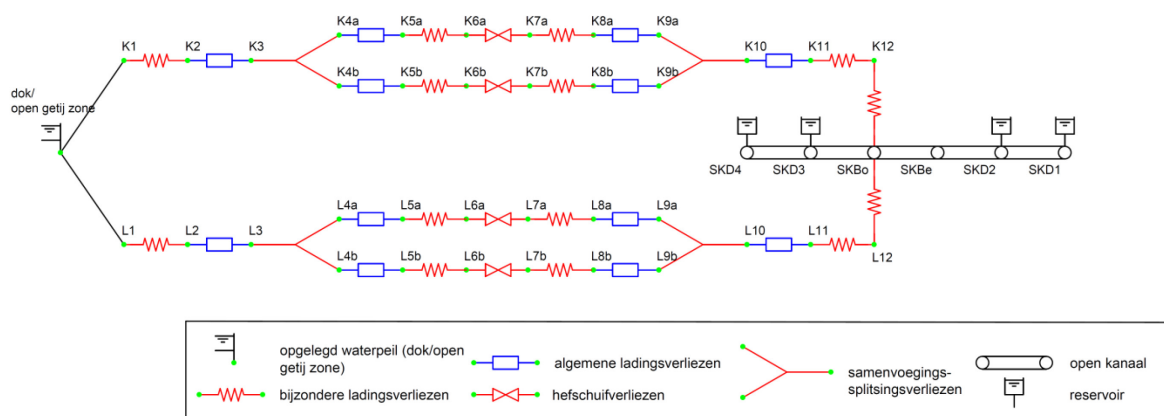
In dit hoofdstuk wordt een hydraulische revisie uitgevoerd van de door EBS opgestelde concept geometrie. Voor het opstellen van de geometrie heeft EBS zich gebaseerd op het nivelleersysteem van de Antwerpse zeesluizen. Op basis van de hydraulisch gereviseerde geometrie wordt het hydraulisch netwerkmodel opgesteld en wordt een inschatting gemaakt van de ladingsverliezen per component. Met dit hydraulisch netwerkmodel worden vervolgens nivelleren en spuien gesimuleerd, de resultaten hiervan worden besproken in hoofdstuk 5.

Een voorstelling van het hydraulisch netwerkmodel wordt gegeven in paragraaf 4.1. De componenten worden vervolgens beschreven in paragraaf 4.2. Per component wordt eerst een voorstel gegeven voor de geometrie en vervolgens wordt een inschatting gemaakt van de hydraulische verliezen. Tot slot wordt in paragraaf 4.3 een samenvatting gegeven van de karakteristieken per onderdeel van het hydraulisch netwerkmodel.

Bemerk dat voor de benaming van de componenten steeds vertrokken wordt van de voor- of achterhaven naar de kolk toe. De inlaten bevinden zich hierbij aan de zijde van de voor- of de achterhaven en de uitstroomconstructie bevindt zich in de kolk. Ook de termen op- en afwaarts worden gedefinieerd vanuit de inlaat (voor- of achterhaven) naar de uitstroomconstructie (kolk) toe. Deze benaming wordt zowel bij vullen als bij ledigen toegepast.

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 Zeebrugge wordt gegeven in Figuur 4. WL heeft in het verleden een hydraulisch netwerkmodel opgesteld van de Zandvlietsluis, Berendrechtsluis, Kieldrechtsluis, het ontwerp voor de nieuwe Royerssluis in de haven van Antwerpen en het ontwerp van een nieuwe sluis te Zeebrugge in kader van het SHIP project.



Figuur 4 – Hydraulisch netwerkmodel nieuwe sluis Zeebrugge voor nivelleren via bovenhoofd

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.

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). 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 Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007). Tabel 10 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 Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a; b).

Tabel 10 – 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

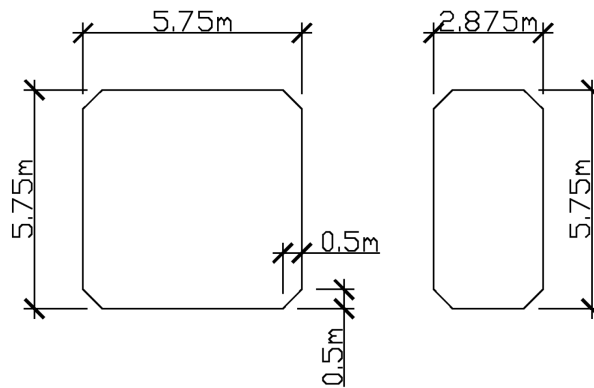
4.2 Componenten

In deze paragraaf wordt per component een voorstel gegeven voor de geometrie, de hydraulische verliescoëfficiënt die gebruikt wordt in het hydraulisch netwerkmodel en indien relevant een voorstel voor verder te onderzoeken optimalisaties. Hiervoor wordt vergeleken met de geometrie van de overige zeesluizen, ervaringen van de beheerders, literatuur en eerder uitgevoerde studies voor ontwerp en validatie van nivelleersystemen van zeesluizen.

Bemerk dat de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie voor de nieuwe sluis Zeebrugge overgenomen wordt van het hydraulisch netwerkmodel van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis. De verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructies werd gebruikt als afregelparameter waarmee de hydraulisch netwerkmodellen gekalibreerd werden aan de hand van in situ metingen. De op deze wijze bepaalde verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie bevat niet enkel de hydraulische verliezen van de uitstroomconstructie maar ook de fout op de overige componenten. Om die reden worden de overige verliescoëfficiënten ofwel rechtstreeks overgenomen uit het hydraulisch netwerkmodel voor de Kieldrechtsluis ofwel berekend aan de hand van dezelfde formuleringen als toegepast bij het opstellen van dit netwerkmodel (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a).

4.2.1 Doorstroomsectie

De omloopriool heeft een hoogte en breedte 5.75 m. Ter hoogte van de hefschuiven wordt de omloopriool gesplitst waarbij de hoogte behouden blijft in de deelriolen en de breedte gehalveerd wordt. De doorstroomsectie van de omloopriool en de doorstroomsectie 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. De secties worden samengevat in Tabel 11. Bemerk dat naast de breedte, de hoogte en de sectie ook de hydraulische diameter ($D_H=4 A/P$) gegeven wordt.



Figuur 5 – Doorsnede omloopriolen

Tabel 11 – Doorstroomsectie

		omloopriool	ter hoogte van de hefschuiven
breedte	[m]	5.75	2.90
hoogte	[m]	5.75	5.75
sectie	[m ²]	33.06	16.68
hydraulische diameter	[m]	5.75	3.86

4.2.2 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 (5.75 m of 3.86 m)	[m]
ε	Wandruwheid = 0.0015 m	[m]
Re	Reynoldsgetal $\text{Re} = \frac{(Q/A)D_H}{\nu}$	[m]
Q	Debiet	[m]
A	Doorstroomsectie (33.06 m ² of 16.68 m ²)	[-]
ν	Kinematische viscositeit = 1.141 10 ⁻⁶ m ² /s (bij 10°C)	[m ² /s]

Voor de wandruwheid van beton worden in literatuur waarden gegeven van 0.3 tot 3 mm, naargelang de ruwheid van de bekisting. Voor deze studie wordt de waarde =1.5 mm weerhouden, analoog met de hydraulische netwerkmodellen van de Zandvliet- Berendrecht- en Kieldrechtsluis.

4.2.3 Inlaten

Als eerste wordt de positie van de inlaten in de hoogte bepaald. Bij de keuze voor de positie van de inlaten in de hoogte spelen volgende elementen mee:

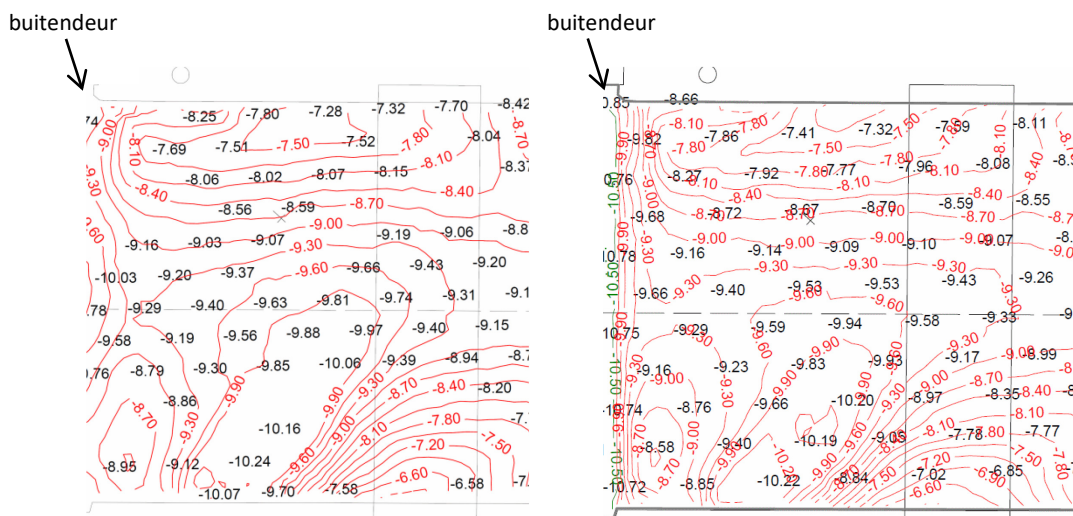
- Om sedimentmigratie van voorhaven naar achterhaven te beperken dient in de voorhaven water met een zo laag mogelijke sedimentconcentratie aangezogen te worden. Indien er een gradiënt in het sedimentconcentratieprofiel aanwezig is kan hiermee rekening gehouden worden in de bepaling van de positie van de inlaten in hoogte. Bij opmaak van dit rapport zijn geen gegevens over de sedimentconcentratieprofielen beschikbaar. Wel is er sprake van een zone met hoge sedimentconcentratie nabij de bodem (zogenaamde fluid mud).
- Na verloop van tijd zal een evenwichtshoogte van de sedimentatie ontstaan. Ten gevolge van in- en uitstroming wordt ervan uitgegaan dat de inlaten evenwel steeds vrij blijven.
- Bij een verschil in densiteit tussen voor- en achterhaven kunnen bij het vullen van de kolk densiteitsstromingen in de kolk optreden. Wanneer ter hoogte van de inlaten een densiteitsgradiënt optreedt in de waterkolom dient de positie van de inlaten zo gekozen te worden dat water met een zo laag mogelijk densiteitsverschil ten opzichte van het water in de kolk aangezogen wordt. Uit de verticale densiteitsprofielen genomen in de voor- en achterhaven volgde dat in de huidige situatie er zo goed als geen densiteitsgradiënt optreedt (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2019a). Moest in de toekomst het Boudewijnkanaal of de achterhaven verzoet worden kan een zoetwatertong optreden in de achterhaven. Om die reden is het voordelig om de inlaten van het bovenhoofd niet aan het oppervlak te voorzien.
- Luchtaanzuiging in de riolen dient absoluut voorkomen te worden. Hiervoor is een minimale waterdekking nodig. Ervaring met de Berendrecht- en Kieldrechtssluis leert dat hier, ondanks de zeer minimale waterdekking, geen luchtaanzuiging optreedt (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2016). Wanneer voor de nieuwe sluis Zeebrugge de inlaten nabij het oppervlak gepositioneerd worden en de geometrie van de inlaten niet gebaseerd wordt op de geometrie van de Antwerpse zeesluizen dient dit verder onderzocht te worden.
- Met het oog op energiedissipatie van de uitstroming bij ledigen van de sluis is het voordeliger om de riolen niet nabij de bodem of nabij het oppervlak te laten uitmonden. Hierdoor kan zowel een spreiding naar boven als naar onder toe optreden.
- Om het risico op de aanzuiging van grote, niet zwevende objecten, in de omloopriolen te verlagen lijkt het wenselijk om een hoogteverschil aan te houden tussen het vloerpeil van het beneden- of bovenhoofd en het vloerpeil van de inlaat.
- Het vloerpeil van de riolen neemt af tussen de inlaten en de uitstroomconstructie, waarvan het peil gelijk is aan dat van de kolkbodem. Hoe hoger de inlaten gelegen zijn, hoe groter deze overgang. Deze overgang wordt bij de Antwerpse zeesluizen uitgevoerd door middel van een helling. Vanuit constructief oogpunt is een helling boven 10 % complex om uit te voeren. In de Berendrecht- en Kieldrechtssluis werd een helling tot 50 % toegepast wat constructief als niet wenselijk beschouwd wordt. Ook vanuit hydraulisch oogpunt zijn de in Berendrecht- en Kieldrechtssluis toegepaste hoeken in het verticaal vlak groot.
- Bij hoog geplaatste inlaten dient ervoor gezorgd te worden dat ter hoogte van de hefschuiven het peil van de riolen al voldoende verlaagd is zodat er geen risico is op luchtaanzuiging.

Een vergelijking van de positie van de inlaten van het bovenhoofd in het verticale vlak voor een aantal zeesluizen wordt gegeven in Tabel 12. Merk hierin op dat de inlaten van het bovenhoofd het laagst geplaatst zijn bij de Nieuwe sluis Terneuzen, namelijk op 1.12 m boven de vloer. De belangrijkste motivatie hiervoor is het aanzuigen van water met hogere densiteit onderaan de waterkolom. Bij de Boudewijnsluis en de Zandvlietsluis werden de inlaten ook relatief laag geplaatst met een hoogte 2.50 m en 3.50 m boven het vloerpeil voor de inlaat. Bij de Berendrecht- en Kieldrechtssluis zijn de inlaten nabij het wateroppervlak geplaatst.

Tabel 12 – Vergelijking positie inlaten in bovenhoofd

		Boude wijn sluis	Zand vliet sluis	Beren drecht sluis	Kiel drecht sluis	Nieuwe sluis Terneuzen
Bodempeil thv inlaat	[m TAW] / [NAP]	-10.33	-13.58	-13.58	-17.80	-14.12
Onderzijde inlaat	[m TAW] / [NAP]	-7.83	-10.08	-4.08	-5.15	-13.00
Bovenzijde inlaat	[m TAW] / [NAP]	-1.33	-3.08	3.92	2.85	-9.00
Normaal peil	[m TAW] / [NAP]	4.17	4.17	4.17	3.50	2.10
Hoogte waterkolom (bij normaal peil)	[m]	14.50	17.75	17.75	21.30	16.22
Hoogte onder inlaat	[m]	2.50	3.50	9.50	12.65	1.12
Hoogte inlaat (dagvlak opening)	[m]	6.50	7.00	8.00	8.00	4.00
Waterdekking boven inlaat (bij normaal peil)	[m]	5.50	7.25	0.25	0.65	11.10

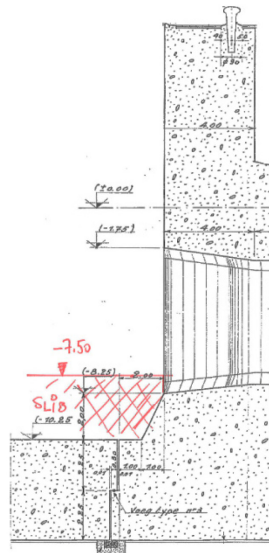
Peilplannen ter hoogte van de inlaten van het bovenhoofd van de Boudewijnsluis worden gegeven in Figuur 6 en van de Zandvlietsluis in Figuur 8. Uit Figuur 6 volgt dat in de zone voor de inlaten van de lange omloopriool van de Boudewijnsluis een sedimentatielaag ligt met bovenzijde op een peil ca. -7.50 m TAW, wat overeenkomt met een dikte van 2.5 à 3.0 m ten opzichte van peil van de kolkbodem op -10.33 m TAW. Het bodempeil van de inlaat ligt op -7.83 m TAW. De sedimentatie komt dus hoger dan het bodempeil van de inlaat van de lange omloopriool, zie Figuur 7. Bij de korte omloopriool wordt opgemerkt dat er een schuin naar het dok gerichte zone vrij blijft van sediment. Dit is vermoedelijk het gevolg van het opwoelen van het sediment bij ledigen van de sluis via het bovenhoofd. Het verschil tussen het sedimentatiepatroon ter plaatse van de korte en dit ter plaatse van de lange omloopriool is toe te schrijven aan de bocht in de korte omloopriool net na de inlaat.



links: meting 5-06-2013 / rechts: meting 14-01-2014

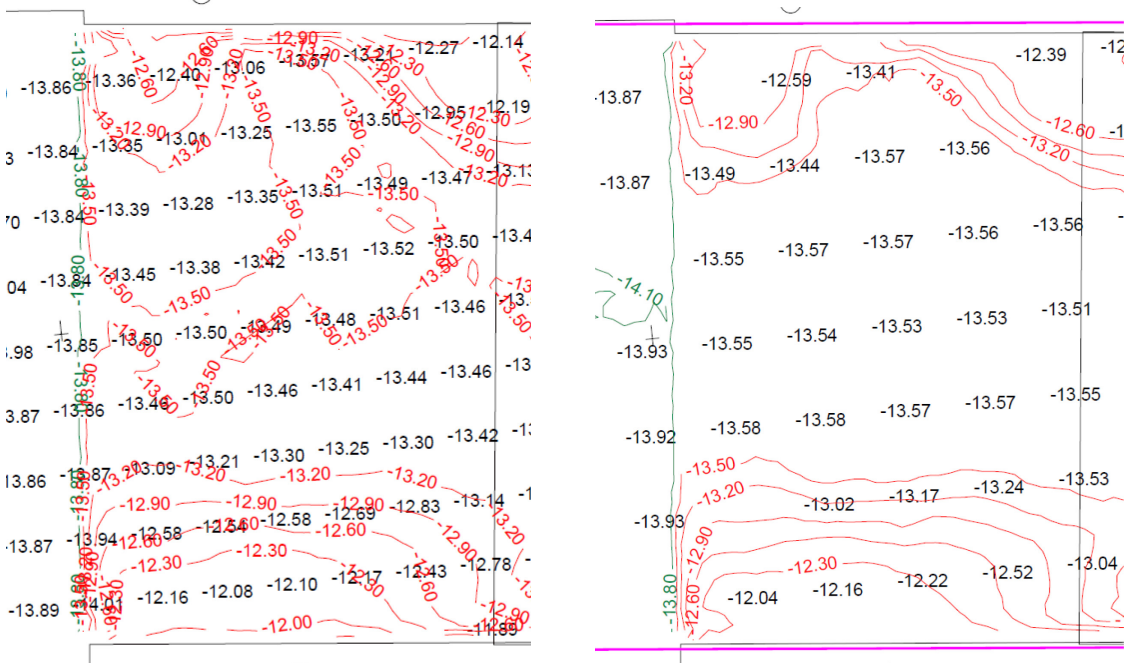
inlaat korte omloopriool bevindt zich bovenaan de figuren, inlaat lange omloopriool bevindt zich onderaan de figuren

Figuur 6 – Peilplan Boudewijnsluis – t.h.v. inlaat bovenhoofd



Figuur 7 – Boudewijnslus – lange omloopriool – doorsnede t.h.v. inlaat bovenhoofd (mail SBE dd. 16/05/2014 ; peilen in NKD, TAW = NKD - 0.08 m)

Uit de peilplannen van de Zandvlietslus, zie Figuur 8, valt op dat de bodem vrij blijft in de omgeving van de aslijn van de sluis en dat naar de wanden toe enige sedimentatie optreedt. De dikte van deze sedimentatie is beperkt tot ca. 1.5 m. Aan de zijde van de lange omloopriolen betreft dit een vrij uniform aanslibbing. Aan de zijde van de korte omloopriool treedt een insnoering op in de sedimentatie. Dit patroon is analoog met wat vastgesteld wordt voor de Boudewijnslus. De op 13/06/05 uitgevoerde bathymetriemeting bevat meer detail dan de op 14/04/08 uitgevoerde bathymetriemeting maar globaal is het patroon gelijk. Uit de plannen van de beide bathymetriemetingen volgt ook dat de sedimentatie in de kolk verwaarloosbaar is.



links bathymetriemeting dd. '176_Zandvlietslus_130605'; Rechts bathymetriemeting dd. '246_140408_Schutkolk Zandvlietslus' inlaat korte omloopriool bevindt zich bovenaan de figuren, inlaat lange omloopriool bevindt zich onderaan de figuren

Figuur 8 – Bathymetrie metingen Bovenhoofd Zandvlietslus

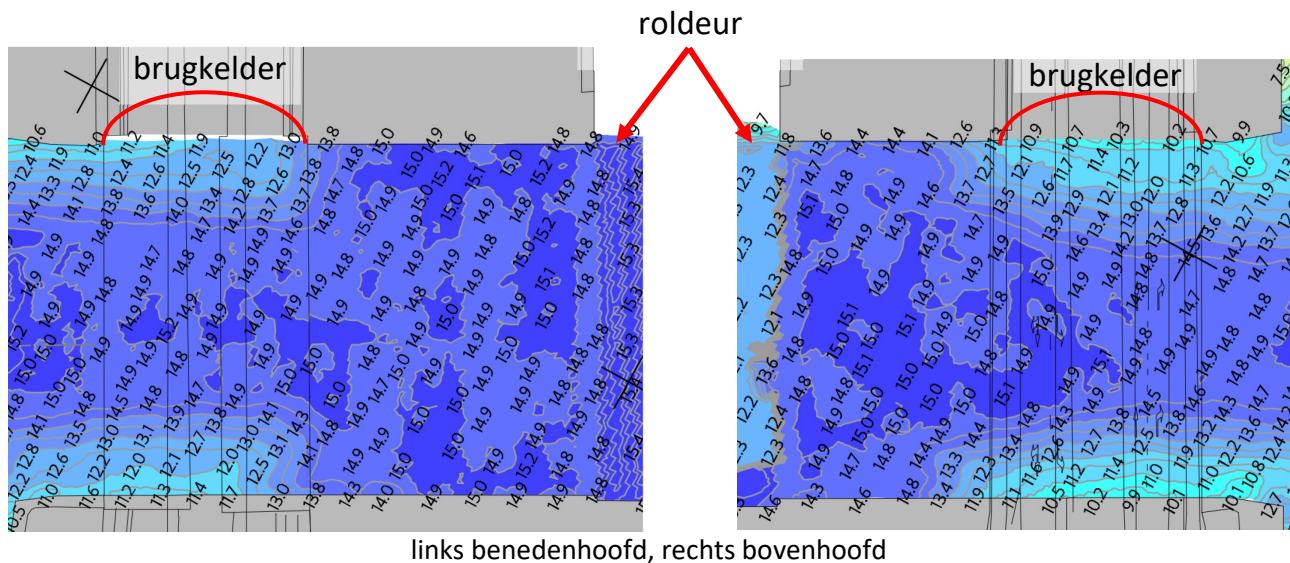
Zowel bij de Boudewijnslus als bij de Zandvlietslus worden door het Havenbedrijf Antwerpen (HA) geen problemen opgemerkt, zowel niet wat betreft sedimentatie in de riolen als wat betreft het meezuigen van objecten in de riolen. Wel wordt door HA vastgesteld dat sedimentmigratie optreedt doorheen de sluisen. Deze migratie kan zowel gebeuren via de omloopriolen als door densiteit gedreven stroming tijdens het openstaan van de roldeuren.

Bij de Berendrechtsluis zijn de riolen nabij het wateroppervlak geplaatst. De aangehouden waterdekking boven de riolen is hierbij minimaal. Op 31-03-2014 heeft het WL een vulling via het bovenhoofd van de Berendrechtsluis bijgewoond. De kolk werd toen genivelleerd van een Scheldepeil TAW - 0.27 m naar een dokpeil TAW + 4.17 m. Een opname van het stromingspatroon naar de korte omloopriool wordt gegeven in Figuur 9. Tijdens deze schutting zijn visueel grote stroomsnelheden aan het wateroppervlak vastgesteld maar werden geen wervels of het aanzuigen van luchtpakketten opgemerkt. De aanstroming aan de oppervlakte was, visueel begroot, sterker voor de korte omloopriool. Het Waterbouwkundig Laboratorium heeft in zijn archieven geen informatie over het ontwerp van de Berendrechtsluis. De reden voor het zo hoog plaatsen van de inlaten in de Berendrechtsluis is niet gekend. Bij de Kieldrechtsluis werd de positie overgenomen van de Berendrechtsluis. Omwille van de bezorgdheid van luchtaanzuiging werd de positie van de inlaten in de hoogte evenwel iets verlaagd.



Figuur 9 – Aanstroming inlaat korte omloopriool Berendrechtsluis vullen via bovenhoofd – Scheldepeil TAW - 0.27 m naar Dokpeil TAW + 4.17 m

Om zicht te krijgen op de evenwichtshoogte van de sedimentatie in Zeebrugge werden door aMT peilplannen overgemaakt van de Vandammeslus. Omdat de nieuwe sluis hetzelfde bodempeil heeft als de Vandammeslus (-15.1 m TAW) en omdat hetzelfde type schepen passeren zijn deze peilplannen ook relevant voor de nieuwe sluis. Figuur 10 geeft voor de in maart 2021 uitgevoerde peiling een detail tussen brugkelder en roldeur voor bovenhoofd en benedenhoofd. De verhoging ter hoogte van de buitenste roldeur van het bovenhoofd wordt verklaard door de aanwezigheid van een caisson in kader van de renovatie van deze roldeur. Bemerk dat tussen de roldeur en de brugkelders geen sedimentatie optreedt. Deze zone wordt niet gebaggerd waardoor dit toegeschreven wordt aan het opwoelen van het sediment door de uitstroming doorheen de laaggelegen nivelleeropeningen in de roldeur. Ter hoogte van de brugkelders treedt sedimentatie op nabij de wanden. Zoals te verwachten is de sedimentatie (zowel in breedte als in hoogte) wat beperkter voor het benedenhoofd dan voor het bovenhoofd. De bovenzijde van de sedimentatie nabij de zijwand bevindt zich op het peil -11.0 m TAW in het benedenhoofd en op -10.0 m TAW in het bovenhoofd. Uit een snelle vergelijking met de overige peilplannen (periode 2015 tot 2021) volgt dat deze toestand stabiel is. Als enige verschil wordt opgemerkt dat de rand waarop sedimentatie begint nabij de brugkelder wat wijzigt tussen de verschillende peilplannen. Dit kan mogelijk toegeschreven worden aan de in de betreffende periode gebruikte roldeuren.



Figuur 10 – Peilplan Vandammesluis dd. 30/03/2021

De achterhaven van Zeebrugge heeft slechts een beperkte bovenafvoer waardoor het peil beheerd wordt door het toevoegen van zeewater. Hiervoor wordt een naast de Vandammesluis gelegen spuirool gebruikt. Deze spuirool bestaat uit drie afzonderlijke kokers met breedte 3.5 m, hoogte 3.0 m en een bodempeil +0.50 m TAW (Ministerie van Openbare Werken. Bruggen en Wegen. Dienst der Kust, 1979). Bemerkt dat de inlaat van deze spuirool zich bovenaan in de waterkolom bevindt. Bij het ontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis dient rekening gehouden te worden dat het nivelleersysteem ook ingezet kan worden om te spuien. Bij het spuien met het nivelleersysteem dient rekening gehouden te worden met sedimentmigratie van voorhaven naar achterhaven toe. Bij spuien via het bovenhoofd zal water vanuit de kolk aangezogen worden. Doordat de inlaten van de uitstroomconstructie nabij de bodem liggen zal het aangezogen water mogelijk een hogere sedimentconcentratie hebben dan bij de huidige spuirool langs de Vandammesluis waar de inlaten zich nabij het wateroppervlak bevinden. Bij spuien via het benedenhoofd is er de mogelijkheid om bij de positie van de inlaten in hoogte rekening te houden met het verwachte verticale sedimentconcentratieprofiel nabij de inlaten.

Zoals hierboven reeds vermeld is sedimentmigratie een belangrijke parameter in de bepaling van de hoogte van de inlaten. In deze voorlopige bepaling wordt voorgesteld om de hoogte enerzijds te baseren op de Boudewijnslus en de Zandvlietslus en anderzijds het bodempeil van de inlaten niet lager te voorzien dan de evenwichtshoogte van de sedimentatie nabij de wand vastgesteld in de Vandammesluis. Hieruit volgt een onderzijde van de inlaat in het dagvlak van de opening op -10.1 m TAW voor het bovenhoofd en -11.1 m TAW voor het benedenhoofd of een bodempeil van de riool gelijk aan -9.6 m TAW voor het bovenhoofd en -10.6 m TAW voor het benedenhoofd. De sluis is ontworpen voor een opwaarts bodempeil -15.10 m TAW. In de eerste fase zal de achterhaven ter hoogte van de nieuwe sluis niet voorbij -10.1 m TAW uitgebaggerd worden. Hiermee rekening houdend wordt voorgesteld om het vloerpeil van de inlaten van het bovenhoofd op -7.60 m TAW te laten aanvagen. Bij het benedenhoofd wordt opgemerkt dat wanneer de sluis gebruikt wordt om te spuien vanuit de voorhaven naar de achterhaven verder onderzoek nodig is naar de positie van de inlaat met het oog op het beperken van sedimentmigratie. Indien uit de te verwachten sedimentconcentratieprofielen volgt dat bij voorkeur water boven een gegeven peil aangezogen wordt kan dit een motivatie zijn om de inlaten in het benedenhoofd hoger te positioneren.

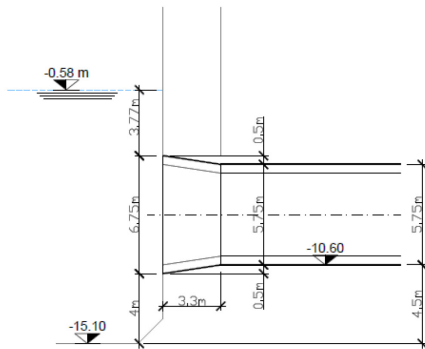
De hieruit volgende positie van de inlaten worden samengevat in Tabel 13.

Tabel 13 – Voorstel positie inlaten in hoogte nieuwe sluis Zeebrugge

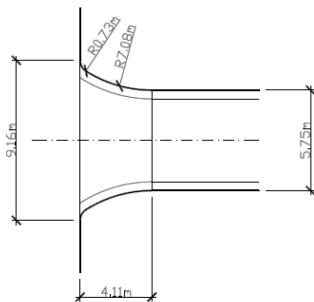
		bovenhoofd	benedenhoofd
Bodempeil t.h.v. inlaat	[m TAW]	-15.10 / -13.10	-15.10
Onderzijde dagvlak opening	[m TAW]	-8.10	-11.10
Vloerpeil inlaat	[m TAW]	-7.60	-10.60
Plafondpeil inlaat	[m TAW]	-1.85	-4.85
Bovenzijde dagvlak opening	[m TAW]	-1.35	-4.35
Exceptioneel laag peil	[m TAW]	+3.00	-0.58
Hoogte waterkolom (bij normaal peil)	[m]	18.10 / 16.10	14.52
Hoogte onder vloerpeil inlaat	[m]	7.50 / 5.50	4.50
Waterdekking boven plafondpeil inlaat (bij het exceptioneel laag peil)	[m]	4.85	4.27

De geometrie van de openingen wordt gebaseerd op de Antwerpse zeesluizen. Een voorstel wordt gegeven in Figuur 11. In het verticaal vlak wordt een afschuining toegepast waarbij de hoogte boven en onder toeneemt met 0.50 m. In het horizontaal vlak wordt een afronding toegepast. De figuur bevat een afronding op basis van de Berendrecht- en Kieldrechtsluis en een afronding op basis van de Zandvlietsluis. Vanuit hydraulisch oogpunt is er een beperkte voorkeur voor de afronding op basis van de Zandvlietsluis ten opzichte van de afronding op basis van de Berendrecht- en Kieldrechtsluis.

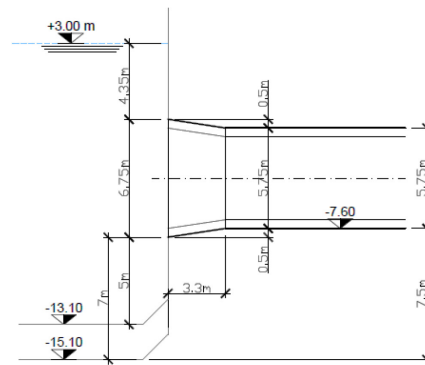
Benedenhoofd



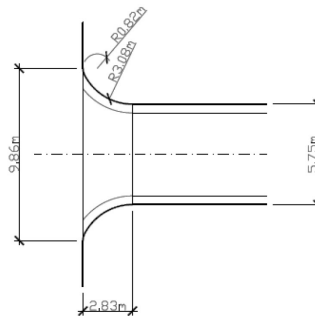
afronding in planzicht
(obv Zandvlietsluis)



Bovenhoofd



afronding in planzicht
(obv Berendrecht/Kieldrechtsluis)



Figuur 11 – Inlaat omloopriolen

Voor de hydraulische verliescoëfficiënt van de inlaat worden de waarden uit Tabel 14 toegepast. Bemerkt dat deze waarden overeenkomen met verliescoëfficiënten uit de modellen voor Zandvlietsluis, Berendrechtsluis en Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2010a; J. B. Vercruyse *et al.*, 2019b).

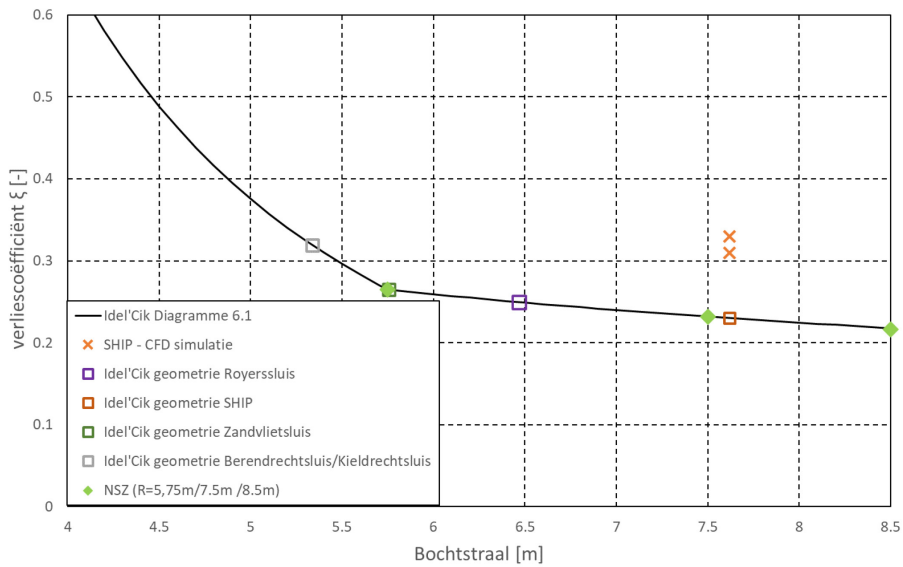
Tabel 14 – Toegepaste verliescoëfficiënt inlaat

Stroomrichting	Vullen	Ledigen
verliescoëfficiënt	0.2	1.0

Door IMDC werd een studie uitgevoerd naar de uitstroming uit de inlaatopeningen van het benedenhoofd bij ledigen van de sluis (Moretti *et al.*, 2021). De simulaties en de nautische beoordeling van de uitstroming op het in- en uitvaren van de jachthaven worden besproken in hoofdstuk 6. De resultaten van deze simulaties tonen dat de uitstroming uit de korte omloopriool niet loodrecht op de aslijn van de kolk gericht is, waardoor deze zonder veel dissipatie afbuigt naar de voorhaven toe. Dit lijkt ook te volgen uit de bathymetriemetingen van de Boudewijn- en Zandvlietsluis (zie Figuur 6 en Figuur 8) die aan de korte omloopriool een schuin naar de voorhaven toe gerichte insnoering vertonen. Mogelijk kan de uitstroming vanuit de korte omloopriool nog geoptimaliseerd worden door bijvoorbeeld de afrondingsstraal van de bocht in het horizontale vlak aan te passen of door het toevoegen van een of meerdere schoepen vanaf de inlaat doorlopend tot in de aansluitende bocht.

4.2.4 Bochten in het horizontaal vlak

De korte omloopriool bevat één bocht in het horizontaal vlak en de lange omloopriool drie bochten in het horizontaal vlak. Deze bochten zorgen voor een ladingsverlies. Dit ladingsverlies is te wijten aan het loslaten van de stroming langs de binnenbocht en/of het ontstaan van een secundaire helicoidale 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 deze bochten worden de formules en diagrammen gegeven in Idel’Cik (1969) diagram 6.1 toegepast. De verliezen in functie van de bochtstraal worden gegeven in Figuur 12. Hierin worden ook de hydraulisch verliescoëfficiënten gegeven voor de overige zeesluizen (as-built en ontwerp) waarbij de bochtstraal verschaald werd naar een rioolbreedte 5.75 m. Hiernaast wordt ook de hydraulische verliescoëfficiënt volgende uit de CFD simulatie voor het SHIP ontwerp gegeven ((Fahner *et al.* (2017) en Vercruyse *et al.* (2017b)). Bemerkt dat het verlies bepaald uit de CFD simulatie hoger is dan volgt uit de formulering van (Idel’Cik, 1969).



Figuur 12 – Hydraulisch verlies bocht in het horizontaal vlak in functie van de bochtstraal

De verliezen voor de bochten in het horizontaal vlak voor het nivelleersysteem van de nieuwe sluis Zeebrugge 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	D_H	R_0/D_H	a_0/b_0	k	Re	ξ_{bocht}
			[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[-]	[-]
kort	K1-K2	90	5.75	5.75	1.00	1	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.26
lang	L1-L2	90	7.5	5.75	1.30	1	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.23
lang	L11-L12	90	7.5	5.75	1.30	1	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.23
lang	L11-L12	90	8.5	5.75	1.48	1	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.22

R_0	Bochtstraal op centerlijn	[m]	b_0	Breedte riool	[m]
D_H	Hydraulische diameter ($=4 \cdot A/P$)	[m]	k	Wandruwheid	[m]
A	Rioolsectie = 8.0 m ²	[m ²]	Re	Reynoldsgetal ($Re=(Q/A) \cdot D_H / \nu$)	[m]
P	Natte omtrek = 16.0 m	[m]	Q	Debiet (volgend uit LOCKSIM)	[m]
a_0	Hoogte riool	[m]	ν	Kinematische viscositeit = 1.141 10 ⁻⁶ m ² /s	[m ² /s]

Bij uittrede van de bocht zal de stroming nog niet genormaliseerd zijn en geconcentreerd zijn aan de buitenbocht. Bij de inlaat zal bij ledigen de uitstroming hierdoor onder hoek gebeuren, zie paragraaf 4.2.3. Bij de hefschuiven zal dit ervoor zorgen dat het debiet niet gelijk verdeeld is over beide hefschuiven, zie paragraaf 4.2.7. Een mogelijke te onderzoeken optimalisatie is het wijzigen van de bochtstraal.

4.2.5 Verlaging vloerpeil omloopriolen

Het bodempeil ter hoogte van de inlaten werd bepaald in paragraaf 4.2.3. Na de inlaten dient het peil van de riolen verlaagd te worden tot het bodempeil van de kolk. Voor het bovenhoofd bedraagt de verlaging 7.5 m en voor het benedenhoofd 4.5 m. Bij een vanuit constructieve overwegingen optimale helling van 10 % komt een verlaging in het verticaal vlak met 7.5 m overeen met een afstand 75 m in het horizontaal vlak. In de lange omloopriool is een lengte ca. 70 m beschikbaar tussen de inlaat en de hierop volgende horizontale bocht naar de hefschuiven. Te scherpe knikken zijn vanuit hydraulisch oogpunt minder wenselijk. In de korte omloopriool is een lengte van ca. 18 m beschikbaar tussen de eerste bocht na de inlaat en de zone waarin de hefschuiven aanwezig zijn worden. Uitgaande van een helling 10% voor de overgang in de lange omloopriool en een lengte van 18 m in de korte omloopriool worden de waarden uit Tabel 16 bekomen.

Tabel 16 – Verlaging vloerpeil omloopriolen

			korte omloopriool	lange omloopriool
bovenhoofd	horizontaal	[m]	18.0	69.0
	peilverschil	[m]	7.50	7.50
	hoek	[%]	42	11
	hoek	[°]	22.62	6.21
benedenhoofd	lengte overgang	[m]	18.0	45.0
	peilverschil	[m]	4.50	4.50
	hoek	[%]	25	10
	hoek	[°]	14.04	5.71

Voor de korte omloopriool bedraagt de helling van de overgang 25 % in het benedenhoofd en 42 % in het bovenhoofd. Deze waarden zijn hoger dan de aanbevolen waarden van 10 % maar lager dan de 50 % toegepast in de Berendrecht- en Kieldrechtsluis. De 50 % van de Berendrecht- Kieldrechtsluis werd vanuit constructief punt evenwel niet wenselijk beschouwd. Indien gewenst kan voor de korte omloopriool de verlaging opgedeeld worden in een eerste overgang voor de hefschuiven en een tweede overgang na de hefschuiven, zoals ook in de Kieldrechtsluis het geval is. Voor de lange omloopriool wordt de helling 10 % nipt overschreden in het bovenhoofd. Voor de lange omloopriool in het benedenhoofd kan deze helling eventueel nog verflauwd worden.

Voor de bochten in het verticaal vlak wordt voor de binnen en buitenhoek een zelfde afronding toegepast, namelijk een straal van 1 m. Voor het bepalen van de verliezen van een dergelijk type bocht worden in dit rapport de formules en diagrammen gegeven in Idel’Cik (1969) diagram 6.9 gebruikt. De ladingsverliezen voor de overgangen in het verticaal vlak worden gegeven in Tabel 17.

Tabel 17 – Ladingsverliezen overgangen in het verticaal vlak

hoofd	Omloop riool	component	aantal	hoek	a_0/b_0	r_0/D_H	k	Re	ξ_{bocht}
				[°]	[-]	[-]	[m]	[-]	[-]
Boven hoofd	kort	K1-K2	1	23	1	0.17	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.26
	kort	K5a-K6a	1	23	2	0.26	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.18
	kort	K5b-K6b	1	23	2	0.26	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.18
	lang	L1-L2	2	6	1	0.17	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.06
Beneden hoofd	kort	K1-K2	1	14	1	0.17	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.14
	kort	K4a-K5a	1	14	2	0.26	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.09
	kort	K4b-K5b	1	14	2	0.26	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.09
	lang	L1-L2	2	6	1	0.17	0.0015	$>2 \cdot 10^5$	0.06

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	[m ²]
Re	Reynoldsgetal ($Re=(Q/A)*D_H/\nu$)	[m]			

Uit Tabel 17 volgt dat de ladingsverliezen van de overgangen in het verticaal vlak van de korte omloopriool van dezelfde grootteorde zijn als de ladingsverliezen van de 90° bochten in het horizontaal vlak. De ladingsverliezen van de overgangen in de lange omloopriool bedragen 25 % tot 50 % van de ladingsverliezen van de overgangen in de korte omloopriool.

Indien gewenst kan de hoek in het verticale vlak van de korte omloopriool verflauwd worden door over te gaan naar een eerste helling opwaarts de schuiven en een tweede helling afwaarts de schuiven. Dit werd bijvoorbeeld toegepast in de korte omloopriool van de Kieldrechtssluis.

Bemerk dat vanuit constructief oogpunt een verticale schacht voordeliger is. Door de beperkte stijging van het vloerpeil, 4.50 m voor het benedenhoofd respectievelijk 7.50 m voor het bovenhoofd, ten opzichte van de rioolhoogte 5.75 m is dit vanuit hydraulisch oogpunt zeer complex en wordt dit hierdoor als niet wenselijk beschouwd.

4.2.6 Hefschuiven

In voorliggend ontwerp wordt het vloerpeil van de riool ter hoogte van de hefschuiven op -15.1 m TAW voorzien. Door het relatief beperkte verval en de lage positie van de hefschuiven worden geen problemen verwacht met cavitatie en luchtaanzuiging. Er bestaat een risico op trillingen ten gevolge van de stroming onder de hefschuif. Voornamelijk bij beperkte hefhoogtes bestaat er een risico op zelfexcitatie waarbij stromingsfluctuaties en fluctuaties van de schuif elkaar versterken (Kolkman & Jongeling, 2007). Wanneer geen bewezen ontwerp wordt toegepast dient dit onderzocht te worden.

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 hierbij overeen met een oneindig hoog verlies en bij een volledig open hefschuif neemt het verlies af tot 0. Voor het simuleren van de troskrachten is het belangrijk dat het verloop van het debiet niet gekenmerkt wordt door plotse overgangen. In het kader van het opstellen van

het LOCKSIM model voor de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007) werd de stapgrootte van de verliezen gegeven in Idel’Cik (1969) diagram 9.1 hierom verfijnd door middel van extrapolatie en interpolatie. Deze aangepaste hefschuifverliezen worden ook hier toegepast. Zie Tabel 18.

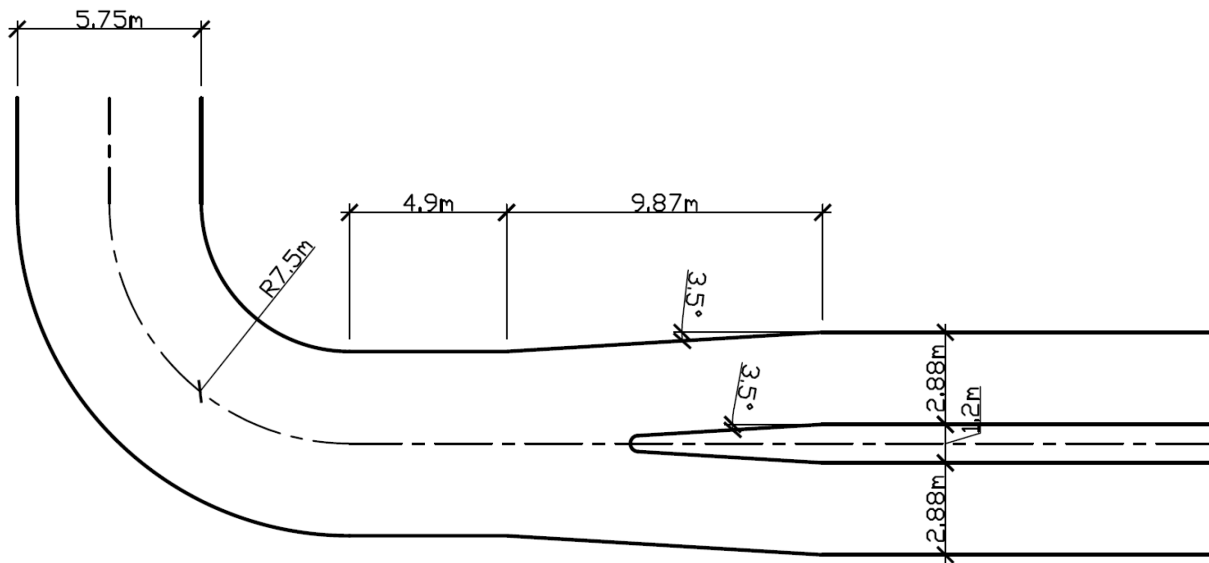
Tabel 18 – Hefschuifverliezen in functie van hefhoogte

$\theta = \delta/H$	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)
op basis van Idel’Cik (1969) diagram 9.1

4.2.7 Splitsing en samenvoegen t.h.v. hefschuiven

Ter hoogte van de hefschuiven wordt het riool gesplitst. De sectie van de riolen ter hoogte van de hefschuiven wordt beschreven in paragraaf 4.2.1. Bemerkt dat de sectie per hefschuif overeenkomt met de halve sectie van de omloopriool. De hefschuiven worden in planzicht tussen de twee roldeuren van het betreffende hoofd geplaatst. Bij het korte riool wordt de splitsing aan de zijde van de inlaat samen met de verlaging van het bodempeil, zie paragraaf 4.2.5, uitgevoerd. Bij het lange omloopriool wordt de splitsing en samenvoeging uitgevoerd op de plaats waar de riolen de bocht rondom de deurkamers maken. Een voorstel voor de geometrie van de splitsing en samenvoeging op basis van de Berendrecht- en Kieldrechtsluis wordt gegeven in Figuur 13. De lengte van de zone waarin de twee deelriolen parallel lopen (12.05 m) en de breedte van de tussenmuur tussen beide riolen (1.2 m) werd overgenomen van de door EBS opgesteld ontwerp tekening (EBS, 2021). De hoek van de overgang, zijnde 3.5° , wordt overgenomen van de Berendrecht- Kieldrechtsluis. Doordat de tussenmuur merkbaar smaller is dan bij de Berendrecht- en Kieldrechtsluis (1.2 m t.o.v. 2.0 m) is er nog een zone met lengte 4.9 m tussen het einde van de bocht en de splitsing/samenvoeging waar de breedte 5.75 m behouden blijft.



Figuur 13 – Voorstel uitstroomconstructie

Voor de verliescoëfficiënten van de splitsing worden de in LOCKSIM ingebouwde verliescoëfficiënten gebruikt. Bij beide schuiven van een riool in dienst zijn deze verliezen beperkt. Bij één van beide hefschuiven buiten dienst kunnen wel grote verliezen optreden. Uit de kalibratie van het model van de Berendrechtsluis en Zandvlietsluis op basis van meetgegevens met een schuif buiten dienst werd een goede overeenkomst bekomen bij het gebruik van de in LOCKSIM ingebouwde verliescoëfficiënten (De Mulder *et al.*, 2010a).

Bemerk dat door de aanwezigheid van de bocht net voor de splitsing de stroming nog geconcentreerd zal zijn in de buitenbocht. Het debiet doorheen de deelriool die het verst van de kolk afgelegd is zal hierdoor hoger zijn dan het debiet in de deelriool dicht bij de kolk. Bemerk dat dit onevenwicht zich ook voordoet in de Antwerpse zeesluizen. Navraag bij HA leert dat er evenwel geen bijzondere verschillen opgemerkt worden tussen de schuiven het dichtste bij de kolk en de schuiven het verste van de kolk.

Indien gewenst kan getracht worden om het evenwicht tussen beide deelriolen te verbeteren. Hydraulisch kan dit eenvoudig gerealiseerd worden door het doortrekken van de tussenmuur tot voorbij de bochten in het horizontaal vlak. Indien het doortrekken van de tussenmuur niet gewenst is kan door middel van CFD-simulaties of schaalmodelproeven simulaties eerst de voorgestelde geometrie onderzocht worden. Vervolgens kan beoordeeld worden of het verkleinen van de bochtstraal van de bochten in het horizontaal vlak de verdeling al kan verbeteren. Wanneer een verkleining van de bochtstraal niet het voldoende effect heeft kan getracht worden om de verdeling te optimaliseren door:

- de aslijn van de bocht te verschuiven ten opzichte van de aslijn van de splitsing- samenvoeging.
- de schoep in de samenvoeging- splitsing onder een hoek te plaatsen zodat de stroming naar de schuiven het dichtst bij de kolk bevoordeeld wordt.

4.2.8 Uitstroomconstructie

De uitstroomconstructie heeft volgende doelen:

- een bodemnabije stroming creëren die gelijkmatig verdeeld is over de breedte van de uitstroomconstructie.
- de stroming die in de riolen nog volgens de langs-as van de kolk gericht is loodrecht op de kolk-as richten.

Uit een bevraging van het gebruik van de Antwerpse zeesluizen volgt dat bij het positioneren van schepen in de kolk geen rekening gehouden wordt met de locatie van de uitstroomopeningen. Schepen worden zonder hinderlijke effecten te ervaren aangemeerd boven de in werking zijnde uitstroomconstructie, zowel bij vullen als bij ledigen. Om die reden wordt voor de nieuwe sluis te Zeebrugge de uitstroomconstructie overgenomen van de Antwerpse zeesluizen. Dit concept werd ontwikkeld voor de Boudewijnsluit op basis van schaalmodelonderzoek (Lamoën, 1950). Bij het ontwerp van de Zandvlietsluit werd de uitstroomconstructie door middel van schaalmodelonderzoek geoptimaliseerd (Smets & Sterling, 1961, 1962). Over het ontwerp van het nivelleersysteem van de Kallosluit en de Berendrechtsluit is in de archieven van WL geen informatie beschikbaar. Voor de gerenoveerde Royerssluit werden simulaties uitgevoerd door middel van CFD (Actiflow (2015), Vercruyssen *et al.* (2016)). Hierbij werd de hoogte van de tussenmuren geoptimaliseerd. Voor de SHIP sluit werd een validatie van de uitstroomconstructie door middel van CFD simulaties uitgevoerd (Fahner *et al.* (2017), Vercruyssen *et al.* (2017b)).

Tabel 19 geeft een overzicht van de kolkafmetingen, riooldimensies en dimensies van de uitstroomconstructie voor de Antwerpse zeesluizen en de uitgevoerde ontwerpen voor de Royerssluit en SHIP sluit. Op basis van deze dimensies zijn volgende dimensieloze karakteristieke verhoudingen bepaald:

- Verhouding van de doorstroomsectie van de uitstroomopeningen tot de doorstroomsectie van de omloopriool. Deze parameter geeft een indicatie van de mate van spreiding van de snelheid.
- Verhouding hoogte van de uitstroomopeningen tot de hoogte van de omloopriool.
- Hoogte/breedte verhouding van de uitstroomopeningen. Bemerkt dat de uitstroomconstructie opgedeeld wordt in verschillende openingen. Uit het uitgevoerde CFD onderzoek in kader van het ontwerp van de Royerssluit en de SHIP sluit volgt namelijk dat in de uitstroomopening de stroming niet uniform is. Door middel van tussenschoppen wordt voor een voldoende spreiding over de breedte van de uitstroomconstructie gezorgd.
- Totale breedte uitstroomopeningen ten opzichte van kolk lengte. Deze parameter geeft een indicatie van de relatieve breedte van de uitstroomconstructie.

Deze dimensieloze karakteristieke verhoudingen zijn ook toegevoegd in Tabel 19.

Op basis van deze dimensieloze karakteristieke verhoudingen zijn vervolgens twee varianten voor de uitstroomconstructie van de nieuwe sluis te Zeebrugge opgesteld. De dimensies van deze varianten zijn als volgt bepaald:

- De hoogte van de uitstroomopeningen wordt bepaald op basis van de verhouding hoogte uitstroomopening ten opzichte van hoogte riool toegepast in de Zandvliet, Berendrecht en Kieldrechtsluit. Bij toepassen van een verhouding 0.45 wordt zo een hoogte 2.6 m uitgekomen.
- Vervolgens wordt gekeken naar de verhouding van de sectie van de uitstroomopeningen ten opzichte van de rioolsectie. Gekozen wordt om de verhouding van de Berendrecht- en Kieldrechtsluit te benaderen namelijk ca. 2.3.
- Tot slot wordt gekeken naar de verhouding van de hoogte ten opzichte van de breedte van de uitstroomopeningen. Bij 6 openingen wordt een breedte 4.9 m per opening bekomen. De verhouding van de hoogte ten opzichte van breedte bedraagt hierbij 0.53 wat overeenkomt met waarde voor de Zandvlietsluit (0.54). Bij 7 openingen wordt een breedte 4.2 m per opening bekomen. Hierbij bedraagt de verhouding van de hoogte ten opzichte van de breedte 0.62 wat beperkt lager is dan de waarde voor de Berendrecht- en de Kieldrechtsluit (0.65).

De varianten zijn ook toegevoegd in Tabel 19.

Tabel 19 – Vergelijking uitstroomconstructie ten opzichte van kolk en riolafmetingen voor bestaande sluisen en het voorstel voor de nieuwe sluis Zeebrugge

			Boudewijn sluis	Zandvliet sluis	Kallo- sluis	Beren- drecht sluis	Kieldrecht sluis	vernieuwde Royers- sluis	SHIP	nieuwe sluis Zeebrugge	
										6 openingen	7 openingen
kolk	lengte	m	360	500	360	500	500	250	390	427	427
	breedte	m	45	57	50	68	68	36	45	55	55
	oppervlak	m ²	16200	28500	18000	34000	34000	9000	17550	23485	23485
	bodempeil	TAW	-10.33	-13.58	-12.58	-13.58	-17.80	-6.41	-12.50	-15.10	-15.10
omloopriool	breedte	m	5.00	6.50	5.50	7.00	7.00	4.00	4.00	5.75	5.75
	hoogte	m	5.50	6.00	6.00	7.00	7.00	4.00	4.00	5.75	5.75
	doorstroomsectie	m ²	27.5	39.0	33.0	49.0	49.0	16.0	16.0	33.1	33.1
uitstroom- constructie	aantal	-	6	6	6	7	7	6	5	6	7
	breedte opening	m	4.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00	3.90	4.90	4.20
	hoogte opening	m	2.00	2.70	2.00	3.25	3.25	1.50	2.00	2.60	2.60
	totale opening- breedte	m	24.0	30.0	30.0	35.0	35.0	24.0	19.5	29.4	29.4
	Totale doorstroomsectie	m ²	48.0	81.0	60.0	113.8	113.8	36.0	39.0	76.4	76.4
<u>totale doorstroomsectie uitstroomopeningen</u> doorstroomsectie omloopriool		-	1.75	2.08	1.82	2.32	2.32	2.25	2.44	2.31	2.31
<u>hoogte uistroomopening</u> hoogte omloopriool		-	0.36	0.45	0.33	0.46	0.46	0.38	0.50	0.45	0.45
<u>hoogte uistroomopening</u> breedte uistroomopening		-	0.50	0.54	0.40	0.65	0.65	0.38	0.51	0.53	0.62
<u>totale openingsbreedte</u> kolk lengte		-	0.067	0.060	0.083	0.070	0.070	0.096	0.050	0.069	0.069

De verhouding van de totale openingsbreedte ten opzichte van de kolk lengte bedraagt 0.069. Dit komt overeen met de verhouding 0.070 bij de Berendrecht- en Kieldrechtsluis. De keuze tussen de twee voorgestelde varianten kan op basis van constructieve overwegingen gemaakt worden. Vanuit hydraulisch oogpunt zal de variant met 7 openingen beperkt voordeliger zijn.

Bovenstaand voorstel voor de uitstroomconstructie is gebaseerd op het ontwerp van de uitstroomconstructie van de Zandvliet-, Berendrecht- en Kieldrechtsluis. Ten opzichte van het ontwerp van de SHIP sluis en de Royerssluis wijkt dit ontwerp af. Voor de SHIP sluis wordt opgemerkt dat de verhouding van de totale openingsbreedte ten opzichte van de kolk lengte kleiner is. De verklaring hiervoor is dat voor deze sluis een minder performant nivelleersysteem, met een relatief kleinere doorstroomsectie, werd beschouwd. Voor de vernieuwde Royerssluis werd omwille van de beperkte kielspelende hoogte van de uitstroming zo laag mogelijk gehouden. Dit resulteerde in lagere maar bredere uitstroomopeningen.

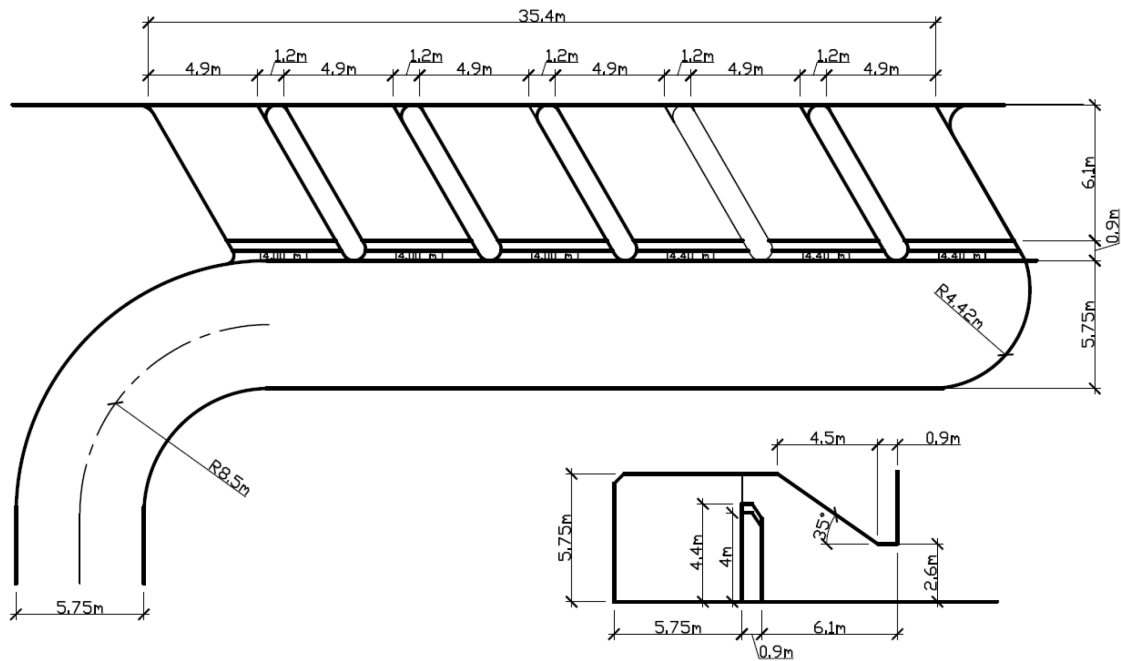
Een goede verdeling van het debiet tussen de verschillende uitstroomopeningen wordt bekomen door een tussenmuur in de uitstroomconstructie. Deze tussenmuur zorgt ervoor dat de stroomsnelheid wordt omgezet in druk. Hierdoor wordt de aansturing van de stroming over de tussenmuren en dus debietverdeling verschoven van stroomsnelheid naar druk. Een verdere optimalisatie van de uitstroming wordt bekomen door de hoogte van de tussenmuren te laten toenemen naar het einde van de uitstroomconstructie toe. Voor de hoogte van de tussenmuur wordt vergeleken met de Zandvlietluis, de Berendrechtsluis, de Kieldrechtsluis en de SHIP sluis. Bemerkt dat in de uitstroomconstructies voor al deze sluizen twee verschillende hoogtes voor de tussenmuur gehanteerd worden. De overgang tussen de eerste en de tweede reeks valt bij een gelijk aantal openingen in de helft en bij een ongelijk aantal openingen op de eerste opening na de centraal gelegen opening. Als eerste inschatting wordt voorgesteld om de relatieve hoogte van de tussenmuren van de Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis te hanteren. Hieruit volgt voor de nieuwe sluis Zeebrugge een hoogte 4.00 m voor de eerste openingen en een hoogte 4.40 m voor de tweede reeks openingen. Voor de hoek van het plafond wordt een helling 35° voorgesteld. Dit is flauwer dan in de Zandvlietluis, de Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis.

Tabel 20 – Vergelijking hoogte tussenmuur en hoek plafond uitstroomconstructie

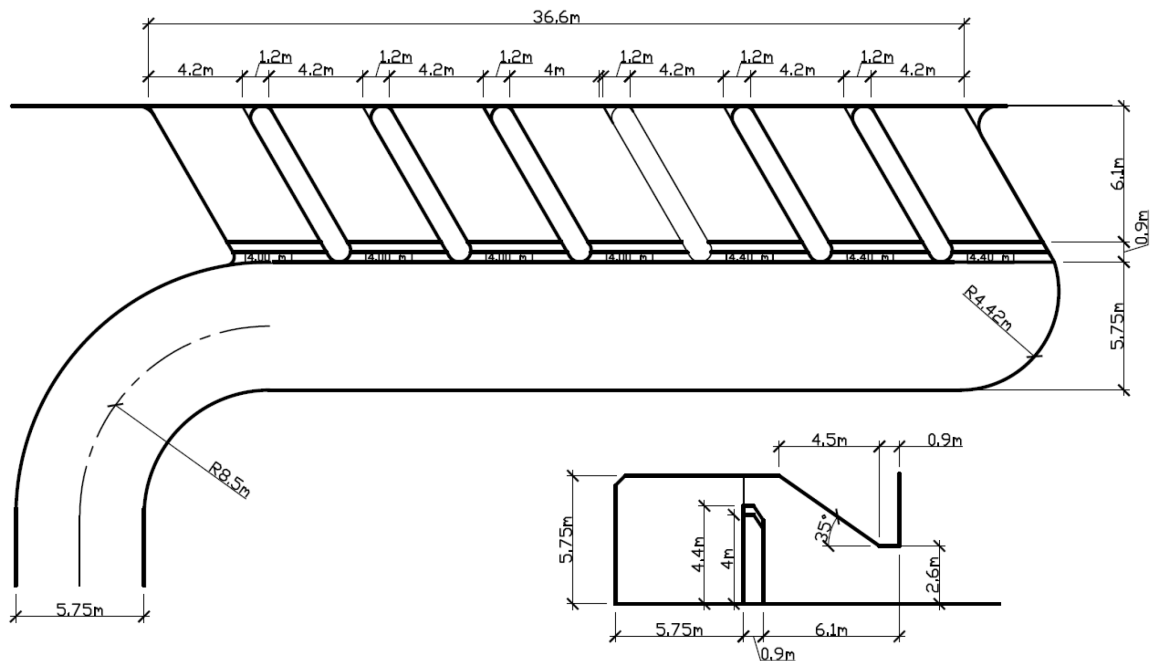
	openingen	hoogte tussenmuur	hoogte riool	relatieve hoogte	hoek plafond
Zandvlietluis	opwaarts	4.42	6.50	0.68	47
	afwaarts	4.75	6.50	0.73	47
Berendrecht- en Kieldrechtsluis	opwaarts	4.90	7.00	0.70	40
	afwaarts	5.40	7.00	0.77	40
SHIP	opwaarts	2.65	4.00	0.66	33
	afwaarts	3.05	4.00	0.76	33
Nieuwe sluis Zeebrugge	opwaarts	4.00	5.75	0.70	35
	afwaarts	4.40	5.75	0.77	35

De geometrie van de hieruit volgende uitstroomconstructie voor de nieuwe sluis Zeebrugge wordt voorgesteld in Figuur 14. Bemerkt dat de schoepen van de uitstroomconstructie een hoek van 60° hebben. Dit is analoog met de overige uitstroomconstructies. Uit de uitgevoerde CFD simulaties in kader van het ontwerp van de Royerssluis en de SHIP sluis volgt dat de uitstroming niet volgens deze schoepen gericht is maar loodrecht op de kolk als gericht is.

variant met 6 openingen



variant met 7 openingen



Figuur 14 – Voorstelling uitstroombouwconstructie nieuwe sluis Zeebrugge

In de hydraulische modellen van de Zandvlietsluis, Berendrechtsluis en Kieldrechtsluis werden de verliezen van de uitstroombouwconstructie gebruikt als kalibratieparameter. De kalibratie van de modellen van de Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis is uitgevoerd aan de hand van opgemeten éénzijdige nivellerings. Op deze wijze is het mogelijk om de uitstroombouwconstructie van de lange en van de korte omloopriool afzonderlijk te kalibreren. Voor de Zandvlietsluis zijn dergelijke éénzijdige nivellerings niet beschikbaar. Tabel 21 geeft de verliescoëfficiënten van de uitstroombouwconstructie volgend uit de afregeling van de modellen van de Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis.

Tabel 21 – Verliezen uitstroomconstructie Berendrecht en Kieldrechtsluis

	korte omloopriool			lange omloopriool		
	Berendrecht sluis	Kieldrecht sluis 2017	Kieldrecht sluis 2019	Berendrecht sluis	Kieldrecht sluis 2017	Kieldrecht sluis 2019
positieve stroomrichting (vullen)	1.7	0.8	1.6	2.6	1.3	2.8
negatieve stroomrichting (ledigen)	3.1	2.7	3.2	2.2	2.2	3.4*

* Op basis van een nivellering met slechts één hefschuif in dienst.
overgenomen uit (J. B. Vercruyse *et al.*, 2019b)

Uit Tabel 21 volgt dat de verliezen van de Kieldrechtsluis zijn toegenomen tussen 2017 en 2019. Een goede overeenkomst wordt gevonden tussen de verliezen voor de Berendrecht sluis en de Kieldrecht sluis op basis van de in 2019 uitgevoerde meting. Dit met uitzondering van de verliescoëfficiënt van de lange omloopriool in de negatieve stroomrichting wat vermoedelijk te verklaren is doordat in de hiervoor gebruikt meting uit 2019 één hefschuif buiten dienst was. Voor deze coëfficiënt wordt wel opgemerkt dat de verliezen volgend uit de kalibratie van het model op metingen uitgevoerd in 2017 overeenkwam met de waarde voor de Berendrecht sluis. Op basis hiervan wordt voorgesteld om voor de hydraulische verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie van de nieuwe sluis de verliezen volgend uit de kalibratie van het hydraulisch netwerkmodel van de Berendrecht sluis over te nemen. De hieruit volgende verliescoëfficiënten in functie van de stroomrichting worden gegeven in Tabel 22.

Tabel 22 – Verliescoëfficiënt uitstroomconstructie nieuwe sluis Zeebrugge

riool	component	positieve stroomrichting	negatieve stroomrichting
korte omloopriool	K12 - sKBO / K12 - sKBE	1.7	3.1
lange omloopriool	K12 - sKBO / K12 - sKBE	2.6	2.2

4.2.9 Kolk

De kolk is opgedeeld in open leiding componenten. De componenten waaruit de kolk is opgebouwd worden gegeven in Tabel 23. De componenten SKBe en SKBo bevinden zich ter plaatse van het midden van de uitstroomconstructie in het benedenhoofd en het bovenhoofd. De componenten SKD1 tot en met SKD4 betreffen de 4 roldeuren de sluis kolk. Deze componenten bevinden zich aan kolkzijde van de respectievelijke roldeur. De component SB respectievelijk SH komt overeen met de boeg respectievelijk het hek van het in de kolk aangemeerd schip.

Tabel 23 – Componenten kolk

component	lengte	sectie	lengte ruimtelijke stap (# stappen)
SKD1- SKD2	24.95	kolk	8.3 m (3)
SKD2- SKBe	31.36	kolk	10.5 m (3)
SKBe- SH	55.69	kolk	11.1 m (5)
SH- SB	258.69	kolk met schip	11.8 m (22)
SKBo-SB	6.31	kolk met schip	6.3 m (1)
SB- SKD3	25.05	kolk	8.4 m (3)
SKD3- SKD4	24.95	kolk	8.3 m (3)

Positie schip op basis van een nivellering via het bovenhoofd

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:

- Δx_{\max} Maximale stap [m]
- Δt Tijdstap 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 – 15.1 m TAW) x 55 m = 830.5 m² [m²]
- B Kolkbreedte = 45 m [m]

$$\Delta x_{\max} = 1 \cdot \sqrt{9.81 \cdot \left(\frac{830.5}{55} \right)} = 12.2 \text{ m}$$

De sectie met het schip wordt gekenmerkt door een reductie van de doorstroomsectie en een toename van de hydraulische omtrek.

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 23485 m². Bij het nivelleren van de kolk met de buitenste roldeuren wordt ook de oppervlakte van de twee binnenste deurenkamers mee genivelleerd en de deurenkamer en het binnenoppervlak van de deur aan de zijde van het laagste peil. De mee te nemen oppervlakken per deurenkamer worden gegeven in Tabel 24. Omwille van de getrapte vorm van de deurenkamer, werd het oppervlak van de deurenkamer bepaald op basis van de lengte en breedte van de deurenkamer ter hoogte van het wateroppervlak (-1.35 m TAW tot 5.0 m TAW; plan EBS (2021)). Het oppervlak van de roldeur wordt bepaald door de breedte van de roldeur in plan EBS (2021) en de kolkbreedte. Bemerkt dat het inwendige oppervlak van de roldeur hierbij verwaarloosd wordt.

Tabel 24 – Mee te nivelleren oppervlak per deurkamer bij gebruik van de uiterste roldeuren [m²]

	Peil voorhaven < peil achterhaven	Peil voorhaven > peil achterhaven
D1	1766.37	0
D2	1221.87	1221.87
D3	1221.87	1221.87
D4	0	1766.37

Nummering deuren oplopend van open getijzone naar achterhaven

4.3 Samenvatting parameters per component

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 25. De bijzondere en algemene ladingsverliezen van de omloopriolen worden samengevat in Tabel 26.

Tabel 25 – Doorstroomsectie omloopriolen

	breedte [m]	hoogte [m]	doorstroomsectie [m ²]	hydraulische diameter [m]
omloopriool	5.75	5.75	33.06	5.75
splitsing t.h.v. hefschuiven	2.88	5.75	16.53	3.83

Tabel 26 – Netwerkmodel omloopriolen bovenhoofd nieuwe sluis Zeebrugge

Bovenhoofd		knoop		type ladingsverlies	Benedenhoofd	
kort	lang	opwaarts	afwaarts		kort	lang
$\xi_{+}=0.73 / \xi_{-}=1.53$	$\xi_{+}=0.55 / \xi_{-}=1.35$	1	2	bijzonder	$\xi_{+}=0.60 / \xi_{-}=1.40$	$\xi_{+}=0.54 / \xi_{-}=1.34$
L = 26.3 m	L = 94.3 m	2	3	algemeen	L = 25.6 m	L = 94.1 m
default LOCKSIM		3	4	bijzonder	default LOCKSIM	
L = 12.5 m	L = 12.0 m	4	5	algemeen	L = 12.2 m	L = 12.0 m
$\xi = 0.18$	$\xi = 0.00$	5	6	bijzonder	$\xi = 0.09$	$\xi = 0.00$
zie Tabel 18		6	7	bijzonder	zie Tabel 18	
$\xi = 0.00$	$\xi = 0.00$	7	8	bijzonder	$\xi = 0.00$	$\xi = 0.00$
L = 12 m	L = 12 m	8	9	algemeen	L = 12 m	L = 12 m
default LOCKSIM		9	10	bijzonder	default LOCKSIM	
L = 41.3 m	L = 105.4 m	10	11	algemeen	L = 41.3 m	L = 105.4 m
$\xi = 0.00$	$\xi = 0.45$	11	12	bijzonder	$\xi = 0.00$	$\xi = 0.45$
$\xi_{+}=1.7 / \xi_{-}=3.1$	$\xi_{+}=2.6 / \xi_{-}=2.2$	12	SKBO/SKBE	bijzonder	$\xi_{+}=1.7 / \xi_{-}=3.1$	$\xi_{+}=2.6 / \xi_{-}=2.2$

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).

5 Numerieke modellering nivellering

De opmaak van het hydraulisch netwerkmodel werd besproken in hoofdstuk 4. Met dit hydraulisch netwerkmodel wordt achtereenvolgens nivelleren, zie paragraaf 5.1, en spuien, zie paragraaf 5.2, gesimuleerd.

5.1 Nivelleren

In deze paragraaf wordt een samenvatting gegeven van de resultaten van de simulaties. In bijlage A wordt per simulatie een figuur gegeven met het kolkpeil, de stijgsnelheid, de openingswet en de langskracht alsook een samenvatting in tabelvorm. Bemerk dat de simulaties beperkt zijn tot de uiterste deurcombinatie en het maatgevend schip zich met de boeg op 50 m van de voor nivelleren gebruikte deur bevindt.

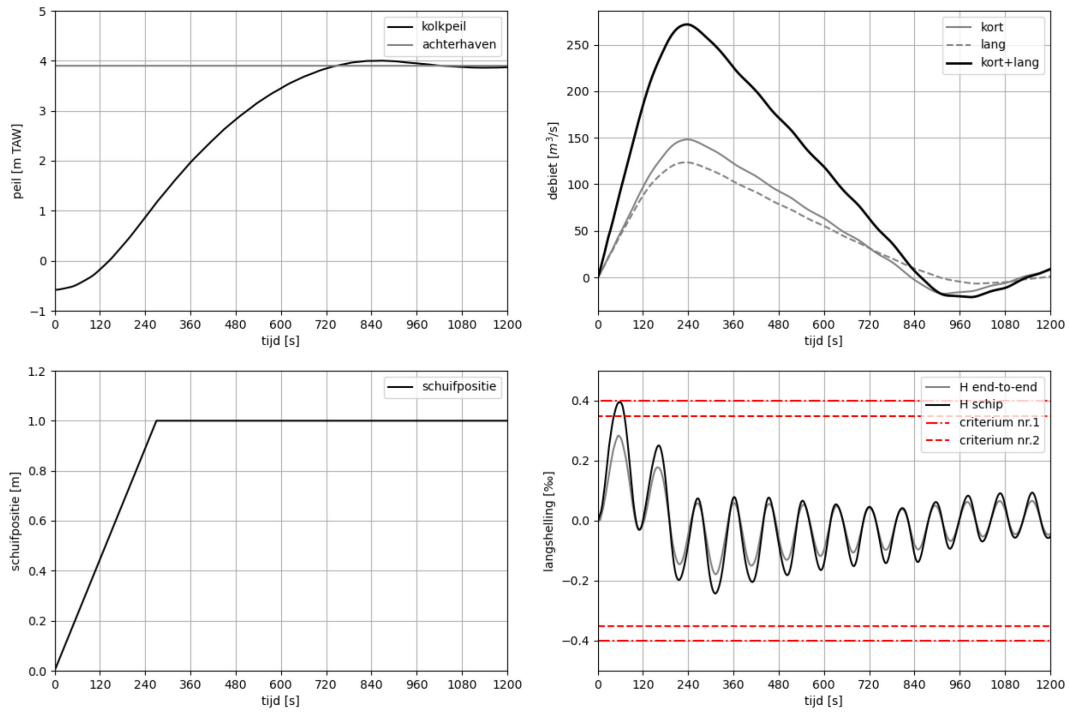
In de randvoorwaarden, zie hoofdstuk 2, wordt zowel een maatgevende peilcombinatie beschouwd voor de langskracht als een maatgevende peilcombinatie voor de nivelleertijd. Omdat het peil in de voorhaven varieert met het getij wordt besloten om naast deze twee peilcombinaties ook een range aan peilen in de voorhaven te simuleren bij het normaal peil in de achterhaven. De voor nivelleren beschouwde peilcombinaties worden samengevat in Tabel 27.

Tabel 27 – Beschouwde peilcombinaties voor nivelleren

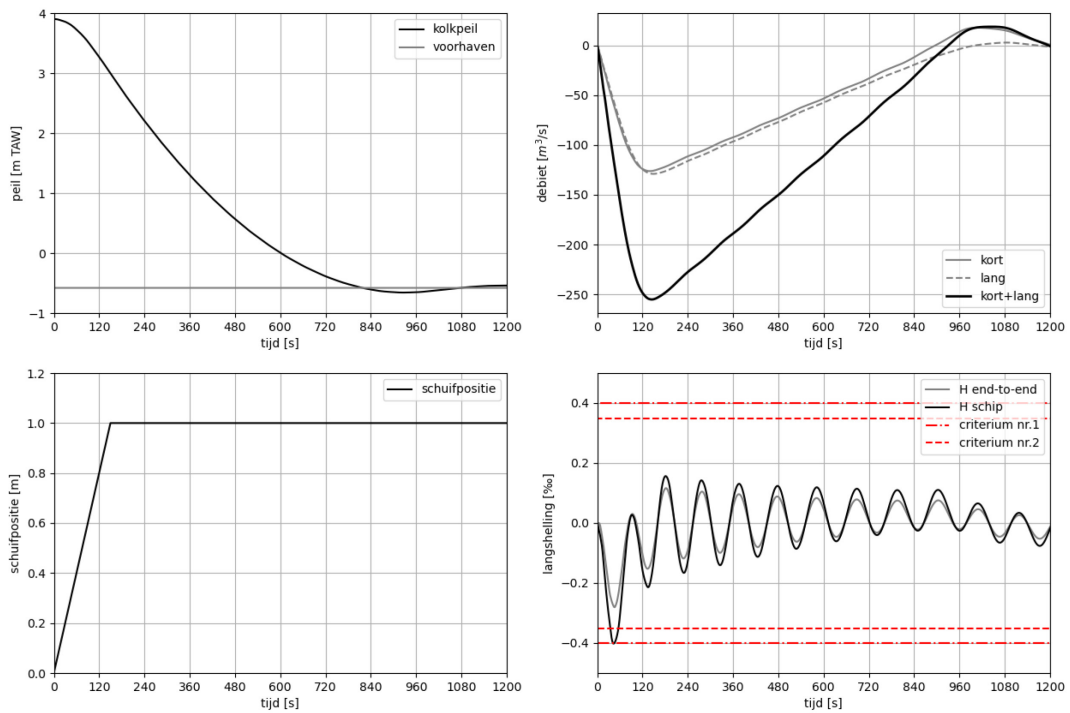
Voorhaven [m TAW]	Dok [m TAW]	Verval [m]	
-0.58	3.90	4.48	Maatgevend peilcombinatie langskracht
0.00	3.40	3.40	Maatgevend peilcombinatie nivelleertijd
1.00	3.40	2.40	
2.00	3.40	1.40	
3.00	3.40	0.40	
4.00	3.40	-0.60	
5.00	3.40	-1.60	
6.00	3.40	-2.60	
7.00	3.40	-3.60	HHW incl. prognose zeespiegelstijging 2125

Obv randvoorwaarden uit Tabel 1 en te beschouwen peilen voorhaven uit Tabel 3

Als eerste wordt een openingswet opgesteld voor het bovenhoofd en een openingswet voor het benedenhoofd. Voor het opstellen van deze openingswetten wordt de maatgevende peilcombinatie voor de langskracht gebruikt waarbij de openingswet zo ingesteld wordt dat het eerste criterium voor de langskracht, i.e. het criterium o.b.v. simulaties in een soortgelijke sluis, niet overschreden wordt. Zie Figuur 15 voor de nivellering met het bovenhoofd en Figuur 16 voor de nivellering met het benedenhoofd. De hieruit volgende openingswetten worden samengevat in Tabel 28.



Figuur 15 – Vullen bovenhoofd bij de voor de langskracht maatgevende peilcombinatie

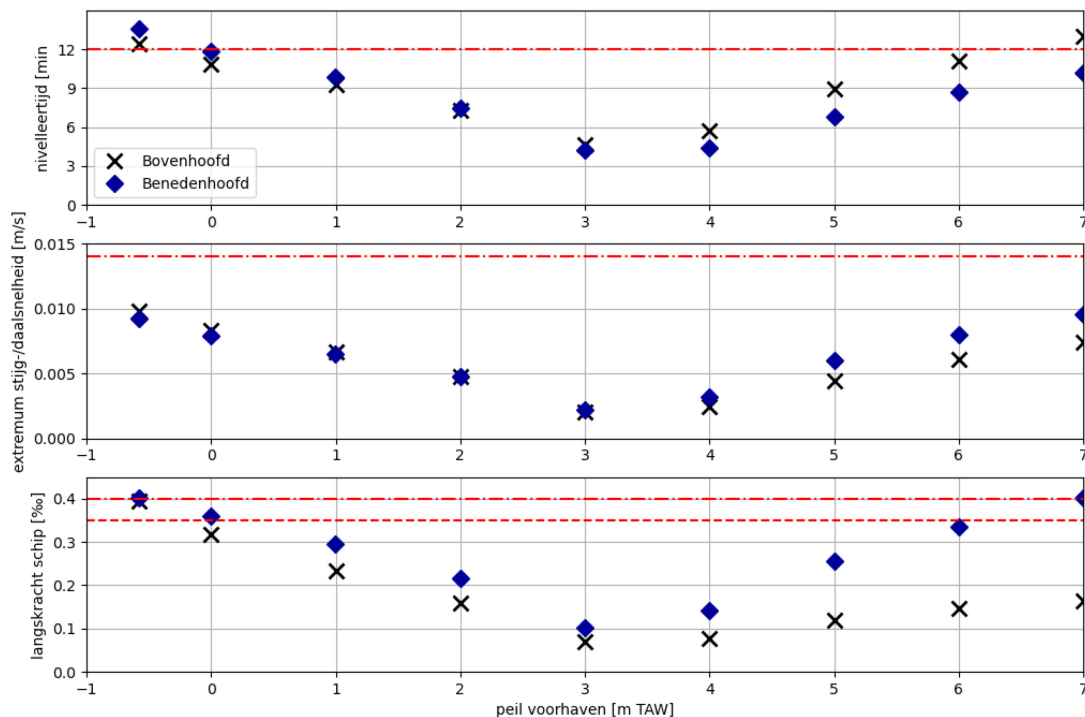


Figuur 16 – Ledigen benedenhoofd bij voor de langskracht de maatgevende peilcombinatie

Tabel 28 – Openingswet

openingswet	hoofd	heftijd [s]	Hefsnelheid [m/s]
O1	Bovenhoofd	270	0.0213
O2	Benedenhoofd	150	0.0383

Met de openingswetten uit Tabel 28 worden de in Tabel 27 opgegeven peilcombinaties gesimuleerd. Hierbij wordt zowel een simulatie uitgevoerd voor nivelleren met het bovenhoofd als een simulatie voor nivelleren met benedenhoofd. Een plot van de uit deze simulaties volgende nivelleertijd, stijgsnelheid van het kolkpeil en extreme waarde van de langshelling van het schip wordt gegeven in Figuur 17.

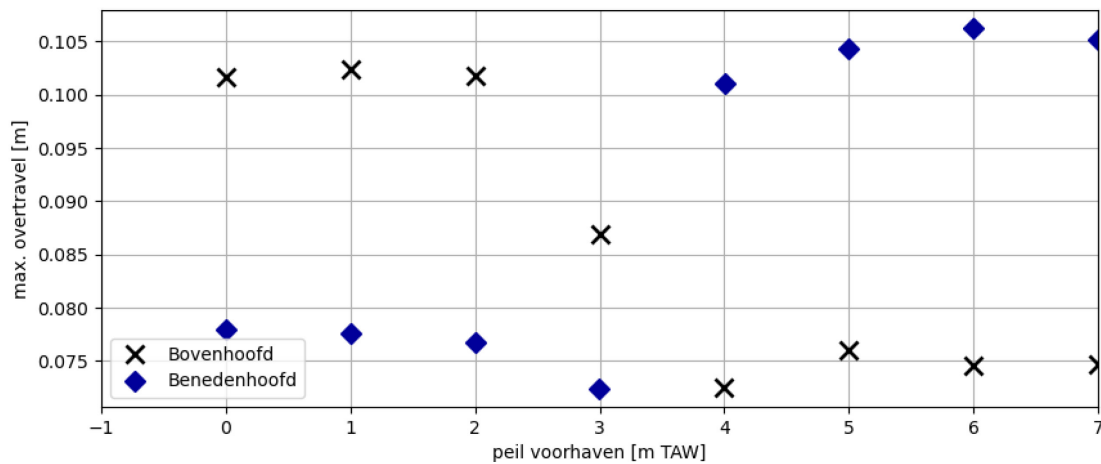


Figuur 17 – Variatie van nivelleertijd, maximale waarde stijgsnelheid en extremum langskracht in functie van peil voorhaven

Uit deze simulaties volgt dat bij de voor nivelleertijd maatgevende peilcombinatie de nivelleertijd niet overschreden wordt. Enkel bij het beschouwde HHW scenario voor 2125 wordt de nivelleertijd beperkt overschreden bij nivelleren met het bovenhoofd. Bij de simulaties waarbij genivelleerd wordt met het benedenhoofd dient wel opgemerkt te worden dat de simulaties uitgevoerd zijn met een constant peil in de voorhaven. In werkelijkheid varieert het peil in de voorhaven met het getij. De peilvariatie tgv het getij zal resulteren in een spreiding op de in Figuur 17 gegeven nivelleertijd. Voor de volledige range aan peilen wordt voldaan aan de opgelegde criteria voor stijgsnelheid en langskracht. Op nivelleren met het benedenhoofd en een peil +7.00 m TAW in de voorhaven na wordt zowel voldaan aan het criterium voor nivelleertijd o.b.v. simulaties van een soortgelijke sluis als aan het criterium voor nivelleertijd o.b.v. metingen.

Door de inertie van het water in de riolen zal op het einde van de nivellering overvulling of overlediging optreden. Het startsignaal openen roldeuren wordt gegeven wanneer deze 'loskomen'. Na het geven van het startsignaal duurt het nog even voor de deuren echt openen. In de Kieldrechtsluis en Berendrechtsluis werd

vastgesteld dat de deuren hierdoor geopend werden met een beperkt restverval. De overtravel volgend uit de simulaties wordt gegeven in Figuur 18. Hieruit volgt een overtravel van ca. 0.105 m bij vullen en ca 0.075 m bij ledigen. Bemerkt dat de simulaties zijn uitgevoerd met een constant peil in de voorhaven. Voor het benedenhoofd zal de peilvariatie de overvulling/overlediging dempen bij een toenemend verval en versterken bij een afnemend verval.



Figuur 18 – Overvulling/overlediging in functie van peil voorhaven

5.2 Spuien

Om de achterhaven op peil te houden wordt gespuid vanuit de voorhaven naar de achterhaven. Aangenomen wordt dat gespuid wordt doorheen één hoofd waarbij de deuren van het niet gebruikte hoofd geopend zijn. Zowel het bovenhoofd als het benedenhoofd worden beschouwd. Op basis van het in hoofdstuk 4 opgemaakt hydraulisch netwerkmodel van het nivelleersysteem worden de globale afvoercoëfficiënt en de globale verliescoëfficiënt bepaald. Hiervoor wordt één simulaties uitgevoerd met waterpeil in de voorhaven gelijk aan +5.70 m TAW en het waterpeil in de achterhaven gelijk aan +3.40 m TAW). Om de vervalonafhankelijk te bevestigen wordt voor het scenario met alle schuiven geopend nog een tweede simulatie uitgevoerd met een beperkt verval, namelijk een waterpeil in de voorhaven gelijk aan +3.70 m TAW en een waterpeil in de achterhaven gelijk aan +3.40 m TAW). Door middel van volgende vergelijkingen wordt uit de resultaten van de simulaties een globale hydraulische afvoercoëfficiënt μ_{glob} en een globale verliescoëfficiënt ξ_{glob} bepaald:

$$Q = \mu_{glob} \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$$

$$\Delta H = \xi_{glob} \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{A^2}$$

$$\xi_{glob} = \frac{1}{\mu_{glob}^2}$$

Met

- Q Debiet [m³/s]
- ΔH Verval (2.3 m of 0.3 m) [m]
- A Doorstroomsectie geopende schuiven (n schuiven * sectie 1 schuif) [m²]
- g Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s² [m/s²]
- μ_{glob} Globale afvoercoëfficiënt [-]
- ξ_{glob} Globale verliescoëfficiënt [-]

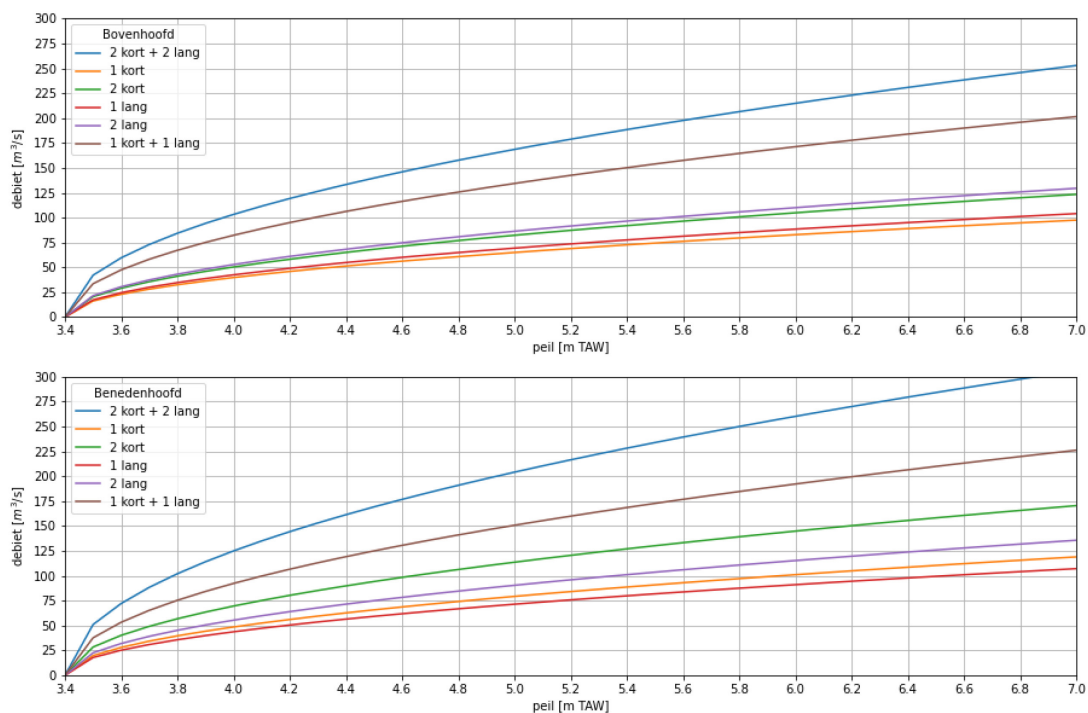
De aan de hand van bovenstaande vergelijking bepaalde globale afvoercoëfficiënt en de globale verliescoëfficiënt wordt gegeven in Tabel 29. Bemerkt hierin dat, voor de voorkomende range, het verval geen invloed heeft op de globale afvoer- en verliescoëfficiënt. De globale verliezen bij alle schuiven in werking liggen in lijn met de verliezen bij de simulaties met twee schuiven in een zelfde riool geopend. Wanneer gespuid wordt met één schuif per riool geopend neemt de afvoercoëfficiënt toe en de verliescoëfficiënt af. Dit wordt verklaard doordat de verliezen bepaald worden op basis van de geopende hefschuifsectie.

Tabel 29 – Afvoer en verliescoëfficiënt voor spuien met het nivelleersysteem

Peil voorhaven		verval [m]	schuiven	Globale afvoercoëfficiënt μ		Globale verliescoëfficiënt ξ	
Voorhaven [m TAW]	Achterhaven [m TAW]			Bovenhoofd	Benedenhoofd	Bovenhoofd	Benedenhoofd
5.7	3.4	2.3	2 kort + 2 lang	0.46	0.55	4.83	3.29
3.7	3.4	0.3	2 kort + 2 lang	0.45	0.55	4.83	3.29
5.7	3.4	2.3	1 kort	0.70	0.86	2.03	1.36
5.7	3.4	2.3	2 kort	0.44	0.61	5.07	2.65
5.7	3.4	2.3	1 lang	0.75	0.77	1.78	1.68
5.7	3.4	2.3	2 lang	0.47	0.49	4.61	4.19
5.7	3.4	2.3	1 kort + 1 lang	0.73	0.81	1.90	1.51

bij geopende deuren in het niet voor spuien ingezette hoofd

Gebruik makend van de in Tabel 29 gegeven globale afvoercoëfficiënten kan het debiet in functie van het verval bepaald worden. Figuur 19 geeft het debiet in functie van het peil in de voorhaven voor het benedenhoofd en bovenhoofd. Bemerkt dat voor de leesbaarheid deze figuur opgesteld werd ten opzichte van een peil 3.40 m TAW in de achterhaven maar dat het debiet gestuurd wordt door het verval.



Figuur 19 – Spuidebiet in functie van peil voorhaven in functie van gebruikte schuifcombinatie

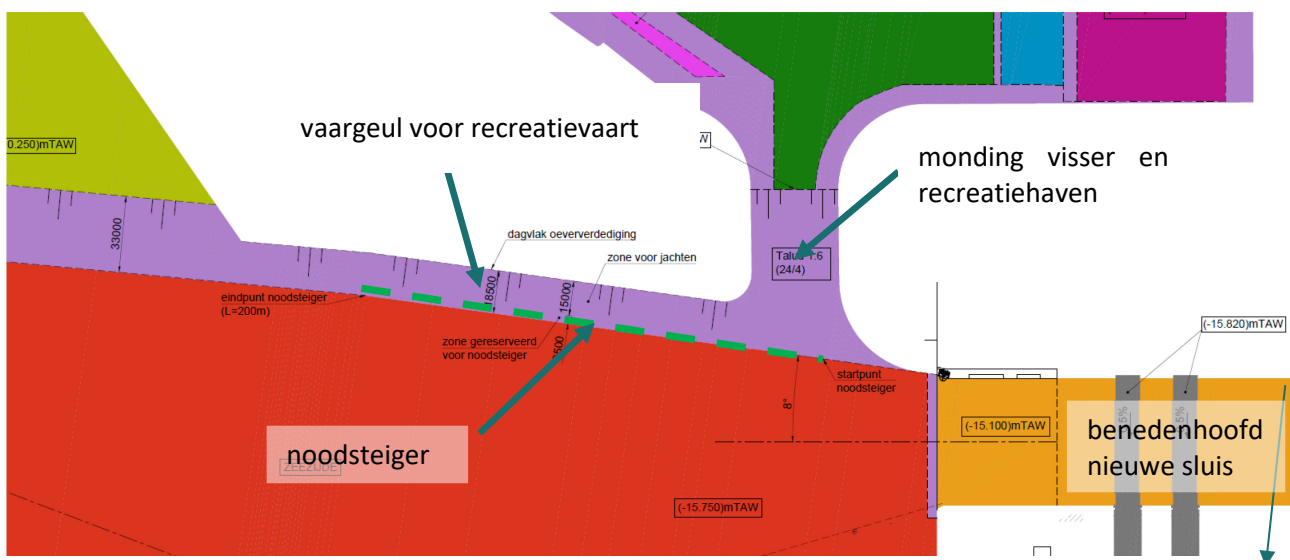
Doordat de verliezen van de in- en uitlaat richtingsafhankelijk zijn is het debiet doorheen het bovenhoofd- en het debiet doorheen het benedenhoofd verschillend. Het grootste debiet treedt op bij spuien doorheen het benedenhoofd. Het gewenste debiet kan gestuurd worden door de keuze van het aantal geopende schuiven. Bij een gemiddeld hoogwater, i.e. +4.20 m TAW, wordt voor het bovenhoofd een debiet 50 m³/s bekomen bij één schuif geopend en een debiet 144 m³/s bij vier schuiven geopend.

Om na te gaan of het nivelleersysteem voldoende performant is om te spuien wordt aanbevolen om een balanssimulatie uit te voeren van het schutverlies en spuivolume over een springtij-doodtijcyclus. Voor de bepaling van het schutverlies en de onderbrekingsduur van spuien ten voordele van nivelleren kan als eerste aanname gekeken worden naar de huidige trafiek doorheen de Vandammesluis. Uit de balanssimulatie volgt het peil in de achterhaven voorafgaand elk spuivenster. Wanneer het peil in de achterhaven de opgelegde grenswaarde onderschrijft is, voor de beschouwde combinatie van getijcyclus, schutverlies en onderbrekingsduur van spuien, het nivelleersysteem niet voldoende performant om de achterhaven op peil te houden.

De sedimentmigratie tijdens spuien dient nog onderzocht te worden, zie paragraaf 4.2.3. Bij spuien met het nivelleersysteem zal het water lager in de waterkolom aangezogen worden dan bij de spuikoker langsheen de Vandammesluis. Op basis van de verwachte sedimentconcentratieprofielen kan gekozen worden om te spuien met het benedenhoofd of het bovenhoofd alsook kan de positie van de inlaat van het benedenhoofd in hoogte mogelijks nog geoptimaliseerd worden.

6 Stromingspatroon voorhaven tgv nivellieren

Het benedenhoofd van de nieuwe sluis te Zeebrugge bevindt zich juist opwaarts van de ingang van de jachthaven. De bij aanvang van de CFD simulaties actuele geometrie van de kaaimuren ter hoogte van het benedenhoofd van de nieuwe sluis en de monding van de vissers- en recreatiehaven wordt gegeven in Figuur 20. Aan de zijde van de ingang van de vissers- en recreatiehaven toont het plan een noodsteiger. Deze noodsteiger heeft een lengte 200 m en overlapt de ingang van de vissers- en recreatiehaven. Tussen de noodsteiger en de kaaimuur wordt een afzonderlijke vaargeul voor jachten voorzien. Bij nivellieren van de nieuwe sluis via het benedenhoofd zal zich een stromingspatroon ontwikkelen in de nabijheid van het benedenhoofd. Dit stromingspatroon kan potentieel hinderlijk zijn voor vaartuigen van of naar de vissers- en recreatiehaven alsook voor aangemeerde schepen aan de noodsteiger. Doordat bij ledigen de dissipatie van de stroming in de voorhaven gebeurt, wordt ledigen als nadeliger beschouwd dan vullen. Het stromingspatroon in de voorhaven ten gevolge van het ledigen van de sluis via het benedenhoofd wordt hierom gesimuleerd aan de hand van een Computational Fluid Dynamics (CFD). Deze CFD simulatie werd uitgevoerd door het studiebureau IMDC in opdracht van aMT. De resultaten van deze CFD simulatie zijn opgeleverd in het rapport Moretti et al. (2021). In dit hoofdstuk wordt op basis van de resultaten uit dit rapport een evaluatie uitgevoerd van de dissipatie van de uitstroming en vervolgens van de potentiële invloed van het stromingspatroon op scheepvaart.



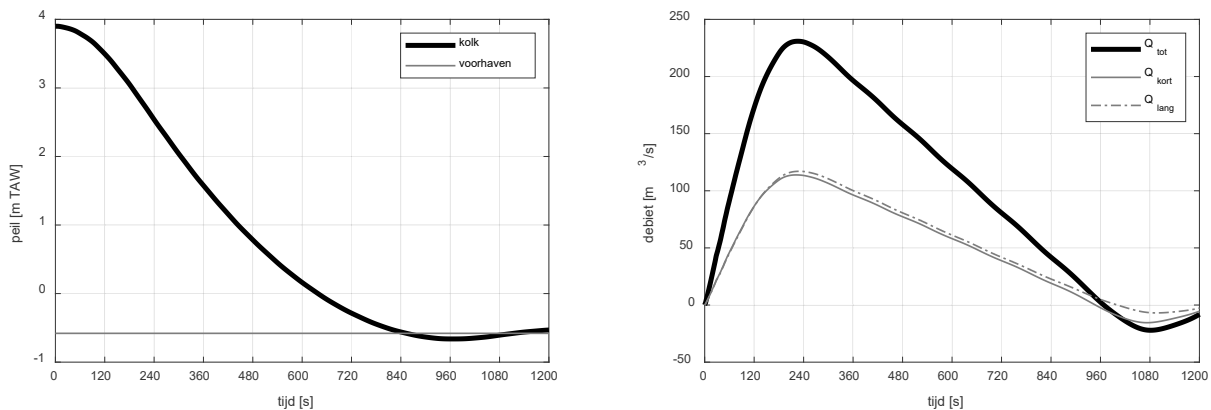
(Expertise Beton en Staal, 2020)

Figuur 20 – Inrichtingsplan voorhaven met bodemdieptes versie dd. 16/12/2020

6.1 Uitgevoerde simulatie

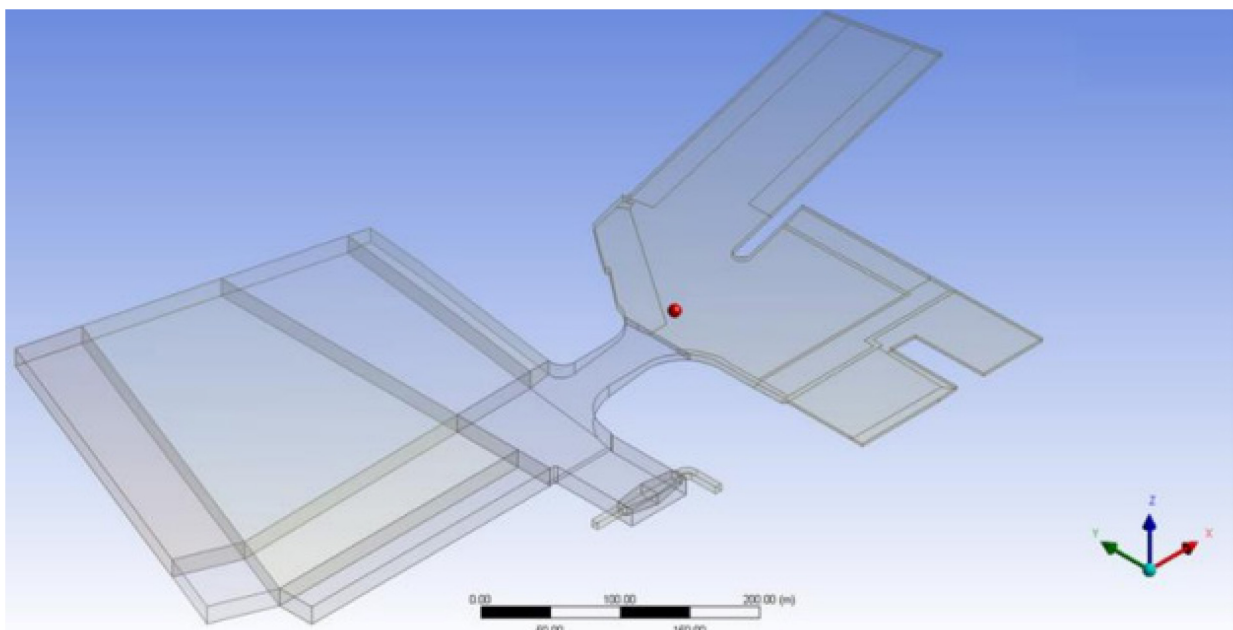
De CFD-simulatie werd uitgevoerd in transient mode. De totale gesimuleerde tijd is 640 s, startend van het moment van openen van de hefschuiten. Het leidingsysteem van de omloopriolen werd beperkt en als randvoorwaarde in de riolen wordt het verloop van het debiet in de tijd opgelegd. Hiervoor wordt de in paragraaf 3.2 beschreven simulatie R1_sim003_G1_BE_P1_O2 gebruikt. Dit betrof een simulatie met het voor nivellieren maximaal peil in de achterhaven (+3.90 m TAW) gecombineerd met het voor nivellieren minimaal peil in de voorhaven (-0.60 m TAW). Het verloop van het kolkpeil in de tijd en de variatie in de tijd

van de uitstroomdebieten uit de korte en lange omloopriool worden voor deze simulatie gegeven in Figuur 21.



Figuur 21 – Opgelegde debieten CFD modellering

Een illustratie van het modeldomein wordt gegeven in Figuur 22. Het CFD model werd vereenvoudigd doordat geen rekening gehouden wordt met stroming ten gevolge van getij. Ook wordt een rigid-lid methodiek toegepast waarbij het wateroppervlak in de voorhaven vastgelegd wordt op -0.60 m TAW. Bij de rigid-lid methodiek is er geen vrij wateroppervlak en worden golven voorgesteld als kleine drukvariaties ten opzichte van het bovenzvlak, dat overeenstemt met het gemiddeld waterpeil. Deze aanpak is toelaatbaar bij golven met een grote periode en een kleine amplitude, meer precies, wanneer het Froude nummer van het golf front kleiner of gelijk is dan 0.10. Voor meer details wordt verwezen naar Moretti *et al.*, (2021).



Figuur 22 – Domein CFD model

Op moment van uitvoeren van de CFD simulaties was de positie van de inlaten in hoogte nog niet bepaald. Een hoge positionering wordt nadeliger beschouwd omwille van de beperkte diepgang van recreatievaartuigen en omdat de spreiding hierbij enkel naar de bodem toe kan gebeuren. Om die reden

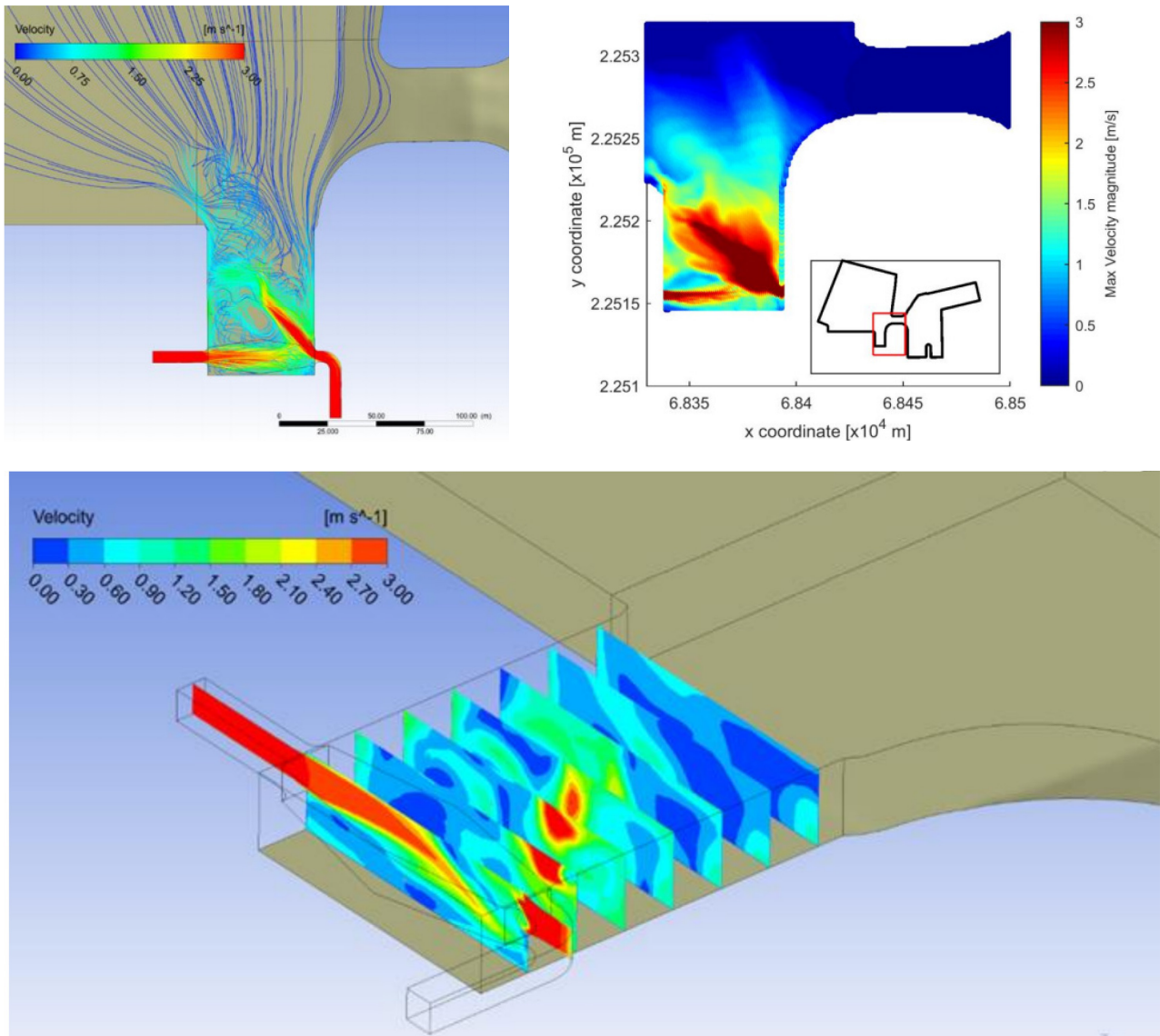
wordt voor de simulaties het bodempeil van de inlaten op -7.25 m TAW geplaatst. Voor de geometrie werd door WL enkel een planzicht overgemaakt. De riolen in het CFD model werden hierop horizontaal uitgetekend terwijl in realiteit een bodemverlaging toegepast zal worden na de inlaat. De helling van de riool ten gevolge van deze bodemverlaging zal enige invloed hebben op de uitstroming. Maar voor het doel van deze CFD simulatie, bepalen of het door het ledigen van de sluis opgewekte stromingspatroon in de voorhaven potentieel hinderlijk is, wordt dit niet bepalend geacht.

6.2 Bespreking resultaten

De dissipatie van de uitstroming bij ledigen wordt besproken in paragraaf 6.2.1. De nautische evaluatie van de mogelijke impact op schepen wordt vervolgens behandeld in paragraaf 6.2.2. Bemerkt dat hiervoor een aantal illustraties uit het door IMDC opgeleverde rapport (Moretti *et al.*, 2021) worden gebruikt. Voor de volledige resultaten wordt verwezen naar het rapport van IMDC.

6.2.1 Dissipatie stroming uit nivelleeropeningen

De inlaten van de lange en korte omloopriolen zijn tegenover elkaar geplaatst en loodrecht op de kolk-as gericht, met als doel dissipatie te verkrijgen door het op elkaar botsen van de twee uitgaande stromingen. Figuur 23 geeft een voorstelling van de stromingslijnen en de maximale snelheden nabij het oppervlak. Uit deze figuur volgt dat dit niet volledig succesvol is. Omwille van de onmiddellijke overgang naar een 90° bocht na de inlaat doet zich een uitstroming uit de korte omloopriool onder een hoek voor. Bij de lange omloopriool doet de uitstroming zich wel loodrecht op de kolk-as voor en buigt de stroming af naar de bodem na circa een halve kolkbreedte. Deze asymmetrie wordt nog versterkt doordat de grotere dwarsgerichte impuls van de stroming uit de lange omloopriool de uitstroming uit de korte omloopriool verder afbuigt. Uit de plots gegeven in Figuur 23 volgt dat dit resulteert in een niet optimale dissipatie en dus een hogere stroomsnelheid naar de voorhaven toe.



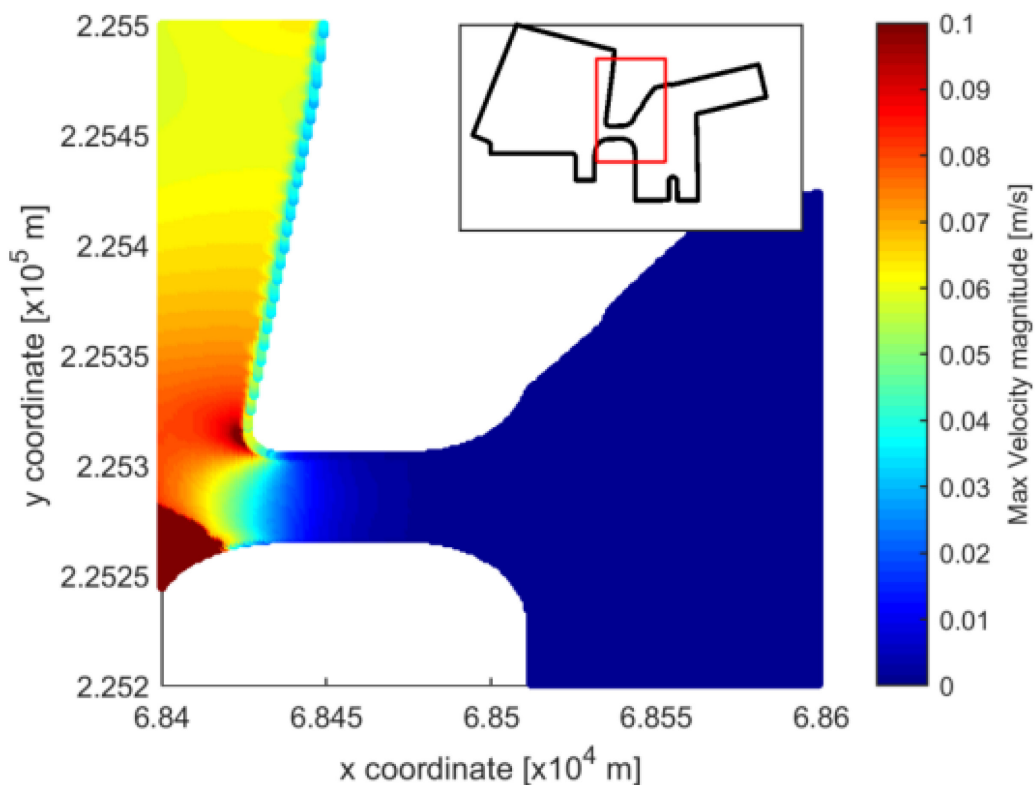
linksboven: stroomlijnen op 240 s
 rechtsboven: maximale snelheid over 5 horizontale vlakken met tussenafstand 0.5 m startend vanaf het wateroppervlak over volledige looptijd simulatie
 onder: dwarsneden met stroomsnelheid op 240 s

Figuur 23 – Stromingspatroon bij uitstroming volgens uit de CFD modelering

Bemerk hierbij dat een soortgelijk stromingspatroon ook verwacht wordt voor de andere sluisen met een soortgelijk nivelleersysteem. In paragraaf 4.2.3 werd een analyse uitgevoerd van de bathymetriemetingen in het bovenhoofd van de Zandvliet- en de Boudewijnsuis. De inlaten van deze sluisen bevinden zich dicht bij de bodem. Uit de bathymetriemetingen volgt dat aan de zijde van de korte omloopriool het erosiepatroon schuin naar de voorhaven toe gericht is, terwijl voor de lange omloopriool het erosiepatroon symmetrisch ten opzichte van de as van de inlaat gericht is. Dit toont aan dat ook voor de Antwerpse zeesluisen de dissipatie bij ledigen vanuit hydraulisch oogpunt niet optimaal verloopt. Navraag bij Havenbedrijf Antwerpen leert dat hier in praktijk geen problemen mee gesignaleerd worden.

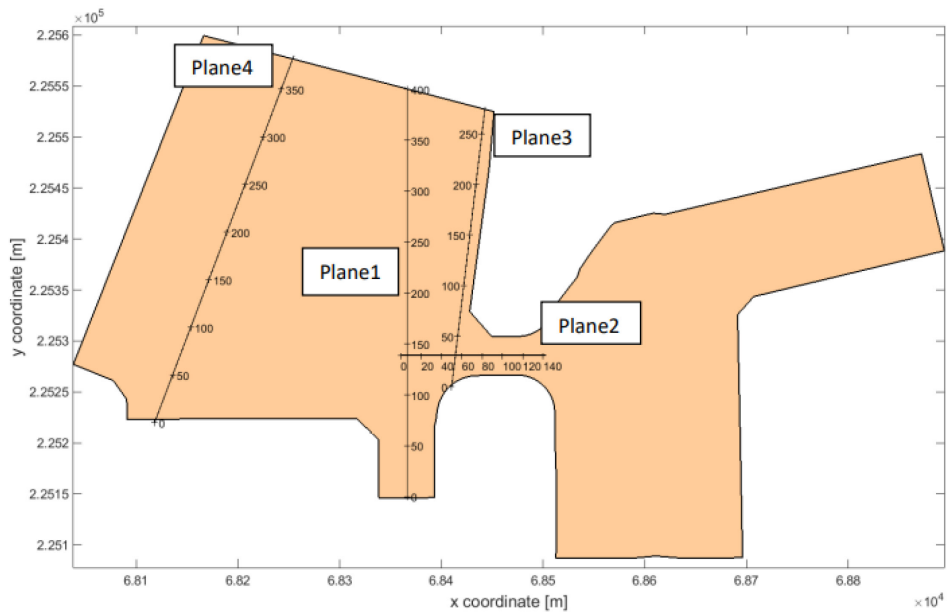
6.2.2 Invloed uitstroming op scheepvaart

Als eerste wordt gekeken naar de maximale snelheid nabij het oppervlak ter hoogte van de ingang van de vissers- en recreatiehaven over de volledig duur van de simulatie (640 s). Hiervoor werd de maximale snelheid tijdens de looptijd van de simulatie bepaald over 5 horizontale vlakken (op het oppervlak en 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m en 2.0 m onder het oppervlak), zie Figuur 24. Uit deze figuur volgt dat de maximale stroomsnelheden in de monding van de jachthaven ten gevolge van het ledigen van de sluis minimaal zijn. Nabij de overgang naar de sluis worden snelheden hoger dan 0.1 m/s opgemerkt alsook in de overstaande hoek worden lokaal snelheden boven 0.1 m/s opgemerkt. Hiertussen is er een ruime zone waarin de snelheid onder de 0.1 m/s blijft.



Figuur 24 – Maximum snelheid tijdens duur simulatie op 5 vlakken liggend tussen het oppervlak en 2.0 m onder het oppervlak

Een tweede analyse wordt uitgevoerd aan de hand van de diepgangsgemiddelde langs- en dwarsnelheid in functie van de tijd voor een aantal lijntrajecten, zie Figuur 25. Op deze trajecten wordt de dieptegemiddelde langs- en dwarsnelheid in functie van de tijd uitgezet. Trajecten 1 en 4 worden opgesteld voor zeeschepen en trajecten 2 en 3 worden opgesteld voor recreatievaartuigen. De gemiddelde snelheid wordt hierbij bepaald over een diepte 10 m overeenkomstig de diepgang van het ontwerpschip voor de sluis en over een diepte 1 m en 2 m voor recreatievaartuigen.



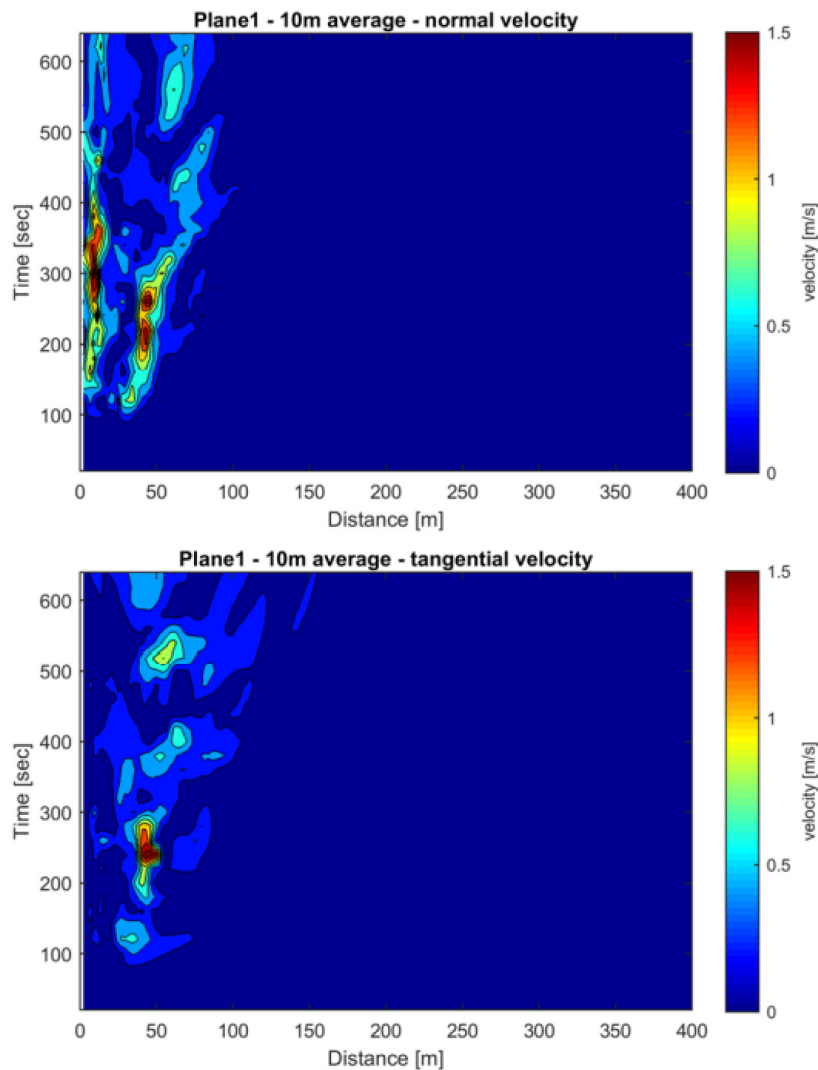
traject 1 en traject 4: zeeschepen (dieptegemiddeld over 10 m)

traject 2 en traject 3: vissers en recreatievaartuigen (dieptegemiddeld over 1 m en 2 m)

Figuur 25 – Trajecten voor analyse dieptegemiddelde snelheid

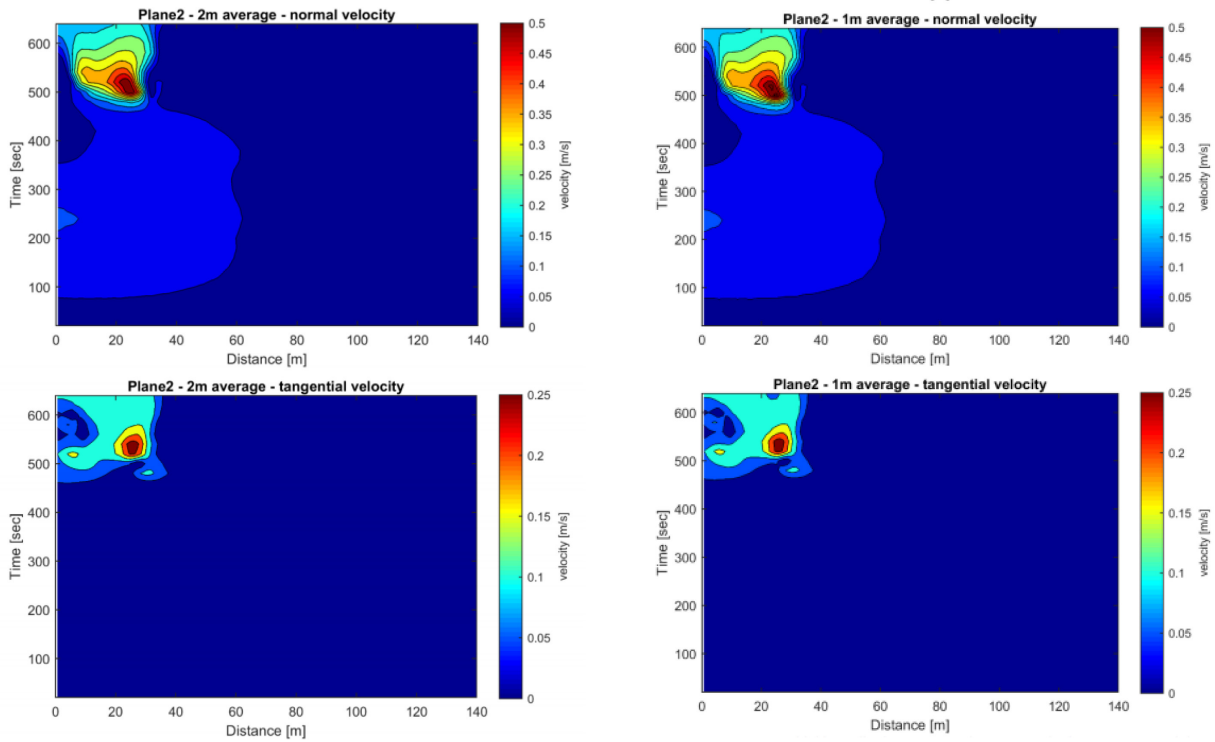
De volledige set resultaten wordt gegeven in Moretti *et al.* (2021). Omdat de snelheden in traject 4 verwaarloosbaar zijn worden deze niet verder besproken in deze paragraaf

De dieptegemiddelde langs- en dwarsnelheid voor traject 1 wordt gegeven in Figuur 27. Traject 1 betreft het naar de voorhaven toe verlengde van de kolk-as. Bemerkt hierbij dat enkel voor de eerste 50 m, gemeten vanaf de roldeur, periodes met lokaal een hogere snelheid, tot 1.5 m/s, voorkomen. Aangezien tijdens ledigen niet ingevaren kan worden en omdat de noodsteiger pas op ca. 130 m ten opzichte van de roldeur begint wordt dit niet als een probleem beschouwd. Bovendien dient opgemerkt dat de noodsteiger enkel voorzien is bij calamiteiten en geen dienst doet als wachtsteiger tot de sluis. Tijdens het nivelleerproces is de aanwezigheid van een zeeschip op korte afstand van de sluis (stel 200 m van de roldeuren) dus uitzonderlijk.



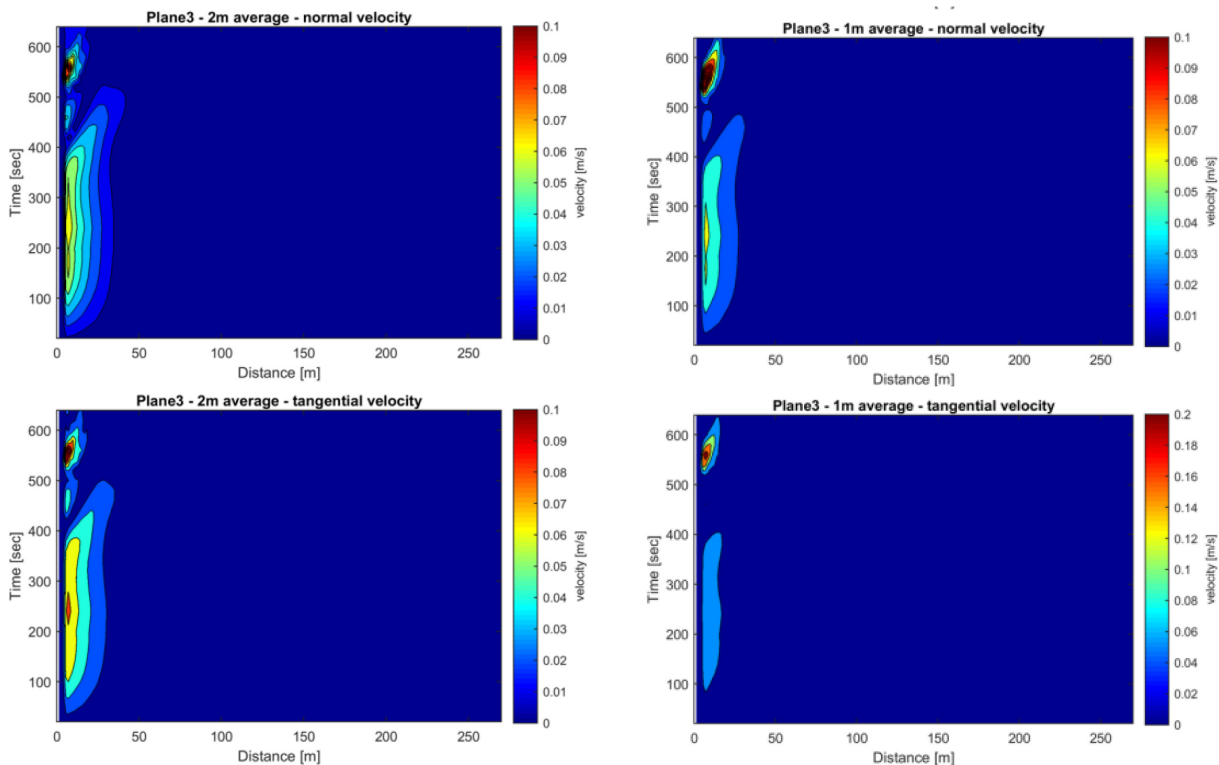
Figuur 26 – Traject 1 over een diepte 10 m gemiddelde langs- en dwarsnelheid in functie van de tijd

De dieptegemiddelde langs- en dwarsnelheid voor traject 2 wordt gegeven in Figuur 27. Traject 2 betreft de aslijn doorheen de monding van de jachthaven. In deze figuur worden op ca. 8 min in het verlengde van de kolkmuur hoge van de sluis weggerichte snelheden met een maximum tot 0.5 m/s opgemerkt. Hierbij treedt ook een snelheid tot 0.25 m/s op gericht volgens de aslijn van de monding. De maximum snelheid in de langsrichting (volgens de aslijn van de monding) doet zich op een iets later tijdstip voor dan de maximum snelheid in de dwarsrichting (volgens de aslijn van de sluis). Bemerkt dat een snelheid 0.5 m/s hoger is dan het in Richtlijnen Vaarwegen (Koedijk, 2020) gehanteerde criterium van 0.3 m/s voor de maximale zijstrooming op een recreatievaartuig in een doorgaand kanaal.



Figuur 27 – Traject 2 over een diepte 2 m gemiddelde langs- en dwarsnelheid in functie van de tijd .

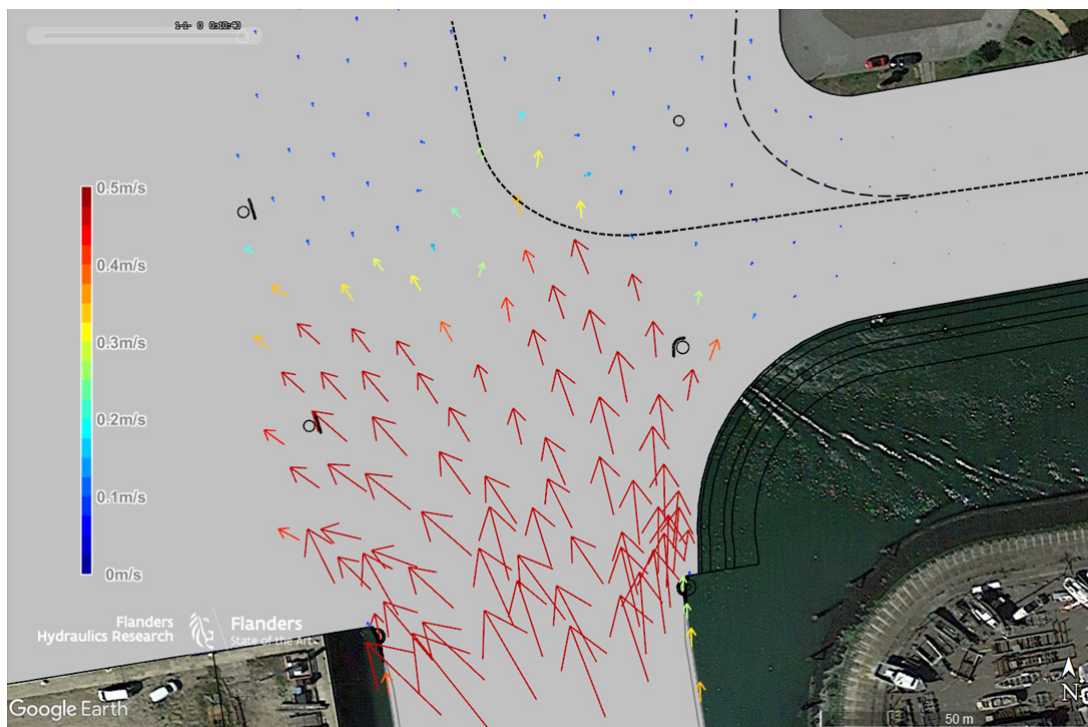
De dieptegemiddelde langs- en dwarsnelheid voor traject 3 wordt gegeven in Figuur 27. Traject 3 betreft de scheidingslijn tussen de noodsteiger en de vaargeul voor recreatievaart. Over de eerste ca. 80 m overspant traject 3 de inlaat naar de vissers- en recreatiehaven. Uit de resultaten valt op dat de snelheid in langsrichting en dwarsrichting ten opzichte van traject 1 beperkt is tot ca. 0.1 m/s en dat deze hogere snelheden beperkt zijn tot de eerste tientallen meters en hierdoor geen hinder vormen voor scheepvaart die vanuit de voorhaven de vissers- en recreatiehaven in- en uitvaren.



Figuur 28 – Traject 3 over een diepte 2 m gemiddelde langs- en dwarsnelheid in functie van de tijd.

Voor een meer gedetailleerd inzicht in de mogelijke hinder voor de jachthaven door de nivelleerstroming van de sluis, werden via IMDC vectorvelden bekomen voor vijf horizontale vlakken variërend tussen het wateroppervlak en een waterdiepte gelijk aan 2 m. Deze vectorvelden werden door WL geprojecteerd op een visualisatie-grid. Figuur 29 biedt een samenvatting van deze verwerking, waarin voor elk punt van het visualisatie-grid de grootste stroomvector weergegeven wordt die tijdens de simulatieduur (640 s) berekend werd. De stroomvector werd hierbij gedefinieerd als de gemiddelde waarde over de hoogte waarvoor gegevens beschikbaar gesteld werden (d.i. 2 m) en wordt gedefinieerd in m/s (1 m/s = 1.94 kn).

Het vectorveld weergegeven in Figuur 29 kan met andere woorden beschouwd worden als de maximale stroomsnelheid die op elke locatie verwacht kan worden door het nivelleren van de sluis. Deze figuur illustreert een snelle afname van de stroomsnelheden ter hoogte van de monding van de jachthaven. Wanneer de stroomsnelheden geëvalueerd worden op de verwachte vaarpaden van de pleziervaart, dan blijken de stroomsnelheden voor een noordelijk traject aan de oostzijde van de noodsteiger (d.i. het zogenaamde fietspad) beperkt te blijven tot waarden kleiner dan 0.1 m/s. Deze waarden liggen ruimschoots onder het stroomcriterium (0.3 m/s) uit Richtlijnen Vaarwegen (Koedijk, 2020). In afwezigheid van zeevaart, kan de pleziervaart ook gebruik maken van de voorhaven van de sluis (vaartraject ten westen van de noodsteiger). Op deze locatie blijken ten gevolge van sluisnivellering stroomsnelheden tot 0.5 m/s te kunnen optreden (zie ook Figuur 27). Deze stroomsnelheden nemen echter snel af in noordelijke richting. Hoewel deze stroomsnelheden het criterium uit Richtlijnen Vaarwegen (Koedijk, 2020) overschrijden, worden de stroomsnelheden op deze locatie aanvaardbaar geacht wegens de grote manoeuvreerruimte die de voorhaven faciliteert voor pleziervaart in combinatie met de snelle reductie van de stroomsnelheden in noordelijke richting. Op basis van de uitgevoerde berekeningen wordt geen nadelig effect verwacht van de stroming door nivelleren op de toegankelijkheid van de jachthaven.



Figuur 29 – Vectorplot van de 2 m-dieptegemiddelde stroomsnelheden (maximum gedurende de volledige simulatietijd)

6.3 Conclusies

Het door middel van CFD modellering gesimuleerde stromingspatroon in de voorhaven ten gevolge van het ledigen van de sluis kan beschouwd worden als een worst case scenario. Dit omdat een extreem hoog peil in de achterhaven gecombineerd met een extreem laag peil in de voorhaven werd beschouwd. Maar ook omdat de inlaten van het benedenhoofd nabij het wateroppervlak voorzien zijn. Uit de simulatie volgt dat vanuit hydraulisch oogpunt de dissipatie niet optimaal is doordat de uitstroming uit de korte omloopriool naar de voorhaven toe afbuigt. Een dergelijke stromingspatroon wordt ook verwacht voor de Antwerpse zeesluizen en werd ook bevestigd aan de hand van de bathymetriemetingen. Navraag bij Havenbedrijf Antwerpen leert dat in praktijk geen operationele hinder ten gevolge van de uitstroming bij ledigen ondervonden wordt.

Niettegenstaande de suboptimale dissipatie zijn de snelheden in de monding van de vissers- en recreatiehaven eerder beperkt. Enkel in het verlengde van de kolkmuur worden tijdelijk hogere snelheden tot 0.5 m/s opgemerkt maar deze treden op waar de vaarweg erg ruim is. Verder weg of in de monding zelf zijn de snelheden, ten gevolge van nivelleren, minimaal.

Bemerkt dat de positie van de inlaten in hoogte nog geoptimaliseerd kan worden, zie paragraaf 4.2.3. Voor de simulatie van het stromingspatroon werden de inlaten zo hoog mogelijk geplaatst omdat dit conservatief is voor de snelheden nabij de monding van de visser- en recreatiehaven. Het lager plaatsen van de inlaten zal resulteren in lagere snelheden nabij het wateroppervlak en ook in een betere dissipatie doordat de stroming hierbij zowel naar het oppervlak als naar de bodem toe kan spreiden.

7 Conclusies

Op vraag van afdeling Maritieme Toegang (aMT) heeft het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) een hydraulisch voorontwerp uitgevoerd voor het nivelleersysteem van de nieuwe sluis in kader van het complex project Nieuwe Sluis Zeebrugge.

Als eerste werden de randvoorwaarden afgeleid. De kolkafmetingen werden overgenomen uit het door EBS opgestelde ontwerpplan, namelijk een lengte van 427 m (tussen de uiterste roldeuren), een breedte van 55 m en een bodempeil -15.10 m TAW. Het maatgevend schip, een Car Carrier met een lengte 265 m, breedte 40 m en diepgang 9.5 m werd overgenomen uit de eerder uitgevoerde nautische studies. Voor het hydraulisch voorontwerp wordt een maatgevende peilcombinatie beschouwd voor het bepalen van de maximale langskracht en een maatgevende peilcombinatie voor het bepalen van de nivelleertijd. Daarnaast wordt bij een normaal peil in de achterhaven een reeks waterpeilen in de voorhaven met stapgrootte 1.0 m vertrekkende vanaf het voor nivelleren maatgevend laagwater tot en met het voor nivelleren maximaal peil in de voorhaven beschouwd. Door de beperkte bovenafvoer, de grootte van de Vandammesluis en het op peil houden van de achterhaven met water vanuit de voorhaven is in de huidige situatie het dichtheidsverschil tussen voor- en achterhaven beperkt. Door aMT wordt aangegeven dat geen rekening gehouden moet worden met een toekomstige toename van het dichtheidsverschil. Om die reden dient bij het ontwerp van het nivelleersysteem geen rekening gehouden te worden met dichtheidsstromingen.

Door aMT wordt een criterium voor de nivelleertijd van 12 à 13 min opgelegd. Voor de stijgsnelheid is een criterium opgesteld op basis van simulaties met het hydraulisch netwerkmodel van de Kieldrechtsluis. Voor de langskracht zijn drie criteria opgesteld. Een eerste criterium is overgenomen uit de literatuur. Voor het tweede criterium werden simulaties uitgevoerd met het maatgevend schip in een soortgelijke sluis, zijnde de Berendrecht- en Kieldrechtsluis, met een soortgelijk hydraulisch netwerkmodel als opgesteld wordt voor de nieuwe sluis Zeebrugge. Het derde criterium voor de langskracht is afgeleid uit in situ metingen van de langse waterspiegelhellingen in de Vandammesluis en in de Kieldrechtsluis.

Voor de nieuwe sluis was eerder al een doorstroomsectie 21.0 m² horende bij een nivelleertijd van 18.0 min bepaald. Deze bepaling is in het voorontwerp geactualiseerd naar de bijgestelde nivelleertijd van 12 min à 13 min. Uit deze actualisatie volgt een doorstroomsectie van 33.0 m² per omloopriool. Op basis hiervan stelt EBS voor om een vierkante sectie te gebruiken wat resulteert in een breedte en hoogte van de omloopriool gelijk aan 5.75 m.

Aan de hand van deze doorstroomsectie en het door EBS opgestelde geometrische voorontwerp wordt vervolgens een hydraulische revisie uitgevoerd van de geometrie. Hierbij worden achtereenvolgens de inlaat, de bochten in het verticaal en horizontaal vlak, de splitsing ter hoogte van de schuiven en de uitstroomconstructie gereviseerd. Daarnaast wordt een inschatting gemaakt van de hydraulische verliescoëfficiënt van elk van deze onderdelen. Voornamelijk met betrekking tot de positie van de inlaten van het benedenhoofd in hoogte is er nog enige onzekerheid. Bij het gebruik van het nivelleersysteem voor spuien wordt idealiter zo weinig mogelijk sediment meegevoerd. Omdat een hogere sedimentconcentratie nabij de bodem verwacht wordt is het vermoedelijk voordeliger om de inlaten van het benedenhoofd hoger in de waterkolom te voorzien. Omdat er vooralsnog geen gegevens beschikbaar zijn van het verwachte sedimentconcentratieprofiel ter hoogte van de inlaten kon dit niet meegenomen worden in het ontwerp. Aanbevolen wordt om sedimentconcentratieprofielen op te meten in de voorhaven. Aan de hand van deze sedimentconcentratieprofielen kan de positie in hoogte van de inlaat van het benedenhoofd mogelijks geoptimaliseerd worden. Het ontwerp van de uitstroomconstructie is gebaseerd op de geometrie van de Antwerpse zeesluizen. In deze uitstroomconstructie bevindt zich een overloopmuur met variabele hoogte. Voor het finale ontwerp wordt aanbevolen om de hoogte van deze overloopmuur te optimaliseren door middel van CFD simulaties. Bijkomend worden nog enkele potentiële optimalisaties aangegeven. Door de bocht net na de inlaat in de korte omloopriool gebeurt de uitstroom bij ledigen onder hoek. De dissipatie van

de stroming uit de korte omloopriool is hierdoor niet optimaal. Voor de lange omloopriool wordt opgemerkt dat de splitsing van de hefschuiven net na een bocht aanwezig is. Hierdoor zal de verdeling over beide hefschuiven niet gelijk zijn. Aangezien beide bemerkingen ook van toepassing zijn op de Antwerpse zeesluizen, en dat uit een gerichte navraag volgde dat in de praktijk hierover geen vaststellingen gedaan worden, is verder onderzoek niet noodzakelijk.

Op basis van de hydraulisch gereviseerde geometrie en de inschatting van de hydraulische verliezen is een hydraulisch netwerkmodel opgesteld. Met dit hydraulisch netwerkmodel is zowel nivelleren als spuien gesimuleerd. Voor nivelleren wordt eerst een openingswet opgesteld voor het bovenhoofd en voor het benedenhoofd met de maatgevende peilcombinatie voor de langskracht. Als criterium voor de langskracht is hierbij het minst strenge criterium op basis van simulaties in een soortgelijke sluis beschouwd. Ten opzichte van het criterium op basis van metingen is er slechts een beperkte overschrijding. Met deze openingswetten zijn ook de overige peilcombinaties gesimuleerd. Hieruit volgt dat bij de voor nivelleren maatgevende peilcombinatie het criterium van 12 minuten voor de nivelleertijd gerespecteerd wordt. Bij een extreem hoog peil van +7.00 m TAW in de voorhaven is er voor nivelleren met het bovenhoofd een beperkte overschrijding van het criterium van de nivelleertijd. Voor de overige simulaties wordt voldaan aan het criterium voor de stijgsnelheid en het criterium voor de langskracht op basis van simulaties met een soortgelijke sluis en het criterium voor de langskracht op basis van in situ metingen.

Met het hydraulisch netwerkmodel is vervolgens ook de globale afvoercoëfficiënt van het nivelleersysteem bepaald in functie van de ingezette schuifcombinatie. Hierbij wordt zowel spuien via het bovenhoofd als spuien via het benedenhoofd beschouwd. Om na te gaan of het nivelleersysteem voldoende performant is om te spuien wordt aanbevolen om een balanssimulatie uit te voeren van het schutverlies en spuivolume over een springtij-doodtijcyclus.

Het benedenhoofd van de sluiscolk bevindt zich juist opwaarts van de ingang van de jachthaven. Hierbij wordt de vraag gesteld of de uitstroming het in- en uitvaren van schepen in de vissers- en recreatiehaven kan hinderen. Op vraag van aMT heeft het studie bureau IMDC hiervoor een CFD simulatie uitgevoerd. Uit deze simulatie volgt dat de uitstroming uit de korte omloopriool zonder veel dissipatie afbuigt naar de voorhaven toe. In het verlengde van de kolkmuur nabij de ingang van de jachthaven kunnen lokaal nog zones met een snelheid tot ca. 0.5 m/s voorkomen. Hoewel deze stroomsnelheden het criterium uit Richtlijnen Vaarwegen (Koedijk, 2020) overschrijden, worden de stroomsnelheden op deze locatie aanvaardbaar geacht wegens de grote manoeuvreerruimte die de voorhaven faciliteert voor pleziervaart in combinatie met de snelle reductie van de stroomsnelheden in noordelijke richting. Op basis van de uitgevoerde berekeningen wordt geen nadelig effect verwacht van de stroming door nivelleren op de toegankelijkheid van de vissers- en recreatiehaven.

8 Referenties

- Actiflow.** (2015). CFD-studie naar stroming door de omloopriolen van de nieuwe Royerssluis: eindrapportage. versie 1.1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- De Mulder, T.; Vercruyssen, J.B.** (2007). Tweede sluis Waaslandhaven: verslag van de meetcampagnes Berendrecht- en zandvlietsluis. *WL Rapporten, 760/03A*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- De Mulder, T.; Vercruyssen, J.B.; Cui, J.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2008). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 3. Verslag van bijkomende meetcampagne Berendrechtsluis. *WL Rapporten, 760_03A*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- De Mulder, T.; Vercruyssen, 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.; Vercruyssen, 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.; Vercruyssen, 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
- EBS.** (2021). Nieuwe sluis Zeebrugge conceptstudie Optie 1 - 427 m tussen deuren 1&4 planzicht dd.12/02/2021
- Expertise Beton en Staal.** (2020). Nieuwe Zeesluis te Zeebrugge conceptstudie - bodemdieptes CFD (dd. 16/12/2020). pp.1
- 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.
- Koedijk, O.C.** (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020. ISBN 9789090334233
- Kolkman, P.A.; Jongeling, T.H.G.** (2007). Dynamic behaviour of hydraulic structures. Part C: Calculation methods and experimental investigations
- Lamoën, J.** (1950). Modelproeven voor het vullen en ledigen van de kolk der Boudewijnsluis (troskrachten, aanslibbingen, golven). *WL Rapporten, 90*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Ministerie van Openbare Werken. Bruggen en Wegen. Dienst der Kust.** (1979). Zeesluis Zeebrugge drainering kolkmuur Doorsneden en details (plan). pp.1
- Moretti, M.; Kyroussi, F.; Decrop, B.; Bolle, A.** (2021). Nieuwe sluis Zeebrugge - Technische studies - CFD modellering uitstroom
- Rietveld, M.; De Loor, A.** (2016). Nieuwe Sluis Terneuzen Verdere bepaling krachtcriteria met SCHAT. 224 pp. Available at: <https://nieuwesluisterneuzen.eu/over-de-nieuwe-sluis>

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

Smets, E.; Sterling, A. (1962). Nieuwe zeesluis te Zandvliet: aanvullend verslag der modelproeven. Bijkomende proeven aangaande het behoud of het weglaten van de overstortmuur in de omloopriolen. *WL Rapporten*, 186_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

US Army Corps of Engineers. (2006). Hydraulic design of of navigation locks: engineer manual EM 1110-2-1604: Washington D.C. 196 pp.

Vercruyse, J.; Verelst, K.. (2020). Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem nieuwe sluis Zeebrugge – bepaling benodigde doorstroomsectie Versie 1.0 Memo's, 20_054: Antwerpen

Vercruyse, J.B.; Vanderkimpfen, P.; Claeys, S.; Mostaert, F. (2019a). Complex project nieuwe sluis Zeebrugge: opmeten dichtheidsverschil tussen voorhaven en achterhaven. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 18_041_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=316701>

Vercruyse, 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

Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Haven van Antwerpen - Royerssluis: deelrapport 2. Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem met omloopriolen in sluishoofden voor vernieuwde Royerssluis. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 12_131_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XI, 104 + 35 p. appendices pp.

Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2019b). Haven Antwerpen - Kieldrechtsluis: validatie hydraulisch netwerkmodel met betrekking tot overvullen en overledigen. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 19_039_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2020). Complex project nieuwe sluis Zeebrugge: bepaling benodigde doorstroomsectie nivelleersysteem. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 19_069_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=324254>

Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2017a). Haven Antwerpen - Kieldrechtsluis: meting overvulling en overlediging. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 16_106_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Van Hoydonck, W.; Mostaert, F. (2017b). Strategisch haveninfrastructuur project Zeebrugge: hydraulisch ontwerp nivelleersysteem sluis met korte omloopriolen. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 15_035_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=291100>

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

Vos, S.; Eloot, K.; Mostaert, F. (2017). Nieuwe Sluis Zeebrugge (NSZ): nautische screening alternatieven met vaarsimulaties. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 17_002_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=317286>

Bijlage A - Resultaten numerieke modellering

De simulaties worden aangeduid met volgende code:

NSZ_N05_G1_BO_D14_H1_O01_S1_ST050

- NSZ/BES/KIS De sluis: nieuwe sluis complex project Zeebrugge / Berendrechtsluis / Kieldrechtsluis
- N01 tot N22 Volgnummer van de simulatie
- G1 De variant van het nivelleersysteem. In deze studie is enkel het in hoofdstuk 4 beschreven hydraulisch netwerkmodel voor de nieuwe sluis gesimuleerd. Voor de Berendrechtsluis en Kieldrechtsluis betreft dit het gekalibreerde model.
- BO/BE Bovenhoofd/Benedenhoofd
- D14 Deurcombinatie. In deze studie is enkel de uiterste deurcombinatie beproefd.
- H1 tot H9 Peilcombinatie zie Tabel 30.
- O01 Openingswet O01 / Openingswet O02. Voor BES en KIS betreft dit de openingswet volgend uit metingen.
- S1 Het gesimuleerde schip. In deze studie is enkel het maatgevend schip beproefd.
- ST050 Afstand tussen boeg en de voor nivelleren gebruikt deur. In deze studie is enkel een afstand 50 m beproefd.

Tabel 30 – Peilcombinaties

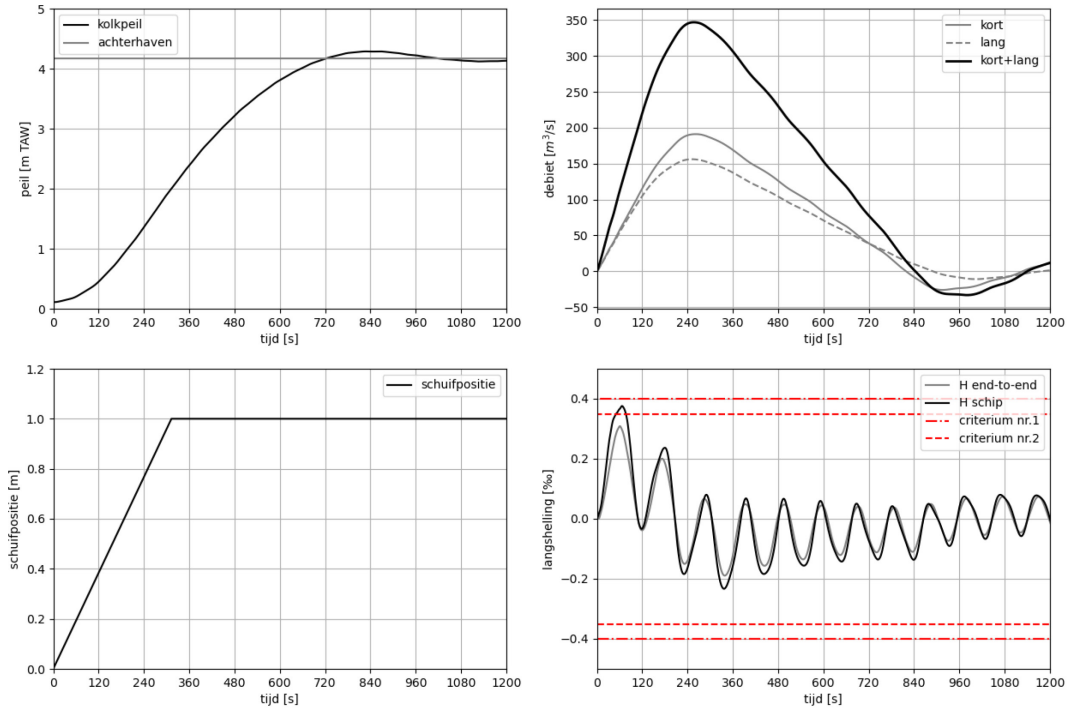
Code	Sluis	Schelde/Voorhaven [m TAW]	Dok/Achterhaven [m TAW]	Verval [m]
H1	BES	0.11	4.17	4.06
H1	KIS	0.10	3.50	3.40
H1	NSZ	-0.58	3.90	4.48
H2	NSZ	0.00	3.40	3.40
H3	NSZ	1.00	3.40	2.40
H4	NSZ	2.00	3.40	1.40
H5	NSZ	3.00	3.40	0.40
H6	NSZ	4.00	3.40	-0.60
H7	NSZ	5.00	3.40	-1.60
H8	NSZ	6.00	3.40	-2.60
H9	NSZ	7.00	3.40	-3.60

8.1 Tabel

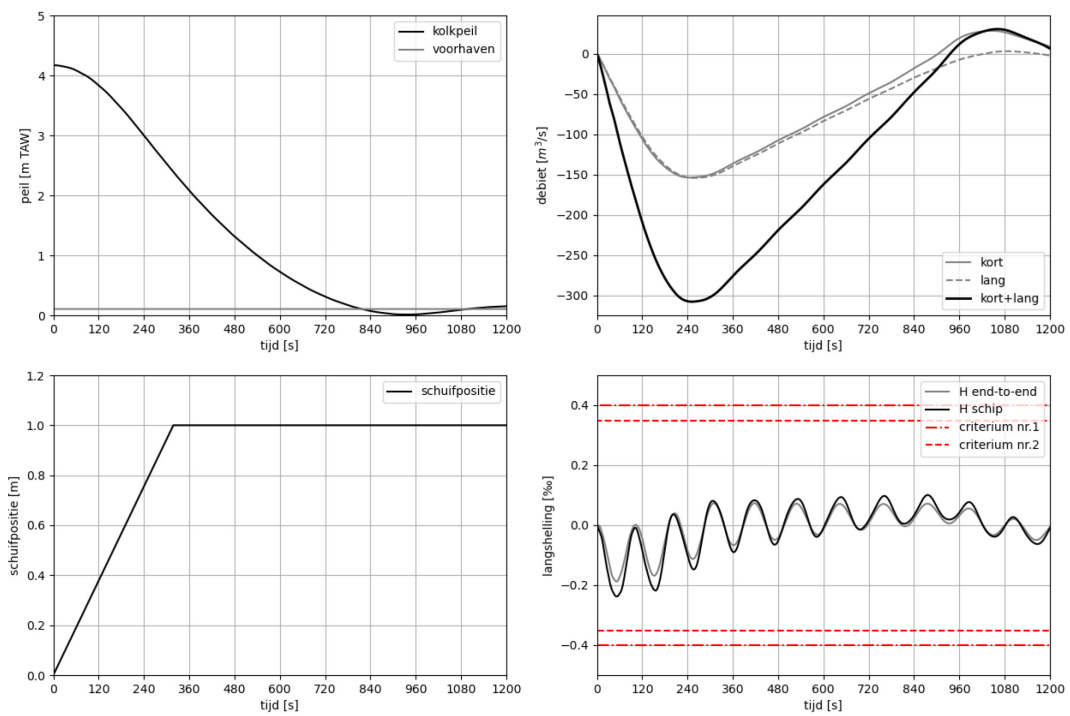
simulatie	kolkpeil start nivellering	kolkpeil einde nivellering	vullen/ ledigen	verval [m]	nivelleertijd		max. overvulling/ overlediging [m]	extr. Waarde stijg- snelheid [m/s]	extr. waarde debiet [m ³ /s]	langskracht schip		
	[m TAW]	[m TAW]			[s]	[min]				extr. [%o]	min. [%o]	max. [%o]
BES_N01_G1_BO_D14_H1_O01_S1_ST050	0.11	4.17	vullen	4.06	723	12.1	0.12	0.0125	347	0.38	-0.23	0.38
BES_N02_G1_BE_D14_H1_O01_S1_ST050	4.17	0.10	ledigen	-4.07	818	13.6	0.09	-0.0111	-308	-0.24	-0.24	0.10
KIS_N03_G1_BO_D14_H1_O01_S1_ST050	0.10	3.50	vullen	3.40	537	9.0	0.15	0.0141	392	0.43	-0.30	0.43
KIS_N04_G1_BE_D14_H1_O01_S1_ST050	3.50	0.10	ledigen	-3.40	1308	21.8	0.05	-0.0119	-328	-0.15	-0.15	0.07
NSZ_N05_G1_BO_D14_H1_O01_S1_ST050	-0.58	3.90	vullen	4.48	747	12.5	0.10	0.0098	272	0.39	-0.24	0.39
NSZ_N06_G1_BO_D14_H2_O01_S1_ST050	0.00	3.40	vullen	3.40	654	10.9	0.10	0.0083	230	0.32	-0.20	0.32
NSZ_N07_G1_BO_D14_H3_O01_S1_ST050	1.00	3.40	vullen	2.40	555	9.3	0.10	0.0067	185	0.23	-0.15	0.23
NSZ_N08_G1_BO_D14_H4_O01_S1_ST050	2.00	3.40	vullen	1.40	436	7.3	0.10	0.0048	132	0.16	-0.10	0.16
NSZ_N09_G1_BO_D14_H5_O01_S1_ST050	3.00	3.40	vullen	0.40	280	4.7	0.09	0.0020	56	0.07	-0.06	0.07
NSZ_N10_G1_BO_D14_H6_O01_S1_ST050	4.00	3.40	ledigen	-0.60	346	5.8	0.07	-0.0024	-68	-0.08	-0.08	0.06
NSZ_N11_G1_BO_D14_H7_O01_S1_ST050	5.00	3.40	ledigen	-1.60	539	9.0	0.08	-0.0044	-123	-0.12	-0.12	0.06
NSZ_N12_G1_BO_D14_H8_O01_S1_ST050	6.00	3.40	ledigen	-2.60	666	11.1	0.07	-0.0061	-170	-0.15	-0.15	0.07
NSZ_N13_G1_BO_D14_H9_O01_S1_ST050	7.00	3.40	ledigen	-3.60	781	13.0	0.07	-0.0074	-206	-0.16	-0.16	0.07
NSZ_N14_G1_BE_D14_H1_O02_S1_ST050	3.90	-0.58	ledigen	-4.48	818	13.6	0.08	-0.0092	-255	-0.40	-0.40	0.16
NSZ_N15_G1_BE_D14_H2_O02_S1_ST050	3.40	0.00	ledigen	-3.40	709	11.8	0.08	-0.0079	-219	-0.36	-0.36	0.15
NSZ_N16_G1_BE_D14_H3_O02_S1_ST050	3.40	1.00	ledigen	-2.40	592	9.9	0.08	-0.0065	-179	-0.30	-0.30	0.13
NSZ_N17_G1_BE_D14_H4_O02_S1_ST050	3.40	2.00	ledigen	-1.40	448	7.5	0.08	-0.0047	-131	-0.22	-0.22	0.11
NSZ_N18_G1_BE_D14_H5_O02_S1_ST050	3.40	3.00	ledigen	-0.40	254	4.2	0.07	-0.0022	-60	-0.10	-0.10	0.07
NSZ_N19_G1_BE_D14_H6_O02_S1_ST050	3.40	4.00	vullen	0.60	263	4.4	0.10	0.0032	89	0.14	-0.09	0.14
NSZ_N20_G1_BE_D14_H7_O02_S1_ST050	3.40	5.00	vullen	1.60	407	6.8	0.10	0.0060	166	0.26	-0.16	0.26
NSZ_N21_G1_BE_D14_H8_O02_S1_ST050	3.40	6.00	vullen	2.60	521	8.7	0.11	0.0080	221	0.34	-0.21	0.34
NSZ_N22_G1_BE_D14_H9_O02_S1_ST050	3.40	7.00	vullen	3.60	612	10.2	0.11	0.0096	266	0.40	-0.26	0.40

8.2 Figuren

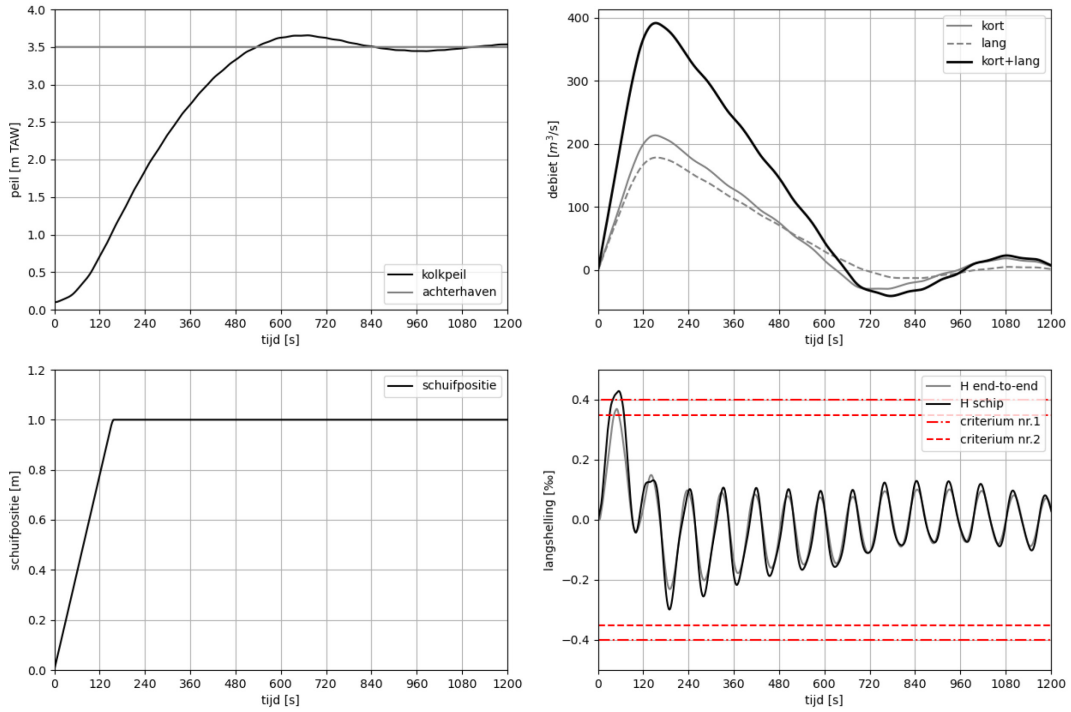
BES_N01_G1_BO_D14_H1_O01_S1_ST050



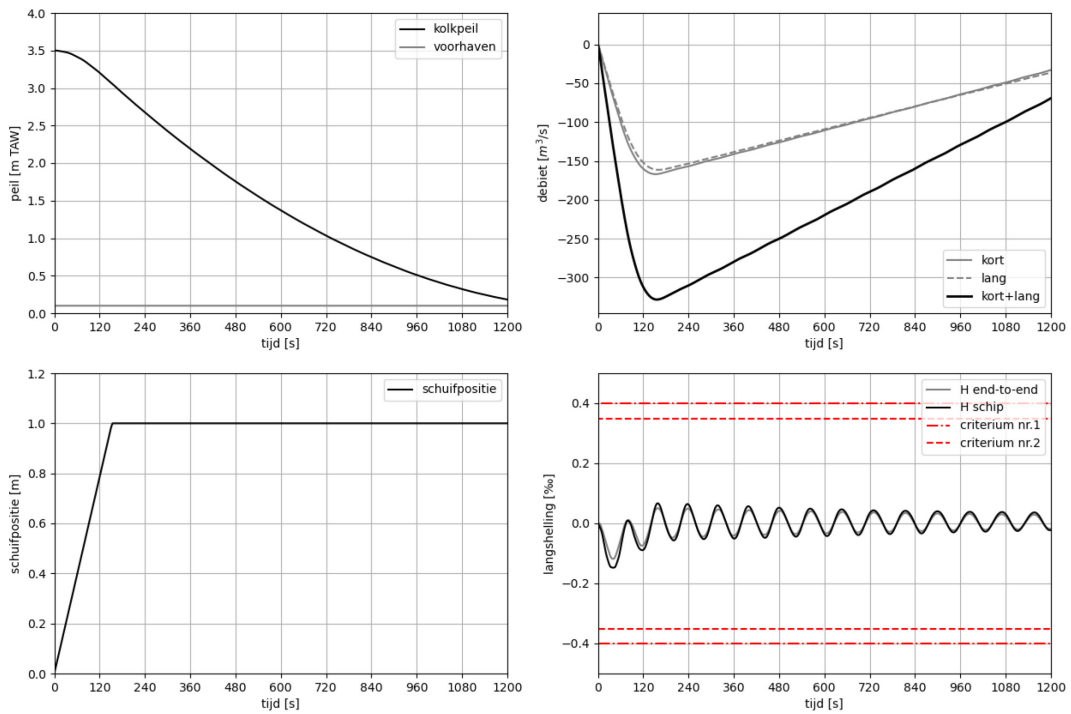
BES_N02_G1_BE_D14_H1_O01_S1_ST050



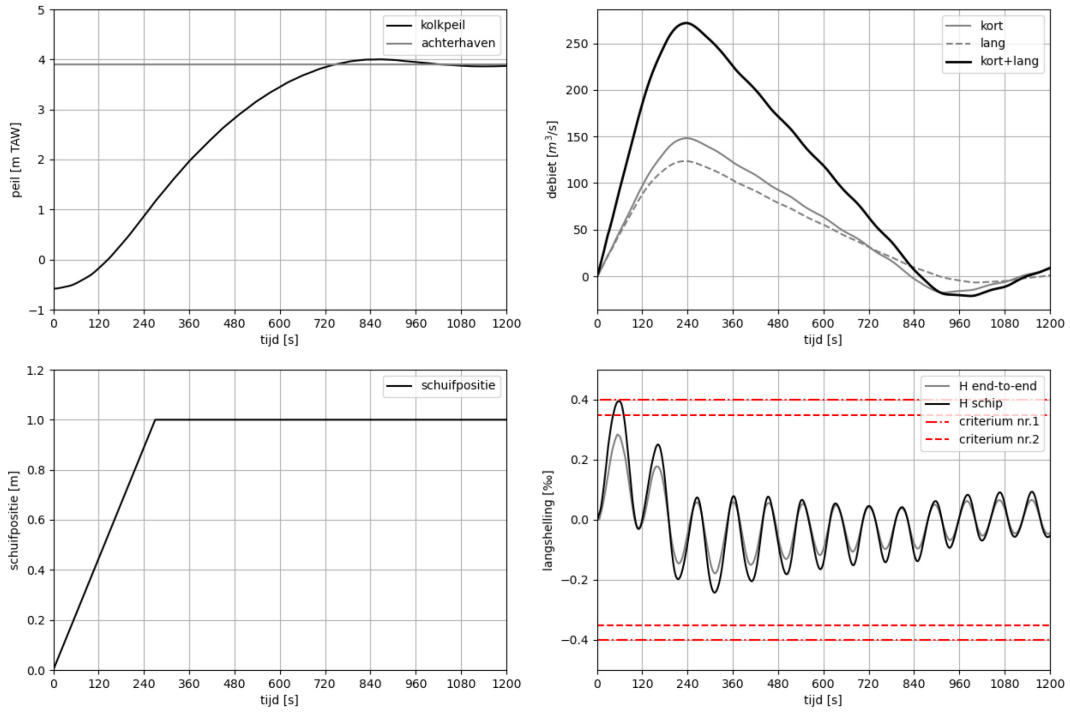
KIS_N03_G1_BO_D14_H1_001_S1_ST050



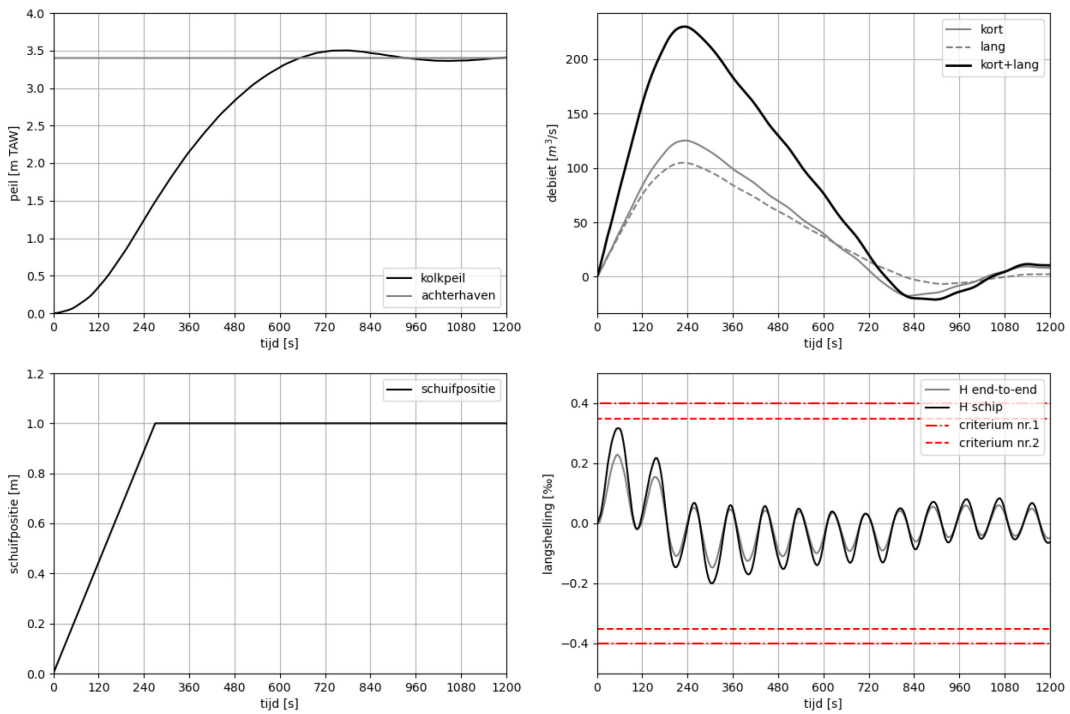
KIS_N04_G1_BE_D14_H1_001_S1_ST050



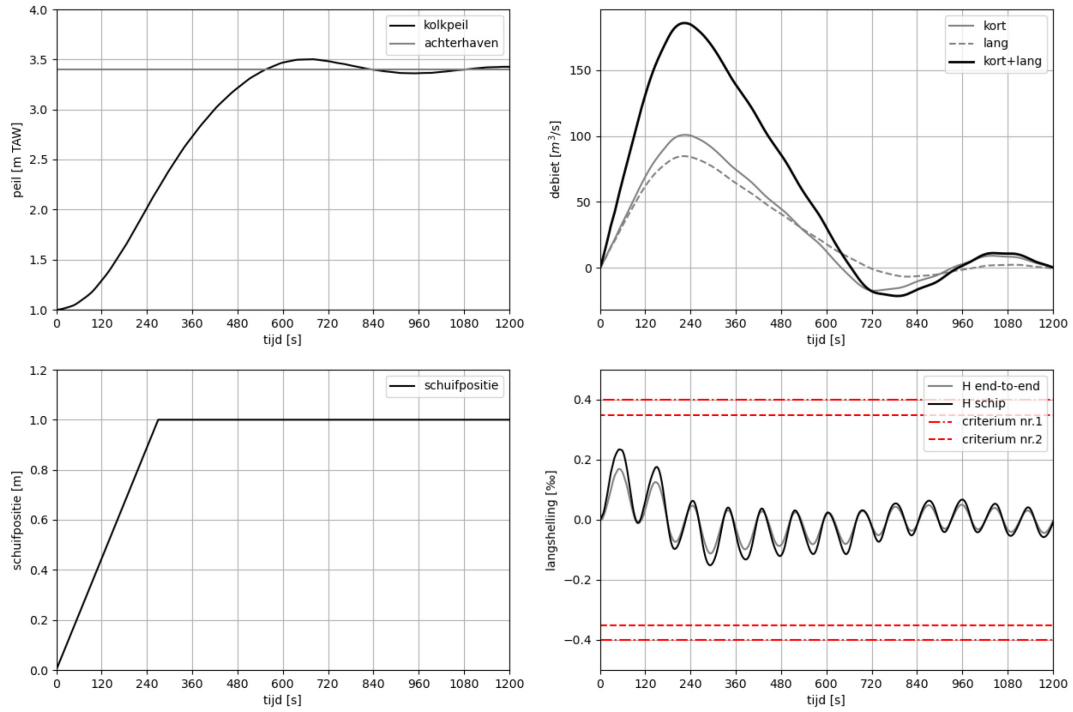
NSZ_N05_G1_BO_D14_H1_O01_S1_ST050



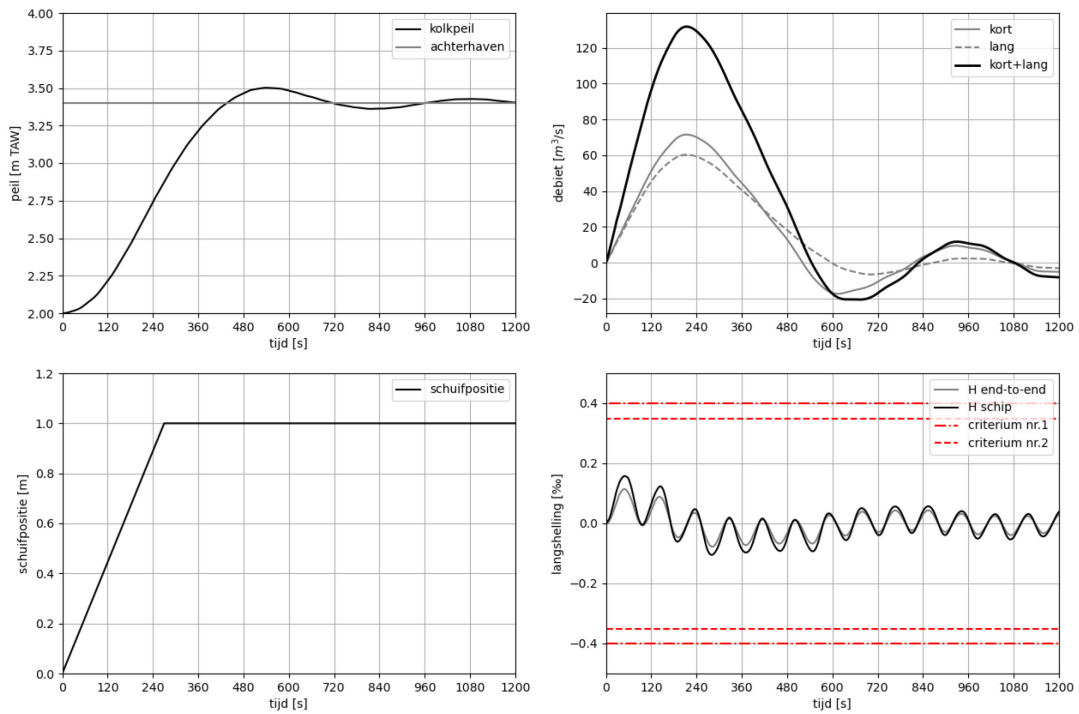
NSZ_N06_G1_BO_D14_H2_O01_S1_ST050



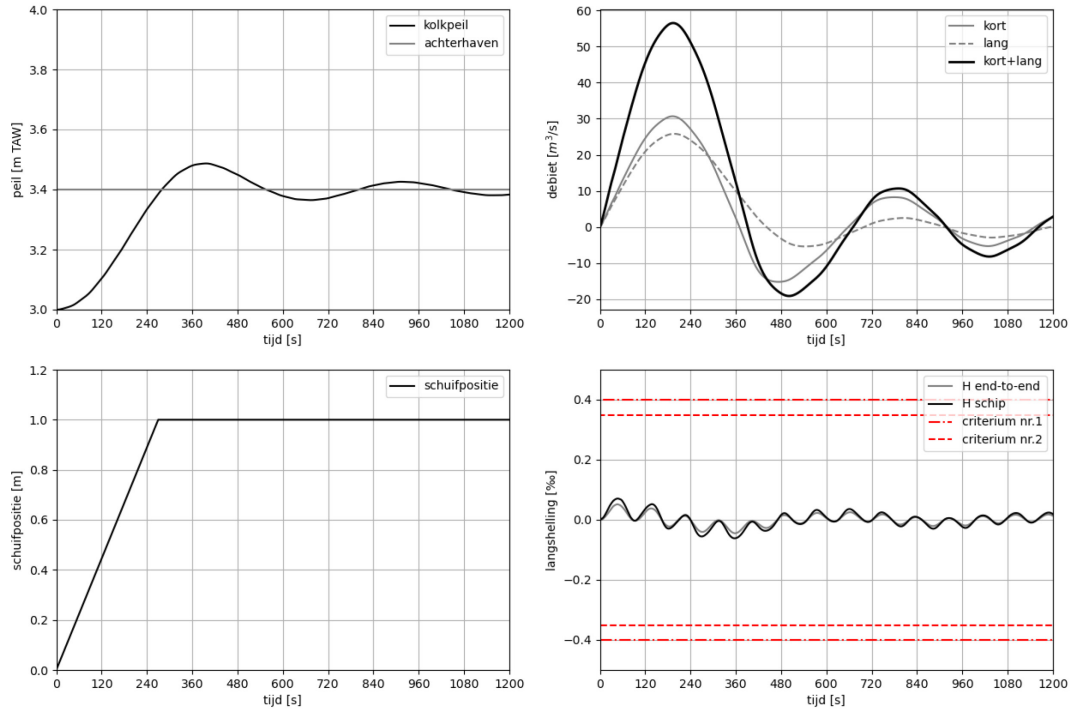
NSZ_N07_G1_BO_D14_H3_O01_S1_ST050



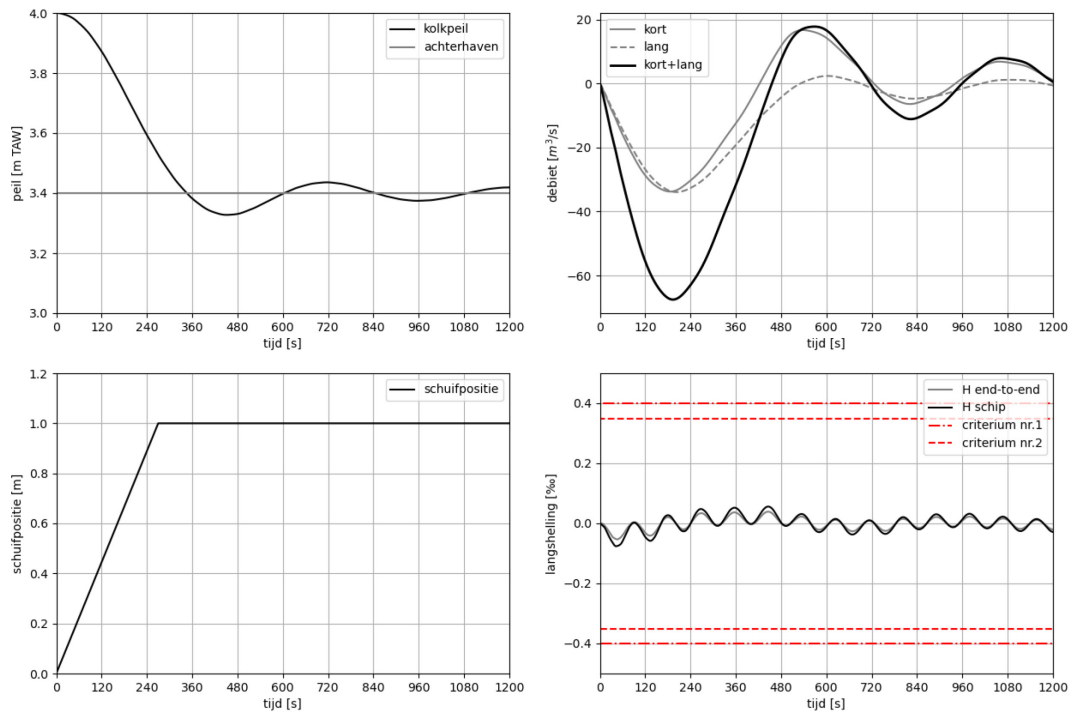
NSZ_N08_G1_BO_D14_H4_O01_S1_ST050



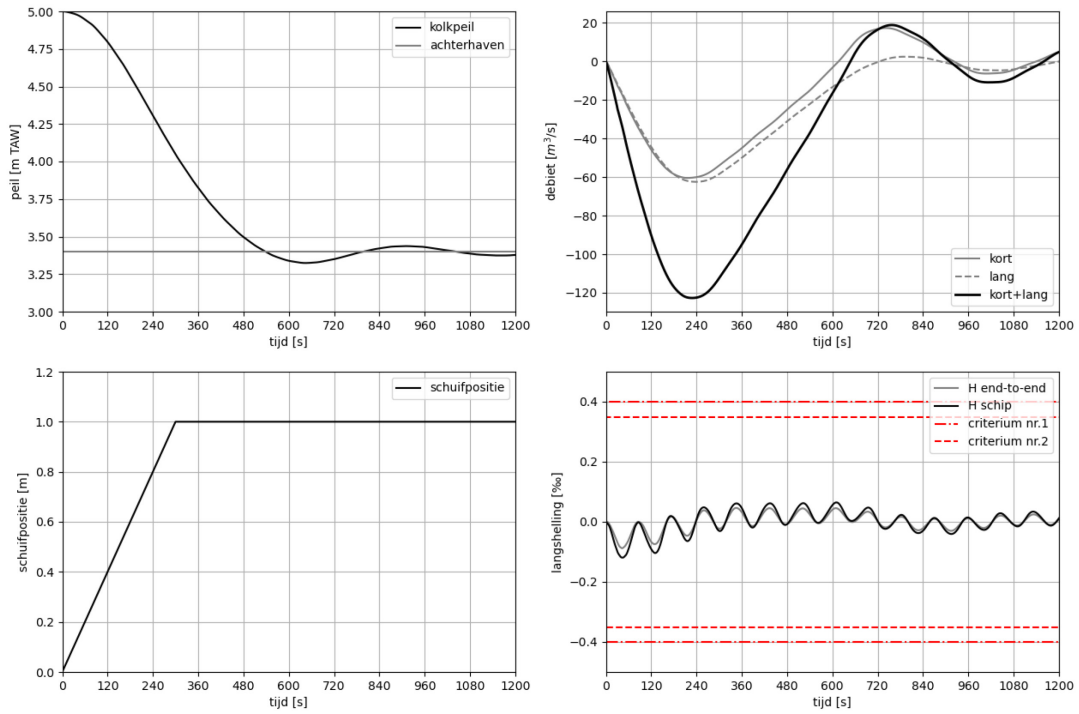
NSZ_N09_G1_BO_D14_H5_O01_S1_ST050



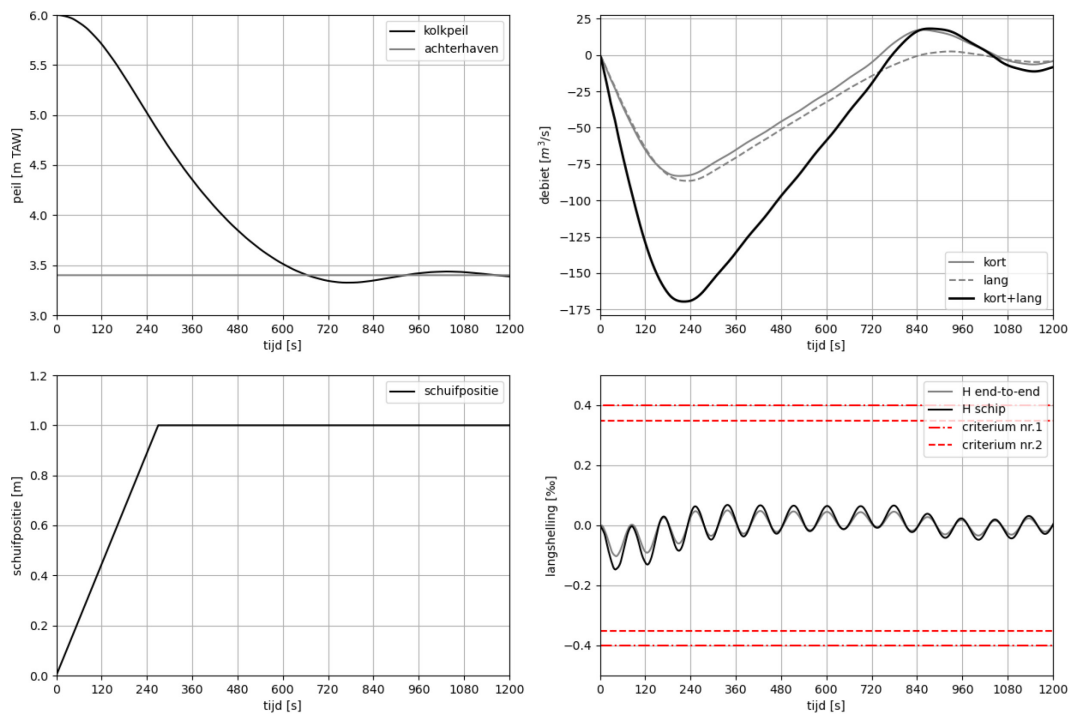
NSZ_N10_G1_BO_D14_H6_O01_S1_ST050



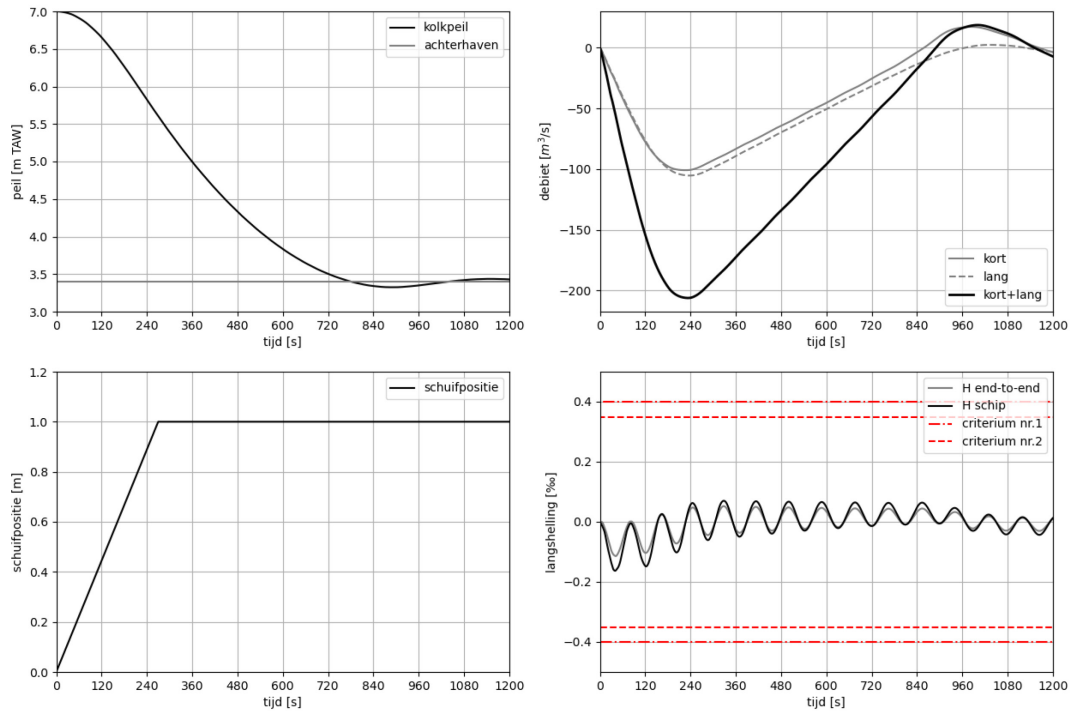
NSZ_N11_G1_BO_D14_H7_O01_S1_ST050



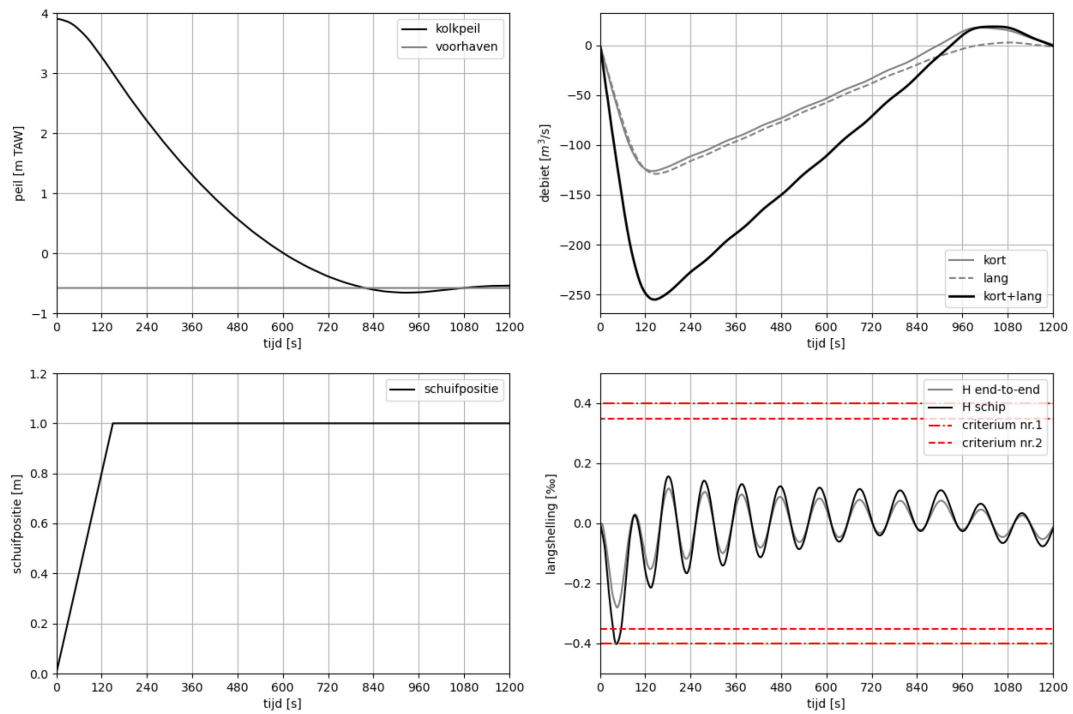
NSZ_N12_G1_BO_D14_H8_O01_S1_ST050



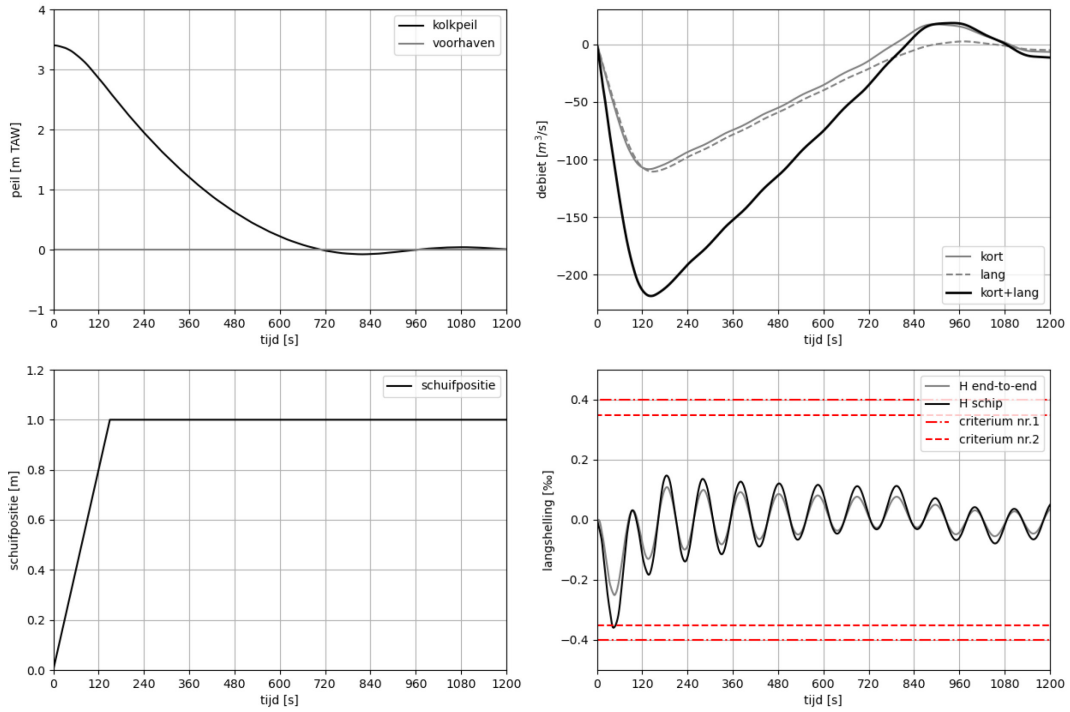
NSZ_N13_G1_BO_D14_H9_O01_S1_ST050



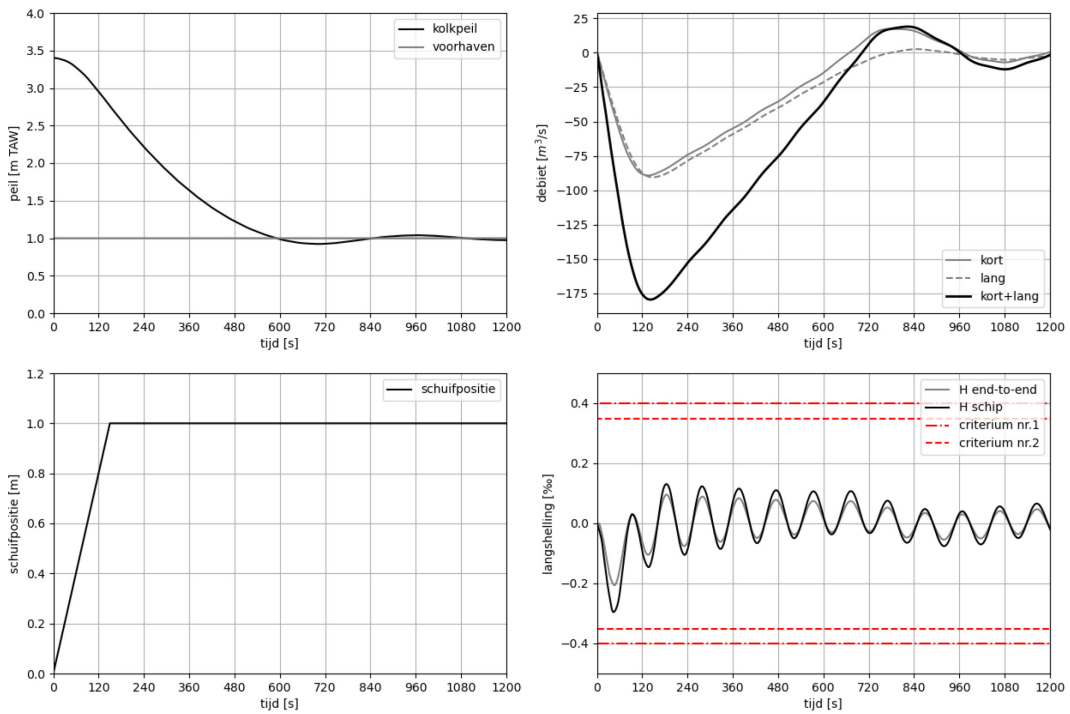
NSZ_N14_G1_BE_D14_H1_O02_S1_ST050



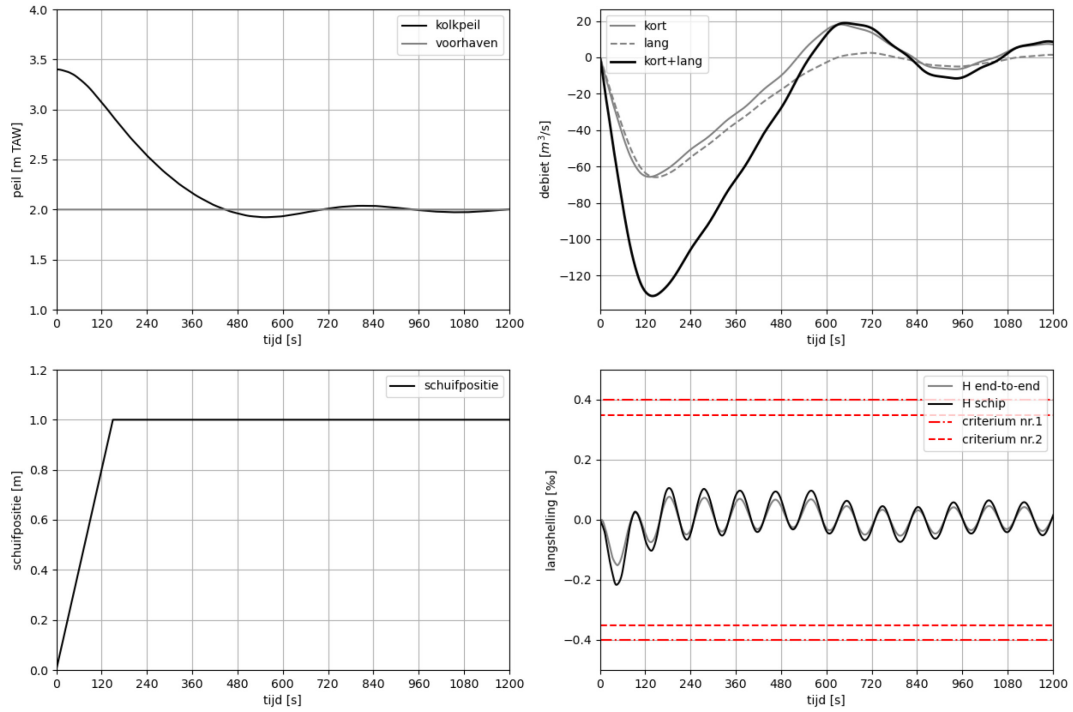
NSZ_N15_G1_BE_D14_H2_O02_S1_ST050



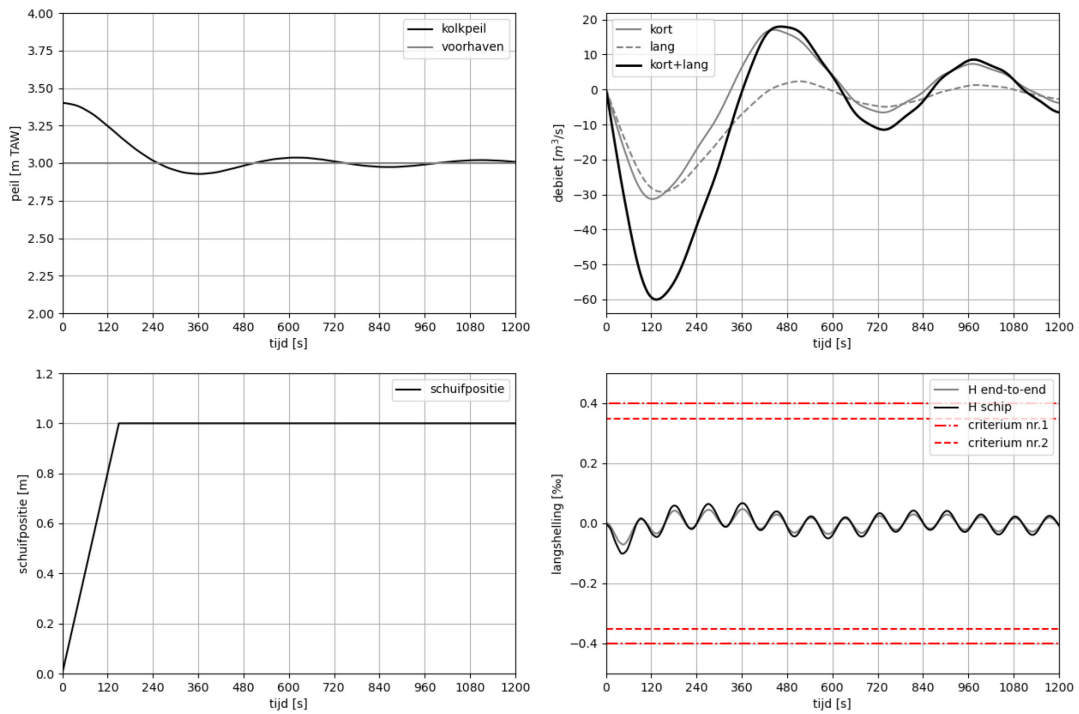
NSZ_N16_G1_BE_D14_H3_O02_S1_ST050



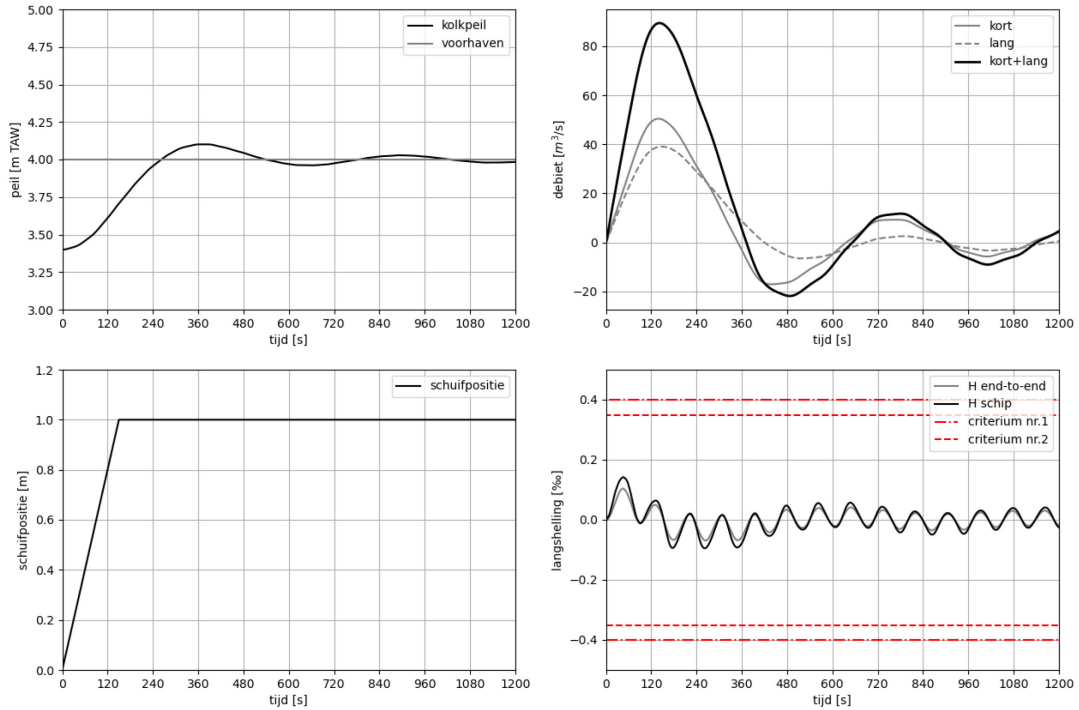
NSZ_N17_G1_BE_D14_H4_O02_S1_ST050



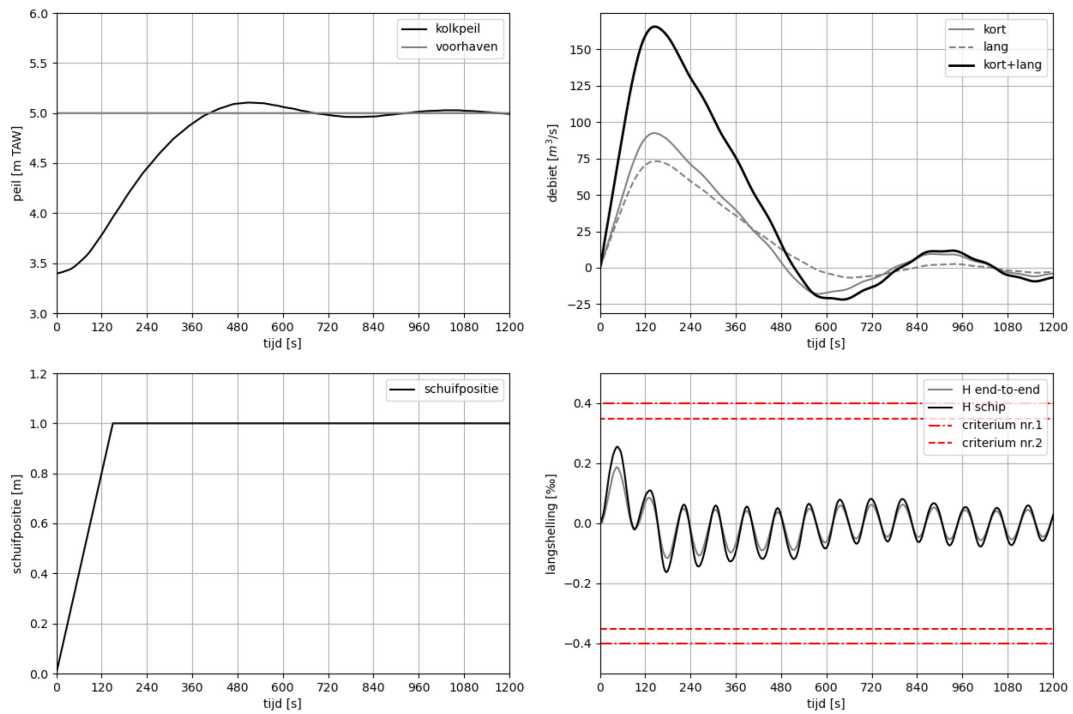
NSZ_N18_G1_BE_D14_H5_O02_S1_ST050



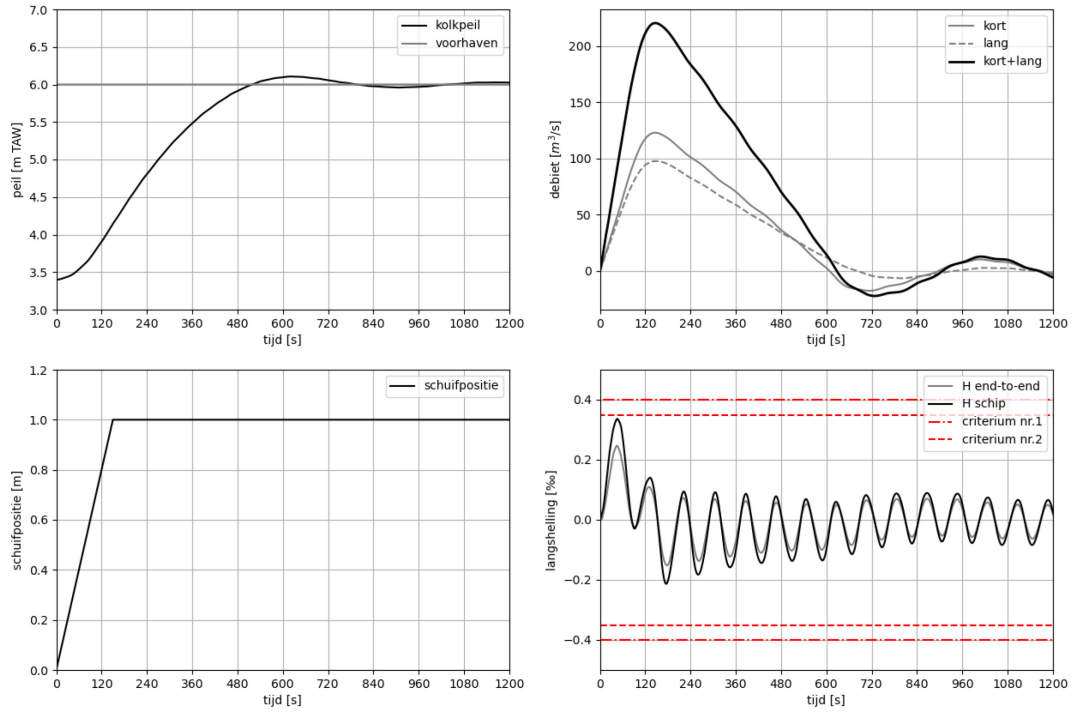
NSZ_N19_G1_BE_D14_H6_O02_S1_ST050



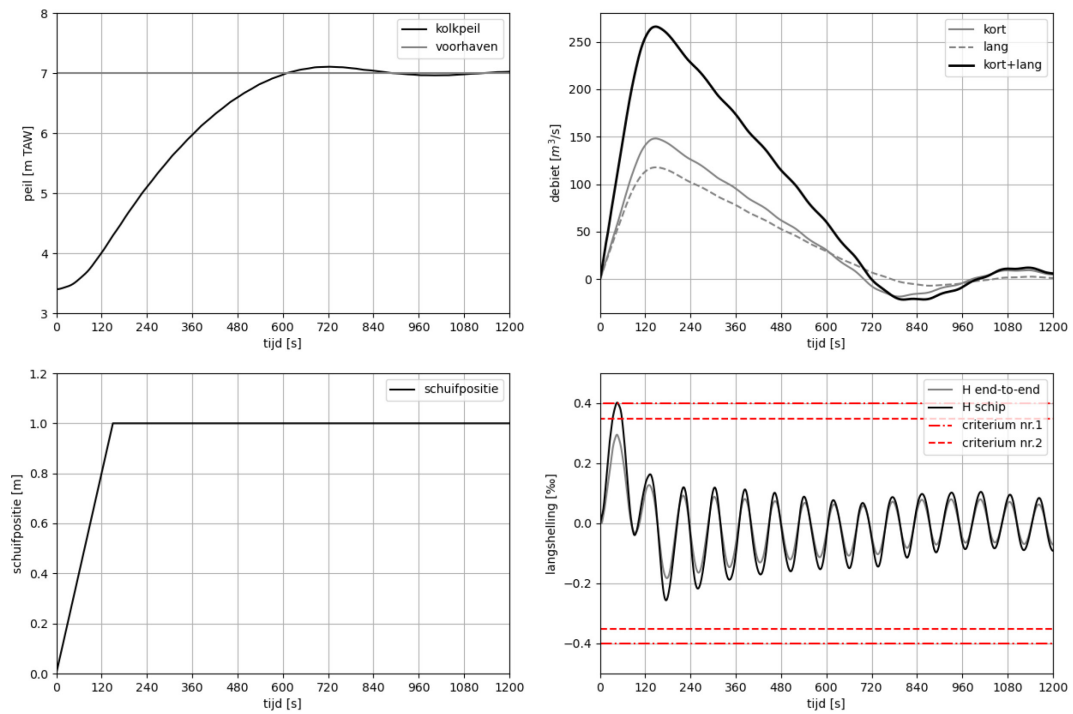
NSZ_N20_G1_BE_D14_H7_O02_S1_ST050



NSZ_N21_G1_BE_D14_H8_O02_S1_ST050



NSZ_N22_G1_BE_D14_H9_O02_S1_ST050



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