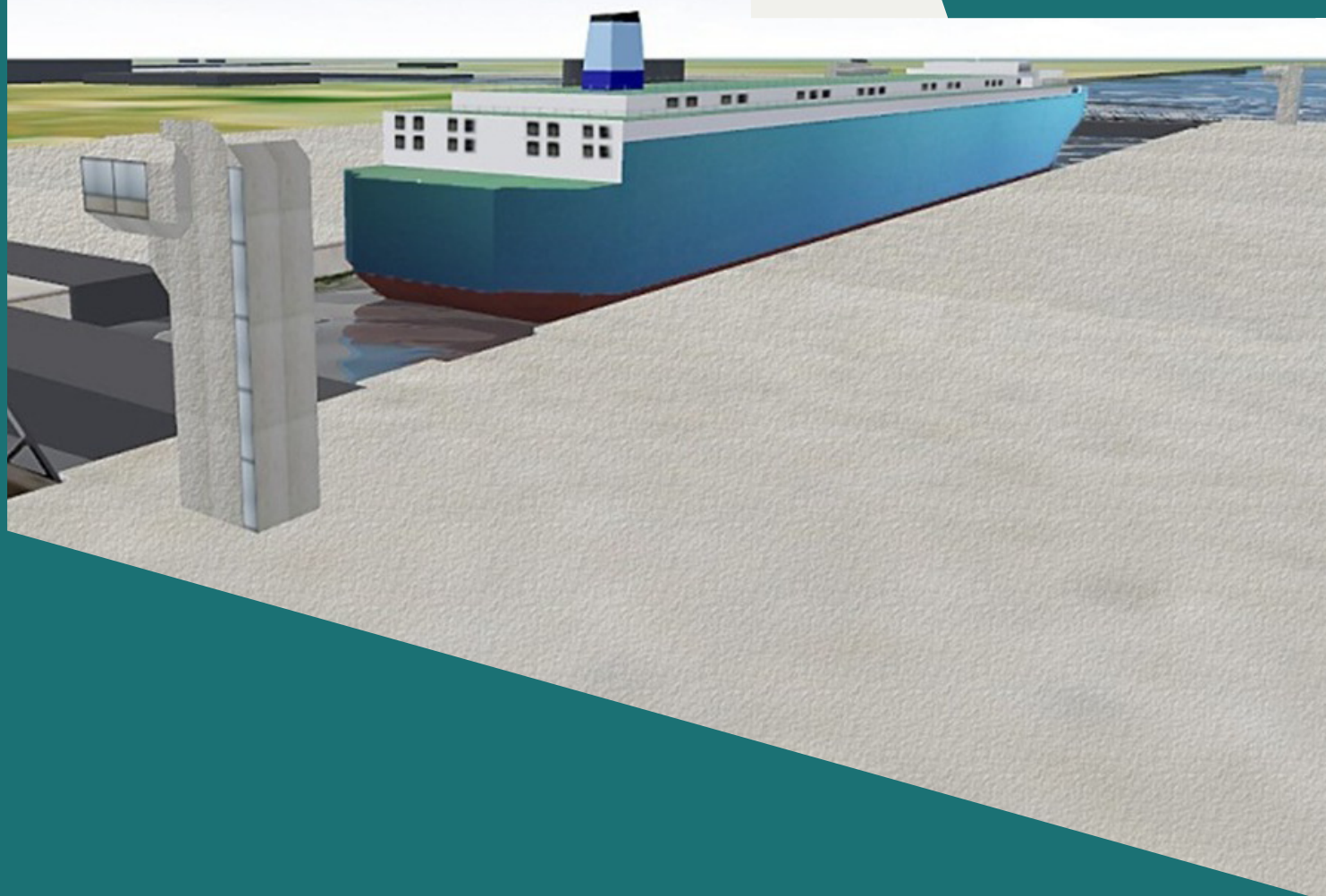




Vlaanderen
is wetenschap



19_069_1
WL rapporten

Complex project nieuwe sluis Zeebrugge

Bepaling benodigde doorstroomsectie nivelleersysteem

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Complex project nieuwe sluis Zeebrugge

Bepaling benodigde doorstroomsectie nivelleersysteem

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

Juridische kennisgeving

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2020
D/2020/3241/113

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; 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.

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

Documentidentificatie

Oprachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2020R19_069_1
Keywords (3-5):	lock, simulation, filling emptying system		
Kennisdomeinen	Waterbouwkundige constructies > Sluizen>Nivelleersysteem > Literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	20	Bijlagen (p.):	2
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2020-05-18 08:26:07 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Kristof Verelst</i>
Projectleider:	Vercruysse, J.	Getekend door: Jeroen Vercruysse (Signature) Getekend op: 2020-05-15 14:57:56 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Jeroen Vercruysse</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-05-15 15:09:26 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

In kader van het complex project nieuwe sluis Zeebrugge vraagt afdeling Maritieme Toegang (aMT) ondersteuning aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL). Een van de onderwerpen waarvoor ondersteuning wordt gevraagd betreft het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis.

Voorafgaand aan het complex project nieuwe sluis Zeebrugge heeft aMT reeds door middel van het Strategisch Haven Infrastructuur Project (SHIP) het optimaliseren van de nautische toegankelijkheid van de achterhaven van Zeebrugge onderzocht. In kader van SHIP heeft WL een hydraulisch ontwerp uitgevoerd voor een nivelleersysteem met openingen in de deur en een hydraulisch ontwerp voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen. Het nivelleersysteem volgend uit deze ontwerpen valt niet één op één over te nemen in het complex project nieuwe sluis Zeebrugge door het wijzigen van de kolkdimensies, het ontwerpschip en de gewenste nivelleertijd.

Door middel van een formule voor het bepalen van de nivelleertijd werd de doorstroomsectie uit de ontwerpen in kader van SHIP verschaald naar de benodigde doorstroomsectie voor de nieuwe sluis in kader van het complex project. Hieruit volgt voor een nivelleersysteem met deuropeningen per deur een totale breedte van 36.85m en hoogte 1.40 m, wat overeenkomt met een vrije sectie 51.6 m². Voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen worden twee riolen 4.6 m x 4.6 m (breedte x hoogte) uitgekomen, wat overeenkomt met een doorstroomsectie 21.2 m² per riool of 42.3 m² in totaal.

Vervolgens wordt per type nivelleersysteem, deuropeningen en korte omloopriolen, één nieuwe simulatie uitgevoerd. Het model opgesteld in kader van SHIP wordt hierbij bijgewerkt met de nieuwe doorstroomsectie, kolkdimensies en het nieuwe ontwerpschip. De openingswet blijft behouden. Uit de simulaties volgt dat zowel voor het nivelleersysteem met deuropeningen als voor het nivelleersysteem met korte omloopriolen een nivelleertijd iets onder 18.0 min uitgekomen wordt.

Uit een voorstudie voor het nivelleersysteem met openingen in de deur uitgevoerd door Expertise Beton en Staal volgt dat 9 openingen in de deur diameter 2.0 m beschouwd dient te worden als maximum haalbaar. Met dit nivelleersysteem werd een nieuwe simulatie uitgevoerd. Hieruit volgde een nivelleertijd 21.1 min.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Randvoorwaarden	3
3 Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem in het kader van SHIP.....	6
3.1 Openingen in de deur	6
3.2 Korte omloopriolen	7
4 Inschatting doorstroomsectie aan hand van literatuurformules	9
5 Initiële hydraulische simulaties nivelleer-systeem.....	11
5.1 Nivelleeropeningen in de deur	11
5.2 Korte omloopriolen	13
6 Bijkomende simulatie voor een nivelleer-systeem met openingen in de deur	15
7 Conclusies	18
8 Referenties	20
9 Bijlage A – afvoercoëfficiënt cirkelvormige openingen afgesloten door vlinderkleppen	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Randvoorwaarden hydraulisch ontwerp nieuwe sluis Zeebrugge.....	3
Tabel 2 – Bijkomend te nivelleren oppervlak.....	4
Tabel 3 – Criteria langskracht toegepast in het ontwerp in kader van SHIP voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen.....	5
Tabel 4 – Benodigde doorstroomsectie nivelleersysteem met openingen in de deur	10
Tabel 5 – Benodigde doorstroomsectie nivelleersysteem met korte omloopriolen	10
Tabel 6 –Nivelleersysteem met openingen in de deur - karakteristieken	11
Tabel 7 – Nivelleersysteem met openingen in de deur – openingswet.....	12
Tabel 8 – Karakteristieken simulatie nivelleren door middel van openingen in de deuren.	12
Tabel 9 – Nivelleersysteem met korte omloopriolen – doorstroomsectie	13
Tabel 10 – Nivelleersysteem met korte omloopriolen – openingswet	13
Tabel 11 – Karakteristieken simulatie nivelleren door middel van korte omloopriolen.....	14
Tabel 12 – Nivelleersysteem met openingen in de deur met max. haalbare doorstroomsectie - karakteristieken.....	15
Tabel 13 – Nivelleersysteem met openingen in de deur met maximum haalbare doorstroomsectie – openingswet	16
Tabel 14 – Karakteristieken simulatie nivelleersysteem met openingen in de deur met maximum haalbare doorstroomsectie	16
Tabel 15 – Samenvatting resultaten simulaties	19
Tabel 16– Afvoercoëfficiënt in functie van openingshoek.....	B1

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Locatie nieuwe sluis Zeebrugge.....	1
Figuur 2 – sluis SHIP – geometrie benedenhoofd voor ontwerp met korte omloopriolen.....	8
Figuur 3 – Resultaat simulatie nivelleren door middel van deuropeningen	12
Figuur 4 – Resultaat simulatie nivelleren door middel van korte omloopriolen.....	14
Figuur 5 – Resultaat simulatie nivelleersysteem met openingen in de deur met max. haalbare doorstroomsectie	16
Figuur 6 – Vergelijking afvoercoëfficiënt in functie van openingshoek	B2

1 Inleiding

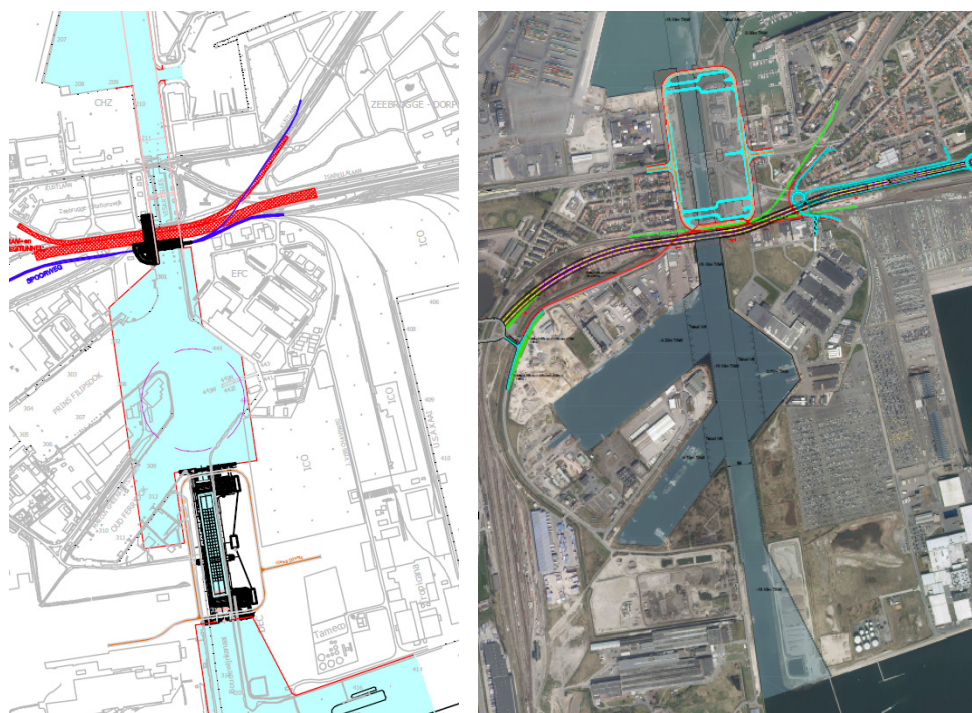
In kader van het complex project nieuwe sluis Zeebrugge vraagt afdeling Maritieme Toegang (aMT) ondersteuning aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL). Een van de onderwerpen waarvoor ondersteuning wordt gevraagd betreft het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis.

Voorafgaand aan het complex project nieuwe sluis Zeebrugge heeft aMT reeds door middel van het Strategisch Haven Infrastructuur Project (SHIP) het optimaliseren van de nautische toegankelijkheid van de achterhaven van Zeebrugge onderzocht. In kader van SHIP heeft WL een hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem van een nieuwe sluis opwaarts de Visartsluis, zie Figuur 1 links. De Visartsluis kwam hierbij te vervallen en tussen de locatie van de huidige Visartsluis en de nieuwe sluis werd een open getijzone gecreëerd. Voor deze sluis heeft WL een hydraulisch ontwerp uitgevoerd voor een nivelleersysteem met openingen in de deur en een hydraulisch ontwerp voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen:

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

In kader van het complex project nieuwe sluis Zeebrugge werd een nieuwe alternatievenstudie uitgevoerd voor het verbeteren van de toegankelijkheid van de achterhaven. Op 10 mei 2019 heeft de Vlaamse Regering het voorkeursbesluit principieel vastgesteld. Hierbij wordt een nieuwe sluis gebouwd op de locatie van de bestaande Visartsluis, zie Figuur 1 rechts.

Figuur 1 – Locatie nieuwe sluis Zeebrugge



links: Strategisch HavenInfrastructuur Project (SHIP) / rechts: complex project nieuwe sluis Zeebrugge

Voor de nieuwe sluis in kader van het complex project nieuwe sluis Zeebrugge is het niet mogelijk om het nivelleersysteem volgend 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 in kader van SHIP:

- de kolkafmetingen en kolkdiepte zijn toegenomen,
- de nieuwe sluis komt op een andere locatie te liggen.

Dit advies maakt een inschatting voor de benodigde doorstroomsectie van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis in kader van het complex project. In deze fase van het onderzoek is er nog geen keuze gemaakt voor het type nivelleersysteem waardoor zowel een nivelleersysteem met openingen in de deur als een nivelleersysteem met korte omloopriolen beschouwd wordt.

Onderhavig advies is als volgt opgebouwd:

In hoofdstuk 2 worden de randvoorwaarden uit het ontwerp in kader van SHIP vergeleken met de randvoorwaarden voor het complex project nieuwe sluis Zeebrugge. Een korte beschrijving van de hydraulisch ontwerpen van het nivelleersysteem uitgevoerd in kader van SHIP wordt gegeven in hoofdstuk 3. Een eerste inschatting van de benodigde doorstroomsectie wordt gemaakt op basis van een formule uit de literatuur, zie hoofdstuk 4. Vervolgens wordt met deze ingeschatte doorstroomsectie per type nivelleersysteem een nieuwe hydraulische simulatie uitgevoerd. Resultaten van deze nieuwe simulaties worden gegeven in hoofdstuk 5. Uit een voorstudie voor het nivelleersysteem met openingen in de deur uitgevoerd door EBS volgt een maximum haalbare doorstroomsectie. De resultaten van een bijkomende simulatie met deze maximum haalbare doorstroomsectie worden gegeven in hoofdstuk 6. Het besluit en aanbevelingen voor het vervolg van het ontwerp worden gegeven in hoofdstuk 7.

2 Randvoorwaarden

De randvoorwaarden voor de nieuwe sluis in kader van het complex project worden in Tabel 1 vergeleken met de randvoorwaarden uit het ontwerp in kader van SHIP. Bemerkt dat de randvoorwaarden voor het complex project beschouwd dienen te worden als de randvoorwaarden zoals gekend bij het schrijven van dit rapport.

Tabel 1 – Randvoorwaarden hydraulisch ontwerp nieuwe sluis Zeebrugge

	eenheid	project		
		SHIP		complex project
dimensies kolk				
lengte (tussen uiterste roldeuren)	[m]	390		427
breedte	[m]	45		55
kolkoppervlak	[m ²]	17550		23485
oppervlak deuren + roldeuren	[m ²]	2845		3337
te nivelleren oppervlak	[m ²]	20395		26822
bodempeil kolk	[m TAW]	-12.5		-15.1
afstand boeg schip tot sluisdeur	[m]	centraal in kolk		50 m
ontwerpschip				
type	[-]	car carrier		car carrier
Naam		Tomar	Tonsberg	carCar_265_400_NSZ
lengte	[m]	200	265	265
breedte	[m]	32.65	32.26	40
diepgang	[m]	11.00	12.30	12.5
blockcoëfficiënt	[-]	0.56	0.71	0.63
maatgevende waterpeilen en dichtheidsverschil				
peil achterhaven	[m TAW]	0.02		0.02
peil voorhaven	[m TAW]	3.50		3.50
verval	[m]	3.48		3.48
dichtheidsverschil tussen voor- en achterhaven	[kg/m ³]	≈ 0		≈ 0
criteria				
nivelleertijd	[min]	15.0		18.0
maximale stijg- daalsnelheid kolkpeil	[m/s]	vullen 0.009 ledigen 0.008 ^[1]		vullen 0.009 ledigen 0.008
extremum langskracht op schip	[‰]	Zie tabel 3		Zie tabel 3

De vergelijking tussen de randvoorwaarden voor het hydraulisch ontwerp uit Tabel 1 wordt hieronder per item (kolkdimensies, ontwerpschip, maatgevende waterpeilen en dichtheidsverschil en criteria) verder besproken.

¹ Bepaald op basis van voorkomende stijg- en daalsnelheden in de Berendrechtsluis, zie Vercruyse *et al.* (2017)

Dimensies kolk

De kolk lengte is met ca. 9 % toegenomen en de kolk breedte is met 22 % toegenomen. Dit resulteert in een toename van het kolkoppervlak met 32 %. Het bodempeil van de kolk is met 2.6 m afgenomen tot -15.1 m TAW. Bemerk in Tabel 1 dat het te nivelleren oppervlak bestaat uit het oppervlak van de kolk en een mee te nivelleren oppervlak van een aantal deurkamers, afhankelijk van de gebruikte deurcombinatie, en de binnenzijde van één roldeur. De oppervlakte berekening van het bijkomend te nivelleren oppervlak wordt gegeven in Tabel 2. Voor het ontwerp in het kader van SHIP wordt deze overgenomen uit Vercruyssen *et al.* (2017). Bemerk dat de sluis voor het complex project 10 m breder is. Als aanname wordt hiervoor zowel de lengte van de deurkamer als de lengte van de roldeur verlengd met 10 m ten opzichte van de in het ontwerp in het kader van SHIP gehanteerde afmetingen.

Tabel 2 – Bijkomend te nivelleren oppervlak

		SHIP	complex project
deurkamer	lengte	61.3	71.3
	breedte	12.9	12.9
	oppervlak	790.8	919.8
roldeur	lengte	45.0	55.0
	breedte	10.5	10.5
	oppervlak	472.5	577.5
uiterste deurcombinatie (= 3 * deurkamer + 1 * roldeur)	Σ	2844.8	3336.8
binnenste deurcombinatie (= 1 * deurkamer + 1 * roldeur)	Σ	1263.3	1497.3

Ontwerpschip

Voor het ontwerp in het kader van SHIP werd een maatgevend schip en een exceptioneel schip beschouwd. Het exceptioneel schip kon hierbij niet verschut worden bij het maatgevend laag peil in de voorhaven. Door het verdiepen van het bodempeil van de kolk tot -15.1 m TAW kan het exceptioneel schip uit het ontwerp in het kader van SHIP in het nieuw ontwerp ook bij het maatgevend laag peil verschut worden. Door MBZ is beslist om als maatgevend schip bij het ontwerp het schip uit de studie “Nieuwe Sluis Zeebrugge (NSZ) - Nautische screening alternatieven met vaarsimulaties” (Vos *et al.*, 2017) over te nemen. Uit overleg met nautische experts van WL volgde dat de block coëfficiënt van dit schip, 0.49, aan de lage kant is. Om die reden werd besloten om een block coëfficiënt 0.63 toe te passen voor dit maatgevend schip. Deze waarde zal vermoedelijk ook gebruikt worden bij verdere nautische simulaties met dit schip. In overleg met aMT werd besloten om voor het hydraulisch ontwerp een diepgang 12.5 m te hanteren.

Maatgevende waterpeilen en dichtheidsverschil

De maatgevende waterpeilen uit het ontwerp in kader van SHIP blijven behouden voor het nieuwe ontwerp. Bij zeesluizen kan een dichtheidsverschil optreden tussen het water in de kolk en het water uit het pand waarnaar genivelleerd wordt. Om het dichtheidsverschil tussen de achter- en voorhaven van Zeebrugge in kaart te brengen heeft WL in 2018 langdurige dichtheidsmetingen uitgevoerd (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2019). Omwille van meettechnische redenen was de onzekerheidsband op deze metingen groter dan initieel begroot. Rekening houdend met deze onzekerheidsband wordt een vermoedelijk maximaal dichtheidsverschil van 4 a 6 kg/m³ begroot tussen voor- en achterhaven. Ervaring met het ontwerp van de Nieuwe Sluis Terneuzen leert dat bij dergelijke lage dichtheidsverschillen de invloed van het dichtheidsverschil op de krachten op schepen tijdens nivelleren veelal verwaarloosd kan worden.

Criteria nivelleren

De nivellering dient uitgevoerd te worden binnen een zo kort mogelijke tijd. De stijg- en daalsnelheid van het kolkpeil en de krachten die de schepen ondervinden dienen hierbij echter onder bepaalde maatgevende waarden te blijven. Bij het ontwerp in het kader van SHIP bedroeg de maximale nivelleertijd 15.0 min. Voor de nieuwe sluis wordt een nivelleertijd tussen 12.0 min en 18.0 min, afhankelijk van het verval bij aanvang nivelleren, vooropgesteld. In deze fase van de studie wordt de analyse beperkt tot het maatgevend waterpeil. Bijgevolg wordt de maximale nivelleertijd van 18.0 min beschouwd. Voor de stijg- en daalsnelheid van het waterpeil in de sluis kolk werden voor het ontwerp in kader van SHIP geen criteria opgelegd. Wel wordt vergeleken met de door WL opgemeten stijg- en daalsnelheden in de Berendrechtssluis (De Mulder *et al.*, 2008; De Mulder & Vercruyssen, 2007). De toelaatbare kracht wordt veelal uitgedrukt als de verhouding van de hydrodynamische kracht in longitudinale richting ten opzichte van de totale verplaatste watermassa van het schip. Voor zeeschepen zijn geen eenduidige richtlijnen beschikbaar. In de ontwerpstudies in het kader van SHIP (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2017; Verelst *et al.*, 2012) werden voor de langskracht drie criteria gehanteerd: een criterium uit de literatuur, een criterium opgesteld op basis van simulaties van een soortgelijke sluis en een criterium opgesteld op basis van door WL uitgevoerde metingen van de langse waterspiegelhelling in een relevante sluis tijdens nivelleren. In deze studie wordt de criteria uit het recentere rapport voor het nivelleersysteem met korte omloopriolen (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2017) overgenomen, zie Tabel 3. Het eerste en derde criterium voor de langskracht zijn zowel van toepassing voor het ontwerp van een nivelleersysteem met openingen in de deur als voor het ontwerp van een nivelleersysteem met korte omloopriolen. Het tweede criterium, simulaties van een soortgelijke sluis, is enkel van toepassing voor een ontwerp met korte omloopriolen. Bemerk dat ook voor openingen in de deuren vergeleken kan worden met een soortgelijk schip verschut in een soortgelijke sluis. Aangezien de Vandammesluis een zeer lange nivelleertijd heeft, kan deze niet voor zulke vergelijking gebruikt worden en dient hiervoor bij voorkeur gekeken te worden naar andere sluisen in het buitenland. Bemerk dat voor het ontwerp in het kader van SHIP een verschillend criterium werd gehanteerd voor het ontwerpschip, het schip Tomar, als voor het exceptioneel schip, het schip Tonsberg. De karakteristieken van het nieuwe ontwerpschip komen beter overeen met het schip Tonsberg dan met het schip Tomar. Voor het uitvoeren van het hydraulisch ontwerp voor de nieuwe sluis dienen de criteria voor de langskracht opnieuw opgesteld te worden voor het nieuwe ontwerpschip. Aangezien de verschillen beperkt worden geacht, worden in deze fase van het onderzoek de criteria horende bij het schip Tonsberg overgenomen voor het nieuwe ontwerpschip. Ter vergelijking: Bij het ontwerp van de Nieuwe Sluis Terneuzen wordt voor een bulk carrier met dezelfde afmetingen en dezelfde diepgang een maximale langskracht op het schip van 0.24 ‰ beschouwd (Nogueira et al (2019)).

Tabel 3 – Criteria langskracht toegepast in het ontwerp in kader van SHIP voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen

project	schip	criterium 1	criterium 2	criterium 3
		literatuur	LOCKSIM simulatie Berendrechtssluis	meting langse waterspiegelhelling Vandamme sluis
toepasbaarheid		opening in deuren & korte omloopriolen	korte omloopriolen	opening in deuren & korte omloopriolen
SHIP	Tomar (ontwerp schip)	0.20 ‰	0.30 ‰	0.40 ‰
	Tonsberg (exceptioneel schip)	0.15 ‰	0.30 ‰	0.30 ‰
complex project	carCar_265_400_NSZ	0.15 ‰	0.30 ‰	0.30 ‰

3 Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem in het kader van SHIP

In onderhavig hoofdstuk worden de door WL uitgevoerde hydraulische ontwerpstudies voor een nivelleersysteem in kader van SHIP kort toegelicht. Het ontwerp voor een nivelleersysteem met openingen in de deur wordt besproken in paragraaf 3.1. Het ontwerp voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen wordt besproken in paragraaf 3.2.

Bemerkt dat de bespreking in dit hoofdstuk beperkt is tot een korte beschrijving van de geometrie, het gebruikte programma voor de simulaties en de toepasbaarheid van de simulaties en resultaten voor de nieuw te ontwerpen sluis in kader van het complex project. Voor de details wordt verwezen naar de betreffende rapporten. Bijkomend wordt voor beide ontwerpen een referentie case geselecteerd die zal gebruikt worden voor de in hoofdstuk 4 beschreven inschatting van de benodigde doorstroomsectie.

3.1 Openingen in de deur

De hydraulische simulaties voor het nivelleersysteem met openingen in de deuren werden uitgevoerd met behulp van het WL programma VUL_SLUIS. Dit (Matlab) programma - ontwikkeld op basis van de beschikbare literatuur in verband met het programma LOCKFILL (ontwikkeld door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat) en gevalideerd met meetgegevens uit de literatuur en met bijkomende meetgegevens van WL - berekent de langskrachten op schepen ten gevolge van het nivelleren van de sluis via openingen in de deuren. Hierbij moet opgemerkt worden dat het programma VUL_SLUIS, vooral met betrekking tot de berekening van de krachten op schepen, nog in ontwikkeling is. Voor de hydraulische simulaties met het nivelleersysteem in het kader van SHIP zijn 2 verschillende versies van het programma zijn gebruikt (namelijk release 01.42.vA.02 en 01.42.vB.02). Deze beide versies geven identiek dezelfde resultaten wat betreft het debiet door de vulopeningen, de variatie van het waterpeil in de sluiskolk en de optredende end-to-end waterspiegelhellingen. De verschillen tussen beide versies betreffen de formulering voor het berekenen van de langskrachten op het schip. Sindsdien is verder gewerkt aan de ontwikkeling van het programma VUL_SLUIS. De simulaties voor een nivelleersysteem met openingen in de deur in kader van het complex project zullen uitgevoerd worden met de laatste release van het programma VUL_SLUIS namelijk release 01.54.00 (Verelst et al., 2017). In VUL_SLUIS release 01.54.00 wordt nog slechts één formulering voor het berekenen van de langskracht op het schip toegepast.

Uit het hydraulisch ontwerp voor een nivelleersysteem met openingen in de deur uitgevoerd in kader van SHIP werd een nivelleersysteem bestaande uit rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven weerhouden. De hefschuiven hebben een totale breedte 30.2 m en een hoogte tussen 1.3 m en 2.0 m. Aanbevolen werd om de openingen zo laag mogelijk te plaatsen. Voor de studie werd verondersteld dat de onderzijde van de openingen samenvalt met de bovenzijde van de onderregel van de roldeur (i.e. -11.23 m TAW). Hierbij werden een aantal openingswetten voorgesteld waarbij ook de hoogte van de openingen werd gewijzigd. Uit deze simulaties wordt de openingswet 'vopen3' weerhouden met een hoogte 1.3 m voor de openingen als referentiecasse. De nivelleertijd bedroeg hierbij 17.3 min wat beperkt sneller is dan het criterium van 18.0 min gehanteerd voor het nieuwe ontwerp in kader van het complex project. Het extremum van de langskracht op het ontwerpschip bedroeg 0.17 ‰. Deze waarde benadert het conservatieve criterium van 0.15 ‰, volgend uit de literatuur, voor het schip Tonsberg.

3.2 Korte omloopriolen

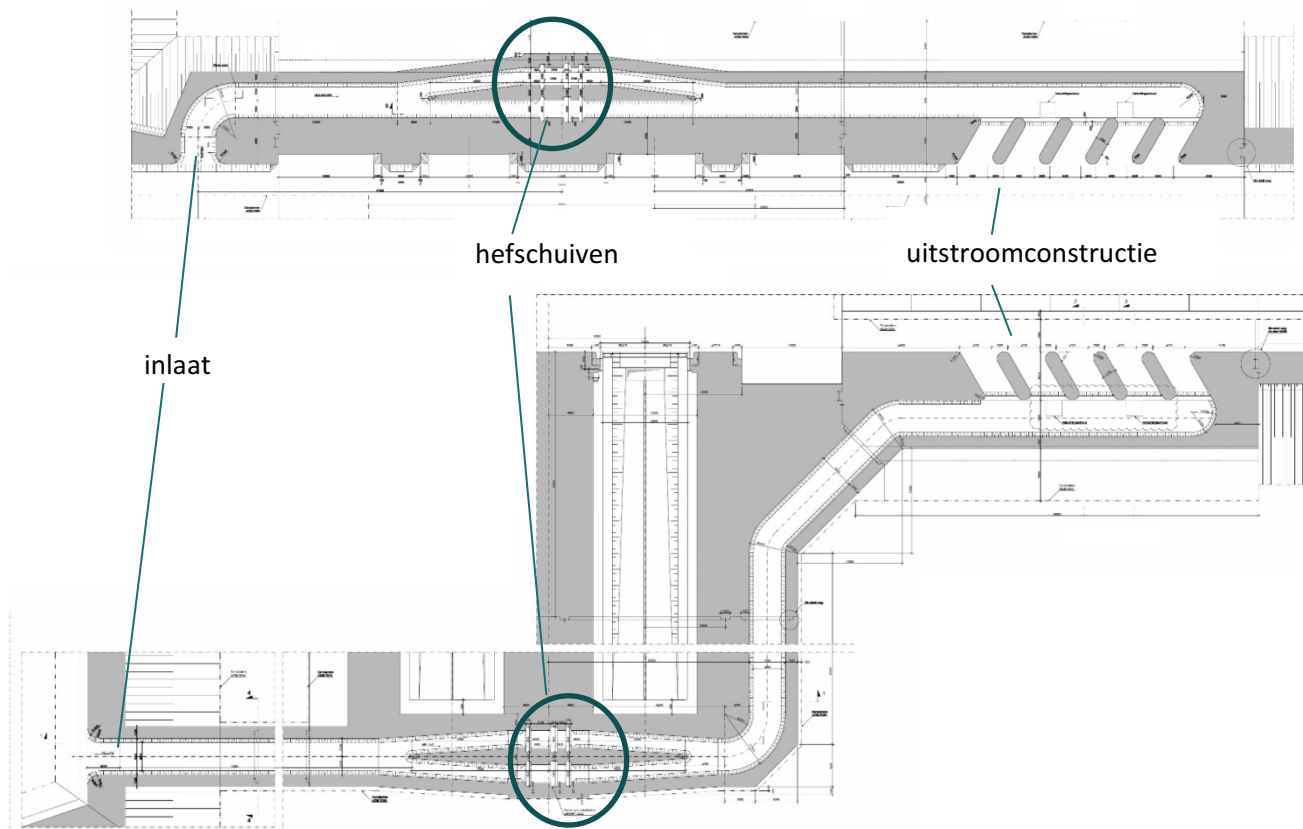
Het ontwerp van het nivelleersysteem met korte omloopriolen wordt beschreven in Vercruyssen *et al.* (2017). Voor deze studie werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld van de omloopriolen en de sluiscolk. Dit hydraulisch netwerkmodel wordt gesimuleerd met het programma LOCKSIM (Schohl G.A., 1998). Dit programma werd ter beschikking gesteld van WL door de ontwikkelaar Dr. G. Schohl (Tennessee Valley Authority, USA). LOCKSIM wordt courant gebruikt voor sluismodellering door de USACE (U.S. Army Corps of Engineers). De simulaties met het nivelleersysteem in kader van SHIP werden uitgevoerd met LOCKSIM Windows Version 1.21. Voor de nieuwe simulaties in kader van het complex project zal dezelfde versie gebruikt worden.

De geometrie van het nivelleersysteem met korte omloopriolen wordt gegeven in Figuur 2. Bemerkt dat het ontwerp gebaseerd is op het ontwerp van het nivelleersysteem van de zeesluizen in haven van Antwerpen. De voornaamste wijziging ten opzichte van de zeesluizen in de haven van Antwerpen is dat de twee inlaten hier niet tegenover elkaar dwars op de colk-as uitmonden. Omwille van plaatsgebrek was dit niet mogelijk bij het ontwerp in het kader van SHIP.

In het kader van het hydraulisch ontwerp van dit nivelleersysteem zijn volgende simulaties uitgevoerd:

1. Met behulp van 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) is de invloed van de positionering van de inlaten op het stromingspatroon in de voorhaven onderzocht. Hiervoor zijn drie varianten gesimuleerd. De CFD-simulaties toonden aan dat de variant waarbij de twee inlaten tegenover elkaar uitmonden ervoor zorgt dat de stroomsnelheid in de voorhaven merkbaar lager is.
2. CFD-simulaties van de lange omloopriool en van de uitstroming in de colk bij vullen. Uit deze CFD simulaties volgde dat de beschouwde geometrie van de uitstroomconstructie zorgt voor een goede verdeling van het debiet over de breedte van de uitstroomconstructie. Ook werden uit deze simulaties de verliescoëfficiënten afgeleid die gebruikt kunnen worden voor het opzetten van een hydraulisch netwerkmodel van het nivelleersysteem.
3. Hydraulische simulaties met het volledige nivelleersysteem met LOCKSIM. Hiervoor werden twee reeksen simulaties uitgevoerd. De eerste reeks betroffen initiële simulaties ter bepaling van de benodigde doorstroomsectie. Hierbij werd een doorstroomsectie 16.0 m², 20.25 m² en 25.0 m² per omloopriool beschouwd. Op basis van deze initiële simulaties werd een doorstroomsectie 16.0 m² per omloopriool weerhouden voor het verdere ontwerp. Voor deze doorstroomsectie werd vervolgens een constructief voorontwerp van de omloopriolen uitgevoerd. Met de geometrie volgend uit dit constructief voorontwerp werd een tweede reeks simulaties uitgevoerd. Hierbij werd de colk bij het maatgevend peil en het ontwerpschip in de colk gevuld in 16.7 tot 18.2 minuten en geledigd in 18.9 tot 19.6 min, afhankelijk van het gehanteerde criterium voor de langskracht. Omwille van het beëindigen van SHIP tijdens het uitvoeren van de CFD simulaties werden de verliezen van het netwerkmodel niet meer bijgewerkt met de resultaten van de CFD simulaties. Als referentiecasi wordt simulatie nr. 13 uit de tweede reeks gebruikt. Hierbij wordt de colk gevuld in 18.2 minuten en bedraagt de langskracht op het ontwerpschip Tonsberg 0.19 ‰ wat overeenkomt met het criterium volgend uit de literatuur, zie Tabel 3.

Figuur 2 – sluis SHIP – geometrie benedenhoofd voor ontwerp met korte omloopriolen



4 Inschatting doorstroomsectie aan hand van literatuurformules

In vorig hoofdstuk is zowel voor een ontwerp van een nivelleersysteem met openingen in de deuren als voor een ontwerp van een nivelleersysteem met korte omloopriolen in het kader van SHIP een referentiecasse geselecteerd, waarvoor de nivelleertijd ca. 18.0 min bedraagt en waarbij de berekende langskrachten op het schip in de kolk lager zijn dan het betreffende criterium. Deze cases zullen gebruikt worden om een eerste inschatting te maken van de doorstroomsectie van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis in het kader van het complex project.

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 2	[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]

Voor het ontwerp van de sluis in kader van SHIP en het complex project is in bovenstaande uitdrukking het verval identiek, zie Tabel 1. Voor het maken van een eerste inschatting van de doorstroomsectie worden, zowel voor het ontwerp met openingen in de deur als voor het ontwerp met korte omloopriolen, referentiecasses beschouwd waarbij de nivelleertijd ca. 18.0 min bedraagt. Op deze wijze is ook de nivelleertijd voor het ontwerp in kader van SHIP en het ontwerp in het kader van het complex project identiek. 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:

$$A_{cp} = \frac{S_{cp}}{S_{SHIP}} \cdot A_{SHIP} = \frac{26822}{20395} \cdot A_{SHIP} = 1.32 \cdot A_{SHIP}$$

Met:

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

Uit bovenstaande volgt dat de benodigde doorstroomsectie voor het ontwerp van het nivelleersysteem in kader van het complex project 32 % groter dient te zijn dan de doorstroomsectie van het nivelleersysteem uit het ontwerp in kader van SHIP. Bemerkt dat dit zowel van toepassing is voor het ontwerp met openingen in de deur (Verelst *et al.*, 2012) als voor het ontwerp met korte omloopriolen (J. B. Vercruyssen *et al.*, 2017).

De inschatting van de benodigde doorstroomsectie voor een nivelleersysteem met openingen in de deur voor de nieuwe sluis in kader van het complex project wordt gegeven in Tabel 4. Als referentiecasi uit het ontwerp in het kader van SHIP wordt een nivelleersysteem met openingen in de deur met een totale breedte gelijk aan 30.20 m en een hoogte gelijk aan 1.30 m beschouwd. Bij het toepassen van een factor 1.32 dient de doorstroomsectie van 39.3 m² uit de referentiecasi toe te nemen tot 51.6 m². Bij behoud van de relatieve breedte van de openingen (= breedte openingen / breedte kolk) wordt voor het ontwerp van de sluis in het kader van het complex project een totale breedte van de openingen van 36.9 m en een hoogte van de openingen van 1.40 m bekomen.

Tabel 4 – Benodigde doorstroomsectie nivelleersysteem met openingen in de deur

	eenheid	SHIP	complex project
breedte openingen	m	30.20	36.85
breedte kolk	m	45.00	55.00
$b_{\text{opening}}/b_{\text{kolk}}$	-	0.67	0.67
hoogte opening	m	1.30	1.40
doorstroomsectie openingen	m ²	39.3	51.6

De inschatting van de benodigde doorstroomsectie voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen voor de nieuwe sluis in kader van het complex project wordt gegeven in Tabel 5. Als referentiecasi uit het ontwerp in het kader van SHIP wordt een nivelleersysteem beschouwd bestaande uit twee korte omloopriolen elk met sectie 16.0 m². Bij het toepassen van een factor 1.32 dient de doorstroomsectie van 16.0 m² per riool uit de referentiecasi toe te nemen tot 21.12 m². Bij een vierkante sectie komt dit overeen met twee riolen met sectie 4.6 m x 4.6 m (bxh).

Tabel 5 – Benodigde doorstroomsectie nivelleersysteem met korte omloopriolen

	eenheid	SHIP	complex project
rioolhoogte	m	4.00	4.60
Rioolbreedte	m	4.00	4.60
sectie per riool	m ²	16.00	21.16
totale sectie	m ²	32.00	42.32

5 Initiële hydraulische simulaties nivelleersysteem

In voorgaand hoofdstuk werd aan de hand van een literatuurformule de doorstroomsectie uit het ontwerp in het kader van SHIP verschaald naar de benodigde doorstroomsectie voor de nieuwe sluis in kader van het complex project. In dit hoofdstuk wordt per type nivelleersysteem één simulatie met deze doorstroomsectie uitgevoerd. Hierbij werd het numeriek model opgesteld voor het ontwerp in het kader van SHIP bijgewerkt met de nieuwe dimensies van de kolk, de afmetingen van het ontwerpschip uit Tabel 1 en de benodigde doorstroomsectie uit vorig hoofdstuk. De openingswetten blijven hierbij initieel behouden. De simulaties worden uitgevoerd voor vullen via het bovenhoofd met de uiterste deurcombinatie. Hierbij dient in het bovenhoofd (zijde achterhaven) het oppervlak van één deurkamer mee genivelleerd te worden en in het benedenhoofd (zijde voorhaven) het oppervlak van twee deurkamers en de binnen oppervlakte van één roldeur. Het doel van deze simulaties is nagaan of de nivelleertijd van 18.0 min gehaald kan worden met de doorstroomsectie uit de eerste inschatting van het nivelleersysteem.

5.1 Nivelleeropeningen in de deur

Voor de nieuwe VUL_SLUIS simulaties worden de dimensies van de kolk, de bijkomend te nivelleren oppervlakken en de afmetingen van het schip overgenomen uit Tabel 1 en Tabel 2. De karakteristieken van het nivelleersysteem worden gegeven in Tabel 6. Bemerkt dat de karakteristieken in deze tabel niet gebaseerd zijn op een constructief ontwerp. Aangenomen wordt dat geen breekbalken worden toegepast en dat door de breedte van de deur de stroming bij uitstroming ook bij gedeeltelijk geopende schuiven uitgespreid is over de volledige doorstroomsectie. De boeg van het schip bevindt zich in de simulaties op 50 m van de voor nivelleren gebruikte deur.

Tabel 6 –Nivelleersysteem met openingen in de deur - karakteristieken

totale openingsbreedte	m	36.85
hoogte openingen	m	1.4
oppervlak openingen	m ²	51.59
peil kolkbodem	m TAW	-15.1
afstand tussen onderzijde opening en kolkbodem	m	1.5
center opening	m TAW	-12.9
afvoercoëfficiënt (Schwanenberg & Jongeling, 2003)	-	0.70 bij HS=0.0 0.65 bij HS=1.0
bovenkant breekbalken + peil uitstroomopening	m TAW	-12.2
doorstroomsectie bij uitstroming	m ²	51.59
extra te nivelleren oppervlak bovenhoofd	m ²	919.8
extra te nivelleren oppervlak benedenhoofd	m ²	2417.1

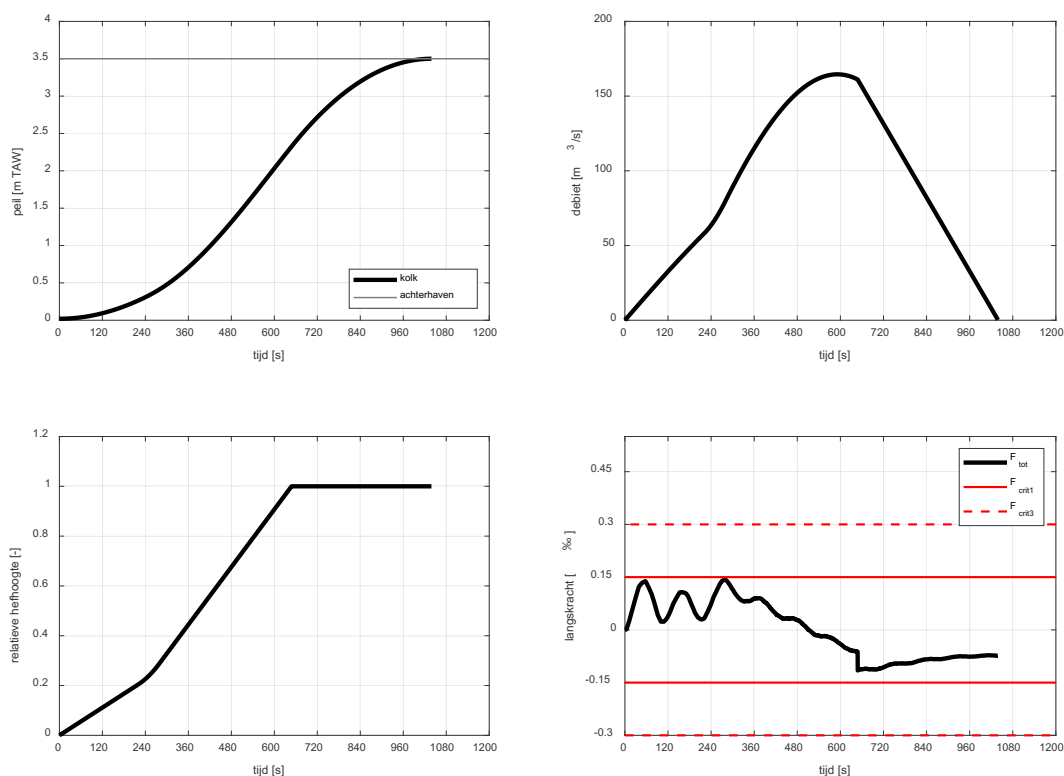
De simulatie wordt uitgevoerd met openingswet 'vopen3' uit Verelst *et al.* (2012), zie Tabel 7.

Tabel 7 – Nivelleersysteem met openingen in de deur – openingswet

tijd [s]	snelheid [m/s]	relatieve hefhoogte [-]
0	0.0013	0.00
220	0.0013	0.22
280	0.0027	0.26
665	0.0027	1.00

De uitkomst van deze simulatie wordt gegeven in Figuur 3 en samengevat in Tabel 8.

Figuur 3 – Resultaat simulatie nivellere door middel van deuropeningen



Tabel 8 – Karakteristieken simulatie nivellere door middel van openingen in de deuren.

startpeil	m TAW	+0.02
eindpeil	m TAW	+3.50
nivelleertijd	min	17.3
maximaal debiet	m ³ /s	165
maximale stijgsnelheid	m/s	0.006
maximale langskracht	‰	0.14
minimale langskracht	‰	-0.12

Bemerk uit Figuur 3 en Tabel 8 dat de gesimuleerde nivelleertijd 0.7 min sneller is dan de door de opdrachtgever vooropgestelde maximale nivelleertijd van 18.0 min. De maximale stijgsnelheid van het kolkpeil bedraagt 0.006 m/s wat lager is dan het criterium van 0.009 m/s bij vullen. Het absoluut extremum van de langskracht bedraagt 0.14 ‰ wat beperkt lager is dan het criterium volgend uit de literatuur (= 0.15 ‰, zie Tabel 3). Uit het verloop van de krachten volgt dat de, uit het SHIP ontwerp overgenomen, openingswet optimaal functioneert voor de nieuwe simulatie en dus niet verder geoptimaliseerd kan worden bij het respecteren van het criterium voor de langskracht volgend uit de literatuur.

5.2 Korte omloopriolen

Voor de nieuwe LOCKSIM simulaties worden de dimensies van de kolk, de bijkomend te nivelleren oppervlakken en de afmetingen van het schip overgenomen uit Tabel 1 en Tabel 2. De boeg van het schip bevindt zich bij deze simulaties op 50 m van de roldeur van het voor nivelleren gebruikte sluishoofd. Het nivelleersysteem wordt overgenomen van sim nr. 13 uit Vercruyssen et al. (2017). Hierbij wordt ook de in Tabel 10 gegeven openingswet overgenomen. Merk op dat voor sim nr. 13 het hydraulisch netwerk model nog niet bijgewerkt was met de verliescoëfficiënten volgend uit de CFD modellering.

Tabel 9 – Nivelleersysteem met korte omloopriolen – doorstroomsectie

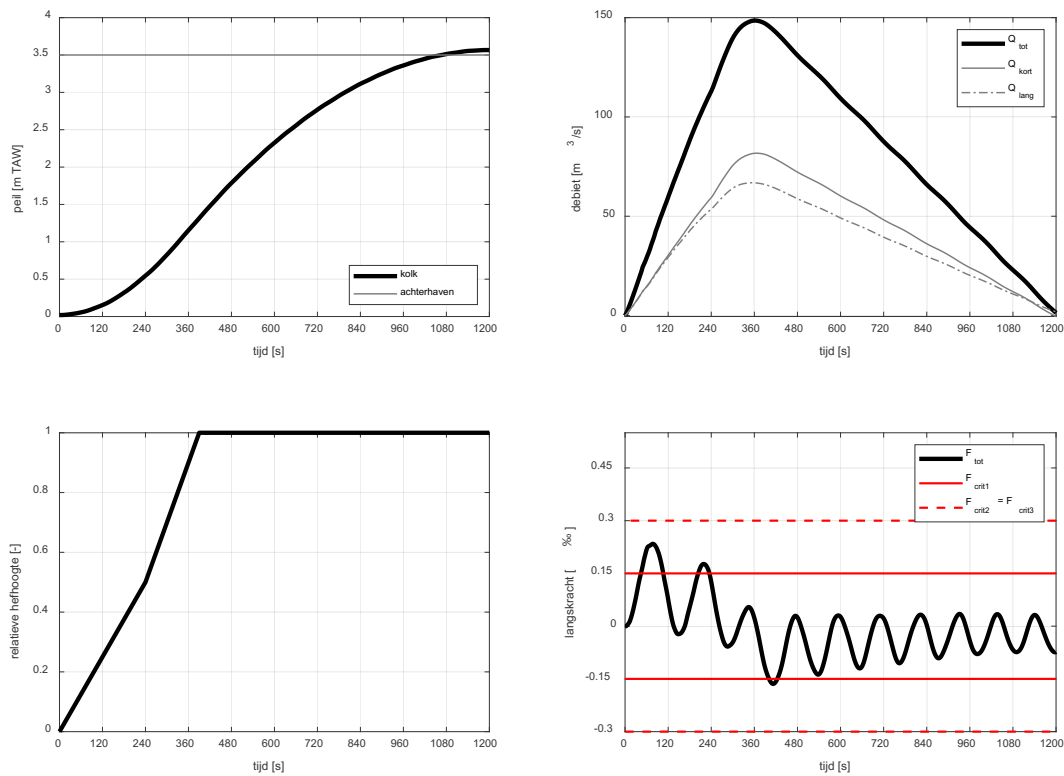
	eenheid	riool	ter hoogte van schuiven
breedte	m	4.6	2.3
hoogte	m	4.6	4.6
sectie	m ²	21.16	10.58
hydraulische straal	m	4.60	3.07

Tabel 10 – Nivelleersysteem met korte omloopriolen – openingswet

tijd	relatieve hefhoogte	hefhoogte	hefsnelheid
[s]	[-]	[m]	[m/s]
0	0	0	0.0096
240	0.5	2.3	0.0153
390	1	4.6	0.0000

De uitkomst van deze simulatie wordt gegeven in Figuur 4 en samengevat in Tabel 11.

Figuur 4 – Resultaat simulatie nivelleren door middel van korte omloopriolen



Tabel 11 – Karakteristieken simulatie nivelleren door middel van korte omloopriolen

startpeil	[m TAW]	0.02
eindpeil	[m TAW]	3.50
nivelleertijd	[min]	17.8
maximaal debiet	[m ³ /s]	149
maximale stijgsnelheid	[m/s]	0.006
maximale langskracht	[‰]	0.23
minimale langskracht	[‰]	-0.16

Bemerk uit Figuur 4 en Tabel 11 dat de gesimuleerde nivelleertijd, 17.8 min, samenvalt met het criterium voor de nivelleertijd, 18.0 min. De maximale stijgsnelheid van het kolkpeil bedraagt 0.006 m/s wat lager is dan het criterium van 0.009 m/s bij vullen. Het absoluut extremum van de langskracht bedraagt 0.23 ‰ wat hoger is dan het conservatievere criterium, 0.15 ‰, volgend uit de literatuur maar lager dan de minder conservatieve criteria op basis van simulaties in een soortgelijke sluis of op basis van metingen van de langse waterspiegelhelling in situ, beide 0.30 ‰. Indien het conservatievere criterium gehanteerd wordt dient de openingswet vertraagd te worden waardoor het criterium voor de nivelleertijd overschreden zal worden. Indien het minder conservatieve criterium voor de langskracht gehanteerd wordt kan de openingswet nog versneld worden wat zal resulteren in een afname van de nivelleertijd.

6 Bijkomende simulatie voor een nivelleersysteem met openingen in de deur

Expertise Beton en Staal (EBS) heeft een voorstudie uitgevoerd naar de haalbaarheid van het in paragraaf 5.1 voorgestelde nivelleersysteem met openingen in de deur. Uit deze voorstudie volgde dat een nivelleersysteem met 9 openingen met diameter 2.0 m beschouwd kan worden als maximum haalbaar. De hieruit volgende doorstroomsectie bij volledige geopende hefschuiven/vlinderkleppen bedraagt 28.3 m². Bemerk dat deze doorstroomsectie 45 % kleiner is dan de in de initiële simulaties voorgestelde doorstroomsectie voor een nivelleersysteem met openingen in de deur, zijnde 51.6 m².

In dit hoofdstuk wordt een bijkomende simulatie met het programma VUL_SLUIS uitgevoerd voor een nivelleersysteem met openingen in de deur met deze maximaal haalbare doorstroomsectie.

De karakteristieken van het nivelleersysteem worden gegeven in Tabel 12. Aangenomen wordt dat geen breekbalken worden toegepast en dat door de breedte van de deur de stroming bij uitstroming ook bij gedeeltelijk geopende schuiven of kleppen uitgespreid is over de volledige doorstroomsectie. De boeg van het schip bevindt zich in de simulaties op 50 m van de voor nivellereen gebruikte deur. Voor de simulaties wordt er vanuit gegaan dat vlinderkleppen toegepast worden. Voor de afvoercoëfficiënt van het nivelleersysteem wordt de waarde afgeleid uit metingen uitgevoerd in de sluis te Zemst na renovatie van de middendeur (J. B. Vercruyse *et al.*, 2015) beschouwd, zie bijlage A. Bemerk dat de afvoercoëfficiënt bij volledige geopende vlinderkleppen, 0.74, in lijn ligt met de voor de initiële simulaties gehanteerde afvoercoëfficiënt 0.70 voor een nivelleersysteem met rechthoekige openingen in de deur afgesloten door hefschuiven.

Tabel 12 – Nivelleersysteem met openingen in de deur met max. haalbare doorstroomsectie - karakteristieken

aantal openingen	m	9
diameter opening	m	2.00
oppervlak openingen	m ²	28.27
peil kolkbodem	m TAW	-15.1
afstand tussen onderzijde opening en kolkbodem	m	1.5
center opening	m TAW	-12.6
afvoercoëfficiënt (Schwanenberg & Jongeling, 2003)	-	o.b.v. metingen sluis Zemst, zie bijlage A
bovenkant breekbalken + peil uitstroomopening	m TAW	-11.6
doorstroomsectie bij uitstroming	m ²	28.27
extra te nivellereen oppervlak bovenhoofd	m ²	919.8
extra te nivellereen oppervlak benedenhoofd	m ²	2417.1

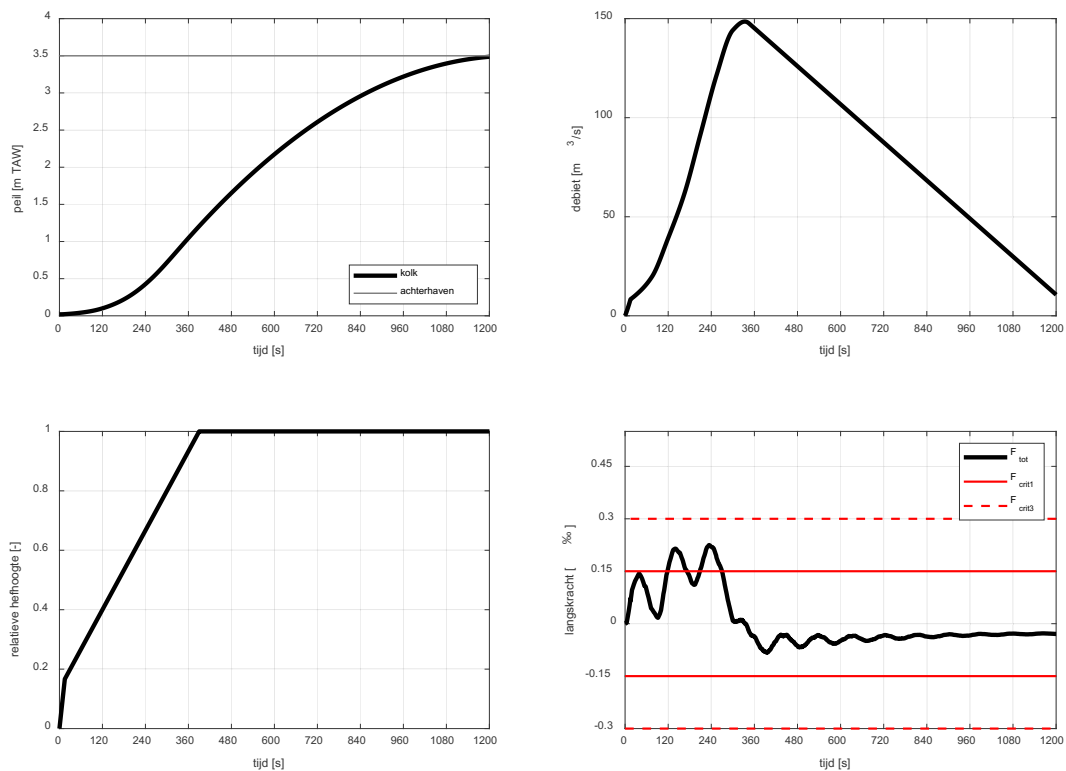
Bemerk dat bij vlinderkleppen tot een openingshoek ca. 15° a 20° de debietstoename bij een toename van de klephoek relatief beperkt is. Om de nivellering niet onnodig traag te laten aanvangen wordt gekozen om voor de openingswet een eerste snelle fase toe te passen tot een openingshoek 15° gevolgd door een tweede tragere fase tot de klep volledig geopend is. De hoeksnelheden zijn zo gekozen dat de piek van de maximale langskracht zich tussen het conservatie en minder conservatieve criterium bevindt. Een doorgedreven optimalisatie werd niet uitgevoerd.

Tabel 13 – Nivelleersysteem met openingen in de deur met maximum haalbare doorstroomsectie – openingswet

tijd	Hoeksnelheid	Openingshoek	Relatieve openingshoek
[s]	[°/s]	[°]	[-]
0-15	1.0	0 – 15	0.00 – 0.17
15-390	0.2	15 – 90	0.17 – 1.00

De uitkomst van deze simulatie wordt gegeven in Figuur 5 en samengevat in Tabel 14.

Figuur 5 – Resultaat simulatie nivelleersysteem met openingen in de deur met max. haalbare doorstroomsectie



Tabel 14 – Karakteristieken simulatie nivelleersysteem met openingen in de deur met maximum haalbare doorstroomsectie

startpeil	m TAW	0.02
eindpeil	m TAW	3.50
nivelleertijd	min	21.1
maximaal debiet	m ³ /s	149
maximale stijgsnelheid	m/s	0.006
maximale langskracht	‰	0.22
minimale langskracht	‰	-0.08

Bemerk uit Figuur 5 en Tabel 14 dat de gesimuleerde nivelleertijd 21.1 min bedraagt wat 3.1 min langer is dan de door de opdrachtgever vooropgestelde nivelleertijd van 18.0 min. De maximale stijgsnelheid van het kolkpeil bedraagt 0.006 m/s wat lager is dan het criterium van 0.009 m/s bij vullen. Het absoluut extremum van de langskracht bedraagt 0.22 ‰ wat hoger is dan het conservatievere criterium, 0.15 ‰, volgend uit de literatuur maar lager dan het minder conservatieve criterium, 0.30 ‰, op basis van metingen van de langse waterspiegelhelling in situ. Indien het conservatievere criterium gehanteerd wordt dient de openingswet vertraagd te worden waardoor het criterium voor de nivelleertijd overschreden zal worden. Indien het minder conservatieve criterium voor de langskracht gehanteerd wordt kan de openingswet nog versneld worden wat zal resulteren in een afname van de nivelleertijd.

7 Conclusies

In kader van het complex project nieuwe sluis Zeebrugge vraagt afdeling Maritieme Toegang (aMT) ondersteuning aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL). Een van de onderwerpen waarvoor ondersteuning wordt gevraagd betreft het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis.

Voorgaand aan het complex project nieuwe sluis Zeebrugge heeft aMT reeds door middel van het Strategisch Haven Infrastructuur Project (SHIP) het optimaliseren van de nautische toegankelijkheid van de achterhaven van Zeebrugge onderzocht. In kader van SHIP heeft WL een hydraulisch ontwerp uitgevoerd voor een nivelleersysteem met openingen in de deur en een hydraulisch ontwerp voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen. Het nivelleersysteem volgend uit deze ontwerpen valt niet één op één over te nemen voor de nieuwe sluis door het wijzigen van de kolkdimensies, het ontwerpschip en de gewenste nivelleertijd.

Uit de vergelijking van de randvoorwaarden volgt dat bij het nieuwe ontwerp in kader van het complex project de kolkbreedte met 22 % is toegenomen (45 m tot 55 m) en de kolk lengte met 9 % is toegenomen (390 m tot 427 m). De bijhorende toename van het te nivelleren oppervlak wordt begroot op 32 %. Bijkomend wordt ook de kolkdiepte met 2.6 m verdiept (bodempelig kolk -12.5 m TAW naar -15.1 m TAW). De nivelleertijd bij maatgevend verval voor de nieuwe sluis bedraagt 18.0 min (t.o.v. 15 min bij het ontwerp in kader van SHIP). Ook het ontwerpschip werd opgeschaald naar de nieuwe kolkdimensies.

Voor het maken van een eerste inschatting van de doorstroomsectie van het nivelleersysteem werd vooreerst uit de in kader van SHIP uitgevoerde ontwerpen voor een nivelleersysteem met deuropeningen en korte omloopriolen een referentie case geselecteerd voor vullen van de sluis kolk met een nivelleertijd van ca. 18.0 min bij het maatgevend verval. De doorstroomsectie uit deze referentiecasses werd aan de hand van een literatuurformule voor nivelleertijd verschaald naar de benodigde doorstroomsectie voor de nieuwe sluis in kader van het complex project. Bij behouden van de nivelleertijd, het verval, de afvoercoëfficiënt en het openingsprogramma van de hefschuiven volgt dat de doorstroomsectie dient toe te nemen met dezelfde verhouding als de toename van het te nivelleren oppervlak, zijnde 32 %. Hieruit volgt voor een nivelleersysteem met openingen in de deuren per deur een totale breedte 36.85 m en hoogte 1.40 m, wat overeenkomt met een doorstroomsectie van 51.6 m^2 . Voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen worden twee riolen $4.6 \text{ m} \times 4.6 \text{ m}$ (breedte \times hoogte) beschouwd, wat overeenkomt met een doorstroomsectie 21.2 m^2 per riool of 42.3 m^2 in totaal.

Vervolgens wordt zowel voor het nivelleersysteem met openingen in de deuren als voor het nivelleersysteem met korte omloopriolen één hydraulisch simulatie uitgevoerd met het nivelleersysteem. Het model uit het ontwerp in het kader van SHIP wordt hierbij bijgewerkt met de nieuwe doorstroomsectie, kolkdimensies en de afmetingen van het nieuwe ontwerpschip. De openingswet blijft behouden. Uit de simulaties volgt dat zowel voor het nivelleersysteem met openingen in de deuren als voor het nivelleersysteem met korte omloopriolen een nivelleertijd lager dan 18.0 min wordt berekend. Het maximaal debiet bedraagt hierbij 149 tot $165 \text{ m}^3/\text{s}$ wat overeenkomt met een maximale stijgsnelheid van ca. 0.006 m/s . Dit is lager dan het criterium 0.009 m/s op basis van metingen in de Berendrecht sluis. Bij de simulatie met openingen in de deuren bedraagt het extremum van de langskracht 0.14 ‰ wat beperkt lager is dan het criterium op basis van de literatuur, 0.15 ‰ . Voor de simulatie met korte omloopriolen bedraagt het extremum van de langskracht 0.23 ‰ wat hoger is dan het criterium uit de literatuur, 0.15 ‰ , maar lager dan het criterium op basis van metingen in en hydraulische simulaties met het nivelleersysteem van een soortgelijke sluis, beide 0.30 ‰ .

Uit een voorstudie uitgevoerd door Expertise Beton en Staal (EBS) naar de haalbaarheid van het voorgestelde nivelleersysteem met openingen in de deur volgt dat 9 openingen met diameter 2.0 m als maximum haalbaar beschouwd worden. De bijhorende doorstroomsectie bedraagt 28.3 m^2 wat 44 ‰ lager is dan de voorgestelde doorstroomsectie uit de initiële simulaties. Een openingswet bestaande uit twee fases wordt voorgesteld, een eerste snelle en een tweede tragere fase. De snelheden worden zo ingesteld dat de maximum

langskracht zich tussen de maximale waarden van het conservatieve en minder conservatieve criterium in bevindt. Uit de simulatie volgt dat met de maximum haalbare doorstroomsectie voor een nivelleersysteem met openingen in de deur de kolk genivelleerd wordt in 21.1 min bij het maatgevend verval. Het maximaal debiet bedraagt hierbij $149 \text{ m}^3/\text{s}$, wat overeenkomt met een maximale stijgsnelheid ca 0.006 m/s . Dit is lager dan het criterium 0.009 m/s op basis van metingen in de Berendrechtsluis.

De resultaten van de hydraulische simulaties worden samengevat in Tabel 15.

Tabel 15 – Samenvatting resultaten simulaties

	eenheid	Criterium	Initiële simulaties		nivelleersysteem met openingen in de deur met max. haalbare doorstroomsectie
			deuropeningen	korte omloopriolen	
			$\Sigma B = 36.85$ $H = 1.40 \text{ m}$ $A_o = 51.60 \text{ m}^2$	2 riolen $B \times H = 4.6 \text{ m} \times 4.6 \text{ m}$ $A_o = 42.32 \text{ m}^2$	
nivelleertijd	min	18	17.3	17.8	21.1
extremum stijgsnelheid	m/s	0.009	0.006	0.006	0.006
extremum langskracht	‰	0.15 à 030	0.14	0.23	0.22

B = breedte opening/riool, ΣB = totale breedte openingen, H = hoogte opening/riool, D= diameter openingen, A_o = totale doorstroomsectie.

Uit deze voorstudie volgt dat met een nivelleersysteem met openingen in de deur met de maximum haalbare doorstroomsectie, 9 openingen diameter 2.0 m, de kolk genivelleerd kan worden in 21.1 min. Dit betreft een overschrijding van de door de opdrachtgever vooropgestelde nivelleertijd met ca. 3.0 min. Met een nivelleersysteem met korte omloopriolen met breedte 4.6 m en hoogte 4.6 m kan de kolk genivelleerd worden in 17.8 min wat overeenkomt met de door de opdrachtgever vooropgestelde nivelleertijd van 18.0 min. De maximale langskracht voor beide types nivelleersystemen ligt hierbij tussen het conservatieve criterium en het minder conservatieve criterium in.

De resultaten van dit adviesrapport dienen beschouwd te worden als een eerste inschatting van de benodigde doorstroomsectie. De simulaties en dus ook de hydraulische verliezen zijn nog niet gebaseerd op een constructief ontwerp. Na het uitvoeren van een constructief (voor)ontwerp dienen nieuwe simulaties uitgevoerd te worden. In dit adviesrapport wordt ook enkel vullen gesimuleerd. Bij een nivelleersysteem met openingen in de deur wordt verwacht dat bij ledigen het hefprogramma versneld kan worden waardoor de nivelleertijd lager zal zijn. Bij een nivelleersysteem met korte omloopriolen analoog aan dit van de Antwerpse zeesluizen wordt verwacht dat de verliezen bij vullen van de kolk lager zijn dan bij ledigen van de kolk. Hierdoor kan bij ledigen de nivelleertijd langer zijn dan bij vullen. Een bepalend factor voor het hefprogramma van de schuiven, en dus ook de nivelleertijd, betreft het criterium voor de langskracht. Bij aanvang van het finaal ontwerp moet het criterium voor de langskracht herbevestigd of opnieuw opgesteld worden.

8 Referenties

De Mulder, T.; Vercruyse, J.B. (2007). Tweede sluis Waaslandhaven: verslag van de meetcampagnes Berendrecht- en zandvlietsluis. *WL Rapporten, 760/03A*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

De Mulder, T.; Vercruyse, 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

O'Mahoney, T.; Weiler, O. (2015). Nieuwe Sluis - Terneuzen Aanvullende LOCKFILL berekeningen - Nivelleren met vlinderkleppen in deuropeningen 1220598-000-HYE-0004, Versie 7, 8 juli 2015, definitief. 127 pp.

Schohl G.A. (1998). User's Manual for LOCKSIM – Hydraulic simulation of navigation lock filling and emptying systems

Schwanenberg, D.; Jongeling, T.H.G. (2003). Vul- en ledigingssysteem Royerssluis: deelopdracht I. Eerste ontwerp. Q2887. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

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.; Van Hoydonck, W.; Mostaert, F. (2017). Strategisch haveninfrastructuur project Zeebrugge: Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem sluis met korte omloopriolen. Versie 3.0 *WL Rapporten, 15_035_1*

Vercruyse, J.B.; Vanderkimpen, P.; Claeys, S.; Mostaert, F. (2019). 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.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2015). Zeekanaal Brussel Schelde - sluis Zemst: terreinmeting na renovatie middendeur. *WL Rapporten, 14_035*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Van Hoydonck, W.; Mostaert, F. (2017). Strategisch haveninfrastructuur project Zeebrugge: hydraulisch ontwerp nivelleersysteem sluis met korte omloopriolen. Versie 3.0. *WL Rapporten, 15_035_1*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 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. CONCEPT *WL Rapporten, 17_002_1*. 45 pp.

Vrijburcht, A. (1994). Q1850 – Aanpassing rekenmodellen Bergsdediepsluis voor vlinderkleppen

9 Bijlage A – afvoercoëfficiënt cirkelvormige openingen afgesloten door vlinderkleppen

Als initiële inschatting van de benodigde afvoercoëfficiënt van de vlinderkleppen in functie van de openingshoek wordt de afvoercoëfficiënt afgeleid uit metingen in de sluis van Zemst na renovatie van de middendeur overgenomen (J. B. Vercruysse *et al.*, 2015), zie Tabel 16. Dit betreffen 8 vlinderkleppen diameter 1.40 m. Bemerkt dat de dikte van de middendeur van de sluis te Zemst 1.80 m bedraagt en dat de vlinderkleppen niet in een straalbuis geplaatst zijn. Doordat de vlinderkleppen van de sluis te Zemst na renovatie openen met een zeer geleidelijke openingswet was het mogelijk om de afvoercoëfficiënt in functie van de openingshoek te bepalen.

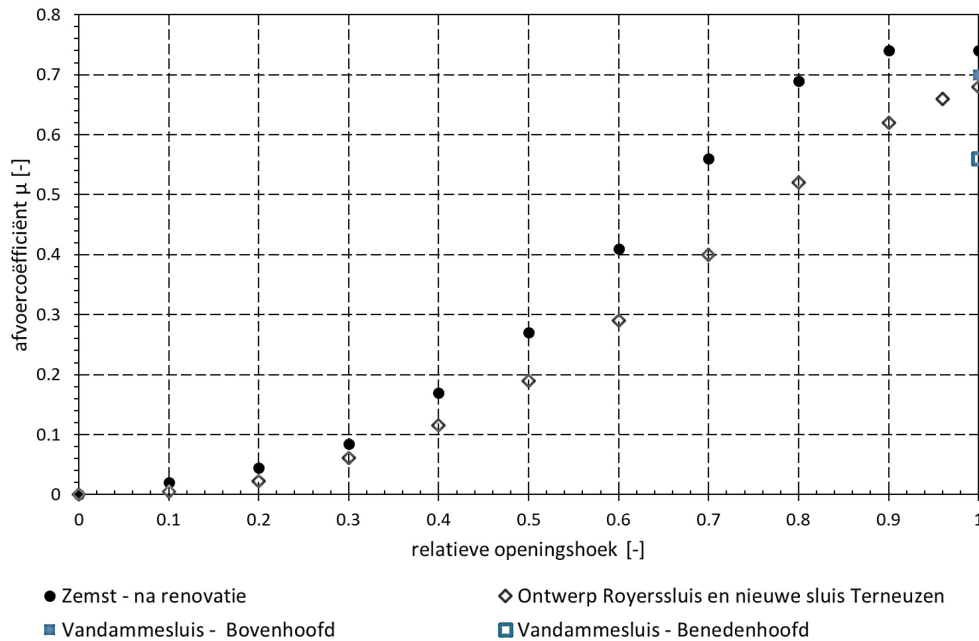
Tabel 16– Afvoercoëfficiënt in functie van openingshoek

Openingshoek	Relatieve opening	Afvoercoëfficiënt
[°]	[-]	[-]
0	0.00	0.000
9	0.10	0.020
18	0.20	0.045
27	0.30	0.085
36	0.40	0.170
45	0.50	0.270
54	0.60	0.410
63	0.70	0.560
72	0.80	0.690
81	0.90	0.740
90	1.00	0.740

(J. B. Vercruysse *et al.*, 2015)

In 2012 werden door WL metingen uitgevoerd in de Vandammesluis te Zeebrugge (J. B. Vercruysse *et al.*, 2012). Doordat de vlinderkleppen in de Vandammesluis in 30 s tot 45 s volledig geopend werden kon enkel de afvoercoëfficiënt bij volledig geopende kleppen bepaald worden. Bij door Deltares uitgevoerde ontwerpen voor een nivelleersysteem met ronde openingen in de deur afgesloten door vlinderkleppen voor de Royerssluis (Schwanenberg & Jongeling, 2003) en voor de nieuwe sluis Terneuzen (O'Mahoney & Weiler, 2015) werd een afvoercoëfficiënt uit Vrijburcht (1994) toegepast. In Figuur 6 worden deze afvoercoëfficiënten vergeleken met de in dit advies toegepaste afvoercoëfficiënt.

Figuur 6 – Vergelijking afvoercoëfficiënt in functie van openingshoek



Bemerk in Figuur 6 dat de voor de simulaties van de nieuwe sluis te Zeebrugge gehanteerde afvoercoëfficiënt vanaf een relatieve opening ca. 0.40 hoger is dan de afvoercoëfficiënt die toegepast werd bij een ontwerp voor de Royerssluis en de nieuwe sluis te Terneuzen. Bij een volledige geopende klep bedraagt de afvoercoëfficiënt toegepast bij een ontwerp van het nivelleersysteem voor de Royerssluis en deze bij een voorontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis Terneuzen 0.68. De afvoercoëfficiënt afgeleid uit metingen in de Vandammesluis voor een volledig klephoek bedraagt ca 0.70 (bij vullen en ledigen) voor het bovenhoofd en 0.56 (bij vullen en ledigen) voor het benedenhoofd. Bemerk hierbij dat de lagere afvoercoëfficiënt van het benedenhoofd mogelijk veroorzaakt werd door een reductie van de vrije doorstroomsectie. Bij renovatie van de betreffende deur werd maritieme aangroei opgemerkt in de openingen.

Bemerk dat de afvoercoëfficiënt gegeven in Tabel 16 en in Figuur 6 toeneemt bij een toename van de openingshoek. Vanaf 0 bij een gesloten klep tot 0.74 bij een volledige geopende klep. Dit in tegenstelling tot de in paragraaf 5.1 gehanteerde afvoercoëfficiënt voor rechthoekige openingen afgesloten door middel van hefschuiven waar de afvoercoëfficiënt toenam van 0.6 bij een gesloten klep tot 0.7 bij een volledig geopende klep. Dit wordt verklaard door de wijze waarop het programma VUL_SLUIS het debiet berekend in functie van de openingshoek. Het debiet wordt door middel van volgende vergelijking berekend in VUL_SLUIS:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2g\Delta h}$$

Met:

- | | | |
|------|--|---------------------|
| - Q | Debiet doorheen de openingen | [m ³ /s] |
| - μ | Afvoercoëfficiënt | [-] |
| - A | Doorstroomsectie (= $D^2 \cdot \pi/4$) | [m ²] |
| - g | Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s ² | [m/s ²] |
| - Δh | Momentsaan verval over de deur | [m] |

Omwille van de complexiteit van de berekening van de vrije doorstroomsectie bij vlinderkleppen wordt in VUL_SLUIS voor vlinderkleppen de doorstroomsectie constant gehouden en gelijkgesteld aan de inwendige doorstroomsectie zonder de aanwezigheid van vlinderkleppen. De invloed van de openingshoek op het debiet wordt hierbij volledig opgenomen door de afvoercoëfficiënt.

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