



Vlaanderen
is wetenschap

23_098_1
WL rapporten

Zeebrugge - Vandammesluis

Optimalisatie openingswet Vlinderkleppen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Zeebrugge - Vandammesluis

Optimalisatie openingswet Vlinderkleppen

Vercruysse, J.; Verelst, K.

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 2024
 D/2024/3241/070

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruyse, J.; Verelst, K. (2024). Zeebrugge - Vandammesluis: Optimalisatie openingswet Vlinderkleppen. Versie 4.0. WL Rapporten, 23_098_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen



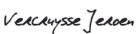

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2024R23_098_1
Trefwoorden (3-5):	lock, simulation, filling emptying system, longitudinal force		
Kennisdomeinen:	Sluizen > Nivelleersysteem > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	20	Bijlagen (p.):	1
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruyse, J.; Verelst, K.
------------	----------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2024-03-27 09:21:42 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid
Projectleider:	Vercruyse, J.	Getekend door: Jeroen Vercruyse (Signa) Getekend op: 2024-03-26 15:48:59 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2024-03-27 08:23:38 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid
-----------------	---------------	---

Abstract

Bij renovatie van de uiterste roldeuren in de Vandammesluis werden bijkomende vlinderkleppen geplaatst. Op vraag van afdeling Maritieme Toegang heeft afdeling Waterbouwkundig Laboratorium voor de vlinderkleppen in deze roldeuren nieuwe openingswetten opgesteld. Hierbij werden in een eerste fase de 5 oude vlinderkleppen geopend en vervolgens in een tweede fase de 4 nieuwe vlinderkleppen. Bij implementatie van de openingswet voor deur 1 in het bovenhoofd is vastgesteld dat de uit het advies volgende openingswet te traag is voor de hydraulische aansturing met foutmeldingen en versnelde slijtage tot gevolg.

In onderhavig advies wordt door middel van simulaties onderzocht hoe de openingssnelheid per klep verhoogd kan worden. Na een aantal inschattende simulaties wordt ervoor gekozen om de kleppen te openen in 4 fasen. In de eerste 3 fasen worden telkens twee kleppen geopend en in de 4^{de} en laatste fase worden drie kleppen geopend. Voor roldeur 1 in het bovenhoofd wordt een openingsduur van 60 s voorgesteld voor de kleppen met een wachttijd van 5 s tussen twee opeenvolgende fasen. Voor roldeur 4 in het benedenhoofd wordt een openingsduur van 55 s voorgesteld voor de kleppen met een wachttijd van 5 s tussen twee opeenvolgende fasen. Ook werd nagegaan vanaf welk peil overgegaan kan worden naar een snellere openingswet uit twee fasen. Hierbij openen in de eerste fase de 5 oude kleppen en in de tweede fase de 4 nieuwe kleppen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Gegevens	3
2.1 Geometrie.....	3
2.2 Waterpeilen.....	4
2.3 Afvoercoëfficiënt vlinderkleppen	6
2.4 Maatgevend schip	6
2.5 In situ opmeting langse waterspiegelhelling voor renovatie	7
3 Criteria	8
4 Initiële simulaties.....	9
5 Simulaties met aangepaste openingswet.....	13
5.1 Schema openen vlinderkleppen	13
5.2 Roldeur 1 in het bovenhoofd.....	14
5.3 Roldeur 4 in het benedenhoofd	16
6 Conclusies	19
7 Referenties	20
Bijlage 1 Validatie VUL_SLUIS en LOCKFIL.....	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Maatgevende waterpeilen en vervallen gehanteerd bij opstellen openingswetten na renovatie ...	4
Tabel 2 – Gesimuleerde peilen in de voorhaven	5
Tabel 3 – Karakteristieken maatgevend schip Car Carrier Wallenius Wilhelmsen TOMAR (Verelst et al., 2012)	6
Tabel 4 – Toegepaste criteria advies 12_095 (Vercruysse <i>et al.</i> , 2012c).....	8
Tabel 5 – Resultaten inschattende simulaties vullen bovenhoofd bij maatgevend verval.....	11
Tabel 6 – ledigen benedenhoofd bij maatgevend verval met openingswetten 12_095.....	12
Tabel 7 – Voorgestelde schema’s openen vlinderkleppen.....	13
Tabel 8 – Simulaties bovenhoofd bij maatgevend verval.....	14
Tabel 9 – Vergelijking nivelleertijd bij toepassen van openingswet O9 en O11 voor nivelleren via het bovenhoofd	16
Tabel 10 – Ledigen benedenhoofd – simulaties bij maatgevend verval	17
Tabel 11 – Vergelijking openingswet O10 en O13 voor nivelleren via het bovenhoofd.....	18

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Ligging Vandammesluis in de haven van Zeebrugge	1
Figuur 2 – Bovenaanzicht Vandammesluis	3
Figuur 3 – Locatie huidige en bijkomende (rode cirkel) vlinderkleppen	4
Figuur 4 – Dichtheidsverdeling peil voorhaven Zeebrugge	5
Figuur 5 – Car Carrier Wallenius Wilhelmsen TOMAR	6
Figuur 6 – Langse waterspiegelhelling H14 bij vullen via bovenhoofd	7
Figuur 7 – Verloop krachten inschattende simulaties (nr001 tot en met nr006)	10
Figuur 8 – ledigen benedenhoofd bij maatgevend verval met openingswetten 12_095	11
Figuur 9 – Simulaties bovenhoofd bij maatgevend verval	14
Figuur 10 – Vergelijking berekende langskracht op het schip en waterspiegelhelling bij toepassen van openingswet O9 en O11 voor nivelleren via het bovenhoofd	15
Figuur 11 – Ledigen benedenhoofd – simulaties bij maatgevend verval.....	16
Figuur 12 – Vergelijking openingswet O10 en O13 voor nivelleren via het bovenhoofd	17

1 Inleiding

Bij renovatie van de uiterste roldeuren in de Vandammesluis werden bijkomende vlinderkleppen geplaatst. Op vraag van aMT heeft WL voor de vlinderkleppen in deze roldeuren nieuwe openingswetten opgesteld. Hierbij werden in een eerste fase de 5 oude vlinderkleppen geopend en vervolgens in een tweede fase de 4 nieuwe vlinderkleppen. Bij implementatie van de openingswet voor deur 1 in het bovenhoofd stelt aMT echter vast dat de uit het advies volgende openingswet te traag is voor de hydraulische aansturing met foutmeldingen en versnelde slijtage tot gevolg. In onderhavig advies wordt door middel van simulaties onderzocht hoe de openingssnelheid per klep verhoogd kan worden.

De Vandammesluis in de haven van Zeebrugge ligt tussen de achterhaven en de getijdhaven zie Figuur 1. Deze sluis werd afgewerkt in 1985. De bouw kaderde in de grote uitbreiding van de haven van Zeebrugge in de periode tussen 1972 en 1985.



Figuur 1 – Ligging Vandammesluis in de haven van Zeebrugge

Het nivelleersysteem bij ingebruikname bestond uit 5 vlinderkleppen met diameter 1.80 m. Dit nivelleersysteem werd als onvoldoende performant ervaren. Bij ledigen via het benedenhoofd met een verval 3.0 m liep de nivelleertijd bijvoorbeeld op tot 40 minuten. Om die reden werd besloten om bij renovatie van de uiterste roldeuren (deur 1 en 4) het aantal vlinderkleppen uit te breiden van 5 naar 9 vlinderkleppen diameter 1.80 m. In kader van deze renovatie werd een studie uitgevoerd door Deltares (Erdbrink & Jongeling, 2008). Deze studie werd uitgevoerd met behulp van het programma LOCKFILL en behandelde nivelleren met deur 4 in het benedenhoofd. WL heeft een revisie van deze studie uitgevoerd (Verduyck *et al.*, 2012b). In deze studie werd deur 1 in het bovenhoofd niet onderzocht. Om het hydraulisch systeem niet te moeten uitbreiden wenste aMT de kleppen te openen in twee fasen, i.e. eerst de oude kleppen en vervolgens de nieuwe kleppen. Hiervoor heeft het Waterbouwkundig Laboratorium in 2012 een nieuwe studie uitgevoerd (Verduyck *et al.*, 2012c). In kader van deze studie werd een model opgemaakt in VUL_SLUIS voor nivelleren via deur 1 in het bovenhoofd en nivelleren via deur 4 in het benedenhoofd.

In kader van het project voor ontwerp van een nieuwe zeesluis in de haven van Zeebrugge werden in 2012 door het Waterbouwkundig Laboratorium ook metingen uitgevoerd in de Vandammesluis (Vercruysse *et al.*, 2012a). Op basis van deze metingen werd het numeriek model gevalideerd en gekalibreerd. Met dit model werden vervolgens per hoofd twee openingswetten voorgesteld:

- Een conservatieve, tragere, openingswet waarbij de kracht op het schip lager is dan criteria uit de literatuur.
- Een pragmatische, snellere, openingswet waarbij de kracht op het schip gelijk of lager is dan de kracht op basis van een simulatie van de situatie voor renovatie en waarbij de end-to-end langse waterspiegelhelling gelijk of lager is dan volgt uit metingen in de Vandammesluis en de Antwerpse zeesluizen.

In overleg werd gekozen om bij implementatie de conservatieve, tragere, openingswet te hanteren. Indien uit praktijk de wens zou volgen om over te gaan naar de snellere pragmatische openingswet werd afgesproken om deze bij ingebruikname in situ te valideren.

In oktober 2019 werd de gerenoveerde roldeur 4 in het benedenhoofd met de voorgestelde conservatieve openingswet in gebruik genomen. In februari 2022 werd ook de gerenoveerde roldeur 1 in het bovenhoofd met de conservatieve openingswet in gebruik genomen. Bij het in gebruik nemen van roldeur 1 werd echter vastgesteld dat de door WL voorgestelde openingswet te traag was voor de hydraulische aansturing van de vlinderkleppen met foutmeldingen en versnelde slijtage tot gevolg. aMT stelt hierom de vraag of het mogelijk is om de openingstijd per klep te beperken tot 60 s en om met meerdere fasen te werken zodat de krachten op de schepen in de kolk beperkt blijven. In dit advies wordt deze werkwijze onderzocht voor het openen van de vlinderkleppen in roldeur 4 in het benedenhoofd en roldeur 1 in het bovenhoofd. Het advies is al volgt opgebouwd:

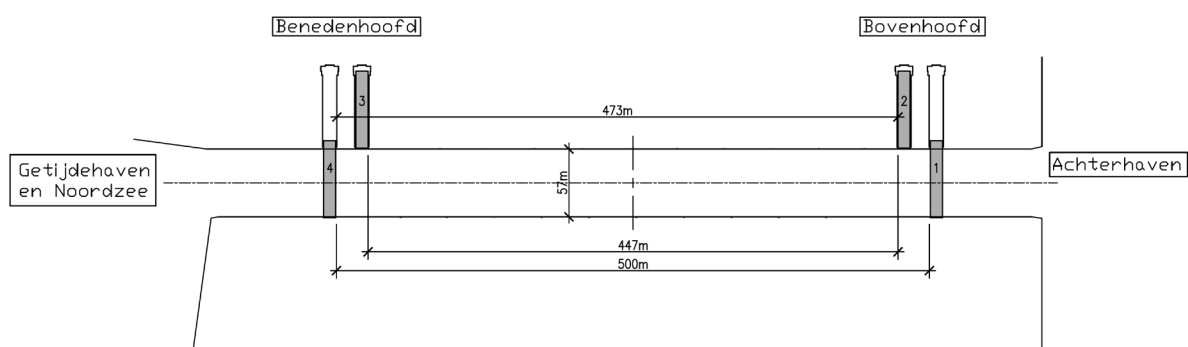
- De gegevens worden samengevat in hoofdstuk 2,
- De gehanteerde criteria voor de kracht en langse waterspiegelhelling worden gegeven in hoofdstuk 3,
- Het resultaat van een aantal inschattende simulaties uitgevoerd voor vullen met roldeur 1 in het bovenhoofd met het maatgevend verval worden gegeven in hoofdstuk 4.
- De simulaties voor het opstellen van de aangepaste openingswet worden gegeven in hoofdstuk 5.
- De conclusies worden samengevat in hoofdstuk 6.

2 Gegevens

Een beschrijving van de geometrie van de sluis met nummering van roldeuren en vlinderkleppen wordt gegeven in paragraaf 2.1. De beschouwde waterpeilen worden gegeven in paragraaf 2.2. De afvoercoëfficiënt van de vlinderkleppen wordt gegeven in paragraaf 2.3. Het beschouwde schip wordt gegeven in paragraaf 2.4. Een korte beschrijving van de in situ opgemeten end-to-end langse waterspiegelhelling wordt gegeven in paragraaf 2.5.

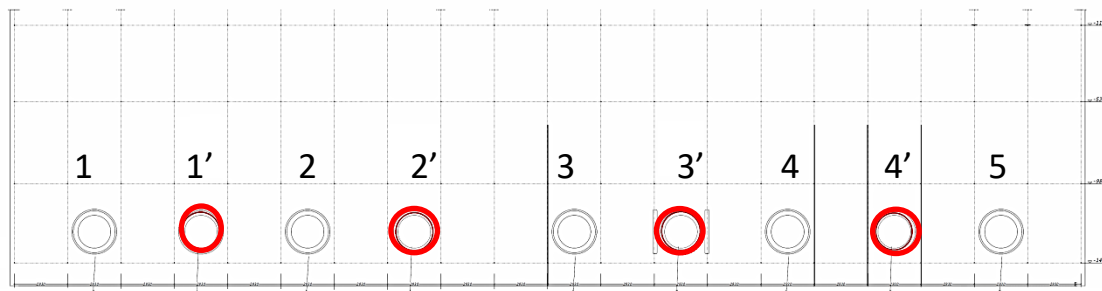
2.1 Geometrie

Figuur 2 geeft een bovenaanzicht van de Vandammesluis. De Vandammesluis heeft een lengte van 500 m tussen de uiterste roldeuren en een kolkbreedte van 57 m. De sluis beschikt over 2 roldeuren per hoofd, deze deuren worden genummerd van deur 1 (opwaarts) naar deur 4 (afwaarts). De sluis heeft een drempeldiepte gelijk aan -15.0 m TAW.



Figuur 2 – Bovenaanzicht Vandammesluis

Het nivelleersysteem voor renovatie bestond uit 5 vlinderkleppen per roldeur. Na renovatie werden deze vlinderkleppen in deur 1 en 4 uitgebreid naar 9 vlinderkleppen. Zowel de nieuwe als de oude vlinderkleppen zijn gemonteerd in een straalbuis, hebben een diameter 1.80 m en de centerlijn op TAW -12.44 m. Een overzicht van de 'oude' en 'nieuwe' vlinderkleppen wordt gegeven in Figuur 3. De nieuwe vlinderkleppen worden in dit rapport aangeduid met een nummer met een accent. Bemerkt dat de vlinderkleppen met gelijk nummer vanuit hetzelfde hydraulisch circuit aangestuurd worden en dat een hydraulisch circuit maar één vlinderklep per keer kan aansturen. Om die redenen bestond de voorgestelde openingswet uit twee fasen: een eerste fase voor de 'oude' vlinderkleppen en een hieropvolgende fase met dezelfde snelheid voor de 'nieuwe' kleppen.



Figuur 3 – Locatie huidige en bijkomende (rode cirkel) vlinderkleppen

2.2 Waterpeilen

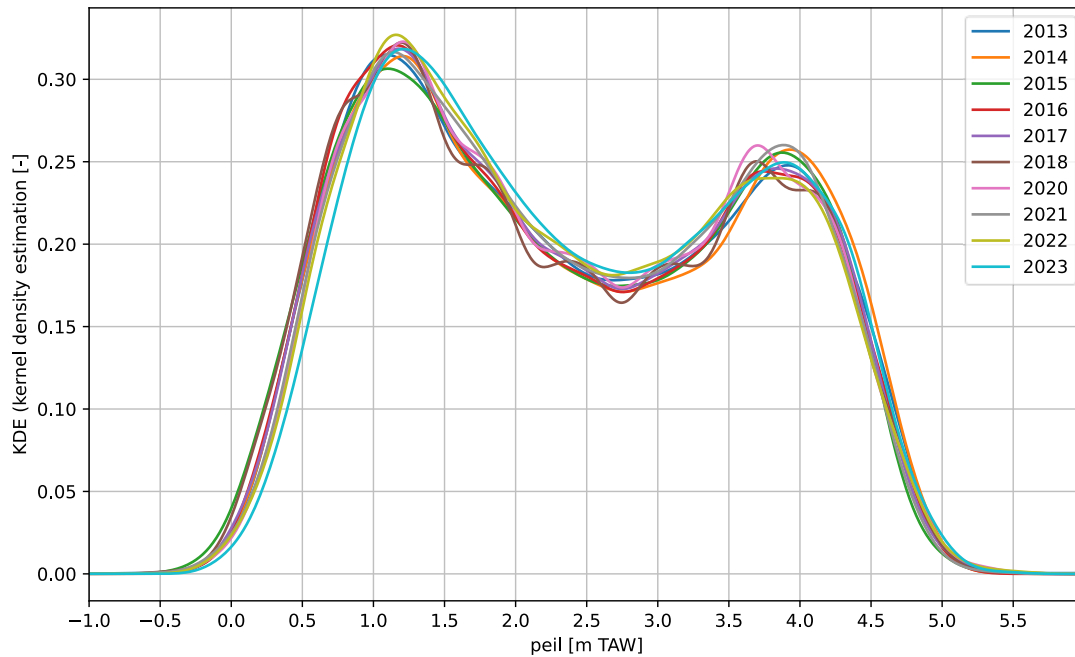
De peilen beschouwd voor het opstellen van de openingswetten na renovatie (advies 12_095, Vercruyssen *et al.*, 2012c) worden samengevat in Tabel 1. Dit betreft in de achterhaven een streefpeil + 3.50 m TAW en in de voorhaven een maatgevend laag peil + 0.02 m TAW en een maatgevend hoog peil + 4.58 m TAW. Het voor het ontwerp maatgevend peil betreft hierbij het laag peil +0.02 m TAW in combinatie met het streefpeil + 3.50 m TAW in de achterhaven.

Tabel 1 – Maatgevende waterpeilen en vervallen gehanteerd bij opstellen openingswetten na renovatie

		dokpeil [m TAW]	voorhaven [m TAW]	verval [m]
laagwater	dokpeil > getijhaven	+ 3.50	+0.02	3.48
hoogwater	dokpeil < getijhaven	+ 3.50	+4.58	1.08

Bij de voorstudie van een nivelleersysteem in kader van complex project nieuwe sluis Zeebrugge (Vercruyssen *et al.*, 2020) werd een laagwater maatgevend voor de langskracht en een iets hoger laagwater maatgevend voor de nivelleertijd gehanteerd. Voor het maatgevend laagwater voor de langskracht werd -0.58 m TAW gehanteerd, dit betreft het laagste peil waarbij nog gesloten wordt. Voor het maatgevend laagwater voor de nivelleertijd werd 0.00 m TAW gehanteerd, dit betreft een laagwater dat slechts 3 % van de getijden onderschreden wordt. Een hoogwater tot 7.00 m TAW werd beschouwd, i.e. het verwachte hoogste hoogwater in 2125. De simulaties werden uitgevoerd met een openingswet voor het benedenhoofd en een openingswet voor het bovenhoofd geoptimaliseerd op het maatgevend laagwater voor de langskracht. Voor details wordt verwezen naar het rapport (Vercruyssen *et al.*, 2020).

Om inzicht te verkrijgen in de range van voorkomende peilen in de voorhaven werd een analyse uitgevoerd op basis van de continue peilmetingen (t.h.v. Leopold II dam) overheen de periode 2013-2023. De uit deze metingen afgeleide dichtheidsverdeling per jaar wordt gegeven in Figuur 4. Bemerkt dat het jaar 2019 niet weergegeven wordt omdat gedurende een 11 maand geen meetgegevens opvraagbaar waren.



o.b.v. peilmetingen Zeebrugge Leopold II dam opgevraagd via www.meetnetvlaamsebanken.be

Figuur 4 – Dichtheidsverdeling peil voorhaven Zeebrugge

Gekozen wordt om in dit rapport de maatgevende peilcombinatie beschouwd bij opstellen van de openingswetten na renovatie te behouden, i.e. het streefpeil 3.50 m TAW in de achterhaven en een peil 0.02 m TAW in de voorhaven. Aanvullend worden simulaties uitgevoerd overheen de range -0.58 m TAW, i.e. het laagste laagwater waarbij nog scheepvaart mogelijk is, tot 5.50 m TAW, i.e. een extreem hoogwater op basis van Figuur 4. Bij een opdeling van dit bereik per +/- 0.50 m wordt de range in Tabel 2 bekomen.

Tabel 2 – Gesimuleerde peilen in de voorhaven

P12	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
-0.58 m TAW	0.02 m TAW	0.50 m TAW	1.00 m TAW	1.50 m TAW	2.00 m TAW	2.50 m TAW	3.00 m TAW	4.00 m TAW	4.50 m TAW	5.00 m TAW	5.50 m TAW

2.3 Afvoercoëfficiënt vlinderkleppen

In advies 12_095 (Vercruyssen *et al.*, 2012c) werden de afvoercoëfficiënten voor het boven- en benedenhoofd gegeven in de toestand voor renovatie afgeleid uit de uitgevoerde terreinmeting en op basis van een validatie van het programma VUL_SLUIS. Hieruit volgde een range tussen 0.56-0.75. Tijdens renovatie werd een reductie van de sectie vastgesteld door biologische aangroei. Om deze reden wordt besloten om de maximale afvoercoëfficiënt 0.75 te hanteren, analoog met advies 12_095.

2.4 Maatgevend schip

Als maatgevend schip wordt het in advies 12_095 (Vercruyssen *et al.*, 2012c) gehanteerde ontwerpschip de Car Carrier Wallenius Wilhelmsen TOMAR overgenomen, zie Figuur 5 en Tabel 3.



Figuur 5 – Car Carrier Wallenius Wilhelmsen TOMAR

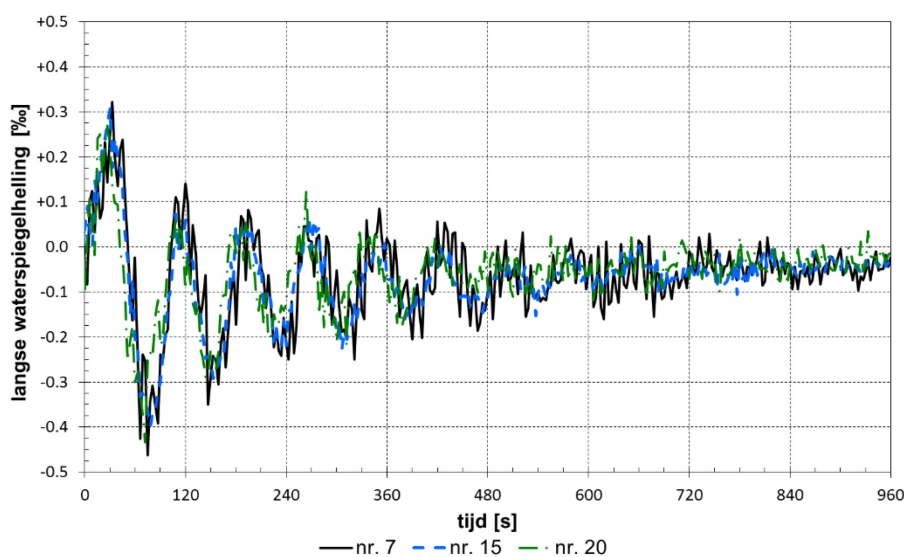
Tabel 3 – Karakteristieken maatgevend schip Car Carrier Wallenius Wilhelmsen TOMAR (Verelst *et al.*, 2012)

Lengte	200 m
Breedte	32.26 m
Diepgang	11.00 m
Nuttig draagvermogen (Deadweight) ¹	22144 ton
Bruto tonnage ¹	61328 ton
Block-coëfficiënt	0.56
Gewichtsdeplacement	40000 ton

¹ Bron: www.marinetraffic.com

2.5 In situ opmeting langse waterspiegelhelling voor renovatie

WL heeft voor renovatie op 17 en 18 juli 2012 in situ metingen uitgevoerd in de Vandammesluis (Vercruyssen *et al.*, 2012a). Tijdens deze in situ metingen werd het waterpeil, de langse waterspiegelhelling en de positie van de schepen in de kolk geregistreerd. De end-to-end langse waterspiegelhelling opgemeten tijdens drie vullingen via het bovenhoofd met een verval 2.55 tot 2.85 m wordt overgenomen in Figuur 6. Bemerkt in het verloop van de langse waterspiegelhelling dat bij aanvang nivelleren een sterke fluctuatie optreedt die vervolgens uitdempt in de tijd. Deze sterke fluctuatie wordt veroorzaakt door de plotse opening van de vlinderkleppen. De openingstijden van de vlinderkleppen voor renovatie bedroegen namelijk +/- 35 s voor roldeur 4 en +/- 43 s voor roldeur 1. Het extremum van 0.40 ‰ is hierbij hoger dan de gehanteerde criteria voor de langskracht op het schip uit de literatuur. Het verval tijdens de metingen was met 2.55 m tot 2.85 m echter nog 0.93 m tot 0.63 m lager dan het maatgevend verval.



(Vercruyssen *et al.*, 2012a)

Figuur 6 – Langse waterspiegelhelling H14 bij vullen via bovenhoofd

In kader van advies 12_095 werd met behulp van VUL_SLUIS een hydrodynamisch numeriek model opgesteld van de Vandammesluis. Een validatie van het programma VUL_SLUIS werd uitgevoerd in Verelst *et al.* (2024). Bij deze validatie werden ook 5 nivelleringen die opgemeten werden in de Vandammesluis beschouwd. De figuren met de vergelijking van de gesimuleerde en opgemeten langse waterspiegelhelling worden overgenomen in bijlage A. Uit deze vergelijking volgt een goede overeenkomst wat betreft de periode van de langshelling van het schip tussen de metingen en de simulaties. Wat het extremum van de langshelling betreft is de overeenkomst ofwel vrij goed ofwel wordt deze overschat. De demping van de langshelling van het schip wordt door het model onderschat.

3 Criteria

De in advies 12_095 (Vercruyssen *et al.*, 2012c) gehanteerde criteria zijn overgenomen in Tabel 4.

Tabel 4 – Toegepaste criteria advies 12_095 (Vercruyssen *et al.*, 2012c)

criterium	stijgsnelheid [m/s]	kracht schip [‰]	end-to-end waterspiegelhelling [‰]
conservatief	/	0.20	/
pragmatisch	0.009	0.95	0.36

De criteria zijn als volgt bepaald:

- Het criterium van 0.20 ‰ voor de langskracht betreft een waarde overgenomen uit een oudere literatuurbron (Vrijer 1977). Bemerkt dat voor nieuwe ontwerpen de toegelaten langskracht bepaald kan worden door middel van een toskrachtmodellering. Dergelijke modellering is echter vooralsnog niet voorhanden voor de Vandammesluis en voor de nieuwe sluis te Zeebrugge
- Het criterium van 0.95 ‰ voor de kracht werd bepaald op basis van een simulatie met VUL_SLUIS release 01.42.00 van de situatie voor renovatie.
- Het criterium van 0.36 ‰ werd bepaald op basis van de in situ opgemeten end-to-end langse waterspiegelhelling in de Vandammesluis en in de Antwerpse zeesluizen.

Omdat het criterium van 0.95 ‰ eerder van toepassing is voor binnenvaartsluizen en gevoelsmatig te hoog is voor zeesluizen wordt dit niet weerhouden. Om deze reden wordt in dit rapport alleen vergeleken met

- criterium kracht schip: 0.20 ‰,
- criterium end-to-end waterspiegelhelling 0.36 ‰.

Hierbij wordt de end-to-end waterspiegelhelling beschouwd over de locatie van de laddernissen van waaruit de in situ opgemeten end-to-end waterspiegelhellingen werden opgemeten (Vercruyssen *et al.*, 2012a).

4 Initiële simulaties

Op 9 oktober 2023 werd een overleg gehouden met afdeling Maritieme Toegang, sectie Elektromechanica van afdeling Expertise Beton en Staal (EBS), Port of Antwerp-Bruges (PoAB) en Waterbouwkundig Laboratorium. Op dit overleg werd afgesproken om de openingstijd van de vlinderkleppen te beperken tot 60 s en om het aantal fases te vergroten. Volgend op dit overleg werd een eerste set inschattende simulaties uitgevoerd voor nivelleren doorheen deur 1 in het bovenhoofd met maatgevend verval. De uit deze eerste simulaties volgende krachten en end-to-end waterspiegelhellingen worden samen met de openingswet voorgesteld in Figuur 7 en de nivelleertijd en extrema van de langskracht en end-to-end langse waterspiegelhelling in Tabel 5.

Bemerkt dat de simulaties gekenmerkt worden door een code

nrxxx_Bx_Px_s1_xb60_Ox

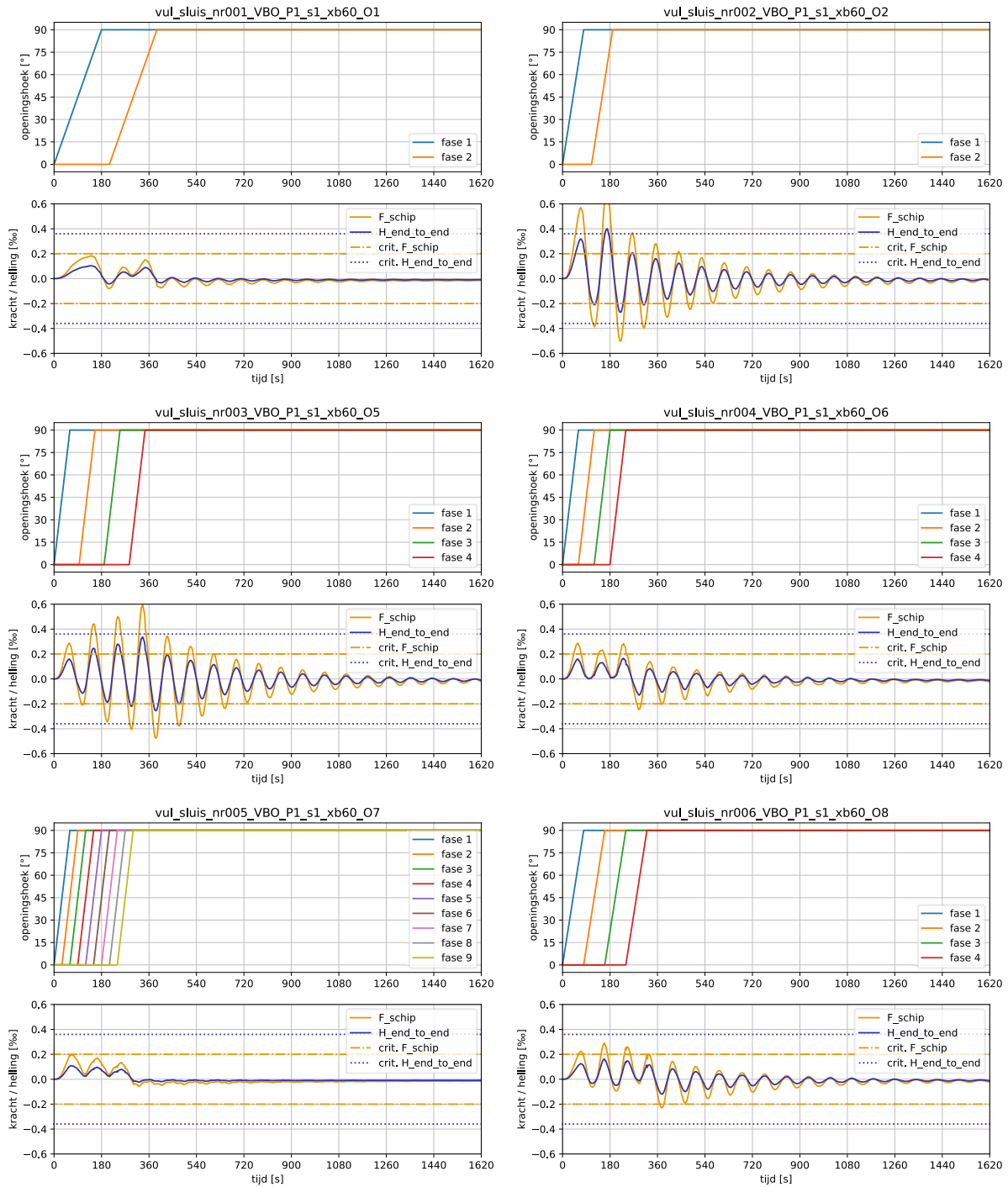
met:

- nrxx het volgnummer van de simulaties
- Bx Het hoofd BO= Bovenhoofd / BE= benedenhoofd
- Px Peil voorhaven, zie paragraaf 2.2
- S1 het type schip, voor de simulaties in dit advies werd slecht één schip beschouwd, zie paragraaf 2.4.
- Xb60 de afstand tussen boeg en de voor nivelleren gebruikte deur. Voor deze simulaties werd steeds één afstand aangehouden, zijnde 60 m.
- Ox de toegepaste openingswet, zie bijlage 2

Voor de simulaties in dit advies wordt steeds de uiterste deurcombinatie en het streefpeil in de achterhaven beschouwd. De simulaties zijn allen uitgevoerd met VUL_SLUIS release versie 1.54.00, de meest recente versie op het moment van opstellen van dit advies.

De openingswet O1 respectievelijk O2 betreft de conservatieve respectievelijke pragmatische openingswet uit advies 12_095 (Vercruyse *et al.*, 2012c). Bemerkt dat de kracht op het schip bij toepassen van de openingswet O1 oploopt tot het criterium uit de literatuur en dat de end-to-end langse waterspiegelhelling bij toepassen van openingswet O2 oploopt tot het uit metingen afgeleide criterium. Bij toepassen van openingswet O2 loopt de toelaatbare langskracht wel op tot 0.7 %, wat als niet toelaatbaar beschouwd wordt. Volgend hierop worden volgende openingswetten onderzocht waarbij de openingsduur per klep beperkt wordt tot 60 s voor openingswet O5, O6 en O7 en tot 80 s voor openingswet O8:

- O5 Opdeling in 4 fasen waarbij door het instellen van een wachttijd de totale openingsduur overeenkomt met openingswet O1.
- O6 Openen in 4 fasen zonder wachttijd.
- O7 Elke 30 s één enkele klep openen
- O8 Openen in 4 fasen zonder wachttijd maar met een openingsduur van 80 s per klep.



Figuur 7 – Verloop krachten inschattende simulaties (nr001 tot en met nr006)

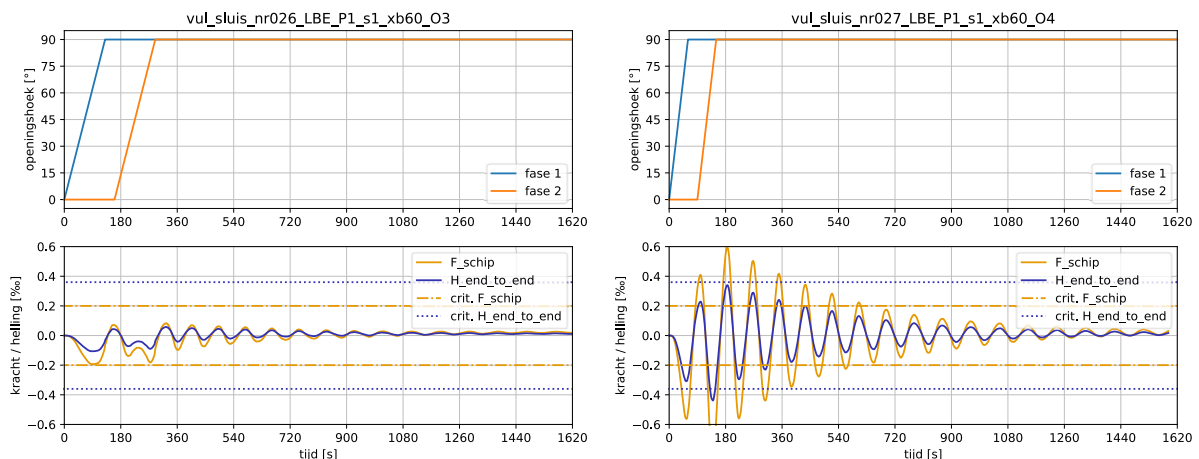
Tabel 5 – Resultaten inschattende simulaties vullen bovenhoofd bij maatgevend verval

nr.	openingswet	nivelleertijd restverval=0.0m		nivelleertijd restverval=0.1m		extremum langskracht schip		extremum langshelling schip	
		[min]	[s]	[min]	[s]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
nr001	O1 (12_098)	28.7	1719	24.4	1464	-0.08	0.18	-0.04	0.10
nr002	O2 (12_098)	26.9	1613	22.6	1357	-0.50	0.71	-0.27	0.40
nr003	O5	28.5	1710	24.2	1454	-0.48	0.59	-0.25	0.34
nr004	O6	27.5	1652	23.3	1396	-0.25	0.29	-0.13	0.16
nr005	O7	27.9	1672	23.6	1416	-0.06	0.20	-0.02	0.11
nr006	O8	28.3	1698	24.0	1442	-0.23	0.29	-0.12	0.16

De in rood gegeven waarden betreffen een overschrijding van het respectievelijke criterium.

Bovenstaande resultaten werden tijdens een overleg op donderdag 9 november voorgelegd aan aMT, EBS-EM en PoAB. Op dit overleg werd de voorkeur gegeven aan openingswet O6 waarbij de schuiven in 60 s geopend worden zonder tussenliggende wachttijd. Doordat de pompen van de oude en de nieuwe kleppen op hetzelfde hydraulisch circuit draaien dient wel een beperkte wachttijd ingerekend te worden. Op 9/11/2023 werd hiervoor door PoAB een minimale wachttijd van 4 s tussen twee opeenvolgende fasen opgegeven. Vertrekkende hiervan worden in hoofdstuk 5 de simulaties voor het opstellen van de openingswet uitgewerkt.

Na uitvoeren van de simulaties voor de deur in het bovenhoofd werden ook simulaties uitgevoerd voor de deur in het benedenhoofd. De openingswet O3 respectievelijk O4 betreft de conservatieve respectievelijke pragmatische openingswet voor vullen met het benedenhoofd uit advies 12_095. De uit deze eerste simulaties volgende krachten en end-to-end waterspiegelhellingen worden samen met de openingswet voorgesteld in Figuur 8 en de nivelleertijd en extrema van de langskracht en end-to-end langse waterspiegelhelling in Tabel 6. Evenals bij vullen volgt dat bij toepassen van openingswet O3 de criteria voor de kracht uit de literatuur gerespecteerd wordt.



Figuur 8 – ledigen benedenhoofd bij maatgevend verval met openingswetten 12_095

Tabel 6 – ledigen benedenhoofd bij maatgevend verval met openingswetten 12_095

nr.	openingswet	nivelleertijd restverval=0.0m		nivelleertijd restverval=0.1m		extremum langskracht schip		extremum langshelling schip	
		[min]	[s]	[min]	[s]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
nr026	O3	27.8	1666	24	1410	-0.19	0.08	-0.11	0.06
nr027	O4	26.5	1591	22	1336	-0.81	0.59	-0.44	0.34

De in rood gegeven waarden betreffen een overschrijding van het respectievelijke criterium.

5 Simulaties met aangepaste openingswet

Zowel voor de roldeur 1 in het bovenhoofd als voor roldeur 4 in het benedenhoofd wordt een openingswet opgemaakt bestaande uit 4 fasen. Per fase opent een set kleppen. Het schema van openen van de vlinderkleppen wordt besproken in paragraaf 5.1. De voorgestelde openingswet voor roldeur 1 in het bovenhoofd wordt voorgesteld in paragraaf 5.2 en de voorgestelde openingswet voor roldeur 4 in het benedenhoofd wordt voorgesteld in paragraaf 5.3.

5.1 Schema openen vlinderkleppen

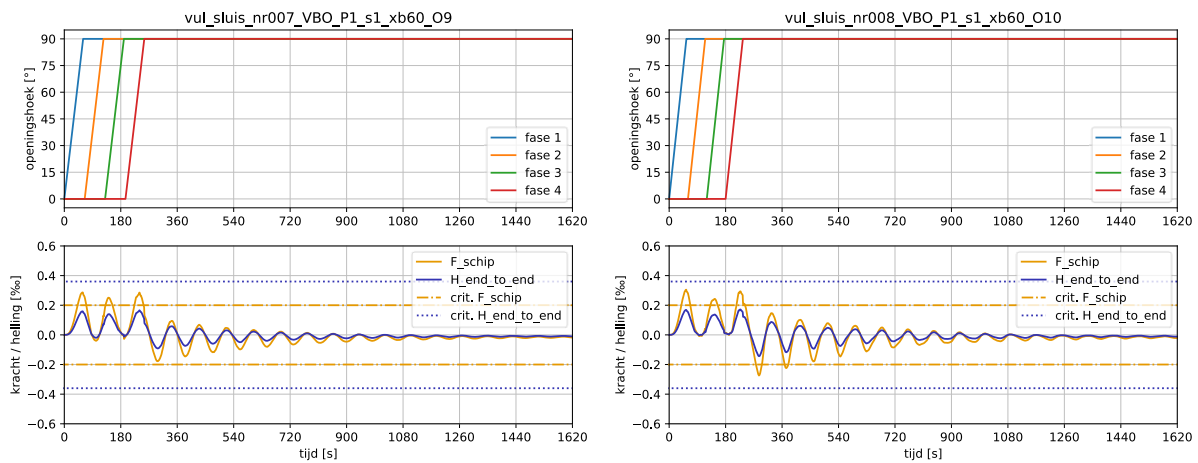
Op basis van de voorkeur van PoAB worden openingswetten weerhouden waarbij de kleppen openen in 4 fasen. In de eerste 3 fasen worden 2 kleppen geopend en in de laatste fase 3. Het is belangrijk dat het openen van de kleppen vrijwel symmetrisch gebeurt. Vanuit PoAB wordt hiernaast de wens gegeven om de wachttijd tussen het openen van twee kleppen op een zelfde circuit te beperken. Door WL worden de twee in Tabel 7 gegeven schema's van openen van de kleppen voorgesteld. Het eerste schema is hierbij volledig symmetrisch. Enkel voor het vierde circuit kan er niet aansluitend geopend worden. In het tweede voorgestelde schema worden eerst circuits 1 tot en met 4 ingezet en pas op het einde circuit 5. Het schema is hierdoor niet symmetrisch. Bemerkt dat in beide schema's gekozen wordt om te starten met de vlinderkleppen aan de kolkwanden. Dit betreft een intuïtieve keuze. De gemaakte aanname is dat de uitstroming van de jets nabij de kolkbodem zorgt voor een daling van de waterspiegel die vervolgens resulteert in een kracht gericht naar de kolkwand toe. Dit effect is sterker bij een afname van de afstand tussen boeg en deur. Aanbevolen wordt om bij ingebruikname van de nieuwe openingswet gericht navraag te doen aan de kapiteins van de RoRo-schepen. Als bepaalde kleinere schepen op een korte afstand nabij de sluisdeur aangemeerd worden verdient het aanbeveling om ook hen gericht te bevragen.

Tabel 7 – Voorgestelde schema's openen vlinderkleppen

Schema 1									
O8	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'	5
fase 1	x								x
fase 2		x						x	
fase 3				x		x			
fase 4			x		x		x		
Schema 2									
O8	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'	5
fase 1	x							x	
fase 2		x					x		
fase 3				x	x				
fase 4			x			x	x		x

5.2 Roldeur 1 in het bovenhoofd

Vertrekkend van openingswet O6 worden openingswet O9 en O10 gevormd. Bij openingswet O9 wordt de openingstijd van de kleppen behouden op 60 s en wordt een wachttijd van 5 s tussen de fasen ingevoegd. Bij openingswet O10 wordt de openingstijd van de kleppen beperkt tot 55 s en wordt een wachttijd van 5 s aangehouden wordt vooraleer de volgende fase aan te gaan. De resultaten van beide openingswetten worden gegeven in Figuur 9 en Tabel 8. Bemerk dat het verschil in nivelleertijd tussen openingswet O9 en O10 beperkt is tot een 11 s. Uit de simulatie volgt voor beide openingswetten een extremum van de langskracht van 0.30 ‰. Dit betreft een overschrijding met 50% van het in hoofdstuk 3 vooropgestelde criterium. Deze overschrijding wordt als toelaatbaar ingeschat. Enerzijds omdat het gesimuleerde extremum van de langse waterspiegelhelling merkbaar lager is dan het in situ opgemeten extremum van de langse waterspiegelhelling voor renovatie (0.17 ‰ ten opzichte van 0.36 ‰). Anderzijds omdat uit de simulaties volgt dat de nieuwe openingswetten resulteren in een aanzienlijke afname van de langskracht ten opzichte van de situatie voor renovatie (0.29 ‰ respectievelijk 0.30 ‰ ten opzichte van 0.95 ‰). Omwille van de lagere waarde voor het negatieve extremum van de kracht en end-to-end waterspiegelhelling wordt besloten om openingswet O9 te weerhouden voor roldeur 1 in het bovenhoofd.



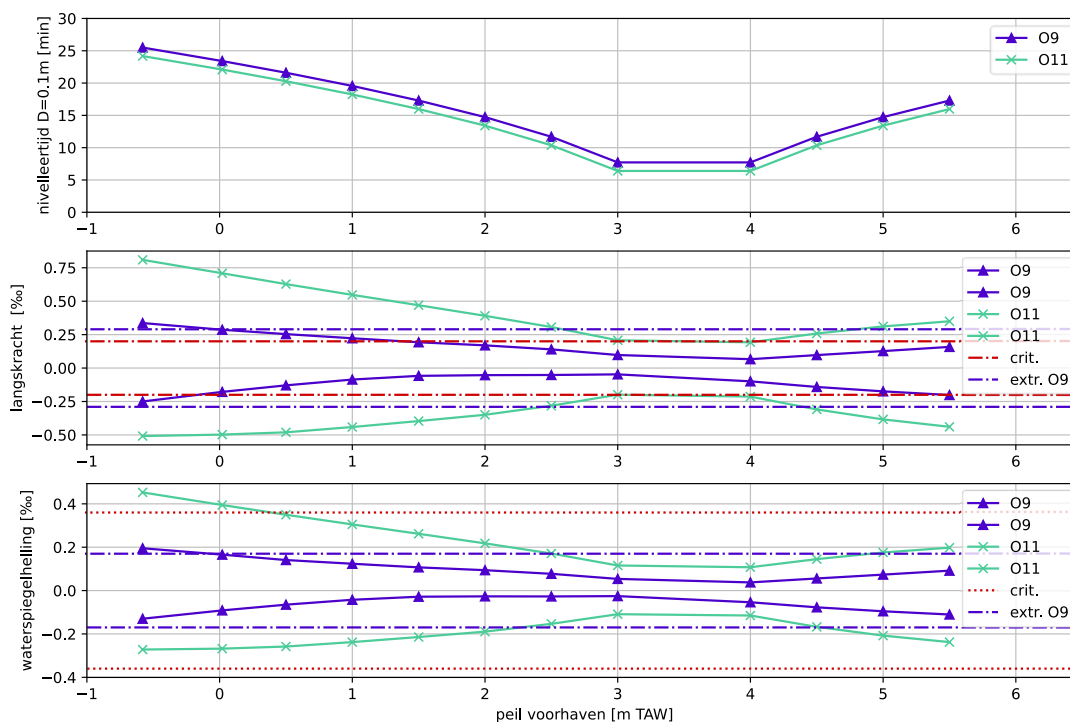
Figuur 9 – Simulaties bovenhoofd bij maatgevend verval

Tabel 8 – Simulaties bovenhoofd bij maatgevend verval

nr.	openingswet	nivelleertijd restverval=0.0m		nivelleertijd restverval=0.1m		extremum langskracht schip		extremum langshelling schip	
		[min]	[s]	[min]	[s]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
nr007	O9	27.7	1660	23	1404	-0.18	0.29	-0.09	0.17
nr008	O10	27.5	1649	23	1393	-0.27	0.30	-0.14	0.17

De in rood gegeven waarden betreffen een overschrijding van het respectievelijke criterium.

Vervolgens wordt nagegaan vanaf welk peil in de voorhaven overgegaan kan worden naar een snellere openingswet bestaande uit twee fasen. In de eerste fase worden de 5 oude vlinderkleppen geopend en in de tweede fase de 4 nieuwe. De openingstijd van de kleppen bedraagt hierbij 60 s met een tussenliggende wachttijd van 5 s, i.e. analoog met de preferentiële openingswet O9 voor nivelleren met het bovenhoofd bij het maatgevend verval. De snellere openingswet bestaande uit twee fasen wordt openingswet O11 benoemd. De nivelleertijd bij een restverval 0.1 m en de extrema van de langskracht en de end-to-end langse waterspiegelhelling worden gegeven in Figuur 10. Bij de figuren voor de kracht en de end-to-end langse waterspiegelhelling wordt eveneens het extremum horende bij de openingswet O9 bij het maatgevend verval geplot. Uit de figuur volgt dat bij een waterpeil in de voorhaven tussen +2.5 m TAW en +4.5 m TAW de berekende langskrachten op het schip en de end-to-end waterspiegelhellingen in de kolk bij het gebruik van de snelle openingswet bestaande uit twee fasen gelijk of kleiner zijn dan het extremum van de kracht bij de trage openingswet met het extreem verval. De nivelleertijd voor beide openingswetten wordt vergeleken in Tabel 9. Bemerkt hierin dat bij toepassen van de snellere openingswet de winst in nivelleertijd 79 s bedraagt onafhankelijk van het verval en dit zowel bij een restverval 0.0 m als bij een restverval 0.1 m.



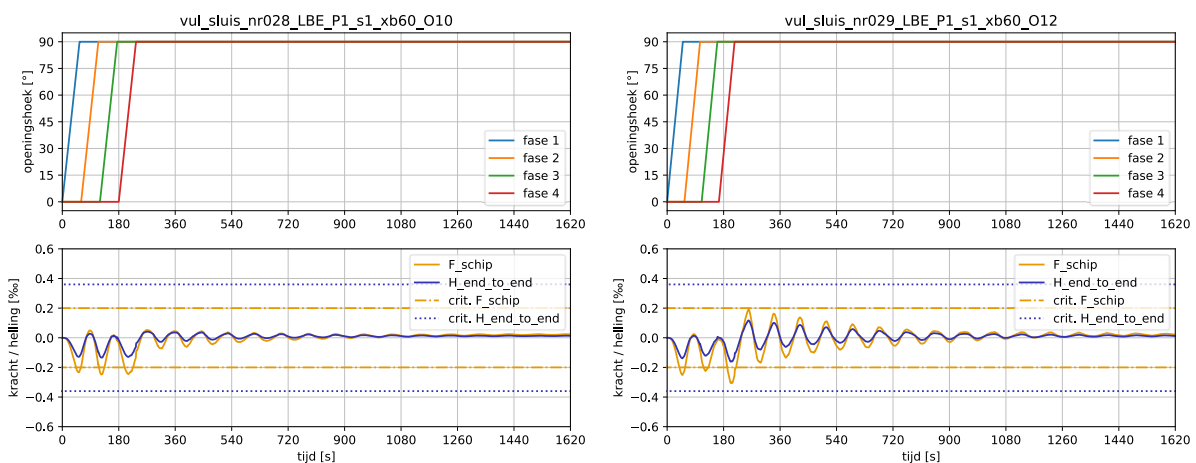
Figuur 10 – Vergelijking berekende langskracht op het schip en waterspiegelhelling bij toepassen van openingswet O9 en O11 voor nivelleren via het bovenhoofd

Tabel 9 – Vergelijking nivelleertijd bij toepassen van openingswet O9 en O11 voor nivelleren via het bovenhoofd

peil voorhaven [m TAW]	nivelleertijd restverval=0.0m				nivelleertijd restverval=0.1m			
	O9	O11	Δ [min]	Δ [s]	O9	O11	Δ [min]	Δ [s]
2.50	16.0	14.6	1.3	79	11.7	10.4	1.3	79
3.00	12.0	10.7	1.3	79	7.7	6.4	1.3	79
4.00	12.0	10.7	1.3	79	7.7	6.4	1.3	79
4.50	16.0	14.6	1.3	79	11.7	10.4	1.3	79

5.3 Roldeur 4 in het benedenhoofd

Bij het benedenhoofd treedt het grootste verval op tijdens ledigen. Voor een zelfde verval zijn de berekende krachten op het schip in de kolk bij ledigen lager dan bij vullen. Gekozen wordt om de vlinderkleppen in de deur ook in 4 fasen te openen. Hierbij wordt met openingswet O10 waarbij de kleppen geopend worden in 55 s met een wachttijd van 5 s. Aanvullend wordt nog een openingswet O12 gedefinieerd, hierbij worden de kleppen geopend in 50 s en wordt een wachttijd van 5 s gehanteerd. De resultaten van beide openingswetten bij ledigen via het benedenhoofd bij het maatgevend verval worden gegeven in Figuur 11 en Tabel 10. Het extremum van de langskracht bedraagt 0.25 ‰ bij openingswet O10 en 0.31 ‰ bij openingswet O12. Dit betreft een overschrijding met 25 % respectievelijk 55 % van het in hoofdstuk 3 vooropgestelde criterium. Deze overschrijdingen worden als toelaatbaar ingeschat. Enerzijds omdat het gesimuleerde extremum van de langse waterspiegelhelling merkkelijk lager is dan het in situ opgemeten extremum van de end-to-end langse waterspiegelhelling voor renovatie (0.13 ‰ respectievelijk 0.16 ‰ ten opzichte van 0.36 ‰). Anderzijds omdat uit de simulaties volgt dat de nieuwe openingswetten resulteren in een aanzienlijke afname van de langskracht ten opzichte van de situatie voor renovatie (0.25 ‰ respectievelijk 0.31 ‰ ten opzichte van 0.95 ‰). Het verschil in nivelleertijd voor beide simulaties bedraagt 12 s. Dit is verwaarloosbaar waardoor de voorkeur wordt gegeven aan openingswet O10.



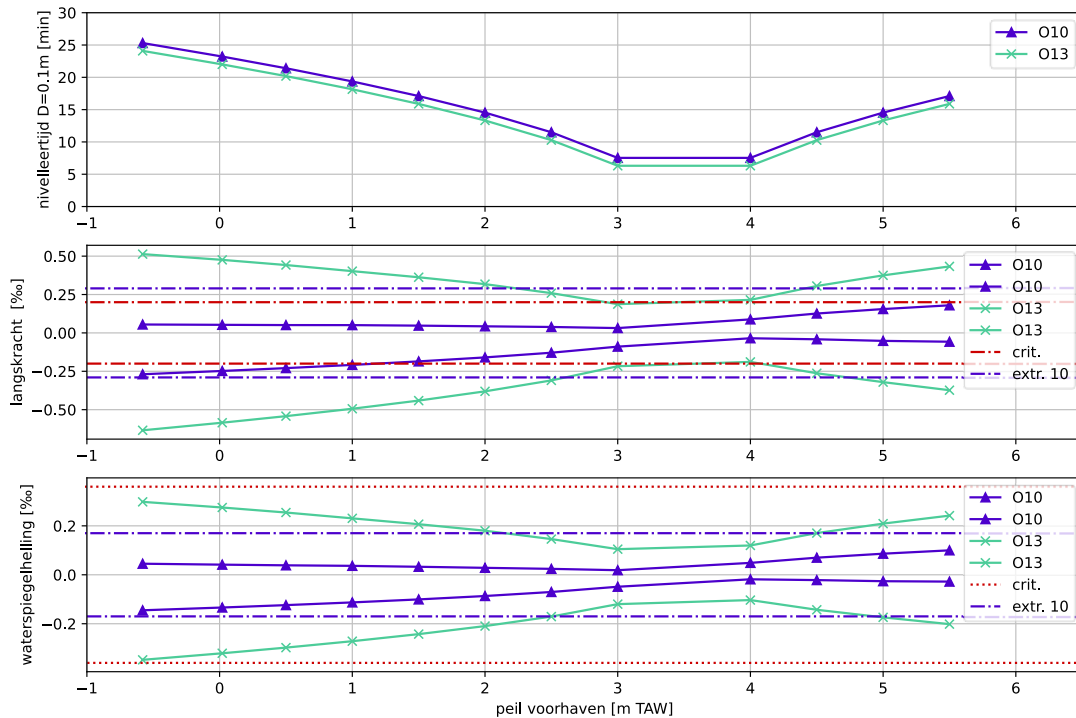
Figuur 11 – Ledigen benedenhoofd – simulaties bij maatgevend verval

Tabel 10 – Ledigen benedenhoofd – simulaties bij maatgevend verval

nr.	openingswet	nivelleertijd restverval=0.0m		nivelleertijd restverval=0.1m		extremum langskracht schip		extremum langshelling schip	
		[min]	[s]	[min]	[s]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
nr028	O10	27.5	1649	23	1393	-0.25	0.05	-0.13	0.04
nr029	O12	27.3	1637	23	1381	-0.31	0.19	-0.16	0.12

De in rood gegeven waarden betreffen een overschrijding van het respectievelijke criterium.

Vervolgens wordt net zoals voor het bovenhoofd nagegaan vanaf welk peil geopend kan worden in twee fasen. De openingstijd per fase wordt hierbij behouden op 55 s, analoog met de gekozen openingswet met 4 fasen. De openingswet bestaande uit twee fasen wordt openingswet O13 genoemd. De nivelleertijd bij een restverval 0.1 m en de extrema van de langskracht en de end-to-end langse waterspiegelhelling wordt gegeven in Figuur 12. Bij de figuren voor de kracht en de langshelling wordt eveneens het extremum horende bij vullen bovenhoofd met O9 geplot. Analooog met vullen via het bovenhoofd wordt voorgesteld om de snellere openingswet met twee fasen te gebruiken bij peilen in de voorhavens tussen +2.5 m TAW en +4.5 m TAW. Uit de simulaties volgt een tijdswinst van 73 s per nivellering.



Figuur 12 – Vergelijking openingswet O10 en O13 voor nivelleren via het bovenhoofd

Tabel 11 – Vergelijking openingswet O10 en O13 voor nivelleren via het bovenhoofd

peil voorhaven [m TAW]	zonder restverval				restverval 0.1 m			
	O10	O13	Δ [min]	Δ [s]	O10	O13	Δ [min]	Δ [s]
2.50	15.8	14.5	1.2	73	11.5	10.3	1.2	73
3.00	11.8	10.6	1.2	73	7.5	6.3	1.2	73
4.00	11.8	10.6	1.2	73	7.5	6.3	1.2	73
4.50	15.8	14.5	1.2	73	11.5	10.3	1.2	73

6 Conclusies

Bij renovatie van de uiterste roldeuren in de Vandammesluis werden 4 bijkomende vlinderkleppen geplaatst. Op vraag van aMT heeft WL voor de vlinderkleppen in deze roldeuren nieuwe openingswetten opgesteld. Hierbij werden in een eerste fase de 5 oude vlinderkleppen geopend en vervolgens in een tweede fase de 4 nieuwe vlinderkleppen. Deze openingswetten werden in 2012 door WL opgesteld op basis van modellering met het programma VUL_SLUIS. Na ingebruikname van roldeur 1 in het bovenhoofd werd echter vastgesteld dat de voorgestelde openingsduur per fase te traag is voor de hydraulische aansturing met foutmeldingen en versnelde slijtage tot gevolg.

Om deze reden worden voor de twee uiterste roldeuren nieuwe openingswetten opgesteld waarbij de kleppen openen in 4 fasen. In de eerste 3 fasen worden telkens twee kleppen geopend en in de 4^{de} en laatste fase worden drie kleppen geopend. Voor roldeur 1 in het bovenhoofd wordt een openingsduur van 60 s voorgesteld voor de kleppen met een wachttijd van 5 s tussen twee opeenvolgende fasen. Voor roldeur 4 in het benedenhoofd wordt een openingsduur van 55 s voorgesteld voor de kleppen met een wachttijd van 5 s tussen twee opeenvolgende fasen. Hiernaast werd nagegaan vanaf welk peil overgegaan kan worden naar een snellere openingswet uit twee fasen. Hierbij openen in de eerste fase de 5 oude kleppen en in de tweede fase de 4 nieuwe kleppen. Uit de simulaties volgt dat zowel voor roldeur 1 in het bovenhoofd als voor roldeur 4 in het benedenhoofd bij een peil tussen +2.50 m TAW en +4.50 m TAW in de voorhaven overgegaan kan worden naar de snellere openingswet bestaande uit twee fasen.

7 Referenties

Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2012a). Haven van Zeebrugge - SHIP: terreinmeting nivelleren Vandammesluis. *WL Rapporten*, 12_036. 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>

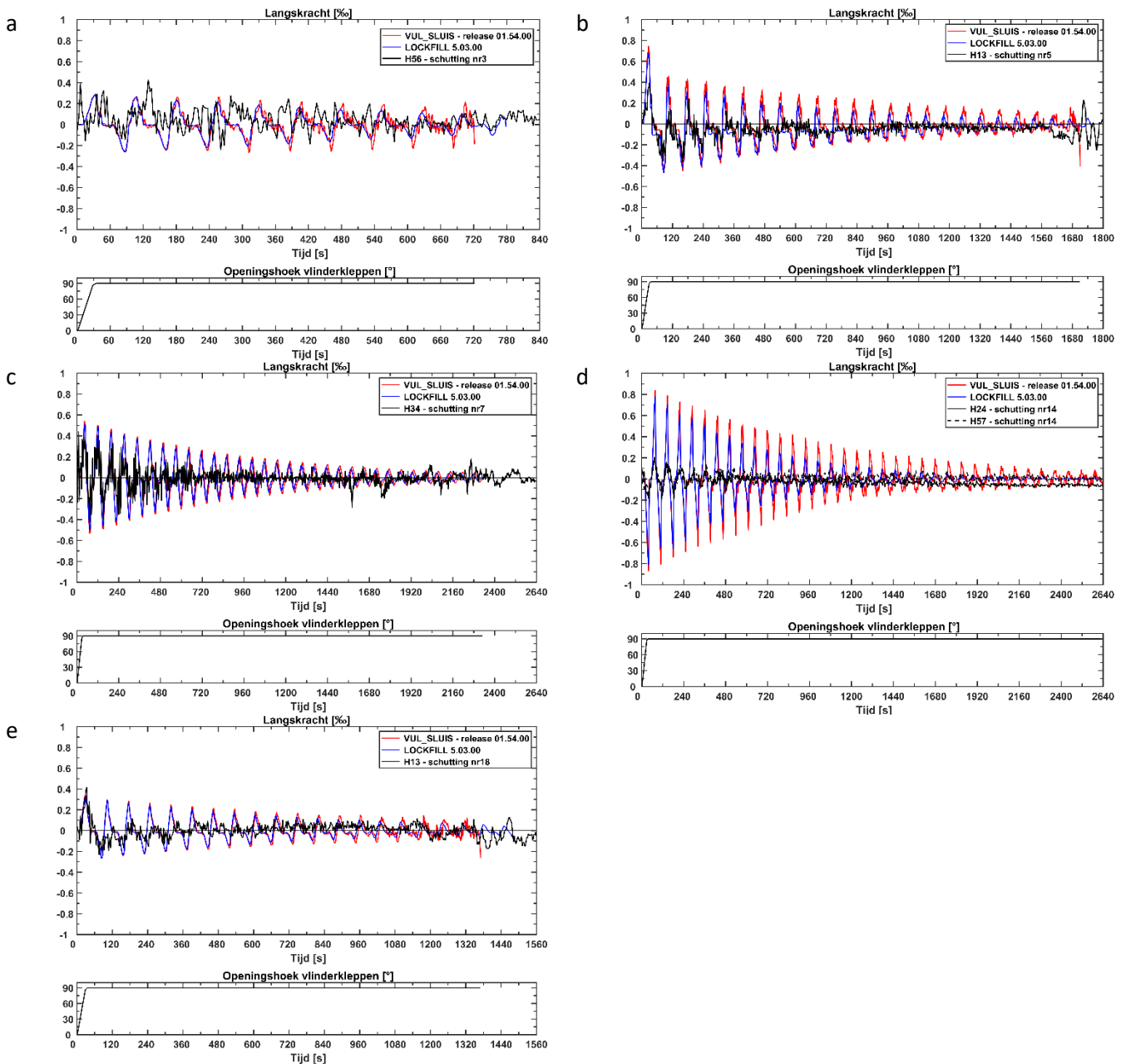
Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2012b). Zeebrugge - Vandamme sluis: review hydraulische studie bijkomende vlinderkleppen. *WL Adviezen*, 12_035. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2012c). Zeebrugge - Vandammesluis: openingswet vlinderkleppen nieuwe toestand. *WL Adviezen*, 12_095. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Vercruyse, J.; De Mulder, T. (2024). Verdere ontwikkeling VUL_SLUIS: Validatie VUL_SLUIS en LOCKFILL voor enkele praktijkcases. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 15_007_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen (in concept).

Bijlage 1 Validatie VUL_SLUIS en LOCKFIL

In onderstaande worden de figuren volgend uit xx met de validatie van VUL_SLUIS en Lockfill op basis van metingen in de Vandammesluis (Vercruyse *et al.*, 2012a).



a: Simulatie 003; b: Simulatie 005; c: Simulatie 007; d: Simulatie 014; e: Simulatie 018

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