

WATERBOUWKUNDIG LABORATORIUM



Vlaanderen
is wetenschap

18_002_1
WL rapporten

Dender – Nieuwe sluis Aalst

Opstellen openingswet nivelleersysteem

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Dender - Nieuwe sluis Aalst

Opstellen openingswet nivelleersysteem

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

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2018
D/2018/3241/032

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2018). Dender - Nieuwe sluis Aalst: Opstellen openingswet nivelleersysteem. Versie 4.0. WL Rapporten, 18_002_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

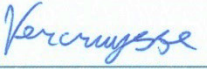
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg, Afdeling Bovenschelde	Ref.:	WL2018R18_002_1
Keywords (3-5):	lock, filling emptying system, design		
Tekst (p.):	27	Bijlagen (p.):	7
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

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

Controle

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

Goedkeuring

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



Abstract

Bij Afdeling Bovenschelde van De Vlaamse Waterweg nv loopt momenteel een project voor de opwaardering van de Dender afwaarts Aalst tot (scheepvaart-)CEMT klasse IV. In kader hiervan wordt te Aalst een nieuwe opwaarts gelegen CEMT klasse I sluis (lengte 56 m, breedte 6.0 m en verval 1.78 m) gebouwd en komt de huidige sluis te Aalst te vervallen. Het Waterbouwkundig Laboratorium heeft voor de nieuwe sluis te Aalst in 2013 het hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem. Uit dit hydraulisch ontwerp volgde een nivelleersysteem met 5 cirkelvormige openingen in de sluisdeur diameter 0.70 m afgesloten met vlinderkleppen. De openingswet voor de vlinderkleppen bestond hierbij uit een eerste fase met een hoge draaisnelheid en hierop aansluitend een tweede fase met een lage draaisnelheid.

Bij het uitwerken van het elektromechanisch ontwerp in 2017 is besloten om voor de vlinderkleppen een openingswet met een constante draaisnelheid toe te passen. Een dergelijke openingswet heeft economische en onderhoudstechnische voordelen. In het kader hiervan vraagt de Vlaamse Waterweg aan het Waterbouwkundig Laboratorium om voor het nivelleersysteem van de sluis een openingswet op te stellen met een constante draaisnelheid. Dit rapport beschrijft de simulaties die uitgevoerd zijn voor het opstellen van deze nieuwe openingswet. Hierbij wordt voor beroepsvaart en recreatievaart eenzelfde openingswet van de vlinderkleppen opgesteld.

Uit een eerste set simulaties volgt dat een recreatievaartuig aangemeerd met de boeg ter hoogte van de stopstreep maatgevend is voor het opstellen van de openingswet van de vlinderkleppen. Voor het vullen van de kolk met dit recreatievaartuig wordt zowel een lineaire openingswet (zonder onderbreking) met een trage hoeksnelheid als een getrapte openingswet (met onderbrekingen) en een hoge hoeksnelheid opgesteld. Uit de simulaties volgt dat met een lineaire openingswet de kolk genivelleerd wordt in 7.2 min. Het toepassen van een getrapte openingswet betekent een verlaging van de nivelleertijd met 80 s tot 5.9 min. Doordat bij ledigen de krachten op de schepen in de kolk veelal lager zijn dan bij vullen kan voor ledigen een snellere openingswet toegepast worden. Zowel voor de lineaire openingswet als voor de getrapte openingswet wordt een voor ledigen geoptimaliseerde versie opgesteld. Bij het toepassen van een geoptimaliseerde openingswet voor ledigen wordt de nivelleertijd met ca. 70 s ingekort tot 6.1 min (bij een lineaire openingswet) en 4.6 min (bij een getrapte openingswet).

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Gegevens	2
2.1 Waterpeilen.....	2
2.2 Sluiskolk	2
2.3 Schip	4
2.4 Simulaties	4
3 Criteria	7
4 Resultaat voorgaande simulaties	8
5 Eerste reeks simulaties.....	10
5.1 Resultaat simulaties.....	10
5.2 Conclusies	17
6 Tweede reeks simulaties	18
6.1 Vullen bovenhoofd	18
6.2 Ledigen benedenhoofd.....	20
6.3 Noodstop	23
6.4 Conclusies	24
7 Conclusie en aanbevelingen	25
7.1 Conclusies	25
7.2 Aanbevelingen	26
8 Referenties	27
Bijlage A - Berekening periode translatiegolf.....	B1
Bijlage B - Openingswetten	B2

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Ontwerpwaterpeilen.....	2
Tabel 2 – Afmetingen sluiskolk.....	2
Tabel 3 – Karakteristieken nivelleersysteem.....	3
Tabel 4 – Afmetingen schip CEMT klasse I en traagloper.....	4
Tabel 5 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte.....	5
Tabel 6 – Resultaat voorgaande simulaties (Verelst <i>et al.</i> , 2014).....	8
Tabel 7 – Voorgaande simulaties – openingswetten geometrie zonder breekbalken.....	9
Tabel 8 – Eerste reeks simulaties – vullen.....	16
Tabel 9 – Tweede reeks simulaties – vullen.....	19
Tabel 10 – Tweede reeks simulaties – ledigen.....	22
Tabel 11 – Tweede reeks simulaties – noodscenario getrapte openingswet.....	24
Tabel 12 – Periode translatiegolf.....	B1
Tabel 13– Lineaire openingswetten.....	B4
Tabel 14– Getrapte openingswetten.....	B5
Tabel 15 – Getrapte openingswet met opdeling in twee sets vlinderkleppen.....	B6
Tabel 16 – Getrapte openingswet met noodstop.....	B7

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Vooraanzicht en doorsnede deur	3
Figuur 2 – Doorsnede deur ter hoogte van vlinderkleppen	3
Figuur 3 – Vergelijking afvoercoëfficiënt.....	5
Figuur 4 – Voorgaande simulaties - openingswetten.....	9
Figuur 5 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O1	11
Figuur 6 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O2	12
Figuur 7 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O3	13
Figuur 8 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O4	14
Figuur 9 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O5	15
Figuur 10 – Tweede reeks simulaties – vullen – openingswet O2	18
Figuur 11 – Tweede reeks simulaties – vullen – openingswet O6	19
Figuur 12 – Tweede reeks simulaties – ledigen – openingswet O2	20
Figuur 13 – Tweede reeks simulaties – ledigen – openingswet O6	21
Figuur 14 – Tweede reeks simulaties – ledigen – openingswet O7	21
Figuur 15 – Tweede reeks simulaties – ledigen – openingswet O8	22
Figuur 16 – Tweede reeks simulaties – noodscenario sluiten vlinderkleppen tijdens vullen met openingswet O6	23
Figuur 17 – Tweede reeks simulaties – noodscenario sluiten vlinderkleppen tijdens ledigen met openingswet O8.....	23
Figuur 18 – Openingswetten eerste reeks simulaties – variatie in de tijd van de openingshoek.....	B2
Figuur 19– Openingswetten eerste reeks simulaties – variatie in de tijd van de hoeksnelheid.....	B3
Figuur 20 – Openingswetten tweede reeks simulaties – variatie in de tijd van de openingshoek.....	B3
Figuur 21 – Openingswetten tweede reeks simulaties – variatie in de tijd van de hoeksnelheid.....	B4

1 Inleiding

Bij Afdeling Bovenschelde van De Vlaamse Waterweg nv (DVW; contactpersoon Jeroen Verbelen) loopt momenteel een project voor de opwaardering van de Dender afwaarts Aalst tot (scheepvaart-)CEMT klasse IV. In kader hiervan wordt te Aalst een nieuwe opwaarts gelegen CEMT klasse I sluis (lengte 56 m, breedte 6.0 m en verval 1.78 m) gebouwd en komt de huidige sluis te Aalst te vervallen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) heeft voor de nieuwe sluis te Aalst het hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem en de dimensionering van de bodembescherming. Een eerste hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem werd uitgevoerd in 2009 (Verelst *et al.*, 2009). Hieruit volgde een nivelleersysteem met 6 cirkelvormige openingen in de sluisdeur diameter 0.60 m afgesloten met vlinderkleppen. Bij het uitwerken van het constructief ontwerp door Expertise Beton en Staal (EBS) werd besloten dat het voorgestelde nivelleersysteem constructief niet haalbaar was. In 2013 heeft WL vervolgens een nieuw hydraulisch ontwerp uitgevoerd (Verelst *et al.*, 2014). Uit dit hydraulisch ontwerp volgde een nivelleersysteem met 5 cirkelvormige openingen in de sluisdeur diameter 0.70 m afgesloten met vlinderkleppen. Hierbij bestond de openingswet van de vlinderkleppen uit een eerste fase met een hoge draaisnelheid (1.5 °/s voor beroepsvaart en 1.4 °/s voor recreatievaart) en hierop aansluitend een tweede fase met een lage draaisnelheid (0.3 °/s voor beroepsvaart en 0.12 °/s voor recreatievaart). Dit nivelleersysteem werd vervolgens constructief verder uitgewerkt door EBS. In 2017 werd door middel van CFD simulaties bijkomend de hydraulische wenselijkheid van een trompetvormige geleiding onderzocht (Vercruysse *et al.*, 2018).

Bij het uitwerken van het elektromechanisch ontwerp in 2017 door de afdeling ElectroMechanica en Telematica (EMT; contactpersoon Kris Janssens) werd besloten om voor de vlinderkleppen een openingswet met een constante draaisnelheid toe te passen. Een dergelijke openingswet heeft economische en onderhoudstechnische voordelen. In kader hiervan vraagt DVW aan WL om voor het nivelleersysteem van de sluis een openingswet op te stellen met een constante draaisnelheid. Dit rapport beschrijft de simulaties die uitgevoerd zijn voor het opstellen van deze nieuwe openingswet.

De gebruikte gegevens voor de simulaties worden samengevat in hoofdstuk 2. De toegepaste criteria voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk en de langskracht op het schip tijdens nivelleren worden gegeven in hoofdstuk 3. De resultaten van de in 2013 uitgevoerde hydraulische simulaties worden samengevat in hoofdstuk 4. Door middel van een eerste reeks simulaties worden de voor- en nadelen van een aantal openingswetten vergeleken, zie hoofdstuk 5. Het resultaat van deze simulaties werd besproken op een overleg met de opdrachtgever. Vervolgens wordt een tweede reeks simulaties uitgevoerd, zie hoofdstuk 6. De conclusies en aanbevelingen worden gegeven in hoofdstuk 7.

2 Gegevens

Dit hoofdstuk beschrijft de voor de simulaties toegepaste gegevens.

De gehanteerde op- en afwaarts waterpeilen worden gegeven in paragraaf 2.1. De voor de simulaties relevante karakteristieken van de sluis en het nivelleersysteem worden beschreven in paragraaf 2.2. De afmetingen van het beroepsvaartuig en het recreatievaartuig worden gegeven in paragraaf 2.3. In paragraaf 2.4 worden de gebruikt programma's beschreven en wordt de naamgeving van de simulaties verduidelijkt.

2.1 Waterpeilen

De ontwerpwaterpeilen voor de nieuwe sluis te Aalst worden gegeven in Tabel 1. Voor de simulaties in dit rapport worden de streefpeilen in het op- en afwaarts pand gehanteerd: een opwaarts peil +7.61 m TAW, een afwaarts peil +5.83 m TAW. Hieruit volgt een verval van 1.78 m.

Tabel 1 – Ontwerpwaterpeilen

	opwaarts [mTAW]	afwaarts [mTAW]	verval [m]
streefpeil	7.61	5.83	1.78
maximum schutpeil	7.61	6.50	
minimum schutpeil (= alarmpeil)	7.48	5.70	
hoogst gemeten waterpeil	8.18	6.90	
laagst gemeten waterpeil	7.48	5.70	

(Bron: Verelst *et al.* (2009))

2.2 Sluiskolk

Op basis van de door DVW bezorgde plannen (Soetaert Civil Contractors *et al.*, 2017a; b) worden de afmetingen van de sluiskolk voor de simulaties bepaald, zie Tabel 2.

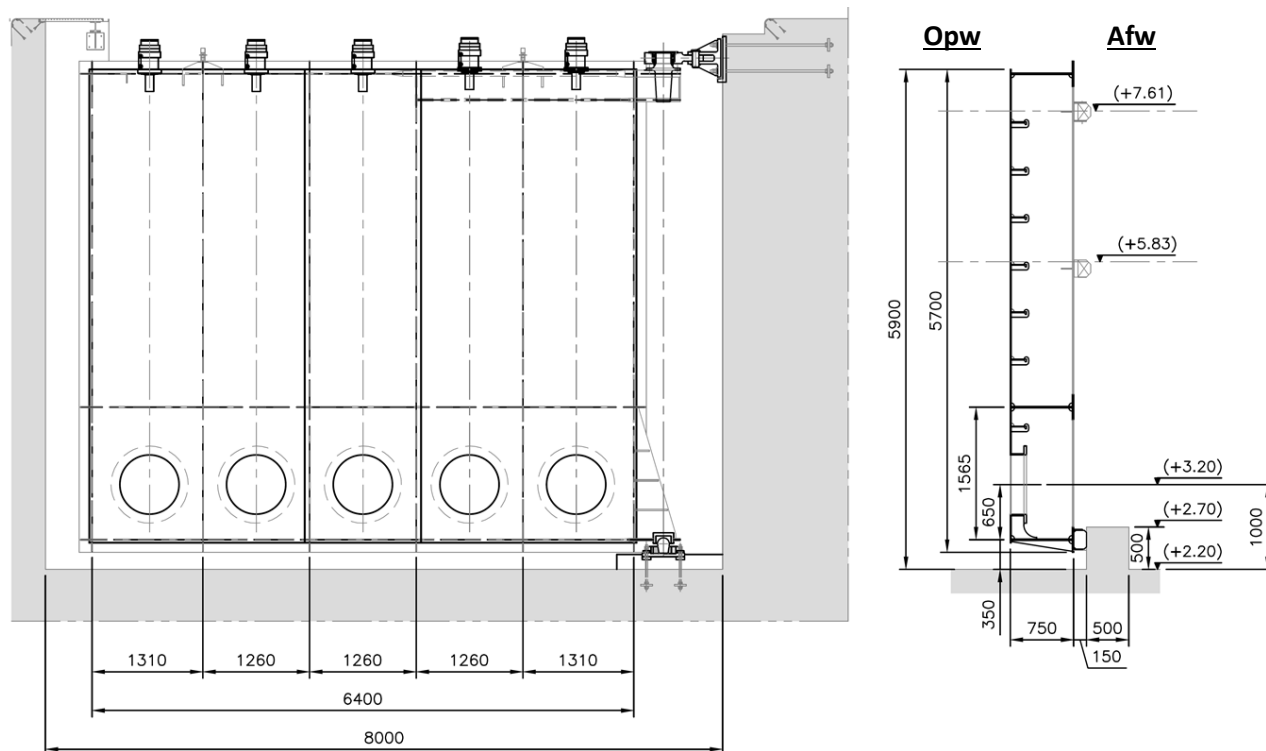
Tabel 2 – Afmetingen sluiskolk

kolklengthe	56.0 m
kolkbreedte	6.0 m
stopstreep	4.00 m
bodempeil kolk	+2.2 m TAW

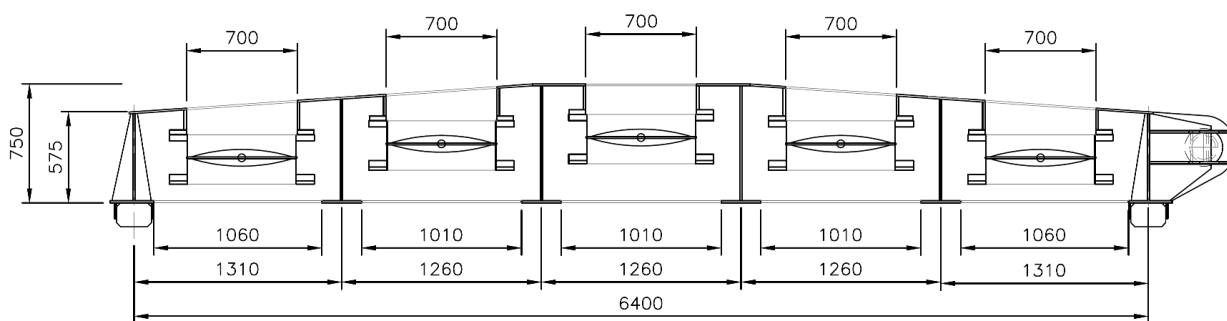
Merk op dat ten opzichte van de vorige simulaties (Verelst *et al.*, 2014) de kolklengthe met 2.0 m is toegenomen. De kolkbreedte, het bodempeil van de kolk en de stopstreepafstand zijn niet gewijzigd ten opzichte van de vorige simulaties. Het nivelleersysteem bestaat per hoofd uit 5 nivelleeropeningen met diameter 0.7 m afgesloten door vlinderkleppen. Voor de nieuwe sluis te Aalst wordt een identieke deur toegepast voor het bovenhoofd en het benedenhoofd. De plannen van deur zijn door EBS in Autocad formaat overgemaakt (mail Robin Timmermans dd. 12/07/2017). Een vooraanzicht en een verticale

doorsnede van deze deur wordt gegeven in Figuur 1, een horizontale doorsnede ter hoogte van het center van de vlinderkleppen wordt gegeven in Figuur 2.

Figuur 1 – Vooraanzicht en doorsnede deur



Figuur 2 – Doorsnede deur ter hoogte van vlinderkleppen



Omwille van de beperkte kolkbreedte (6.00 m) wordt een draaideur toegepast, met een dikte van 0.75 m in het midden en 0.575 m aan de zijkanten. De voor de simulaties benodigde karakteristieken van het nivelleersysteem worden samengevat in Tabel 3.

Tabel 3 – Karakteristieken nivelleersysteem

aantal vlinderkleppen	[-]	5
diameter vlinderkleppen	[m]	0.70
doorstroomsectie vlinderklep	[m ²]	0.38
totale doorstroomsectie	[m ²]	1.92

2.3 Schip

In de in 2009 en 2013 uitgevoerde studie werd een schip CEMT klasse I als ontwerpschip beschouwd. Daarnaast werd ook een recreatievaartuig (een traagloper) beschouwd. De karakteristieke afmetingen van deze beide types schepen worden overgenomen in Tabel 4.

Tabel 4 – Afmetingen schip CEMT klasse I en traagloper

		CEMT klasse I	traagloper
lengte		38.5 m	12.0 m
breedte		5.05 m	3.4 m
diepgang		2.2 m	1.4 m
blokcoëfficiënt		0.90	0.38
massa ¹		384.9 ton ⁽²⁾	21.7 ton ⁽²⁾
hoek boeg	horizontaal vlak	45°	45°
	verticaal vlak	90°	90°

(Bron: Verelst *et al.* (2009))

2.4 Simulaties

De simulaties worden zowel uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.54.00 als met LOCKFILL release 5.03.00. Zowel het programma VUL_SLUIS als het programma LOCKFILL berekenen voor een nivelleersysteem met openingen in de deur het debiet doorheen de openingen, het kolkpeil en de optredende langskrachten op een schip in de kolk. Het programma VUL_SLUIS is door WL ontwikkeld op basis van de beschikbare literatuur in verband met het programma LOCKFILL (ontwikkeld door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat) en is gevalideerd met meetgegevens uit de literatuur en met bijkomende meetgegevens van WL (Verelst *et al.*, 2017). Voor het opstellen van de openingswet wordt het programma VUL_SLUIS gebruikt. De resultaten met het programma LOCKFILL worden ter vergelijking gegeven.

Het debiet doorheen de nivelleeropening wordt berekend door middel van volgende formule:

$$Q = \mu_{(k)} \cdot n \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$$

Met:

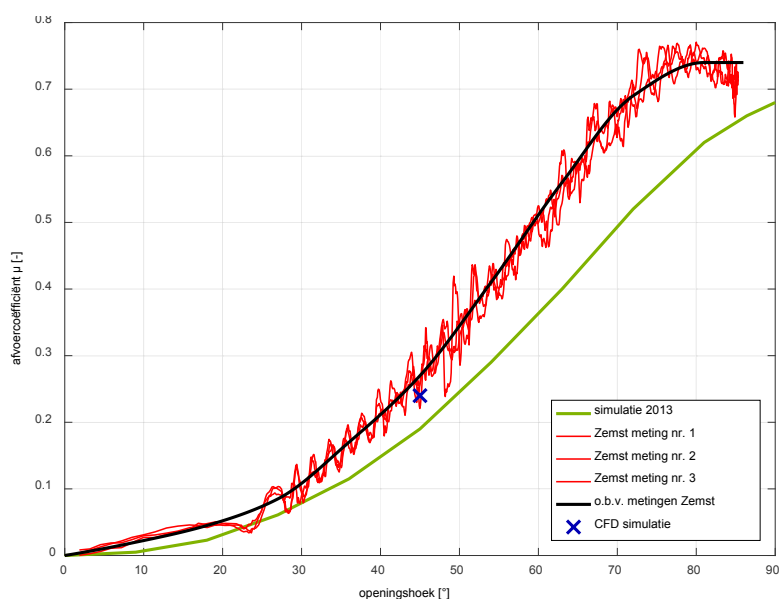
- Q Debiet [m³/s]
- $\mu_{(k)}$ Afvoercoëfficiënt in functie van klephoek [-]
- n Aantal openingen = 5 [-]
- A Doorstroomsectie (1 nivelleeropening $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0.385 \text{ m}^2$) [m²]
- g Valversnelling = 9.81 m/s² [m/s²]
- ΔH Verval = 1.62 m [m]

¹ Deze massa betreft de massa van schip + lading.

² In de in 2009 uitgevoerde studie is voor het schip CEMT klasse I een blokcoëfficiënt van 0.90 verondersteld en voor de traagloper een blokcoëfficiënt van 0.38. De massa van het schip + lading is bepaald als lengte x breedte x diepgang x blokcoëfficiënt. De blokcoëfficiënt van 0.38 voor de traagloper is bepaald op basis van een studie uitgevoerd door Van Oossanen & Associates b.v. (Van Oossanen & Associates b.v., 2006), in opdracht van Rijkswaterstaat/RIZA.

In de voorgaande door WL uitgevoerde hydraulische simulaties werd de variatie van de afvoercoëfficiënt in functie van de klephoek overgenomen uit Schwanenberg & Jongeling (2003). In Figuur 3 wordt deze afvoercoëfficiënt vergeleken met de uit in situ metingen van een nivelleersysteem met vlinderkleppen (middendeur sluis Zemst) afgeleide afvoercoëfficiënt (Vercruysse *et al.*, 2015) en de afvoercoëfficiënt bij een klephoek 45° volgend uit de uitgevoerde CFD simulaties van de nivelleeropening (Badano *et al.*, 2017). Merk hierin op dat zowel de afvoercoëfficiënt afgeleid uit de in situ metingen als de afvoercoëfficiënt bij een klephoek 45° volgend uit de CFD simulaties hoger is dan de afvoercoëfficiënt gehanteerd in de voorgaande simulaties. Voor de in dit rapport beschreven simulaties wordt de afvoercoëfficiënt afgeleid uit de in situ meting toegepast. Bemerkt hierbij dat een hogere afvoercoëfficiënt veelal conservatief is voor het bepalen van de langskracht. De in VUL_SLUIS en LOCKFILL ingegeven afvoercoëfficiënt in functie van de hoek wordt gegeven in Tabel 5.

Figuur 3 – Vergelijking afvoercoëfficiënt



Tabel 5 – Afvoercoëfficiënt in functie van hefhoogte

relatieve openings hoek	afvoercoëfficiënt μ	
	voorgaande simulaties (Schwanenberg & Jongeling, 2003)	huidige simulaties (Vercruysse <i>et al.</i> , 2015)
0.00	0.000	0.000
0.10	0.005	0.020
0.20	0.023	0.045
0.30	0.061	0.085
0.40	0.115	0.170
0.50	0.190	0.270
0.60	0.290	0.410
0.70	0.400	0.560
0.80	0.520	0.690
0.90	0.620	0.740
0.96	0.660	0.740
1.00	0.680	0.740

Zowel in VUL_SLUIS als in LOCKFILL dient voor de uitstroomopeningen de doorstroomsectie en het peil van de bovenzijde van de jet aan afwaartse zijde van de sluisdeur opgegeven te worden. Doordat geen breekbalken toegepast worden, wordt aangenomen dat de spreiding tussen de vlinderkleppen en het afwaarts deurvlak verwaarloosbaar is. De doorstroomsectie van de jet aan afwaartse zijde van de sluisdeur en het peil van de bovenzijde van de jets wordt hierom gelijkgesteld met de oppervlakte en het bovenpeil van de cirkelvormige openingen waarin de vlinderkleppen gemonteerd zijn.

De uitgevoerde simulaties met VUL_SLUIS en LOCKFILL hebben een als volgt opgebouwde naam:

$$\underbrace{\text{SXXX}}_{\text{volg-}} - \underbrace{\text{V/L}}_{\text{type}} - \underbrace{\text{PX}}_{\text{peilen}} - \underbrace{\text{SX}}_{\text{schip}} - \underbrace{\text{OX}}_{\text{openings-}} - \underbrace{\text{stX}}_{\text{wet stopstreep-afstand}}$$

Met:

- SXXX Volnummer simulatie
- V/L Type
 - V Vullen
 - L Ledigen
- PX Gebruikte peilen
 - P1 Opwaarts +7.61 m TAW, afwaarts +5.83 m TAW
- SX Schip
 - S1 CEMT klasse I
 - S2 traagloper
- OX Openingswet O1 tot en met O9
- stX Stopstreepafstand
 - st4 Boeg schip op 4 m van de deur
 - st7 Boeg schip op 7 m van de deur

3 Criteria

De criteria waaraan het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem dient te voldoen, worden overgenomen uit de in 2009 en de in 2013 uitgevoerde studie:

1. Nivelleertijd

Door de opdrachtgever is gesteld dat de nivelleertijd van de sluis ca. 4 min (240 s) dient te bedragen.

2. Maximale langskracht

Voor het schip CEMT klasse I wordt een maximaal toelaatbare langskracht van 1.5 ‰ toegepast en voor recreatievaart wordt een maximaal toelaatbare langskracht van 3 ‰ toegepast (Beem *et al.*, 2000).

3. Stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk

Voor binnenvaart wordt bij vervallen lager dan 10.0 m een bovengrens voor de maximale waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk van 1 m/min (~ 0.017 m/s) toegepast (Beem *et al.*, 2000). Voor recreatievaart wordt een bovengrens voor de maximale waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk van 0.6 m/min (~ 0.010 m/s) toegepast (Lasard & Pulina, 1994).

Voor de in dit rapport beschreven simulaties worden in hoofdzaak de criteria voor de langskracht en de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk toegepast en wordt getracht om een nivelleertijd te bekomen die zo dicht mogelijk bij de opgegeven nivelleertijd van 4 min gelegen is.

4 Resultaat voorgaande simulaties

De voorgaande simulaties (Verelst *et al.*, 2014) werden uitgevoerd voor een nivelleersysteem met 5 openingen in de deur afgesloten met vlinderkleppen diameter 0.70 m. Hierbij werd zowel een geometrie zonder breekbalken als een geometrie met aanwezigheid van breekbalken beschouwd. In het uiteindelijke ontwerp werd gekozen voor een nivelleersysteem zonder breekbalken. Tabel 6 geeft een overzicht van de resultaten van de simulaties uit (Verelst *et al.*, 2014) voor het nivelleersysteem zonder breekbalken. Voor deze simulaties werd VUL_SLUIS release 01.42.07 toegepast. Van deze release van het programma VUL_SLUIS bestonden twee versies namelijk release 01.42.vA.07 en 01.42.vB.07. In deze beide versies van het programma VUL_SLUIS is de berekening van het debiet door de vulopeningen, de variatie van het waterpeil in de sluiskolk en de optredende end-to-end waterspiegelhellingen identiek. De verschillen tussen de beide versies van het programma betreffen de formulering voor het berekenen van de langskrachten op het schip. Tijdens de validatie van het programma is wel gebleken dat de resultaten van release 01.42.vB.07 het beste overeenkomen met deze van het Nederlandse programma LOCKFILL. Bij de ontwikkeling van VUL_SLUIS release 01.54.00 (Verelst *et al.*, 2017) werd slechts één formulering voor het berekenen van de langskracht op het schip meer toegepast. De vergelijking tussen de berekende langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 leert dat met deze release lagere langskrachten op het schip berekend worden dan deze berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.07 en dat deze langskrachten de langskrachten op het schip berekend met LOCKFILL beter benaderen.

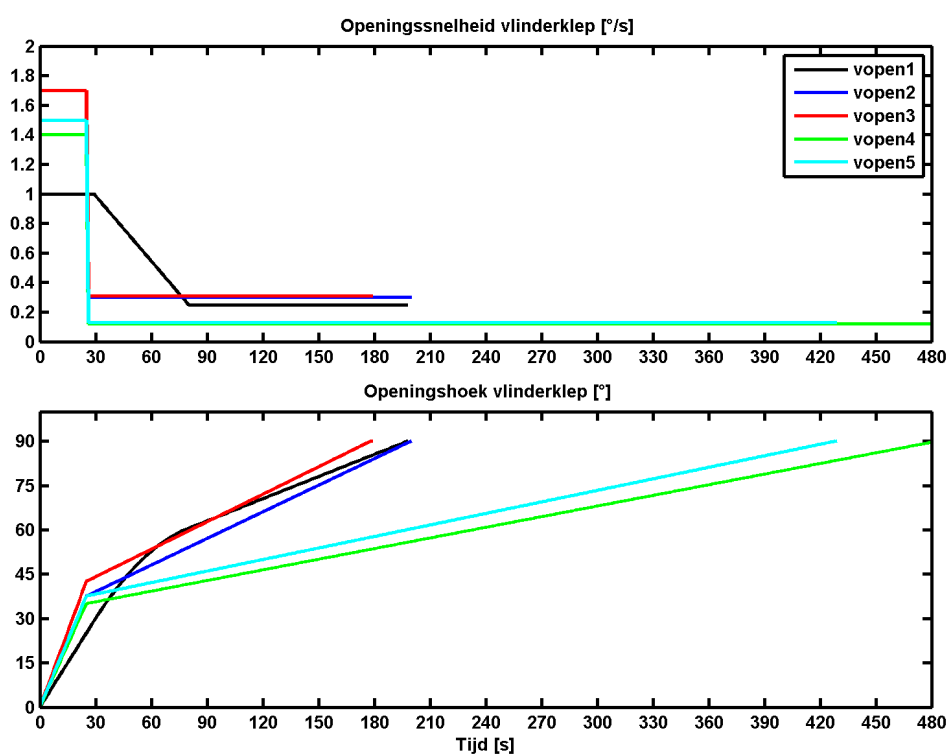
Tabel 6 – Resultaat voorgaande simulaties (Verelst *et al.*, 2014)

	CEMT klasse I		traagloper	
	openingswet vopen1	openingswet vopen2	openingswet vopen2	openingswet vopen4
nivelleertijd	231 s	240 s	240 s	348 s
restverval 0 cm	3.9 min	4.0 min	4.0 min	5.8 min
nivelleertijd	197 s	205 s	205 s	302 s
restverval 10cm	3.3 min	3.4 min	3.4 min	5.0 min
extreme waarde stijgsnelheid	0.013 m/s	0.012 m/s	0.012 m/s	0.007 m/s
extreme waarde debiet	4.1 m ³ /s	3.8 m ³ /s	3.8 m ³ /s	2.3 m ³ /s
minimale waarde langskracht vul_sluis.m release 01.42.vA.07	-1.66 ‰	-1.47 ‰	-7.57 ‰	-2.89 ‰
maximale waarde langskracht vul_sluis.m release 01.42.vA.07	0.31 ‰	0.59 ‰	0.97 ‰	0.87 ‰
minimale waarde langskracht vul_sluis.m release 01.42.vB.07	-0.79 ‰	-0.73 ‰	-3.60 ‰	-1.39 ‰
maximale waarde langskracht vul_sluis.m release 01.42.vB.07	0.36 ‰	0.69 ‰	1.12 ‰	1.03 ‰

Merk in Tabel 6 op dat een verschillende openingswet voorgesteld wordt voor het CEMT klasse I schip en voor de traagloper in de kolk. Bij toepassen van de openingswet vopen2 met de traagloper in de kolk wordt

het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk beperkt overschreden en bedraagt de gesimuleerde langskracht 2.5 keer het criterium. Hierop werd een aangepaste, tragere, openingswet opgesteld voor de traagloper (vopen4). De nivelleertijd bedraagt 4.0 min voor het CEMT klasse I schip en 5.8 min voor de traagloper. De in Verelst *et al.* (2014) toegepaste openingswetten zijn grafisch voorgesteld in Figuur 4 en weergegeven in Tabel 7.

Figuur 4 – Voorgaande simulaties - openingswetten



(Verelst *et al.*, 2014)

Tabel 7 – Voorgaande simulaties – openingswetten geometrie zonder breekbalken

vopen1	Tijdstip	0.0 s	30.0 s	80.0 s	195.4 s (volledig open)
	Openingssnelheid	1.000 °/s	1.000 °/s	0.250 °/s	0.250 °/s
vopen2	Tijdstip	0.0 s	25.0 s	26.0 s	198.4 s (volledig open)
	Openingssnelheid	1.500 °/s	1.500 °/s	0.300 °/s	0.300 °/s
vopen4	Tijdstip	0.0 s	25.0 s	26.0 s	479.2 s (volledig open)
	Openingssnelheid	1.400 °/s	1.400 °/s	0.120 °/s	0.120 °/s

(Verelst *et al.*, 2014)

Merk in Figuur 4 en Tabel 7 op dat de openingswetten vopen2 en vopen4 bestaan uit een eerste fase met een hoge draaisnelheid gevolgd door een tweede fase met een trage draaisnelheid. Openingswet vopen1 bestaat uit een eerste fase met een hoge draaisnelheid en een derde fase met een trage draaisnelheid in de tussenliggende fase neemt de draaisnelheid lineair af over een periode van 50 s.

5 Eerste reeks simulaties

Het opzet van de eerste reeks simulaties is het vergelijken van verschillende types openingswetten. Op basis van de resultaten kan door de opdrachtgever een keuze gemaakt worden, die vervolgens in de tweede reeks simulaties, zie hoofdstuk 6, verder uitgewerkt wordt. Omdat bij een nivelleersysteem met openingen in de sluisdeur vullen van de kolk maatgevender is voor de krachten op het schip dan ledigen worden de simulaties in dit hoofdstuk beperkt tot vullen.

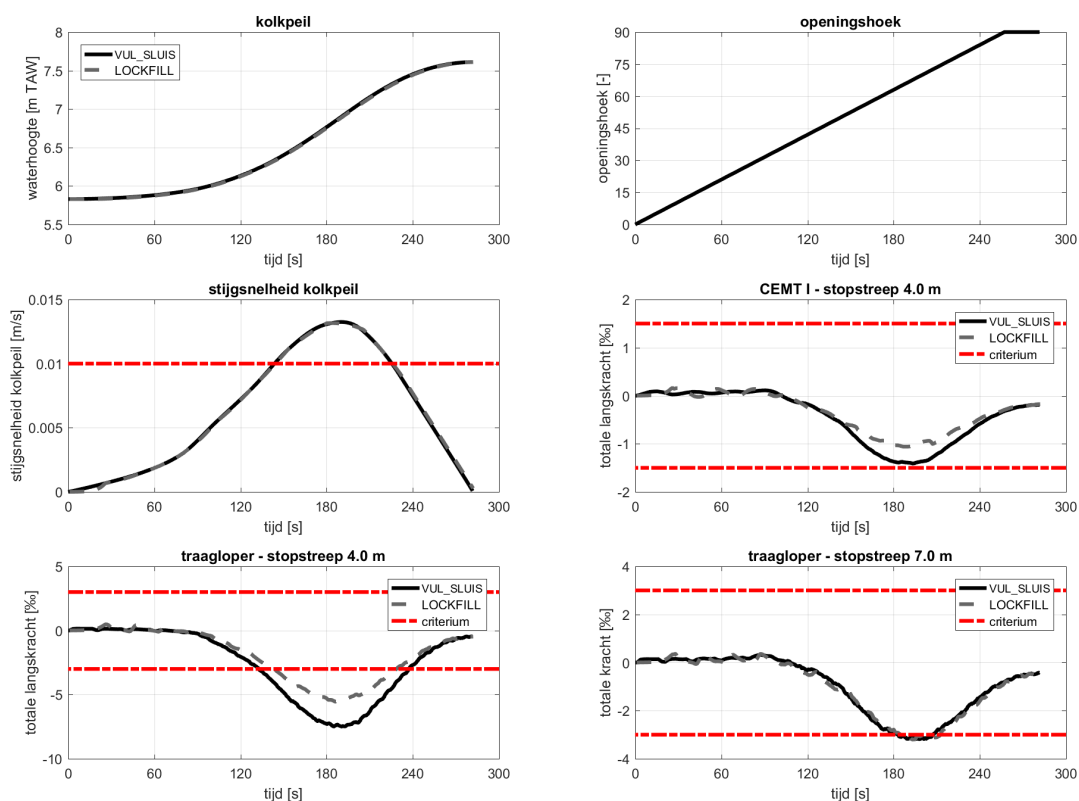
De resultaten van de simulaties worden besproken in paragraaf 5.1 en de conclusie wordt samengevat in paragraaf 5.2.

5.1 Resultaat simulaties

Merk op dat de openingswetten in deze eerste reeks simulaties zo opgesteld zijn dat het criterium voor de langskracht telkens gerespecteerd wordt. Met het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk wordt in de vergelijking in deze paragraaf nog geen rekening gehouden. Vooreerst wordt voor elke toegepaste openingswet de nivelleerkromme, de variatie in de tijd van de openingshoek, de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk en de langskracht op een CEMT klasse I schip en een traagloper in de kolk grafisch voorgesteld (Figuur 5 tot en met Figuur 9).

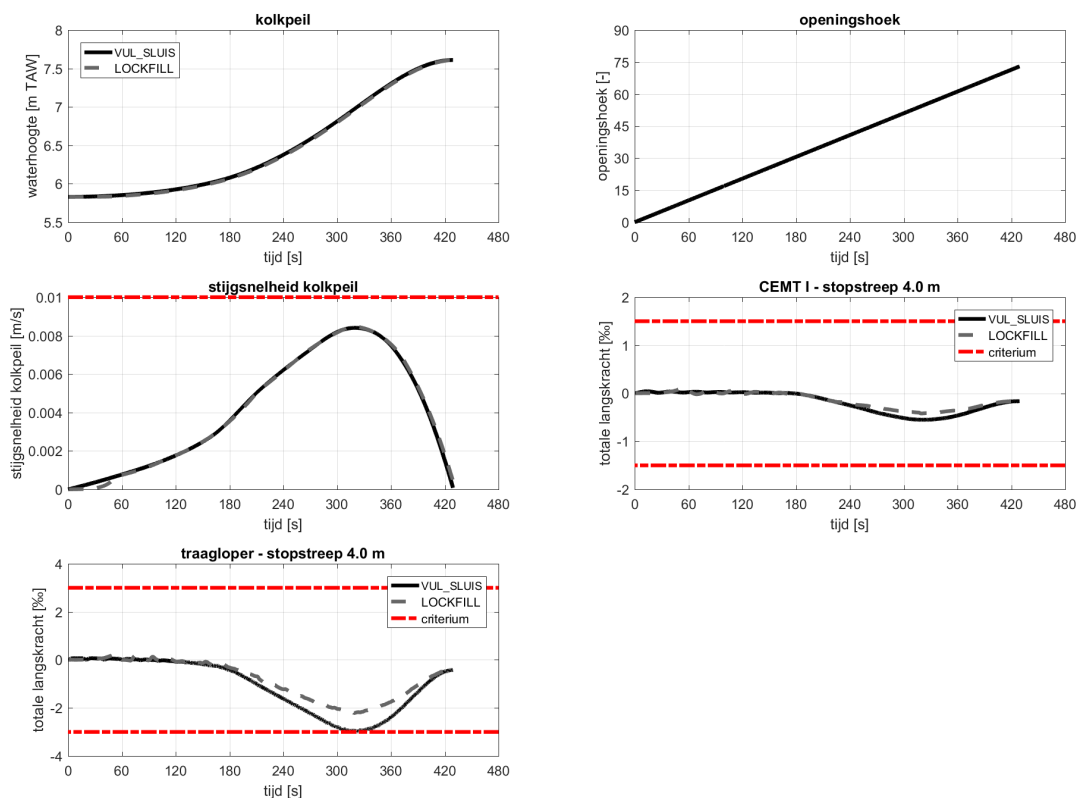
Openingswet O1, zie Figuur 5, betreft een lineaire openingswet met een hoeksnelheid 0.35 °/s. De hoeksnelheid wordt zo gekozen dat de langskracht op het CEMT klasse I schip onder het betreffende criterium blijft. Bij het toepassen van een lineaire openingswet neemt het debiet door de openingen in de sluiscolk geleidelijk toe en zijn de optredende translatiegolven quasi verwaarloosbaar. Het extremum van de stijgsnelheid van het waterpeil in de colk is lager dan het criterium voor beroepsvaart (0.013 m/s ten opzichte van 0.017 m/s) maar hoger dan het criterium voor recreatievaart (0.013 m/s ten opzichte van 0.010 m/s). Bij het aanmeren van de traagloper met de boeg ter plaatse van stopstreep wordt het criterium voor de langskracht overschreden (7.5 ‰ ten opzichte van 3.0 ‰). Iteratief is daarna bepaald dat bij aanmeren van het schip met de boeg van de traagloper op 7.0 m van de deur een langskracht op het schip lager dan het criterium berekend wordt.

Figuur 5 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O1



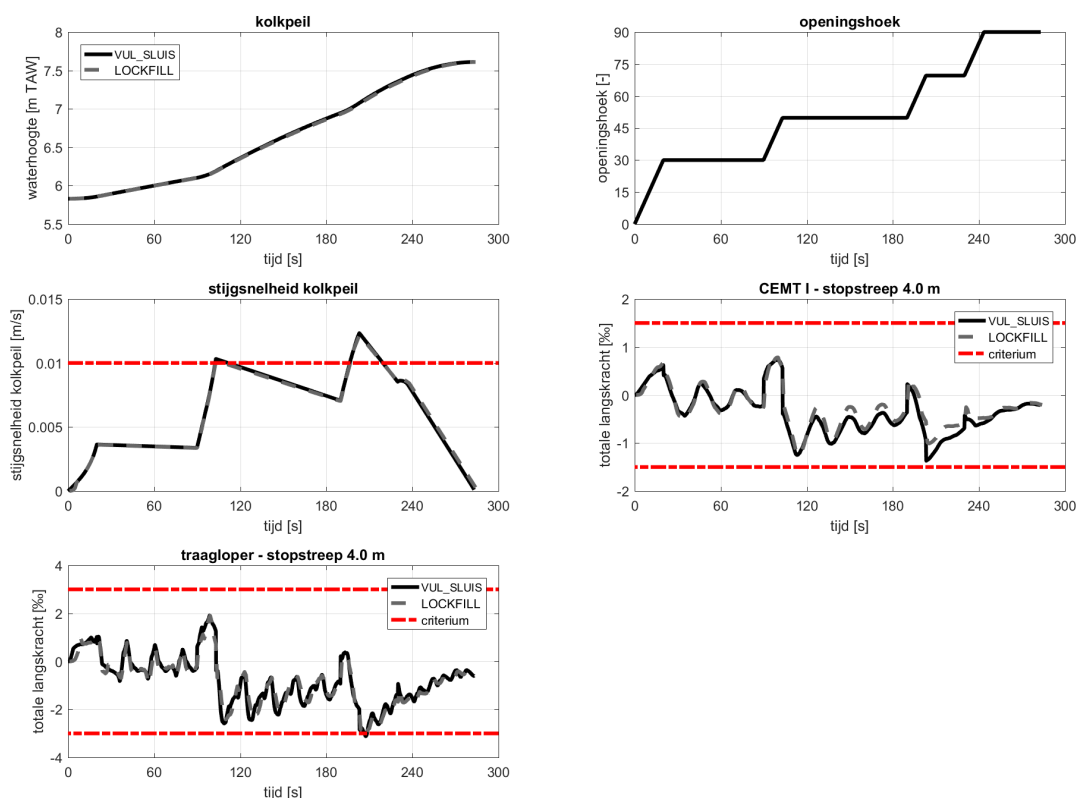
Openingswet O2, zie Figuur 6, betreft een lineaire openingswet met een hoeksnelheid 0.17 °/s. De hoeksnelheid wordt zo gekozen dat de langskracht op de traagloper met de boeg ter plaatse van de stopstreep aangemeerd onder het betreffende criterium blijft. Op het einde van de nivellering, op 429 s, bedraagt de openingshoek 73°. Doordat de openingswet opgesteld wordt voor de traagloper is de langskracht op het CEMT klasse I schip merkkelijk lager dan het criterium. Ook wordt voldaan aan het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bij een recreatievaartuig (0.008 m/s ten opzichte van 0.010 m/s).

Figuur 6 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O2



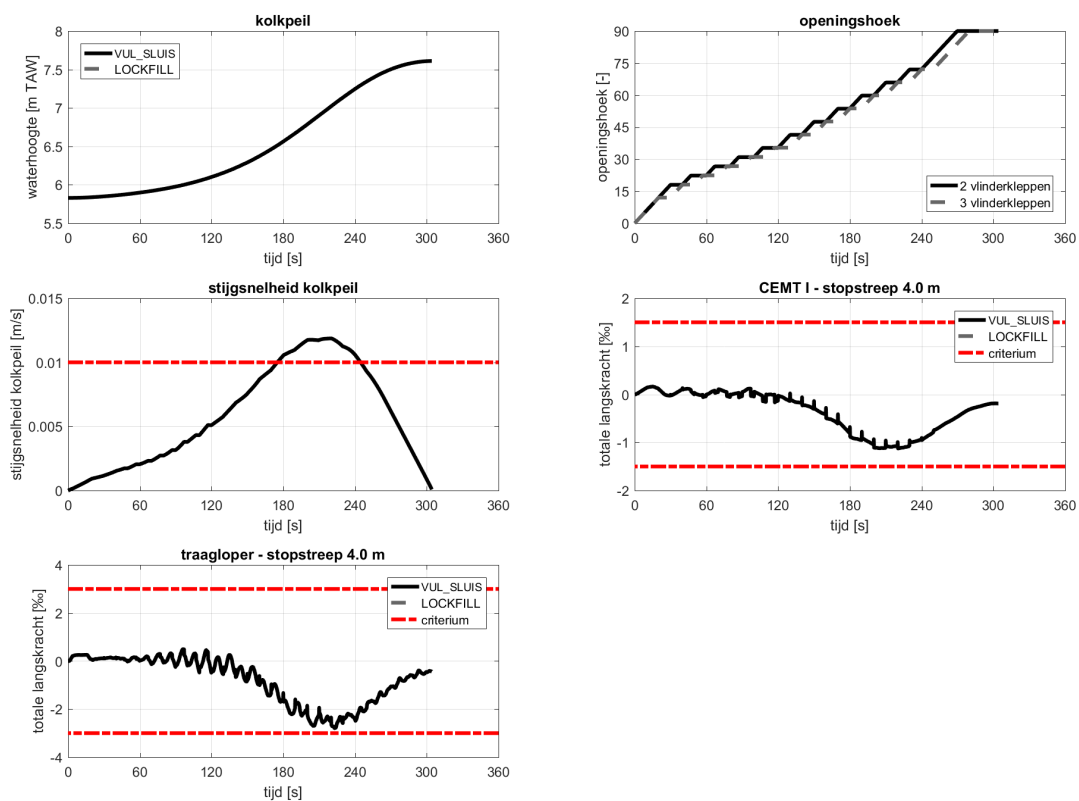
Openingswet O3, zie Figuur 7, betreft een getrapte openingswet met een hoeksnelheid 1.5 °/s en 4 openingsfases. De hoeksnelheid is constant en bedraagt 1.5 °/s. De starttijd en looptijd van de openingsfases wordt zo gekozen dat de langskracht op het CEMT klasse I schip onder het betreffende criterium blijft. De traagloper bevindt zich met de boeg van het schip op 7.0 m van de sluisdeur. Uit de simulaties volgt dat zowel voldaan wordt aan het criterium voor de langskracht op het CEMT klasse I schip als aan het criterium voor de langskracht op de traagloper (bij het aanmeren met de boeg op 7.0 m van de deur). Het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk voor een recreatievaartuig wordt kortstondig overschreden (0.012 m/s ten opzichte van 0.010 m/s).

Figuur 7 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O3



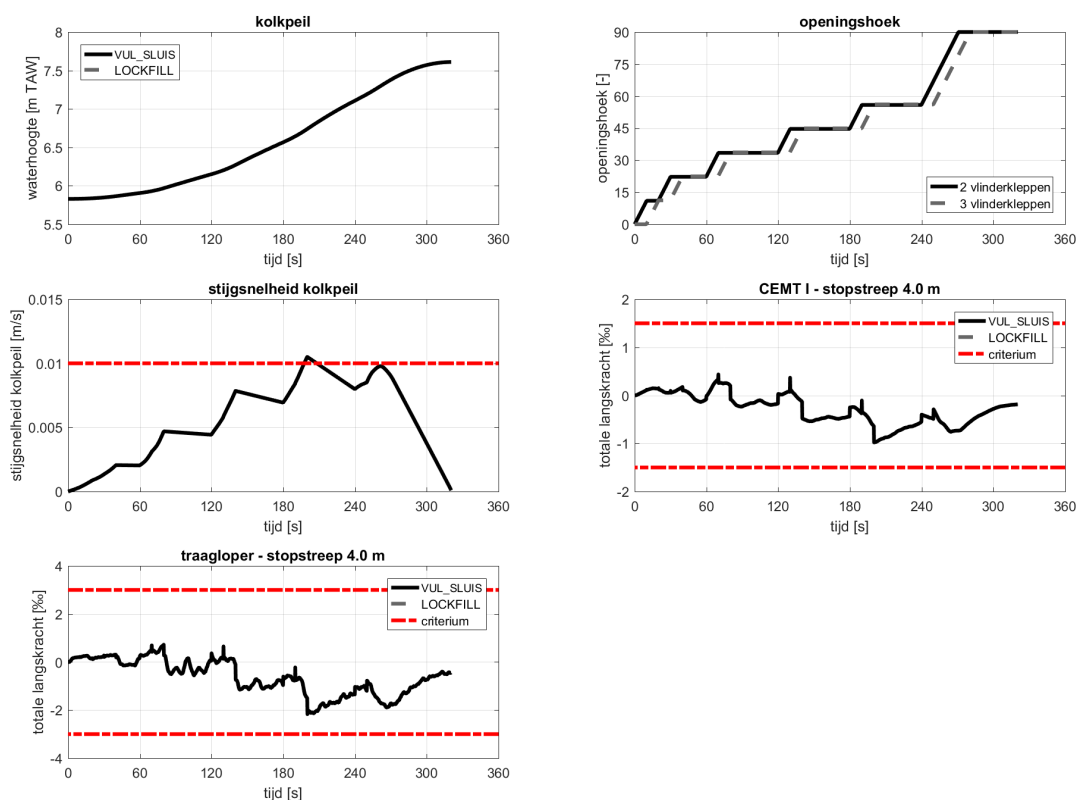
Bij openingswet O4, zie Figuur 8, worden de 5 vlinderkleppen opgedeeld in twee sets vlinderkleppen (een eerste set met 2 vlinderkleppen en een tweede set met 3 vlinderkleppen). Bemerk dat in de publiek beschikbare versie van LOCKFILL de mogelijkheid niet bestaat om te werken met twee verschillende sets vlinderkleppen, hierom zijn de simulaties beperkt tot VUL_SLUIS. De vlinderkleppen worden alternerend geopend in periodes met een duurtijd 10 s. De periode van een translatiegolf in de kolk bedraagt ca. 20 s, zie bijlage A. Door het alternerend openen van de vlinderkleppen in periodes met een duurtijd 10 s zal het openen van de tweede set vlinderkleppen (na 10 s) de door het openen van de eerste set vlinderkleppen opgewekte translatiegolf dempen. Het voordeel hiervan is dat een quasi continue openingswet bekomen wordt met een hogere hoeksnelheid dan mogelijk is bij het gelijktijdig openen van de vlinderkleppen. Door bij het begin en aan het einde van de nivellering de kleppen samen te openen kan de debietskromme nog enigszins verder geoptimaliseerd worden. Uit de simulaties volgt dat zowel voldaan wordt aan het criterium voor de langskracht op het CEMT klasse I schip als aan het criterium voor de langskracht op de traagloper (bij het aanmeren met de boeg op 7.0 m van de deur). Het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk wordt voor het recreatievaartuig overschreden (0.012 m/s ten opzichte van 0.010 m/s).

Figuur 8 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O4



Uit de simulaties met de getrapte openingswet O3, zie Figuur 7, volgt dat na elke openingstap de translatiegolven in de kolk sterk toenemen. Bij openingswet O5, zie Figuur 9, wordt ook in trappen geopend. Echter analoog als bij openingswet O4 worden de vlinderkleppen geopend met een looptijd van 10 s per trap en worden de kleppen opgedeeld in twee sets waarbij de openingsstap van de tweede set vlinderkleppen onmiddellijk volgt na de openingsstap van de eerste set vlinderkleppen. Op deze wijze wordt een beduidend lagere amplitude van de translatiegolven in de kolk berekend. Uit de figuur volgt dat bij toepassen van openingswet O5 de langskrachten lager zijn dan het criterium (zowel voor het CEMT klasse I schip met de boeg op 4.0 m als voor de traagloper met de boeg op 7.0 m). Het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk wordt voor het recreatievaartuig beperkt overschreden (0.011 m/s ten opzichte van 0.010 m/s).

Figuur 9 – Eerste reeks simulaties – vullen – openingswet O5



In Tabel 8 wordt per uitgevoerde nivellering de nivelleertijd, de maximale stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk en de extrema van de langskracht berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL gegeven. De overschrijdingen van het criterium voor de langskracht op het schip in de kolk en het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk worden aangeduid met rood. Uit de simulaties volgt dat bij het respecteren van het criterium voor de langskracht op het CEMT klasse I schip de kolk genivelleerd kan worden in ca. 5.0 min. Wanneer de traagloper hierbij met de boeg op 7.0 m van de deur aangemeerd wordt blijft de optredende langskracht onder het criterium. De stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk overschrijdt hierbij het criterium voor recreatievaart (0.011 m/s tot 0.013 m/s ten opzichte van 0.010 m/s). Bij het aanmeren van de traagloper op 4.0 m van de deur en het toepassen van een (tragere) lineaire openingswet neemt de nivelleertijd toe tot 7.2 min, het extremum van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk blijft hierbij onder het criterium (0.008 m/s ten opzichte van 0.010 m/s).

Tabel 8 – Eerste reeks simulaties – vullen

simu- latie	open- ings- wet	schip	stops- treep- afstand	nivelleer- tijd		extr. stijg snel heid	extr. langskracht			
							positief		negatief	
							VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS	LOCKFILL
[-]	[-]	[-]	[m]	[s]	[min]	[m/s]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
S001	O1	CEMT klasse I	4	282	4.7	0.013	0.11	0.16	-1.41	-1.06
S002		traagloper	4				0.14	0.48	-7.50	-5.55
S003		traagloper	7				0.32	0.37	-3.19	-3.20
S004	O2	CEMT klasse I	4	429	7.2	0.008	0.04	0.12	-0.55	-0.42
S005		traagloper	4				0.07	0.27	-2.98	-2.22
S006	O3	CEMT klasse I	4	283	4.7	0.012	0.73	0.78	-1.37	-1.25
S007		traagloper	7				1.91	1.90	-3.12	-2.98
S008	O4	CEMT klasse I	4	304	5.1	0.012	0.16	/	-1.13	/
S009		traagloper	7				0.49	/	-2.79	/
S010	O5	CEMT klasse I	4	320	5.3	0.011	0.44	/	-0.98	/
S011		traagloper	7				0.72	/	-2.17	/

5.2 Conclusies

Bij het opstellen van een openingswet voor een CEMT klasse I schip in de kolk kan een nivelleertijd van ca. 5 min behaald worden, zowel bij toepassen van een lineaire openingswet, een getrapte openingswet als bij toepassen van een getrapte openingswet waarbij de vlinderkleppen opgedeeld worden in twee afzonderlijke sets. Het extremum van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bedraagt hierbij 0.011 m/s tot 0.013 m/s. Bemerk dat deze waarden lager zijn dan het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk voor beroepsvaart (0.017 m/s) maar beperkt hoger dan het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk voor recreatievaart (0.010 m/s). Wanneer de boeg van de traagloper zich op 7.0 m van de sluisdeur bevindt blijft de berekende langskracht onder het criterium. Daarnaast is ook een openingswet met constante hoeksnelheid opgesteld voor de situatie waarbij de traagloper met de boeg op 4.0 m van de deur aangemeerd wordt. Hieruit volgt een toename van de nivelleertijd tot 7.2 min. Het extremum van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bedraagt hierbij 0.008 m/s en blijft dus onder het criterium voor recreatievaart (0.010 m/s). Door de trage openingssnelheid zijn de kleppen op het einde van de nivellering slechts tot 73° geopend.

Het toepassen van een lineaire openingswet (zonder onderbrekingen) heeft als voordeel dat zich translatiegolven voordoen in de kolk met een kleine amplitude. Het nadeel van een lineaire openingswet is dat de hoeksnelheid bepaald wordt door de kracht/stijgsnelheid op het ogenblik van maximaal debiet en dat het niet mogelijk is om bij begin en einde nivelleren, wanneer de stijgsnelheid en de langskracht beperkt zijn, sneller te openen. Bij een getrapte openingswet kan het debiet wel gestuurd worden tijdens de nivellering. Het nadeel van een getrapte openingswet is dat na elke geïntroduceerde openingsstap de translatiegolven in de kolk toenemen. Tot slot worden ook nog twee openingswetten getest waarbij de vlinderkleppen in twee sets geopend worden (eerste set 2 vlinderkleppen en tweede set 3 vlinderkleppen). Beide openingswetten hebben een looptijd per openingsstap van 10 s wat ca. overeenkomt met de halve periode van de translatiegolf in de kolk. Bij de eerste openingswet worden de twee sets vlinderkleppen continu alternerend geopend waardoor een openingswet zonder onderbreking bekomen wordt. Door bij begin en einde nivellering de kleppen samen te openen kan het debiet nog wat geoptimaliseerd worden. Bij de tweede openingswet wordt een getrapte openingswet met een tijdverschuiving van 10 s tussen de eerste en tweede set vlinderkleppen toegepast. Het voordeel hiervan is dat door het openen van de tweede set vlinderkleppen de opgewekte translatiegolf door het openen van de eerste set vlinderkleppen gedempt wordt. Het nadeel van het openen van de twee sets vlinderkleppen met een tijdverschuiving is dat bij een afwijking op deze verschuiving in situ de amplitude van de translatiegolven versterkt wordt in plaats van gedempt.

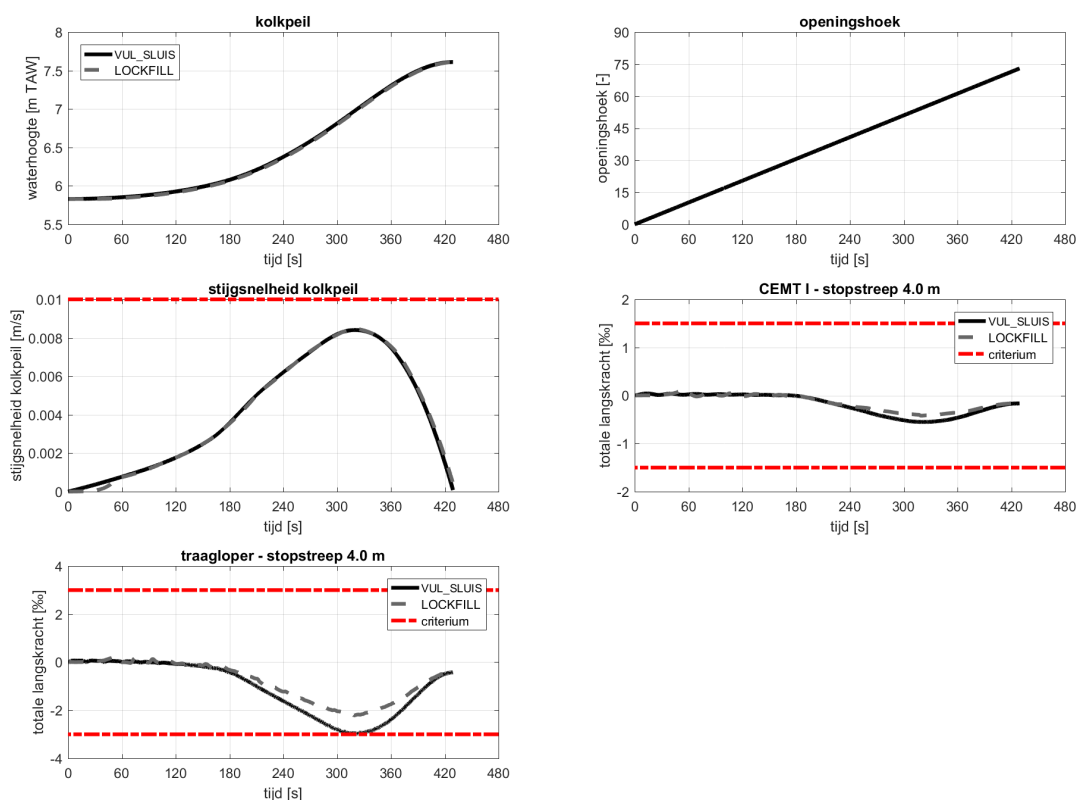
6 Tweede reeks simulaties

De resultaten van de eerste reeks simulaties zijn op 1/2/2018 besproken met de opdrachtgever. Op dit overleg wordt afgesproken om de traagloper met de boeg op 4.0 m als maatgevend te beschouwen. Voor het vullen van de kolk wordt zowel een lineaire openingswet als een getrapte openingswet beschouwd. Voor ledigen worden deze openingswetten overgenomen en zal van zowel de lineaire als de getrapte openingswet ook een voor ledigen geoptimaliseerde variant opgesteld worden. De resultaten voor vullen worden gegeven in paragraaf 6.1 en de resultaten voor ledigen worden gegeven in 6.2. Voor vullen en voor ledigen met de getrapte openingswet wordt in paragraaf 6.3 een noodstop gesimuleerd. De conclusies worden vervolgens besproken in paragraaf 6.4.

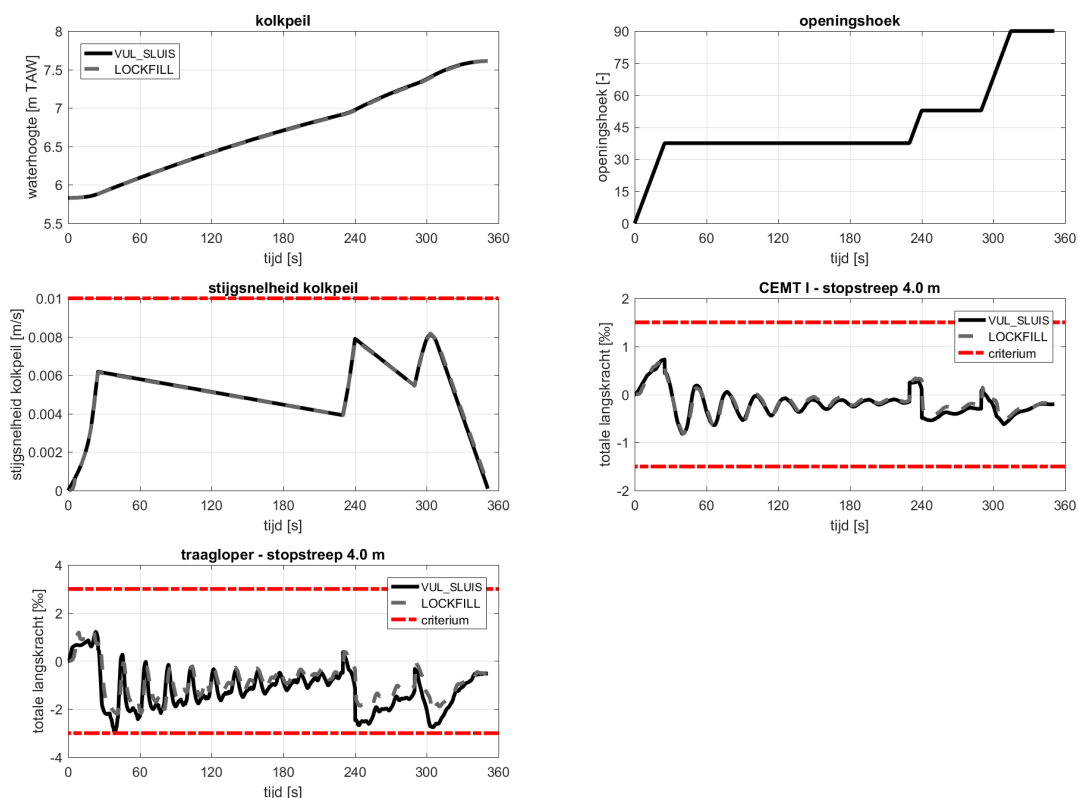
6.1 Vullen bovenhoofd

De resultaten voor de lineaire openingswet en getrapte openingswet worden gegeven in Figuur 10 respectievelijk Figuur 11. De nivelleertijd, extrema van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk en positieve en negatieve extrema van de langskracht wordt samengevat in Tabel 9.

Figuur 10 – Tweede reeks simulaties – vullen – openingswet O2



Figuur 11 – Tweede reeks simulaties – vullen – openingswet O6



Tabel 9 – Tweede reeks simulaties – vullen

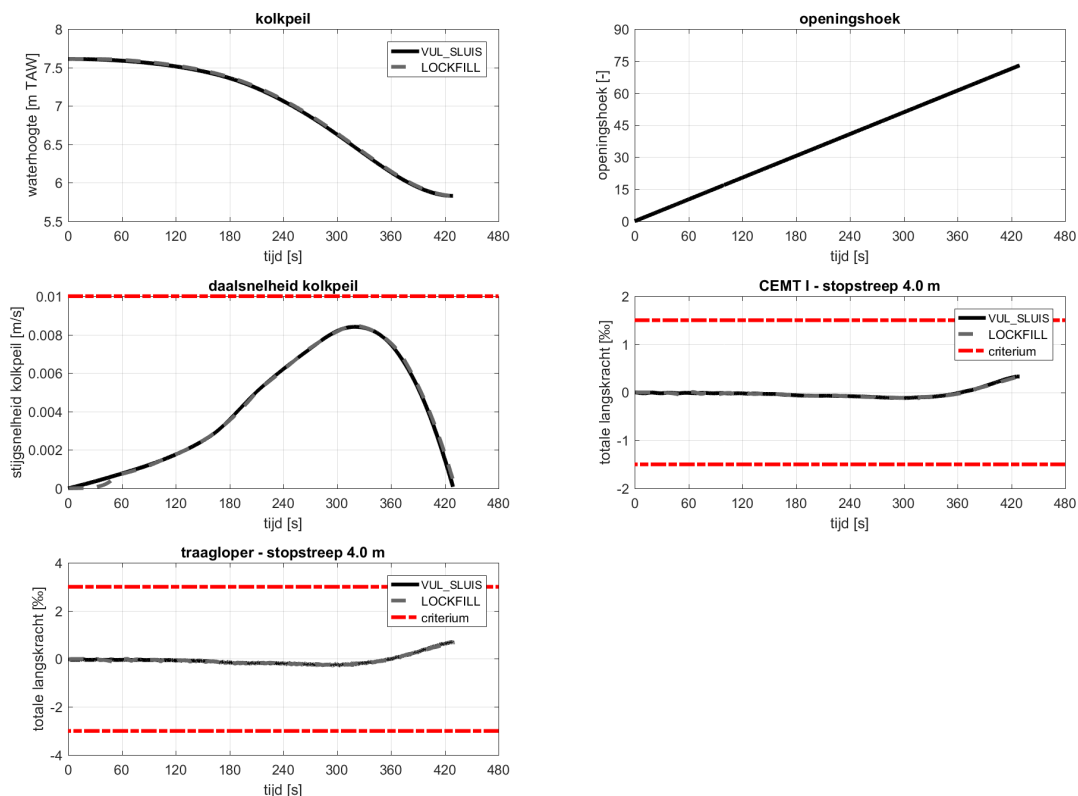
simu- latie	open- ings- wet	schip	stop streep- afstand	nivelleertijd		extr. stijg snel heid	extr. langskracht			
							positief		negatief	
							VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS	LOCKFILL
[-]	[-]	[-]	[m]	[s]	[min]	[m/s]	[%]	[%]	[%]	[%]
S004	O2	CEMT klasse I	4	429	7.2	0.008	0.04	0.12	-0.55	-0.42
S005		traagloper	4				0.07	0.27	-2.98	-2.22
S012	O6	CEMT klasse I	4	351	5.9	0.008	0.73	0.72	-0.82	-0.82
S013		traagloper	4				1.22	1.25	-3.01	-2.21

Uit de resultaten volgt dat bij een lineaire openingswet de kolk genivelleerd kan worden in 7.2 min. Bij het toepassen van een getrapte openingswet wordt de kolk ca. 80 s sneller genivelleerd (5.9 min). Voor beide simulaties bedraagt het extremum van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk 0.008 m/s. De langskracht op de traagloper komt hierbij overeen met het criterium. De langskracht op het CEMENT klasse I schip is merkbaar lager dan het criterium.

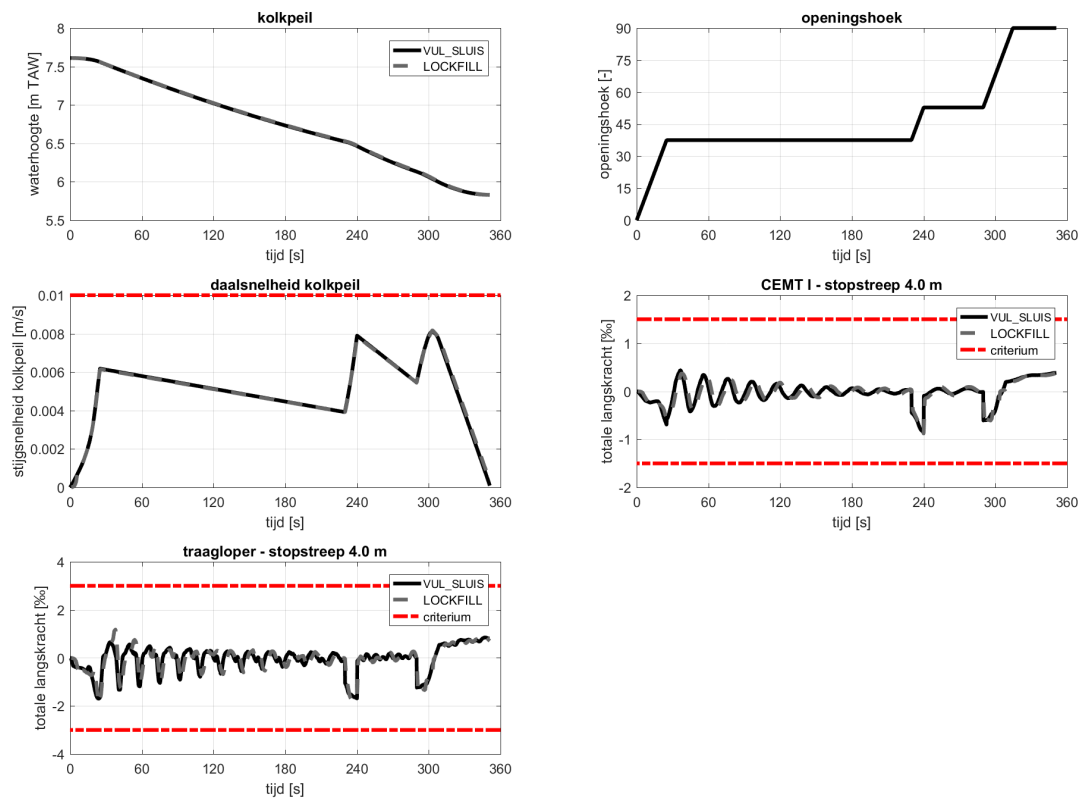
6.2 Ledigen benedenhoofd

Voor ledigen met het benedenhoofd worden openingswetten O2 en O6 overgenomen, zie Figuur 12 en Figuur 13. Vervolgens wordt ook nog een simulatie uitgevoerd met een voor ledigen geoptimaliseerde lineaire openingswet, zie Figuur 14, en een voor ledigen geoptimaliseerde getrapte openingswet, zie Figuur 15. De nivelleertijd, extrema van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk en positieve en negatieve extrema voor de langskracht worden samengevat in Tabel 10.

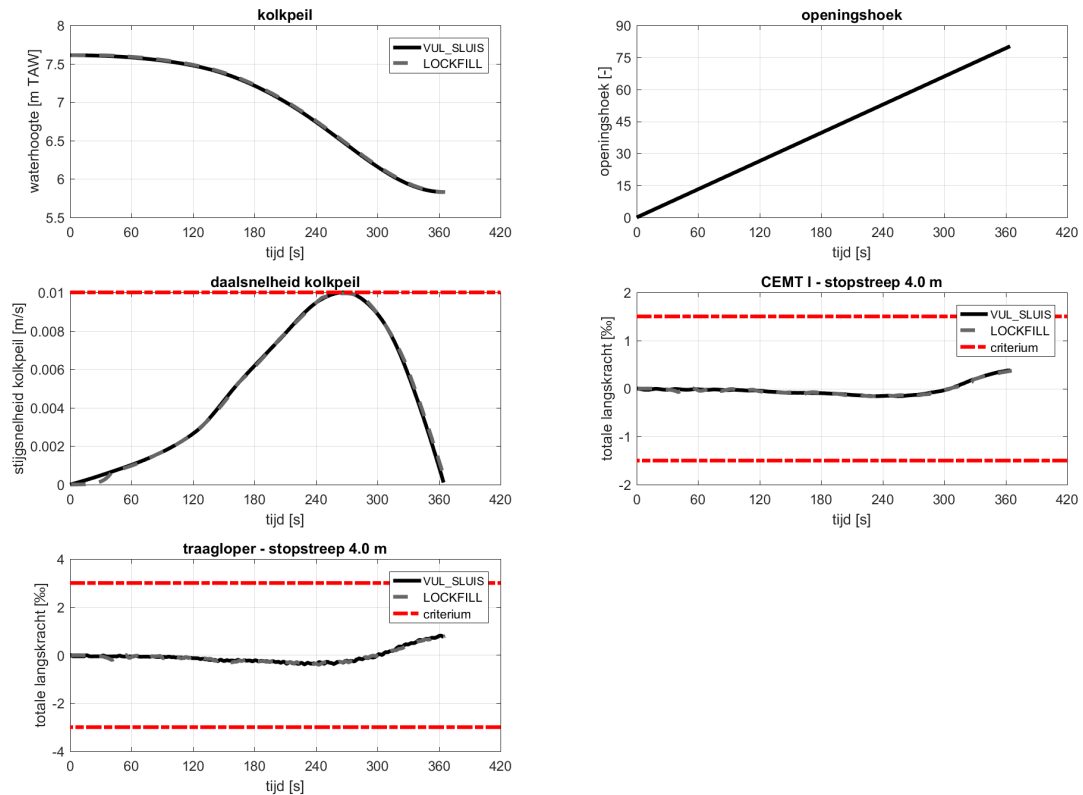
Figuur 12 – Tweede reeks simulaties – ledigen – openingswet O2



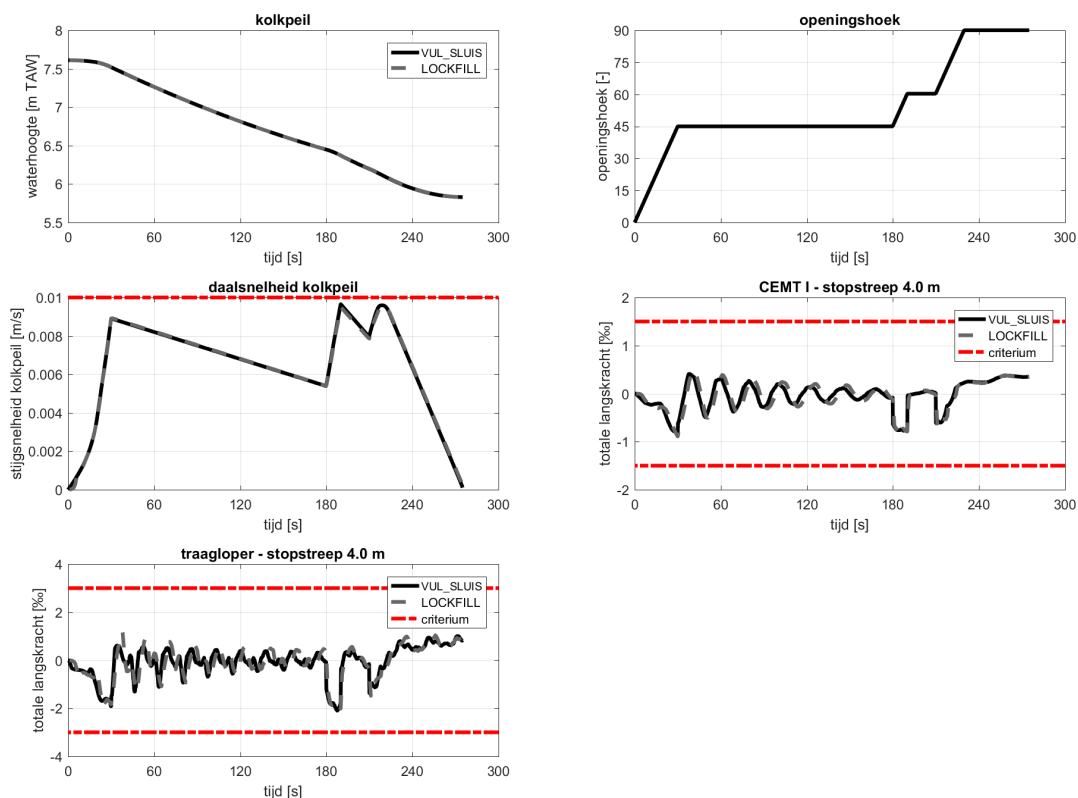
Figuur 13 – Tweede reeks simulaties – ledigen – openingswet O6



Figuur 14 – Tweede reeks simulaties – ledigen – openingswet O7



Figuur 15 – Tweede reeks simulaties – ledigen – openingswet O8



Tabel 10 – Tweede reeks simulaties – ledigen

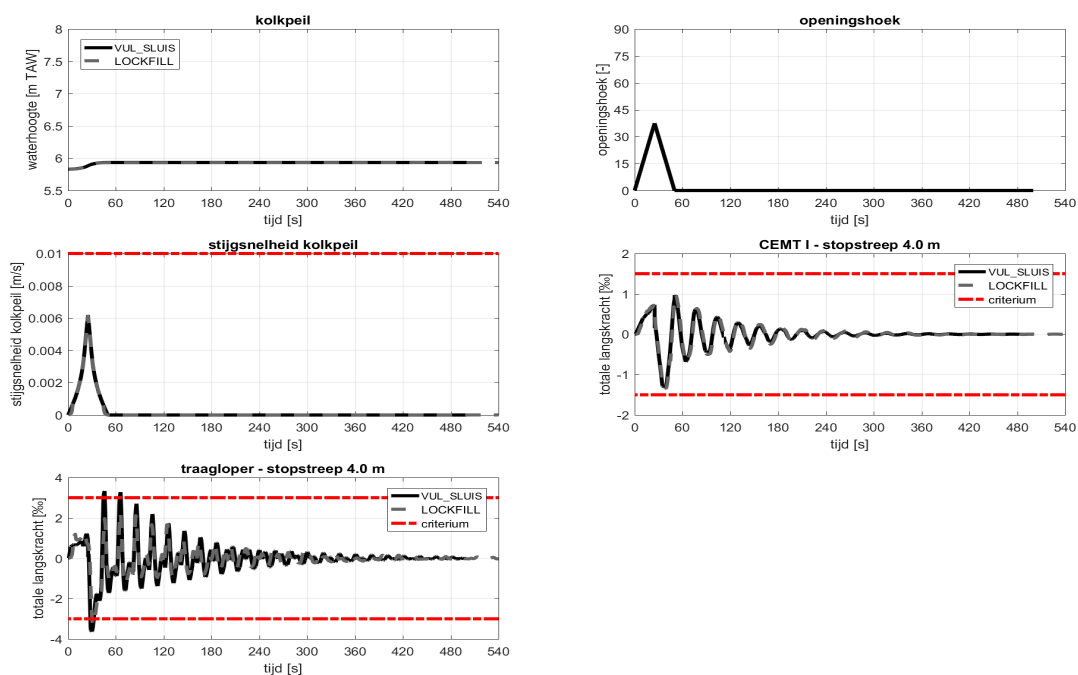
simu- latie	open- ings- wet	schip	stop streep- afstand	nivelleertijd		extr. stijg snel heid	extr. langskracht			
							positief		negatief	
							VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS	LOCKFILL
[-]	[-]	[-]	[m]	[s]	[min]	[m/s]	[%]	[%]	[%]	[%]
S014	O2	CEMT klasse I	4	429	7.2	0.008	0.33	0.33	-0.12	-0.12
S015		traagloper	4				0.70	0.69	-0.28	-0.27
S016	O6	CEMT klasse I	4	351	5.9	0.008	0.44	0.38	-0.83	-0.88
S017		traagloper	4				0.85	1.18	-1.70	-1.89
S018	O7	CEMT klasse I	4	364	6.1	0.010	0.38	0.37	-0.16	-0.18
S019		traagloper	4				0.81	0.79	-0.39	-0.40
S020	O8	CEMT klasse I	4	275	4.6	0.010	0.41	0.47	-0.83	-0.89
S021		traagloper	4				1.01	1.18	-2.10	-2.02

Bemerk uit Figuur 12 tot en met Figuur 15 en Tabel 10 dat bij toepassen van een geoptimaliseerde openingswet voor ledigen de nivelleertijd met ca. 70 s ingekort kan worden tot 6.1 min (bij een lineaire openingswet) en 4.6 min (bij een getrapte openingswet). Bij de geoptimaliseerde openingswetten voor ledigen is het extremum van de daalsnelheid maatgevend en niet de langskracht.

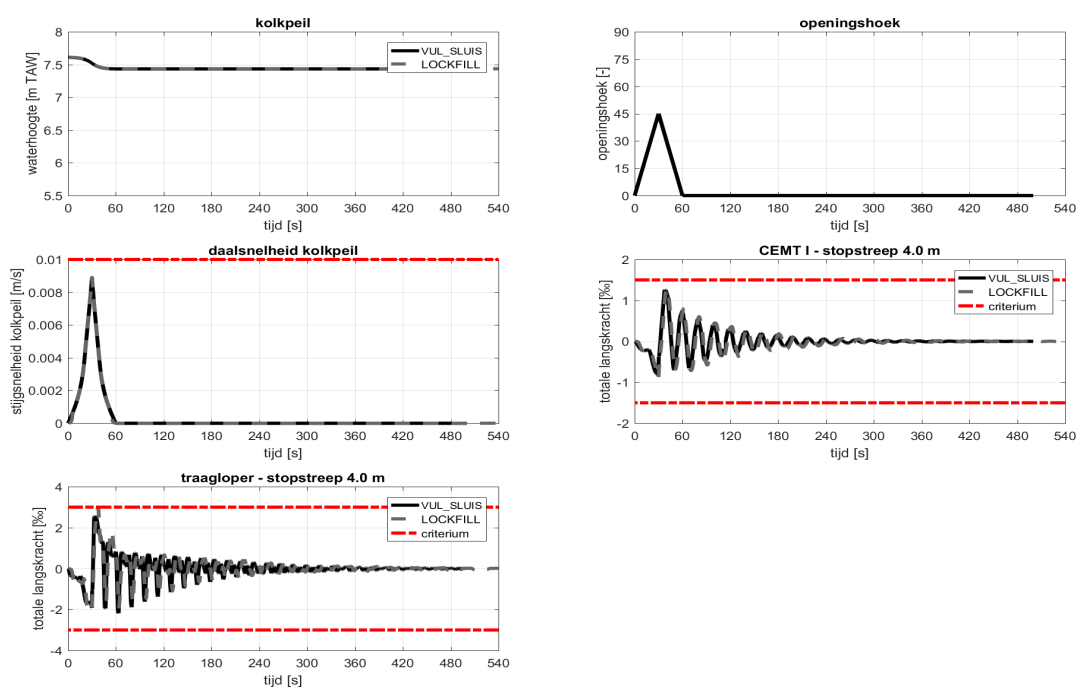
6.3 Noodstop

Tot slot wordt een noodstop gesimuleerd. Hierbij worden bij vullen met de volledige kolk en de getrapte openingswet O6 en bij ledigen met de volledige kolk en de getrapte openingswet O8 de kleppen onmiddellijk na het beëindigen van de eerste openingsstap terug gesloten met dezelfde hoeksnelheid. De resultaten van deze simulatie met het CEMT klasse I schip en de traagloper in de kolk worden gegeven in Figuur 16 (vullen) en Figuur 17 (ledigen) en Tabel 11.

Figuur 16 – Tweede reeks simulaties – noodscenario sluiten vlinderkleppen tijdens vullen met openingswet O6



Figuur 17 – Tweede reeks simulaties – noodscenario sluiten vlinderkleppen tijdens ledigen met openingswet O8



Tabel 11 – Tweede reeks simulaties – noodscenario getrapte openingswet

simu- latie	open- ings- wet	schip	stops- treep- afstand	extr. stijg snel heid	extr. langskracht			
					positief		negatief	
					VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS	LOCKFILL
[-]	[-]	[-]	[m]	[m/s]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
S022	O6	CEMT klasse I	4	0.006	0.97	0.97	-1.31	-1.34
S023		traagloper	4		3.33	2.24	-3.63	-3.27
S024	O8	CEMT klasse I	4	0.009	1.26	1.28	-0.83	-0.89
S025		traagloper	4		2.57	2.99	-2.18	-1.89

Uit Figuur 16, Figuur 17 en Tabel 11 volgt dat het plots sluiten van de vlinderkleppen voor een sterke toename van de translatiegolf in de sluis kolk zorgt. Zowel bij vullen als bij ledigen blijft de langskracht op het CEMT klasse I schip hierbij onder het criterium. Voor vullen met de traagloper wordt het criterium voor de langskracht overschreden (3.63 ‰ ten opzichte van 3.00 ‰). Bij ledigen met de traagloper blijft de langskracht onder het criterium. Bemerkt dat bij het plots sluiten van de vlinderkleppen tegen een trage snelheid (zoals de hoeksnelheid van de lineaire openingswetten) de toename van de langskracht kleiner zal zijn. Een nadeel van een noodstop met een trage hoeksnelheid is dat het langer duurt vooraleer de vlinderkleppen gesloten zijn.

6.4 Conclusies

In overleg met de opdrachtgever is besloten om de nivellering met de traagloper op 4.0 m van de deur als maatgevend te beschouwen. Voor dit scenario is een lineaire en een getrapte openingswet opgesteld. Hieruit volgt dat bij het toepassen van een lineaire openingswet de kolk genivelleerd wordt in 7.2 min. Bij het toepassen van een getrapte openingswet wordt een 80 s kortere nivelleertijd berekend (5.9 min). Doordat bij ledigen de krachten op de schepen in de kolk veelal lager zijn dan bij vullen kan voor ledigen een snellere openingswet toegepast worden. Bij het toepassen van een geoptimaliseerde openingswet voor ledigen wordt de nivelleertijd met ca. 70 s ingekort tot 6.1 min (bij een lineaire openingswet) en 4.6 min (bij een getrapte openingswet). Voor ledigen is het extremum van de daalsnelheid maatgevend in plaats van het extremum van de langskracht. Tot slot is ook nog een noodstop scenario gesimuleerd voor de getrapte openingswet voor vullen en de voor ledigen geoptimaliseerde getrapte openingswet. Onmiddellijk na beëindigen van de eerste openingstap wordt de vlinderklep met een zelfde snelheid terug gesloten. Dit zorgt voor sterke translatiegolven in de kolk waarbij voor vullen het criterium voor de langskracht op de traagloper overschreden wordt (3.6 ‰ ten opzichte van 3.0 ‰). Bij ledigen wordt het criterium voor de langskracht op de traagloper niet overschreden. Voor het CEMT klasse I schip wordt zowel bij vullen als bij ledigen het criterium voor de langskracht niet overschreden. Bemerkt dat bij het plots sluiten van de vlinderkleppen tegen een trage snelheid (zoals de hoeksnelheid van de lineaire openingswetten) de toename van de langskracht kleiner zal zijn. Een nadeel van een noodstop met een trage hoeksnelheid is dat het langer duurt vooraleer de vlinderkleppen gesloten zijn.

7 Conclusie en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Door middel van een eerste reeks simulaties zijn vooreerst de voor- en nadelen van een aantal openingswetten voor de vlinderkleppen van de nieuwe sluis te Aalst vergeleken. Uit deze eerste reeks simulaties volgt dat met het CEMT klasse I schip in de kolk een nivelleertijd van ca. 5 min behaald kan worden, zowel bij toepassen van een lineaire openingswet, een getrapte openingswet als bij een getrapte openingswet waarbij de vlinderkleppen opgedeeld worden in twee afzonderlijke sets. Het extremum van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bedraagt hierbij 0.011 m/s tot 0.013 m/s, wat lager is dan het criterium voor stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bij beroepsvaart (0.017 m/s) maar hoger dan het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bij recreatievaart (0.010 m/s). Wanneer de boeg van de traagloper zich verder van de sluisdeur bevindt (op 7.0 m in plaats van 4.0 m) blijft de langskracht op de traagloper onder het criterium voor de langskracht voor recreatievaart (3.0 ‰). Ook wordt een openingswet met constante hoeksnelheid opgesteld voor de situatie waarbij het recreatievaartuig met de boeg op 4.0 m van de deur aangemeerd wordt. Hieruit volgt een toename van de nivelleertijd tot 7.2 min. Het extremum van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bedraagt hierbij 0.008 m/s en blijft dus onder het criterium voor recreatievaart (0.010 m/s). Door de trage hoeksnelheid van deze openingswet zijn de kleppen op het einde van de nivellering slechts tot 73° geopend.

In het overleg met de opdrachtgever is daarna afgesproken om het recreatievaartuig met de boeg aangemeerd op 4.0 m van de deur als maatgevend te beschouwen. Voor deze conditie wordt zowel een lineaire openingswet (zonder onderbreking) als een getrapte openingswet (met onderbrekingen) beschouwd. Voor ledigen wordt ook een geoptimaliseerde (snellere) openingswet opgesteld. Rekening houdend met deze randvoorwaarden wordt vervolgens een tweede reeks simulaties uitgevoerd. Hieruit volgt dat met een lineaire openingswet de kolk genivelleerd wordt in 7.2 min. Bij het toepassen van een getrapte openingswet wordt een 80 s kortere nivelleertijd berekend (5.9 min). Doordat bij ledigen de krachten op de schepen in de kolk veelal lager zijn dan bij vullen kan voor ledigen een snellere openingswet toegepast worden. Bij het toepassen van een geoptimaliseerde openingswet voor ledigen wordt de nivelleertijd met ca. 70 s ingekort tot 6.1 min (bij een lineaire openingswet) en 4.6 min (bij een getrapte openingswet).

Tot slot is ook nog een noodstop scenario gesimuleerd voor de getrapte openingswet voor vullen en de voor ledigen geoptimaliseerde getrapte openingswet. Onmiddellijk na beëindigen van de eerste openingstap wordt de vlinderklep met een zelfde snelheid terug gesloten. Dit zorgt voor sterke translatiegolven in de kolk waarbij voor vullen het criterium voor de langskracht op de traagloper overschreden wordt (3.6 ‰ ten opzichte van 3.0 ‰). Bij ledigen wordt het criterium voor de langskracht op de traagloper niet overschreden. Voor het CEMT klasse I schip wordt zowel bij vullen als bij ledigen het criterium voor de langskracht niet overschreden. Bemerkt dat bij het plots sluiten van de vlinderkleppen tegen een trage snelheid (zoals de hoeksnelheid van de lineaire openingswetten) de toename van de langskracht kleiner zal zijn. Een nadeel van een noodstop met een trage hoeksnelheid is dat het langer duurt vooraleer de vlinderkleppen gesloten zijn.

7.2 Aanbevelingen

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

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

8 Referenties

- Badano, N.; Rauwoens, P.; Decrop, B.** (2017). Departement Mobiliteit en Openbare Werken Raamovereenkomst CFD-modellering stroming rond waterbouwkundige constructies. 53 pp.
- Beem, R.C.A.; Boogaard, A.; Glerum, A.; de Graaf, M.A.; Henneberque, S.D.; Hiddinga, P.H.; Kranenburg, D.; van der Meer, M.T.J.; Nagtegaal, G.; Van der Paverd, M.; Smink, L.M.C.; Vrijburcht, A.; Weijers, J.** (2000). Ontwerp van schutsluizen: deel 1. Bouwdienst Rijkswaterstaat: Utrecht. ISBN 90-369-3305-6
- Lasard, S.; Pulina, B.** (1994). Dimensioning and design of Boat passages and locks for boats for pleasure and entertainment, *in*: (1994). *28th International Navigation Congress (P.I.A.N.C.), Section I, subject 5, Sevilla, Spain, May 1994*
- Schwanenberg, D.; Jongeling, T.H.G.** (2003). Vul- en ledigingssysteem Royerssluis: deelopdracht I. Eerste ontwerp. Q2887. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- Soetaert Civil Contractors; Arcadis; Waterwegen en Zeekanaal NV Afdeling Bovenschelde.** (2017a). Dender Vernieuwing stuwsluiscomplex Aalst FASE 1 Besteknr: 16 EGGE/12/21 Vloerplaat - deel 1 derde uitzending 12/06/2017. pp.1
- Soetaert Civil Contractors; Arcadis; Waterwegen en Zeekanaal NV Afdeling Bovenschelde.** (2017b). Dender Vernieuwing stuwsluiscomplex Aalst FASE 1 Besteknr: 16 EGGE/12/21 Vloerplaat - deel 2 derde uitzending 12/06/2017
- Van Oossanen & Associates b.v.** (2006). Ideale rompvorm van een recreatievaartuig
- Vercruysse, J.B.; Van Hoydonck, W.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2018). Dender – Nieuwe sluis Aalst: CFD-modellering van een geleiding opwaarts van de nivelleeropeningen. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 17_064_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=294260>
- Vercruysse, 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
- Verelst, K.; De Mulder, T.; Schindfessel, L.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2017). Verdere ontwikkeling programma vul_sluis: Vergroten inzicht in code en formuleringen.. *WL Rapporten*, 15_007_1: Antwerpen
- Verelst, K.; De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Mostaert, F.** (2009). Dender: stuwsluis Aalst. Kolkafmetingen en nivelleersysteem sluis. *WL Rapporten*, 760_10a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; Vercruysse, J.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Dender - Stuwsluis Aalst: aanpassing ontwerp nivelleersysteem sluis. *WL Adviezen*, 13_097. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Bijlage A - Berekening periode translatiegolf

Periode ondiepwatergolf zonder schip in de kolk:

$$T = \frac{2 \cdot l_{kolk}}{c_k}$$

Periode ondiepwatergolf met schip in de kolk:

$$T = \frac{2 \cdot (l_{kolk} - l_{schip})}{c_k} + \frac{2 \cdot l_{schip}}{c_s}$$

Snelheid ondiepwatergolf in sectie zonder schip:

$$c_k = \sqrt{g \cdot h_{gem}}$$

Snelheid ondiepwatergolf in sectie met schip:

$$c_s = \sqrt{g \cdot \frac{b_{kolk} \cdot h_{gem} - b_{schip} \cdot d_{schip}}{b_{kolk}}}$$

Met:

- T Periode ondiepwatergolf [s]
- l_{kolk} Lengte kolk (56.0 m) [m]
- l_{schip} Lengte schip (CEMT klasse I 38.5 m, traagloper 12.0 m) [m]
- c_k Snelheid ondiepwatergolf in sectie zonder schip [m/s]
- c_s Snelheid ondiepwatergolf in sectie met schip [m/s]
- g Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s² [m/s²]
- h_{gem} Waterhoogte in kolk (bij opwaarts peil 5.41 m, bij afwaarts peil 3.63 m) [m]
- d_{schip} Diepgang schip (CEMT klasse I 2.2 m, traagloper 1.4 m) [m]
- b_{schip} Breedte schip (CEMT klasse I 5.05 m, traagloper 3.4 m) [m]

Tabel 12 – Periode translatiegolf

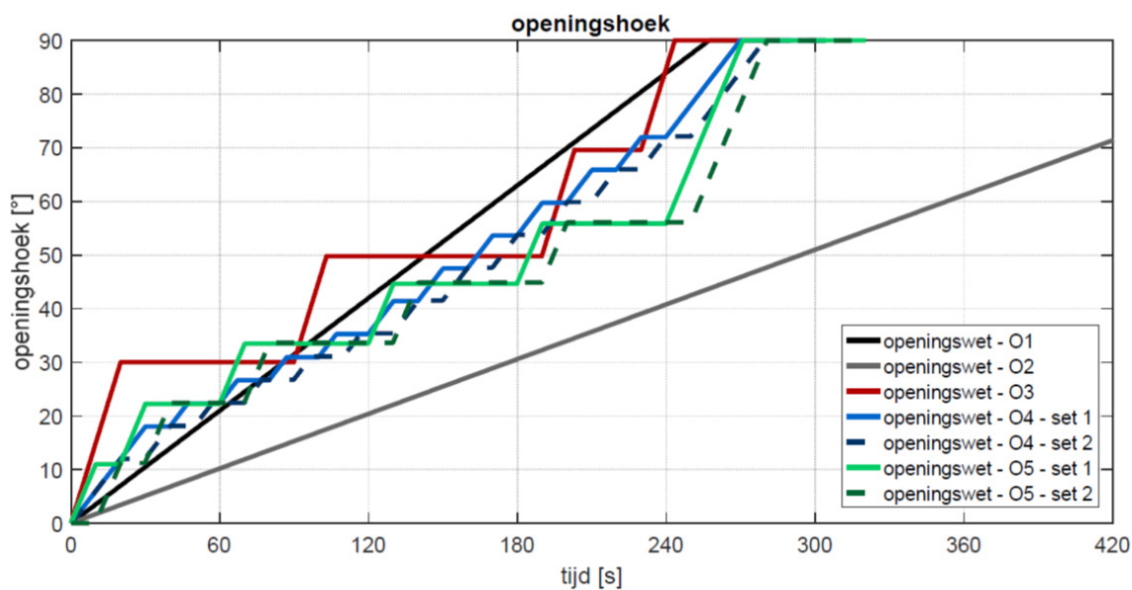
kolkpeil	periode translatiegolf		
	lege kolk	CEMT klasse I	traagloper
[m TAW]	[s]	[s]	[s]
5.83	18.8	24.3	19.3
7.61	15.4	17.8	15.6

Uit Tabel 12 volgt dat de periode van de translatiegolven in de kolk tussen 24 s en 16 s bedraagt. Voor het opstellen van de openingswet wordt, ter vereenvoudiging, uitgegaan van een periode 20 s.

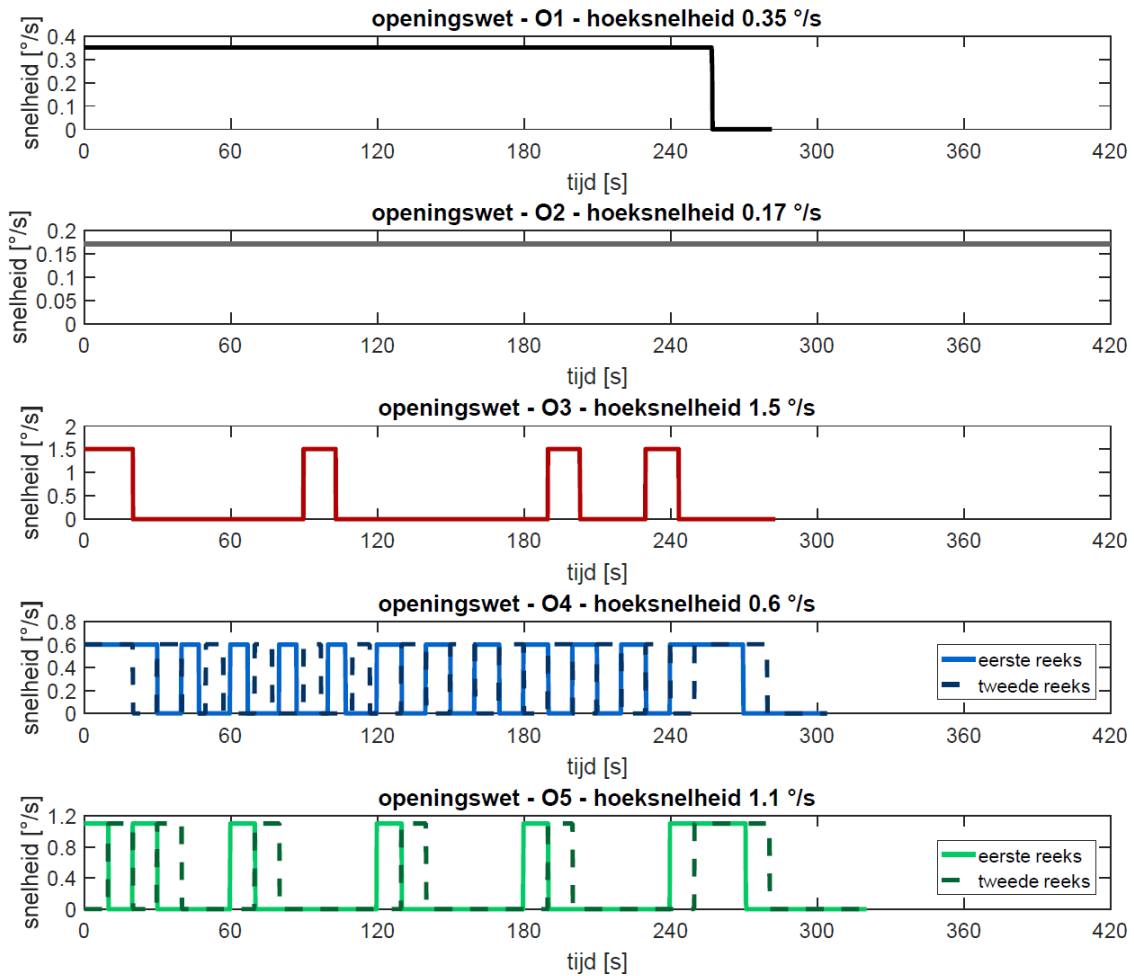
Bijlage B - Openingswetten

In deze bijlage worden de voor de simulaties toegepaste openingswetten gegeven. De variatie in de tijd van de openingshoek respectievelijk de hoeksnelheid voor de eerste reeks simulaties wordt gegeven in Figuur 18 respectievelijk Figuur 19. De variatie in de tijd van de openingshoek respectievelijk de hoeksnelheid voor de tweede reeks simulaties wordt gegeven in Figuur 20 respectievelijk Figuur 21. Hierna wordt de, hoeksnelheid en openingshoek in functie van de tijd ook in tabelvorm weergegeven. De lineaire openingswetten worden gegeven in Tabel 13, de getrapte openingswetten worden gegeven in Tabel 14 en de getrapte openingswetten met een opdeling in twee sets vlinderkleppen worden gegeven in Tabel 15. De getrapte openingswet met noodstop wordt gegeven in Tabel 16. Merk op dat in de simulaties de rustpauzes starten op 0.1 s na beëindigen van een openingsfase en op 0.1 s eindigen voor het starten van een openingsfase. Dit wordt gedaan omdat voor de programma's VUL_SLUIS een LOCKFILL een tabel ingegeven moet worden met een tijd en bijhorende hoeksnelheid. Wanneer de hoeksnelheid tussen twee tijdstippen verschilt wordt in beide programma's een interpolatie van de hoeksnelheid toegepast. Omdat dit niet gewenst is wordt gekozen om een minimale overgangstijd te voorzien (0.1 s). Merk op dat in situ ook een overgangsregime aanwezig zal zijn. Omdat WL niet kan inschatten hoe dit overgangsregime eruitziet wordt hier geen rekening mee gehouden.

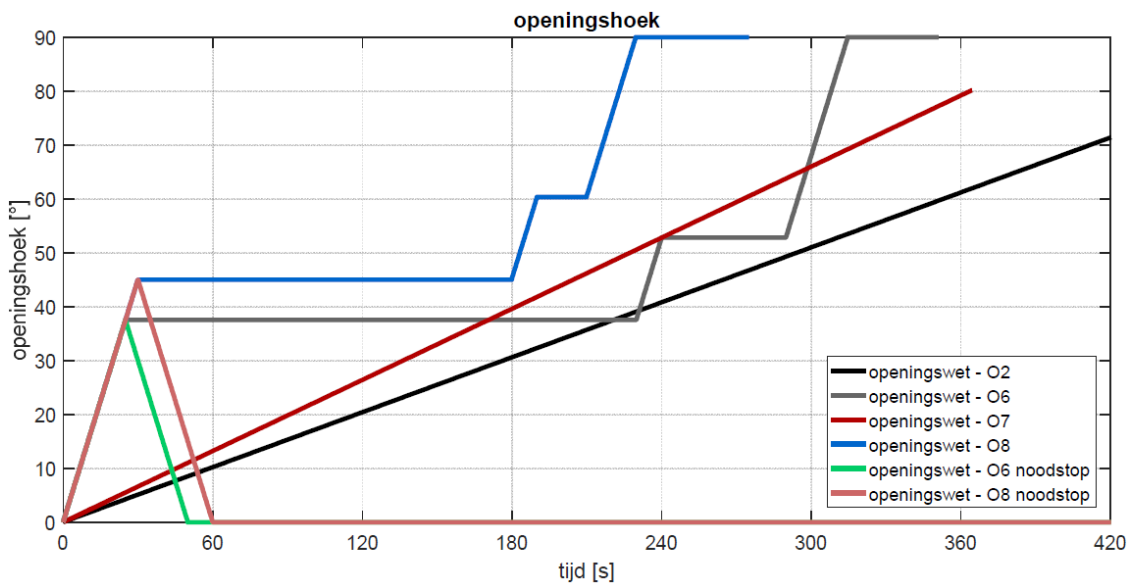
Figuur 18 – Openingswetten eerste reeks simulaties – variatie in de tijd van de openingshoek



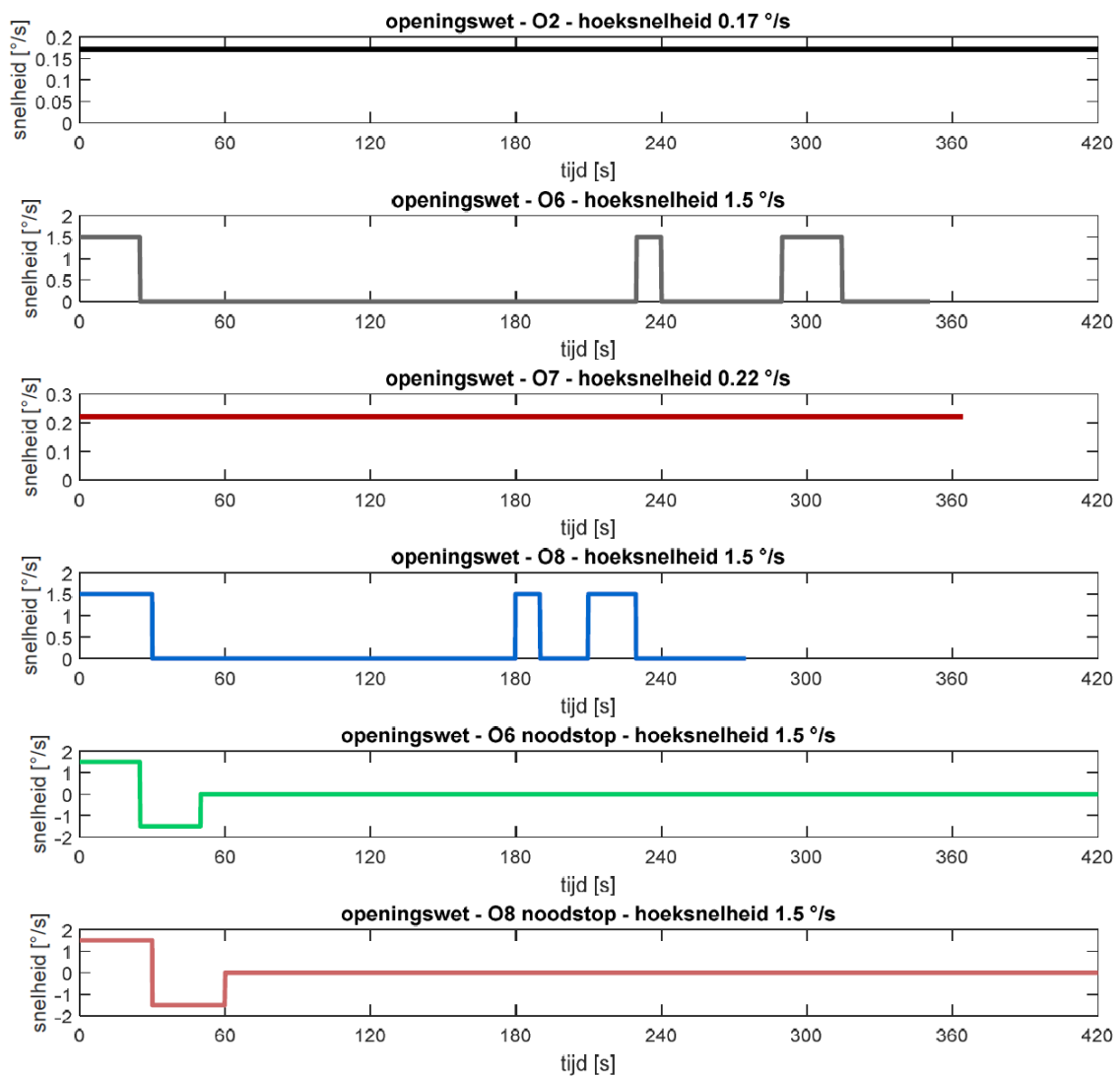
Figuur 19– Openingswetten eerste reeks simulaties – variatie in de tijd van de hoeksnelheid



Figuur 20 – Openingswetten tweede reeks simulaties – variatie in de tijd van de openingshoek



Figuur 21 – Openingswetten tweede reeks simulaties – variatie in de tijd van de hoeksnelheid



Tabel 13– Lineaire openingswetten

openingswet O1			openingswet O2			openingswet O7		
tijd	hoek-snelheid	openings-hoek	tijd	hoek-snelheid	openings-hoek	tijd	hoek-snelheid	openings-hoek
[s]	[$^{\circ}/s$]	[$^{\circ}$]	[s]	[$^{\circ}/s$]	[$^{\circ}$]	[s]	[$^{\circ}/s$]	[$^{\circ}$]
0.0	0.35	0	0.0	0.17	0	0.0	0.22	0
257.1	0.35	90	529.4	0.17	90	409.1	0.22	90

Tabel 14– Getrapte openingswetten

openingswet O3			openingswet O6			openingswet O8		
tijd	hoek-snelheid	openings-hoek	tijd	hoek-snelheid	openings-hoek	tijd	hoek-snelheid	openings-hoek
[s]	[°/s]	[°]	[s]	[°/s]	[°]	[s]	[°/s]	[°]
0.0	1.5	0	0.0	1.5	0	0.0	1.5	0
20.0	1.5	30	25.0	1.5	37.5	30.0	1.5	45
20.1	0	30	25.1	0	37.5	30.1	0	45
89.9	0	30	229.9	0	37.5	179.9	0	45
90.0	1.5	30	230.0	1.5	37.5	180.0	1.5	45
103.0	1.5	49.5	240.0	1.5	52.5	190.0	1.5	60
103.1	0	49.5	240.1	0	52.5	190.1	0	60
189.9	0	49.5	289.9	0	52.5	209.9	0	60
190.0	1.5	49.5	290.0	1.5	52.5	210.0	1.5	60
203.0	1.5	69	315.0	1.5	90	260.0	0.6	90
203.1	0	69						
229.9	0	69						
230.0	1.5	69						
244.0	1.5	90						

Tabel 15 – Getrapte openingswet met opdeling in twee sets vlinderkleppen

openingswet O4						openingswet O5					
vlinderkleppen set 1			vlinderkleppen set 2			vlinderkleppen set 1			vlinderkleppen set 2		
tijd	hoek-	open-	tijd	hoek-	open-	tijd	hoek-	open-	tijd	hoek-	open-
[s]	[°/s]	[°]	[s]	[°/s]	[°]	[s]	[°/s]	[°]	[s]	[°/s]	[°]
0.0	0.6	0	0.0	0.6	0	0.0	1.1	0	0.0	0	0
30.0	0.6	18	20.0	0.6	12	10.0	1.1	11	9.9	0	0
30.1	0	18	20.1	0	12	10.1	0	11	10.0	1.1	0
39.9	0	18	29.9	0	12	19.9	0	11	20.0	1.1	11
40.0	0.6	18	30.0	0.6	12	20.0	1.1	11	20.1	0	11
47.0	0.6	22.2	40.0	0.6	18	30.0	1.1	22	29.9	0	11
47.1	0	22.2	40.1	0	18	30.1	0	22	30.0	1.1	11
59.9	0	22.2	49.9	0	18	59.9	0	22	40.0	1.1	22
60.0	0.6	22.2	50.0	0.6	18	60.0	1.1	22	40.1	0	22
67.0	0.6	26.4	57.0	0.6	22.2	70.0	1.1	33	69.9	0	22
67.1	0	26.4	57.1	0	22.2	70.1	0	33	70.0	1.1	22
79.9	0	26.4	69.9	0	22.2	119.9	0	33	80.0	1.1	33
80.0	0.6	26.4	70.0	0.6	22.2	120.0	1.1	33	80.1	0	33
87.0	0.6	30.6	77.0	0.6	26.4	130.0	1.1	44	129.9	0	33
87.1	0	30.6	77.1	0	26.4	130.1	0	44	130.0	1.1	33
99.9	0	30.6	89.9	0	26.4	179.9	0	44	140.0	1.1	44
100.0	0.6	30.6	90.0	0.6	26.4	180.0	1.1	44	140.1	0	44
107.0	0.6	34.8	97.0	0.6	30.6	190.0	1.1	55	189.9	0	44
107.1	0	34.8	97.1	0	30.6	190.1	0	55	190.0	1.1	44
119.9	0	34.8	109.9	0	30.6	239.9	0	55	200.0	1.1	55
120.0	0.6	34.8	110.0	0.6	30.6	240.0	1.1	55	200.1	0	55
130.0	0.6	40.8	117.0	0.6	34.8	298.3	0.6	90	249.9	0	55
130.1	0	40.8	117.1	0	34.8				250.0	1.1	55
139.9	0	40.8	129.9	0	34.8				308.3	0.6	90
140.0	0.6	40.8	130.0	0.6	34.8						
150.0	0.6	46.8	140.0	0.6	40.8						
150.1	0	46.8	140.1	0	40.8						
159.9	0	46.8	149.9	0	40.8						
160.0	0.6	46.8	150.0	0.6	40.8						
170.0	0.6	52.8	160.0	0.6	46.8						
170.1	0	52.8	160.1	0	46.8						
179.9	0	52.8	169.9	0	46.8						
180.0	0.6	52.8	170.0	0.6	46.8						
190.0	0.6	58.8	180.0	0.6	52.8						
190.1	0	58.8	180.1	0	52.8						
199.9	0	58.8	189.9	0	52.8						
200.0	0.6	58.8	190.0	0.6	52.8						
210.0	0.6	64.8	200.0	0.6	58.8						
210.1	0	64.8	200.1	0	58.8						
219.9	0	64.8	209.9	0	58.8						
220.0	0.6	64.8	210.0	0.6	58.8						
230.0	0.6	70.8	220.0	0.6	64.8						
230.1	0	70.8	220.1	0	64.8						
239.9	0	70.8	229.9	0	64.8						
240.0	0.6	70.8	230.0	0.6	64.8						
272.0	0.6	90	240.0	0.6	70.8						
			240.1	0	70.8						
			249.9	0	70.8						
			250.0	0.6	70.8						
			282.0	0.6	90						

Tabel 16 – Getrapte openingswet met noodstop

openingswet O6 noodstop			openingswet O8 noodstop		
tijd	hoek-snelheid	openings-hoek	tijd	hoek-snelheid	openings-hoek
[s]	[°/s]	[°]	[s]	[°/s]	[°]
0.0	1.5	0	0.0	1.5	0
25.0	1.5	37.5	30.0	1.5	45.0
25.1	-1.5	37.5	30.1	-1.5	45.0
50.0	-1.5	0	60.0	-1.5	0

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