

Deelrapport 3

Simulaties ontwerp nivelleersysteem sluis

waterbouwkundiglaboratorium.be

Denderbelle – Vernieuwing stuwsluis

Deelrapport 3 – Simulaties ontwerp nivelleersysteem sluis

Verelst, K.; Vercruysse, J.

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2023
D/2023/3241/010

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Vercruyse, J. (2023). Denderbelle – Vernieuwing stuwsuis: Deelrapport 3 – Simulaties ontwerp nivelleersysteem sluis. Versie 7.0. WL Rapporten, 15_062_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg nv regio West	Ref.:	WL2023R15_062_3
Trefwoorden (3-5):	Lock, Filling, Emptying, dimensions, simulations		
Kennisdomeinen:	Waterbouwkundige constructies > sluizen > nivelleersysteem > numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	80	Bijlagen (p.):	42
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Verelst, K.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vercruyse, J.	Getekend door: Jeroen Vercruyse (Signa) Getekend op: 2023-01-18 09:47:45 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Jeroen Vercruyse</i>
Projectleider:	Verelst, K;	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2023-01-17 15:56:11 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Kristof Verelst</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2023-01-17 16:17:17 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Abdelkarim Bellafkih</i>
-----------------	---------------	---



Abstract

In kader van de opwaardering van de Dender afwaarts Aalst tot een waterweg CEMT klasse IV worden te Denderbelle een nieuwe sluis (lengte: 130.0 m en breedte: 10.5 m) en nieuwe stuwen gebouwd. De nieuwe sluis heeft een tussenhoofd, waardoor het mogelijk is om de opwaartse en afwaartse deelsluis afzonderlijk te nivelleren. De sluisdeuren voor het bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd zijn identiek en het nivelleersysteem bestaat uit openingen in de puntdeuren.

Voor de nieuwe sluis werd reeds een voorontwerp gemaakt van een sluis met openingen in de puntdeuren als nivelleersysteem (8 vlinderkleppen diameter 0.90 m of 12 vlinderkleppen diameter 0.70 m). Bij het verder uitwerken van het constructieve ontwerp is vastgesteld dat de uit het voorontwerp volgende diameters van de vlinderkleppen niet ingebouwd kunnen worden in de puntdeuren. Om die reden wordt een nieuw hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem uitgevoerd. Hiervoor zijn initieel drie types nivelleersystemen beschouwd, namelijk cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen, cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven en rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven. Daarnaast wordt in het nieuwe ontwerp van het nivelleersysteem het bodempeil van de sluisdeur op -0.78 mTAW beschouwd om rekening te houden met een mogelijke toekomstige waterpeildaling van 0.40 m in het afwaartse pand.

Met deze drie types nivelleersystemen zijn eerst een aantal hydraulische simulaties uitgevoerd voor de meest maatgevende situatie, i.e. vullen van de volledige kolk met een schip CEMT klasse IV in de kolk. Uit deze hydraulische simulaties volgt dat met cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen een nivelleertijd berekend wordt die langer is dan de maximale waarde van 10 min. Met (cirkelvormige of rechthoekige) openingen afgesloten met hefschuiven kan zowel voldaan worden aan het criterium van de nivelleertijd als aan het criterium voor de maximale langskracht op het schip. Op basis van de resultaten van deze simulaties werd door de opdrachtgever het nivelleersysteem met 6 rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven geselecteerd voor het finale ontwerp.

Met dit geselecteerde nivelleersysteem zijn daarna een eerste reeks hydraulische simulaties en een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hierbij werd één openingswet voor elk sluishoofd beschouwd, echter een verschillende openingswet voor beroepsvaart en recreatievaart. In de gevoeligheidsanalyse werd de invloed op de berekende langskrachten en de nivelleertijd van het afwaarts waterpeil, de beschouwde waarde van de afvoercoëfficiënt van de openingen in de sluisdeur, de aanwezigheid van breekbalken en de beschouwde release van het programma VUL_SLUIS onderzocht. Aangezien de verlaging van het afwaarts waterpeil vermoedelijk gedurende de eerste jaren na ingebruikname van de sluis nog niet zal uitgevoerd worden, is daarna een tweede reeks hydraulische simulaties uitgevoerd met het huidige waterpeil gelijk aan +3.82 mTAW in het afwaartse pand. Voor deze simulaties werd één openingswet met constante snelheid beschouwd voor elk sluishoofd, dewelke zowel geldig voor is beroepsvaart als voor recreatievaart. De openingssnelheid van de hefschuiven verschilt hierbij per sluishoofd.

Daarna zijn de finale simulaties met het nivelleersysteem uitgevoerd. De afvoercoëfficiënt van de opening in de deur, zowel voor een configuratie met breekbalken als voor een configuratie zonder breekbalken, is hierbij overgenomen uit uitgevoerde schaalmodelproeven. Voor deze finale simulaties is één openingswet voor elk sluishoofd beschouwd, dewelke zowel toepasbaar is voor recreatievaart als voor beroepsvaart, met eenzelfde openingssnelheid voor elk sluishoofd. Uit deze finale simulaties volgt dat nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse deelsluis en de afwaartse deelsluis mogelijk is in een nivelleertijd korter dan 10.0 min. Aan het einde van de nivellering zijn de hefschuiven juist niet volledig geopend bij vullen van de volledige kolk, maar wel bij ledigen van de volledige kolk. Het toepassen van breekbalken verlaagt de nivelleertijd zeer beperkt. Het verlagen van de hoogte van de openingen in de sluisdeur met 0.10 m tot een hoogte van 0.80 m heeft tot gevolg dat de hefschuiven aan het einde van de nivellering, zowel bij vullen als bij ledigen van de volledige kolk, wel volledig geopend zijn. Dit heeft geen invloed op de nivelleertijd bij ledigen en een verwaarloosbare invloed op de nivelleertijd bij vullen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	X
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Ontwerp nivelleersysteem	2
1.3 Rapportage	3
2 Gegevens	4
2.1 Ontwerp sluiskolk	4
2.2 Waterstanden.....	6
2.3 Schepen	7
3 Criteria	8
4 Hydraulische simulaties nivelleersysteem.....	10
4.1 Programma	10
4.2 Afvoercoëfficiënt openingen	11
4.2.1 Algemeen.....	11
4.2.2 Cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen	11
4.2.3 Cirkelvormige of rechthoekige openingen afgesloten met hefschuif	12
4.3 Invloed breekbalken	18
4.4 Resultaten simulaties	20
5 Resultaten initiële simulaties drie types nivelleersystemen	21
5.1 Algemeen.....	21
5.2 Cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen	23
5.3 Resultaten simulaties cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven.....	25
5.4 Resultaten simulaties rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven	28
5.5 Samenvatting resultaten	31
6 Resultaten eerste reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem.....	32
6.1 Algemeen.....	32
6.2 Simulaties nivelleren volledige sluiskolk	34
6.3 Simulaties nivelleren opwaartse deelkolk.....	37

6.4	Simulaties nivelleren afwaartse deerkolk	40
6.5	Samenvatting resultaten	43
6.6	Gevoeligheidsanalyse afvoercoëfficiënt, toegepaste simulatieprogramma en breekbalken	45
6.7	Gevoeligheidsanalyse afwaarts waterpeil	49
6.8	Gevoeligheidsanalyse versie VUL_SLUIS	51
6.9	Samenvatting resultaten gevoeligheidsanalyse	54
7	Resultaten tweede reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem	55
7.1	Algemeen	55
7.2	Simulaties nivelleren volledige kolk	57
7.3	Simulaties nivelleren opwaartse deerkolk	59
7.4	Simulaties nivelleren afwaartse deerkolk	60
7.5	Samenvatting resultaten	61
8	Resultaten finale simulaties geselecteerd nivelleersysteem	63
8.1	Algemeen	63
8.2	Simulaties nivelleren volledige kolk	65
8.3	Simulaties nivelleren opwaartse deerkolk	67
8.4	Simulaties nivelleren afwaartse deerkolk	69
8.5	Samenvatting resultaten	71
9	Conclusie	74
9.1	Algemeen	74
9.2	Hydraulische simulaties nivelleersysteem	75
9.3	Opmerkingen en aanbevelingen	78
10	Referenties	79
	Bijlage 1: Tabellen	B1
	Initiële simulaties drie types nivelleersystemen	B1
	Eerste reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem	B4
	Tweede reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem	B9
	Finale simulaties geselecteerd nivelleersysteem	B11
	Bijlage 2: Figuren	B14
	Initiële simulaties drie types nivelleersystemen	B14
	Eerste reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem	B19
	Finale simulaties geselecteerd nivelleersysteem	B34

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Belangrijkste afmetingen en peilen met betrekking tot het ontwerp van de sluis	5
Tabel 2 – Toegepaste waterstanden	6
Tabel 3 – Afmetingen schepen.	7
Tabel 4 – Karakteristieke afmetingen recreatievaart op de Dender	7
Tabel 5 – Overzicht toegepaste criteria.....	9
Tabel 6 – Afvoercoëfficiënt vlinderkleppen	12
Tabel 7 – Waarden afvoercoëfficiënt voor cirkelvormige opening.....	13
Tabel 8 – Waarden afvoercoëfficiënt	14
Tabel 9 – Afvoercoëfficiënt nivelleeropening Denderbelle uit schaalmodelonderzoek Vercruyssen <i>et al.</i> , (2018)	15
Tabel 10 – Gemiddelde waarden minimale en maximale waarde van de afvoercoëfficiënt voor een opening afgesloten met een hefschuif	17
Tabel 11 – Toegepaste waarden voor oppervlakte straal na breekbalken en peil bovenzijde straal na breekbalken	19
Tabel 12 – Verschillende types nivelleersystemen voor hydraulische simulaties.....	21
Tabel 13 – Nivelleertijd en extreme waarden stijgsnelheid voor simulaties nivelleersysteem met cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen.	23
Tabel 14 – Nivelleertijd en extreme waarde van de stijgsnelheid voor simulaties met het nivelleersysteem met cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven.....	26
Tabel 15 – Nivelleertijd en extreme waarden stijgsnelheid voor simulaties nivelleersysteem met rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven	29
Tabel 16 – Geselecteerd nivelleersysteem voor ontwerp.....	32
Tabel 17 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor eerste reeks simulaties nivelleren volledige kolk.....	34
Tabel 18 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor eerste reeks simulaties nivelleren opwaartse deelkolk	37
Tabel 19 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor eerste reeks simulaties afwaartse deelkolk	40
Tabel 20 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd uit eerste reeks simulaties met het nivelleersysteem.....	43
Tabel 21 – Nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 voor bij vullen / ledigen van de volledige kolk en de opwaartse en afwaartse deelkolk	43
Tabel 22 – Afstand tussen boeg schip en sluisdeur bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse en afwaartse deelkolk.....	44
Tabel 23 – Definitie simulaties gevoeligheidsanalyse vullen volledige kolk en vullen/ledigen afwaartse kolk	47

Tabel 24 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid, minimale en maximale waarde van de langskracht voor simulaties gevoeligheidsanalyse nivelleren volledige kolk en nivelleren afwaartse deelkolk.....	47
Tabel 25 – Invloed verhoging afwaarts waterpeil op nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse en afwaartse deelkolk	50
Tabel 26 – Invloed verhoging afwaarts waterpeil op afstand tussen boeg schip en sluisdeur bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse en afwaartse deelkolk.	50
Tabel 27 – Vergelijking extreme waarde van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.00, LOCKFILL 5.03.00 en VUL_SLUIS 01.54.00 uit simulaties gevoeligheidsanalyse voor nivelleren volledige kolk, opwaartse deelkolk en afwaartse deelkolk.....	52
Tabel 28 – Geselecteerd nivelleersysteem voor ontwerp.....	55
Tabel 29 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor tweede reeks simulaties nivelleren volledige kolk.....	57
Tabel 30 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor tweede reeks simulaties nivelleren opwaartse deelkolk	59
Tabel 31 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor tweede reeks simulaties nivelleren afwaartse deelkolk	60
Tabel 32 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd op basis van de tweede reeks simulaties met het geselecteerde nivelleersysteem.....	61
Tabel 33 – Nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 32 voor bij vullen / ledigen van de volledige kolk en de opwaartse en afwaartse deelkolk	61
Tabel 34 – Geselecteerd nivelleersysteem voor ontwerp.....	64
Tabel 35 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd op basis van de tweede reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem	64
Tabel 36 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor finale simulaties nivelleren volledige kolk.....	66
Tabel 37 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor finale simulaties nivelleren opwaartse deelkolk	68
Tabel 38 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor finale simulaties nivelleren afwaartse deelkolk	70
Tabel 39 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd uit de finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem	71
Tabel 40 – Nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 39 voor bij vullen / ledigen van de volledige kolk en de opwaartse en afwaartse deelkolk	72
Tabel 41 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd uit de finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem	76
Tabel 42 – Nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 41 voor bij vullen / ledigen van de volledige kolk en de opwaartse en afwaartse deelkolk	77

Tabel 43 – Resultaten initiële simulaties cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen	B1
Tabel 44 – Resultaten initiële simulaties cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven	B2
Tabel 45 – Resultaten initiële simulaties rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven.....	B3
Tabel 46 – Resultaten eerste reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren volledige sluisolk	B4
Tabel 47 – Resultaten eerste reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren opwaartse en afwaartse deolk	B5
Tabel 48 – Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse voor nivelleren volledige olk, opwaartse en afwaartse deolk met afwaartse waterstand +3.82 mTAW	B6
Tabel 49 – Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse voor nivelleren volledige sluisolk met VUL_SLUIS release 01.54.00	B7
Tabel 50 – Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse voor nivelleren afwaartse en opwaartse deolk met VUL_SLUIS release 01.54.00	B8
Tabel 51 – Resultaten tweede reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren volledige olk	B9
Tabel 52 – Resultaten tweede reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren opwaartse en afwaartse deolk	B10
Tabel 53 – Resultaten finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren volledige olk	B11
Tabel 54 – Resultaten finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren opwaartse deolk	B12
Tabel 55 – Resultaten finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren afwaartse deolk	B13

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Situering nieuwe sluis en nieuwe stuwen Denderbelle	1
Figuur 2 – Voorontwerp nieuwe sluis Denderbelle	4
Figuur 3 – Toegepaste afstand tussen stopstreep en puntdeur voor de hydraulische simulaties	6
Figuur 4 – Afvoercoëfficiënt vlinderkleppen	12
Figuur 5 – Cirkelvormige opening met breekbalken	13
Figuur 6 – Rechthoekige opening met breekbalken uit Van der Ven (2015)	14
Figuur 7 – Geometrieën breekbalken.....	15
Figuur 8 – Afvoercoëfficiënt nivelleeropening Denderbelle uit schaalmodelonderzoek Vercruysse <i>et al.</i> , (2018).....	16
Figuur 9 – Afvoercoëfficiënt voor openingen afgesloten met een hefschuif.....	16
Figuur 10 – Verdeling opgemeten stroomsnelheden op 1.3 m verwijderd van de opening in de deur	19
Figuur 11 – Variatie in de tijd van de langskracht op het schip; de openingshoek en de openingssnelheid van de vlinderkleppen voor simulatie VK_VKc_01.....	24
Figuur 12 – Variatie in de tijd van de langskracht op het schip, de hefhoogte en de openingssnelheid van de hefschuiven voor simulatie VK_HSc_01	25
Figuur 13 – Variatie in de tijd van de langskracht op het schip, de hefhoogte en de openingssnelheid van de hefschuiven voor simulatie VK_HSr_01.....	28
Figuur 14 – Variatie in de tijd van het waterpeil in de sluiskolk, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip voor simulatie VK_HSr_09.....	35
Figuur 15 – Variatie in de tijd van het waterpeil in de sluiskolk, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip voor simulatie OPW_HSr_01.....	38
Figuur 16 – Variatie in de tijd van het waterpeil in de sluiskolk, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip voor simulatie AFW_HSr_01	41
Figuur 17 – Vergelijking langskracht op het schip voor simulaties VK_HSr_50 en VK_HSr_51	58
Figuur 18 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_VKc_01 en simulatie VK_VKc_04	B14
Figuur 19 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_HSc_01 en simulatie VK_HSc_06	B15
Figuur 20 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_HSc_07 en simulatie VK_HSc_08	B16
Figuur 21 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_HSr_01 en simulatie VK_HSr_06.....	B17
Figuur 22 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_HSr_07 en simulatie VK_HSr_08.....	B18
Figuur 23 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HSr_09; b:simulatie VK_HSr_12).....	B19
Figuur 24 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HSr_13; b: simulatie VK_HSr_14).....	B20
Figuur 25 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HSr_23; b: simulatie VK_HSr_26).....	B21

Figuur 26 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HSr_15; b: simulatie VK_HSr_18).....	B22
Figuur 27 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HS_27;b: simulatie VK_HSr_30)	B23
Figuur 28 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk (a: simulatie OPW_HSr_01; b: simulatie OPW_HSr_03)	B24
Figuur 29 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk (a: simulatie OPW_HSr_04;b: simulatie OPW_HSr_05)	B25
Figuur 30 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk (simulatie OPW_HSr_06)	B26
Figuur 31 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk (a: simulatie OPW_HSr_07; b: simulatie OPW_HSr_08)	B27
Figuur 32 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk (a: simulatie OPW_HSr_11; b: simulatie OPW_HSr_12)	B28
Figuur 33 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelkolk (a: simulatie AFW_HSr_01; b:simulatie AFW_HSr_02)	B29
Figuur 34 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelkolk (a: simulatie AFW_HSr_03;b: simulatie AFW_HSr_04)	B30
Figuur 35 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelkolk (a: simulatie AFW_HSr_05; b: simulatie AFW_HSr_06)	B31
Figuur 36 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelkolk (a: simulatie AFW_HSr_09; b: simulatie AFW_HSr_10)	B32
Figuur 37 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelkolk (a: simulatie AFW_HSr_11; b: simulatie AFW_HSr_12)	B33
Figuur 38 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk uit simulatie VK_HSr_56, VK_HSr_57, VK_HSr_58, en VK_HSr_59.....	B34
Figuur 39 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk uit simulaties VK_HSr_60, VK_HSr_61, VK_HSr_62 en VK_HSr_63	B35
Figuur 40 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk uit simulaties VK_HSr_64, VK_HSr_65, VK_HSr_66 en VK_HSr_67	B36
Figuur 41 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk uit simulaties OPW_HSr_31, OPW_HSr_32, OPW_HSr_33 en OPW_HSr_34	B37
Figuur 42 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk uit simulaties OPW_HSr_35, OPW_HSr_36, OPW_HSr_37 en OPW_HSr_38	B38
Figuur 43 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk uit simulaties OPW_HSr_39, OPW_HSr_40, OPW_HSr_41, OPW_HSr_42, OPW_HSr_43 en OPW_HSr_44	B39
Figuur 44 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelkolk uit simulaties AFW_HSr_34, AFW_HSr_35, AFW_HSr_36, AFW_HSr_37, AFW_HSr_38 en AFW_HSr_39.	B40

Figuur 45 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelskolk uit simulaties AFW_HSr_40, AFW_HSr_41, AFW_HSr_42 en AFW_HSr_43..... B41

Figuur 46 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelskolk uit simulaties AFW_HSr_44, AFW_HSr_45, AFW_HSr_46 en AFW_HSr_47..... B42

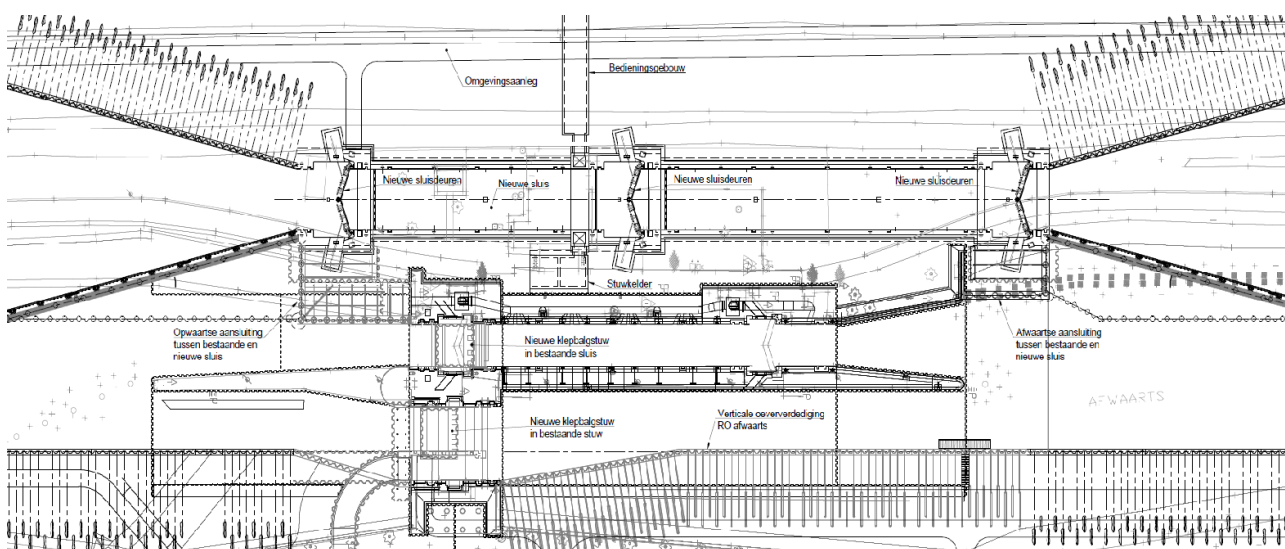
1 Inleiding

1.1 Situering

Bij De Vlaamse Waterweg nv regio West loopt momenteel een project voor de opwaardering van de Dender tot (scheepvaart-)klasse IV.

Voor het stuwsluiscomplex te Denderbelle wordt hierbij een nieuwe sluis gebouwd op de linkeroever, naast de huidige sluis. De ontubbeling van de stuw wordt gerealiseerd door in de huidige sluiskolk een nieuwe stuw te bouwen en de huidige stuw te vervangen door een nieuwe stuw.

Figuur 1 situeert de ligging van de nieuwe sluis en de nieuwe stuwen te Denderbelle.



Figuur 1 – Situering nieuwe sluis en nieuwe stuwen Denderbelle

Voor de nieuwe sluis te Denderbelle werd reeds een voorontwerp gemaakt van een sluis met puntdeuren en openingen in de puntdeuren als nivelleersysteem. Dit voorontwerp werd in januari 2015 door het studie bureau SBE aan De Vlaamse Waterweg nv regio West overgemaakt. Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) leverde hiervoor een aantal inputs. Zo werd door het WL in 2010 reeds een voorontwerp gemaakt van een nivelleersysteem met openingen in de deuren en werd de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd. Het voorontwerp van het nivelleersysteem is gerapporteerd in Verelst *et al.* (2010). Uit dit voorontwerp volgde dat een nivelleersysteem met 8 vlinderkleppen diameter 0.90 m of 12 vlinderkleppen diameter 0.70 m voldeed aan de vooropgestelde criteria voor nivelleertijd en langskrachten op het schip.

Voor het uitwerken van het finale ontwerp doet de Vlaamse Waterweg nv regio West (contactpersoon: Lien Vanhoutte) beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal (EBS), Geotechniek en Waterbouwkundig Laboratorium (WL).

Bij de verdere uitwerking van het constructief ontwerp door de Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS) is vastgesteld dat het niet haalbaar was om de uit het voorontwerp volgende diameter van de vlinderkleppen in te bouwen in de puntdeuren. Om die reden wordt door WL een nieuw hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem uitgevoerd. Daarnaast wordt ook rekening gehouden met een mogelijke toekomstige waterpeildaling van het afwaarts pand met 0.40 m. Het toekomstig streefpeil in het afwaarts kanaalpand

verlaagt hierdoor tot +3.45 mTAW. Rekening houdend met deze mogelijke waterpeildaling is door de opdrachtgever ook gesteld dat het drempelpeil, respectievelijk het bodempeil van de sluiskolk verlaagd dienen te worden met 0.60 m tot -0.28 mTAW, respectievelijk -0.78 mTAW. Hierbij wordt door de opdrachtgever 0.20 m extra kielspeling in rekening gebracht.

1.2 Ontwerp nivelleersysteem

Voor het nieuwe hydraulische ontwerp van het nivelleersysteem zijn initieel volgende drie types nivelleersystemen beschouwd met als maximale afmetingen (bepaald door EBS):

- 8 cirkelvormige openingen diameter 0.60 m afgesloten met vlinderkleppen. De onderrand van de vlinderkleppen bevindt zich op +0.30 mTAW.
- 6 cirkelvormige openingen diameter 0.90 m afgesloten met hefschuiven. De onderrand van de hefschuiven bevindt zich op +0.15 mTAW.
- 6 rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven. De onderrand van de hefschuiven bevindt zich op +0.15 mTAW.

Met deze drie types nivelleersystemen zijn een aantal hydraulische simulaties uitgevoerd. Op basis van de resultaten van deze simulaties is door de opdrachtgever het nivelleersysteem met rechthoekige openingen afgesloten door hefschuiven geselecteerd voor het verdere ontwerp van het nivelleersysteem. Met dit geselecteerde nivelleersysteem zijn een eerste reeks hydraulische simulaties uitgevoerd. Deze simulaties zijn uitgevoerd met zowel het programma VUL_SLUIS van WL als het programma LOCKFILL van Deltares. Bij deze simulaties werd één openingswet voor het bovenhoofd, één voor het tussenhoofd en één voor het benedenhoofd beschouwd, maar werd een aparte openingswet voor beroepsvaart en recreatievaart beschouwd.

Door de opdrachtgever is daarna gesteld dat de verlaging van het waterpeil in het afwaartse pand vermoedelijk de eerste jaren nog niet zal uitgevoerd worden. Om die reden is een tweede reeks hydraulische simulaties uitgevoerd met het huidige waterpeil in het afwaartse pand als randvoorwaarde. Voor deze simulaties werd één openingswet met constante snelheid beschouwd voor het bovenhoofd, één voor het tussenhoofd en één voor het benedenhoofd. Deze openingswet is zowel geldig voor beroepsvaart als voor recreatievaart. Bij deze simulaties is ook de laatste stand van het ontwerp van de openingen in de deur door EBS in rekening gebracht, i.e. de onderzijde van de openingen bevindt zich op +0.10 mTAW in plaats van +0.15 mTAW.

Sinds 2014 loopt op het WL een intern onderzoeksproject naar het toepassen van breekbalken voor nivelleersystemen met openingen in de deur (Breugem *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2016; Vercruysse *et al.*, 2019). Het doel van dit onderzoeksproject is om de invloed van breekbalken op het debiet doorheen de opening en op de stroming in de sluiskolk te onderzoeken en om de geometrie van de breekbalken te optimaliseren. Voor dit onderzoeksproject heeft WL een schaalmodel gebouwd waarbij voor een gegeven nivelleeropening verschillende geometrieën breekbalken beproefd kunnen worden. In dit schaalmodel zijn voor de nivelleeropening van de nieuwe sluis te Denderbelle ook proeven uitgevoerd voor een geometrie zonder breekbalken en twee variërende geometrieën met breekbalken. De resultaten van deze proeven zijn beschreven in Vercruysse *et al.*, (2018). Tijdens deze proeven is de afvoercoëfficiënt bepaald van de opening in de deur, zowel voor een configuratie met breekbalken als voor een configuratie zonder breekbalken.

Met behulp van in het schaalmodel beproefde waarde van de afvoercoëfficiënt is de finale reeks hydraulische simulaties uitgevoerd. Voor deze simulaties is één constante openingsnelheid beschouwd voor de openingswet van de schuiven in het bovenhoofd, het tussenhoofd en het benedenhoofd. De beschouwde openingswet is zowel toepasbaar voor beroepsvaart als voor recreatievaart. Deze finale simulaties zijn zowel uitgevoerd met het programma VUL_SLUIS van WL als met het programma LOCKFILL van Deltares.

1.3 Rapportage

Dit rapport beschrijft de uitgevoerde hydraulische simulaties in het kader van het ontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis te Denderbelle.

Hoofdstuk 2 van dit rapport vat de gebruikte gegevens samen.

De criteria waaraan het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem getoetst worden, worden beschreven in Hoofdstuk 3.

Hoofdstuk 4 beschrijft een aantal algemeenheden met betrekking tot de simulaties die in dit rapport zijn uitgevoerd.

Hoofdstuk 5 geeft de resultaten van de initiële hydraulische simulaties met de drie verschillende types nivelleersystemen. Op basis van deze simulaties is het nivelleersysteem met rechthoekige openingen afgesloten door hefschuiven geselecteerd voor het verdere ontwerp.

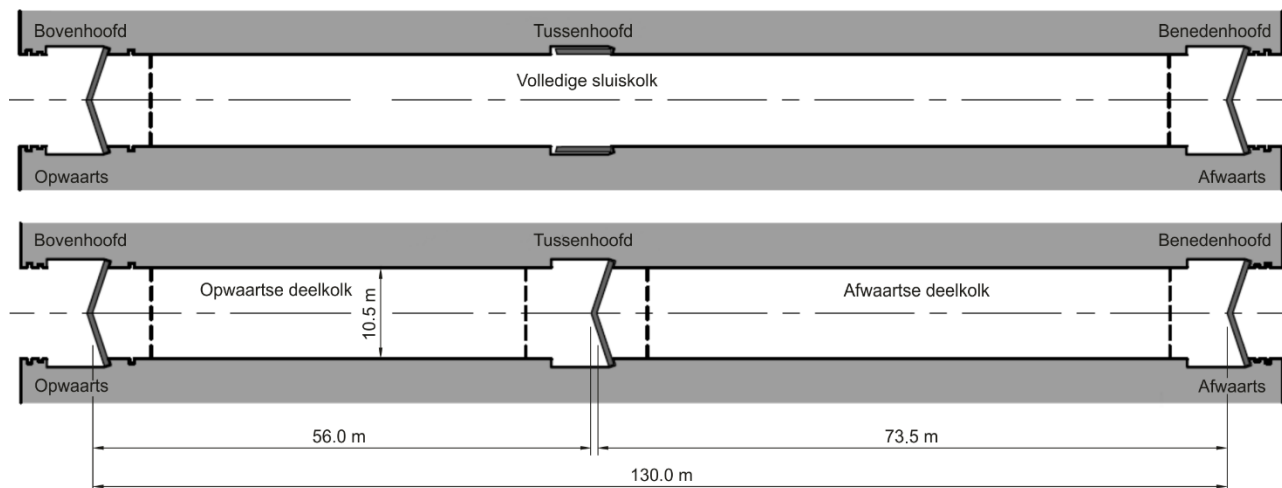
De resultaten van een eerste reeks simulaties met het geselecteerde nivelleersysteem worden beschreven in hoofdstuk 6 van dit rapport. Daarna zijn een tweede reeks simulaties uitgevoerd voor het huidig waterpeil in het afwaartse pand met één constante openingssnelheid voor bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd. Deze simulaties zijn beschreven in hoofdstuk 7 van dit rapport. In hoofdstuk 8 worden de resultaten beschreven van de finale simulaties die met dit geselecteerde nivelleersysteem zijn uitgevoerd.

Hoofdstuk 9 vat de conclusies van dit rapport samen.

2 Gegevens

2.1 Ontwerp sluiskolk

Figuur 2 geeft een bovenaanzicht van de nieuwe sluis te Denderbelle.



Figuur 2 – Voorontwerp nieuwe sluis Denderbelle

Boven: volledige sluiskolk; beneden: opwaartse en afwaartse deelkolk In deze studie zal telkens volgende naamgeving gebruikt worden:

- Volledige kolk: De sluiskolk waarbij de sluisdeuren van het bovenhoofd en de sluisdeuren van het benedenhoofd gesloten zijn. De sluisdeuren van het tussenhoofd zijn open.
- Opwaartse deelkolk: De sluiskolk waarbij de sluisdeuren van het bovenhoofd en de sluisdeuren van het tussenhoofd gesloten zijn. De sluisdeuren van het benedenhoofd zijn open. Dit is de kleinste sluiskolk bij gebruik van de tussendeuren.
- Afwaartse deelkolk: De sluiskolk waarbij de sluisdeuren van het tussenhoofd en de sluisdeuren van het benedenhoofd gesloten zijn. De sluisdeuren van het bovenhoofd zijn open. Deze kolk is de grotere sluiskolk bij gebruik van de tussendeuren.

De sluisdeuren voor het bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd zijn identiek. Het nivelleersysteem, bestaat uit openingen in de puntdeuren en is hierdoor ook identiek voor de drie hoofden. Dit heeft als voordeel dat slechts één set reservedeuren voorzien dient te worden.

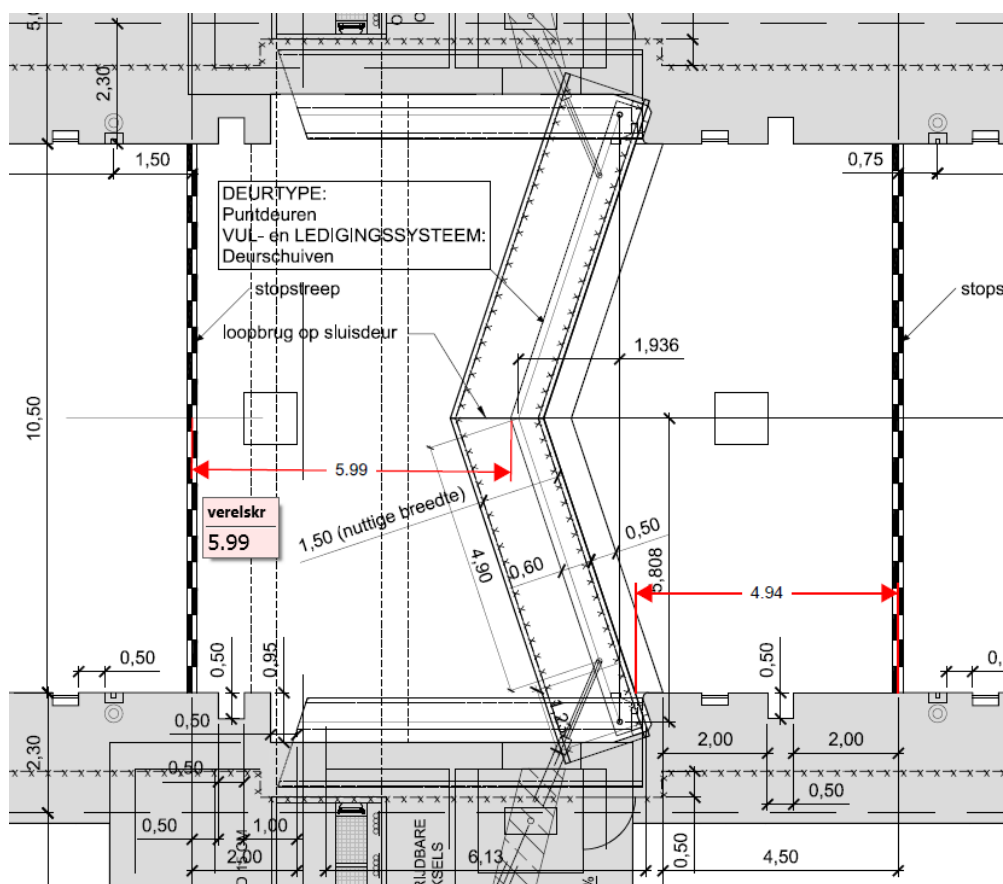
Tabel 1 vat de belangrijkste afmetingen en peilen met betrekking tot het ontwerp van de sluis samen.

Tabel 1 – Belangrijkste afmetingen en peilen met betrekking tot het ontwerp van de sluis

Totale lengte opwaartse dealkolk	56.0 m
Totale lengte afwaartse dealkolk	73.5 m
Totale lengte volledige kolk	130.0 m
Breedte sluiskolk	10.5 m
Bodempeil sluiskolk	- 0.78 mTAW
Drempelpeil opwaarts	- 0.28 mTAW
Drempelpeil afwaarts	- 0.28 mTAW
Afstand stopstreep tot puntdeur	5.0 m

Bij Tabel 1 wordt het volgende opgemerkt:

- De lengte van de volledige sluiskolk, de opwaartse kolk en de afwaartse kolk, is bepaald als de afstand tussen de scharnierpunten van de hoofden aan het uiteinde van de betreffende sluiskolken, verminderd met de dikte van de puntdeur van het afwaartse sluishoofd van de betreffende sluiskolk. Dit heeft wel tot gevolg dat de som van de lengte van de opwaartse kolk en de lengte van de afwaartse kolk één deurdikte kleiner is dan de lengte van de totale kolk. Voor de eenvoud zijn de lengtes afgerond tot 0.5 m.
- Vòòr de uitvoering van de initiële simulaties (uit hoofdstuk 5) werd een dikte van de sluisdeur van 0.60 m door EBS beschouwd. Later, na verdere uitwerking van het ontwerp van de sluisdeur door EBS, werd deze dikte bijgesteld naar 0.70 m. Voor alle simulaties in dit rapport worden de lengtes van de sluiskolk uit Figuur 3 beschouwd, dewelke bepaald zijn op basis van een dikte van 0.60 m. De wijziging van de dikte van de sluisdeur naar 0.70 m werd bij het uitvoeren van de simulaties in hoofdstuk 6, hoofdstuk 7 en hoofdstuk 8 niet meer in rekening gebracht. De invloed hiervan op de resultaten wordt echter verwaarloosbaar geacht.
- Voor het uitvoeren van de hydraulische simulaties wordt voor de afstand tussen de stopstreep en de puntdeur altijd conservatief de kortste afstand beschouwd (zie Figuur 3). Voor de sluisdeur in het opwaartse hoofd van de betreffende sluiskolk is dit de afstand tussen de stopstreep en de scharnierpunten van de sluisdeur. Deze bedraagt ca. 6.0 m. Voor de sluisdeur in het afwaartse hoofd van de sluiskolk is dit de afstand tussen de stopstreep en de punt van de sluisdeur (ca. 5.0 m). Voor het uitvoeren van de simulaties is conservatief de kleinste waarde van deze beide afstanden beschouwd (5.0 m).



Figuur 3 – Toegepaste afstand tussen stopstreep en puntdeur voor de hydraulische simulaties

2.2 Waterstanden

Tabel 2 geeft een overzicht van de toegepaste waterstanden voor het ontwerp van het niveleersysteem. Initieel zijn de simulaties uitgevoerd voor het streefpeil van het afwaarts pand na de mogelijke waterpeildaling (+3.45 mTAW). Deze waarde is conservatief voor de berekening van nivelleertijd, stijgsnelheid en langskracht op het schip. Later is het huidig streefpeil in het afwaarts pand beschouwd, aangezien nog niet bepaald is wanneer de waterpeilverlaging in het afwaarts pand doorgevoerd wordt.

Tabel 2 – Toegepaste waterstanden

Streefpeil opwaarts	+ 5.83 mTAW
Huidig streefpeil afwaarts	+ 3.82 mTAW
Streefpeil afwaarts na waterpeildaling	+ 3.45 mTAW

2.3 Schepen

Wat het ontwerpschip betreft, worden door de opdrachtgever de volgende 3 ontwerpschepen vooropgesteld:

- De volledige sluiskolk wordt ontworpen voor een schip CEMT-klasse IV.
- De opwaartse deelkolk, i.e. de kleinste en opwaarts gelegen sluiskolk bij gebruik van de tussendeuren, wordt ontworpen voor een schip CEMT-klasse I.
- De afwaartse deelkolk i.e. de grootste en afwaarts gelegen sluiskolk bij gebruik van de tussendeuren, wordt ontworpen voor een schip CEMT-klasse II.

Voor de volledige sluiskolk worden naast simulaties met het ontwerpschip CEMT klasse IV in de kolk ook simulaties uitgevoerd met een kleiner schip CEMT klasse III in de kolk en simulaties met een schip CEMT klasse II in de kolk.

Tabel 3 vat de afmetingen van deze schepen nog eens samen. Hierbij moet het volgende opgemerkt worden:

- De originele CEMT-classificatie uit “Richtlijnen Vaarwegen 2011” (Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2011) vermeldt voor schepen van klasse IV een maximale lengte van 85 m. Hierbij wordt ook vermeld dat door schaalvergroting de lengte van klasse IV-schepen maximaal 105 m kan bedragen. Deze laatste waarde is door de opdrachtgever gekozen als ontwerplengte.
- De literatuur vermeldt voor deze 3 types schepen meestal een maximaal geladen diepgang van respectievelijk 2.2 m (CEMT-klasse I), 2.5 m (CEMT-klasse II) en 2.5 m (CEMT-klasse IV). Richtlijnen Vaarwegen 2011 vermeldt dat de maximaal geladen diepgang van de huidige vloot door schaalvergroting 2.5 m kan bedragen voor CEMT-klasse I, 2.6 m voor CEMT-klasse II en 3.0 m voor CEMT-klasse IV. Deze laatste waarden zijn door de opdrachtgever gekozen als ontwerpdiepgang.

Tabel 3 – Afmetingen schepen.

CEMT-classificatie	I	II	III	IV
Lengte	38.5 m	55.0 m	85.0 m	105.0 m
Breedte	5.05 m	6.6 m	8.2 m	9.5 m
Diepgang (geladen)	2.5 m	2.6 m	2.7 m	3.0 m
Diepgang (ongeladen)	1.2 m	1.4 m	1.5 m	1.6 m
Totale Massa (schip+lading)*	405 ton	765 ton	1235 ton	2385 ton

*Bron: EAU 2004 (Members of the Committee for Waterfront Structures, 2006)

- Naast beroepsvaart dient de sluis ook ontworpen te worden voor recreatievaart. Hiervoor worden dezelfde karakteristieke afmetingen gebruikt als toegepast bij het ontwerp van het nivelleersysteem van de stuwsuis te Aalst (Verelst *et al.*, 2009, 2014b), zie Tabel 4. Voor het uitvoeren van de simulaties met het nivelleersysteem in deze studie worden de maximale afmetingen voor traagloper 2 beschouwd (12.0 m x 3.4 m x 1.40 m) en een totale massa van 21700 kg.

Tabel 4 – Karakteristieke afmetingen recreatievaart op de Dender

	Lengte	Breedte	Diepgang
RIB	4.0 m – 7.0 m	± 2.0 m	0.50 m – 0.60 m
Speedboot	5.0 m – 7.0 m	2.0 m – 2.6 m	0.60 m – 0.90 m
Traagloper 1	8.0 m – 9.0 m	2.5 m – 2.8 m	0.80 m – 1.10 m
Traagloper 2	8.0 m – 12.0 m	3.0 m – 3.4 m	1.00 m – 1.40 m

3 Criteria

Met betrekking tot het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem worden volgende criteria toegepast:

1. Nivelleertijd

Door de opdrachtgever is gesteld dat de nivelleertijd voor de volledige sluiscolk maximaal 10 min (600 s) dient te bedragen. Voor de opwaartse en afwaartse deelcolk wordt geen waarde opgegeven waardoor hiervoor hetzelfde criterium gehanteerd wordt als voor de volledige colk.

2. Stijgsnelheid kolkpeil

“Ontwerp van schutsluizen” vermeldt voor binnenvaart met vaste haalkommen (of vaste bolders) een maximale stijgsnelheid van het kolkpeil van 1.0 m/min (~ 0.017 m/s). Voor recreatievaart vermeldt Lassard & Pulina (1994) een maximale waarde van de stijgsnelheid van het kolkpeil van 0.6 m/min (~ 0.010 m/s).

3. Maximale langskracht

Vrijburcht (1992) vermeldt voor schepen met een laadvermogen kleiner dan 600 ton (CEMT klasse II) een maximaal toelaatbare langskracht van 1.5 ‰ (van de totale waterverplaatsing, i.e. eigengewicht van het schip en lading). “Ontwerp van schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) vermeldt, bij gebruik van vaste bolders, voor vullen een maximaal toelaatbare langskracht van 1.5 ‰ voor schepen van klasse III en een maximaal toelaatbare langskracht van 1.1 ‰ voor schepen van CEMT klasse IV. Voor ledigen vermeldt “Ontwerp van schutsluizen” een maximaal toelaatbare waarde voor de langskracht van 1.5 ‰ voor schepen CEMT klasse IV en 2.0 ‰ voor schepen CEMT klasse III.

De maximale toelaatbare waarde van de langskracht op het schip neemt in verhouding niet toe met de scheepsmassa. Om die reden zal bij een grotere scheepsklasse de, ten opzichte van het scheepsgewicht uitgedrukte, toelaatbare langskracht op het schip lager zijn. Bij de hierboven vermelde maximaal toelaatbare langskrachten is de waarde voor het schip CEMT klasse III hoger dan deze voor een schip CEMT klasse I en een schip CEMT klasse II. Dit is niet logisch. Om die reden wordt in dit rapport voor een schip CEMT klasse I en een schip CEMT klasse II het criterium voor een schip CEMT klasse III overgenomen.

Op basis van deze waarden wordt in deze studie voor het ontwerpschip CEMT klasse IV voor vullen een maximaal toelaatbare langskracht van 1.1 ‰ weerhouden en voor de schepen CEMT klasse I, klasse II en klasse III een maximaal toelaatbare waarde van 1.5 ‰. Voor ledigen wordt 1.5 ‰ toegepast voor schepen CEMT klasse IV en 2.0 ‰ voor schepen CEMT klasse I, klasse II en klasse III.

Voor recreatievaart vermelden zowel Vrijburcht (1992) als “Ontwerp van schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) dat de maximaal toelaatbare waarde voor de langskracht 3.0 ‰ bedraagt.

Tabel 5 geeft een overzicht van de toegepaste criteria.

Tabel 5 – Overzicht toegepaste criteria

3		Classificatie schip				
		CEMT IV	CEMT III	CEMT II	CEMT I	recreatievaart
Nivelleertijd		[min]	10	10	10	10
Maximale stijgsnelheid		[mm/s]	17	17	17	10
bron		-	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Lasard & Pulina, 1994)
Langskracht	vullen met vaste bolders	[‰]	1.1	1.5	1.5	3.0
	ledigen of vullen met drijvende bolders	[‰]	1.5	2.0	2.0	2.0 / (1.5)
	bron	-	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)	(Beem <i>et al.</i> , 2000) / (Vrijburcht, 1992)	(Beem <i>et al.</i> , 2000)

4 Hydraulische simulaties nivelleersysteem

4.1 Programma

De hydraulische simulaties met het nivelleersysteem worden zowel uitgevoerd met het programma VUL_SLUIS van WL als met het programma LOCKFILL van Deltares, waarop het programma VUL_SLUIS gebaseerd is. VUL_SLUIS en LOCKFILL gebruiken eenzelfde rekenmethode. Eerst wordt het debiet door de openingen berekend in functie van de tijd. Hieruit volgt de nivelleerkromme en de nivelleertijd. Aan de hand van het debiet door de openingen en de waterstand in de sluiskolk wordt vervolgens de langskracht op het schip in de sluiskolk berekend. Hierbij worden de volgende 5 componenten van de langskracht beschouwd: Langskracht ten gevolge van translatiegolven, langskracht ten gevolge van impulsafname, langskracht ten gevolge van vulstraalwerking, langskracht ten gevolge van wrijving en langskracht ten gevolge van dichtheitsverschillen. De component van de langskracht ten gevolge van dichtheitsverschillen kan enkel door LOCKFILL berekend worden, maar deze is niet beschikbaar in de ter beschikking gestelde versie. Bij de ontwikkeling van VUL_SLUIS is de langskracht ten gevolge van dichtheitsverschillen niet beschouwd.

De berekeningsmethode van LOCKFILL is gebaseerd op schaalmodelonderzoek, deskstudies en eerder ontwikkelde berekeningsprogramma's. Het programma was ontwikkeld door Deltares in de periode 1989-1993 in opdracht van Rijkswaterstaat. In 2012 werd, in opdracht van Rijkswaterstraat, LOCKFILL 5.0 ontwikkeld door Deltares (Deltares, 2015). Sinds juli 2015 is het programma LOCKFILL vrij ter beschikking gesteld. Het programma VUL_SLUIS is een programma dat door WL is ontwikkeld op basis van de beschikbare literatuur in verband met het programma LOCKFILL en gevalideerd met meetgegevens uit de literatuur en met bijkomende meetgegevens van WL.

Hierbij moet opgemerkt worden dat het programma VUL_SLUIS, vooral met betrekking tot de berekening van de krachten op een schip, nog steeds in ontwikkeling is. De initiële simulaties (hoofdstuk 5), de eerste simulaties met het beschouwde nivelleersysteem (hoofdstuk 6) werden om die reden uitgevoerd met twee verschillende versies van het programma, namelijk VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 en VUL_SLUIS release 01.42.vB.08. De ontwikkeling van deze versies van het programma VUL_SLUIS wordt beschreven in Verelst, De Mulder et al. (2014) en Verelst *et al.*, (2016a; b). Deze beide releases geven identiek dezelfde resultaten wat betreft het debiet door de vulopeningen, de variatie van het waterpeil in de sluiskolk en de optredende end-to-end waterspiegelhellingen. De verschillen tussen beide releases betreffen de formulering voor het berekenen van de langskrachten op het schip. Sinds juni 2017 is VUL_SLUIS release 01.54.00 beschikbaar. In deze release is de formulering voor de berekening van de langskracht op het schip gewijzigd, waardoor nog één langskracht op het schip berekend wordt. De ontwikkeling van deze release van het programma VUL_SLUIS wordt beschreven in Verelst *et al.*, (2017). Deze release van VUL_SLUIS is gebruikt voor het uitvoeren van de tweede reeks simulaties in hoofdstuk 7 en de finale simulaties met het beschouwde nivelleersysteem in hoofdstuk 8. In de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 6 worden de beide releases van VUL_SLUIS vergeleken om de invloed van het toepassen van deze beide releases van het programma VUL_SLUIS op de berekende langskrachten op het schip na te gaan.

Hierbij wordt opgemerkt dat zowel het programma VUL_SLUIS als het programma LOCKFILL niet gevalideerd zijn voor recreatievaart.

4.2 Afvoercoëfficiënt openingen

4.2.1 Algemeen

Op een bepaald tijdstip kan het debiet door de openingen in de sluisdeur berekend worden aan de hand van volgende formulering:

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

Met:

– Q	Debiet door de openingen in de deur	[m ³ /s]
– μ	Afvoercoëfficiënt	[-]
– A	Oppervlakte openingen	[m ²]
– g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]
– Δh	Verval	[m]

In dit rapport worden simulaties uitgevoerd met drie mogelijke types nivelleersystemen. Deze paragraaf beschrijft welke waarde voor de afvoercoëfficiënt voor deze drie types nivelleersystemen is beschouwd.

In hoofdstuk 5 worden deze drie types nivelleersystemen met elkaar vergeleken. Hierbij wordt opgemerkt dat bij volledig geopende kleppen of hefschuiven voor deze drie types nivelleersystemen de volgende totale oppervlakte van de openingen berekend wordt:

- 8 cirkelvormige openingen diameter 0.60 m: 2.26 m²,
- 6 cirkelvormige openingen diameter 0.90 m: 3.82 m²,
- 6 rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m: 4.86 m².

Uit paragraaf 4.2.2 en paragraaf 4.2.3 volgt dat de verschillen in totale oppervlakte van de openingen bij volledig geopende kleppen of schuiven tussen de drie verschillende systemen groter is dan eventuele verschillen in de afvoercoëfficiënt van de verschillende types openingen. Om die reden wordt de vergelijking van deze drie types nivelleersystemen uitgevoerd met de gemiddelde waarde van de afvoercoëfficiënt, die in deze paragrafen bepaald is. Voor de simulaties met het geselecteerde nivelleersysteem met rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven wordt in paragraaf 4.2.3 meer in detail beschreven welke waarde van de afvoercoëfficiënt toegepast wordt voor welke simulaties.

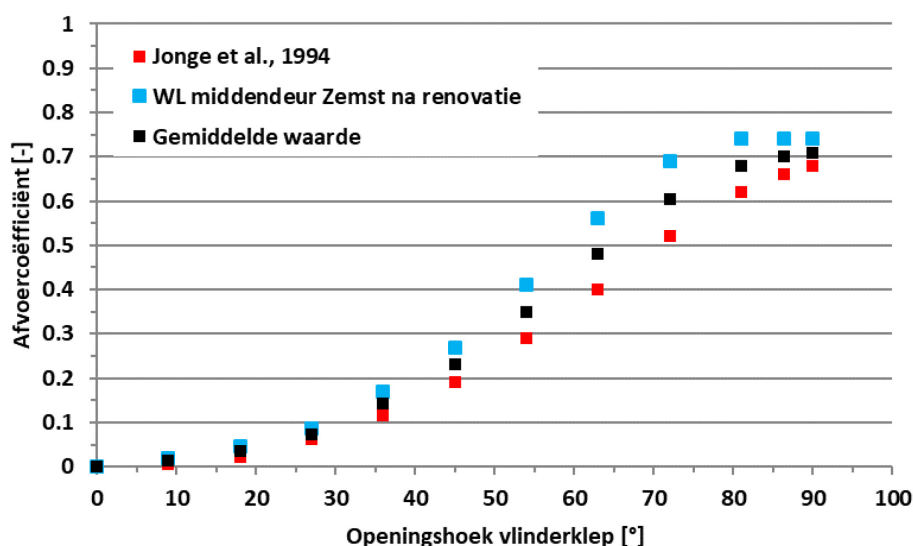
4.2.2 Cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen

In Jonge et al. (1994) worden waarden vermeld van de afvoercoëfficiënt van vlinderkleppen geschat op basis van metingen in de Bergdiepsesluis. Deze waarden betreffen vlinderkleppen zonder breekbalken. Door WL zijn in 2015 waterpeilmetingen uitgevoerd in de afwaartse kolk van de sluis van Zemst na renovatie van de middendeur (Vercruysse *et al.*, 2016b). De nieuwe middendeur is voorzien van 8 openingen diameter 1.40 m afgesloten met vlinderkleppen. Hierbij zijn geen breekbalken aanwezig. Op basis van deze metingen is de waarde van de afvoercoëfficiënt in functie van de openingshoek afgeleid.

De waarde van de afvoercoëfficiënt van vlinderkleppen uit deze twee bronnen is gegeven in Tabel 6 en grafisch voorgesteld in Figuur 4. Voor de simulaties in hoofdstuk 5 van dit rapport wordt het gemiddelde van de afvoercoëfficiënt uit deze beide bronnen toegepast. Deze is met de zwarte vierkantjes voorgesteld in Figuur 4.

Tabel 6 – Afvoercoëfficiënt vlinderkleppen

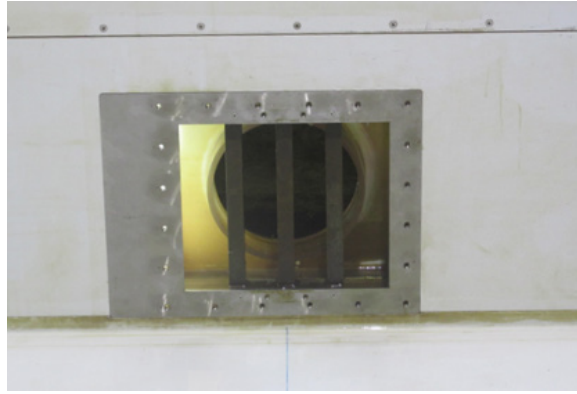
Relatieve klephoek $\theta/90^\circ$	Klephoek θ	Jonge et al. (1994).	Zemst na renovatie (Vercruysse et al., 2016b)	Gemiddelde waarde
[-]	[°]	[-]	[-]	[-]
0.00	0.0	0.000	0.000	0.000
0.10	9.0	0.005	0.020	0.013
0.20	18.0	0.023	0.045	0.034
0.30	27.0	0.061	0.085	0.073
0.40	36.0	0.115	0.170	0.143
0.50	45.0	0.190	0.270	0.230
0.60	54.0	0.290	0.410	0.350
0.70	63.0	0.400	0.560	0.480
0.80	72.0	0.520	0.690	0.605
0.90	81.0	0.620	0.740	0.680
0.96	86.4	0.660	0.740	0.700
1.00	90.0	0.6800	0.740	0.701



Figuur 4 – Afvoercoëfficiënt vlinderkleppen

4.2.3 Cirkelvormige of rechthoekige openingen afgesloten met hefschuif

WL is in 2015 gestart met een onderzoek naar de invloed van breekbalken op een niveleersysteem met openingen in de deur (Ramos et al., 2016). Hierbij is zowel schaalmodelonderzoek met behulp van een generiek schaalmodel als CFD-modellering uitgevoerd. Op het schaalmodel is de invloed onderzocht van breekbalken op het stromingspatroon in de sluiscolk voor één cirkelvormige opening in een sluisdeur. De opening met diameter 0.20 m is ingebouwd in een kamer met breedte 0.278 m, hoogte 0.286 m en diepte 0.12 m. Aan opwaartse zijde is een geleidingbuis voorzien met lengte 0.06 m en diameter 0.20 m. Hierbij wordt opgemerkt dat al deze afmetingen schaalmodelafmetingen betreffen. Figuur 5 geeft een voorstelling van deze cirkelvormige opening met breekbalken in het schaalmodel.



Figuur 5 – Cirkelvormige opening met breekbalken uit Ramos *et al.* (2016)

Met behulp van het schaalmodel is de afvoercoëfficiënt bepaald van de cirkelvormige opening zonder breekbalken en van de cirkelvormige opening met verschillende configuraties van breekbalken. In Tabel 7 zijn de waarden van de afvoercoëfficiënt vermeld voor de opening zonder breekbalken en bij aanwezigheid van 3 breekbalken aan de buitenzijde van de sluisdeur. De waarde van de afvoercoëfficiënt voor de opening met 3 breekbalken aan de binnenzijde van de sluisdeur is hoger dan deze voor de opening zonder breekbalken, maar lager dan deze voor de opening met 3 breekbalken aan de buitenzijde van de deur. Om die reden is deze niet vermeld in Tabel 7 en in deze studie ook verder niet meer beschouwd.

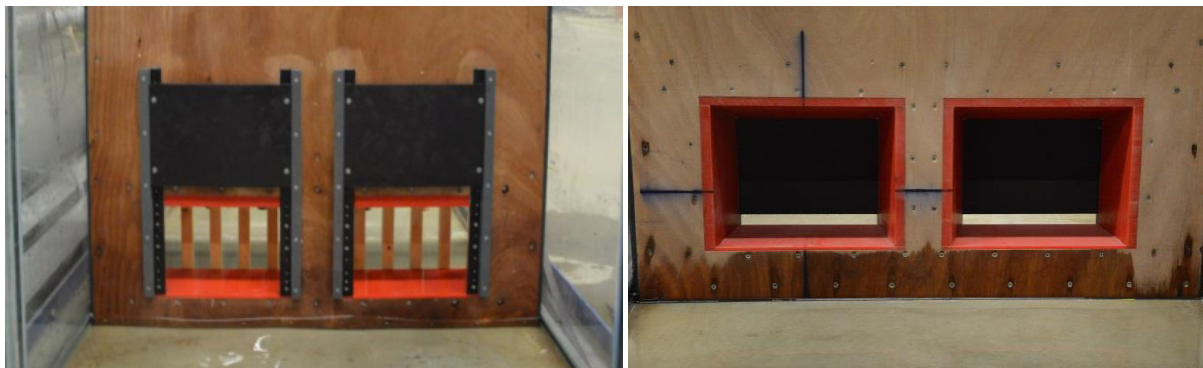
Tabel 7 – Waarden afvoercoëfficiënt voor cirkelvormige opening uit Ramos *et al.* (2016)

Relatieve hefhoogte hefschuif [-]	Afvoercoëfficiënt opening [-]	
	Zonder breekbalken	3 breekbalken aan buitenzijde
0.150	0.915	0.861
0.275	0.763	0.766
0.400	0.715	0.712
0.525	0.689	0.697
0.650	0.675	0.691
0.775	0.673	0.695
0.900	0.666	0.697
1.000	0.659	0.699

Bij de waarden voor de afvoercoëfficiënt uit Tabel 7 wordt het volgende opgemerkt:

- Bij aanwezigheid van breekbalken worden beperkt hogere waarden voor de afvoercoëfficiënt opgemeten dan bij afwezigheid van breekbalken. Dit is een eerder tegen-intuïtief resultaat.
- Tijdens het schaalmodelonderzoek werd ook de waarde van de afvoercoëfficiënt bij volledig geopende opening bepaald voor volgende alternatieve configuraties breekbalken:
 - 3 breekbalken geplaatst aan de binnenzijde van de deur: $\mu = 0.68$.
 - 3 breekbalken geplaatst aan de buitenzijde van de deur, waarbij de tussenafstand tussen de breekbalken verkleind is: $\mu = 0.66$.
 - 4 breekbalken geplaatst aan de buitenzijde van de deur: $\mu = 0.68$.
 - 5 breekbalken geplaatst aan de buitenzijde van de deur: $\mu = 0.63$.

Daarnaast worden in Van der Ven (2015) resultaten beschreven van schaalmodelonderzoek en CFD-modellering voor een stroming door één of twee rechthoekige openingen in een sluisdeur. Deze rechthoekige openingen met (in schaalmodelafmetingen) een breedte van 0.25 m en een hoogte van 0.20 m verwijden naar afwaarts toe tot een breedte van 0.31 m en een hoogte van 0.25 m (Figuur 6).



Figuur 6 – Rechthoekige opening met breekbalken uit Van der Ven (2015)
links: aanzicht van afwaarts; rechts: zicht van opwaarts (zonder breekbalken)

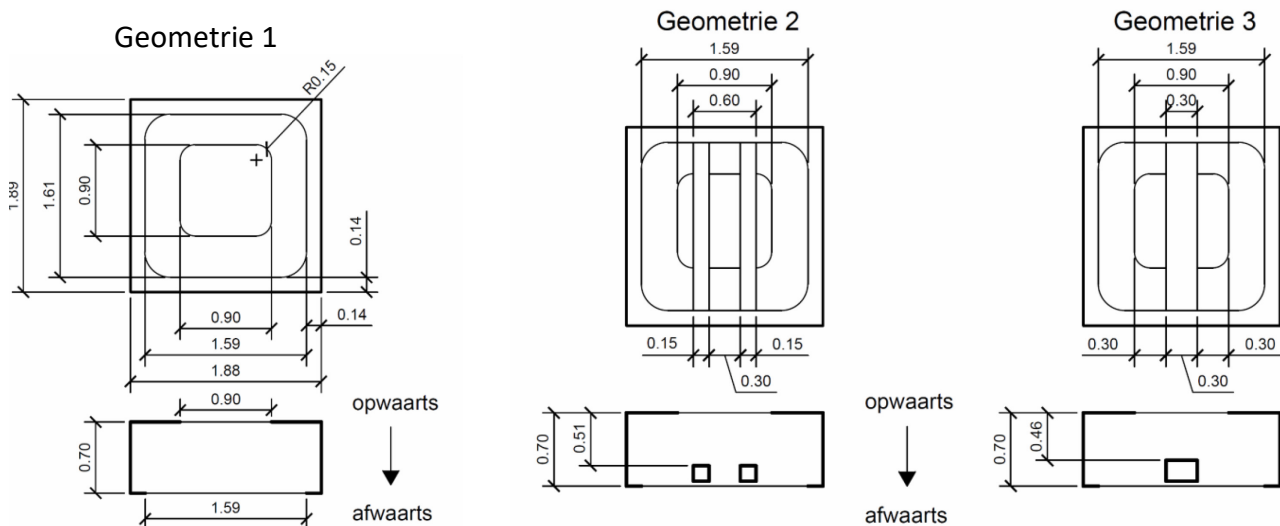
Voor deze configuraties openingen in de deur is in Van der Ven (2015) de afvoercoëfficiënt bepaald enerzijds voor de configuratie zonder breekbalken en anderzijds voor een configuratie met 4 breekbalken aan de buitenzijde van de sluisdeur. De waarden van de afvoercoëfficiënt voor de rechthoekige openingen uit deze proeven zijn gegeven in Tabel 8. Bij deze waarden wordt opgemerkt dat voor openingen met breekbalken een lagere waarde van de afvoercoëfficiënt berekend wordt dan bij openingen zonder breekbalken. Echter bij openingen zonder breekbalken doet zich een eigenaardige stijging van de afvoercoëfficiënt voor tussen de relatieve hefhoogtes van de hefschuif 0.50 en 1.00. Deze stijging wordt in Van der Ven (2015) verklaard door de afwezigheid van loslating aan de tip van de schuif bij volledig geopende schuiven.

Tabel 8 – Waarden afvoercoëfficiënt uit Van der Ven (2015)

Relatieve hefhoogte hefschuif [-]	Afvoercoëfficiënt opening [-]	
	Zonder breekbalken	Met 4 breekbalken
0.100	0.783	0.773
0.250	0.702	0.692
0.500	0.689	0.673
1.000	0.740	0.667

Ter vergelijking: door WL werden in 2011 waterpeilmetingen uitgevoerd op verschillende locaties in de sluis van Evergem. De sluis van Evergem wordt genivelleerd met cirkelvormige openingen in de sluisdeur afgesloten door hefschuiven en aanwezigheid van breekbalken. Op basis van deze meetgegevens werd voor het nivelleersysteem van de sluis van Evergem een afvoercoëfficiënt berekend bij volledig geopende schuiven die gelijk is aan 0.72 (met een standaardafwijking van 0.05 berekend over de verschillende nivelleringen). Deze opgemeten waarde is beperkt hoger dan de waarde voor de afvoercoëfficiënt met breekbalken uit Ramos *et al.* (2016) en Van der Ven (2015).

In het schaalmodel voor het onderzoeksproject over breekbalken zijn in 2018 proeven uitgevoerd met de nivelleeropening van de nieuwe sluis te Denderbelle. Deze proeven zijn gerapporteerd in Vercruysse *et al.*, (2018) en zijn uitgevoerd voor één geometrie zonder breekbalken, één geometrie met 2 breekbalken met breedte 0.15 m geplaatst aan de binnenzijde van de opening en één geometrie met 1 centrale breekbalk met breedte 0.30 m aan de binnenzijde van de opening. Figuur 7 geeft een voorstelling van deze 3 geometrieën.



Figuur 7 – Geometrieën breekbalken

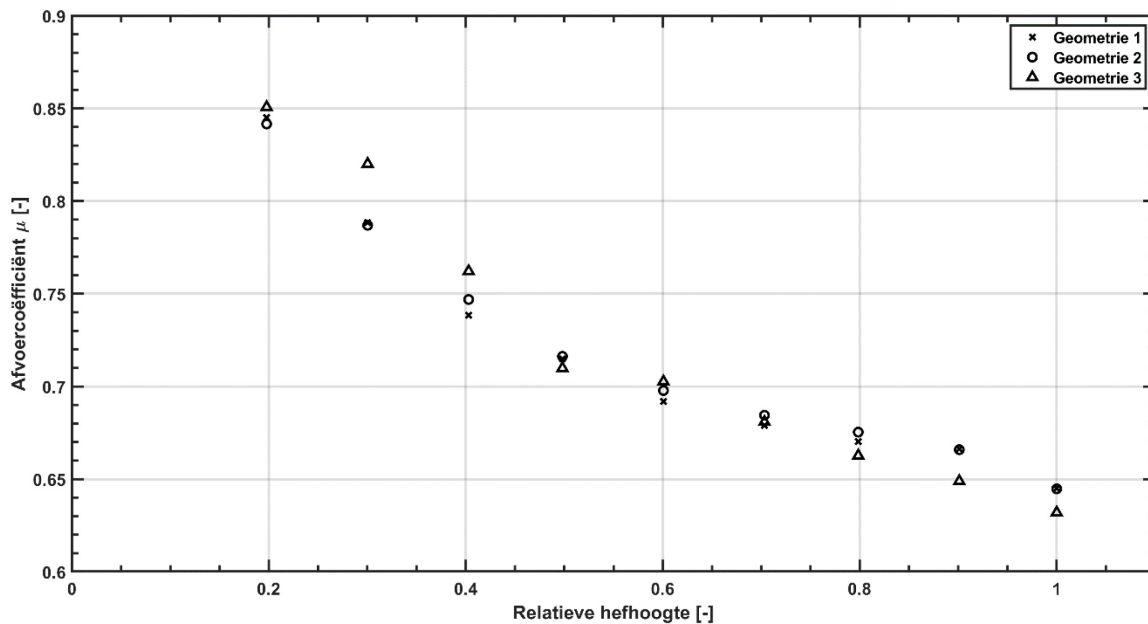
Geometrie 1 : geen breekbalken; Geometrie 2: 2 breekbalken met breedte 0.15 m;
Geometrie 3: 1 centrale breekbalk met breedte 0.30 m

Tabel 9 geeft in tabelvorm de waarde van de afvoercoëfficiënt die voor deze 3 geometrieën is opgemeten in het schaalmodel. Deze waarden zijn grafisch voorgesteld in Figuur 8. Voor de finale simulaties met het geselecteerde nivelleersysteem in hoofdstuk 8 van dit rapport zullen de waarden van de afvoercoëfficiënt voor de geometrie zonder breekbalken (Geometrie 1) en deze voor de geometrie met twee breekbalken (Geometrie 2) uit de schaalmodelproeven beschouwd worden.

Uit Tabel 9 en Figuur 8 volgt dat de afvoercoëfficiënt voor de opening van de nieuwe sluis te Denderbelle zonder breekbalken weinig verschilt van deze voor de geometrie met twee breekbalken. Voor de geometrie met één centrale breekbalk wordt voor een relatieve hefhoogte van de hefschuif van 0.8 en hoger een beperkt lagere waarde van de afvoercoëfficiënt opgemeten dan voor de overige geometrieën. Ook wordt bij een relatieve hefhoogte van 0.2 en 0.4 een beperkt hogere waarde van de afvoercoëfficiënt opgemeten dan bij de overige geometrieën.

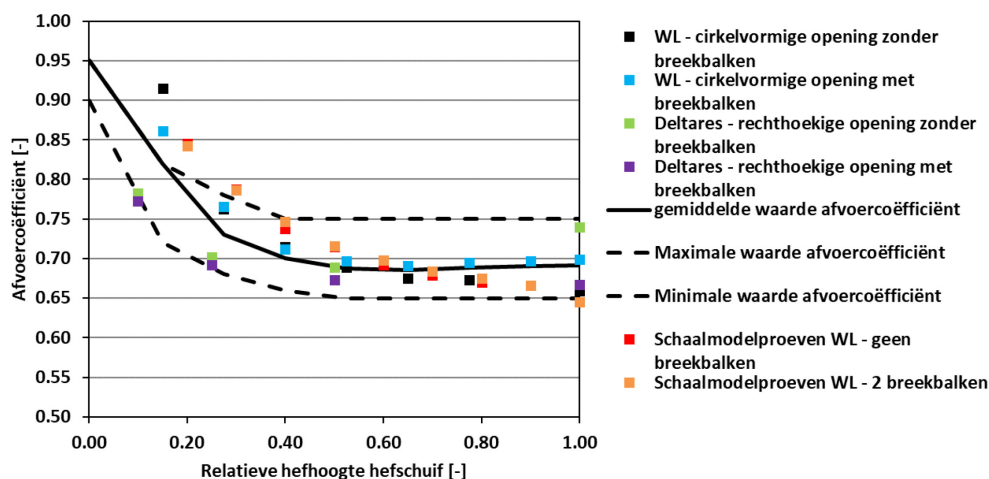
Tabel 9 – Afvoercoëfficiënt nivelleeropening Denderbelle uit schaalmodelonderzoek Vercruysse *et al.*, (2018)

Relatieve Hefhoogte [-]	Afvoercoëfficiënt μ [-]		
	Geometrie 1	Geometrie 2	Geometrie 3
0.20	0.845	0.842	0.851
0.30	0.788	0.787	0.820
0.40	0.738	0.747	0.762
0.50	0.715	0.716	0.710
0.60	0.692	0.698	0.703
0.70	0.679	0.684	0.681
0.80	0.670	0.675	0.663
0.90	0.666	0.666	0.649
1.00	0.645	0.645	0.632



Figuur 8 – Afvoercoëfficiënt niveleeropening Denderbelle uit schaalmodelonderzoek Vercruysse *et al.*, (2018)

De gegevens uit Tabel 7, Tabel 8 en Tabel 9 zijn nog eens grafisch voorgesteld in Figuur 9.



Figuur 9 – Afvoercoëfficiënt voor openingen afgesloten met een hefschuif.

In Figuur 9 is ook de gemiddelde waarde, de maximale en de minimale waarde voorgesteld, die in hoofdstuk 5, hoofdstuk 6 en hoofdstuk 7 zijn toegepast. Bij het uitvoeren van de simulaties in deze hoofdstukken was nog geen waarde van de afvoercoëfficiënt voor rechthoekige openingen uit de schaalmodelmetingen beschikbaar. Zoals reeds vermeld in paragraaf 4.2.1 wordt in hoofdstuk 5 een gemiddelde waarde van de afvoercoëfficiënt toegepast, aangezien de verschillen in totale oppervlakte van de drie verschillende beschouwde openingen bij volledig geopende kleppen of schuiven groter is dan eventuele verschillen in de afvoercoëfficiënt van de verschillende types openingen. In hoofdstuk 6 en hoofdstuk 7 worden simulaties uitgevoerd met het geselecteerde niveleersysteem met rechthoekige openingen in de deur. Voor deze simulaties wordt een maximale waarde van de afvoercoëfficiënt toegepast, omdat deze maximale waarde aanleiding geeft tot hogere debieten door de opening en bijgevolg tot grotere krachten op de schepen in de kolk. Om nog te voldoen aan het beschouwde criterium voor de langskrachten

op het schip wordt bijgevolg de openingswet vertraagd. Het toepassen van de maximale waarde van de afvoercoëfficiënt geeft daarom aanleiding tot de traagste openingswet van de hefschuiven. De finale simulaties met het nivelleersysteem in hoofdstuk 8 worden uitgevoerd met de in het schaalmodel opgemeten waarden voor de afvoercoëfficiënt van de rechthoekige openingen.

De gemiddelde waarde van de afvoercoëfficiënt is berekend als het gemiddelde van de waarden uit Tabel 7 en Tabel 8. Hiervoor zijn de waarden van de afvoercoëfficiënt uit Van der Ven (2015) geïnterpoleerd bij de relatieve hefhoogtes waarvoor de afvoercoëfficiënt van WL bepaald is. Voor de bepaling van de minimale en de maximale waarden wordt $\mu = 0.65$, respectievelijk $\mu = 0.75$ beschouwd als minimale, respectievelijk maximale waarden bij volledig geopende hefschuiven. Deze waarden komen ook overeen met de waarden die in de literatuur algemeen beschouwd worden als onder- en bovengrens voor de afvoercoëfficiënt voor openingen afgesloten met hefschuiven. Voor relatieve hefhoogtes hoger dan 0.5 wordt de afvoercoëfficiënt gelijk gesteld aan de minimale, respectievelijk en maximale waarde bij volledig geopende hefschuiven. Voor relatieve hefhoogtes lager dan 0.15 wordt de maximale waarde gelijk beschouwd aan de gemiddelde waarde en wordt (visueel bepaald) een vloeiende overgang voorzien tussen deze waarden en de constante waarde. De maximale waarde is dezelfde als deze beschouwd bij het ontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve (Vercruysse *et al.*, 2016a). Voor de minimale waarde wordt op een analoge wijze ervoor gezorgd dat deze de lagere waarden opgemeten door Deltares omvat en dat een vloeiende overgang bestaat tussen deze waarden en de constante waarde bij relatieve hefhoogtes groter dan 0.5. In Tabel 10 zijn de getalwaarden voor de gemiddelde waarde, de minimale en de maximale waarde van de afvoercoëfficiënt gegeven. De in het schaalmodel opgemeten waarden voor de afvoercoëfficiënt zijn voor relatieve hefhoogtes lager dan 0.4 iets hoger dan de toegepaste maximale waarde. Voor relatieve hefhoogtes hoger dan 0.4 varieert de in het schaalmodel opgemeten waarde van de afvoercoëfficiënt tussen de initieel bepaalde maximale waarde van de afvoercoëfficiënt (bij een relatieve hefhoogte 0.4) en de initieel bepaalde minimale waarde van de afvoercoëfficiënt (bij een relatieve hefhoogte 1.0).

Tabel 10 – Gemiddelde waarden minimale en maximale waarde van de afvoercoëfficiënt voor een opening afgesloten met een hefschuif

Relatieve hefhoogte hefschuif [-]	Afvoercoëfficiënt μ [-]		
	Minimale waarde	Gemiddelde waarde	Maximale waarde
0.000	0.900	0.950	0.950
0.150	0.720	0.820	0.820
0.275	0.680	0.730	0.780
0.400	0.660	0.700	0.750
0.525	0.650	0.688	0.750
0.650	0.650	0.685	0.750
0.775	0.650	0.689	0.750
0.900	0.650	0.690	0.750
1.000	0.650	0.691	0.750

4.3 Invloed breekbalken

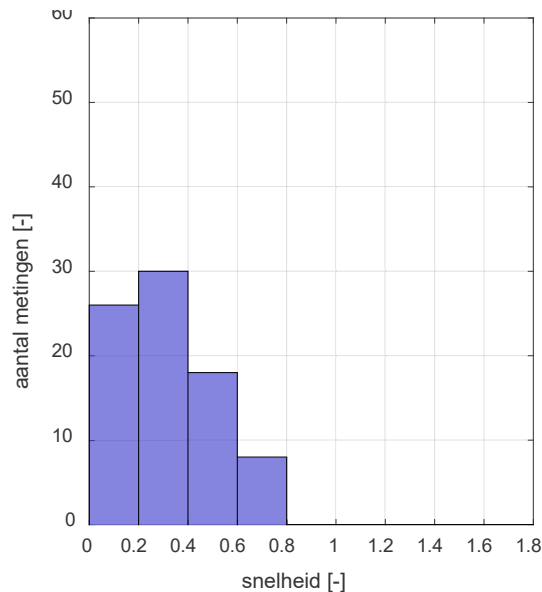
Breekbalken hebben als doel te zorgen voor energiedissipatie van de straal uit de openingen. Hierdoor verlagen, in theorie, de krachten op schepen in de kolk waardoor de nivelleeropeningen sneller geopend kunnen worden. Hoe de spreiding van de vulstralen verloopt is afhankelijk van de geometrie van de breekbalken en de positie ten opzichte van de inlaatopening. Anderzijds kunnen breekbalken ook de afvoercoëfficiënt van de opening beïnvloeden. Uit de in paragraaf 4.2.3 uitgevoerde analyse van de afvoercoëfficiënt volgt dat in het geval van Denderbelle de beproefde geometrie met 2 breekbalken geen invloed heeft op de afvoercoëfficiënt en dat de beproefde geometrie met 1 centrale breekbalken een zeer beperkte invloed heeft op de afvoercoëfficiënt.

De initiële simulaties uit hoofdstuk 5 worden uitgevoerd met een gemiddelde waarde voor de afvoercoëfficiënt. Bij deze werkwijze wordt de invloed van breekbalken op de afvoercoëfficiënt niet in rekening gebracht. Zoals vermeld in paragraaf 4.2.3 worden de simulaties uit hoofdstuk 6 en hoofdstuk 7 uitgevoerd met de maximale waarde van de afvoercoëfficiënt. In hoofdstuk 6 worden als gevoeligheidsanalyse ook simulaties uitgevoerd met de minimale waarde voor de afvoercoëfficiënt. Het verschil tussen de minimale en de maximale waarde van de afvoercoëfficiënt is groter dan de invloed van breekbalken op de afvoercoëfficiënt. Om die reden wordt verondersteld dat de invloed van breekbalken reeds omvat zit in de waarde van de afvoercoëfficiënt en wordt voor de simulaties met breekbalken in deze hoofdstukken eenzelfde waarde voor de afvoercoëfficiënt toegepast als voor simulaties zonder breekbalken. Voor de simulaties in hoofdstuk 8 worden de in het schaalmodel (zowel voor de configuratie met als voor de configuratie zonder breekbalken) opgemeten waarde van de afvoercoëfficiënt toegepast.

Naast de invloed op de afvoercoëfficiënt zorgen breekbalken ook voor een spreiding van de straal uit de openingen. Zowel in VUL_SLUIS als in LOCKFILL dient hiervoor de oppervlakte van de straal na de breekbalken opgegeven te worden en het peil van de bovenzijde van de breekbalken. De waarde van deze beide parameters is zowel in VUL_SLUIS als in LOCKFILL constant gedurende de nivellering. Hierbij wordt opgemerkt dat dit in werkelijkheid niet het geval is. Voor de simulaties in dit rapport wordt bij afwezigheid breekbalken verondersteld dat de vulstraal 100 % van de inlaatopening bedraagt. In geval van breekbalken worden zowel simulaties uitgevoerd met een spreiding van de vulstraal na breekbalken met 120 % als simulaties met een spreiding met 140 %. Hierbij wordt enkel een spreiding van de straal in de hoogte en niet in de breedte toegepast.

Bij het begin van de studie is door EBS een voorontwerp gemaakt van de openingen in de deuren. Hierbij werd de onderzijde van de openingen voor openingen afgesloten met vlinderkleppen op +0.30 mTAW beschouwd en op +0.15 mTAW voor (rechthoekige of cirkelvormige) openingen afgesloten met hefschuiven. Deze waarden zijn beschouwd om het peil van de bovenzijde van de straal na breekbalken te bepalen (rekening houdend met de spreiding van de straal in de hoogte) voor de simulaties uit hoofdstuk 5, hoofdstuk 6. Bij uitvoering van het detailontwerp van de puntdeuren is de onderzijde van de (geselecteerde) rechthoekige openingen in de deuren later verlaagd naar +0.10 mTAW. Deze laatste waarde is beschouwd voor het bepalen van het peil van de bovenzijde van de straal na breekbalken voor de simulaties uit hoofdstuk 7 en hoofdstuk 8 van dit rapport.

Bij de simulaties met breekbalken in hoofdstuk 7 en hoofdstuk 8 van dit rapport is enkel een spreiding van de straal na breekbalken van 140 % beschouwd. Deze spreiding van de straal na breekbalken is, analoog als bij het ontwerp van het nivelleersysteem voor de sluis te Sint-Baafs-Vijve (Vercruysse *et al.*, 2014), bepaald op basis van de verdeling van de in het schaalmodel opgemeten snelheden op een afstand 1.3 m verwijderd van de opening in de deur (Figuur 10) bij volledig geopende schuiven. Uit Figuur 10 uit Vercruysse *et al.*, (2018) volgt dat op 1.3 m van de opening een maximale stroomsnelheid van 0.6 à 0.7 maal de sectiegemiddelde stroomsnelheid (= debiet gedeeld door oppervlakte van de opening) wordt opgemeten. Een stroomsnelheid van 0.7 maal de sectiegemiddelde stroomsnelheid komt overeen met een toename van de natte sectie met 140 % in vergelijking met de oppervlakte van de opening in de deur zelf.



Figuur 10 – Verdeling opgemeten stroomsnelheden op 1.3 m verwijderd van de opening in de deur (Vercruysse *et al.*, 2018)

Tabel 11 geeft een overzicht van de waarden die voor de oppervlakte van de straal na breekbalken en het peil van de bovenzijde van de straal na breekbalken zijn toegepast bij het uitvoeren van de simulaties in dit rapport. Bij deze tabel wordt nog opgemerkt dat bij cirkelvormige openingen afgesloten door vlinderkleppen de breekbalken het best horizontaal aangebracht zouden worden, aangezien de as van de vlinderklep reeds verticaal geplaatst is. Bij het horizontaal plaatsen van breekbalken ontstaat echter aan het oppervlak een meer turbulente stroming dan bij een verticale plaatsing. Dit is echter nadelig, waardoor bij het uitvoeren van de simulaties met cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen geen breekbalken toegepast zullen worden.

Tabel 11 – Toegepaste waarden voor oppervlakte straal na breekbalken en peil bovenzijde straal na breekbalken

Type nivelleersysteem	Afmetingen	Totale Doorstroomsectie	Simulaties uit hoofdstuk	Breekbalken	Oppervlakte straal na breekbalken	Peil bovenzijde straal na breekbalken
Cirkelvormige opening met vlinderkleppen	8 x Ø 0.60 m	2.26 m ²	5	N	2.26 m ²	+ 0.90 mTAW
Cirkelvormige opening met hefschuif	6 x Ø 0.90 m	3.82 m ²	5	N	3.82 m ²	+ 1.05 mTAW
				J (spreiding 120 %)	4.58 m ²	+ 1.23 mTAW
				J (spreiding 140 %)	5.40 m ²	+ 1.35 mTAW
Rechthoekige opening met hefschuif	6 x 0.90 m x 0.90 m	4.86 m ²	5,6	N	4.86 m ²	+ 1.05 mTAW
			7,8		4.86 m ²	+ 1.00 mTAW
			5,6	J (spreiding 120 %)	5.83 m ²	+ 1.23 mTAW
			5,6	J (spreiding 140 %)	6.48 m ² (*)	+ 1.35 mTAW(*)
			7,8		6.80 m ²	+ 1.36 mTAW

* = Deze afmetingen zijn benaderend bepaald. Hierbij is de hoogte van straal na breekbalken naar beneden afgerond naar 1.20 m. Dit is een spreiding van de straal gelijk aan 133 %.

4.4 Resultaten simulaties

Bij de resultaten uit dit rapport wordt algemeen het volgende opgemerkt:

- Aan elke uitgevoerde simulaties wordt de volgende unieke naamgeving toegekend:

AA_BBd_EE

Hierin is:

- AA Aanduiding van de kolk die beschouwd wordt
VK voor volledige kolk, OPW voor opwaartse deelkolk en AFW voor afwaartse deelkolk.
 - BB Aanduiding van het type afsluitmiddel
'VK' voor vlinderkleppen en 'HS' voor hefschuiven.
 - d Aanduiding voor de vorm van de openingen:
'c' voor cirkelvormig en 'r' voor rechthoekig
 - EE Volgnummer van de simulatie.
- Bij puntdeuren is het soms gebruikelijk om de deuren reeds te openen bij een restverval van 0.10 m. Door de opdrachtgever is gesteld dat de deuren niet geopend mogen worden onder een restverval. Om die reden wordt in dit rapport enkel de nivelleertijd bij een restverval van 0.00 m beschouwd.
 - In dit rapport wordt volgende tekenconventie voor de langskracht gehanteerd:
 - Een positieve langskracht betekent dat het schip in de sluis kolk een kracht ondervindt die weggericht is van de voor nivelleren gebruikte deur.
 - Een negatieve langskracht op het schip is naar de voor nivelleren gebruikte deur toe gericht.

5 Resultaten initiële simulaties drie types nivelleersystemen

5.1 Algemeen

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de initiële simulaties met de drie mogelijke types nivelleersystemen. Tabel 12 geeft een overzicht van de afmetingen van deze nivelleersystemen.

Tabel 12 – Verschillende types nivelleersystemen voor hydraulische simulaties

Nivelleersysteem	Opening opwaarts	Opening afwaarts	Peil onderzijde openingen
Cirkelvormige openingen met vlinderkleppen	8 x Ø 0.60 m	8 x 0.60 m	+ 0.30 m TAW
Cirkelvormige openingen met hefschuiven	6 x Ø 0.90 m	6 x 1.50 m x 1.50 m	+ 0.15 m TAW
Rechthoekige openingen met hefschuiven	6 x 0.90 m x 0.90 m	6 x 1.50 m x 1.50 m	+ 0.15 m TAW

De simulaties in dit hoofdstuk worden gebruikt om een keuze te maken tussen de drie verschillende types nivelleersystemen. Om die reden worden in dit hoofdstuk enkel simulaties voor nivelleren van de volledige kolk met het schip CEMT klasse IV in de kolk uitgevoerd. Deze combinatie wordt als maatgevend beschouwd. Algemeen geldt bij een ontwerp van een nivelleersysteem met openingen in de deuren dat ledigen van een sluis kolk minder bepalend is voor de optredende langskrachten dan vullen. Bij ledigen vindt de energiedissipatie van de stralen uit de nivelleeropeningen plaats in het afwaarts pand en is er geen directe invloed van de straal uit de opening op het schip. Bijgevolg worden voornamelijk simulaties uitgevoerd voor vullen van de volledige sluis kolk. Om na te gaan of bij ledigen eventueel sneller genivelleerd kan worden dan bij vullen, worden ook enkele simulaties uitgevoerd voor ledigen van de volledige kolk met het schip CEMT klasse IV in de kolk. Tenzij anders vermeld, wordt voor alle simulaties een afstand tussen boeg van het schip en de voor nivelleren gebruikte sluisdeur beschouwd dewelke gelijk is aan de stopstreepafstand van 5.0 m.

Alle simulaties in dit hoofdstuk zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL 5.03.00.

Voor elke simulatie uit dit hoofdstuk is de openingswet van de schuiven zo bepaald, dat de met VUL_SLUIS en met LOCKFILL berekende langskracht op het schip het in hoofdstuk 3 gegeven criterium voor de langskracht niet overschrijdt. Hierbij wordt telkens de (in absolute waarde) maximale waarde van de met beide versies van het programma VUL_SLUIS en met LOCKFILL berekende langskracht op het schip vergeleken met het criterium. In dit stadium van het ontwerp is geen exacte overeenkomst met het criterium nagestreefd. Een overschrijding van het criterium tot 0.10 % is hierbij nog als aanvaardbaar beschouwd.

Bij openingen afgesloten met hefschuiven worden in dit hoofdstuk openingswetten berekend, dewelke bestaan uit een combinatie van periodes met hogere hefsnelheden en periodes met lagere hefsnelheden. De openingssnelheden van de hefschuiven voor de verschillende opeenvolgende periodes (binnen eenzelfde openingswet) zijn hierbij zo bepaald dat de maximale waarde van de openingssnelheid niet meer dan een factor drie verschilt van de minimale waarde van de openingssnelheid.

De resultaten van de simulaties met het nivelleersysteem met cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen zijn beschreven in paragraaf 5.2, de resultaten van de simulaties met het nivelleersysteem

met cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven in paragraaf 5.3 en de resultaten van de simulaties met rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven in paragraaf 5.4. Paragraaf 5.5 vat de resultaten van deze simulaties nog eens samen.

In Nederland wordt bij hefschuiven meestal een minimale hefsnelheid van 0.003 m/s toegepast om stick-slip te voorkomen. Het optreden van stick-slip is echter afhankelijk van het type vijzel dat voor het openen van de schuiven wordt toegepast en van het type glijstrips. Bij het uitvoeren van de simulaties in dit hoofdstuk was nog niet duidelijk of stick-slip mogelijks een probleem zou kunnen zijn. Om die reden is in paragraaf 5.3 en paragraaf 5.4 telkens getracht om de openingswet van de hefschuiven aan te passen zodat de minimale openingssnelheid 0.003 m/s bedraagt. Later is uit overleg met EBS gebleken dat afhankelijk van het beschouwde type glijstrip tussen hefschuif en deur en het beschouwde bewegingsmechanisme stick-slip niet echt een probleem is, waardoor de voorwaarde van een minimale hefsnelheid van 0.003 m/s eigenlijk niet van toepassing is. Voor de simulaties met het geselecteerde nivelleersysteem in hoofdstuk 6 wordt deze voorwaarde niet meer toegepast.

5.2 Cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen

Met het nivelleersysteem met 8 cirkelvormige openingen diameter 0.60 m afgesloten met vlinderkleppen is vooreerst simulatie VK_VKc_01 uitgevoerd. Voor deze simulatie wordt een nivelleertijd van 11.6 min berekend. Aangezien dit hoger is dan de toegelaten waarde van 10.0 min, zijn daarna simulaties VK_VKc_02 en VK_VKc_03 uitgevoerd om na te gaan op welke wijze een lagere nivelleertijd bekomen kan worden. Bij simulatie VK_VKc_02 zijn de openingen lager geplaatst met een peil van de onderzijde van de openingen gelijk aan het peil van de bovenzijde van de drempel (- 0.28 m TAW). Door het lager plaatsen van de opening in de deur komt de vulstraal op een lagere hoogte de kolk binnen, wat mogelijk een lagere kracht op het schip tot gevolg heeft. Bij simulatie VK_VKc_03 wordt een afstand tussen boeg van het schip en de sluisdeur van 10.0 m beschouwd in plaats van 5.0 m bij de overige simulaties. De grotere afstand tussen schip en sluisdeur zorgt voor een grotere uitspreiding van de jet in hoogte. Hierdoor worden lagere stroomsnelheden in de jet bekomen en worden mogelijk lagere krachten op het schip in de kolk berekend.

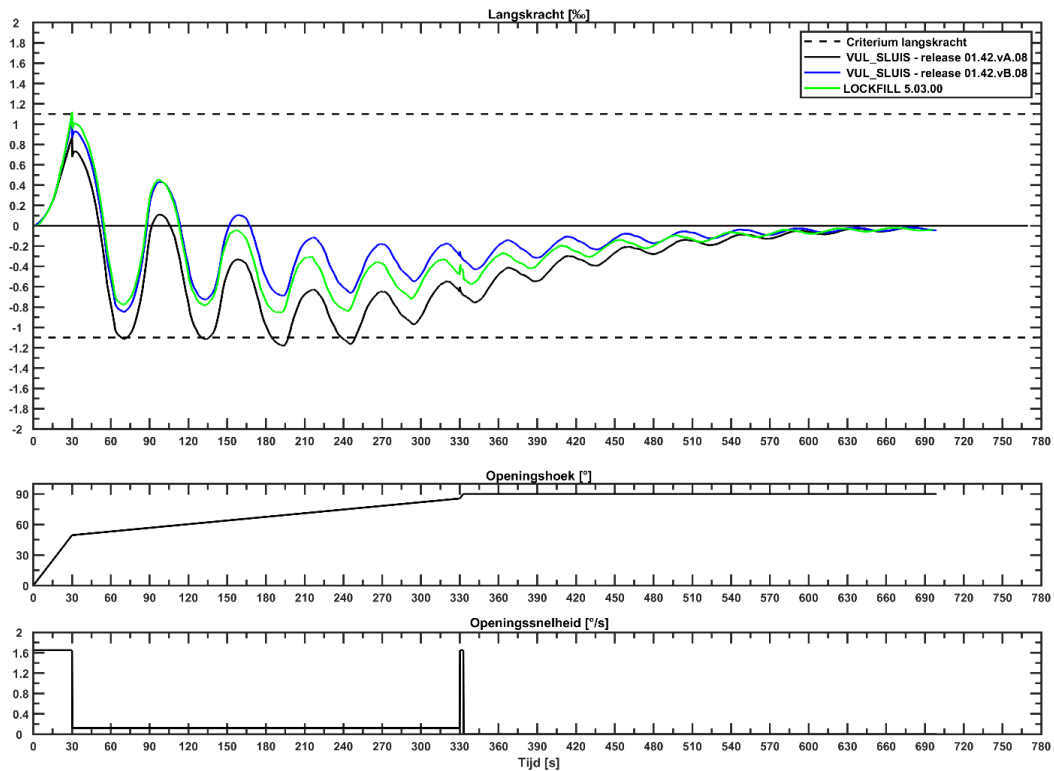
Simulatie VK_VKc_04 betreft ledigen van de sluiskolk. Deze simulatie is uitgevoerd om na te gaan of bij ledigen sneller genivelleerd kan worden dan bij vullen van de sluiskolk.

Tabel 43 in Bijlage 1 geeft een meer gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties. In Tabel 13 is een overzicht gegeven van de nivelleertijd en de extreme waarde van de stijgsnelheid. Aangezien telkens juist voldaan is aan het criterium voor de langskracht (zie Figuur 11 voor simulatie VK_VKc_01), wordt de berekende langskracht niet vermeld in Tabel 13. Een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de langskracht op het schip voor simulaties VK_VKc_01 en VK_VKc_04 is gegeven in Figuur 18 in Bijlage 2.

Tabel 13 – Nivelleertijd en extreme waarden stijgsnelheid voor simulaties nivelleersysteem met cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen.

Type	Naam	Afmetingen	Openingssnelheid vlinderkleppen	Breek- balken	Onderzijde opening	Afstand schip sluisdeur	Nivelleer- tijd	Extreme waarde stijgsnelheid
Vullen	VK_VKc_01	8 x Ø 0.60 m	0.0 s < t < 30.0 s : 1.650 °/s 30.1 s < t < 330.0 s : 0.120 °/s t > 330.1 s : 1.650 °/s	N	+0.30 mTAW	5 m	11.6 min	0.005 m/s
	VK_VKc_02	8 x Ø 0.60 m	0.0 s < t < 30.0 s : 1.640 °/s 30.1 s < t < 330.0 s : 0.100 °/s t > 330.1 s : 1.640 °/s	N	-0.28 mTAW	5 m	11.9 min	0.006 m/s
	VK_VKc_03	8 x Ø 0.60 m	0.0 s < t < 30.0 s : 1.670 °/s t > 30.1 s : 0.400 °/s	N	+0.30 mTAW	10 m	10.8 min	0.007 m/s
Ledigen	VK_VKc_04	8 x Ø 0.60 m	t > 0.0 s : 2.100 °/s	N	+0.30 mTAW	5 m	10.4 min	-0.008 m/s

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium



Figuur 11 – Variatie in de tijd van de langskracht op het schip; de openingshoek en de openingssnelheid van de vlinderkleppen voor simulatie VK_VKc_01.

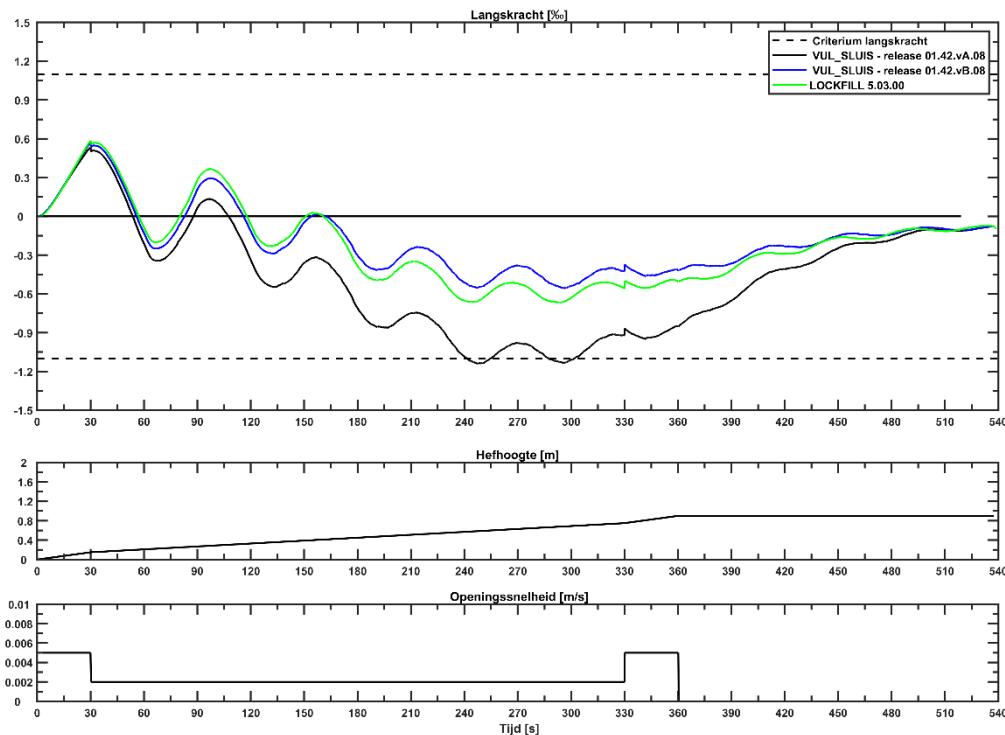
Op basis van Tabel 13 wordt het volgende vastgesteld:

- Zowel voor vullen als voor ledigen wordt een nivelleertijd hoger dan 10.0 min berekend. Bij ledigen is de nivelleertijd (10.4 min) 1.2 min lager dan bij vullen van de sluiscolk (11.6 min).
- Het lager plaatsen van de openingen zorgt niet voor een reductie van de nivelleertijd.
- Bij het vergroten van de afstand tussen het schip en de sluisdeur tot 10 m wordt een verlaging van de nivelleertijd met 0.8 min (tot 10.8 min) bekomen.
- Alle simulaties voldoen aan het criterium voor de maximale waarde voor de stijgsnelheid van 0.017 m/s voor beroepsvaart en ook aan het strengere criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart.

Met betrekking tot de openingswet wordt bij simulaties VK_VKc_01 en VK_VKc_02 opgemerkt dat na $t = 300$ s een snellere opening van de vlinderkleppen wordt beschouwd. Uit Figuur 11 en Tabel 43 in Bijlage 1 volgt dat voor simulatie VK_VKc_01 de vlinderkleppen volledig geopend zijn ca. 2.7 s na het begin van dit gedeelte met een grotere openingssnelheid. Deze korte periode met een hogere openingssnelheid heeft een verwaarloosbare invloed op de nivelleertijd en de langskrachten op het schip en kan bijgevolg weggelaten worden.

5.3 Resultaten simulaties cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven

Met het nivelleersysteem met 6 cirkelvormige openingen diameter 0.90 m afgesloten met hefschuiven is vooreerst simulatie VK_HSc_01 zonder breekbalken uitgevoerd. Voor deze simulatie geeft Figuur 12 een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de langskracht op het schip, de hefhoogte en de openingssnelheid van de hefschuiven. De nivelleertijd voor deze simulatie bedraagt 9.0 min berekend, wat lager is dan de toegelaten waarde van 10.0 min.



Figuur 12 – Variatie in de tijd van de langskracht op het schip, de hefhoogte en de openingssnelheid van de hefschuiven voor simulatie VK_HSc_01

De hefsnelheid van de tweede fase van de openingswet bedraagt echter 0.002 m/s. Zoals vermeld in paragraaf 5.1 werd initieel een minimale waarde van de hefsnelheid van 0.003 m/s beschouwd ter voorkoming van stick-slip. Daarom zijn volgende varianten gesimuleerd waarbij getracht wordt om de berekende krachten op het schip te verlagen en zo een hefsnelheid van de schuiven te bekomen die hoger is dan 0.003 m/s gedurende de volledige nivellering:

- VK_HSc_02: de diameter van de openingen is verkleind naar 0.70 m.
- VK_HSc_03: aanwezigheid van breekbalken, waarbij 120 % wordt beschouwd voor de spreiding van de straal na de breekbalken. Breekbalken zorgen voor een uitspreiding van de jet in de hoogte, waardoor vermoedelijk lagere krachten op het schip berekend worden.
- VK_HSc_04: aanwezigheid van breekbalken, waarbij 140 % wordt beschouwd voor de spreiding van de straal na de breekbalken.
- VK_HSc_05: Het peil van de onderzijde van de openingen is verlaagd naar - 0.80 m TAW, i.e. gelijk met de bovenzijde van drempel. Bij een lager geplaatste opening treedt de jet uit de opening de sluiscolk binnen op een lagere hoogte, wat lagere krachten op het schip tot gevolg kan hebben (door het kleinere contactoppervlak met de boeg van het schip).

- VK_HSc_06: een openingswet wordt toegepast waarbij het heffen van de schuiven wordt gestopt tussen $t = 60.0$ s en $t = 240.0$ s. Door het stoppen van het heffen van de hefschuiven wordt een lager maximaal debiet door de openingen bekomen, wat leidt tot lagere krachten op het schip in de kolk.
- VK_HSc_07: simulatie met het schip CEMT klasse IV op 10.0 m afstand van de deur. Door de grotere afstand tot de deur, wordt de jet meer uitgespreid in de hoogte. Dit heeft lagere stroomsnelheden in de jet en bijgevolg lagere krachten op het schip tot gevolg.

Simulatie VK_HSc_08 betreft ledigen van de sluis kolk. Deze simulatie is uitgevoerd om na te gaan of bij ledigen sneller genivelleerd kan worden dan bij vullen van de sluis kolk.

Tabel 44 in Bijlage 1 geeft een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties. In Tabel 14 is een overzicht gegeven van de nivelleertijd en de extreme waarde van de stijgsnelheid. Aangezien telkens juist voldaan is aan het criterium voor de langskracht, worden deze waarden niet vermeld in Tabel 14. Een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de langskracht op het schip voor simulaties VK_HSc_01 en VK_HSc_06, respectievelijk simulaties VK_HSc_07 en VK_HSc_08 is gegeven in Figuur 19, respectievelijk Figuur 20 in Bijlage 2.

Tabel 14 – Nivelleertijd en extreme waarde van de stijgsnelheid voor simulaties met het niveleersysteem met cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven.

Type	Naam	Afmetingen	Openingssnelheid hefschuiven	Breek- balken	Onderzijde opening	Afstand schip sluisdeur	Nivelleer- tijd	Extreme waarde stijgsnelheid
Vullen	VK_HSc_01	6 x Ø 0.90 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0050 m/s 30.1 s < t < 330.0 s : 0.0020 m/s t > 330.1 s : 0.0050 m/s	N	+0.15 mTAW	5 m	9.0 min	0.008 m/s
	VK_HSc_02	6 x Ø 0.70 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0060 m/s t > 30.1 s : 0.0020 m/s	N	+0.15 mTAW	5 m	11.9 min	0.006 m/s
	VK_HSc_03	6 x Ø 0.90 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0060 m/s 30.1 s < t < 330.0 s : 0.0020 m/s t > 330.1 s : 0.0060 m/s	J (120 %)	+0.15 mTAW	5 m	8.8 min	0.008 m/s
	VK_HSc_04	6 x Ø 0.90 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0066 m/s t > 30.1 s : 0.0023 m/s	J (140 %)	+0.15 mTAW	5 m	8.4 min	0.008 m/s
	VK_HSc_05	6 x Ø 0.90 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0050 m/s 30.1 s < t < 330.0 s : 0.0020 m/s t > 330.1 s : 0.0050 m/s	N	-0.28 mTAW	5 m	9.0 min	0.008 m/s
	VK_HSc_06	6 x Ø 0.90 m	0.0 s < t < 60.0 s : 0.0070 m/s 60.1 < t < 240.0 s : 0.0000 m/s t > 240.1 s : 0.0030 m/s	N	+0.15 mTAW	5 m	9.0 min	0.007 m/s
	VK_HSc_07	6 x Ø 0.90 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0080 m/s t > 30.1 s : 0.0040 m/s	N	+0.15 mTAW	10 m	7.4 min	0.007 m/s
Ledigen	VK_HSc_08	6 x Ø 0.90 m	t > 0.0 s : 0.0170 m/s	N	+0.15 mTAW	5 m	6.4 min	-0.013 m/s

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

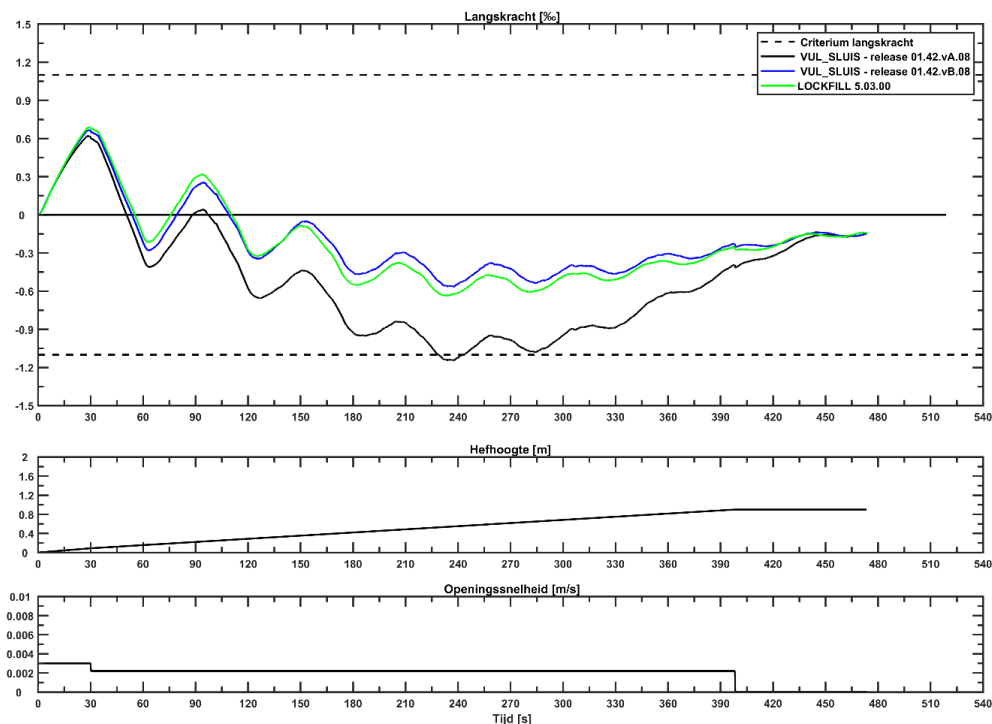
Op basis van Tabel 14 wordt het volgende vastgesteld:

- Met uitzondering van simulatie VK_HSc_02 (openingen met diameter 0.70 m) is de nivelleertijd voor alle simulaties lager dan 10.0 min. De nivelleertijd bij vullen varieert tussen 7.4 min en 9.0 min en is bij ledigen gelijk aan 6.4 min. Voor simulatie VK_HSc_02 wordt een nivelleertijd van 11.9 min berekend.
- Bij toepassen van breekbalken kan een beperkt snellere nivelleertijd bekomen worden. De nivelleertijd daalt van 9.0 min, naar 8.8 min (bij spreiding straal 120 %; simulatie VK_HSc_03) en 8.4 min (bij spreiding straal 140 %; simulatie VK_HSc_04). Deze daling van de nivelleertijd met 0.2 min (12 s) en 0.6 min (48 s) is zeer beperkt.
- Het verlagen van het peil van de onderzijde van de openingen (simulatie VK_HSc_05) heeft geen merkbare invloed op de berekende langskrachten op het schip en bijgevolg op de hefsnelheid van de hefschuiven.
- Met behulp van een openingswet met een stop van 180 s (simulatie VK_HSc_06) wordt met hefsnelheden groter of gelijk aan 0.003 m/s ongeveer eenzelfde nivelleertijd bekomen (9.0 min) als bij simulatie VK_HSc_01.
- Het vergroten van de afstand tussen het schip en de sluisdeur (simulatie VK_HSc_07) zorgt voor een verlaging van de langskracht op het schip, waardoor de hefsnelheid van de schuiven verhoogd kan worden. Dit heeft een daling van de nivelleertijd van 9.0 min naar 7.4 min tot gevolg. Ook bij deze simulatie worden hefsnelheden toegepast die groter zijn of gelijk aan 0.003 m/s.
- Alle simulaties voldoen aan het criterium voor de maximale waarde voor de stijgsnelheid van 0.017 m/s voor beroepsvaart. Het strengere criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart wordt enkel overschreden bij ledigen van de sluiskolk.

De laatste fase van de openingswet voor simulatie VK_HSc_01 betreft opnieuw een snellere opening van de hefschuiven. Ook hier wordt uit Figuur 12 en uit de openingstijden van de schuiven vermeld in Tabel 44 in Bijlage 1 opgemerkt dat deze laatste fase slechts een relatief korte duur heeft (ca. 30.0 s). De invloed van deze snellere opening van de hefschuiven aan het einde van de nivellering op de nivelleertijd is eerder beperkt.

5.4 Resultaten simulaties rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven

Met het nivelleersysteem met 6 rechthoekige openingen 0.90 m x 0.90 m afgesloten met hefschuiven is vooreerst simulatie VK_HSr_01 zonder breekbalken uitgevoerd. Voor deze simulatie wordt een nivelleertijd van 7.9 min berekend, wat lager is dan de toegelaten waarde van 10.0 min. Figuur 13 geeft voor deze simulatie een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de langskracht op het schip, de hefhoogte en de openingssnelheid van de hefschuiven. Uit deze figuur volgt dat de eerste piek van de langskracht op het schip nog beduidend lager is dan het criterium. Aangezien de nivelleertijd van de sluiskolk nog beduidend lager is dan de toegelaten waarde van 10.0 min, stelt zich de vraag of de iets snellere opening van de hefschuiven bij het begin van nivelleren nodig is. Deze snellere opening zorgt slechts voor een beperkt snellere nivellering.



Figuur 13 – Variatie in de tijd van de langskracht op het schip, de hefhoogte en de openingssnelheid van de hefschuiven voor simulatie VK_HSr_01

De hefsnelheid van de hefschuif in de tweede fase van de openingswet bedraagt bij simulatie VK_HSr_01 0.0022 m/s, wat lager is dan 0.003 m/s. Zoals vermeld in paragraaf 5.1 werd initieel een minimale waarde van de hefsnelheid van 0.003 m/s beschouwd ter voorkoming van stick-slip. Daarom zijn volgende variëte simulaties uitgevoerd waarbij getracht wordt om de berekende langskrachten op het schip te verlagen, waardoor een hefsnelheid van de schuiven mogelijk is die hoger is dan 0.003 m/s gedurende de volledige nivellering:

- VK_HSr_02: de hoogte van de openingen is verkleind naar 0.70 m.
- VK_HSr_03: breekbalken zijn aanwezig, waarbij 120 % wordt beschouwd voor de spreiding van de straal na de breekbalken. Breekbalken zorgen voor een uitspreiding van de jet in de hoogte, waardoor vermoedelijk lagere krachten op het schip berekend worden.
- VK_HSr_04: breekbalken zijn aanwezig, waarbij 140 % wordt beschouwd voor de spreiding van de straal na de breekbalken.

- VK_HSr_05: Het peil van de onderzijde van de openingen is verlaagd naar - 0.28 m TAW, i.e. gelijk met de bovenzijde van drempel. Bij een lager geplaatste opening treedt de jet uit de opening de sluiskolk binnen op een lagere hoogte, wat lagere krachten op het schip tot gevolg kan hebben (door het kleinere contactoppervlak met de boeg van het schip).
- VK_HSr_06: een openingswet wordt toegepast waarbij het heffen van de schuiven wordt gestopt tussen $t = 90.0$ s en $t = 210.0$ s. Door het stoppen van het heffen van de hefschuiven wordt een lager maximaal debiet door de openingen bekomen, wat leidt tot lagere krachten op het schip in de kolk.
- VK_HSr_07: simulatie met het schip op 10.0 m afstand van de deur. Door de grotere afstand tot de deur, wordt de jet meer uitgespreid in de hoogte. Dit heeft lagere stroomsnelheden in de jet en bijgevolg lagere krachten op het schip tot gevolg.

Simulatie VK_HSr_08 betreft ledigen van de sluiskolk. Deze simulatie is uitgevoerd om na te gaan of bij ledigen sneller genivelleerd kan worden dan bij vullen van de sluiskolk.

Tabel 45 in Bijlage 1 geeft een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties. In Tabel 15 is voor deze simulaties een overzicht gegeven van de nivelleertijd en de extreme waarde van de stijgsnelheid. Aangezien telkens juist voldaan is aan het criterium voor de langskracht, worden deze waarden niet vermeld in Tabel 15. Een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de langskracht op het schip voor simulaties VK_HSr_01 en VK_HSr_06, respectievelijk simulaties VK_HSr_07 en VK_HSr_08 is gegeven in Figuur 21, respectievelijk Figuur 22 in Bijlage 2.

Tabel 15 – Nivelleertijd en extreme waarden stijgsnelheid voor simulaties nivelleersysteem met rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven

Type	Naam	Afmetingen	Openingssnelheid hefschuiven	Breekbalken	Onderzijde openingen	Afstand schip sluisdeur	Nivelleertijd	Extreme waarde stijgsnelheid
Vullen	VK_HSr_01	6 x 0.9 m x 0.9 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0030 m/s t > 30.1 s : 0.0022 m/s	N	+0.15 mTAW	5 m	7.9 min	0.008 m/s
	VK_HSr_02	6 x 0.9 m x 0.7 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0040 m/s t > 30.1 s : 0.0018 m/s	N	+0.15 mTAW	5 m	8.7 min	0.007 m/s
	VK_HSr_03	6 x 0.9 m x 0.9 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0028 m/s t > 30.1 s : 0.0026 m/s	J (120 %)	+0.15 mTAW	5 m	7.5 min	0.009 m/s
	VK_HSr_04	6 x 0.9 m x 0.9 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0045 m/s t > 30.1 s : 0.0027 m/s	J (140 %)	+0.15 mTAW	5 m	7.1 min	0.009 m/s
	VK_HSr_05	6 x 0.9 m x 0.9 m	0.0 s < t < 30 s : 0.0054 m/s t > 30.1 s : 0.0017 °/s	N	- 0.28 mTAW	5 m	8.1 min	0.007 m/s
	VK_HSr_06	6 x 0.9 m x 0.9 m	0.0 s < t < 90.0 s : 0.0060 m/s 90.1 s < t < 210.0 s : 0.0000 m/s t > 210.1 s : 0.0030 m/s	N	+0.15 mTAW	5 m	7.7 min	0.007 m/s
	VK_HSr_07	6 x 0.9 m x 0.9 m	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0050 m/s t > 30.1 s : 0.0037 m/s	N	+0.15 mTAW	10 m	6.5 min	0.010 m/s
Ledigen	VK_HSr_08	6 x 0.9 m x 0.9 m	t > 0.0 s : 0.0120 m/s	N	+0.15 mTAW	5 m	5.3 min	-0.015 m/s

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Aan de hand van Tabel 15 wordt het volgende vastgesteld:

- Voor alle simulaties wordt een nivelleertijd berekend die lager is dan 10.0 min. De nivelleertijd bij vullen varieert tussen 6.5 min en 8.7 min en is bij ledigen gelijk aan 5.3 min.
- Bij toepassen van breekbalken kan een beperkt snellere nivelleertijd bekomen worden. De nivelleertijd daalt van 7.9 min naar 7.5 min (bij spreiding straal 120 %; simulatie VK_HSr_03) en 7.1 min (bij spreiding straal 140 %; simulatie VK_HSr_04). Deze daling van de nivelleertijd met 0.4 min (24 s), respectievelijk 0.8 min (48 s) is eerder beperkt.
- Het verlagen van het peil van de onderzijde van de openingen (simulatie VK_HSr_05) heeft geen merkbaar effect op de nivelleertijd en de extreme waarde van de stijgsnelheid.
- Met behulp van een openingswet met een stop van 120 s (simulatie VK_HSr_06) wordt dezelfde nivelleertijd berekend, maar met een minimale hefsnelheid gelijk aan 0.003 m/s.
- Het vergroten van de afstand tussen het schip en de sluisdeur (simulatie VK_HSr_07) zorgt voor een verlaging van de langskracht op het schip, waardoor de hefsnelheid van de schuiven verhoogd kan worden. Dit heeft een daling van de nivelleertijd van 7.9 min naar 6.5 min tot gevolg. Ook bij deze simulatie worden hefsnelheden toegepast die juist groter zijn dan 0.003 m/s.
- Alle simulaties voldoen aan het criterium voor de maximale waarde voor de stijgsnelheid van 0.017 m/s voor beroepsvaart. Het strengere criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart wordt enkel overschreden bij ledigen.

5.5 Samenvatting resultaten

Op basis van de resultaten van de simulaties met de drie types nivelleersystemen in de vorige paragrafen kan het volgende besloten worden:

1. 8 cirkelvormige openingen diameter 0.60 m afgesloten met vlinderkleppen:
Voor dit nivelleersysteem wordt een nivelleertijd berekend van 11.6 min bij vullen en 10.4 min bij ledigen van de sluiscolk. Deze waarden zijn hoger dan de toelaatbare waarde van 10.0 min. Het lager plaatsen van de openingen in de sluisdeur zorgt niet voor een verlaging van de nivelleertijd. Enkel bij het vergroten van de afstand tussen schip en sluisdeur van 5.0 m (gelijk aan de stopstreepafstand) naar 10.0 m kan de nivelleertijd beperkt verlaagd worden tot 10.8 min, wat nog hoger is dan het criterium van 10.0 min. Alle simulaties voldoen aan het criterium voor de maximale waarde voor de stijgsnelheid van 0.017 m/s voor beroepsvaart en aan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart.
2. 6 cirkelvormige openingen diameter 0.90 m afgesloten met hefschuiven:
Voor dit nivelleersysteem wordt een nivelleertijd van 9.0 min bij vullen berekend en 6.4 min bij ledigen. Alle simulaties voldoen aan het criterium voor de maximale waarde voor de stijgsnelheid van 0.017 m/s voor beroepsvaart. Enkel bij ledigen wordt een maximale waarde van de daalsnelheid van het waterpeil berekend die groter is dan de toegelaten waarde van 0.010 m/s voor recreatievaart.
3. 6 Rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven:
Met rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven wordt een nivelleertijd van 7.9 min bij vullen en 5.3 min bij ledigen berekend. Deze nivelleertijden voldoen aan het criterium van 10.0 min. Alle simulaties voldoen aan het criterium voor de maximale waarde voor de stijgsnelheid van 0.017 m/s voor beroepsvaart. Enkel bij ledigen wordt een maximale waarde van de daalsnelheid van het waterpeil berekend die groter is dan de toegelaten waarde van 0.010 m/s voor recreatievaart.

Voor vullen van de volledige kolk met cirkelvormige of rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven zijn de hierboven vermelde resultaten berekend op basis van hefsnelheden van de hefschuif lager dan 0.003 m/s. In Nederland wordt meestal een ondergrens van 0.003 m/s voor de hefsnelheid gehanteerd ter voorkoming van stick-slip verschijnselen. Het optreden van stick-slip is echter sterk afhankelijk van het type vijzel en van het type glijstrips tussen hefschuif en deur. Bij het uitvoeren van de simulaties in dit hoofdstuk was nog niet gekend of stick-slip zou kunnen optreden of mogelijks problematisch kan zijn. Om die reden zijn een aantal mogelijkheden onderzocht om na te gaan of bij vullen gedurende een volledige nivellering een hefsnelheid van de schuiven hoger dan 0.003 m/s bekomen kan worden. Het verkleinen van de openingen, het toepassen van breekbalken en het lager plaatsen van de openingen geven voor beide systemen met hefschuiven geen aanleiding tot een hefsnelheid hoger dan 0.003 m/s. Enkel bij toepassen van een openingswet met een stop (180 s bij cirkelvormige openingen en 120 s bij rechthoekige openingen) en bij het vergroten van de afstand tussen de boeg van het schip en de sluisdeur worden hefsnelheden juist gelijk of groter dan 0.003 m/s bekomen. Echter na overleg met EBS is gebleken dat zelfs bij hefsnelheden lager dan 0.003 m/s niet voor stick-slip dient gevreesd te worden. Bijgevolg zijn enkel de hierboven vermelde resultaten van belang voor de vergelijking van de drie verschillende types nivelleersystemen.

Aan de hand van de resultaten van de simulaties uit dit hoofdstuk en overleg met EBS heeft de opdrachtgever beslist om het nivelleersysteem met 6 rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven te selecteren voor het verdere ontwerp van het nivelleersysteem.

6 Resultaten eerste reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem

6.1 Algemeen

Aan de hand van de resultaten van de simulaties in vorig hoofdstuk en in overleg met EBS heeft de opdrachtgever besloten om het nivelleersysteem met 6 rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven te selecteren voor het verdere ontwerp van het nivelleersysteem. Tabel 16 geeft een overzicht van de karakteristieke afmetingen van dit nivelleersysteem.

Tabel 16 – Geselecteerd nivelleersysteem voor ontwerp

Nivelleersysteem	Opening opwaarts	Opening afwaarts	Peil onderzijde openingen
Rechthoekige openingen met hefschuiven	6 x 0.90 m x 0.90 m	6 x 1.50 m x 1.50 m	+0.15 mTAW

Met dit nivelleersysteem zullen in dit hoofdstuk volgende simulaties uitgevoerd worden:

- Vullen/ledigen van de volledige kolk met het ontwerpschip CEMT klasse IV in de kolk. Daarnaast worden ook simulaties uitgevoerd met een kleiner schip in de sluis kolk (schip CEMT klasse III of CEMT klasse II) en met recreatievaart in de kolk.
- Vullen/ledigen van de opwaartse deelkolk met een schip CEMT klasse I in de kolk en met recreatievaart in de kolk.
- Vullen/ledigen van de afwaartse deelkolk met een schip CEMT klasse II in de kolk en met recreatievaart in de kolk.

Tenzij anders vermeld, wordt voor alle simulaties een afstand tussen boeg van het schip en de voor nivelleren gebruikte sluisdeur beschouwd dewelke gelijk is aan de stopstreepafstand van 5.0 m.

Uit een overleg met de opdrachtgever en met EBS volgen volgende randvoorwaarden voor het uitvoeren van de simulaties:

- Bij voorkeur worden geen breekbalken toegepast.
- Bij voorkeur wordt geen frequentiesturing op de motoren van de hefschuiven toegepast. Dit heeft tot gevolg dat een lineaire openingswet met constante openingssnelheid van de hefschuiven wordt toegepast.
- Het is niet wenselijk om verschillende openingswetten toe te passen voor beroepsvaart en voor recreatievaart.
- Indien na een eerste snellere opening van de hefschuiven een tragere opening van de schuiven nodig is, wordt dit gerealiseerd door de opening van de hefschuiven te stoppen en daarna opnieuw te bewegen met dezelfde hefsnelheid als tijdens de eerste fase van de opening.

Bij het uitvoeren van de simulaties in dit hoofdstuk en de volgende hoofdstukken van dit rapport wordt getracht om aan deze voorwaarden te voldoen.

In paragraaf 6.2 worden de simulaties voor nivelleren van de volledige sluis kolk beschreven, in paragraaf 6.3 deze voor nivelleren van de opwaartse deelkolk en in paragraaf 6.4 deze voor nivelleren van de afwaartse deelkolk. Als gevoeligheidsanalyse zijn daarna een aantal simulaties uitgevoerd, waarbij de afvoercoëfficiënt, het toegepast simulatieprogramma (VUL_SLUIS of LOCKFILL) en de aanwezigheid van breekbalken gevarieerd

is. Deze zijn beschreven in paragraaf 6.6. Daarnaast zijn als gevoeligheidsanalyse in paragraaf 6.7 alle simulaties opnieuw uitgevoerd bij het huidig afwaarts waterpeil +3.82 mTAW in plaats van het verlaagd afwaarts waterpeil +3.45 mTAW en zijn in paragraaf 6.8 alle simulaties met het verlaagd afwaarts waterpeil +3.45 mTAW opnieuw uitgevoerd met een recentere versie van VUL_SLUIS.

In paragraaf 6.9 worden de resultaten van de simulaties uit paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4, de openingswetten voor de hefschuiven in het bovenhoofd, het tussenhoofd en het benedenhoofd en de resultaten van de gevoeligheidsanalyse nog eens samengevat.

Bij de uitgevoerde simulaties en de resultaten ervan uit dit hoofdstuk wordt het volgende opgemerkt:

- Alle simulaties in dit hoofdstuk zijn uitgevoerd gebruik makend van de maximale waarde van de afvoercoëfficiënt voor rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven (zie paragraaf 4.2.3). Een hogere waarde voor de afvoercoëfficiënt zorgt voor hogere debieten door de openingen en geeft bijgevolg aanleiding tot hogere waarden voor de langskracht op het schip. Dit kan gecompenseerd worden door de openingssnelheid van de hefschuif te verlagen. Het toepassen van de maximale waarde van de afvoercoëfficiënt geeft bijgevolg de traagste opening van de hefschuiven, dewelke het meest bepalend is voor het elektromechanisch ontwerp. In de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 6.6 wordt ook nagegaan of bij toepassen van de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt de vooropgestelde nivelleertijd nog gehaald kan worden.
- Alle simulaties in deze paragrafen zijn uitgevoerd zonder breekbalken te beschouwen. Met andere woorden de oppervlakte van de straal na de breekbalken is gelijk aan de oppervlakte van de openingen in de deur en blijft ook constant in de tijd. Bij de gevoeligheidsanalyse uit paragraaf 6.6 wordt ook de invloed van het toepassen van breekbalken onderzocht.
- De nummering van de simulaties met het nivelleersysteem van de volledige sluiscolk volgt op deze van de simulaties uit paragraaf 5.4, i.e. de initiële simulaties met het nivelleersysteem met rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven. De eerste simulatie in paragraaf 6.2 heeft bijgevolg VK_HSr_09 als naamgeving. De nummering van de simulaties met het nivelleersysteem van de opwaartse en de afwaartse deelcolk begint bij 1.
- Voor de vergelijking van de berekende langskrachten met de maximaal toegelaten waarde wordt telkens de (in absolute waarde) maximale waarde van de met beide versies van het programma VUL_SLUIS en met LOCKFILL berekende langskracht op het schip beschouwd. Uit paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 volgt dat in praktijk de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.42.Va.08 maatgevend is, waardoor deze gebruikt wordt om te vergelijken met het criterium en om de openingssnelheid van de hefschuiven te bepalen. In de gevoeligheidsanalyse beschreven in paragraaf 6.6 wordt ook een openingswet opgesteld door de langskrachten berekend met LOCKFILL te vergelijken met het criterium.
- Bij elke uitgevoerde simulatie is de (in absolute waarde) maximale waarde van de langskracht op het schip niet noodzakelijk gelijk aan de toegelaten waarde. Om die reden wordt in de overzichtstabellen ook de extreme waarde van de langskracht vermeld. Deze wordt berekend als het extremum van de langskracht berekend met versie A van VUL_SLUIS, de langskracht berekend met versie B van VUL_SLUIS en de langskracht berekend met LOCKFILL.

6.2 Simulaties nivelleren volledige sluiscolk

Deze paragraaf beschrijft alle simulaties die voor nivelleren van de volledige kolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de volledige kolk is het schip CEMT klasse IV. Alle simulaties uit deze paragraaf zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL 5.03.00. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 46 in Bijlage 1. Tabel 17 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen.

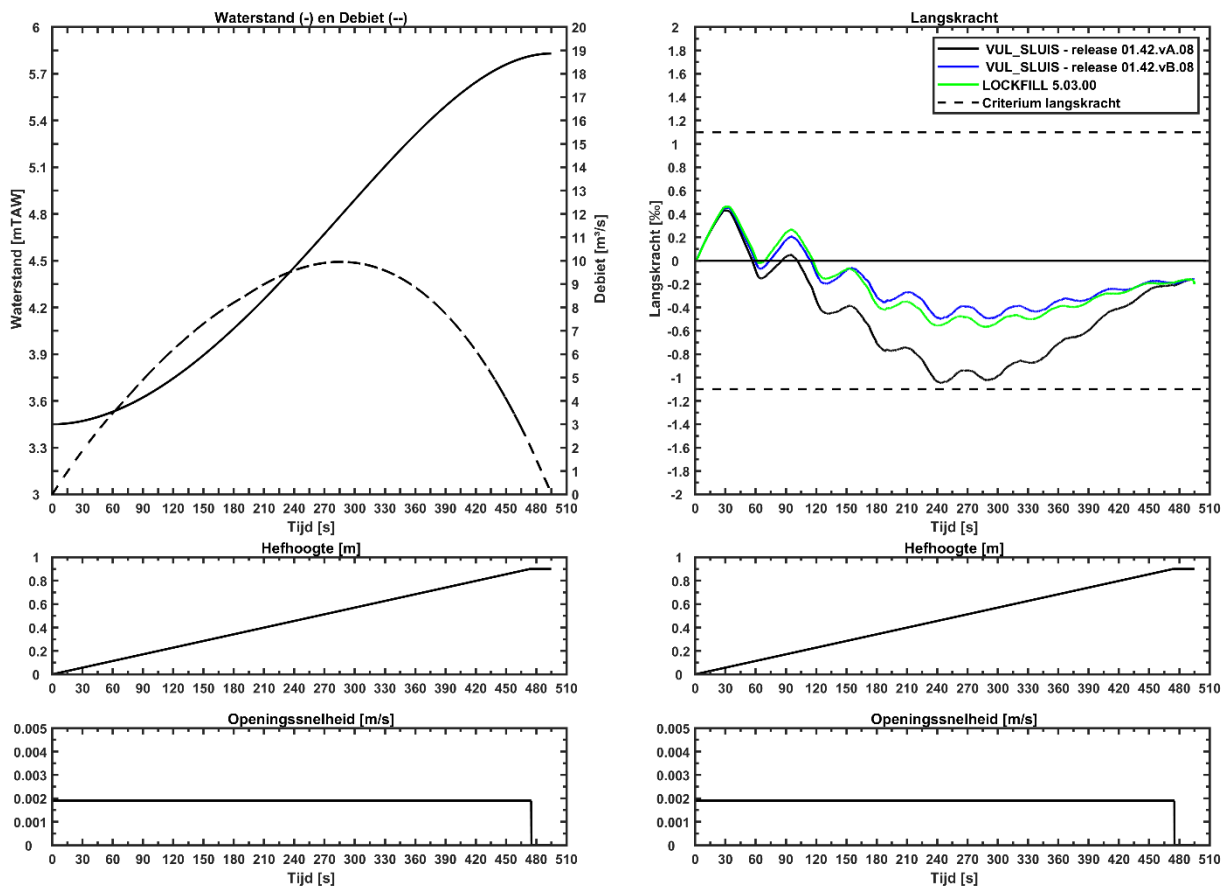
Tabel 17 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor eerste reeks simulaties nivelleren volledige kolk

Type	Naam	Hefschuiven		Schip	Afstand schip sluisdeur	Criterium langskracht	Nivelleer-tijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
		Openingssnelheid	Openings-tijd						
Vullen	VK_HSr_09	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475 s	CEMT IV	5 m	1.1 ‰	8.2 min	0.008 m/s	-1.1 ‰
	VK_HSr_10	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475 s	CEMT III	5 m	1.5 ‰	8.2 min	0.008 m/s	-1.2 ‰
	VK_HSr_11	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475 s	CEMT II	5 m	1.5 ‰	8.2 min	0.008 m/s	-1.4 ‰
	VK_HSr_12	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	8.2 min	0.008 m/s	-10.0 ‰
	VK_HSr_13	t > 0.0 s: 0.00057 m/s	1579 s		5 m	3.0 ‰	14.9 min	0.004 m/s	-3.0 ‰
	VK_HSr_14	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475 s		19 m	3.0 ‰	8.2 min	0.008 m/s	-2.7 ‰
	VK_HSr_15	t > 0.0 s: 0.00130 m/s	692 s	CEMT IV	5 m	1.1 ‰	9.9 min	0.006 m/s	-0.7 ‰
	VK_HSr_16	t > 0.0 s: 0.00130 m/s	692 s	CEMT III	5 m	1.5 ‰	9.9 min	0.006 m/s	-0.8 ‰
	VK_HSr_17	t > 0.0 s: 0.00130 m/s	692 s	CEMT II	5 m	1.5 ‰	9.9 min	0.006 m/s	-0.9 ‰
Ledigen	VK_HSr_18	t > 0.0 s: 0.00130 m/s	692 s	Recreatie-vaart	12 m	3.0 ‰	9.9 min	0.006 m/s	-3.0 ‰
	VK_HSr_19	t > 0.0 s: 0.01400 m/s	64 s	CEMT IV	5 m	1.5 ‰	4.9 min	-0.016 m/s	-1.5 ‰
	VK_HSr_20	t > 0.0 s: 0.01400 m/s	64 s	CEMT III	5 m	2.0 ‰	4.9 min	-0.016 m/s	-1.6 ‰
	VK_HSr_21	t > 0.0 s: 0.01400 m/s	64 s	CEMT II	5 m	2.0 ‰	4.9 min	-0.016 m/s	-1.2 ‰
	VK_HSr_22	t > 0.0 s: 0.01400 m/s	64 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	4.9 min	-0.016 m/s	2.3 ‰
	VK_HSr_23	t > 0.0 s: 0.00470 m/s	191 s	CEMT IV	5 m	1.5 ‰	5.9 min	-0.012 m/s	0.6 ‰
	VK_HSr_24	t > 0.0 s: 0.00470 m/s	191 s	CEMT III	5 m	2.0 ‰	5.9 min	-0.012 m/s	-0.6 ‰
	VK_HSr_25	t > 0.0 s: 0.00470 m/s	191 s	CEMT II	5 m	2.0 ‰	5.9 min	-0.012 m/s	0.5 ‰
	VK_HSr_26	t > 0.0 s: 0.00470 m/s	191 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	5.9 min	-0.012 m/s	1.1 ‰
	VK_HSr_27	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450 s	CEMT IV	5 m	1.5 ‰	8.1 min	-0.008 m/s	0.5 ‰
	VK_HSr_28	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450 s	CEMT III	5 m	2.0 ‰	8.1 min	-0.008 m/s	0.5 ‰
	VK_HSr_29	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450 s	CEMT II	5 m	2.0 ‰	8.1 min	-0.008 m/s	0.4 ‰
	VK_HSr_30	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	8.1 min	-0.008 m/s	0.8 ‰

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Voor vullen van de volledige sluiscolk via het bovenhoofd is de openingsswet van de hefschuiven afgeleid op basis van simulatie VK_HSr_09 met het ontwerpschip CEMT klasse IV in de sluiscolk. De (constante) openingssnelheid van de hefschuiven van 0.0019 m/s zorgt ervoor dat de extreme waarde van de langskracht juist gelijk is aan de maximum toegelaten waarde van 1.1 ‰. Voor deze simulatie wordt een nivelleertijd van 8.2 min berekend, wat nog beduidend lager is dan de maximale waarde van 10.0 min. De extreme waarde van de stijgsnelheid bedraagt 0.008 m/s, wat lager is dan de toegelaten waarde van 0.017 m/s voor beroepsvaart en de toegelaten waarde van 0.010 m/s voor recreatievaart. Voor deze simulatie toont

Figuur 14 de variatie in de tijd van het waterpeil in de sluisenkolk, het debiet door de openingen, de langskracht op het schip, de hefhoogte van de schuiven en de openingssnelheid van de schuiven. Uit deze figuur volgt dat de hefschuiven volledig geopend zijn ca. 20 s voor het einde nivelleren.



Figuur 14 – Variatie in de tijd van het waterpeil in de sluisenkolk, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip voor simulatie VK_HSr_09

Daarna zijn met deze openingswet simulaties uitgevoerd met het schip CEMT klasse III (simulatie VK_HSr_10), het schip CEMT klasse II (simulatie VK_HSr_11) en recreatievaart (simulatie VK_HSr_12) in de sluisenkolk. Enkel bij recreatievaart in de sluisenkolk wordt een extreme waarde van de langskracht berekend van 10.0 %, wat beduidend hoger is dan de toegelaten waarde van 3.0 %. Met als doel een lagere extreme waarde van de langskracht op het schip bij recreatievaart te bekomen, zijn daarna simulaties VK_HSr_13 en VK_HSr_14 uitgevoerd. Bij simulatie VK_HSr_13 wordt de openingswet zodanig vertraagd dat de extreme waarde van de langskracht op het recreatievaartschip in de sluisenkolk voldoet aan het criterium van 3.0 %. Hierbij wordt echter een nivelleertijd van 14.9 min berekend wat beduidend hoger is dan het criterium van 10.0 min. Voor deze simulatie is de openingstijd van de schuiven gelijk aan 1579 s (= 26.3 min). Hieruit volgt dat de hefschuiven nog niet volledig geopend zijn op het einde van de nivellering, wat niet aanbevolen is. Bij simulatie VK_HSr_14 wordt een extreme waarde van de langskracht op het recreatievaartschip juist lager dan 3.0 % bekomen door het vergroten van de afstand tussen de boeg van het schip en de sluisdeur tot 19 m.

Voor ledigen is eerst simulatie VK_HSr_19 uitgevoerd met het ontwerpschip CEMT klasse IV in de sluisenkolk. De (constante) openingssnelheid van de hefschuiven is zodanig bepaald dat de extreme waarde van de langskracht op het schip in de kolk juist gelijk is aan de maximaal toegelaten waarde van 1.5 %. Voor deze simulatie wordt een nivelleertijd van 4.9 min berekend, wat de helft is van het criterium van 10.0 min. De

extreme waarde van de stijgsnelheid bedraagt 0.016 m/s, wat juist lager is dan het criterium van 0.017 m/s voor beroepsvaart maar hoger dan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart.

Met deze openingswet zijn simulaties VK_HSr_20 (schip CEMT klasse III in de kolk), VK_HSr_21 (schip CEMT klasse II in de kolk) en VK_HSr_22 (recreatievaart in de kolk) uitgevoerd. Voor al deze simulaties worden extreme waarden van de langskracht berekend, die voldoen aan het criterium voor het betreffende schip. De berekende extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil van 0.016 m/s voldoet aan het criterium voor beroepsvaart, maar is hoger dan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart.

Uit de simulaties voor ledigen van de afwaartse deelkolk in paragraaf 6.4 volgt dat het toepassen van de openingswet van simulaties VK_HSr_19 tot en met VK_HSr_22 aanleiding geeft tot te grote daalsnelheden van het waterpeil in de kolk. In paragraaf 6.4 wordt voor het benedenhoofd van de sluis kolk een tragere openingswet afgeleid met een openingssnelheid van de hefschuiven van 0.0047 m/s. Om die reden worden de simulaties met het schip CEMT klasse IV, het schip CEMT klasse III, het schip CEMT klasse II en recreatievaart in de kolk opnieuw uitgevoerd met deze tragere openingswet. Dit geeft simulaties VK_HSr_23 tot en met VK_HSr_26. Uit deze simulaties volgt een nivelleertijd van de sluis kolk van 5.9 min, wat nog beduidend lager is dan de maximale waarde van 10.0 min. De extreme waarde van de stijgsnelheid bedraagt -0.012 m/s, wat voldoet aan het criterium voor beroepsvaart, maar wat beperkt hoger is dan de maximaal toegelaten waarde voor recreatievaart. Voor alle simulaties worden langskrachten op het schip berekend die lager zijn dan de maximaal toegelaten waarden voor het betreffende schip.

Bij toepassing van de op deze wijze bepaalde openingswetten wordt voor ledigen van de volledige kolk alsook voor vullen van de opwaartse deelkolk (zie paragraaf 6.4) een extreme waarde van de stijgsnelheid berekend die juist hoger is dan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart. Uit paragraaf 6.3 en paragraaf 6.4 volgt dat vullen van de opwaartse deelkolk bepalend is voor het vaststellen van de openingswet van het bovenhoofd en ledigen van de afwaartse deelkolk voor het vaststellen van de openingswet van het benedenhoofd. Om die reden zijn voor vullen simulaties VK_HSr_15 tot en met VK_HSr_18 uitgevoerd met de tragere openingswet afgeleid in paragraaf 6.3 en voor ledigen simulaties VK_HSr_27 tot en met VK_HSr_30 met de tragere openingswet afgeleid in paragraaf 6.4. Voor vullen wordt een openingssnelheid van de hefschuiven van 0.0013 m/s beschouwd en voor ledigen een openingssnelheid van 0.0020 m/s. Uit deze simulaties volgt een nivelleertijd van 9.9 min bij vullen en 8.1 min bij ledigen, wat nog juist lager is dan het criterium van 10.0 min. De extreme waarde van de stijgsnelheid bedraagt 0.006 m/s bij vullen en -0.008 m/s bij ledigen, wat voldoet aan het strengere criterium voor recreatievaart. De berekende langskracht op het schip is zowel bij vullen als bij ledigen voor de schepen CEMT klasse IV, CEMT klasse III en CEMT klasse II beduidend lager dan het betreffende criterium. Voor recreatievaart kan met deze tragere openingswet bij vullen juist voldaan worden aan het criterium voor de langskracht op het schip bij een afstand tussen boeg en sluisdeur van 12 m, wat lager is dan in de vorige simulaties.

Indien voor een bepaalde openingswet van de hefschuiven de langskracht op het schip CEMT klasse IV in de kolk juist voldoet aan het criterium, volgt uit de simulaties in deze paragraaf dat de berekende langskrachten op het schip CEMT klasse III en deze op het schip CEMT klasse II in de kolk ook voldoen aan de betreffende criteria. Dit geldt zowel voor vullen als voor ledigen van de kolk. Om die reden worden in de volgende hoofdstukken enkel nog simulaties voor vullen en ledigen van de volledige kolk met het schip CEMT klasse IV in de kolk uitgevoerd. De simulaties voor vullen en ledigen van de kolk met het schip CEMT klasse III en de simulaties met het schip CEMT klasse II in de kolk zullen niet meer uitgevoerd worden.

Figuur 23 (simulatie VK_HSr_09 en VK_HSr_12), Figuur 24 (simulatie VK_HSr_13 en VK_HSr_14), Figuur 25 (simulatie VK_HSr_23 en VK_HSr_26), Figuur 26 (simulatie VK_HSr_15 en VK_HSr_18) en Figuur 27 (simulatie VK_HSr_27 en VK_HSr_30) in Bijlage 2 geven voor een aantal simulaties een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de berekende waterstand in de sluis kolk, het debiet door de openingen en langskracht op het schip.

6.3 Simulaties nivelleren opwaartse deelcolk

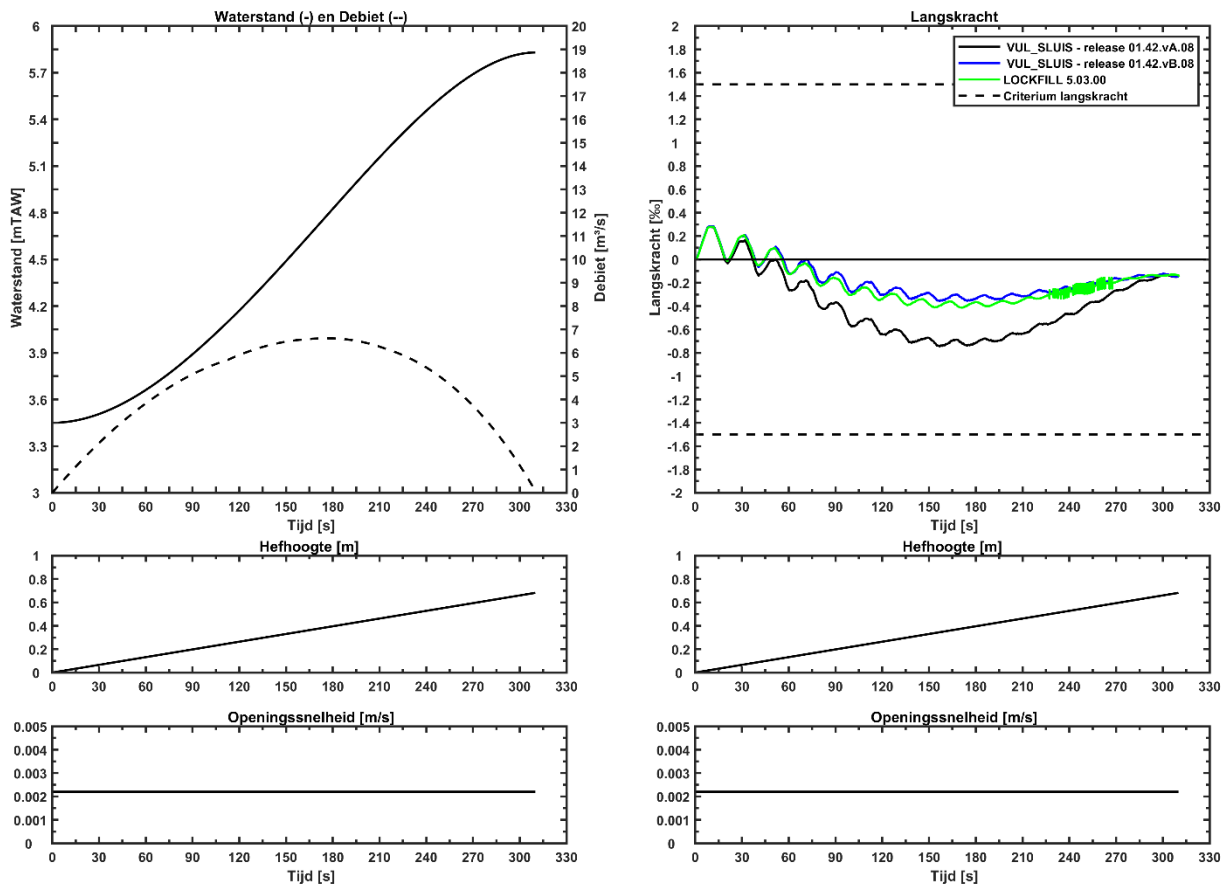
Deze paragraaf beschrijft alle simulaties die voor nivelleren van de opwaartse deelcolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de opwaartse deelcolk is het schip CEMENT klasse I. Alle simulaties uit deze paragraaf zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL 5.03.00. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 47 in Bijlage 1. Tabel 18 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen.

Tabel 18 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor eerste reeks simulaties nivelleren opwaartse deelcolk

Type	Naam	Hefschuiven		Schip	Afstand schip sluisdeur	Criterium langskracht	Nivelleer-tijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
		Openingssnelheid	Openings-tijd						
Vullen	OPW_HSr_01	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s	CEMENT I	5 m	1.5 ‰	5.4	0.011 m/s	-0.7 ‰
	OPW_HSr_02	t > 0.0 s: 0.0039 m/s	231 s	CEMENT I	5 m	1.5 ‰	3.8	0.016 m/s	-1.5 ‰
	OPW_HSr_03	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	5.4	0.011 m/s	-4.2 ‰
	OPW_HSr_03	t > 0.0 s: 0.0013 m/s	692 s		5 m	3.0 ‰	6.5	0.010 m/s	-2.9 ‰
	OPW_HSr_05	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s		8 m	3.0 ‰	5.4	0.011 m/s	-2.8 ‰
	OPW_HSr_06	t > 0.0 s: 0.0013 m/s	692 s	CEMENT I	5 m	1.5 ‰	6.5	0.010 m/s	-0.5 ‰
Ledigen	OPW_HSr_07	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250 s	CEMENT I	5 m	2.0 ‰	3.9	-0.016 m/s	0.5 ‰
	OPW_HSr_08	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	3.9	-0.016 m/s	1.1 ‰
	OPW_HSr_09	t > 0.0 s: 0.0043 m/s	209 s	CEMENT I	5 m	2.0 ‰	3.6	-0.017 m/s	0.5 ‰
	OPW_HSr_10	t > 0.0 s: 0.0043 m/s	209 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	3.6	-0.017 m/s	1.6 ‰
	OPW_HSr_11	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600 s	CEMENT I	5 m	2.0 ‰	6.0	-0.010 m/s	0.2 ‰
	OPW_HSr_12	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	6.0	-0.010 m/s	0.5 ‰

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Voor vullen van de opwaartse deelcolk via het bovenhoofd is eerst simulatie OPW_HSr_01 uitgevoerd met de openingsswet dewelke voor vullen van de volledige sluiscolk in paragraaf 6.2 voor het bovenhoofd is bepaald. De (constante) openingssnelheid van de hefschuiven bedraagt 0.0019 m/s. Voor deze simulatie wordt een nivelleertijd van 5.4 min berekend, wat beduidend lager is dan de maximale waarde van 10.0 min. De extreme waarde van de stijgsnelheid bedraagt 0.011 m/s, wat lager is dan de toegelaten waarde van 0.017 m/s voor beroepsvaart. De extreme waarde van de langskracht op het schip bedraagt 0.7 ‰, wat beduidend lager is dan het criterium van 1.5 ‰. Voor deze simulatie toont Figuur 15 de variatie in de tijd van het waterpeil in de sluiscolk, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip. Uit deze figuur volgt dat de hefschuiven nog niet volledig geopend zijn aan het einde van de nivellering. Dit is eigenlijk een suboptimaal gebruik van het nivelleersysteem, maar kan niet vermeden worden door het toepassen van één openingsswet voor het bovenhoofd.



Figuur 15 – Variatie in de tijd van het waterpeil in de sluiscolk, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip voor simulatie OPW_HSr_01

Aangezien de extreme waarde van de langskracht bij simulatie OPW_HSr_01 nog lager is dan het criterium, is simulatie OPW_HSr_02 uitgevoerd met een snellere openingswet (openingssnelheid 0.0039 m/s) om na te gaan wat de snelst mogelijke opening van de hefschuiven voor het bovenhoofd van de opwaartse deelcolk is. Voor deze simulatie wordt een nivelleertijd van 3.8 min berekend, een extreme waarde van de stijgsnelheid van 0.016 m/s en een extreme waarde van de langskracht van 1.5 ‰. Deze openingswet wordt echter verder niet beschouwd, omdat de openingswet van de hefschuiven in het bovenhoofd in praktijk ook gebruikt zal worden voor vullen van de volledige colk. Deze snellere openingswet zou bij nivellering van de volledige colk te hoge langskrachten op het schip tot gevolg hebben.

Voor recreatievaart is eerst simulatie OPW_HSr_03 uitgevoerd met de openingswet met (constante) openingssnelheid van de hefschuiven gelijk aan 0.0019 m/s. De extreme waarde van de stijgsnelheid van 0.011 m/s is hierbij juist hoger dan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart. Echter voor deze simulatie wordt een extreme waarde van de langskracht op het schip van 4.2 ‰ berekend, wat hoger is dan het criterium van 3.0 ‰. Met als doel om voor recreatievaart een lagere extreme waarde van de langskracht op het schip te bekomen, zijn daarna simulaties OPW_HSr_04 en OPW_HSr_05 uitgevoerd. Bij simulatie OPW_HSr_04 wordt de openingswet zodanig vertraagd dat de extreme waarde van de langskracht op het recreatievaartschip in de sluiscolk juist lager is dan het criterium van 3.0 ‰. Hierbij wordt een nivelleertijd van 6.5 min berekend. Uit Tabel 18 volgt ook dat de hefschuiven pas geopend zijn na 692 s (= 11.5 min). Dit is 4.0 min na het tijdstip van einde nivellering, wat niet aanbevolen is. Bij simulatie OPW_HSr_05 wordt een extreme waarde van de langskracht op het recreatievaartschip in de colk juist lager dan 3.0 ‰ bekomen door het vergroten van de afstand tussen de boeg van het schip en de sluisdeur tot 8 m.

Voor ledigen zijn eerst simulaties OPW_HSr_07 (schip CEMT klasse I in de kolk) en OPW_HSr_08 (recreatievaart in de kolk) uitgevoerd met de openingswet dewelke in paragraaf 6.4 voor vullen van de afwaartse deerkolk is afgeleid. De (constante) openingssnelheid van de hefschuiven bedraagt hierbij 0.0036 m/s. Voor deze simulaties wordt een nivelleertijd van 3.9 min berekend en een extreme waarde van de daalsnelheid van 0.016 m/s. De nivelleertijd is lager dan het criterium van 10.0 min. De daalsnelheid is lager dan het criterium voor beroepsvaart, maar hoger dan het criterium voor recreatievaart. De extreme waarde van de langskracht op het schip bedraagt 0.5 ‰ voor het schip CEMT klasse I en 1.1 ‰ voor recreatievaart. Deze beide waarden zijn lager dan de criteria voor de langskracht voor de betreffende scheepstypes. Bij deze simulaties zijn de hefschuiven volledig geopend 15 s na het tijdstip van einde nivelleren.

Ook voor ledigen is nagegaan of een snellere lediging nog mogelijk is, aangezien voor de langskracht op het schip nog lagere waarden berekend worden dan het betreffende criterium. Om die reden zijn simulaties OPW_HSr_09 (schip CEMT klasse I in de kolk) en OPW_HSr_10 (recreatievaartuig in de kolk) uitgevoerd. Aangezien bij deze simulaties de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk meer bepalend is dan de langskracht op het schip, kan slechts een beperkte winst van 0.3 min in nivelleertijd behaald worden. Deze (zeer beperkt snellere) openingswet van de hefschuiven wordt echter niet meer beschouwd voor het vervolg, aangezien in praktijk voor vullen van de afwaartse deerkolk via het tussenhoofd dezelfde openingswet zal toegepast worden dan bij ledigen van de opwaartse deerkolk. Uit paragraaf 6.4 volgt dat deze hefsnelheid bij vullen van de afwaartse deerkolk aanleiding zal geven tot te hoge langskrachten op het schip in de kolk.

Bij toepassing van deze openingswetten wordt zowel bij vullen als bij ledigen van de opwaartse deerkolk een extreme waarde van de stijgsnelheid berekend die hoger is dan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart. Voor vullen van de opwaartse deerkolk volgt dat bij de reeds uitgevoerde simulatie OPW_HSr_04 met de tragere openingswet voor recreatievaart een extreme waarde van de stijgsnelheid wordt berekend die juist gelijk is aan 0.010 m/s. Om die reden is de openingssnelheid van 0.0013 m/s uit deze simulatie beschouwd voor het bovenhoofd en is met deze openingssnelheid simulatie OPW_HSr_06 uitgevoerd met het schip CEMT klasse I in de kolk. Voor deze simulatie wordt een nivelleertijd berekend van 6.5 min en bedraagt de extreme waarde van de langskrachten op het schip -0.5 ‰, wat beduidend lager is dan het criterium voor dit schip. Bij recreatievaart in de kolk kan voldaan worden aan het criterium voor de langskracht bij de minimale afstand van 5.0 m tussen schip en de sluisdeur.

Door de kleinere lengte van de opwaartse deerkolk worden iets hogere extreme waarden van de stijgsnelheid berekend bij ledigen van de opwaartse deerkolk dan bij vullen van de afwaartse kolk (zie paragraaf 6.4). Bijgevolg is ledigen van de opwaartse kolk bepalend voor het vaststellen van de openingswet van de schuiven van het tussenhoofd. Simulaties OPW_HSr_11 en OPW_HSr_12 voor ledigen van de opwaartse kolk zijn uitgevoerd met de openingswet met een hefsnelheid van 0.0015 m/s. Uit deze simulaties volgt een nivelleertijd van 6.0 min voor ledigen van de kolk. De extreme waarde van de stijgsnelheid bedraagt 0.010 m/s, wat juist gelijk is aan het criterium voor recreatievaart. De berekende langskracht op het schip is zowel voor het schip CEMT klasse I als voor recreatievaart beduidend lager dan het betreffende criterium.

Figuur 28 (simulatie OPW_HSr_01 en OPW_HSr_03), Figuur 29 (simulatie OPW_HSr_04 en OPW_HSr_05), Figuur 30 (simulatie OPW_HSr_06), Figuur 31 (simulatie OPW_HSr_07 en OPW_HSr_08) en Figuur 32 (simulatie OPW_HSr_11 en OPW_HSr_12) in Bijlage 2 geven een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de waterstand in de sluiskolk, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip.

6.4 Simulaties nivelleren afwaartse deelcolk

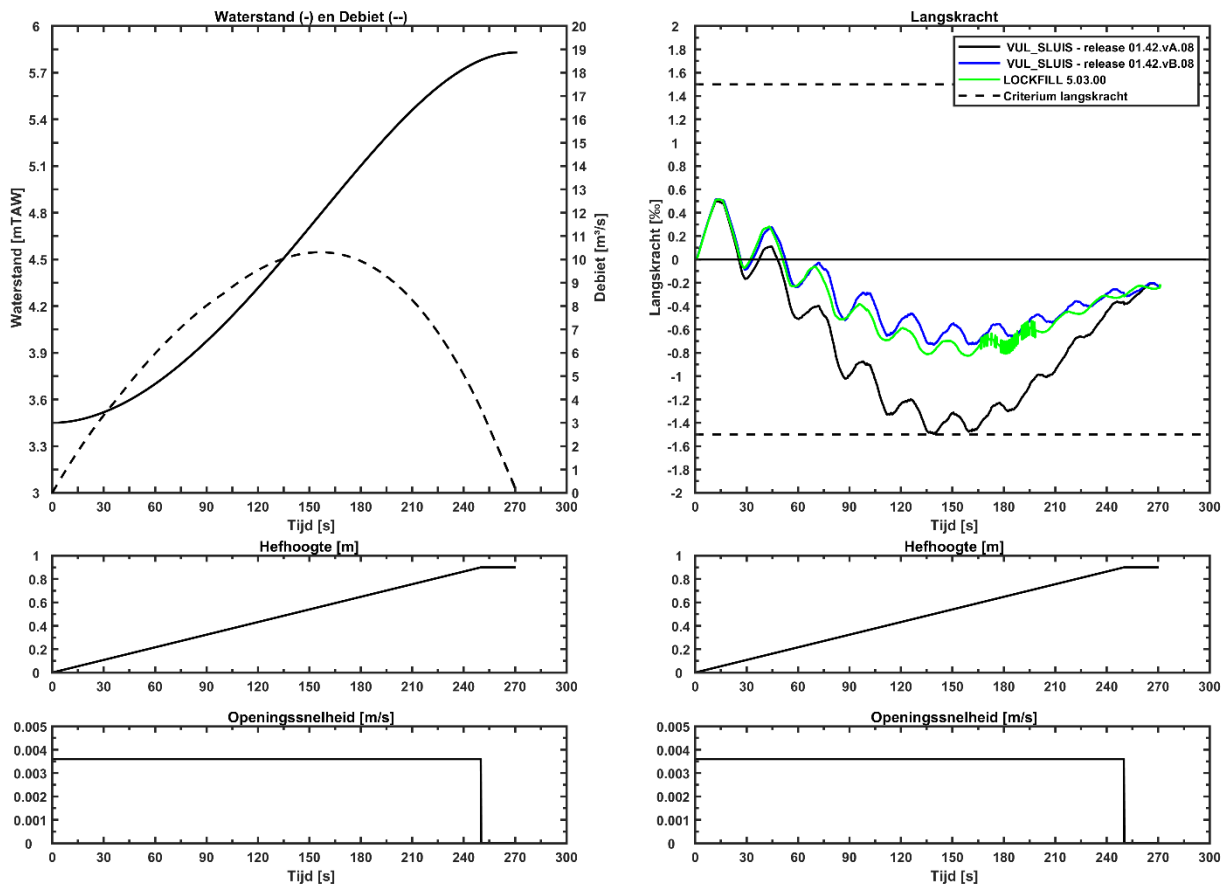
Deze paragraaf beschrijft alle simulaties die voor nivelleren van de afwaartse deelcolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de afwaartse deelcolk is het schip CEMENT klasse II. Alle simulaties uit deze paragraaf zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL 5.03.00. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 47 in Bijlage 1. Tabel 19 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen.

Tabel 19 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor eerste reeks simulaties afwaartse deelcolk

Type	Naam	Hefschuiven		Schip	Afstand schip sluisdeur	Criterium langskracht	Nivelleer-tijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
		Openingssnelheid	Openings-tijd						
Vullen	AFW_HSr_01	$t > 0.0$ s: 0.0036 m/s	250 s	CEMENT II	5 m	1.5 ‰	4.5 min	0.014 m/s	-1.5 ‰
	AFW_HSr_02	$t > 0.0$ s: 0.0036 m/s	250 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	4.5 min	0.014 m/s	-10.4 ‰
	AFW_HSr_03	$t > 0.0$ s: 0.0010 m/s	900 s		5 m	3.0 ‰	8.5 min	0.008 m/s	-3.0 ‰
	AFW_HSr_04	$t > 0.0$ s: 0.0036 m/s	250 s		18 m	3.0 ‰	4.5 min	0.014 m/s	-2.9 ‰
	AFW_HSr_05	$t > 0.0$ s: 0.0015 m/s	600 s	CEMENT II	5 m	1.5 ‰	6.9 min	0.009 m/s	-0.6 ‰
	AFW_HSr_06	$t > 0.0$ s: 0.0015 m/s	600 s	Recreatie-vaart	8 m	3.0 ‰	6.9 min	0.009 m/s	-2.9 ‰
Ledigen	AFW_HSr_07	$t > 0.0$ s: 0.0140 m/s	64 s	CEMENT II	5 m	2.0 ‰	3.0 min	-0.026 m/s	-1.1 ‰
	AFW_HSr_08	$t > 0.0$ s: 0.0140 m/s	64 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	3.0 min	-0.026 m/s	-2.3 ‰
	AFW_HSr_09	$t > 0.0$ s: 0.0047 m/s	191 s	CEMENT II	5 m	2.0 ‰	4.0 min	-0.016 m/s	0.5 ‰
	AFW_HSr_10	$t > 0.0$ s: 0.0047 m/s	191 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	4.0 min	-0.016 m/s	1.4 ‰
	AFW_HSr_11	$t > 0.0$ s: 0.0020 m/s	450 s	CEMENT II	5 m	2.0 ‰	6.0 min	-0.010 m/s	0.3 ‰
	AFW_HSr_12	$t > 0.0$ s: 0.0020 m/s	450 s	Recreatie-vaart	5 m	3.0 ‰	6.0 min	-0.010 m/s	0.6 ‰

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Voor vullen van de afwaartse deelcolk via het tussenhoofd is de openingsswet van de hefschuiven afgeleid op basis van simulatie AFW_HSr_01 met het ontwerpschip in de sluiscolk. De (constante) openingssnelheid van de hefschuiven van 0.0036 m/s zorgt ervoor dat de extreme waarde van de langskracht juist gelijk is aan de maximum toegelaten waarde van 1.5 ‰. Voor deze simulatie wordt een nivelleertijd van 4.5 min berekend en een extreme waarde van de stijgsnelheid van 0.014 m/s. Deze waarden zijn lager dan het criterium voor nivelleertijd en het criterium voor de stijgsnelheid van 0.017 m/s bij beroepsvaart. Voor deze simulatie toont Figuur 16 de variatie in de tijd van het waterpeil in de sluiscolk, het debiet door de openingen, de langskracht op het schip, de hefhoogte van de schuiven en de openingssnelheid van de schuiven. Uit deze figuur volgt dat de hefschuiven volledig geopend zijn ca. 30 s voor het einde van de nivellering.



Figuur 16 – Variatie in de tijd van het waterpeil in de sluiscolk, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip voor simulatie AFW_HSr_01

Daarna is met deze openingswet simulatie AFW_HSr_02 uitgevoerd met een recreatievaartuig in de sluiscolk. De extreme waarde van de stijgsnelheid is voor deze simulatie hoger dan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart. De extreme waarde van de langskracht bedraagt 10.4 ‰, wat beduidend hoger is dan de toegelaten waarde van 3.0 ‰. Met als doel een lagere extreme waarde van de langskracht op het schip bij recreatievaart te bekomen, zijn daarna simulaties AFW_HSr_03 en AFW_HSr_04 uitgevoerd. Bij simulatie AFW_HSr_03 wordt de openingswet zodanig vertraagd dat de extreme waarde van de langskracht op het recreatievaartschip in de sluiscolk juist lager is dan het criterium van 3.0 ‰. Hierbij wordt een nivelleertijd van 8.5 min berekend. De hefschuiven zijn echter volledig geopend na 900 s (= 15.0 min), wat 6.5 min later is dan het einde van de nivellering, wat niet aanbevolen is. Bij simulatie AFW_HSr_04 wordt een extreme waarde van de langskracht op het recreatievaartschip juist lager dan 3.0 ‰ bekomen door het vergroten van de afstand tussen de boeg van het schip en de sluisdeur tot 18 m. Analoog als bij simulatie AFW_HSr_02 voldoet de berekende maximale waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de colk niet aan het criterium voor recreatievaart.

Voor ledigen van de afwaartse deelcolk zijn eerst simulaties AFW_HSr_07 (schip CEMT klasse II in de colk) en AFW_HSr_08 (recreatievaartuig in de colk) uitgevoerd met de openingswet dewelke in paragraaf 6.2 voor ledigen van de volledige colk is afgeleid. De (constante) openingssnelheid van de hefschuiven bedraagt hierbij 0.0140 m/s. Voor deze simulaties wordt een nivelleertijd van 3.0 min berekend en een extreme waarde van de stijgsnelheid van -0.026 m/s. De nivelleertijd is lager dan het criterium van 10.0 min. De stijgsnelheid is beduidend hoger dan het criterium voor beroepsvaart en het criterium voor recreatievaart. De extreme waarden van de langskracht op het schip zijn lager dan de criteria voor de beide scheepstypes.

Omwille van de overschrijding van het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk voor beroepsvaart, is een tragere openingswet van de hefschuiven gedefinieerd, waarbij wel voldaan is aan de maximaal toegelaten waarde van 0.017 m/s voor beroepsvaart. Hierbij bedraagt de openingssnelheid van de hefschuiven 0.00470 m/s. Gebruik makend van deze openingswet zijn simulaties AFW_HSr_09 (schip CEMT klasse II in de kolk) en AFW_HSr_10 (recreatievaartuig in de kolk) uitgevoerd. Voor recreatievaart is de berekende stijgsnelheid van -0.016 m/s nog hoger dan de maximaal toegelaten waarde van 0.010 m/s. Voor deze simulaties wordt een nivelleertijd van 4.0 min berekend en langskrachten op het schip van 0.5 ‰ (schip CEMT klasse II) en 1.4 ‰ (recreatievaart), dewelke beduidend lager zijn dan de criteria voor beide scheepstypes.

Bij toepassing van deze openingswetten wordt zowel bij vullen als bij ledigen van de afwaartse deelkolk een extreme waarde van de stijgsnelheid berekend die hoger is dan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart. Bij ledigen van de opwaartse deelkolk (zie paragraaf 6.3) worden extreme waarden van de daalsnelheid berekend, dewelke iets hoger zijn dan deze bij vullen van de afwaartse deelkolk. Hierdoor is ledigen van de opwaartse deelkolk maatgevend voor de openingswet van het tussenhoofd. Om die reden zijn voor vullen van de afwaartse deelkolk simulaties AFW_HSr_05 en AFW_HSr_06 uitgevoerd met de (tragere) hefsnelheid van 0.0015 m/s uit paragraaf 6.3. Voor deze simulaties wordt een nivelleertijd van 6.9 min berekend en een extreme waarde van de stijgsnelheid van 0.009 m/s, wat juist lager is dan het criterium voor recreatievaart. Voor het schip CEMT klasse II wordt een langskracht berekend, dewelke beduidend lager is dan het criterium van 1.5 ‰. Voor recreatievaart wordt bij een afstand tussen boeg van het schip en sluisdeur van 8.0 m een langskracht berekend dewelke juist gelijk is aan het criterium van 3.0 ‰. Deze afstand van 8.0 m is wel beduidend lager dan de 12.0 m uit de vorige simulaties.

Voor ledigen van de afwaartse deelkolk zijn simulaties AFW_HSr_11 en AFW_HSr_12 uitgevoerd met een hefsnelheid van 0.0020 m/s. Bij toepassen van deze hefsnelheid wordt een nivelleertijd van 6.0 min berekend en een extreme waarde van de stijgsnelheid van -0.010 m/s, wat juist gelijk is aan het criterium voor recreatievaart. De berekende langskracht op het schip is zowel voor het schip CEMT klasse II als voor recreatievaart beduidend lager dan het betreffende criterium.

Figuur 33 (simulatie AFW_HSr_01 en AFW_HSr_02), Figuur 34 (simulatie AFW_HSr_03 en AFW_HSr_04), Figuur 35 (simulatie AFW_HSr_05 en AFW_HSr_06), Figuur 36 (simulatie AFW_HSr_09 en AFW_HSr_10) en Figuur 37 (simulatie AFW_HSr_11 en AFW_HSr_12) in Bijlage 2 geven voor een aantal simulaties een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de waterstand in de sluiskolk, het debiet door de nivelleeropeningen en de langskracht op het schip.

6.5 Samenvatting resultaten

Rekening houdend met het feit dat in praktijk per sluishoofd één openingswet beschouwd wordt voor vullen of ledigen van de verschillende deelkolken, worden op basis van de resultaten uit paragraaf 6.2, 6.3 en 6.4 de openingswetten uit Tabel 20 geselecteerd voor de hefschuiven in het bovenhoofd, het tussenhoofd en het benedenhoofd. In deze tabel zijn twee reeksen openingswetten vermeld. Uit de vorige paragrafen volgt dat voor een aantal simulaties een te hoge stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk voor recreatievaart wordt berekend. Bij het uitvoeren van de simulaties was in dit stadium van het onderzoek niet volledig duidelijk of hiermee rekening moest gehouden worden. Om die reden is een eerste reeks openingswetten vermeld, waarbij geen rekening werd gehouden is met het criterium voor de extreme waarde van de stijgsnelheid voor recreatievaart. Deze reeks openingswetten wordt aangeduid met “eerste ontwerp”. Bij de tweede reeks openingswetten wordt wel voldaan aan het criterium van de stijgsnelheid voor recreatievaart in de sluis kolk.

Tabel 20 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd uit eerste reeks simulaties met het nivelleersysteem

Sluishoofd	Eerste ontwerp		Rekening houdend met stijgsnelheid recreatievaart	
	Openingssnelheid hefschuiven	Openingstijd hefschuiven	Openingssnelheid hefschuiven	Openingstijd hefschuiven
Bovenhoofd	$t > 0.0$ s: 0.0019 m/s	474 s	$t > 0.0$ s: 0.0013 m/s	692 s
Tussenhoofd	$t > 0.0$ s: 0.0036 m/s	250 s	$t > 0.0$ s: 0.0015 m/s	600 s
Benedenhoofd	$t > 0.0$ s: 0.0047 m/s	191 s	$t > 0.0$ s: 0.0020 m/s	450 s

Tabel 21 geeft een overzicht van de nivelleertijd, de extreme waarde van het debiet en de extreme waarde van de stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 bij vullen/ledigen van de volledige kolk, de opwaartse deelkolk en de afwaartse deelkolk. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat de extreme waarde van het debiet niet vermeld werd in de overzichtstabellen in paragraaf 6.2, 6.3 en 6.4. Deze waarden zijn rechtstreeks overgenomen uit de betreffende tabellen in Bijlage 1. In Tabel 22 wordt een overzicht gegeven van de minimale afstand tussen boeg van het schip en de voor nivelleren gebruikte sluisdeur die bij toepassing van deze openingswetten nodig is om ervoor te zorgen dat de berekende krachten op het schip in de kolk voldoen aan de betreffende criteria.

Tabel 21 – Nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 voor bij vullen / ledigen van de volledige kolk en de opwaartse en afwaartse deelkolk

Sluis kolk	Type	Eerste ontwerp			Rekening houdend met stijgsnelheid recreatievaart		
		Nivelleer-tijd	Extrem e waarde debiet	Extrem e waarde stijgsnelheid	Nivelleer-tijd	Extrem e waarde debiet	Extrem e waarde stijgsnelheid
Volledige kolk	Vullen	8.2 min	10.0 m ³ /s	0.008 m/s	9.9 min	8.2 m ³ /s	0.006 m/s
	Ledigen	5.9 min	15.8 m ³ /s	-0.012 m/s	8.1 min	10.2 m ³ /s	-0.008 m/s
Opwaartse deelkolk	Vullen	5.4 min	6.5 m ³ /s	0.011 m/s	6.5 min	5.4 m ³ /s	0.010 m/s
	Ledigen	3.9 min	9.0 m ³ /s	-0.016 m/s	6.0 min	5.8 m ³ /s	-0.010 m/s
Afwaartse deelkolk	Vullen	4.5 min	10.3 m ³ /s	0.014 m/s	6.9 min	6.6 m ³ /s	0.009 m/s
	Ledigen	4.0 min	11.8 m ³ /s	-0.016 m/s	6.0 min	7.6 m ³ /s	-0.010 m/s

Tabel 22 – Afstand tussen boeg schip en sluisdeur bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse en afwaartse deelkolk.

Type	Sluishoofd	Eerste ontwerp		Rekening houdend met stijgsnelheid recreatievaart	
		Beroepsvaart*	Recreatievaart	Beroepsvaart*	Recreatievaart
Vullen	Volledige kolk	5 m	19 m	5 m	12 m
	Opwaartse	5 m	8 m	5 m	5 m
	Afwaartse deelkolk	5 m	18 m	5 m	8 m
Ledigen	Volledige kolk	5 m	5 m	5 m	5 m
	Opwaartse	5 m	5 m	5 m	5 m
	Afwaartse deelkolk	5 m	5 m	5 m	5 m

* = Schip CEMT klasse IV voor volledige kolk, schip CEMT klasse I voor opwaartse deelkolk en schip CEMT klasse II voor afwaartse deelkolk.

In werkelijkheid zal de tussendeur van de sluis kolk ook als reservedeur gebruikt worden in het geval van een defect aan de puntdeuren van het bovenhoofd of het benedenhoofd. De hefsnelheid van de hefschuiven van het tussenhoofd is echter groter dan deze van het bovenhoofd, maar kleiner dan deze van het benedenhoofd. Bijgevolg kan de tussendeur integraal gebruikt worden ter vervanging van de sluisdeur van het benedenhoofd. Zonder aanpassing van de motoren zal hierbij wel een beperkt tragere nivelleertijd bekomen worden bij ledigen van de volledige kolk en bij ledigen van de afwaartse deelkolk. Indien de tussendeur gebruikt wordt ter vervanging van de sluisdeur in het bovenhoofd moeten altijd de motoren van de hefschuiven van de sluisdeur van het bovenhoofd op de tussendeur geplaatst worden. Zoniet zullen te hoge langskrachten op het schip bekomen worden bij vullen van de volledige kolk of bij vullen van de opwaartse deelkolk.

6.6 Gevoeligheidsanalyse afvoercoëfficiënt, toegepaste simulatieprogramma en breekbalken

Bij de afleiding van de openingswetten uit paragraaf 6.5 is gebruik gemaakt van de maximale waarde van de afvoercoëfficiënt voor rechthoekige en cirkelvormige openingen bij afwezigheid van breekbalken, aangezien deze waarde van de afvoercoëfficiënt overeenkomt met de traagste opening van de hefschuiven. Daarbij is telkens de maximale waarde van de langskracht berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL vergeleken met de toelaatbare waarde voor de langskracht. Als gevoeligheidsanalyse worden met de openingswetten uit de vorige paragrafen een aantal simulaties uitgevoerd, waarbij volgende parameters gevarieerd worden:

1. De toegepaste waarde van de afvoercoëfficiënt: De minimale waarde van de afvoercoëfficiënt wordt beschouwd in plaats van de maximale waarde.
2. Definitie van de openingswetten op basis van VUL_SLUIS of LOCKFILL: In vorig hoofdstuk is de openingswet bepaald door de maximale waarde van de langskracht berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL te vergelijken met het criterium voor het betreffende schip. Met versie A van VUL_SLUIS worden globaal beduidend hogere langskrachten op het schip berekend, waardoor de openingswetten uit vorig hoofdstuk eigenlijk bepaald zijn met deze versie. Ter vergelijking wordt ook een simulatie uitgevoerd waarbij de openingswet is bepaald op basis van de langskrachten op het schip berekend met LOCKFILL.
3. De aanwezigheid van breekbalken: Alle simulaties in vorig hoofdstuk zijn uitgevoerd bij afwezigheid van breekbalken. Om die reden worden ook een aantal simulaties met breekbalken uitgevoerd. Hierbij wordt enkel een spreiding van de straal juist na de breekbalken gelijk aan 120 % toegepast en wordt dezelfde maximale waarde van de afvoercoëfficiënt beschouwd. Vooreerst wordt voor de betreffende openingswet nagegaan wat de langskrachten op het schip zijn indien breekbalken worden toegepast. Daarna wordt een aangepaste (snellere) openingswet gedefinieerd.

De gevoeligheidsanalyse in deze paragraaf wordt uitgevoerd voor simulatie VK_HSr_09 voor vullen van de volledige sluisolk (hefsnelheid hefschuiven: 0.0019 m/s), simulatie AFW_HSr_01 voor vullen van de afwaartse deelolk (hefsnelheid hefschuiven: 0.0036 m/s) en simulatie AFW_HSr_09 voor ledigen van de afwaartse deelolk (hefsnelheid hefschuiven: 0.0047 m/s). Uit de vorige paragrafen volgt dat de openingswet van de hefschuiven in het bovenhoofd namelijk bepaald wordt door vullen van de volledige olk, deze van het tussenhoofd door vullen van de afwaartse deelolk en deze van het benedenhoofd door ledigen van de afwaartse deelolk. Om die reden zijn deze simulaties beschouwd voor de gevoeligheidsanalyse in deze paragraaf. De nummering van de verschillende simulaties voor nivelleren van de volledige olk en nivelleren van de afwaartse deelolk volgt op deze uit de vorige paragrafen.

Voor vullen van de volledige olk zijn volgende simulaties uitgevoerd als gevoeligheidsanalyse:

- VK_HSr_31: Simulatie met de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt en een hefsnelheid van de hefschuiven gelijk aan 0.0019 m/s. Bij deze simulatie wordt de invloed van de afvoercoëfficiënt op de nivelleertijd nagegaan.
- VK_HSr_32: Simulatie waarbij de openingssnelheid van de hefschuiven bepaald is aan de hand van de vergelijking van de extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met LOCKFILL met het criterium. De extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met versie A van VUL_SLUIS is hierbij hoger dan het criterium.
- VK_HSr_33: Simulatie met een openingssnelheid van de hefschuiven gelijk aan 0.0019 m/s en aanwezigheid van breekbalken.
- VK_HSr_34: Simulatie met aanwezigheid van breekbalken met snellere openingswet van de hefschuiven.

Voor het nivelleren van de afwaartse deelsluis zijn volgende simulaties uitgevoerd als gevoeligheidsanalyse:

- AFW_HSr_13: Simulatie voor vullen met toepassing van de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt en een hefsnelheid van de hefschuiven gelijk aan 0.0036 m/s. Bij deze simulatie wordt de invloed van de afvoercoëfficiënt op de nivelleertijd voor vullen nagegaan.
- AFW_HSr_14: Simulatie voor vullen waarbij de openingssnelheid van de hefschuiven zo bepaald is dat de extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met LOCKFILL voldoet aan de maximaal toelaatbare waarde voor de langskracht. De extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met versie A van VUL_SLUIS is hierbij hoger dan het criterium.
- AFW_HSr_15: Simulatie voor vullen met een openingssnelheid van de hefschuiven gelijk aan 0.0019 m/s en aanwezigheid van breekbalken.
- AFW_HSr_16: Simulatie voor vullen met aanwezigheid van breekbalken en snellere (geoptimaliseerde) openingssnelheid van de hefschuiven.
- AFW_HSr_17: Simulatie voor ledigen met toepassing van de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt en een hefsnelheid 0.0047 m/s. Bij deze simulatie wordt de invloed van de afvoercoëfficiënt op de nivelleertijd voor ledigen nagegaan.

Bij de simulaties voor nivelleren van de afwaartse deelsluis wordt het volgende opgemerkt:

- Bij ledigen van een sluisluis worden door LOCKFILL en de beide versies van VUL_SLUIS langskrachten op het schip berekend, dewelke bijna gelijk zijn (De verschillen bedragen grootteorde 0.1 ‰). Om die reden is de simulatie waarbij de openingssnelheid van de hefschuiven zo bepaald is dat de extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met LOCKFILL voldoet aan de maximaal toelaatbare waarde voor de langskracht niet meer uitgevoerd voor ledigen van de afwaartse deelsluis.
- Bij ledigen bevinden de breekbalken zich aan voorhavenszijde van de sluisdeur (buiten de sluisluis). Deze beïnvloeden bijgevolg de langskrachten op het schip niet. Om die reden is voor ledigen van de afwaartse luis geen simulatie meer uitgevoerd met breekbalken.

Alle simulaties uit deze paragraaf zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL 5.03.00.

Tabel 23 vat de gegevens voor al deze simulaties nog eens samen. In deze tabel zijn in blauw de simulaties uit vorige paragrafen vermeld waarmee de resultaten vergeleken zijn. De nivelleertijd, de extreme waarde voor de stijgsnelheid en de extreme waarden voor de langskracht op het schip berekend met beide versies van het programma VUL_SLUIS en LOCKFILL worden gegeven in Tabel 24.

Tabel 23 – Definitie simulaties gevoeligheidsanalyse vullen volledige kolk en vullen/ledigen afwaartse kolk

Sluiskolk	Type	Naam	Schip	Afvoer-coëfficiënt	Openings-wet op basis van	Hefschuiven		Breek-balken
						Openingssnelheid	Openings-tijd	
Volledige kolk	Vullen	VK_HSr_09	CEMT klasse IV	Maximum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s	N
		VK_HSr_31	CEMT klasse IV	Minimum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s	N
		VK_HSr_32	CEMT klasse IV	Maximum	LOCKFILL	t > 0.0 s: 0.0034 m/s	265 s	N
		VK_HSr_33	CEMT klasse IV	Maximum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s	J (120%)
		VK_HSr_34	CEMT klasse IV	Maximum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0022 m/s	409 s	J (120%)
Afwaartse kolk	Vullen	AFW_HSr_01	CEMT Klasse II	Maximum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	237 s	N
		AFW_HSr_13	CEMT Klasse II	Minimum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250 s	N
		AFW_HSr_14	CEMT Klasse II	Maximum	LOCKFILL	t > 0.0 s: 0.0056 m/s	161 s	N
		AFW_HSr_15	CEMT Klasse II	Maximum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250 s	J (120%)
		AFW_HSr_16	CEMT Klasse II	Maximum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0040 m/s	225 s	J (120%)
	Ledigen	AFW_HSr_09	CEMT Klasse II	Maximum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0047 m/s	191 s	N
		AFW_HSr_17	CEMT Klasse II	Minimum	VUL SLUIS	t > 0.0 s: 0.0047 m/s	191 s	N

Afstand schip tot sluisdeur bedraagt altijd 5 m; blauwe tekst: referentiesimulatie

Tabel 24 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid, minimale en maximale waarde van de langskracht voor simulaties gevoeligheidsanalyse nivelleren volledige kolk en nivelleren afwaartse deelkolk

Type	Naam	Criterium langskracht	Nivelleer-tijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Langskracht VUL_SLUIS release 01.42.vA.08		Langskracht VUL_SLUIS release 01.42.vB.08		Langskracht LOCKFILL	
					min.	max	min.	max	min.	max.
		%	min	m/s	%	%	%	%	%	%
Vullen volledige kolk	VK_HSr_09	1.1	8.2	0.008	-1.05	0.43	-0.50	0.45	-0.57	0.46
	VK_HSr_31	1.1	8.9	0.007	-0.89	0.40	-0.42	0.42	-0.49	0.42
	VK_HSr_32	1.1	6.5	0.011	-1.90	0.68	-0.91	0.74	-1.03	0.77
	VK_HSr_33	1.1	8.2	0.008	-0.90	0.44	-0.47	0.46	-0.51	0.47
	VK_HSr_34	1.1	7.7	0.008	-1.06	0.50	-0.55	-0.52	-0.59	0.53
Vullen afwaartse deelkolk	AFW_HSr_01	1.5	4.5	0.014	-1.50	0.50	-0.73	0.52	-0.83	0.51
	AFW_HSr_13	1.5	4.9	0.013	-1.30	0.46	-0.65	0.48	-0.71	0.47
	AFW_HSr_14	1.5	3.8	0.017	-2.32	0.73	-1.12	0.77	-1.34	0.76
	AFW_HSr_15	1.5	4.6	0.014	-1.30	0.49	-0.70	0.51	-0.74	0.51
	AFW_HSr_16	1.5	4.3	0.015	-1.50	0.55	-0.81	0.57	-0.88	0.57
Ledigen afwaartse deelkolk	AFW_HSr_09	2.0	4.0	-0.016	-0.37	0.48	-0.37	0.48	-0.36	0.46
	AFW_HSr_17	2.0	4.4	-0.015	-0.34	0.35	-0.34	0.35	-0.34	0.35

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium; blauwe tekst: referentiesimulatie.

Uit Tabel 24 volgt het volgende:

- Het toepassen van de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt zorgt zowel bij vullen van de volledige kolk als bij vullen en ledigen van de afwaartse kolk voor een toename van de nivelleertijd. De nivelleertijd neemt bij vullen van de volledige kolk toe van 8.2 min naar 8.9 min, bij vullen van de afwaartse deerkolk van 4.5 min naar 4.9 min en bij ledigen van de afwaartse deerkolk van 4.0 min naar 4.4 min. Deze nivelleertijden blijven nog lager dan de maximale waarde van 10 min. Hierbij moet opgemerkt worden dat bij het toepassen van de hefsnelheid van de hefschuiven van het bovenhoofd van 0.0013 m/s (zie paragraaf 6.2), waarbij rekening gehouden is met het criterium voor de stijgsnelheid voor recreatievaart, reeds een nivelleertijd berekend wordt gelijk aan 9.9 min voor vullen van de volledige kolk. Voor deze conditie kan bijgevolg het toepassen van de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt van de openingen leiden tot een beperkte overschrijding van de maximale toelaatbare waarde van de nivelleertijd van 10 min. Bij toepassen van de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt nemen de berekende langskrachten op het schip in de kolk af. Voor vullen van de volledige kolk daalt de extreme waarde van -1.05 ‰ naar -0.89 ‰, bij vullen van de afwaartse kolk van 1.50 ‰ naar 1.30 ‰ en bij ledigen van de afwaartse kolk van 0.48 ‰ naar 0.35 ‰.
- Indien de openingswet van de hefschuiven bepaald wordt aan de hand van de extreme waarde van de langskracht berekend met LOCKFILL, kan een beduidend snellere openingssnelheid van de hefschuiven bekomen worden. Bij vullen van de volledige kolk neemt de hefsnelheid van de hefschuiven toe van 0.0019 m/s naar 0.0034 m/s en bij vullen van de afwaartse kolk van 0.0036 m/s naar 0.0056 m/s. De openingstijd van de hefschuiven daalt bij vullen van de volledige kolk van 474 s naar 265 s en bij vullen van de afwaartse kolk van 250 s naar 161 s. Hierdoor daalt ook de nivelleertijd bij vullen van de volledige kolk van 8.2 min naar 6.5 min en bij vullen van de afwaartse kolk van 4.5 min naar 3.8 min. Echter de extreme waarde van de stijgsnelheid stijgt bij vullen van de volledige kolk van 0.008 m/s naar 0.011 m/s. Bij vullen van de afwaartse kolk stijgt de extreme waarde van de stijgsnelheid van 0.014 m/s naar 0.017 m/s. Hierbij wordt opgemerkt dat de hefsnelheid van de hefschuiven bij vullen van de afwaartse kolk beperkt is door de extreme waarde van de stijgsnelheid en niet door de langskrachten op het schip.
- Het toepassen van breekbalken geeft aanleiding tot een beperkte verlaging van de berekende langskrachten op het schip. De extreme waarde van de langskracht daalt bij vullen van de volledige kolk van 1.05 ‰ naar 0.90 ‰ en bij vullen van de afwaartse kolk van 1.50 ‰ naar 1.30 ‰. Bijgevolg kan slechts een beperkt snellere opening van de hefschuiven bekomen worden. De hefsnelheid van de hefschuiven stijgt bij vullen van de volledige kolk van 0.0019 m/s naar 0.0022 m/s en de openingstijd neemt af van 474 s naar 409 s. Bij vullen van de afwaartse kolk stijgt de hefsnelheid van 0.0036 m/s naar 0.0040 m/s en neemt de openingstijd af van 250 s naar 225 s. Dit heeft tot gevolg dat de nivelleertijd bij vullen van de volledige kolk daalt van 8.2 min naar 7.7 min bij een gelijk blijvende waarde voor de extreme waarde van de stijgsnelheid. Bij vullen van de afwaartse kolk daalt de nivelleertijd van 4.5 min naar 4.3 min en stijgt de extreme waarde van de stijgsnelheid van 0.014 m/s naar 0.015 m/s.

6.7 Gevoeligheidsanalyse afwaarts waterpeil

De simulaties in hoofdstuk 5 en in paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 zijn uitgevoerd voor het toekomstig verlaagd waterpeil in het afwaarts pand (+3.45 mTAW). Door de opdrachtgever wordt aangegeven dat deze verlaging vermoedelijk niet in de eerstvolgende jaren na ingebruikname van de sluis doorgevoerd wordt. Om die reden is, als gevoeligheidsanalyse, nagegaan wat de invloed is van het toepassen van het 0.40 m hoger huidig waterpeil van +3.82 mTAW in het afwaarts pand. Hierbij zijn voor vullen en ledigen van de volledige kolk, de opwaartse en de afwaartse deelkolk alle simulaties uit paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 opnieuw uitgevoerd met het hogere afwaarts waterpeil. Indien bij de simulaties uit paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 voor recreatievaart een grotere afstand tussen boeg van het schip en sluisdeur is beschouwd om te voldoen aan het criterium voor de langskracht, is deze afstand ook aangepast zodat voor deze simulatie juist voldaan is aan het betreffende criterium. Daarnaast is voor vullen van de volledige kolk met recreatievaart in de kolk en het schip op 14 m verwijderd van de sluisdeur ook één simulatie uitgevoerd met breekbalken (simulatie VK_HSr_37). Op deze wijze zijn voor nivelleren van de volledige kolk simulaties VK_HSr_35 tot en met VK_HSr_43 uitgevoerd, voor nivelleren van de opwaartse deelkolk simulaties OPW_HSr_13 tot en met OPW_HSr_20 en voor nivelleren van de afwaartse deelkolk AFW_HSr_18 tot en met AFW_HSr_25.

Alle simulaties uit deze paragraaf zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL 5.03.00. De resultaten van deze simulaties zijn gegeven in Tabel 48 in Bijlage 1. Aangezien deze simulaties een gevoeligheidsanalyse betreffen, is voor deze simulaties in Bijlage 2 geen grafische voorstelling gegeven van de variatie in de tijd van de waterstand in de sluisdeur, het debiet door de openingen en de langskracht op het schip.

Tabel 25 geeft een overzicht van de invloed van het hogere afwaarts waterpeil op de nivelleertijd, de extreme waarde van het debiet door de nivelleeropeningen en de extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk. Bij alle uitgevoerde simulaties is voldaan aan het criterium voor de langskracht op het betreffende schip in de kolk. Om die reden worden de berekende langskrachten op het schip niet vermeld in Tabel 25. Uit deze tabel volgt het volgende:

- De verhoging van het afwaarts waterpeil naar +3.82 mTAW zorgt voor een verlaging van de nivelleertijd van 0.3 à 0.4 min (18 à 24 s) voor nivelleren van de volledige kolk, 0.1 à 0.3 min (6 à 18 s) voor nivelleren van de opwaartse deelkolk en 0.2 à 0.3 min (12 à 18 s) voor nivelleren van de afwaartse deelkolk.
- De verlaging van de nivelleertijd voor vullen van de volledige kolk is dezelfde als deze berekend voor ledigen van de volledige kolk. Bij vullen van de opwaartse en de afwaartse deelkolk is de verlaging van de nivelleertijd beperkt (maximaal 6 s) groter dan bij ledigen.
- De extreme waarde van het debiet neemt bij een verhoging van het afwaarts waterpeil naar +3.82 mTAW af met 0.4 à 1.9 m³/s. De extreme waarde van de stijgsnelheid neemt zeer beperkt af (met maximaal 0.001 m/s).

Voor vullen van de kolk met recreatievaart in de kolk is een afstand tussen boeg van het schip en de sluisdeur beschouwd, die groter is dan de minimale waarde van 5 m. Tabel 26 vergelijkt zowel voor beroepsvaart als voor recreatievaart de beschouwde afstand tussen boeg van het schip en sluisdeur voor alle uitgevoerde simulaties. Uit deze tabel volgt dat bij ledigen van de kolk altijd de minimale afstand van 5 m tussen boeg van het schip en de sluisdeur beschouwd is, alsook voor vullen van de kolk met beroepsvaart in de kolk. Dit wordt niet beïnvloed door de verhoging van het afwaarts waterpeil. Voor vullen van de volledige kolk met recreatievaart in de kolk zorgt de verhoging van het afwaarts waterpeil voor een verlaging van de minimale afstand tussen boeg van het schip en de sluisdeur tot 14 m bij toepassing van de openingswetten uit het eerste ontwerp en tot 10 m bij toepassing van de openingswetten rekening houdend met de stijgsnelheid voor recreatievaart. Analooch daalt de minimale afstand tussen boeg van het schip en sluisdeur voor vullen van opwaartse, respectievelijk afwaartse kolk tot 6 m, respectievelijk 14 m bij toepassing van de openingswetten uit het eerste ontwerp en tot 5 m, respectievelijk 6 m bij toepassing van de openingswetten rekening houdend met de stijgsnelheid voor recreatievaart.

Tabel 25 – Invloed verhoging afwaarts waterpeil op nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse en afwaartse deelkolk

	Sluishoofd	Waterpeil afwaarts	Eerste ontwerp			Rekening houdend met stijgsnelheid recreatievaart		
			Nivelleer-tijd	Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Nivelleer-tijd	Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid
Vullen	Volledige kolk	+3.45 mTAW	8.2 min	10.0 m ³ /s	0.008 m/s	9.9 min	8.2 m ³ /s	0.006 m/s
		+3.82 mTAW	7.9 min	8.8 m ³ /s	0.007 m/s	9.5 min	7.2 m ³ /s	0.006 m/s
	Opwaartse deelkolk	+3.45 mTAW	5.4 min	6.5 m ³ /s	0.011 m/s	6.5 min	5.4 m ³ /s	0.010 m/s
		+3.82 mTAW	5.2 min	5.7 m ³ /s	0.010 m/s	6.2 min	4.8 m ³ /s	0.008 m/s
	Afwaartse deelkolk	+3.45 mTAW	4.5 min	10.3 m ³ /s	0.014 m/s	6.9 min	6.6 m ³ /s	0.009 m/s
		+3.82 mTAW	4.3 min	9.1 m ³ /s	0.012 m/s	6.6 min	5.8 m ³ /s	0.008 m/s
Ledigen	Volledige kolk	+3.45 mTAW	5.9 min	-15.8 m ³ /s	-0.012 m/s	8.1 min	-10.2 m ³ /s	-0.008 m/s
		+3.82 mTAW	5.6 min	-13.9 m ³ /s	-0.011 m/s	7.7 min	-9.0 m ³ /s	-0.007 m/s
	Opwaartse deelkolk	+3.45 mTAW	3.9 min	-9.0 m ³ /s	-0.016 m/s	6.0 min	-5.8 m ³ /s	-0.010 m/s
		+3.82 mTAW	3.8 min	-8.6 m ³ /s	-0.014 m/s	5.8 min	-5.1 m ³ /s	-0.009 m/s
	Afwaartse deelkolk	+3.45 mTAW	4.0 min	-11.8 m ³ /s	-0.016 m/s	6.0 min	-7.6 m ³ /s	-0.010 m/s
		+3.82 mTAW	3.8 min	-10.4 m ³ /s	-0.014 m/s	5.8 min	-6.7 m ³ /s	-0.009 m/s

Tabel 26 – Invloed verhoging afwaarts waterpeil op afstand tussen boeg schip en sluisdeur bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 20 voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse en afwaartse deelkolk.

	Sluishoofd	Waterpeil afwaarts	Eerste ontwerp		Rekening houdend met stijgsnelheid recreatievaart	
			Beroepsvaart*	Recreatievaart	Beroepsvaart*	Recreatievaart
Vullen	Volledige kolk	+3.45 mTAW	5 m	19 m	5 m	12 m
		+3.82 mTAW	5 m	14 m	5 m	10 m
	Opwaartse deelkolk	+3.45 mTAW	5 m	8 m	5 m	5 m
		+3.82 mTAW	5 m	6 m	5 m	5 m
	Afwaartse deelkolk	+3.45 mTAW	5 m	18 m	5 m	8 m
		+3.82 mTAW	5 m	14 m	5 m	6 m
Ledigen	Volledige kolk	+3.45 mTAW	5 m	5 m	5 m	5 m
		+3.82 mTAW	5 m	5 m	5 m	5 m
	Opwaartse deelkolk	+3.45 mTAW	5 m	5 m	5 m	5 m
		+3.82 mTAW	5 m	5 m	5 m	5 m
	Afwaartse	+3.45 mTAW	5 m	5 m	5 m	5 m

* = Schip CEMT klasse IV voor volledige kolk, schip CEMT klasse I voor opwaartse deelkolk en schip CEMT klasse II voor afwaartse deelkolk.

6.8 Gevoeligheidsanalyse versie VUL_SLUIS

De simulaties in hoofdstuk 5 en in paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 en VUL_SLUIS release 01.42.vB.08. Sinds juni 2017, i.e. na uitvoeren van de simulaties in hoofdstuk 5 en in paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 van dit rapport maar voorafgaand aan het uitvoeren van de simulaties in hoofdstuk 7 en hoofdstuk 8 van dit rapport, is VUL_SLUIS release 01.54.00 beschikbaar (zie paragraaf 4.1).

Om de invloed van de nieuwe versie van VUL_SLUIS op de resultaten te onderzoeken zijn alle simulaties uit paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 opnieuw uitgevoerd met deze nieuwe release van VUL_SLUIS. Hierbij zijn de openingswetten van de hefschuiven uit Tabel 20 in paragraaf 6.5 toegepast. Indien bij toepassen van de nieuwe release van VUL_SLUIS langskrachten op het schip in de kolk berekend worden, die lager zijn dan het betreffende criterium, is de openingswet van de hefschuiven niet aangepast, omwille van de vergelijkbaarheid met de reeds uitgevoerde simulaties met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL. Voor een aantal simulaties voor vullen van de kolk met recreatievaart in de kolk was met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 een grotere afstand tussen schip en sluisdeur nodig om ervoor te zorgen dat de berekende langskrachten op het schip voldeden aan het criterium. Voor deze simulaties is nagegaan of de minimale afstand tussen boeg van het schip en sluisdeur verkleind kon worden. Indien een simulatie uit paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 niet gewijzigd is en enkel opnieuw uitgevoerd wordt met de nieuwe release van VUL_SLUIS, dan wordt in deze paragraaf de nummering van deze simulaties uit paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 eenvoudigweg overgenomen. Indien bij recreatievaart in de kolk de afstand tussen boeg van het schip en sluisdeur gewijzigd is, dan krijgt de simulatie een nieuwe volgnummer, volgend op deze uit paragraaf 6.7 (simulatie VK_HSr_44, OPW_HSr_21, AFW_HSr_26 en AFW_HSr_27). Om de invloed van breekbalken na te gaan zijn ook simulaties VK_HSr_45, VK_HSr_46, OPW_HSr_22, OPW_HSr_23, AFW_HSr_28 en AFW_HSr_29 uitgevoerd. Voor de simulaties met breekbalken is een spreiding van de straal na de breekbalken gelijk aan 120 % beschouwd, is eenzelfde hefsnelheid beschouwd als voor de simulaties zonder breekbalken en is de afstand tussen schip en sluisdeur gelijk aan 5.0 m. Een overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 49 en Tabel 50 in Bijlage 1. Aangezien de aanpassingen aan VUL_SLUIS release 01.54.00 enkel de berekening van de langskracht op het schip betreffen, worden in deze tabellen voor al deze simulaties de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, VUL_SLUIS release 01.42.vB.08, LOCKFILL en VUL_SLUIS release 01.54.00 met elkaar vergeleken. Merk op dat de aanpassingen aan VUL_SLUIS release 01.54.00 geen invloed heeft op de berekende waarde van de nivelleertijd, de extreme waarde van het debiet door de openingen en de extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk, waardoor voor deze parameters slechts een waarde gegeven wordt in de tabellen in Bijlage.

Voor vullen van de kolk volgt uit Tabel 49 en Tabel 50 in Bijlage 1 dat het positieve extremum van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 niet verschilt van deze berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 en VUL_SLUIS release 01.42.vB.08. Het met VUL_SLUIS release 01.54.00 berekende negatieve extremum van de langskracht is (in absolute waarde) beduidend lager dan dit berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 en iets groter dan dit berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL. Voor ledigen van de sluis kolk worden beperkte verschillen berekend tussen het positieve en negatieve extremum van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en dit berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 en VUL_SLUIS release 01.42.vB.08.

Tabel 27 vergelijkt de extreme waarde van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, LOCKFILL en VUL_SLUIS release 01.54.00. Aangezien de extreme waarde van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 altijd kleiner is dan deze berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 is deze waarde niet vermeld in de tabel.

Tabel 27 – Vergelijking extreme waarde van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.00, LOCKFILL 5.03.00 en VUL_SLUIS 01.54.00 uit simulaties gevoeligheidsanalyse voor nivelleren volledige kolk, opwaartse deelskolk en afwaartse deelskolk

Type	Naam	Openingswet	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breek- balken	Criterium langskracht	Extreme waarde langskracht		
							VUL_SLUIS 01.42.vA.08	LOCKFILL 5.03.00	VUL_SLUIS 01.54.00
				m	J/N	‰	‰	‰	‰
Vullen volledige kolk	VK_HSr_09	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	CEMT IV	5	N	1.1	-1.05	-0.57	-0.72
	VK_HSr_10	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	CEMT III	5	N	1.5	-1.25	-0.68	-0.92
	VK_HSr_11	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	CEMT II	5	N	1.5	-1.37	-0.73	-1.00
	VK_HSr_12	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	Recreatie	5	N	3.0	-9.96	-5.21	-7.35
	VK_HSr_44	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	-vaart	9	N	3.0	-	-	-2.85
	VK_HSr_45	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	CEMT IV	5	J (120%)	1.1	-	-	-0.54
	VK_HSr_46	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	Recreatie -vaart	5	J (120%)	3.0	-	-	-6.21
Ledigen volledige kolk	VK_HSr_27	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	CEMT IV	5	N	1.5	0.44	0.50	0.43
	VK_HSr_28	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	CEMT III	5	N	2.0	0.44	0.51	0.43
	VK_HSr_29	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	CEMT II	5	N	2.0	0.36	0.39	0.36
	VK_HSr_30	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	Recreatie -vaart	5	N	3.0	0.82	0.70	0.77
Vullen opwaartse deelskolk	OPW_HSr_01	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	CEMT I	5	N	1.5	-0.71	-0.39	-0.56
	OPW_HSr_03	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	Recreatie -vaart	5	N	3.0	-4.21	-2.22	-3.25
	OPW_HSr_21	t > 0.0 s: 0.0019 m/s		6	N	3.0	-	-	-2.65
	OPW_HSr_22	t > 0.0 s: 0.0019 m/s		5	J (120%)	3.0	-	-	-2.75
	OPW_HSr_23	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	CEMT I	5	J (120%)	1.5	-	-	-0.47
Ledigen opwaartse deelskolk	OPW_HSr_11	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	CEMT I	5	N	2.0	0.18	0.19	0.18
	OPW_HSr_12	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	Recreatie -vaart	5	N	3.0	0.50	0.47	0.52
Vullen afwaartse deelskolk	AFW_HSr_05	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	CEMT II	5	N	1.5	-1.50	-0.83	-0.46
	AFW_HSr_26	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	Recreatie -vaart	5	N	3.0	-	-	-3.34
	AFW_HSr_27	t > 0.0 s: 0.0015 m/s		6	N	3.0	-	-	-2.51
	AFW_HSr_28	t > 0.0 s: 0.0015 m/s		5	J (120%)	3.0	--	-	-2.83
	AFW_HSr_29	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	CEMT II	5	J (120%)	1.5	-	-	-0.37
Ledigen afwaartse deelskolk	AFW_HSr_11	t > 0.0 s: 0.0020 m/s	CEMT II	5	N	2.0	0.28	0.29	0.27
	AFW_HSr_12	t > 0.0 s: 0.0020 m/s	Recreatie -vaart	5	N	3.0	0.65	0.61	0.71

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium; - = simulatie niet uitgevoerd.

Uit Tabel 27 volgt het volgende:

- Voor vullen van de kolk is de extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 (in absolute waarde) beperkt groter dan de waarde berekend met LOCKFILL en beduidend lager dan de waarde berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08. Voor ledigen van de kolk verschilt de extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 (in absolute waarde) beperkt van deze berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS release 01.42.vA.08.

- Om te voldoen aan het criterium voor de langskrachten op het schip voor recreatievaart werd in paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 voor vullen van de volledige kolk, respectievelijk vullen van de opwaartse en de afwaartse kolk, besloten dat het recreatievaarschip in de kolk afgemeerd dient te worden op 19 m, respectievelijk 8 m verwijderd van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur. Bij toepassen van VUL_SLUIS release 01.54.00 worden voor vullen beduidend lagere langskrachten op het schip berekend, waardoor deze minimale afstand tussen boeg van het schip en sluisdeur afneemt tot 9 m voor vullen van de volledige kolk en tot 6 m voor vullen van de opwaartse en de afwaartse deelkolk.
- Het toepassen van breekbalken zorgt er bij toepassen van VUL_SLUIS release 01.54.00 voor dat zowel voor vullen als voor ledigen van de volledige kolk, de opwaartse en de afwaartse deelkolk, zowel voor beroepsvaart als voor recreatievaart kan voldaan worden aan het criterium van de langskracht op het schip in de kolk wanneer het schip afgemeerd is op de minimale afstand van 5 m van de sluisdeur.

6.9 Samenvatting resultaten gevoeligheidsanalyse

Uit de in paragrafen 6.6, 6.7 en 6.8 uitgevoerde gevoeligheidsanalyse wordt het volgende besloten:

- Het toepassen van de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt zorgt zowel bij vullen van de volledige kolk als bij vullen en ledigen van de afwaartse kolk voor een toename van de nivelleertijd met 0.4 min à 0.7 min (24 à 42 s). Bij toepassen van de minimale waarde van de afvoercoëfficiënt nemen de berekende langskrachten op het schip in de kolk beperkt af.
- Indien de openingswet van de hefschuiven bepaald wordt aan de hand van de extreme waarde van de langskracht berekend met LOCKFILL, kan een beduidend snellere openingssnelheid van de hefschuiven bekomen worden, waardoor de nivelleertijd afneemt. Echter door de snellere opening van de hefschuiven neemt de extreme waarde van de stijgsnelheid van de kolk toe. Hierbij wordt opgemerkt dat de hefsnelheid van de hefschuiven bij vullen van de afwaartse kolk beperkt is door de extreme waarde van de stijgsnelheid en niet door de langskrachten op het schip.
- Het toepassen van breekbalken geeft aanleiding tot een beperkte verlaging van de berekende langskrachten op het schip. Bijgevolg kan slechts een beperkt snellere opening van de hefschuiven bekomen worden. Dit heeft een beperkt lagere nivelleertijd tot gevolg en een beperkt hogere waarde van de extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk.
- De verhoging van het afwaarts waterpeil naar +3.82 mTAW zorgt voor een beperkte verlaging van de nivelleertijd met 0.1 à 0.4 min (6 à 24 s). Hierbij neemt de extreme waarde van het debiet af met 0.4 à 1.9 m³/s en neemt de extreme waarde van de stijgsnelheid zeer beperkt af (met maximaal 0.001 m/s).
- Voor vullen van de volledige kolk, respectievelijk de opwaartse en de afwaartse kolk met recreatievaart in de kolk zorgt de verhoging van het afwaarts waterpeil naar +3.82 mTAW voor een verlaging van de minimale afstand tussen boeg van het schip en de sluisdeur tot 14 m, respectievelijk 6m en 14 m bij toepassing van de openingswetten uit het eerste ontwerp en tot 10 m, respectievelijk 5 m en 6 m bij toepassing van de openingswetten rekening houdend met de stijgsnelheid voor recreatievaart. Bij vullen van de (volledige, opwaartse en afwaarts) kolk met beroepsvaart in de kolk en bij ledigen van de (volledige, opwaartse en afwaarts) kolk blijft de minimale afstand van 5 m (gelijk aan de stopstreepafstand) behouden bij een verhoging van het afwaarts waterpeil naar +3.82 mTAW.
- Het toepassen van VUL_SLUIS release 01.54.00 heeft tot gevolg dat bij vullen van de kolk het positieve extremum van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 niet verschilt van deze berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 en VUL_SLUIS release 01.42.vB.08. Het met VUL_SLUIS release 01.54.00 berekende negatieve extremum van de langskracht is (in absolute waarde) beduidend lager dan dit berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 en iets groter dan dit berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vB.08 en LOCKFILL. Voor ledigen van de sluis kolk worden beperkte verschillen berekend tussen het positieve en negatieve extremum van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en dit berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08 en VUL_SLUIS release 01.42.vB.08.
- Voor vullen van de kolk is de extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 (in absolute) waarde beperkt groter dan de waarde berekend met LOCKFILL en beduidt lager dan de waarde berekend met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08. Voor ledigen van de kolk verschilt de extreme waarde van de langskracht op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 (in absolute) waarde beperkt van deze berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS release 01.42.vA.08.
- Doordat bij toepassen van VUL_SLUIS release 01.54.00 beduidend lagere extreme waarden van de langskracht op het schip berekend worden dan met VUL_SLUIS release 01.42.vA.08, neemt de minimale afstand tussen boeg van het schip en de sluisdeur bij vullen van de kolk met recreatievaart in de kolk af tot 9 m voor vullen van de volledige kolk en tot 6 m voor vullen van de opwaartse en de afwaartse deelkolk.

7 Resultaten tweede reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem

7.1 Algemeen

Na het uitvoeren van de simulaties uit hoofdstuk 6 en overleg met de opdrachtgever werd een nieuwe reeks simulaties uitgevoerd. Voor het uitvoeren van deze simulaties werden in overleg met de opdrachtgever en EBS de volgende randvoorwaarden beschouwd:

- De simulaties worden uitgevoerd met één openingswet voor het bovenhoofd, één openingswet voor het benedenhoofd en één openingswet voor het tussenhoofd. In tegenstelling tot de simulaties uit hoofdstuk 6 wordt voor vullen en ledigen van een kolk via één bepaald sluishoofd altijd dezelfde openingswet toegepast. Deze openingswet moet zowel toepasbaar zijn voor recreatievaart als voor beroepsvaart in de kolk. Er wordt geen onderscheid gemaakt in openingswet tussen deze beide scheepstypes. De openingssnelheid mag hierbij nog wel verschillen per sluishoofd. Dit betekent dat het criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk voor recreatievaart bepalend is.
- Zowel bij simulaties met het beroepsvaart als bij simulaties met recreatievaart in de kolk wordt het schip altijd afgemeerd ter plaatse van de stopstreep, i.e. op 5 m van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur.
- De simulaties worden uitgevoerd met een waterpeil in het afwaarts pand gelijk aan het huidig waterpeil van +3.82 mTAW.
- De simulaties worden uitgevoerd met rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven. Er worden 6 openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m voorzien. Het peil van de onderzijde van de openingen bevindt zich op +0.10 mTAW. Er worden zowel simulaties uitgevoerd bij afwezigheid van breekbalken als simulaties bij aanwezigheid van breekbalken afwaarts van de opening. Bij simulaties zonder breekbalken wordt de sectie van de straal afwaarts van de openingen gelijk beschouwd aan de maximale sectie van de openingen opwaarts. Bij toepassen van breekbalken wordt een toename van de hoogte van de straal afwaarts van de openingen met 140 % beschouwd (zie Tabel 11 uit paragraaf 4.3 voor beschouwde oppervlakte opening na breekbalken en peil bovenzijde straal na breekbalken).
- Wat de afvoercoëfficiënt betreft wordt voor alle simulaties, i.e. zowel zonder breekbalken als met breekbalken, de maximale waarde uit Tabel 10 (paragraaf 4.2.3) beschouwd.

Tabel 28 geeft een overzicht van de karakteristieke afmetingen van het geselecteerde nivelleersysteem.

De simulaties zijn enkel met VUL_SLUIS release 01.54.00 uitgevoerd en niet met LOCKFILL, aangezien dit nog niet de finale simulaties met het nivelleersysteem betreffen.

Tabel 28 – Geselecteerd nivelleersysteem voor ontwerp

Nivelleersysteem	Opening opwaarts	Sectie straal afwaarts openingen	Peil onderzijde openingen
Rechthoekige openingen met hefschuiven	6 x 0.90 m x 0.90 m	6 x 0.90 m x 0.90 m (zonder breekbalken) 6 x 0.90 m x 1.26 m (met breekbalken en toename sectie met 140 %)	+0.10 mTAW

Bij het uitvoeren van de simulaties in hoofdstuk 6 is het volgende vastgesteld:

- Bij vullen van de opwaartse deerkolk is de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bepalend bij het opstellen van de openingswet. Bij vullen van de afwaartse deerkolk en bij vullen van de volledige kolk is de langskracht op het schip bepalend. Bij ledigen is altijd de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bepalend bij het opstellen van de openingswet.
- Bij toepassen van één openingswet voor het bovenhoofd, i.e. voor vullen van de volledige kolk en voor vullen van de opwaartse deerkolk, is de langskracht op het recreatievaartschip in de kolk bij vullen van de volledige kolk meer bepalend dan de langskracht op het recreatievaartschip in de kolk bij vullen van de opwaartse deerkolk.
- Bij toepassen van één openingswet voor het benedenhoofd, i.e. voor ledigen van de volledige kolk en voor ledigen van de afwaartse kolk, is de stijgsnelheid van het waterpeil bij ledigen van de afwaartse kolk meer bepalend voor het bepalen van de openingssnelheid van de schuiven dan de stijgsnelheid van het waterpeil bij ledigen van de volledige kolk.
- Bij toepassen van één openingswet voor het tussenhoofd, i.e. voor vullen van de afwaartse deerkolk en ledigen van de opwaartse deerkolk, is de berekende langskracht op het recreatievaartschip in de kolk bij vullen van de afwaartse deerkolk meer bepalend dan de stijgsnelheid van het waterpeil bij ledigen van de opwaartse deerkolk.

Rekening houdend met deze vaststellingen is volgende werkwijze toegepast voor het opstellen van de openingswet voor elk sluishoofd:

1) Bovenhoofd:

Bij het opstellen van de openingswet voor het bovenhoofd wordt de openingswet eerst gewijzigd totdat de langskracht op het recreatievaartschip in de kolk bij vullen van de volledige kolk voldoet aan het criterium. Daarna worden, ter controle, de simulaties uitgevoerd voor vullen van de volledige kolk met het schip CEMT klasse IV in de kolk, vullen van de opwaartse deerkolk met het schip CEMT klasse I in de kolk en vullen van de opwaartse deerkolk met recreatievaart in de kolk.

2) Benedenhoofd:

Vooreerst wordt de openingswet gewijzigd totdat voor ledigen van de afwaartse deerkolk de daalsnelheid van het waterpeil in de kolk voldoet aan het criterium voor recreatievaart. Daarna worden, ter controle, met deze openingswet de simulaties voor ledigen van de volledige kolk met schip CEMT IV, ledigen van de volledige kolk met recreatievaart in de kolk en ledigen van de afwaartse deerkolk met schip CEMT II in de kolk uitgevoerd.

3) Tussenhoofd:

Vooreerst wordt de openingswet gewijzigd totdat voor vullen van de afwaartse deerkolk de langskracht op het recreatievaartschip in de kolk voldoet aan het betreffende criterium. Daarna worden, ter controle, met deze openingswet de simulaties voor vullen van de afwaartse deerkolk met schip CEMT II in de kolk, ledigen van de opwaartse deerkolk met schip CEMT I in de kolk en ledigen van de opwaartse deerkolk met het recreatievaartschip in de kolk uitgevoerd.

Deze werkwijze is toegepast bij het uitvoeren van de simulaties voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse deerkolk en de afwaartse deerkolk. In paragrafen 7.2 (nivelleren volledige kolk), 7.3 (nivelleren opwaartse kolk) en 7.4 (nivelleren afwaartse kolk) zijn de resultaten van deze simulaties beknopt beschreven. Paragraaf 7.5 vat de resultaten van deze simulaties en de in dit hoofdstuk afgeleid openingswetten voor de schuiven in het bovenhoofd, het tussenhoofd en het benedenhoofd nog eens samen.

Aangezien deze simulaties nog niet de finale simulaties met het beschouwde nivelleersysteem betreffen, worden in deze paragrafen enkel de tabellen met het overzicht van de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht beschreven. Een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de berekende debieten door de nivelleeropening en de berekende langskrachten op het schip in de kolk wordt niet gegeven in deze paragrafen, noch in Bijlage 2.

7.2 Simulaties nivelleren volledige kolk

Deze paragraaf beschrijft de simulaties die voor nivelleren van de volledige kolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de volledige kolk is het schip CEMT klasse IV. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 51 in Bijlage 1. Tabel 29 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen.

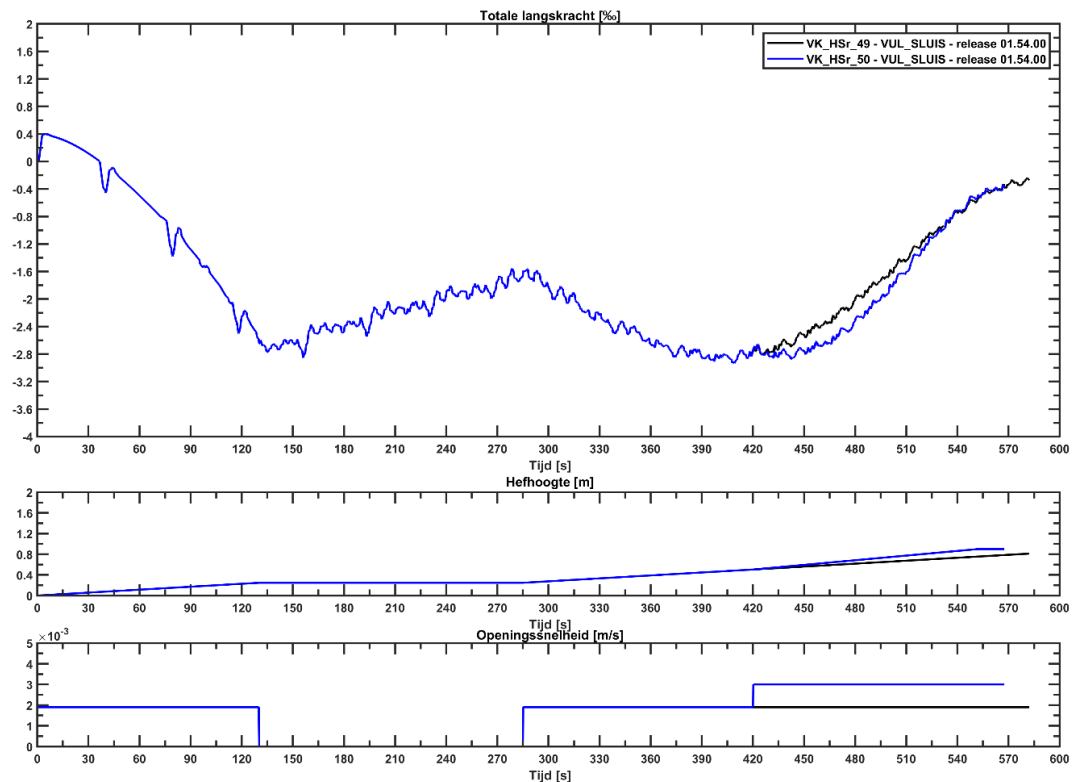
Tabel 29 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor tweede reeks simulaties nivelleren volledige kolk

Type	Naam	Hefschuiven		Schip	Breekbalken	Criterium langskracht	Nivelleertijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
		Openingssnelheid	Openings-tijd						
Vullen	VK_HSr_47	$t > 0.0$ s : 0.0019 m/s	474 s	CEMT IV	N	1.1 ‰	7.9 min	0.006 m/s	-0.57 ‰
	VK_HSr_48	$t > 0.0$ s : 0.0019 m/s	474 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	7.9 min	0.006 m/s	-5.62 ‰
	VK_HSr_49	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 285.0 s : 0.0000 m/s t > 285.1 s : 0.0019 m/s	629 s	CEMT IV	N	1.1 ‰	9.7 min	0.005 m/s	0.34 ‰
	VK_HSr_50	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 285.0 s : 0.0000 m/s t > 285.1 s : 0.0019 m/s	629 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	9.7 min	0.005 m/s	-2.93 ‰
	VK_HSr_51	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 285.0 s : 0.0000 m/s 285.1 s < t < 420.0 s : 0.0019 m/s t > 420.1 s : 0.0030 m/s	552 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	9.5 min	0.005 m/s	-2.93 ‰
	VK_HSr_52	0.0 s < t < 140.0 s : 0.0019 m/s 140.1 s < t < 250.0 s : 0.0000 m/s t > 250.1 s : 0.0019 m/s	583 s	CEMT IV	J (140 ‰)	1.1 ‰	9.1 min	0.005 m/s	0.34 ‰
	VK_HSr_53	0.0 s < t < 140.0 s : 0.0019 m/s 140.1 s < t < 250.0 s : 0.0000 m/s t > 250.1 s : 0.0019 m/s	583 s	Recreatievaart	J (140 ‰)	3.0 ‰	9.1 min	0.005 m/s	-2.90 ‰
Ledigen	VK_HSr_54	$t > 0.0$ s : 0.0025 s	360 s	CEMT IV	N	1.5 ‰	7.0 min	-0.007 m/s	0.35 ‰
	VK_HSr_55	$t > 0.0$ s : 0.0025 s	360 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	7.0 min	-0.007 m/s	0.87 ‰

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Vooreerst zijn simulaties VK_HSr_47 en VK_HSr_48 uitgevoerd voor vullen van de volledige kolk met een openingssnelheid van de hefschuiven gelijk aan 0.0019 m/s, i.e. dezelfde waarde als de openingssnelheid van de hefschuiven van het bovenhoofd uit Tabel 20 van paragraaf 6.5. Uit deze simulaties volgt dat de berekende nivelleertijd lager is dan het criterium van 10 min. De extreme waarde van de stijgsnelheid is lager dan het conservatievere criterium voor recreatievaart. Voor het schip CEMT klasse IV worden langskrachten op het schip berekend die lager zijn dan het betreffende criterium, echter voor recreatievaart worden langskrachten berekend, die beduidend hoger zijn dan het criterium. Om deze krachten te verlagen is gekozen voor het stoppen van het heffen van de hefschuiven. Een verlaging van de openingssnelheid van de hefschuiven was hier ook mogelijk geweest, maar is niet uitgevoerd. Bijgevolg zijn simulaties VK_HSr_49 en VK_HSr_50 uitgevoerd, waarbij na $t = 130.0$ s het heffen van de hefschuiven gedurende 155 s gestopt is. De nivelleertijd bij deze simulatie neemt toe tot 9.7 min, wat juist lager is dan het criterium van 10.0 min. Bij deze simulaties wordt opgemerkt dat de hefschuiven volledig geopend zijn op 629 s (= 10.5 min), wat betekent dat de hefschuiven nog niet volledig geopend zijn bij einde nivelleren. Dit is een suboptimaal gebruik van het nivelleersysteem, aangezien de hefschuiven bij vullen van de volledige kolk nooit volledig geopend zijn. De

hefschuiven zijn op het tijdstip van einde nivelleren 0.81 m geopend en zijn 46.8 s na einde nivelleren volledig geopend. Door middel van het sneller openen van de hefschuiven naar het einde toe is in simulatie VK_HSr_51 getracht om de nivelleertijd te verkorten. Hiervoor is de openingsswet na het optreden van de tweede piek van de berekende langskracht op het schip in de kolk (zie Figuur 17) versneld tot 0.0030 m/s. De berekende langskracht op het schip blijft hierdoor nog lager dan het criterium voor recreatievaart, maar de hefschuiven zijn 15.6 s voor einde nivelleren volledig geopend. De nivelleertijd voor deze simulatie is 14.6 s lager dan deze voor simulatie VK_HSr_49, wat zeer beperkt is. Bijgevolg is het verlagen van de hoogte van de openingen naar bijvoorbeeld 0.80 m een efficiëntere oplossing om te vermijden dat de hefschuiven aan het einde van de nivellering nog niet volledig geopend zijn.



Figuur 17 – Vergelijking langskracht op het schip voor simulaties VK_HSr_50 en VK_HSr_51

Daarna is met simulaties VK_HSr_52 en VK_HSr_53 nagegaan of een snellere nivelleertijd kan bekomen worden bij het toepassen van breekbalken. Bij simulatie VK_HSr_53 is de openingssnelheid van de hefschuiven bepaald zodat de berekende langskracht op het schip juist voldoet aan het criterium voor recreatievaart. Op deze wijze wordt een nivelleertijd van 9.1 min bekomen. Dit is 0.6 min (= 36 s) sneller dan bij simulaties VK_HSr_49 en VK_HSr_50. De berekende stijgsnelheid van het waterpeil in de sluis kolk en de berekende langskrachten op het schip zijn voor de simulaties VK_HSr_52 en VK_HSr_53 min of meer dezelfde als bij de simulaties VK_HSr_49 en VK_HSr_50. Hieruit volgt dat het toepassen van breekbalken slechts voor een beperkte reductie van de nivelleertijd zorgt. Ook bij de simulatie met breekbalken zijn de hefschuiven volledig geopend ca. 0.6 min na einde nivelleren.

Voor ledigen van de volledige kolk zijn simulaties VK_HSr_54 en VK_HSr_55 uitgevoerd met de openingsswet van de hefschuiven, die voor ledigen van de afwaartse deelsluis is afgeleid (zie paragraaf 7.4). De nivelleertijd voor deze simulaties bedraagt 7.0 min, de daalsnelheid van het waterpeil in de kolk 0.007 m/s. De berekende langskrachten op het schip in de kolk zijn lager dan de criteria voor de betreffende scheepstypes. De hefschuiven zijn volledig geopend op het einde van de nivellering.

7.3 Simulaties nivelleren opwaartse deelkolk

Deze paragraaf beschrijft de simulaties die voor nivelleren met de opwaartse deelkolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de opwaartse deelkolk is het schip CEMENT klasse I. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 52 in Bijlage 1. Tabel 30 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen.

Tabel 30 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor tweede reeks simulaties nivelleren opwaartse deelkolk

Type	Naam	Hefschuiven		Schip	Breekbalken	Criterium langskracht	Nivelleertijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
		Openingssnelheid	Openings-tijd						
Vullen	OPW_HSr_24	$t > 0.0$ s : 0.0019 m/s	474 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	5.1 min	0.010 m/s	-2.53 ‰
	OPW_HSr_25	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 285.0 s : 0.0000 m/s t > 285.1 s : 0.0019 m/s	629 s	CEMENT I	N	1.5 ‰	6.4 min	0.009 m/s	-0.41 ‰
	OPW_HSr_26	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 285.0 s : 0.0000 m/s t > 285.1 s : 0.0019 m/s	629 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	6.4 min	0.009 m/s	-2.32 ‰
	OPW_HSr_27	0.0 s < t < 140.0 s : 0.0019 m/s 140.1 s < t < 250.0 s : 0.0000 m/s t > 250.1 s : 0.0019 m/s	583 s	CEMENT I	J (140 ‰)	1.5 ‰	6.0 min	0.009 m/s	-0.35 ‰
	OPW_HSr_28	0.0 s < t < 140.0 s : 0.0019 m/s 140.1 s < t < 250.0 s : 0.0000 m/s t > 250.1 s : 0.0019 m/s	583 s	Recreatievaart	J (140 ‰)	3.0 ‰	6.0 min	0.009 m/s	-2.06 ‰
Ledigen	OPW_HSr_29	$t > 0.0$ s : 0.0017 s	565 s	CEMENT I	N	2.0 ‰	5.4 min	-0.009 m/s	0.16 ‰
	OPW_HSr_30	$t > 0.0$ s : 0.0017 s	565 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	5.4 min	-0.009 m/s	0.47 ‰

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Voor vullen van de opwaartse deelkolk zijn simulaties OPW_HSr_24 tot en met OPW_HSr_28 uitgevoerd. De openingswetten voor deze simulaties betreffen de openingswetten die in paragraaf 7.2 voor vullen van de volledige kolk zijn afgeleid. Voor ledigen van de opwaartse deelkolk zijn simulaties OPW_HSr_29 en OPW_HSr_30 uitgevoerd met de openingswet van de hefschuiven, die voor vullen van de afwaartse deelkolk is afgeleid (zie paragraaf 7.4).

Uit Tabel 30 volgt dat de nivelleertijd voor alle simulaties beduidend lager is dan 10 min. De stijgsnelheid van het waterpeil in de opwaartse deelkolk is voor alle simulaties juist gelijk of juist lager dan het criterium voor recreatievaart (0.010 m/s) en de berekende langskrachten op het schip zijn voor alle simulaties lager dan het criterium voor de langskracht op het betreffende schip. Bij alle simulaties zijn de hefschuiven pas geopend tussen 165 s en 243 s na einde nivelleren. Op het tijdstip van einde nivelleren zijn de hefschuiven 49 à 65 % geopend.

7.4 Simulaties nivelleren afwaartse deerkolk

Deze paragraaf beschrijft de simulaties die voor nivelleren met de afwaartse deerkolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de afwaartse deerkolk is het schip CEMENT klasse II. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 52 in Bijlage 1. Tabel 31 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen.

Tabel 31 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor tweede reeks simulaties nivelleren afwaartse deerkolk

Type	Naam	Hefschuiven		Schip	Breekbalken	Criterium langskracht	Nivelleertijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
		Openingssnelheid	Openingstijd						
Vullen	AFW_HSr_30	t > 0.0 s: 0.0017 m/s	565 s	CEMENT II	N	1.5 ‰	6.2 min	0.008 m/s	-0.40 ‰
	AFW_HSr_31	t > 0.0 s: 0.0017 m/s	565 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	6.2 min	0.008 m/s	-2.90 ‰
Ledigen	AFW_HSr_32	t > 0.0 s: 0.0025 m/s	552 s	CEMENT II	N	2.0 ‰	5.2 min	-0.010 m/s	0.28 ‰
	AFW_HSr_33	t > 0.0 s: 0.0025 m/s	552 s	Recreatievaart	N	3.0 ‰	5.2 min	-0.010 m/s	0.76 ‰

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Voor vullen van de afwaartse deerkolk zijn simulaties AFW_HSr_30 en met AFW_HSr_31 uitgevoerd. De openingswet van de hefschuiven in deze simulaties is iteratief bepaald zodat de berekende langskracht op het recreatievaartschip in de kolk bij simulatie AFS_HSr_31 juist lager is dan het criterium van 3.0 ‰ voor recreatievaart. Bij deze simulaties bedraagt de nivelleertijd 6.2 min en de extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk 0.008 m/s. Dit is lager dan het criterium van 10 min voor de nivelleertijd en lager dan het criterium van 0.010 m/s voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk voor recreatievaart. De berekende langskracht op het schip CEMENT klasse II in de kolk is beduidend lager dan het criterium van 1.5 ‰.

Voor ledigen van de afwaartse deerkolk zijn simulaties AFW_HSr_32 en met AFW_HSr_33 uitgevoerd. De openingswet van de hefschuiven in deze simulaties is op een iteratieve wijze bepaald, zodat de stijgsnelheid van het waterpeil in de sluis kolk juist gelijk is aan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart. De berekende langskrachten op het schip in de kolk zijn voor de beide simulaties beduidend lager dan het betreffende criterium. De nivelleertijd bedraagt 5.2 min, wat ook beduidend lager is dan het criterium van 10.0 min.

Bij vullen, respectievelijk ledigen van de kolk, zijn de hefschuiven ca. 190 s, respectievelijk 242 s, later geopend dan het tijdstip einde nivelleren. Op het tijdstip einde nivelleren zijn de hefschuiven bij vullen 71 % geopend en bij ledigen 86 %.

7.5 Samenvatting resultaten

Op basis van de resultaten in paragrafen 7.2, 7.3 en 7.4 geeft Tabel 32 een overzicht van de openingswetten die in dit hoofdstuk beschouwd zijn voor de hefschuiven in het bovenhoofd, het tussenhoofd en het benedenhoofd.

Tabel 32 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd op basis van de tweede reeks simulaties met het geselecteerde nivelleersysteem

	Openingssnelheid hefschuiven	Openingstijd hefschuiven
Bovenhoofd	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 285.0 s : 0.0000 m/s t > 285.1 s : 0.0019 m/s	629 s
Tussenhoofd	t > 0.0 s : 0.0017 m/s	565 s
Benedenhoofd	t > 0.0 s : 0.0025 m/s	552 s

Voor deze openingswetten geeft Tabel 33 een overzicht van de nivelleertijd, de extreme waarde van het debiet en de extreme waarde van de stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 32 voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse deelkolk en de afwaartse deelkolk. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat de extreme waarde van het debiet niet vermeld werd in de overzichtstabellen in paragraaf 7.2, 7.3 en 7.4. Deze waarden zijn rechtstreeks overgenomen uit de betreffende tabellen in Bijlage 1. Uit Tabel 33 volgt dat de nivelleertijd voor zowel vullen als ledigen van de volledige kolk, de opwaartse deelkolk en de afwaartse deelkolk lager is dan het criterium van 10 minuten. De extreme waarde van de stijgsnelheid is voor al deze nivelleringen lager of juist gelijk aan het criterium van 0.010 m/s voor recreatievaart.

Tabel 33 – Nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 32 voor bij vullen / ledigen van de volledige kolk en de opwaartse en afwaartse deelkolk

Sluiskolk	Type	Nivelleertijd	Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid
Volledige kolk	Vullen	9.7 min	6.4 m ³ /s	0.005 m/s
	Ledigen	7.0 min	10.1 m ³ /s	-0.007 m/s
Opwaartse deelkolk	Vullen	6.4 min	5.3 m ³ /s	0.009 m/s
	Ledigen	5.4 min	5.4 m ³ /s	-0.009 m/s
Afwaartse deelkolk	Vullen	6.2 min	6.2 m ³ /s	0.008 m/s
	Ledigen	5.2 min	7.5 m ³ /s	-0.010 m/s

Bij deze resultaten wordt het volgende opgemerkt:

- Uit de simulaties volgt dat bij vullen van de volledige kolk de hefschuiven op het einde van de nivellering slechts 0.81 m geopend zijn. Dit is slechts 0.09 m lager dan de volledige opening. Bij ledigen van de volledige kolk zijn de hefschuiven wel volledig geopend aan het einde van de nivellering. Dit is een suboptimaal (niet economisch) ontwerp van het nivelleersysteem. Bij vullen van de volledige kolk kan de openingswet juist na het tijdstip van de tweede piek in de langskrachten op het schip nog beperkt versnelt worden. Hierdoor zijn de hefschuiven wel volledig geopend aan het einde van de nivellering, maar wordt slechts een zeer beperkte winst in nivelleertijd van 14.6 s bekomen. Bij nivelleren van de opwaartse en de afwaartse kolk zijn de hefschuiven aan het einde van de nivellering slechts 49 à 86 % geopend. Dit is onvermijdelijk, aangezien per sluishoofd

eenzelfde openingswet wordt toegepast voor vullen en ledigen van de volledige kolk of de deelkolken en aangezien de openingen in de puntdeuren voor alle hoofden dezelfde zijn. De puntdeuren kunnen aan het einde van de nivellering zonder enig probleem geopend worden met gedeeltelijk geopende schuiven.

- Voor vullen van de volledige kolk en vullen van de opwaartse deelkolk is nagegaan of de aanwezigheid van breekbalken een invloed heeft op de nivelleertijd. Hieruit volgt dat het toepassen van breekbalken zorgt voor een beperkte verlaging van de nivelleertijd met 33 s bij vullen van de volledige kolk en 24 s bij vullen van de opwaartse deelkolk. Bij vullen van de volledige kolk zijn de hefschuiven op het einde van de nivellering bij toepassen van breekbalken 92.6 % geopend, tegenover 90.1 % bij afwezigheid van breekbalken. Voor vullen van de afwaartse deelkolk zijn in dit stadium van het onderzoek geen simulaties uitgevoerd met aanwezigheid van breekbalken.

8 Resultaten finale simulaties geselecteerd nivelleersysteem

8.1 Algemeen

Na het uitvoeren van de simulaties uit hoofdstuk 7 en overleg met de opdrachtgever worden de finale simulaties met het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis te Denderbelle uitgevoerd. Voor het uitvoeren van deze simulaties werden in overleg met de opdrachtgever en EBS de volgende randvoorwaarden beschouwd:

- De simulaties worden uitgevoerd met een openingswet met één openingssnelheid, dewelke toepasbaar is voor het bovenhoofd, het benedenhoofd en het tussenhoofd. Deze openingswet moet zowel toepasbaar zijn voor recreatievaart als voor beroepsvaart in de kolk. Dit houdt in dat het strengere criterium voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk voor recreatievaart bepalend is. Indien voor een bepaald scheepstype te hoge krachten worden berekend, is het mogelijk om het heffen van de hefschuiven te stoppen gedurende een bepaalde periode. De openingssnelheid van de hefschuiven is echter voor alle sluishoofden dezelfde.
- Zowel bij simulaties met het schip CEMT klasse I als bij simulaties met recreatievaart in de kolk wordt het schip altijd afgemeerd ter plaatse van de stopstreep, i.e. met de boeg van het schip op 5 m van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur.
- Voor nivelleren van de volledige kolk wordt getracht om een openingswet te beschouwen, waarbij de hefschuiven aan het einde van de nivellering volledig geopend zijn. Indien de hefschuiven bij nivelleren van de opwaartse of de afwaartse deelkolk aan het einde van de nivellering nog niet volledig geopend zijn, wordt dit niet als problematisch beschouwd. Dit is onvermijdbaar wegens het toepassen van één openingswet per sluishoofd en het feit dat de openingen in de puntdeuren voor elk hoofd dezelfde zijn.
- De simulaties worden uitgevoerd met een waterpeil in het afwaarts pand gelijk aan het huidig waterpeil van +3.82 mTAW.
- De simulaties worden uitgevoerd met rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven. Er worden 6 openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m voorzien. Het peil van de onderzijde van de openingen bevindt zich op +0.10 mTAW. Er worden zowel simulaties uitgevoerd bij afwezigheid van breekbalken als simulaties bij aanwezigheid van breekbalken afwaarts van de opening. Voor de simulaties zonder breekbalken worden de waarden voor Geometrie 1 (geen breekbalken) beschouwd, voor simulaties met breekbalken worden de waarden voor Geometrie 2 (2 breekbalken met breedte 0.15 m geplaatst aan de binnenzijde van de opening) beschouwd. Voor de configuratie met breekbalken is in paragraaf 4.3 uit de schaalmodelproven een spreiding in de hoogte van de straal na breekbalken met 140 % afgeleid (zie Tabel 11 in paragraaf 4.3).
- Wat de afvoercoëfficiënt van de openingen betreft worden de afvoercoëfficiënten opgemeten tijdens het schaalmodelonderzoek voor de nivelleeropening van de nieuwe sluis te Denderbelle toegepast (zie Tabel 9 in paragraaf 4.2.3).

Tabel 36 geeft een overzicht van de karakteristieke afmetingen van het geselecteerde nivelleersysteem.

De simulaties zijn zowel met VUL_SLUIS release 01.54.00 uitgevoerd als met LOCKFILL 5.03.00.

Tabel 34 – Geselecteerd nivelleersysteem voor ontwerp

Nivelleersysteem	Opening opwaarts	Sectie straal afwaarts openingen	Peil onderzijde openingen
Rechthoekige openingen met hefschuiven	6 x 0.90 m x 0.90 m	6 x 0.90 m x 0.90 m (zonder breekbalken) 6 x 0.90 m x 1.26 m (met breekbalken en toename sectie met 140 %)	+0.10 mTAW

Voor het opstellen van de openingswet van de hefschuiven voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse deelkolk en de afwaartse deelkolk wordt eenzelfde werkwijze toegepast als beschreven in paragraaf 7.1. De openingssnelheid van de hefschuiven, dewelke dezelfde is voor alle sluishoofden, is bepaald op basis van de openingswetten die volgen uit de tweede reeks simulaties met het nivelleersysteem beschreven in hoofdstuk 7. Deze openingswetten zijn nog eens herhaald in Tabel 35. Uit deze tabel volgt dat voor het bovenhoofd een openingswet met stoppen van het heffen van de hefschuiven en een openingssnelheid 0.0019 m/s is toegepast. De openingswet voor het tussenhoofd heeft een iets lagere openingssnelheid van 0.0017 m/s, maar de hefschuiven zijn 64 s sneller geopend doordat het heffen van de hefschuiven hier niet gestopt wordt. De openingswet voor het benedenhoofd heeft een grotere openingssnelheid van 0.0025 m/s zonder tussenstop. Voor het uitvoeren van de simulaties is de openingssnelheid van 0.0019 m/s van het bovenhoofd beschouwd. Deze openingssnelheid kan zonder problemen toegepast worden voor het benedenhoofd, maar voor het tussenhoofd moet vermoedelijk een tussenstop ingebouwd worden. Alternatief had ook de openingssnelheid van het tussenhoofd kunnen beschouwd worden. Op deze wijze was de stop voor het tussenhoofd vermeden. Echter dit betekent dat het langer duurt vooraleer de hefschuiven volledig geopend zijn, waardoor de kans groter wordt dat de hefschuiven aan het einde van de nivellering niet volledig geopend zijn, wat vooral bij nivelleren van de volledige kolk als een suboptimale werking beschouwd wordt.

Tabel 35 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd op basis van de tweede reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem

	Openingssnelheid hefschuiven	Openingstijd hefschuiven
Bovenhoofd	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 285.0 s : 0.0000 m/s t > 285.1 s : 0.0019 m/s	629 s
Tussenhoofd	t > 0.0 s : 0.0017 m/s	565 s
Benedenhoofd	t > 0.0 s : 0.0025 m/s	552 s

Voor de vergelijking van de berekende langskrachten op het schip met het betreffende criterium wordt telkens de extreme waarde van de berekende langskracht vergeleken met het criterium. De extreme waarde wordt bepaald als het maximum van de (in absolute waarde) maximale langskrachten berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS.

In paragrafen 8.2 (nivelleren volledige kolk), 8.3 (nivelleren opwaartse deelkolk) en 8.4 (nivelleren afwaartse deelkolk) zijn de resultaten van deze simulaties beknopt beschreven. In paragraaf 8.5 worden de resultaten van deze simulaties en de openingswetten voor de hefschuiven van het bovenhoofd, het tussenhoofd en het benedenhoofd, die in dit hoofdstuk zijn afgeleid nog eens samengevat.

8.2 Simulaties nivelleren volledige kolk

Deze paragraaf beschrijft de simulaties die voor nivelleren van de volledige kolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de volledige kolk is het schip CEMT klasse IV. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 53 in Bijlage 1. Tabel 36 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen. Figuur 38, Figuur 39 en Figuur 40 in Bijlage 2 geven voor al deze simulaties een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de waterstand in de sluis, het debiet door de nivelleeropeningen en de langskracht op het schip.

Uit hoofdstuk 7 volgt voor vullen van de volledige kolk een openingswet met hefsnelheid 0.0019 m/s en het stoppen van het heffen van de hefschuiven gedurende 155.0 s. Om die reden zijn eerst simulaties VK_HSr_56 en VK_HSr_57 uitgevoerd met een openingswet met een stop. De afvoercoëfficiënt van de openingen is echter gewijzigd. Om ervoor te zorgen dat de krachten op het recreatievaartschip in de kolk lager blijven dan het criterium is om die reden de tussenstop in de openingswet gewijzigd naar de periode tussen $t = 137.0$ s en $t = 220$ s of een periode van 83 s. Bij deze simulaties wordt de sluis, wat juist lager is dan het criterium van 10.0 min. De stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk, alsook de berekende langskrachten op het schip zijn lager dan de betreffende criteria. Echter bij einde nivelleren zijn de hefschuiven 0.85 m geopend, wat slechts 5 cm minder is dan een volledige opening. De hefschuiven zijn 24.8 s geopend na einde nivellering.

Om de invloed van breekbalken na te gaan zijn simulaties VK_HSr_58 en VK_HSr_59 uitgevoerd. Voor deze simulaties is de openingswet gewijzigd zodat de berekende langskrachten op het schip bij recreatievaart in de kolk (simulatie VK_HSr_59) juist lager zijn dan het criterium van 3.0 ‰. Door het toepassen van breekbalken wordt een nivelleertijd van 9.1 min bekomen, wat 0.6 min (= 36 s) sneller is dan bij afwezigheid van breekbalken. Ook bij deze simulaties zijn de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk en de berekende langskrachten op het schip lager dan de betreffende criteria. De hefschuiven zijn bij toepassen van breekbalken 53 s sneller geopend dan bij afwezigheid van breekbalken. Bij einde nivelleren zorgt dit ervoor dat de hefschuiven 0.88 m geopend zijn, wat slechts 2 cm lager is dan de volledige opening.

Zowel bij de simulaties met afwezigheid van breekbalken (simulaties VK_HSr_56 en VK_HSr_57) als bij de simulaties met aanwezigheid van breekbalken (simulaties VK_HSr_58 en VK_HSr_59) zijn de hefschuiven nog niet volledig geopend bij einde nivellering. Om die reden zijn een aantal simulaties uitgevoerd met een iets lagere hoogte van de opening. Hiervoor is een opening met hoogte 0.80 m beschouwd. De breedte van de openingen in de sluisdeur blijft behouden op 0.90 m. Bij een hoogte van de opening van 0.80 m zullen de afmetingen van de uitstroomopening aan afwaartse zijde van de deur dezelfde blijven. Om die reden wordt voor deze simulaties eenzelfde bovenzijde van de vulstraat na breekbalken en eenzelfde oppervlakte van de straat na breekbalken beschouwd als bij de simulaties met de openingen met hoogte 0.90 m. Daarnaast geldt ook dat de hefschuiven pas volledig geopend zijn bij einde nivelleren. Dus zal de vulstraat gedurende bijna de volledige nivellering eenzelfde gedrag (wat uitspreiding in hoogte betreft) vertonen als bij de openingen met hoogte 0.90 m. Bijgevolg zal ook de maximale kracht op het schip in de kolk en de extreme waarde van de stijgsnelheid gelijk zijn aan deze berekend met openingen met hoogte 0.90 m, aangezien deze maximale waarden zich voordoen voordat de hefschuif de hoogte 0.80 m heeft bereikt. Enkel de nivelleertijd van de kolk zal iets toenemen.

Met deze lagere hoogte van de opening zijn simulaties VK_HSr_60 en VK_HSr_61 bij afwezigheid van breekbalken en simulaties VK_HSr_62 en VK_HSr_63 bij aanwezigheid van breekbalken uitgevoerd. Deze simulaties zijn met dezelfde openingswet uitgevoerd als de simulaties met openingen met hoogte 0.90 m. Bij al deze simulaties zijn de hefschuiven geopend juist voor einde nivelleren. Voor deze simulaties bedraagt de nivelleertijd 591 s (=9.9 min) bij afwezigheid van breekbalken en 554 s (= 9.2 min) bij aanwezigheid van breekbalken, wat 6 s, respectievelijk 8 s hoger is dan bij de simulaties met openingen met hoogte 0.90 m. Deze verschillen in nivelleertijd zijn verwaarloosbaar. Ook bij deze simulaties is de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk lager dan het criterium voor recreatievaart. Enkel bij het recreatievaartschip in de kolk wordt een langskracht berekend die juist hoger is dan het criterium van 3.0 ‰.

Dit wordt als toelaatbaar beschouwd, aangezien uit Figuur 39 in Bijlage 2 volgt dat de overschrijding enkel een (numerieke) schommeling van de langskracht op het schip betreft.

Wat ledigen van de sluiscolk betreft zijn enkel simulaties uitgevoerd met een constante openingssnelheid van de hefschuiven gelijk aan 0.0019 m/s. Dit betreffen simulaties VK_HSr_64 en VK_HSr_65 voor de openingen met hoogte 0.90 m en simulaties VK_HSr_66 en VK_HSr_67 voor de openingen met hoogte 0.80 m. De nivelleertijd bedraagt 8.2 min bij openingen met hoogte 0.90 m en 8.4 min bij openingen met hoogte 0.80 m. Voor deze simulaties zijn de stijgsnelheid van het waterpeil in de colk en de berekende langskrachten op het schip beduidend lager dan de betreffende criteria.

Tabel 36 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor finale simulaties nivelleren volledige colk.

Type	Naam	Hoogte openingen	Hefschuiven		Schip	Breekbalken	Criterium langskracht	Nivelleer-tijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
			Openingssnelheid	Openings-tijd						
Vullen	VK_HSr_56	0.90 m	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s	609 s	CEMT IV	N	1.1 ‰	9.7 min	0.005 m/s	0.35 ‰
	VK_HSr_57		125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s		Recreatievaart	N	3.0 ‰	9.7 min	0.005 m/s	-2.96 ‰
	VK_HSr_58		0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s	556 s	CEMT IV	J (140 %)	1.1 ‰	9.1 min	0.006 m/s	0.36 ‰
	VK_HSr_59		137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s		Recreatievaart	J (140 %)	3.0 ‰	9.1 min	0.006 m/s	-2.97 ‰
	VK_HSr_60	0.80 m	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s	556 s	CEMT IV	N	1.1 ‰	9.9 min	0.005 m/s	0.34 ‰
	VK_HSr_61		125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s		Recreatievaart	N	3.0 ‰	9.9 min	0.005 m/s	-2.97 ‰
	VK_HSr_62		0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s	504 s	CEMT IV	J (140 %)	1.1 ‰	9.2 min	0.006 m/s	0.35 ‰
	VK_HSr_63		137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s		Recreatievaart	J (140 %)	3.0 ‰	9.2 min	0.006 m/s	-3.04 ‰
Ledigen	VK_HSr_64	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s	CEMT IV	N	1.5 ‰	8.2 min	-0.006 m/s	0.47 ‰
	VK_HSr_65				Recreatievaart	N	3.0 ‰	8.2 min	-0.006 m/s	0.50 ‰
	VK_HSr_66	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421 s	CEMT IV	N	1.5 ‰	8.2 min	-0.006 m/s	-0.30 ‰
	VK_HSr_67				Recreatievaart	N	3.0 ‰	8.2 min	-0.006 m/s	0.39 ‰

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

8.3 Simulaties nivelleren opwaartse deerkolk

Deze paragraaf beschrijft de simulaties die voor nivelleren van de opwaartse deerkolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de opwaartse deerkolk is het schip CEMT klasse I. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 54 in Bijlage 1. Tabel 37 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen. Figuur 41, Figuur 42 en Figuur 43 in Bijlage 2 geven voor al deze simulaties een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de waterstand in de sluis, het debiet door de nivelleeropeningen en de langskracht op het schip.

Uit de vorige hoofdstukken volgt dat simulaties voor vullen, respectievelijk ledigen van de opwaartse deerkolk een controle zijn van de openingswetten die voor vullen van de volledige kolk (zie paragraaf 8.2), respectievelijk vullen van de afwaartse deerkolk (paragraaf 8.4) zijn afgeleid. Op deze wijze zijn voor vullen van de opwaartse deerkolk simulaties OPW_HSr_31 tot en met OPW_HSr_34 uitgevoerd voor openingen met hoogte 0.90 m en simulaties OPW_HSr_35 tot en met OPW_HSr_38 voor openingen met hoogte 0.80 m. Voor ledigen zijn simulaties OPW_HSr_39 tot en met OPW_HSr_42 uitgevoerd voor openingen met hoogte 0.90 m en simulaties OPW_HSr_43 en OPW_HSr_44 voor openingen met hoogte 0.80 m.

Voor vullen van de opwaartse deerkolk met een hoogte van de openingen in de sluisdeur van 0.90 m bedraagt de nivelleertijd 6.3 minuten bij afwezigheid van breekbalken en 5.9 minuten bij aanwezigheid van breekbalken. De extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk is gelijk aan of juist lager dan het criterium voor recreatievaart, de berekende langskrachten op het schip in de kolk blijven lager dan de betreffende criteria. Aan het einde van de nivellering zijn de hefschuiven geopend tot 0.46 m (51 % van de totale hefhoogte) bij aanwezigheid van breekbalken en 0.51 m (57 % van de totale hefhoogte) bij afwezigheid van breekbalken.

Wat de simulaties met openingen in de sluisdeur met hoogte 0.80 m betreft, is de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de langskracht op het schip gelijk aan deze berekend voor de openingen met hoogte 0.90 m. De reden hiervoor is dat het identieke simulaties betreffen en dat de hefschuiven aan het einde van de nivellering maar geopend zijn tot 0.47 m (59 % van de totale hefhoogte).

De nivelleertijd voor ledigen van de sluisdeur bedraagt 5.3 minuten, zowel bij openingen met hoogte 0.90 m als bij openingen met hoogte 0.80 m. Voor deze simulaties wordt een extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk gelijk aan 0.010 m/s berekend, wat juist gelijk is aan het criterium voor recreatievaart. De berekende langskrachten op het schip zijn voor alle simulaties beduidend lager dan het criterium. Aan het einde van de nivellering zijn de hefschuiven geopend tot 0.60 m (67 % van de totale hefhoogte bij openingen met hoogte 0.90 m en 75 % van de totale hefhoogte bij openingen met hoogte 0.80 m.)

Tabel 37 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor finale simulaties nivelleren opwaartse deelkol

Type	Naam	Hoogte openingen	Hefschuiven		Schip	Breekbalken	Criterium langskracht	Nivelleertijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
			Openingssnelheid	Openings-tijd						
Vullen	OPW_HSr_31	0.90 m	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s	609 s	CEMT I	N	1.5 ‰	6.3 min	0.009 m/s	-0.41 ‰
	OPW_HSr_32		125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s		Recreatie-vaart	N	3.0 ‰	6.3 min	0.009 m/s	-2.39 ‰
	OPW_HSr_33		0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s	556 s	CEMT I	J (140 ‰)	1.5 ‰	5.9 min	0.010 m/s	-0.35 ‰
	OPW_HSr_34		137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s t > 220.1 s : 0.0019 m/s		Recreatie-vaart	J (140 ‰)	3.0 ‰	5.9 min	0.010 m/s	-2.22 ‰
	OPW_HSr_35	0.80 m	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s	556 s	CEMT I	N	1.5 ‰	6.4 min	0.009 m/s	-0.39 ‰
	OPW_HSr_36		125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s		Recreatie-vaart	N	3.0 ‰	6.4 min	0.009 m/s	-2.23 ‰
	OPW_HSr_37		0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s	504 s	CEMT I	J (140 ‰)	1.5 ‰	5.9 min	0.010 m/s	-0.33 ‰
	OPW_HSr_38		137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s t > 220.1 s : 0.0019 m/s		Recreatie-vaart	J (140 ‰)	3.0 ‰	5.9 min	0.010 m/s	-2.18 ‰
Ledigen	OPW_HSr_39	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s	CEMT I	N	2.0 ‰	5.2 min	-0.010 m/s	0.17 ‰
	OPW_HSr_40				Recreatie-vaart	N	3.0 ‰	5.2 min	-0.010 m/s	0.47 ‰
	OPW_HSr_41		0.0 s < t < 150.0 s : 0.0019 m/s 150.1 s < t < 160.0 s : 0.0000 m/s t > 160.1 s : 0.0019 m/s	484 s	CEMT I	N	2.0 ‰	5.3 min	-0.010 m/s	0.18 ‰
	OPW_HSr_42				Recreatie-vaart	N	3.0 ‰	5.3 min	-0.010 m/s	0.47 ‰
	OPW_HSr_43	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421 s	CEMT I	N	2.0 ‰	5.3 min	-0.010 m/s	0.18 ‰
	OPW_HSr_44				Recreatie-vaart	N	3.0 ‰	5.3 min	-0.010 m/s	0.46 ‰

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

8.4 Simulaties nivelleren afwaartse deelkolk

Deze paragraaf beschrijft de simulaties die voor nivelleren van de afwaartse deelkolk zijn uitgevoerd. Het ontwerpschip voor de afwaartse deelkolk is het schip CEMT klasse II. Een gedetailleerd overzicht van de resultaten van deze simulaties is gegeven in Tabel 55 in Bijlage 1. Tabel 38 vat voor deze simulaties de nivelleertijd, de extreme waarde van de stijgsnelheid en de extreme waarde van de langskracht op het schip samen. Figuur 44, Figuur 45 en Figuur 46 in Bijlage 2 geven voor al deze simulaties een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de waterstand in de sluis, het debiet door de nivelleeropeningen en de langskracht op het schip.

Voor vullen van de afwaartse deelkolk zijn eerst simulaties AFW_HSr_34 en AFW_HSr_35 uitgevoerd. Bij recreatievaart in de sluis (simulatie AFW_HSr_35) wordt een extreme waarde van de langskracht op het schip berekend gelijk aan -3.09 ‰, wat juist hoger is dan het criterium van 3.0 ‰ voor recreatievaart. Om die reden wordt de openingswet vertraagd door het heffen van de schuiven te stoppen gedurende 10 s. Met deze openingswet zijn simulaties AFW_HSr_36 en AFW_HSr_37 uitgevoerd. Bij toepassen van deze openingswet wordt de sluis gevuld in 6.1 min, wat beduidend lager is dan het criterium van 10 min. De extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk is juist lager dan het criterium voor recreatievaart. De berekende langskrachten op het schip CEMT II in de kolk blijven beduidend lager dan de het criterium, deze op het recreatievaartschip in de kolk zijn juist lager dan het criterium. Aan het einde van de nivellering zijn de hefschuiven geopend tot 0.68 m (76 % van de totale hefhoogte). Hieruit volgt dat het verlagen van de hoogte van de openingen in de deur kan overwogen worden om ervoor te zorgen dat de hefschuiven in de deur aan het einde van de nivellering voor een groter percentage geopend zijn.

Om de invloed van breekbalken na te gaan zijn simulaties AFW_HSr_38 en AFW_HSr_39 uitgevoerd. Omdat bij toepassen van breekbalken iets lagere langskrachten op het schip berekend worden dan bij afwezigheid van breekbalken, zijn deze simulaties uitgevoerd kunnen worden met de constante openingssnelheid van 0.0019 m/s. De nivelleertijd van de sluis wordt door toepassen van breekbalken verlaagd met 6 s, wat verwaarloosbaar is. Bij deze simulaties zijn de hefschuiven aan het einde van de nivellering geopend tot 0.69 m (77 % van de totale hefhoogte).

Daarna zijn voor de openingen met hoogte 0.80 m de simulaties AFW_HSr_40 en AFW_HSr_41 (afwezigheid van breekbalken) en AFW_HSr_42 en AFW_HSr_43 (aanwezigheid van breekbalken) met dezelfde openingswet en dezelfde waarden voor de parameters oppervlakte vulstraal na breekbalken en peil bovenzijde vulstraal na breekbalken als bij de simulaties met hoogte 0.90 m. Al deze simulaties zijn uitgevoerd met de constante openingssnelheid van 0.0019 m/s. De nivelleertijd is voor vullen van de kolk is 3 s korter dan bij de openingen in de deur met hoogte 0.90 m. Deze verschillen zijn verwaarloosbaar. De extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk is juist lager dan het criterium voor recreatievaart. De berekende langskrachten op het schip CEMT klasse II in de kolk blijven beduidend lager dan de het criterium, deze voor recreatievaart zijn juist lager dan het criterium. Bij deze simulaties zijn de hefschuiven aan het einde van de nivellering geopend tot 0.70 m (87 % van de totale hefhoogte).

Voor ledigen van de kolk zijn, zowel voor openingen in de sluisdeur met hoogte 0.90 m als voor openingen in de sluisdeur met hoogte 0.80 m, simulaties uitgevoerd met de constante openingssnelheid van 0.0019 m/s. Voor deze simulaties wordt een nivelleertijd berekend van 6.1 min. De extreme waarde van de stijgsnelheid bedraagt 0.009 m/s, wat juist kleiner is dan het criterium voor recreatievaart. De berekende langskrachten op het schip in de kolk zijn beduidend lager dan de betreffende criteria. Ook bij deze simulaties zijn de hefschuiven aan het einde van de nivellering geopend tot ca. 0.70 m (87 % van de totale hefhoogte).

Tabel 38 – Nivelleertijd, extreme waarden stijgsnelheid en extreme waarde langskracht voor finale simulaties nivelleren afwaartse deelsluis

Type	Naam	Hoogte openingen	Hefschuiven		Schip	Breekbalken	Criterium langskracht	Nivelleertijd	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht
			Openingssnelheid	Openings-tijd						
Vullen	AFW_HSr_34	0.90 m	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s	CEMT IV	N	1.5 ‰	6.1 min	0.009 m/s	-0.43 ‰
	AFW_HSr_35				Recreatievaart	N	3.0 ‰	6.1 min	0.009 m/s	-3.09 ‰
	AFW_HSr_36		0.0 s < t < 150.0 s : 0.0019 m/s 150.1 s < t < 160.0 s : 0.0000 m/s t > 160.1 s : 0.0019 m/s	484 s	CEMT IV	N	1.5 ‰	6.1 min	0.008 m/s	-0.44 ‰
	AFW_HSr_37				Recreatievaart	N	3.0 ‰	6.1 min	0.008 m/s	-2.99 ‰
	AFW_HSr_38		t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s	CEMT IV	J (140 ‰)	1.5 ‰	6.0 min	0.009 m/s	-0.37 ‰
	AFW_HSr_39				Recreatievaart	J (140 ‰)	3.0 ‰	6.0 min	0.009 m/s	-2.69 ‰
	AFW_HSr_40	0.80 m	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	421 s	CEMT IV	N	1.5 ‰	6.1 min	0.009 m/s	-0.41 ‰
	AFW_HSr_41				Recreatievaart	N	3.0 ‰	6.1 min	0.009 m/s	-2.93 ‰
	AFW_HSr_42		t > 0.0 s: 0.0019 m/s	421 s	CEMT IV	J (140 ‰)	1.5 ‰	6.1 min	0.009 m/s	-0.36 ‰
	AFW_HSr_43				Recreatievaart	J (140 ‰)	3.0 ‰	6.1 min	0.009 m/s	-2.57 ‰
Ledigen	AFW_HSr_44	0.90 m	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474 s	CEMT IV	N	2.0 ‰	6.1 min	-0.009 m/s	0.30 ‰
	AFW_HSr_45				Recreatievaart	N	3.0 ‰	6.1 min	-0.009 m/s	0.71 ‰
	AFW_HSr_46	0.80 m	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	421 s	CEMT IV	N	2.0 ‰	6.1 min	-0.009 m/s	0.28 ‰
	AFW_HSr_47				Recreatievaart	N	3.0 ‰	6.1 min	-0.009 m/s	0.65 ‰

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

8.5 Samenvatting resultaten

Op basis van de resultaten in paragrafen 8.2, 8.3 en 8.4 geeft Tabel 39 een overzicht van de openingswetten die in dit hoofdstuk beschouwd zijn voor de hefschuiven in het bovenhoofd, het tussenhoofd en het benedenhoofd.

Tabel 39 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd uit de finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem

Hoogte openingen	Sluishoofd	Geen breekbalken aanwezig		Breekbalken aanwezig	
		Openingssnelheid	Openings-tijd	Openingssnelheid	Openings-tijd
0.90 m	Bovenhoofd	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s 125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s	609 s	0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s 137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s t > 220.1 s : 0.0019 m/s	556 s
	Tussenhoofd	t > 0.0 s : 0.0019 m/s ^(*)	474 s ^(*)	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s
	Benedenhoofd	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s	t > 0.0 s : 0.0019 m/s ^(*)	474 s ^(**)
0.80 m	Bovenhoofd	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s	551 s	0.0 s < t < 132.0 s : 0.0019 m/s 132.1 s < t < 245.0 s : 0.0000 m/s t > 245.1 s : 0.0019 m/s	534 s
	Tussenhoofd	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s
	Benedenhoofd	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s	t > 0.0 s : 0.0019 m/s ^(*)	474 s ^(*)

* = Voor het tussenhoofd werd een openingswet met een tussenstop van 10 s opgesteld. Enerzijds de zeer korte tussenstop van 10 s, anderzijds het feit dat de zeer beperkte overschrijding van het criterium een (numerieke) oscillatie van de langskracht betreft en het feit dat in de meeste binnenvaartsluizen geen problemen voordoen met recreatievaart, maken dat deze tussenstop niet wordt aanbevolen.

** = Breekbalken bevinden zich aan afwaartse zijde, dus deze beïnvloeden de stroming in de kolk niet; bijgevolg is de openingswet dezelfde als bij afwezigheid van breekbalken.

Voor deze openingswetten geeft Tabel 40 een overzicht van de nivelleertijd, de extreme waarde van het debiet en de extreme waarde van de stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 39 voor nivelleren van de volledige kolk, de opwaartse deelkolk en de afwaartse deelkolk. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat de extreme waarde van het debiet niet vermeld werd in de overzichtstabellen in paragrafen 8.2, 8.3 en 8.4. Deze waarden zijn rechtstreeks overgenomen uit de betreffende tabellen in Bijlage 1.

Tabel 40 – Nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 39 voor bij vullen / ledigen van de volledige kolk en de opwaartse en afwaartse deelkolk

Hoogte openingen	Sluiskolk	Type	Geen breekbalken aanwezig			Breekbalken aanwezig		
			Nivelleer-tijd	Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Nivelleer-tijd	Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid
0.90 m	Volledige kolk	Vullen	9.7 min	6.4 m ³ /s	0.005 m/s	9.1 min	7.0 m ³ /s	0.006 m/s
		Ledigen	8.2 min	8.2 m ³ /s	-0.006 m/s	8.2 min	8.2 m ³ /s	-0.006 m/s
	Opwaartse deelkolk	Vullen	6.3 min	5.3 m ³ /s	0.009 m/s	5.9 min	5.5 m ³ /s	0.010 m/s
		Ledigen	5.3 min	5.6 m ³ /s	-0.010 m/s	5.3 min	5.6 m ³ /s	-0.010 m/s
	Afwaartse deelkolk	Vullen	6.1 min	6.1 m ³ /s	0.008 m/s	6.0 min	6.4 m ³ /s	0.009 m/s
		Ledigen	6.1 min	6.3 m ³ /s	-0.009 m/s	6.1 min	6.3 m ³ /s	-0.009 m/s
0.80 m	Volledige kolk	Vullen	9.9 min	6.3 m ³ /s	0.005 m/s	9.2 min	6.6 m ³ /s	0.005 m/s
		Ledigen	8.2 min	8.1 m ³ /s	-0.006 m/s	8.2 min	8.1 m ³ /s	-0.006 m/s
	Opwaartse deelkolk	Vullen	6.4 min	5.2 m ³ /s	0.009 m/s	5.9 min	5.4 m ³ /s	0.010 m/s
		Ledigen	5.3 min	5.5 m ³ /s	-0.010 m/s	5.3 min	5.5 m ³ /s	-0.010 m/s
	Afwaartse deelkolk	Vullen	6.1 min	6.3 m ³ /s	0.009 m/s	6.0 min	6.3 m ³ /s	0.009 m/s
		Ledigen	6.1 min	6.3 m ³ /s	-0.009 m/s	6.1 min	6.3 m ³ /s	-0.009 m/s

Op basis van Tabel 40 wordt het volgende besloten:

- Voor vullen van de volledige kolk met openingen in de deur met hoogte 0.90 m is de nivelleertijd van 9.7 min juist lager is dan het criterium van 10 min. Voor ledigen van de volledige kolk wordt een nivelleertijd van 8.2 min berekend. Voor vullen en ledigen van de afwaartse deelkolk en de opwaartse deelkolk worden nivelleertijden berekend tussen 5.3 min en 6.3 min. Bij vullen van de volledige kolk zijn de hefschuiven aan het einde van de nivellering niet volledig geopend (tot 0.85 m bij afwezigheid van breekbalken en 0.88 m bij aanwezigheid van breekbalken). Bij ledigen van de volledige kolk zijn de hefschuiven wel volledig geopend aan het einde van de nivellering.
- Het toepassen van breekbalken verlaagt de nivelleertijd zeer beperkt, namelijk met 0.6 min (36 s) voor vullen volledige kolk, met 0.4 min (24 s) voor vullen van de opwaartse deelkolk en met 0.1 min (6 s) voor vullen van de afwaartse deelkolk.
- Het verlagen van de hoogte van de openingen van 0.90 m naar 0.80 m heeft geen invloed op de nivelleertijd bij ledigen. Voor vullen van de sluis kolk wordt een verwaarloosbare invloed op de nivelleertijd berekend (een maximale stijging van 0.1 min (6 s) à 0.2 min (12 s)). Het verlagen van de openingen in de sluisdeur met 0.10 m heeft tot gevolg dat de hefschuiven aan het einde van de nivellering, zowel bij vullen als bij ledigen van de volledige kolk, wel volledig geopend zijn.
- Door toepassen van dezelfde openingssnelheid voor alle sluis hoofden is het onvermijdelijk dat bij nivelleren van de opwaartse deelkolk en nivelleren van de afwaartse deelkolk, de hefschuiven niet volledig geopend aan het einde van de nivellering, namelijk tot 51 % à 75 % voor nivelleren van de opwaartse deelkolk en 76 % à 87 % bij nivelleren van de afwaartse deelkolk. Dit is geen probleem, aangezien de puntdeuren aan het einde van de nivellering zonder enig probleem geopend kunnen worden met gedeeltelijk geopende hefschuiven.

Bij de hierboven vermelde resultaten wordt het volgende opgemerkt:

- Voor de vergelijking van de berekende langskrachten op het schip met het betreffende criterium wordt telkens de extreme waarde van de berekende langskracht vergeleken met het criterium. De extreme waarde wordt bepaald als het maximum van de (in absolute waarde) maximale langskrachten berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS. Algemeen worden met VUL_SLUIS iets lagere negatieve extrema van de langskracht op het schip berekend dan met LOCKFILL. Indien enkel zou vergeleken worden met de resultaten van LOCKFILL, in plaats van met de resultaten van beide programma's tesamen, dan zouden de openingswetten voor bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd slechts beperkt verschillen van de openingswetten die in dit hoofdstuk afgeleid worden. De verklaring hiervoor is dat bij de opwaartse en de afwaartse deelkolk de openingswet bepaald is door de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk. De openingswet van het bovenhoofd bestaat uit een openingswet, waarbij het heffen van de hefschuiven gestopt wordt gedurende 2 min. De periode waarover deze hefschuiven gestopt worden kan bijvoorbeeld iets ingekort worden bij het enkel beschouwen van de resultaten van LOCKFILL. De openingswetten voor het tussenhoofd en het benedenhoofd zullen hierbij niet gewijzigd worden, aangezien voor deze hoofden de constante openingssnelheid van 0.0019 m/s is voorgesteld.
- Uit de simulaties volgt dat breekbalken nauwelijks invloed hebben op de nivelleertijd van de volledige kolk, de opwaartse deelkolk en de afwaartse deelkolk. Echter de stroming in de kolk zal door de aanwezigheid van breekbalken wel een minder turbulent karakter vertonen dan bij afwezigheid van breekbalken.

9 Conclusie

9.1 Algemeen

Bij De Vlaamse Waterweg nv regio West loopt momenteel een project voor de opwaardering van de Dender tot (scheepvaart-)klasse IV. Voor het stuwsluiscomplex te Denderbelle wordt hierbij een nieuwe sluis gebouwd op de linkeroever, naast de huidige sluis. De ontubbeling van de stuw wordt gerealiseerd door in de huidige sluiskolk een nieuwe stuw te bouwen en tegelijkertijd de huidige stuw te vervangen door een nieuwe stuw op dezelfde locatie. De nieuwe sluis heeft een lengte van 130.0 m, een breedte van 10.5 m en is voorzien van puntdeuren. Door de aanwezigheid van middendeuren kan de kolk verdeeld worden in een opwaartse deelsluiskolk met lengte 56.0 m en een afwaartse deelsluiskolk met lengte 73.5 m.

Voor de nieuwe sluis werd reeds een voorontwerp gemaakt van een sluis met puntdeuren en openingen in de deuren als nivelleersysteem. Dit voorontwerp werd in januari 2015 door het studiebureau SBE aan De Vlaamse Waterweg nv regio West (DVW) overgemaakt. Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) leverde hiervoor een aantal inputs. Zo werd door het WL in 2010 reeds een voorontwerp gemaakt van een nivelleersysteem met openingen in de deuren en werd de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd. Uit het voorontwerp volgde dat een nivelleersysteem met 8 vlinderkleppen diameter 0.90 m of 12 vlinderkleppen diameter 0.70 m voldeed aan de vooropgestelde criteria.

Voor het uitwerken van het finale ontwerp doet DVW nu beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal (EBS) en Geotechniek. Bij deze verdere uitwerking van het constructief ontwerp door EBS is vastgesteld dat de uit het voorontwerp volgende diameter van de vlinderkleppen niet ingebouwd kan worden in de puntdeuren.

Om die reden wordt een nieuw ontwerp van het nivelleersysteem uitgevoerd. Hiervoor zijn door EBS volgende mogelijke maximale afmetingen gedefinieerd wat betreft de openingen in de sluisdeuren:

- 8 cirkelvormige openingen diameter 0.60 m afgesloten met vlinderkleppen,
- 6 cirkelvormige openingen diameter 0.90 m afgesloten met hefschuiven,
- 6 rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven.

Naast deze 3 verschillende nivelleersystemen wordt bij het nieuwe ontwerp van het nivelleersysteem ook rekening gehouden met een waterpeildaling van 0.40 m in het afwaartse pand. Het streefpeil in het afwaarts kanaalpand verlaagt hierbij tot +3.45 mTAW. Rekening houdende met deze mogelijke waterpeildaling is door de opdrachtgever gesteld dat het bodempeil van de sluiskolk verlaagd dient te worden tot - 0.78 mTAW.

Dit rapport beschrijft de hydraulische simulaties die in het kader van het finale ontwerp van het nivelleersysteem werden uitgevoerd. Alle hydraulische simulaties werden hierbij zowel uitgevoerd met het programma VUL_SLUIS van WL als met het programma LOCKFILL van Deltares, waarop het programma VUL_SLUIS gebaseerd is.

9.2 Hydraulische simulaties nivelleersysteem

Om een keuze te maken tussen de 3 mogelijke types nivelleersystemen zijn eerst een aantal simulaties met deze nivelleersystemen uitgevoerd. Hiervoor zijn enkel simulaties uitgevoerd voor vullen van de volledige kolk met een schip CEMT klasse IV in de kolk, aangezien deze combinatie als maatgevend wordt beschouwd. Om na te gaan of bij ledigen eventueel sneller genivelleerd kan worden dan bij vullen, zijn ook enkele simulaties voor ledigen uitgevoerd. Voor elk van deze simulaties is de openingswet van de schuiven zo gedefinieerd dat de berekende langskracht op het schip juist lager is dan het criterium. De simulaties zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.48.vA.08, VUL_SLUIS release 01.48.vB.08 en LOCKFILL 5.03.00.

Op basis van deze simulaties wordt het volgende besloten:

- Enkel voor het nivelleersysteem met 8 cirkelvormige openingen diameter 0.60 m afgesloten met vlinderkleppen wordt een nivelleertijd berekend die hoger is dan toelaatbare waarde van 10.0 min. Het lager plaatsen van de openingen in de deur zorgt voor dit nivelleersysteem niet voor een verlaging van de nivelleertijd. Enkel door het vergroten van de afstand tussen schip en sluisdeur van 5.0 m (gelijk aan de stopstreepafstand) tot 10.0 m kan de nivelleertijd beperkt verlaagd worden tot een waarde die juist hoger is dan het criterium van 10.0 min. Voor de beide andere nivelleersystemen voldoet de nivelleertijd bij alle uitgevoerde simulaties aan het criterium van 10.0 min.
- Alle simulaties met de drie nivelleersystemen voldoen aan het criterium voor de maximale waarde voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de sluis kolk van 0.017 m/s voor beroepsvaart.
- Wat ledigen van de sluis kolk betreft wordt voor alle simulaties met het nivelleersysteem met 8 cirkelvormige openingen diameter 0.60 m afgesloten met vlinderkleppen voldaan aan het strengere criterium voor de maximale waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk van 0.010 m/s voor recreatievaart. Bij het nivelleersysteem met 6 cirkelvormige openingen diameter 0.90 m afgesloten met hefschuiven en het nivelleersysteem met 6 rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven wordt voor ledigen een maximale waarde van de daalsnelheid van het waterpeil in de kolk berekend die groter is dan de toegelaten waarde van 0.010 m/s voor recreatievaart.

Op basis van de resultaten van deze simulaties met de drie types nivelleersystemen heeft de opdrachtgever in overleg met EBS beslist om het nivelleersysteem met 6 rechthoekige openingen met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven te selecteren voor het ontwerp van de nieuwe sluis te Denderbelle.

Met het geselecteerde nivelleersysteem zijn daarna een eerste reeks hydraulische simulaties en een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Deze simulaties zijn uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.48.vA.08, VUL_SLUIS release 01.48.vB.08 en LOCKFILL 5.03.00. Bij deze simulaties werd één openingswet voor het bovenhoofd, één voor het tussenhoofd en één voor het benedenhoofd beschouwd, maar werd een aparte openingswet voor beroepsvaart en recreatievaart beschouwd. In de gevoeligheidsanalyse werd de invloed op de berekende langskrachten en de nivelleertijd van het beschouwde afwaarts waterpeil, de beschouwde waarde van de afvoercoëfficiënt van de openingen in de sluisdeur, de aanwezigheid van breekbalken en de beschouwde release van het programma VUL_SLUIS onderzocht.

Door de opdrachtgever is daarna gesteld dat nog niet zeker is wanneer de verlaging van het waterpeil in het afwaartse pand juist uitgevoerd zal worden. Om die reden is een tweede reeks hydraulische simulaties uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.54.00 met het huidige waterpeil +3.82 mTAW in het afwaartse pand als randvoorwaarde. Voor deze simulaties werd één openingswet met constante snelheid beschouwd voor het bovenhoofd, één voor het tussenhoofd en één voor het benedenhoofd. Deze openingswet is zowel geldig voor beroepsvaart als voor recreatievaart, maar de openingssnelheid van de hefschuiven verschilt hierbij per sluishoofd. Bij deze simulaties is ook de laatste stand van het ontwerp van de openingen in de deur door EBS in rekening gebracht, i.e. de onderzijde van de openingen bevindt zich op +0.10 mTAW in plaats van +0.15 mTAW.

Daarna zijn de finale simulaties met het nivelleersysteem uitgevoerd. De afvoercoëfficiënt van de opening in de deur, zowel voor een configuratie met breekbalken als voor een configuratie zonder breekbalken, is hierbij overgenomen uit de schaalmodelproeven beschreven in Vercruyse *et al.* (2018). Voor deze finale simulaties is één openingswet voor het bovenhoofd, één openingswet voor het benedenhoofd en één openingswet voor het tussenhoofd beschouwd. De beschouwde openingswet is zowel toepasbaar voor recreatievaart als voor beroepsvaart in de kolk en bestaat uit eenzelfde openingssnelheid voor elk sluishoofd. Indien voor een bepaald scheepstype met een constante openingssnelheid nog te hoge krachten op het schip in de kolk worden berekend, is het heffen van de hefschuiven gestopt gedurende een bepaalde periode. Daarnaast is getracht om voor nivelleren van de volledige kolk een openingswet te beschouwen, waarbij de hefschuiven aan het einde van de nivellering volledig geopend zijn. Deze simulaties zijn uitgevoerd zowel met VUL_SLUIS release 01.54.00 als met LOCKFILL 5.03.00 bij het huidig afwaarts waterpeil gelijk aan +3.82 mTAW.

Al de hierboven beschreven simulaties zijn uitgevoerd voor vullen en ledigen van de volledige kolk, vullen en ledigen van de opwaartse deelkolk en vullen en ledigen van de afwaartse deelkolk. Hierbij is zowel het ontwerpschip voor de betreffende deelkolken als een recreatievaartuig in de sluis kolk beschouwd.

Tabel 41 geeft een overzicht van de openingswetten die bij de finale simulaties met het nivelleersysteem zijn beschouwd voor de hefschuiven in het bovenhoofd, het tussenhoofd en het benedenhoofd. Tabel 42 geeft een overzicht van de nivelleertijd, de extreme waarde van het debiet en de extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk bij toepassing van deze openingswetten voor nivelleren van de volledige kolk, nivelleren van de opwaartse deelkolk en nivelleren van de afwaartse deelkolk.

Tabel 41 – Geselecteerde openingswetten voor de hefschuiven in bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd uit de finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem

Hoogte openingen	Sluishoofd	Geen breekbalken aanwezig		Breekbalken aanwezig	
		Openingssnelheid	Openings-tijd	Openingssnelheid	Openings-tijd
0.90 m	Bovenhoofd	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s 125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s	609 s	0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s 137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s t > 220.1 s : 0.0019 m/s	556 s
	Tussenhoofd	t > 0.0 s : 0.0019 m/s ^(*)	474 s ^(*)	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s
	Benedenhoofd	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s	t > 0.0 s : 0.0019 m/s ^(*)	474 s ^(**)
0.80 m	Bovenhoofd	0.0 s < t < 130.0 s : 0.0019 m/s 130.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s	551 s	0.0 s < t < 132.0 s : 0.0019 m/s 132.1 s < t < 245.0 s : 0.0000 m/s t > 245.1 s : 0.0019 m/s	534 s
	Tussenhoofd	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s
	Benedenhoofd	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474 s	t > 0.0 s : 0.0019 m/s ^(*)	474 s ^(*)

* = Voor het tussenhoofd werd een openingswet met een tussenstop van 10 s opgesteld. Enerzijds de zeer korte tussenstop van 10 s, anderzijds het feit dat de zeer beperkte overschrijding van het criterium een (numerieke) oscillatie van de langskracht betreft en het feit dat in de meeste binnenvaartsluizen geen problemen voordoen met recreatievaart, maken dat deze tussenstop niet wordt aanbevolen.

** = Breekbalken bevinden zich aan afwaartse zijde, dus deze beïnvloeden de stroming in de kolk niet; bijgevolg is de openingswet dezelfde als bij afwezigheid van breekbalken.

Tabel 42 – Nivelleertijd, extreme waarde debiet en extreme waarde stijgsnelheid bij toepassing van de openingswetten uit Tabel 41 voor bij vullen / ledigen van de volledige kolk en de opwaartse en afwaartse deelkolk

Hoogte openingen	Sluiskolk	Type	Geen breekbalken aanwezig			Breekbalken aanwezig		
			Nivelleer-tijd	Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Nivelleer-tijd	Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid
0.90 m	Volledige kolk	Vullen	9.7 min	6.4 m ³ /s	0.005 m/s	9.1 min	7.0 m ³ /s	0.006 m/s
		Ledigen	8.2 min	8.2 m ³ /s	-0.006 m/s	8.2 min	8.2 m ³ /s	-0.006 m/s
	Opwaartse deelkolk	Vullen	6.3 min	5.3 m ³ /s	0.009 m/s	5.9 min	5.5 m ³ /s	0.010 m/s
		Ledigen	5.3 min	5.6 m ³ /s	-0.010 m/s	5.3 min	5.6 m ³ /s	-0.010 m/s
	Afwaartse deelkolk	Vullen	6.1 min	6.1 m ³ /s	0.008 m/s	6.0 min	6.4 m ³ /s	0.009 m/s
		Ledigen	6.1 min	6.3 m ³ /s	-0.009 m/s	6.1 min	6.3 m ³ /s	-0.009 m/s
0.80 m	Volledige kolk	Vullen	9.9 min	6.3 m ³ /s	0.005 m/s	9.2 min	6.6 m ³ /s	0.005 m/s
		Ledigen	8.2 min	8.1 m ³ /s	-0.006 m/s	8.2 min	8.1 m ³ /s	-0.006 m/s
	Opwaartse deelkolk	Vullen	6.4 min	5.2 m ³ /s	0.009 m/s	5.9 min	5.4 m ³ /s	0.010 m/s
		Ledigen	5.3 min	5.5 m ³ /s	-0.010 m/s	5.3 min	5.5 m ³ /s	-0.010 m/s
	Afwaartse deelkolk	Vullen	6.1 min	6.3 m ³ /s	0.009 m/s	6.0 min	6.3 m ³ /s	0.009 m/s
		Ledigen	6.1 min	6.3 m ³ /s	-0.009 m/s	6.1 min	6.3 m ³ /s	-0.009 m/s

Op basis van Tabel 41 en Tabel 42 wordt het volgende besloten:

- Bij vullen van de volledige kolk met openingen in de deur met hoogte 0.90 m wordt een nivelleertijd berekend van 9.7 min, wat juist lager is dan het criterium van 10 min. Voor ledigen van de volledige kolk wordt een nivelleertijd van 8.2 min berekend. Voor vullen en ledigen van de afwaartse deelkolk en de opwaartse deelkolk worden nivelleertijden berekend tussen 5.3 min en 6.3 min. Bij vullen van de volledige kolk zijn de hefschuiven niet volledig geopend aan het einde van de nivellering (tot 0.85 m bij afwezigheid van breekbalken en 0.88 m bij aanwezigheid van breekbalken). Bij ledigen van de volledige kolk zijn de hefschuiven wel volledig geopend aan het einde van de nivellering. Door toepassen van dezelfde openingssnelheid voor alle sluishoofden is het onvermijdelijk dat bij nivelleren van de opwaartse deelkolk en nivelleren van de afwaartse deelkolk, de hefschuiven niet volledig geopend zijn aan het einde van de nivellering, namelijk tot 51 % à 75 % voor nivelleren van de opwaartse deelkolk en 76 % à 87 % bij nivelleren van de afwaartse deelkolk. Dit is geen probleem, aangezien de puntdeuren aan het einde van de nivellering zonder enig probleem geopend kunnen worden met gedeeltelijk geopende hefschuiven.
- Het toepassen van breekbalken (bij openingen met hoogte 0.90 m) verlaagt de nivelleertijd zeer beperkt, namelijk met 0.6 min (36 s) voor vullen volledige kolk, met 0.4 min (24 s) voor vullen opwaartse kolk en met 0.1 min (6 s) voor vullen afwaartse kolk.
- Het verlagen van de hoogte van de openingen in de sluisdeur met 0.10 m tot een hoogte van 0.80 m heeft tot gevolg dat de hefschuiven aan het einde van de nivellering, zowel bij vullen als bij ledigen van de volledige kolk, wel volledig geopend zijn. Deze verlaging heeft geen invloed op de nivelleertijd bij ledigen. Voor vullen van de sluiskolk wordt een verwaarloosbare invloed op de nivelleertijd berekend (een maximale stijging van 0.1 min (6 s) à 0.2 min (12 s)). Voor vullen van de volledige kolk wordt een nivelleertijd van 9.9 min berekend, wat juist lager is dan de toelaatbare nivelleertijd van 10.0 min. Bij een hoogte van de opening van 0.80 cm zullen de afmetingen van de uitstroomopening

aan afwaartse zijde van de deur dezelfde blijven. Om die reden wordt voor deze simulaties eenzelfde waarde voor de parameter bovenzijde van de vulstraal na breekbalken en voor de parameter bovenzijde van de straal na breekbalken beschouwd als bij de simulaties met de openingen met hoogte 0.90 m. Daarnaast geldt ook dat de hefschuiven pas volledig geopend zijn bij einde nivelleren. Bijgevolg zal de vulstraal gedurende bijna de volledige nivellering eenzelfde gedrag (wat uitspreiding in hoogte betreft) vertonen als bij de openingen met hoogte 0.90 m, waardoor de maximale kracht op het schip in de kolk en de extreme waarde van de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk gelijk zijn aan deze berekend met openingen met hoogte 0.90 m, aangezien deze maximale waarden zich voordoen voordat de hefschuif de hoogte 0.80 m heeft bereikt.

9.3 Opmerkingen en aanbevelingen

Bij de besluiten uit dit rapport kunnen volgende opmerkingen en aanbevelingen geformuleerd worden:

- Voor de vergelijking van de berekende langskrachten op het schip met het betreffende criterium wordt telkens het maximum van de (in absolute waarde) maximale langskrachten berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS. Algemeen worden met VUL_SLUIS vergeken met het criterium. Algemeen worden met VUL_SLUIS iets lagere negatieve extrema berekend van de langskracht op het schip dan met LOCKFILL. Indien enkel zou vergeleken worden met de resultaten van LOCKFILL, in plaats van met de resultaten van beide programma's tesamen, dan zouden de openingswetten voor bovenhoofd, tussenhoofd en benedenhoofd slechts beperkt verschillen van de openingswetten die in dit rapport zijn afgeleid. De verklaring hiervoor is dat bij de opwaartse en de afwaartse deelkolk de openingswet bepaald is door de stijgsnelheid van het waterpeil in de kolk. De openingswet van het bovenhoofd bestaat uit een openingswet, waarbij het heffen van de hefschuiven gestopt wordt gedurende 2 min. De periode waarover deze hefschuiven gestopt worden kan bijvoorbeeld iets ingekort worden bij het enkel beschouwen van de resultaten van LOCKFILL. De openingswetten voor het tussenhoofd en het benedenhoofd zullen hierbij niet gewijzigd worden, aangezien voor deze hoofden de constante openingsnelheid van 0.0019 m/s is voorgesteld.
- In kader van dit project werden schaalmodelproeven uitgevoerd op de geometrie van de opening in de deur (zowel bij afwezigheid van breekbalken als bij aanwezigheid van breekbalken. Uit deze schaalmodelproeven werd besloten dat breekbalken bijna geen invloed hebben op de afvoercoëfficiënt en dus op het debiet doorheen de opening. Wel wordt de stroomsnelheid uit de opening in de deur met ca. 50 % verlaagd bij het toepassen van breekbalken. Uit de simulaties in dit rapport volgt echter dat breekbalken nauwelijks invloed hebben op de nivelleertijd van de volledige kolk, de opwaartse deelkolk en de afwaartse deelkolk. Echter door de lagere stroomsnelheid na de breekbalken zal de stroming in de kolk mogelijks een minder turbulent karakter vertonen dan bij afwezigheid van breekbalken.
- Het programma LOCKFILL, en bij uitbreiding ook het programma VUL_SLUIS, is niet gevalideerd is recreatievaart. Aanbevolen wordt om bij de ingebruikname van de nieuwe sluis recreatievaart op een voldoende afstand te laten aanmeren en, rekening houdend met de feedback van de schippers, de afstand tot de deur geleidelijk te verkleinen.
- 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.

10 Referenties

- 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
- Breugem, W.A.; Decrop, B.; Rauwoens, P.; Van Hoydonck, W.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Hydraulic study of breaking logs in lock filling with gate openings: Sub report 2. CFD modeling of scale model experiments. *WL Rapporten*, 14_050. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerp
- Deltares.** (2015). LOCKFILL. User and Technical manual. version 0.00 8 July 2015
- Jonge, J.J.; Taat, J.J.; Vrijburcht, A.** (1994). Uitbreiding van het rekenprogramma LOCKFILL rapport Q1537
- 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*
- Members of the Committee for Waterfront Structures.** (2006). Recommendations of the committee for waterfront structures harbours and waterways: EAU 2004. Ernst & Sohn: Berlin. ISBN 978-3-433-01666-4
- Ramos, P.X.; De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Hydraulic study of breaking logs in lock filling with gate openings: report on scale model research. *WL Rapporten*, 14_050. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu.** (2011). Richtlijnen Vaarwegen 2011. RVW 2011
- Van der Ven, P.P.D.; Van Velzen, G.; O'Mahoney, T.S.D.; De Loor, A.** (2015). Comparison of scale model measurements and 3D CFD simulations of loss coefficients and flow patterns for lock levelling systems, *in*: (2015). *SMART RIVERS 2015, Buenos Aires, Argentina, 7-11 September 2015: papers booklet*
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2019). Hydraulisch onderzoek naar breekbalken voor sluizen met nivelleeropeningen in de deuren: eindrapport. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 14_050_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=321065>
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Ondersteuning ontwerp klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve: Deelrapport 3 – Ontwerp nivelleersysteem. Versie 7.0. *WL Rapporten*, 12_142. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België. IV, 30 + 8 p. bijlagen pp.
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2018). Denderbelle – Vernieuwing stuwsluis Denderbelle: deelrapport 6. Schaalmodelstudie breekbalken. versie 4.0. *WL Rapporten*, 15_062_6. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016a). Klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve: advies nivelleeropeningen en openingswet hefschuiven. *WL Adviezen*, 16_042. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016b). Zeekanaal Brussel Schelde – sluis Zemst: verslag terreinmeting vulling afwaartse kolk. *WL Adviezen*, 15_061. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2010). Dender - Vernieuwing sluis Denderbelle: toetsing kolkafmetingen en voorontwerp nivelleersysteem van de sluis. *WL Rapporten*, 760_11. Flanders Hydraulics Research: Antwerpen

Verelst, K.; De Mulder, T.; Schindfessel, L.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2014a). Numerieke modellering van sluisvulling via openingen in deuren: Deelrapport 1 - Opmaak en eerste validatie van het programma vul_sluis. *WL Rapporten*, 00_077. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; De Mulder, T.; Schindfessel, L.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016a). Numerieke modellering van sluisvulling via openingen in deuren: Deelrapport 2 - Verder testen en ontwikkelen programma vul_sluis. *WL Rapporten*, 00_077. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; De Mulder, T.; Schindfessel, L.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016b). Numerieke modellering van sluisvulling via openingen in deuren: Deelrapport 3 - Uitbreiding programma vul_sluis. *WL Rapporten*, 00_077: 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. (2014b). Dender - Stuwsluis Aalst: aanpassing ontwerp nivelleersysteem sluis. *WL Adviezen*, 13_097. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vrijburcht, A. (1992). Hydraulisch voorontwerp van deurvul- en ledigingsopeningen. Waterloopkundig Laboratorium = Delft Hydraulics Laboratory: Delft

Bijlage 1: Tabellen

Initiële simulaties drie types nivelleersystemen

Tabel 43 – Resultaten initiële simulaties cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen

	Afmetingen	Type	Openingssnelheid	Openings- tijd	Breek- balken	Onderzijde openingen	Afstand schip sluisdeur	Nivelleertijd				Extreme waarde stijgsnelheid		Langskracht					
								VUL_SLUIS		LOCKFILL		VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS 01.42.vA.08		VUL_SLUIS 01.42.vB.08		LOCKFILL 5.03.00	
								s	min	s	min	m/s	m/s	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
				s	J/N	mTAW	m	s	min	s	min	m/s	m/s	‰	‰	‰	‰	‰	‰
VK_VKc_01	8 x Ø 0.6 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 1.650 °/s 30.1 s < t < 330.0 s : 0.120 °/s t > 330.1 s : 1.650 °/s	333	N	+0.30	5	698.8	11.6	695.8	11.6	0.005	0.005	-1.18	0.87	-0.85	1.06	-0.85	1.12
VK_VKc_02	8 x Ø 0.6 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 1.640 °/s 30.1 s < t < 330.0 s : 0.100 °/s t > 330.1 s : 1.640 °/s	337	N	-0.28	5	714.2	11.9	710.8	11.8	0.005	0.006	-1.20	0.78	-0.87	1.02	-0.98	0.93
VK_VKc_03	8 x Ø 0.6 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 1.670 °/s t > 30.1 s : 0.400 °/s	100	N	+0.30	10	646.0	10.8	640.0	10.7	0.007	0.007	-1.17	0.95	-0.75	1.07	-0.65	1.15
VK_VKc_04	8 x Ø 0.6 m	Ledigen	t > 0.0 s : 2.100 °/s	43	N	+0.30	5	623.2	10.4	616.0	10.3	-0.008	-0.008	-1.16	0.70	-1.16	0.70	-1.16	0.65

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

	Afmetingen	Type	Openings­ ­snelheid	Openings- tijd	Breek- balken	Onderzijde openingen	Afstand schip sluisdeur	Nivelleertijd				Extreme waarde stijgsnelheid		Langskracht [%o]					
								VUL_SLUIS		LOCKFILL		VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS 01.42.vA.08		VUL_SLUIS 01.42.vB.08		LOCKFILL 5.03.00	
				s	J/N	mTAW	m	s	min	s	min	m/s	m/s	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
VK_HSc_01	6 x Ø0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0050 m/s 30.1 s < t < 330.0 s: 0.0020 m/s t > 330.1 s : 0.0050 m/s	360	N	+ 0.15 m	5	537.6	9.0	538.6	9.0	0.007	0.008	-1.14	0.53	-0.56	0.57	-0.67	0.59
VK_HSc_02	6 x Ø0.7 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0060 m/s t > 30.1 s : 0.0020 m/s	390	N	+ 0.15 m	5	713.8	11.9	715.6	11.9	0.006	0.006	-1.15	0.52	-0.55	0.57	-0.75	0.59
VK_HSc_03	6 x Ø0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0060 m/s 30.1 s < t < 330.0 s: 0.0020 m/s t > 330.1 s : 0.0060 m/s	350	J (120 %)	+ 0.15 m	5	525.0	8.8	526.0	8.8	0.007	0.008	-1.07	0.66	-0.57	0.71	-0.64	0.74
VK_HSc_04	6 x Ø0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0066 m/s t > 30.1 s : 0.0023 m/s	335	J (140 %)	+ 0.15 m	5	501.4	8.4	502.4	8.4	0.008	0.008	-1.12	0.75	-0.59	0.80	-0.69	0.83
VK_HSc_05	6 x Ø0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0050 m/s 30.1 s < t < 330.0 s: 0.0020 m/s t > 330.1 s : 0.0050 m/s	360	N	- 0.28 m	5	537.6	9.0	538.6	9.0	0.007	0.008	-1.14	0.52	-0.51	0.57	-0.62	0.56
VK_HSc_06	6 x Ø0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 60.0 s : 0.0070 m/s 60.1 < t < 240.0 s : 0.0000 m/s t > 240.1 s : 0.0030 m/s	400	N	+ 0.15 m	5	541.6	9.0	542.4	9.0	0.006	0.007	-1.05	0.77	-0.64	0.89	-0.55	0.96
VK_HSc_07	6 x Ø0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0080 m/s t > 30.1 s : 0.0040 m/s	195	N	+ 0.15 m	10	443.8	7.4	446.0	7.4	0.009	0.010	-1.20	0.90	-0.63	0.96	-0.58	1.00
VK_HSc_08	6 x Ø0.9 m	Ledigen	t > 0.0 s : 0.017 m/s	53	N	+ 0.15 m	5	385.6	6.4	386.2	6.4	-0.012	-0.013	-1.16	0.25	-1.16	0.25	-1.14	0.27

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Tabel 45 – Resultaten initiële simulaties rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven

	Afmetingen	Type	Openingssnelheid	Openings- tijd	Breek- balken	Onderzijde opening	Afstand schip sluisdeur	Nivelleertijd				Extreme waarde stijgsnelheid		Langskracht [‰]					
								VUL_SLUIS		LOCKFILL		VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS 01.42.vA.08		VUL_SLUIS 01.42.vB.08		LOCKFILL 5.03.00	
								s	min	s	min			Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
				s	J/N	mTAW	m					m/s	m/s	‰	‰	‰	‰	‰	‰
VK_HSr_01	6 x 0.9 m x 0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0030 m/s t > 30.1 s : 0.0022 m/s	450	N	+ 0.15 m	5	473.4	7.9	474.0	7.9	0.008	0.008	-1.14	0.62	-0.56	0.66	-0.63	0.69
VK_HSr_02	6 x 0.9 m x 0.7 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0040 m/s t > 30.1 s : 0.0018 m/s	433	N	+ 0.15 m	5	521.8	8.7	522.2	8.7	0.007	0.007	-1.18	0.71	-0.59	0.80	-0.70	0.82
VK_HSr_03	6 x 0.9 m x 0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0028 m/s t > 30.1 s : 0.0026 m/s	314	J (120 %)	+ 0.15 m	5	450.4	7.5	451.0	7.5	0.008	0.009	-1.14	0.60	-0.58	0.63	-0.65	0.65
VK_HSr_04	6 x 0.9 m x 0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0045 m/s t > 30.1 s : 0.0027 m/s	283	J (140 %)	+ 0.15 m	5	428.2	7.1	428.6	7.1	0.008	0.009	-1.18	0.88	-0.69	0.93	-0.75	0.98
VK_HSr_05	6 x 0.9 m x 0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30 s : 0.0054 m/s t > 30.1 s : 0.0017 %/s	434	N	- 0.28 m	5	484.8	8.1	485.4	8.1	0.007	0.007	-1.15	0.89	-0.85	1.04	-0.89	1.02
VK_HSr_06	6 x 0.9 m x 0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 90.0 s : 0.0060 m/s 90.1 s < t < 210.0 s : 0.0000 m/s t > 210.1 s : 0.0030 m/s	330	N	+ 0.15 m	5	463.2	7.7	463.6	7.7	0.007	0.007	-1.18	0.99	-0.72	1.13	-0.60	1.20
VK_HSr_07	6 x 0.9 m x 0.9 m	Vullen	0.0 s < t < 30.0 s : 0.0050 m/s t > 30.1 s : 0.0037 m/s	203	N	+ 0.15 m	10	392.4	6.5	392.8	6.5	0.010	0.010	-1.13	0.96	-1.18	-0.62	-0.59	1.04
VK_HSr_08	6 x 0.9 m x 0.9 m	Ledige n	0.0 s < t : 0.0120 m/s	75	N	+ 0.15 m	5	319.0	5.3	319.2	5.3	-0.015	-0.015	-1.18	0.55	-1.18	0.55	-1.18	0.56

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Eerste reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem

Tabel 46 – Resultaten eerste reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren volledige sluisolk

Type	Naam	Openingssnelheid	Openings- tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Criterium langskracht	Nivelleertijd				Extreme waarde Debiet		Extreme waarde stijgsnelheid		Langskracht [%]					
							VUL_SLUIS		LOCKFILL		VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS 01.42.vA.08		VUL_SLUIS 01.42.vB.08		LOCKFILL 5.03.00	
			s		m	%	s	min	s	min	m³/s	m³/s	m/s	m/s	min. %	max. %	min. %	max. %	min. %	max. %
Vullen	VK_HSr_09	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	CEMT IV	5	1.1	494.8	8.2	494.8	8.2	9.9	10.0	0.007	0.008	-1.05	0.43	-0.50	0.45	-0.57	0.46
	VK_HSr_10	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	CEMT III	5	1.5	494.8	8.2	494.8	8.2	9.9	10.0	0.007	0.008	-1.25	0.40	-0.58	0.42	-0.68	0.42
	VK_HSr_11	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	CEMT II	5	1.5	494.8	8.2	494.8	8.2	9.9	10.0	0.007	0.008	-1.37	0.29	-0.63	0.30	-0.73	0.30
	VK_HSr_12	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	Recreatievaart	5	3.0	494.8	8.2	494.8	8.2	9.9	10.0	0.007	0.008	-9.96	0.45	-4.45	0.46	-5.21	0.46
	VK_HSr_13	t > 0.0 s: 0.00057 m/s	1579		5	3.0	895.0	14.9	895.2	14.9	5.5	5.5	0.004	0.004	-3.00	0.14	-1.33	0.14	-1.56	0.14
	VK_HSr_14	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475		19	3.0	494.8	8.2	494.8	8.2	9.9	10.0	0.007	0.008	-2.71	0.45	-0.99	0.45	-0.57	0.45
	VK_HSr_15	t > 0.0 s: 0.00130 m/s	692	CEMT IV	5	1.1	596.6	9.9	596.6	9.9	8.2	8.2	0.006	0.006	-0.69	0.31	-0.32	0.32	-0.37	0.33
	VK_HSr_16	t > 0.0 s: 0.00130 m/s	692	CEMT III	5	1.5	596.6	9.9	596.6	9.9	8.2	8.2	0.006	0.006	-0.84	0.29	-0.39	0.30	-0.46	0.30
	VK_HSr_17	t > 0.0 s: 0.00130 m/s	692	CEMT II	5	1.5	596.6	9.9	596.6	9.9	8.2	8.2	0.006	0.006	-0.91	0.20	-0.42	0.21	-0.49	0.21
	VK_HSr_18	t > 0.0 s: 0.00130 m/s	692	Recreatievaart	12	3.0	596.6	9.9	596.6	9.9	8.2	8.2	0.006	0.006	-2.99	0.31	-1.18	0.31	-1.02	0.31
Ledigen	VK_HSr_19	t > 0.0 s: 0.01400 m/s	64	CEMT IV	5	1.5	291.6	4.9	291.8	4.9	21.8	21.8	-0.016	-0.016	-1.45	0.80	-1.45	0.80	-1.47	0.84
	VK_HSr_20	t > 0.0 s: 0.01400 m/s	64	CEMT III	5	2.0	291.6	4.9	291.8	4.9	21.8	21.8	-0.016	-0.016	-1.59	0.84	-1.59	0.84	-1.58	0.80
	VK_HSr_21	t > 0.0 s: 0.01400 m/s	64	CEMT II	5	2.0	291.6	4.9	291.8	4.9	21.8	21.8	-0.016	-0.016	-1.18	0.62	-1.18	0.62	-1.16	0.60
	VK_HSr_22	t > 0.0 s: 0.01400 m/s	64	Recreatievaart	5	3.0	291.6	4.9	291.8	4.9	21.8	21.8	-0.016	-0.016	-2.23	2.34	-2.23	2.34	-2.04	1.78
	VK_HSr_23	t > 0.0 s: 0.00470 m/s	191	CEMT IV	5	1.5	354.8	5.9	354.8	5.9	15.8	15.8	-0.012	-0.012	-0.56	0.47	-0.56	0.47	-0.54	0.57
	VK_HSr_24	t > 0.0 s: 0.00470 m/s	191	CEMT III	5	2.0	354.8	5.9	354.8	5.9	15.8	15.8	-0.012	-0.012	-0.55	0.48	-0.55	0.48	-0.58	0.51
	VK_HSr_25	t > 0.0 s: 0.00470 m/s	191	CEMT II	5	2.0	354.8	5.9	354.8	5.9	15.8	15.8	-0.012	-0.012	-0.43	0.37	-0.43	0.37	-0.42	0.47
	VK_HSr_26	t > 0.0 s: 0.00470 m/s	191	Recreatievaart	5	3.0	354.8	5.9	354.8	5.9	15.8	15.8	-0.012	-0.012	-0.94	1.10	-0.94	1.10	-0.76	0.94
	VK_HSr_27	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450	CEMT IV	5	1.5	483.0	8.1	483.0	8.1	10.2	10.2	-0.007	-0.008	-0.22	0.44	-0.22	0.40	-0.21	0.50
	VK_HSr_28	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450	CEMT III	5	2.0	483.0	8.1	483.0	8.1	10.2	10.2	-0.007	-0.008	-0.23	0.44	-0.23	0.40	-0.22	0.51
	VK_HSr_29	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450	CEMT II	5	2.0	483.0	8.1	483.0	8.1	10.2	10.2	-0.007	-0.008	-0.19	0.36	-0.19	0.40	-0.17	0.39
	VK_HSr_30	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450	Recreatievaart	5	3.0	483.0	8.1	483.0	8.1	10.2	10.2	-0.007	-0.008	-0.46	0.82	-0.46	0.80	-0.33	0.70

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Tabel 47 – Resultaten eerste reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren opwaartse en afwaartse deelkolk

Type	Naam	Openingssnelheid	Openings-tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Criterium langskracht	Nivelleertijd				Extreme waarde Debiet		Extreme waarde stijgsnelheid		Langskracht [%]					
							VUL_SLUIS		LOCKFILL		VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS 01.42.vA.08		VUL_SLUIS 01.42.vB.08		LOCKFILL 5.03.00	
			s				s	min	s	min	m³/s	m³/s	m/s	m/s	min. min.	max. max.	min. min.	max. max.	min. min.	max. max.
Vullen opwaartse deelkolk	OPW_HSr_01	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	CEMT I	5	1.5	322.4	5.4	323.0	5.4	6.5	6.5	0.011	0.011	-0.71	0.24	-0.34	0.25	-0.39	0.24
	OPW_HSr_02	t > 0.0 s: 0.0039 m/s	209	CEMT I	5	1.5	225.8	3.8	226.4	3.8	9.3	9.3	0.016	0.016	-1.48	0.47	-0.72	0.49	-0.87	0.48
	OPW_HSr_03	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	Recreatie-vaart	5	3.0	322.4	5.4	323.0	5.4	6.5	6.5	0.011	0.011	-4.21	0.45	-1.99	0.45	-2.22	0.45
	OPW_HSr_04	t > 0.0 s: 0.0013 m/s	692		5	3.0	388.4	6.5	388.6	6.5	5.4	5.4	0.009	0.010	-2.90	0.31	-1.99	0.31	-1.53	0.31
	OPW_HSr_05	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474		8	3.0	322.4	5.4	323.0	5.4	6.5	6.5	0.011	0.011	-2.84	0.44	-1.29	0.45	-1.32	0.45
	OPW_HSr_06	t > 0.0 s: 0.0013 m/s	692	CEMT I	5	1.5	388.4	6.5	388.6	6.5	5.4	5.4	0.009	0.010	-0.49	0.17	-0.24	0.17	-0.11	0.17
Ledigen opwaartse deelkolk	OPW_HSr_07	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250	CEMT I	5	2.0	235.0	3.9	235.6	3.9	9.0	9.0	-0.015	-0.016	-0.26	0.46	-0.26	0.46	-0.26	0.41
	OPW_HSr_08	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250	Recreatie-vaart	5	3.0	235.0	3.9	235.6	3.9	9.0	9.0	-0.015	-0.016	-0.68	1.13	-0.68	1.13	-0.54	1.14
	OPW_HSr_09	t > 0.0 s: 0.0043 m/s	209	CEMT I	5	2.0	215.2	3.6	215.8	3.6	9.8	9.8	-0.017	-0.017	-0.31	0.53	-0.31	0.53	-0.30	0.50
	OPW_HSr_10	t > 0.0 s: 0.0043 m/s	209	Recreatie-vaart	5	3.0	215.2	3.6	215.8	3.6	9.8	9.8	-0.017	-0.017	-0.68	1.59	-0.69	1.59	-0.60	1.25
	OPW_HSr_11	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	CEMT I	5	2.0	362.2	6.0	362.8	6.0	5.8	5.8	-0.010	-0.010	-0.11	0.18	-0.11	0.18	-0.11	0.19
	OPW_HSr_12	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	Recreatie-vaart	5	3.0	362.2	6.0	362.8	6.0	5.8	5.8	-0.010	-0.010	-0.26	0.50	-0.26	0.50	-0.22	0.47
Vullen afwaartse deelkolk	AFW_HSr_01	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250	CEMT II	5	1.5	270.4	4.5	271.2	4.5	10.3	10.3	0.013	0.014	-1.50	0.50	-0.73	0.52	-0.83	0.51
	AFW_HSr_02	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250	Recreatie-vaart	5	1.5	270.4	4.5	271.2	4.5	10.3	10.3	0.013	0.014	-10.42	0.83	-4.69	0.85	-5.65	0.84
	AFW_HSr_03	t > 0.0 s: 0.0010 m/s	900		5	3.0	507.6	8.5	507.8	8.5	5.4	5.4	0.007	0.008	-2.96	0.24	-1.35	0.24	-1.57	0.24
	AFW_HSr_04	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250		18	3.0	270.4	4.5	271.2	4.5	10.3	10.3	0.013	0.014	-2.87	0.83	-1.23	0.83	-0.88	0.83
	AFW_HSr_05	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	CEMT II	5	1.5	416.2	6.9	416.4	6.9	6.57	6.57	0.009	0.009	-0.60	0.22	-0.29	0.20	-0.33	0.23
	AFW_HSr_06	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	Recreatie-vaart	8	1.5	416.2	6.9	416.4	6.9	6.57	6.57	0.009	0.009	-2.95	0.35	-1.28	0.40	-1.36	0.36
Ledigen afwaartse deelkolk	AFW_HSr_07	t > 0.0 s: 0.0140 m/s	64	CEMT II	5	2.0	178.4	3.0	179.0	3.0	19.4	19.4	-0.025	-0.025	-1.07	0.58	-1.07	0.58	-1.00	0.51
	AFW_HSr_08	t > 0.0 s: 0.0140 m/s	64	Recreatie-vaart	5	3.0	178.4	3.0	179.0	3.0	19.4	19.4	-0.025	-0.025	-2.19	1.99	-2.19	1.99	-2.26	1.98
	AFW_HSr_09	t > 0.0 s: 0.0047 m/s	191	CEMT II	5	2.0	241.4	4.0	242.0	4.0	11.8	11.8	-0.015	-0.016	-0.37	0.48	-0.37	0.48	-0.36	0.46
	AFW_HSr_10	t > 0.0 s: 0.0047 m/s	191	Recreatie-vaart	5	3.0	241.4	4.0	242.0	4.0	11.8	11.8	-0.015	-0.016	-1.12	1.44	-1.12	1.44	-0.70	1.13
	AFW_HSr_11	t > 0.0 s: 0.0020 m/s	450	CEMT II	5	2.0	361.0	6.0	361.6	6.0	7.6	7.6	-0.010	-0.010	-0.16	0.28	-0.16	0.30	-0.16	0.29
	AFW_HSr_12	t > 0.0 s: 0.0020 m/s	450	Recreatie-vaart	5	3.0	361.0	6.0	361.6	6.0	7.6	7.6	-0.010	-0.010	0.45	0.65	-0.45	0.60	-0.30	0.61

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Tabel 48 – Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse voor nivelleren volledige kolk, opwaartse en afwaartse deelkol met afwaartse waterstand +3.82 mTAW

Type	Naam	Openingswet	Openings- tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breek- balken	Criterium langskracht	Nivelleertijd				Extreme waarde Debiet		Extreme waarde stijgsnelheid		Langskracht [%]					
								VUL_SLUIS		LOCKFILL		VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS	LOCKFILL	VUL_SLUIS 01.42.vA.08		VUL_SLUIS 01.42.vB.08		LOCKFILL 5.03.00	
			s		m	J/N	‰	s	min	m³/s	m/s	‰	‰	‰	‰	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Vullen volledige kolk	VK_HSr_35	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	CEMT IV	5	N	1.1	473.6	7.9	473.6	7.9	8.8	8.8	0.006	0.007	-0.75	0.32	-0.36	0.34	-0.42	0.34
	VK_HSr_36	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	Recreatievaart	14	N	3.0	473.6	7.9	473.6	7.9	8.8	8.8	0.006	0.007	-2.95	0.39	-1.22	0.40	-0.94	0.38
	VK_HSr_37	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474		14	J (120 %)	3.0	473.6	7.9	473.6	7.9	8.8	8.8	0.006	0.007	-2.66	0.39	-1.11	0.40	-0.84	0.38
	VK_HSr_38	t > 0.0 s: 0.0013 m/s	692	CEMT IV	5	N	3.0	571.6	9.5	571.8	9.5	7.2	7.2	0.005	0.006	-0.51	0.23	-0.24	0.24	-0.28	0.24
	VK_HSr_39	t > 0.0 s: 0.0013 m/s	692	Recreatievaart	10	N	3.0	571.6	9.5	571.8	9.5	7.2	7.2	0.005	0.006	-2.87	0.27	-1.21	0.28	-1.14	0.26
Ledigen volledige kolk	VK_HSr_40	t > 0.0 s: 0.0047 s	191	CEMT IV	5	N	1.5	333.6	5.6	333.8	5.6	13.9	13.9	-0.010	-0.011	-0.42	0.36	-0.42	0.36	-0.42	0.45
	VK_HSr_41	t > 0.0 s: 0.0047 s	191	Recreatievaart	5	N	3.0	333.6	5.6	333.8	5.6	13.9	13.9	-0.010	-0.011	-0.83	1.09	-0.83	1.09	-0.63	0.89
	VK_HSr_42	t > 0.0 s: 0.0020 s	450	CEMT IV	5	N	1.5	461.8	7.7	462.0	7.7	9.0	9.0	-0.007	-0.007	-0.19	0.36	-0.19	0.36	-0.19	0.42
	VK_HSr_43	t > 0.0 s: 0.0020 s	450	Recreatievaart	5	N	3.0	461.8	7.7	462.0	7.7	9.0	9.0	-0.007	-0.007	-0.42	0.64	-0.42	0.64	-0.28	0.66
Vullen opwaartse deelkolk	OPW_HSr_13	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	CEMT I	5	N	1.5	308.8	5.1	309.4	5.2	5.7	5.7	0.010	0.010	-0.54	0.20	-0.26	0.20	-0.30	0.20
	OPW_HSr_14	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	Recreatievaart	6	N	3.0	308.8	5.1	309.4	5.2	5.7	5.7	0.010	0.010	-2.73	0.39	-1.33	0.40	-1.49	0.39
	OPW_HSr_15	t > 0.0 s: 0.0013 m/s	692	CEMT I	5	N	1.5	371.8	6.2	372.2	6.2	4.8	4.8	0.008	0.008	-0.37	0.14	-0.18	0.14	-0.21	0.14
	OPW_HSr_16	t > 0.0 s: 0.0013 m/s	692	Recreatievaart	5	N	3.0	371.8	6.2	372.2	6.2	4.8	4.8	0.008	0.008	-1.04	0.27	-1.04	0.27	-1.19	0.27
Ledigen opwaartse deelkolk	OPW_HSr_17	t > 0.0 s: 0.0036 s	250	CEMT I	5	N	2.0	225.2	3.8	225.8	3.8	7.9	7.9	-0.013	-0.014	-0.25	0.33	-0.24	0.33	-0.23	0.35
	OPW_HSr_18	t > 0.0 s: 0.0036 s	250	Recreatievaart	5	N	3.0	225.2	3.8	225.8	3.8	7.9	7.9	-0.013	-0.014	-0.52	1.10	-0.52	1.10	-0.47	0.96
	OPW_HSr_19	t > 0.0 s: 0.0015 s	600	CEMT I	5	N	2.0	346.8	5.8	347.4	5.8	5.1	5.1	-0.009	-0.009	-0.10	0.15	-0.10	0.15	-0.10	0.19
	OPW_HSr_20	t > 0.0 s: 0.0015 s	600	Recreatievaart	5	N	3.0	346.8	5.8	347.4	5.8	5.1	5.1	-0.009	-0.009	-0.21	0.40	-0.21	0.40	-0.20	0.48
Vullen afwaartse deelkolk	AFW_HSr_18	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250	CEMT II	5	N	1.5	258.6	4.3	259.2	4.3	9.1	9.1	0.012	0.012	-1.11	0.40	-0.55	0.41	-0.63	0.41
	AFW_HSr_19	t > 0.0 s: 0.0036 m/s	250	Recreatievaart	14	N	3.0	258.6	4.3	259.2	4.3	9.1	9.1	0.012	0.012	-2.94	0.72	-1.28	0.73	-1.16	0.69
	AFW_HSr_20	t > 0.0 s: 0.0015 s	600	CEMT II	5	N	1.5	398.6	6.6	398.6	6.6	5.8	5.8	0.008	0.008	-0.45	0.18	-0.21	0.18	-0.25	0.18
	AFW_HSr_21	t > 0.0 s: 0.0015 s	600	Recreatievaart	6	N	3.0	398.6	6.6	398.6	6.6	5.8	5.8	0.008	0.008	-2.84	0.31	-1.26	0.32	-1.52	0.31
Ledigen afwaartse deelkolk	AFW_HSr_22	t > 0.0 s: 0.0047 m/s	191	CEMT II	5	N	2.0	229.6	3.8	230.3	3.8	10.4	10.4	-0.013	-0.014	-0.34	0.41	-0.34	0.41	-0.33	0.39
	AFW_HSr_23	t > 0.0 s: 0.0047 m/s	191	Recreatievaart	5	N	3.0	229.6	3.8	230.3	3.8	10.4	10.4	-0.013	-0.014	-0.99	1.22	-0.99	1.22	-0.64	1.14
	AFW_HSr_24	t > 0.0 s: 0.0020 m/s	450	CEMT II	5	N	2.0	345.8	5.8	346.4	5.8	6.7	6.7	-0.009	-0.009	-0.15	0.29	-0.15	0.23	-0.15	0.23
	AFW_HSr_25	t > 0.0 s: 0.0020 m/s	450	Recreatievaart	5	N	3.0	345.8	5.8	346.4	5.8	6.7	6.7	-0.009	-0.009	-0.41	0.58	-0.41	0.58	-0.28	0.61

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Tabel 49 – Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse voor nivelleren volledige sluis kolk met VUL_SLUIS release 01.54.00

Type	Naam	Openingssnelheid	Openings- tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breek- balken	Criterium langskracht	Nivelleertijd		Extreme waarde Debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Langskracht							
												VUL_SLUIS 01.42.vA.08		VUL_SLUIS 01.42.vB.08		LOCKFILL 5.03.00		VUL_SLUIS 01.54.00	
			s		m	J/N	%	s	min	m³/s	m/s	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
												%	%	%	%	%	%	%	%
Vullen volledige kolk	VK_HSr_09	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	CEMT IV	5	N	1.1	494.8	8.2	9.9	0.007	-1.05	0.43	-0.50	0.45	-0.57	0.46	-0.72	0.45
	VK_HSr_10	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	CEMT III	5	N	1.5	494.8	8.2	9.9	0.007	-1.25	0.40	-0.58	0.42	-0.68	0.42	-0.92	0.42
	VK_HSr_11	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	CEMT II	5	N	1.5	494.8	8.2	9.9	0.007	-1.37	0.29	-0.63	0.30	-0.73	0.30	-1.00	0.30
	VK_HSr_12	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	Recreatie- vaart	5	N	3.0	494.8	8.2	9.9	0.007	-9.96	0.45	-4.45	0.46	-5.21	0.46	-7.35	0.46
	VK_HSr_44	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475		9	N	3.0	494.8	8.2	9.9	0.007	-	-	-	-	-	-	-2.85	0.46
	VK_HSr_45	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	CEMT IV	5	J	1.1	494.8	8.2	9.9	0.007	-	-	-	-	-	-	-0.54	0.46
	VK_HSr_46	t > 0.0 s: 0.00190 m/s	475	Recreatie- vaart	5	J (120 %)	3.0	494.8	8.2	9.9	0.007	-	-	-	-	-	-	-6.21	0.46
Ledigen volledige kolk	VK_HSr_27	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450	CEMT IV	5	N	1.5	483.0	8.1	10.2	-0.007	-0.22	0.44	-0.22	0.40	-0.21	0.50	-0.22	0.43
	VK_HSr_28	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450	CEMT III	5	N	2.0	483.0	8.1	10.2	-0.007	-0.23	0.44	-0.23	0.40	-0.22	0.51	-0.22	0.43
	VK_HSr_29	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450	CEMT II	5	N	2.0	483.0	8.1	10.2	-0.007	-0.19	0.36	-0.19	0.40	-0.17	0.39	-0.19	0.36
	VK_HSr_30	t > 0.0 s: 0.00200 m/s	450	Recreatie- vaart	5	N	3.0	483.0	8.1	10.2	-0.007	-0.46	0.82	-0.46	0.80	-0.33	0.70	-0.56	0.77

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium; - = Simulatie niet uitgevoerd

Tabel 50 – Resultaten simulaties gevoeligheidsanalyse voor nivelleren afwaartse en opwaartse deelkolk met VUL_SLUIS release 01.54.00

Type	Naam	Openingswet	Openings- tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breek- balken	Criterium langskracht	Nivelleertijd		Extreme waarde Debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Langskracht							
												VUL_SLUIS 01.42.vA.08		VUL_SLUIS 01.42.vB.08		LOCKFILL 5.03.00		VUL_SLUIS 01.54.00	
			s					s	min			min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
					m	J/N	‰			m³/s	m/s	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰
Vullen opwaartse kolk	OPW_HSr_01	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	CEMT I	5	N	1.5	322.4	5.4	6.5	0.011	-0.71	0.24	-0.34	0.25	-0.39	0.24	-0.56	0.25
	OPW_HSr_03	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	Recreatie- vaart	5	N	3.0	322.4	5.4	6.5	0.011	-4.21	0.45	-1.99	0.45	-2.22	0.45	-3.25	0.45
	OPW_HSr_21	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474		6	N	3.0	322.4	5.4	6.5	0.011	-	-	-	-	-	-	-2.65	0.45
	OPW_HSr_22	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474		5	J (120 %)	3.0	322.4	5.4	6.5	0.011	-	-	-	-	-	-	-2.75	0.45
	OPW_HSr_23	t > 0.0 s: 0.0019 m/s	474	CEMT I	5	J (120 %)	1.5	322.4	5.4	6.5	0.011	-	-	-	-	-	-	-0.47	0.25
Ledigen opwaartse kolk	OPW_HSr_11	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	CEMT I	5	N	2.0	362.2	6.0	5.8	-0.010	-0.11	0.18	-0.11	0.18	-0.11	0.19	-0.11	0.18
	OPW_HSr_12	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	Recreatie- vaart	5	N	3.0	362.2	6.0	5.8	-0.010	-0.26	0.50	-0.26	0.50	-0.22	0.47	-0.28	0.52
Vullen afwaartse kolk	AFW_HSr_05	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	CEMT II	5	N	1.5	270.4	4.5	10.3	0.013	-1.50	0.50	-0.73	0.52	-0.83	0.51	-0.46	0.23
	AFW_HSr_26	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	Recreatie- vaart	5	N	3.0	270.4	4.5	10.3	0.013	-	-	-	-	-	-	-3.34	0.36
	AFW_HSr_27	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600		6	N	3.0	270.4	4.5	10.3	0.013	-	-	-	-	-	-	-2.51	0.36
	AFW_HSr_28	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600		5	N	3.0	270.4	4.5	10.3	0.013	-	-	-	-	-	-	-2.83	0.36
	AFW_HSr_29	t > 0.0 s: 0.0015 m/s	600	CEMT II	5	J (120 %)	1.5	270.4	4.5	10.3	0.013	-	-	-	-	-	-	-0.37	0.23
Ledigen afwaartse kolk	AFW_HSr_11	t > 0.0 s: 0.0020 m/s	450	CEMT II	5	N	2.0	361.0	6.0	7.6	-0.010	-0.16	0.28	-0.16	0.30	-0.16	0.29	-0.16	0.27
	AFW_HSr_12	t > 0.0 s: 0.0020 m/s	450	Recreatie- vaart	5	N	3.0	361.0	6.0	7.6	-0.010	-0.45	0.65	-0.45	0.60	-0.30	0.61	-0.50	0.71

groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium; - = Simulatie niet uitgevoerd

Tweede reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem

Tabel 51 – Resultaten tweede reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren volledige kolk

Type	Naam	Openingswet	Openings- tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breekbalken	Criterium langskracht	Nivelleertijd		Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht	
			s		m			s	min			min.	max.
Vullen volledige kolk	VK_HSr_47	$t > 0.0$ s : 0.0019 m/s	474	CEMT IV	5	N	1.1	473.6	7.9	8.8	0.006	-0.57	0.34
	VK_HSr_48	$t > 0.0$ s : 0.0019 m/s	474	Recreatievaart	5	N	3.0	473.6	7.9	8.8	0.006	-5.62	0.40
	VK_HSr_49	$0.0 \text{ s} < t < 130.0 \text{ s}$: 0.0019 m/s $130.1 \text{ s} < t < 285.0 \text{ s}$: 0.0000 m/s $t > 285.1 \text{ s}$: 0.0019 m/s	629	CEMT IV	5	N	1.1	582.2	9.7	6.4	0.005	-0.31	0.34
	VK_HSr_50	$0.0 \text{ s} < t < 130.0 \text{ s}$: 0.0019 m/s $130.1 \text{ s} < t < 285.0 \text{ s}$: 0.0000 m/s $t > 285.1 \text{ s}$: 0.0019 m/s	629	Recreatievaart	5	N	3.0	582.2	9.7	6.4	0.005	-2.93	0.40
	VK_HSr_51	$0.0 \text{ s} < t < 130.0 \text{ s}$: 0.0019 m/s $130.1 \text{ s} < t < 285.0 \text{ s}$: 0.0000 m/s $285.1 \text{ s} < t < 420.0 \text{ s}$: 0.0019 m/s $t > 420.1 \text{ s}$: 0.0030 m/s	552	Recreatievaart	5	N	3.0	567.6	9.5	6.4	0.005	-2.93	0.40
	VK_HSr_52	$0.0 \text{ s} < t < 140.0 \text{ s}$: 0.0019 m/s $140.1 \text{ s} < t < 250.0 \text{ s}$: 0.0000 m/s $t > 250.1 \text{ s}$: 0.0019 m/s	583 s	CEMT IV	5	J (140 %)	1.1	548.8	9.1	7.0	0.005	-0.29	0.34
	VK_HSr_53	$0.0 \text{ s} < t < 140.0 \text{ s}$: 0.0019 m/s $140.1 \text{ s} < t < 250.0 \text{ s}$: 0.0000 m/s $t > 250.1 \text{ s}$: 0.0019 m/s	583 s	Recreatievaart	5	J (140 %)	3.0	548.8	9.1	7.0	0.005	-2.90	0.40
Ledigen volledige kolk	VK_HSr_54	$t > 0.0$ s : 0.0025 s	360	CEMT IV	5	N	1.5	417.2	7.0	10.1	-0.007	-0.23	0.35
	VK_HSr_55	$t > 0.0$ s : 0.0025 s	360	Recreatievaart	5	N	3.0	417.2	7.0	10.1	-0.007	-0.42	0.87

Tabel 52 – Resultaten tweede reeks simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren opwaartse en afwaartse deelcolk

Type	Naam	Openingswet	Openings- tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breekbalken	Criterium langskracht	Nivelleertijd		Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht	
			s		m	J/N	‰	s	min	m³/s	m/s	min.	max.
Vullen opwaartse deelcolk	OPW_HSr_24	$t > 0.0 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$	474	Recreatievaart	5	N	3.0	308.8	5.1	5.7	0.010	-2.53	0.40
	OPW_HSr_25	$0.0 \text{ s} < t < 130.0 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$ $130.1 \text{ s} < t < 285.0 \text{ s} : 0.0000 \text{ m/s}$ $t > 285.1 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$	629	CEMT I	5	N	1.5	386.4	6.4	5.3	0.009	-0.41	0.20
	OPW_HSr_26	$0.0 \text{ s} < t < 130.0 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$ $130.1 \text{ s} < t < 285.0 \text{ s} : 0.0000 \text{ m/s}$ $t > 285.1 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$	629	Recreatievaart	5	N	3.0	386.4	6.4	5.3	0.009	-2.32	0.40
	OPW_HSr_27	$0.0 \text{ s} < t < 140.0 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$ $140.1 \text{ s} < t < 250.0 \text{ s} : 0.0000 \text{ m/s}$ $t > 250.1 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$	583	CEMT I	5	J (140 %)	1.5	362.2	6.0	5.5	0.009	-0.35	0.20
	OPW_HSr_28	$0.0 \text{ s} < t < 140.0 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$ $140.1 \text{ s} < t < 250.0 \text{ s} : 0.0000 \text{ m/s}$ $t > 250.1 \text{ s} : 0.0019 \text{ m/s}$	583	Recreatievaart	5	J (140 %)	3.0	362.2	6.0	5.5	0.009	-2.06	0.40
Ledigen opwaartse deelcolk	OPW_HSr_29	$t > 0.0 \text{ s} : 0.0017 \text{ s}$	565	CEMT I	5	N	2.0	326.2	5.4	-5.4	-0.009	-0.12	0.16
	OPW_HSr_30	$t > 0.0 \text{ s} : 0.0017 \text{ s}$	565	Recreatievaart	5	N	3.0	326.2	5.4	-5.4	-0.009	-0.26	0.47
Vullen afwaartse deelcolk	AFW_HSr_30	$t > 0.0 \text{ s} : 0.0017 \text{ m/s}$	565	CEMT II	5	N	1.5	374.8	6.2	6.2	0.008	-0.40	0.20
	AFW_HSr_31	$t > 0.0 \text{ s} : 0.0017 \text{ m/s}$	565	Recreatievaart	5	N	3.0	374.8	6.2	6.2	0.008	-2.90	0.36
Ledigen afwaartse deelcolk	AFW_HSr_32	$t > 0.0 \text{ s} : 0.0025 \text{ m/s}$	552	CEMT II	5	N	2.0	309.8	5.2	7.5	-0.010	-0.19	0.28
	AFW_HSr_33	$t > 0.0 \text{ s} : 0.0025 \text{ m/s}$	552	Recreatievaart	5	N	3.0	309.8	5.2	7.5	-0.010	-0.40	0.76

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Finale simulaties geselecteerd nivelleersysteem

Tabel 53 – Resultaten finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren volledige kolk

Type	Naam	Hoogte openingen	Openingswet	Openings-tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breek-balken	Criterium langskracht	Software	Nivelleertijd		Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht	
		m		s		m	J/N	‰		s	min	m³/s	m/s	min.	max.
Vullen volledige kolk	VK_HSr_56	0.90 m	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s 125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s	609	CEMT IV	5	N	1.1	VUL_SLUIS	584.2	9.7	6.4	0.005	-0.29	0.34
	VK_HSr_57				Recreatievaart	5	N	3.0	LOCKFILL	584.2	9.7	6.4	0.005	-0.28	0.35
	VK_HSr_58	0.90 m	0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s 137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s t > 220.1 s : 0.0019 m/s	556	CEMT IV	5	J (140 %)	1.1	VUL_SLUIS	546.6	9.1	7.0	0.005	-0.30	0.35
	VK_HSr_59				Recreatievaart	5	J (140 %)	3.0	LOCKFILL	546.8	9.1	7.0	0.006	-0.29	0.36
	VK_HSr_60	0.80 m	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s 125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s	556	CEMT IV	5	N	1.1	VUL_SLUIS	591.0	9.9	6.3	0.005	-0.28	0.34
	VK_HSr_61				Recreatievaart	5	N	3.0	LOCKFILL	591.0	9.9	6.3	0.005	-0.27	0.34
	VK_HSr_62	0.80 m	0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s 137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s t > 220.1 s : 0.0019 m/s	504	CEMT IV	5	J (140 %)	1.1	VUL_SLUIS	554.6	9.2	7.0	0.005	-0.30	0.35
	VK_HSr_63				Recreatievaart	5	J (140 %)	3.0	LOCKFILL	554.6	9.2	7.0	0.006	-0.28	0.35
Ledigen volledige kolk	VK_HSr_64	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	CEMT IV	5	N	1.5	VUL_SLUIS	494.2	8.2	8.2	-0.006	-0.18	0.27
	VK_HSr_65				Recreatievaart	5	N	3.0	LOCKFILL	494.4	8.2	8.2	-0.006	-0.25	0.47
	VK_HSr_66	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	CEMT IV	5	N	1.5	VUL_SLUIS	494.2	8.2	8.2	-0.006	-0.37	0.50
	VK_HSr_67				Recreatievaart	5	N	3.0	LOCKFILL	494.4	8.2	8.2	-0.006	-0.30	0.20
	VK_HSr_68	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	CEMT IV	5	N	1.5	VUL_SLUIS	505.0	8.4	8.1	-0.006	-0.18	0.21
	VK_HSr_69				Recreatievaart	5	N	3.0	LOCKFILL	505.2	8.4	8.1	-0.006	-0.18	0.24
	VK_HSr_70	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	CEMT IV	5	N	1.5	VUL_SLUIS	505.0	8.4	8.1	-0.006	-0.37	0.42
	VK_HSr_71				Recreatievaart	5	N	3.0	LOCKFILL	505.2	8.4	8.1	-0.006	-0.25	0.39

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Tabel 54 – Resultaten finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren opwaartse deelcolk

Type	Naam	Hoogte openingen	Openingswet	Openings-tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breek-balken	Criterium langskracht	Software	Nivelleertijd		Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht	
		m								s	min			min.	max.
Vullen opwaartse deelcolk	OPW_HSr_31	0.90 m	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s 125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s	609	CEMT I	5	N	1.5	VUL_SLUIS	378.0	6.3	5.3	0.009	-0.41	0.20
									LOCKFILL	378.0	6.3	5.3	0.009	-0.32	0.20
	OPW_HSr_32				Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	378.0	6.3	5.3	0.009	-2.39	0.40
									LOCKFILL	378.0	6.3	5.3	0.009	-1.60	0.40
	OPW_HSr_33	0.90 m	0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s 137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s t > 220.1 s : 0.0019 m/s	556	CEMT I	5	J (140 %)	1.5	VUL_SLUIS	351.0	5.9	5.5	0.009	-0.35	0.20
									LOCKFILL	351.4	5.9	5.5	0.010	-0.28	0.20
	OPW_HSr_34				Recreatievaart	5	J (140 %)	3.0	VUL_SLUIS	351.0	5.9	5.5	0.009	-2.22	0.40
									LOCKFILL	351.4	5.9	5.5	0.010	-1.37	0.40
	OPW_HSr_35	0.80 m	0.0 s < t < 125.0 s : 0.0019 m/s 125.1 s < t < 260.0 s : 0.0000 m/s t > 260.1 s : 0.0019 m/s	556	CEMT I	5	N	1.5	VUL_SLUIS	382.4	6.4	5.2	0.009	-0.39	0.20
									LOCKFILL	382.4	6.4	5.2	0.009	-0.31	0.20
	OPW_HSr_36				Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	382.4	6.4	5.2	0.009	-2.23	0.40
									LOCKFILL	382.4	6.4	5.2	0.009	-1.54	0.40
Ledigen opwaartse deelcolk	OPW_HSr_37	0.80 m	0.0 s < t < 137.0 s : 0.0019 m/s 137.1 s < t < 220.0 s : 0.0000 m/s t > 220.1 s : 0.0019 m/s	504	CEMT I	5	J (140 %)	1.5	VUL_SLUIS	354.8	5.9	5.4	0.009	-0.33	0.20
									LOCKFILL	355.0	5.9	5.4	0.010	-0.27	0.20
	OPW_HSr_38				Recreatievaart	5	J (140 %)	3.0	VUL_SLUIS	354.8	5.9	5.4	0.009	-2.18	0.40
									LOCKFILL	355.0	5.9	5.4	0.010	-1.32	0.40
	OPW_HSr_39	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	CEMT I	5	N	2.0	VUL_SLUIS	313.2	5.2	5.6	-0.010	-0.13	0.16
									LOCKFILL	313.8	5.2	5.6	-0.010	-0.13	0.17
	OPW_HSr_40				Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	313.2	5.2	5.6	-0.010	-0.29	0.47
									LOCKFILL	313.8	5.2	5.6	-0.010	-0.26	0.45
	OPW_HSr_41	0.90 m	0.0 s < t < 150.0 s : 0.0019 m/s 150.1 s < t < 160.0 s : 0.0000 m/s t > 160.1 s : 0.0019 m/s	484	CEMT I	5	N	2.0	VUL_SLUIS	317.8	5.3	5.6	-0.010	-0.13	0.15
									LOCKFILL	318.4	5.3	5.6	-0.010	-0.13	0.18
	OPW_HSr_42				Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	317.8	5.3	5.6	-0.010	-0.29	0.45
									LOCKFILL	318.4	5.3	5.6	-0.010	-0.26	0.47
	OPW_HSr_43	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	CEMT I	5	N	2.0	VUL_SLUIS	316.4	5.3	5.5	0.009	-0.13	0.16
									LOCKFILL	317.0	5.3	5.5	-0.010	-0.13	0.18
	OPW_HSr_44				Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	316.4	5.3	5.5	0.009	-0.28	0.45
									LOCKFILL	317.0	5.3	5.5	-0.010	-0.26	0.46

Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

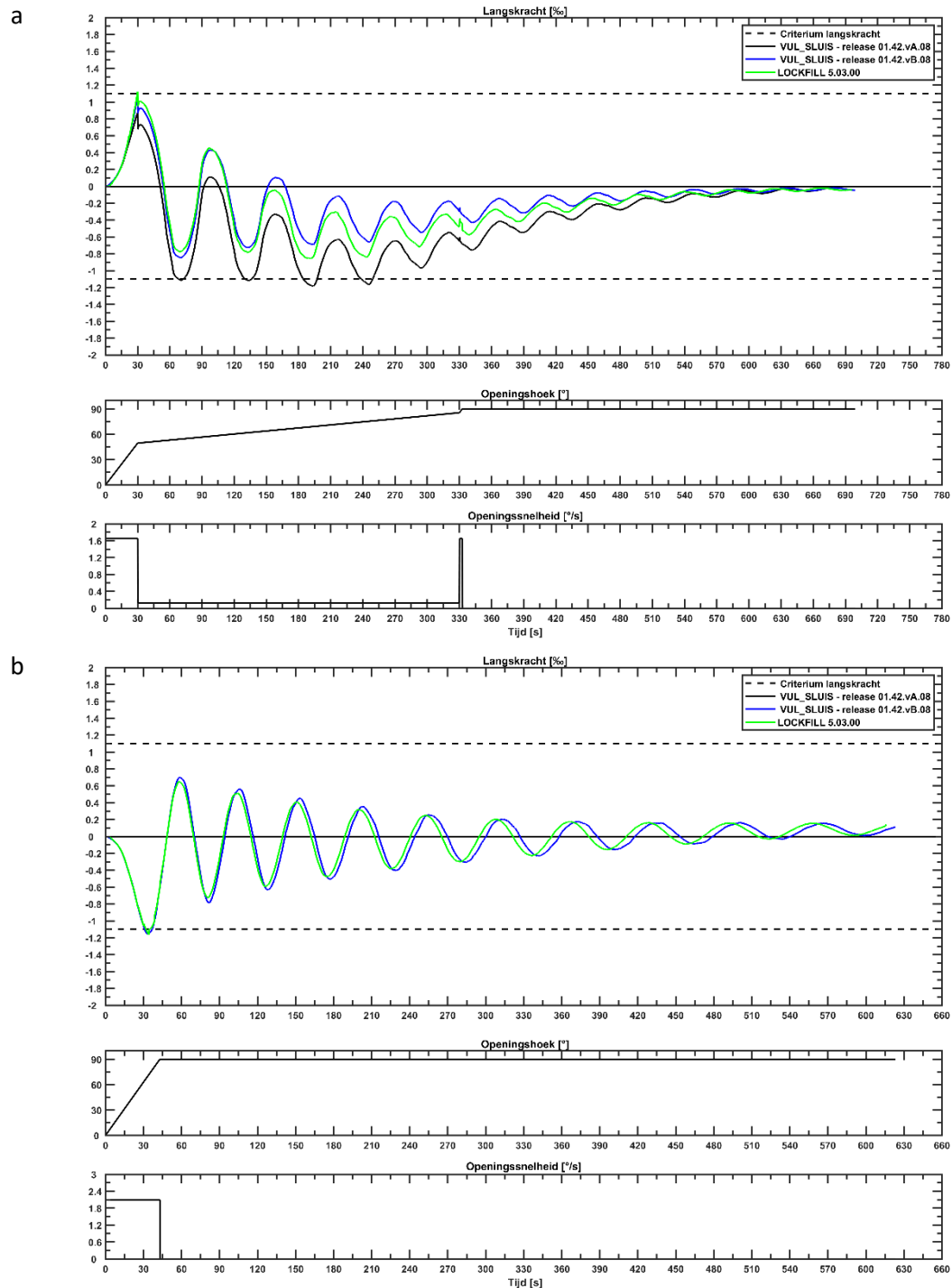
Tabel 55 – Resultaten finale simulaties met geselecteerd nivelleersysteem voor nivelleren afwaartse deelkolk

Type	Naam	Hoogte openingen	Openingswet	Openings-tijd	Schip	Afstand schip sluisdeur	Breek-balken	Criterium langskracht	Software	Nivelleertijd		Extreme waarde debiet	Extreme waarde stijgsnelheid	Extreme waarde langskracht	
		m		s		m	J/N	‰		s	min	m³/s	m/s	min.	max.
Vullen afwaartse deelkolk	AFW_HSr_34	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	CEMT II	5	N	1.5	VUL_SLUIS	363.2	6.1	6.3	0.008	-0.43	0.23
									LOCKFILL	363.4	6.1	6.3	0.009	-0.30	0.23
	AFW_HSr_35	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	363.2	6.1	6.3	0.008	-3.09	0.40
									LOCKFILL	363.4	6.1	6.3	0.009	-2.10	0.40
	AFW_HSr_36	0.90 m	0.0 s < t < 150.0 s : 0.0019 m/s 150.1 s < t < 160.0 s : 0.0000 m/s t > 160.1 s : 0.0019 m/s	484	CEMT II	5	N	1.5	VUL_SLUIS	368.4	6.1	6.1	0.008	-0.44	0.23
									LOCKFILL	368.4	6.1	6.1	0.008	-0.33	0.23
	AFW_HSr_37	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	368.4	6.1	6.1	0.008	-2.99	0.40
									LOCKFILL	368.4	6.1	6.1	0.008	-2.09	0.40
	AFW_HSr_38	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	CEMT II	5	J (140 %)	1.5	VUL_SLUIS	362.2	6.0	6.4	0.008	-0.37	0.23
									LOCKFILL	362.4	6.0	6.4	0.009	-0.26	0.23
	AFW_HSr_39	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	Recreatievaart	5	J (140 %)	3.0	VUL_SLUIS	362.2	6.0	6.4	0.008	-2.69	0.40
									LOCKFILL	362.4	6.0	6.4	0.009	-1.77	0.40
	AFW_HSr_40	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	CEMT II	5	N	1.5	VUL_SLUIS	366.4	6.1	6.3	0.008	-0.41	0.23
									LOCKFILL	366.6	6.1	6.3	0.009	-0.29	0.23
	AFW_HSr_41	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	366.4	6.1	6.3	0.008	-2.93	0.40
									LOCKFILL	366.6	6.1	6.3	0.009	-2.03	0.40
Ledigen afwaartse deelkolk	AFW_HSr_42	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	CEMT II	5	J (140 %)	1.5	VUL_SLUIS	365.4	6.1	6.3	0.008	-0.36	0.23
									LOCKFILL	365.6	6.1	6.3	0.009	-0.25	0.23
	AFW_HSr_43	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	Recreatievaart	5	J (140 %)	3.0	VUL_SLUIS	365.4	6.1	6.3	0.008	-2.57	0.40
									LOCKFILL	365.6	6.1	6.3	0.009	-1.72	0.40
	AFW_HSr_44	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	CEMT II	5	N	2.0	VUL_SLUIS	363.2	6.1	6.3	-0.008	-0.14	0.18
									LOCKFILL	363.4	6.1	6.3	-0.009	-0.14	0.30
	AFW_HSr_45	0.90 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	474	Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	363.2	6.1	6.3	-0.008	-0.31	0.47
									LOCKFILL	363.4	6.1	6.3	-0.009	-0.27	0.71
	AFW_HSr_46	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	CEMT II	5	N	2.0	VUL_SLUIS	366.4	6.1	6.3	-0.008	-0.14	0.18
									LOCKFILL	366.6	6.1	6.3	-0.009	-0.14	0.28
	AFW_HSr_47	0.80 m	t > 0.0 s : 0.0019 m/s	421	Recreatievaart	5	N	3.0	VUL_SLUIS	366.4	6.1	6.3	-0.008	-0.31	0.52
									LOCKFILL	366.6	6.1	6.3	-0.009	-0.27	0.65

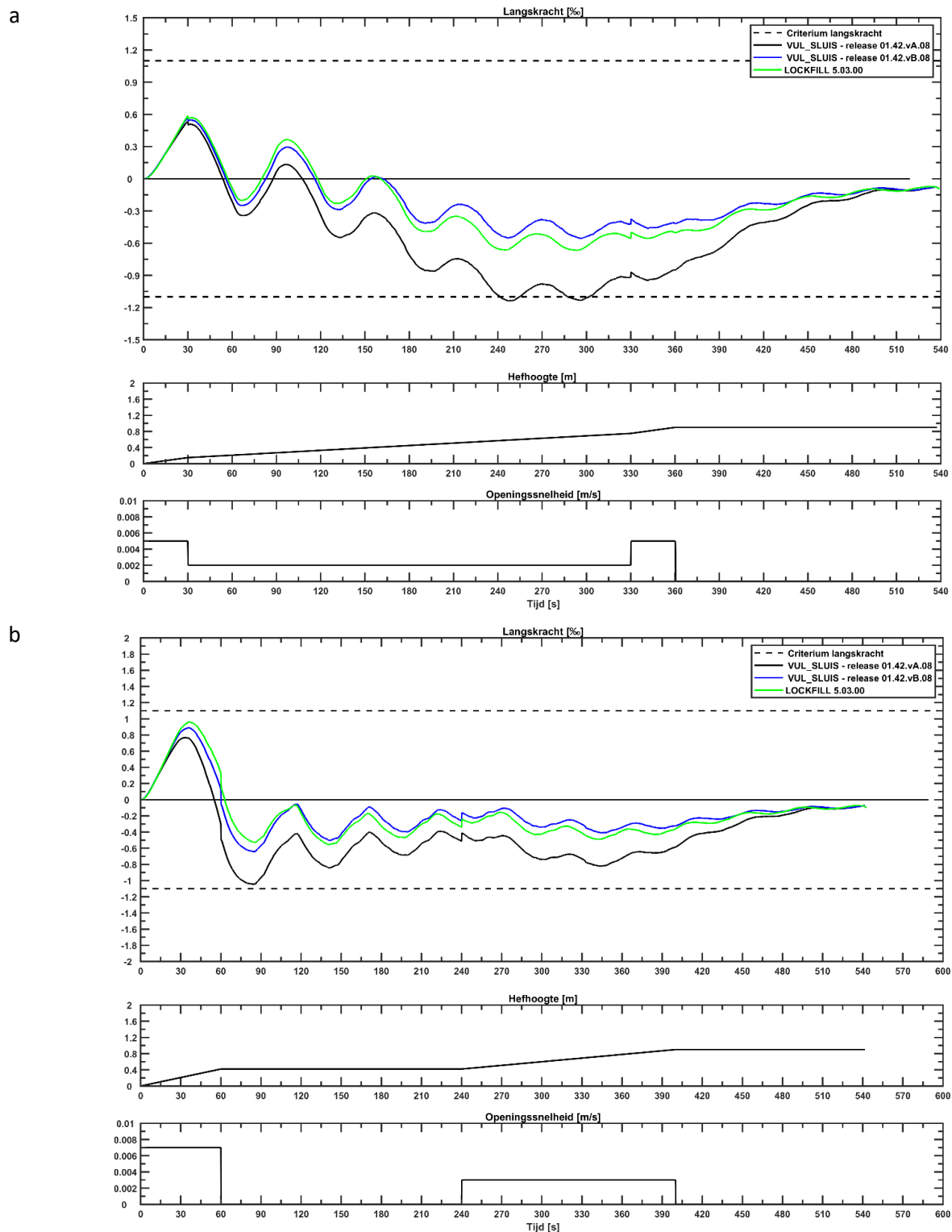
Groen: voldoet aan criterium; rood: voldoet niet aan criterium

Bijlage 2: Figuren

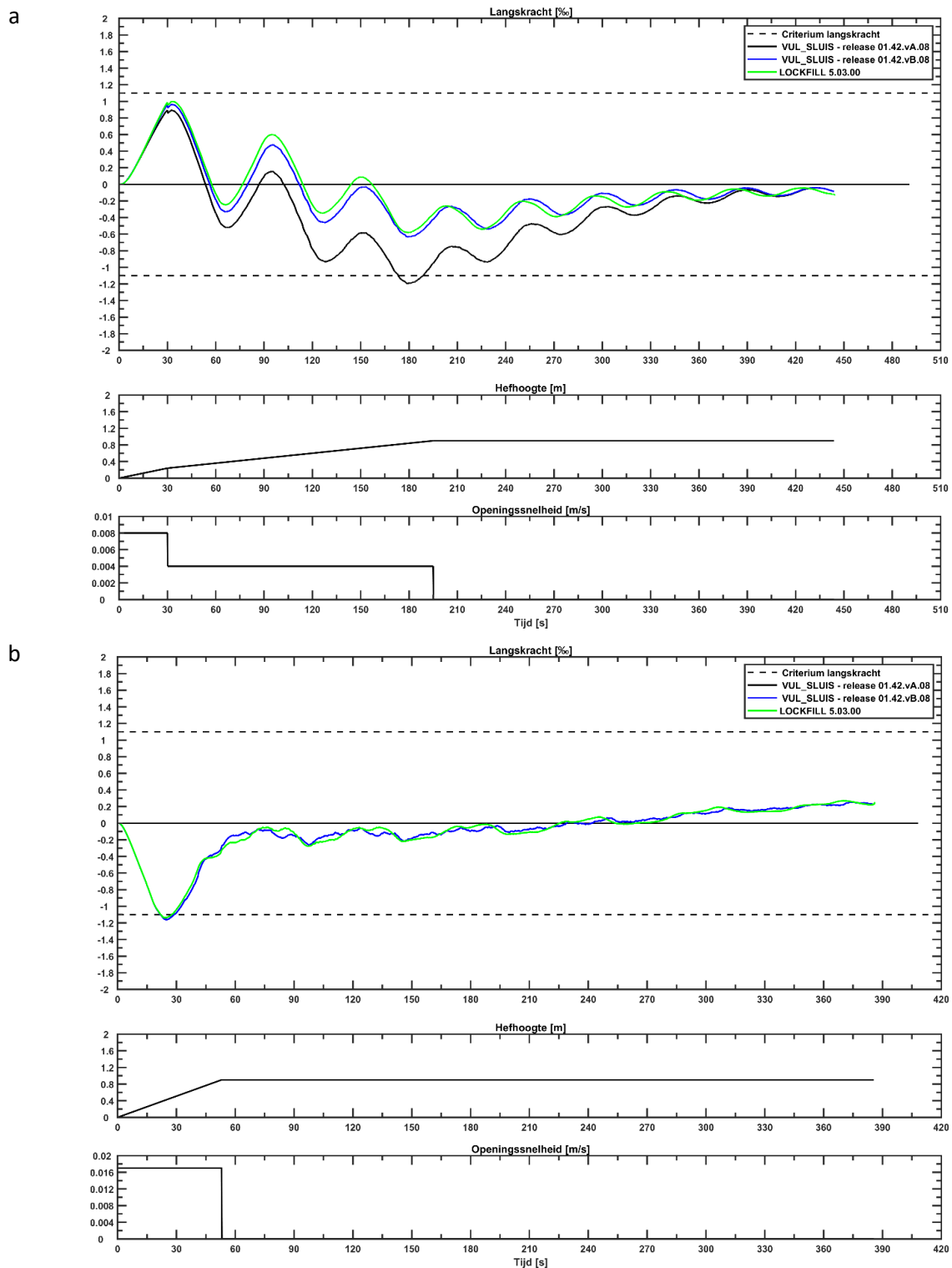
Initiële simulaties drie types niveleersystemen



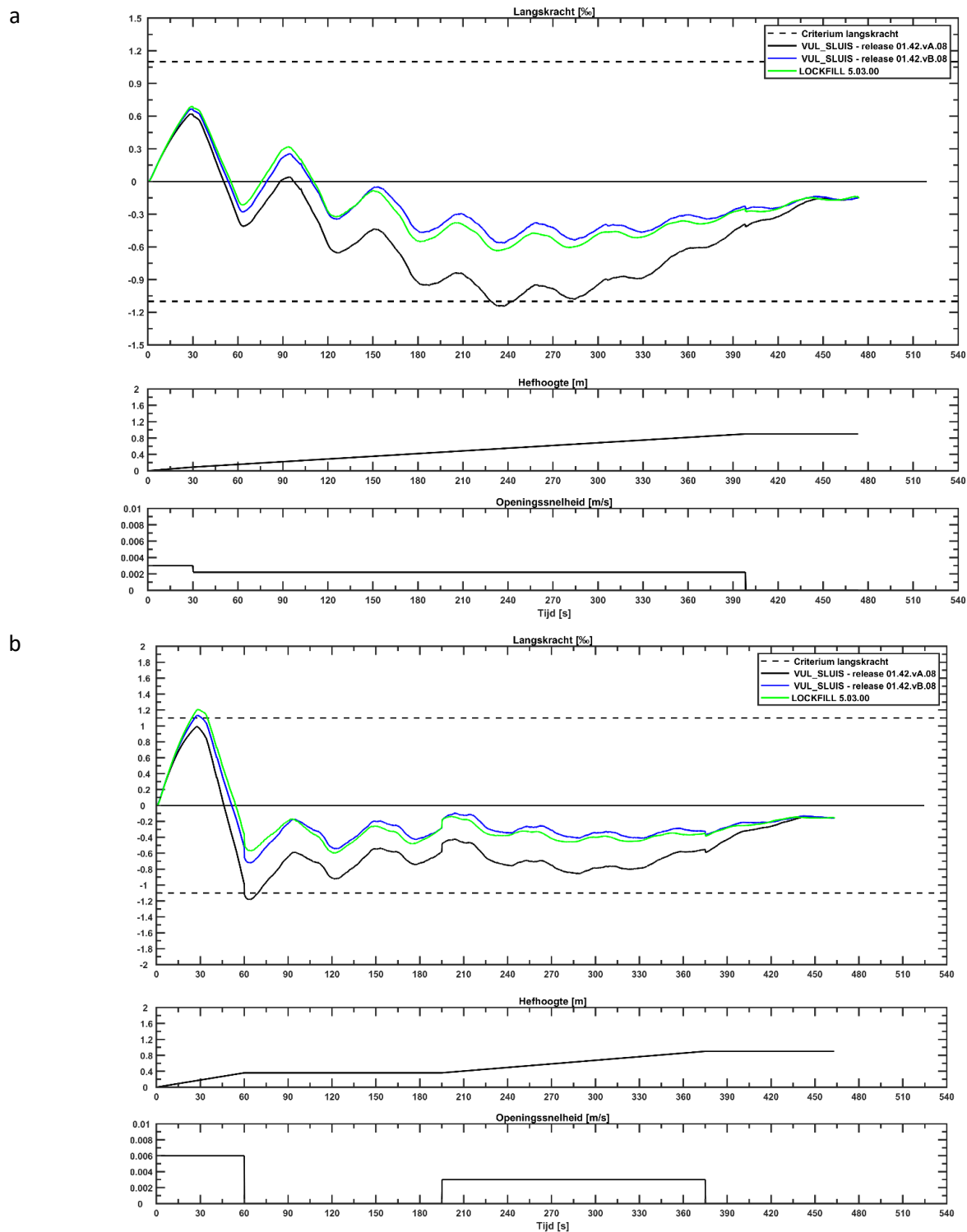
Figuur 18 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_VKc_01 en simulatie VK_VKc_04
a: VK_VKc_01; b VK_VKc_04



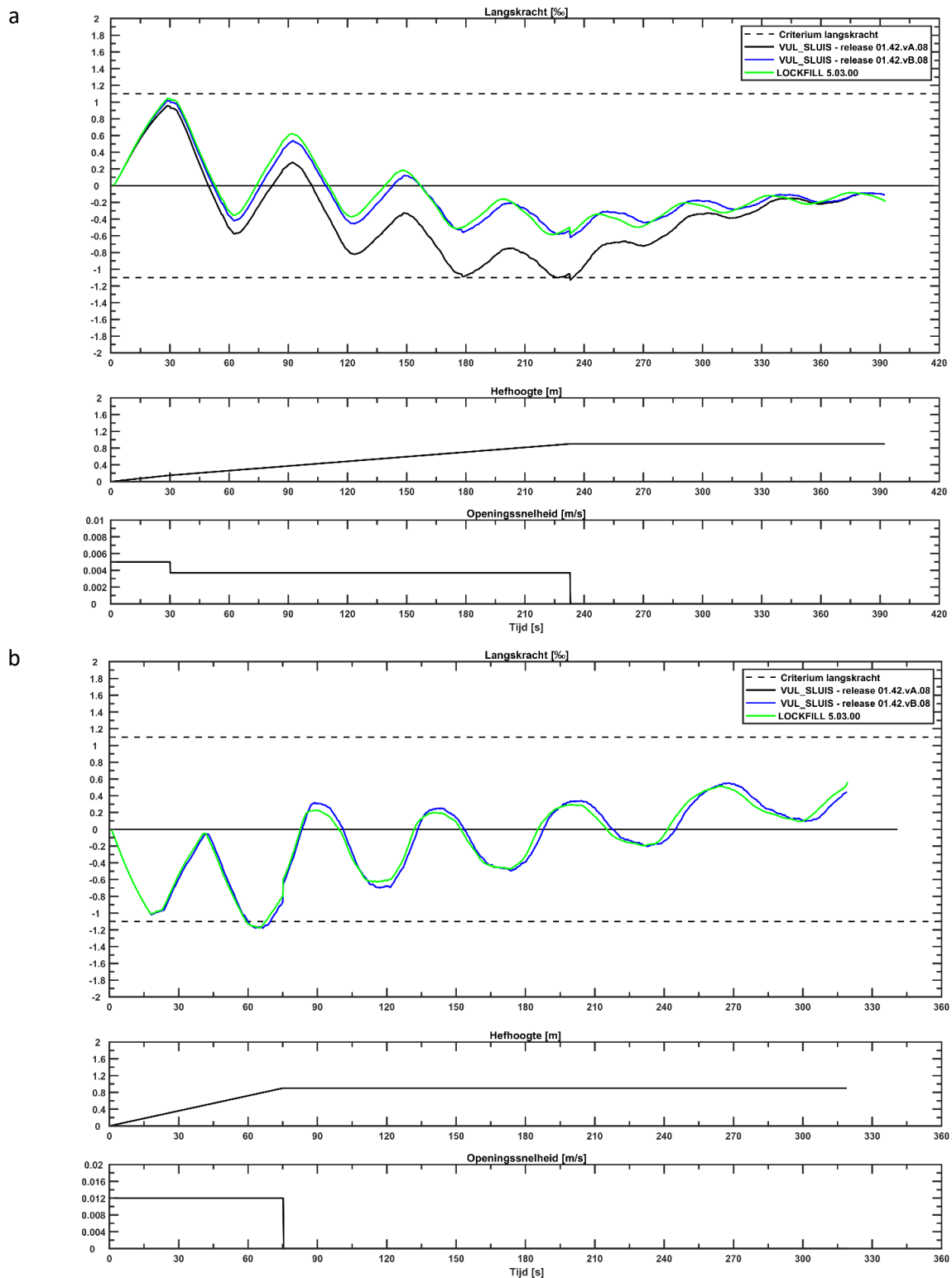
Figuur 19 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_HSc_01 en simulatie VK_HSc_06
a: VK_HSc_01; b: VK_HSc_06



Figuur 20 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_HSc_07 en simulatie VK_HSc_08
a: VK_HSc_07; b: VK_HSc08

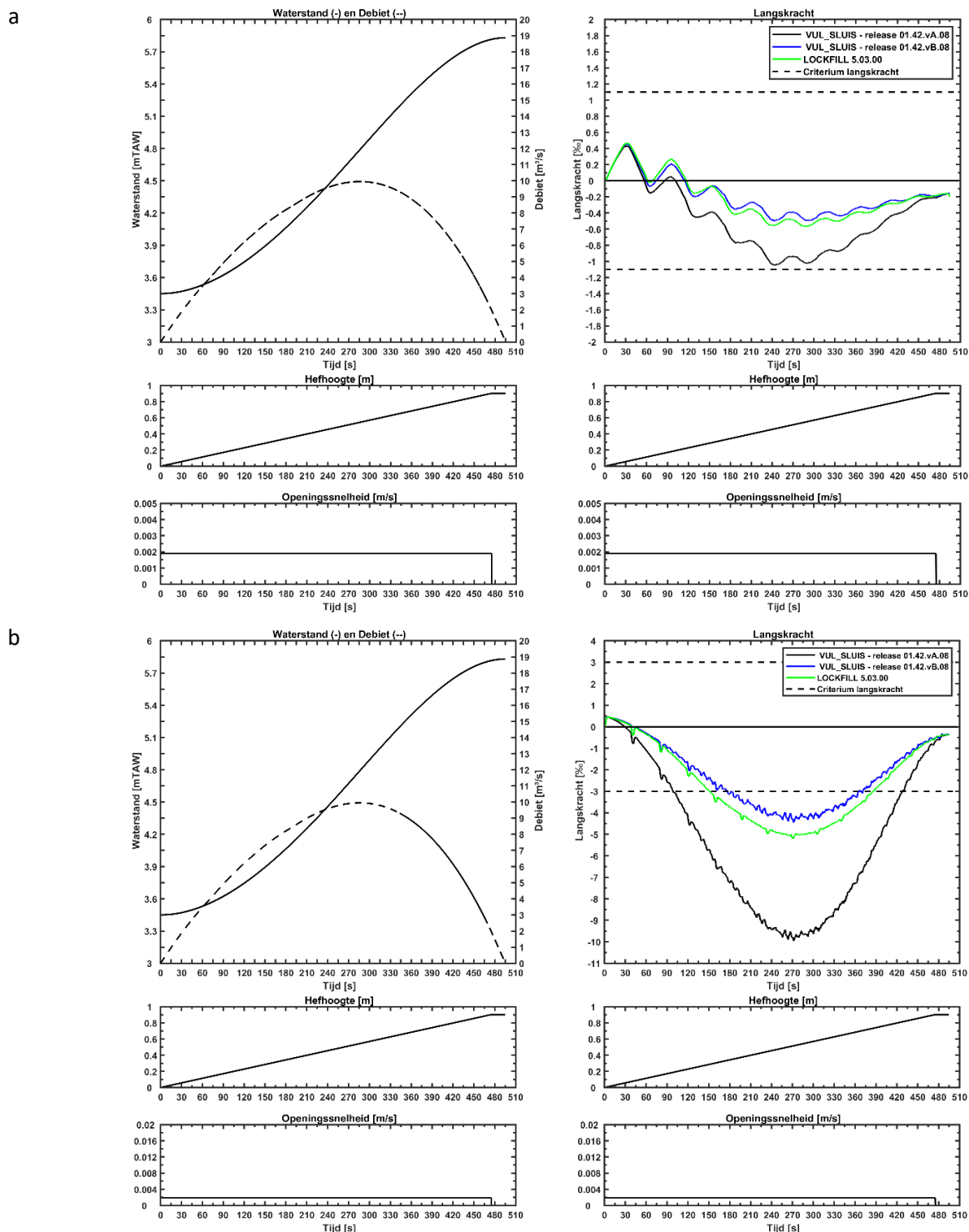


Figuur 21 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_HSr_01 en simulatie VK_HSr_06
a: VK_HSr_01; b: VK_HSr_06

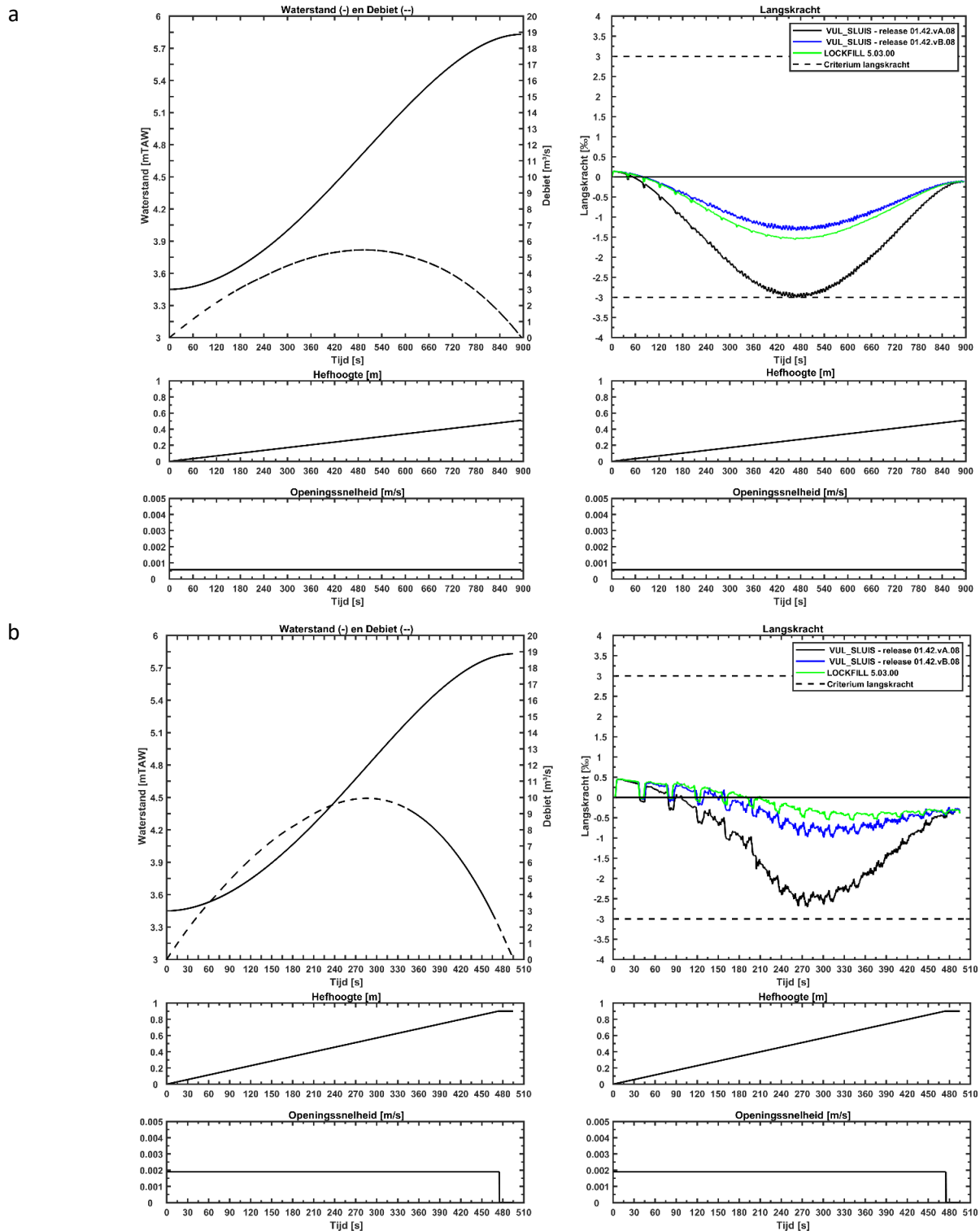


Figuur 22 – Variatie in de tijd van de langskracht voor simulatie VK_HSr_07 en simulatie VK_HSr_08
a: VK_HSr_07; b: VK_HSr_08

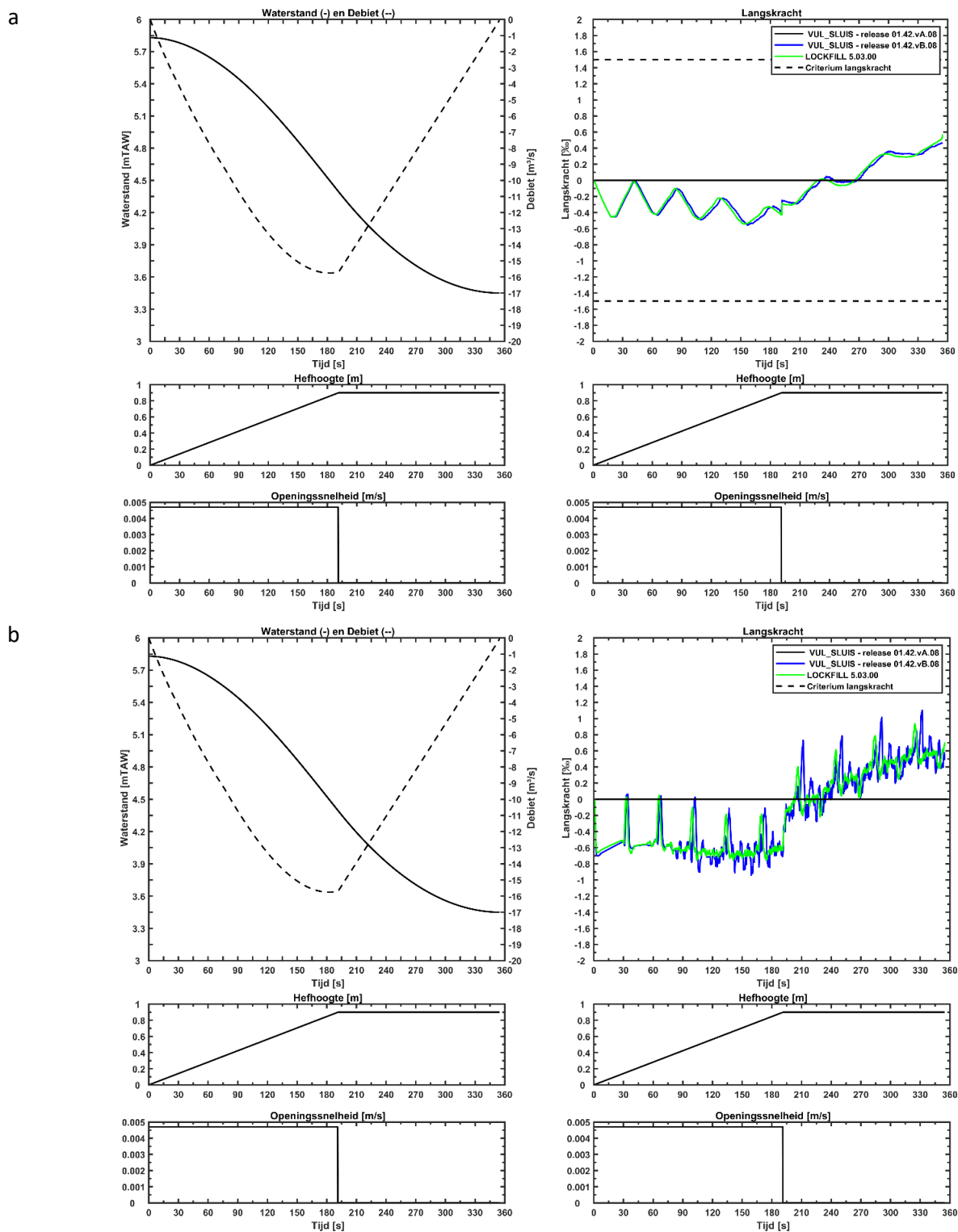
Eerste reeks simulaties geselecteerd nivelleersysteem



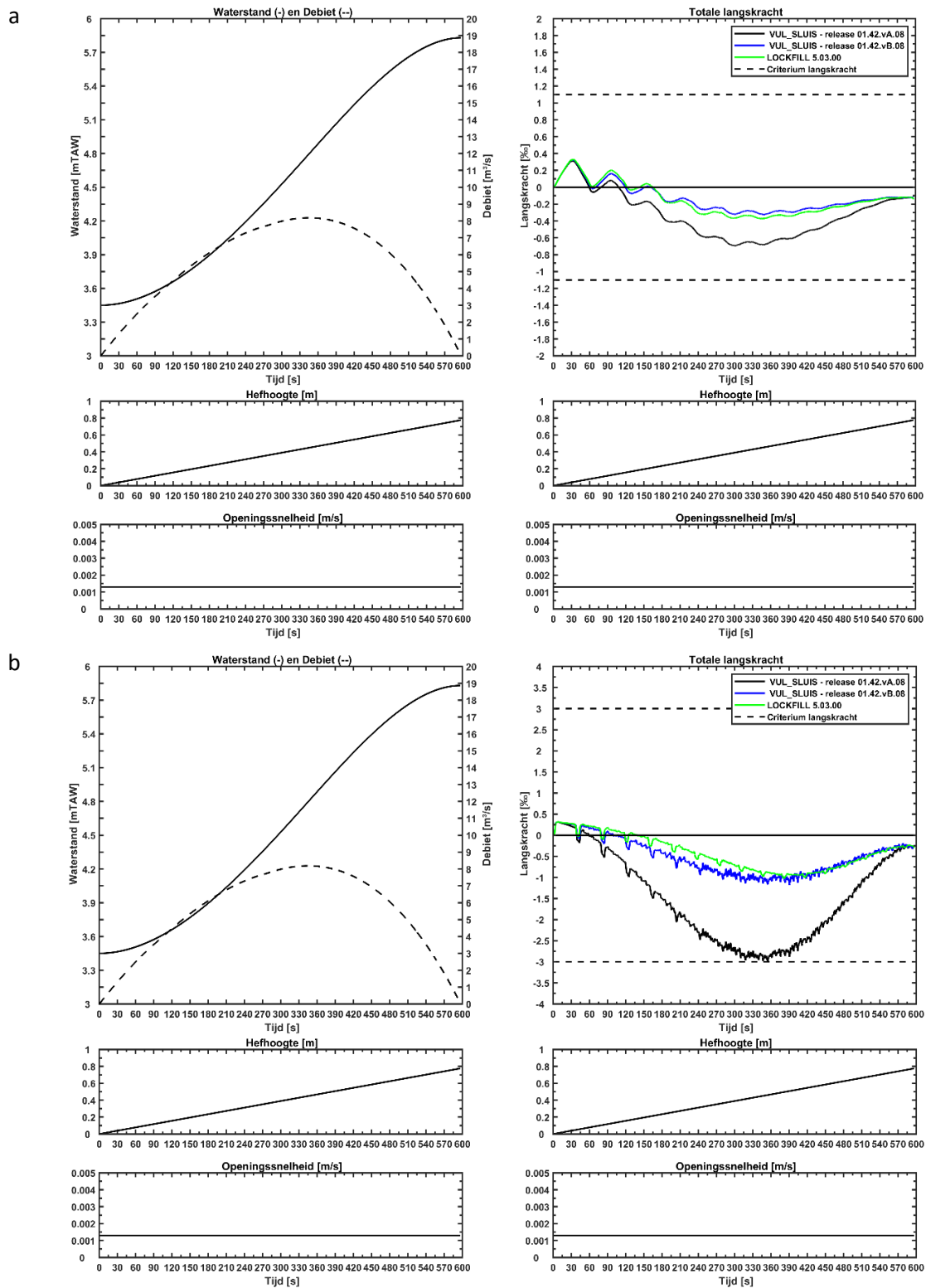
Figuur 23 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige colk (a: simulatie VK_HSR_09; b: simulatie VK_HSR_12)



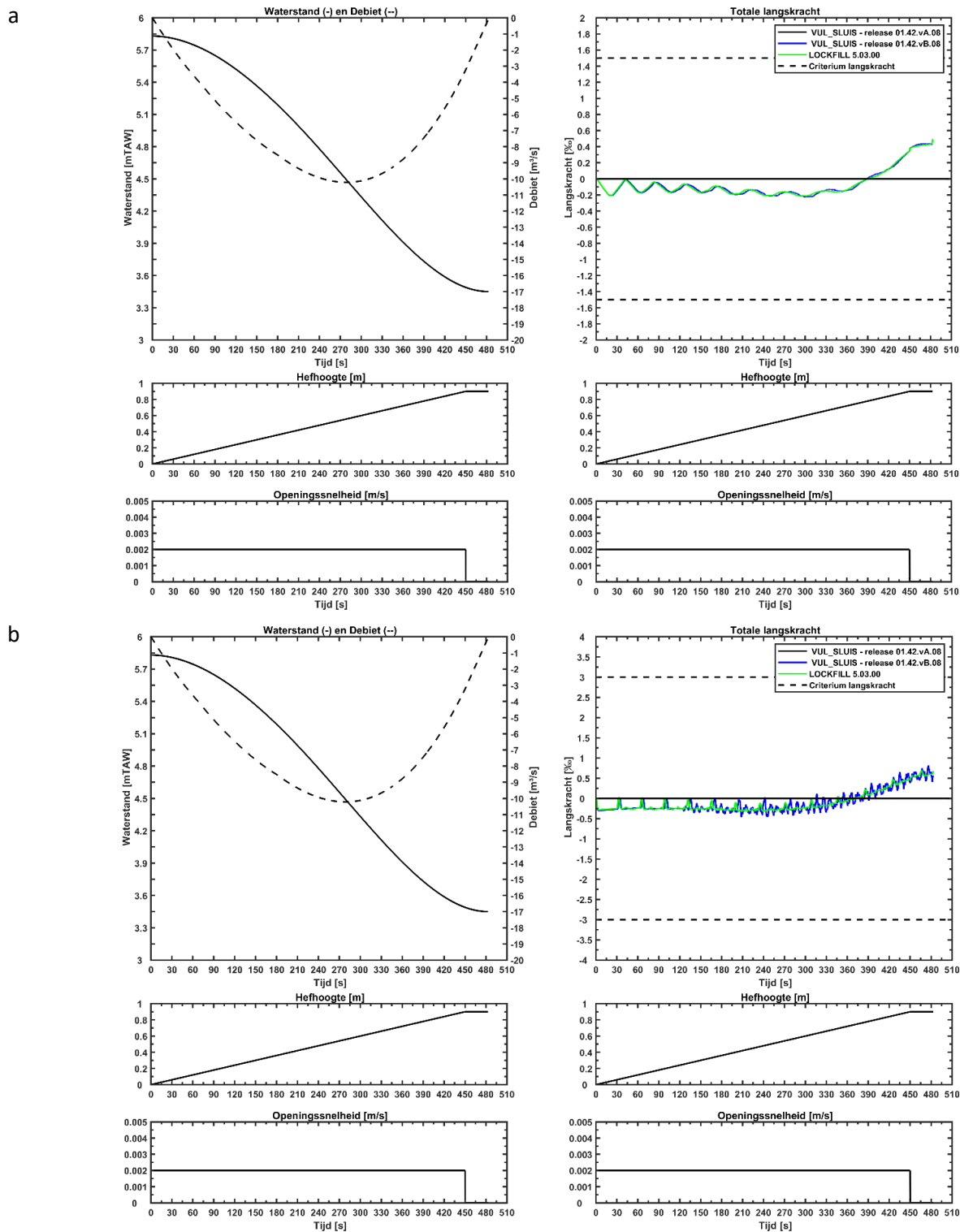
Figuur 24 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluis, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HSR_13; b: simulatie VK_HSR_14)



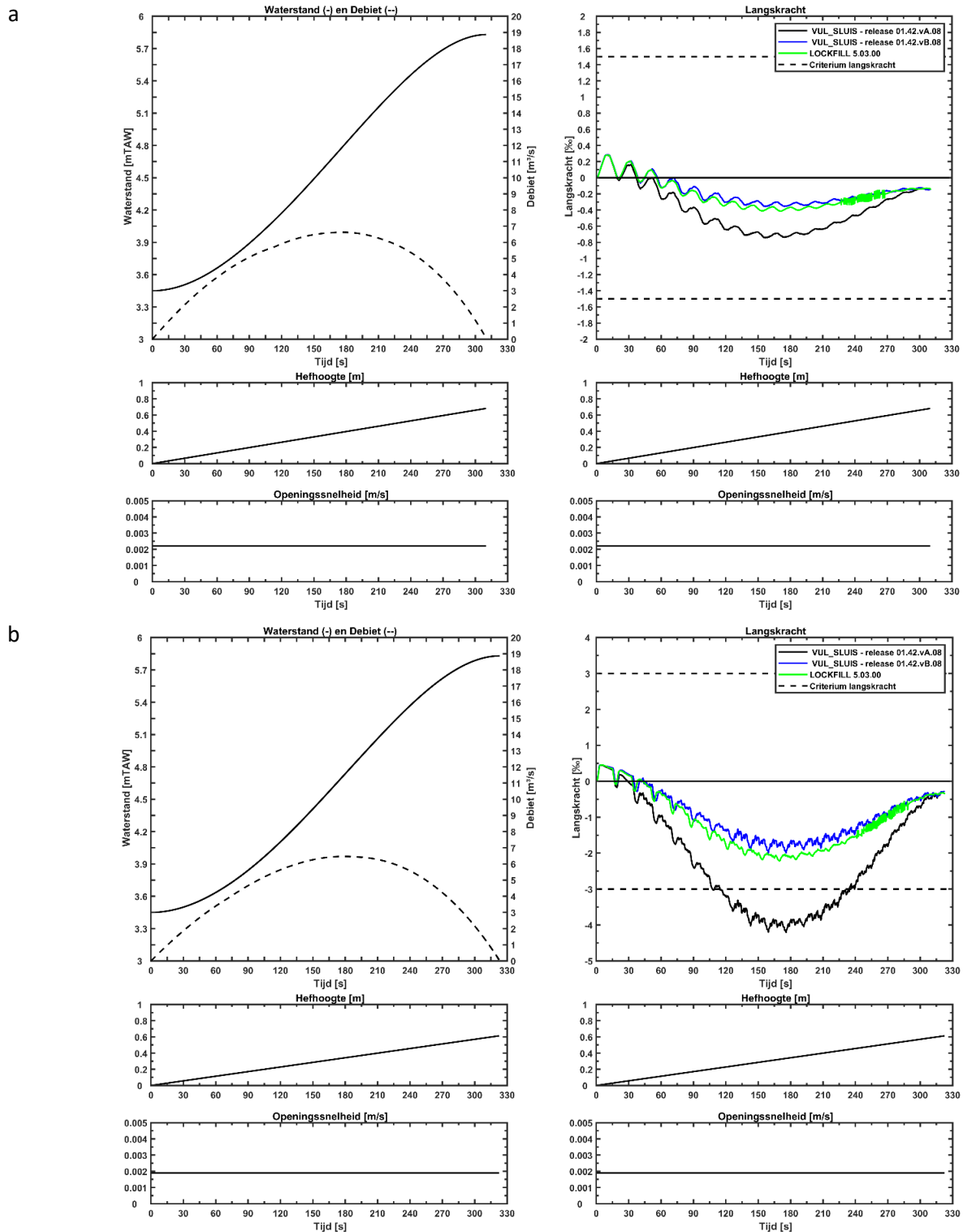
Figuur 25 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluisolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HSr_23; b: simulatie VK_HSr_26)



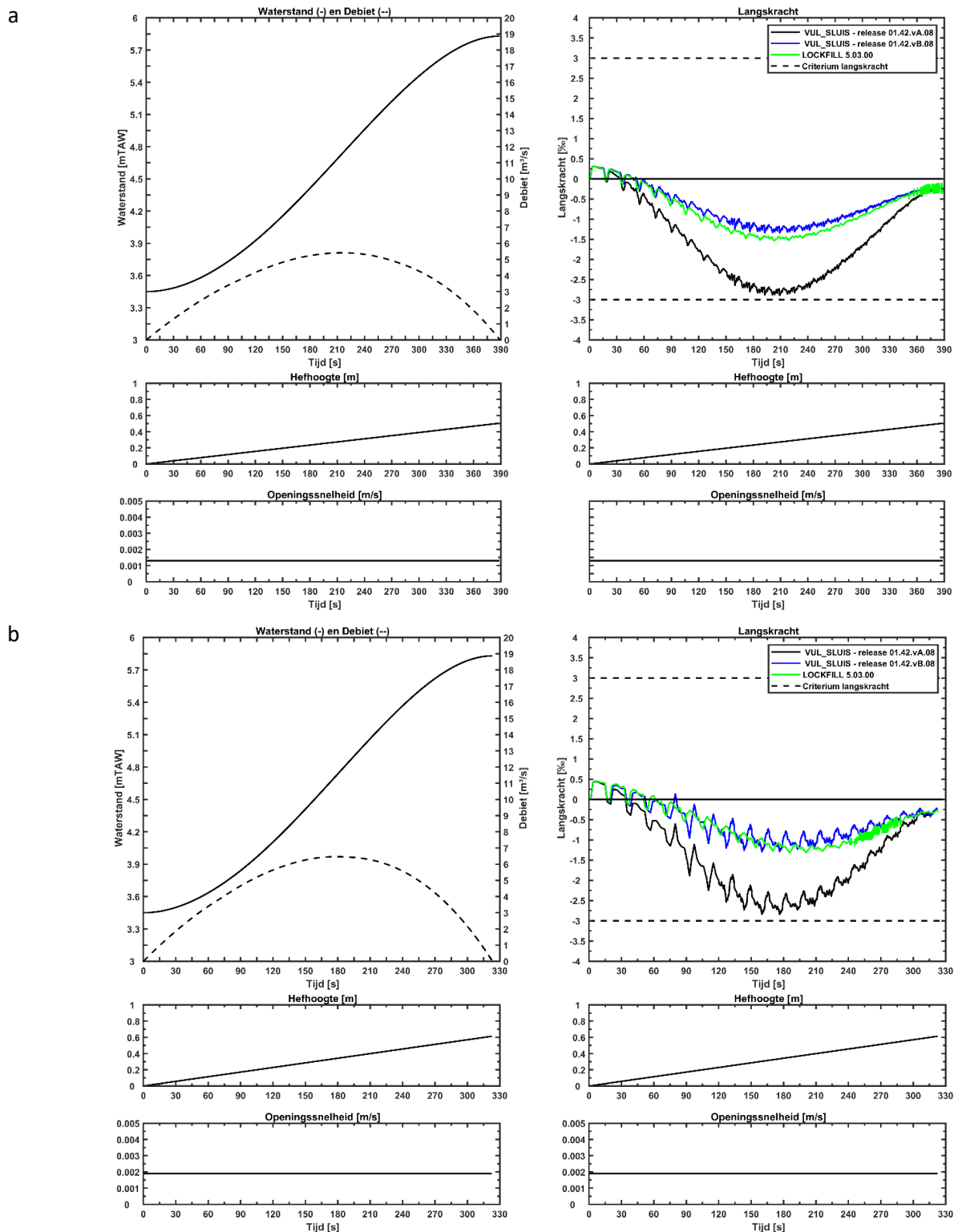
Figuur 26 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluisolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HSr_15; b: simulatie VK_HSr_18)



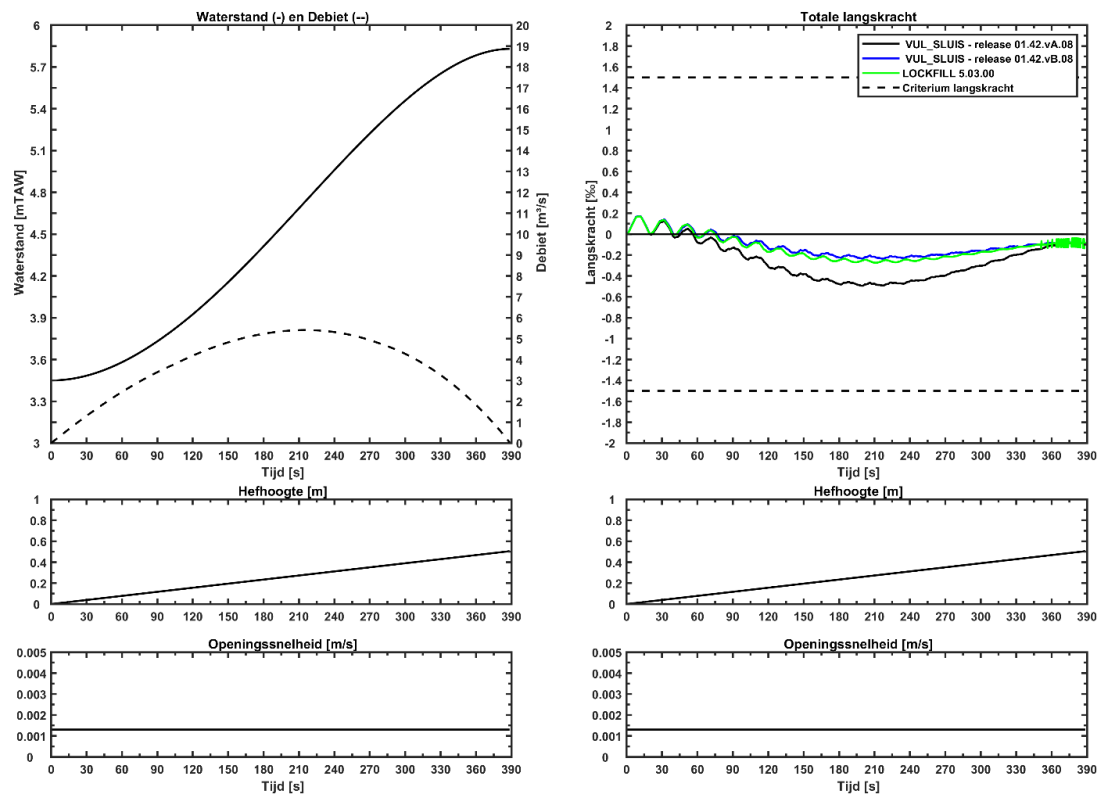
Figuur 27 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluis, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk (a: simulatie VK_HS_27; b: simulatie VK_HSr_30)



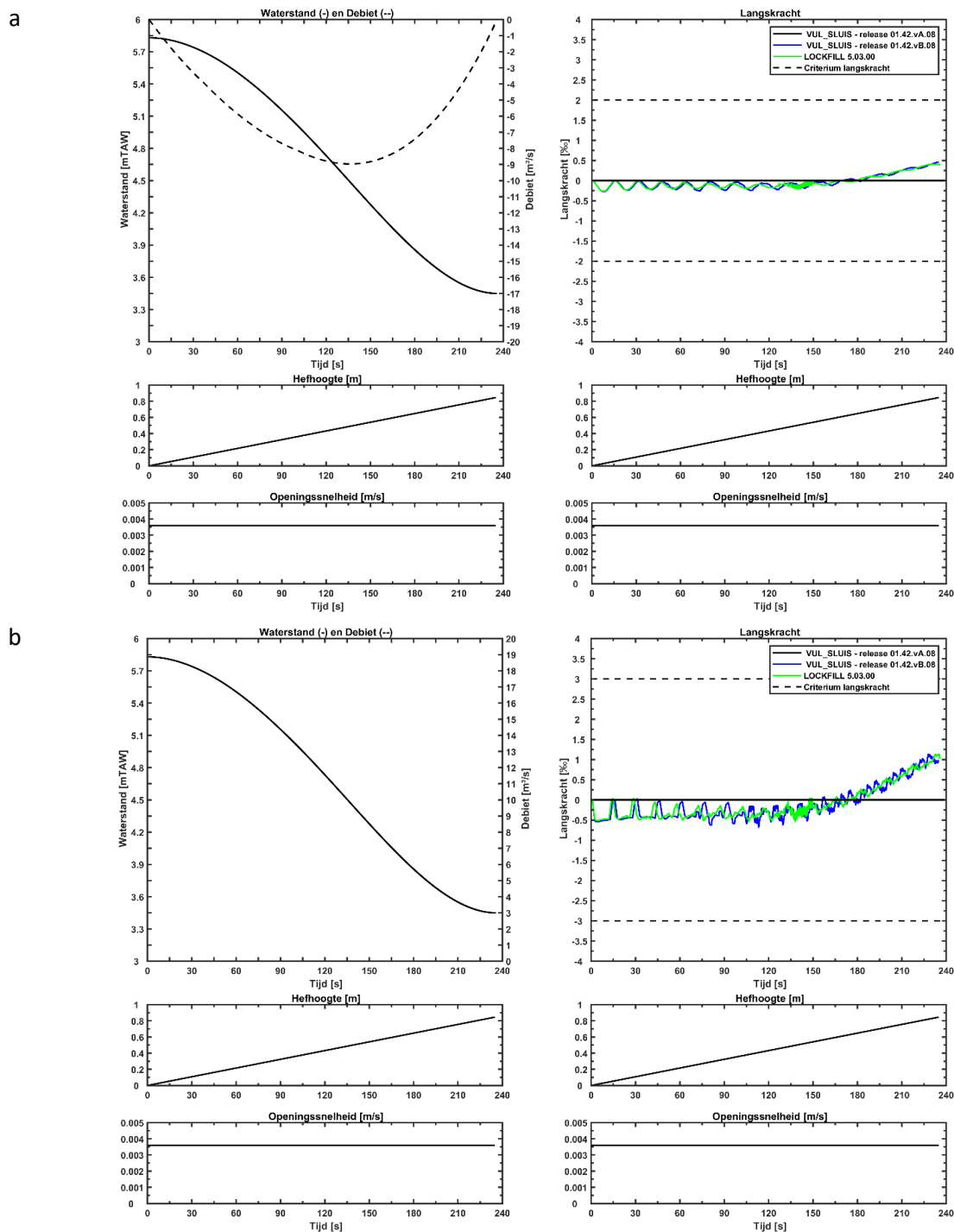
Figuur 28 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluisolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelsluis (a: simulatie OPW_HSr_01; b: simulatie OPW_HSr_03)



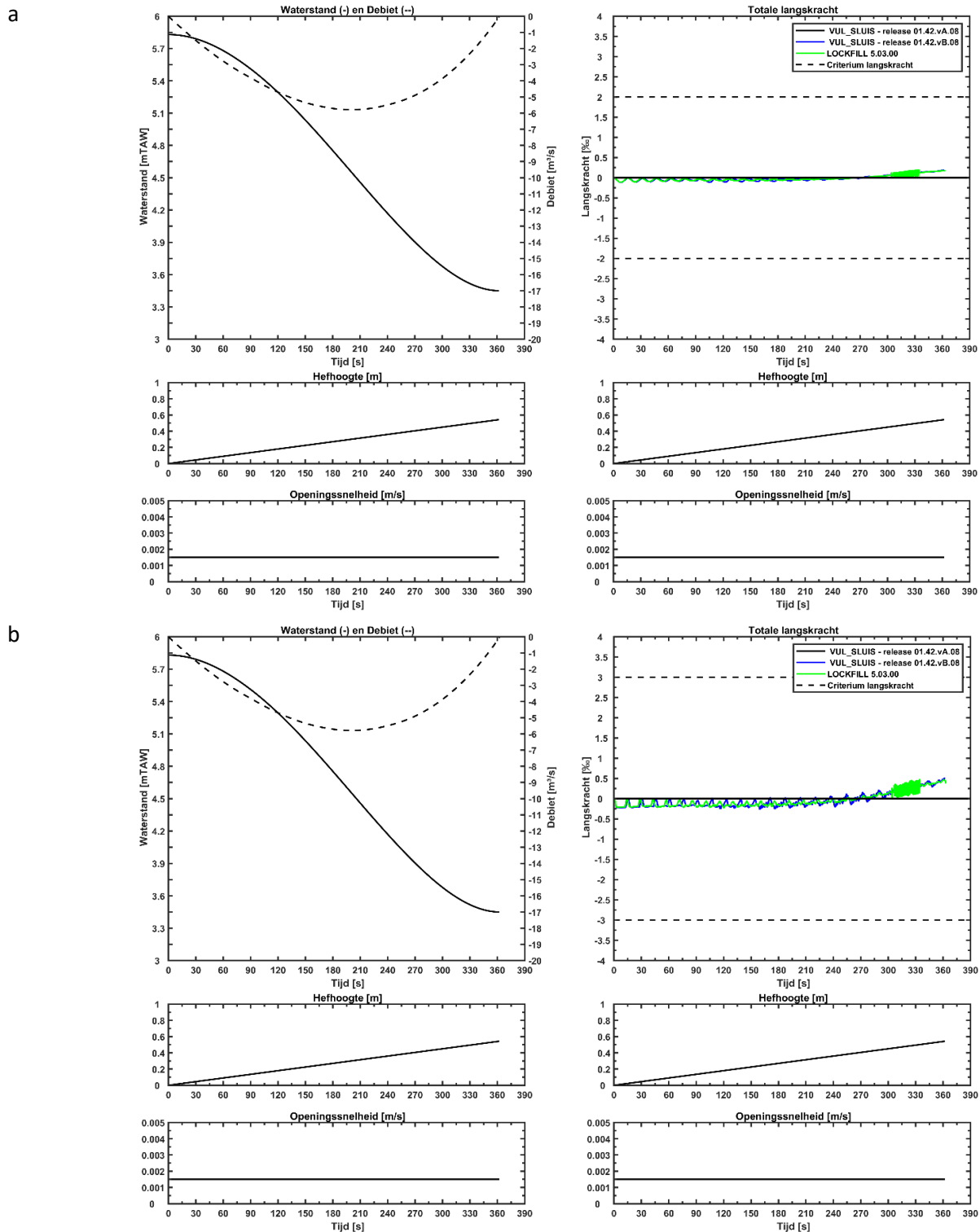
Figuur 29 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelcolk (a: simulatie OPW_HSr_04; b: simulatie OPW_HSr_05)



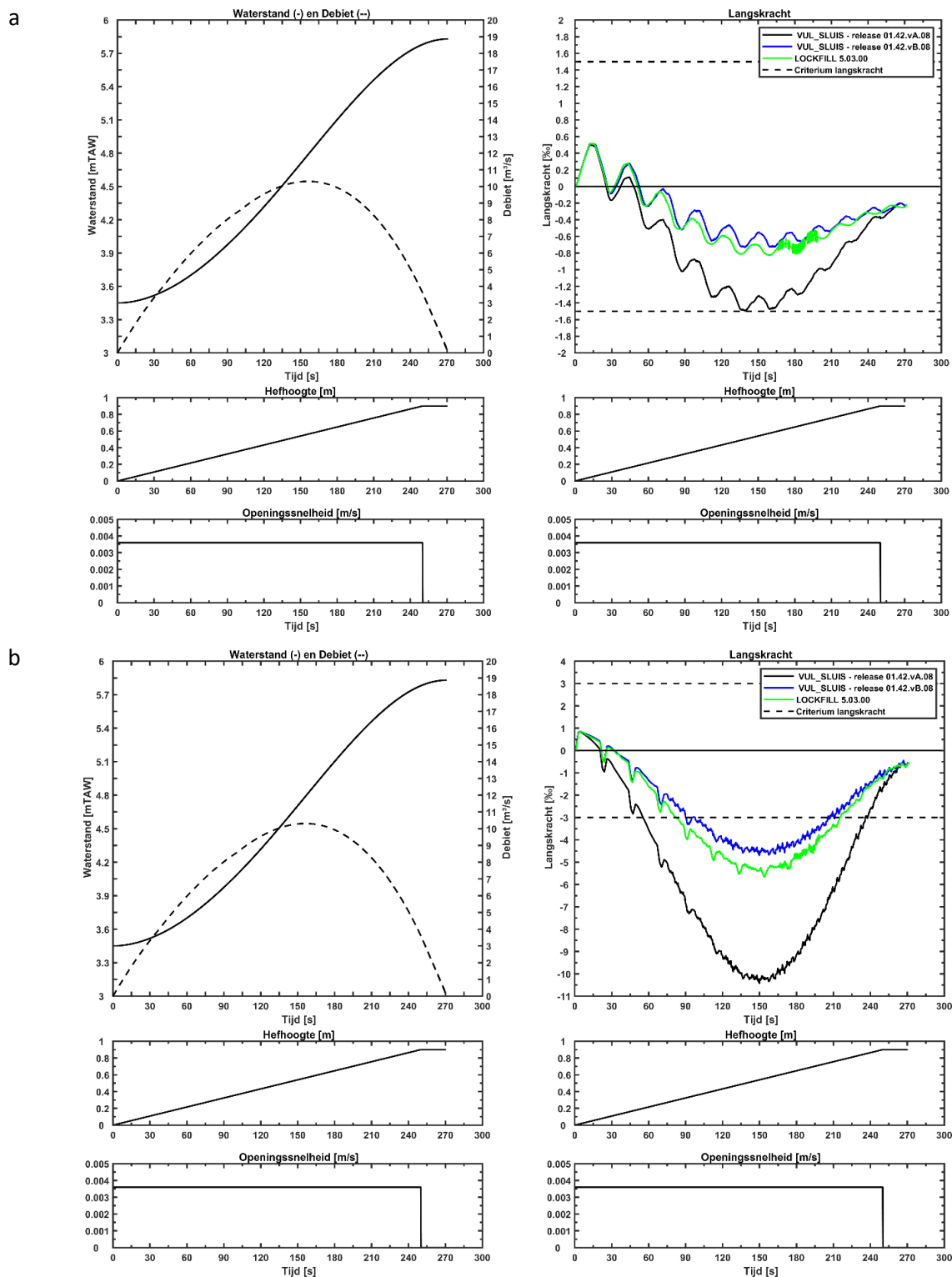
Figuur 30 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk (simulatie OPW_HSr_06)



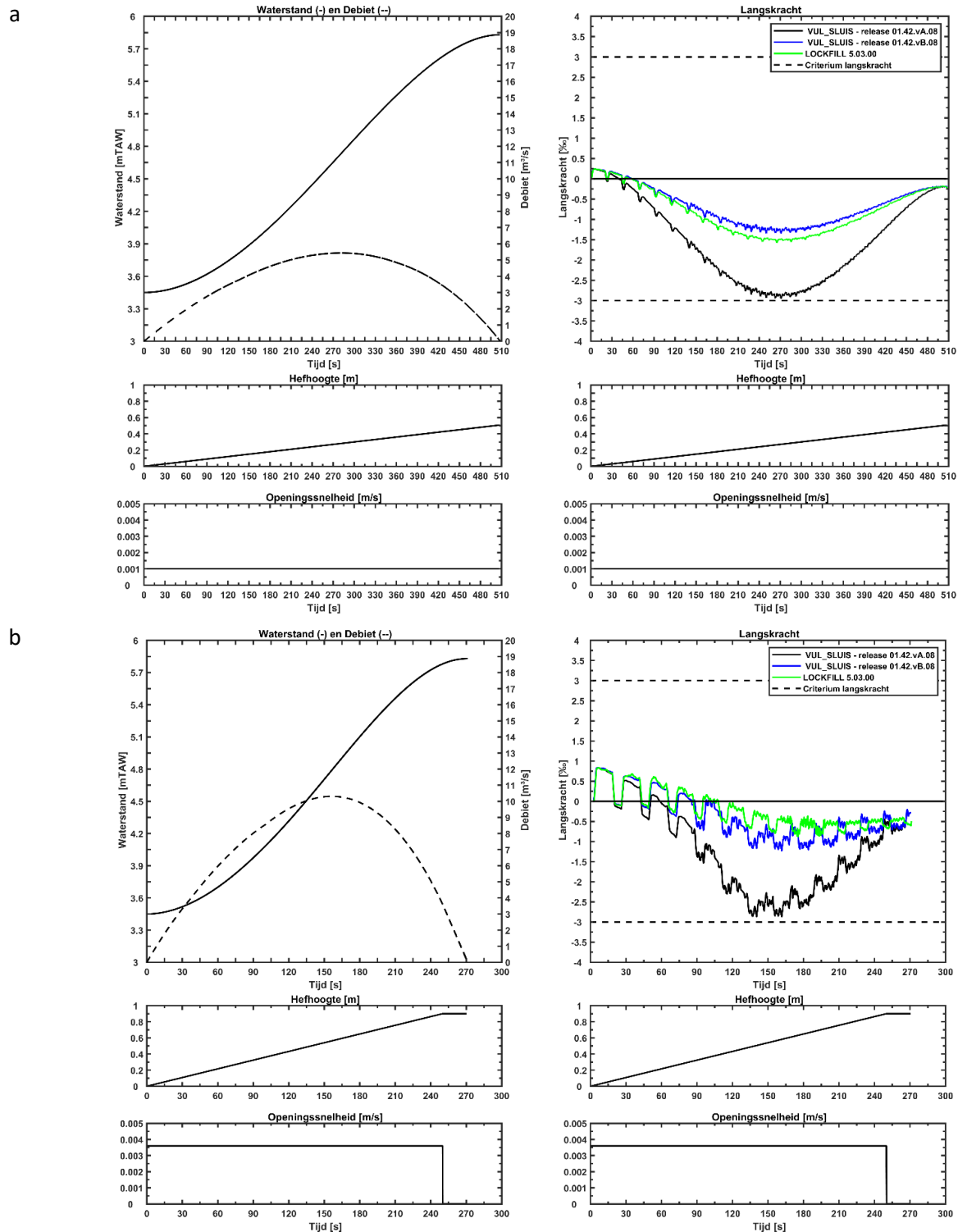
Figuur 31 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluisolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelsluis (a: simulatie OPW_HSr_07; b: simulatie OPW_HSr_08)



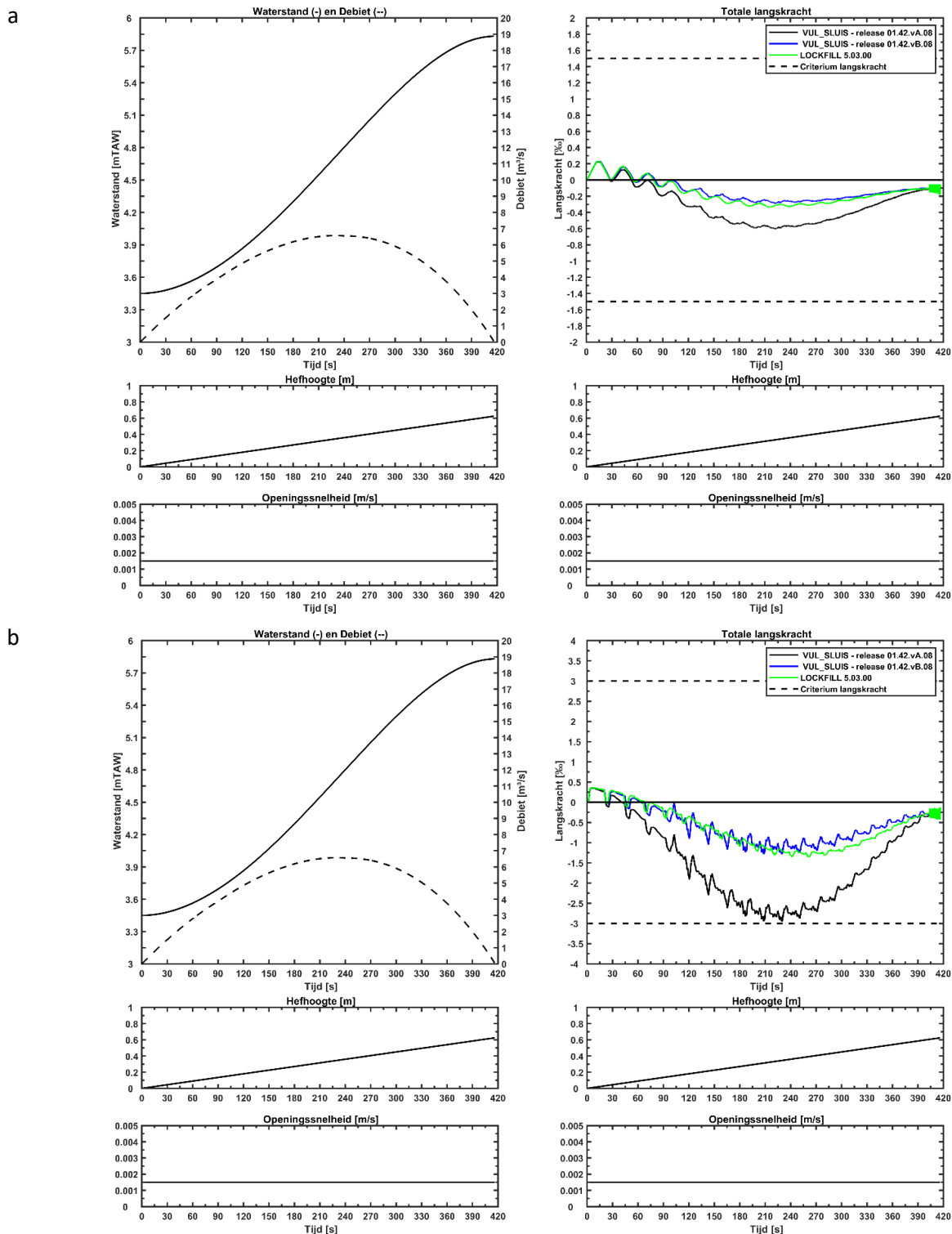
Figuur 32 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluis, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk (a: simulatie OPW_HSr_11; b: simulatie OPW_HSr_12)



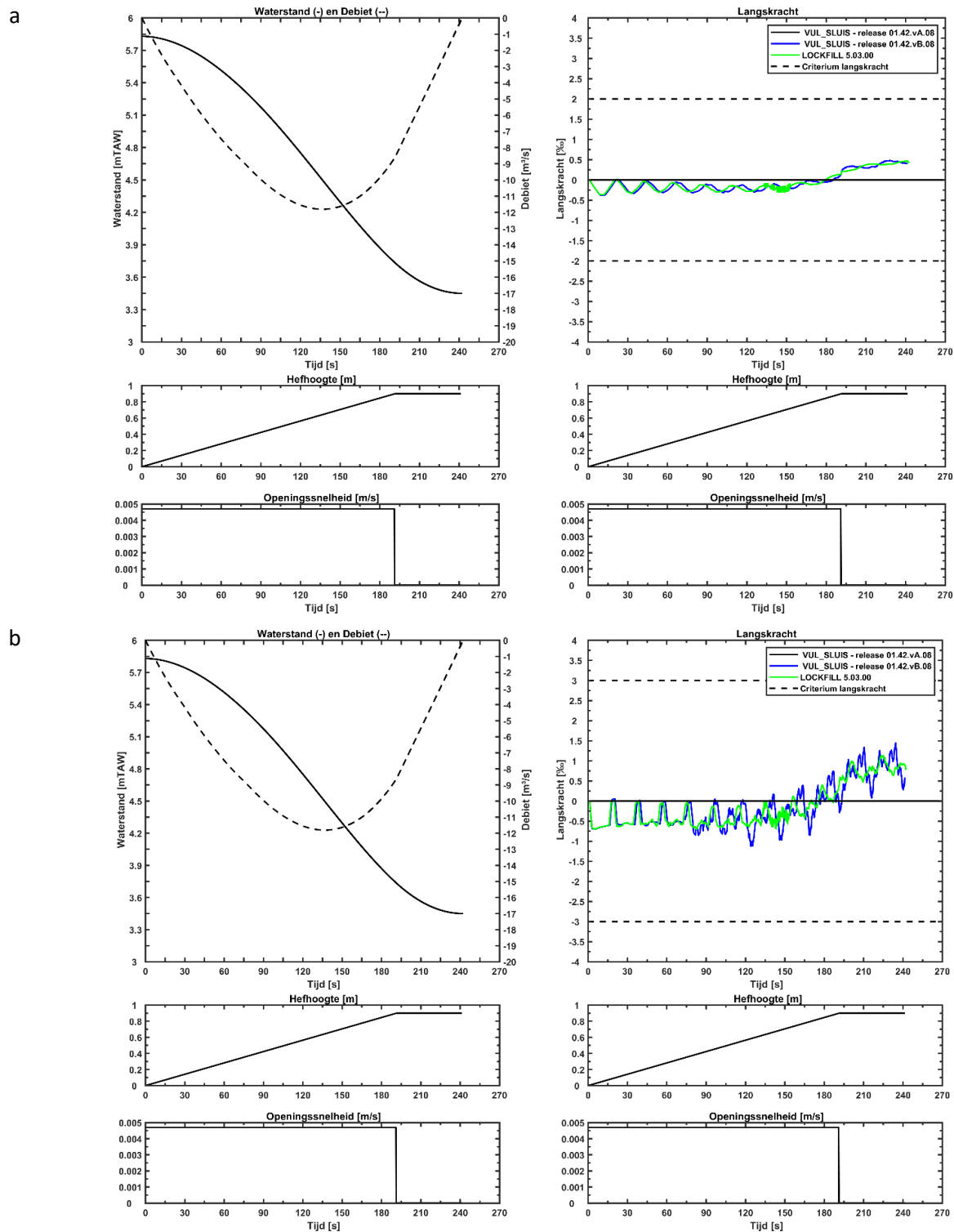
Figuur 33 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluis, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelkolk (a: simulatie AFW_HSr_01; b: simulatie AFW_HSr_02)



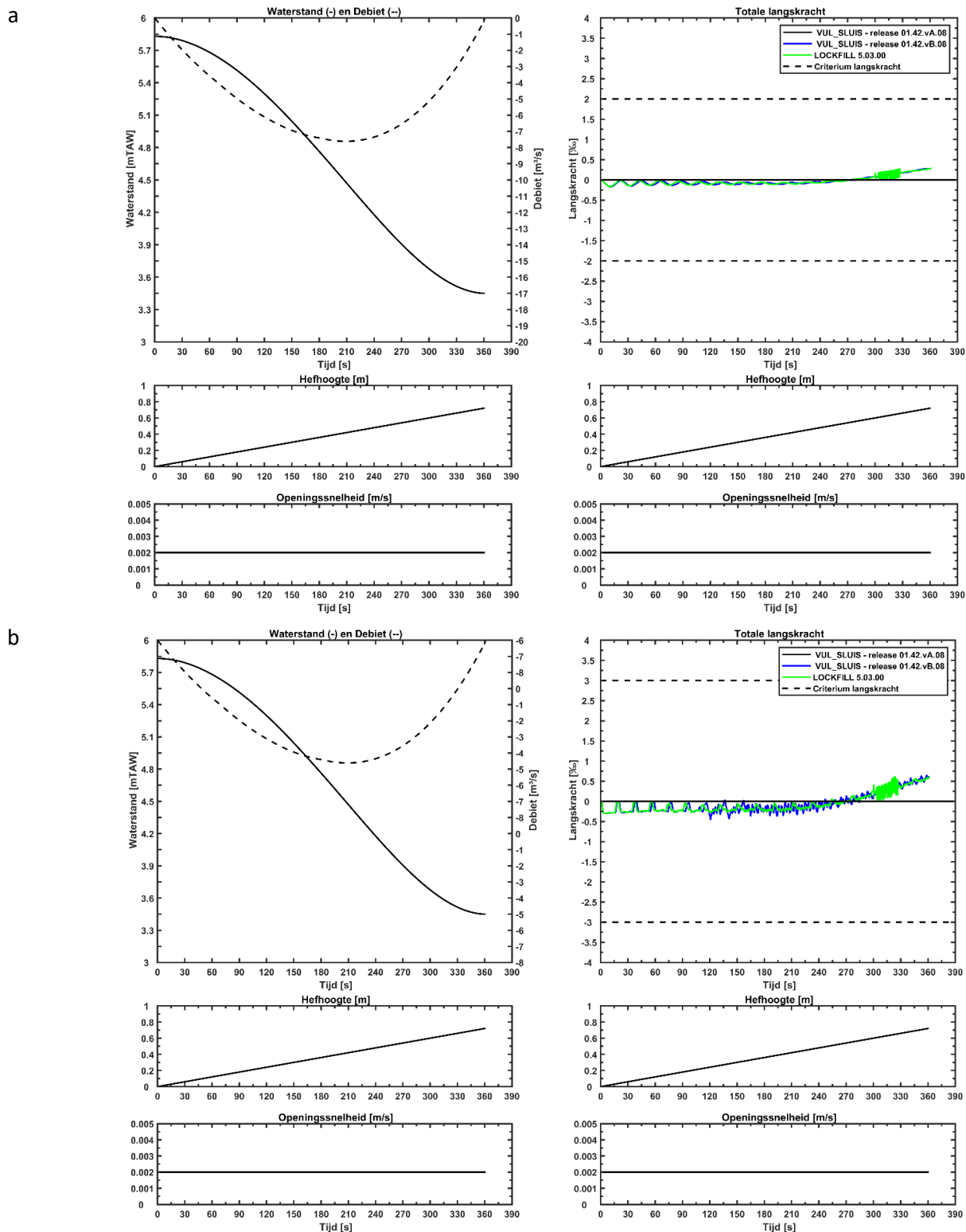
Figuur 34 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelcolk (a: simulatie AFW_HSr_03; b: simulatie AFW_HSr_04)



Figuur 35 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelcolk (a: simulatie AFW_HSr_05; b: simulatie AFW_HSr_06)

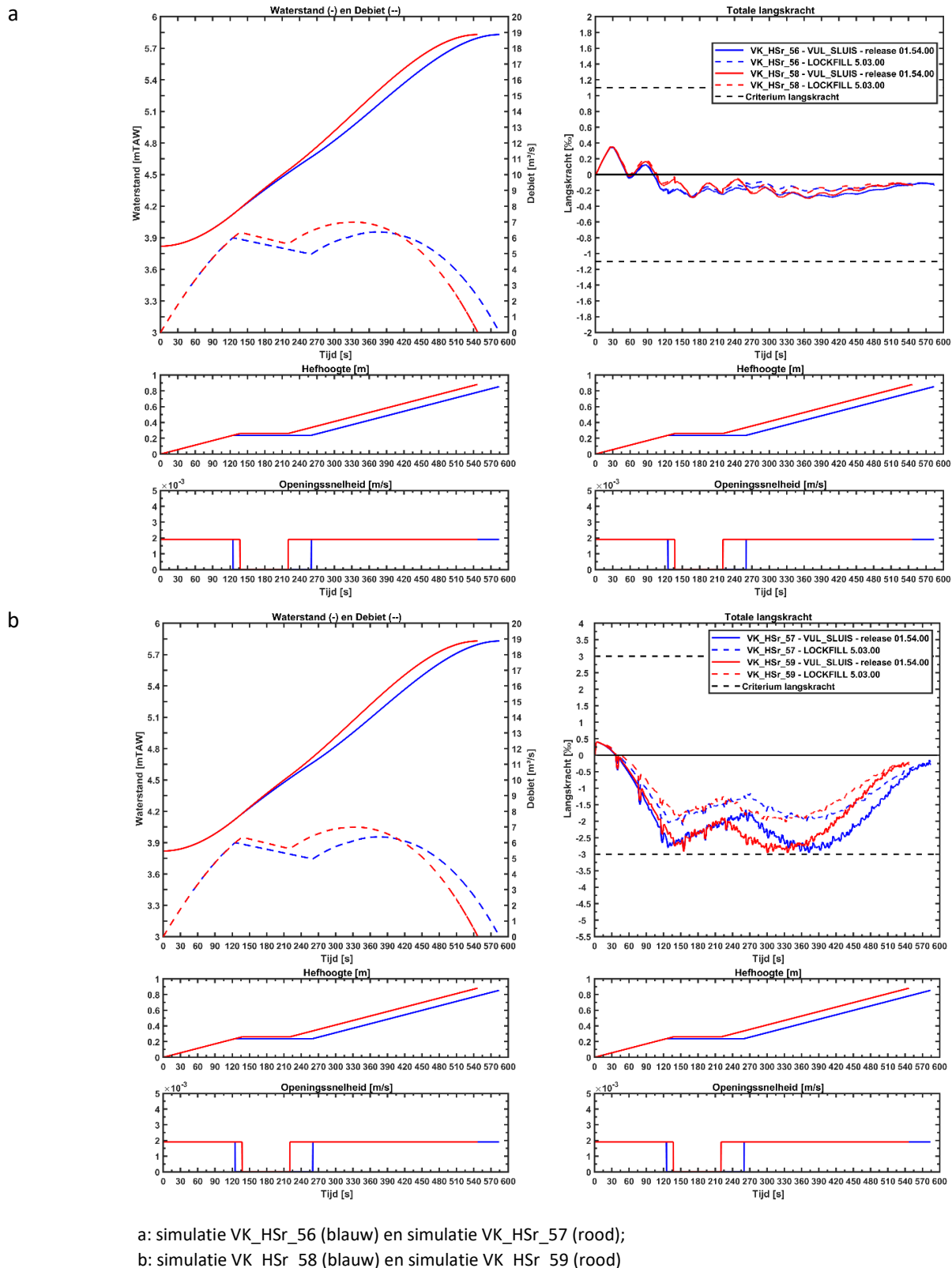


Figuur 36 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelcolk (a: simulatie AFW_HSr_09; b: simulatie AFW_HSr_10)

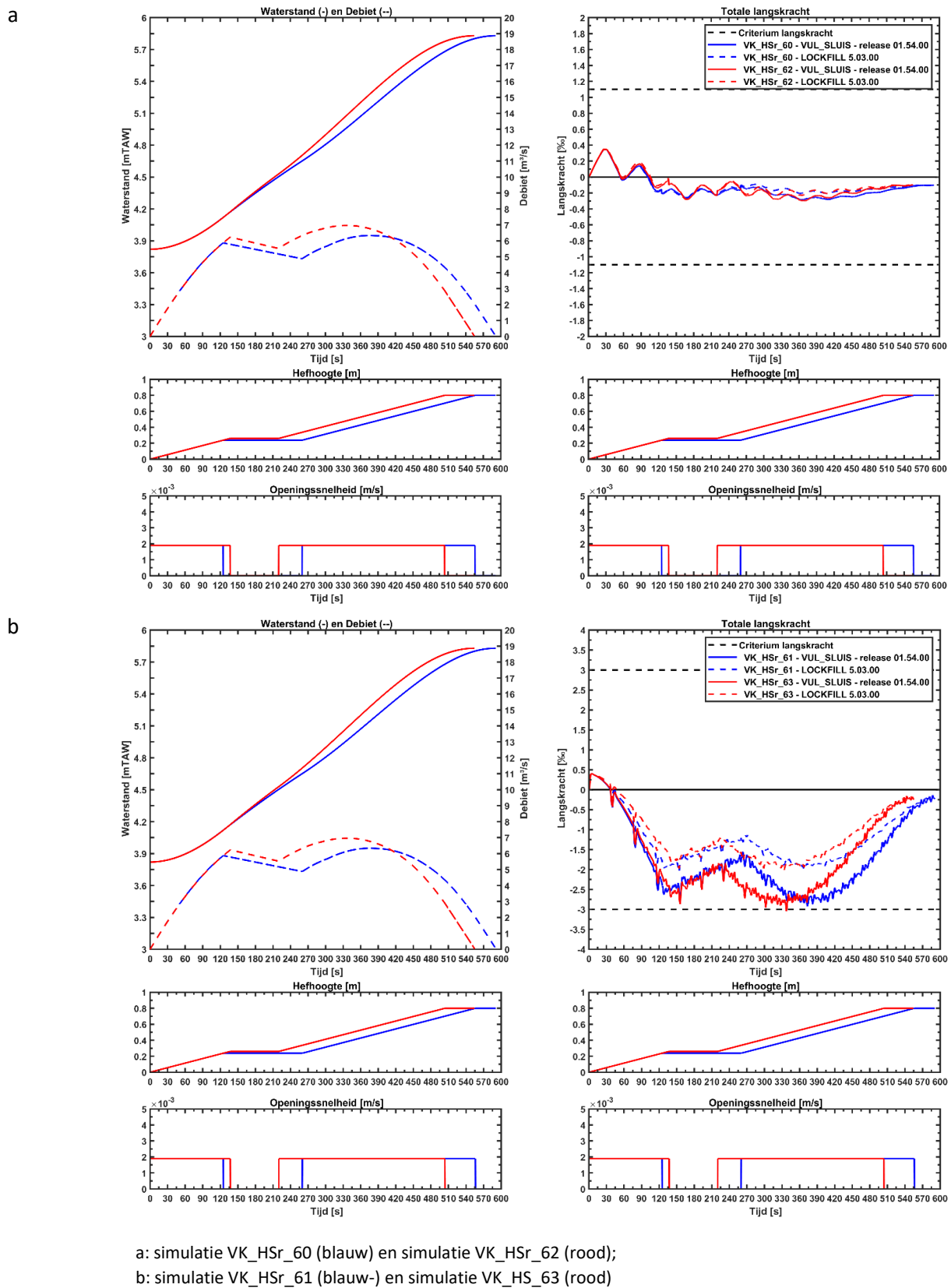


Figuur 37 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluisolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelolk (a: simulatie AFW_HSr_11; b: simulatie AFW_HSr_12)

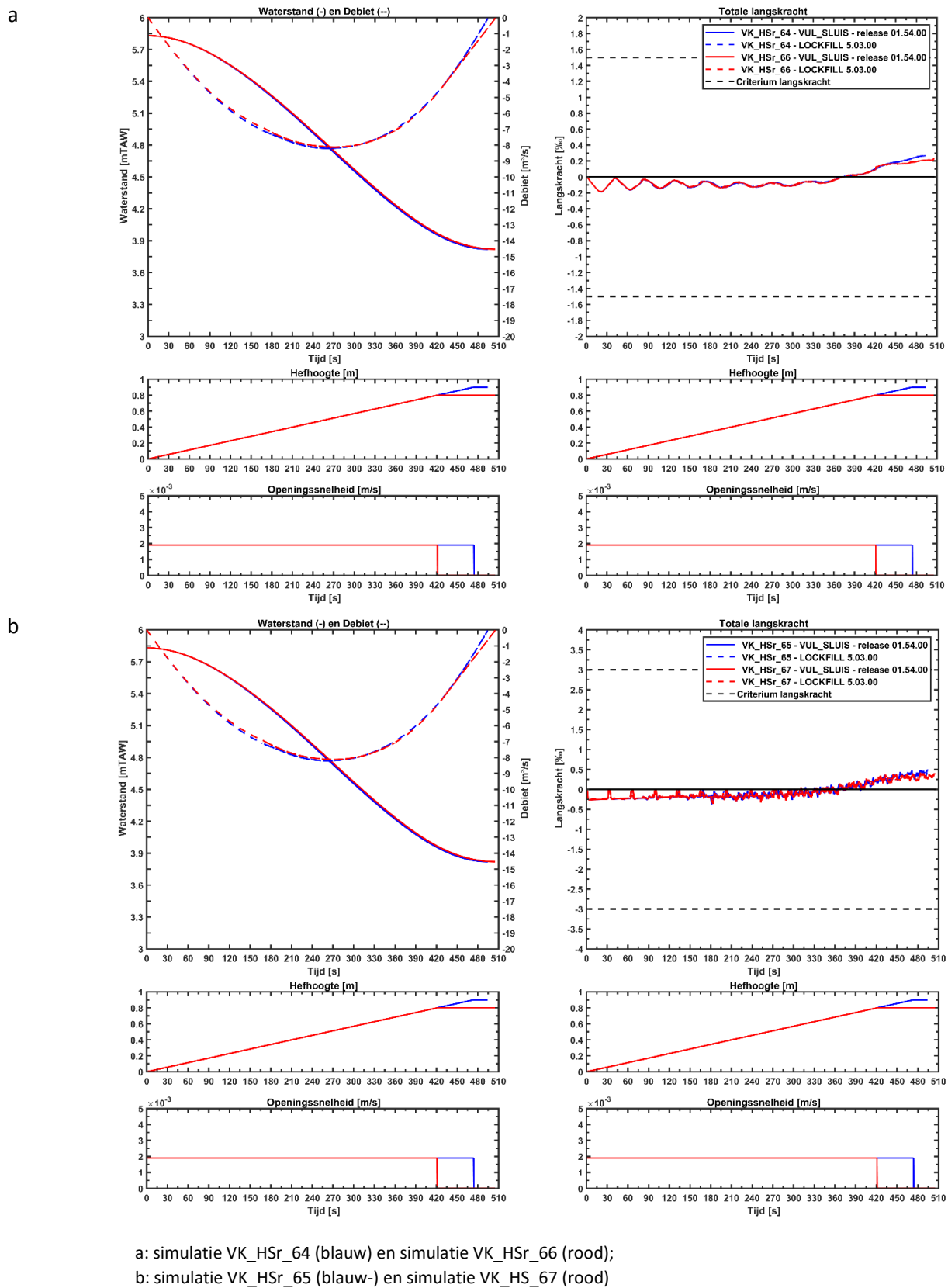
Finale simulaties geselecteerd nivelleersysteem



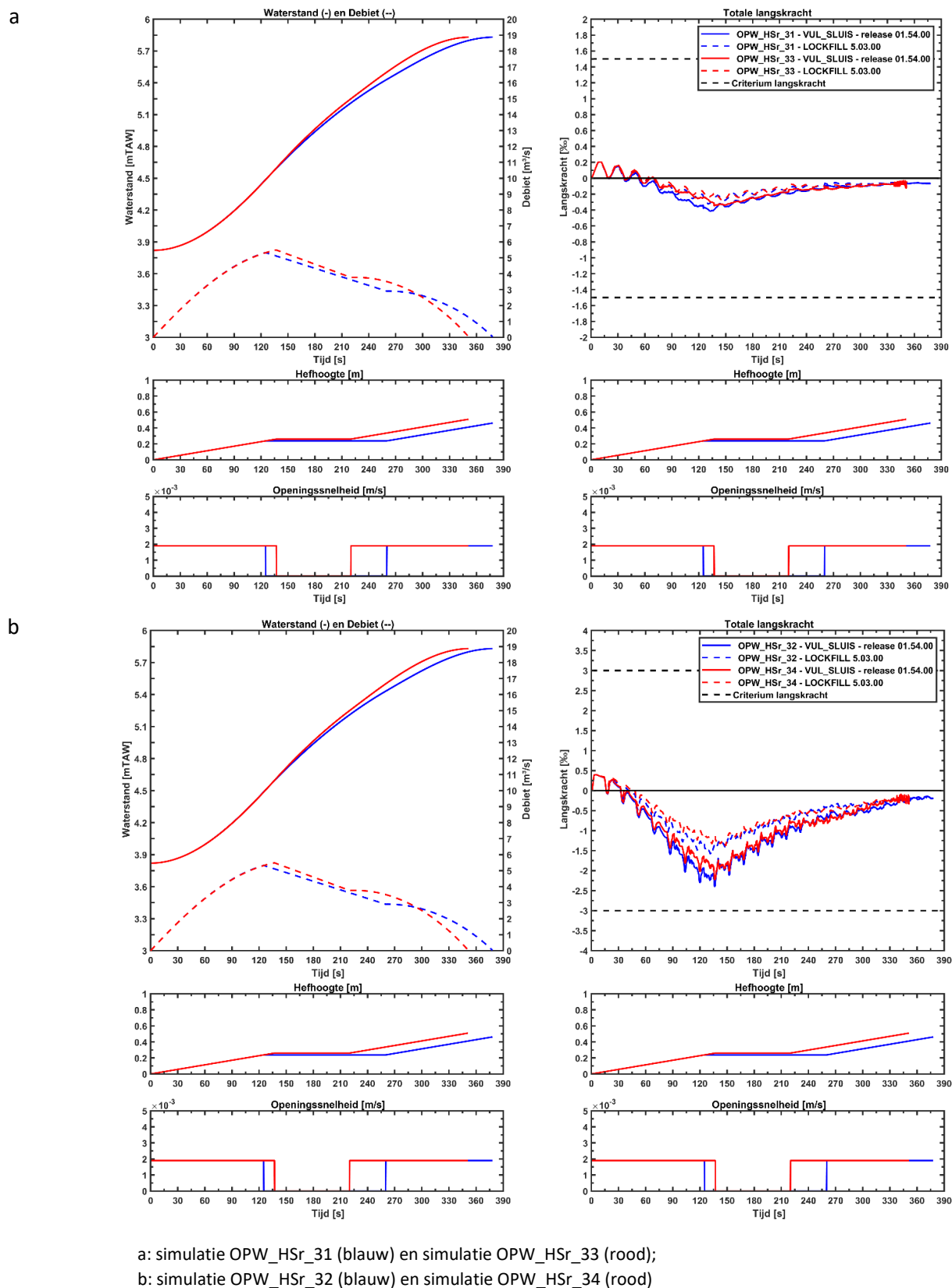
Figuur 38 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluisolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk uit simulatie VK_HSr_56, VK_HSr_57, VK_HSr_58, en VK_HSr_59



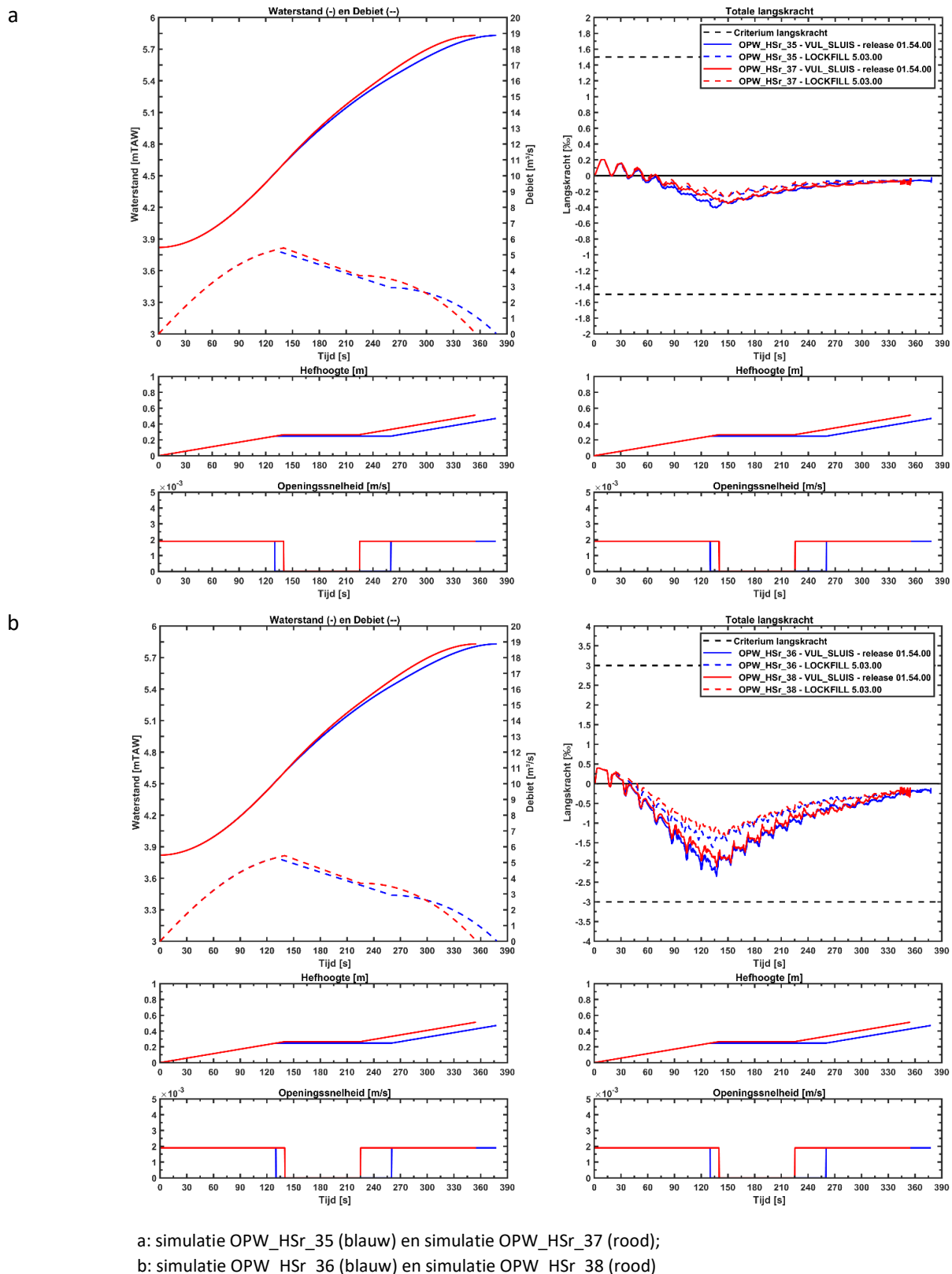
Figuur 39 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluis, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk uit simulaties VK_HSr_60, VK_HSr_61, VK_HSr_62 en VK_HSr_63



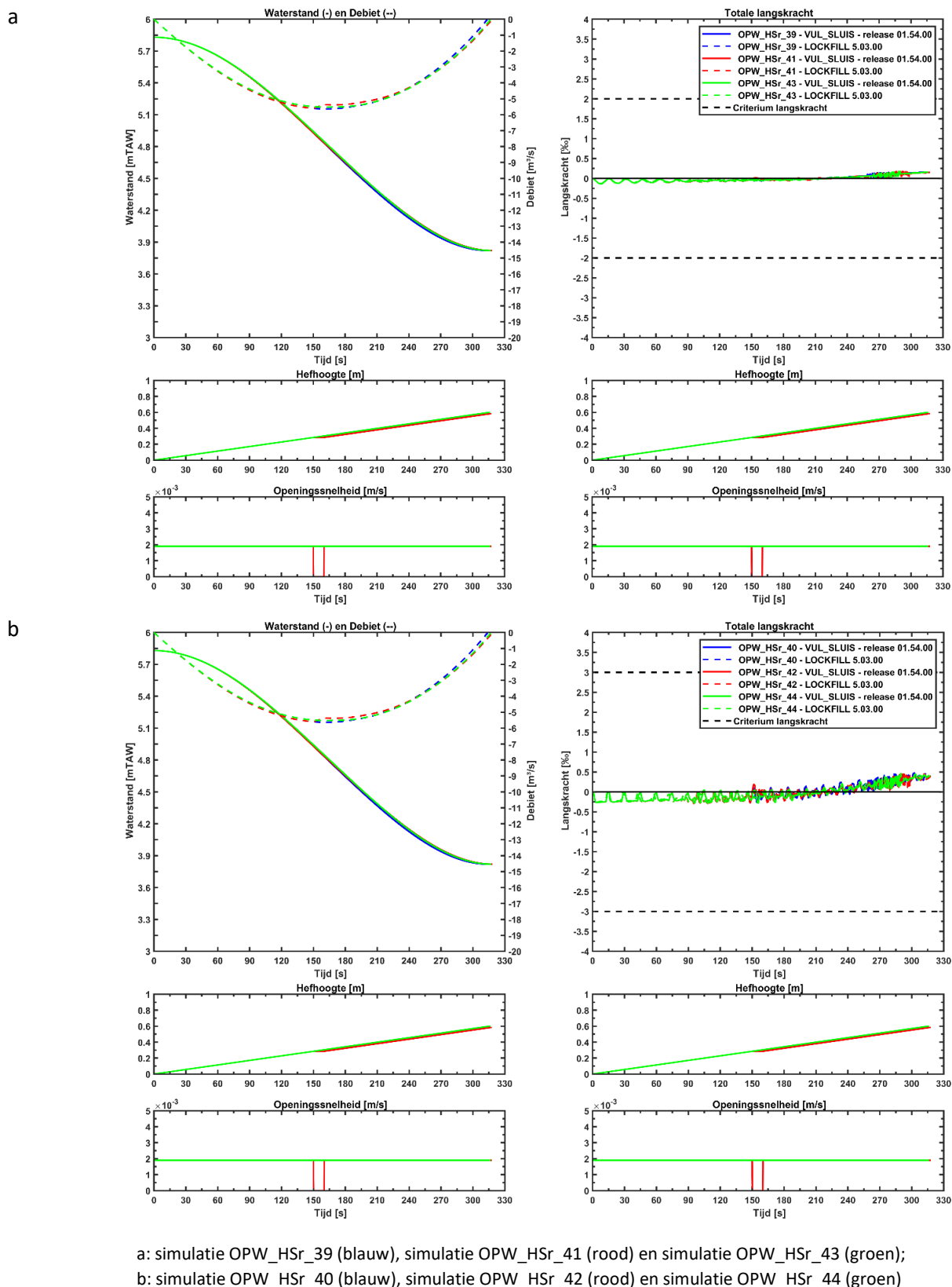
Figuur 40 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren volledige kolk uit simulaties VK_HSr_64, VK_HSr_65, VK_HSr_66 en VK_HSr_67



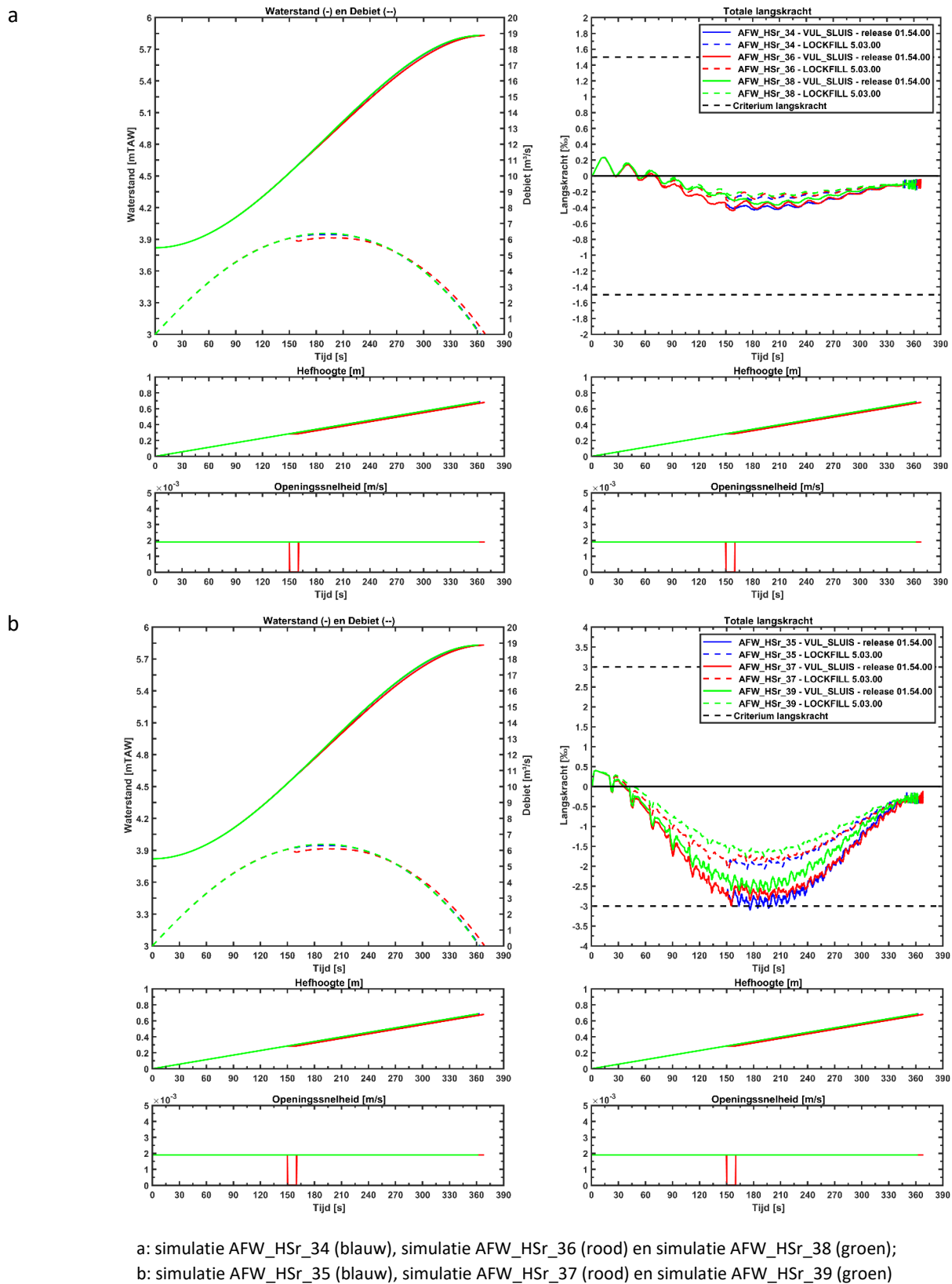
Figuur 41 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelsluis uit simulaties OPW_HSr_31, OPW_HSr_32, OPW_HSr_33 en OPW_HSr_34



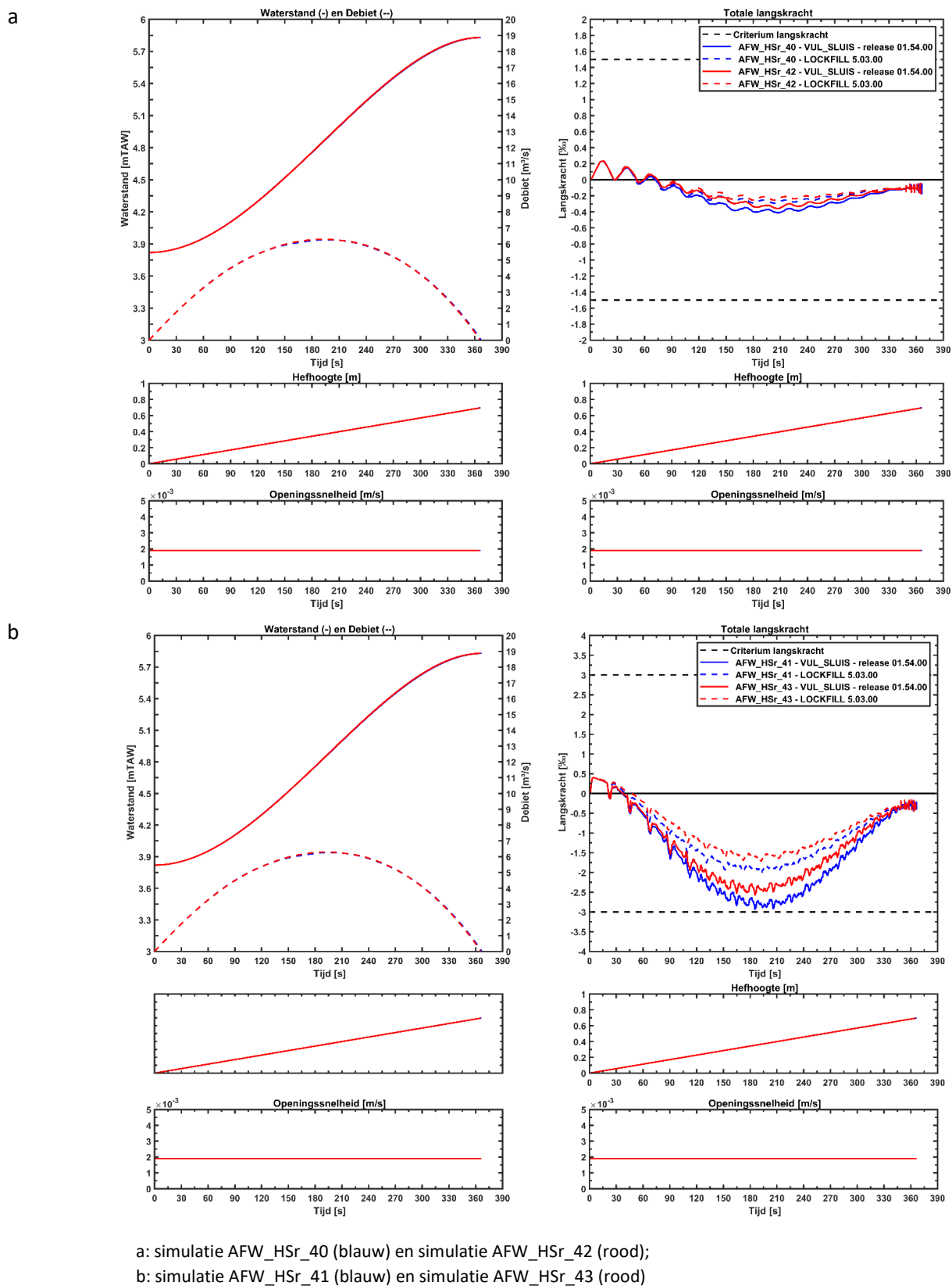
Figuur 42 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluis, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelkolk uit simulaties OPW_HSr_35, OPW_HSr_36, OPW_HSr_37 en OPW_HSr_38



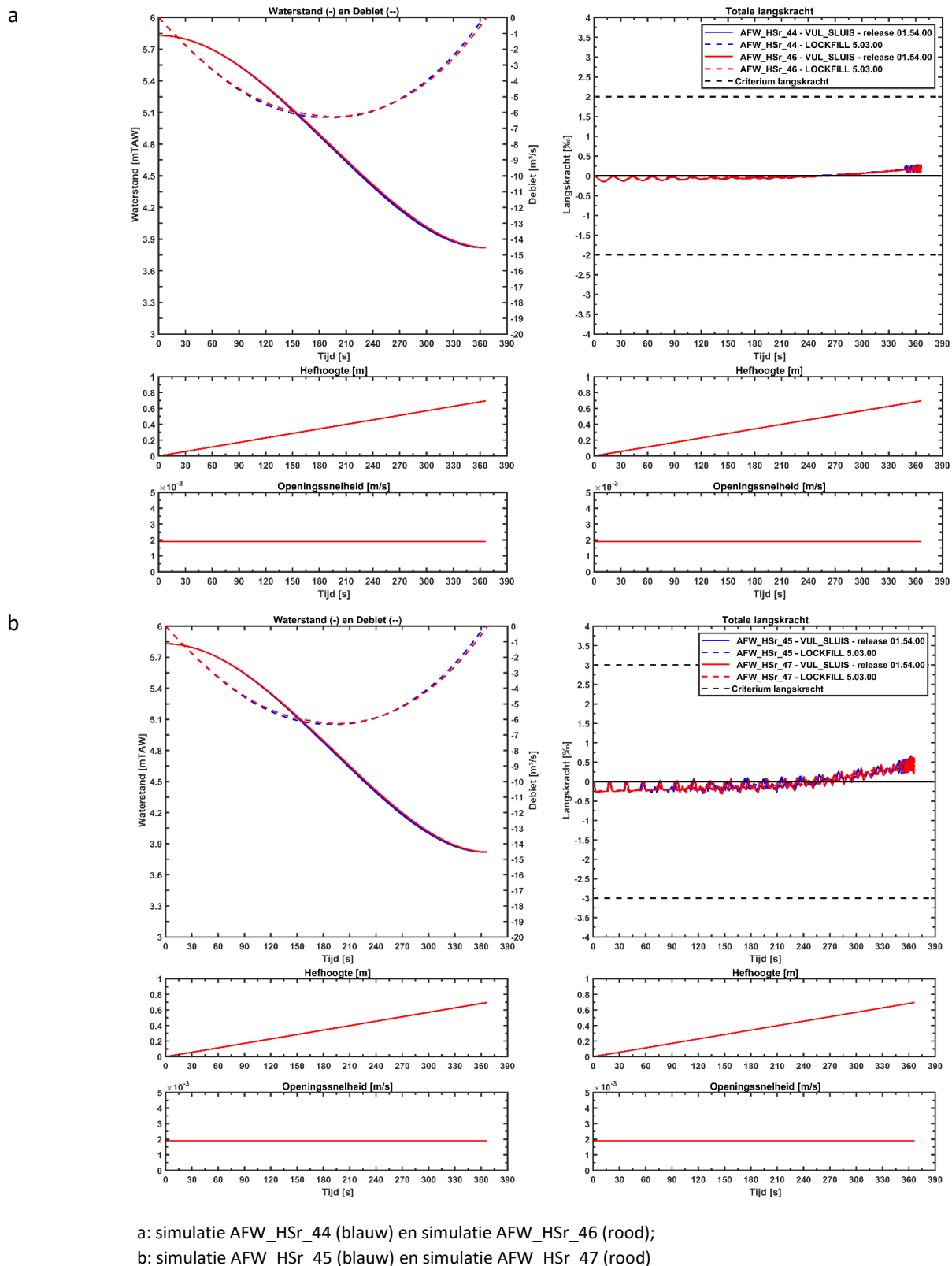
Figuur 43 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren opwaartse deelcolk uit simulaties OPW_HSr_39, OPW_HSr_40, OPW_HSr_41, OPW_HSr_42, OPW_HSr_43 en OPW_HSr_44



Figuur 44 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelcolk uit simulaties AFW_HSr_34, AFW_HSr_35, AFW_HSr_36, AFW_HSr_37, AFW_HSr_38 en AFW_HSr_39.



Figuur 45 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluisolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deellok uit simulaties AFW_HSr_40, AFW_HSr_41, AFW_HSr_42 en AFW_HSr_43



Figuur 46 – Variatie in de tijd van waterstand in de sluisolk, debiet door de openingen en langskracht op het schip voor nivelleren afwaartse deelolk uit simulaties AFW_HSr_44, AFW_HSr_45, AFW_HSr_46 en AFW_HSr_47

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