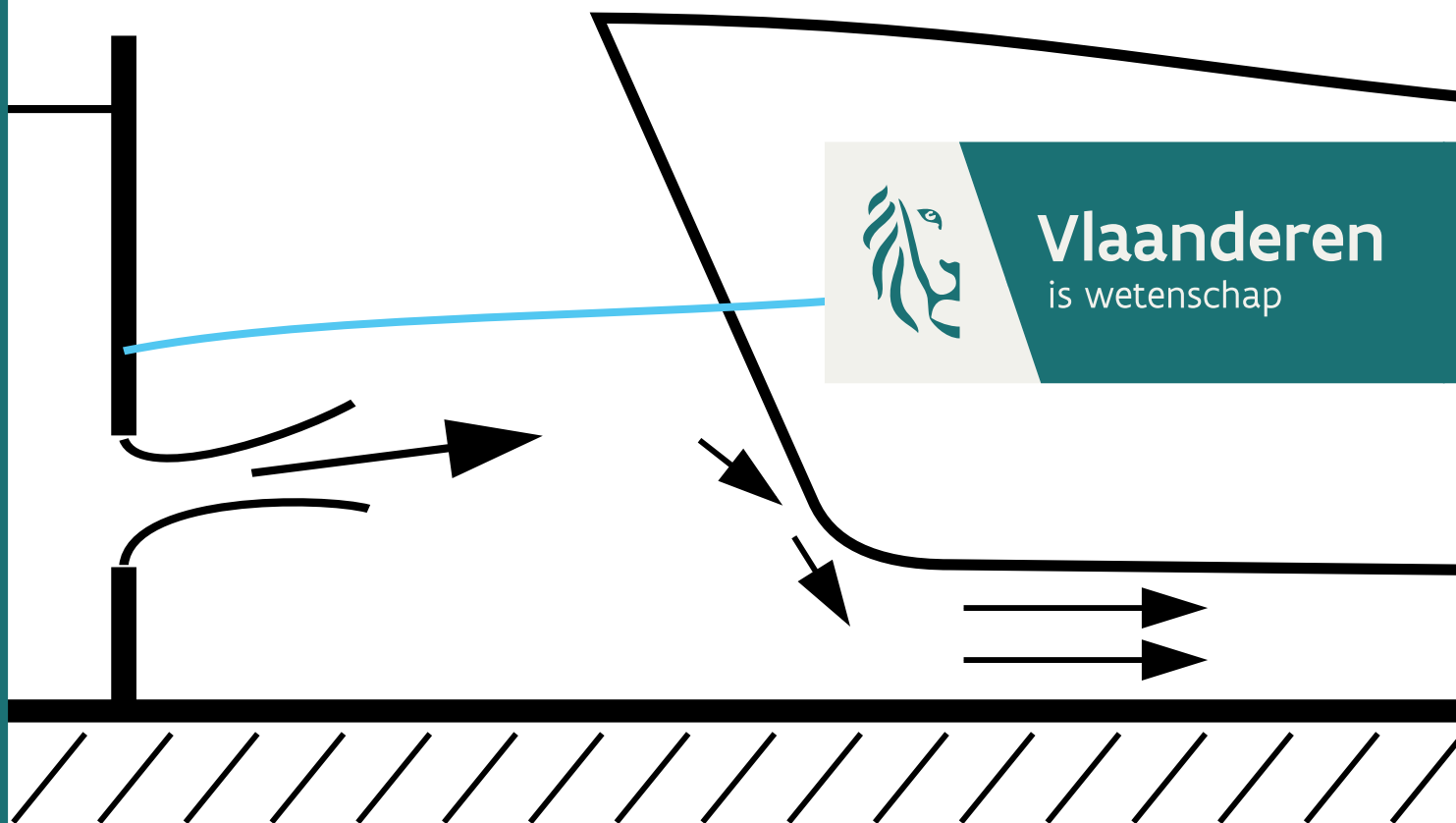




Vlaanderen
is wetenschap



15_007_3
WL rapporten

Verdere ontwikkeling programma VUL_SLUIS

Vergelijking VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D

Verdere ontwikkeling programma VUL_SLUIS

Vergelijking VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D

Verelst, K.; De Mulder, T.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2019
D/2019/3241/223

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2019). Verdere ontwikkeling programma VUL_SLUIS: Vergelijking VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D. Versie 5.0. WL Rapporten, 15_007_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

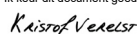
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2019R15_007_3
Keywords (3-5):	Lock, filling and emptying, software, development		
Tekst (p.):	78	Bijlagen (p.):	3
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Mulder, T.	
Projectleider:	Verelst, K.	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2019-11-29 09:37:55 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed 

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-11-29 13:13:23 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed 
-----------------	--------------	--



Abstract

In 2008 is door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) begonnen met het ontwikkelen van een eigen programma dat het nivelleren van een schutsluis via openingen in de deuren beschrijft. Dit programma is gebaseerd op literatuur met betrekking tot het programma LOCKFILL, wat ontwikkeld is door Deltares in opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat. De ontwikkeling van het programma VUL_SLUIS is gestart in het WL-project 00_077 en leidde tot twee verschillende versies van het programma, dewelke van elkaar verschillen in de formulering voor het berekenen van de langskrachten op het schip. Bij de verdere ontwikkeling van het programma VUL_SLUIS is reeds een eerste deelonderzoek uitgevoerd naar een aantal opmerkingen, aanbevelingen en verbeterpunten, wat geleid heeft tot VUL_SLUIS release 01.53.01. Met deze release worden zowel versie A als versie B van het programma gesimuleerd. Daarna werd door Universiteit Gent een onderzoek uitgevoerd naar de berekening van debiet en impuls in de vulstraal. Het resultaat van dit onderzoek was een nieuwe implementatie van de subroutine VUL_SLUIS_impuls_straal.m, dewelke geïmplementeerd is in VUL_SLUIS release 01.54.00. Deze laatste release berekent slechts één versie meer van de langskrachten op het schip in de sluisolk.

In voorliggend rapport worden voor 16 karakteristieke cases de debieten door de nivelleeropeningen, de waterstand in de sluisolk en de langskrachten op het schip in de olk berekend met de beide versies van VUL_SLUIS release 01.53.01 en met VUL_SLUIS release 01.54.00 vergeleken met deze berekend met LOCKFILL, met LOCKSIM en met Delft3D (zowel met debieten uit VUL_SLUIS als met debieten uit LOCKSIM als input).

Uit deze vergelijking volgt dat zeer beperkte verschillen waargenomen worden tussen de met de verschillende programma's berekende debieten door de nivelleeropeningen en de waterstand in de sluisolk. Wat de berekende langskracht op het schip betreft worden beperkte verschillen waargenomen voor cases met betrekking tot ledigen van een sluisolk en voor cases waarbij de langskracht ten gevolge van translatiegolven de dominante component is. Voor de cases met betrekking tot vullen, waarbij alle componenten van de langskracht relevant zijn, heeft de eerste piek van de langskracht, wanneer translatiegolven dominant zijn, berekend met de vier verschillende programma's dezelfde grootte en dezelfde timing. Tijdens het overige gedeelte van de nivellering neemt voor deze cases de bijdrage van de component ten gevolge van impulsafname en vulstraalwerking toe en worden min of meer gelijkaardige langskrachten berekend met LOCKSIM en Delft3D en min of meer gelijkaardige langskrachten met VUL_SLUIS en LOCKFILL. De negatieve extrema van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL zijn groter dan deze berekend met Delft3D en LOCKSIM. De langskrachten berekend met Delft3D met debieten uit VUL_SLUIS als input vertonen beduidend minder damping dan deze berekend met de andere programma's, de langskrachten berekend met Delft3D met debieten uit LOCKSIM als input vertonen een goede overeenkomst met de langskrachten berekend met LOCKSIM.

Als laatste zijn een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. De invloed van het al dan niet spiegelen van het snelheidsprofiel in VUL_SLUIS release 01.54.00 op de berekende langskrachten is nagegaan, alsook de invloed van de lengte van de interne componenten, de tijdstap en de waarde van de parameter θ in het Preissman-oplossingschema in LOCKSIM. Wat de simulaties met Delft3D betreft, is de invloed van de celgrootte, de waarde van de horizontale eddy viscositeit en de ruwheid op de berekende langskrachten op het schip onderzocht.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VIII
Gebruikte notatie	XI
1 Inleiding	1
2 Gesimuleerde cases.....	3
3 Invoer van simulaties.....	7
3.1 Algemeen.....	7
3.2 VUL_SLUIS en LOCKFILL	7
3.3 LOCKSIM	11
3.4 Delft3D.....	15
4 Vergelijking debiet door nivelleeropeningen, waterstand in sluiskolk en nivelleertijd	23
4.1 Vergelijking debiet door nivelleeropeningen en waterstand in sluiskolk	23
4.2 Vergelijking nivelleertijd	32
5 Vergelijking berekende langskracht op schip.....	34
5.1 Algemeen.....	34
5.2 Vergelijking totale langskracht voor cases met betrekking tot ledigen sluiskolk of vullen kolk gedomineerd door translatiegolven.....	36
5.3 Vergelijking totale langskracht voor vullen van een sluis waarbij alle componenten van de langskracht relevant zijn.....	43
5.4 Vergelijking langskracht ten gevolge van translatiegolven berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS50	
5.5 Invloed vulstraatwerking en demping translatiegolven op totale langskracht op het schip.....	52
6 Gevoeligheidsanalyses.....	61
6.1 Algemeen.....	61
6.2 Spiegelingsnelheidsprofiel bij simulaties met VUL_SLUIS	61
6.3 Lengte interne componenten, tijdstap en gewichtsfactor van het Preismann-schema bij LOCKSIM-simulaties.....	64
6.4 Celgrootte, horizontale eddy viscositeit en ruwheid bij Delft3D-simulaties.....	72
7 Conclusies	75
8 Referenties	78
Bijlage 1 Tabellen.....	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht gesimuleerde cases.....	3
Tabel 2 – Gedetailleerde informatie gesimuleerde cases.....	4
Tabel 3 – Toegepaste waarden voor de afvoercoëfficiënt voor de verschillende cases.....	5
Tabel 4 – Toegepaste openingswetten voor de verschillende cases.	6
Tabel 5 – Waarden algemene parameters VUL_SLUIS en LOCKFILL	9
Tabel 6 – Overzicht invoergegevens simulaties VUL_SLUIS en LOCKFILL.....	10
Tabel 7 – Berekening maximale lengte interne componenten	12
Tabel 8 – Bepaling celgrootte voor de verschillende cases.....	16
Tabel 9 – Bepaling tijdstap voor verschillende cases	20
Tabel 10 – Inschatting horizontale eddy viscositeit	21
Tabel 11 – Rekening tijd simulaties.....	22
Tabel 12 – Statistische parameters (eenheid: %) voor vergelijking debiet door openingen berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D	24
Tabel 13 – Statistische parameters (eenheid: %) voor vergelijking waterstand in sluiskolk berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D.	25
Tabel 14 – Vergelijking nivelleertijd voor de simulaties met VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM.....	32
Tabel 15 – Vergelijking maximale waarde debiet door nivelleeropeningen voor de simulaties met VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM.....	33
Tabel 16 – Bepaling periode en frequentie van harmonische oscillaties bij minimale en maximale waterdiepte in sluiskolk.	35
Tabel 17 – Procentuele afwijking tussen positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en de krachten berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D.	39
Tabel 18 – Procentuele afwijking (%) tussen positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en de krachten berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D	45
Tabel 19 – Berekening minimale tijdstap LOCKSIM-simulatie	64
Tabel 20 – Positieve en negatieve extrema van de totale langskracht op het schip [‰] berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01, VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03, Case05, Case08, Case09, Case10 en Case14.	B1
Tabel 21 - Positieve en negatieve extrema van de totale langskracht op het schip [‰] berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01, VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16.	B1
Tabel 22 – Statistische parameters voor langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03, Case05, Case08, Case09, Case10 en Case14.	B2
Tabel 23 – Statistische parameters voor langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16.	B2

Tabel 24 – Statistische parameters voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKSIM en Delft3D..... B3

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Componenten van de langskracht op het schip in een sluiskolk bij vullen en bij ledigen.	1
Figuur 2 – LOCKSIM-model.....	11
Figuur 3 – Ligging schip.....	17
Figuur 4 – Positie debietspunten.....	17
Figuur 5 – Locatie uitvoerpunten en raaien voor Case09	19
Figuur 6 – Vergelijking van de variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de nivelleeropeningen en parameter μA berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case03 en Case04.	26
Figuur 7 – Vergelijking van de variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en parameter μA berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case05, Case06, Case07 en Case08.	27
Figuur 8 – Vergelijking van de variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en parameter μA berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case09, Case10, Case11 en Case12.	28
Figuur 9 – Vergelijking van de variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en parameter μA berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case13, Case14, Case15 en Case16.	29
Figuur 10 – Variatie in de tijd van de waterstand in het opwaarts kanaalpand voor Case09 uit de inputfile van VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM	31
Figuur 11 – Vergelijking van de totale langskracht [%] op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03, Case05, Case08, Case09, Case10 en Case14.....	36
Figuur 12 – Modelleren deurkamers in Delft3D	37
Figuur 13 – Invloed deurkamers op langskrachten berekend met Delft3D.	38
Figuur 14 – Statistische parameters voor vergelijking langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03, Case05, Case08, Case09, Case10 en Case14.	39
Figuur 15 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03 en Case05.	41
Figuur 16 – invloed aanwezigheid deurkamer op variantiedensiteitsspectrum voor Case09	42
Figuur 17 – Vergelijking van de totale langskracht [%] op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07 en Case11.....	43
Figuur 18 – Vergelijking van de totale langskracht [%] op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case12, Case13, Case15 en Case16.....	44
Figuur 19 – Statistische parameters voor vergelijking langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16.....	47
Figuur 20 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor voor Case01, Case02, Case04 en Case06.	48

Figuur 21 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16.	49
Figuur 22 – Vergelijking van de component van de langskracht [%] op het schip ten gevolge van translatiegolven berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL voor Case01, Case02, Case03, Case04, Case05, Case06.	50
Figuur 23 – Vergelijking van de component van de langskracht [%] op het schip ten gevolge van translatiegolven berekend met VUL_SLUIS, en LOCKFILL voor Case07, Case08, Case09, Case10, Case11, Case12, Case13, Case14, Case15 en Case16.	51
Figuur 24 – Vergelijking van de langskracht [%] (zonder invloed van vulstraal) op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case03, Case04, Case05, Case06, Case07 en Case08.	54
Figuur 25 – Vergelijking van de langskracht [%] (zonder invloed van vulstraal) op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D voor Case09, Case10, Case11, Case12, Case13, Case14, Case15 en Case16.	55
Figuur 26 – Statistische parameters voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKSIM en Delft3D.....	56
Figuur 27 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D.	58
Figuur 28 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D.	59
Figuur 29 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D.	60
Figuur 30 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip [%] berekend met VUL_SLUIS (gespiegeld en niet-gespiegeld snelheidsprofiel) en LOCKFILL voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case09, Case10, Case11, Case12 en Case13.	62
Figuur 31 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip [%] berekend met VUL_SLUIS (gespiegeld en niet-gespiegeld snelheidsprofiel) en LOCKFILL voor Case15 en Case16.	63
Figuur 32 – Variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed wijziging Δx en Δt) en Delft3D en variatie in de tijd van het Courant-getal in LOCKSIM voor Case01, Case02, Case03 en Case04.	66
Figuur 33 – Variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed wijziging Δx en Δt) en Delft3D en variatie in de tijd van het Courant-getal in LOCKSIM voor Case05, Case06, Case07 en Case08.	67
Figuur 34 – Variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed wijziging Δx en Δt) en Delft3D en variatie in de tijd van het Courant-getal in LOCKSIM voor Case09, Case10, Case11 en Case12.	68
Figuur 35 – Variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed wijziging Δx en Δt) en Delft3D en variatie in de tijd van het Courant-getal in LOCKSIM voor Case13, Case14, Case15 en Case16.	69
Figuur 36 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed gewichtsfactor θ Preismann-schema) en Delft3D voor Case01, Case02, Case03, Case04, Case05, Case06, Case07 en Case08.	70

Figuur 37 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed gewichtsfactor θ Preismann-schema) en Delft3D voor Case09, Case10, Case11, Case12, Case13, Case14, Case15 en Case16.	71
Figuur 38 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D (invloed ruwheid en horizontale eddy viscositeit) voor Case01, Case06, Case11, Case13 en Case16.	73
Figuur 39 – Invloed verfijning rekenrooster op de totale kracht op het schip berekend met Delft3D voor Case11, Case13 en Case14.	74
Figuur 40 – Invloed van twee maal verfijnen rekenrooster in twee richtingen op de variatie in de tijd van de langskrachten op het schip berekend met Delft3D voor Case01.	74

Gebruikte notatie

Δt	Tijdstap	[s]
Δx	Lengte interne componenten, celgrootte in x-richting	[m]
Δy	Celgrootte in y-richting	[m]
μ	Afvoercoëfficiënt nivelleeropeningen	[-]
μA	Effectieve doorsnede nivelleeropeningen	[m ²]
v_{hor}	Horizontale eddy viscositeit	[m ² /s]
ψ_1	Coëfficiënt drukopbouw	[-]
ψ_3	Coëfficiënt ontwikkeling grenslaag	[-]
A	De totale oppervlakte van de nivelleeropeningen bij een bepaalde relatieve hefhoogte of relatieve openingshoek	[m ²]
A_{ic}	Natte sectie van de interne componenten	[m ²]
A_{tot}	De totale oppervlakte van de openingen bij volledig geopende hefschuiven of vlinderkleppen.	[m ²]
B	Breedte aan waterlijn	[m]
b_k	Breedte sluiskolk	[m]
b_s	Breedte schip	[m]
c	Golfvoortplantingssnelheid	[m/s]
CFL, C	Courant-getal	[-]
CE_1	Coëfficiënt CE_1 voor damping translatiegolven	[-]
CE_2	Coëfficiënt CE_2 voor damping translatiegolven	[-]
d_s	Diepgang schip	[m]
$F_{impuls,geenvulstraal}$	Langskracht op het schip ten gevolge van impulsafname zonder invloed van geconcentreerde vulstraal	[‰]
F_{langs}	Langskracht op het schip	[N]
$F_{langs,geenvulstraal}$	Langskracht op het schip zonder invloed van geconcentreerde vulstraal	[‰]
F_{transl}	Langskracht op het schip ten gevolge van translatiegolven	[‰]
$F_{wrijving}$	Langskracht op het schip ten gevolge van wrijving	[‰]
g	Valversnelling	[m/s ²]
h	Waterdiepte	[m]
H_{min}	Minimaal waterpeil	[mZref]
H_{boeg}	Waterstand ter plaatse van de boeg	[mZref]
H_{hek}	Waterstand ter plaatse van het hek	[mZref]
H_{kolk}	Waterstand in de sluiskolk	[mZref]
H_{opw}	Waterstand in opwaarts kanaalpand	[mZref]
l_k	Lengte sluiskolk	[m]
l_s	Lengte schip	[m]
Q	Debiet door nivelleeropeningen	[m ³ /s]
S	(Oscillerende) waterspiegelhelling in de sluiskolk	[-]
T	Periode van harmonische oscillaties in sluiskolk	[s]
U	Stroomsnelheid	[m/s]
W	Gewicht van de verplaatste vloeistof van het schip	[N]

x_i, y_i	Waarde van de tijdsreeksen die vergeleken worden	[...]
$\bar{x}, \bar{y}$	Gemiddelde waarde van de tijdsreeksen die vergeleken worden	[...]
z_k	Bodempeil sluiskolk	[mZref]
Z_{ref}	Naam gebruikte referentievlaak	[-]

1 Inleiding

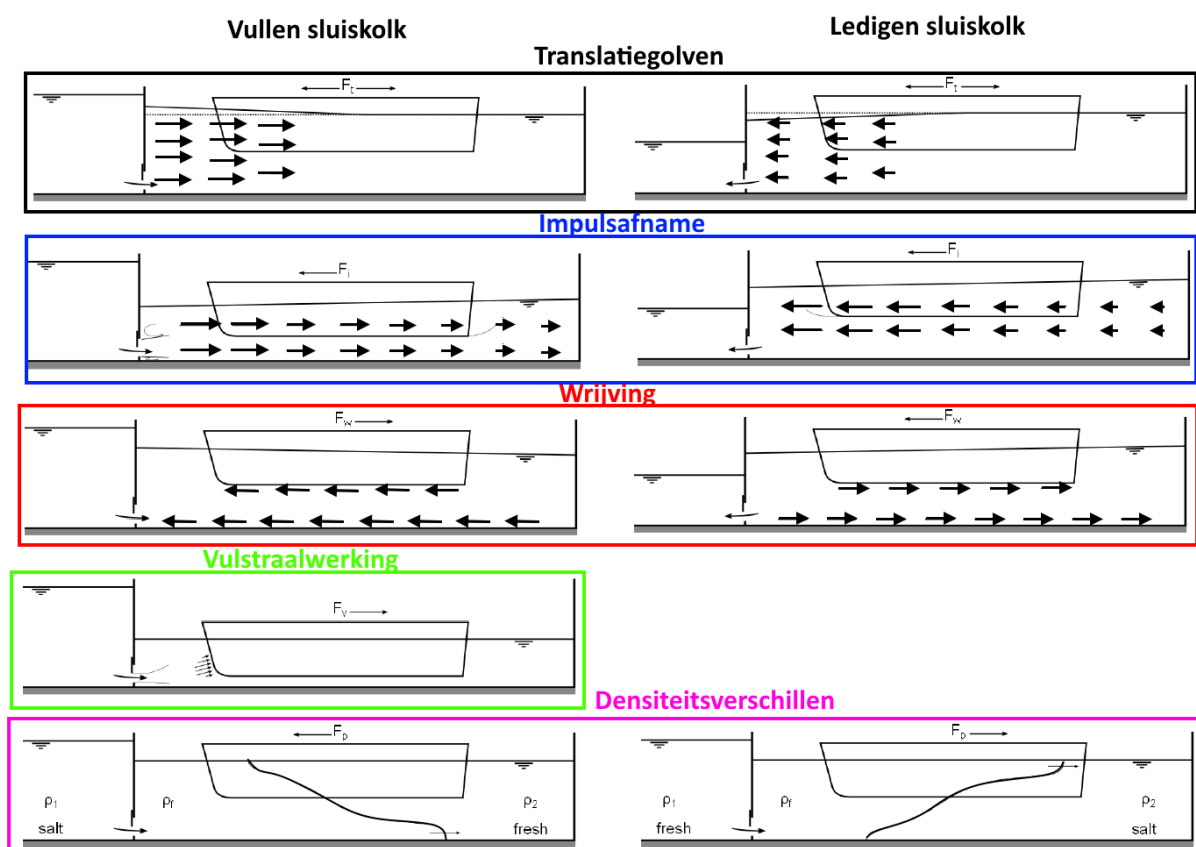
Voor het nivelleren van sluizen kan gebruik gemaakt worden van diverse systemen zoals bijvoorbeeld openingen in de sluisdeuren, (korte of lange) omloopriolen of van openingen in de bodem.

Bij vullen van een sluiscolk met openingen in de deuren worden volgende componenten van de langskracht op het schip onderscheiden (zie ook Figuur 1):

- De component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven in de sluiscolk
- De component van de langskracht ten gevolge impulsafname van de stroming in de langsrichting van de colk
- De component van de langskracht ten gevolge van wrijving van de stroming tegen het schip en de colkwanden
- De component van de langskracht ten gevolge van het botsen van de straal uit de openingen tegen de boeg van het schip
- De component van de langskracht ten gevolge van verschillen in dichtheid tussen het water aan de boeg en hek van het schip.

Bij ledigen zijn enkel de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven, impulsafname en wrijving aanwezig.

Figuur 1 – Componenten van de langskracht op het schip in een sluiscolk bij vullen en bij ledigen.



Bron: Beem *et al.*, (2000)

In 2008 is door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) begonnen met het ontwikkelen van een eigen programma, VUL_SLUIS genaamd, dat het nivelleren van een schutsluis via openingen in de deuren beschrijft. Dit programma is gebaseerd op literatuur met betrekking tot het programma LOCKFILL, wat ontwikkeld is door Deltares in opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat. Het programma VUL_SLUIS beschrijft in geschematiseerde vorm het vul- en ledigingsproces van een schutsluis via openingen in de sluisdeuren. Het programma berekent de variatie in de tijd van de waterstand in de sluiskolk, het debiet door de openingen in de deuren en de verschillende componenten van de langskracht op het schip. Bij de ontwikkeling van dit programma is enkel het nivelleren via openingen in de sluisdeuren beschouwd. Nivelleren via korte omloopriolen, nivelleren via omloopriolen met woelkelder en de berekening van de component van de langskracht ten gevolge van dichtheidsverschillen zijn voorlopig niet beschouwd bij de ontwikkeling van het programma VUL_SLUIS, maar zijn wel in beperkte mate mogelijk in LOCKFILL.

De ontwikkeling en een eerste validatie van het programma VUL_SLUIS is uitgevoerd in het WL-project 00_077. Binnen dit project zijn twee verschillende versies van het programma ontwikkeld, namelijk release 01.42.vA.08 en 01.42.vB.08. 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.

Binnen voorliggend project, de verdere ontwikkeling van het programma VUL_SLUIS, is reeds een eerste deelonderzoek uitgevoerd naar een aantal opmerkingen, aanbevelingen en verbeterpunten met betrekking tot de ontwikkeling van het programma VUL_SLUIS. Hierbij is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van een aantal algemene invoerparameters. Tevens werd de invloed onderzocht van 15 (beperkte) wijzigingen aan de code van het programma en werd een analyse uitgevoerd van de variatie in de tijd van een aantal interne (binnen het programma toegepaste) variabelen. Dit onderzoek is gerapporteerd in Verelst *et al.* (2017). Als resultaat van dit onderzoek is VUL_SLUIS release 01.53.01 ontwikkeld. Met deze release worden zowel versie A als versie B van het programma gesimuleerd. Daarna werd in Schindfessel & De Mulder (2017) een onderzoek uitgevoerd naar de berekening van debiet en impuls in de vulstraal. Het resultaat van dit onderzoek was een nieuwe versie van de subroutine vul_sluis_impuls_straal.m, dewelke geïmplementeerd is in VUL_SLUIS release 01.54.00. Deze laatste release berekent slechts één versie meer van de langskrachten op het schip in de sluiskolk.

In voorliggend rapport worden de langskrachten berekend met de beide versies van VUL_SLUIS release 01.53.01 en deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 vergeleken met deze berekend met LOCKFILL, met LOCKSIM en met Delft3D.

Hiervoor zijn de 16 karakteristieke cases beschouwd, dewelke in Verelst *et al.* (2017) voor de gevoeligheidsanalyse van de algemene invoerparameters en voor de gevoeligheidsanalyse van de wijzigingen aan de code beschouwd zijn. Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van deze 16 beschouwde cases.

In hoofdstuk 3 wordt voor elk beschouwd softwarepakket de invoer voor de simulaties voor deze 16 cases beschreven.

Daarna worden de resultaten van de simulaties met de verschillende softwarepakketten vergeleken. In hoofdstuk 4 wordt nagegaan wat de verschillen zijn in het berekende debiet door de nivelleeropeningen in de sluisdeur en de berekende waterstand in de sluiskolk. Een vergelijking tussen de met de verschillende softwarepakketten berekende langskracht op het schip is beschreven in hoofdstuk 5.

Hoofdstuk 6 beschrijft de resultaten van een aantal uitgevoerde gevoeligheidsanalyses, terwijl hoofdstuk 7 de conclusies van dit rapport samenvat.

2 Gesimuleerde cases

De simulaties in dit rapport zijn uitgevoerd voor de 16 karakteristieke cases, die in Verelst *et al.* (2017) voor de gevoeligheidsanalyse van de algemene invoerparameters en voor de gevoeligheidsanalyse van de wijzigingen aan de code beschouwd zijn.

Tabel 1 geeft een overzicht van de geselecteerde cases. In deze tabel zijn ook de referenties en de figuurnummers of de naam van de simulaties uit deze referenties vermeld. Meer gedetailleerde informatie met betrekking tot deze cases is gegeven in Tabel 2. Om de omvang van de tabel te beperken zijn de waarden voor de afvoercoëfficiënt van de openingen en de openingswetten van de schuiven / kleppen afzonderlijk gegeven in Tabel 3 en Tabel 4.

Tabel 1 – Overzicht gesimuleerde cases

Case nr.	Type nivelleersysteem	Type nivellering	Naam voorbeeld / naam sluis	Referentie	Figuur nr. / Naam simulatie
1	Rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven	Vullen	LOCKFILL	<i>Waterloopkundig Laboratorium (1994a)</i>	Figuur 10
2		Vullen	Royerssluis	<i>Schwanenberg & Jongeling (2003)</i>	Simulatie A1
3		Ledigen	Royerssluis	<i>Schwanenberg & Jongeling (2003)</i>	Simulatie A21
4	Cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen	Vullen	LOCKFILL	<i>Waterloopkundig Laboratorium (1994b)</i>	Figuur 22
5		Ledigen	LOCKFILL	<i>Waterloopkundig Laboratorium (1994b)</i>	Figuur 23
6		Vullen	Royerssluis	<i>Schwanenberg & Jongeling (2003)</i>	Simulatie A3
7		Vullen	Royerssluis	<i>Schwanenberg & Jongeling (2003)</i>	Simulatie A11
8		Ledigen	Royerssluis	<i>Schwanenberg & Jongeling (2003)</i>	Simulatie A23
9		Vullen	Vandammesluis	<i>Vercruysse et al. (2012)</i>	Nivellering 18
10	Cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven	Vullen	Evergem	<i>Vercruysse et al. (2011)</i>	Nivellering 12
11		Vullen	Sint-Baafs-Vijve b = 12,5 m	<i>Vercruysse et al. (2014)</i>	Geometrie 5 - Openingswet 5
12	Rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven	Vullen	Sint-Baafs-Vijve b = 16,0 m	<i>Vercruysse et al. (2016)</i>	Simulatie 27
13		Vullen	Denderbelle	<i>Verelst et al. (2016c)</i>	Simulatie Hsr09
14		Ledigen	Denderbelle	<i>Verelst et al. (2016c)</i>	Simulatie Hsr15
15		Vullen	Denderbelle	<i>Verelst et al. (2016c)</i>	Simulatie Hsr12
16	Cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven	Vullen	Terneuzen	<i>Dos Santos Nogueira et al. (2016)</i>	Proef T1.12

Tabel 2 – Gedetailleerde informatie gesimuleerde cases

		Case01	Case02	Case03	Case04	Case05	Case06	Case07	Case08	Case09	Case10	Case11	Case12	Case13	Case14	Case15	Case16
		LOCKFILL figuur 10	Royerssluis simulatie A1	Royerssluis simulatie A21	LOCKFILL figuur 22	LOCKFILL figuur 23	Royerssluis simulatie A3	Royerssluis simulatie A11	Royerssluis simulatie A23	Vandammesluis nivellering18	Evergem nivellering12	Sint-Baafs-Vijve b=12.5m; Geometrie 5 - openingswet 5	Sint-Baafs-Vijve b=16m Simulatie27	Denderbelle simulatie HSr09	Denderbelle simulatie HSr15	Denderbelle simulatie HSr12	Terneuzen Proef T1.12
Type		Vullen	Vullen	Ledigen	Vullen	Ledigen	Vullen	Vullen	Ledigen	Vullen	Vullen	Vullen	Vullen	Vullen	Ledigen	Vullen	Vullen
ALGEMEEN																	
Referentievlak	ref	NAP	TAW	TAW	NAP	NAP	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	NAP
OPWAARTS KANAALPAND																	
Peil opwaarts pand	[mZref]	1.00	4.40	-1.00	1.00	-2.00	4.40	4.40	-1.00	3.60	5.73	8.00	8.00	5.83	3.45	5.83	2.19
SLUISKOLK																	
Lengte sluiskolk	[m]	200.0	182.5	182.5	200.0	200.0	182.5	182.5	182.5	473.0	256.6	258.1	259.0	130.0	130.0	130.0	427.0
Breedte sluiskolk	[m]	16.0	22.0	22.0	16.0	16.0	22.0	22.0	22.0	57.0	25.0	12.5	16.0	10.5	10.5	10.5	55.0
Bodempeil sluiskolk	[mZref]	-5.70	-6.33	-6.33	-5.70	-5.70	-6.33	-6.33	-6.33	-15.19	-0.55	0.90	0.91	-0.78	-0.78	-0.78	-17.00
Initiële waterstand kolk	[mZref]	-2.00	-1.00	4.40	-2.00	1.00	-1.00	-1.00	4.40	2.34	4.62	5.61	5.11	3.45	5.83	3.45	-2.67
SCHIP			JOWI	JOWI			JOWI	JOWI	JOWI			CEMT Vb	CEMT Vb	CEMT IV	CEMT IV	Recreatievaart	Bulkcarrier
Lengte	[m]	110.00	135.50	135.50	110.00	110.00	135.50	135.50	135.50	82.00	99.00	185.00	185.00	105.00	105.00	12.00	265.00
Breedte schip	[m]	11.40	16.84	16.84	11.40	11.40	16.84	16.84	16.84	11.50	9.57	11.40	11.40	9.50	9.50	3.40	40.00
Diepgang	[m]	2.80	3.20	3.20	2.80	2.80	3.20	3.20	3.20	4.29	2.70	3.50	3.50	3.00	3.00	1.40	12.50
Massa	[ton]	2890.0	6500.0	6500.0	2890.0	2890.0	6500.0	6500.0	6500.0	3236.4	2302.0	6000.0	6000.0	2385.0	2385.0	21.7	98436.0
Hoek boeg in de verticale	[°]	90	90	90	90	90	90	90	90	45	90	21	21	90	90	90	90
Hoek boeg in de horizontale	[°]	45	45	45	45	45	45	45	45	90	45	90	90	45	45	45	60
Afstand boeg tot vuldeur	[m]	7.5	10.0	10.0	7.5	7.5	10.0	10.0	10.0	55.0	7.5	7.0	5.1	5.0	5.0	5.0	50.0
HEFSCHUIVEN																	
Type vulopeningen	[-]	Rechthoekig	Rechthoekig	Rechthoekig	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	Cirkelvormig	Cirkelvormig	Rechthoekig	Rechthoekig	Rechthoekig	Rechthoekig	Cirkelvormig
Aantal rechthoekige openingen	[-]	5	7	4	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	6	6	6	6	n.v.t.
Hoogte openingen	[m]	1.10	1.30	1.50	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.05	0.90	0.90	0.90	n.v.t.
Breedte openingen	[m]	2.10	2.15	2.15	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.89	0.90	0.90	0.90	n.v.t.
Aantal cirkelvormige openingen	[-]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	12	6	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	12
Diameter opening (cirkelvormige opening)	[m]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.20	1.35	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	2.20
Afvoercoëfficiënt (i.f.v. relatieve hefhoogte)	[-]	H1	H1	H1	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	H2	H2	H3	H3	H3	H3	H4
Openingssnelheid v _h	[m/s]	OC1	OC2	OC3	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	OC9	OC10	OC11	OC12	OC13	OC12	OC14
VLINDERKLEPPEN																	
Aantal vlinderkleppen	[-]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	8	8	8	8	8	5	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Diameter vulopening (cirkelvormige opening)	[m]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.40	1.40	1.80	1.40	1.40	1.80	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Klephoek gesloten stand	[°]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	90	90	0	0	0	0	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Klephoek open stand	[°]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0	0	90	90	90	90	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Minimale klephoek	[°]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	10	10	8	8	0	0	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Afvoercoëfficiënt (i.f.v. relatieve klepstand)	[-]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	V1	V1	V1	V1	V1	V1	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Openingssnelheid v _h	[°/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	OC4	OC4	OC5	OC6	OC7	OC8	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Breekbalken		J/N	J	J	J	J	J	J	J	N	J	J	J	J	J	J	J
Niveau bovenkant vulopeningen	[mZref]	-3.50	-3.83	-3.63	-3.50	-3.50	-3.43	-3.83	-3.83	n.v.t.	0.90	2.45	2.14	1.05	1.05	1.05	-9.30
Oppervlakte vulstraal juist na breekbalken	[m²]	16.00	27.40	18.06	16.00	16.00	24.42	14.77	14.77	n.v.t.	13.57	10.31	14.29	4.86	4.86	4.86	45.60
Hoek van de vulstraal met de horizontale	[°]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Niveau onderkant vulopeningen	[mZref]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	-13.34	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Contractiecoëfficiënt	[-]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.6	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Deurkas Roldeur		J/N															
Extra oppervlakte opwaarts	[m²]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Extra oppervlakte afwaarts	[m²]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1694	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Extra uitvoerpunten		J/N															
X-coördinaat opwaarts uitvoerpunt	[m]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	54	3	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
X-coördinaat afwaarts uitvoerpunt	[m]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	413	233	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing

Tabel 3 – Toegepaste waarden voor de afvoercoëfficiënt voor de verschillende cases

Openingen afgesloten met hefschuiven								Openingen afgesloten met vlinderkleppen	
H1		H2		H3		H4		V1	
Relatieve hefhoogte	Afvoercoëfficiënt	Relatieve hefhoogte	Afvoercoëfficiënt	Relatieve hefhoogte	Afvoercoëfficiënt	Relatieve hefhoogte	Afvoercoëfficiënt	Relatieve Openingshoek	Afvoercoëfficiënt
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.00	0.70	0.00	0.75	0.00	0.95	0.00	0.880	0.00	0.000
1.00	0.65	0.60	0.75	0.15	0.82	0.15	0.884	0.10	0.005
		0.70	0.71	0.28	0.78	0.20	0.859	0.20	0.023
		0.80	0.69	0.40	0.75	0.50	0.849	0.30	0.061
		0.90	0.69	1.00	0.75	1.00	0.614	0.40	0.115
		1.00	0.65					0.50	0.190
								0.60	0.290
								0.70	0.400
								0.80	0.520
								0.90	0.620
								0.96	0.660
								1.00	0.680

Opmerking: Bij openingen afgesloten met vlinderkleppen bevat de afvoercoëfficiënt ook de relatieve oppervlakte van de openingen. Dit verklaart de kleine waarden voor de afvoercoëfficiënt voor vlinderkleppen bij een relatieve klephoek gelijk aan 0.00.

Tabel 4 – Toegepaste openingswetten voor de verschillende cases.

Case	Naam openingswet	Tijd	Openings- snelheid	Case	Naam openingswet	Tijd	Openings- snelheid
Case01	OC1	0.0 s 2000.0 s	0.0025 m/s 0.0025 m/s	Case06	OC5	0.0 s 120.0 s 160.0 s 2000.0 s	0.3350 °/s 0.3350 °/s 0.1005 °/s 0.0900 °/s
Case02	OC2	0.0 s 2000.0 s	0.0031 m/s 0.0031 m/s	Case07	OC6	0.0 s 120.0 s 160.0 s 2000.0 s	0.3950 °/s 0.3950 °/s 0.1150 °/s 0.1300 °/s
Case03	OC3	0.0 s 2000.0 s	0.0100 m/s 0.0100 m/s	Case08	OC7	0.0 s 120.0 s 160.0 s 2000.0 s	0.6200 °/s 0.6200 °/s 1.0000 °/s 1.0000 °/s
Case04 Case05	OC4	0.0 s 2000.0 s	0.2000 °/s 0.2000 °/s	Case09	OC8	0.0 s 2.5 s 27.5 s 29.5 s 34.5 s 35.0 s 3000.0 s	0.0000 °/s 3.1600 °/s 3.1600 °/s 0.6000 °/s 0.6000 °/s 0.0000 °/s 0.0000 °/s
Case	Naam openingswet	Tijd	Openings- snelheid	Case	Naam openingswet	Tijd	Openings- snelheid
Case10	OC9	0.0 s	0.0150 m/s	Case11	OC10	0.0 s	0.0040 m/s
		17.0 s	0.0150 m/s	Case12	OC11	90.0 s	0.0040 m/s
		17.1 s	0.0000 m/s			120.0 s	0.0015 m/s
		55.0 s	0.0000 m/s			350.0 s	0.0015 m/s
		55.1 s	0.0130 m/s			380.0 s	0.0040 m/s
		67.0 s	0.0130 m/s			2000.0 s	0.0040 m/s
		67.1 s	0.0000 m/s			0.0 s	0.0030 m/s
		94.0 s	0.0000 m/s	Case13 Case15	OC12	89.0 s	0.0030 m/s
		94.1 s	0.0140 m/s			90.0 s	0.0010 m/s
		105.0 s	0.0140 m/s	Case14	OC13	389.0 s	0.0010 m/s
		105.1 s	0.0000 m/s			390.0 s	0.0030 m/s
		133.0 s	0.0000 m/s	Case16	OC14	2000.0 s	0.0030 m/s
		133.1 s	0.0130 m/s			0.0 s	0.0011 m/s
		146.0 s	0.0130 m/s			62.5 s	0.0011 m/s
		146.1 s	0.0000 m/s			62.6 s	0.0000 m/s
		165.0 s	0.0000 m/s			137.0 s	0.0000 m/s
		165.1 s	0.0150 m/s			137.1 s	0.0030 m/s
		2000.0 s	0.0150 m/s			5500.0 s	0.0030 m/s

3 Invoer van simulaties

3.1 Algemeen

Voor elk van de toegepaste softwareprogramma's beschrijft dit hoofdstuk de opbouw van het numeriek model. Hierbij wordt opgemerkt dat voor het uitvoeren van de simulaties voor de 16 cases steeds de invoergegevens van de simulaties met VUL_SLUIS als basis beschouwd zijn. Bij LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D is getracht om de invoer van deze simulaties zo goed mogelijk te laten overeenstemmen met de invoer van de overeenkomstige simulatie uitgevoerd met VUL_SLUIS.

De invoergegevens voor VUL_SLUIS en LOCKFILL zijn beschreven in paragraaf 3.2. Aangezien de invoer voor deze beide programma's identiek is, worden deze in dezelfde paragraaf beschreven. In paragraaf 3.3, respectievelijk 3.4 wordt de opbouw van het model en de invoer voor de simulaties met LOCKSIM, respectievelijk de simulaties met Delft3D, beschreven.

3.2 VUL_SLUIS en LOCKFILL

De programma's VUL_SLUIS en LOCKFILL beschrijven in geschematiseerde vorm het vul- en ledigingsproces van een schutsluis bij nivelleren via openingen in de sluisdeuren. De beide programma's berekenen de variatie in de tijd van de (over de kolkoppervlakte gemiddelde) waterstand in de sluiskolk, het debiet door de openingen in de deuren en de verschillende componenten van de langskracht op het schip

De LOCKFILL-simulaties in dit rapport zijn uitgevoerd met LOCKFILL 05.03.00 (Deltares, 2016).

In Verelst *et al.* (2017) is onderzoek uitgevoerd naar een aantal opmerkingen, aanbevelingen en verbeterpunten met betrekking tot de ontwikkeling van het programma VUL_SLUIS. Bij de ontwikkeling van het programma VUL_SLUIS tot en met VUL_SLUIS release 01.53.01 werden twee verschillende versies van het programma ontwikkeld dewelke identieke resultaten geven 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 echter de berekening van de impuls in de vulstraal en bijgevolg de berekening van de langskrachten op het schip. In VUL_SLUIS release 01.54.00 wordt slechts één versie van de langskracht op het schip meer berekend. De simulaties met VUL_SLUIS zijn zowel uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.53.01 als met VUL_SLUIS release 01.54.00 om zowel de langskrachten op het schip berekend met beide versies van VUL_SLUIS release 01.53.01 als deze berekend met de enige versie van VUL_SLUIS release 01.54.00 te vergelijken met deze berekend met de overige softwareprogramma's.

In Tabel 6 is voor alle beschouwde cases een overzicht gegeven van de invoergegevens voor het programma VUL_SLUIS. Deze tabel verschilt als volgt met Tabel 2 uit hoofdstuk 2:

- Bij uitvoeren van simulaties met vlinderkleppen in LOCKFILL en VUL_SLUIS is vastgesteld dat de definitie van de minimale klephoek verschillend is in beide programma's. De verschillen tussen de beide definities van de minimale klephoek worden hieronder meer in detail verklaard. Daarnaast is het in VUL_SLUIS mogelijk om (in relatie tot het gebruik van de minimale klephoek) de klephoek van de vlinderklep zowel te laten variëren tussen 0° (gesloten stand) en 90° (geopende stand) als tussen 90°(gesloten stand) en 0° (geopende stand). Dit is niet mogelijk in LOCKFILL. De klephoek in LOCKFILL dient altijd te variëren tussen 0° (gesloten stand) en 90° (geopende stand). Om die reden is voor alle simulaties met vlinderkleppen een klephoek in gesloten stand gelijk aan 0° beschouwd en een klephoek in geopende stand gelijk aan 90°.
- In LOCKFILL dient altijd een waarde voor de bovenzijde van de vulstraal na breekbalken en de oppervlakte van de vulstraal na breekbalken opgegeven te worden (of: breekbalken zijn altijd

aanwezig). In VUL_SLUIS is het mogelijk om ook geen breekbalken te beschouwen. Omdat het doel van dit onderzoek is een zo identiek mogelijke simulatie uit te voeren met LOCKFILL en VUL_SLUIS, is in VUL_SLUIS voor alle simulaties breekbalken='J' beschouwd. Voor configuraties zonder breekbalken is in VUL_SLUIS de totale oppervlakte van de openingen beschouwd als input voor de parameter "oppervlakte van de vulstraal na de breekbalken" en de bovenzijde van de openingen voor de parameter "bovenzijde vulstraal na breekbalken". Dit heeft bij Case09, Case10, Case13, Case14 en Case15 geleid tot een wijziging van de input.

De tabellen met waarden voor de afvoercoëfficiënt van de openingen en de openingswetten van de schuiven/kleppen zijn gegeven in hoofdstuk 2 (Tabel 3 en Tabel 4).

Bij uitvoering van de simulaties zijn volgende verschillen tussen LOCKFILL en VUL_SLUIS vastgesteld:

1. Definitie minimale klephoek voor vlinderkleppen

Voor waarden van de klephoek lager dan de minimale klephoek wordt in VUL_SLUIS de waarde voor de afvoercoëfficiënt bij een hoek 0° beschouwd. Bij hogere waarden van de klephoek wordt de waarde voor de klephoek geïnterpoleerd uit de tabel in de invoerfile. Dit is in VUL_SLUIS geprogrammeerd analoog aan de situatie bij het schaalmodelonderzoek voor de sluis van Zemst (Vercruysse *et al.*, 2013), waar bij klephoeken lager dan 8° de rubber van de vlinderklep in het schaalmodel ervoor zorgde dat geen debiet werd doorgelaten.

In LOCKFILL echter wordt bij klephoeken lager dan de minimale klephoek de waarde voor de afvoercoëfficiënt van de openingen toegepast dewelke gelijk is aan de waarde bij de minimale klephoek. Hierbij wordt dus verondersteld dat de vlinderklep niet volledig gesloten is. Communicatie met Deltares (mail dd. 21/07/2017 met helpdesk LOCKFILL) leert dat iets is misgelopen bij de implementatie van deze minimale klephoek in LOCKFILL.

2. Breedte openingen bij Case10 en Case16

Case10 en Case16 betreffen cirkelvormige openingen afgesloten met een hefschuif. In VUL_SLUIS is het mogelijk om het aantal openingen, de diameter van de openingen en de variatie van de hefsnelheid van de hefschuif in functie van de tijd als input op te geven. In LOCKFILL echter dienen cirkelvormige openingen afgesloten met een hefschuif opgegeven te worden als een opening met een totale breedte, dewelke varieert in functie van de relatieve hefhoogte van de hefschuif. Hierbij wordt een tabel opgegeven met voor elke relatieve hefhoogte de som van de breedtes van alle aanwezige cirkelvormige openingen op deze hoogte.

3. Lengte tabellen in LOCKFILL

Met uitzondering van de tabel met de variatie van de totale breedte van de openingen in functie van de relatieve hefhoogte van de hefschuif, geldt voor alle tabellen in LOCKFILL dat de maximale lengte gelijk is aan 40 lijnen. Bij Case09 is in VUL_SLUIS de variatie van het opwaarts kolkpeil in functie van de tijd in de input opgegeven. In LOCKFILL is als input voor deze parameter een tabel opgegeven met maximaal 40 lijnen, die (met een constante tijdstap) geselecteerd is uit de input van VUL_SLUIS.

Tabel 5 geeft een overzicht van de algemene parameters uit de invoerfile van VUL_SLUIS en LOCKFILL.

Tabel 5 – Waarden algemene parameters VUL_SLUIS en LOCKFILL

Tijdstap simulatie	0.2 s
Coëfficiënt drukopbouw ψ_1	0.8
Coëfficiënt ontwikkeling grenslaag ψ_3	0.9
Coëfficiënt CE_1 voor demping translatiegolven	0.07
Coëfficiënt CE_2 voor demping translatiegolven	0.40
Ruwheid kolkwanden en kolkbodem	0.005 m
Ruwheid romp schip	0.005 m

Case09 is de enige case met roldeuren, waarbij dus deurkamers aanwezig zijn. In VUL_SLUIS wordt voor deze deurkamers een oppervlakte van 1694 m² aan de afwaartse zijde (ter plaatse van de niet voor nivelleren gebruikte sluisdeur) en 0 m² aan de opwaartse zijde (ter plaatse van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur) beschouwd. In LOCKFILL is dit enkel mogelijk door opgeven van één parameter $ASK = 1694 \text{ m}^2$, die de totale oppervlakte van de roldeuren in rekening brengt. Bij alle overige cases wordt geen oppervlakte van de deurkamers opgegeven.

Wat de optionele parameters in VUL_SLUIS release 01.53.01 en VUL_SLUIS release 01.54.00 betreft, worden voor alle cases geen extra uitvoerpunten gedefinieerd ('N' bij invoer EXTRA_UITV), wordt geen extra uitvoer van interne variabelen toegepast ('N' bij invoer EXTRA_OUTPUT), wordt standaard altijd loslating aan boeg en hek beschouwd ('J' bij invoer LOSLATING) en wordt standaard de invloed van de vulstraal bij de langskracht ten gevolge van impulsafname beschouwd ('J' bij invoer VULSTRAAL). In hoofdstuk 5 worden voor alle beschouwde cases ook de resultaten van een aantal simulaties besproken, waarbij de coëfficiënt CE_2 voor de demping van translatiegolven gewijzigd is, waarbij loslating aan boeg en hek niet beschouwd wordt ('N' bij invoer LOSLATING) en waarbij de invloed van de vulstraal bij de langskracht ten gevolge van impulsafname niet beschouwd wordt ('N' bij invoer VULSTRAAL).

De programma's VUL_SLUIS en LOCKFILL berekenen voor het schip in de kolk de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven, de langskracht ten gevolge van impulsafname, de langskracht ten gevolg van vulstraalwerking en de langskracht ten gevolge van wrijving. De totale langskracht op het schip is de som van deze componenten.

Tabel 6 – Overzicht invoergegevens simulaties VUL_SLUIS en LOCKFILL

		Case01	Case02	Case03	Case04	Case05	Case06	Case07	Case08	Case09	Case10	Case11	Case12	Case13	Case14	Case15	Case16
		LOCKFILL figuur 10	Royerssluis simulatie A1	Royerssluis simulatie A21	LOCKFILL figuur 22	LOCKFILL figuur 23	Royerssluis simulatie A3	Royerssluis simulatie A11	Royerssluis simulatie A23	Vandammesluis nivellering18	Evergem nivellering12	Sint-Baafs-Vijve b=12.5m; Geometrie 5 - openingswet 5	Sint-Baafs-Vijve b=16.0m Simulatie27	Denderbelle simulatie HSr09	Denderbelle simulatie HSr15	Denderbelle simulatie HSr12	Terneuzen Proef T1.12
Type		Vullen	Vullen	Ledigen	Vullen	Ledigen	Vullen	Vullen	Ledigen	Vullen	Vullen	Vullen	Vullen	Vullen	Ledigen	Vullen	Vullen
ALGEMEEN																	
Referentievlak	ref	NAP	TAW	TAW	NAP	NAP	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	TAW	NAP
Tijdsstap	s	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Valversnelling	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Dichtheid water	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Coëfficiënt drukopbouw	-	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Coëfficiënt ontwikkeling grenslaag	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Coëfficiënt 1 voor demping translatiegolven	-	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Coëfficiënt 2 voor demping translatiegolven	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
OPWAARTS KANAALPAND																	
Peil opwaarts pand	[mZref]	1.00	4.40	-1.00	1.00	-2.00	4.40	4.40	-1.00	3.60	5.73	8.00	8.00	5.83	3.45	5.83	2.19
SLUISKOLK																	
Lengte sluisolk	[m]	200.0	182.5	182.5	200.0	200.0	182.5	182.5	182.5	473.0	256.6	258.1	259.0	130.0	130.0	130.0	427.0
Breedte sluisolk	[m]	16.0	22.0	22.0	16.0	16.0	22.0	22.0	22.0	57.0	25.0	12.5	16.0	10.5	10.5	10.5	55.0
Bodempeil sluisolk	[mZref]	-5.70	-6.33	-6.33	-5.70	-5.70	-6.33	-6.33	-6.33	-15.19	-0.55	0.90	0.91	-0.78	-0.78	-0.78	-17.00
Initiële waterstand kolk	[mZref]	-2.00	-1.00	4.40	-2.00	1.00	-1.00	-1.00	4.40	2.34	4.62	5.61	5.11	3.45	5.83	3.45	-2.67
Ruwheid kolkwanden en kolkbodem	[m]	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
SCHIP			JOWI	JOWI			JOWI	JOWI	JOWI			CEMT Vb	CEMT Vb	CEMT IV	CEMT IV	Recreatievaart	Bulkcarrier
Lengte	[m]	110.00	135.50	135.50	110.00	110.00	135.50	135.50	135.50	82.00	99.00	185.00	185.00	105.00	105.00	12.00	265.00
Breedte schip	[m]	11.40	16.84	16.84	11.40	11.40	16.84	16.84	16.84	11.50	9.57	11.40	11.40	9.50	9.50	3.40	40.00
Diepgang	[m]	2.80	3.20	3.20	2.80	2.80	3.20	3.20	3.20	4.29	2.70	3.50	3.50	3.00	3.00	1.40	12.50
Massa	[ton]	2890.0	6500.0	6500.0	2890.0	2890.0	6500.0	6500.0	6500.0	3236.4	2302.0	6000.0	6000.0	2385.0	2385.0	21.7	98436.0
Hoek boeg in de verticale	[°]	90	90	90	90	90	90	90	90	45	90	21	21	90	90	90	90
Hoek boeg in de horizontale	[°]	45	45	45	45	45	45	45	45	90	45	90	90	45	45	45	60
Afstand boeg tot vuldeur	[m]	7.5	10.0	10.0	7.5	7.5	10.0	10.0	10.0	55.0	7.5	7.0	5.1	5.0	5.0	5.0	50.0
Ruwheid romp van het schip	[m]	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
HEFSCHUIVEN																	
Maximale hoogte vulopeningen	[m]	1.10	1.30	1.50	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.20	1.35	1.05	0.90	0.90	0.90	2.20
Type vulopeningen	[-]	Rechthoekig	Rechthoekig	Rechthoekig	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	Cirkelvormig	Cirkelvormig	Rechthoekig	Rechthoekig	Rechthoekig	Rechthoekig	Cirkelvormig
Totale breedte openingen	[m]	10.50	15.05	8.60	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	11.34	5.40	5.40	5.40	n.v.t.
Aantal cirkelvormige openingen	[-]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	12	6	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	12
Diameter vulopening (cirkelvormige opening)	[m]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.20	1.35	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	2.20
Afvoercoëfficiënt (i.f.v. relatieve hefhoogte)	[-]	H1	H1	H1	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	H2	H2	H3	H3	H3	H3	H4
Openingssnelheid v _h	[m/s]	OC1	OC2		n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	OC9	OC10	OC11	OC12	OC13	OC12	OC14
VLINDERKLEPPEN																	
Aantal vlinderkleppen	[-]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	8	8	8	8	8	5	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Diameter vulopening (cirkelvormige opening)	[m]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.40	1.40	1.80	1.40	1.40	1.80	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Klephoek gesloten stand	[°]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0	0	0	0	0	0	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Klephoek open stand	[°]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	90	90	90	90	90	90	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Minimale klephoek	[°]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0	0	0	0	0	0	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Afvoercoëfficiënt (i.f.v. relatieve klepstand)	[-]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	V1	V1	V1	V1	V1	V1	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Openingssnelheid v _h	[°/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	OC4	OC4	OC5	OC6	OC7	OC8	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Breekbalken		J/N	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J
Niveau bovenkant vulopeningen	[mZref]	-3.50	-3.83	-3.63	-3.50	-3.50	-3.43	-3.83	-3.83	-11.54	0.90	2.45	2.14	1.05	1.05	1.05	-9.30
Oppervlakte vulstraat juist na breekbalken	[m²]	16.00	27.40	18.06	16.00	16.00	24.42	14.77	14.77	12.73	13.58	10.31	14.29	4.87	4.87	4.87	45.63
Hoek van de vulstraat met de horizontale	[°]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Deurkas Roldeur		J/N	N	N	N	N	N	N	N	J	N	N	N	N	N	N	N
Extra oppervlakte opwaarts	[m²]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Extra oppervlakte afwaarts	[m²]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1694	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Extra uitvoerpunten		J/N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
X-coördinaat opwaarts uitvoerpunt	[m]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
X-coördinaat afwaarts uitvoerpunt	[m]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Special																	
Extra output	[-]	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Vulstraat	[-]	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J
Loslating	[-]	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J

n.v.t. = niet van toepassing

3.3 LOCKSIM

Met LOCKSIM (Schohl G.A., 1998) kunnen hydraulische simulaties uitgevoerd worden van nivelleersystemen die bestaan uit een combinatie van componenten waarin stroming met vrij oppervlak optreedt (vb: sluiskolk) en componenten waarin zich stroming onder druk voordoet (Leidingnetwerken).

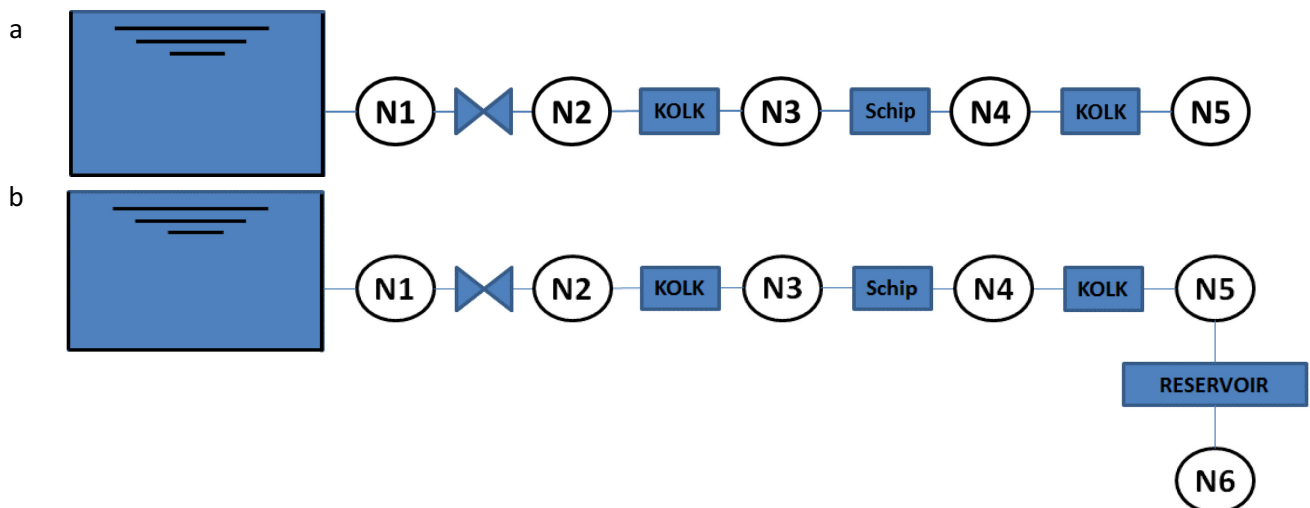
De simulaties in dit rapport zijn uitgevoerd met LOCKSIM windows release 1.21.

De waterbeweging in de sluiskolk wordt berekend door het oplossen van de 1D St.-Venant vergelijkingen. Hiervoor wordt de kolk in langszin door een equidistant rekenrooster verdeeld in moten. De onbekenden zijn de waterstanden in en de debieten doorheen de dwarssecties waaruit het rekenrooster bestaat.

In LOCKSIM kan rekening gehouden worden met de aanwezigheid van een schip in de kolk (een drijvend object) door de natte sectie van de raaien ter plaatse van het schip te verminderen met de sectie van het schip en de natte omtrek van deze raaien te vermeerderen.

Met uitzondering van Case09, waar afwaarts een deurkamer aanwezig is, is voor alle cases een gelijkaardig LOCKSIM model opgemaakt. Een voorstelling van dit model is gegeven in Figuur 2. Hierbij is tussen knooppunt N1 en N2 een klep aanwezig. Afhankelijk van de case betreft dit een hefschuif of een vlinderklep. Tussen knooppunten N2 en N3 en tussen knooppunten N4 en N5 bevindt zich het gedeelte van de sluiskolk waarin geen schip aanwezig is. Dit gedeelte is gemodelleerd aan de hand van componenten met een vrij wateroppervlak. Het schip, gemodelleerd als componenten met een vrij wateroppervlak met verminderde natte sectie, is aanwezig tussen knooppunten N3 en N4. Bij Case09, waarbij er afwaarts een deurkamer aanwezig is, is tussen knooppunten N5 en N6 een reservoir met een oppervlakte gelijk aan de oppervlakte van de deurkamer (1694 m²) aanwezig. In dit reservoir worden de 1D-Saint-Venant vergelijkingen niet opgelost.

Figuur 2 – LOCKSIM-model



a: LOCKSIM-model overige cases; b: LOCKSIM-model Case09

Om voor alle cases de simulaties zo goed mogelijk te doen overeenkomen met de simulaties met VUL_SLUIS en LOCKFILL, wordt ook 0.2 s als tijdstap toegepast bij alle simulaties.

Voor componenten met een vrij wateroppervlak dient de totale lengte van de component opgegeven te worden. Voor het uitvoeren van de simulatie wordt in LOCKSIM de betreffende component opgedeeld gebruik makend van interne knooppunten en interne componenten. Het aantal interne componenten dient

ook opgegeven te worden. De handleiding van LOCKSIM (Schohl G.A., 1998) raadt aan om voldoende interne componenten te beschouwen, zodat het Courant-getal gedurende de volledige simulatie in de buurt van of groter is dan 1.0. Hieruit volgt:

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \sqrt{\frac{g A_{ic}}{B}} \geq 1.0 \text{ of } (\Delta x)_{max} \leq \Delta t \sqrt{g \left(\frac{A_{ic}}{B} \right)_{min}}$$

Met:

-	C	Courant-getal	[-]
-	Δt	Tijdstap	[s]
-	Δx	Lengte interne componenten	[m]
-	g	Valversnelling	[m/s ²]
-	A _{ic}	Natte sectie van de interne componenten	[m ²]
-	B	Breedte aan waterlijn van de componenten	[m]

Bij de component met vrij oppervlak waar het schip aanwezig is, i.e. tussen knooppunten N3 en N4 wordt een breedte aan de waterlijn opgegeven dewelke gelijk is aan de breedte van de sluiskolk. Het schip wordt voor deze componenten in rekening gebracht door de breedte en de diepgang van het drijvend object als input voor deze component op te geven.

Tabel 7 geeft voor alle cases het resultaat van de berekening van de maximale lengte van de interne componenten. Uit deze tabel volgt dat de minimale waarde van de maximale lengte van een interne component 1.20 m bedraagt. Voor de eenvoud is bij het uitvoeren van de simulaties voor alle cases een lengte van 1.0 m beschouwd voor de interne componenten van een component met vrij wateroppervlak.

Tabel 7 – Berekening maximale lengte interne componenten

Case	Breedte sluiskolk	Minimale waterdiepte	Tijdstap	Maximale lengte
	[m]	[m]	[s]	[m]
Case01	16.0	3.70	0.2	1.20
Case02	22.0	5.33	0.2	1.45
Case03	22.0	5.33	0.2	1.45
Case04	16.0	3.70	0.2	1.20
Case05	16.0	3.70	0.2	1.20
Case06	22.0	5.33	0.2	1.45
Case07	22.0	5.33	0.2	1.45
Case08	22.0	5.33	0.2	1.45
Case09	57.0	17.53	0.2	2.62
Case10	25.0	5.17	0.2	1.42
Case11	12.5	4.71	0.2	1.36
Case12	16.0	4.71	0.2	1.36
Case13	10.5	4.23	0.2	1.29
Case14	10.5	4.23	0.2	1.29
Case15	10.5	4.23	0.2	1.29
Case16	55.0	14.33	0.2	2.37

In de inputfile van de simulaties worden volgende algemene parameters toegepast:

- Gewichtsfactor θ in het Preissman schema voor het impliciet oplossen van leidingen en kanalen: $wf_time = 0.55$. Dit is de default-waarde vermeld in de handleiding van LOCKSIM.
- Ruwheidslengte voor componenten met vrij wateroppervlak: 0.005 m.

Voor de verschillende types nivelleersystemen is de openingssnelheid en de afvoercoëfficiënt van de opening als volgt opgegeven:

1. Rechthoekige of cirkelvormige openingen afgesloten met hefschuiven:
 - De variatie in de tijd van de hefhoogte van de hefschuif wordt in tabelvorm opgegeven in de input.
 - De variatie van de parameter $\mu A/A_{tot}$ in functie van de relatieve hefhoogte van de hefschuif wordt in tabelvorm in de input opgegeven.
2. Cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen:
 - De variatie in de tijd van de relatieve openingshoek van de vlinderklep wordt in tabelvorm opgegeven in de input.
 - De variatie van de parameter $\mu A/A_{tot}$ in functie van de relatieve openingshoek van de vlinderklep wordt in tabelvorm in de input opgegeven.

Hierbij is μ [-] de afvoercoëfficiënt van de opening, A [m²] de totale oppervlakte van de openingen bij een bepaalde relatieve hefhoogte of relatieve openingshoek en A_{tot} [m²] de totale oppervlakte van de openingen bij volledig geopende hefschuiven of vlinderkleppen.

Als output is voor elk knooppunt van het numeriek model (aangeduid met N1, N2, N3, N4 of N5 in Figuur 2) de waterdiepte en de piëzometrische hoogte opgevraagd. Daarnaast is het debiet door de opening in de deur (voor component N1-N2) opgevraagd en het debiet voor de componenten met vrij wateroppervlak (componenten N2-N3, N3-N4 en N4-N5). Met behulp van de berekende waterpeilen ter plaatse van boeg en hek van het schip wordt de hydrostatische langskracht op het schip als volgt berekend:

$$F_{langs} = W \cdot S = W \left(\frac{H_{boeg} - H_{hek}}{l_s} \right)$$

Met:

- F_{langs}	Langskracht op het schip	[N]
- W	Gewicht van de verplaatste vloeistof van het schip	[N]
- S	(Oscillerende) waterspiegelhelling in de sluiskolk	[-]
- H_{boeg}	Waterstand ter plaatse van de boeg	[mZref]
- H_{hek}	Waterstand ter plaatse van het hek	[mZref]
- l_s	Lengte schip	[m]

Met betrekking tot de input voor de simulaties met LOCKSIM dient nog het volgende opgemerkt te worden:

- De ervaring met het gebruik van LOCKSIM heeft geleerd dat bij simulaties met een schip in de kolk een error gegeneerd kan worden indien het bodempeil van de component met vrij wateroppervlak lager is gelegen dan 0 m en het waterpeil of de piezometrische hoogte boven 0 m gelegen is. Om die reden is voor alle cases, met uitzondering van Case10 en Case11 waarbij het bodempeil 0.90 m TAW bedraagt, de hoogteligging van het model, het opwaarts waterpeil en het initiële waterpeil in de kolk aangepast zodat het bodempeil van elk knooppunt minimaal 1.0 m bedraagt. Voor de grafische voorstellingen in het vervolg van dit rapport zullen de met deze waarden berekende waterpeilen opnieuw omgerekend worden naar de werkelijke waterpeilen en hoogteligging.
- Bij het aanmaken van de inputfiles is vastgesteld dat tabellen in de inputfile maximaal mogen bestaan uit 25 lijnen. Bij het opgeven van de openingssnelheid en de afvoercoëfficiënt van de

openingen zoals hierboven beschreven en bij het invoeren van de variatie in de tijd van de opwaartse waterstand bij Case09 is ervoor gezorgd dat deze tabellen bestaan uit maximaal 25 lijnen.

- Bij Case04, Case05, Case06, Case07 en Case08 is in de inputfile bij de tabel met de afvoercoëfficiënt van de opening de optie interpolation=spline toegepast. Bij deze cases is vastgesteld dat bij toepassen van de standaard lineaire interpolatie een debietskromme bekomen werd met een eerder hoekig verloop. Voor de overige cases is de standaard lineaire interpolatie in de tabellen toegepast. Bij Case10, waarbij een openingswet met stops is toegepast, werd bij toepassen van de spline interpolatie vastgesteld dat de debietskromme een te vloeiend verloop kende. Om die reden is voor deze case de standaard lineaire interpolatie toegepast.

3.4 Delft3D

Delft3D is een programma ontwikkeld door Deltares (vroegere WL Delft | Delft Hydraulics) waarmee multi-dimensionele (2D of 3D) hydrodynamische simulaties kunnen uitgevoerd worden. Voor het simuleren van de stroming in de sluiskolk worden 2DH hydrodynamische simulaties uitgevoerd. Hierbij worden de 2D-ondiepwater vergelijkingen opgelost. Binnen Delft3D is het mogelijk om een schip in de sluiskolk te beschouwen door een extern drukveld op te leggen. De waarde van de druk komt hierbij overeen met de diepgang van het schip. De in deze paragraaf beschreven werkwijze voor het simuleren van de waterbeweging in een sluiskolk met schip en de werkwijze voor de berekening van de langskracht op het schip is identiek als toegepast door WL bij het voorontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluizen op het Panamakanaal (Verelst *et al.*, 2016a).

De simulaties in dit rapport zijn uitgevoerd met DELFT3D-FLOW versie 5.00.00.1287 (Deltares, 2014).

De 16 in dit rapport beschouwde cases betreffen allen het nivelleren van sluizen met een verschillende lengte en breedte. Ook verschilt de verhouding van de breedte van het schip tot de breedte van de sluis van case tot case. Om het genereren van het rekenrooster voor de verschillende cases te vergemakkelijken is ervoor gekozen om voor de meeste cases één en dezelfde celgrootte van het rekenrooster (zowel in de X- als in de Y-richting) te beschouwen. Deze celgrootte is zodanig gekozen dat tussen de kolkwand en het (in dwarszin centraal geplaatste) schip voldoende cellen aanwezig zijn. Bij het voorontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluizen op het Panamakanaal werd hiervoor in Verelst *et al.*, (2016a), rekening houdend met de rekentijd van de simulaties, een minimum aantal van 3 cellen beschouwd. Dit aantal is niet voldoende om het stroompatroon tussen de kolkwand en het schip in detail te simuleren, maar wel voldoende om de komberging van het gedeelte tussen kolkwand en schip en de verhanglijn van de stroming in dit gedeelte in rekening te brengen. Bijgevolg werd voor alle cases, met uitzondering van Case09 en Case16, een celgrootte van 0.25 m toegepast. Omwille van het grote aantal gridcellen, de beduidend langere rekentijd en de grootte van de uitvoerfile is voor Case09 en Case16 een celgrootte van 0.50 m toegepast. Tabel 8 geeft voor elke case een overzicht van de celgrootte van het rekenrooster en van het op deze wijze bekomen aantal gridcellen tussen de kolkwand en het schip en het aantal gridcellen van het rekenrooster in X- en Y-richting. Bij deze tabel wordt het volgende opgemerkt:

- Voor Case11, Case13 en Case14 worden bij toepassen van een celgrootte van 0.25 m slechts 2 cellen tussen de kolkwand en het schip bekomen. Voor deze cases wordt in paragraaf 6.2, als gevoeligheidsanalyse, ook een simulatie uitgevoerd met een fijner grid.
- Bij Case12 is de afstand tussen de boeg van het schip en de sluisdeur gelijk aan 5.1 m. Bij toepassen van cellen met een celgrootte van 0.25 m is de boeg van het schip in de simulatie met Delft3D eigenlijk op 5.0 m van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur gelegen. Dit verschil van 0.1 m met de werkelijke afstand tussen boeg van het schip en sluisdeur heeft een eerder beperkte invloed op de berekende langskrachten op het schip.

Met deze celgrootte wordt voor de meeste cases een grootte van de file met uitvoer in alle roosterpunten bekomen tussen 500 Mb en 800 Mb. Enkel voor Case13, Case14 en Case15 wordt een bestandsgrootte tussen 100 Mb en 200 Mb bekomen, voor Case09 een bestandsgrootte van 3.5 Gb en voor Case16 een bestandsgrootte van 2.0 Gb.

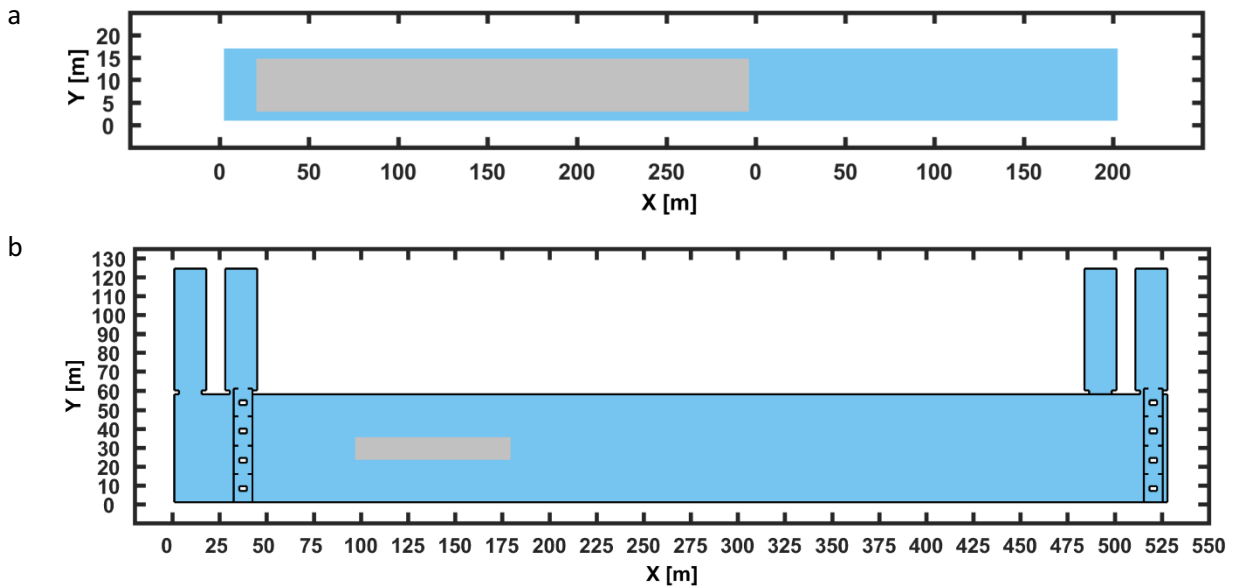
Tabel 8 – Bepaling celgrootte voor de verschillende cases

Case	Lengte sluis	Breedte sluis	Breedte schip	Afstand schip - kolkwand	Cel- grootte	# gridcellen tussen kolkwand en schip	# gridcellen rekenrooster
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	
Case01	200.0	16.0	11.40	2.30	0.25	9	801 x 65
Case02	182.5	22.0	16.84	2.58	0.25	10	731 x 89
Case03	182.5	22.0	16.84	2.58	0.25	10	731 x 89
Case04	200.0	16.0	11.40	2.30	0.25	9	801 x 65
Case05	200.0	16.0	11.40	2.30	0.25	9	801 x 65
Case06	182.5	22.0	16.84	2.58	0.25	10	731 x 89
Case07	182.5	22.0	16.84	2.58	0.25	10	731 x 89
Case08	182.5	22.0	16.84	2.58	0.25	10	731 x 89
Case09	473.0	57.0	11.50	22.75	0.50	45	1069 x 248*
Case10	256.6	25.0	9.57	7.72	0.25	31	1027 x 101
Case11	258.1	12.5	11.4	0.55	0.25	2	1033 x 51
Case12	259.0	16.0	11.4	2.30	0.25	9	1037 x 65
Case13	130.0	10.5	9.5	0.50	0.25	2	521 x 43
Case14	130.0	10.5	9.5	0.50	0.25	2	521 x 43
Case15	130.0	10.5	3.5	3.50	0.25	14	521 x 43
Case16	427.0	55.0	40.0	7.50	0.50	15	855 x 111

* Het rekenrooster bevat ook de deurkamers van benedenhoofd en bovenhoofd

Zoals hoger reeds vermeld, is het in Delft3D mogelijk om de aanwezigheid van een schip te simuleren met behulp van een artificieel drukveld. Hierbij wordt de luchtdruk zo gekozen dat de dimensies van de kuil in het wateroppervlak overeenkomen met de waterverplaatsing van het schip. Figuur 3 geeft, als voorbeeld, voor Case01 en Case09 een voorstelling van het rekenrooster en de ligging van het schip. Aangezien in de ééndimensionale formulering van de waterbeweging in de kolk toegepast in VUL_SLUIS en in LOCKFILL er geen rekening kan worden gehouden met de exacte positie van het schip in dwarszin (enkel met de door het schip veroorzaakte blockage), wordt voor de eenvoud het schip in dwarszin in het midden van de sluis kolk verondersteld en wordt bijgevolg het artificieel drukveld ook in het midden tussen de beide sluis kolk muren beschouwd.

Figuur 3 – Ligging schip

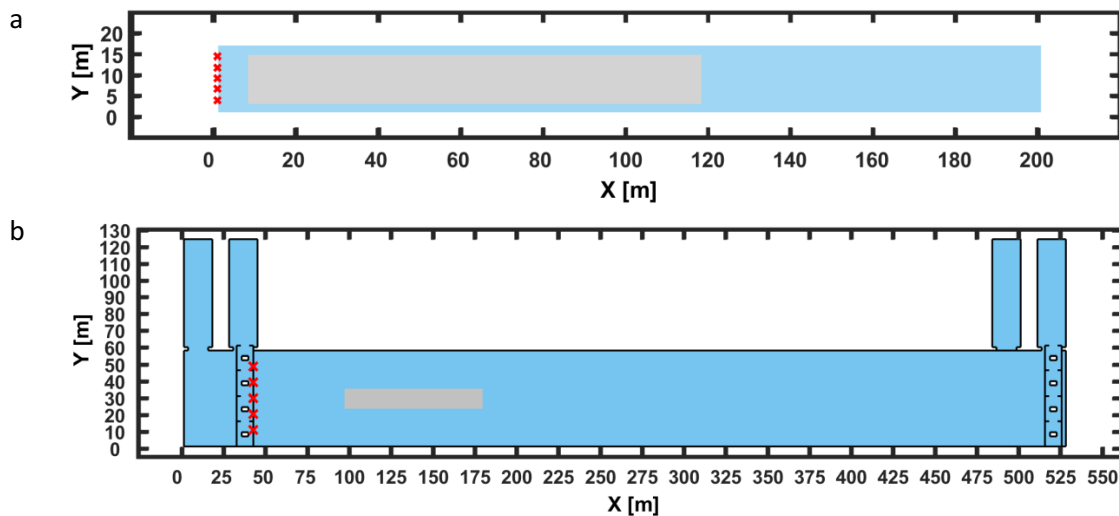


a: Case01; b: Case09

In het rekenrooster van Case09 zijn ook de deurkamers en de roldeur aanwezig. De roldeur is opgebouwd uit “thindams” (i.e. niet-permeabele wanden van rekencellen) en “drypoints” (i.e. droogstaande rekencellen). Het aantal drypoints en het aantal verdelingen van de roldeur is arbitrair bepaald en berust niet op een ontwerp van de bestaande roldeuren van de Vandammesluis. Tijdens de terreinmetingen, die in de Vandammesluis zijn uitgevoerd, was wegens onderhoud van de roldeur één deurkamer buiten gebruik. Om die reden is in Figuur 3 één deurkamer volledig afgesloten.

Het debiet door de openingen in de sluisdeur wordt in Delft3D ingegeven aan de hand van zogenaamde “discharges” of debietspunten. Voor elke case bevinden de debietspunten zich ter plaatse van de opwaartse voor nivelleren gebruikte sluisdeur. De debietspunten worden gelijkmatig verdeeld over de breedte van de sluiscolk. Als voorbeeld is in Figuur 4 voor Case01 en Case09 de positie van de debietspunten weergegeven (aan de hand van rode kruisjes).

Figuur 4 – Positie debietspunten



a: Case01; b: Case09

Het debiet door de openingen in de sluisdeur wordt niet door Delft3D zelf berekend. Initieel werd hiervoor het totale debiet van de overeenkomstige simulatie met VUL_SLUIS beschouwd. In VUL_SLUIS wordt het debiet door de openingen in de sluiskolk berekend aan de hand van de gemiddelde waterstand in de kolk. In LOCKSIM echter wordt het debiet door de openingen in de sluiskolk berekend aan de hand van de waterstand juist afwaarts van de opwaartse sluisdeur. Omwille van deze verschillende berekening van het debiet door de openingen in de sluisdeur zijn alle simulaties daarna ook uitgevoerd met het totale debiet van de simulaties met LOCKSIM als input. Om het debiet voor elk individueel debietspunt te bekomen is het totale debiet uit VUL_SLUIS en LOCKSIM gedeeld door het aantal debietspunten. Aangezien de tijdstap van de tijdsreeks voor deze debietspunten in Delft3D een veelvoud dient te zijn van de tijdstap van de simulatie ($0.001 \text{ min} = 0.06 \text{ s}$; zie lager), en aangezien de tijdstap van een simulatie in Delft3D uitgedrukt wordt in minuten, is een selectie van deze debietsreeksen uitgevoerd met een tijdstap van 1.2 s. Het debietspunt in Delft3D is van het type “momentum discharge”. Hierbij dient per tijdstap ook de stroomsnelheid en de stroomrichting opgegeven te worden. Voor het berekenen van de stroomsnelheid van een individueel debietspunt wordt het ogenblikkelijke debiet gedeeld door de oppervlakte na breekbalken (uit de invoerfile van de overeenkomstige simulaties met VUL_SLUIS). Voor de stroomrichting wordt 90° toegepast (in de langsas van de sluiskolk).

Voor het definiëren van de uitvoer is voor elke case een aantal uitvoerpunten en raaien gedefinieerd. Om de opmaak van het numeriek model te vereenvoudigen zijn voor elke case telkens volgende uitvoerpunten (gelegen ter plaatse van de aslijn van de sluiskolk) en raaien gedefinieerd (zie Figuur 5 voor Case09 als voorbeeld):

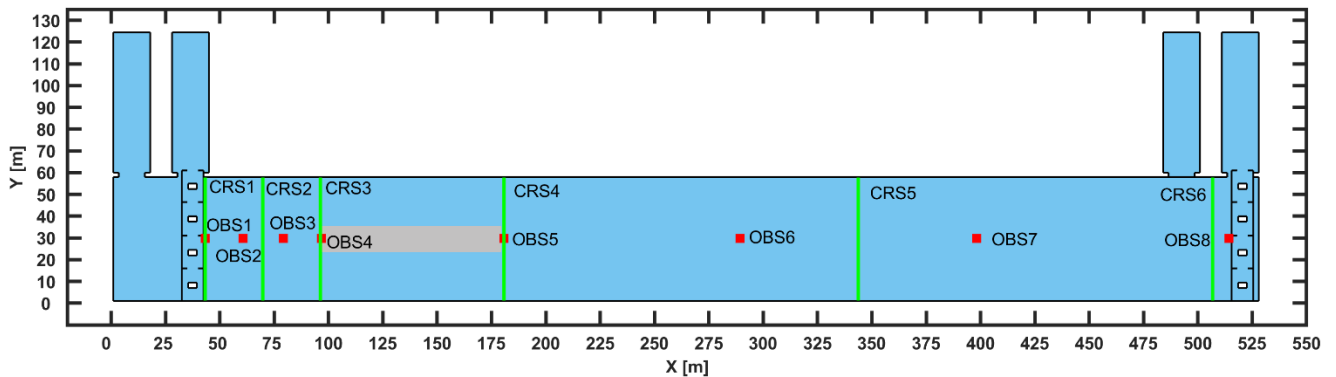
1. Uitvoerpunten:

- OBS1: uitvoerpunt 1 gridcel afwaarts van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur.
- OBS2: uitvoerpunt gelegen op 1/3 van de afstand tussen de opwaartse sluisdeur en de boeg van het schip.
- OBS3: uitvoerpunt gelegen op 2/3 van de afstand tussen de opwaartse sluisdeur en de boeg van het schip.
- OBS4: uitvoerpunt gelegen 1 gridcel opwaarts van de boeg van het schip.
- OBS5: uitvoerpunt gelegen 1 gridcel afwaarts van het hek van het schip.
- OBS6: uitvoerpunt gelegen op 1/3 van de afstand tussen hek van het schip en de afwaartse sluisdeur.
- OBS7: uitvoerpunt gelegen op 2/3 van de afstand tussen hek van het schip en de afwaartse sluisdeur.
- OBS8: uitvoerpunt gelegen 1 gridcel opwaarts van de afwaartse sluisdeur

2. Raaien:

- CRS1: Raai gelegen 1 gridcel afwaarts van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur.
- CRS2: Raai gelegen midden tussen de opwaartse sluisdeur en de boeg van het schip.
- CRS3: raai gelegen 1 gridcel opwaarts van de boeg van het schip.
- CRS4: raai gelegen 1 gridcel afwaarts van het hek van het schip .
- CRS5: Raai gelegen midden tussen het hek van het schip en de afwaartse sluisdeur.
- CRS6: Raai gelegen 1 gridcel opwaarts van de afwaartse sluisdeur (met uitzondering voor Case09, zie Figuur 5, waar deze raai enkele gridcellen voor de afwaartse roldeur gelegen is).

Figuur 5 – Locatie uitvoerpunten en raaien voor Case09



Rode rechthoeken: uitvoerpunten; Groene lijnen: raaien

Voor al deze uitvoerpunten en raaien wordt elke 0.005 minuten (= 0.3 s) de waterstand en de stroomsnelheid (voor de uitvoerpunten) en de debieten (voor de raaien) naar het uitvoerbestand weggeschreven. Daarnaast wordt voor elk roosterpunt van het rekenrooster elke 0.05 minuten (= 3 s) de waterstand, waterdiepte, stroomsnelheid in x- en y-richting naar de uitvoerfile weggeschreven.

De tijdstap voor de simulaties wordt bepaald aan de hand van het Courant criterium:

$$CFL = 2 \Delta t \sqrt{gh} \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}} < 1$$

Met:

- CFL	Courant-getal voor golfvoortplanting	[-]
- Δt	Tijdstap	[s]
- g	Valversnelling	[m/s ²]
- h	Waterdiepte	[m]
- $\Delta x, \Delta y$	Celgrootte in X- en Y-richting	[m]

Hierbij wordt opgemerkt dat de manual van Delft3D een Courant-getal lager dan $4\sqrt{2}$ aanbeveelt voor toepassingen in rivieren. Tijdens het voorontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluisen op het Panamakanaal (Verelst *et al.*, 2016a) is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de tijdstap van de simulatie. Uit deze gevoeligheidsanalyse is gebleken dat het toepassen van een tijdstap die overeenkomt met een Courant-criterium gelijk aan $4\sqrt{2}$ aanleiding geeft tot beduidend grotere berekende langskrachten en dwarskrachten op het schip dan een tijdstap die overeenkomt met een lagere waarde van het Courant-criterium. Om die reden is voor deze studie een waarde van het Courant-criterium gelijk aan 1.0 toegepast.

Voor elke case geeft Tabel 8 de op deze wijze berekende tijdstap van de simulatie, zowel voor de minimale waterstand in de sluiskolk als voor de maximale waterstand in de sluiskolk. Uit deze tabel volgt een minimale waarde van de tijdstap gelijk aan 0.00014 min. Op basis hiervan is voor het uitvoeren van de simulaties voor alle cases een tijdstap gelijk aan 0.0001 min (= 0.006 s) beschouwd.

Tabel 9 – Bepaling tijdstap voor verschillende cases

Case	Cel-grootte	Bodem-peil	Minimaal waterpeil			Maximaal waterpeil		
			Waterpeil	Waterdiepte	Tijdstap	Waterpeil	Waterdiepte	Tijdstap
	[m]	[mZref]	[mZref]	[m]	[min]	[mZref]	[m]	[min]
Case01	0.25	-5.70	-2.00	3.70	0.00024	1.00	6.70	0.00018
Case02	0.25	-6.33	-1.00	5.33	0.00020	4.40	10.73	0.00014
Case03	0.25	-5.70	-1.00	5.33	0.00020	4.40	10.73	0.00014
Case04	0.25	-5.70	-2.00	3.70	0.00024	1.00	6.70	0.00018
Case05	0.25	-6.33	-2.00	3.70	0.00024	1.00	6.70	0.00018
Case06	0.25	-6.33	-1.00	5.33	0.00020	4.40	10.73	0.00014
Case07	0.25	-6.33	-1.00	5.33	0.00020	4.40	10.73	0.00014
Case08	0.25	-15.90	-1.00	5.33	0.00020	4.40	10.73	0.00014
Case09	0.25	-0.55	2.34	18.24	0.00022	3.60	19.50	0.00021
Case10	0.25	0.90	4.62	5.17	0.00021	5.73	6.28	0.00019
Case11	0.25	0.90	5.61	4.71	0.00022	8.00	7.10	0.00018
Case12	0.25	-0.78	5.61	4.71	0.00022	8.00	7.10	0.00018
Case13	0.25	-0.78	3.45	4.23	0.00023	5.83	6.61	0.00018
Case14	0.25	-0.78	3.45	4.23	0.00023	5.83	6.61	0.00018
Case15	0.25	-0.78	3.45	4.23	0.00023	5.83	6.61	0.00018
Case16	0.25	-17.00	-2.69	14.31	0.00025	2.13	19.13	0.00022

Daarnaast dient in een Delft3D-simulatie ook een waarde voor de horizontale eddy viscositeit opgegeven te worden. Om deze waarde te bepalen wordt gebruikelijk volgende vuistregel toegepast:

$$\nu_{hor} = 0.1 U \Delta x$$

Met:

- ν_{hor} Horizontale eddy viscositeit [m²/s]
- U Stroomsnelheid [m/s]
- Δx Celgrootte van het rekenrooster in de x-richting [m]

Om een inschatting te maken van de waarde van de horizontale eddy viscositeit dient de stroomsnelheid gekend te zijn. Voor de inschatting wordt de stroomsnelheid voor elke beschouwde case berekend op de volgende 3 wijzen:

1. Het maximale debiet door de openingen (uit de simulatie met VUL_SLUIS) gedeeld door de natte sectie van de sluiskolk bij het minimale waterpeil in de sluiskolk.
2. Het maximale debiet door de openingen (uit de simulatie met VUL_SLUIS) gedeeld door de natte sectie van de sluiskolk bij het maximale waterpeil in de sluiskolk.
3. De maximale waarde van de ogenblikkelijke stroomsnelheid in de sluiskolk juist afwaarts van de opwaartse sluisdeur uit de simulatie met VUL_SLUIS voor de betreffende case. De ogenblikkelijke stroomsnelheid in de sluiskolk juist afwaarts van de opwaartse sluisdeur wordt hierbij berekend als het debiet door de openingen gedeeld door de natte sectie in de sluiskolk.

Tabel 10 geeft de resultaten van de berekende waarde van de horizontale eddy viscositeit, gebruik makend van de stroomsnelheid die op deze 3 wijzen berekend is.

Tabel 10 – Inschatting horizontale eddy viscositeit

Case	Δx	b_k	z_k	$Q_{\max}$	Minimaal waterpeil			Maximaal waterpeil			Simulatie VUL_SLUIS	
					$H_{\min}$	U	v_{hor}	$H_{\max}$	U	v_{hor}	U	v_{hor}
Case01	0.25	16.0	-5.70	27.4	-2.00	0.46	0.0116	1.00	0.26	0.0064	0.34	0.0084
Case02	0.25	22.0	-6.33	63.5	-1.00	0.54	0.0135	4.40	0.27	0.0067	0.37	0.0093
Case03	0.25	22.0	-5.70	73.1	-1.00	0.62	0.0156	4.40	0.31	0.0077	0.36	0.0090
Case04	0.25	16.0	-5.70	35.0	-2.00	0.59	0.0148	1.00	0.33	0.0082	0.42	0.0104
Case05	0.25	16.0	-6.33	35.0	-2.00	0.59	0.0148	1.00	0.33	0.0082	0.45	0.0111
Case06	0.25	22.0	-6.33	61.5	-1.00	0.52	0.0131	4.40	0.26	0.0065	0.37	0.0093
Case07	0.25	22.0	-6.33	53.0	-1.00	0.45	0.0113	4.40	0.22	0.0056	0.33	0.0082
Case08	0.25	22.0	-15.90	77.4	-1.00	0.66	0.0165	4.40	0.33	0.0082	0.36	0.0091
Case09	0.50	57.0	-0.55	42.5	2.34	0.04	0.0020	3.60	0.04	0.0019	0.04	0.0021
Case10	0.25	25.0	0.90	31.4	4.62	0.24	0.0061	5.73	0.20	0.0051	0.22	0.0055
Case11	0.25	12.5	0.90	18.0	5.61	0.31	0.0076	8.00	0.20	0.0051	0.25	0.0062
Case12	0.25	16.0	-0.78	25.0	5.61	0.33	0.0083	8.00	0.22	0.0055	0.27	0.0068
Case13	0.25	10.5	-0.78	10.0	3.45	0.23	0.0056	5.83	0.14	0.0036	0.18	0.0044
Case14	0.25	10.5	-0.78	21.5	3.45	0.48	0.0121	5.83	0.31	0.0077	0.34	0.0084
Case15	0.25	10.5	-0.78	10.0	3.45	0.23	0.0056	5.83	0.14	0.0036	0.18	0.0044
Case16	0.50	55.0	-17.00	183.0	-2.69	0.23	0.0116	2.13	0.17	0.0087	0.20	0.0101

 Δx : Celgrootte rekenrooster [m] b_k : Breedte sluiskolk [m] z_k : Bodempeil sluiskolk [mZref] $Q_{\max}$: Maximaal debiet [m³/s] $H_{\min}$: Minimaal waterpeil [mZref] U : Stroomsnelheid [m/s] v_{hor} : Horizontale eddy viscositeit [m²/s]

Uit Tabel 10 volgt dat de laagste waarde voor de horizontale eddy viscositeit wordt berekend voor Case09 ($v_{\text{hor}} = 0.0020 \text{ m}^2/\text{s}$). Voor de overige cases varieert de horizontale eddy viscositeit tussen $0.0036 \text{ m}^2/\text{s}$ en $0.0156 \text{ m}^2/\text{s}$. Uit deze inschatting volgt een minimale waarde voor de horizontale eddy viscositeit gelijk aan $0.0020 \text{ m}^2/\text{s}$. Indien deze waarde in de inputfile van de simulaties wordt toegepast, vertoont de variatie in de tijd van de berekende langskracht op het schip voor bepaalde cases echter grote fluctuaties van de langskracht naar het einde van de nivellering toe. Om die reden is voor het uitvoeren van de simulaties voor de 16 beschouwde cases een horizontale eddy viscositeit gelijk aan $0.0500 \text{ m}^2/\text{s}$ toegepast. Dit is dezelfde waarde als toegepast in Verelst *et al.* (2016a). In paragraaf 6.2 worden, als gevoeligheidsanalyse, voor een aantal cases de berekende langskrachten voor simulaties met deze waarde voor de horizontale eddy viscositeit vergeleken met deze berekend met de lagere waarde van $0.002 \text{ m}^2/\text{s}$.

Wat de ruwheid van de kolkvloer betreft, wordt een White-Colebrook formulering met een ruwheidslengte gelijk aan 0.005 m (zowel in de X- als in de Y-richting) toegepast. Merk op dat in de Delft3D simulaties (in tegenstelling tot de LOCKSIM simulaties) geen wrijving aan de verticale kolkwanden ("free slip") en aan de scheepsrump (i.e. de door het drukveld veroorzaakte "kuil" in het wateroppervlak) wordt meegenomen.

Voor elke case is de simulatie uitgevoerd op één processor van de Reynolds queue van het Linux-cluster van WL. Deze queue bevat 12 nodes met 16 processoren type 2x Intel Xeon E5-2640 v3 @2.60 Ghz 8 core. Tabel 11 geeft de rekentijd voor de simulaties met de verschillende cases.

Tabel 11 – Rekentijd simulaties

Case	Rekentijd [hh:mm:ss]	Case	Rekentijd [hh:mm:ss]
Case01	03:12:59.57	Case09	33:28:41.42
Case02	03:59:19.72	Case10	05:08:04.43
Case03	04:17:08.73	Case11	04:48:51.53
Case04	03:15:09.46	Case12	06:06:10.64
Case05	03:12:09.06	Case13	01:43:51.14
Case06	04:09:00.46	Case14	00:42:03.30
Case07	06:04:16.70	Case15	01:03:58.70
Case08	05:35:23.07	Case16	11:53:11.60

Analoog als in Verelst *et al.* (2016a) wordt voor elke simulatie de longitudinale component van de hydrostatische kracht op het schip berekend als:

$$F_{langs} = W \cdot S = W \left(\frac{H_{boeg} - H_{hek}}{l_s} \right)$$

Met:

- F_{langs}	Langskraft op het schip	[N]
- W	Gewicht van de verplaatste vloeistof van het schip	[N]
- S	(Oscillerende) waterspiegelhelling in de sluiskolk	[-]
- H_{boeg}	Waterstand ter plaatse van de boeg	[mZref]
- H_{hek}	Waterstand ter plaatse van het hek	[mZref]
- l_s	Lengte schip	[m]

Hierbij wordt opgemerkt dat S in feite de helling van het schip op het betreffende tijdstip voorstelt. Echter, bij een voorontwerp van het nivelleersysteem wordt de helling van het schip benaderd door het instantaan waterstandsverschil tussen boeg en hek van het schip.

Als uitvoer van de Delft3D-simulatie (zie boven) wordt onder meer de waterstand in elke roosterpunt weggeschreven. Aan de hand van de waterstandstijdsreeksen voor alle roosterpunten juist voor de boeg en de waterstandstijdsreeksen voor alle roosterpunten juist na het hek wordt gebruik makend van de hierboven vermelde formulering de longitudinale component van de hydrostatische kracht op het schip berekend.

4 Vergelijking debiet door nivelleeropeningen, waterstand in sluiskolk en nivelleertijd

4.1 Vergelijking debiet door nivelleeropeningen en waterstand in sluiskolk

Dit hoofdstuk vergelijkt voor alle 16 beschouwde cases de variatie in de tijd van het debiet door de nivelleeropeningen, de waterstand in de sluiskolk en de waarde van de parameter μA voor de simulaties uitgevoerd met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D. In Figuur 6 tot en met Figuur 9 zijn deze parameters grafisch voorgesteld. De waarde van de parameter μA is hierbij voor elk softwareprogramma als volgt berekend:

$$\mu A = \frac{Q}{\sqrt{2g (H_{opw} - H_{kolk})}}$$

Met:

- μA	Effectieve doorsnede nivelleeropeningen	[m ²]
- Q	Debiet door de nivelleeropeningen	[m ³ /s]
- g	Valversnelling	[m/s ²]
- H_{opw}	Waterstand opwaarts kanaalpand	[mZref]
- H_{kolk}	Waterstand in de sluiskolk	[mZref]

Hierbij wordt opgemerkt dat uit paragraaf 3.4 volgt dat bij de simulaties met Delft3D de waterstand in het opwaarts kanaalpand geen input is. Het invoerbestand voor de debietspunten bevat de debieten door de openingen in de sluisdeur berekend met VUL_SLUIS of berekend met LOCKSIM. Om voor de simulaties met Delft3D de waarde van de parameter μA te berekenen zou bijgevolg de opwaartse waterstand uit de simulaties met VUL_SLUIS, respectievelijk LOCKSIM moeten beschouwd worden. Dit is niet uitgevoerd en om die reden is in de grafische voorstellingen de waarde van de parameter μA voor de simulaties met Delft3D ook niet grafisch voorgesteld. Voor de simulaties met Delft3D is telkens het debiet beschouwd in de raai die 1 roostercel afwaarts van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur gelegen is.

Daarnaast wordt ook opgemerkt dat voor de simulaties met LOCKSIM de eindtijd opgegeven wordt in de inputfile. Bij VUL_SLUIS en LOCKFILL wordt een tijdsduur van de simulatie opgegeven, maar de simulatie wordt automatisch gestopt indien het waterpeil in de sluiskolk gelijk is aan het opwaarts waterpeil. In LOCKSIM is zulk stopcriterium niet aanwezig, waardoor in de inputfile door de gebruiker gebruikelijk een tijdsduur van de simulatie wordt beschouwd die groter is dan de nivelleertijd. De berekening van de waterstand in de sluiskolk en het debiet door de nivelleeropeningen loopt dan ook door tot het opgegeven eindtijdstip. Bij het genereren van de grafische voorstellingen is de waarde van de voorgestelde parameter uit de simulatie met LOCKSIM beperkt tot het einde van de nivellering, wat bepaald is als het eerste tijdstip waarbij de waterstand in de sluiskolk gelijk is aan de opwaartse waterstand.

Voor alle cases zijn de tijdsreeksen met de variatie in de tijd van debiet en waterstand berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D ook numeriek vergeleken. Hiervoor zijn volgende statistische parameters gehanteerd:

1. Bias : $bias = \bar{y} - \bar{x}$ met $\bar{x} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \right)$ en $\bar{y} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{N} \right)$
2. Root mean square error $rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}}$
3. Standaard deviatie $std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i - bias)^2}{N-1}}$
4. Goodness-of-fit $gof = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$

Hierin zijn x_i en y_i de waarden van de beide vergeleken tijdsreeksen en $\bar{x}$ en $\bar{y}$ de gemiddelde waarden van de beide tijdsreeksen. Aangezien de tijdstappen van de output van de verschillende uitgevoerde simulaties niet dezelfde zijn, wordt de output y_i van de tijdsreeks geïnterpoleerd op de tijdstap van de tijdsreeks x_i waarmee vergeleken wordt.

Voor de vergelijking van de tijdreeksen van het debiet door de nivelleeropeningen en de waterstand in de sluiskolk berekend met VUL_SLUIS met deze berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D zijn deze statistische parameters berekend voor alle beschouwde cases. Voor de vergelijking van de tijdsreeksen van waterstand in de sluiskolk zijn de waarden van bias, root-mean-square error en standaarddeviatie relatief weergegeven in procent ten opzichte van het initieel verval. Voor de vergelijking van de tijdsreeksen van het debiet door de openingen in de sluisdeur zijn deze statistische parameters relatief in procent weergegeven ten opzichte van het maximaal debiet door de openingen in de sluisdeur. De waarden van deze statistische parameters zijn gegeven in Tabel 12 en Tabel 13.

Tabel 12 – Statistische parameters (eenheid: %) voor vergelijking debiet door openingen berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D

	VUL_SLUIS - LOCKFILL				VUL_SLUIS - LOCKSIM				VUL_SLUIS - Delft3D (Q _{VUL_SLUIS})				VUL_SLUIS - Delft3D (Q _{LOCKSIM})			
	Bias	RMSE	STD	GOF	Bias	RMSE	STD	GOF	Bias	RMSE	STD	GOF	Bias	RMSE	STD	GOF
Case01	0	0	0	100	0.3	0.5	0.4	100	-0.1	0.1	0	100	0.2	0.5	0.4	98.4
Case02	0	0	0	100	0.2	0.3	0.3	100	0.1	0.2	0.2	100	0.1	0.3	0.2	100
Case03	0	0	0	100	-0.1	0.4	0.4	100	0.1	0.1	0	100	-0.1	0.4	0.4	100
Case04	0	0.5	0.5	100	0.3	0.6	0.5	100	-0.1	0.1	0	100	0.2	0.5	0.4	100
Case05	0	0.5	0.5	100	-0.6	2.1	2	99.9	0.1	0.1	0	100	-0.5	2.1	2	99.9
Case06	0	0.6	0.6	100	0.2	0.4	0.4	100	-0.1	0.1	0	100	0.1	0.4	0.4	100
Case07	0	0.4	0.4	100	0.1	0.3	0.3	100	-0.1	0.1	0	100	0	0.2	0.2	100
Case08	0	0.2	0.2	100	-0.1	0.3	0.3	100	0.1	0.1	0	100	-0.1	0.4	0.4	100
Case09	0.3	1.5	1.5	99.8	-0.1	2.1	2.1	99.7	-0.1	0.2	0.2	100	-0.2	2.1	2.1	99.7
Case10	0	0.1	0.1	100	0.4	1.7	1.6	99.8	0	0.1	0.1	100	0.3	1.6	1.6	99.8
Case11	0	0	0	100	0.5	1.1	1	100	-0.1	0.1	0	100	0.4	1.1	1	100
Case12	0	0	0	100	0.5	1.9	1.8	99.8	-0.1	0.1	0.1	100	0.5	1.8	1.8	99.8
Case13	0	0	0	100	0.3	0.9	0.8	100	-0.1	0.1	0.1	100	0.1	0.8	0.8	100
Case14	0	0	0	100	-0.5	1.5	1.4	99.9	0.1	0.1	0.1	100	-0.4	1.5	1.5	99.9
Case15	0	0	0	100	0.2	0.7	0.7	100	-0.1	0.1	0.1	100	0	0.7	0.7	100
Case16	0	0.5	0.5	100	-0.5	0.7	0.4	100	-0.1	0.1	0	100	-0.6	0.8	0.4	100

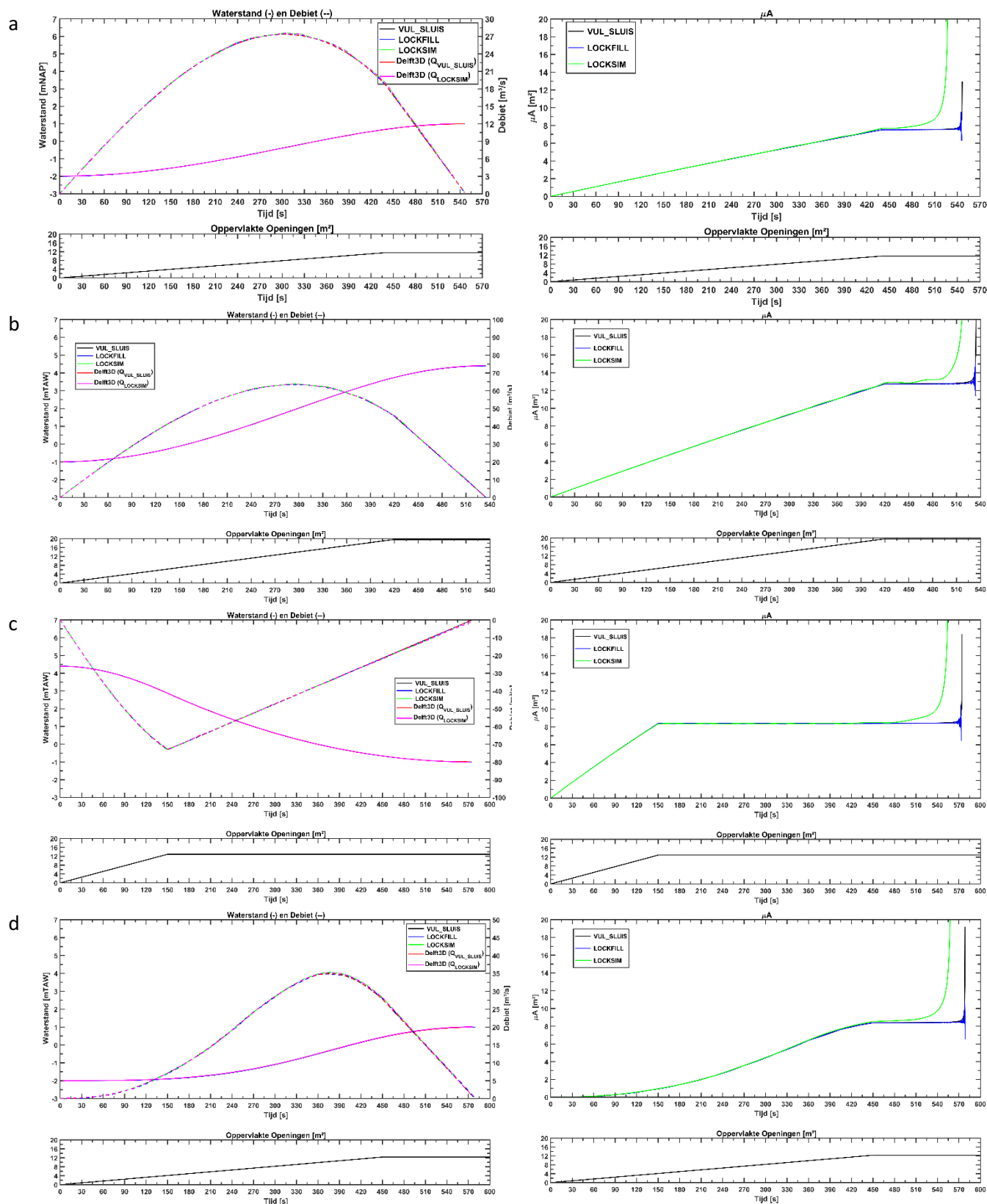
Bias, root-mean-square error (RMSE) en standaarddeviatie (STD) zijn relatief weergegeven ten opzichte van het maximale debiet door de nivelleeropeningen.

Tabel 13 – Statistische parameters (eenheid: %) voor vergelijking waterstand in sluiskolk berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D.

	VUL_SLUIS - LOCKFILL				VUL_SLUIS - LOCKSIM				VUL_SLUIS - Delft3D (Q _{VUL_SLUIS})				VUL_SLUIS - Delft3D (Q _{LOCKSIM})			
	Bias	RMSE	STD	GOF	Bias	RMSE	STD	GOF	Bias	RMSE	STD	GOF	Bias	RMSE	STD	GOF
Case01	0	0	0	100	0.1	0.2	0.2	100	-0.1	0.2	0.2	100	0	0.2	0.2	100
Case02	0	0	0	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100
Case03	0	0	0	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100
Case04	-0.2	0.3	0.1	100	0.1	0.2	0.2	100	0	0.2	0.2	100	0.2	0.2	0.1	100
Case05	0.2	0.3	0.1	100	0	0.2	0.2	100	-0.1	0.2	0.2	100	0	0.2	0.2	100
Case06	-0.2	0.3	0.1	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100
Case07	-0.2	0.2	0.1	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100
Case08	0.1	0.1	0	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100	0	0.1	0.1	100
Case09	0	0.1	0.1	100	0	0.6	0.6	100	0.1	0.5	0.5	100	0.1	0.5	0.5	100
Case10	0	0	0	100	0.1	0.7	0.7	100	0	1.1	1.1	100	0.1	0.7	0.7	100
Case11	0	0	0	100	0.1	0.3	0.3	100	0.1	0.3	0.3	100	0.2	0.3	0.2	100
Case12	0	0	0	100	-0.2	0.4	0.4	100	0.1	0.4	0.4	100	-0.1	0.4	0.4	100
Case13	0	0	0	100	-0.1	0.2	0.2	100	0	0.1	0.1	100	-0.1	0.2	0.1	100
Case14	0	0	0	100	0.1	0.3	0.3	100	0	0.3	0.3	100	0.1	0.4	0.3	100
Case15	0	0	0	100	-0.2	0.2	0.1	100	0	0.1	0.1	100	-0.2	0.2	0.1	100
Case16	-0.1	0.2	0.1	100	-0.4	0.6	0.4	100	0	0.1	0.1	100	-0.4	0.6	0.4	100

Bias, root-mean-square error (RMSE) en standaarddeviatie (STD) zijn relatief weergegeven ten opzichte van het initiële verval van de simulatie.

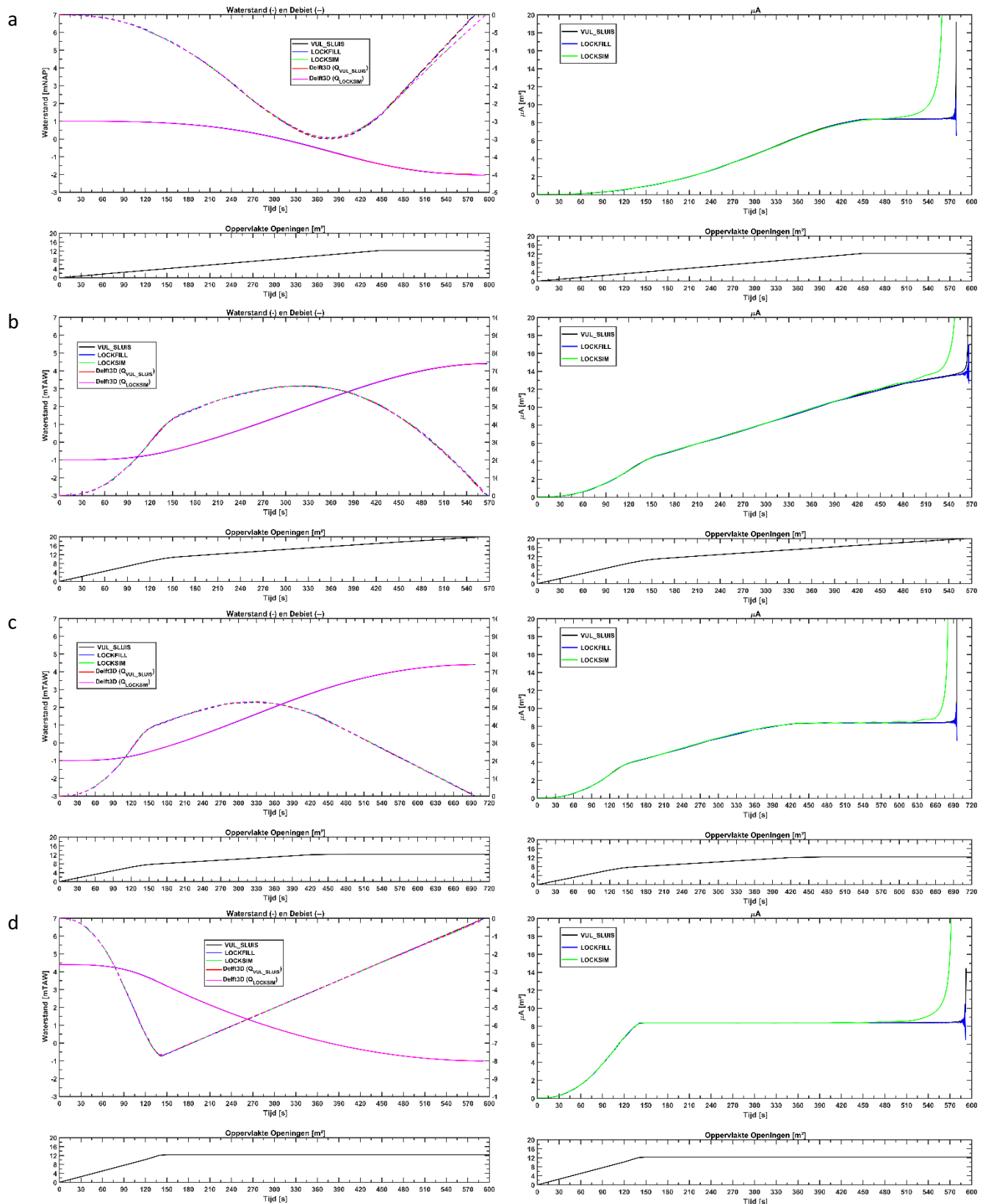
Figuur 6 – Vergelijking van de variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de nivelleeropeningen en parameter μA berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case03 en Case04.



a: Case01; b: Case02; c: Case03; d: Case04;

Links: Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk en debiet door nivelleeropeningen; rechts: Variatie in de tijd van parameter μA .

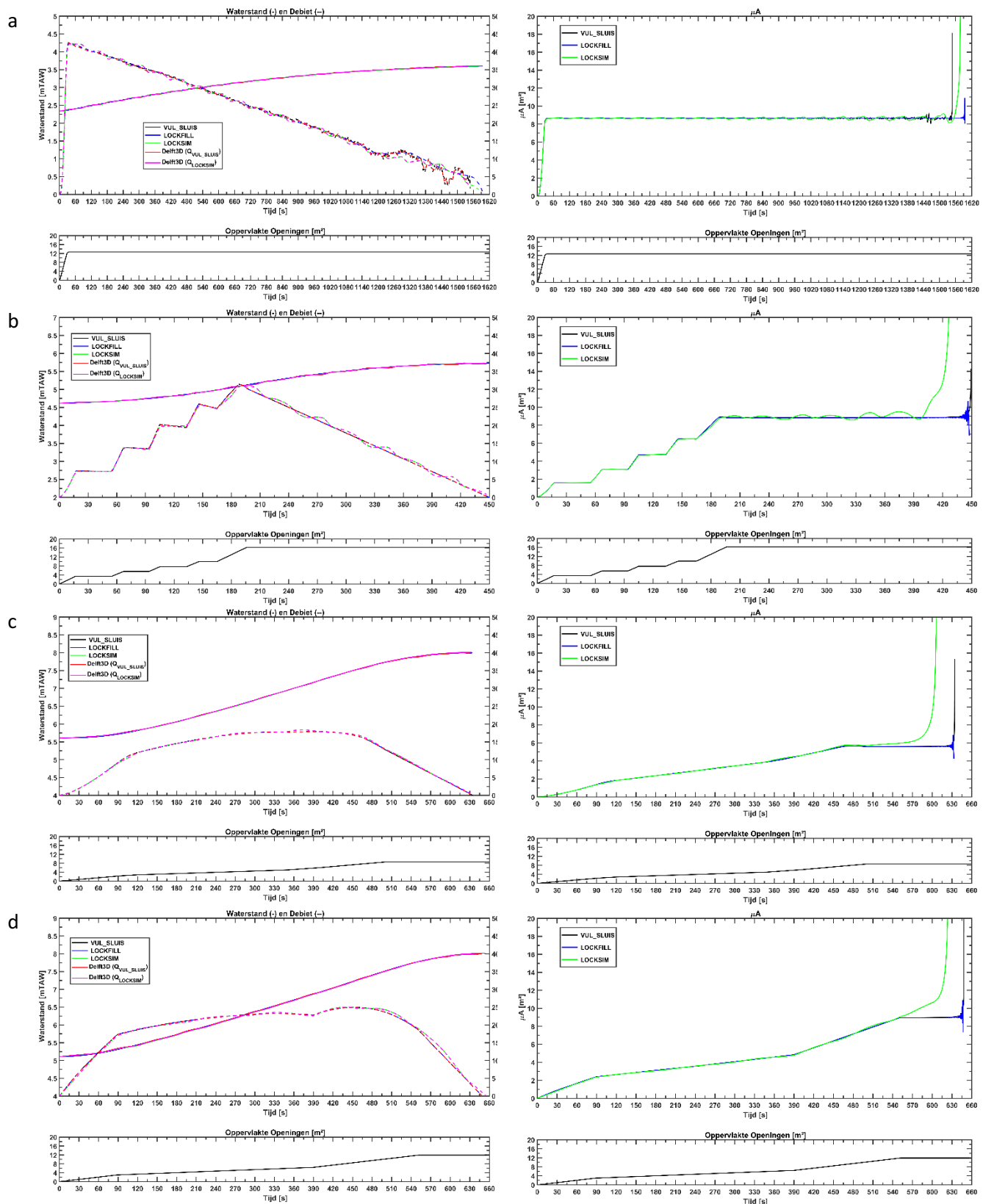
Figuur 7 – Vergelijking van de variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en parameter μA berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case05, Case06, Case07 en Case08.



a: Case05; b: Case06; c: Case07; d: Case08;

Links: Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk en debiet door nivelleeropeningen; rechts: Variatie in de tijd van parameter μA .

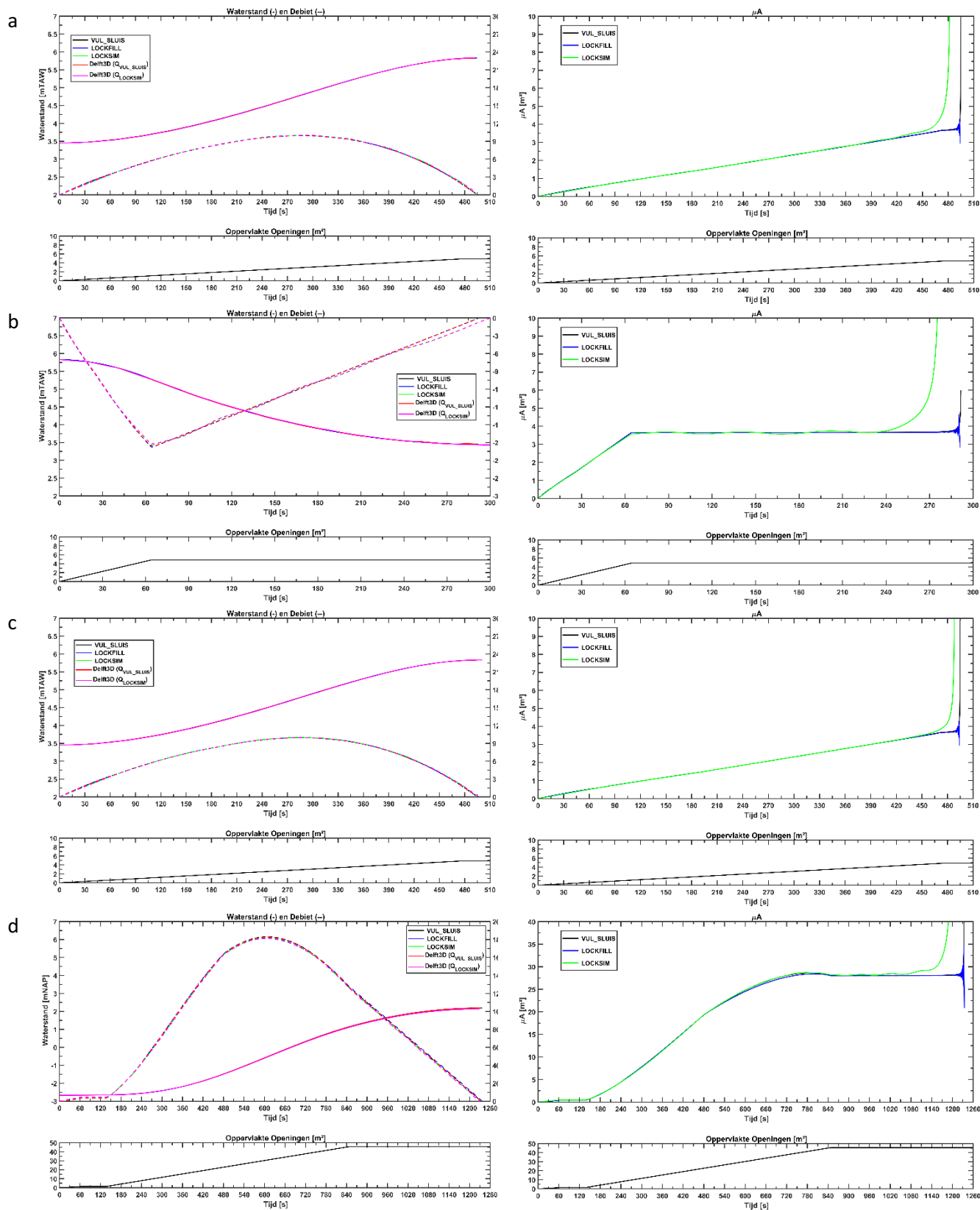
Figuur 8 – Vergelijking van de variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk, debiet door de openingen en parameter μA berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case09, Case10, Case11 en Case12.



a: Case09; b: Case10; c: Case11; d: Case12;

Links: Variatie in de tijd van waterstand in de sluiskolk en debiet door nivelleeropeningen; rechts: Variatie in de tijd van parameter μA .

Figuur 9 – Vergelijking van de variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk, debiet door de openingen en parameter μA berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case13, Case14, Case15 en Case16.



a: Case13; b: Case14; c: Case15; d: Case16;

Links: Variatie in de tijd van waterstand in de sluiscolk en debiet door nivelleeropeningen; rechts: Variatie in de tijd van parameter μA .

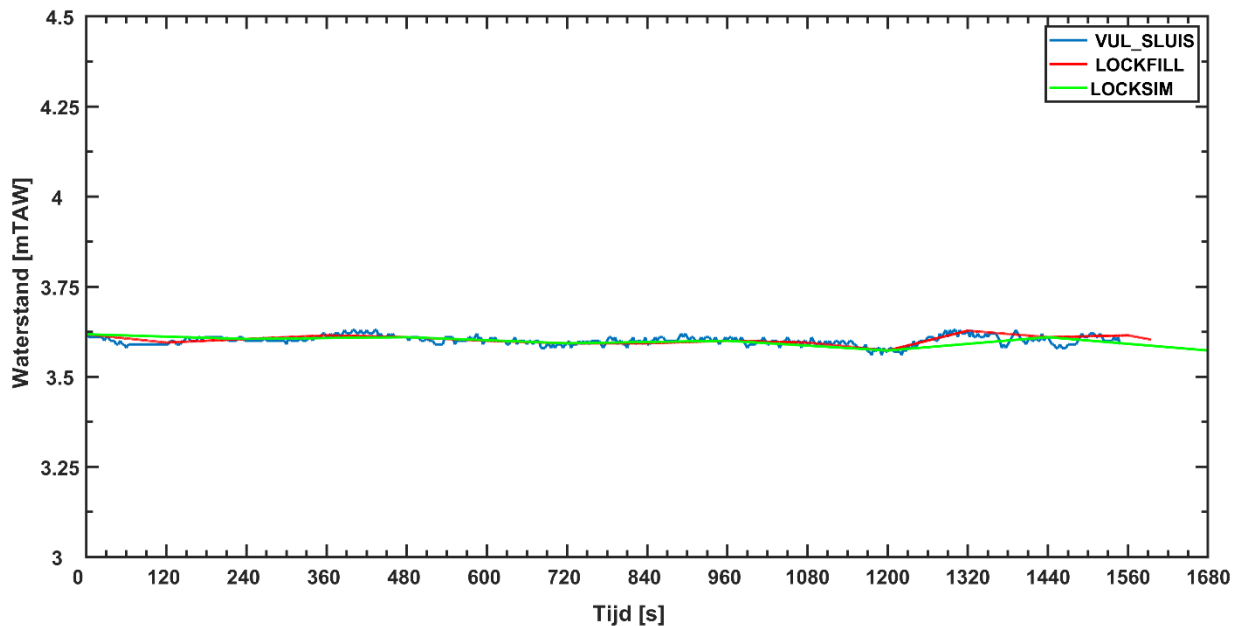
Uit Figuur 6 tot en met Figuur 9, Tabel 13 en Tabel 12 kan vooreerst besloten worden dat zeer beperkte verschillen waargenomen worden tussen het met de verschillende programma's berekende debiet door de nivelleeropeningen en de waterstand in de sluiskolk. Voor de vergelijking van de debietstijdsreeksen, respectievelijk waterstandstijdsreeksen berekend met de verschillende programma's wordt een bias, root-mean-square error en standaardafwijking berekend die maximaal 2.1 % bedraagt van het maximale debiet door de nivelleeropeningen, respectievelijk 0.7 % van het initiële verval.

Met uitzondering van Case09 is de bias tussen het debiet berekend met VUL_SLUIS en dit berekend met LOCKFILL voor alle cases gelijk aan 0. Bij Case09 bedraagt de bias 0.3 % van het maximale debiet. Voor alle cases wordt een iets groter verschil in debiet waargenomen tussen VUL_SLUIS en LOCKSIM, namelijk een bias tussen 0.1 en 0.6 % van het maximale debiet door de nivelleeropeningen. Wat de vergelijking van het debiet door de nivelleeropeningen berekend met VUL_SLUIS en Delft3D betreft, wordt vastgesteld dat de waarden van de statistische parameters afhankelijk zijn van de debieten die als input voor de simulatie gebruikt worden. Bij gebruik van de debieten uit VUL_SLUIS als input zijn de waarden van de statistische parameters zeer klein, i.e. een bias, root-mean-square error en standaardafwijking van maximaal 0.2 % van het maximale debiet door de nivelleeropeningen. Bij gebruik van de debieten uit LOCKSIM als input zijn de waarden van de statistische parameters bij vergelijking van de debieten berekend met VUL_SLUIS en Delft3D gelijk aan deze van de vergelijking van de debieten berekend met VUL_SLUIS en LOCKSIM (namelijk maximaal 0.6 % van het maximale debiet voor bias en 2.1 % van het maximale debiet voor root-mean-square-error en standaarddeviatie).

De bias tussen de waterstanden berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL bedraagt maximaal 0.2 % van het initiële verval, de bias tussen de tijdreeksen met waterstanden berekend met VUL_SLUIS en LOCKSIM bedraagt maximaal 0.4 % van het initiële verval. Wat de vergelijking van de waterstanden berekend met VUL_SLUIS en Delft3D betreft, bedragen de waarden van bias, root-mean-square error en standaardafwijking maximaal 0.7 % van het initiële verval. Bij gebruik van de debieten berekend met VUL_SLUIS als input worden, analoog als bij de vergelijking van de debietstijdreeksen, iets lagere waarden berekend voor de statistische parameters dan bij het gebruik van de debieten berekend met LOCKSIM als input. De statistische parameters voor deze laatste reeks simulaties zijn even groot als deze bij vergelijking van de waterstandstijdreeksen berekend met VUL_SLUIS en LOCKSIM.

De grafische voorstellingen tonen voor alle cases met uitzondering van Case09 eenzelfde debiet voor de simulaties met VUL_SLUIS, LOCKFILL en Delft3D. Voor Case09 volgt uit Figuur 8 dat het debiet door de nivelleeropeningen berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS gelijk is aan elkaar tot ca. $t = 1300$ s. Vanaf dit tijdstip wordt een verschillend debiet tussen LOCKFILL en VUL_SLUIS berekend. De verklaring hiervoor is de variatie in de tijd van de opwaartse waterstand (zie Figuur 10). Vanaf $t = 1200$ s wordt een beperkte daling van het opwaarts waterpeil waargenomen gevolgd door een beperkte stijging. In VUL_SLUIS is de variatie van het opwaarts waterpeil in de inputfile opgegeven met een tijdstap van 7 s. Omwille van de beperking op de lengte van de tabellen als invoer in LOCKFILL (40 lijnen, zie paragraaf 3.2), is de variatie in de tijd van het opwaarts waterpeil in de invoerfile van de simulatie met LOCKFILL opgegeven met een tijdstap van 120 s. Deze grotere tijdstap zorgt voor een hoger berekend debiet dan bij de simulatie met VUL_SLUIS. Hetzelfde doet zich voor bij de simulatie met LOCKSIM, waar in de inputfile maximaal 25 lijnen mogelijk zijn en waardoor een tijdstap van 240 s is beschouwd voor de tijdsreeks van het waterpeil in het opwaarts kanaalpand.

Figuur 10 – Variatie in de tijd van de waterstand in het opwaarts kanaalpand voor Case09 uit de inputfile van VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM



Uit de grafische voorstellingen van de variatie in de tijd van het debiet door de nivelleeropeningen berekend met LOCKSIM volgt dat bij volledig geopende kleppen of schuiven de debietskromme een slingingering vertoont rond deze berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL. Deze slingingering wordt verklaard door de wijze van berekening van het debiet door de nivelleeropeningen. In VUL_SLUIS en LOCKFILL wordt hiervoor de gemiddelde waterstand in de sluiskolk beschouwd, terwijl in LOCKSIM de waterstand juist naast de voor nivelleren gebruikte sluisdeur beschouwd wordt. Deze slingingering verklaart ook de iets grotere bias tussen het debiet berekend met LOCKSIM en dit berekend met VUL_SLUIS.

De variatie in de tijd van de parameter μA is in het begin van de nivellering voor alle programma's zo goed als gelijk aan elkaar. Naar het einde van de nivellering toe wordt bij de simulaties met LOCKSIM, analoog als bij de variatie in de tijd van het debiet, een licht schommelend patroon waargenomen. Bij volledig geopende kleppen of schuiven neemt de waarde van de parameter μA in de LOCKSIM-simulaties sterk toe, in vergelijking met de constante waarde bij de simulaties met de overige programma's. Bij einde nivelleren wordt een exponentiële toename van de parameter μA vastgesteld, wat verklaard kan worden doordat het verval gelijk is aan 0 en bijgevolg een deling door 0 plaatsvindt. Deze exponentiële stijging van de waarde van de parameter μA doet zich, met uitzondering van Case09, bij de LOCKSIM-simulaties eerder voor in de tijd dan bij de simulaties met VUL_SLUIS en LOCKFILL, wat betekent dat met LOCKSIM een kortere nivelleertijd berekend wordt dan met de andere programma's. Bij Case09 zorgen de verschillen in de variatie in de tijd van de waterstand in het opwaarts kanaalpand na $t = 1200$ s in de inputfile van de verschillende programma's ervoor dat het tijdstip van einde nivellering, en bijgevolg ook de exponentiële toename van de parameter μA bij einde nivelleren zich eerder voordoen in de tijd dan bij de overige programma's.

4.2 Vergelijking nivelleertijd

Tabel 14 vergelijkt voor alle cases de nivelleertijd uit de simulaties met VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM. Bij deze tabel wordt het volgende opgemerkt:

- Voor alle programma's is de nivelleertijd bepaald als het tijdstip waarbij het waterpeil in de sluiscolk gelijk is aan het opwaarts waterpeil.
- De nivelleertijd van de simulaties met Delft3D is niet gegeven in de tabel, aangezien deze eigenlijk gelijk is aan de nivelleertijd van het programma waarmee de debieten als input zijn berekend, i.e. de nivelleertijd berekend met VUL_SLUIS of met LOCKSIM.

Met uitzondering van Case09 en Case16 wordt met LOCKFILL een maximaal 2.0 s langere nivelleertijd berekend dan met VUL_SLUIS en met LOCKSIM een nivelleertijd die tussen 6.0 s en 18.8 s korter is dan VUL_SLUIS. Voor Case09, respectievelijk Case 16, wordt met LOCKFILL een nivelleertijd berekend die 46.8 s, respectievelijk 3.4 s, langer is dan berekend met VUL_SLUIS en met LOCKSIM een nivelleertijd die ca. 31.8 s langer is, respectievelijk 32.8 s korter is. Een verklaring voor de beduidend kortere nivelleertijd berekend met LOCKSIM is de hierboven vermelde slingering van de debietskromme uit LOCKSIM rond deze berekend met VUL_SLUIS. Bij Case09 wordt met LOCKSIM een 31.8 s langere nivelleertijd berekend dan met VUL_SLUIS omwille van het verschil in de variatie in de tijd van de waterstand in het opwaarts kanaalpand na $t = 1200$ s in de inputfile van LOCKSIM met dit in de inputfile van VUL_SLUIS.

In Tabel 15 wordt, analoog als in Tabel 14, voor alle cases het maximale debiet door de niveleeropeningen voor de simulaties met VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM met elkaar vergeleken. De verschillen tussen de maximale waarde van het debiet berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL bedragen maximaal 1.0 % van het berekende debiet met VUL_SLUIS. Tussen de debieten berekend met VUL_SLUIS en LOCKSIM wordt een verschil van maximaal 2.3 % berekend.

Tabel 14 – Vergelijking nivelleertijd voor de simulaties met VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM.

	Nivelleertijd [s]			Verskil met nivelleertijd VUL_SLUIS			
				Absoluut [s]		Relatief [%]	
	VUL_SLUIS	LOCKFILL	LOCKSIM	LOCKFILL	LOCKSIM	LOCKFILL	LOCKSIM
Case01	546.6	546.8	528.8	0.2	-17.8	0.0	-3.3
Case02	534.6	534.8	521.4	0.2	-13.2	0.0	-2.5
Case03	574.4	574.4	556.6	0.0	-17.8	0.0	-3.1
Case04	578.4	579.6	559.6	1.2	-18.8	0.2	-3.3
Case05	578.4	579.6	561.8	1.2	-16.6	0.2	-2.9
Case06	565.2	567.2	553.2	2.0	-12.0	0.4	-2.1
Case07	695.4	696.6	682.2	1.2	-13.2	0.2	-1.9
Case08	592.2	592.6	574.0	0.4	-18.2	0.1	-3.1
Case09	1547.8	1594.6	1579.6	46.8	31.8	3.0	2.1
Case10	449.2	449.8	429.6	0.6	-19.6	0.1	-4.4
Case11	634.2	634.4	607.4	0.2	-26.8	0.0	-4.2
Case12	648.4	648.4	626.0	0.0	-22.4	0.0	-3.5
Case13	494.8	494.8	482.8	0.0	-12.0	0.0	-2.4
Case14	291.6	291.8	277.2	0.2	-14.4	0.1	-4.9
Case15	494.8	494.8	488.8	0.0	-6.0	0.0	-1.2
Case16	1233.6	1237.0	1200.8	3.4	-32.8	0.3	-2.7

Tabel 15 – Vergelijking maximale waarde debiet door nivelleeropeningen voor de simulaties met VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM.

	Debiet [m³/s]			Verskil met debiet VUL_SLUIS			
				Absoluut [m³/s]		Relatief [%]	
	VUL_SLUIS	LOCKFILL	LOCKSIM	LOCKFILL	LOCKSIM	LOCKFILL	LOCKSIM
Case01	27.4	27.4	27.6	0.0	0.2	0.0	0.7
Case02	63.5	63.5	63.8	0.0	0.3	0.0	0.5
Case03	73.1	73.1	72.8	0.0	-0.3	0.0	-0.4
Case04	34.9	34.8	35.3	-0.1	0.3	-0.4	1.0
Case05	34.9	34.8	34.6	-0.1	-0.3	-0.4	-0.9
Case06	61.6	61.4	61.7	-0.1	0.2	-0.2	0.3
Case07	53.0	52.6	53.3	-0.4	0.2	-0.7	0.4
Case08	77.4	77.5	76.7	0.1	-0.7	0.1	-0.9
Case09	42.6	42.7	42.2	0.1	-0.4	0.3	-0.8
Case10	31.4	31.4	31.1	0.0	-0.4	0.0	-1.2
Case11	17.9	17.9	18.3	0.0	0.4	0.0	2.3
Case12	25.0	25.0	25.1	0.0	0.1	0.0	0.4
Case13	9.9	10.0	10.0	0.0	0.1	0.0	0.7
Case14	21.8	21.8	21.4	0.0	-0.4	0.0	-2.0
Case15	9.9	10.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Case16	183.0	181.1	181.7	-1.9	-1.3	-1.0	-0.7

5 Vergelijking berekende langskracht op schip

5.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt voor de 16 beschouwde cases de langskracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D met elkaar vergeleken. Vooreerst wordt de met de verschillende programma's berekende langskracht grafisch vergeleken.

Bij een ontwerp van een nivelleersysteem worden gebruikelijk de positieve en negatieve extrema van de berekende langskrachten op het schip vergeleken. Om die reden worden in dit hoofdstuk ook de positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D in tabelvorm met elkaar vergeleken. In deze tabel wordt ook de procentuele afwijking ten opzichte van de overeenkomstige waarde berekend met VUL_SLUIS bepaald. Deze procentuele afwijking is als volgt berekend:

$$\% \text{ afwijking} = \frac{\text{waarde software } X - \text{waarde vul_sluis}}{\text{waarde vul_sluis}} \times 100 \%$$

Aan de hand van een Fast-Fourier Transformatie is voor elke case en voor de tijdsreeksen met langskrachten berekend met de verschillende softwareprogramma's het variantiedensiteitspectrum berekend en grafisch voorgesteld. Hierbij wordt opgemerkt dat, met uitzondering van Case09 en Case10, enkel het gedeelte tussen 0 en 0.03 Hz (= 1/33.3 s) getoond is. Deze grenzen van het variantiedensiteitspectrum zijn bepaald aan de hand van de periode van de harmonische oscillaties van het water in een sluiskolk met schip (Deltares, 2016):

$$T = \frac{2(l_k - l_s)}{\sqrt{g h}} - \frac{2l_s}{\sqrt{g \frac{b_k h - b_s d_s}{b_k}}}$$

Met:

-	T	Periode van harmonische oscillaties in sluiskolk	[s]
-	l_k	Lengte sluiskolk	[m]
-	b_k	Breedte sluiskolk	[m]
-	l_s	Lengte schip	[m]
-	b_s	Breedte schip	[m]
-	d_s	Diepgang schip	[m]
-	g	Valversnelling	[m/s ²]
-	h	Waterdiepte	[m]

Voor elke case wordt in Tabel 16 aan de hand van deze formulering de periode en de frequentie van de harmonische oscillaties van het water in de kolk berekend bij de minimale en de maximale waterdiepte in de kolk. Uit deze tabel volgen oscillatiefrequenties tussen 0.009 Hz en 0.031 Hz. Hieruit volgt dat de belangrijkste oscillatiefrequenties kleiner zijn dan 0.03 Hz. Voor Case09 en Case10 wordt een oscillatiefrequentie van 0.013 à 0.015 Hz berekend. Dit is kleiner dan 0.03 Hz. Echter bij deze cases zijn de secundaire oscillaties met een oscillatiefrequentie gelijk aan een veelvoud van de hoofdfrequentie ook nog prominent aanwezig. Om die reden is voor deze beide cases het variantiedensiteitspectrum grafisch voorgesteld tussen 0 Hz en 0.05 Hz.

Tabel 16 – Bepaling periode en frequentie van harmonische oscillaties bij minimale en maximale waterdiepte in sluisolk.

	Kolk		Schip			Minimale waterdiepte in kolk			Maximale waterdiepte in kolk		
	l_k	b_k	l_s	b_s	d_s	h_k	T	f	h_k	T	f
	m	m	m	m	m	mTAW	s	Hz	mTAW	s	Hz
Case01	200.0	16.0	11.40	2.80	110.00	3.70	83.67	0.012	6.70	54.58	0.018
Case02	182.5	22.0	16.84	3.20	135.50	5.33	63.98	0.016	10.73	39.23	0.025
Case03	182.5	22.0	16.84	3.20	135.50	10.73	39.23	0.025	5.33	63.98	0.016
Case04	200.0	16.0	11.40	2.80	110.00	3.70	83.67	0.012	6.70	54.58	0.018
Case05	200.0	16.0	11.40	2.80	110.00	6.70	54.58	0.018	3.70	83.67	0.012
Case06	182.5	22.0	16.84	3.20	135.50	5.33	63.98	0.016	10.73	39.23	0.025
Case07	182.5	22.0	16.84	3.20	135.50	5.33	63.98	0.016	10.73	39.23	0.025
Case08	182.5	22.0	16.84	3.20	135.50	10.73	39.23	0.025	5.33	63.98	0.016
Case09	473.0	57.0	11.50	4.29	82.00	17.53	72.46	0.014	18.79	69.97	0.014
Case10	256.6	25.0	9.57	2.70	99.00	5.17	75.34	0.013	6.28	67.76	0.015
Case11	258.1	12.5	11.40	3.50	185.00	4.71	117.39	0.009	7.10	77.28	0.013
Case12	259.0	16.0	11.40	3.50	185.00	4.20	113.49	0.009	5.11	93.94	0.011
Case13	130.0	10.5	9.50	3.00	105.00	4.23	62.22	0.016	6.61	40.18	0.025
Case14	130.0	10.5	9.50	3.00	105.00	6.61	40.18	0.025	4.23	62.22	0.016
Case15	130.0	10.5	3.40	1.40	12.00	4.23	40.58	0.025	6.61	32.40	0.031
Case16	427.0	55.0	40.00	12.50	265.00	14.33	101.26	0.010	19.19	76.86	0.013

Paragraaf 5.2 vergelijkt de totale langskracht berekend met de verschillende beschouwde programma's voor cases met betrekking tot ledigen van een sluisolk of voor vullen van een kolk gedomineerd door translatiegolven. In paragraaf 5.3 wordt de totale langskracht vergeleken voor cases met betrekking tot vullen van een sluisolk waarbij alle componenten van de langskracht aanwezig zijn.

Voor alle cases vergelijkt paragraaf 5.4 de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven berekend met VUL_SLUIS met deze berekend met LOCKFILL.

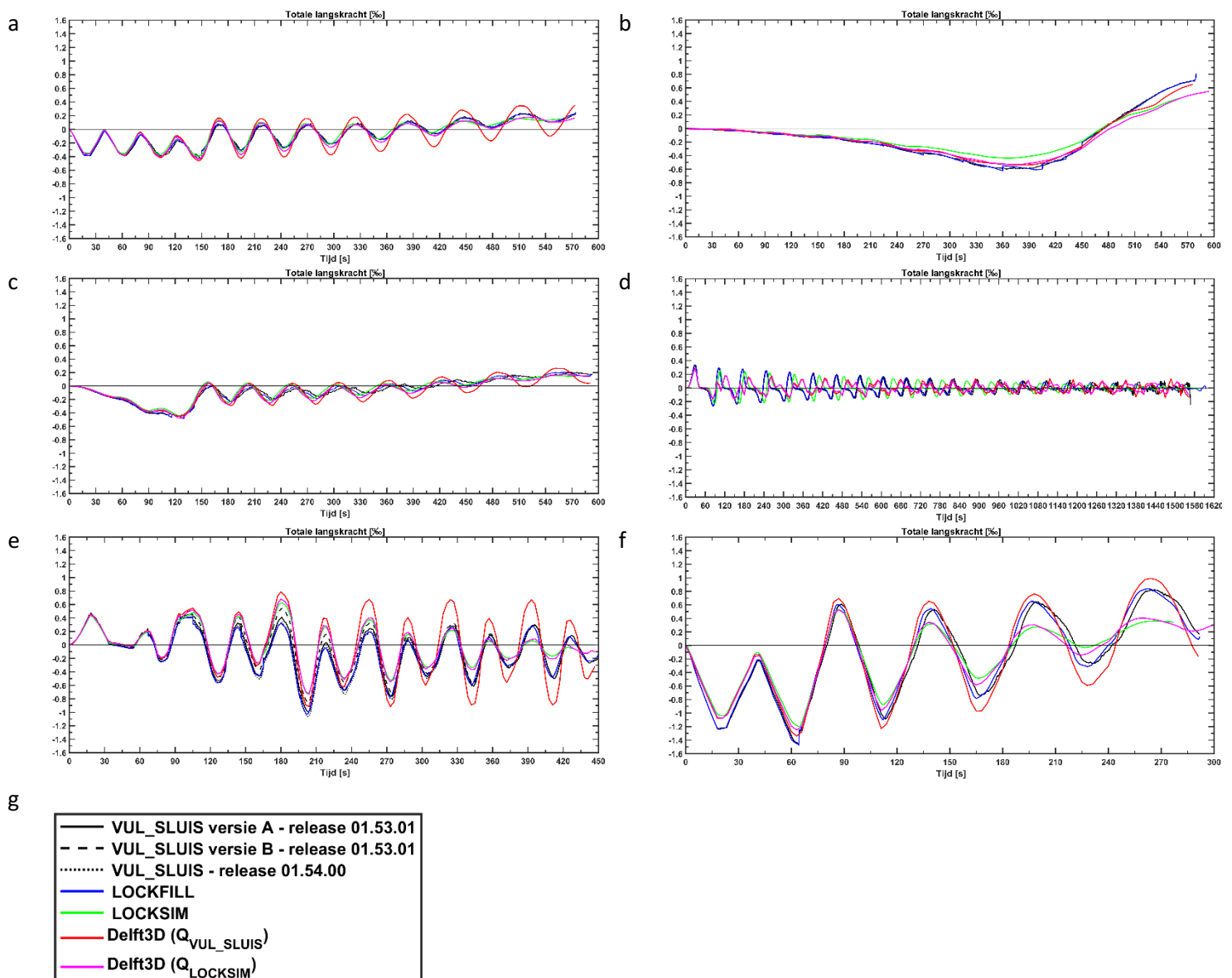
Paragraaf 5.5 bespreekt de invloed van de vulstraalwerking en de demping van translatiegolven op de berekende totale langskracht op het schip.

5.2 Vergelijking totale langskracht voor cases met betrekking tot ledigen sluiscolk of vullen colk gedomineerd door translatiegolven

Deze paragraaf vergelijkt de totale langskracht voor alle cases met betrekking tot ledigen van een sluiscolk (Case03, Case05, Case08 en Case14) en voor de cases met betrekking tot vullen van een sluiscolk waarbij de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven dominant is (Case09 en Case10).

Figuur 11 vergelijkt voor deze cases de totale langskracht op het schip berekend met de verschillende softwareprogramma's.

Figuur 11 – Vergelijking van de totale langskracht [%] op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03, Case05, Case08, Case09, Case10 en Case14.



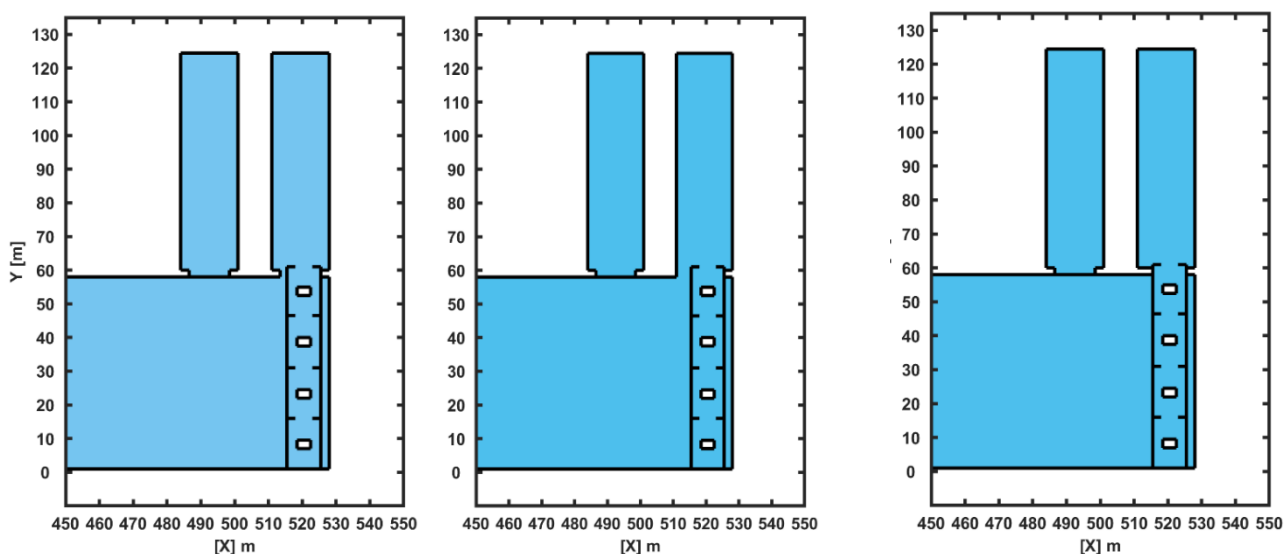
Uit Figuur 11 volgt dat, met uitzondering van Case14, bij begin nivellieren met de verschillende programma's dezelfde langskrachten op het schip berekend worden. Bij Case14 worden met beide releases van VUL_SLUIS en LOCKFILL iets hogere langskrachten berekend dan met LOCKSIM en beide simulaties met Delft3D.

Met uitzondering van Case10, worden voor al deze cases geen verschillen in langskrachten berekend tussen beide versies van VUL_SLUIS release 01.53.01 en tussen VUL_SLUIS release 01.53.01 en VUL_SLUIS release 01.54.00 en tussen alle releases van VUL_SLUIS en LOCKFILL. Voor Case10 worden met versie B van VUL_SLUIS release 01.53.01 hogere langskrachten op het schip in de kolk berekend dan met versie A van VUL_SLUIS release 01.53.01. Met VUL_SLUIS release 01.54.00 worden voor deze case lagere langskrachten berekend dan met beide versies van VUL_SLUIS release 01.53.01. De met VUL_SLUIS release 01.54.00 berekende langskrachten vallen samen met deze berekend met LOCKFILL.

Bij Case03, Case05, Case08 en Case09 is de grootte van langskrachten berekend met LOCKSIM gedurende de volledige nivellering bijna gelijk aan deze van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL. Bij Case10 en Case14 wordt naar het einde van de nivellering toe een grotere damping van de berekende langskrachten waargenomen dan bij de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL. Hierdoor worden naar het einde van de nivellering met LOCKSIM beduidend lagere langskrachten op het schip berekend. Bij gebruik van de debieten berekend met VUL_SLUIS als input in Delft3D wordt voor alle cases naar het einde van de nivellering toe een kleinere damping van de langskrachten waargenomen dan bij de simulaties met VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL, waardoor met dit programma hogere krachten op het schip berekend worden. Bij gebruik van de debieten berekend met LOCKSIM als input vallen de langskrachten op het schip berekend met Delft3D zo goed als samen met de langskrachten berekend met LOCKSIM. Bijgevolg worden met Delft3D ook voor Case10 en Case14 naar het einde van de nivellering toe een grotere damping en bijgevolg kleinere langskrachten op het schip berekend dan met VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL.

Bij Case09 wordt een bijkomende reflectie waargenomen in het verloop van de langkracht. Deze bijkomende reflecties worden veroorzaakt door de aanwezigheid van de deurkamer aan het opwaartse uiteinde van het numeriek model. Om dit na te gaan zijn 2 extra simulaties uitgevoerd met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input. Een eerste simulatie waarbij de opening naar de deurkamer vergroot is en een tweede simulatie waarbij de deurkamer niet aanwezig is in het numeriek model (zie Figuur 12).

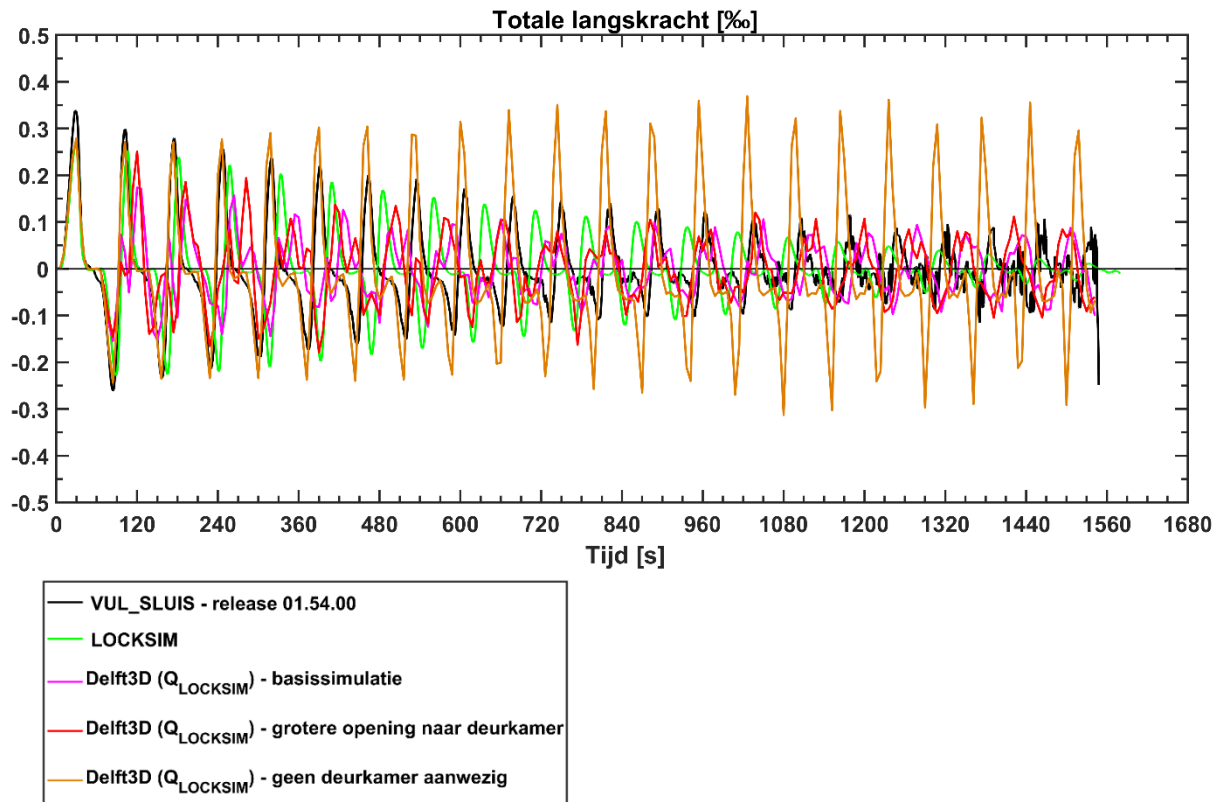
Figuur 12 – Modelleren deurkamers in Delft3D



Links: basissimulatie; midden: grotere opening naar deurkamers: rechts: geen deurkamer aanwezig

De langskrachten op het schip berekend voor deze simulaties zijn grafisch voorgesteld in Figuur 13. Uit deze figuur volgt dat een vergroting van de opening naar de deurkamer een verkleining van de amplitude van de bijkomende reflectie tot gevolg heeft. Bij afwezigheid van de deurkamers is de bijkomende reflectie niet aanwezig en wordt met Delft3D een gelijkaardig verloop van de langskrachten op het schip berekend als met LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00. De demping van de langskracht in de sluiscolk berekend met Delft3D en afwezigheid van een deurkamer is beduidend lager dan de demping van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKSIM.

Figuur 13 – Invloed deurkamers op langskrachten berekend met Delft3D.



De voor deze cases positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01, VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D (zowel met debieten uit VUL_SLUIS als debieten uit LOCKSIM als input) worden gegeven in Tabel 20 in Bijlage 1. De procentuele afwijking tussen de positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, i.e. de meest recente release van VUL_SLUIS, en de langskrachten berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D wordt gegeven in Tabel 17.

Tabel 22 in Bijlage 1 geeft voor deze simulaties een overzicht van de berekende statistische parameters. In deze tabel zijn volgende tijdsreeksen statistisch met elkaar vergeleken:

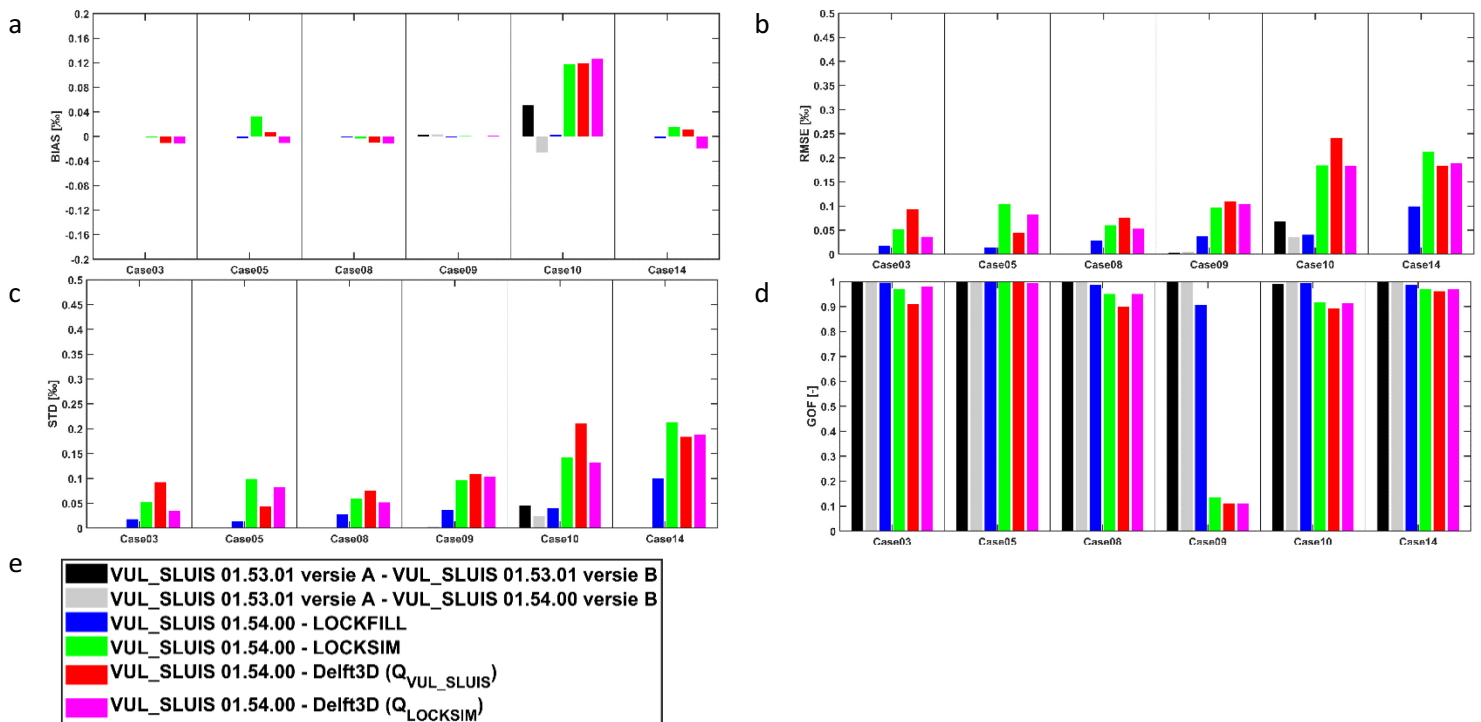
- VUL_SLUIS release 01.53.01 versie A en VUL_SLUIS release 01.53.01 versie B.
- VUL_SLUIS release 01.53.01 versie A met VUL_SLUIS release 01.54.00.
- VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL.
- VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKSIM.
- VUL_SLUIS release 01.54.00 en Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input.
- VUL_SLUIS release 01.54.00 en Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input.

Voor de definitie van deze statistische parameters wordt verwezen naar hoofdstuk 4. De berekende statistische parameters worden grafisch voorgesteld in Figuur 14.

Tabel 17 – Procentuele afwijking tussen positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en de krachten berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D.

	LOCKFILL – VUL_SLUIS release 01.54.00		LOCKSIM– VUL_SLUIS release 01.54.00		Delft3D (Q _{VUL_SLUIS}) – VUL_SLUIS release 01.54.00		Delft3D (Q _{LOCKSIM}) – VUL_SLUIS release 01.54.00	
	min.	max.	min.	min.	min.	max.	min.	max.
Case03	3	7	-7	-32	9	50	2	-23
Case05	4	2	-27	-29	-10	-8	-11	-22
Case08	8	1	0	-24	0	29	7	-15
Case09	2	-3	-12	-22	-38	-15	-41	-18
Case10	-3	-1	-32	36	-14	71	-32	48
Case14	1	2	-18	-36	-8	20	-14	-36

Figuur 14 – Statistische parameters voor vergelijking langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03, Case05, Case08, Case09, Case10 en Case14.



Uit Tabel 17 en Figuur 14 volgt dat de positieve en negatieve extrema van de langskrachten berekend met LOCKFILL, respectievelijk LOCKSIM, maximaal 8 %, respectievelijk 36 %, afwijken van deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00. Bij gebruik van de debieten berekend met VUL_SLUIS als input in Delft3D worden procentuele afwijkingen tot 71 % berekend tussen positieve en negatieve extrema van de langskrachten berekend met Delft3D en deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00. Worden de debieten berekend met LOCKSIM als input toegepast in Delft3D dan worden procentuele afwijkingen tot 48 % berekend, wat van dezelfde grootteorde is als de procentuele afwijkingen tussen de positieve en negatieve extrema van de langskrachten berekend met LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00.

Met uitzondering van Case10 wordt voor alle cases een maximale bias van 0.03 % berekend tussen de langskrachten berekend met LOCKFILL, LOCKSIM of Delft3D en deze berekend met VUL_SLUIS release

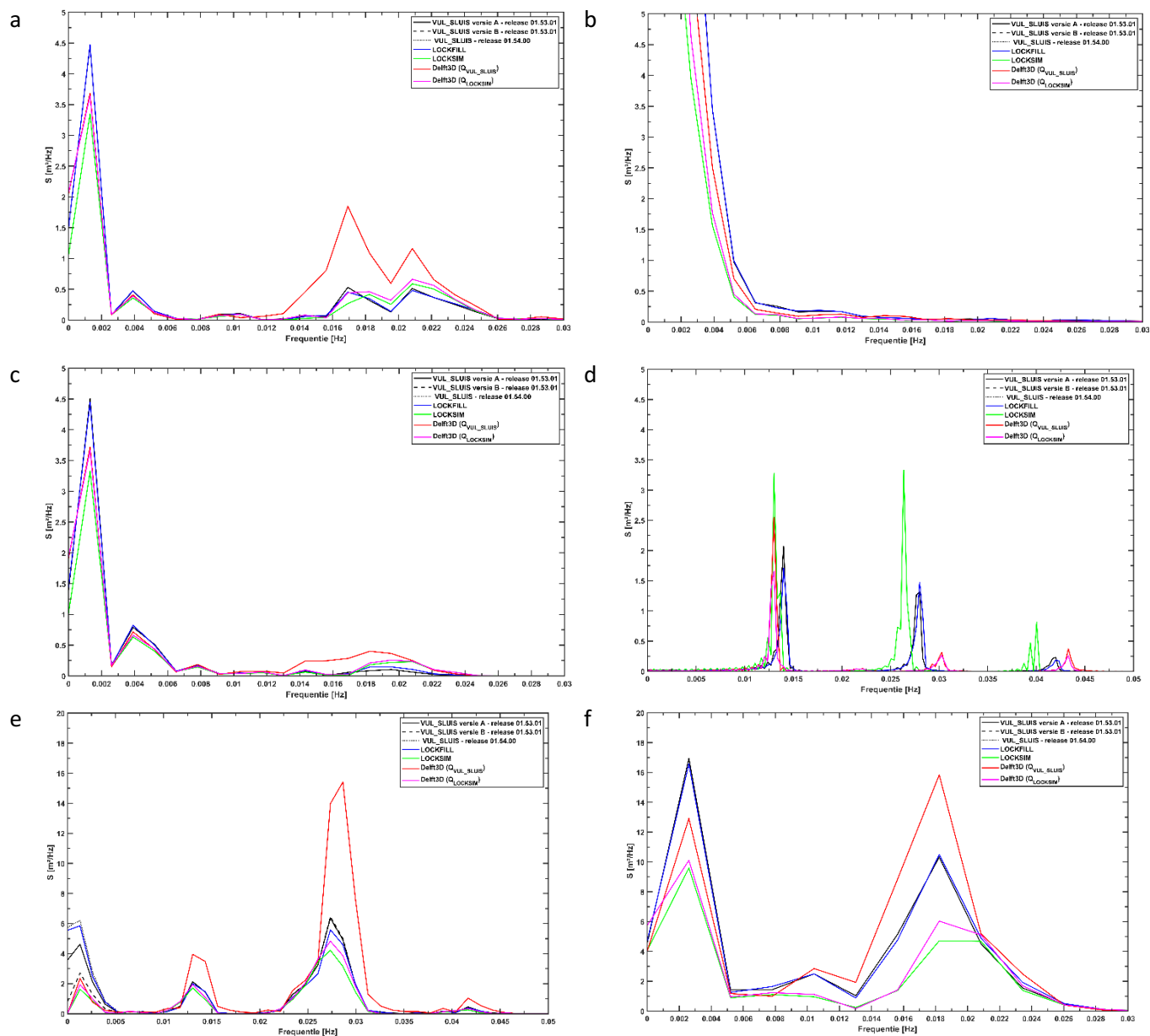
01.54.00. Voor Case10 wordt een iets hogere waarde van 0.13 % berekend voor de bias tussen de langskrachten berekend met LOCKSIM en Delft3D en VUL_SLUIS release 01.54.00. De root-mean-square-error en de standaarddeviatie tussen de langskrachten berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D bedraagt maximaal 0.24 %. Hierbij wordt opgemerkt dat de waarden voor root-mean-square-error en standaarddeviatie van de krachten tussen LOCKFILL en VUL_SLUIS release 01.54.00 beduidend kleiner zijn (maximaal 0.10 %) dan deze tussen LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00 (maximaal 0.21 %) en tussen Delft3D (zowel met debieten berekend met VUL_SLUIS als berekend met LOCKSIM als input) en VUL_SLUIS release 01.54.00 (maximaal 0.24 %). Daarnaast wordt ook opgemerkt dat deze maximale waarden van root-mean-square error en standaarddeviatie berekend worden voor Case10 en Case14. Bij de overige cases worden lagere waarden voor root-mean-square error en standaarddeviatie berekend, i.e. maximaal 0.04 % tussen langskrachten berekend met LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00 en maximaal 0.11 % tussen langskrachten berekend met Delft3D en VUL_SLUIS release 01.54.00. Bij Case09 wordt vastgesteld dat de goodness-of-fit tussen de langskrachten berekend met LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00 en deze tussen de langskrachten berekend met Delft3D en VUL_SLUIS release 01.54.00 zeer laag is. De verklaring hiervoor is de faseverschuiving tussen de langskrachten berekend met LOCKSIM en Delft3D en deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 gedurende de nivellering, wat aanleiding geeft tot een minder goede overeenkomst tussen de berekende langskrachten.

In Figuur 15 is voor de in deze paragraaf beschouwde cases een grafische voorstelling gegeven van het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met de verschillende beschouwde programma's. Uit deze figuur volgt dat voor deze cases de variantiedensiteitsspectra van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input dezelfde aanwezige frequenties vertonen. Het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input vertoont voor vullen iets hogere aanwezige frequenties en voor ledigen iets lagere aanwezige frequenties. Dit kan ook waargenomen worden in de grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de langskracht. De periode van de langskracht berekend met Delft3D met debieten uit VUL_SLUIS als input wordt naar het einde van de nivellering toe voor Case03 en Case08 iets groter en voor Case 10 en Case14 iets kleiner dan de periode van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL en LOCKSIM.

De faseverschuiving in de langskrachten berekend met LOCKSIM en Delft3D voor Case09 is ook merkbaar in het variantiedensiteitsspectrum voor deze case. De eerste piek van het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met Delft3D (zowel met debieten uit VUL_SLUIS als LOCKSIM als input) en LOCKSIM is aanwezig bij een iets lagere frequentie (0.013 Hz) dan de eerste piek van het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL (0.014 Hz). De tweede en de derde piek van het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met LOCKSIM blijven aanwezig bij iets lagere frequenties (respectievelijk 0.026 Hz en 0.040 Hz) dan deze van het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL (respectievelijk 0.028 Hz en 0.042 Hz). De tweede en de derde piek van het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met Delft3D (zowel met de debieten uit VUL_SLUIS als met de debieten als LOCKSIM als input) zijn aanwezig bij iets hogere frequenties (respectievelijk 0.030 Hz en 0.043 Hz) als deze van het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL (respectievelijk 0.028 Hz en 0.042 Hz).

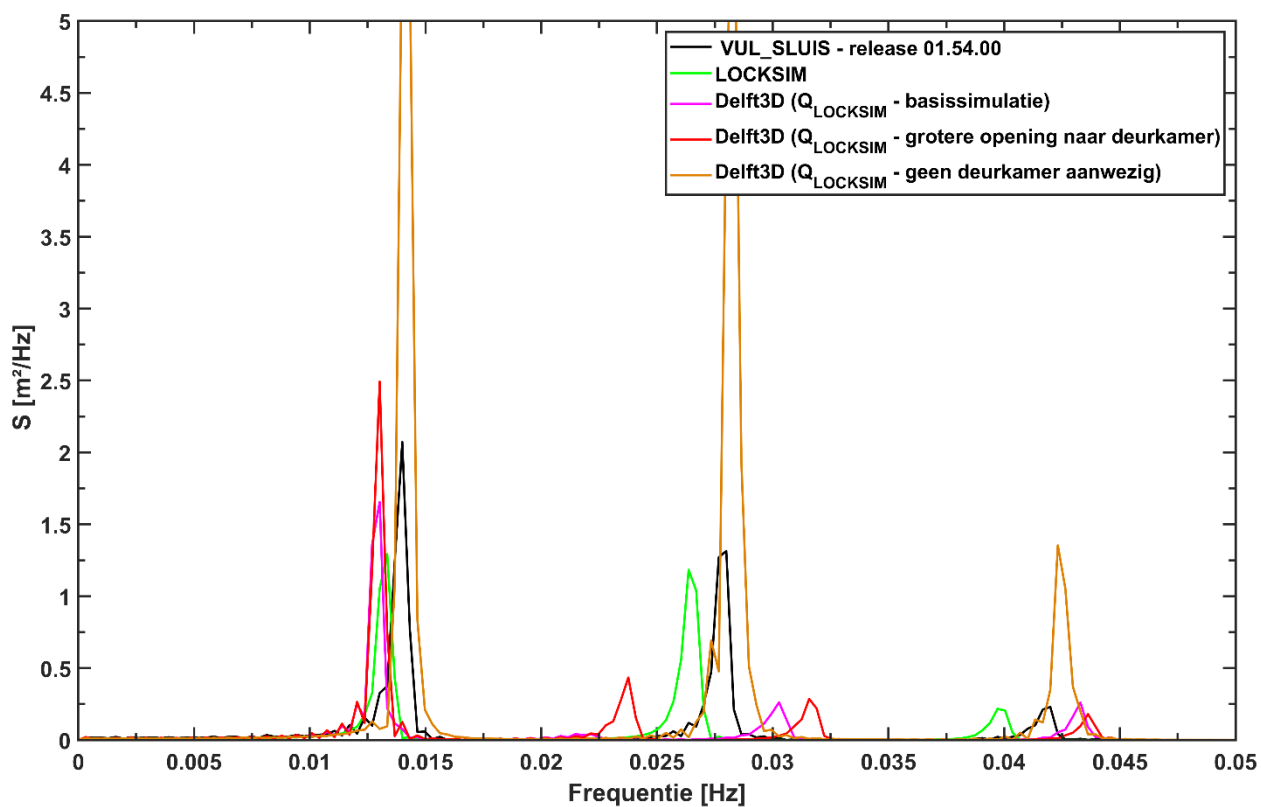
Figuur 16 vergelijkt het met Delft3D berekende variantiedensiteitsspectrum voor Case09 met dit voor de hoger vermelde simulaties met Delft3D en de aanpassing van de deurkamer. Uit deze figuur volgt dat een grotere opening naar de deurkamer de frequentie waarbij de eerste piek zich voordoet niet wijzigt. Tussen 0.02 Hz en 0.03 Hz doen zich nu wel twee secundaire pieken voor. Bij afwezigheid van een deurkamer in Delft3D doen zowel de eerste piek als de beide secundaire pieken zich voor bij dezelfde frequentie als de pieken in het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00. Het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met Delft3D en afwezigheid van een deurkamer vertoont wel iets hogere frequenties dan dit van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, analoog als was besloten voor Case10.

Figuur 15 – Variantiedensiteitspectra voor langskrachten berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03 en Case05.



a: Case03; b: Case05; c: Case08; d: Case09; e: Case10; f: Case14.

Figuur 16 – invloed aanwezigheid deurkamer op variantiedensiteitsspectrum voor Case09

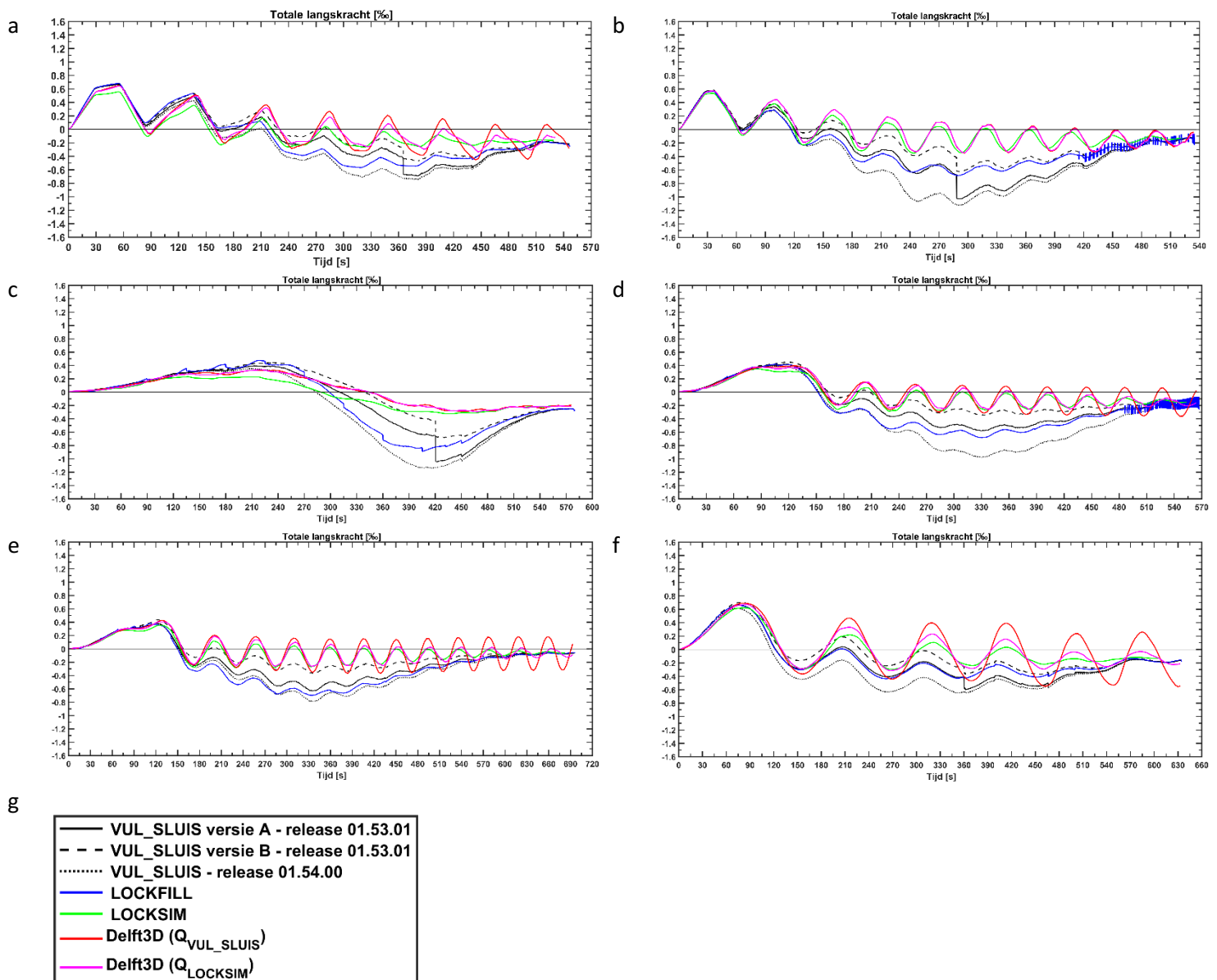


5.3 Vergelijking totale langskracht voor vullen van een sluis waarbij alle componenten van de langskracht relevant zijn

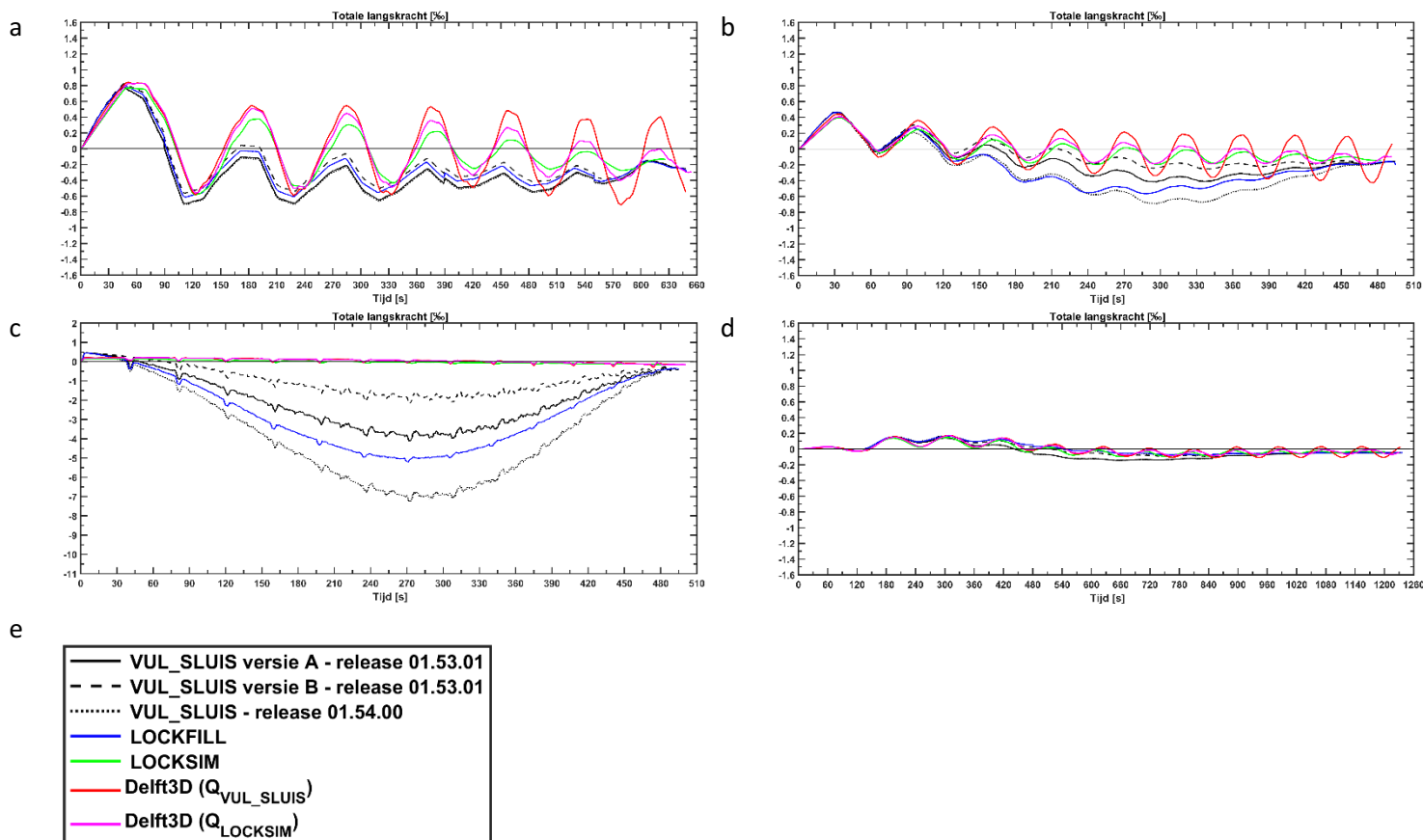
Deze paragraaf vergelijkt de totale langskracht op het schip berekend met de verschillende programma's voor de overige cases met betrekking tot vullen van een sluiskolk, i.e. Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16. Voor al deze cases zijn alle componenten van de langskracht relevant, alhoewel bij de meeste cases de component van de langskracht ten gevolge van impulsafname dominant is.

Figuur 17 en Figuur 18 vergelijken voor deze cases de totale langskracht op het schip berekend met de verschillende softwareprogramma's.

Figuur 17 – Vergelijking van de totale langskracht [%] op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07 en Case11.



Figuur 18 – Vergelijking van de totale langskracht [%] op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case12, Case13, Case15 en Case16.



a: Case12; b: Case13; c: Case15; d: Case16; e: legende figuren.

Uit Figuur 17 en Figuur 18 volgt dat voor vullen van een sluisolk de variatie in de tijd van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01 nog een sprong vertoont. Deze sprong in de langskrachten doet zich zowel voor bij de langskrachten berekend met versie A als bij deze berekend met versie B. Hierbij is voor alle cases de langskracht berekend met versie A van VUL_SLUIS release 01.53.01 een betere benadering van deze berekend met LOCKFILL dan deze berekend met versie B. De kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 vertoont geen sprong meer. De negatieve extrema van de langskracht op het schip in de kolk berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zijn (in absolute waarde) iets groter dan deze berekend met versie A van VUL_SLUIS release 01.53.01.

Voor alle cases heeft de eerste piek van de langskracht berekend met de 4 verschillende programma's dezelfde grootte en dezelfde periode. Bij het begin van de nivellering is de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven dominant. Tijdens het overige gedeelte van de nivellering neemt voor deze cases de bijdrage van de component ten gevolge van impulsaftake en vulstraalwerking toe. Gedurende de periode waarin deze beide bijdragen dominant zijn, worden min of meer gelijkaardige langskrachten berekend met LOCKSIM en Delft3D (zowel met de debieten uit VUL_SLUIS als de debieten uit LOCKSIM als input) en min of meer gelijkaardige langskrachten met VUL_SLUIS en LOCKFILL. De negatieve extrema van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL zijn (in absolute waarde) hoger dan deze berekend met Delft3D en LOCKSIM. De langskrachten berekend met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input vertonen een relatief goede overeenkomst met de langskrachten berekend met LOCKSIM. Naar het einde van de nivellering toe is de amplitude van de langskrachten berekend met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input beduidend hoger dan deze berekend met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input door de lagere demping van de berekende langskrachten. Hierbij wordt opgemerkt dat (numerieke)

damping van de berekende langskrachten functie is van de gekozen invoerparameters. In deze studie is ervoor gekozen, om redenen van vergelijkbaarheid, om de invoerparameters zoveel mogelijk te doen overeenkomen met de invoerparameters van de simulatie met VUL_SLUIS. Mogelijk is deze keuze van de invoerparameters wat betreft numerieke damping van de langskrachten niet optimaal voor het betreffende programma.

In Figuur 17 wordt bij Case04 vastgesteld dat de langskrachten berekend met LOCKFILL een verloop kennen dat schommelt rond dit van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS. Dit wordt ook vastgesteld bij Case05 en Case08 in paragraaf 5.2. Case04, Case05 en Case08 betreffen allen cases met cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen. Dit schommelend verloop doet zich (visueel) echter niet voor bij Case06 en Case07, dewelke ook simulaties zijn met cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen. Een verklaring voor deze schommeling rond de langskrachten berekend met VUL_SLUIS is niet gevonden. Daarnaast wordt vastgesteld dat voor Case02 en Case06 de langskrachten op het schip berekend met LOCKFILL aan het einde van de nivellering een sterk fluctuerend verloop kennen. Een verklaring voor dit fluctuerend verloop is ook niet gevonden.

De voor deze cases positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01, VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D (zowel met debieten uit VUL_SLUIS als debieten uit LOCKSIM als input) worden met elkaar vergeleken in Tabel 21 in Bijlage 1. De procentuele afwijking tussen de positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, i.e. de meest recente release van VUL_SLUIS, en de langskrachten berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D wordt gegeven in Tabel 18.

Tabel 18 – Procentuele afwijking (%) tussen positieve en negatieve extrema van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en de krachten berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D

	LOCKFILL – VUL_SLUIS release 01.54.00		LOCKSIM– VUL_SLUIS release 01.54.00		Delft3D (Q _{VUL_SLUIS}) – VUL_SLUIS release 01.54.00		Delft3D (Q _{LOCKSIM}) – VUL_SLUIS release 01.54.00	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Case01	-24	3	-64	-16	-39	-3	-55	-3
Case02	-39	0	-69	-5	-69	2	-69	2
Case04	-22	35	-72	-35	-75	-7	-74	-6
Case06	-30	9	-71	-11	-63	1	-73	-3
Case07	-12	1	-64	-9	-53	11	-67	5
Case11	-33	7	-55	1	-15	12	-52	9
Case12	-13	3	-18	-1	0	9	-21	7
Case13	-18	2	-71	-12	-39	-3	-73	-10
Case15	-28	0	-98	-66	-96	-54	-97	-54
Case16	-2	-2	10	-13	26	3	-1	1

Uit Tabel 18 volgt dat voor de meeste cases de procentuele afwijking tussen de positieve en negatieve extrema berekend met LOCKFILL en deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 kleiner is dan de procentuele afwijking tussen LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00 en ook kleiner dan de procentuele afwijking tussen Delft3D en VUL_SLUIS release 01.54.00. Met uitzondering van Case04 verschillen de positieve extrema berekend met LOCKFILL maximaal 9 % met deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00. Voor Case04 wordt echter een procentuele afwijking tot 35 % berekend tussen het maximum van de langskracht berekend LOCKFILL en dit berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00. Voor de negatieve extrema wordt een procentuele afwijking tussen LOCKFILL en VUL_SLUIS release 01.54.00 tot 39 % berekend. Met uitzondering van Case15 (recreatievaart in sluiskolk), worden voor de overige cases procentuele afwijkingen tot 71 % berekend tussen de negatieve extrema van de langskracht berekend met

LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00 en tussen deze berekend met Delft3D (zowel met de debieten uit VUL_SLUIS als met de debieten uit LOCKSIM als input) en VUL_SLUIS release 01.54.00. Wat de positieve extrema van de langskracht betreft, worden procentuele afwijkingen tot 35 %, respectievelijk 11 %, berekend tussen de waarden berekend met LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00, respectievelijk deze berekend met Delft3D en VUL_SLUIS release 01.54.00. Bij Case15 worden procentuele afwijkingen tot 98 % berekend tussen de negatieve extrema berekend met LOCKSIM en Delft3D en VUL_SLUIS release 01.54.00 en tot 66 %, respectievelijk 54 % tussen de negatieve extrema berekend met LOCKSIM en VUL_SLUIS release 01.54.00, respectievelijk Delft3D en VUL_SLUIS release 01.54.00. De procentuele afwijkingen tussen de positieve en negatieve extrema van de langskracht berekend met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input en deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zijn ongeveer even groot als, respectievelijk iets groter dan, de procentuele afwijkingen tussen de positieve en negatieve extrema van de langskracht berekend met LOCKSIM, respectievelijk Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input, en deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00.

Tabel 23 in Bijlage 1 geeft voor de simulaties uitgevoerd voor deze cases een overzicht van de berekende statistische parameters. In deze tabel zijn volgende tijdsreeksen statistisch met elkaar vergeleken:

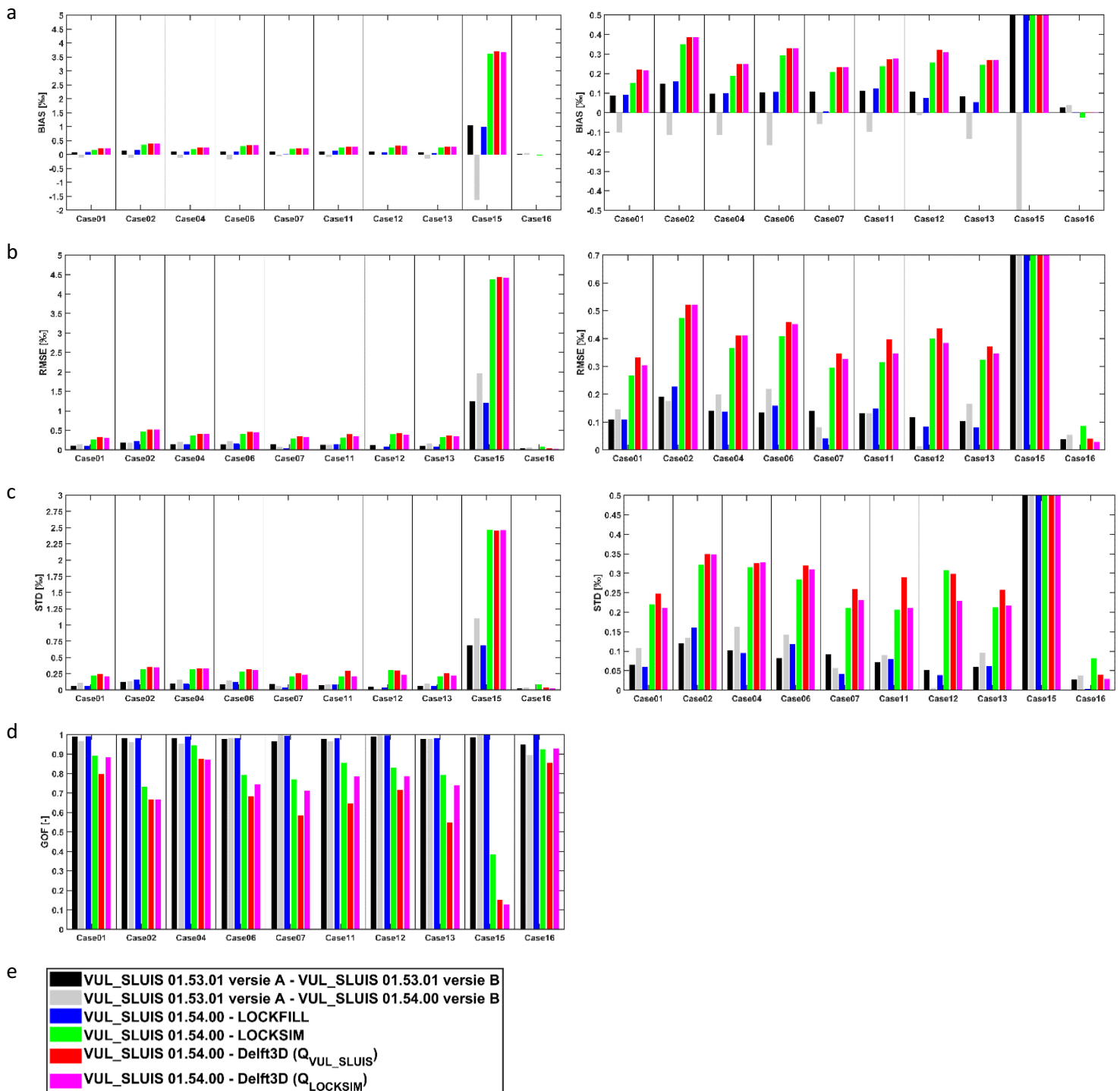
- VUL_SLUIS release 01.53.01 versie A en VUL_SLUIS release 01.53.01 versie B
- VUL_SLUIS release 01.53.01 versie A met VUL_SLUIS release 01.54.00
- VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL
- VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKSIM
- VUL_SLUIS release 01.54.00 en Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input
- VUL_SLUIS release 01.54.00 en Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input

Voor de definitie van deze statistische parameters wordt verwezen naar hoofdstuk 4. De berekende statistische parameters worden grafisch voorgesteld in Figuur 19.

Uit Figuur 19 en Tabel 23 in Bijlage 1 volgt dat de waarde van de bias van de langskrachten bij vergelijking tussen VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL, met uitzondering van Case15, maximaal 0.16 ‰ bedraagt met een root-mean-square error van maximaal 0.23 ‰ en een standaarddeviatie van maximaal 0.16 ‰. Voor Case15, i.e. recreatievaart in de sluiskolk, worden grotere verschillen waargenomen tussen de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en deze berekend met LOCKFILL. De bias bedraagt ca. 1.00 ‰ met een root-mean-square error gelijk aan 1.20 ‰ en een standaarddeviatie van 0.69 ‰. Dit was hierboven ook al opgemerkt bij de bespreking van de procentuele afwijking tussen de positieve en negatieve extrema van de langskracht berekend met LOCKFILL en deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00. Voor deze grotere berekende langskracht op het schip bij recreatievaart is nog geen verklaring gevonden.

De waarde van de bias, root-mean-square error en de standaarddeviatie van de langskrachten bij vergelijking van VUL_SLUIS release 01.54.00 met LOCKSIM en deze bij vergelijking van VUL_SLUIS release 01.54.00 met Delft3D zijn ongeveer gelijk aan elkaar. Voor een aantal cases is de root-mean-square error en de standaarddeviatie van de langskrachten bij vergelijking van VUL_SLUIS release 01.54.00 met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input iets groter dan deze bij vergelijking van VUL_SLUIS release 01.54.00 met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input. Met uitzondering van Case15 bedraagt de bias maximaal 0.39 ‰, de root-mean square error maximaal 0.52 ‰ en de standaarddeviatie maximaal 0.35 ‰. Bij Case15 bedraagt de bias 3.67 ‰, de root-mean-square error 4.42 ‰ en de standaarddeviatie 2.47 ‰.

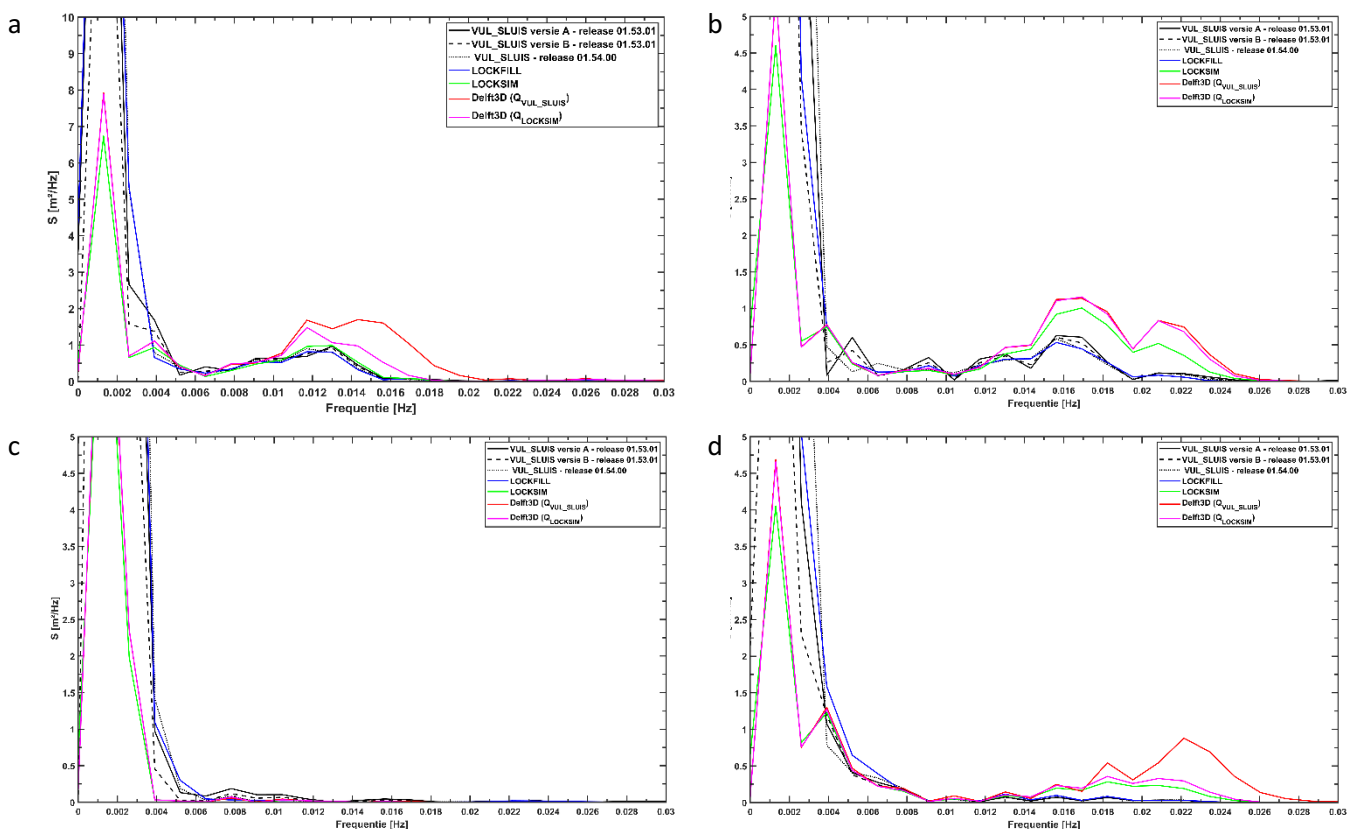
Figuur 19 – Statistische parameters voor vergelijking langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16.



In Figuur 20 en Figuur 21 is voor de in deze paragraaf beschouwde cases een grafische voorstelling gegeven van het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met de verschillende beschouwde programma's. Uit deze figuren volgt dat de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en deze berekend met LOCKFILL voor alle cases dezelfde frequenties bevatten (vb: tussen 0.006 Hz en 0.016 Hz voor Case01). De langskrachten berekend met LOCKSIM voor Case02, Case06, Case07, Case12 en Case16 bevatten iets meer hogere frequenties dan deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00. Voor Case01,

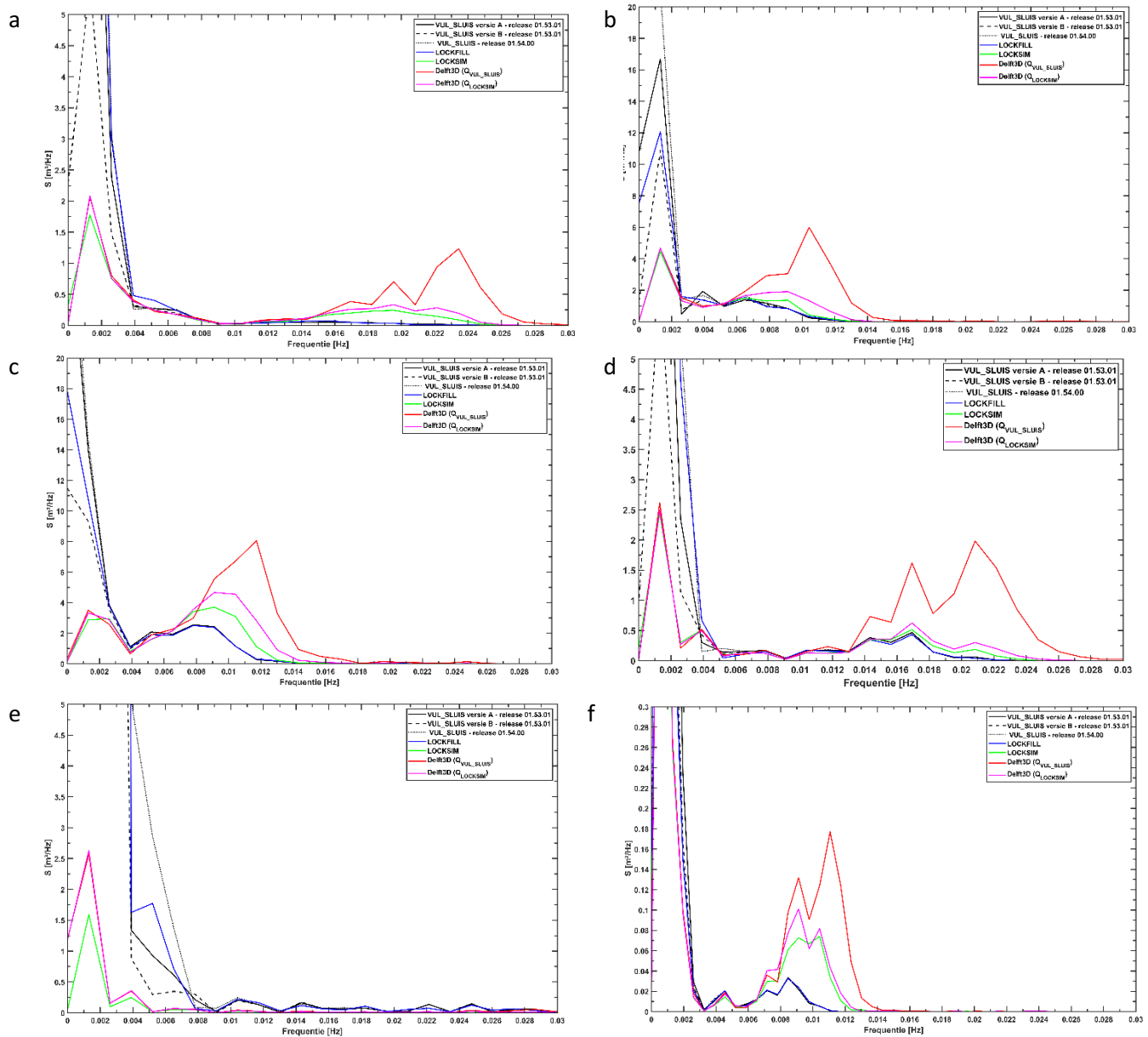
Case04, Case11 en Case13 bevat het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met LOCKSIM dezelfde frequenties als dit van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00. Het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten op het schip berekend met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input bevat iets meer hogere frequenties dan deze van de langskrachten berekend met de overige programma's. Het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten op het schip berekend met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input komt relatief goed overeen met dit van de langskrachten berekend met LOCKSIM. De hogere frequenties van de langskrachten berekend met LOCKSIM en Delft3D (zowel met debieten uit VUL_SLUIS als met debieten uit LOCKSIM als input) zijn ook merkbaar in de figuren met de variatie in de tijd van de langskrachten. De periode van de langskrachten op het schip berekend met Delft3D en met LOCKSIM wordt naar het einde van de nivellering tot duidelijk kleiner dan deze berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL. Dit is echter een gevolg van de numerieke dispersie, dewelke afhankelijk is van de invoerparameters van het programma. Analooq als bij de numerieke damping van de langskrachten geldt ook hier dat de invoerparameters in deze studie, om redenen van vergelijkbaarheid, gekozen zijn om de invoerparameters zoveel mogelijk te doen overeenkomen met de invoerparameters van de simulatie met VUL_SLUIS. Mogelijk is deze keuze van de invoerparameters wat betreft numerieke dispersie niet optimaal voor het betreffende programma.

Figuur 20 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor voor Case01, Case02, Case04 en Case06.



a: Case01; b: Case02; c: Case04; d: Case06.

Figuur 21 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16.



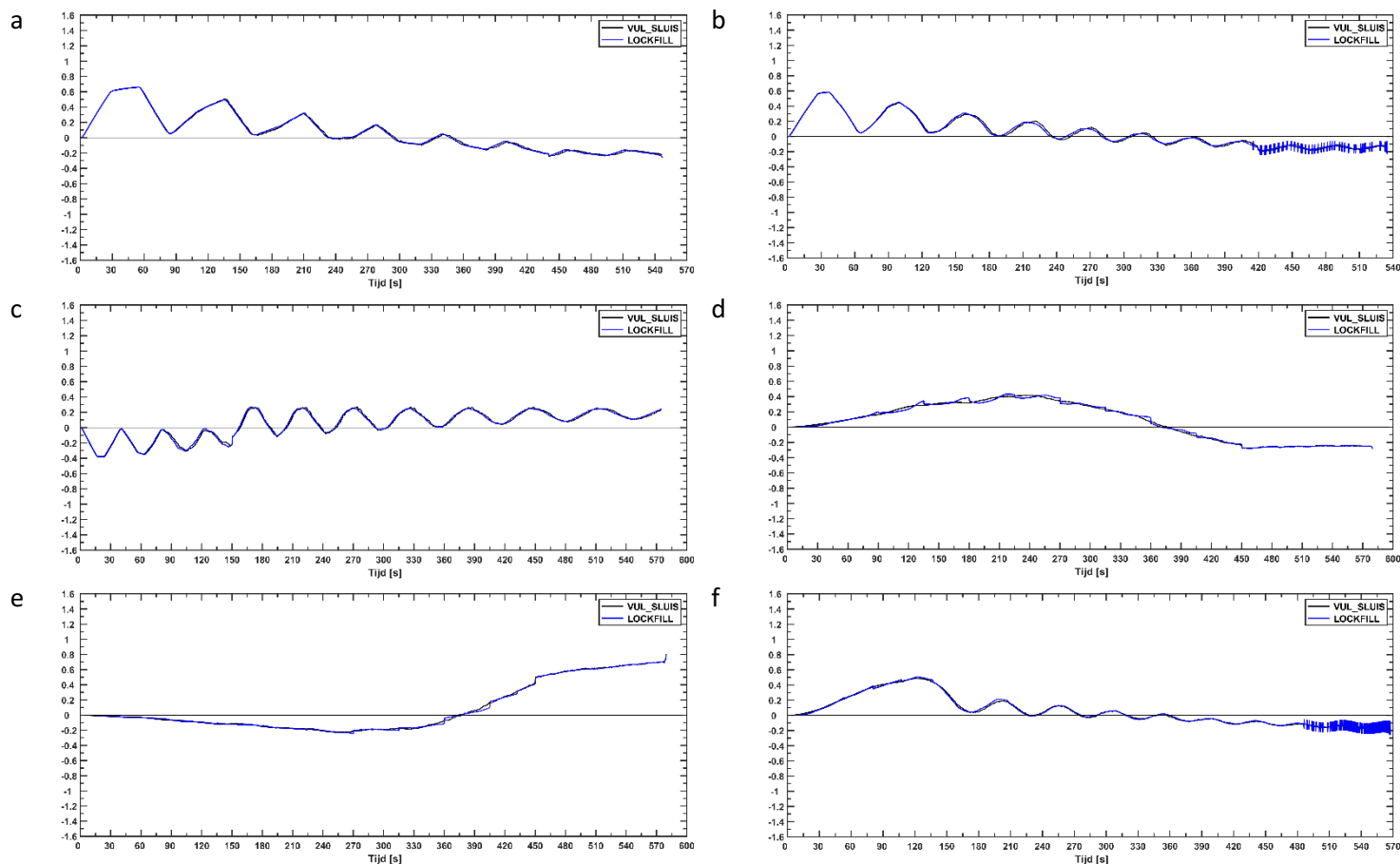
a: Case07; b: Case11; c: Case12; d: Case13; e: Case15; f: Case16

5.4 Vergelijking langskracht ten gevolge van translatiegolven berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS

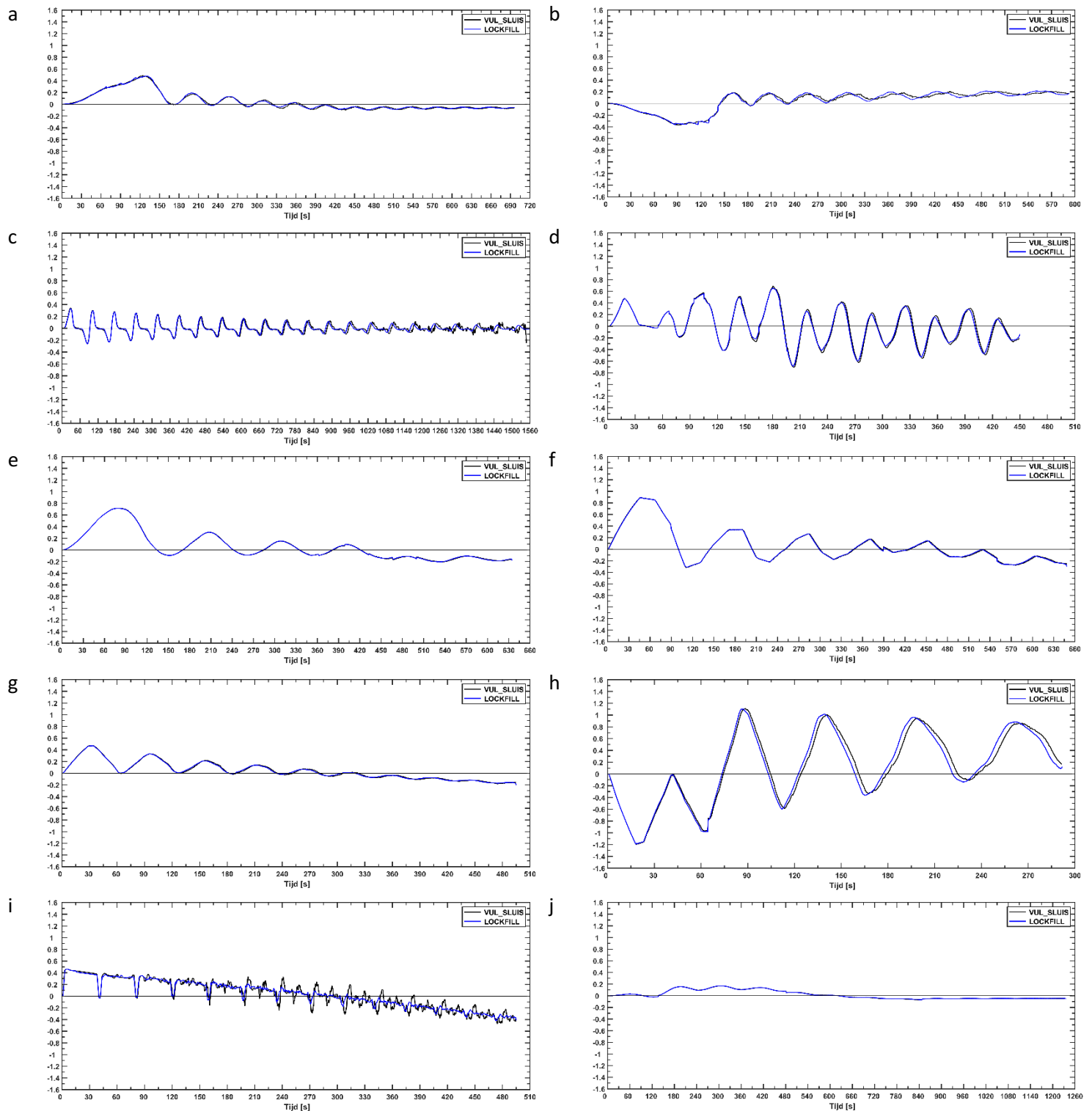
Figuur 22 en Figuur 23 vergelijken voor alle cases de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 met deze berekend met LOCKFILL. Uit deze figuren volgt dat met LOCKFILL en VUL_SLUIS voor de meeste cases eenzelfde langskracht ten gevolge van translatiegolven berekend wordt. Er worden wel zeer beperkte verschillen in de periode van de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven waargenomen. De verschillen in periode zijn het duidelijkst merkbaar bij Case08, Case09 en Case14. Voor deze cases hebben de langskrachten ten gevolge van translatiegolven berekend met LOCKFILL een iets kleinere periode dan deze berekend met VUL_SLUIS.

Uit Figuur 22 en Figuur 23 volgt ook dat de schommelingen in het verloop van de langskrachten berekend met LOCKFILL voor cases met vlinderkleppen, die in paragraaf 5.3 beschreven werden, zich voordoen in de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven. Bij Case04, Case05 en Case08 waren de schommelingen ook merkbaar in de totale langskracht op het schip, maar niet bij Case06 en Case07. Uit Figuur 22 volgt dat de schommelingen in de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven zowel merkbaar zijn bij Case04, Case05 en Case08 als bij Case06 en Case07. Deze schommelingen doen zich voornamelijk voor bij een stijging van de langskracht ten gevolge van translatiegolven. Daarnaast volgt uit Figuur 22 ook dat de hoogfrequente fluctuaties in de totale langskracht op het schip voor Case02 en Case06 berekend met LOCKFILL, ook aanwezig zijn in de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven en er volledig door veroorzaakt worden.

Figuur 22 – Vergelijking van de component van de langskracht [%] op het schip ten gevolge van translatiegolven berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL voor Case01, Case02, Case03, Case04, Case05, Case06.



Figuur 23 – Vergelijking van de component van de langskracht [%] op het schip ten gevolge van translatiegolven berekend met VUL_SLUIS, en LOCKFILL voor Case07, Case08, Case09, Case10, Case11, Case12, Case13, Case14, Case15 en Case16.



a: Case07, b: Case08; c: Case09; d: Case10; e: Case11; f: Case12; g: Case13; h: Case14; i: Case15; j: Case16.

5.5 Invloed vulstraalwerking en demping translatiegolven op totale langskracht op het schip

Uit de vergelijking van de variatie in de tijd van de totale langskracht op het schip berekend met VUL_SLUIS en deze berekend met de andere programma's voor vullen van een sluiskolk voor de cases waarbij alle componenten van de langskracht relevant zijn werd in paragraaf 5.3 besloten dat met VUL_SLUIS en LOCKFILL langskrachten op het schip berekend worden dewelke ongeveer gelijk zijn aan elkaar, maar beduidend groter zijn (vooral het negatieve extremum) dan deze berekend met LOCKSIM en Delft3D (zowel met de debieten uit VUL_SLUIS als met de debieten uit LOCKSIM als input). De verklaring hiervoor is dat VUL_SLUIS en LOCKFILL ook de invloed van de geconcentreerde vulstraal op het schip beschouwen in de impulsbalans van het schip in de sluiskolk. De geconcentreerde vulstraal op de boeg van het schip beïnvloedt de component van de langskracht ten gevolge van impulsafname en de component van de langskracht ten gevolge van vulstraalwerking. In LOCKSIM en Delft3D wordt deze invloed niet in rekening gebracht, vermits ze de waterbeweging in de kolk beschrijven met de 1D respectievelijk 2DH ondiep-water-vergelijkingen en bijgevolg enkel de sectiegemiddelde respectievelijk de dieptegemiddelde stroomsnelheid gebruiken. Enkel door toepassing van een impulscorrectiecoëfficiënt zouden ze enigszins rekening kunnen houden met niet-uniforme snelheidsprofielen, maar daar wordt in de hier beschouwde LOCKSIM en Delft3D simulaties geen gebruik van gemaakt. Om dit te illustreren zijn de simulaties voor de 16 beschouwde cases opnieuw uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.54.00, maar waarbij de invloed van de geconcentreerde vulstraal op de impulsbalans van het schip in de sluiskolk niet meer beschouwd wordt. Hierbij wordt de optie 'VULSTRAAL = N' bij het gedeelte '8.0 SPECIAL' in de inputfile toegepast (zie Verelst *et al.* (2016b) en Verelst *et al.* (2017)).

Daarnaast zijn de simulaties voor de 16 beschouwde cases ook nog eens uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.54.00 waarbij zowel de optie 'VULSTRAAL = N' als de optie 'LOSLATING = N' bij het gedeelte '8.0 SPECIAL' in de inputfile toegepast is. Hierbij wordt de invloed van loslating aan hek, respectievelijk boeg van het schip op de langskracht ten gevolge van impulsafname bij vullen, respectievelijk ledigen van de sluiskolk niet in rekening gebracht. Als laatste is ook nog eens de waarde van de parameter CE_2 met betrekking tot de demping van translatiegolven verlaagd van 0.40 naar 0.05, analoog als uitgevoerd in de gevoeligheidsanalyse in Verelst *et al.* (2017). De waarde $CE_2 = 0.05$ komt overeen met de waarde die ook door Deltares in simulaties met LOCKFILL voor de nieuwe sluis van Terneuzen is toegepast.

In Figuur 24 en Figuur 25 wordt voor alle cases de variatie in de tijd van de langskracht op het schip berekend met LOCKSIM en Delft3D (zowel met de debieten uit VUL_SLUIS als met de debieten uit LOCKSIM als input) vergeleken met de langskracht op het schip berekend met:

- VUL_SLUIS release 01.54.00 met 'VULSTRAAL = N' in de inputfile (in de figuren aangeduid met '*geen vulstraal*').
- VUL_SLUIS release 01.54.00 met 'VULSTRAAL = N' en 'LOSLATING = N' in de inputfile (in de figuren aangeduid met '*geen vulstraal, geen loslating*').
- VUL_SLUIS release 01.54.00 met 'VULSTRAAL = N' en 'LOSLATING = N' in de inputfile en wijziging van de waarde van de parameter CE_2 naar 0.05 (in de figuren aangeduid met '*geen vulstraal, geen loslating en $CE_2 = 0.05$* ').

Aangezien de hierboven beschreven wijzigingen niet mogelijk zijn in de standaard versie van LOCKFILL, wordt niet vergeleken met de langskrachten berekend met LOCKFILL. Met betrekking tot de langskrachten berekend met VUL_SLUIS wordt opgemerkt dat in de figuren de langskracht zonder invloed van de geconcentreerde vulstraal voorgesteld zijn. Deze is als volgt berekend:

$$F_{\text{langs,geenvulstraal}} = F_{\text{transl}} + F_{\text{impuls,geen vulstraal}} + F_{\text{wrijving}}$$

Met:

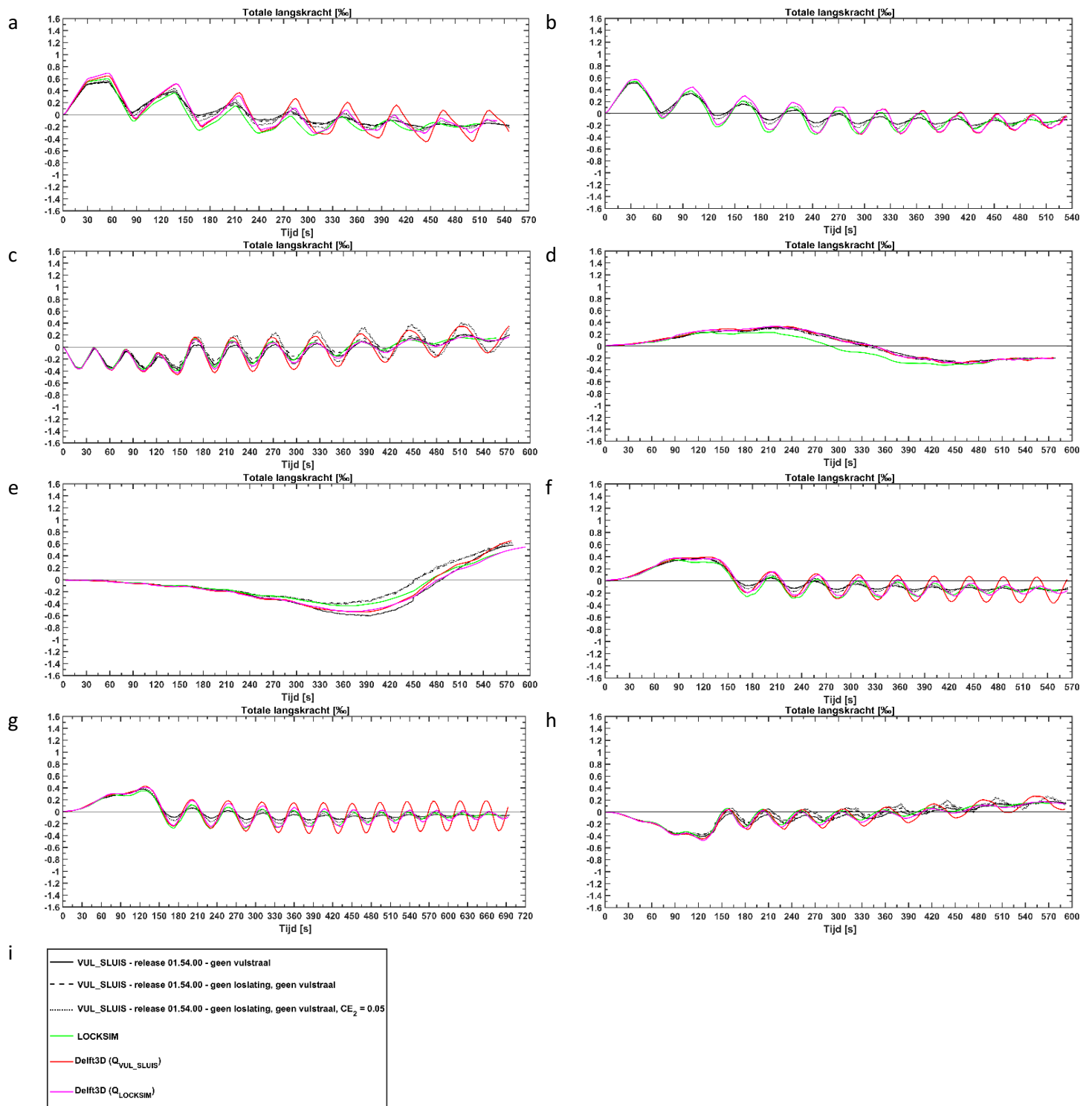
- $F_{\text{langs,geenvulstraal}}$	Langskracht op het schip zonder invloed van geconcentreerde vulstraal	[‰]
- F_{transl}	Langskracht op het schip ten gevolge van translatiegolven	[‰]
- $F_{\text{impuls,geenvulstraal}}$	Langskracht op het schip ten gevolge van impulsafname zonder invloed van geconcentreerde vulstraal	[‰]
- F_{wrijving}	Langskracht op het schip ten gevolge van wrijving	[‰]

Naast een grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de berekende langskrachten, zijn ook de bias, root-mean square error en de goodness-of-fit berekend voor volgende vergelijkingen:

- Tijdsreeks van langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal met de tijdsreeks van langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating aan boeg en hek van het schip
- Tijdsreeks van langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal met de tijdsreeks van langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en met aanpassing van de coëfficiënt voor demping van translatiegolven.
- Tijdsreeks van langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en met aanpassing van de coëfficiënt voor demping van translatiegolven met de tijdsreeks van langskrachten berekend met LOCKSIM.
- Tijdsreeks van langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en met aanpassing van de coëfficiënt voor demping van translatiegolven met de tijdsreeks van langskrachten berekend met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input.
- Tijdsreeks van langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en met aanpassing van de coëfficiënt voor demping van translatiegolven met de tijdsreeks van langskrachten berekend met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input.

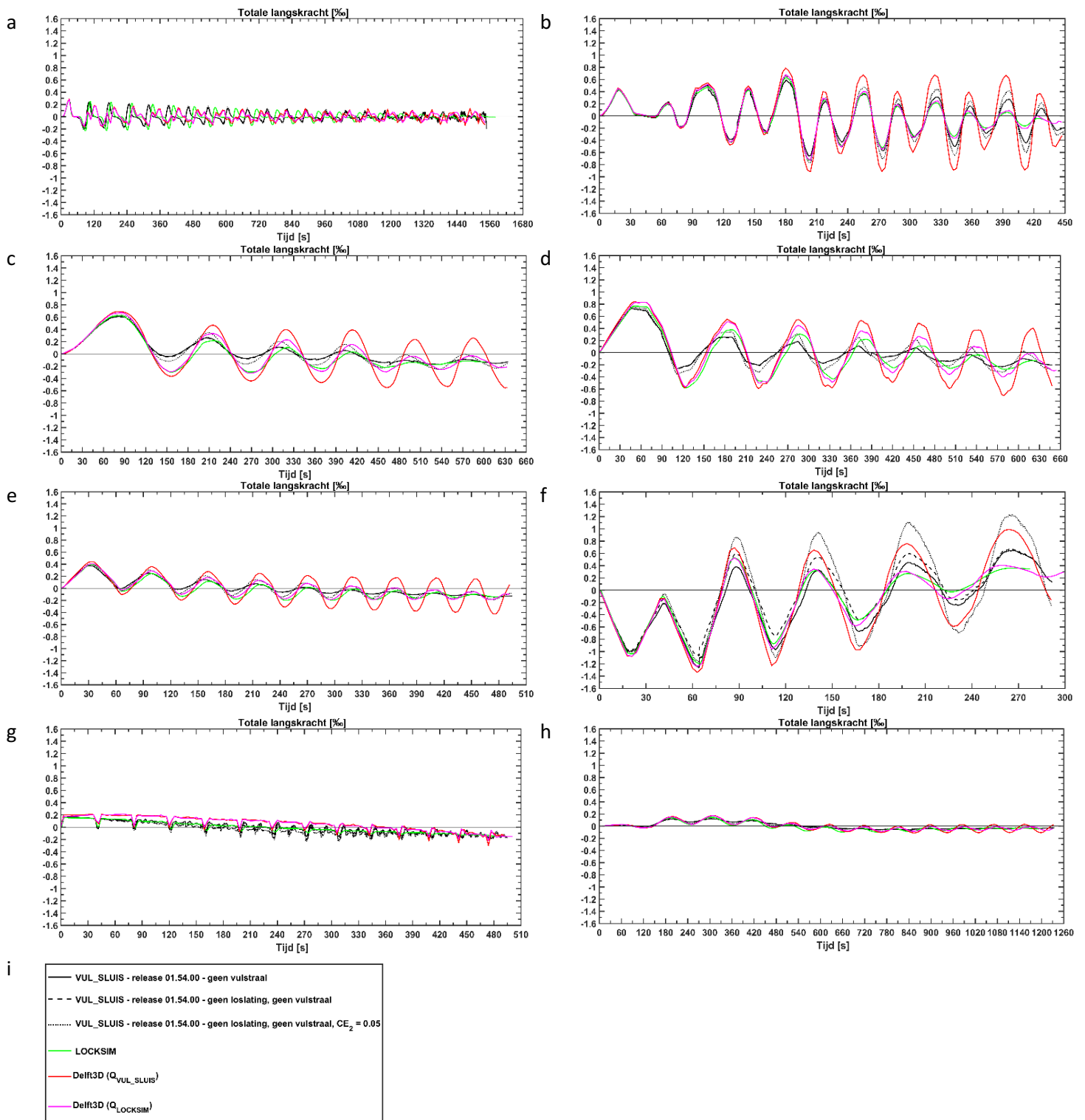
De waarden van deze statistische parameters voor deze vergelijkingen zijn gegeven in Tabel 24 in Bijlage 1 en grafisch voorgesteld in Figuur 26.

Figuur 24 – Vergelijking van de langskracht [%] (zonder invloed van vulstraal) op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case03, Case04, Case05, Case06, Case07 en Case08.



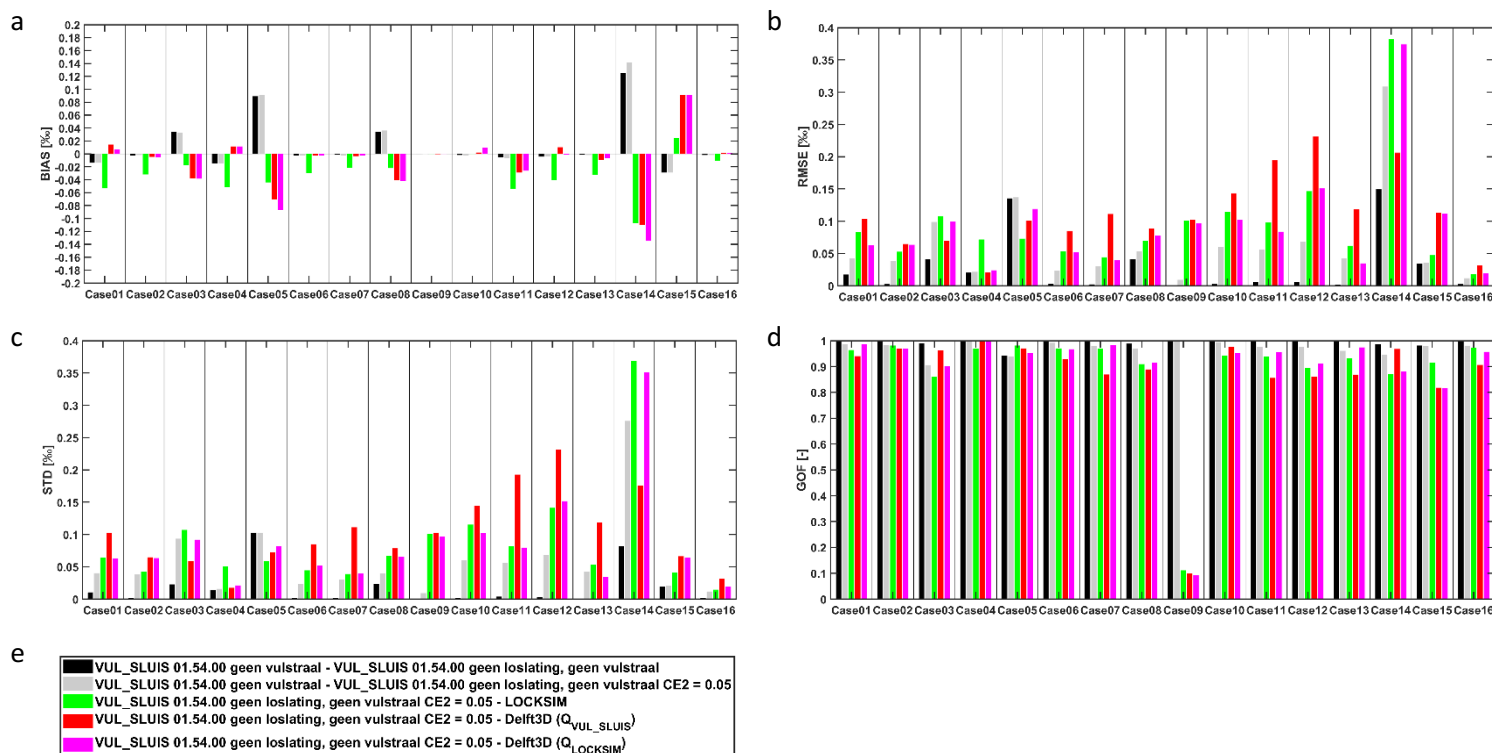
a: Case01; b: Case02; c: Case03; d: Case04; e: Case05; f: Case06; g: Case07; h: Case08; i: legende figuren.

Figuur 25 – Vergelijking van de langskracht [%] (zonder invloed van vulstraal) op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D voor Case09, Case10, Case11, Case12, Case13, Case14, Case15 en Case16.



a: Case09; b: Case10; c: Case11; d: Case12; e: Case13; f: Case14; g: Case15; h: Case16; i: legende figuren.

Figuur 26 – Statistische parameters voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKSIM en Delft3D.



a: bias; b: rmse; c: std; d: gof; e: legende figuren

Uit de grafische voorstelling van de variatie van de langskracht in de tijd (Figuur 24 en Figuur 25) volgt dat bij de cases met betrekking tot vullen van een sluis loslating aan het hek van het schip de berekende langskracht nauwelijks beïnvloedt. Enkel bij ledigen van een sluis (Case03, Case05, Case08 en Case14) wordt een iets grotere invloed op de langskracht waargenomen. Het verlagen van de parameter CE_2 naar 0.05, wat de demping van translatiegolven beïnvloedt, heeft voor alle cases een iets grotere invloed op de langskracht dan de loslating aan boeg of hek van het schip. De amplitude van de berekende langskracht wordt iets groter bij verlaging van de parameter CE_2 . Bij Case09 en Case15 wordt geen invloed van de verlaging van de parameter CE_2 waargenomen.

De iets grotere invloed van de verlaging van de parameter CE_2 op de berekende langskracht op het schip volgt ook uit Tabel 24 in Bijlage 1 met de statistische parameters. Enkel bij de cases met betrekking tot ledigen (Case03, Case05, Case08 en Case14) wordt een bias tot 0.12 ‰ en een standaarddeviatie tot 0.10 ‰ berekend bij vergelijking van de tijdsreeks zonder vulstraal met deze zonder vulstraal en zonder loslating. Voor de overige cases met betrekking tot vullen van de sluis is de bias beperkt tot 0.03 ‰ en de standaarddeviatie tot 0.02 ‰. Uit de vergelijking van de tijdsreeks na wijziging van de parameter CE_2 zonder invloed van vulstraal en loslating met de tijdsreeks zonder invloed van vulstraalwerking volgt eenzelfde bias als bij de vorige vergelijking, maar een grotere standaarddeviatie (zowel bij vullen als ledigen van de sluis). Dit duidt op een grotere invloed van de verlaging van de parameter CE_2 naar 0.05 op de langskrachten dan de invloed van loslating aan boeg of hek van het schip.

Uit de vergelijking van de variatie in de tijd van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en na wijziging van de parameter CE_2 met deze berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D volgt dat de wijziging van de parameter CE_2 ervoor heeft gezorgd dat de langskrachten voor alle cases, met uitzondering van Case03 en Case14, dichter gelegen zijn bij de deze berekend met LOCKSIM. Bij Case03 en Case14 zijn de met VUL_SLUIS berekende langskrachten hoger dan deze berekend met LOCKSIM en Delft3D. Bij Case10 doet zich naar het einde van de nivellering toe een

grotere demping voor van de langskrachten berekend met LOCKSIM. Om die reden worden ook voor deze case met VUL_SLUIS langskrachten berekend die hoger zijn dan deze berekend met LOCKSIM, maar nog lager dan deze met Delft3D.

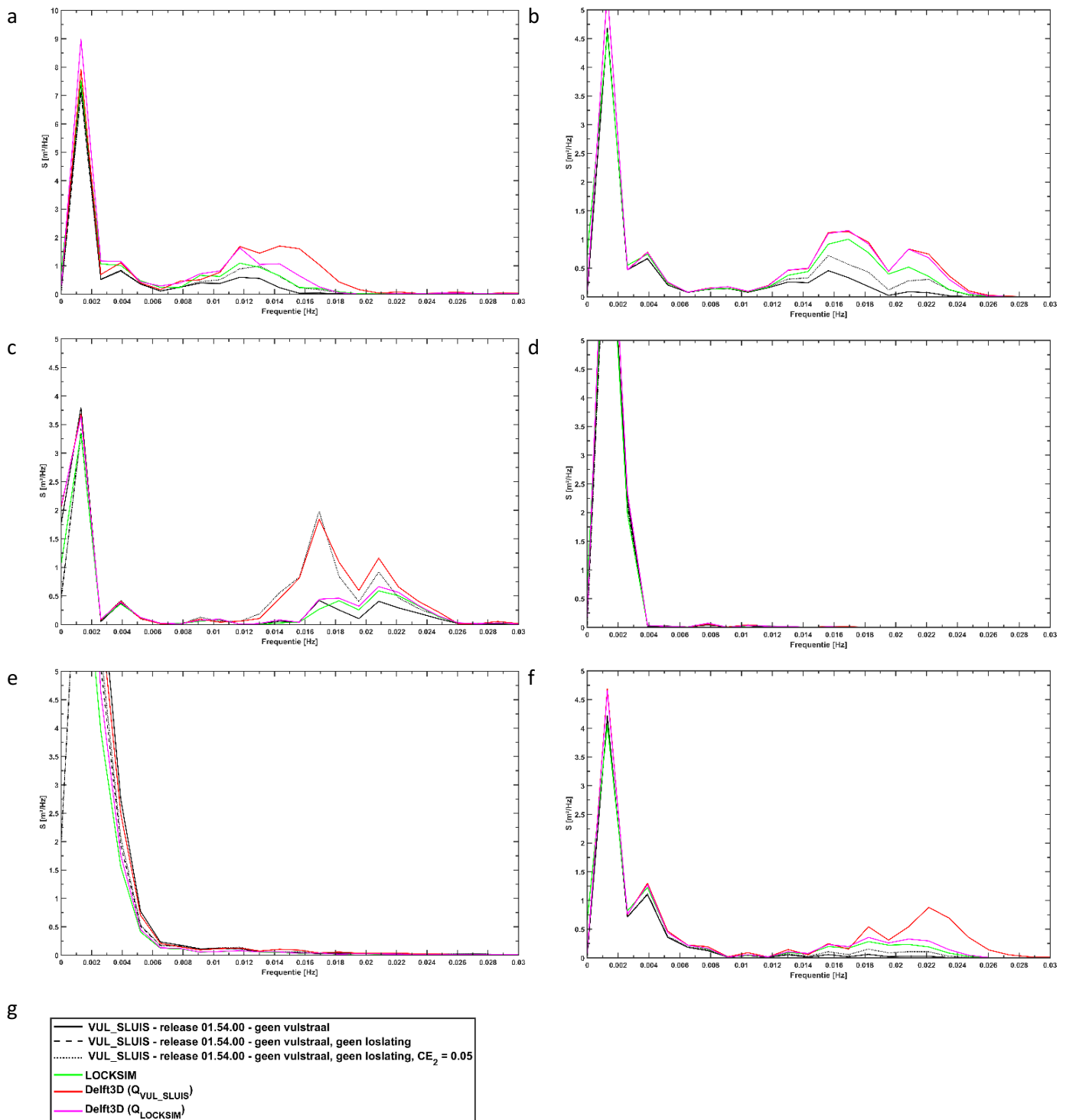
Het voorgaande kan ook besloten worden uit de berekende statistische parameters. Voor de meeste cases wordt een negatieve bias berekend bij vergelijking van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en na wijziging van de parameter CE_2 met deze berekend met LOCKSIM. De bias bedraagt voor de meeste cases tot -0.05 ‰ en is enkel voor Case14 gelijk aan -0.11 ‰. Voor Case09 en Case10 is de bias gelijk aan 0.00 ‰ en voor Case15 is deze positief (0.02 ‰). De root-mean-square error en de standaarddeviatie bedragen voor bijna alle cases maximaal 0.15 ‰. Enkel voor Case14 wordt een grotere root-mean-square error van 0.38 ‰ en een grotere standaarddeviatie van 0.37 ‰ berekend. Met uitzondering van Case14, wordt bij vergelijking van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en na wijziging van de parameter CE_2 met deze berekend met Delft3D een bias van maximaal 0.13 ‰ berekend (zowel met de debieten uit VUL_SLUIS als deze uit LOCKSIM als input) en een root-mean-square error en standaarddeviatie gelijk 0.23 ‰, respectievelijk 0.15 ‰ bij toepassing van de debiet uit VUL_SLUIS, respectievelijk LOCKSIM in Delft3D als input. Voor Case14 wordt een bias van 0.11 ‰, respectievelijk 0.13 ‰ berekend bij vergelijking van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en na wijziging van de parameter CE_2 met deze berekend met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS respectievelijk LOCKSIM als input en een root-mean-square error en standaarddeviatie gelijk aan 0.21 ‰, respectievelijk 0.37 ‰.

Voor Case15, een simulatie met recreatievaart in de sluis, worden beperkte verschillen tussen de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en na wijziging van de parameter CE_2 en deze berekend met LOCKSIM en Delft3D waargenomen (een bias van maximaal 0.09 ‰ en een root-mean-square error van maximaal 0.11 ‰). De gemiddelde waarde van de langskracht berekend met LOCKSIM valt samen met deze berekend met VUL_SLUIS. Met Delft3D worden beperkt hogere langskrachten berekend, dewelke eenzelfde variatie in de tijd vertonen als de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en LOCKSIM. Worden de waarden van deze statistische parameters vergeleken met de beduidend hogere waarden uit Tabel 23 voor de simulaties met invloed van geconcentreerde vulstraal (een bias van maximaal 3.69 ‰ en een root-mean-square error van maximaal 4.43 ‰) dan volgt hieruit dat de grotere negatieve component van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 het gevolg is van de invloed van de geconcentreerde vulstraal op de langskracht ten gevolge van impulsafname.

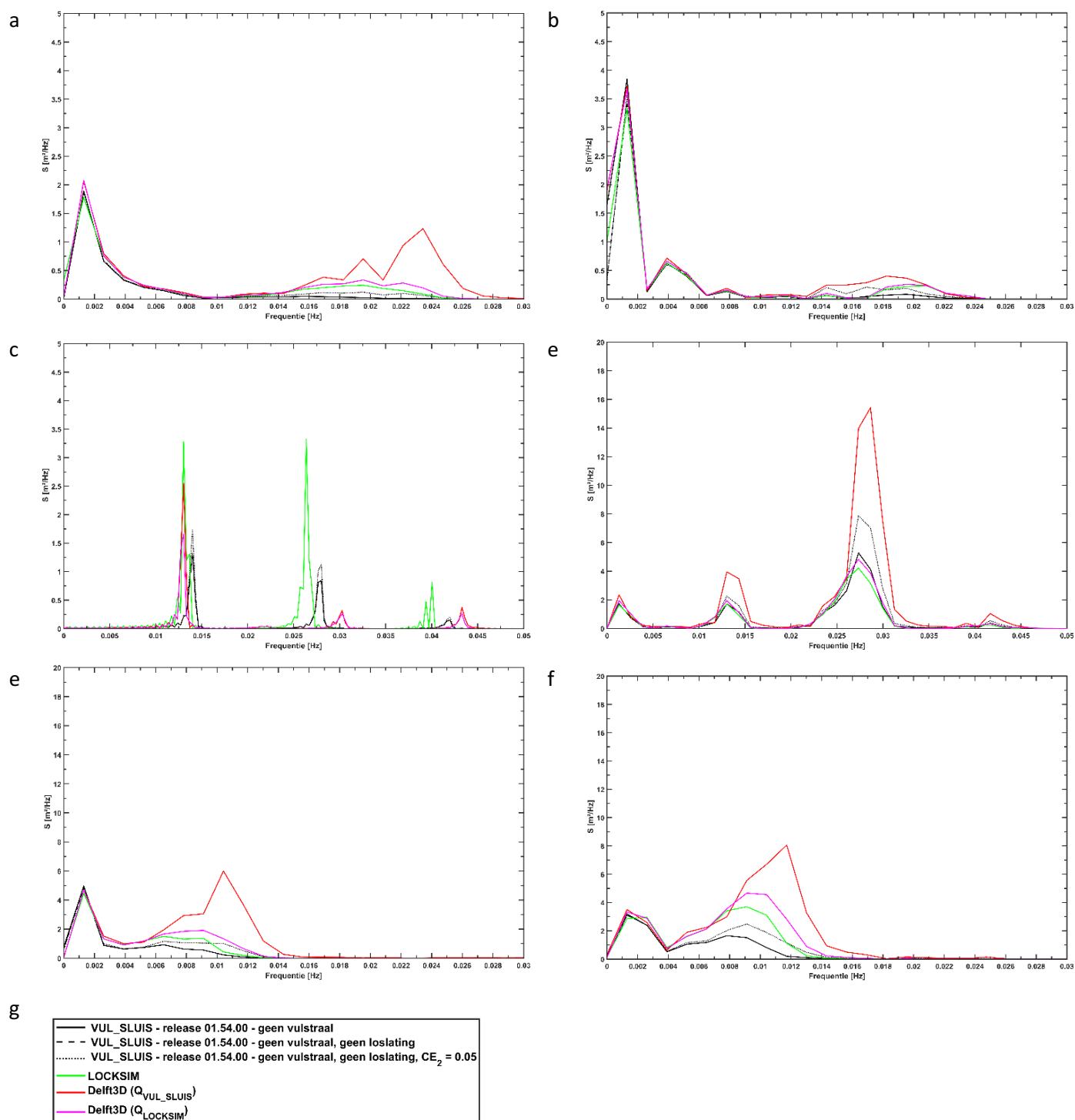
Figuur 27 en Figuur 28 vergelijken voor alle beschouwde cases het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten op het schip berekend met de speciale simulaties van VUL_SLUIS met dit van de langskrachten berekend met LOCKSIM en Delft3D (met de debieten uit VUL_SLUIS en met de debieten uit LOCKSIM als input). Uit deze figuren volgt voor Case03 en Case14 met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en na aanpassing van de parameter CE_2 langskrachten berekend worden met dezelfde frequenties als berekend met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input ten gevolge van de invloed van loslating van de vulstraal aan het hek van het schip. Bij Case10 zijn in het variantiedensiteitsspectrum van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS dezelfde frequenties aanwezig als in dit berekend met LOCKSIM en in dit berekend met Delft3D. De variantiedensiteit van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en na aanpassing van de parameter CE_2 ligt echter dichter bij deze berekend met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input dan bij deze berekend met LOCKSIM en deze berekend met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input. Voor de overige cases is de variantiedensiteit van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zonder invloed van vulstraal en loslating en na aanpassing van de parameter CE_2 lager dan deze berekend met LOCKSIM, dewelke ongeveer gelijk is aan deze berekend met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input en beduidend lager dan deze berekend met Delft3D met debieten uit VUL_SLUIS als input. Daarnaast zorgen, met uitzondering van Case03 en Case14, de wijzigingen aan VUL_SLUIS er niet voor dat in het variantiedensiteitsspectrum van de berekende langskrachten op het schip meer frequenties

aanwezig zijn. De waarde van de variantiedensiteit voor een bepaalde frequentie stijgt of daalt wel, maar frequenties met variantiedensiteit gelijk aan 0 blijven deze waarde behouden.

Figuur 27 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D.

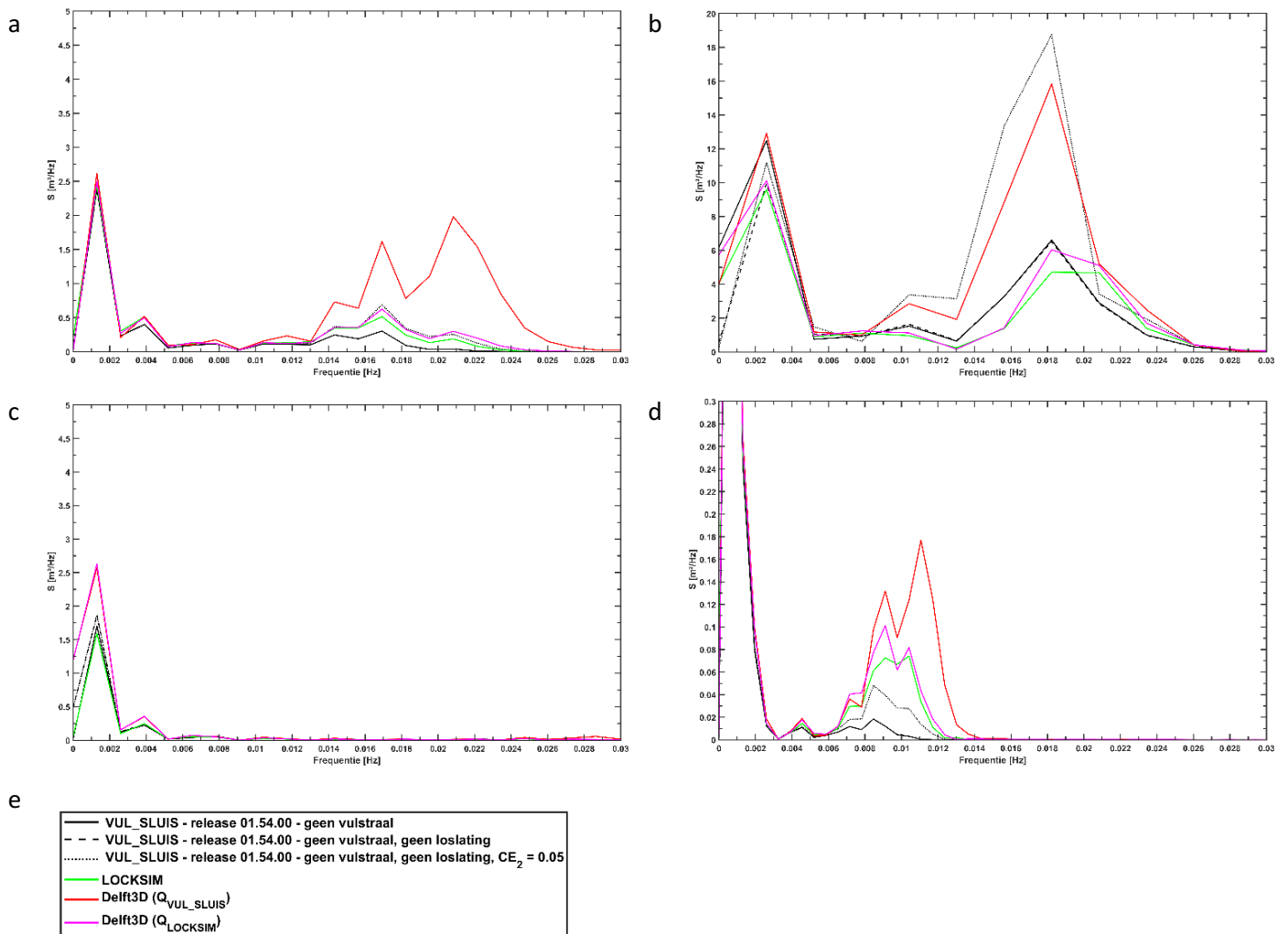


Figuur 28 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D.



a: Case07; b: Case08; c: Case09; d: Case10; e: Case11; f: Case12; g: legende figuren.

Figuur 29 – Variantiedensiteitsspectra voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS, LOCKSIM en Delft3D.



a: Case13; b: Case14; c: Case15; d: Case16; e: legende figuren.

6 Gevoeligheidsanalyses

6.1 Algemeen

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van een aantal uitgevoerde gevoeligheidsanalyses.

In VUL_SLUIS release 01.54.00 wordt bij de berekening van de impuls in de vulstraat een spiegeling van het snelheidsprofiel uitgevoerd. In paragraaf 6.2 wordt nagegaan wat de invloed is van het spiegelen van het snelheidsprofiel op de berekende langskracht op het schip en worden de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 gebruik makend van enerzijds spiegelen van het snelheidsprofiel en anderzijds niet spiegelen van het snelheidsprofiel vergeleken met de langskrachten berekend met LOCKFILL.

In paragraaf 6.3 wordt voor de simulaties met LOCKSIM de invloed op de berekende langskrachten van de lengte van de interne componenten, de invloed van de tijdstap en de invloed van de gewichtsfactor in het Preismann-oplossingsschema onderzocht. Daarnaast wordt in paragraaf 6.4 nagegaan wat de invloed is van de celgrootte, de horizontale eddy viscositeit en de ruwheid op de langskrachten op het schip berekend met Delft3D.

6.2 Spiegeling snelheidsprofiel bij simulaties met VUL_SLUIS

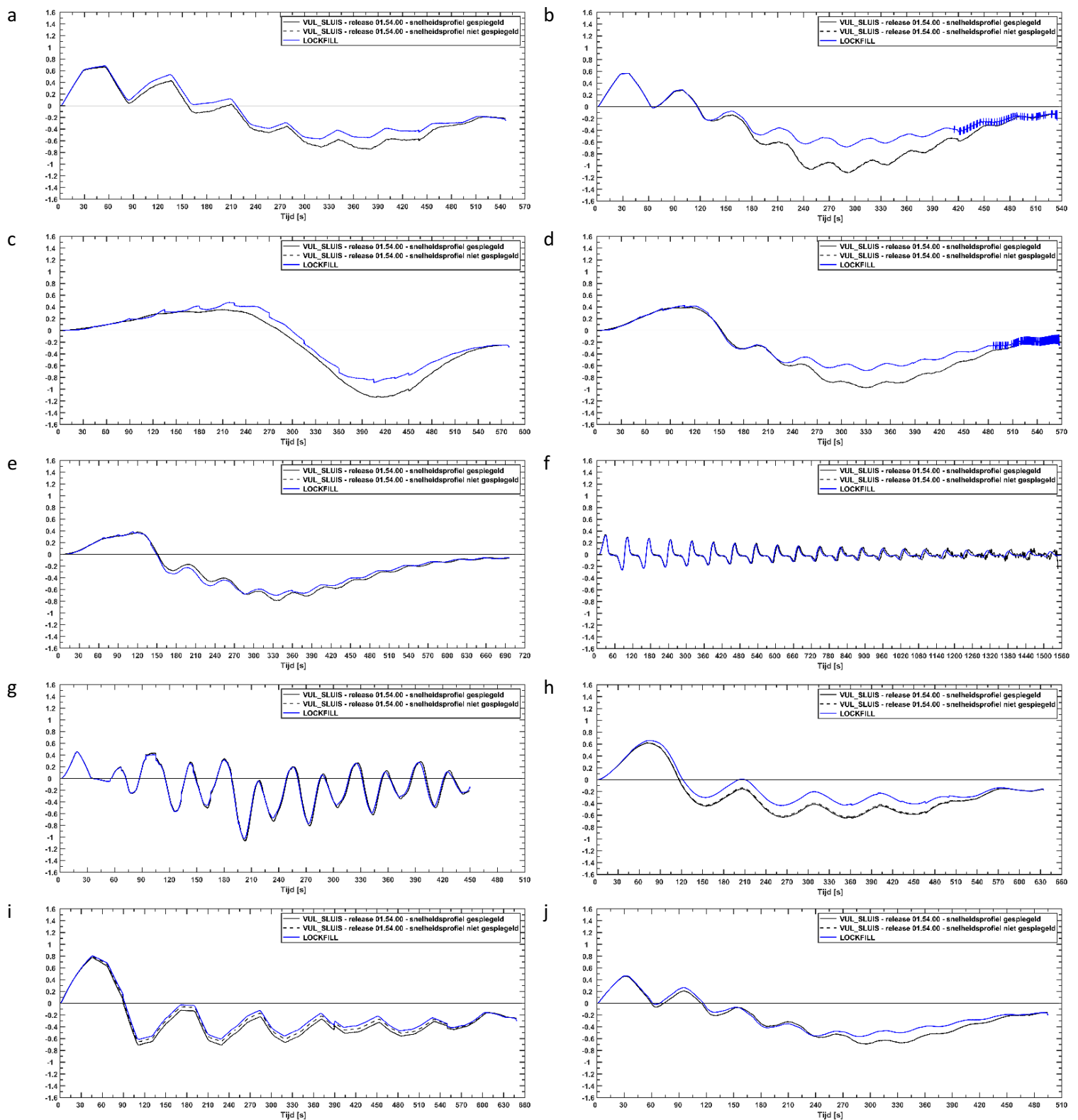
De bepaling van het debiet en impuls in de vulstraat in VUL_SLUIS release 01.54.00 wordt uitgevoerd zoals beschreven in Verelst *et al.* (2017) en Schindfessel & De Mulder (2017). Hierbij wordt ter plaatse van de boeg van het schip een snelheidsprofiel berekend. Het is mogelijk dat een deel van dit berekende snelheidsprofiel lager is gelegen dan de bodem van de sluiskolk of hoger dan het wateroppervlak. Indien dit het geval is, wordt het gedeelte van het snelheidsprofiel dat buiten de wand of het wateroppervlak valt gespiegeld ten opzichte van de wand of het wateroppervlak en bij het overige gedeelte van het snelheidsprofiel opgeteld. Dit wordt standaard uitgevoerd in VUL_SLUIS release 01.54.00.

Uit hoofdstuk 5 volgt dat bij vullen van een sluiskolk de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 nog afwijken van deze berekend met LOCKFILL. In deze paragraaf wordt nagegaan of het al dan niet spiegelen van het snelheidsprofiel invloed heeft op de berekende langskrachten op het schip en of hierdoor een betere overeenkomst met LOCKFILL bekomen wordt. Om die reden zijn voor alle beschouwde cases de simulaties opnieuw uitgevoerd met VUL_SLUIS release 01.54.00, maar waarbij in de subroutine VUL_SLUIS_impuls_straal.m de spiegeling van het snelheidsprofiel niet wordt uitgevoerd.

Figuur 30 en Figuur 31 vergelijken de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, zowel met als zonder het uitvoeren van de spiegeling van het snelheidsprofiel, met de langskrachten berekend met LOCKFILL. Aangezien de berekening van debiet en impuls in de vulstraat enkel wordt uitgevoerd bij vullen van een sluiskolk, worden enkel deze cases getoond in deze figuren.

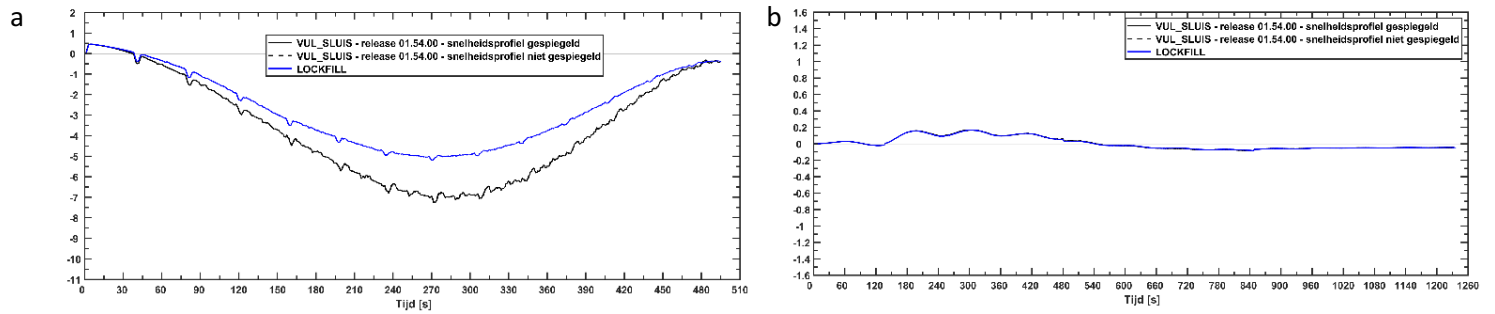
Uit deze beide figuren volgt dat voor de meeste cases het niet spiegelen van het snelheidsprofiel geen invloed heeft op de berekende langskrachten op het schip. Enkel bij Case11 en Case12 wordt bij niet spiegelen van het snelheidsprofiel een iets kleinere (negatieve) langskracht op het schip berekend, waardoor voor deze cases een iets betere overeenkomst met de langskrachten berekend met LOCKFILL bekomen wordt.

Figuur 30 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip [%] berekend met VUL_SLUIS (gespiegeld en niet-gespiegeld snelheidsprofiel) en LOCKFILL voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case09, Case10, Case11, Case12 en Case13.



a: Case01; b: Case02; c: Case04; d: Case06; e: Case07; f: Case09; g: Case10; h: Case11; i: Case12; j: Case13.

Figuur 31 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip [%] berekend met VUL_SLUIS (gespiegeld en niet-gespiegeld snelheidsprofiel) en LOCKFILL voor Case15 en Case16.



a: Case15; b: Case16.

6.3 Lengte interne componenten, tijdstap en gewichtsfactor van het Preismann-schema bij LOCKSIM-simulaties

Voor alle cases zijn de simulaties met LOCKSIM uitgevoerd met een tijdstap van 0.20 s, i.e. dezelfde tijdstap als bij de simulaties met VUL_SLUIS en LOCKFILL. Voor de componenten met een vrij wateroppervlak wordt hierbij een lengte van 1.0 m beschouwd voor de lengte van de interne componenten (zie paragraaf 3.3). De simulaties met Delft3D worden voor alle cases, met uitzondering van Case09 en Case16, uitgevoerd met een rekenrooster met een celgrootte van 0.25 m. Bij Case09 en Case16 bedraagt de celgrootte van het rekenrooster 0.50 m. De tijdstap voor de Delft3D-simulaties bedraagt voor alle cases 0.001 min (= 0.060 s).

In deze paragraaf worden de simulaties met LOCKSIM voor alle cases opnieuw uitgevoerd met een lengte voor de interne componenten van de elementen met een vrij wateroppervlak gelijk aan de celgrootte van het rekenrooster van Delft3D (0.50 m voor Case09 en Case16 en 0.25 m voor de overige cases). Om te voldoen aan het Courant-criterium dient de tijdstap bijgevolg ook verlaagd te worden. Gebruik makend van de formulering in paragraaf 3.3 geeft Tabel 7 de resultaten van de minimale waarde voor de tijdstap van een simulatie bij toepassing van een lengte van 0.50 m voor de interne componenten bij Case09 en Case16 en 0.25 m bij de overige cases. Op basis van de waarden in deze tabel wordt een tijdstap van 0.025 s beschouwd voor deze simulaties.

Deze tijdstap is iets lager dan de tijdstap waarmee de simulaties met Delft3D uitgevoerd zijn, namelijk 0.06 s. Als tweede gevoeligheidsanalyse is daarna de tijdstap van de simulaties voor alle cases bij toepassing van een lengte van 0.50 m voor de interne componenten bij Case09 en Case16 en 0.25 m bij de overige cases verhoogd naar 0.06 s.

Tabel 19 – Berekening minimale tijdstap LOCKSIM-simulatie

Case	Breedte sluiskolk	Minimale waterdiepte	Lengte componenten	Minimale Tijdstap
	[m]	[m]	[m]	[s]
Case01	16.0	3.70	0.25	0.020
Case02	22.0	5.33	0.25	0.017
Case03	22.0	5.33	0.25	0.017
Case04	16.0	3.70	0.25	0.020
Case05	16.0	3.70	0.25	0.020
Case06	22.0	5.33	0.25	0.017
Case07	22.0	5.33	0.25	0.017
Case08	22.0	5.33	0.25	0.017
Case09	57.0	17.53	0.50	0.021
Case10	25.0	5.17	0.25	0.016
Case11	12.5	4.71	0.25	0.023
Case12	16.0	4.71	0.25	0.020
Case13	10.5	4.23	0.25	0.025
Case14	10.5	4.23	0.25	0.025
Case15	10.5	4.23	0.25	0.025
Case16	55.0	14.33	0.50	0.022

Figuur 32 tot en met Figuur 35 vergelijken de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL en Delft3D (zowel met debieten uit VUL_SLUIS als debieten uit LOCKSIM als input) met de volgende langskrachten berekend met LOCKSIM:

- Berekend met een lengte van de interne componenten gelijk aan 1.00 m en tijdstap 0.200 s,
- Berekend met een lengte van de interne componenten gelijk aan 0.25 m (0.50 m voor Case09 en Case16 en een tijdstap 0.025 s
- Berekende met een lengte van interne componenten gelijk aan 0.25 m (0.50 m voor Case09 en Case16) en een tijdstap 0.060 s.

In deze figuren is voor elke beschouwde case ook de variatie in de tijd van het Courant-getal tijdens de simulatie weergegeven. Hierbij wordt opgemerkt dat voor elke simulatie zowel voor een sectie zonder schip als voor een sectie met schip de waarde van de standaard plot-variabelen CRMIN en CRMAX in LOCKSIM is opgevraagd. Deze plot-variabelen zijn als volgt gedefinieerd:

$$CRMIN = (U - c) \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

$$CRMAX = (U + c) \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

met:

- CRMIN, CRMAX	Minimale en maximale waarde van het Courant-getal	[-]
- Δt	Tijdstap	[s]
- Δx	Lengte interne componenten	[m]
- U	Stroomsnelheid	[m/s]
- c	Golfvoortplantingssnelheid	[m/s]

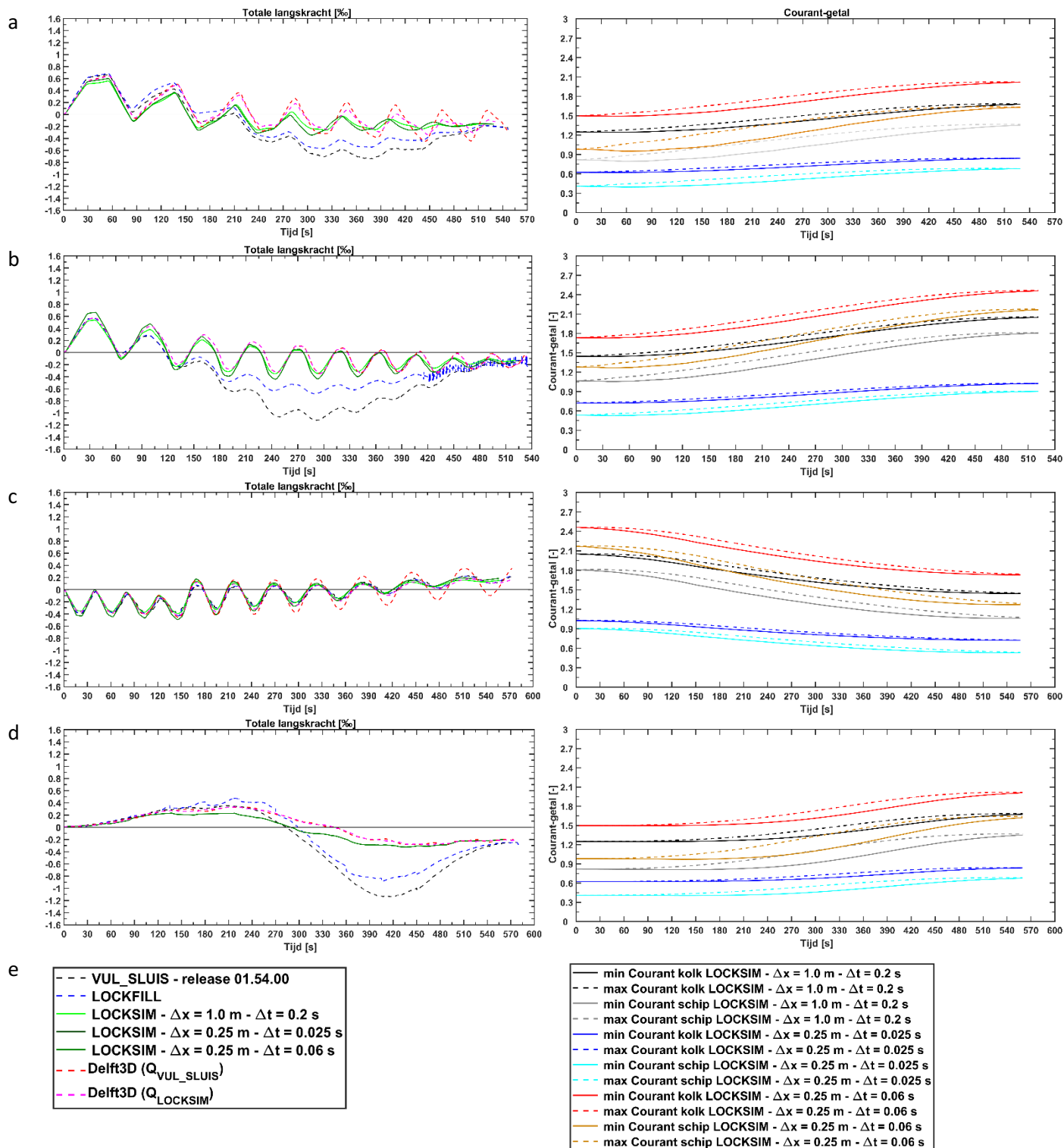
Uit Figuur 32 tot en met Figuur 35 volgt dat de wijziging van de lengte van de interne componenten naar 0.25 m (0.50 m voor Case09 en Case16) en de tijdstap van de simulatie naar 0.025 s enkel bij Case01, Case02, Case06, Case10, Case11 en Case12 een invloed heeft op de berekende langskrachten op het schip. Bij Case02, Case06, Case10 en Case11 is de invloed op de berekende langskrachten zeer beperkt, bij Case01 en Case12 is deze invloed iets groter. Met uitzondering van Case01 betreft deze invloed voornamelijk een toename van de amplitude van de berekende langskrachten. Voor Case01 wordt ook een beperkte toename in de periode van de berekende langskrachten op het schip waargenomen. De wijziging van de tijdstap van de simulatie van 0.025 s naar 0.06 s bij een lengte van de interne componenten gelijk aan 0.25 m (0.50 m voor Case09 en Case16) heeft voor alle cases geen invloed op de berekende langskrachten op het schip.

De visualisatie van de variatie in de tijd van het Courant-getal tijdens de simulatie leert dat het Courant getal bij een lengte van de interne componenten gelijk aan 1.0 m en een tijdstap van 0.2 s hoger is dan 1.0, zoals aanbevolen in de handleiding van LOCKSIM. Met uitzondering van Case09 varieert het Courant-getal tussen 1.2 en 2.0. Bij Case09 wordt een Courant-getal gelijk aan 2.7 berekend. Het wijzigen van de lengte van de interne componenten naar 0.25 m (0.50 m voor Case09 en Case16) en de tijdstap naar 0.025 s zorgt ervoor dat het Courant-getal voor alle simulaties tijdens de volledige duur van de simulatie lager is dan 1.0. Het vergroten van de tijdstap naar 0.06 s, analoog als bij de simulaties met Delft3D, zorgt voor een toename van het Courant-getal. Met uitzondering van Case09 varieert het Courant-getal tussen 1.7 en 2.5. Voor Case09 wordt bij deze simulatie een Courant-getal gelijk aan 1.5 berekend.

Naast de invloed van de lengte van de interne componenten en de invloed van de tijdstap op de berekende langskrachten is ook de invloed van de parameter θ van het Preismann-oplossingsschema onderzocht. Standaard is de waarde van de parameter θ gelijk aan 0.55. Als gevoeligheidsanalyse is de waarde van deze parameter verhoogd naar 0.65. Figuur 36 en Figuur 37 vergelijken de langskrachten berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL en Delft3D met de langskrachten berekend met LOCKSIM met deze beide waarden voor de parameter θ van het Preismann-oplossingsschema. Voor alle cases hebben de langskrachten berekend met een waarde 0.65 voor de parameter θ een beperkt lagere amplitude dan deze berekend met een waarde 0.55 voor de parameter θ . Enkel voor Case06 worden beperkte verschillen in langskrachten

tussen de simulaties met beide waarden voor de parameter θ berekend, voor de overige simulaties zijn de verschillen verwaarloosbaar.

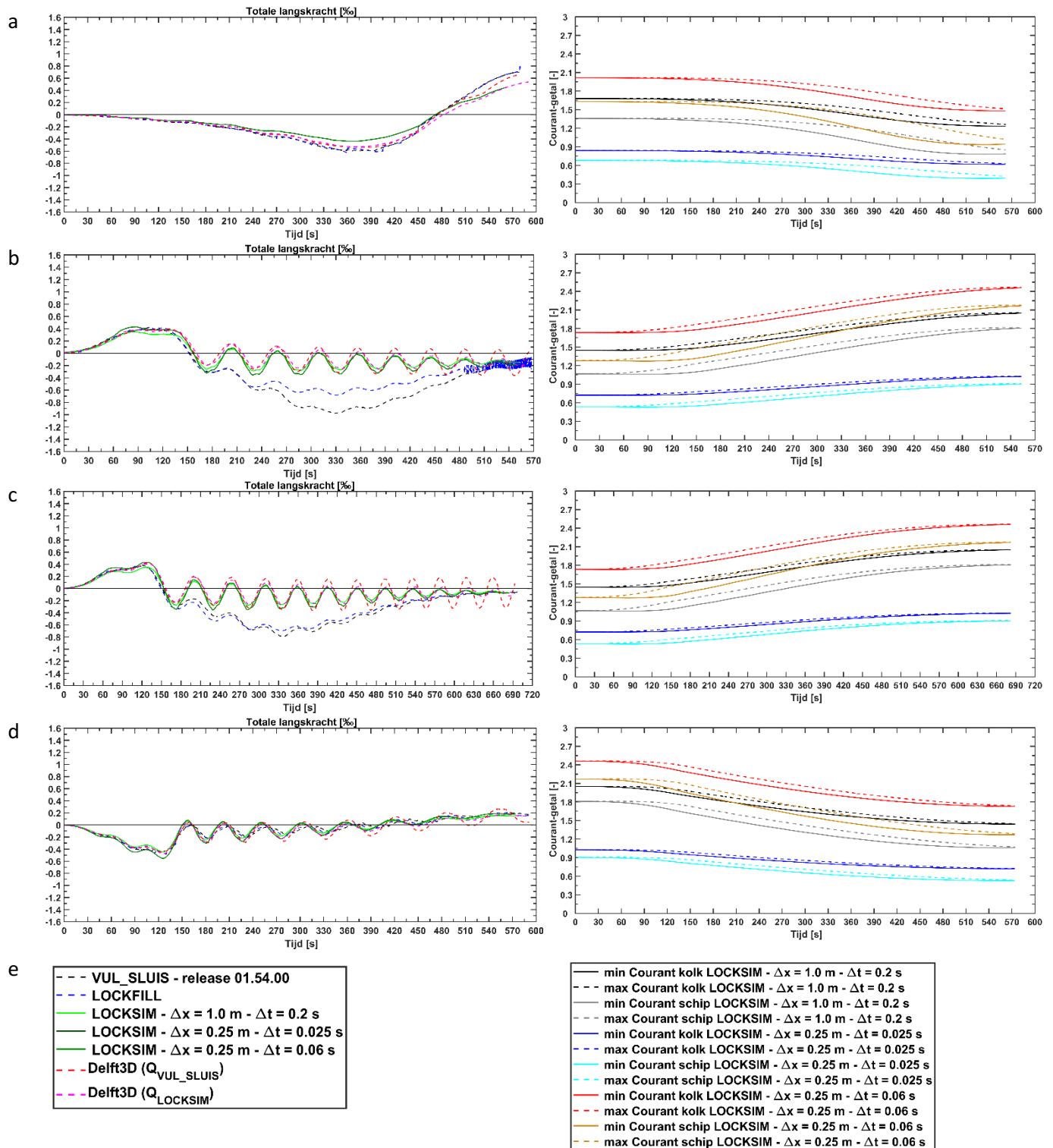
Figuur 32 – Variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed wijziging Δx en Δt) en Delft3D en variatie in de tijd van het Courant-getal in LOCKSIM voor Case01, Case02, Case03 en Case04.



a: Case01; b: Case02; c: Case03; d: Case04; e: legende figuren;

links: Variatie in de tijd van de langskracht op het schip; rechts: Variatie in de tijd van Courant-getal tijdens LOCKSIM-simulatie.

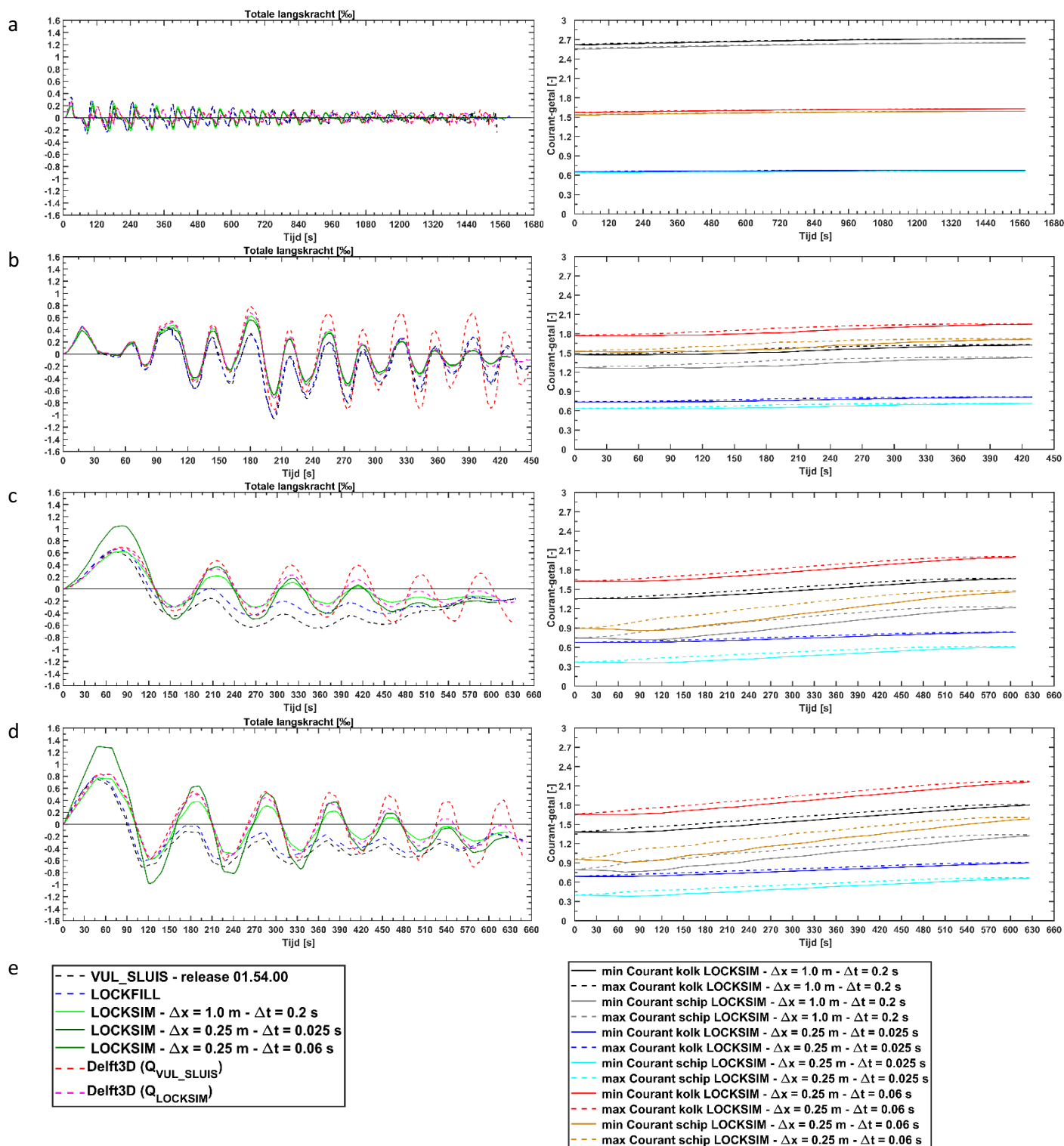
Figuur 33 – Variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed wijziging Δx en Δt) en Delft3D en variatie in de tijd van het Courant-getal in LOCKSIM voor Case05, Case06, Case07 en Case08.



a: Case05; b: Case06; c: Case07; d: Case08; e: legende figuren;

links: Variatie in de tijd van de langskracht op het schip; rechts: Variatie in de tijd van Courant-getal tijdens LOCKSIM-simulatie.

Figuur 34 – Variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed wijziging Δx en Δt) en Delft3D en variatie in de tijd van het Courant-getal in LOCKSIM voor Case09, Case10, Case11 en Case12.

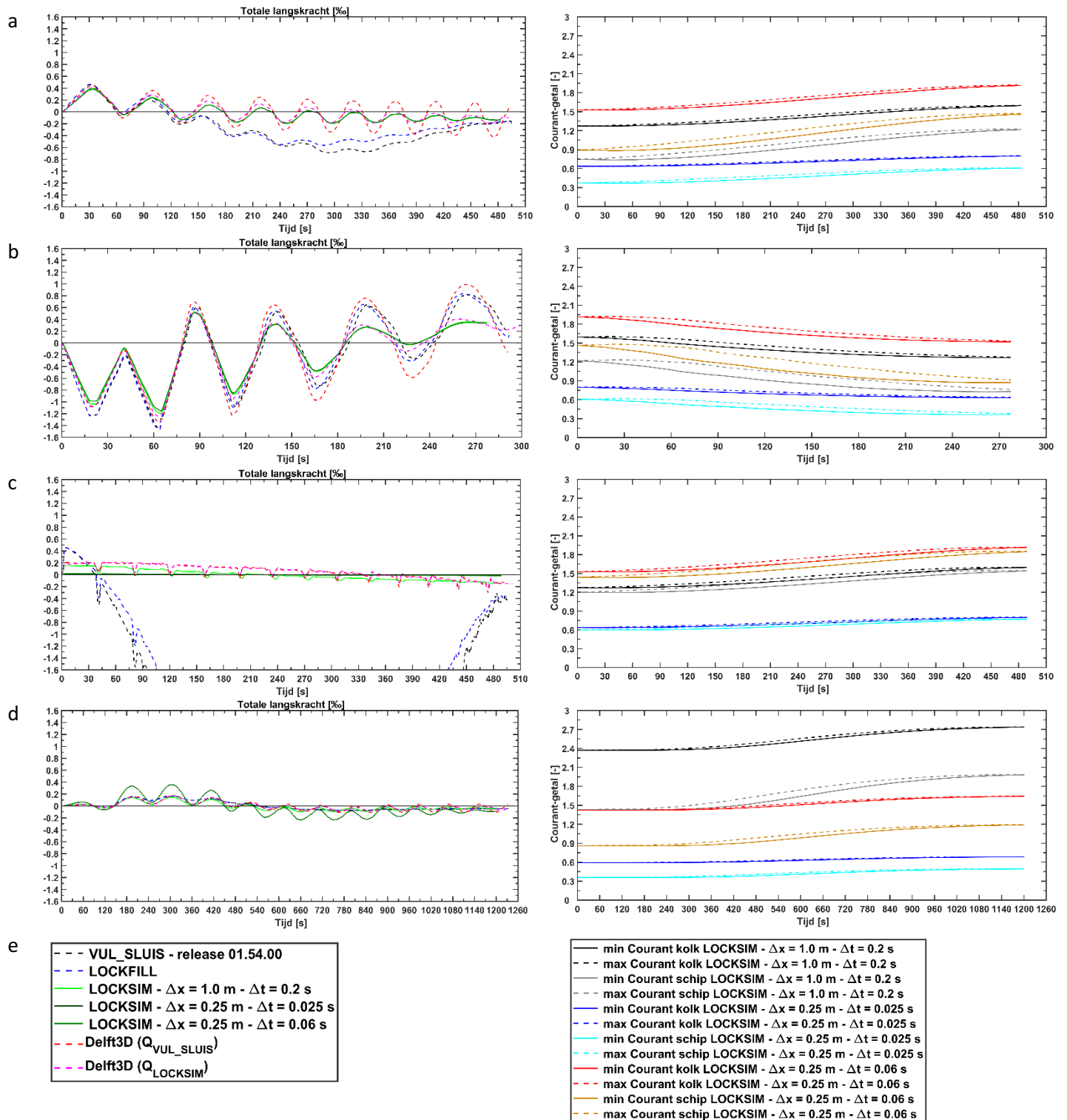


a: Case09; b: Case10; c: Case11; d: Case12; e: legende figuren;

links: Variatie in de tijd van de langskracht op het schip; rechts: Variatie in de tijd van Courant-getal tijdens LOCKSIM-simulatie.

Voor Case09 is $\Delta x = 0.50$ m en $\Delta t = 0.025$ s en $\Delta x = 0.50$ m en $\Delta t = 0.060$ s.

Figuur 35 – Variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed wijziging Δx en Δt) en Delft3D en variatie in de tijd van het Courant-getal in LOCKSIM voor Case13, Case14, Case15 en Case16.

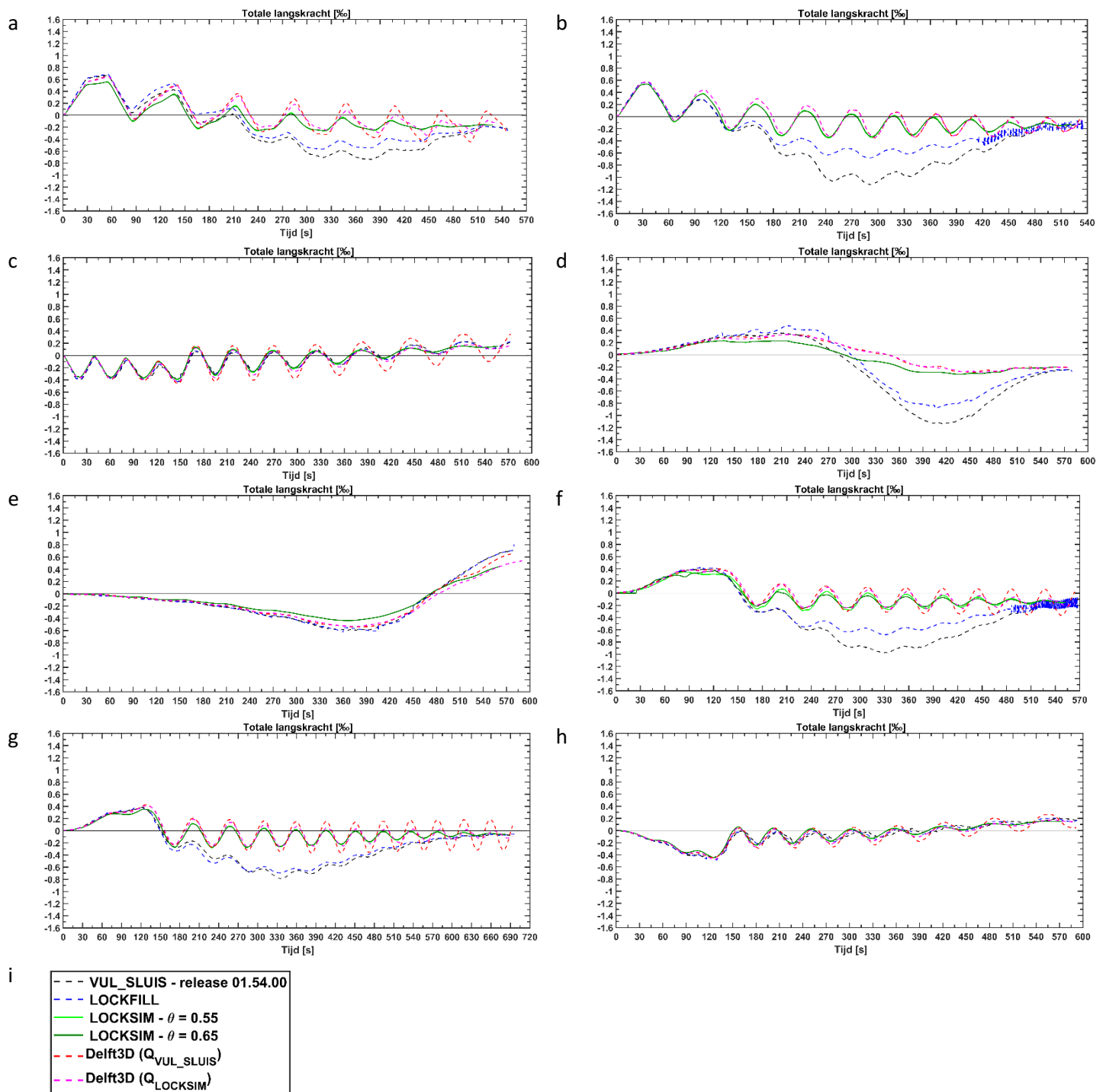


a: Case13; b: Case14; c: Case15; d: Case16; e: legende figuren;

links: Variatie in de tijd van de langskracht op het schip; rechts: Variatie in de tijd van Courant-getal tijdens LOCKSIM-simulatie.

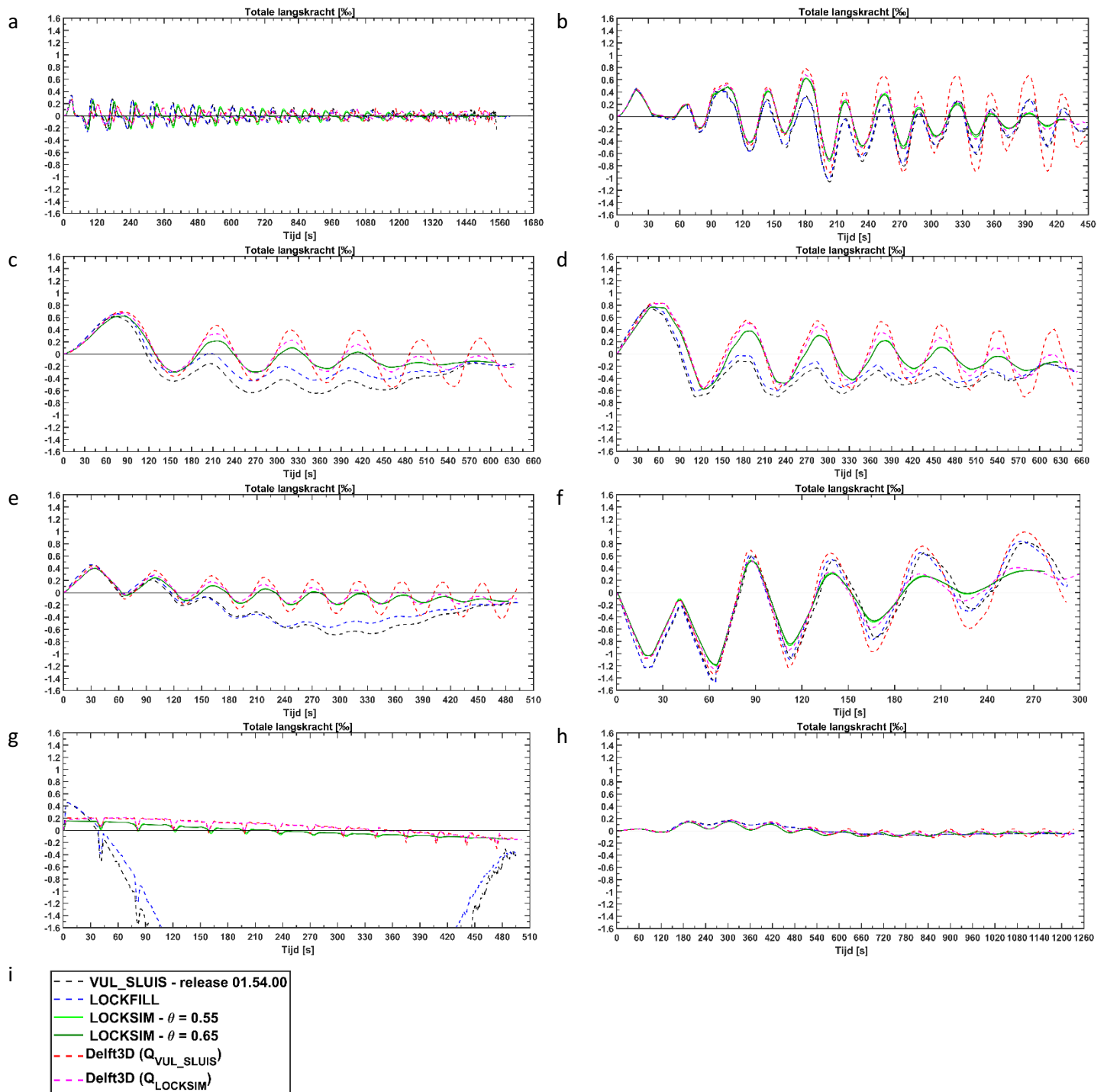
Voor Case16 is $\Delta x = 0.50 \text{ m}$ en $\Delta t = 0.025 \text{ s}$ en $\Delta x = 0.50 \text{ m}$ en $\Delta t = 0.060 \text{ s}$.

Figuur 36 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed gewichtsfactor θ Preismann-schema) en Delft3D voor Case01, Case02, Case03, Case04, Case05, Case06, Case07 en Case08.



a: Case01; b: Case02; c: Case03; d: Case04; e: Case05; f: Case06; g: Case07; h: Case08; i: legende figuren.

Figuur 37 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM (invloed gewichtsfactor θ Preismann-schema) en Delft3D voor Case09, Case10, Case11, Case12, Case13, Case14, Case15 en Case16.



a: Case09; b: Case10; c: Case11; d: Case12; e: Case13; f: Case14; g: Case15; h: Case16; i: legende figuren.

6.4 Celgrootte, horizontale eddy viscositeit en ruwheid bij Delft3D-simulaties

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van een aantal gevoeligheidsanalyses die uitgevoerd zijn met betrekking tot de simulaties met Delft3D. Aangezien de rekentijd voor een simulatie met Delft3D (enkele uren, zie Tabel 11) beduidend langer is dan deze voor simulaties met VUL_SLUIS (30 s à 1 minuut), LOCKFILL (grootteorde 30 s) en LOCKSIM (enkele minuten), zullen de in deze paragraaf vermelde gevoeligheidsanalyses uitgevoerd worden voor een beperkt aantal cases en niet voor alle cases zoals in de vorige paragrafen.

De Delft3D-simulaties zijn uitgevoerd met een horizontale eddy viscositeit gelijk aan $0.025 \text{ m}^2/\text{s}$. De toegepaste waarde voor de horizontale eddy viscositeit is groter dan de waarde $0.002 \text{ m}^2/\text{s}$ die aan de hand van de vuistregel $\nu_{hor} = 0.1 U \Delta x$ in paragraaf 3.4 werd bepaald. Als eerste gevoeligheidsanalyse worden de simulaties voor Case01, Case06, Case11, Case13 en Case16 herhaald met een horizontale eddy viscositeit gelijk aan $0.002 \text{ m}^2/\text{s}$.

Daarnaast zijn de Delft3D-simulaties uitgevoerd met een waarde k_s voor de ruwheid gelijk aan 0.005 m . Deze waarde is dezelfde als toegepast in de simulaties met VUL_SLUIS en LOCKFILL. De simulaties voor de nieuwe sluizen van het Panama-kanaal zijn echter uitgevoerd met een waarde k_s voor de ruwheid gelijk aan 0.025 m , wat beduidend hoger is dan 0.005 m . Om de invloed van de hogere waarde voor k_s op de berekende langskrachten na te gaan zijn de simulaties voor Case01, Case06, Case11, Case13 en Case16 opnieuw uitgevoerd met een waarde voor k_s gelijk aan 0.025 m .

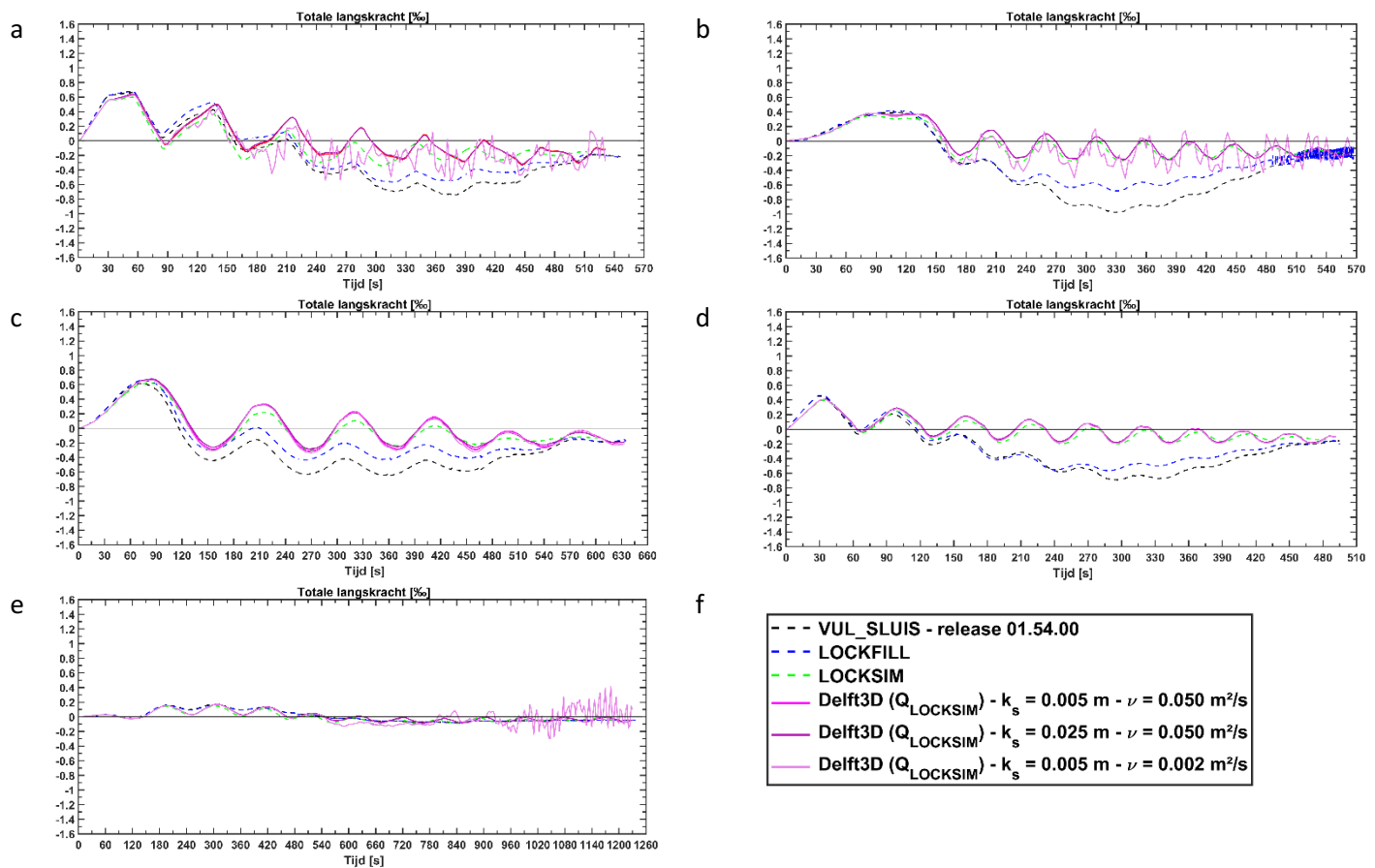
Voor deze 5 cases vergelijkt Figuur 38 de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL en LOCKSIM met deze berekend met Delft3D. Wat de Delft3D-simulaties betreft worden in deze figuren de langskrachten getoond voor volgende simulaties:

- ruwheidswaarde k_s gelijk aan 0.005 m een horizontale eddy viscositeit gelijk aan $0.050 \text{ m}^2/\text{s}$,
- ruwheidswaarde k_s gelijk aan 0.005 m een horizontale eddy viscositeit gelijk aan $0.002 \text{ m}^2/\text{s}$,
- ruwheidswaarde k_s gelijk aan 0.025 m een horizontale eddy viscositeit gelijk aan $0.050 \text{ m}^2/\text{s}$

Uit hoofdstuk 5 volgt dat de langskrachten op het schip berekend met Delft3D met de debieten uit LOCKSIM als input een betere overeenkomst vertonen met de langskrachten op het schip berekend met LOCKSIM dan deze berekend met Delft3D met de debieten uit VUL_SLUIS als input. Om die reden zijn de simulaties uit deze paragraaf als gevoeligheidsanalyse enkel uitgevoerd met de debieten uit LOCKSIM als input voor Delft3D.

Uit deze figuur volgt dat voor al deze cases het verhogen van de ruwheid van de kolkbodem geen invloed heeft op de berekende langskrachten op het schip. Het verlagen van de horizontale eddy viscositeit van $0.050 \text{ m}^2/\text{s}$ naar $0.002 \text{ m}^2/\text{s}$ heeft geen invloed op de berekende langskrachten bij Case11, Case13 en Case16. Bij Case01, Case06 en Case16 worden met deze lagere waarde voor de horizontale eddy viscositeit langskrachten berekend dewelke naar het einde van de nivellering toe een zeer fluctuerende variatie in de tijd kennen. Omwille van het ontstaan van deze bijkomende fluctuaties, waarvoor niet echt een verklaring is gevonden, is binnen dit project ervoor gekozen om de simulaties met Delft3D uit te voeren met een waarde voor de horizontale eddy viscositeit gelijk aan $0.050 \text{ m}^2/\text{s}$.

Figuur 38 – Vergelijking van de variatie in de tijd van totale kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D (invloed ruwheid en horizontale eddy viscositeit) voor Case01, Case06, Case11, Case13 en Case16.

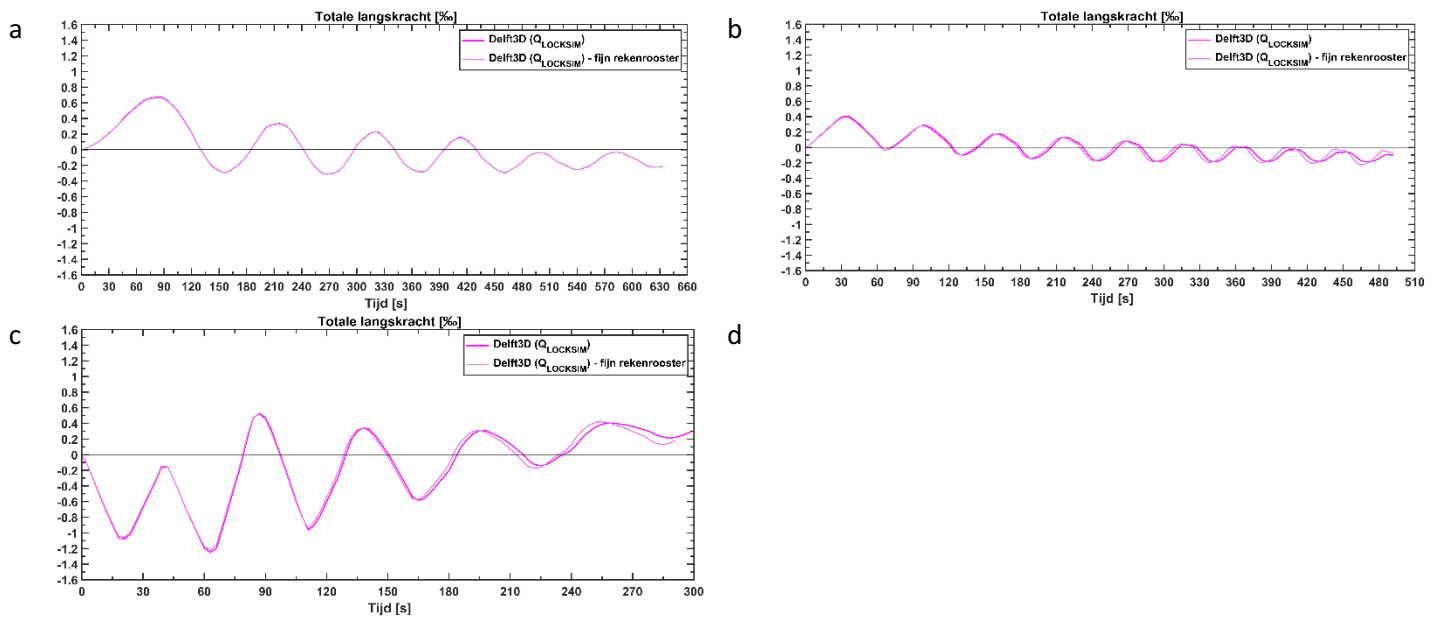


a: Case01; b: Case06; c: Case11; d: Case13; e: Case16; f: legende figuren.

Met uitzondering van Case09 en Case16, zijn de Delft3D-simulaties voor alle overige cases uitgevoerd met een celgrootte van de roostercellen in x- en y-richting gelijk aan 0.25 m. In paragraaf 6.4 is vastgesteld dat hierbij voor Case11, Case13 en Case14 slechts twee cellen tussen de kolkwand en het schip aanwezig zijn, wat relatief weinig is. Om die reden is het rekenrooster voor deze 3 cases in de y-richting nog eens bijkomend verfijnd met een factor 2. Op deze wijze worden voor deze cases 3 of 4 roostercellen tussen de kolkwand en het schip bekomen. In de originele simulaties hadden de roostercellen een vierkante vorm (celgrootte 0.25 m in beide richtingen). Nu zijn de roostercellen rechthoekig (celgrootte 0.25 m in de x-richting en 0.125 m in de y-richting).

Figuur 39 vergelijkt voor Case11, Case13 en Case14, de langskracht op het schip berekend met het originele rekenrooster en deze berekend met het rekenrooster dat in de y-richting verfijnd is. Uit deze figuur volgt dat bij Case11 geen verschil aanwezig is tussen de langskrachten berekend met het originele en het verfijnde rekenrooster. Bij Case13 en Case14 worden met het in de y-richting verfijnde rekenrooster langskrachten berekend, waarvan de grootte gelijk is aan deze berekend met het originele rekenrooster. De periode van de langskrachten berekend met het in de y-richting verfijnde rekenrooster is voor deze cases echter iets kleiner dan de periode van de langskrachten berekend met het originele rekenrooster. Dit verschil in numerieke dispersie wordt vermoedelijk veroorzaakt door de wijziging van het Courant-getal ten gevolge van de verfijning van het rekenrooster in de y-richting.

Figuur 39 – Invloed verfijning rekenrooster op de totale kracht op het schip berekend met Delft3D voor Case11, Case13 en Case14.

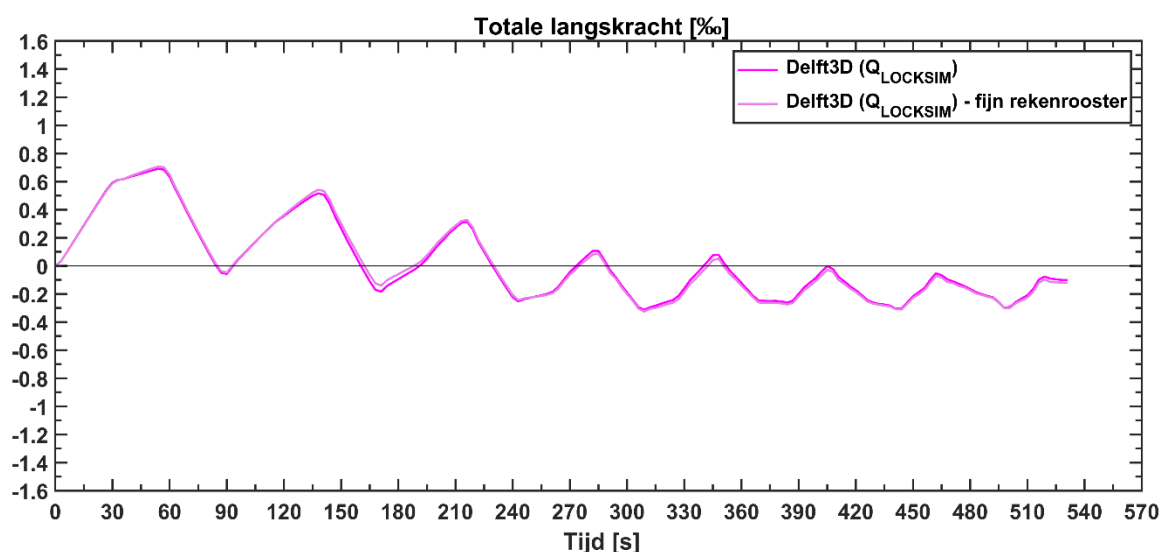


a: Case11; b: Case13; c: Case14.

Daarnaast is voor Case01 ook een simulatie uitgevoerd, waarbij het rekenrooster zowel in de x-richting als in de y-richting met een factor twee verfijnd is. Dit geeft een rekenrooster van 1601 x 129 cellen. De tijdstap is hierbij ook verlaagd van 0.001 min naar 0.0005 min om te voldoen aan het Courant-criterium. De horizontale eddy viscositeit is behouden op 0.05 m²/s voor deze simulatie.

Figuur 40 vergelijkt de variatie in de tijd van de langskrachten op het schip berekend met het originele rekenrooster met deze berekend met het in de twee richtingen verfijnd rekenrooster. Uit deze figuur volgt een zeer minieme invloed van de verfijning op de berekende langskrachten op het schip.

Figuur 40 – Invloed van twee maal verfijnen rekenrooster in twee richtingen op de variatie in de tijd van de langskrachten op het schip berekend met Delft3D voor Case01.



7 Conclusies

In 2008 is door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) begonnen met het ontwikkelen van een eigen programma dat het nivelleren van een schutsluis via openingen in de deuren beschrijft. Dit programma is gebaseerd op literatuur met betrekking tot het programma LOCKFILL, wat ontwikkeld is door Deltares in opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat. De ontwikkeling en een eerste validatie van het programma VUL_SLUIS is uitgevoerd in het WL-project 00_077 en heeft geleid tot twee verschillende versies van het programma, namelijk release 01.42.vA.08 en 01.42.vB.08. Deze beide versies geven echter identiek dezelfde resultaten wat betreft het debiet door de vulopeningen, de variatie van het waterpeil in de sluiskolk en de optredende end-to-end waterspiegelhellingsen. De verschillen tussen beide versies betreffen de formulering voor het berekenen van de langskrachten op het schip. Bij de verdere ontwikkeling is een eerste deelonderzoek uitgevoerd naar een aantal opmerkingen, aanbevelingen en verbeterpunten en is VUL_SLUIS release 01.53.01 ontwikkeld (Verelst *et al.*, 2017). Met deze release worden zowel versie A als versie B van het programma gesimuleerd. Daarna werd in Schindfessel & De Mulder (2017) een onderzoek uitgevoerd naar de berekening van debiet en impuls in de vulstraat. Het resultaat van dit onderzoek was een nieuwe versie van de subroutine VUL_SLUIS_impuls_straal.m, dewelke geïmplementeerd is in VUL_SLUIS release 01.54.00. Deze laatste release berekent slechts één versie meer van de langskrachten op het schip in de sluiskolk.

In voorliggend rapport worden voor de 16 karakteristieke cases, dewelke in Verelst *et al.* (2017) voor de gevoeligheidsanalyse van de algemene invoerparameters en voor de gevoeligheidsanalyse van de wijzigingen aan de code beschouwd zijn, de langskrachten op het schip berekend met de beide versies van VUL_SLUIS release 01.53.01 vergeleken met deze berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, evenals met deze berekend met LOCKFILL, met LOCKSIM en met Delft3D. Bij deze vergelijking is vooreerst getracht om met de overige software programma's de invoer van de simulatie met VUL_SLUIS zo goed mogelijk te benaderen. In VUL_SLUIS en LOCKFILL wordt het debiet door de nivelleeropeningen berekend aan de hand van de gemiddelde waterstand in de sluiskolk, terwijl in LOCKSIM de waterstand juist afwaarts van de voor nivelleren gebruikte sluisdeur beschouwd wordt. Omwille van deze verschillende berekeningswijze van het debiet door de nivelleeropeningen zijn met Delft3D twee reeksen simulaties uitgevoerd, namelijk één reeks met de debieten uit VUL_SLUIS als input en één reeks met de debieten uit LOCKSIM als input.

Eerst is voor deze 16 cases **het debiet door de nivelleeropeningen en het waterpeil in de sluiskolk** berekend met de verschillende programma's vergeleken. Hieruit volgt dat zeer beperkte verschillen waargenomen worden tussen het met de verschillende programma's berekende debiet door de nivelleeropeningen en de berekende waterstand in de sluiskolk. Enkel met LOCKSIM wordt bij volledig geopende kleppen of schuiven een variatie in de tijd van het debiet berekend dat slingert rond het debiet berekend met LOCKFILL en VUL_SLUIS. Deze slingering wordt verklaard door de verschillende berekeningswijze van het debiet door de nivelleeropeningen in beide programma's. Daarnaast is vastgesteld dat, met uitzondering van Case09 en Case16, met LOCKFILL een maximaal 2.0 s langere nivelleertijd berekend wordt dan met VUL_SLUIS en met LOCKSIM een nivelleertijd die tussen 6.0 s en 18.8 s korter is dan met VUL_SLUIS. Voor Case09, respectievelijk Case 16, wordt met LOCKFILL een nivelleertijd berekend die 46.8 s, respectievelijk 3.4 s, langer is dan berekend met VUL_SLUIS en met LOCKSIM een nivelleertijd die ca. 31.8 s langer is, respectievelijk 32.8 s korter is.

Daarna zijn **de langskrachten op het schip** berekend met LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D vergeleken met deze berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01 en met VUL_SLUIS release 01.54.00.

Uit deze vergelijking volgt dat voor cases met betrekking tot ledigen van een sluiskolk beperkte verschillen waargenomen worden in de berekende langskrachten op het schip. Dit is ook het geval bij cases waarbij de langskracht ten gevolge van translatiegolven de dominante component is.

Voor de cases met betrekking tot vullen wordt in de variatie in de tijd van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01 nog een sprong waargenomen, zowel bij versie A als bij versie B. Hierbij is voor alle cases de langskracht berekend met versie A van VUL_SLUIS release 01.53.01 een betere benadering van deze berekend met LOCKFILL dan deze berekend met versie B van VUL_SLUIS. De kracht op het schip berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 vertoont geen sprong meer. De negatieve extrema van de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 zijn iets groter dan deze berekend met versie A van VUL_SLUIS release 01.53.01. De waarde van de bias van de langskrachten bij vergelijking tussen VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL bedraagt, met uitzondering van Case15 met recreatievaart in de sluiskolk, maximaal 0.16 ‰ met een root-mean-square error van maximaal 0.23 ‰ en een standaarddeviatie van maximaal 0.16 ‰.

Voor alle cases met betrekking tot vullen waarbij alle componenten van de langskracht relevant zijn, heeft de eerste piek van de langskracht berekend met de vier verschillende programma's dezelfde grootte en dezelfde timing. Bij het begin van de nivellering is de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven dominant. Tijdens het overige gedeelte van de nivellering neemt voor deze cases de bijdrage van de component ten gevolge van impulsafname en vulstraalwerking toe. Gedurende de periode waarin deze beide bijdragen dominant zijn, worden min of meer gelijkaardige langskrachten berekend met LOCKSIM en Delft3D (zowel met debieten uit VUL_SLUIS als debieten uit LOCKSIM als input) en min of meer gelijkaardige langskrachten met VUL_SLUIS en LOCKFILL. De negatieve extrema van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en LOCKFILL zijn hoger dan deze berekend met Delft3D en LOCKSIM. Bij alle cases wordt waargenomen dat de langskracht berekend met LOCKSIM naar het einde van de nivellering toe een grotere damping kent dan deze berekend met de andere programma's. Daarnaast wordt opgemerkt dat de langskrachten berekend met Delft3D met debieten uit VUL_SLUIS als input beduidend minder damping vertonen dan deze berekend met de andere programma's. De langskrachten berekend met debieten uit LOCKSIM als input vertonen een goede overeenkomst met de langskrachten berekend met LOCKSIM. Bij simulaties met cirkelvormige openingen afgesloten met vlinderkleppen, wordt vastgesteld dat de langskrachten berekend met LOCKFILL (vooral bij stijgende langskrachten) een verloop kennen dat schommelt rond dit van de langskrachten berekend met VUL_SLUIS. Deze schommelingen zijn aanwezig in de component van de langskracht ten gevolge van translatiegolven. Een verklaring voor deze schommelingen is niet gevonden.

De variantiedensiteitsspectra tonen dezelfde aanwezige frequenties bij de langskrachten berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM. Met Delft3D met debieten uit VUL_SLUIS als input wordt een variantiedensiteitsspectrum berekend dat iets meer hogere frequenties bevat bij vullen en lagere bij ledigen. Dit volgt ook uit de grafische voorstelling van de variatie in de tijd van de langskracht. De periode van de langskracht berekend met Delft3D met debieten uit VUL_SLUIS als input wordt bij vullen, respectievelijk ledigen, naar het einde van de nivellering toe iets kleiner, respectievelijk groter, dan de periode van de langskracht berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL en LOCKSIM. Echter bij toepassen van de debieten uit LOCKSIM als input in DELFT3D worden langskrachten berekend met dezelfde frequenties als de langskrachten berekend met LOCKSIM.

Indien in VUL_SLUIS de invloed van de geconcentreerde vulstraal op de component van de langskracht ten gevolge van impulsafname niet in beschouwing wordt genomen, worden beduidend kleinere verschillen tussen de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en deze berekend met LOCKSIM en Delft3D waargenomen. Hieruit volgt dat de grotere negatieve component van de langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS het gevolg is van de invloed van de geconcentreerde vulstraal op de langskracht ten gevolge van impulsafname. Ook het verlagen van de parameter CE_2 naar 0.05, wat de damping van translatiegolven beïnvloedt, zorgt voor iets kleinere verschillen tussen de langskrachten berekend met VUL_SLUIS en deze berekend met LOCKSIM en Delft3D.

Als laatste zijn een aantal **gevoeligheidsanalyses** uitgevoerd. Een eerste gevoeligheidsanalyse betreft het al dan niet spiegelen van het snelheidsprofiel bij de berekening van het debiet en impuls in de vulstraal in VUL_SLUIS release 01.54.00. Voor de meeste cases heeft niet-spiegelen van het snelheidsprofiel geen

invloed op de berekende langskracht. Voor twee cases wordt een beperkt betere overeenkomst tussen de langskracht berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00 en LOCKFILL waargenomen.

Een tweede gevoeligheidsanalyse betreft voor simulaties met LOCKSIM de invloed van de lengte van de interne componenten, de tijdstap en de waarde van de parameter θ in het Preismann-oplossingschema op de berekende langskrachten. Hieruit volgt dat de wijzigingen met betrekking tot de lengte van de interne componenten en de tijdstap van de simulatie, met uitzondering van Case01, voor alle overige cases geen of een minimale invloed hebben op de berekende langskracht op het schip. Bij Case01 heeft de wijziging van de lengte van de interne componenten van 1.0 m naar 0.25 m tot gevolg dat de grootte van de berekende langskracht ongeveer dezelfde blijft, maar dat de periode van de berekende langskracht iets afneemt. De wijziging van de tijdstap van 0.025 s naar 0.060 s bij een lengte 0.25 m (0.50 m voor Case06 en Case16) voor de interne componenten heeft geen invloed op de berekende langskracht.

Als laatste gevoeligheidsanalyse is voor 6 cases de celgrootte, de waarde voor de horizontale eddy viscositeit en de ruwheid in de simulaties met Delft3D gewijzigd. Hieruit volgt dat een wijziging van de ruwheid en de celgrootte van het rekenrooster geen of een zeer beperkte invloed heeft op de berekende langskrachten op het schip. De verlaging van de horizontale eddy viscositeit zorgt bij twee cases dat naar het einde van de nivellering toe zeer sterk fluctuerende langskrachten berekend worden. Bij de overige cases wordt geen invloed op de berekende langskrachten waargenomen.

8 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
- Deltares.** (2014). Delft3D-Flow. User Manual.
- Deltares.** (2016). LOCKFILL. User and Technical manual. version 0.00 4 Mei 2016
- Dos Santos Nogueira, H.; van der Hout, A.J.; O'Mahoney, T.** (2016). Scale model of the new lock in Terneuzen. Results of levelling and lock-exchange tests.. 1220959-000: Delft, The Netherlands
- Schindfessel, L.; De Mulder, T.** (2017). Studieopdracht naar de berekening van debiet en impuls in het programma vul_sluis.m. Laboratorium voor Hydraulica van de Universiteit Gent: Gent
- Schohl G.A.** (1998). User's Manual for LOCKSIM – Hydraulic simulation of navigation lock filling and emptying systems
- Schwanenberg, D.; Jongeling, T.H.G.** (2003). Vul- en ledigingssysteem Royerssluis: deelopdracht I. Eerste ontwerp. Q2887. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- Vercruysse, J.B.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2011). Ringvaart om Gent - Tweede sluis Evergem: verslag van terreinmeting inzake vullen- en ledigen. *WL Rapporten*, 760_13. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruysse, J.B.; De Mulder, T.; Verelst, K.; Schindfessel, L.; Peeters, P.** (2013). Zeekanaal Brussel Schelde - sluis Zemst: rapportage schaalmodelonderzoek vulling via openingen in het middenhoofd. *WL Rapporten*, 12_044. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2012). Haven van Zeebrugge - SHIP: terreinmeting nivelleren Vandammesluis. *WL Rapporten*, 12_036. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- 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.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve: advies nivelleeropeningen en openingswet hefschuiven. *WL Adviezen*, 16_042. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016a). Conceptual design of the filling and emptying system for the new locks of the Panama Canal: overview of mathematical modelling. *WL Rapporten*, 00_139. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- 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.; Vercruysse, J.B.; Boey, I.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016c). Denderbelle – Vernieuwing stuwsluis Denderbelle: Deelrapport 4 – Simulaties ontwerp nivelleersysteem sluis. Versie 1.0. *WL Rapporten*, 15_062. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Waterloopkundig Laboratorium.** (1994a). Handleiding LOCKFILL. Q1537. Rijkswaterstaat. Bouwdienst: [S.I.]
- Waterloopkundig Laboratorium.** (1994b). LOCKFILL: deel B. Uitbreiding van het rekenprogramma.. Q1537 november 1994. Rijkswaterstaat. Bouwdienst: [S.I.]

Bijlage 1 Tabellen

Tabel 20 – Positieve en negatieve extrema van de totale langskracht op het schip [%] berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01, VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case03, Case05, Case08, Case09, Case10 en Case14.

	VUL_SLUIS release 01.53.01 versie A		VUL_SLUIS release 01.53.01 versie A		VUL_SLUIS release 01.54.00		LOCKFILL		LOCKSIM		Delft3D (Q _{VUL_SLUIS})		Delft3D (Q _{LOCKSIM})	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	min.	min.	max.	min.	max.
Case03	-0.43	0.23	-0.43	0.23	-0.43	0.23	-0.44	0.25	-0.39	0.16	-0.46	0.35	-0.44	0.18
Case05	-0.60	0.70	-0.60	0.70	-0.60	0.70	-0.63	0.71	-0.44	0.50	-0.54	0.65	-0.53	0.55
Case08	-0.45	0.20	-0.45	0.20	-0.45	0.20	-0.48	0.21	-0.45	0.16	-0.45	0.26	-0.48	0.17
Case09	-0.27	0.33	-0.26	0.34	-0.26	0.34	-0.27	0.33	-0.23	0.26	-0.16	0.29	-0.15	0.28
Case10	-0.99	0.46	-0.85	0.55	-1.06	0.46	-1.03	0.46	-0.73	0.63	-0.92	0.79	-0.73	0.68
Case14	-1.46	0.83	-1.46	0.83	-1.46	0.83	-1.47	0.84	-1.20	0.53	-1.34	0.99	-1.25	0.53

Tabel 21 - Positieve en negatieve extrema van de totale langskracht op het schip [%] berekend met VUL_SLUIS release 01.53.01, VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKFILL, LOCKSIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16.

	VUL_SLUIS release 01.53.01 versie A		VUL_SLUIS release 01.53.01 versie A		VUL_SLUIS release 01.54.00		LOCKFILL		LOCKSIM		Delft3D (Q _{VUL_SLUIS})		Delft3D (Q _{LOCKSIM})	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	min.	min.	max.	min.	max.
Case01	-0.69	0.67	-0.47	0.68	-0.74	0.66	-0.57	0.68	-0.26	0.56	-0.45	0.65	-0.34	0.64
Case02	-1.03	0.57	-0.63	0.58	-1.12	0.56	-0.68	0.56	-0.35	0.54	-0.35	0.57	-0.34	0.57
Case04	-1.04	0.39	-0.68	0.44	-1.14	0.35	-0.89	0.48	-0.32	0.23	-0.29	0.33	-0.30	0.33
Case06	-0.58	0.42	-0.35	0.45	-0.98	0.39	-0.68	0.43	-0.28	0.35	-0.36	0.39	-0.26	0.38
Case07	-0.63	0.39	-0.37	0.44	-0.79	0.38	-0.70	0.39	-0.28	0.35	-0.37	0.43	-0.26	0.40
Case11	-0.60	0.66	-0.37	0.70	-0.65	0.62	-0.44	0.66	-0.30	0.62	-0.55	0.69	-0.31	0.67
Case12	-0.70	0.78	-0.57	0.82	-0.71	0.78	-0.61	0.80	-0.58	0.77	-0.71	0.84	-0.56	0.83
Case13	-0.42	0.46	-0.25	0.47	-0.69	0.45	-0.56	0.46	-0.20	0.40	-0.42	0.44	-0.19	0.41
Case15	-4.13	0.46	-2.16	0.46	-7.28	0.46	-5.21	0.46	-0.14	0.16	-0.30	0.21	-0.22	0.21
Case16	-0.14	0.15	-0.10	0.16	-0.09	0.17	-0.09	0.17	-0.10	0.15	-0.11	0.17	-0.09	0.17

Tabel 22 – Statistische parameters voor langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKIM en Delft3D voor Case03, Case05, Case08, Case09, Case10 en Case14.

	VUL_SLUIS 01.53.01 versie A - VUL_SLUIS 01.53.01 versie B				VUL_SLUIS 01.53.01 versie A - VUL_SLUIS 01.54.00				VUL_SLUIS 01.54.00 - LOCKFILL				VUL_SLUIS 01.54.00 - LOCKSIM				VUL_SLUIS 01.54.00 - Delft3D (Q _{VUL_SLUIS})				VUL_SLUIS 01.54.00 - Delft3D (Q _{LOCKSIM})			
	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]
Case03	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.02	0.02	0.99	0.00	0.05	0.05	0.97	-0.01	0.09	0.09	0.91	-0.01	0.04	0.03	0.98
Case05	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.01	0.01	1.00	0.03	0.10	0.10	1.00	0.01	0.04	0.04	1.00	-0.01	0.08	0.08	0.99
Case08	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.03	0.03	0.99	0.00	0.06	0.06	0.95	-0.01	0.08	0.08	0.90	-0.01	0.05	0.05	0.95
Case09	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.04	0.04	0.91	0.00	0.10	0.10	0.13	0.00	0.11	0.11	0.11	0.00	0.10	0.10	0.11
Case10	0.05	0.07	0.05	0.99	-0.03	0.03	0.02	1.00	0.00	0.04	0.04	0.99	0.12	0.18	0.14	0.92	0.12	0.24	0.21	0.89	0.13	0.18	0.13	0.91
Case14	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.10	0.10	0.99	0.01	0.21	0.21	0.97	0.01	0.18	0.18	0.96	-0.02	0.19	0.19	0.97

Tabel 23 – Statistische parameters voor langskrachten op het schip berekend met VUL_SLUIS, LOCKFILL, LOCKIM en Delft3D voor Case01, Case02, Case04, Case06, Case07, Case11, Case12, Case13, Case15 en Case16.

	VUL_SLUIS 01.53.01 versie A - VUL_SLUIS 01.53.01 versie B				VUL_SLUIS 01.53.01 versie A - VUL_SLUIS 01.54.00				VUL_SLUIS 01.54.00 - LOCKFILL				VUL_SLUIS 01.54.00 - LOCKSIM				VUL_SLUIS 01.54.00 - Delft3D (Q _{VUL_SLUIS})				VUL_SLUIS 01.54.00 - Delft3D (Q _{LOCKSIM})			
	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]	bias [%o]	rmse [%o]	std [%o]	gof [-]
Case01	0.09	0.11	0.06	0.99	-0.10	0.15	0.11	0.97	0.09	0.11	0.06	0.99	0.16	0.28	0.23	0.89	0.22	0.33	0.25	0.80	0.22	0.32	0.23	0.86
Case02	0.15	0.19	0.12	0.98	-0.11	0.18	0.13	0.96	0.16	0.23	0.16	0.98	0.35	0.47	0.32	0.73	0.39	0.52	0.35	0.66	0.39	0.52	0.35	0.67
Case04	0.10	0.14	0.10	0.98	-0.11	0.20	0.16	0.95	0.10	0.14	0.09	0.99	0.19	0.37	0.31	0.94	0.25	0.41	0.33	0.87	0.25	0.41	0.33	0.87
Case06	0.10	0.13	0.08	0.98	-0.17	0.22	0.14	0.98	0.11	0.16	0.12	0.98	0.29	0.41	0.28	0.79	0.33	0.46	0.32	0.68	0.33	0.45	0.31	0.75
Case07	0.11	0.14	0.09	0.97	-0.06	0.08	0.06	1.00	0.01	0.04	0.04	0.99	0.21	0.29	0.21	0.77	0.23	0.35	0.26	0.58	0.23	0.33	0.23	0.71
Case11	0.11	0.13	0.07	0.98	-0.10	0.13	0.09	0.97	0.12	0.15	0.08	0.98	0.24	0.31	0.21	0.85	0.27	0.40	0.29	0.65	0.28	0.35	0.21	0.78
Case12	0.11	0.12	0.05	0.99	-0.01	0.01	0.01	1.00	0.07	0.08	0.04	1.00	0.25	0.40	0.31	0.83	0.32	0.44	0.30	0.72	0.31	0.38	0.23	0.79
Case13	0.08	0.10	0.06	0.98	-0.13	0.16	0.10	0.98	0.05	0.08	0.06	0.98	0.25	0.32	0.21	0.79	0.27	0.37	0.26	0.55	0.27	0.35	0.22	0.74
Case15	1.04	1.25	0.68	0.98	-1.64	1.97	1.10	1.00	0.99	1.20	0.69	1.00	3.62	4.37	2.47	0.38	3.69	4.43	2.45	0.15	3.67	4.42	2.46	0.13
Case16	0.03	0.04	0.03	0.95	0.04	0.05	0.04	0.89	0.00	0.00	0.00	1.00	-0.02	0.08	0.08	0.92	0.00	0.04	0.04	0.85	0.00	0.03	0.03	0.93

Tabel 24 – Statistische parameters voor langskrachten op het schip (zonder invloed van vulstraal) berekend met VUL_SLUIS release 01.54.00, LOCKSIM en Delft3D

	VUL_SLUIS geen vulstraal - VUL_SLUIS geen loslating, geen vulstraal				VUL_SLUIS geen vulstraal - VUL_SLUIS geen loslating, geen vulstraal, CE ₂ = 0.05				VUL_SLUIS, geen loslating, geen vulstraal, CE ₂ = 0.05 - LOCKSIM				VUL_SLUIS, geen loslating, geen vulstraal, CE ₂ = 0.05 - Delft3D (Q _{VUL_SLUIS})				VUL_SLUIS, geen loslating, geen vulstraal, CE ₂ = 0.05 - Delft3D (Q _{LOCKSIM})			
	bias [%]	rmse [%]	std [%]	gof [%]	bias [%]	rmse [%]	std [%]	gof [%]	bias [%]	rmse [%]	std [%]	gof [%]	bias [%]	rmse [%]	std [%]	gof [%]	bias [%]	rmse [%]	std [%]	gof [%]
Case01	-0.01	0.02	0.01	1.00	-0.01	0.04	0.04	0.98	-0.05	0.06	0.04	0.99	0.01	0.10	0.10	0.94	0.01	0.07	0.07	0.97
Case02	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.04	0.04	0.98	-0.03	0.05	0.04	0.98	0.00	0.06	0.06	0.97	0.00	0.06	0.06	0.97
Case03	0.03	0.04	0.02	0.99	0.03	0.10	0.09	0.90	-0.02	0.11	0.11	0.86	-0.04	0.07	0.06	0.96	-0.04	0.10	0.09	0.90
Case04	-0.01	0.02	0.01	1.00	-0.01	0.02	0.02	1.00	-0.05	0.07	0.05	0.97	0.01	0.02	0.02	1.00	0.01	0.02	0.02	1.00
Case05	0.09	0.14	0.10	0.94	0.09	0.14	0.10	0.94	-0.04	0.07	0.06	0.98	-0.07	0.10	0.07	0.97	-0.09	0.12	0.08	0.95
Case06	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.02	0.02	0.99	-0.03	0.05	0.04	0.97	0.00	0.08	0.08	0.93	0.00	0.05	0.05	0.97
Case07	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.03	0.03	0.98	-0.02	0.04	0.04	0.97	0.00	0.11	0.11	0.87	0.00	0.04	0.04	0.98
Case08	0.03	0.04	0.02	0.99	0.04	0.05	0.04	0.97	-0.02	0.07	0.07	0.91	-0.04	0.09	0.08	0.89	-0.04	0.08	0.07	0.91
Case09	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.01	0.01	1.00	0.00	0.10	0.10	0.11	0.00	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.09
Case10	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.06	0.06	0.99	0.00	0.11	0.11	0.94	0.00	0.14	0.14	0.98	0.01	0.10	0.10	0.95
Case11	0.00	0.01	0.00	1.00	-0.01	0.06	0.06	0.97	-0.05	0.10	0.08	0.94	-0.03	0.19	0.19	0.86	-0.03	0.08	0.08	0.96
Case12	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.07	0.07	0.98	-0.04	0.15	0.14	0.89	0.01	0.23	0.23	0.86	0.00	0.15	0.15	0.91
Case13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.04	0.04	0.96	-0.03	0.06	0.05	0.93	-0.01	0.12	0.12	0.87	-0.01	0.03	0.03	0.97
Case14	0.12	0.15	0.08	0.99	0.14	0.31	0.28	0.94	-0.11	0.38	0.37	0.87	-0.11	0.21	0.18	0.97	-0.13	0.37	0.35	0.88
Case15	-0.03	0.03	0.02	0.98	-0.03	0.04	0.02	0.98	0.02	0.05	0.04	0.91	0.09	0.11	0.07	0.82	0.09	0.11	0.06	0.82
Case16	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.01	0.01	0.98	-0.01	0.02	0.01	0.97	0.00	0.03	0.03	0.91	0.00	0.02	0.02	0.96

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