Vlaanderen
is wetenschap

12_131_2
WL rapporten

Haven van Antwerpen - Royerssluis

Deelrapport 2 – Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem met omloopriolen in sluishoofden voor vernieuwde Royerssluis

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Haven van Antwerpen - Royerssluis

Deelrapport 2 – Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem met omloopriolen in sluishoofden voor vernieuwde Royerssluis

Vercruysse, J.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.

Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaanderen is wetenschap

Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2016

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 2016

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Haven van Antwerpen - Royerssluis: Deelrapport 2 – Hydraulisch ontwerp nivelleersysteem met omloopriolen in sluishoofden voor vernieuwde Royerssluis. Versie 3.0. WL Rapporten, 12_131_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2016R12_131_2
Keywords (3-5):	lock, filling emptying eystem, design, short culverts		
Tekst (p.):	104	Bijlagen (p.):	35
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruysse, J.; Verelst, K.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Mulder, T.	
Projectleider:	Verelst, K.	

Goedkeuring

Coördinator onderzoeksgroep:	Peeters, P.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	

Abstract

De Royerssluis verbindt de Schelde met het havengebied van de haven van Antwerpen op Rechteroever. De bestaande Royerssluis heeft een breedte van 22 m en een lengte van 180 m. Een grondige aanpassing van de bestaande Royerssluis met een (symmetrische) verbreding en verlenging (naar Schelde toe) wordt vooropgesteld. Het ontwerp van de vernieuwde Royerssluis voorziet zowel aan Scheldezijde als aan dokzijde twee roldeuren. De breedte van de vernieuwde sluis zal 36 m bedragen en de lengte tussen de buitenste roldeuren bedraagt 250 m.

De Afdeling Maritieme Toegang heeft aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om het hydraulisch ontwerp van een nivelleersysteem uit te voeren voor de vernieuwde Royerssluis. In 2013 werd reeds het hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem, waarbij openingen in de roldeuren werden beschouwd. Bij dit systeem was een relatief groot aantal openingen met grote doorsnede nodig voor het bereiken van de gewenste nivelleertijd, wat dit nivelleersysteem zowel in prijs als in onderhoud duur maakt. Om die reden heeft de Afdeling Maritieme Toegang aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om bijkomend een nivelleersysteem te ontwerpen op basis van korte omloopriolen.

Hiervoor werd eerst de benodigde doorstroomsectie van de omloopriolen bepaald aan de hand van literatuurformules en meetgegevens van de Berendrechtsluis. Daarna werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld. Met dit hydraulisch netwerkmodel werden simulaties uitgevoerd waarbij de nivelleerkromme, de debieten doorheen de omloopriolen en de langse waterspiegelhellingen in de kolk gesimuleerd werden. Hierbij werd een optimalisatie van de openingswet uitgevoerd, waardoor een zo kort mogelijke nivelleertijd bekomen werd waarbij het criterium (0.60 ‰) voor de (langs)kracht(en) op het maatgevend schip in de kolk nog gerespecteerd wordt. Daarna is de uitmonding van de omloopriolen in de sluiskolk, de geometrie van de inlaten en de positionering van de hefschuiven verder uitgewerkt. Omwille van de complexiteit van de uitstroomconstructie van de omloopriolen in de sluiskolk werd besloten de stroming door deze constructie met behulp van CFD te modelleren in een uitbestede studie. Uit de CFD studie volgde de verdeling van het debiet over de lengte van de uitstroomconstructie, het stromingspatroon in de kolk en de hydraulische verliezen. Vervolgens werd het hydraulisch netwerkmodel aangepast en werden nieuwe simulaties uitgevoerd om na te gaan of de nieuwe sluis voldoet aan de criteria wat betreft nivelleertijd en langskracht op het schip.

Inhoudstafel

Abstract III
Inhoudstafel V
Lijst van de tabellen VII
Lijst van de figuren IX
1 Inleiding 1
2 Gegevens 4
2.1 Sluiskolk 4
2.2 Maatgevende waterstanden 6
2.3 Maatgevende scheepscombinatie 7
3 Criteria 9
3.1 Nivelleertijd 9
3.2 Stijgsnelheid waterpeil 9
3.3 Kracht op verschutte schepen 9
4 Nivelleersysteem 11
4.1 Principe 11
4.2 Doorstroomsectie omloopriolen 12
4.3 Doorstroomsectie uitstroomconstructie 13
4.4 Geometrie 15
4.5 Besluit 20
5 LOCKSIM simulaties initiële geometrie 21
5.1 Hydraulisch netwerkmodel 22
5.2 Simulaties 27
5.3 Besluit 33
6 Hydraulisch ontwerp componenten van het nivelleersysteem 34
6.1 Lokale verdieping kolkbodem 34
6.2 Positionering inlaat 42
6.2.1 Geometrie 42
6.2.2 Sedimentatie 45
6.2.3 Luchtaanzuiging 47
6.2.4 Wervelvorming 50

6.3 Hefschuif 54
6.3.1 Luchtaanzuiging 54
6.3.2 Cavitatie 57
6.4 Besluit 60
7 CFD simulatie uitstroomconstructie 62
7.1 CFD-model 62
7.2 Debietsverdeling uitstroomopeningen 66
7.3 Verliescoëfficiënt 68
7.4 Stromingspatroon in de omloopriolen, de uitstroomconstructie en de sluiskolk 70
7.4.1 Conditie 1 71
7.4.2 Conditie 2 76
7.5 Tijdsafhankelijke simulatie 82
7.6 Besluit 87
8 LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie 89
8.1 Hydraulisch netwerkmodel 89
8.2 Simulaties 92
8.3 Besluit 96
9 Besluit 97
10 Referenties 101
Bijlage A – Gevoeligheidsanalyse LOCKSIM simulatie B1
Bijlage B – Simulaties hydraulisch netwerkmodel B3
LOCKSIM simulaties initiële geometrie B3
LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie B24
Bijlage C – Illustratie tijdsafhankelijke CFD simulatie B32

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht afmetingen voorontwerp sluiskolk (Vlaamse Overheid - MOW, 2012) 4

Tabel 2 – Overzicht afmetingen voorontwerp deurkamer 5

Tabel 3 – In deze studie beschouwde extra te nivelleren oppervlakte van deurkamers en binnen oppervlakte roldeur in bovenhoofd (BOHO) en benedenhoofd (BEHO) 5

Tabel 4 – Ontwerpwaterpeilen uit Schwanenberg & Jongeling (2003) 6

Tabel 5 – Typisch waterpeil in dokken op rechteroever periode 1995 – 1997 (De Broe, 2003) 6

Tabel 6 – Karakteristieke waterpeilen te Antwerpen-Loodsgebouw voor de periode 2001-2010 (Taverniers *et al.* 2011) 6

Tabel 7 – In deze studie gehanteerde combinaties van Scheldepeilen en dokpeilen 7

Tabel 8 – Karakteristieken van de maatgevende scheepscombinatie (combinatie CEMT klasse Vb en een CEMT klasse VIb) 8

Tabel 9 – Afvoercoëfficiënt bij volledig geopende schuiven μ [-] voor de Berendrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2008) 12

Tabel 10 – Vergelijking afmetingen omloopriolen en uitstroomconstructie Antwerpse zeesluizen 14

Tabel 11 – Doorstroomsectie omloopriolen en hefschuiven 22

Tabel 12 – Hydraulisch netwerkmodel omloopriolen vernieuwde Royerssluis 23

Tabel 13 – Hydraulisch netwerkmodel kolk vernieuwde Royerssluis 24

Tabel 14 – Afmetingen duwkonvooi CEMT klasse Vb en CEMT klasse VIb en maatgevend schip 25

Tabel 15 – Parameters LOCKSIM simulaties waarbij afgeweken wordt van de default waarde 26

Tabel 16 – Uitgevoerde LOCKSIM simulaties 29

Tabel 17 – Resultaten LOCKSIM simulaties 30

Tabel 18 – Niveau kiel ten opzichte van niveau plafond uitstroomopeningen bij het maatgevend schip 35

Tabel 19 – Marge piëzometrische hoogte inlaat bovenhoofd voor de Berendrechtsluis en de vernieuwde Royerssluis 49

Tabel 20 – Geometrische karakteristieken inlaat bovenhoofd Berendrechtsluis en vernieuwde Royerssluis 52

Tabel 21 – Controle risico op wervelvorming Berendrechtsluis en vernieuwde Royerssluis korte omloopriool bovenhoofd 53

Tabel 22 – Hoogte overstortmuren initiële geometrie en alternatieve geometrie 64

Tabel 23 – Condities steady state simulatie o.b.v. LOCKSIM simulatie N4 66

Tabel 24 – Debietverdeling uitstroomopeningen voor conditie 1 en conditie 2 (uitgedrukt in % van het debiet bij uniforme verdeling) 66

Tabel 25 – Hydraulische verliescoëfficiënt ξ [-] CFD model (Actiflow, 2015) 69

Tabel 26 – Hydraulische verliezen CFD model, overige componenten en uitstroomconstructie 69

Tabel 27 – Vergelijking hydraulische verliezen uitstroomconstructie Royerssluis en Berendrechtsluis (/ = geen CFD-simulatie uitgevoerd) 70

Tabel 28 – Debietverdeling uitstroomopeningen lange omlooppriool voor conditie 2 vergelijking steady state en tijdsafhankelijke simulatie (uitgedrukt in % van het debiet bij uniforme verdeling) 85

Tabel 29 – Hydraulisch netwerkmodel korte omloopriolen vernieuwde Royerssluis..... 90

Tabel 30 – Hydraulisch netwerkmodel lange omloopriolen vernieuwde Royerssluis 91

Tabel 31 – Hydraulisch netwerkmodel omloopriolen vernieuwde Royerssluis – Lengte secties in de sluiskolk. 92

Tabel 32 – Hydraulisch netwerk simulaties gewijzigde geometrie 93

Tabel 33 – Resultaten simulaties vullen bovenhoofd LOCKSIM simulaties initiële geometrie (v1) en LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie (v2) 94

Tabel 34 – Resultaten simulaties ledigen benedenhoofd LOCKSIM simulaties initiële geometrie (v1) en LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie (v2) 95

Tabel 35 – Resultaten vulling via bovenhoofd Scheldepeil TAW – 1.00m, Dokpeil TAW + 4.40 m..... 96

Tabel 36 – Gebruikte simulaties voor gevoeligheidsanalyse..... B1

Tabel 37 – Gewijzigde parameters gevoeligheidsanalyse B1

Tabel 38 – Resultaten gevoeligheidsanalyse op nivelleertijd, end-to-end langse waterspiegelhelling een langse waterspiegelhelling over schip..... B2

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Locatie Royerssluis in het Antwerps havengebied 1

Figuur 2 – Principeschets nivelleersysteem Antwerpse Zeesluizen (Boudewijnsluis (1959) t.e.m. Deurganckdoksluis (2016)) omloopriolen (blauw), hefschuiven (rood), roldeuren (grijs) 2

Figuur 3 – Afmetingen sluiskolk 4

Figuur 4 – Principe nivelleersysteem Antwerpse zeesluizen 11

Figuur 5 – Bovenaanzicht korte en lange omloopriool bovenhoofd 17

Figuur 6 – Doorsnede omloopriolen bovenhoofd 18

Figuur 7 – Doorstroomsectie 19

Figuur 8 – Lokale verdieping kolkbodem ter hoogte van de uitstroomopeningen 19

Figuur 9 – Hydraulisch netwerkmodel voor nivelleren via bovenhoofd 22

Figuur 10 – Ligging schepen in de sluiskolk ten opzichte van de sluisdeur en de uitlaten van de omloopriolen 26

Figuur 11 – Openingswetten simulaties vernieuwde Royerssluis 31

Figuur 12 – Nivelleertijd in functie van Scheldepeil dokpeil = extreem hoog dokpeil TAW + 4.40 m 32

Figuur 13 – Invloed verticale afstand tussen kiel schip en plafond uitstroomopeningen op dwarskracht en langskracht op het schip (Lamoen, 1950) 36

Figuur 14 – Lokale verdieping van de bodem van de Boudewijnsluis ter hoogte van de uitstroomconstructie 37

Figuur 15 – Histogram kielspeling kleiner dan 2.0 m in de Boudewijnsluis voor schuttingen 2013 38

Figuur 16 – Doorsnede verdiepte kolkbodem 39

Figuur 17 – Peilplan Boudewijnsluis – lokaal verdiepte kolkbodem benedenhoofd 40

Figuur 18 – Peilplan Boudewijnsluis – lokaal verdiepte kolkbodem bovenhoofd 40

Figuur 19 – Peilplan Van Cauwelaertsluis – meting dd. 7-01-2014 – illustratie opwaarts kolkhelft 41

Figuur 20 – Peilplan Zandvlietsluis – meting dd. 8-04-2014 – illustratie t.h.v. uitstroomconstructie bovenhoofd 41

Figuur 21 – Verticale doorsnede inlaat korte omloopriool bovenhoofd 42

Figuur 22 – Illustratie inlaat lange omloopriool 43

Figuur 23 – Illustratie inlaat lange omloopriool 44

Figuur 24 – Verticale doorsnede inlaat korte omloopriool benedenhoofd 44

Figuur 25 – Peilplan Boudewijnsluis – t.h.v. inlaat bovenhoofd 45

Figuur 26 – Boudewijnsluis – lange omloopriool – doorsnede t.h.v. inlaat bovenhoofd (mail SBE dd. 16/05/2014 ; peilen in NKD, TAW = NKD - 0.08 m) 46

Figuur 27 – Peilplannen bovenhoofd 46

Figuur 28 – Aanstroming inlaat korte omloopriool Berendrechtsluis vullen via bovenhoofd – Scheldepeil TAW – 0.27 m naar Dokpeil TAW + 4.17 m 48

Figuur 29 – Illustratie berekening doorstroomsectie inlaat en plafondpeil instroomopening 48

Figuur 30 – Definitieschets waterdekking h_d boven instroomopening met hydraulische diameter D en stroomsnelheid V 50

Figuur 31 – Relatieve waterdekking boven een instroomopening als een functie van het Froudegetal (Vaes *et al.*, 2004) 51

Figuur 32 – Openingen in plafond omloopriool ter hoogte van hefschuif 54

Figuur 33 – Inzinking waterspiegel na hefschuif op basis van Fig 4.6 uit Naudascher (1991) voor stroming met vrij oppervlak onder een hefstuw 55

Figuur 34 – Piëzometrische hoogte ter hoogte van vena contracta o.b.v. simulatie N4 vullen bovenhoofd Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m 56

Figuur 35 – Snelheid vena contracta o.b.v. simulatie N4 vullen bovenhoofd Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m 59

Figuur 36 – Cavitatieparameter K o.b.v. simulatie N4 vullen bovenhoofd Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m 59

Figuur 37 – Illustratie rekendomein 63

Figuur 38 – Illustratie uitstroomconstructie initiële geometrie 63

Figuur 39 – Doorsnede uitstroomopening initiële geometrie 64

Figuur 40 – Waterpeil in de sluiskolk en relatieve hefhoogte hefschuif (figuur boven), debiet door de omloopriolen (figuur midden), langse waterspiegelhelling (figuur onder) – simulatie N4 vullen bovenhoofd met de maatgevende scheepscombinatie – Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m 65

Figuur 41 – Debietverdeling uitstroomopeningen boven: conditie 1 / onder: conditie 2 (uitgedrukt in % van het debiet bij uniforme verdeling) 67

Figuur 42 – CFD simulatie conditie 1 – snelheid boven bodem 71

Figuur 43 – CFD simulatie conditie 1 – snelheid in een verticaal vlak evenwijdig met de as van de sluiskolk 72

Figuur 44 – CFD simulatie conditie 1 – snelheid in een verticaal vlak evenwijdig met schoepen uitstroomopening 73

Figuur 45 – CFD simulatie conditie 1 – visualisatie stroomlijnen 74

Figuur 46 – CFD simulatie conditie 1 – inzinking wateroppervlak 75

Figuur 47 – CFD simulatie conditie 2 – snelheid boven bodem 77

Figuur 48 – CFD simulatie conditie 2 – snelheid in een verticaal vlak evenwijdig met kolk-as 78

Figuur 49 – CFD simulatie conditie 2 – snelheid in een verticaal vlak evenwijdig met schoepen uitstroomopening 79

Figuur 50 – CFD simulatie conditie 2 – visualisatie stroomlijnen 80

Figuur 51 – CFD simulatie conditie 2 – inzinking wateroppervlak 81

Figuur 52 – Loslaatpunt binnenzijde bocht voor uitstroomconstructie lange omloopriool 83

Figuur 53 – Tijdsafhankelijke simulatie conditie 2 lange omloopriool 84

Figuur 54 – Lange omloopriool conditie 2 – stroming op 0.75 m boven de kolkbodem 86

Figuur 55 – Lange omloopriool conditie 2 – stroming uit dagvlak uitstroomopeningen 86

Figuur 56 – Hydraulisch netwerkmodel vernieuwde Royerssluis voor nivelleren via bovenhoofd 89

Figuur 57 – Openingswetten LOCKSIM simulaties initiële geometrie (v1; streepjeslijn) en LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie (v2; volle lijn) 93

Figuur 58 – Nivelleertijd in functie van Scheldepeil LOCKSIM simulaties v2 dokpeil = extreem hoog dokpeil TAW + 4.40 m 94

Figuur 59 – Simulatie N1 ..... B3

Figuur 60 – Simulatie N2 ..... B4

Figuur 61 – Simulatie N3 ..... B5

Figuur 62 – Simulatie N4 ..... B6

Figuur 63 – Simulatie N5 ..... B7

Figuur 64 – Simulatie N6 ..... B8

Figuur 65 – Simulatie N7 ..... B9

Figuur 66 – Simulatie N8 ..... B10

Figuur 67 – Simulatie N9 ..... B11

Figuur 68 – Simulatie N10 ..... B12

Figuur 69 – Simulatie N11 ..... B13

Figuur 70 – Simulatie N12 ..... B14

Figuur 71 – Simulatie N13 ..... B15

Figuur 72 – Simulatie N14 ..... B16

Figuur 73 – Simulatie N15 ..... B17

Figuur 74 – Simulatie N16 ..... B18

Figuur 75 – Simulatie N17 ..... B19

Figuur 76 – Simulatie N18 ..... B20

Figuur 77 – Simulatie N19 ..... B21

Figuur 78 – Simulatie N20 ..... B22

Figuur 79 – Simulatie N21 ..... B23

Figuur 80 – Simulatie N22 ..... B24

Figuur 81 – Simulatie N23 ..... B25

Figuur 82 – Simulatie N24 ..... B26

Figuur 83 – Simulatie N25 ..... B27

Figuur 84 – Simulatie N26 ..... B28

Figuur 85 – Simulatie N27 ..... B29

Figuur 86 – Simulatie N28 ..... B30

Figuur 87 – Simulatie N29 ..... B31

1 Inleiding

De Royerssluis is een van de 7[(1)] sluizen die de Schelde verbindt met het havengebied van de haven van Antwerpen, zie Figuur 1. De Royerssluis is gelegen op de rechteroever van de Schelde. De bestaande Royerssluis heeft een breedte van 22 m en een lengte van 180 m. Een grondige aanpassing van de bestaande Royerssluis met een (symmetrische) verbreding en verlenging (naar Schelde toe) wordt vooropgesteld. De vernieuwde sluis is zowel aan Scheldezijde als aan dokzijde voorzien van twee roldeuren. De breedte van de vernieuwde sluis zal 36 m bedragen en de lengte tussen de buitenste roldeuren bedraagt 250 m.

Figuur 1 – Locatie Royerssluis in het Antwerps havengebied

De Afdeling Maritieme Toegang (aMT, contactpersoon: ir. W. De Cock) heeft aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd om het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem uit te voeren voor de vernieuwde Royerssluis.

Met betrekking tot de vernieuwing van de Royerssluis werd door WL reeds een nautische simulatiestudie uitgevoerd om het ontwerp van de voorhaven te onderzoeken (Verwilligen *et al.*, 2012). Hierbij werden voornamelijk de gewenste geleidingswerken en staketsels beoordeeld om een veilige toegang van de vernieuwde sluis te garanderen. Voor het nivelleersysteem heeft WL|Delft Hydraulics (nu: Deltares) in 2002 een eerste ontwerp gemaakt (Schwanenberg & Jongeling, 2003).

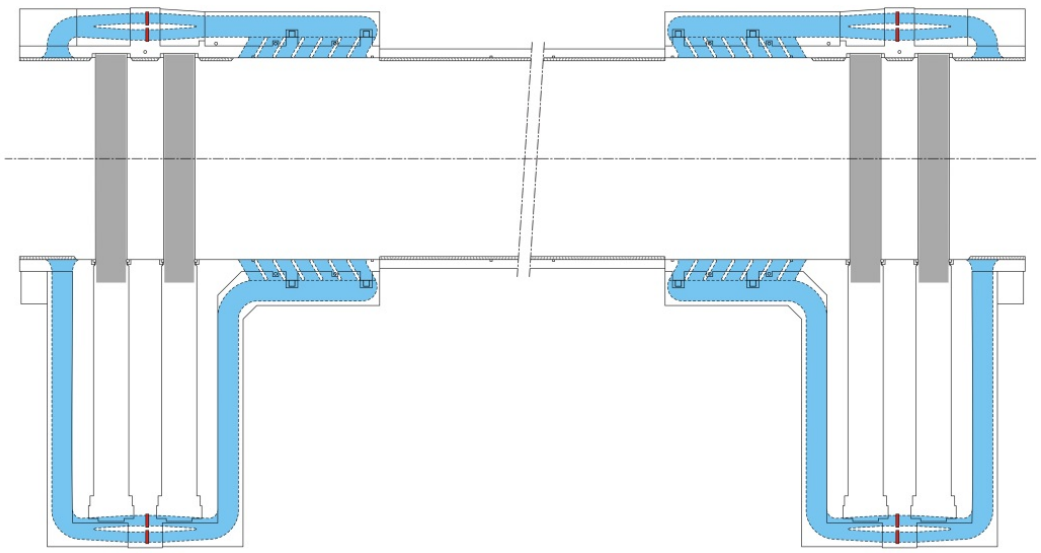
[1] De 7 sluizen in volgorde van constructie zijn de Kattendijksluis, de Royerssluis, de Van Cauwelaertsluis, de Boudewijnsluis, de Zandvlietsluis, de Kallosluis, de Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis.

In de in 2002 uitgevoerde studie bleven de afmetingen van de huidige sluis behouden en was het de bedoeling dat het nivelleersysteem ingebouwd werd in de roldeuren van de bestaande sluis. Door middel van simulaties met het programma LOCKFILL (ontwikkeld door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat) werden een aantal varianten met hefschuiven en een aantal varianten met vlinderkleppen onderzocht. Het programma LOCKFILL berekent het waterpeil in de kolk en de langskrachten op schepen ten gevolge van het nivelleren van de sluis via openingen in de deuren.

In 2012-2013 werd door WL een ontwerp opgemaakt voor een nivelleersysteem met openingen in de deur (Verelst *et al.*, 2013). De simulaties werden uitgevoerd voor een kolk met breedte 36.0 m en lengte tussen de buitenste roldeuren van 250 m. Het bodempeil van de huidige kolk, op TAW –6.41 m, werd niet gewijzigd. De hydraulische simulaties werden uitgevoerd met het WL programma “vul_sluis”. Uit de hydraulische simulaties met het nivelleersysteem met openingen in de roldeur werd besloten dat bij de maatgevende situatie een nivelleertijd lager dan 15 min bekomen wordt met een nivelleersysteem bestaande uit 13 cirkelvormige openingen met diameter 1.80 m afgesloten met vlinderkleppen (totale doorstroomsectie: 33.08 m²) of met een nivelleersysteem waarbij over de volledige breedte van de sluisdeur wordt genivelleerd (analoog aan de Kaisersluis in Hamburg).Tijdens het verder uitwerken van het technisch ontwerp van het nivelleersysteem met openingen in de roldeur werd besloten dat een dergelijk groot aantal openingen met grote doorsnede zowel de prijs als het onderhoud van het nivelleersysteem duur maakt. Om deze reden is een nivelleersysteem met openingen in de roldeur niet weerhouden. Daarnaast werd een nivelleersysteem waarbij over de volledige breedte van de sluisdeur wordt genivelleerd ook niet verder beschouwd.

Omwille van bovenstaande redenen heeft aMT eind 2013 aan WL gevraagd om een nivelleersysteem te ontwerpen op basis van korte omloopriolen. Een illustratie van een dergelijk nivelleersysteem wordt gegeven in Figuur 2. Dit type nivelleersysteem werd voor het eerste toegepast voor de Boudewijnsluis (1955). Vervolgens zijn ook de recentere zeevaartsluizen van de haven van Antwerpen (Zandvlietsluis (1967), Berendrechtsluis (1989), Kallo sluis (1979), Kieldrechtsluis (2016) met een dergelijk type nivelleersysteem uitgerust.

Figuur 2 – Principeschets nivelleersysteem Antwerpse Zeesluizen (Boudewijnsluis (1959) t.e.m. Kieldrechtsluis (2016)) omloopriolen (blauw), hefschuiven (rood), roldeuren (grijs)



Onderhavig rapport beschrijft het hydraulisch ontwerp van een degelijk nivelleersysteem met korte omloopriolen voor de vernieuwde Royerssluis. Het constructief ontwerp werd door aMT uitbesteed aan het studiebureau SBE en verliep synchroon met het hydraulisch ontwerp.

De voor het ontwerp toegepaste geometrie van de sluiskolk, waterstanden aan Scheldezijde en aan dokzijde en de beschouwde ontwerpschepen worden beschreven in hoofdstuk 2. De criteria waaraan het nivelleersysteem moet voldoen, worden gegeven in hoofdstuk 3. De benodigde doorstroomsectie van de omloopriolen wordt bepaald aan de hand van literatuurformules en meetgegevens van de Berendrechtsluis, zie hoofdstuk 4. Daarna werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld. Met dit hydraulisch netwerkmodel werden simulaties uitgevoerd waarbij de nivelleerkromme, de debieten doorheen de omloopriolen en de langse waterspiegelhellingen in de kolk gesimuleerd werden, zie hoofdstuk 5. Door middel van het optimaliseren van de openingswet van de hefschuiven werd een zo kort mogelijke nivelleertijd bekomen waarbij het criterium voor de kracht op het maatgevend schip in de kolk nog gerespecteerd wordt. De aansluiting van de omloopriolen in de kolk, de geometrie van de inlaten en de positionering van de hefschuiven wordt uitgewerkt in hoofdstuk 6. Omwille van de complexiteit van de uitstroomconstructie werd besloten de stroming door deze component te bestuderen met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) in een uitbestede studie. De resultaten van deze CFD-modellering worden gerapporteerd in hoofdstuk 7. Vervolgens werd het hydraulisch netwerkmodel bijgewerkt rekening houdend met de geometrische wijzigingen ten opzichte van de voorontwerpgeometrie en de verliezen van de uitstroomconstructie volgend uit de CFD studie, zie hoofdstuk 8. Een samenvatting van de hydraulische ontwerpstudie wordt gegeven in hoofdstuk 9.

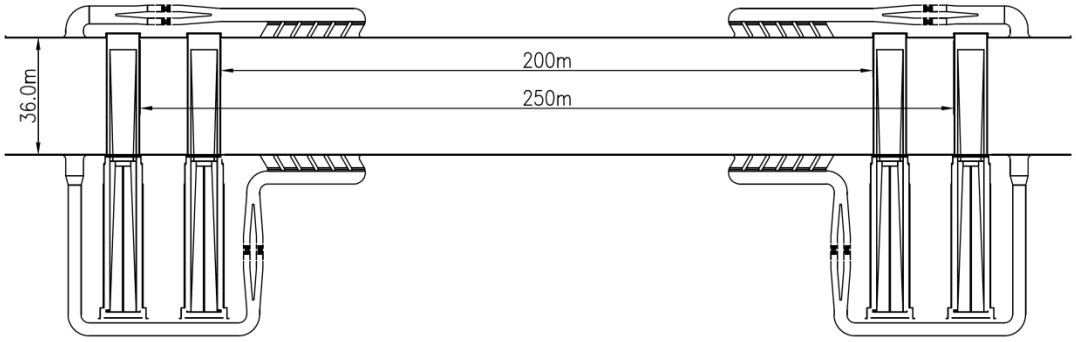
2 Gegevens

De geometrie van de kolk en de extra te nivelleren oppervlakte van de deurkamers wordt beschreven in paragraaf 2.1. De voor het ontwerp te hanteren maatgevende Schelde- en dokpeilen worden gegeven in paragraaf 2.2. Het aanwezige schip in de kolk heeft een invloed op de optredende waterbeweging in de kolk. De maatgevende scheepscombinatie wordt beschreven in paragraaf 2.3.

2.1 Sluiskolk

Een bovenaanzicht van de vernieuwde Royerssluis wordt gegeven in Figuur 3. De afmetingen van de sluiskolk worden gegeven in Tabel 1.

Figuur 3 – Afmetingen sluiskolk



Tabel 1 – Overzicht afmetingen voorontwerp sluiskolk (Vlaamse Overheid - MOW, 2012)

lengte sluiskolk tussen de buitenste roldeuren	250 m
lengte sluiskolk tussen de binnenste roldeuren	200 m[(2)]
breedte sluiskolk	36.0 m
bodempeil sluiskolk	TAW - 6.41 m

Merk in Figuur 3 op dat naast het te nivelleren volume van de kolk ook het volume van de deurkamers en één roldeur genivelleerd moet worden. Tabel 2 geeft een overzicht van de afmetingen van de deurkamers. Hierbij moet opgemerkt worden dat de deurkamer in verticale zin een getrapte opbouw heeft. In Tabel 2 wordt de lengte van de deurkamer vermeld tussen het niveau TAW – 0.17 m en TAW + 4.40 m. Ook voor de breedte van de deurkamer wordt de breedte tussen het niveau TAW – 0.17 m en TAW + 4.40 m beschouwd.

[2] Deze afmeting kan in het definitief ontwerp nog gewijzigd worden, afhankelijk van de definitieve breedte van de roldeuren en deurkamers.

Tabel 2 – Overzicht afmetingen voorontwerp deurkamer

Lengte deurkamer	52.7 m
Breedte deurkamer (TAW – 0.17 m tot TAW + 4.40 m)	16.9 m
Breedte deur	9.5 m

De te nivelleren oppervlakte van de sluiskolk wordt berekend als het product van de lengte en de breedte van de sluiskolk vermeerderd met de te nivelleren oppervlakte van de deurkamers en de binnenoppervlakte van één roldeur.

Tabel 3 geeft voor de verschillende types nivelleringen een overzicht van de in rekening te brengen extra te nivelleren oppervlakte, bestaande uit de oppervlakte van de deurkamers en de binnenoppervlakte van één roldeur. Hierbij wordt de ingenomen oppervlakte van de binnenstructuur van de roldeur verwaarloosd.

Tabel 3 – In deze studie beschouwde extra te nivelleren oppervlakte van deurkamers en binnen oppervlakte roldeur in bovenhoofd (BOHO) en benedenhoofd (BEHO)

		buitenste roldeuren gesloten		**binnenste roldeuren gesloten**	
		Scheldezijde	**dokzijde**	**Scheldezijde**	**dokzijde**
vullen BOHO / ledigen BEHO (Schelde < dok)	**opp. deurkamer**	2 x 890.6 m² = 1781.2 m²	1 x 890.6 m² = 890.6 m²	1 x 890.6 m² = 890.6 m²	0 x 890.6 m² = 0 m²
	binnenopp. roldeur	9.5 m x 36.0 m = 342.0 m²	0 m²	9.5 m x 36.0 m = 342.0 m²	0 m²
	extra te nivelleren opp.	2123.2 m²	890.6 m²	1232.6 m²	0 m²
	kolk opp.	9000 m²		7200 m²	
	totaal te nivelleren opp.	12014 m²		8432 m²	
ledigen BOHO / vullen BEHO (Schelde > dok)	**opp. deurkamer**	1 x 890.6 m² = 890.6 m²	2 x 890.6 m² = 1781.2 m²	0 x 890.6 m² = 0 m²	1 x 890.6 m² = 890.6 m²
	binnenopp. roldeur	0 m²	9.5 m x 36.0 m = 342.0 m²	0 m²	9.5 m x 36.0 m = 342.0 m²
	extra te nivelleren opp.	890.6 m²	2123.2 m²	0 m²	1232.6 m²
	kolk opp.	9000 m²		7200 m²	
	totaal te nivelleren opp.	12014 m²		8432 m²	

2.2 Maatgevende waterstanden

In de studies voor de vernieuwde Royerssluis van Schwanenberg & Jongeling (2003) en Verelst *et al.* (2013) zijn de in Tabel 4 gegeven ontwerpwaterpeilen toegepast.

Tabel 4 – Ontwerpwaterpeilen uit Schwanenberg & Jongeling (2003)

scenario	waterstand kolk [m TAW]	waterstand dokken [m TAW]	waterstand Schelde [m TAW]	verval [m]
vullen bovenhoofd	-1.00	+4.40	-	5.40
ledigen benedenhoofd	+4.40	-	-1.00	5.40
vullen benedenhoofd	+3.92	-	+7.00	3.08
ledigen bovenhoofd	+7.00	+3.92	-	3.08

Bij het ontwerp van het nivelleersysteem voor de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2010b) zijn door WL, als validatie van de software simulaties uitgevoerd met het nivelleersysteem voor de Berendrecht- en de Zandvlietsluis op de rechteroever. Voor de waterstanden van de haven op rechteroever werden hierbij de waarden uit Tabel 5 toegepast

Tabel 5 – Typisch waterpeil in dokken op rechteroever periode 1995 – 1997 (De Broe, 2003)

	waterpeil dok [m TAW]
extreem hoog dokpeil	+ 4.37
normaal dokpeil	+ 4.17
extreem laag dokpeil	+ 3.82

Tabel 6 geeft een overzicht van de karakteristieke waterpeilen van de Schelde te Antwerpen-Loodsgebouw voor de periode 2001-2010.

Tabel 6 – Karakteristieke waterpeilen te Antwerpen-Loodsgebouw voor de periode 2001-2010 (Taverniers *et al.* 2011)

hoogste hoogwater	TAW + 7.06 m
gemiddeld hoogwater springtij	TAW + 5.75 m
gemiddeld hoogwater gemiddeld tij	TAW + 5.31 m
gemiddeld hoogwater doodtij	TAW + 4.73 m
gemiddeld laagwater doodtij	TAW + 0.40 m
gemiddeld laagwater gemiddeld tij	TAW + 0.06 m
gemiddeld laagwater springtij	TAW – 0.20 m
laagste laagwater	TAW – 1.26 m

In overleg met de opdrachtgever is besloten om in deze studie voor het maatgevend laagwater in de Schelde de waarde TAW – 1.00 m te beschouwen. Taverniers *et al.*, (2011) bevat ook frequentieverdelingen van het voorkomen van de laagwaters en de hoogwaters in de periode 2001-2010. Uit deze frequentieverdelingen volgt dat een laagwater van TAW – 1.00 m slechts 3 maal is onderschreden gedurende deze periode van 10 jaar.

Op basis van voorgaande tabellen worden de in deze studie gehanteerde combinaties van Scheldepeilen en dokpeilen opgesteld, zie Tabel 7.

Tabel 7 – In deze studie gehanteerde combinaties van Scheldepeilen en dokpeilen

waterstand Schelde [m TAW]	waterstand dokken [m TAW]	verval [m]
- 1.00	+ 4.40	5.40
+ 0.00	+ 4.40	4.40
+ 1.00	+ 4.40	3.40
+ 2.00	+ 4.40	2.40
- 1.00	+ 3.82	4.82

Bij Tabel 7 wordt het volgende opgemerkt:

- Aangezien het in deze studie beschouwde maatgevend laagwater op de Schelde slechts uitzonderlijk voorkomt, worden ook simulaties uitgevoerd met hogere Scheldepeilen. Als conservatieve aanname wordt hierbij voor het dokpeil de bovengrens van TAW + 4.40 m gebruikt.
- Voor de simulaties waarbij luchtaanzuiging ter hoogte van de inlaat bekeken wordt, is voor het dokpeil de ondergrens van TAW +3.82 m gebruikt.
- In deze studie zijn enkel simulaties uitgevoerd met een Scheldepeil lager dan het dokpeil. Enerzijds is het maximale verval hoger voor de situatie met een Scheldepeil lager dan het dokpeil. Anderzijds is de waterdiepte in de kolk kleiner voor de situatie met een Scheldepeil lager dan het dokpeil. Dit maakt dat deze situatie maatgevend is voor de optredende langskrachten in de kolk en de nivelleertijd.

2.3 Maatgevende scheepscombinatie

De vernieuwde Royerssluis zal uitsluitend gebruikt worden voor binnenvaartschepen. De maatgevend scheepscombinatie bestaat uit een CEMT klasse Vb duwkonvooi en een CEMT klasse VIb duwkonvooi naast elkaar afgemeerd. Tabel 8 geeft een overzicht van de in deze studie toegepaste afmetingen van deze maatgevende combinatie.

Tabel 8 – Karakteristieken van de maatgevende scheepscombinatie (combinatie CEMT klasse Vb en een CEMT klasse VIb)

	CEMT klasse Vb	**CEMT klasse VIb**
Lengte	195.0 m	195.0 m
Breedte	11.4 m	22.8 m
Diepgang	4.5 m	4.5 m
totale massa (schip+lading)	8271 ton	16095 ton
hoek boeg in verticale vlak	21.2°	21.2°
hoek boeg in horizontale vlak	90°	90°

Bij deze tabel moet het volgende opgemerkt worden:

- Merk op dat volgens de CEMT-classificering (CEMT, 1992) een duwkonvooi CEMT klasse Vb een lengte heeft tussen 172 m en 185 m en een duwkonvooi CEMT klasse VIb een lengte heeft tussen 185 m en 195 m. In de in deze studie beschouwde software wordt omwille van de ééndimensionale benadering, ter vereenvoudiging, de combinatie van duwkonvooi CEMT klasse Vb en duwkonvooi CEMT klasse VIb gesimuleerd als één schip. Om die reden wordt in deze studie voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb ook een lengte 195 m toegepast.
- In het kader van sleeptankonderzoek uitgevoerd met een schaalmodel (op schaal 1/25) van het duwkonvooi CEMT klasse Vb en een schaalmodel van het duwkonvooi CEMT klasse VIb (op schaal 1/40) is de totale massa van de beide duwkonvooien bepaald bij een diepgang van 4.0 m. De prototype-lengte van deze duwkonvooien bedroeg 185.0 m (2 duwbakken met een lengte van 76.5 m en een duwboot met een lengte van 32.0 m). Op basis van de opgemeten massa van de duwkonvooien (omgerekend naar prototypedimensies) en rekening houdend met het feit dat de duwboot een lengte heeft van 32.0 m, een diepgang van 1.75 m en een blokcoëfficiënt van 0.71, wordt voor de duwbak een blokcoëfficiënt van 0.93 berekend. Met behulp van de blokcoëfficiënt van de duwbak en de grotere lengte van het duwkonvooi in rekening brengend (door een duwbak van 82.0 m[3] te beschouwen) is voor het CEMT klasse VIb duwkonvooi de totale massa bij een diepgang van 4.5 m uit Tabel 8 bepaald.
- De waarden voor de hoek van de boeg van de duwbak in het horizontaal en verticaal vlak zijn bepaald op basis van het op het WL aanwezig zijnde schaalmodel van deze duwbakken.

[3] De website www.debinnenvaart.nl vermeldt een beperkt aantal duwbakken met lengtes groter dan 76.5 m. Op deze site wordt een duwbak van een Belgische schipper vermeld met een lengte van 82.0 m. Deze lengte is beschouwd voor deze studie.

3 Criteria

De nivellering dient te voldoen aan een aantal hydraulische criteria. De gebruikte criteria betreffen: de nivelleertijd (paragraaf 3.1), de stijgsnelheid (paragraaf 3.2) en de kracht op de verschutte schepen (paragraaf 3.3).

3.1 Nivelleertijd

Door de opdrachtgever wordt bij een maximaal verval van 5.40 m een nivelleertijd van 12.0 min vooropgesteld. Dit maximaal verval komt overeen met een Scheldepeil TAW – 1.00 m en een dokpeil TAW + 4.40 m. Later werd in overleg met de opdrachtgever de vooropgestelde nivelleertijd gewijzigd naar 15.0 min. De nivelleertijd wordt hierbij berekend als de tijd tussen de start van de nivellering en het tijdstip dat het waterpeil in de sluiskolk gelijk is aan het waterpeil van het pand waarnaar genivelleerd wordt.

In sommige gevallen (vooral van toepassing op puntdeuren) worden de sluisdeuren reeds geopend indien er nog een restverval over de deuren aanwezig is. Bij roldeuren echter is het niet gebruikelijk om de deuren te openen onder een restverval. Tijdens de door WL uitgevoerde terreinmeting in de Vandammesluis echter is vastgesteld dat bij deze sluis de roldeuren regelmatig geopend worden onder een restverval. In deze studie wordt voor de bepaling van de nivelleertijd echter geen restverval beschouwd.

3.2 Stijgsnelheid waterpeil

Voor de stijgsnelheid van het waterpeil in de sluiskolk vermeldt Ontwerp van schutsluizen (Beem *et al.*, 2000) voor binnenvaart met vaste haalkommen een maximale stijgsnelheid van het kolkpeil van 1 m/min (~0.017 m/s).

3.3 Kracht op verschutte schepen

De maatgevende scheepscombinatie is een duwkonvooi CEMT klasse Vb in combinatie met een duwkonvooi CEMT klasse VIb. In de literatuur worden voor deze scheepstypes volgende waarden voor de maximaal toegelaten langskracht (uitgedrukt als een fractie in promille van het gewicht van het schip) vermeld:

- Voor een duwkonvooi CEMT klasse Vb wordt een maximaal toelaatbare langskracht op het schip van 0.75 ‰ bij vullen en 1.00 ‰ bij ledigen toegepast (Meersschaut, 1999).
- In de cursus “Ontwerpen en beoordelen van waterbouwkundige constructies” (Anon, 2006) wordt voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb een maximaal toegelaten langskracht op het schip van 0.75 ‰ bij vullen en bij ledigen van de sluiskolk vermeld.
- Meersschaut (1999) vermeldt dat telefonisch onderhoud met de Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft geleerd dat voor vierbaksduwvaart (CEMT klasse VIb) een maximaal toelaatbare langskracht van 0.60 ‰ bij vullen en 0.80 ‰ bij ledigen toegepast wordt.

Voor vullen van de sluiskolk volgt hieruit voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb een maximaal toelaatbare langskracht van 0.75 ‰ en voor het duwkonvooi CEMT klasse VIb een maximale toegelaten waarde voor de langskracht op het schip van 0.60 ‰.

De bovenstaande waarden gelden voor het schip zelf. Bij combinatie van deze beide scheeptypes tot één schip kunnen deze maximaal toelaatbare waarden niet toegepast worden.

In het programma LOCKSIM wordt de combinatie van beide schepen ingegeven als één schip met een lengte van 195.0 m een breedte van 34.2 m en een diepgang van 4.5 m. Deze schepen zijn in praktijk niet met elkaar verbonden. Om die reden wordt voor de combinatie van beide schepen de minimale waarde van de maximaal toelaatbare langskracht op beide schepen (i.e. 0.60 ‰) beschouwd.

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- De combinatie van een duwkonvooi CEMT klasse Vb en een duwkonvooi CEMT klasse VIb zou kunnen gezien worden als een duwkonvooi CEMT klasse VIc (1 duwboot met 3 duwbakken naast elkaar en 2 duwbakken achter elkaar), maar dan met 2 duwboten in plaats van 1 duwboot. De in deze paragraaf afgeleide waarden voor de maximaal toelaatbare langskracht op het schip mogen echter niet beschouwd worden als de maximaal toelaatbare waarden voor de langskracht op een duwkonvooi CEMT klasse VIc. Logischerwijs zouden voor een duwkonvooi CEMT klasse VIc lagere maximale toegelaten waarden voor de langskracht moeten toegepast worden dan voor het duwkonvooi CEMT klasse VIb. Voor grotere schepen (i.e. een groter gewicht van het geladen schip) worden algemeen lagere maximaal toegelaten waarden voor de langskracht (uitgedrukt in ‰, relatief ten opzichte van het gewicht van het schip) toegepast.
- In deze studie zijn voor de maximaal toegelaten waarde van de langskracht op het ontwerpschip waarden uit de literatuur toegepast. In het verleden zijn door WL metingen uitgevoerd van de langse waterspiegelhelling in bestaande sluizen (o.a. de Zandvlietsluis, de Berendrechtsluis, de Vandammesluis en de sluis van Zemst). Deze langse waterspiegelhelling is een maat voor de hydrostatische kracht welke, volgens de literatuur, vaak de belangrijkste component is van de totale hydrodynamische kracht die schepen ondervinden tijdens nivelleren. Op basis van deze metingen werd besloten dat de troskrachtcriteria uit de literatuur redelijk conservatief zijn. Om die reden werd het ontwerp van het nivelleersysteem voor onder andere de Kieldrechtsluis en voor de nieuwe sluis in Zeebrugge in het kader van SHIP getoetst aan berekende langskrachten op het ontwerpschip in een bestaande sluis (als referentiesluis). Voor de studie van de vernieuwde Royerssluis kon geen referentiesluis (i.e. een sluis met een gelijkaardig nivelleersysteem en ontwerpschip) gedefinieerd worden, waardoor de (eerder conservatieve) criteria voor de maximaal toegelaten langskracht op het schip uit de literatuur toegepast dienden te worden.

4 Nivelleersysteem

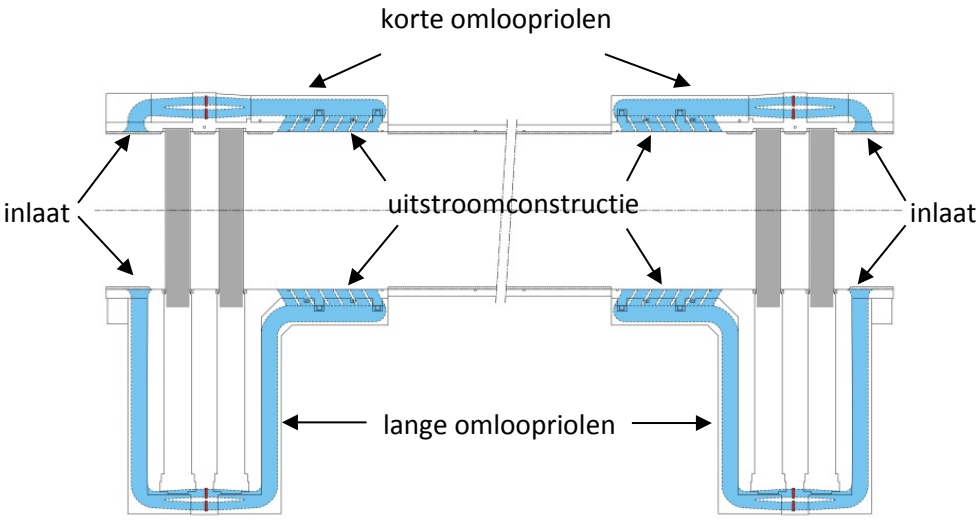
Het gekozen nivelleersysteem wordt kort toegelicht in paragraaf 4.1. De benodigde doorstroomsectie van de omloopriolen wordt berekend aan de hand van een analytische formule voor het berekenen van de nivelleertijd, zie paragraaf 4.2. De benodigde doorstroomsectie van de uitstroomconstructie wordt bepaald door middel van een vergelijking met de uitstroomconstructie van de overige Antwerpse zeesluizen, zie paragraaf 4.3. De geometrie van het nivelleersysteem wordt besproken in paragraaf 4.4. Het besluit wordt samengevat in paragraaf 4.5.

4.1 Principe

In deze studie wordt voor de vernieuwde Royerssluis een nivelleersysteem met korte omloopriolen opgesteld op basis van analoge nivelleersysteem toegepast in de bestaande Antwerpse zeesluizen. Dit systeem werd als eerste toegepast bij de Boudewijnsluis. Vervolgens werden volgende sluizen uitgerust met een dergelijk nivelleersysteem: de Zandvlietsluis de Kallosluis, De Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis. De geometrie van het nivelleersysteem van de Boudewijnsluis en de Zandvlietsluis zijn op het WL onderzocht aan de hand van schaalmodelproeven. Deze schaalmodelproeven zijn gerapporteerd in Lamoen (1950) voor de Boudewijnsluis en in Smets & Sterling (1961, 1962) voor de Zandvlietsluis.

Een principeschets van dit nivelleersysteem met korte omloopriolen wordt gegeven in Figuur 4. Beide hoofden beschikken over een afzonderlijk nivelleersysteem met omloopriolen die langsheen de deuren worden geleid. Deze omloopriolen monden onderaan in de kolkmuur uit via een uitstroomconstructie.

Figuur 4 – Principe nivelleersysteem Antwerpse zeesluizen



Merk in Figuur 4 op dat de omloopriolen van eenzelfde hoofd een groot onderling verschil in lengte hebben. Aan de kolkwand waarin de deurnissen geplaatst zijn, worden de omloopriolen hieromheen geleid, wat resulteert in een toename van de rioollengte ten opzichte van de riolen aan de andere kolkwand. In dit rapport wordt daarom verder verwezen naar beide omloopriolen aan de hand van de termen '**lange omloopriool**' respectievelijk '**korte omloopriool**', zie Figuur 4.

De terminologie van 'inlaat' en 'uitstroomconstructie van een omloopriool die in dit rapport wordt gehanteerd, wordt verduidelijkt in Figuur 4. Merk op dat deze terminologie gebaseerd is op de standaard stroomrichting in geval van vullen van de sluiskolk, waarbij water in de kolk wordt gebracht. In geval van lediging is de standaard stroomrichting in de riolen uiteraard omgekeerd en vervult de zogenaamde 'uitstroomconstructie' de rol van een inlaat waarlangs water uit de kolk geëvacueerd wordt.

4.2 Doorstroomsectie omloopriolen

Door de opdrachtgever werd aanvankelijk een nivelleertijd van 12.0 min bij het maatgevend verval vooropgesteld, zie paragraaf 3.1. Het voor de nivelleertijd maatgevend Scheldepeil respectievelijk dokpeil bedraagt TAW – 1.00 m respectievelijk TAW + 4.40 m (zie paragraaf 2.2). Dit komt overeen met een maatgevend verval van 5.40 m. De nivelleertijd kan bepaald worden aan de hand van volgende literatuur formule (Beem *et al.*, 2000):

$$t_{niv} = \left(\frac{S_{kolk} \cdot \sqrt{2g}}{g \cdot \mu \cdot A_{openingen}} \right) \cdot \Delta H^{0.5} + \frac{1}{2} \cdot t_h$$

Met:

- t_{niv} Nivelleertijd = 12.0 min = 720 s (paragraaf 3.1) [s]
- $A_{openingen}$ Totale doorstroomsectie omloopriolen [m^2]
- S_{kolk} Te nivelleren oppervlak bij het nivelleren met buitenste roldeuren gesloten = 12014 m^2 (Tabel 3) [m^2]
- g Valversnelling = 9.81 m/s^2 [m/s^2]
- μ Afvoercoëfficiënt bij volledig geopende schuiven= 0.54 (Tabel 9) [-]
- ΔH Verval = 5.4 m (paragraaf 2.2) [m]
- t_h Heftijd schuiven = 313 s (analoog met deze voor de Berendrechtsluis) [s]

Merk hierbij op:

- In kader van het hydraulisch ontwerp van de Kieldrechtsluis zijn metingen uitgevoerd in de Zandvlietsluis en de Berendrechtsluis (De Mulder & Vercruysse, 2007; De Mulder *et al.*, 2008). Van de in 2008 uitgevoerde terreinmeting in de Berendrechtsluis werd de nivelleertijd in functie van het verval uitgezet. Op basis van deze grafiek en de hierboven vermelde formule werd door middel van een regressieanalyse de afvoercoëfficiënt bepaald, zie Tabel 9.

Tabel 9 – Afvoercoëfficiënt bij volledig geopende schuiven μ [-] voor de Berendrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2008)

	vullen via het bovenhoofd	vullen via het beneden hoofd	ledigen via het bovenhoofd	ledigen via het benedenhoofd	globaal
afvoercoëfficiënt μ [-]	0.66	0.78	0.60	0.54	0.61
afwijking afvoercoëfficiënt regressiecurve t.o.v. metingen [%]	+3 / -11	+4 / -14	+4 / -19	+11 / -16	+25 / -33

Uit Tabel 9 volgt dat de op basis van de meetgegevens van de Berendrechtsluis afgeleide afvoercoëfficiënt voor ledigen over het algemeen kleiner is dan de afvoercoëfficiënt voor vullen. Aangezien de formule voor de nivelleertijd en het criterium voor de nivelleertijd zowel voor vullen als voor ledigen van toepassing is, wordt de kleinste afvoercoëfficiënt overgenomen voor het begroten van de benodigde doorstroomsectie van de omloopriolen.

- Als eerste aanname wordt de heftijd gelijkgesteld aan 313 s, i.e. de heftijd van de hefschuiven van de Berendrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2008). Een andere mogelijkheid zou zijn om de hefsnelheid gelijk te stellen. Bij een rioolhoogte 4 m voor de vernieuwde Royerssluis en een rioolhoogte 7 m voor de Berendrechtsluis wordt de heftijd hierdoor gereduceerd tot 179 s. Bij toepassen van bovenstaande formule volgt hieruit een reductie van de nivelleertijd met 68 s. Merk op dat dit slechts aannames betreffen en dat de toelaatbare hefsnelheid zal volgen uit de LOCKSIM simulaties, zie hoofdstuk 5 en hoofdstuk 8.

Na het herschrijven van de formule kan de benodigde doorstroomsectie berekend worden:

$$A_{openingen} = \left(\frac{S_{kolk} \cdot \sqrt{2g}}{g \cdot \mu \cdot}\right) \cdot \Delta H^{0.5} \cdot \frac{1}{\left(t_{niv} - \frac{1}{2} \cdot t_h\right)} = \left(\frac{12014 \cdot \sqrt{2g}}{9.81 \cdot 0.54}\right) \cdot 5.4^{0.5} \cdot \frac{1}{\left(720 - \frac{1}{2} \cdot 313\right)}$$
$$= 41.4\ m^2$$

Uit bovenstaande formule volgt dat een doorstroomsectie van 41.4m^2 nodig is om de kolk in 12 min te nivelleren bij het maatgevend verval.

In overleg met de opdrachtgever werd afgesproken om voor de initiële LOCKSIM simulaties een doorstroomsectie 32 m^2 te beschouwen. Deze doorstroomsectie komt overeen met de doorstroomsectie van 33 m^2 volgend uit de simulaties voor een nivelleersysteem met openingen in de deur (Verelst *et al.*, 2013). Op basis van een doorstroomsectie van 32 m^2 wordt gekozen voor omloopriolen met een breedte 4.0 m en een hoogte 4.0 m. De doorstroomsectie per riool bedraagt 16 m^2 of 32 m^2 voor beide omloopriolen.

4.3 Doorstroomsectie uitstroomconstructie

Voor het bepalen van de doorstroomsectie van de uitstroomconstructie (i.e. het aantal openingen en de afmetingen van de openingen) wordt een vergelijking gemaakt met de uitstroomconstructie van de analoge nivelleersystemen van de overige zeesluizen in de haven van Antwerpen.

Tabel 10 vergelijkt de afmetingen van de kolk, de omloopriolen en de uitstroomconstructie van de vernieuwde Royerssluis met deze van de nivelleersystemen van de overige zeesluizen. In deze tabel zijn ook de waarden voor de volgende dimensieloze karakteristieke verhoudingen tussen de afmetingen van het nivelleersysteem vermeld:

- Verhouding van de doorstroomsectie van de uitstroomopeningen tot de doorstroomsectie van de omloopriool.
- Hoogte/breedte verhouding van de uitstroomopeningen.
- Verhouding hoogte van de uitstroomopeningen tot de hoogte van de omloopriool.

Tabel 10 – Vergelijking afmetingen omloopriolen en uitstroomconstructie Antwerpse zeesluizen

			Boudewijn sluis	Zandvliet sluis	Kallo-sluis	Beren-drecht sluis	Kieldrecht sluis	vernieuwde Royers-sluis
kolk	lengte	m	360	500	360	500	500	250
	breedte	m	45	57	50	68	68	36
	oppervlak	m²	16200	28500	18000	34000	34000	9000
	bodempeil	TAW	-10.33	-13.58	-12.58	-13.58	-17.8	-6.41
omloopriool	breedte	m	5.00	6.50	5.50	7.00	7.00	4.00
	hoogte	m	5.50	6.00	6.00	7.00	7.00	4.00
	doorstroomsectie	m²	27.5	39	33	49	49	16
uitstroom-constructie	aantal	-	6	6	6	7	7	6
	breedte	m	4.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00
	hoogte	m	2.00	2.70	2.00	3.25	3.25	1.50
	doorstroomsectie	m²	48	81	60	113.75	113.75	36
$\frac{\text{doorstroomsectie uitstroomopeningen}}{\text{doorstroomsectie omloopriool}}$		-	1.75	2.08	1.82	2.32	2.32	2.25
$\frac{\text{hoogte uitstroomopening}}{\text{breedte uitstroomopening}}$		-	0.50	0.54	0.40	0.65	0.65	0.38
$\frac{\text{hoogte uitstroomopening}}{\text{hoogte omloopriool}}$		-	0.36	0.45	0.33	0.46	0.46	0.38

Uit Tabel 18 volgt dat de verhouding van de doorstroomsectie van de uitstroomopeningen tot de doorstroomsectie van de omloopriool bij de overige zeesluizen gelegen is tussen 1.75 en 2.32. De hoogte/breedte verhouding van de uitstroomopeningen varieert tussen 0.40 en 0.65. De verhouding van de hoogte van de uitstroomopeningen tot de hoogte van de omloopriool varieert tussen 0.33 en 0.46.

Aan de hand van deze waarden zijn voor de uitstroomconstructie van één omloopriool van de vernieuwde Royerssluis 6 openingen met een breedte van 4.0 m en een hoogte van 1.5 m beschouwd. Op deze wijze wordt voor elke omloopriool een doorstroomsectie van de openingen van 36 m² bekomen. De doorstroomsectie van één omloopriool van de vernieuwde Royerssluis bedraagt 16 m². Aldus wordt een verhouding doorstroomsectie van de uitstroomopeningen tot de doorstroomsectie van de omloopriolen van 2.25 bekomen en een verhouding van de hoogte van de uitstroomopeningen tot de hoogte van de omloopriool van 0.38. Deze beide verhoudingen zijn gelegen binnen de range van waarden van deze verhoudingen voor de nivelleersystemen voor de overige zeesluizen. De hoogte/breedte verhouding van de uitstroomopeningen bedraagt voor de vernieuwde Royerssluis 0.38, wat juist lager is dan de ondergrens voor deze verhouding van 0.40, dewelke voor de Kallosluis berekend is. Aangezien dit slechts een beperkt lagere waarde voor deze verhouding betreft, wordt de hoogte/breedte verhouding van de uitstroomopeningen behouden voor het verdere ontwerp van het nivelleersysteem.

4.4 Geometrie

Het studiebureau heeft de geometrie uitgewerkt in CAD. Gedurende het ontwerpproces heeft WL verschillende plannen ontvangen:

- In kader van de MKBA werden door het studiebureau onderstaande plannen opgemaakt (mail De Cock, W. dd. 26/11/2013; pdf formaat):
    - SBE (2013a). MKBA Royerssluis Antwerpen - Doorsnedes scenario 2 - Eerste uitgave. Plan dd. 22-04-2013
    - SBE (2013b). MKBA Royerssluis Antwerpen - Grondplan scenario 2 - Eerste uitgave Plan dd. 15-05-2013

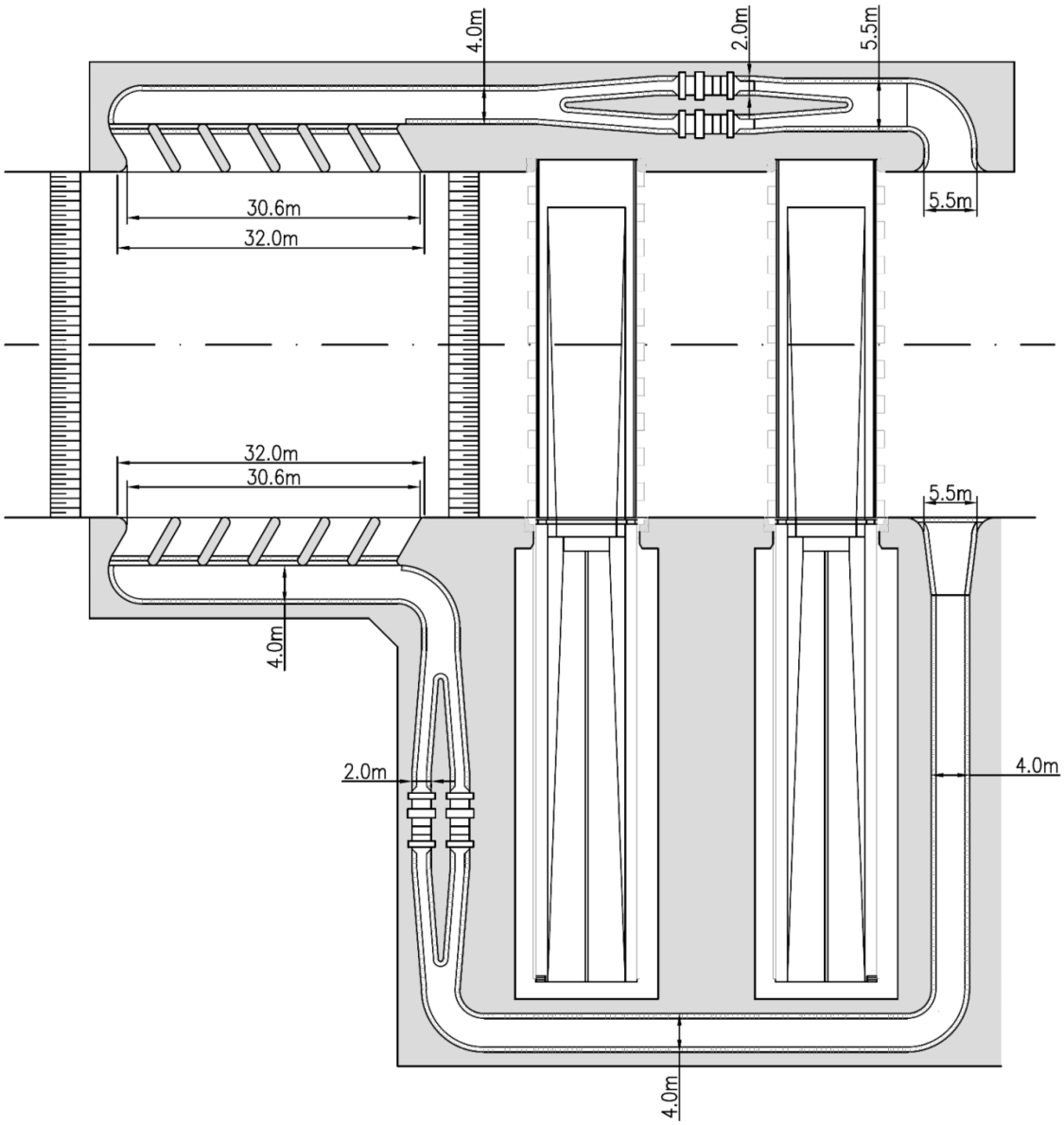
  Deze plannen werden gebruikt voor het opstellen van het hydraulisch netwerkmodel met de initiële geometrie in hoofdstuk 5.
- Na het bepalen van de doorstroomsectie van de omloopriolen en de uitstroomconstructie heeft het studiebureau volgende plannen opgesteld (mail Putteman, J. DD. 2/04/2014 en 4/04/2014; pdf formaat):
    - SBE (2014b). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Korte omloopriool Benedenhoofd planzicht en sneden Plan dd. 02-04-2014.
    - SBE (2014c). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Korte omloopriool Benedenhoofd planzicht en sneden Plan dd. 03-04-2014.
    - SBE (2014d). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Lange omloopriool Benedenhoofd planzicht en sneden - Plan dd. 02-04-2014.
- Voor het uittekenen van de CFD geometrie heeft WL de 2D CAD plannen van de initiële geometrie opgevraagd bij SBE (mail Putteman, J. dd. 23/05/2014; CAD formaat). Naast bovenstaande plannen bevatte het aangeleverde CAD bestand ook volgende plannen:
    - SBE (2014e). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Principeaanzicht saswand Plan dd. 02-04-2014.
    - SBE (2014a). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Grondplan sluis met wegenis Plan dd. 04-04-2014.(SBE, 2014f) Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Voorstel positie kiosken hefschuiven Plan dd. 03-04-2014.
- Op 11/06/2014 heeft SBE de plannen van het bovenhoofd bezorgd met de gewijzigde geometrie van de inlaat en het verlaagde bodempeil van de omloopriolen (mail Puttenman, J. dd. 11/06/2014; pdf formaat):
    - SBE (2014o). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Principe aanzichten saswand - plan dd. 11-06-2014
    - SBE (2014h). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Korte omloopriool Bovenhoofd planzicht en sneden - plan dd. 11-06-2014
    - SBE (2014n). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool Bovenhoofd planzicht en sneden - plan dd. 11-06-2014
- Voor het afwerken van het rapport heeft WL in januari 2015 de meest recente plannen opgevraagd (mail Putteman, J. dd. 13/01/2015; pdf formaat):

- SBE (2014r). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis -Principeaanzichten saswand - plan dd. 2-12-2014
- SBE (2014p). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis -Doorsnedes deurkamer benedenhoofd - plan dd. 2-12-2014
- SBE (2014q). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis -Korte omloopriool benedenhoofd planzicht en sneden - plan dd. 2-12-2014
- SBE (2014j). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool benedenhoofd planzicht en snede A - plan dd. 2-12-2014
- SBE (2014k). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool benedenhoofd planzicht en snede B - plan dd. 2-12-2014
- SBE (2014i). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Korte omloopriool bovenhoofd planzicht en sneden - plan dd. 2-12-2014
- SBE (2014l). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool bovenhoofd planzicht en snede A - plan dd. 2-12-2014
- SBE (2014m). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool bovenhoofd planzicht en snede B - plan dd. 2-12-2014
- SBE (2014g). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Doorsnedes deurkamer bovenhoofd - plan dd. 2-12-2014
- SBE. (2015). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis -Deurkamer planzicht en doorsnede op + 8.250 - plan dd. 6-01-2015

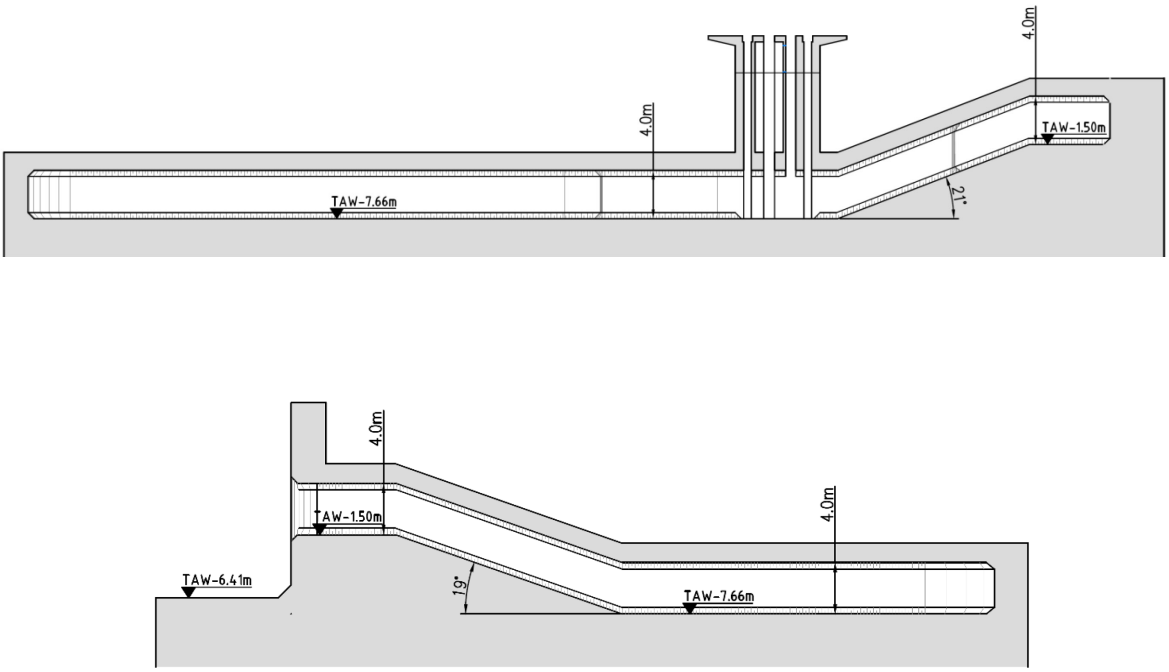
Op basis van de op 13/01/2015 doorgestuurde plannen werd het hydraulisch netwerkmodel uit hoofdstuk 5 gewijzigd en werden nieuwe LOCKSIM simulaties uitgevoerd, zie hoofdstuk 8.

De hieronder beschreven geometrie is op basis van de op 13/01/2015 doorgestuurde plannen. Een bovenaanzicht respectievelijk doorsnede van het nivelleersysteem wordt gegeven in Figuur 5 respectievelijk Figuur 6.

Figuur 5 – Bovenaanzicht korte en lange omloopriool bovenhoofd



Figuur 6 – Doorsnede omloopriolen bovenhoofd



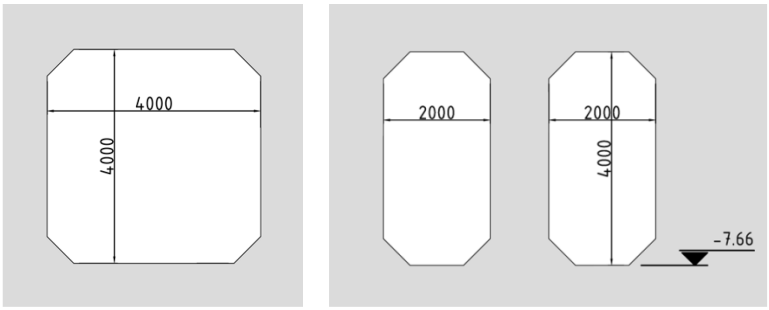
boven: kort omloopriool / onder: lange omloopriool

Bemerk hierin:

- De omloopriolen hebben een breedte 4.0 m en een hoogte 4.0 m. Omwille van constructieve redenen worden de 4 hoeken afgeschuind over 0.25 m. Ter hoogte van de hefschuiven wordt de omloopriool gesplitst. De beschikbare doorstroomsectie blijft behouden en de deelriolen hebben een breedte 2.0 m en een hoogte 4.0 m. De doorstroomsectie van de omloopriool en de doorstroomsectie ter hoogte van de hefschuiven worden gegeven in Figuur 7.
- De lange omloopriool wordt rondom de deurkamers geleid en heeft hierdoor twee extra 90° bochten in vergelijking met de korte omloopriool. De lengte van de lange omloopriool is hierdoor ook groter dan deze van de korte omloopriool: 168 m ten opzichte van 78 m.
- Om de bouwkuip te beperken in breedte worden de hefschuiven van de lange omloopriool naast de deurkamers geplaatst. Dit in tegenstelling tot de reeds bestaande zeesluizen waar de hefschuiven halfweg de omloopriool geplaatst zijn (zie Figuur 5).
- Het bodempeil van de kolk ligt op TAW – 6.41 m. Bij een maatgevend Scheldepeil TAW – 1.00 m bedraagt de waterhoogte in de kolk 5.41 m, wat maakt dat de kielspeling voor de ontwerpschepen met diepgang 4.50 m bij deze peilen 0.91 m bedraagt.
- Ter hoogte van de uitstroomconstructie wordt een lokale verdieping van de kolkbodem met 1.25 m voorzien tot een bodempeil TAW – 7.66 m, zie Figuur 8. Het bodempeil van de omloopriolen wordt ook op TAW – 7.66 m geplaatst omwille van het risico op luchtaanzuiging ter hoogte van de hefschuiven. De verdieping van de kolkbodem wordt besproken in paragraaf 6.1 en het risico op luchtaanzuiging ter hoogte van de hefschuiven in paragraaf 6.3.

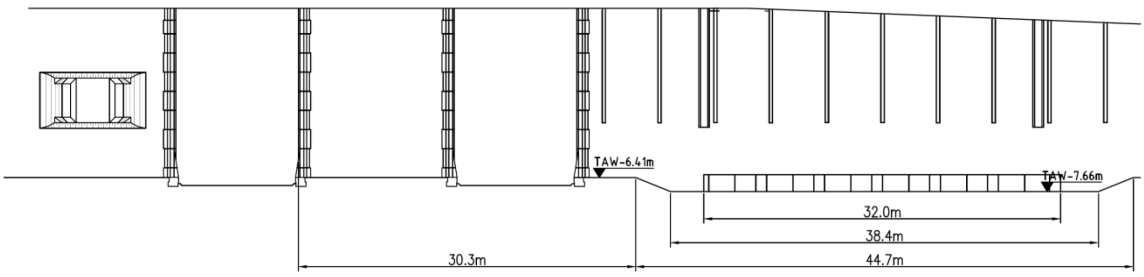
- De geometrie van de inlaten is om constructieve en hydraulische redenen gewijzigd ten opzichte van deze van de Berendrechtsluis en de Kieldrechtsluis. Dit wordt besproken in paragraaf 6.2.
- De geometrie van de uitstroomconstructie wordt besproken in hoofdstuk 7.
- Op het peil van de inlaat na zijn de omloopriolen van het benedenhoofd en van het bovenhoofd aan elkaar gelijk. Het peil van de inlaat van de omloopriolen was nog niet bepaald tijdens het uitvoeren van de initiële simulaties (zie hoofdstuk 5). Om die reden werd besloten om voor de initiële simulaties de invloed van het peilverschil op de lengte van de omloopriolen niet mee te nemen, waardoor de omloopriolen in het benedenhoofd en het bovenhoofd in de initiële simulaties identiek zijn.

Figuur 7 – Doorstroomsectie



links: omloopriool / rechts: t.h.v. hefschuif

Figuur 8 – Lokale verdieping kolkbodem ter hoogte van de uitstroomopeningen



4.5 Besluit

De benodigde doorstroomsectie van de omloopriolen werd bepaald op basis van een analytische formule voor de nivelleertijd. Hierbij werd de afvoercoëfficiënt bepaald op basis van in het verleden uitgevoerde terreinmetingen in de Berendrechtsluis. Uit deze formule volgde dat met een doorstroomsectie van 41.4 m^2 een nivelleertijd van 12.0 min gehaald kan worden. In overleg met de opdrachtgever werd afgesproken om voor de initiële LOCKSIM simulaties een doorstroomsectie 32 m^2 te beschouwen. Deze doorstroomsectie komt overeen met de doorstroomsectie van 33 m^2 volgend uit de simulaties voor een nivelleersysteem met openingen in de deur. Op basis hiervan werd een initiële geometrie uitgewerkt met omloopriolen met breedte 4.0 m en hoogte 4.0 m. Dit komt overeen met een doorstroomsectie van 16 m^2 per omloopriool of 32 m^2 in totaal. De doorstroomsectie van de uitstroomconstructie in de kolk wordt bepaald door middel van een vergelijking met de uitstroomconstructie van het nivelleersysteem van de overige Antwerpse Zeesluizen. De gekozen uitstroomconstructie bestaat per omloopriool uit 6 openingen met breedte 4.0 m en hoogte 1.50 m.

Na het bepalen van de doorstroomsectie van de omloopriolen en de uitstroomconstructie werd door het studiebureau een initieel ontwerp van de omloopriolen opgemaakt. Bij het verder uitwerken van het hydraulisch ontwerp werden de geometrie en het peil van de inlaten gewijzigd, het bodempeil van de riool verlaagd en ter hoogte van de uitstroomconstructie in de kolk een lokale bodemverdieping voorzien.

5 LOCKSIM simulaties initiële geometrie

Na het bepalen van de doorstroomsectie van de omloopriolen, zie hoofdstuk 4, werd een initiële geometrie opgemaakt. Aan de hand van deze initiële geometrie wordt een hydraulisch netwerkmodel opgesteld waarmee hydraulische simulaties uitgevoerd worden. Hierbij is gebruik gemaakt van LOCKSIM[4]. Na het uitvoeren van de CFD studie en het finaliseren van de geometrie worden in hoofdstuk 8 simulaties uitgevoerd met een gewijzigd hydraulisch netwerkmodel.

Het opgestelde hydraulisch netwerkmodel wordt beschreven in paragraaf 5.1. Met dit model worden simulaties uitgevoerd waarbij een geoptimaliseerde openingswet wordt opgesteld en waarmee vervolgens de nivelleertijd, stijgsnelheid en langse waterspiegelhelling op een schip in de sluiskolk bepaald worden, zie paragraaf 5.2. De conclusies worden samengevat in paragraaf 5.3.

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

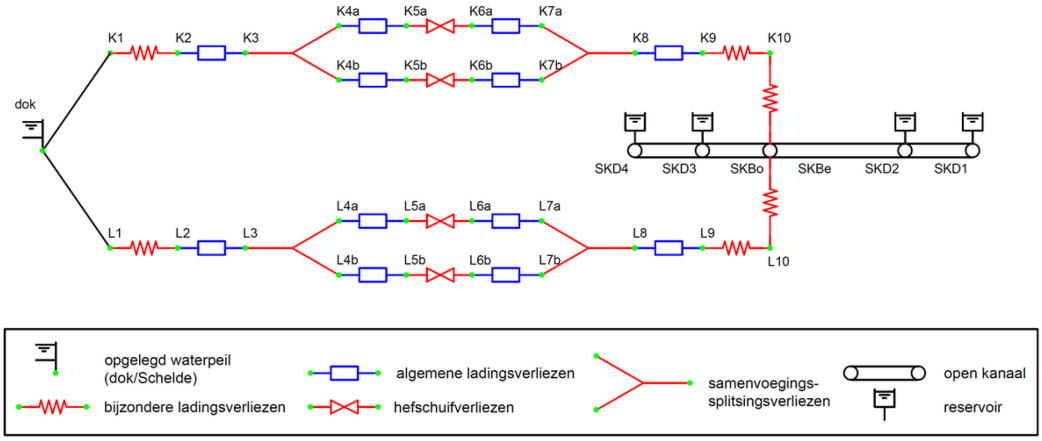
- De hydraulische simulaties in dit hoofdstuk betreffen de initiële geometrie. Hierbij bevindt het vloerpeil van de omloopriolen zich op TAW – 6.41 m. De lokale verdieping van de sluiskolkbodem ter plaatse van de uitstroomconstructie, het verlagen van het bodempeil van de omloopriolen en de overige wijzigingen aan het ontwerp van de omloopriolen beschreven in hoofdstuk 6 worden in dit hoofdstuk niet beschouwd.
- Het merendeel van de simulaties wordt uitgevoerd voor vullen via het bovenhoofd, aangezien de langse waterspiegelhelling op de verschutte schepen hierbij het grootste zijn. Ter controle zijn enkele simulaties voor ledigen via het benedenhoofd uitgevoerd.
- De waterbeweging in de sluiskolk wordt gemodelleerd door het oplossen van de 1D Saint-Venant vergelijkingen. De aanwezigheid van een schip in de sluiskolk wordt in rekening gebracht door het wijzigen van de natte sectie en de natte omtrek ter plaatse van het schip. Uit de waterbeweging in de sluiskolk wordt de variatie in de tijd van de waterspiegelhelling tussen boeg en hek van het schip berekend, dewelke een maat is voor de hydrostatische kracht op het schip in de sluiskolk. Aan de hand van de uitgevoerde hydraulische simulaties kan bijgevolg een inschatting gemaakt worden van de langskracht op het schip in de sluiskolk tijdens het nivelleren. De simulaties geven geen informatie met betrekking tot dwarskracht en momenten op het schip tijdens de nivellering.
- Enkel de langse waterbeweging in de kolk ten gevolge van het nivelleren wordt gesimuleerd. Bij het nivelleren van de maatgevende scheepscombinatie bedraagt de blokkering van de natte sectie bij het minimaal kolkpeil 80 %. Ten gevolge van deze blokkering kan het uitvaren of invaren van één van beide schepen resulteren in grote krachten op het nog aangemeerd schip. Ook het openen van de deuren met een restverval kan resulteren in grote krachten op de schepen in de sluiskolk. Deze krachten kunnen niet begroot worden met het gebruikte programma.

[4] Het programma LOCKSIM (Schohl G.A., 1998) werd ter beschikking gesteld van het WL door de ontwikkelaar Dr. G.A. Schohl (Tennesse Valley Authority, USA). LOCKSIM wordt courant gebruikt voor sluismodellering door de USACE (U.S. Army Corps of Engineers).

5.1 Hydraulisch netwerkmodel

Op basis van de in het verleden opgestelde hydraulisch netwerkmodellen voor de Zandvlietsluis, Berendrechtsluis en Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a; b) wordt een hydraulisch netwerkmodel opgesteld voor de vernieuwde Royerssluis. Een dergelijk netwerkmodel betreft een netwerkschema van gesloten en open leidingen, lokale (tijdsafhankelijke) verliezen en splitsingen en samenvoegingen. Het netwerkschema dat opgesteld is voor de vernieuwde Royerssluis wordt gegeven in Figuur 9. Merk op dat de omloopriolen van het beneden- en bovenhoofd (op het drempelpeil van de inlaat na) identiek zijn waardoor voor beide omloopriolen dezelfde schematisatie gebruikt zal worden.

Figuur 9 – Hydraulisch netwerkmodel voor nivelleren via bovenhoofd



De schematisatie van de korte en lange omloopriool is identiek. De bijzondere ladingsverliezen en de algemene ladingsverliezen (i.e. de rioollengtes) zijn evenwel verschillend. De sectie van de omloopriolen wordt gegeven in Tabel 11. De bijzondere en algemene ladingsverliezen van de omloopriolen worden samengevat in Tabel 12.

Tabel 11 – Doorstroomsectie omloopriolen en hefschuiven

	breedte [m]	hoogte [m]	doorstroomsectie [m²]	hydraulische diameter [m]
omloopriool	4.00	4.00	16.00	4.00
hefschuiven	2.00	4.00	8.00	2.67

Tabel 12 – Hydraulisch netwerkmodel omloopriolen vernieuwde Royerssluis

knoop		type component	beschrijving	omloopriool	
op-waarts	af-waarts			kort	lang
1	2	bijzondere	inlaat verliezen en bochten voor splitsing	ξ+ = 1.0 / ξ- = 1.8	ξ+ = 1.0 / ξ- = 1.8
2	3	algemene	lengte leiding van inlaat tot splitsing	L = 15.6 m	L = 65.1m
3	4	splitsing	verliezen splitsen (of samenvoegen)	default ≈ 0	default ≈ 0
4	5	algemene	lengte leiding tussen splitsing en hefschuif	L = 15.8 m	L = 15.8 m
5	6	hefschuif	hefschuifverliezen in functie van opening	ξ(t)	ξ(t)
6	7	algemene	lengte leiding tussen hefschuif en samenvoeging	L = 15.8 m	L = 15.8 m
7	8	samenvoeging	verliezen samenvoegen (of splitsen)	default ≈ 0	default ≈ 0
8	9	algemene	lengte leiding na samenvoeging t.e.m. halve lengte uitstroomconstructie	L = 18.4 m	L = 71.6 m
9	10	bijzondere	verliezen bochten tot uitstroomconstructie	ξ = 0.0	ξ = 0.4
10	SKBO/ SKBE[5]	bijzondere	verliezen uitstroomconstructie	ξ+ = 1.7 ξ- = 3.1	ξ+ = 2.6 ξ- = 2.2

Bij Tabel 12 wordt het volgende opgemerkt:

- Sommige componenten hebben een verlies afhankelijk van de stroomrichting. Een "+" duidt op stroming van dok of Schelde naar de kolk (i.e. de normale stroomrichting bij sluisvulling) en een "-" duidt op stroming van de kolk naar dok of Schelde (i.e. de normale stroomrichting bij sluislediging).
- De inlaat heeft een verlies ξ+ = 0.2 bij positieve stroming en bij het omkeren van de stroming een verlies ξ- = 1.0. Dit zijn standaardwaarden voor een inlaat/uitlaat (Schohl G.A., 1998).
- De horizontale bochten zijn overgenomen van een eerste geometrie doorgestuurd door SBE. (2013). De verliezen zijn begroot door middel van de diagrammen van (Idel'Cik, 1969). Zowel voor de horizontale bochten in de lange als korte omloopriool wordt op deze wijze een verliescoëfficiënt ξ = 0.2 bekomen.
- Het vloerpeil van de omloopriool ter hoogte van de inlaat ligt hoger dan het vloerpeil van de rest van de omloopriool waar het peil overeenkomt met de kolkbodem (TAW – 6.41 m). De hoek waaronder de overgang tussen het peil van de inlaat en de rest van de omloopriool gemaakt wordt was bij het uitvoeren van de simulaties nog niet bepaald. Om die reden wordt als eerste schatting de verliezen van een verticale knik overgenomen uit het hydraulisch netwerkmodel van de Berendrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2010b). Voor elke verticale knik wordt een verlies ξ = 0.3 in rekening gebracht of ξ = 0.6 in totaal.
- De verliescoëfficiënt van de hefschuiven wordt overgenomen uit Idel'Cik (1969). Door middel van interpolatie wordt de stap in hefhoogte waarmee in Idel'Cik (1969) een verliescoëfficiënt wordt gegeven verkleind (De Mulder *et al.*, 2007).

[5] SKBO = sluiskolk bovenhoofd ; SKBE = sluiskolk benedenhoofd

- Voor de splitsings- en samenvoegingsverliezen worden de default waarden uit LOCKSIM (i.e. bepaald op basis van formules die interpoleren tussen de in D. S. Miller (1990) voorgestelde ladingsverliescoëfficiënten) gebruikt, waarvoor de hoek moet ingegeven worden. Op het plan SBE (2013) werd een hoek van 4° afgelezen.
- De verliezen van de uitstroomconstructie zijn bepaald door het afregelen van het hydraulisch netwerkmodel van de Berendrechtsluis aan de hand van in het verleden door WL uitgevoerde terreinmetingen in de Berendrechtsluis. Hierdoor worden de modelonnauwkeurigheden van het model van de Berendrechtsluis verdisconteerd (De Mulder *et al.*, 2010a). De verliezen verschillen sterk tussen de korte en lange omloopriool. De waarde voor ξ- is groter dan deze voor ξ+ voor de korte omloopriool, terwijl dit voor de lange omloopriool omgekeerd is.
- Voor de omloopriolen en de kolk wordt een equivalente wandruwheid van 1.5 mm toegepast om de wrijvingsverliezen te begroten. In de literatuur wordt voor beton een waarde tussen 0.3 mm en 3.0 mm gevonden waarbij 0.3 mm van toepassing is voor nieuw glad beton en 3.0 mm voor oud beton (Munson *et al.*, 1990). De lengte van de leidingen wordt gemeten op de hartlijn. Het vloerpeil van de riolen wordt overal op peil TAW – 6.41 m gelegd, wat overeenkomt met het bodempeil van de kolk.

De lengte van de “open kanalen” waaruit de kolk bestaat wordt gegeven in Tabel 13. De kolkbodem ligt op TAW – 6.41 m en de kolkbreedte bedraagt 36.0 m.

Tabel 13 – Hydraulisch netwerkmodel kolk vernieuwde Royerssluis

knoop		lengte open kanaal [m]
opwaarts	afwaarts	
SKD4	SKD3	22.9
SKD3	SKBo	22.7
SKBo	SKBe	158.8
SKBe	SKD1	22.7
SKD1	SKD2	22.9

In de LOCKSIM berekeningen wordt de lengte van de “open kanaal” componenten opgedeeld in een aantal ruimtelijke stappen Δx met een identieke lengte. Om redenen van nauwkeurigheid bedraagt de maximale lengte van een ruimtelijke stap:

$$\Delta x_{max}=\Delta t\cdot\sqrt{g\left(\frac{A}{B}\right)_{min}} \qquad \text{(Schohl G.A., 1998)}$$

Met:

- Δx_{max} Maximale stap [m]
- Δt Tijdstap simulaties = 1 s [s]
- g Valversnelling = 9.81 m/s^2 [m/s^2]
- A Natte sectie bij minimum kolkpeil
  = waterhoogte x kolkbreedte = $\left(\text{TAW - 1.0 m -TAW - 6.41 m}\right)$x 36 m=194 m^2 [m^2]
- B Kolkbreedte = 36 m [m]

$$\Delta x_{max}=1\cdot\sqrt{9.81\cdot\left(\frac{194}{36}\right)}=7.3\text{ m}$$

De kolk is uitgerust met roldeuren, namelijk twee roldeuren in elk sluishoofd. Bij gebruik van de buitenste roldeuren (nr. 1 en nr. 4) bedraagt de kolkoppervlakte 9000 m^2. Bij het nivelleren van de kolk met de buitenste roldeuren wordt ook de oppervlakte van de twee binnenste deurkamers mee genivelleerd en de deurkamer en het binnenoppervlak van de deur aan de zijde van het laagste peil. Uit Tabel 3 in paragraaf 2.1 volgt dat de totaal te nivelleren oppervlakte voor vullen van de sluis via het bovenhoofd en ledigen van de sluis via het benedenhoofd met de buitenste roldeuren 12014 m² bedraagt.

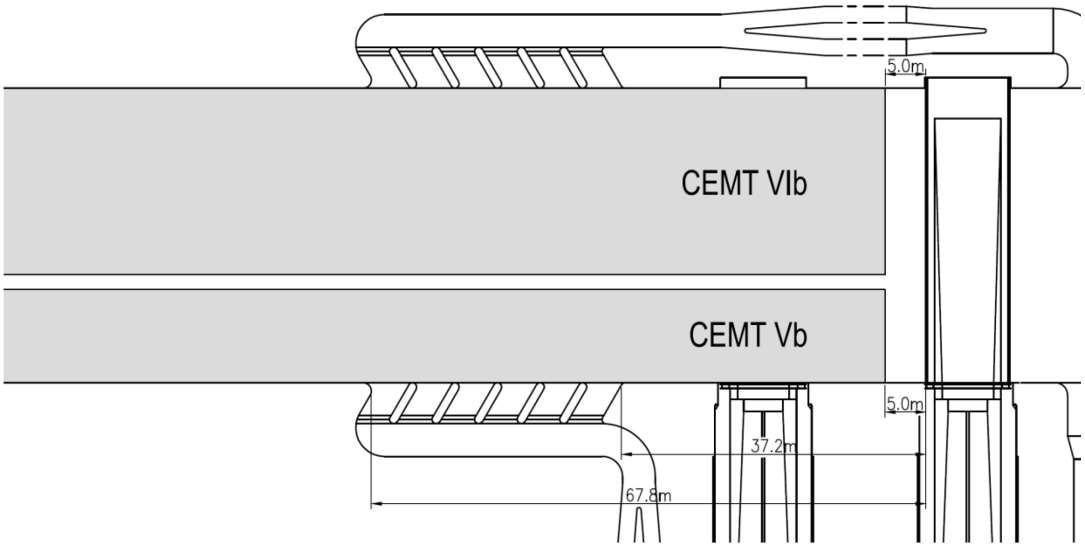
De simulaties worden uitgevoerd met een duwkonvooi klasse CEMT Vb en een duwkonvooi klasse CEMT VIb met een diepgang 4.50 m naast elkaar aangemeerd in de kolk (Tabel 8). In LOCKSIM worden deze twee schepen als 1 schip weergegeven. Deze configuratie wordt beschouwd als de maatgevende scheepscombinatie. In de tabellen wordt dit aangeduid met S1. Voor de toelaatbare langse waterspiegelhelling (uitgedrukt in ‰ ten opzichte van de scheepsmassa) wordt het in Nederland gehanteerde criterium van 0.60 ‰ voor een duwkonvooi klasse CEMT VIb overgenomen (zie paragraaf 3.3). Tijdens de terreinmetingen in de Berendrechtsluis werd vastgesteld dat de schepen tot op 5.0 m van de voor nivelleren gebruikte deur aanmeerden. Bij de simulaties met een schip wordt de boeg daarom standaard op 5.0 m van de voor nivelleren gebruikte deur geplaatst[6]. Figuur 10 geeft een voorstelling van de ligging van de schepen in de sluiskolk ten opzichte van de sluisdeur en de uitlaten van de omloopriolen.

Tabel 14 – Afmetingen duwkonvooi CEMT klasse Vb en CEMT klasse VIb en maatgevend schip

	CEMT klasse Vb	**CEMT klasse VIb**	**maatgevende scheepscombinatie S1 (LOCKSIM)**
lengte	195.0 m	195.0 m	195.0 m
breedte	11.4 m	22.8 m	34.2 m
diepgang	4.5 m	4.5 m	4.5 m
totale massa (schip+lading)	8271 ton	16095 ton	24366 ton
afstand boeg tot deur	5.0 m	5.0 m	5.0 m

[6] De afstand tussen boeg van het schip en de voor nivelleren gebruikte deur is beduidend kleiner dan toegepast bij het ontwerp van het nivelleersysteem met openingen in de roldeur uit Verelst *et al.* (2013), waar de maatgevende scheepscombinatie zich midden tussen de beschouwde opwaartse en afwaartse roldeur bevond. De afstand tussen de boeg van het schip en de voor nivelleren gebruikte deur bedroeg in Verelst *et al.* (2013) 27.5 m.

Figuur 10 – Ligging schepen in de sluiskolk ten opzichte van de sluisdeur en de uitlaten van de omloopriolen



De LOCKSIM simulaties worden uitgevoerd met een tijdstap van 1 s. Deze waarde volgde uit een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd bij het opstellen van de hydraulische netwerkmodellen in het kader van het ontwerp van de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007). Tabel 15 geeft een overzicht van de waarden voor de variabelen uit de invoerfile van LOCKSIM, waarvoor afgeweken wordt van de default waarden. De gekozen waarden komen overeen met deze gebruikt voor de numerieke modellen in het kader van het ontwerp van de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a; b).

Tabel 15 – Parameters LOCKSIM simulaties waarbij afgeweken wordt van de default waarde

kinematische viscositeit (voor zoet water bij een temperatuur 15°)		1.41 x 10-6 m²/s
nauwkeurigheid voor beëindigen iteraties	Debiet (Dq_max)	0.001 m³/s
	Piëzometrische hoogte (Dh_max)	0.0001 m
	Lengte (Dx_max)	0.0001 m

In Bijlage A wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van de gebruikte tijdstap, de maximale ruimtelijke stap voor de “open kanaal” componenten en de nauwkeurigheid voor het beëindigen van de iteraties.

5.2 Simulaties

Met het in paragraaf 5.1 opgestelde netwerkmodel zijn volgende simulaties uitgevoerd:

- N1 en N2: Het vullen van de volledige kolk met een Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m bij toepassing van de openingswet van de hefschuiven van de Berendrechtsluis. Simulatie N1 betreft een simulatie met een lege kolk, simulatie N2 een simulatie met de maatgevende scheepscombinatie met de boeg op 5.0 m van de roldeur.
- N3 en N4: Het vullen van de volledige kolk van een Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m met de maatgevende scheepscombinatie in de sluiskolk met de boeg op 5.0 m. Bij simulatie N3 wordt als openingswet van de hefschuiven de maximale hefsnelheid beschouwd bij een openingswet met constante hefsnelheid. Bij simulatie N4 wordt de maximale hefsnelheid beschouwd bij een openingswet bestaande uit twee delen met elk een constante hefsnelheid. Hierbij wordt telkens gezorgd dat het criterium voor de langse waterspiegelhelling gerespecteerd wordt.
- N5: Simulatie N3 wordt herhaald met het schip in het midden van de kolk, i.e. de boeg van het schip op 27.5 m van de deur. Deze afstand is dezelfde als beschouwd bij het ontwerp van het nivelleersysteem met openingen in de roldeur uit Verelst *et al.* (2013).
- N6, N10 en N11: Simulatie N3 wordt herhaald met een Scheldepeil van respectievelijk TAW + 0.00 m (verval 4.40 m), TAW + 1.00 m (verval 3.40 m), TAW + 2.00 m (verval 2.40 m) in plaats van TAW - 1.00 m (verval 5.40 m).
- N7: De gehele kolkbodem wordt met 0.50 m verlaagd tot TAW - 6.91 m. De vulling wordt uitgevoerd vanaf een Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m met de maatgevende scheepscombinatie in de sluiskolk en de boeg van het schip op 5.0 m van de sluisdeur. Een openingswet met constante hefsnelheid wordt opgesteld waarbij het criterium voor de langse waterspiegelhelling nog juist gerespecteerd wordt.
- N8: Deze simulatie is gelijkaardig aan N4 maar in plaats van een dokpeil TAW + 4.40 m wordt genivelleerd naar een dokpeil TAW + 3.82 m. Deze situatie is maatgevend voor luchtaanzuiging en wervelvorming ter hoogte van de inlaat aan dokzijde.
- N9 en N12: Het vullen van de volledige kolk van een Scheldepeil TAW – 0.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m met de maatgevende scheepscombinatie met de boeg op 5.0 m. Voor de openingswet wordt de maximale hefsnelheid gezocht voor een openingswet met constante hefsnelheid (simulatie N9) respectievelijk een openingswet bestaande uit twee delen met elk een constante hefsnelheid (simulatie N12). Hierbij wordt gezorgd dat het criterium voor de langse waterspiegelhelling gerespecteerd wordt.
- N13 en N14: Simulatie N12 wordt herhaald maar startend van een Scheldepeil respectievelijk TAW + 1.00 m, TAW + 2.00 m in plaats van TAW + 0.00 m.
- N15: Het ledigen van de volledige kolk van een dokpeil TAW + 4.40 m naar een Scheldepeil TAW - 1.00 m (verval: 5.40 m) met de maatgevende scheepscombinatie met de boeg op 5.0 m. Voor de openingswet wordt de maximale hefsnelheid gezocht voor een openingswet uit twee delen met elk een constante hefsnelheid. Hierbij wordt gezorgd dat het criterium voor de langse waterspiegelhelling nog gerespecteerd wordt.

- N16 en N17 en N18: Simulatie N15 wordt herhaald maar eindigend op respectievelijk een Scheldepeil TAW + 0.00 m (verval 4.40 m), TAW + 1.00 m (verval 3.40 m), TAW + 2.00 m (verval 2.40 m) in plaats van TAW - 1.00 m (verval 5.40 m).
- N19 en N20 en N21: Simulatie N4 wordt herhaald maar startend vanaf respectievelijk een Scheldepeil TAW + 0.00 m (verval 4.40 m), TAW + 1.00 m (verval 3.40 m), TAW + 2.00 m (verval 2.40 m) in plaats van TAW - 1.00 m (verval 5.40 m).

De simulaties worden samengevat in Tabel 16.

Tabel 16 – Uitgevoerde simulaties

simulatie nr.	hoofd[7]	type	bodempeil kolk [m TAW]	peil Schelde [m TAW]	peil dok [m TAW]	verval [m]	configuratie	afstand boeg tot deur [m]	openingswet nr.	openingswet beschrijving
N1	BO	vullen	-6.41	- 1.00	+ 4.40	5.40	leeg	/	1	openingswet Berendrecht
N2	BO	vullen	-6.41	- 1.00	+ 4.40	5.40	S1	5.0	1	openingswet Berendrecht
N3	BO	vullen	-6.41	- 1.00	+ 4.40	5.40	S1	5.0	2	lineaire openingswet tot criterium 0.60 ‰ gerespecteerd is
N4	BO	vullen	-6.41	- 1.00	+ 4.40	5.40	S1	5.0	3	openingswet 2 hefsnelheden tot criterium 0.60 ‰ gerespecteerd is
N5	BO	vullen	-6.41	- 1.00	+ 4.40	5.40	S1	27.5	2	openingswet simulatie N3
N6	BO	vullen	-6.41	0.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	2	openingswet simulatie N3
N7	BO	vullen	-6.91	- 1.00	+ 4.40	5.40	S1	5.0	4	lineaire openingswet tot criterium 0.60 ‰ gerespecteerd is
N8	BO	vullen	-6.41	- 1.00	+ 3.82	4.82	S1	5.0	3	openingswet simulatie N4
N9	BO	vullen	-6.41	0.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	5	lineaire openingswet tot criterium 0.60 ‰ gerespecteerd is
N10	BO	vullen	-6.41	1.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	2	openingswet simulatie N3
N11	BO	vullen	-6.41	2.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	2	openingswet simulatie N3
N12	BO	vullen	-6.41	0.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	6	openingswet 2 hefsnelheden tot criterium 0.60 ‰ gerespecteerd is
N13	BO	vullen	-6.41	1.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	6	openingswet simulatie N12
N14	BO	vullen	-6.41	2.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	6	openingswet simulatie N12
N15	BE	ledigen	-6.41	-1.00	+ 4.40	5.40	S1	5.0	7	openingswet 2 hefsnelheden tot criterium 0.60 ‰ gerespecteerd is
N16	BE	ledigen	-6.41	0.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	7	openingswet simulatie N15
N17	BE	ledigen	-6.41	1.00	+ 4.40	3.40	S1	5.0	7	openingswet simulatie N15
N18	BE	ledigen	-6.41	2.00	+ 4.40	2.40	S1	5.0	7	openingswet simulatie N15
N19	BO	vullen	-6.41	0.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	3	openingswet simulatie N4
N20	BO	vullen	-6.41	1.00	+ 4.40	3.40	S1	5.0	3	openingswet simulatie N4
N21	BO	vullen	-6.41	2.00	+ 4.40	2.40	S1	5.0	3	openingswet simulatie N4

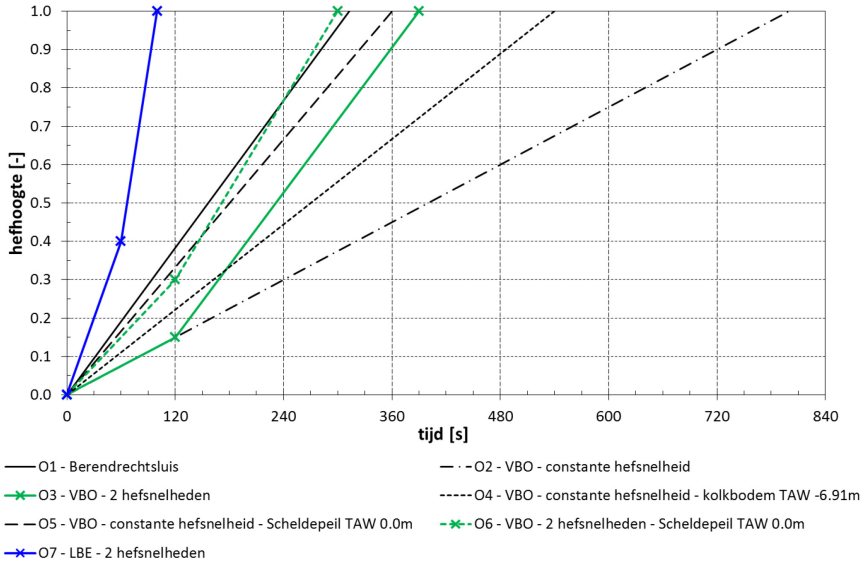
[7] BO = bovenhoofd ; BE = benedenhoofd

In bijlage B wordt per simulatie een figuur gegeven met de nivelleerkromme, de openingswet, het debiet in functie van de tijd en de langse waterspiegelhelling in functie van de tijd. De nivelleertijd en de extrema worden samengevat in Tabel 17. De nivelleertijd is in het geval van vullen bepaald als het eerste tijdstip dat het kolkpeil het eindpeil overschrijdt. In geval van ledigen is de nivelleertijd bepaald als het eerste tijdstip dat het kolkpeil het eindpeil onderschrijdt. De simulaties zijn uitgevoerd met een tijdstap 1 s. De gebruikte openingswetten worden gegeven in Figuur 11.

Tabel 17 – Resultaten simulaties

simu-latie	verval [m]	nivelleertijd [min]	maximaal debiet			end-to-end langse waterspiegelhelling		langse waterspiegel-helling schip	
			totaal [m^3/s]	kort [m^3/s]	lang [m^3/s]	max. [‰]	min. [‰]	max. [‰]	min. [‰]
N1	5.4	13.3	135	74	60	0.28	-0.23	0.00	0.00
N2	5.4	13.3	134	74	60	1.07	-0.72	1.30	-0.86
N3	5.4	16.4	101	55	47	0.47	-0.23	0.58	-0.29
N4	5.4	14.4	133	73	60	0.47	-0.47	0.58	-0.56
N5	5.4	16.4	101	55	47	0.49	-0.27	0.62	-0.33
N6	4.4	15.2	88	47	41	0.23	-0.17	0.28	-0.21
N7	5.4	14.8	117	64	53	0.48	-0.32	0.58	-0.39
N8	4.82	13.8	121	66	55	0.45	-0.37	0.55	-0.45
N9	4.4	12.4	115	63	52	0.50	-0.36	0.60	-0.43
N10	3.4	13.9	73	39	34	0.14	-0.10	0.17	-0.12
N11	2.4	12.4	57	30	27	0.09	-0.06	0.11	-0.07
N12	4.4	12.1	125	69	56	0.50	-0.50	0.59	-0.60
N13	3.4	10.8	106	58	48	0.31	-0.32	0.36	-0.38
N14	2.4	9.2	85	47	38	0.20	-0.18	0.23	-0.21
N15	-5.4	14.4	136	68	68	0.17	-0.48	0.20	-0.54
N16	-4.4	12.9	121	61	60	0.13	-0.43	0.15	-0.49
N17	-3.4	11.2	110	61	52	0.21	-0.37	0.23	-0.42
N18	-2.4	8.8	93	51	42	0.20	-0.30	0.24	-0.35
N19	4.4	13.2	117	64	52	0.40	-0.38	0.48	-0.46
N20	3.4	11.8	100	55	45	0.30	-0.22	0.36	-0.26
N21	2.4	10.3	80	44	36	0.19	-0.13	0.22	-0.15

Figuur 11 – Openingswetten simulaties vernieuwde Royerssluis[8]



Uit de simulaties volgt:

- De aanwezigheid van de maatgevende scheepscombinatie in de kolk bij het maatgevend verval (simulatie N2) zorgt voor een 3 à 4 keer grotere maximale optredende end-to-end langse waterspiegelhelling in vergelijking met een lege kolk (simulatie N1).
- Het toepassen van de in de Berendrechtsluis gehanteerde lineaire openingswet met een totale heftijd van 313 s (simulatie N2) resulteerde in een maximaal optredende langse waterspiegelhelling van 1.3 ‰ op de maatgevende scheepscombinatie.
- Om de langse waterspiegelhelling te reduceren zijn twee alternatieve openingswetten opgesteld:
    - openingswet nr. 2 opent de hefschuif met een constante snelheid in 13.3 min. Voor het maatgevend verval wordt een nivelleertijd berekend van 16.4 min (simulatie N3).
    - openingswet nr. 3 opent de hefschuif met een eerste trage hefsnelheid gedurende 2 min en vervolgens met een snellere hefsnelheid gedurende de daaropvolgende 4.5 min. Voor het maatgevend verval wordt een nivelleertijd berekend van 14.4 min (simulatie N4).
- Het schip centraal in de sluiskolk plaatsen (simulatie N5) heeft geen significante invloed op de optredende langse waterspiegelhellingen in vergelijking met het schip op 5.0 m verwijderd van de sluisdeur (simulatie N3), aangezien de langskracht op het schip bepaald wordt door translatiegolven.
- Het nivelleren vanaf een Scheldepeil TAW + 0.00 m in plaats van TAW – 1.00 m zorgt voor een halvering van de maximale langse waterspiegelhelling en voor een daling van de nivelleertijd met ca. 1.0 min tot 15.2 min bij toepassing van een lineaire openingswet (simulatie N6). Bij het opstellen van een alternatieve lineaire openingswet (openingswet 5, simulatie N9) wordt een nivelleertijd van 12.4 min bekomen.

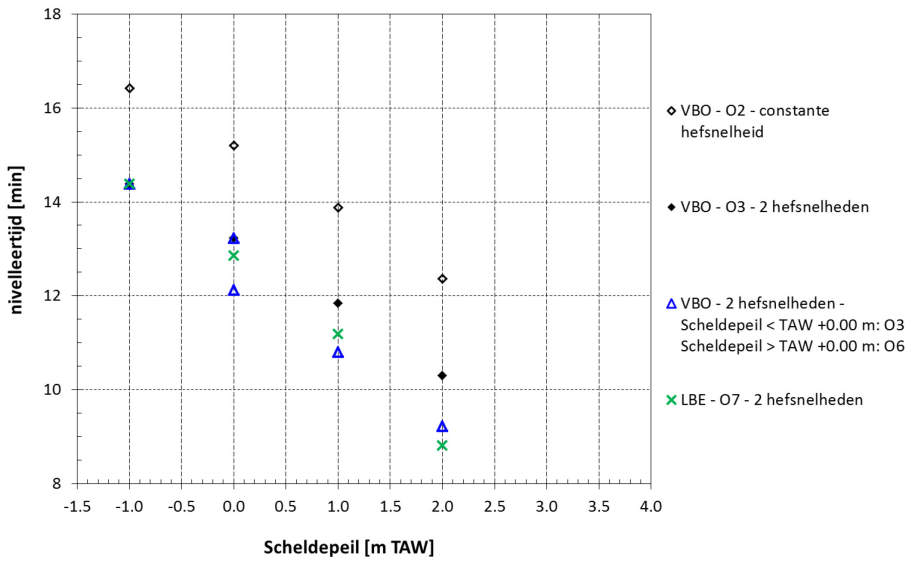
[8] VBO = vullen bovenhoofd ; LBE = ledigen benedenhoofd

- Het verdiepen van de volledige kolkbodem met 0.50 m tot TAW – 6.91 m (simulatie N7) en het opstellen van een nieuwe lineaire openingswet nr. 4 met de maximaal toelaatbare hefsnelheid zorgt voor een winst van 1.6 min op de nivelleertijd. Hierbij wordt een nivelleertijd van 14.8 min bekomen bij het maatgevend verval van 5.40 m.
- Voor het benedenhoofd is het mogelijk om een snellere openingswet in te stellen (simulatie N15 met openingswet 7). Door de grotere verliezen bij ledigen (Tabel 12) zal de nivelleertijd evenwel gelijkaardig zijn als voor vullen via het bovenhoofd. Bij een Scheldepeil TAW + 0.00 m bedraagt de nivelleertijd 12.9 min (simulatie N16).

De nivelleertijd in functie van het Scheldepeil wordt gegeven in Figuur 12 voor:

- vullen via het bovenhoofd met een openingswet met constante hefsnelheid voor alle vervallen (openingswet 2, simulatie N3, N6, N10 en N11).
- vullen via het bovenhoofd met een openingswet met twee hefsnelheden voor alle vervallen (openingswet 3, simulatie N4, N19, N20 en N21).
- vullen via het bovenhoofd met een openingswet met twee snelheden,
    - een afzonderlijke openingswet voor Scheldepeilen lager dan TAW + 0.00 m (openingswet 3, simulatie N4),
    - een afzonderlijke openingswet voor Scheldepeilen hoger of gelijk aan TAW + 0.00 m (openingswet 6, simulatie N12, N13 en N14).
- ledigen via het benedenhoofd met 1 openingswet bestaande uit twee snelheden voor alle vervallen (openingswet 7, simulaties N15, N16, N17 en N18).

Figuur 12 – Nivelleertijd in functie van Scheldepeil dokpeil = extreem hoog dokpeil TAW + 4.40 m



Uit Figuur 12 volgt dat de vernieuwde Royerssluis in 16.4 min genivelleerd kan worden bij het maatgevend verval, i.e. een Scheldepeil TAW – 1.00 m en een dokpeil TAW + 4.40 m en het toepassen van een openingswet met een constante hefsnelheid waarbij het criterium voor de optredende langse waterspiegelhellingen gerespecteerd blijft. Deze nivelleertijd kan gereduceerd worden tot 14.4 min wanneer de openingswet bestaat uit twee verschillende hefsnelheden (de eerste 2 min een trage snelheid en de volgende 4.5 min een hogere snelheid). Op deze wijze wordt een nivelleertijd berekend die juist lager is dan de (later gewijzigde) vooropgestelde nivelleertijd van 15.0 min.

Bij een Scheldepeil TAW + 0.00 m (verval 4.40 m) bedraagt de vultijd 13.2 min bij toepassen van de openingswet met twee hefsnelheden geoptimaliseerd voor een verval van 5.40 m. Bij het opstellen van een aparte openingswet voor peilen groter of gelijk aan TAW + 0.00 m wordt de nivelleertijd bij een verval van 4.40 m gereduceerd tot 12.2 min. Voor lagere vervallen, worden bij het toepassen van deze openingswet nivelleertijden berekend die lager zijn dan de (initieel) vooropgestelde nivelleertijd van 12.0 min. Hieruit volgt dat winst in nivelleertijd kan behaald worden door het instellen van een aantal verschillende openingswetten in functie van het optredende Scheldepeil.

Bij ledigen via het benedenhoofd wordt een verval onafhankelijke openingswet bestaande uit twee hefsnelheden toegepast. Bij het maatgevend verval van 5.40 m wordt een nivelleertijd van 14.4 min bekomen. De verliezen van het nivelleersysteem zijn groter bij ledigen dan bij vullen. Omdat de langse waterspiegelhellingen bij ledigen kleiner zijn in vergelijking met vullen, kan toch een snellere openingswet toegepast worden. Door deze snellere openingswet neemt de nivelleertijd bij ledigen sneller af bij een afnemend verval in vergelijking met vullen.

Merk op dat in praktijk bij ledigen of vullen via het benedenhoofd het Scheldepeil niet constant blijft in de tijd. Bij ledigen via het benedenhoofd zal een stijgend Scheldepeil voor een afname van de nivelleertijd zorgen en een daling van het Scheldepeil voor een toename van de nivelleertijd.

5.3 Besluit

Na het bepalen van de doorstroomsectie van de omloopriolen is een hydraulisch netwerkmodel opgesteld van de vernieuwde Royerssluis. Dit hydraulisch netwerkmodel is gesimuleerd gebruik makend van het programma LOCKSIM. Een dergelijk model betreft een netwerkschema van gesloten en open leidingen, lokale (tijdsafhankelijke) verliezen en splitsingen en samenvoegingen. Aan de hand van deze simulaties kunnen de debieten door de riolen, het kolkpeil en de langse waterspiegelhellingen in de kolk berekend worden. De langse waterspiegelhelling over boeg en hek komt overeen met de hydrostatische kracht op het schip (relatief ten opzichte van het gewichtsdeplacement, i.e. het gewicht van het geladen schip).

In dit hoofdstuk werd voornamelijk vullen via het bovenhoofd gesimuleerd, aangezien bij vullen grotere langse waterspiegelhellingen in de kolk optreden dan bij ledigen en de grootste vervallen optreden bij vullen via het bovenhoofd en ledigen via het benedenhoofd.

Uit de simulaties volgt dat door middel van een geoptimaliseerde openingswet bestaande uit twee hefsnelheden de kolk bij het maatgevend verval van 5.40 m gevuld kan worden in 14.4 min. Bij een Scheldepeil TAW + 0.00 m (verval 4.40 m) bedraagt de vultijd 13.2 min bij toepassen van de openingswet geoptimaliseerd voor een verval van 5.40 m. Door het toepassen van een afzonderlijke openingswet voor Scheldepeilen boven TAW + 0.00 m (vervallen kleiner of gelijk aan 4.40 m) kan de vultijd bij een Scheldepeil TAW + 0.00 m gereduceerd worden tot 12.2 min. De verliezen van het nivelleersysteem zijn voor ledigen groter dan voor vullen. Doordat de langse waterspiegelhellingen bij ledigen kleiner zijn, kunnen de schuiven sneller opgetrokken worden. Bij het maatgevend verval van 5.40 m bedraagt de nivelleertijd voor ledigen 14.4 min, wat gelijk is aan deze voor vullen. Hierbij wordt opgemerkt dat voor ledigen ook een geoptimaliseerde openingswet bestaande uit twee hefsnelheden toegepast is. Deze verschilt van de openingswet met twee hefsnelheden bij vullen van de sluiskolk bij het maatgevend verval van 5.40 m.

6 Hydraulisch ontwerp componenten van het nivelleersysteem

In hoofdstuk 5 werd aan de hand van LOCKSIM simulaties de vulling en lediging van de sluiskolk gesimuleerd. Onder andere gebruik makend van deze resultaten worden in onderhavig hoofdstuk volgende onderdelen in detail bekeken:

- De lokale verdieping van de kolkbodem ter hoogte van de uitstroomconstructie, zie paragraaf 6.1.
- De optimalisatie van de inlaten aan dok- en Scheldezijde op vlak van sedimentatie, luchtaanzuiging en wervelvorming, zie paragraaf 6.2.
- Het risico op luchtaanzuiging en cavitatie ter hoogte van de hefschuif, zie paragraaf 6.3.

6.1 Lokale verdieping kolkbodem

Bij het bepalen van de doorstroomsectie van de uitstroomconstructie in paragraaf 4.3 werden 6 uitstroomopeningen met een breedte van 4.0 m en een hoogte van 1.50 m gekozen. Initieel werd een bodempeil van de omloopriool beschouwd dat gelijk is aan het bodempeil van de sluiskolk (TAW – 6.41 m). Bij het maatgevend verval van 5.40 m is de laagste waterstand in de sluiskolk gelijk aan het Scheldepeil van TAW – 1.00 m. Bij deze waterstand bedraagt de kielspeling van de maatgevende scheepscombinatie met een diepgang van 4.50 m echter 0.91 m. Zoals vermeld in paragraaf 5.1 is het mogelijk dat schepen afgemeerd worden met de boeg naast de uitstroomconstructie. In dat geval bevindt de kiel van het schip bij een kielspeling van 0.91 m en een hoogte van de uitstroomopeningen van 1.50 m zich 0.59 m lager dan de bovenzijde van de uitstroomopeningen. Tijdens een nivellering is het dan mogelijk dat de jet uit de uitstroomopeningen tegen de boeg van het schip aanleiding geeft tot (mogelijks ontoelaatbare) dwarskrachten op het schip.
Om na te gaan of het feit dat het plafond van de uitstroomopeningen 0.59 m hoger is dan de kiel van het schip bij de laagste waterstand in de sluiskolk toelaatbaar is, zijn volgende analyses uitgevoerd:

1. Het plafondpeil van de uitstroomopeningen en de locatie van de kiel van het schip bij de laagste waterstand in de sluiskolk voor de vernieuwde Royerssluis is vergeleken met de overeenkomstige gegevens voor de duwvaartsluizen op het Albertkanaal. De duwvaartsluizen op het Albertkanaal worden genivelleerd door lange omloopriolen.
2. Tijdens schaalmodelonderzoek voor het nivelleersysteem van de Boudewijnsluis werd de invloed van de afstand tussen kiel van het schip en het plafondpeil van de uitstroomopeningen onderzocht. Op basis van de resultaten van het schaalmodelonderzoek wordt de afstand van 0.59 m tussen de kiel van het schip en het plafond van de uitstroomopeningen voor de vernieuwde Royerssluis beoordeeld.
3. De afstand tussen de kiel van het schip en het plafondpeil van de uitstroomopeningen voor de vernieuwde Royerssluis wordt vergeleken met de optredende waarden bij nivelleringen in de Boudewijnsluis.

Tabel 18 vergelijkt het peil van het schip ten opzichte van het plafondpeil van de zijspruiten van de duwvaartsluizen op het Albertkanaal met de overeenkomstige waarde voor de vernieuwde Royerssluis.

Tabel 18 – Niveau kiel ten opzichte van niveau plafond uitstroomopeningen bij het maatgevend schip[9]

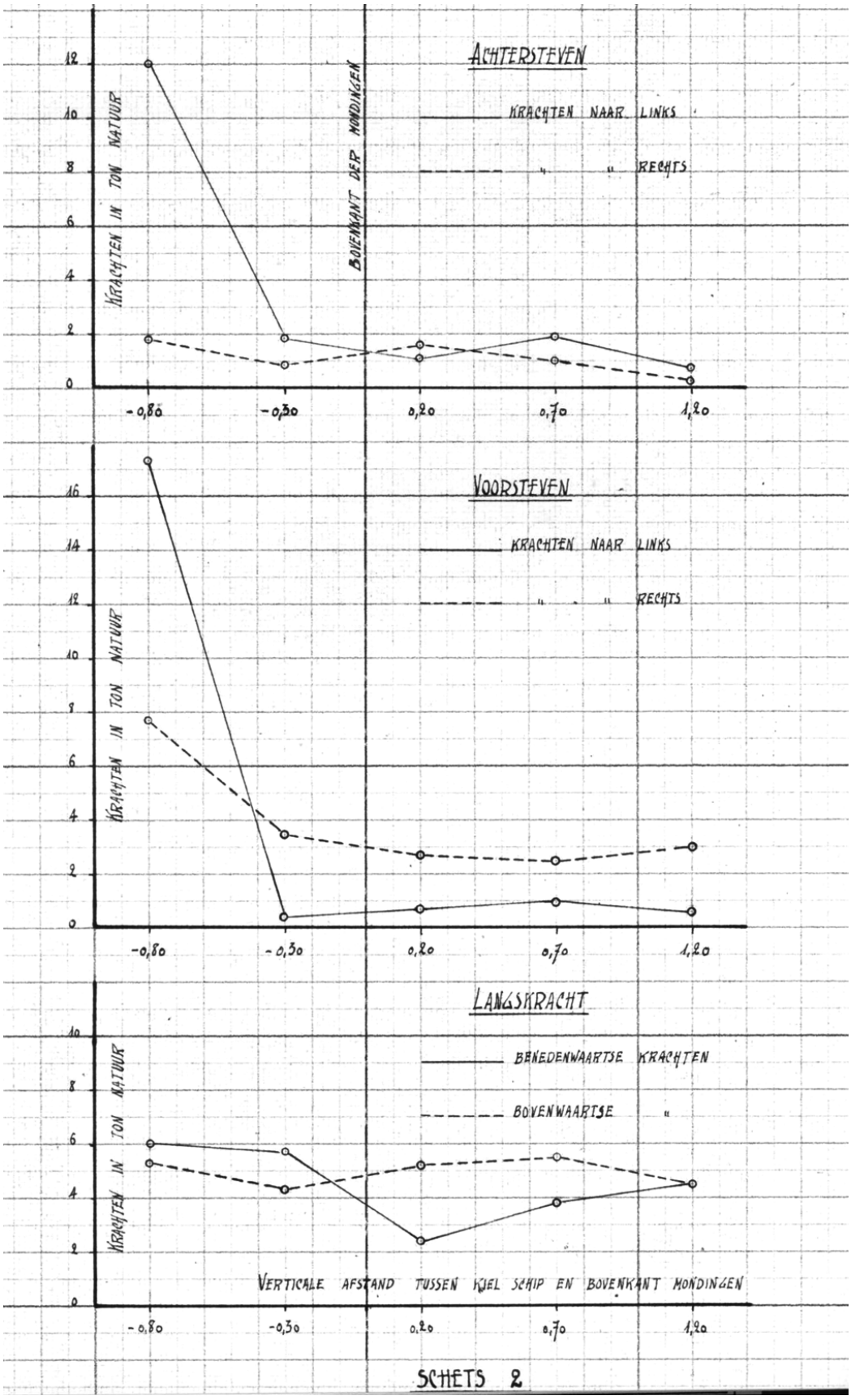
	eenheid	duwvaartsluis				vernieuwde Royerssluis
		Genk	Hasselt	Kwaadmechelen	Olen	
hoogte uitstroomopeningen	m	2.50	1.00	1.00	1.00	1.50
bodempeil kolk	m TAW	43.32	23.12	13.12	3.12	-6.41
peil afwaarts pand	m TAW	49.9	29.7	19.7	9.70	-1.00
waterhoogte in kolk bij peil afwaarts pand	m	6.58	6.58	6.58	6.58	5.41
waterkolom boven uitstroomopening	m	4.08	5.58	5.58	5.58	3.91
diepgang schip[10]	m	3.40	3.40	3.40	3.40	4.50
niveau kiel ten opzichte van niveau kolkbodem	m	3.18	3.18	3.18	3.18	0.91
relatieve kielspeling	%	94	94	94	9	20
niveau kiel ten opzichte van niveau plafond uitstroomopening	m	0.68	2.18	2.18	2.18	-0.59

Uit Tabel 18 volgt dat het op het Albertkanaal in praktijk niet voorkomt dat de kiel van het schip lager komt dan het niveau van het plafond van de zijspruiten. Merk op dat de kielspeling in de Royerssluis bij het maatgevend Scheldepeil en de maatgevende diepgang 0.91 m bedraagt. De kielspeling bij de toegelaten diepgang in de duwvaartsluizen op het Albertkanaal bedraagt 3.18 m of ruim drie keer hoger dan in de Royerssluis.

Op de Royerssluis na heeft de Boudewijnsluis het hoogste bodempeil en de kleinste kolkafmetingen. Ook merkt GHA op dat in de Boudewijnsluis met geringe kielspeling geschut wordt. Hierdoor is het interessant om voor het ontwerp van de vernieuwde Royerssluis te vergelijken met de Boudewijnsluis.
Het ontwerp van de Boudewijnsluis werd door middel van schaalmodelproeven uitgewerkt op het WL (Lamoen, 1950). Eén van de uitgevoerde proeven betreft de invloed van de locatie van het plafondpeil van de uitstroomopening in vergelijking met de kiel van het schip. Figuur 13 geeft een voorstelling van de dwarskracht op de voorsteven en de achtersteven en de langskracht in functie van de afstand tussen kiel van het schip en het plafond van de uitstroomopeningen.

[9] De duwvaartsluis te Wijnegem wordt niet beschouwd omdat deze een lager verval heeft en wordt genivelleerd door middel van een systeem met een woelkelder.
[10] De toegelaten diepgang op het Albertkanaal bedraagt 3.40 m (www.descheepvaart.be).

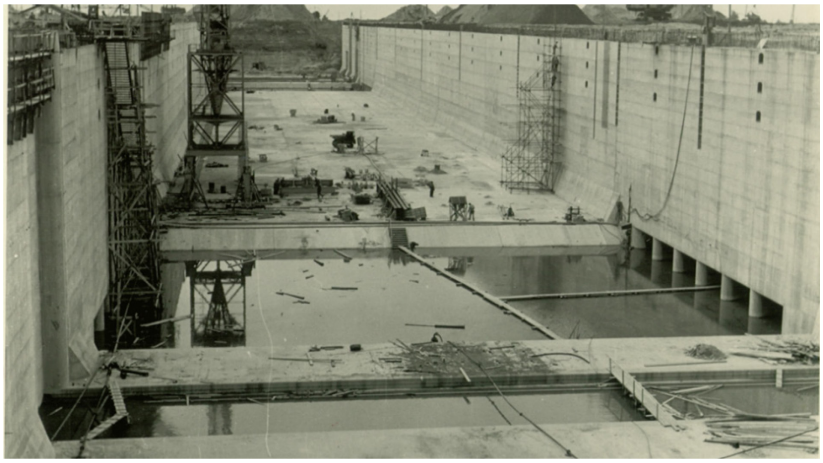
Figuur 13 – Invloed verticale afstand tussen kiel schip en plafond uitstroomopeningen op dwarskracht en langskracht op het schip (Lamoen, 1950)



Uit Figuur 13 volgt dat wanneer de kiel van het schip zich 0.30 m lager bevindt dan het plafondpeil van de uitstroomopening geen merkbare invloed op de dwarskracht vastgesteld wordt ten opzichte van de metingen waarbij de kiel van het schip zich hoger bevindt dan het plafondpeil van de uitstroomopeningen. Bij de proeven waarbij de kiel zich echter 0.80 m lager bevindt dan het plafond van de uitstroomopening werd een grote stijging van de dwarskracht vastgesteld (Lamoen, 1950). Merk wel op dat bij de proeven waarbij de kiel zich 0.30 m onder het plafond van de uitstroomopeningen of hoger bevond een geometrie werd beschouwd waarbij zich stootblokken voor de uitlaten bevonden. De proef waarbij de kiel zich 0.80 m onder het plafondpeil bevond werd uitgevoerd zonder stootblokken.

Het bovenstaande laat besluiten dat een positie van de kiel 0.80 m lager dan het plafondpeil te groot is. De interpretatie van de schaalmodelresultaten wordt wel bemoeilijkt door de aanwezigheid van stootblokken. Tijdens het schaalmodelonderzoek van de Boudewijnsluis werd vervolgens ter hoogte van de uitstroomconstructie de bodem lokaal met 1.50 m verlaagd zodat het plafondpeil van de uitstroomopeningen zich altijd 0.70 m onder de kiel van het schip bevindt. Figuur 14 geeft een foto van de lokale verdieping ter plaatse van de uitstroomconstructie, genomen tijdens de bouw van de Boudewijnsluis. Merk in deze figuur op dat in de lokale verdieping geen stootblokken zijn geplaatst, dit in tegenstelling tot wat aangeraden wordt in Lamoen (1950).

Figuur 14 – Lokale verdieping van de bodem van de Boudewijnsluis ter hoogte van de uitstroomconstructie



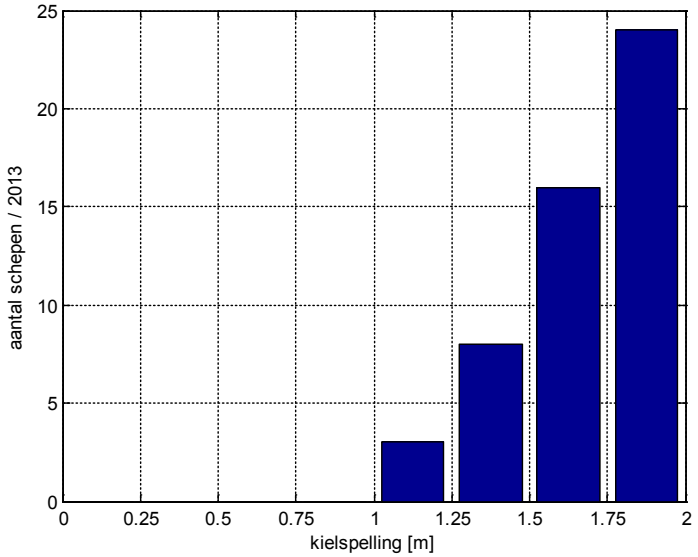
Als laatste wordt nagegaan met welke kielspeling op dit ogenblik geschut wordt in de Boudewijnsluis. Dit is uitgevoerd op basis van een door GHA (mail dd. 6-03-2014) overgemaakt Excel bestand met de uitgevoerde schuttingen en de karakteristieken van de verschutte schepen voor het volledige jaar 2013. De schuttingen uit dit bestand werden gecorreleerd aan de opgemeten waterpeilen in de Schelde.
De verwerking is als volgt gebeurd:

- Aangezien voor het jaar 2013 geen gevalideerde meetgegevens beschikbaar zijn voor de meetpost aan Scheldezijde van de Boudewijnsluis, wordt het Scheldepeil ter hoogte van de Boudewijnsluis bepaald als het gemiddelde van het peil te Liefkenshoek en het peil te Kallo.
- Op het tijdstip van begin nivellering (tijdstip “Deur Dicht” in de tabel) wordt het bijhorende Scheldepeil opgezocht en bijgevoegd in de tabel met de schuttingen.
- Het peil van de kiel van elk schip wordt berekend door van het Scheldepeil de diepgang van het schip af te trekken. Uit het peil van de kiel van het schip en het bodempeil van de verdieping van de kolk (TAW – 10.33 m) wordt vervolgens de kielspeling bepaald.

- De tabel wordt gefilterd zodat alleen de schuttingen van de Schelde naar het dok beschouwd worden.
- Vervolgens wordt een histogram met het aantal voorkomens van de kielspeling opgesteld.

In Figuur 15 wordt voor een kielspeling kleiner dan 2.0 m het aantal schepen in functie van de kielspeling gegeven.

Figuur 15 – Histogram kielspeling kleiner dan 2.0 m in de Boudewijnsluis voor schuttingen 2013

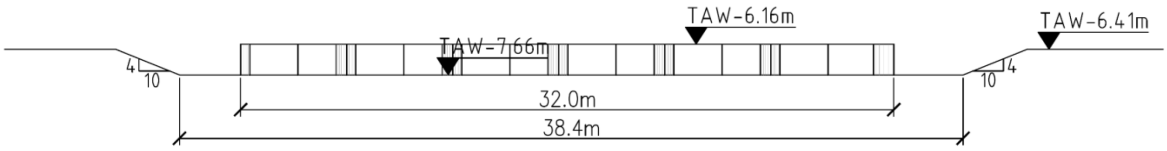


Van alle nivelleringen uitgevoerd in 2013 bedroeg de laagste kielspeling 1.02 m. Het schip had een diepgang van 9.0 m en werd verschut bij een Scheldepeil TAW – 0.31 m. Het plafondpeil van de uitstroomopening komt in de Boudewijnsluis 0.50 m boven de verdiepte kolkbodem uit, waardoor de kiel van het schip zich nog 0.52 m boven het plafondpeil van de uitstroomopening bevond.

Algemeen kan uit de bovenstaande analyses besloten worden dat voor de sluizen waarmee vergeleken werd de kiel van het schip zich steeds hoger bevindt dan het plafondpeil van de uitstroomopeningen in de sluiskolkmuur. Uit de schaalmodelproeven van de Boudewijnsluis volgde een beduidende stijging van de dwarskracht op het schip indien de kiel van het schip zich 0.80 m lager bevindt dan het plafondpeil van de uitstroomopening ten opzichte van wanneer de keil van het schip zich 0.30 m lager bevindt dan het plafondpeil van de uitstroomopening. Op basis hiervan wordt aangeraden om ervoor te zorgen dat de kiel van het schip bij elk waterpeil in de sluiskolk zich hoger bevindt dan het plafond van de uitstroomopening. Wanneer de mogelijkheid bestaat dat de kiel van het schip zich lager bevindt dan het plafondpeil van de uitstroomopening dient door middel van een CFD-modellering of schaalmodelonderzoek nagegaan te worden of dit toelaatbaar is voor de dwarskrachten op de boeg van de aangemeerde schepen.

Om deze redenen werd op de tweede overlegvergadering met de opdrachtgever en het studiebureau SBE (dd. 16-05-2014) voorgesteld om de kolkbodem van de vernieuwde Royerssluis ter hoogte van de uitstroomconstructie met 1.25 m te verdiepen, zie Figuur 16. Bij een lokaal met 1.25 m verdiepte kolkbodem komen de uitstroomopeningen, bij een hoogte 1.50 m, nog 0.25 m boven de eigenlijk sluiskolkbodem uit. De kielspeling van het maatgevend schip bij het maatgevend verval bedraagt 0.91 m (boven de eigenlijke sluiskolkbodem). In dat geval bevindt de kiel van het schip zich nog 0.66 m boven het plafondpeil van de uitstroomopeningen. Door het lokaal verdiepen van de kolkbodem kunnen ook de omloopriolen met 1.25 m verlaagd worden. Bij het versnellen van het water onder de hefschuiven ontstaat een drukval. Wanneer de piëzometrische lijn hierbij tot onder het plafondpeil van de omloopriool zakt wordt lucht aangezogen. Om luchtaanzuiging te voorkomen is het nuttig om de omloopriool voldoende laag te plaatsen, dit wordt besproken in paragraaf 6.3.

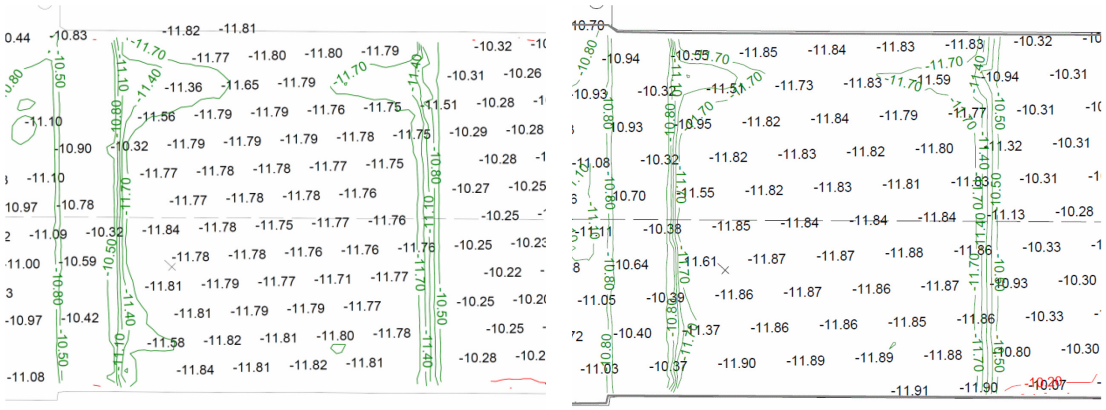
Figuur 16 – Doorsnede verdiepte kolkbodem



De vraag stelt zich of in deze lokale verdieping zich sedimentatie zal voordoen. Hiervoor heeft GHA voor de Boudewijnsluis de plannen van de peilingen uitgevoerd op 5-06-2013 en 14-01-2014 bezorgd. Een zoom van de peilplannen wordt gegeven in:

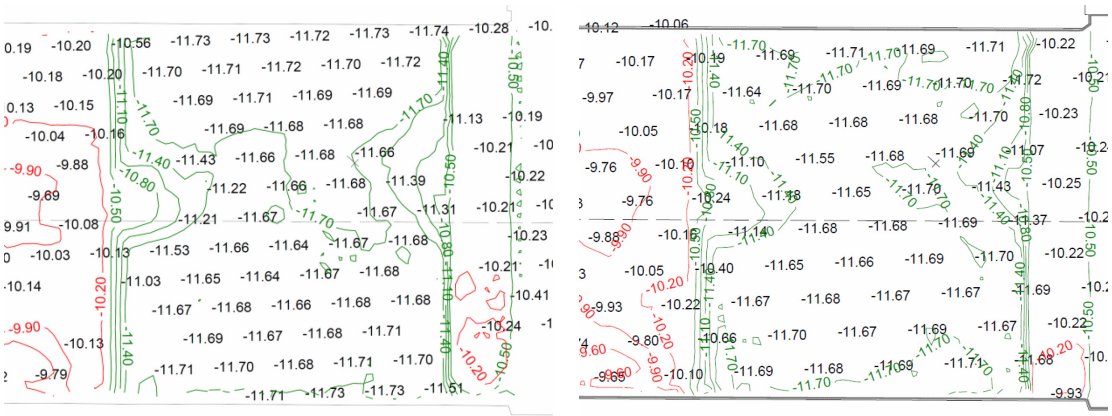
- Figuur 17 : detail ter plaatse van de lokaal verdiepte kolkbodem in het benedenhoofd,
- Figuur 18 : detail ter plaatse van de lokaal verdiepte kolkbodem in het bovenhoofd.

Figuur 17 – Peilplan Boudewijnsluis – lokaal verdiepte kolkbodem benedenhoofd



links: meting 5-06-2013 / rechts: meting 14-01-2014

Figuur 18 – Peilplan Boudewijnsluis – lokaal verdiepte kolkbodem bovenhoofd

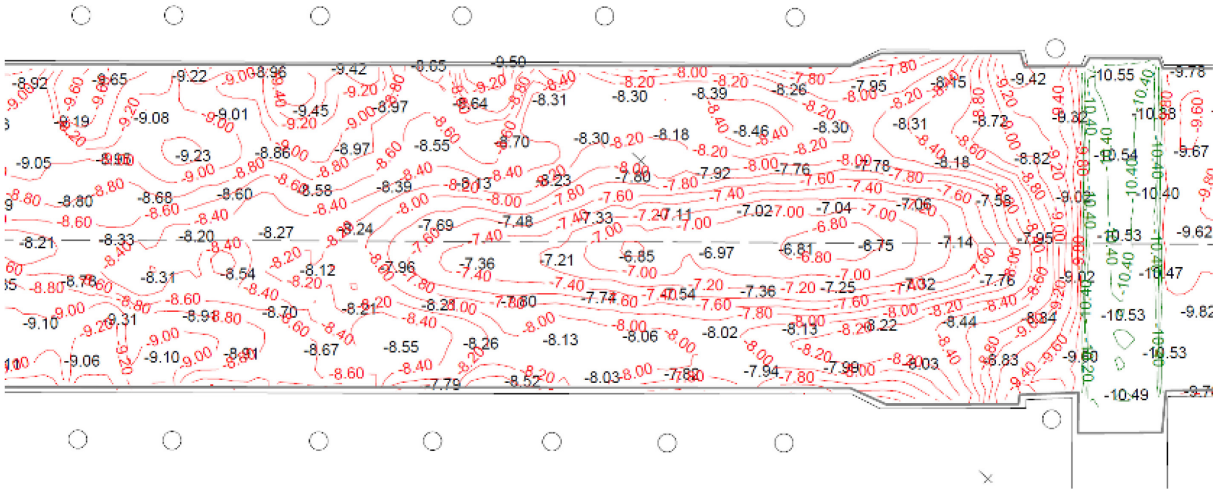


links: meting 5-06-2013 / rechts: meting 14-01-2014

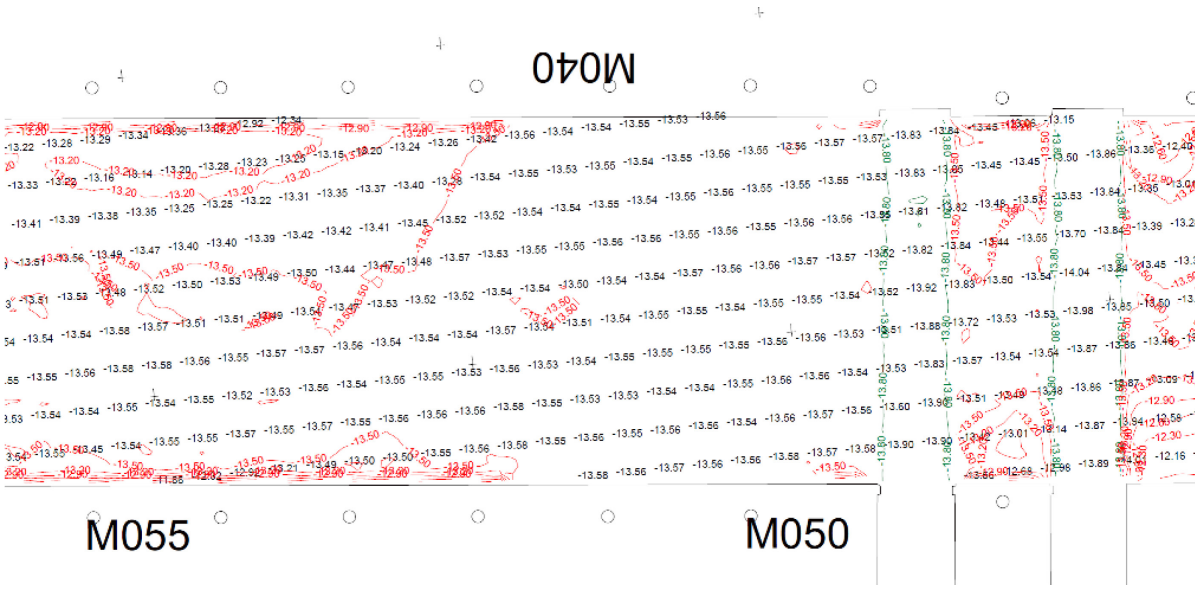
Uit Figuur 17 en Figuur 18 volgt dat in de lokaal verdiepte kolkbodem van de Boudewijnsluis quasi geen sedimentatie voorkomt. De beperkte sedimentatie is slechts beperkt gewijzigd in de tijdspanne tussen de twee metingen. De sedimentatie op de kolkbodem is beperkt. Lokaal wordt sedimentatie met een dikte tot ca. 0.60 m opgemeten. Het sedimentatiepatroon op de kolkbodem is slechts beperkt gewijzigd tussen de twee metingen.

Ter vergelijking worden ook de peilplannen van de Van Cauwelaertsluis (Figuur 19) en de Zandvlietsluis (Figuur 20) gegeven. Het nivelleersysteem van de Van Cauwelaertsluis bestaat uit lange omloopriolen met uitstroomopeningen verspreid over de kolklengte. De Van Cauwelaertsluis is gelegen naast de Boudewijnsluis en wordt (sinds de renovatie) quasi uitsluitend voor binnenvaart gebruikt. Het bodempeil van de kolk ligt op TAW – 9.83 m in de Van Cauwelaertsluis. De Zandvlietsluis heeft een gelijkaardig nivelleersysteem als de Boudewijnsluis maar heeft geen lokale verdieping ter hoogte van de uitstroomconstructie.

Figuur 19 – Peilplan Van Cauwelaertsluis – meting dd. 7-01-2014 – illustratie opwaarts kolkhelft



Figuur 20 – Peilplan Zandvlietsluis – meting dd. 8-04-2014 – illustratie t.h.v. uitstroomconstructie bovenhoofd



Op het peilplan van de Van Cauwelaertsluis (meting dd. 7-01-2014) wordt een sterke sedimentatie opgemerkt over de volledige kolk (met inzinkingen ter hoogte van de zijspruiten). De sedimentatielaag heeft lokaal een dikte tot ca. 3 m. Op het peilplan van de Zandvlietsluis (meting dd. 5-6-2014 en meting dd. 8-4-2014) werd in de kolk een beperkte sedimentatie tot 0.4 m vastgesteld. In de zone waarin de uitstroomconstructie uitmondt komt geen sedimentatie voor. Een mogelijke verklaring voor de sedimentatie in de Van Cauwelaertsluis is dat deze quasi uitsluitend voor binnenvaart gebruikt wordt waarbij de diepgang (evenals de afmetingen en het vermogen van de schroef) van de schepen eerder beperkt is. Uit deze analyse van de peilplannen volgt dat zich ter plaatse van de uitmonding van de omloopriolen in de sluiskolk bijna geen sedimentatie voordoet, zowel bij een niet-verdiepte kolkbodem zoals de Zandvlietsluis als bij een lokaal verdiepte kolkbodem zoals de Boudewijnsluis.

6.2 Positionering inlaat

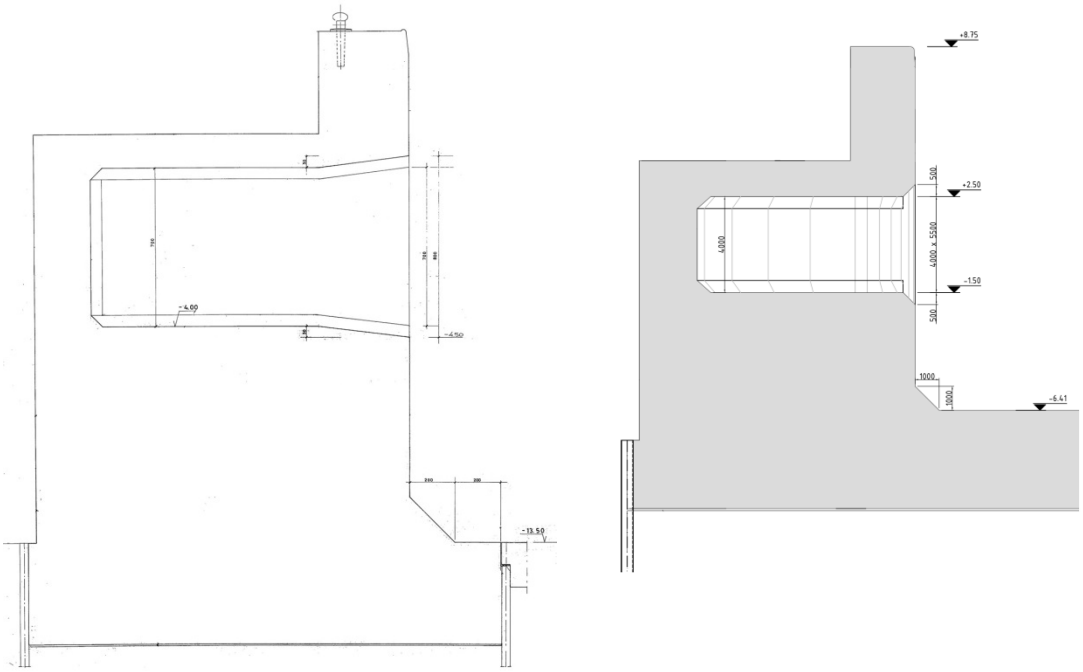
De geometrie van de inlaatopening wordt besproken in paragraaf 6.2.1. Om het aanzuigen van sediment te beperken dienen de inlaten bij voorkeur zo hoog mogelijk geplaatst te worden, zie paragraaf 6.2.2. Om het risico op luchtaanzuiging, zie paragraaf 6.2.3, en wervelvorming, zie paragraaf 6.2.4, te beperken moet evenwel voldoende waterdekking voorzien worden.

De in deze paragraaf voor de vernieuwde Royerssluis gehanteerde onderzoeksmethodes zijn analoog als deze toegepast bij het hydraulisch ontwerp van de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2010b). De inlaat van het benedenhoofd wordt zo gepositioneerd dat bij een extreem laag Scheldepeil nog een bepaalde waterdekking aanwezig is. Bij vullen via het benedenhoofd (bij een Scheldepeil hoger dan het dokpeil) zal dus een ruime waterdekking aanwezig zijn. De inlaat van het bovenhoofd wordt omwille van mogelijke aanzuiging van sediment zo hoog mogelijk geplaatst. De meest kritieke situatie voor wervelvorming of luchtaanzuiging bij de inlaat treedt op in de korte omloopriool van het bovenhoofd bij vullen met het extreem laag Schelde- en dokpeil. Om deze reden worden de analyses met betrekking tot de positionering van de inlaat beperkt tot deze situatie.

6.2.1 Geometrie

Het bodempeil van de inlaat in het bovenhoofd van de vernieuwde Royerssluis bevindt zich op TAW – 1.50 m en het plafondpeil van de inlaat op TAW + 2.50 m. Een verticale doorsnede van de inlaat van de vernieuwde Royerssluis is gegeven in Figuur 21. De inlaat van het bovenhoofd van de Berendrechtsluis is op een beperkte hoogte onder het dokpeil geplaatst. Om deze reden wordt in Figuur 21 ook een doorsnede gegeven van de inlaat van het bovenhoofd van de Berendrechtsluis.

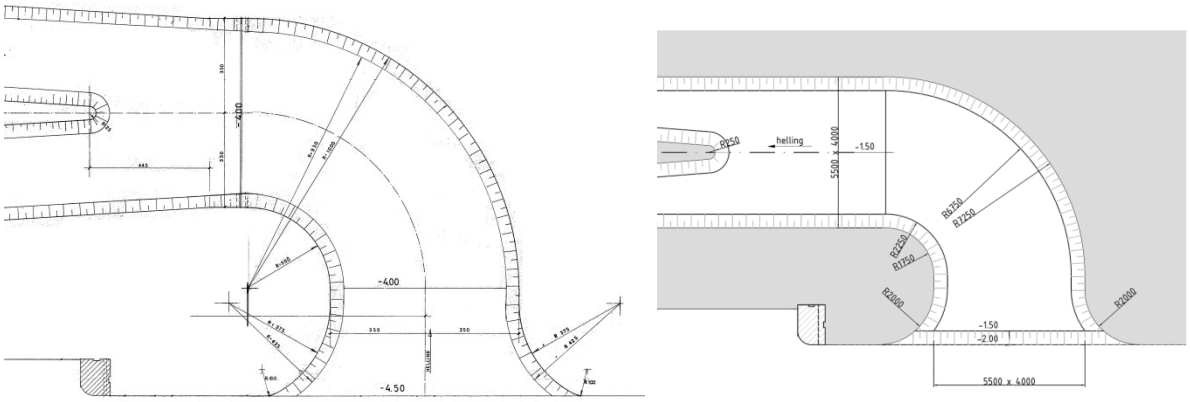
Figuur 21 – Verticale doorsnede inlaat korte omloopriool bovenhoofd



links: Berendrechtsluis / rechts: vernieuwde Royerssluis

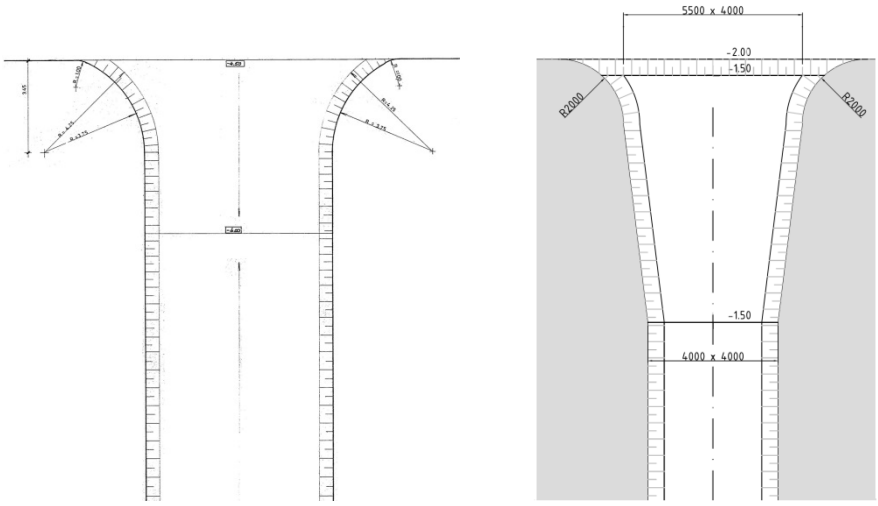
De hoogte van de inlaatopening in het dagvlak is zowel bij de Berendrechtsluis als bij de vernieuwde Royerssluis 1.0 m hoger dan de rioolhoogte. Bij de Berendrechtsluis verloopt de overgang naar de uiteindelijke rioolhoogte onder een geleidelijke hoek. Bij het ontwerp van het nivelleersysteem voor de vernieuwde Royerssluis was dit constructief niet mogelijk en wordt een afkanting onder een hoek van 45° voorzien. Om de snelheden in het dagvlak van de inlaat te beperken wordt de breedte van de inlaatopening bij de vernieuwde Royerssluis verbreed van 4.0 m (breedte riool) naar 5.5 m (breedte in dagvlak zonder bochtstraal). De verticale wanden worden vervolgens door middel van een bochtstraal van 2.0 m aangesloten met het dagvlak. Bij de korte omloopriool wordt de breedte van 5.5 m teruggebracht naar 4.0 m ter plaatse van de splitsing van de riool Bij de lange omloopriool wordt de breedte van 5.5 m naar 4.0 m teruggebracht onder een tophoek van 14°. Een planzicht van de inlaat van de korte omloopriool wordt gegeven in Figuur 22 en een planzicht van de lange omloopriool in Figuur 23. Ter vergelijking wordt ook de geometrie van de Berendrechtsluis gegeven.

Figuur 22 – Illustratie inlaat lange omloopriool



links: Berendrechtsluis / rechts: vernieuwde Royerssluis

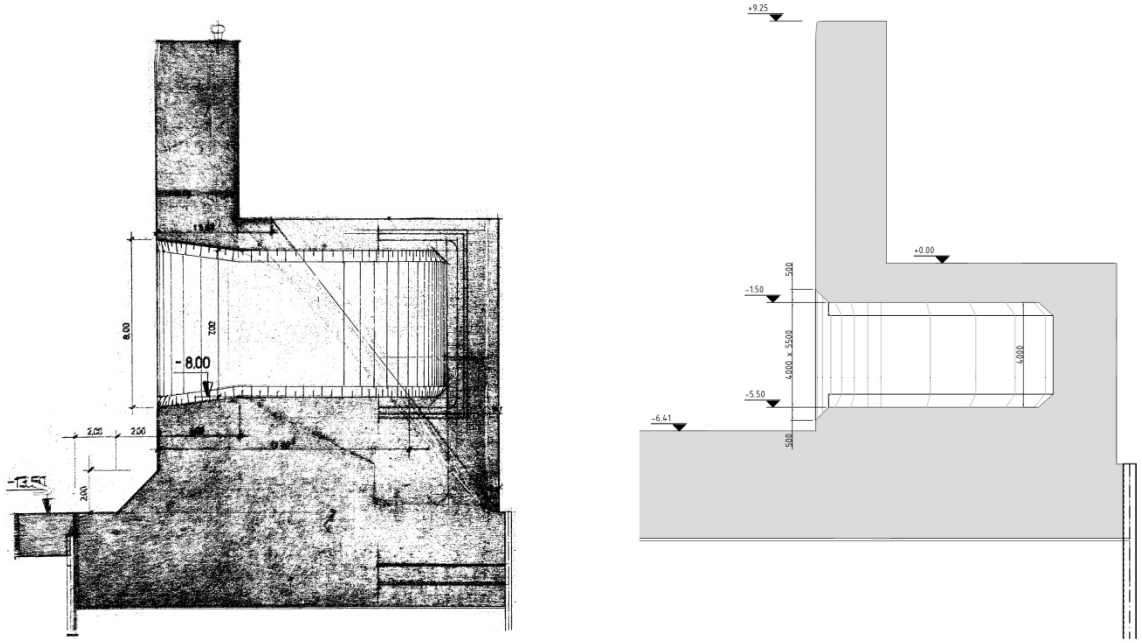
Figuur 23 – Illustratie inlaat lange omloopriool



links: Berendrechtsluis / rechts: vernieuwde Royerssluis

Het bodempeil van de inlaat in het benedenhoofd van de vernieuwde Royerssluis wordt geplaatst op TAW – 5.50 m en het plafondpeil van de inlaat op TAW - 1.50 m. Een verticale doorsnede van de inlaat van het bovenhoofd van de Berendrechtsluis en de vernieuwde Royerssluis wordt gegeven in Figuur 24.

Figuur 24 – Verticale doorsnede inlaat korte omloopriool benedenhoofd



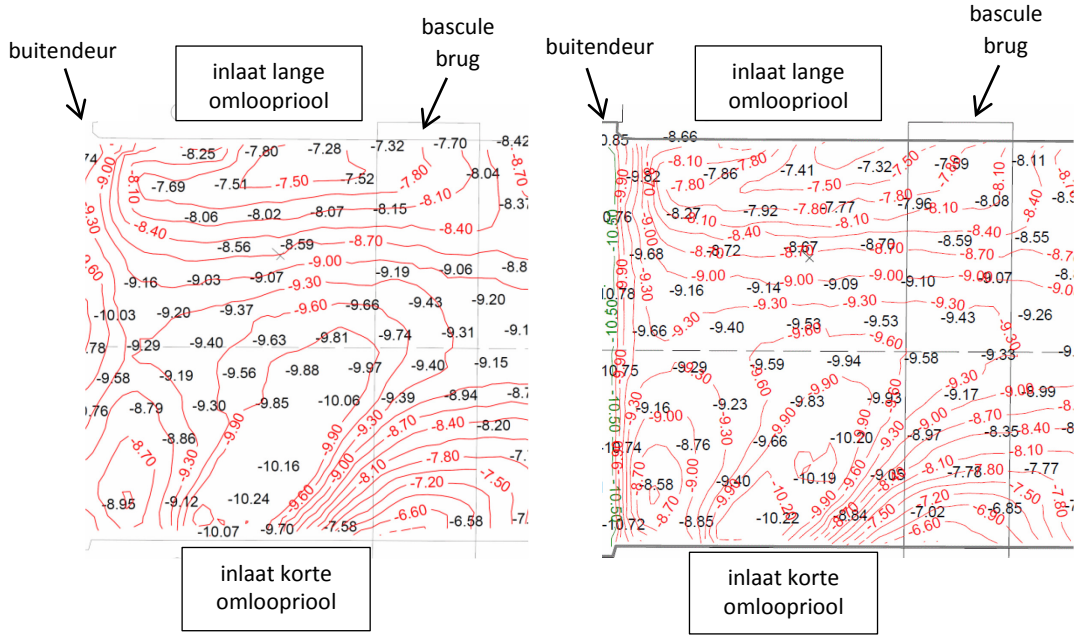
links: Berendrechtsluis / rechts: vernieuwde Royerssluis

Het maatgevend Scheldepeil bedraagt TAW – 1.00 m. Bij een minimale waterdekking van 0.50 m bedraagt het maximale plafondpeil TAW – 1.50 m. Bij een rioolhoogte 4.0 m volgt een bodempeil van de inlaat op TAW – 5.50 m. Dit is slechts 0.91 m boven het bodempeil van de kolk (TAW – 6.41 m). Dit wordt toelaatbaar geacht omdat bij het benedenhoofd aangenomen wordt dat het sediment voldoende in suspensie gebracht wordt door schroefstraalwerking van in- en uitvarende schepen bij een laag Scheldepeil. Ook is het gemiddelde Scheldepeil lager dan het dokpeil waardoor de inlaat van het benedenhoofd een groter gedeelte van de tijd als uitlaat zal werken dan als inlaat. In het benedenhoofd van de Berendrechtsluis is het plafondpeil van de omloopriool ter hoogte van de inlaat op TAW – 1.00 m gelegen. De bovenzijde van de inlaat in het dagvlak bedraagt zelfs TAW – 0.50 m. Bij het maatgevend laagwater zou de bovenzijde van de inlaat boven het laagwater zitten. Hierbij merkt GHA op dat tot op heden geen problemen vastgesteld zijn met de inlaten van het benedenhoofd van de Berendrechtsluis. Door het lager gelegen bodempeil van de kolk in de Berendrechtsluis (TAW – 13.58 m ten opzichte van TAW – 6.41 m voor de vernieuwde Royerssluis) is het bodempeil van de inlaat bij de Berendrechtsluis 5.58 m boven de kolkbodem geplaatst ten opzichte van 0.91 m boven de kolkbodem bij de vernieuwde Royerssluis.

6.2.2 Sedimentatie

De inlaten van de Boudewijnsluis zijn op een beperkte hoogte boven de bodem geplaatst. Om deze reden wordt voor het bekijken van het risico op sedimentatie van de inlaten bij de vernieuwde Royerssluis vergeleken met de Boudewijnsluis. GHA heeft voor de Boudewijnsluis de peilplannen bezorgd van de peilingen uitgevoerd op 5-06-2013 en 14-01-2014. Een detail van de sedimentatie ter hoogte van de inlaten van het bovenhoofd wordt gegeven in Figuur 25.

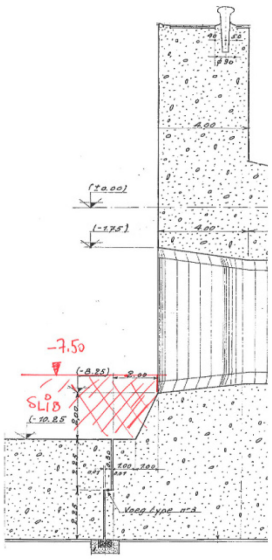
Figuur 25 – Peilplan Boudewijnsluis – t.h.v. inlaat bovenhoofd



links: meting 5-06-2013 / rechts: meting 14-01-2014

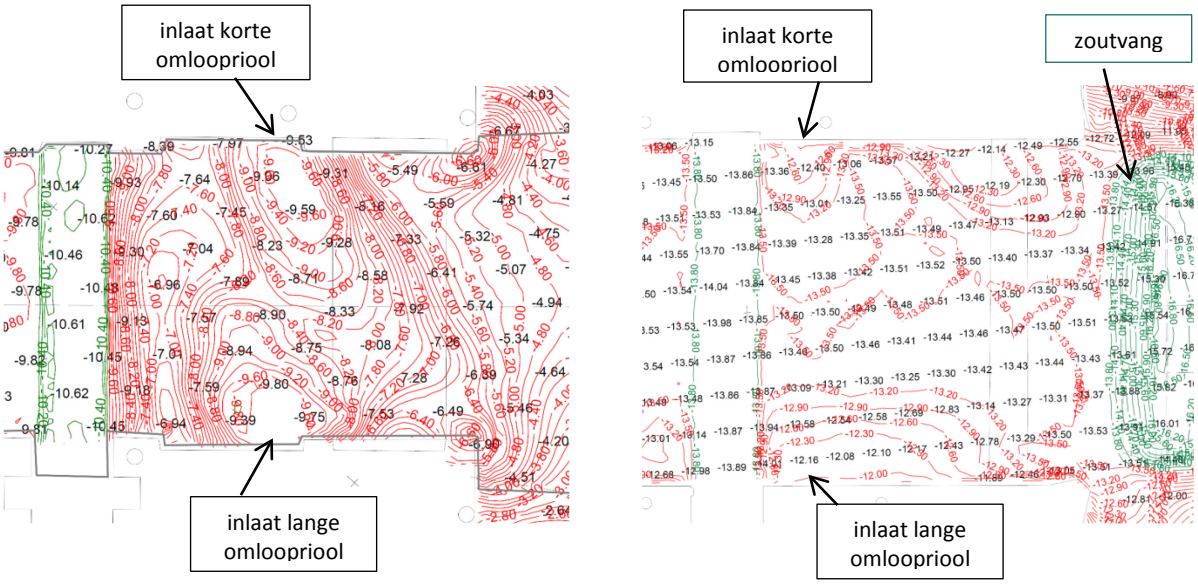
Ter hoogte van de inlaat van de lange omloopriool ligt het bovenpeil van de sedimentatielaag op ca. TAW – 7.50 m (zie Figuur 25), wat overeenkomt met een dikte van 2.5 à 3.0 m ten opzichte van het bodempeil van de kolk op TAW – 10.33 m. Het bodempeil van de inlaat ligt op TAW – 7.83 m en de sedimentatie komt dus hoger dan het bodempeil van de inlaat, zie Figuur 26. Ter plaatse van de inlaat van de korte omloopriool bevindt de bovenzijde van de sedimentatielaag zich op TAW – 10.2 m. Ter plaatse van de inlaten van het benedenhoofd zijn geen peilgegevens beschikbaar. In praktijk worden aan de inlaten van het benedenhoofd geen problemen waargenomen met sedimentatie.

Figuur 26 – Boudewijnsluis – lange omloopriool – doorsnede t.h.v. inlaat bovenhoofd
(mail SBE dd. 16/05/2014 ; peilen in NKD, TAW = NKD - 0.08 m)



Ter vergelijking wordt in Figuur 27 ook een detail gegeven van de peilplannen van de Van Cauwelaertsluis en de Zandvlietsluis ter plaatse van de inlaten van het bovenhoofd.

Figuur 27 – Peilplannen bovenhoofd



links: Van Cauwelaertsluis meting dd. 7-01-2014 / rechts: Zandvlietsluis meting dd. 8-04-2014

Op het peilplan van de Van Cauwelaertsluis (meting dd. 7-01-2014) wordt aan het bovenhoofd sedimentatie opgemerkt. Ter hoogte van beide inlaten wordt lokaal wel een zone vrijgehouden, waarbij het peil van de bovenzijde van de sedimentatie zich bevindt op ca. TAW – 9.6 m. Aan het bovenhoofd van de Zandvlietsluis wordt ter plaatse van de inlaat van de lange omloopriool sedimentatie met een dikte ca. 1.5 m (tot ca. TAW – 12.0 m) opgemerkt. Het bodempeil van de inlaat van de Zandvlietsluis ligt 2.4 m boven de sedimentatie op TAW – 9.58 m. Aan dokzijde van de Zandvlietsluis is duidelijk het lagere bodempeil ter plaatse van de zoutvang op te merken. Merk op dat de zoutvang van de Zandvlietsluis periodiek ingezet wordt voor het afvoeren van sediment naar de Schelde. Hierbij wordt de zoutvang eerst schoongespoeld met een baggerwerktuig. Dit baggerwerktuig brengt vervolgens het sediment rondom de zoutvang in suspensie waarna dit in suspensie gebracht sediment gravitair afgevoerd wordt via de zoutvang. Het is de auteurs van dit rapport niet duidelijk wanneer een dergelijke operatie uitgevoerd is ten opzichte van het tijdstip van de peilmeting.

6.2.3 Luchtaanzuiging

Via de inlaat of openingen in het plafond van een omloopriool die in verbinding staan met het maaiveld kan in bepaalde omstandigheden lucht in de omloopriool gezogen worden. Dit kan meer bepaald optreden wanneer tijdens de nivellering de piëzometrische lijn ter hoogte van de openingen zakt onder het plafondpeil van de omloopriool.

Lucht in de omloopriolen dient zoveel mogelijk vermeden te worden, vermits:

- de toegenomen ladingsverliezen de efficiëntie van het systeem verminderen,
- de lucht in de omloopriolen kan zorgen voor slechte werkingscondities van de hefschuiven (trilling, fluctuerende krachten, cavitatie),
- uittredende luchtbellen problemen kunnen opleveren voor (kleine) vaartuigen, al dient opgemerkt dat de lucht onderweg in een omloopriool kan ontsnappen via de openingen ter hoogte van de hefschuiven (noodsponningen, toegangsschacht en schuifschacht).

Om luchtaanzuiging tegen te gaan dient de piëzometrische lijn steeds een zekere afstand boven het plafondpeil van de omloopriool te blijven. Deze marge is nodig om rekening te houden met stromingsonregelmatigheden die in praktijk ter hoogte van dergelijke openingen bestaan (maar niet gesimuleerd worden in de 1D numerieke modellen voor de waterbeweging in de omloopriolen). In de literatuur werd (nog) geen drempelwaarde voor de marge gevonden, al werd in één van de ingediende technische voorstellen voor het Design & Build contract voor de nieuwe sluizen op het Panamakanaal een drempelwaarde van ca. 1.0 m aanbevolen.

Het peil van de inlaat van de Berendrechtsluis is relatief hoog waardoor voor het beoordelen van de inlaat van de vernieuwde Royerssluis vergeleken zal worden met de Berendrechtsluis. Op 31-03-2014 heeft het WL een vulling via het bovenhoofd van de Berendrechtsluis bijgewoond. De kolk werd toen genivelleerd van een Scheldepeil TAW – 0.27 m naar een dokpeil TAW + 4.17 m. Een opname van het stromingspatroon naar de korte omloopriool wordt gegeven in Figuur 28. Tijdens deze schutting zijn visueel grote stroomsnelheden aan het wateroppervlak vastgesteld maar werden geen wervels of het aanzuigen van luchtpakketten opgemerkt. Het aanstromingspatroon aan de oppervlakte was, visueel begroot, sterker voor de korte omloopriool.

Figuur 28 – Aanstroming inlaat korte omloopriool Berendrechtsluis
vullen via bovenhoofd – Scheldepeil TAW – 0.27 m naar Dokpeil TAW + 4.17 m

Om te controleren of de piëzometrische hoogte al dan niet lager komt dan het plafond van de inlaat wordt de snelheidshoogte in de inlaat afgetrokken van het dokpeil. Hierbij wordt het verlies in energiehoogte door de aanstroming naar de inlaat verwaarloosd.

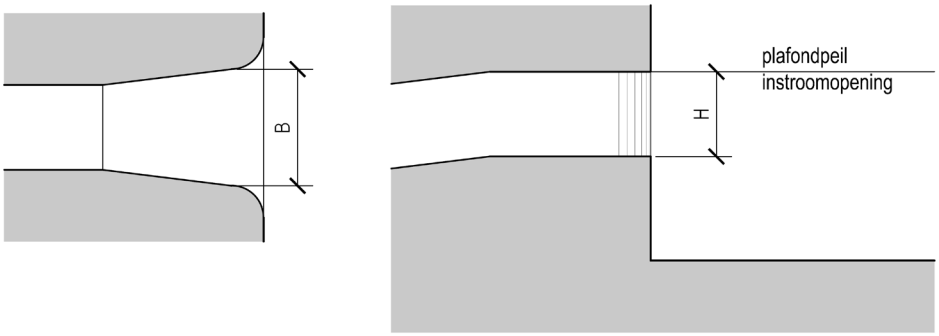
$$\underbrace{H_P}_{piezometrische\ hoogte} = \underbrace{E}_{peil\ dok} - \underbrace{\frac{1}{2g} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2}_{snelheidshoogte}$$

Met:

- H_P Piëzometrische hoogte [m TAW]
- E Totale energiehoogte ≈ dokpeil [m TAW]
- Q Debiet (simulatie N4, zie paragraaf 5.2) [m^3/s]
- A Doorstroomsectie inlaat (B x H = 5.5 x 4.0 = 22 m^2) [m^2]
- g Valversnelling = 9.81 m/s^2 [m/s^2]

Voor de doorstroomsectie van de inlaat worden de breedte en hoogte zoals aangeduid in Figuur 29 gebruikt. Ook de snelheidshoogte wordt berekend ten opzichte van deze sectie.

Figuur 29 – Illustratie berekening doorstroomsectie inlaat en plafondpeil instroomopening



De marge tussen de piëzometrische hoogte en het plafondpeil van de instroomopening wordt berekend voor:

- de vernieuwde Royerssluis bij een Scheldepeil TAW – 1.00 m en een dokpeil[11] TAW + 3.82 m (simulatie N8),
- de Berendrechtsluis bij een Scheldepeil TAW – 1.00 m en een dokpeil TAW + 3.82 m,
- de Berendrechtsluis bij de peilen die zich tijdens het terreinbezoek voordeden: een Scheldepeil TAW – 0.27 m en een dokpeil TAW + 4.17 m.

Merk op dat voor het dokpeil het minimum dokpeil TAW + 3.82 m gehanteerd wordt zodat een minimale waterdekking aanwezig is boven de inlaat. Voor het debiet doorheen de korte omloopriool van de vernieuwde Royerssluis worden de resultaten van simulatie N8 gebruikt, zie paragraaf 5.2. Dit betreft een vulling via het bovenhoofd vanaf een Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 3.82 m met een geoptimaliseerde openingswet bestaande uit twee hefsnelheden. Voor de Berendrechtsluis met het maatgevend verval worden de resultaten van het LOCKSIM model uit de studie voor de Kieldrechtsluis overgenomen uit De Mulder *et al.* (2010b). Met dit model wordt een nieuwe simulatie gedaan waarbij genivelleerd wordt van een Scheldepeil TAW – 0.27 m naar een dokpeil TAW + 4.17 m.

De piëzometrische hoogte aan de inlaat en de marge ten opzichte van het plafondpeil van de riool wordt gegeven in Tabel 19.

Tabel 19 – Marge piëzometrische hoogte inlaat bovenhoofd voor de Berendrechtsluis en de vernieuwde Royerssluis

		Berendrechtsluis		vernieuwde Royerssluis
Scheldepeil	m TAW	-1.00	- 0.27	- 1.00
dokpeil	m TAW	+ 3.82	+ 4.17	+ 3.82
debiet korte omloopriool	m^3/s	222	202	66
hoogte riool	m	8.0	8.0	4.00
breedte riool	m	7.0	7.0	5.50
doorstroomsectie	m^2	56.0	56.0	22.0
snelheid in riool	m/s	3.96	3.61	3.00
dynamische energiehoogte	m	0.80	0.66	0.46
vloerpeil riool inlaat	m TAW	- 4.58	- 4.58	- 1.50
plafondpeil riool inlaat	m TAW	+ 3.42	+ 3.42	+ 2.50
piëzometrische hoogte	m TAW	+ 3.02	+ 3.51	+ 3.36
marge	m	- 0.42	+ 0.09	+ 0.86

Als het vloerpeil van de inlaat van de vernieuwde Royerssluis op het peil TAW – 1.50 m komt te liggen bedraagt de marge van de piëzometrische hoogte ten opzichte van het plafond 0.86 m. Dit komt in de buurt van het criterium van 1.00 m. Dit is aanzienlijk groter dan voor de Berendrechtsluis waarbij de marge slechts 0.09 m was bij de bijgewoonde schutting en negatief bij maatgevend laag Scheldepeil (TAW –1.00 m) in combinatie met het maatgevend laag dokpeil (TAW + 3.82 m).

[11] Het minimum dokpeil voor het Rechterkanaaldok is overgenomen uit (De Mulder *et al.*, 2010b). Dit was gebaseerd op De Broe, E. (2003).

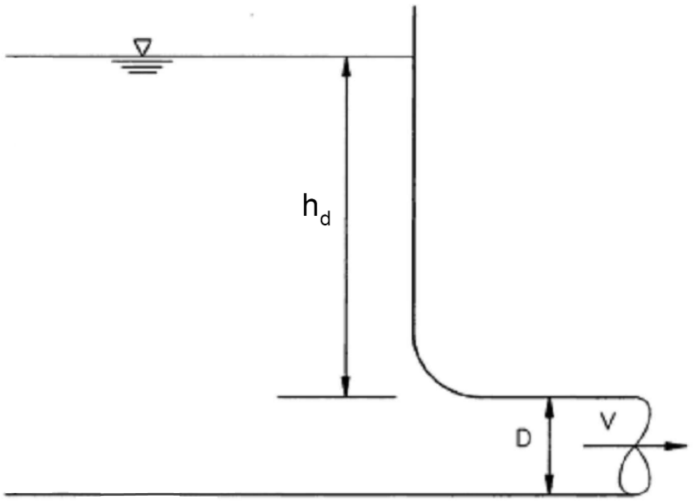
6.2.4 Wervelvorming

Wanneer water uit een “reservoir” wegstroomt naar een (onder water liggende) instroomopening van een leiding kan er wervelvorming (Eng. vortex formation) optreden. In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende types wervels. Alle types wervels zorgen voor een niet-uniforme stroming, wat gepaard gaat met een verhoging van de hydraulische ladingsverliezen. Sommige types brengen daarnaast ook lucht in de leiding. Bijgevolg dient wervelvorming vermeden te worden in het geval van een sluis met een nivelleersysteem bestaande uit (omloop)riolen, vermits:

- de toegenomen ladingsverliezen de efficiëntie van het systeem verminderen,
- de lucht in de omloopriolen kan zorgen voor slechte werkingscondities van de hefschuiven (trilling, fluctuerende krachten, cavitatie),
- uittredende luchtbellen problemen kunnen opleveren voor (kleine) vaartuigen, al dient opgemerkt dat de lucht onderweg in een omloopriool kan ontsnappen via de openingen t.h.v. de hefschuiven (noodsponningen, toegangsschacht en schuifschacht),
- door de wervels “gevangen” vuil in de riolen gezogen kan worden,
- de wervels hinderlijk kunnen zijn voor voorbijvarende schepen, al dient opgemerkt dat er zich tijdens vullen (en ledigen) van de sluis in principe geen schepen in de buurt van de inlaatconstructies bevinden.

Uit de literatuur volgt dat het al dan niet optreden van wervels afhankelijk is van meerdere geometrische en hydraulische factoren, zoals o.a. de mate van symmetrie van het “reservoir” waaruit water naar de instroomopening stroomt en de turbulentie van de aanstroming. Niettegenstaande deze complexiteit, is het gebruikelijk om bijna uitsluitend aandacht te besteden aan de ligging van de instroomopening t.o.v. de waterspiegel. Er wordt meer bepaald aangeraden om de instroomopening voldoende diep te situeren, zodat de waterdekking h_d [m] boven de instroomopening voldoende groot is in vergelijking met de hydraulische diameter D [m] van de instroomopening, zie Figuur 30.

Figuur 30 – Definitieschets waterdekking h_d boven instroomopening met hydraulische diameter D en stroomsnelheid V

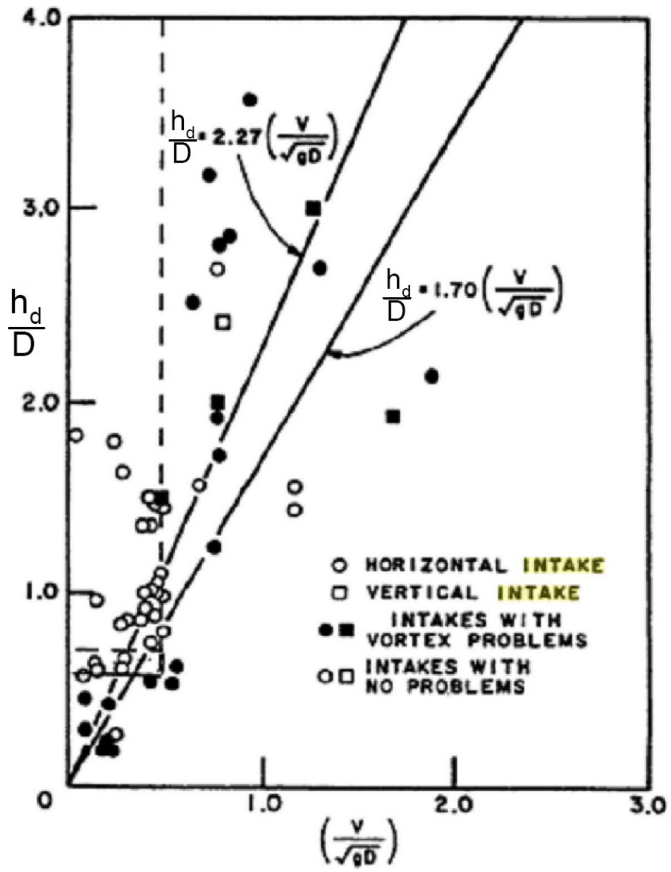


In de literatuur worden criteria opgegeven waarbij de relatieve waterdekking h_d/D groter moet zijn dan een bepaalde drempelwaarde. De drempelwaarde hangt af van de instroomsnelheid V, via een soort Froudegetal Fr:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.D}}.$$

In Figuur 31 (overgenomen uit Vaes *et al.* (2004)) worden empirische resultaten weergegeven voor horizontale (en verticale) inlaten met en zonder problemen op het vlak van wervelvorming. De resultaten worden d.m.v. symbolen voorgesteld in een grafiek met op de horizontale as het Froudegetal en op de verticale as de relatieve waterdekking.

Figuur 31 – Relatieve waterdekking boven een instroomopening als een functie van het Froudegetal (Vaes *et al.*, 2004)



Merk op dat in Figuur 31 ook een tweetal criteria uit de literatuur worden voorgesteld met volle lijnen. Deze zijn van de vorm:

$$\frac{h_d}{D} \geq a + b.Fr,$$

met a=0 en b=1.70, respectievelijk a=0 en b=2.27. In andere bronnen uit de literatuur worden gelijkaardige criteria gegeven met iets andere waarden voor a en/of b (Stichting Postacademisch Onderwijs, 2006).

In Vaes *et al.* (2004) wordt aan de hand van de empirische resultaten in Figuur 31 (met name de open cirkelsymbolen, representatief voor horizontale inlaten zonder problemen op het vlak van wervelvorming) betoogd dat er een relatief "veilig" ontwerpgebied bestaat. Dit gebied wordt gedefinieerd door twee criteria die gelijktijdig vervuld moeten zijn, namelijk:

$$Fr \leq 0.5$$

en

$$\frac{h_d}{D} \geq 0.7$$

Het "veilig" gebied wordt voorgesteld in Figuur 31 door een rechthoek in streepjeslijn. Dit criterium wordt in het vervolg van deze paragraaf aangeduid met "criterium 1"

Merk op dat in de literatuur soms varianten op het tweede deelcriterium worden gehanteerd die (veel) conservatiever zijn (en geen bovengrens stellen aan het Froudegetal). Bij het voorontwerp van de nieuwe sluizen voor het Panamakanaal werd aanbevolen dat:

$$\frac{h_d}{D} \geq 1.0 .$$

Dit wordt in het vervolg van deze paragraaf aangeduid met "criterium 2".

De afmetingen van de instroomopeningen van de vernieuwde Royerssluis en Berendrechtsluis (en de eruit afgeleide grootheden) worden weergegeven in Tabel 20. De doorstroomsectie A [m²] zal verder gebruikt worden om het debiet Q [m³/s] door een omloopriool te vertalen naar een instroomsnelheid V [m/s] : $V = Q / A$. De hydraulische diameter zal verder gebruikt worden om de relatieve waterdekking h_d/D te bepalen.

Tabel 20 – Geometrische karakteristieken inlaat bovenhoofd Berendrechtsluis en vernieuwde Royerssluis

	Berendrechtsluis	vernieuwde Royerssluis
breedte B [m]	8.0	5.5
hoogte H [m]	7.0	4.0
oppervlakte A [m^2]	56.0	22.0
hydraulische diameter D [m]	7.5	4.6
bodempeil inlaat bovenhoofd [m TAW]	-4.08	-1.50
plafondpeil inlaat bovenhoofd [m TAW]	2.92	2.50

De controle van het risico op wervelvorming wordt, analoog als de controle van het risico op luchtaanzuiging in paragraaf 6.2.3, uitgevoerd voor:

- de vernieuwde Royerssluis bij een Scheldepeil TAW - 1.00 m en een dokpeil TAW + 3.82 m (simulatie N8),
- de Berendrechtsluis bij een Scheldepeil TAW - 1.00 m en een dokpeil TAW + 3.82 m,
- de Berendrechtsluis bij de peilen die zich tijdens het terreinbezoek voordeden: een Scheldepeil TAW - 0.27 m en een dokpeil TAW + 4.17 m.

Tabel 21 geeft voor deze 3 situaties een overzicht van de berekeningsresultaten van de toetsing aan deze 3 criteria.

Tabel 21 – Controle risico op wervelvorming Berendrechtsluis en vernieuwde Royerssluis
korte omloopriool bovenhoofd

		Berendrechtsluis		vernieuwde Royerssluis
dokpeil	[m TAW]	+ 3.82	+ 4.17	+ 3.82
plafondpeil instroomopening	[m TAW]	+ 2.92	+ 2.92	+ 2.50
minimale waterdekking h_d	[m]	0.90	1.25	1.32
minimale relatieve waterdekking h_d/D	[-]	0.12	0.17	0.29
Scheldepeil	[m TAW]	-1.00	-0.27	-1.00
max. debiet tijdens nivellering	[m^3/s]	222	202	66
maximale snelheid V	[m/s]	3.96	3.61	3.00
Fr	[-]	0.46	0.42	0.45
Criterium 1 (Fr ≤ 0.5) voldaan ? [J/N]	/	J	J	J
Criterium 1 ($h_d/D \geq 0.7$) voldaan ? [J/N]	/	N	N	N
Criterium 2 ($h_d/D \geq 1.0$) voldaan ? [J/N]	/	N	N	N

Uit Tabel 21 volgt dat:

- Het maximale Froudegetal bij de vernieuwde Royerssluis en de Berendrechtsluis lager is dan de bovengrens van Fr= 0.50 die volgt uit criterium 1.
- Niet voldaan wordt aan het criterium voor de relatieve waterdekking, zowel bij toepassen van criterium 1 als bij toepassen van criterium 2. Merk op dat de relatieve waterdekking voor de vernieuwde Royerssluis bijna dubbel zo hoog is als tijdens de waarneming bij de Berendrechtsluis.

Het GHA heeft geen problemen gesignaleerd wat betreft wervelvorming bij de Berendrechtsluis. Ook werden tijdens de waarneming op 31-03-2014 geen wervels vastgesteld. Hierdoor kan besloten worden dat de verticale positie van de inlaat in het bovenhoofd van de Berendrechtsluis toelaatbaar is. De inlaat van de vernieuwde Royerssluis heeft een hogere relatieve waterdekking en een gelijkaardig Froude getal in vergelijking met de inlaat van de Berendrechtsluis. De positie van de inlaat van de vernieuwde Royerssluis is hydraulisch niet nadeliger dan de Berendrechtsluis en bijgevolg ook nog toelaatbaar.

Wegens de lagere positie van de inlaat aan het benedenhoofd in vergelijking met deze van het bovenhoofd vormt wervelvorming voor deze inlaat dan ook geen probleem.

6.3 Hefschuif

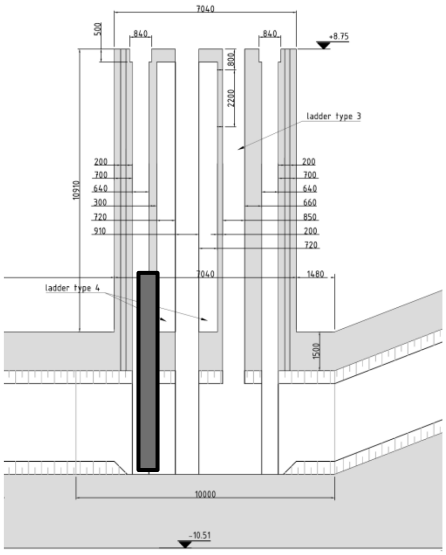
Afwaarts van de hefschuif zal, ten gevolge van het versnellen van de stroming onder de (partieel geopende) hefschuif, een drukval ontstaan. Bij een te hoog geplaatste hefschuif kan door deze drukval lucht aangezogen worden in de omloopriool, zie paragraaf 6.3.1. Wanneer ten gevolge van deze drukval de druk lokaal daalt tot onder de dampspanning zal cavitatie ontstaan, zie paragraaf 6.3.2.

6.3.1 Luchtaanzuiging

Wat betreft het nivelleersysteem van een sluis met omloopriolen, is een preferentiële plaats voor luchtaanzuiging de zone onmiddellijk afwaarts van een gedeeltelijk geopende hefschuif. De stroming schiet onder de tip van de schuif door aan hoge snelheid, omwille van de vernauwde doorstroomsectie. Deze snelheid stijgt eerst nog afwaarts van de hefschuif, door contractie van de stroomlijnen. Het snelheidsmaximum wordt bereikt in de zogenaamde vena contracta (i.e. de nauwste doorsnede).

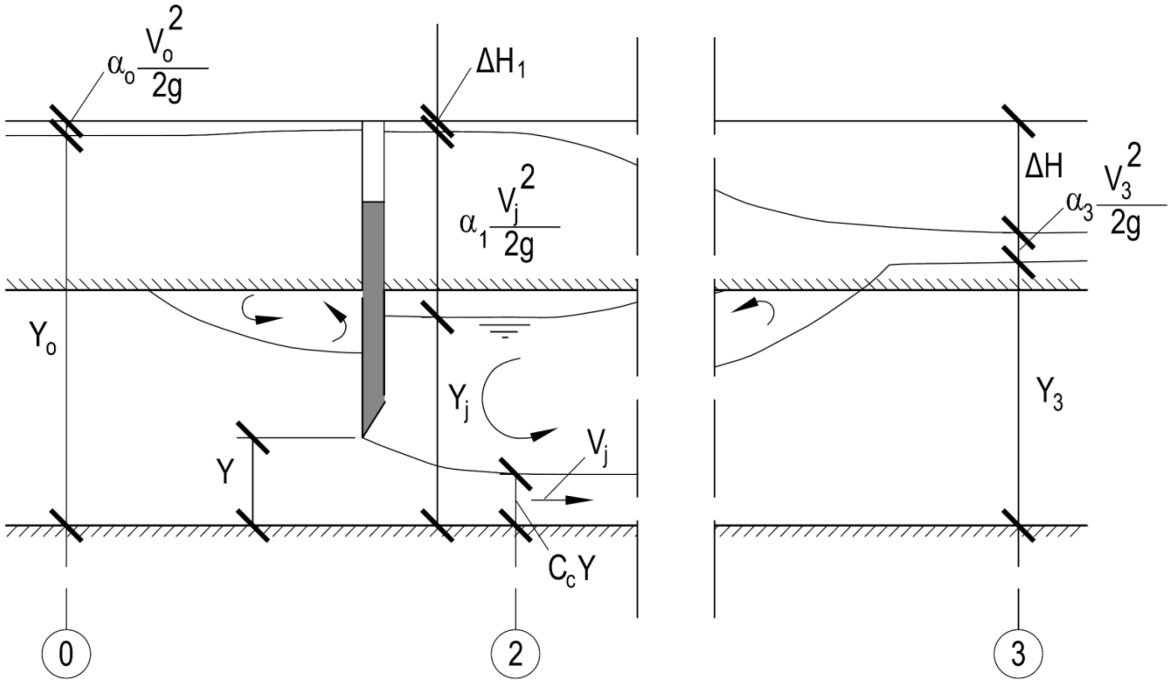
Merk in Figuur 32 op dat opwaarts en afwaarts van de hefschuif noodsponningen en een toegangsschacht voorzien zijn.

Figuur 32 – Openingen in plafond omloopriool ter hoogte van hefschuif



Wanneer de piëzometrische lijn in de omloopriool ten gevolge van de drukval daalt tot onder het plafondpeil kan via de noodsponningen en de toegangsschacht lucht aangezogen worden. De maximale snelheid en dus drukval zal optreden ter hoogte van de vena contracta, zie Figuur 33.

Figuur 33 – Inzinking waterspiegel na hefschuif op basis van Fig 4.6 uit Naudascher (1991) voor stroming met vrij oppervlak onder een hefstuw



Naudascher (1991) geeft volgende formule voor het bepalen van de piëzometrische hoogte ter plaatse van de vena contracta:

$$H_{vc} = E_{opw} - \Delta E_1 - \alpha \frac{V_c^2}{2g}$$

$$V_c = \frac{Q}{A_r \cdot h_s \cdot C_c}$$

Met:

- H_{vc} Piëzometrische hoogte ter plaatse van de vena contracta [m TAW]
- E_{opw} Energiehoogte opwaarts hefschuif (simulatie N4, zie paragraaf 5.2) [m TAW]
- ΔE_1 Hydraulisch verlies aanstroming naar vena contracta ≈ 0 [m]
- α Coëfficiënt omwille van het niet evenredig verdeeld zijn van de snelheid over de hoogte [-]
- V_c Hoogtegemiddelde snelheid in de vena contracta [m/s]
- g Valversnelling = 9.81 m/s^2 [m/s^2]
- Q Debiet (simulatie N4, zie paragraaf 5.2) [m^3/s]
- A_r Doorstroomsectie riool ter hoogte van de hefschuif = 16 m^2 [m^2]
- h_s Relatieve hoogte hefschuif (simulatie N4, zie paragraaf 5.2) [-]
- C_c Contractiecoëfficiënt [-]

De verliezen ten gevolge van de aanstroming naar de vena contracta worden verwaarloosbaar geacht ten opzichte van de verliezen van de dissipatie afwaarts van de vena contracta. Om deze reden wordt de component ΔE_1 niet meegenomen in de benaderende formule. Naudascher (1991) vermeldt dat in prototype de Reynoldsgetallen altijd voldoende hoog zijn zodat viskeuze effecten verwaarloosd mogen worden en de coëfficiënt α in goede benadering gelijkgesteld kan worden aan 1.0 en dus wegvalt. De vergelijking kan hierdoor vereenvoudigd worden tot:

$$H_{vc} \cong E_{opw} - \frac{\left(\frac{Q}{A_r \cdot h_S \cdot C_C}\right)^2}{2g}$$

Bij het verwaarlozen van de verliezen ten gevolge van de aanstroming kan de contractiecoëfficiënt C_C bepaald worden uit de verliescoëfficiënt van de hefschuif door middel van volgende formule voor een plotse verwijding:

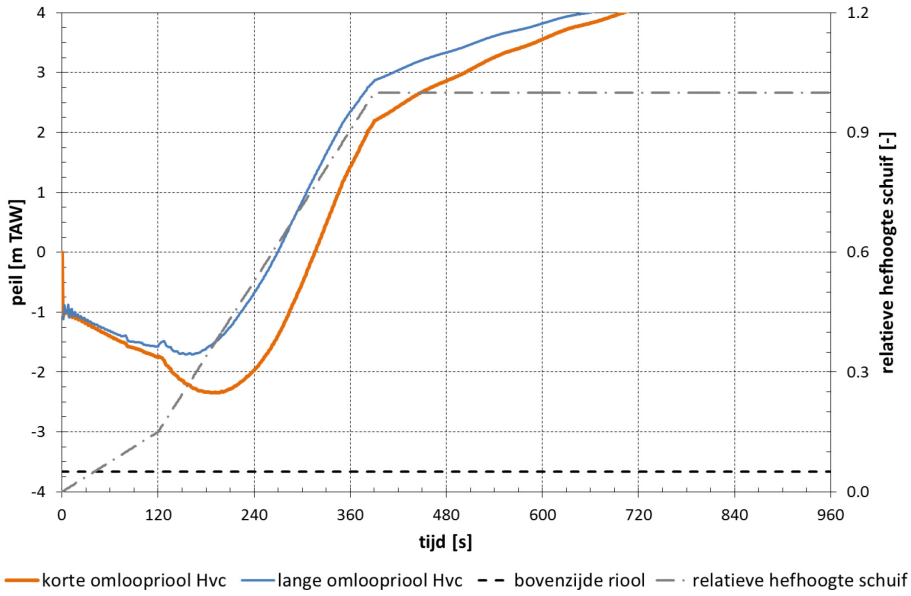
$$\xi = \left(\frac{A_r}{C_c \cdot A_s} - 1\right)^2 \rightarrow C_c = \frac{1}{(\sqrt{\xi}+1)} \frac{A_r}{A_s}$$

Met:

- ξ Verliescoëfficiënt hefschuif (Idel'Cik, 1969) [-]
- A_r Doorstroomsectie riool [m^2]
- A_s Doorstroomsectie onder hefschuif [m^2]
- C_c Contractiecoëfficiënt ter hoogte van vena contracta. [-]

De met bovenstaande formules bepaalde piëzometrische hoogte ter plaatse van de vena contracta wordt gegeven in Figuur 34. Ter vergelijking wordt ook het plafondpeil van de omloopriool gegeven. Hierbij wordt uitgegaan van de geometrie waarbij de omloopriolen en de kolkbodem ter hoogte van de uitstroomconstructie met 1.25 m verdiept zijn. Het bodempeil van de omloopriool ligt hierbij op TAW – 7.66 m en het plafondpeil op TAW – 3.66 m.

Figuur 34 – Piëzometrische hoogte ter hoogte van vena contracta o.b.v. simulatie N4 vullen bovenhoofd Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m



De minimale piëzometrische hoogte ter plaatse van de vena contracta in de korte omlooprioolriool bedraagt TAW – 2.33 m. De tolerantie ten opzichte van het plafond van de omloopriool (gelegen op TAW – 3.66 m) bedraagt 1.33 m. Deze marge is hoger dan de in paragraaf 6.2 vermelde tolerantie van 1.0 m voor de nieuwe sluizen op het Panamakanaal.

Merk op dat omwille van de diepere ligging van de kolkbodem in de overige Antwerpse zeesluizen de marge ten opzichte van luchtaanzuiging hier groter zal zijn dan bij de vernieuwde Royerssluis.

6.3.2 Cavitatie

Bij de (turbulente) stroming van een vloeistof (water) treedt cavitatie op in zones waar de druk daalt onder de dampdruk van de vloeistof. Daardoor ontstaan belletjes van gas (lucht), die imploderen wanneer ze in een zone komen waar de druk weer hoger is. Dit kan belangrijke schade opleveren aan de wanden van de omloopriolen.

Wat betreft het nivelleersysteem van een sluis met omloopriolen, is een preferentiële plaats voor cavitatie de zone onmiddellijk afwaarts van een gedeeltelijk geopende hefschuif. De stroming schiet onder de tip van de hefschuif door aan hoge snelheid, omwille van de vernauwde doorstroomsectie. Deze snelheid stijgt eerst nog afwaarts van de hefschuif, door contractie van de stroomlijnen. Het snelheidsmaximum wordt bereikt in de zogenaamde vena contracta (i.e. de nauwste doorsnede). Verder afwaarts neemt de snelheid af doordat de stroming terug verwijdt, wat gepaard gaat met stijgende drukken.

In Miller (2008) wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende types cavitatie, naargelang de frequentie en mate van gasbelvorming, en dus naargelang het schadepotentieel. In dit hoofdstuk wordt verder getoetst of de zogenaamde “incipient cavitation” kan optreden. Dit “begin van cavitatie” gaat gepaard met het intermitterend ontstaan van gasbellen in een beperkte zone en heeft van alle types het meest beperkte schadepotentieel. (Opmerking: Indien kan aangetoond worden dat “incipient cavitation” niet of slechts gedurende een beperkte tijdspanne optreedt, moet er niet meer getoetst worden of er ook andere – i.e. meer grootschalige en schadelijke - types van cavitatie kunnen voorkomen.)

Om het risico op cavitatie te toetsen worden diverse cavitatieindices voorgesteld in de literatuur. In onderhavig rapport zal de cavitatieindex K van de USACE (zie Schohl G.A. (1998) en US Army Corps of Engineers (2006)) gebruikt worden:

$$K = \frac{\left(h_{vc} + h_{atm}\right) - h_{damp}}{V_{vc}^2 \big/ 2g},$$

$$h_{vc} \cong e_{opw} - \frac{\left(\frac{Q}{A_r \cdot h_s \cdot C_C}\right)^2}{2g} \quad \text{(zie paragraaf 6.3.1)}$$

$$V_c = \frac{Q}{A_r \cdot h_s \cdot C_c} \quad \text{(zie paragraaf 6.3.1)}$$

Met:

- K — Cavitatieindex [-]
- h_{vc} — Piëzometrische hoogte vena contracta [m waterkolom, t.o.v. top vena contracta],
- h_{atm} — (absolute) Luchtdruk[12] [m waterkolom],
- h_{damp} — (absolute) Dampdruk van water[13] [m waterkolom],
- V_c — Hoogte gemiddelde snelheid vena contracta [m/s]
- g — Valversnelling = 9.81 m/s^2 [m/s^2]
- Q — Debiet (simulatie N4, zie paragraaf 0) [m^3/s]

[12] h_{atm} ≈ 10.13 m waterkolom (= 994 m Bar wat overeenkomt met een relatief lage luchtdruk)

[13] De (absolute) dampdruk is afhankelijk van de watertemperatuur. Uit 12 metingen verspreid over het jaar 2006 die WL heeft uitgevoerd in de Waaslandhaven, werden (op halve waterhoogte) watertemperaturen gevonden in de range van 5°C tot 25°C. Vermits de dampdruk stijgt met de temperatuur, wordt voor een (conservatieve) berekening van K de waarde bij 25°C gehanteerd: h_{damp} ≈ 0.34 m waterkolom.

- A_r Doorstroomsectie riool = 16 m^2 [m^2]
- h_s Relatieve hoogte hefschuif (simulatie N4, zie paragraaf 0) [-]
- C_c Contractiecoëfficiënt (zie paragraaf 6.3.1) [-]
- e_{opw} Opwaartse energiehoogte ten opzichte van vena contracta (simulatie N4, zie paragraaf 5.2)[14] [m waterkolom],

Merk op dat K een dimensieloos getal is dat ter hoogte van de vena contracta de resterende “overdruk” ten opzichte van de dampdruk van water uitdrukt, relatief ten opzichte van de snelheidshoogte.

Indien de waarde van K voldoende groot is – i.e. groter dan een bepaalde drempelwaarde – is er geen risico op cavitatie.

In de literatuur vindt men drempelwaarden voor K (geldig voor de zogenaamde “incipient cavitation”) in de range van 1.0 à 2.0.

Wat betreft deze drempelwaarden dient opgemerkt te worden dat er nog al wat onzekerheid is op de te hanteren drempelwaarde voor K omwille van volgende redenen:

- Er is een afhankelijkheid van het type schuif of klep in een riool ; bijgevolg moet men omzichtig omspringen met het toepassen van waarden vermeld voor één type (bijv. een “reverse tainter valve”, i.e. een soort sectorschuif die populair is in de U.S.A., waarvoor in US Army Corps of Engineers (1975) een drempelwaarde 1.0 wordt aanbevolen voor ontwerpdoeleinden) op een ander type (bijv. een verticale hefschuif zoals in onderhavig rapport),
- Per type schuif, hangt het al dan niet optreden van cavitatie (en bijgevolg de drempelwaarde) af van geometrische details van de onderrand van de schuif (die o.a. de contractiecoëfficiënt C_c beïnvloeden). Daarnaast zijn ook geometrische details van de schuifschacht, de noodsponningen enz. van belang.
- Drempelwaarden zijn vaak afgeleid uit schaalmodelproeven, terwijl in de literatuur wordt gewaarschuwd dat er belangrijke schaaleffecten optreden.

Merk dus op dat er nogal wat onzekerheid is op de te hanteren drempelwaarde voor K.

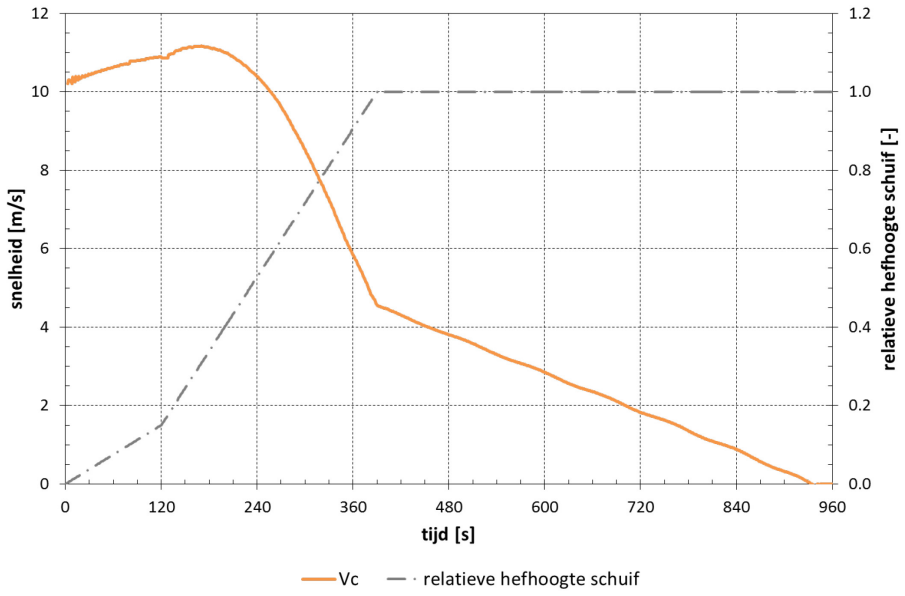
In ieder geval volgt uit het bovenstaande dat het cavitatiegevaar beperkt kan worden door de hefschuif voldoende diep te plaatsen, zodat de piëzometrische druk ten opzichte van de vena contracta voldoende groot is. Ook de snelheid van lichten van de hefschuif (i.e. de openingswet) blijkt een impact op het cavitatierisico te hebben.

In Novak *et al.* (2007) wordt vermeld dat volgens Ball en Johnson een 3 mm loodrechte bodemverhoging bij snelheden van 11 m/s kan resulteren in cavitatie. Om deze reden wordt naast de cavitatieparameter K ook de bodemnabije snelheid gecontroleerd. InCom Working Group 106 (2009) vermeldt dat in veel landen de gemiddelde stroomsnelheid in riolen wordt beperkt om cavitatie te voorkomen. In China wordt hiervoor een maximale (sectiegemiddelde) snelheid 12 m/s gehanteerd, in Europa wordt een maximale (sectiegemiddelde) snelheid tussen 6 m/s en 10 m/s gehanteerd. Merk op dat dit sectiegemiddelde waarden betreffen en lokaal dus hogere snelheden kunnen voorkomen.

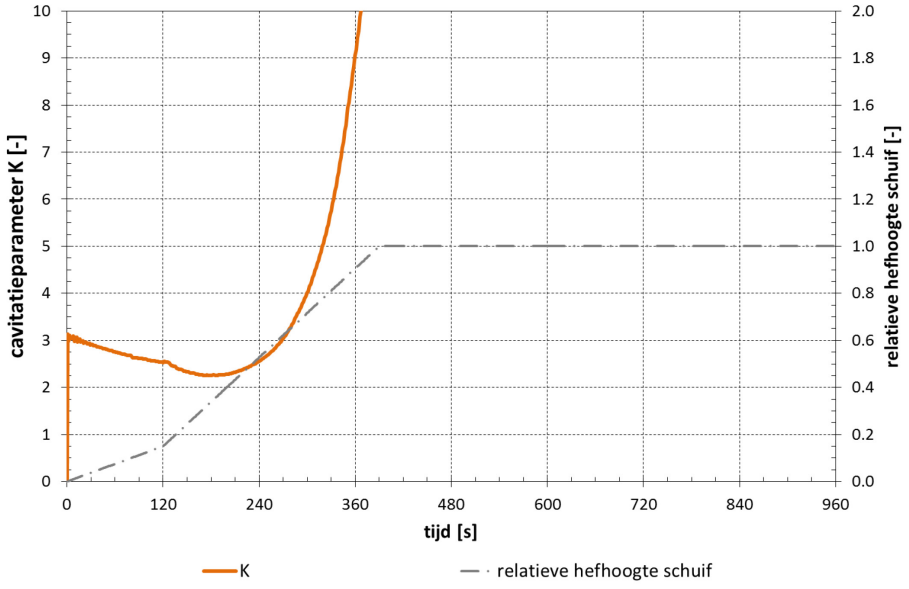
De bodemnabije snelheid en de cavitatieparameter K ter hoogte van de vena contracta wordt gegeven in Figuur 35 en Figuur 36. Hierbij wordt uitgegaan van de geometrie waarbij de omloopriolen en de kolkbodem ter hoogte van de uitstroomconstructie met 1.25 m verdiept zijn. Het bodempeil van de omloopriool ligt hierbij op TAW – 7.66 m.

[14] In LOCKSIM wordt h_2 uitgedrukt in m TAW. Om h_2 uit te drukken t.o.v. de top van de vena contracta, dient bijgevolg het vloerpeil in m TAW afgetrokken te worden evenals de dikte (in m) van de straal in de vena contracta (= $C_c.h_s$).

Figuur 35 – Snelheid vena contracta o.b.v. simulatie N4 vullen bovenhoofd Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m



Figuur 36 – Cavitatieparameter K o.b.v. simulatie N4 vullen bovenhoofd Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m



Uit de figuren kan het volgende besloten worden:

- De maximale snelheid ter hoogte van de vena contract bedraagt 11 m/s. Dit komt overeen met een snelheid waarbij een risico op cavitatie ontstaat.
- De minimale waarde van de cavitatieparameter K bedraagt 2.3 dit is hoger dan de drempelwaarde van 2.0 voor “incipient cavitation”. Voor de Berendrechtsluis wordt in De Mulder *et al.* (2010b) een minimale waarde K berekend van 2.7, wat hoger is dan voor de vernieuwde Royerssluis. Door de lager gelegen kolkbodem en bijgevolg ook omloopriolen van de Berendrechtsluis is deze minder gevoelig voor cavitatie.
- In de zeesluizen van de haven van Antwerpen heeft GHA tot op heden geen schade vastgesteld ten gevolge van cavitatie. In de literatuur (Beem *et al.*, 2000; USACE, 1995) wordt vermeld dat cavitatiegevaar voorkomt bij sluizen met een hoger verval. Een exacte grenswaarde van het verval waarbij cavitatie kan optreden wordt niet gevonden. Merk op dat met een maximaal verval van 5.4 m de Royerssluis niet echt een sluis met een groot verval genoemd kan worden. Bijkomend wordt opgemerkt dat uit paragraaf 2.2 volgt dat het verval van 5.4 m eerder uitzonderlijk voorkomt.

6.4 Besluit

De uitstroomopeningen in de kolk hebben een hoogte van 1.50 m. In de initiële geometrie komt de onderzijde van de uitstroomopeningen overeen met de kolkbodem (TAW – 6.41 m). Bij een nivellering met het maatgevend laagwater (Scheldepeil TAW – 1.00 m) en de maatgevende scheepscombinatie (diepgang 4.50 m) in de sluiskolk bevindt de kiel van het schip zich 0.59 m lager dan het plafond van de uitstroomopeningen. Om na te gaan of dit nog toelaatbaar is, werd de relatieve positie van de kiel van het schip ten opzichte van het plafondpeil van de uitstroomopeningen voor de vernieuwde Royerssluis vergeleken met deze voor de duwvaartsluizen voor het Albertkanaal, deze uit de schaalmodelstudie voor de Boudewijnsluis en deze voor de nivelleringen uitgevoerd in de Boudewijnsluis. Hieruit volgt dat het plafondpeil van de uitstroomopeningen bij de duwvaartsluizen op het Albertkanaal steeds lager is dan de kiel van het schip tijdens een nivellering. Uit de schaalmodelproeven van de korte omloopriolen voor de Boudewijnsluis werd besloten dat de positie van de kiel van het schip 0.80 m lager dan het plafondpeil van de uitstroomopening resulteert in een grote toename van de dwarskracht. Een positie van de kiel van het schip 0.30 m lager dan het plafondpeil zou nog toelaatbaar zijn voor de dwarskracht (al waren er toen “stootblokken” voorzien voor de uitstroomconstructie). Op basis van deze analyse werd in overleg met de opdrachtgever en het studiebureau SBE besloten om de bodem van de sluiskolk ter plaatse van de uitstroomconstructie met 1.25 m te verdiepen zodat het plafond van de uitstroomopeningen 0.25 m boven de (niet verdiepte) kolkbodem uitkomt. De kiel van het maatgevend schip bij het maatgevend laag Scheldepeil ligt hierbij nog 0.66 m boven het plafondpeil van de uitstroomopeningen.

De inlaat wordt bij voorkeur zo hoog mogelijk geplaatst om instroom van sediment in de omloopriolen te minimaliseren maar dit wordt gelimiteerd door het risico op luchtaanzuiging en wervelvorming. Uit de toetsing van deze beide criteria volgt dat het vrijwel onmogelijk is om te voldoen aan de criteria voor luchtaanzuiging en wervelvorming uit de literatuur. De waterdekking boven de inlaten van de Berendrechtsluis is minimaal en voldoet bijgevolg ook niet aan de criteria uit de literatuur. Omdat bij GHA geen problemen bekend zijn bij de inlaten van de Berendrechtsluis wordt deze als benchmark gebruikt voor het ontwerp van de vernieuwde Royerssluis. Op 31-03-2014 werd een nivellering vande Berendrechtsluis bijgewoond waarbij van een Scheldepeil TAW – 0.27 m opgeschut werd naar een dokpeil TAW + 4.17 m. Aan het oppervlak ter plaatse van het bovenhoofd werd een sterk stromingspatroon vastgesteld maar zijn geen wervels of luchtaanzuiging opgemerkt. In overleg met aMT en SBE werd om die reden besloten om in het bovenhoofd het bodempeil van de inlaat op TAW – 1.50 m aan te leggen. Hierbij ligt het plafondpeil van de inlaat op TAW + 2.50 m.

De aanwezige marge bij de maatgevende condities is hierbij groter dan tijdens de bijgewoonde schutting van de Berendrechtsluis. Aan het benedenhoofd wordt het bodempeil van de inlaat op TAW – 5.50 m vastgelegd en het plafondpeil op TAW – 1.50 m, waardoor de marge ten opzichte van het maatgevend Scheldepeil beperkt is tot 0.50 m. Bemerk hierbij dat de bodem van de inlaat slechts 0.91 m boven de kolkbodem uitkomt. Doordat aan de inlaat van het benedenhoofd de sterkste stroming optreedt wanneer deze werkt als uitlaat wordt dit nog toelaatbaar geacht.

Door het versnellen van het water onder de hefschuif zal een drukval ontstaan. Ten gevolge van deze drukval zou luchtaanzuiging of cavitatie kunnen optreden. Het risico op luchtaanzuiging en cavitatie wordt getoetst op basis van een bodempeil van de omloopriolen op TAW – 7.66 m, gelijk aan het bodempeil van een lokale verdieping met 1.25 m in de kolk. Hieruit volgt dat het ontwerp van de vernieuwde Royerssluis bij een bodempeil van de omloopriolen op TAW – 7.66 m zowel voor luchtaanzuiging als cavitatie voldoet aan de criteria.

7 CFD simulatie uitstroomconstructie

Met behulp van het in deze studie toegepaste hydraulische netwerkmodel is het niet mogelijk het complexe stromingspatroon in de uitstroomconstructie te simuleren. Dit is enkel mogelijk met behulp van schaalmodelonderzoek of Computational Fluid Dynamics (CFD). Gelet op het te korte tijdsbestek voor een schaalmodelstudie werd gekozen om de stroming in de uitstroomconstructie en de sluiskolk te simuleren door middel van CFD-simulaties. De CFD-simulaties werden uitbesteed aan Actiflow B.V. Voor het uitvoeren van de CFD-simulaties werd de software OpenFOAM gebruikt.

Voorafgaand aan de eigenlijke CFD-simulaties werd door Actiflow B.V. een gridgevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten van deze gridgevoeligheidsanalyse zijn beschreven in Actiflow B.V. (2015b). Met het op basis van de gridgevoeligheidsanalyse gekozen grid worden de uitstroomconstructies van de lange omloopriool, de korte omloopriool en de lange omloopriool met aangepaste hoogte van de overstortmuur gesimuleerd. Deze simulaties betreffen steady-state simulaties voor twee verschillende debieten door de omloopriool. Daarnaast is voor de lange omloopriool ook een tijdsafhankelijke simulaties uitgevoerd. De uitgevoerde CFD-simulaties en de tijdsafhankelijke simulatie zijn beschreven in Actiflow B.V. (2015a).

Hierbij moet het volgende opgemerkt worden:

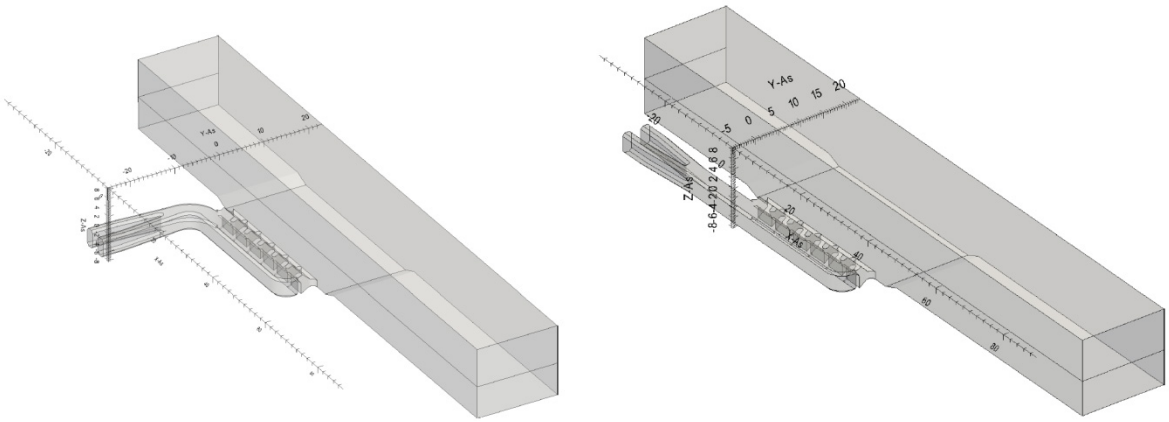
- De CFD-simulaties zijn enkel uitgevoerd voor vullen van de sluiskolk aangezien hierbij de grootste verstoring in de kolk optreedt en de debietverdeling over de uitstroomopeningen vermoedelijk minder uniform is.
- De CFD-simulaties worden uitgevoerd voor een lege sluiskolk. Bijgevolg is het niet mogelijk om op basis van de uitgevoerde CFD-simulaties een uitspraak te doen met betrekking tot de langskrachten en dwarskrachten op een schip in de sluiskolk, dat afgemeerd is met de boeg boven de uitstroomopeningen van de omloopriool.

Het CFD-model wordt beschreven in paragraaf 7.1. Een belangrijk aandachtspunt voor het ontwerp van de uitstroomconstructie is om het debiet over de uitstroomopeningen zo uniform mogelijk te verdelen De debietsverdeling over de uitstroomopeningen wordt besproken in paragraaf 7.2. De hydraulische verliezen van de uitstroomconstructie in de simulaties van de initiële geometrie (hoofdstuk 5) zijn gebaseerd op resultaten van terreinmetingen in de Berendrechtsluis. Deze verliezen worden in paragraaf 7.3 vergeleken met de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie berekend aan de hand van de CFD simulaties. Het stromingspatroon in de omloopriool, de uitstroomconstructie en in de sluiskolk wordt beschreven in paragraaf 7.4. De resultaten van de tijdsafhankelijke simulatie zijn beschreven in paragraaf 7.5. Een besluit wordt geformuleerd in paragraaf 7.6.

7.1 CFD-model

Omwille van de verschillen in geometrie tussen de korte en de lange omloopriool worden voor beide omloopriolen CFD-simulaties uitgevoerd. Figuur 37 geeft voor de korte en de lange omloopriool een voorstelling van het rekendomein.

Figuur 37 – Illustratie rekendomein

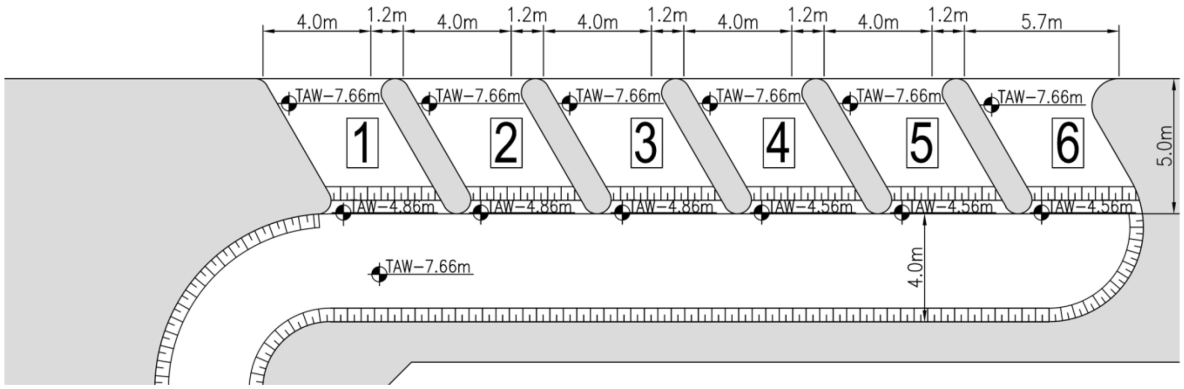


links: lange omloopriool / rechts: korte omloopriool

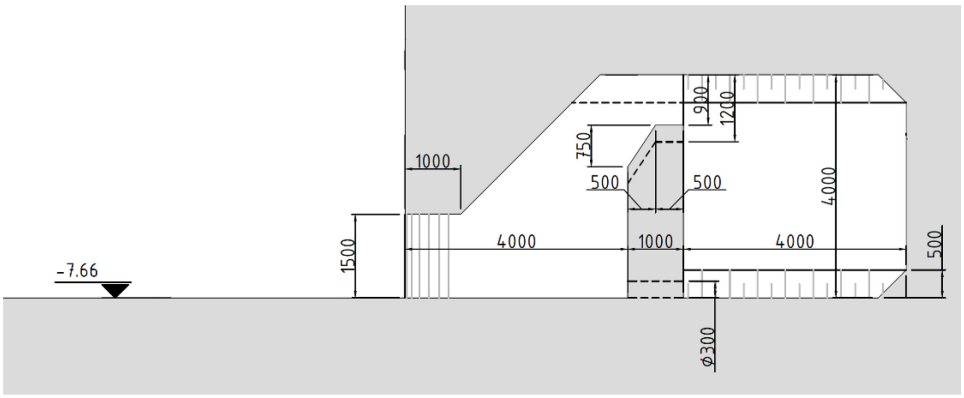
Zowel voor de lange als de korte omloopriool wordt het CFD model opwaarts begrensd ter hoogte van de hefschuiven. Afwaarts wordt een gedeelte van de kolk meegenomen in het model. Het gesimuleerde deel van de kolk wordt begrensd door het binnenoppervlak van de buitenste roldeur van het betreffende hoofd, het symmetrievlak van de kolk en een uitstroomvlak op 129 m ten opzichte binnenoppervlak van de buitenste roldeur van het betreffende hoofd.

Figuur 38 en Figuur 39 geven een voorstelling van de in het CFD model gebruikte geometrie van de uitstroomconstructie voor de lange en korte omloopriool. Merk hierin op dat de overstortmuur van de drie zijspruiten het dichtst bij de betreffende roldeur een hoogte 2.8 m heeft en dat deze bij de volgende drie zijspruiten een hoogte 3.1 m heeft (zie Tabel 22). Dit hoogteverschil zorgt voor een meer uniforme debietsverdeling over de uitstroomopeningen. Een dergelijk verschil in hoogte van de overstortmuur is ook aanwezig bij de uitstroomconstructie van de overige Antwerpse zeesluizen. In Figuur 38 wordt ook de in dit rapport gehanteerde nummering voor de uitstroomopeningen weergegeven.

Figuur 38 – Illustratie uitstroomconstructie initiële geometrie



Figuur 39 – Doorsnede uitstroomopening initiële geometrie



Naast de geometrie van de uitstroomconstructie op basis van de initiële geometrie (SBE, 2014c; d) zijn ook CFD-simulaties uitgevoerd voor de lange omloopriool met een gewijzigde hoogte van de overstortmuur. Deze alternatieve geometrie heeft tot doel de debietverdeling over de verschillende uitstroomopeningen te optimaliseren.

Tabel 22 – Hoogte overstortmuren initiële geometrie en alternatieve geometrie

	nr. uitstroomopening					
	1	2	3	4	5	6
korte en lange omloopriool initiële geometrie	2.8 m	2.8 m	2.8 m	3.1 m	3.1 m	3.1 m
lange omloopriool alternatieve geometrie	2.5 m	2.5 m	2.8 m	2.8 m	3.1 m	3.1 m

Voor het uitvoeren van de CFD-simulaties wordt de LTS-InterFoam solver van OpenFOAM toegepast. Deze solver is geschikt voor een snelle convergentie naar een steady-state oplossing van twee fasestroming met 2 onsamendrukbare media (water en lucht). Voor de modellering van de turbulentie wordt gebruik gemaakt van het k-ω-SST turbulentiemodel. Nabij de vaste wanden wordt een wandfunctiemodel toegepast. Voor meer details in verband met de toegepaste modelinstellingen wordt verwezen naar (Actiflow, 2014).

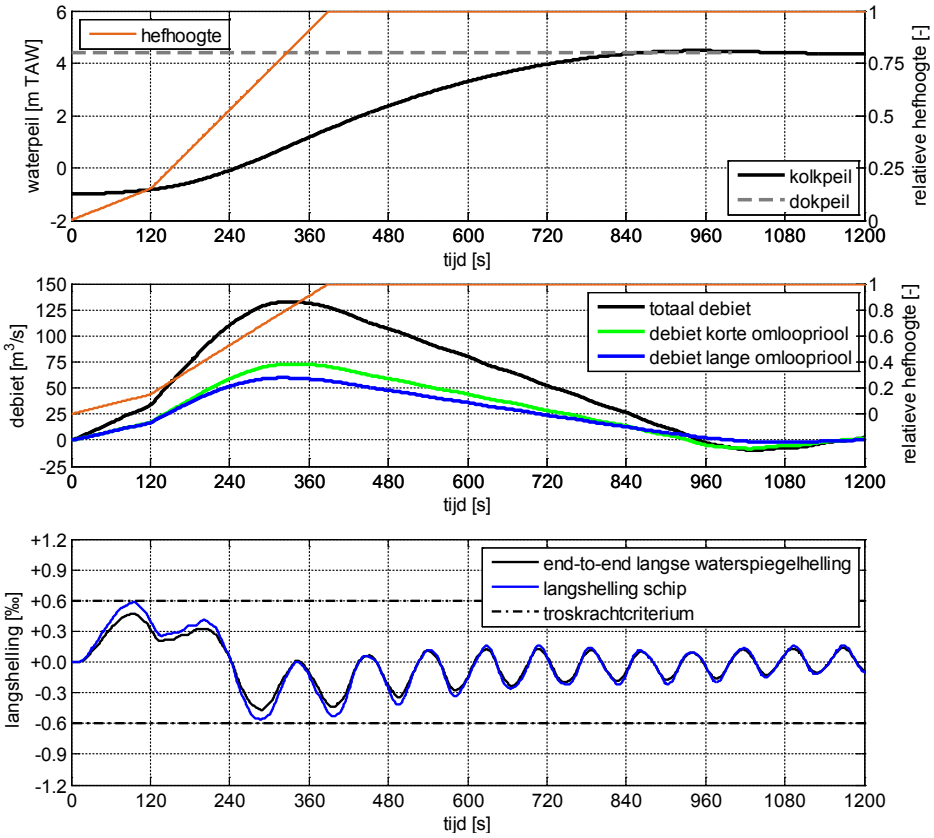
Voor het uitvoeren van de CFD-simulaties worden volgende randvoorwaarden beschouwd:

- De opwaartse rand of inlaat bevindt zich ter hoogte van de hefschuiven. Aan deze rand wordt een vast debiet opgelegd. De druk ter hoogte van de hefschuiven volgt uit de simulatie.
- Voor de wanden wordt een wandfunctie model toegepast dat rekening houdt met de equivalente wandruwheid. Deze wanden betreffen de omloopriolen, de kolkbodem en de binnenzijde van de roldeur. De opgegeven equivalente wandruwheid bedraagt 1.5 mm (ook al bestaat de binnenzijde van de roldeur niet uit beton), dit is analoog met de LOCKSIM simulaties.
- De centerlijn van de kolk wordt ingegeven als symmetrievlak.

- Boven de kolk wordt een vlak genaamd “atmosfeer” gedefinieerd. Hierin kan enkel lucht instromen ten gevolge van de waterstroming in de sluiskolk.
- De afwaartse rand of de uitlaat van het model bevindt zich in de sluiskolk op 129 m verwijderd van de buitenste roldeur. Aan het uitstroomvlak in de kolk wordt eenzelfde debiet opgelegd als aan de opwaartse rand.

Voor de korte omloopriool en de lange omloopriool (met en zonder aangepaste hoogte van de overstortmuur) worden steady-state CFD-simulaties uitgevoerd voor twee verschillende condities. Deze twee condities zijn bepaald op basis van LOCKSIM simulatie N4, zie Figuur 40.

Figuur 40 – Waterpeil in de sluiskolk en relatieve hefhoogte hefschuif (figuur boven), debiet door de omloopriolen (figuur midden), langse waterspiegelhelling (figuur onder) – simulatie N4 vullen bovenhoofd met de maatgevende scheepscombinatie – Scheldepeil TAW – 1.00 m naar een dokpeil TAW + 4.40 m



Op basis van Figuur 40 zijn volgende 2 stromingscondities geselecteerd:

- Conditie 1: het tijdstip waarop de langse waterspiegelhelling op het schip maximaal (i.e. het meest positief) is.
- Conditie 2: het tijdstip van maximaal totaal debiet. Merk op dat dit tijdstip ca. overeenkomt met het ogenblik dat de langse waterspiegelhelling minimaal (i.e. het meest negatief) is.

Deze stromingscondities worden samengevat in Tabel 23. Merk op dat in deze tabel per conditie twee sets resultaten worden weergeven. De reden hiervoor is dat na het opstellen van de condities voor de CFD studie werd vastgesteld dat voor de lengte van de lange omloopriool een foutieve (lees te kleine) waarde werd gehanteerd. De LOCKSIM simulaties in hoofdstuk 5 zijn uitgevoerd met de correcte lengte van de lange omloopriool.

Het debiet en waterpeilen die als input gebruikt worden voor de CFD simulaties zijn opgesteld met het LOCKSIM model met de foutieve lengte voor de lange omloopriool. Bemerk dat het verschil tussen beide echter minimaal is en dat bijgevolg ook de invloed op de resultaten van de CFD-simulaties verwaarloosbaar zal zijn.

Tabel 23 – Condities steady state simulatie o.b.v. simulatie N4

conditie	LOCKSIM simulatie	tijdstip [s]	kolkpeil [m TAW]	debiet door de lange omloopriool [m^3/s]	debiet door de korte omloopriool [m^3/s]	hefhoogte hefschuif [m]
1	CFD studie	90	-0.89	13	13	0.48 (12%)
	gecorrigeerd (hoofdstuk 5)	95	-0.89	13	13	0.48 (12%)
2	CFD studie	319	0.73	62	73	4.00 (100%)
	gecorrigeerd (hoofdstuk 5)	323	0.75	60	73	4.00 (100%)

Merk in Figuur 40 op dat bij conditie 2 de hefschuiven voor 80 % geopend zijn. De invloed hiervan wordt voor stromingsconditie 2 verwaarloosd en de simulatie wordt uitgevoerd bij volledig geopende hefschuiven.

Tijdens de CFD simulaties wordt het peil in de kolk en het debiet doorheen de omloopriool uit Tabel 23 opgelegd. Alhoewel beide condities afgeleid zijn uit een LOCKSIM simulatie met het maatgevend verval kan aangenomen worden dat de gesimuleerde stromingspatronen en de debietverdelingen gelijkaardig zijn bij lagere vervallen.

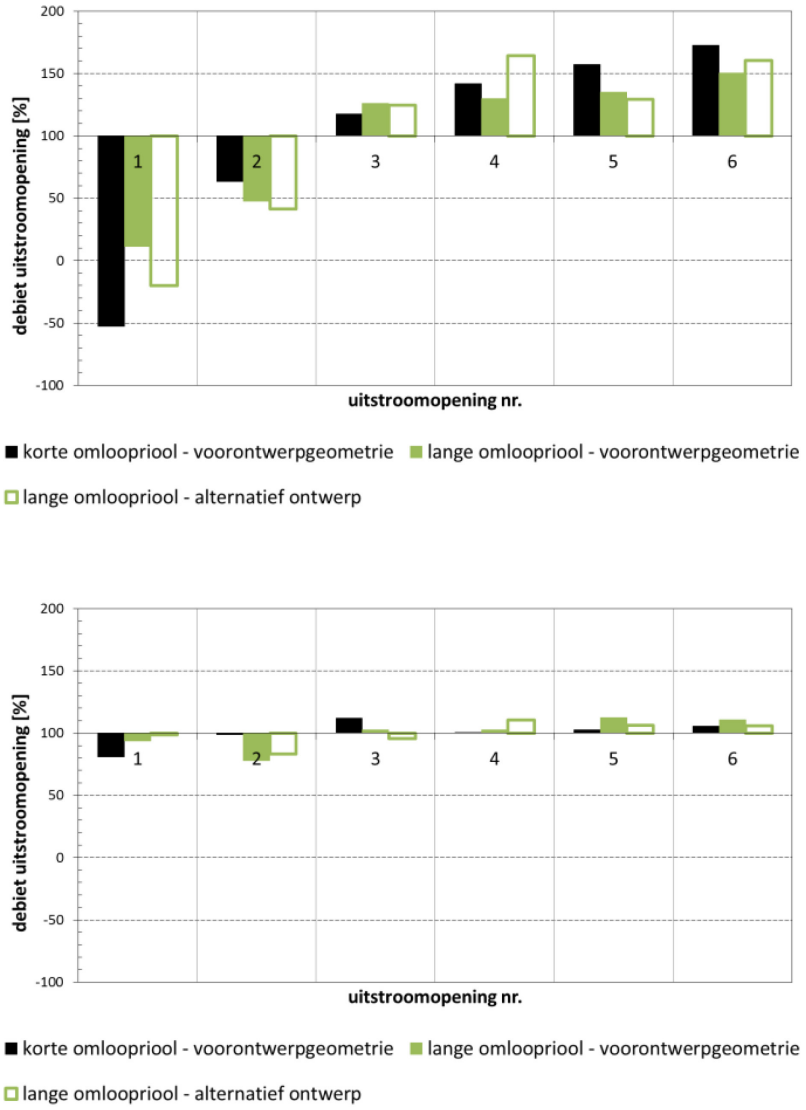
7.2 Debietsverdeling uitstroomopeningen

De debietverdeling over de uitstroomopeningen bij conditie 1 en conditie 2 wordt gegeven in Tabel 24 en grafisch voorgesteld in Figuur 41. Voor alle beschouwde configuraties en condities wordt het debiet doorheen een uitstroomopening relatief uitgedrukt ten opzichte van het debiet door de betreffende opening bij een uniforme debietverdeling.

Tabel 24 – Debietverdeling uitstroomopeningen voor conditie 1 en conditie 2
(uitgedrukt in % van het debiet bij uniforme verdeling)

uitstroom opening nr.	conditie 1			conditie 2		
	korte omloopriool initiële geometrie	lange omloopriool initiële geometrie	lange omloopriool alternatieve geometrie	korte omloopriool initiële geometrie	lange omloopriool initiële geometrie	lange omloopriool alternatieve geometrie
1	-52	11	-20	81	94	98
2	63	48	41	99	78	83
3	117	126	125	112	103	95
4	142	130	164	100	103	111
5	157	135	129	103	112	106
6	173	150	160	105	111	106

Figuur 41 – Debietverdeling uitstroomopeningen boven: conditie 1 / onder: conditie 2
(uitgedrukt in % van het debiet bij uniforme verdeling)



Uit Tabel 24 en Figuur 41 volgt dat bij conditie 1, met een voor 12 % geopende hefschuif, een merkelijk lager, tot zelfs negatief, debiet door uitstroomopening 1 en 2 gegenereerd wordt. Dit wordt verklaard door de bodemnabije stroming die ontstaat afwaarts van een gedeeltelijk geopende hefschuif. Boven deze bodemnabije stroming ontstaat een wervel. Bij de korte omloopriool is deze bodemnabije stroming pas ter hoogte van uitstroomopening nr. 3 voldoende gespreid over de hoogte van de omloopriool zodat de bovenzijde van deze stroming boven de overstortmuur uitkomt. Bij de simulaties met de lange omloopriool wordt de bodemnabije stroming door de 90° bocht voor de uitstroomconstructie omhoog geleid en weggericht van uitstroomopening nr. 1 en 2 naar de achterwand van de omloopriool toe.

Bij conditie 2 wordt een relatief goede verdeling vastgesteld over de verschillende uitstroomopeningen. Aangezien bij deze conditie de hefschuiven volledig geopend zijn, is de stroming in de omloopriool veel uniformer verdeeld over de dwarssectie. Bij de lange omloopriool is het debiet door opening nr. 3 en nr. 4 ongeveer gelijk aan het debiet bij uniforme stroming. Het debiet door uitstroomopening nr. 5 en nr. 6 is ca. 10 % hoger dan bij uniforme stroming en door uitstroomopening nr. 1 en nr. 2 respectievelijk 6 % en 22% lager. Bij de korte omloopriool is het debiet door uitstroomopening nr. 1 een 19 % te laag en door uitstroomopening nr. 3 een 12 % te hoog.

De enige mogelijk oplossing om bij een gedeeltelijk geopende hefschuif een even goede debietverdeling te bekomen als bij een volledig geopende hefschuif is om ervoor te zorgen dat het stromingspatroon naar de uitstroomconstructie uniform is. Merk op dat de afstand tussen de hefschuiven en de uitstroomconstructie (31.1 m voor de korte omloopriool en 26.4 m voor de lange omloopriool) relatief beperkt is. Bij de lange omloopriool zouden de hefschuiven eventueel verder van de uitstroomconstructie gepositioneerd kunnen worden, maar bij de korte omloopriool is dit geen optie. Een ander mogelijkheid om een uniformere verdeling te verkrijgen is het geforceerd dissiperen van de stroming, bijvoorbeeld door geleidingen of stootblokken in te werken in de bodem van de omloopriool afwaarts van de hefschuif. Deze energiedissipatoren afwaarts van de hefschuif zullen dan wel de verliescoëfficiënt van de omloopriool verhogen.

Merk op dat in de korte omloopriolen van de huidige Antwerpse zeesluizen met gelijkaardige nivelleersystemen een gelijkaardig debietverdeling te verwachten valt. Bij de lange omloopriolen van de huidige Antwerpse zeesluizen zijn de hefschuiven echter in het midden van de omloopriool geplaatst waardoor voor de lange omloopriool bij een gedeeltelijk geopende hefschuif een betere verdeling te verwachten valt dan volgt uit de uitgevoerde CFD-simulaties voor het nivelleersysteem van de vernieuwde Royerssluis waar de hefschuiven (om constructieve redenen) dichter tegen de uitstroomconstructie geplaatst zijn.

In overleg met aMT en SBE werd besloten om een mogelijke aanpassing van de geometrie te beperken tot een wijziging in de hoogte van de overstortmuren, zie Tabel 22. Hierbij worden drie verschillende hoogtes van de overstortmuur toegepast in plaats van twee hoogtes in de initiële geometrie van het nivelleersysteem. Uit de uitgevoerde CFD-simulaties volgt dat deze alternatieve geometrie in geval van conditie 2 met volledige geopende hefschuiven resulteert in een beperkte verbetering van de debietverdeling. In geval van conditie 1 met gedeeltelijk geopende hefschuiven wordt de debietverdeling echter iets slechter. Voor uitstroomopening nr. 1 wordt bij de alternatieve geometrie zelfs een negatief debiet berekend. Op basis hiervan wordt besloten om de voorgestelde wijziging aan de hoogte van de overstortmuur niet te weerhouden en de geometrie van de uitstroomconstructie uit de initiële geometrie te behouden.

7.3 Verliescoëfficiënt

In Actiflow B.V. (2015a) wordt het drukverschil gerapporteerd tussen de uitlaat van het CFD-model en de inlaat ter plaatse van de hefschuiven. Aan de hand van dit drukverschil en het debiet door de omloopriolen kan de hydraulische verliescoëfficiënt ξ berekend worden. Hiervoor wordt volgende formulering gebruikt:

$$\Delta H = \xi \cdot \frac{Q^2}{2g \cdot A^2} \rightarrow \xi = \Delta H \cdot \frac{2g \cdot A^2}{Q^2}$$

Met:

- ξ Verliescoëfficiënt [-]
- ΔH Drukverschil [m waterkolom]
- g Valversnelling = 9.81 m/s^2 [m/s^2]
- Q Debiet afhankelijk van conditie (Tabel 23) [m^3/s]
- A Doorstroomsectie omloopriool = 16 m^2 [m^2]

Gebruik makend van deze formulering is in Actiflow B.V. (2015a) voor de korte omloopriool, de lange omloopriool en de lange omloopriool met gewijzigde hoogte van de overstortmuur de hydraulische verliescoëfficiënt berekend van het volledige CFD-model. Een overzicht van deze waarden wordt gegeven in Tabel 25.

Tabel 25 – Hydraulische verliescoëfficiënt ξ [-] CFD model (Actiflow, 2015)

	korte omloopriool initiële geometrie	lange omloopriool initiële geometrie	lange omloopriool alternatieve geometrie
conditie 1	114.9	114.7	116.1
conditie 2	2.06	2.35	2.22

De verliescoëfficiënt van het CFD model uit Tabel 25 bevat naast de verliezen van de uitstroomconstructie ook volgende verliezen:

- Hefschuifverliezen bij gedeeltelijk geopende hefschuiven,
- Leidingverliezen ten gevolge van wandwrijving,
- Verliezen ten gevolge van de samenvloeiing,
- Bochtverlies voor de lange omloopriool.

Bij conditie 1 worden de verliezen gedomineerd door de gedeeltelijke opening van de hefschuiven. Voor de LOCKSIM simulaties wordt de stap in hefhoogtes waarmee in Idel'Cik (1969) een verliescoëfficiënt wordt gegeven verkleind (De Mulder *et al.*, 2007). Bij de hefhoogte uit conditie 1 wordt in het LOCKSIM model een verliescoëfficiënt 140 toegepast. Dit is iets hoger dan volgt uit de CFD simulaties. Merk op dat in de CFD simulaties geen rekening wordt gehouden met de verliezen in de aanstroming naar de opening onder de hefschuif en met de bijkomende contractie van de stroming onder de hefschuif ten gevolge van de aanstroming.

Doordat de hydraulische invloed (i.e. de bijzondere ladingsverliezen) van een component niet onmiddellijk "uitgewerkt" is afwaarts van de component, is het niet mogelijk om de verliezen per component te bepalen uit de drukken op- en afwaarts van elke component. Voor het bepalen van de verliezen van de uitstroomconstructie worden van de verliezen uit Tabel 25 de in het hydraulisch netwerkmodel toegepaste samenvoeging-, wandwrijving- en bochtverliezen afgetrokken, zie Tabel 26. Hierbij wordt de verliescoëfficiënt bepaald bij conditie 2 gebruikt omdat hierbij geen hefschuifverliezen in rekening genomen worden.

Tabel 26 – Hydraulische verliezen CFD model, overige componenten en uitstroomconstructie

		korte omloopriool initiële geometrie	lange omloopriool initiële geometrie	lange omloopriool alternatieve geometrie
totaal	CFD model	2.06	2.35	2.22
overige componenten (paragraaf 5.1)	hefschuif (volledig geopend)	0.00	0.00	0.00
	leiding	0.10	0.10	0.10
	samenvoeging	-0.04	-0.04	-0.04
	leiding	0.20	0.17	0.17
	bocht	0.00	0.28	0.28
	SOM= $\xi_{\Sigma overig}$	0.27	0.51	0.51
uitstroom-constructie	CFD ($\xi_{CFD\text{-}model} - \xi_{\Sigma overig}$)	1.79	1.84	1.71

Merk in Tabel 26 op dat de verliezen van de uitstroomconstructie dominant zijn ten opzichte van de samenvoegingsverliezen, leidingsverliezen en bochtverliezen. De verliescoëfficiënt van de korte en lange omloopriool afgeleid uit de CFD-modellering is quasi gelijk (ξ = 1.79 in vergelijking met. ξ = 1.84). Voor de alternatieve geometrie zijn de verliezen van de uitstroomconstructie van de lange omloopriool beperkt lager ten opzichte van de initiële geometrie (ξ = 1.71 in vergelijking met ξ = 1.84).

In de initiële LOCKSIM simulaties (hoofdstuk 5) wordt als aanname de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie van de Berendrechtsluis gebruikt. Deze werd bepaald op basis van een op terreinmetingen gekalibreerd LOCKSIM model. De wijze waarop de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie voor de Berendrechtsluis is bepaald uit de terreinmetingen verdisconteert het onderschatten en overschatten van de verliescoëfficiënt van de overige componenten van het netwerkmodel van de omloopriool. De verliescoëfficiënt voor de uitstroomconstructie berekend uit de CFD-modellering verdisconteert enkel het overschatten en onderschatten van de verliezen voor het gedeelte van de omloopriool vanaf de hefschuiven tot en met de uitstroomconstructie. In Tabel 27 wordt de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie uit de CFD simulaties vergeleken met de in hoofdstuk 5 toegepaste verliescoëfficiënten van de Berendrechtsluis.

Tabel 27 – Vergelijking hydraulische verliezen uitstroomconstructie Royerssluis en Berendrechtsluis
(/ = geen CFD-simulatie uitgevoerd)

		korte omloopriool	lange omloopriool
Royerssluis (bepaald op basis van CFD model)	initiële geometrie	1.79	1.84
	alternatieve geometrie	/	1.71
Berendrechtsluis (bepaald op basis van op metingen Berendrechtsluis gekalibreerd LOCKSIM model)		1.70	2.60

Merk in Tabel 27 op dat de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie van de korte omloopriool bepaald op basis van de CFD-studie relatief goed overeenkomt met de op basis van een op metingen gekalibreerd LOCKSIM model bepaalde waarde voor de Berendrechtsluis (ξ = 1.79 in vergelijking met. ξ = 1.70). Bij de lange omloopriool is de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie op basis van de CFD-studie merkelijk lager ten opzichte van de op basis van een op metingen gekalibreerd LOCKSIM model bepaalde waarde voor de Berendrechtsluis (ξ = 1.84 en ξ = 1.71 in vergelijking met ξ = 2.60).

7.4 Stromingspatroon in de omloopriolen, de uitstroomconstructie en de sluiskolk

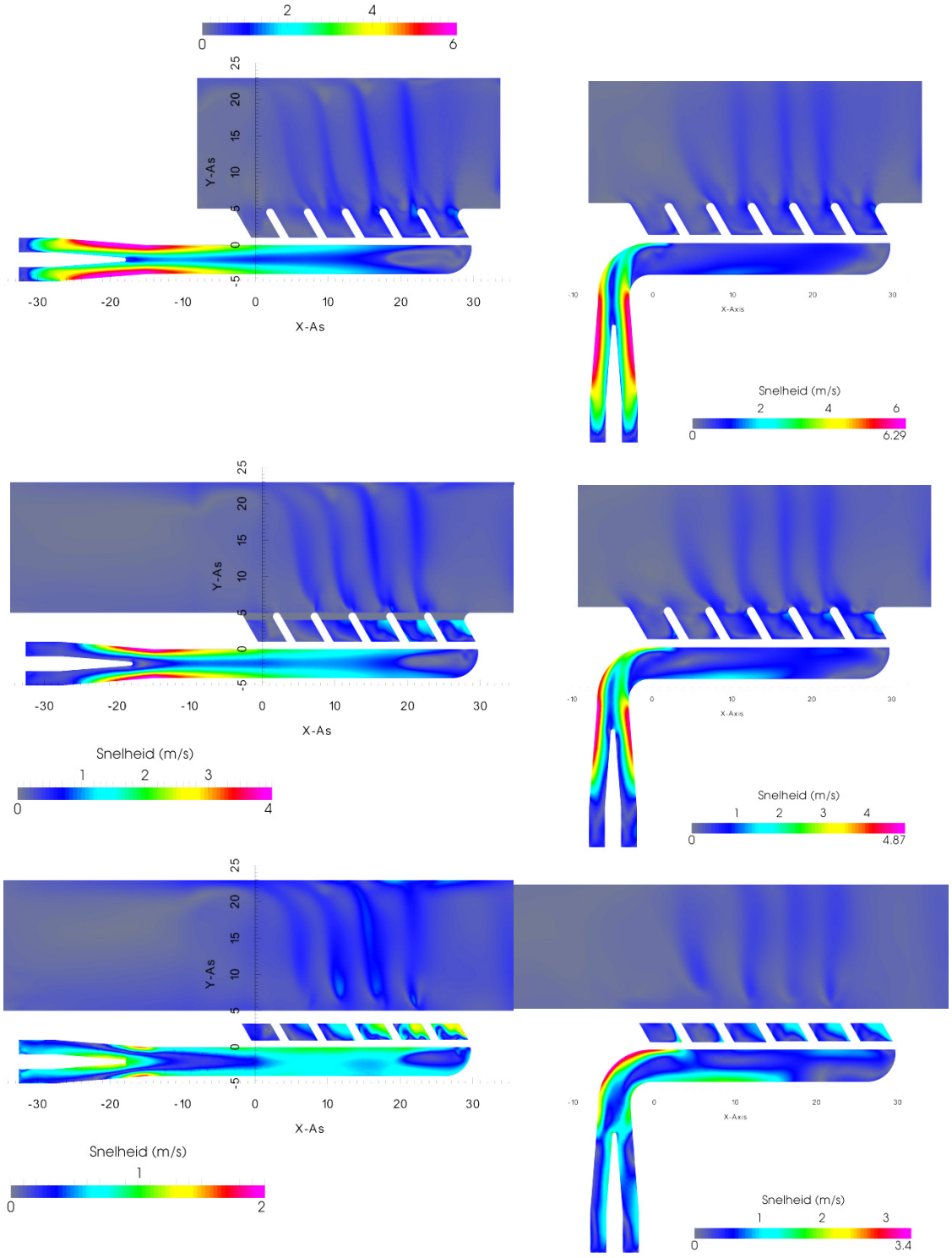
Het stromingspatroon in de omloopriolen, de uitstroomconstructie en de sluiskolk wordt beschreven in paragraaf 7.4.1 voor conditie 1 en in paragraaf 7.4.2 voor conditie 2.

Merk op dat in paragraaf 7.4.1 en paragraaf 7.4.2 enkel het stromingspatroon voor de simulaties met de korte en lange omloopriool met de initiële geometrie van de uitstroomconstructie besproken worden. In paragraaf 7.2 werd besloten om de alternatieve geometrie van de uitstroomconstructie niet te weerhouden voor het ontwerp. Omwille van de overzichtelijkheid wordt het stromingspatroon voor de lange omloopriool met gewijzigde hoogte van de overstortmuur in deze paragraaf niet verder besproken, maar wordt verwezen naar Actiflow B.V. (2015a).

7.4.1 Conditie 1

Figuur 42 geeft een voorstelling van de stroomsnelheid in een horizontaal vlak evenwijdig met de bodem van de sluiskolk op respectievelijk 0.75 m, 1.50 m en 2.25 m, ten opzichte van de bodem van de omloopriolen en de lokaal verdiepte kolkbodem.

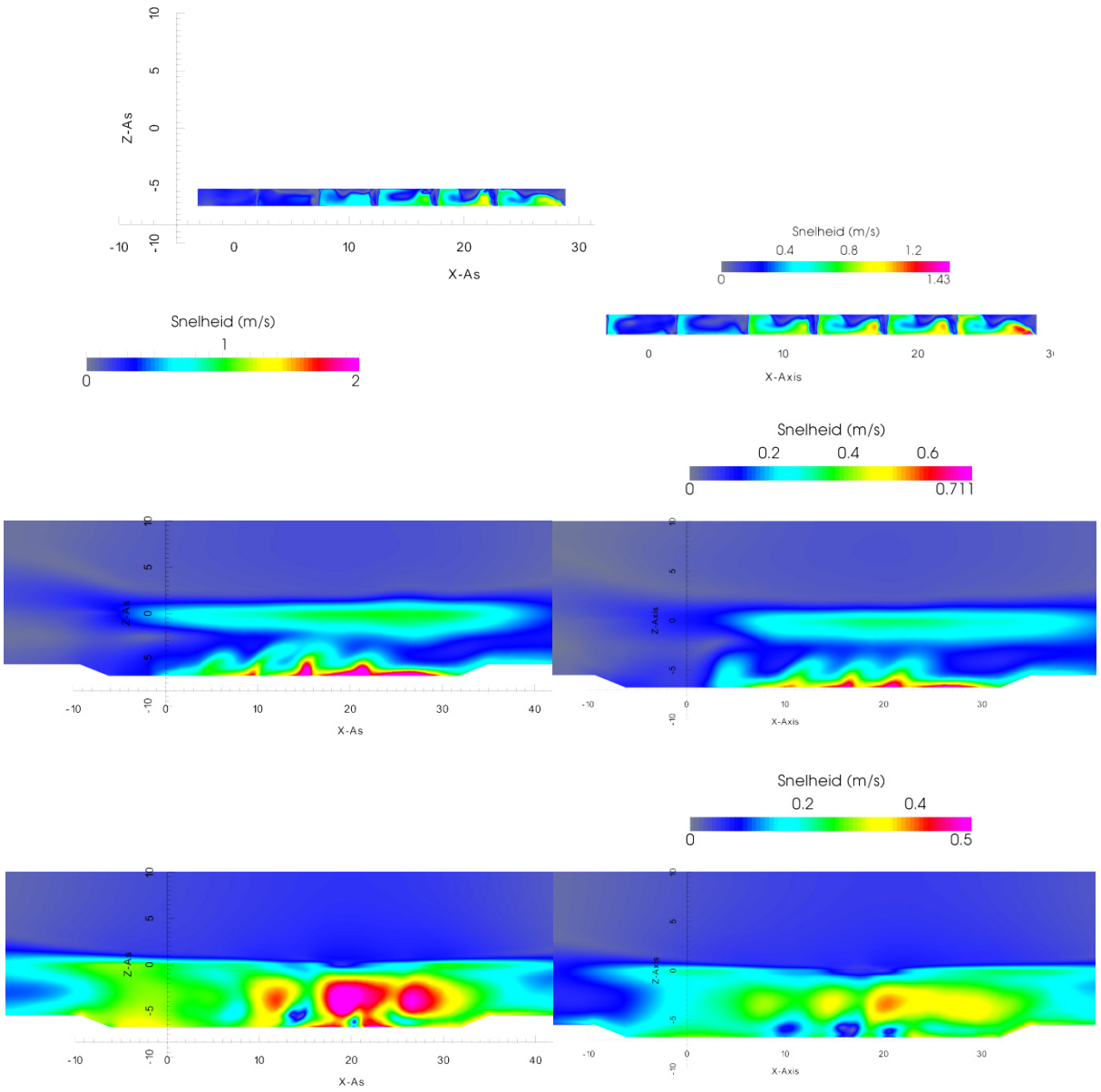
Figuur 42 – CFD simulatie conditie 1 – snelheid boven bodem



links: korte omloopriool / rechts: lange omloopriool
boven: op 0.75 m boven bodem - midden: op 1.50 m boven de bodem - onder: op 2.25 m boven de bodem

Een voorstelling van de stroomsnelheid in een aantal verticale doorsnedes wordt gegeven in Figuur 43. Hiervoor is een verticaal vlak in het dagvlak van de uitstroomopeningen, een verticaal vlak op ¼ kolkbreedte en een verticaal vlak ter hoogte van het symmetrievlak (in de aslijn van de sluiskolk) beschouwd.

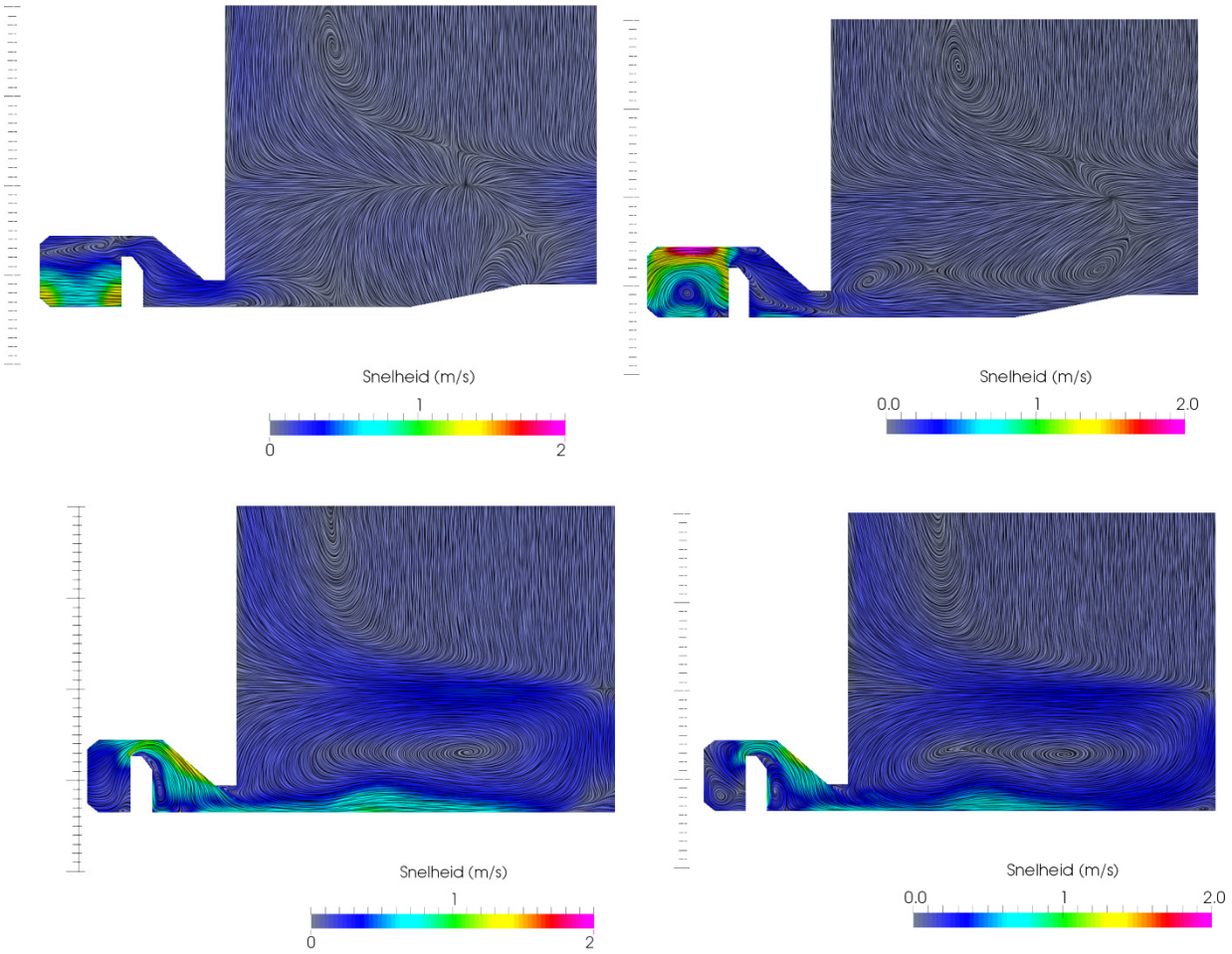
Figuur 43 – CFD simulatie conditie 1 – snelheid in een verticaal vlak evenwijdig met de as van de sluiskolk



links: korte omloopriool / rechts: lange omloopriool
boven: in dagvlak uitstroomopeningen / midden: op kwart kolkbreedte / onder: in symmetrievlak

Figuur 44 geeft een voorstelling van de stroomsnelheid in een verticaal vlak loodrecht op de as van de sluiskolk ter plaatse van uitstroomopening nr. 1 en uitstroomopening nr. 6. Bemerk dat de resultaten uit Figuur 44 zowel de stroming van het water als de lucht weergeven. Het scheidingsvlak tussen water en lucht wordt gekenmerkt door de horizontale lijn waarop de stroomlijnen van het bovenvlak (lucht) en ondervlak (water) op afbuigen.

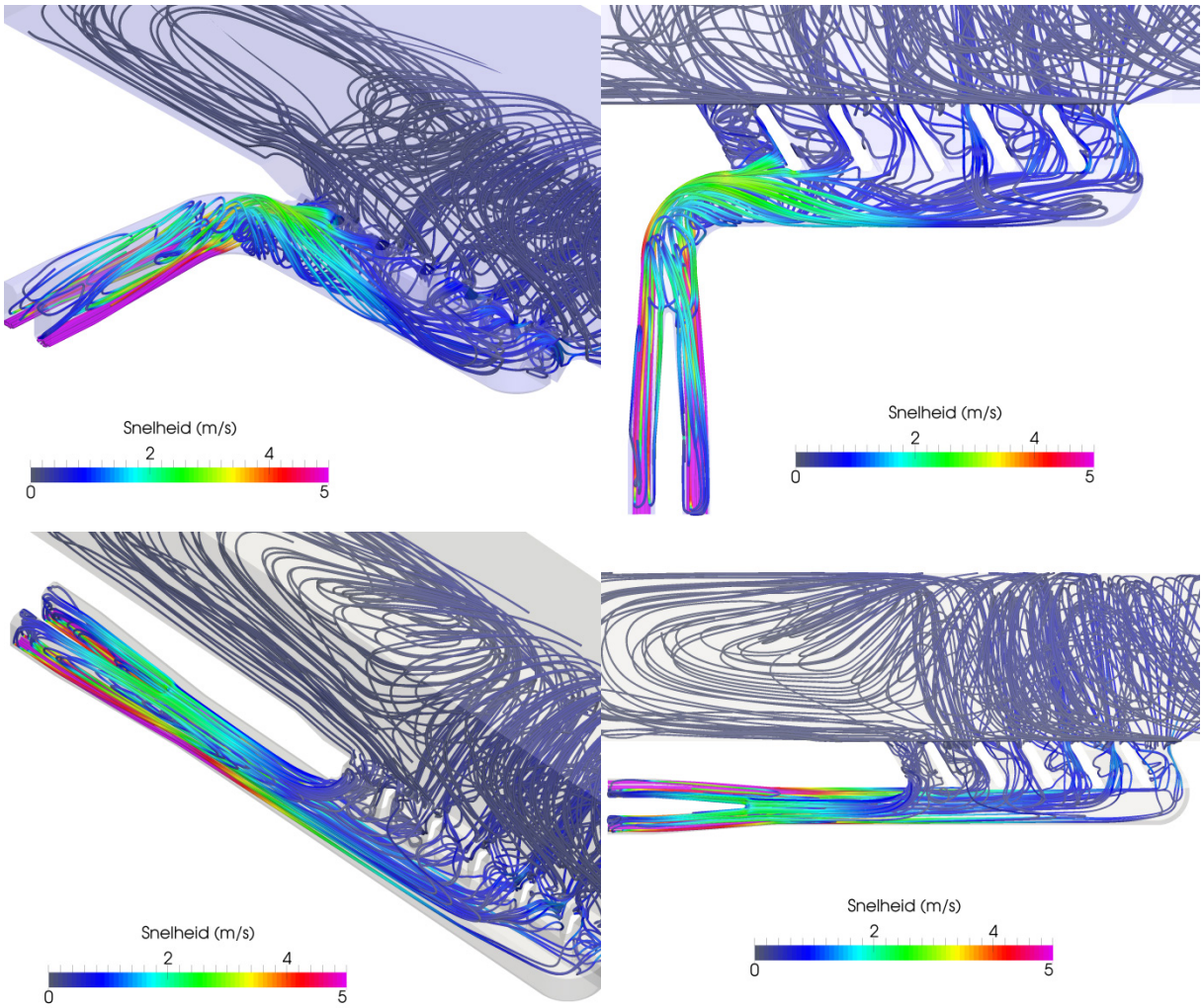
Figuur 44 – CFD simulatie conditie 1 – snelheid in een verticaal vlak evenwijdig met schoepen uitstroomopening



links: korte omloopriool / rechts: lange omloopriool
boven: uitstroomopening nr. 1 / onder: uitstroomopening nr. 6

Een visualisatie van de stroomlijnen wordt gegeven in Figuur 45.

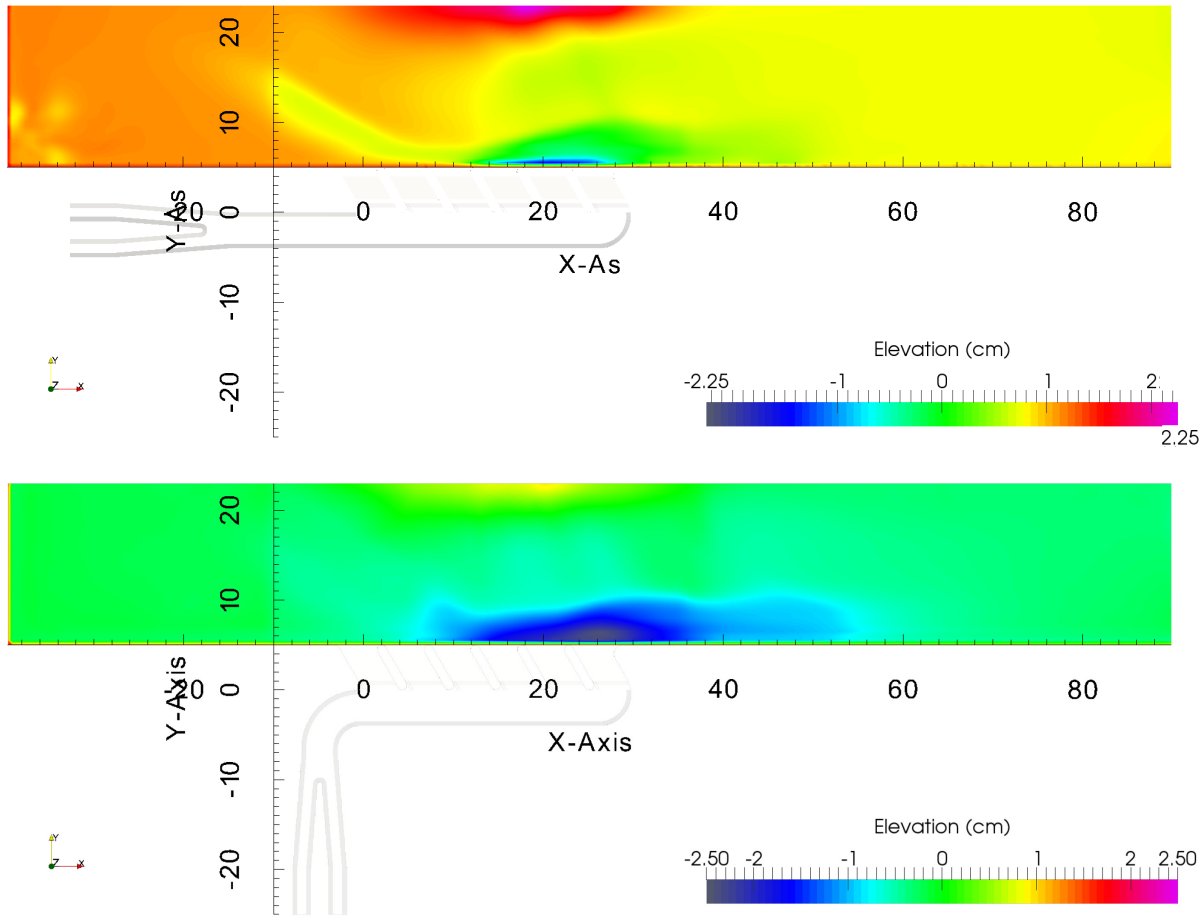
Figuur 45 – CFD simulatie conditie 1 – visualisatie stroomlijnen



boven: lange omloopriool / onder: korte omloopriool

De CFD-simulaties zijn uitgevoerd met een vrij vloeistofoppervlak (i.e. het scheidingsvlak dat volgt uit de simulatie van de tweefasenstroming lucht-water). Uit de resultaten van de simulaties kunnen bijgevolg ook de waterspiegelvariaties in de sluiskolk gevisualiseerd worden, zie Figuur 46.

Figuur 46 – CFD simulatie conditie 1 – inzinking wateroppervlak



boven: korte omloopriool / onder: lange omloopriool

Merk in Figuur 42 tot en met Figuur 46 op:

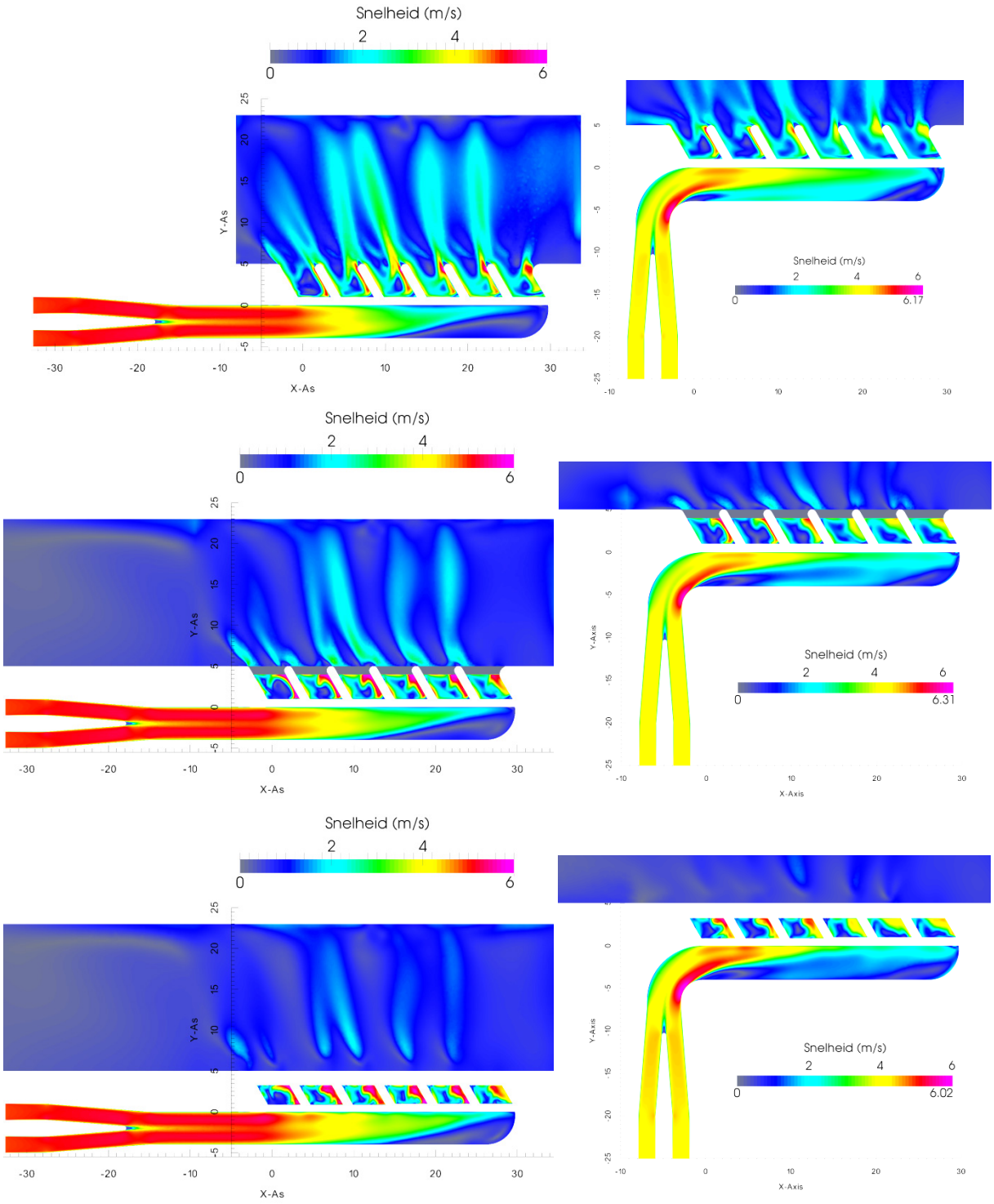
- Ten gevolge van de gedeeltelijke geopende hefschuif bij conditie 1 ontstaat een bodemnabije stroming in de omloopriolen. Boven deze stroming ontstaat een neer. De hoogste stroomsnelheden komen voor aan de buitenwanden van de samenvoeging. Bij de korte omloopriool reikt de bovenzijde van de stroming pas ter hoogte van opening 3 aan de overstortmuur waardoor voor opening 1 zelfs een debiet aangezogen wordt. Bij de lange omloopriool zal de stroming ten gevolge van de bocht voor de uitstroomconstructie een helicoïdaal patroon krijgen waardoor de stroming weggeleid wordt van de eerste uitstroomopeningen, zie Figuur 45.
- De uitstroomopeningen worden gescheiden door geleidingsschoepen. De schoepen worden naar de deuren van het betreffende hoofd gericht. Uit Figuur 42 volgt dat de uittredende stroming uit uitstroomopeningen nr. 4, nr. 5 en nr. 6 loodrecht op de as van de sluiskolk gericht is. De stroming wordt in de uitstroomconstructie 90° gedraaid in plaats van de volledige 120° (wanneer de uitstroming evenwijdig met de schoepen zou gebeuren). Bij de overige uitstroomopeningen wordt een stroming waargenomen die enigszins in de richting van de roldeuren van het betreffende hoofd gericht is.

- De uittredende stroming wordt naar de bodem van de lokaal verdiepte kolkbodem toe gericht door het schuine plafond volgend op de overstortmuur, zie Figuur 44. In deze figuur is ook duidelijk een neer in de sluiskolk waar te nemen. De stroming aan de bodem uit de uitstroomopeningen wordt ter plaatse van het symmetrievlak naar het oppervlak afgebogen en in de richting van de sluiskolkmuur gestuurd.
- De grafische voorstelling van de stroomsnelheid in een horizontaal vlak op 0.75 m, 1.50 m en 2.25 m boven de lokaal verdiepte kolkbodem, zie Figuur 42, toont dat de stroomsnelheid in de sluiskolk afneemt met de hoogte boven de bodem. Op 0.75 m boven de bodem bedraagt de maximale snelheid in de kolk ca. 1.0 m/s, op 2.25 m boven de bodem is dit afgenomen tot snelheden onder 0.5 m/s.
- De variaties van de waterspiegel in Figuur 46 zijn beperkt tot ca. 1.5 cm. Boven de uitstroomopeningen doet zich een inzinking voor en ter hoogte van het symmetrievlak een opstuwing. Bij de lange omloopriool strekt deze inzinking zich ca. 10 m naar afwaarts uit voorbij de uitstroomconstructie.
- De grafische voorstellingen van het stromingspatroon in de dwarsdoorsnedes door de omloopriool en de dwarsdoorsnedes door de uitstroomopeningen tonen een uitermate driedimensionaal stromingspatroon. Uit Figuur 43 en Figuur 45 volgt dat de stroming over de overstortmuur enerzijds tegen de buitenschoep van de uitstroomopening naar buiten stroomt. Anderzijds wordt een deel van de stroming afgebogen via het dak van de opening naar de binnenschoep toe.

7.4.2 Conditie 2

Figuur 47 geeft een voorstelling van de stroomsnelheid in een horizontaal vlak evenwijdig met de bodem van de sluiskolk op respectievelijk 0.75 m, 1.50 m en 2.25 m, ten opzichte van de bodem van de omloopriolen en de lokaal verdiepte kolkbodem.

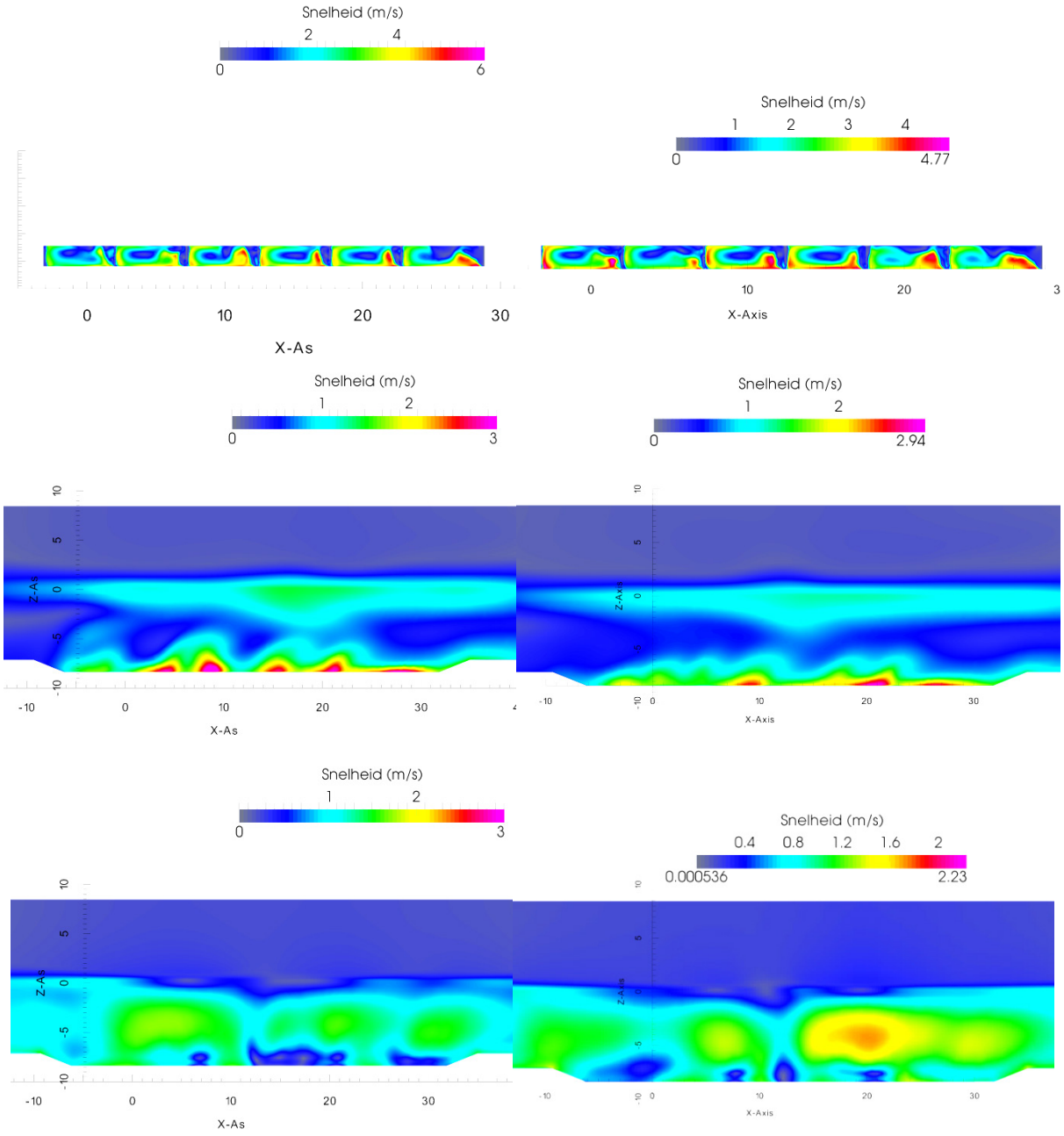
Figuur 47 – CFD simulatie conditie 2 – snelheid boven bodem



links: korte omloopriool / rechts: lange omloopriool
boven: op 0.75 m boven bodem - midden: op 1.50 m boven de bodem - onder: op 2.25 m boven de bodem

Een verticale doorsnede met de stroomsnelheid in het dagvlak van de uitstroomopening, op ¼ kolkbreedte en ter hoogte van het symmetrievlak wordt geven in Figuur 48.

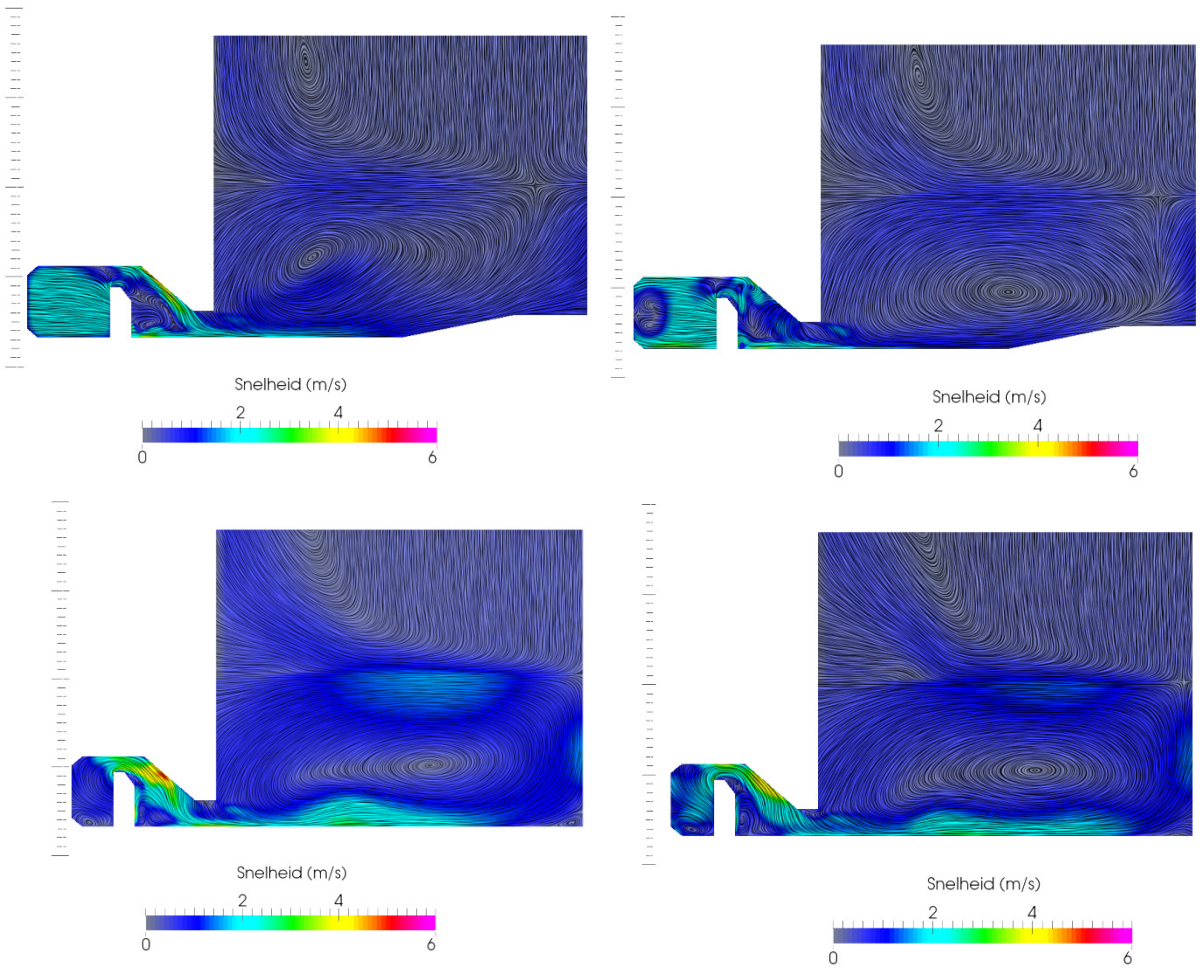
Figuur 48 – CFD simulatie conditie 2 – snelheid in een verticaal vlak evenwijdig met kolk-as



links: korte omloopriool / rechts: lange omloopriool
boven: in dagvlak uitstroomopeningen - midden: op kwart kolkbreedte - onder: in symmetrievlak

Figuur 49 geeft een voorstelling van de stroomsnelheid in een verticaal vlak loodrecht op de as van de sluiskolk ter plaatse van uitstroomopening nr. 1 en uitstroomopening nr. 6.

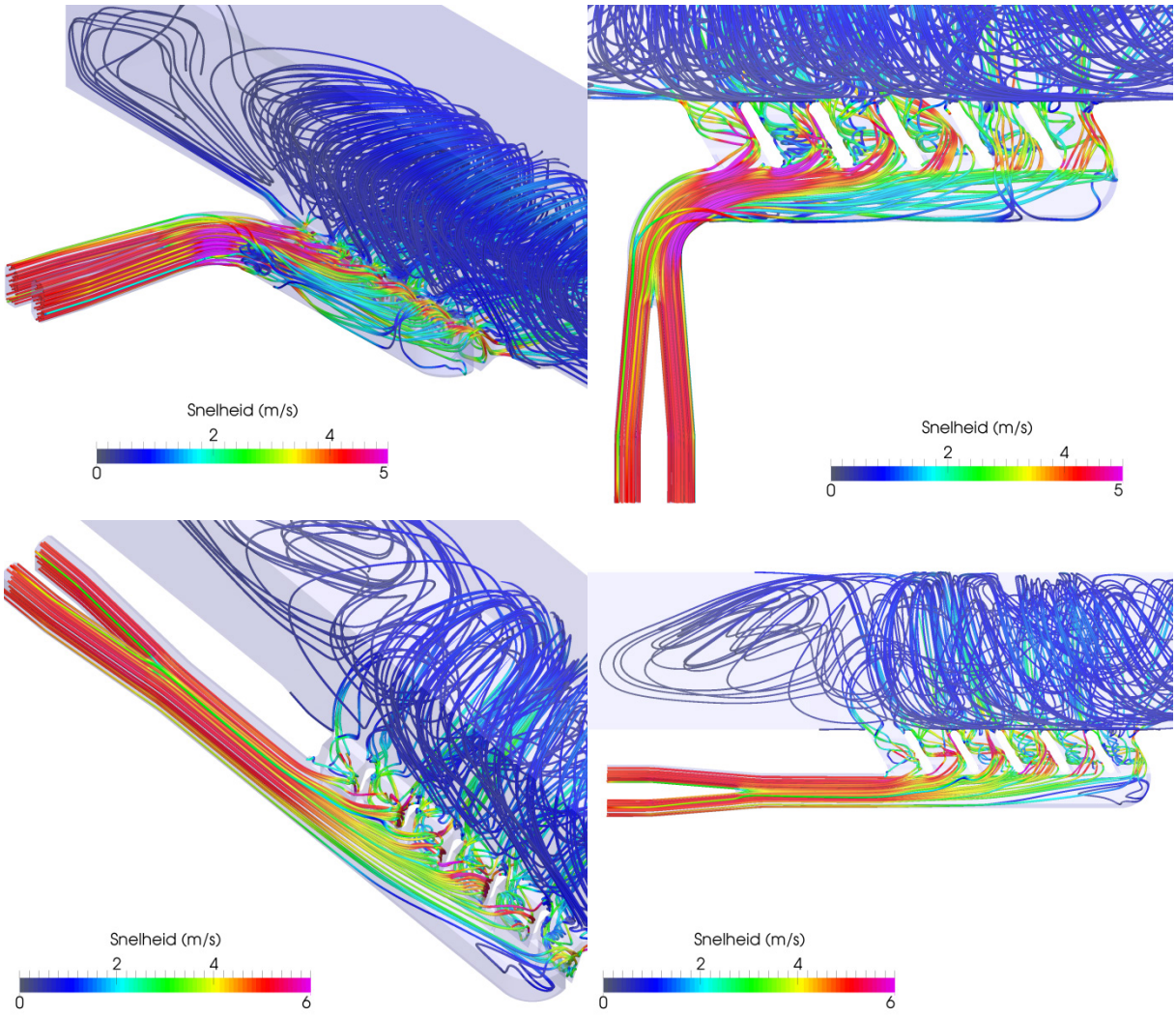
Figuur 49 – CFD simulatie conditie 2 – snelheid in een verticaal vlak evenwijdig met schoepen uitstroomopening



links: korte omloopriool / rechts: lange omloopriool
boven: uitstroomopening nr. 1 - onder: uitstroomopening nr. 6

Een visualisatie van de stroomlijnen wordt gegeven in Figuur 50.

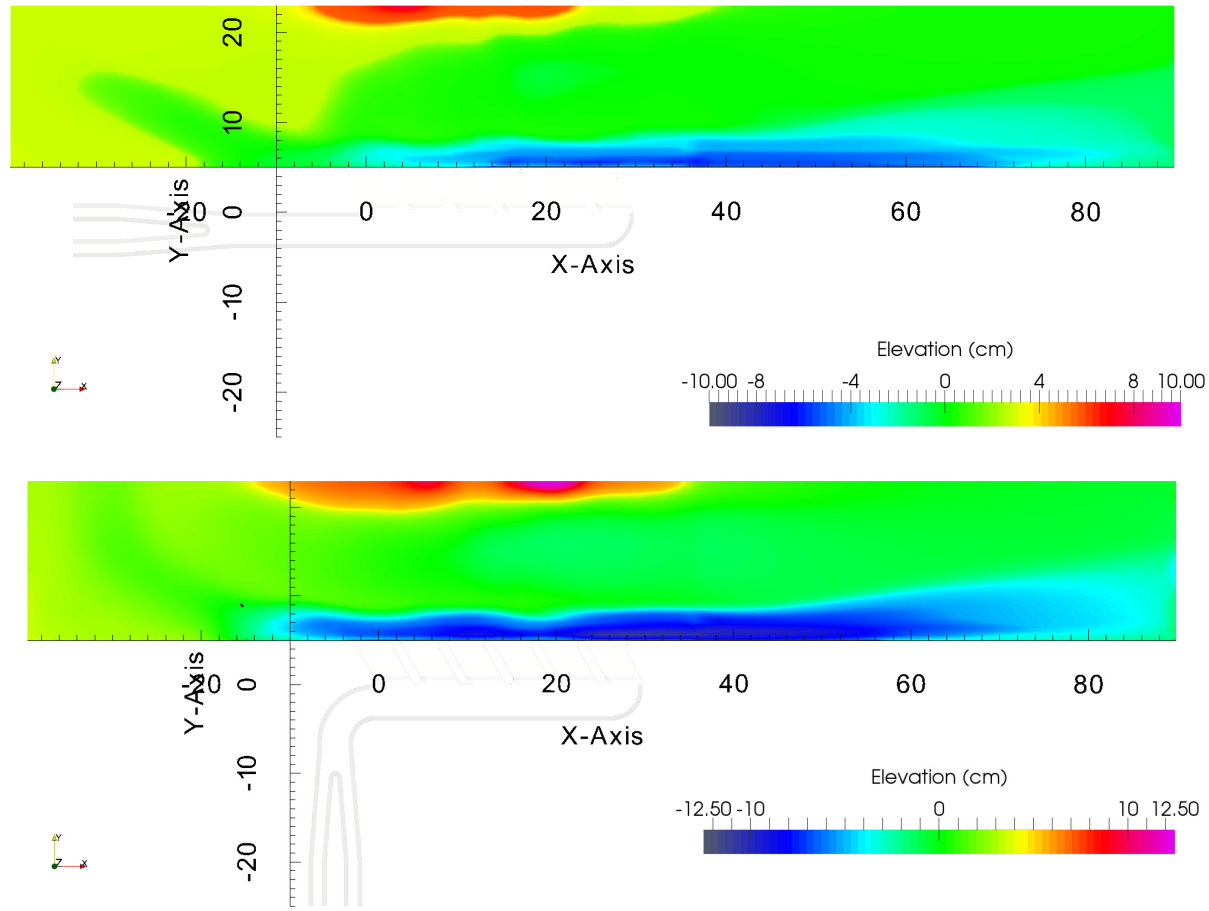
Figuur 50 – CFD simulatie conditie 2 – visualisatie stroomlijnen



boven: lange omloopriool - onder: korte omloopriool

Figuur 51 geeft, analoog als bij conditie 1, een voorstelling van de grootte van de waterspiegelvariaties in de sluiskolk.

Figuur 51 – CFD simulatie conditie 2 – inzinking wateroppervlak



boven: korte omloopriool - onder: lange omloopriool

Merk in Figuur 47 tot en met Figuur 51 op:

- Bij de korte omloopriool ontstaat een quasi uniforme aanstroming naar de uitstroomconstructie, zie Figuur 47. Bij de lange omloopriool is net opwaarts van de uitstroomconstructie een bocht aanwezig. In deze bocht ontstaat loslating waarbij de stroming naar de buitenzijde van de bocht wordt geleid en waarbij zich aan de binnenzijde een zone met terugstroming voordoet.
- De uitstroomopeningen worden gescheiden door geleidingsschoepen. De hoek van deze schoepen is naar de deuren van het betreffende hoofd toe gericht. Uit Figuur 47 volgt dat de hoek van de uittredende stroming verschilt per uitstroomopening en varieert tussen evenwijdig met de schoepen (voor uitstroomopening nr. 1, nr. 2 en nr. 3) tot loodrecht op de kolk as (voor uitstroomopening nr. 4, nr. 5 en nr. 6).
- De uitredende stroming in het verticale vlak evenwijdig met de schoepen is analoog als bij conditie 1. De uittredende stroming wordt naar de bodem van de lokaal verdiepte kolkbodem toe gericht door het schuine plafond volgend op de overstortmuur, zie Figuur 49. In deze figuur wordt ook duidelijk een neer in de kolk waargenomen waarbij de stroming langs de bodem van de sluiskolk ter plaatse van het symmetrievlak afgebogen wordt naar het wateroppervlak en vervolgens afgebogen wordt in de richting van de sluiskolkwand.

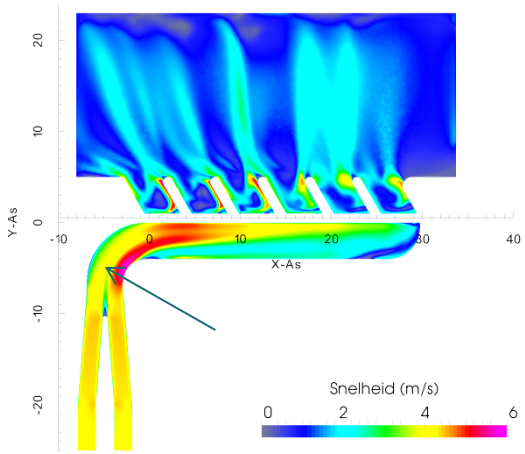
- Uit Figuur 42 met de voorstelling van de stroomsnelheid in een horizontaal vlak op 0.75 m, 1.50 m en 2.25 m boven de lokaal verdiepte kolkbodem volgt dat de snelheid in de kolk afneemt met de hoogte. Op 0.75 m boven de bodem bedraagt de maximale snelheid in de kolk ca. 3.0 m/s op 2.25 m boven de bodem is dit afgenomen tot snelheden lager dan 1.5 m/s.
- De waterspiegel vertoont een duidelijke lokale inzinking boven de uitstroomopening en een lokale opstuwing ter hoogte van het symmetrievlak, zie Figuur 51. Bij de korte omloopriool bedraagt de maximale inzinking ca. 0.05 m en wordt een ongeveer even grote maximale opstuwing waargenomen. Bij de lange omloopriool bedraagt de maximale inzinking ca. 0.10 m en is de maximale opstuwing ook gelijk aan ca. 0.10 m. De locatie van de opstuwing is zoals logisch verwacht kan worden beperkt tot de zone recht tegenover de uitstroomconstructie. De locatie van de inzinking aan de kolkwand is merkbaar tot 30 m afwaarts van de uitstroomconstructie. Een verklaring hiervoor werd niet gevonden.
- In de uitstroomopeningen wordt eenzelfde uitgesproken driedimensionaal stromingspatroon waargenomen als bij conditie 1.

7.5 Tijdsafhankelijke simulatie

In de vorige paragrafen werd het stromingspatroon besproken uit de CFD-simulaties voor de korte en de lange omloopriool. Deze simulaties betroffen steady-state simulaties, waarbij het waterpeil in de sluiskolk en het debiet door de openingen constant blijven. Deze simulaties werden uitgevoerd gebruik makend van Local Time Stepping voor het versnellen van de convergentie. Hierbij wordt in een bepaalde iteratiestap per roostercel een verschillende tijdstap toegepast afhankelijk van de waarde van het Courant-getal in de betreffende roostercel. Bij toepassing van deze methode is het niet mogelijk om fluctuaties in het stromingspatroon te visualiseren, aangezien geconvergeerd wordt naar een stabiele steady-state oplossing.

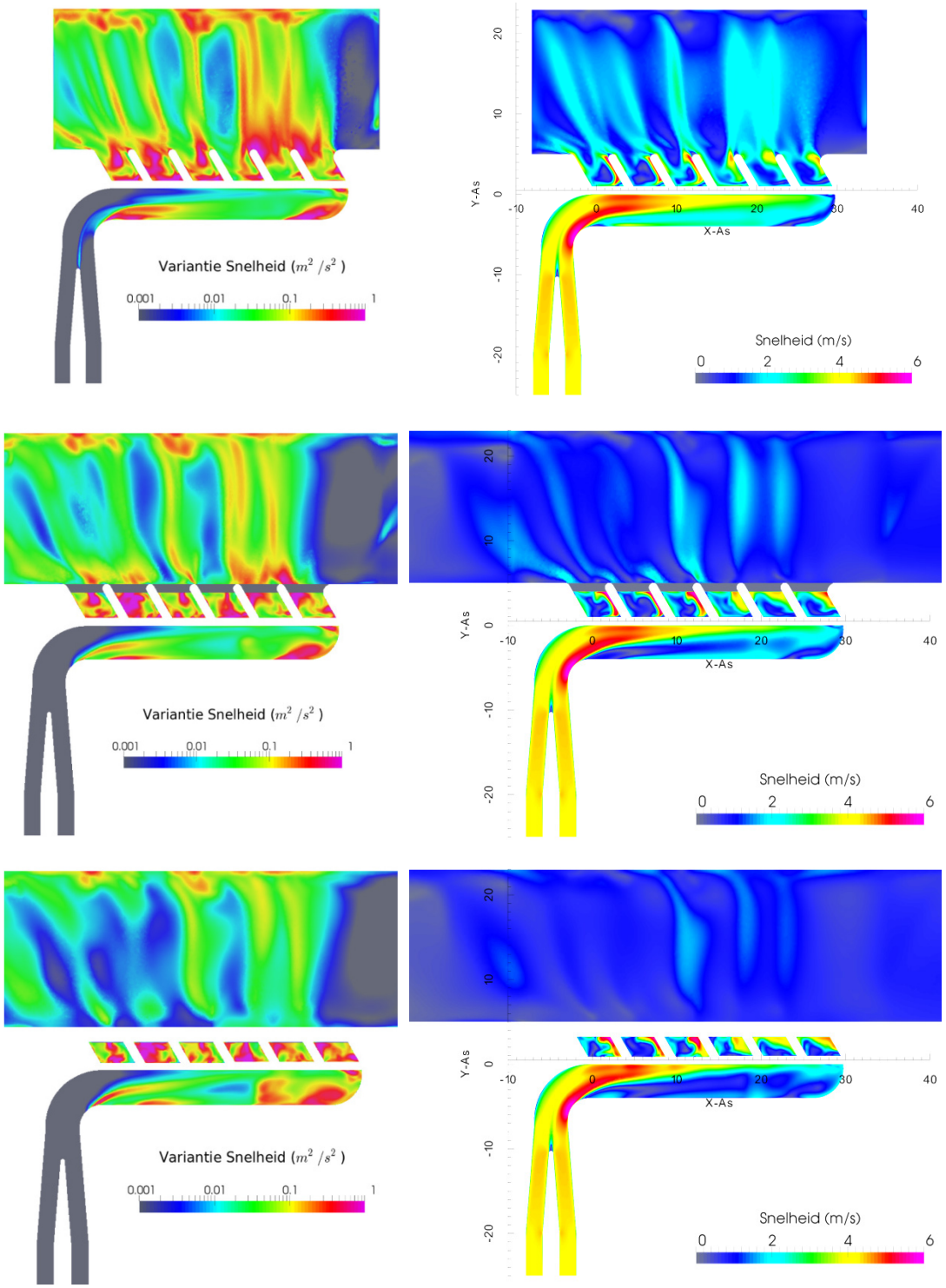
Figuur 52 toont de snelheid in de omloopriool in een horizontaal vlak op 0.75 m boven de bodem van de omloopriool. Aan de binnenzijde van de bocht van de lange omloopriool doet zich loslating van de stroming voor. Deze loslating kan mogelijks gepaard gaan met stromingsfluctuaties, dewelke niet kunnen gesimuleerd worden met de toegepaste solver met Local Time Stepping. Om de invloed na te gaan van de fluctuatie van de stroming ter plaatse van dit loslaatpunt op de stroming in de uitstroomconstructie en op de stroming in de sluiskolk wordt een tijdsafhankelijke simulatie uitgevoerd van de stroming door de lange omloopriool bij conditie 2 en de uitstroomconstructie op basis van de initiële geometrie. Bij een tijdsafhankelijke simulaties worden alle roostercellen gesimuleerd met dezelfde tijdstap.

Figuur 52 – Loslaatpunt binnenzijde bocht voor uitstroomconstructie lange omloopriool



De tijdsafhankelijke simulatie wordt uitgevoerd voor een tijdspanne van 60 s. De grafische voorstellingen van de stroomsnelheid in deze paragraaf betreffen telkens het gemiddelde van de stroomsnelheid tussen t = 30 s en t = 60 s, om invloeden van het initialiseren van het stromingspatroon uit te sluiten. Het tijdsafhankelijke karakter van de stroming wordt gevisualiseerd door over dezelfde tijdspanne de variantie van de stroomsnelheid te visualiseren. Figuur 53 geeft een voorstelling van de variantie van de stroomsnelheid in een horizontaal vlak 0.75 m boven de bodem van de omloopriool. Ter vergelijking wordt in deze figuur ook een voorstelling gegeven van de gemiddelde stroomsnelheid tussen t = 30 s en t = 60 s.

Figuur 53 – Tijdsafhankelijke simulatie conditie 2 lange omloopriool



links: variantie / rechts: gemiddelde snelheid
boven: op 0.75 m boven bodem - midden: op 1.50 m boven de bodem - onder: op 2.25 m boven de bodem

De variantie van de stroomsnelheid in de omloopriool tussen de hefschuif en de 90° bocht is verwaarloosbaar klein. Aan de binnenzijde van de bocht en vervolgens ter hoogte van het aanhechtingspunt van de loslatende wervel worden hogere waarden berekend voor de variantie van de stroomsnelheid. Daarnaast worden hogere waarden voor de variantie van de stroomsnelheid berekend aan het einde van de omloopriool en in de uitstroomopeningen zelf. Ter plaatse van de verdieping in de sluiskolkbodem worden ook hogere waarden voor de variantie van de stroomsnelheid berekend dan in de rest van de sluiskolk. Deze variantie neemt af bij een toenemende hoogte boven het bodempeil van de verdiepte zone.

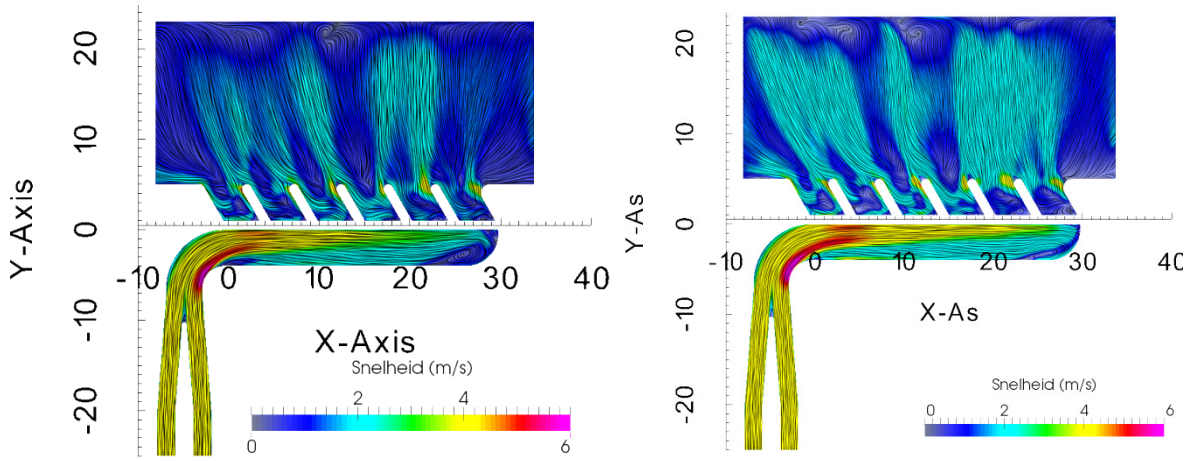
In bijlage C worden grafische voorstellingen met een tijdstap van 0.3 s gegeven van de stroomsnelheid in een horizontaal vlak op 0.75 m, 1.25 m en 2.25 m boven de bodem. Deze figuren tonen een fluctuerende neer aan de binnenzijde van de bocht voor de uitstroomconstructie. Ter plaatse van deze fluctuerende neer worden de hogere waarden voor de variantie van de stroomsnelheid uit Figuur 53 berekend. Ten gevolge van de fluctuaties in het stromingspatroon worden afwaarts van het loslaatpunt wervels opgewekt, dewelke naar het uiteinde van de omloopriool toe bewegen. Dit verklaart de hogere waarden voor de variantie van de stroomsnelheid aan het einde van de omloopriool. Uit Figuur 53 volgt dat zich in de uitstroomopeningen een fluctuerend stromingspatroon voordoet, dit volgt ook uit Bijlage C. Dit heeft tot gevolg dat de stroming aan de buitenzijde van één schoep en de stroming aan de binnenzijde van de ernaast gelegen tussenschoep nu eens samenvoegt en dan weer splitst. Dit verklaart de hogere waarden voor de variantie van de stroomsnelheid in de verdieping van de kolkbodem ter plaatse van de tussenschoepen.

Tabel 28 vergelijkt voor elke uitstroomopening het debiet door deze opening uit de steady-state simulatie met het debiet door deze opening gemiddeld over 30 s uit de tijdsafhankelijke simulatie. Figuur 54, respectievelijk Figuur 55 vergelijkt het stromingspatroon uit de tijdsafhankelijke simulatie met dit uit de steady-state simulatie voor een horizontaal vlak op 0.75 m boven de bodem van de omloopriool respectievelijk een verticaal vlak ter plaatse van het dagvlak van de uitstroomopeningen.

Tabel 28 – Debietverdeling uitstroomopeningen lange omloopriool voor conditie 2
vergelijking steady state en tijdsafhankelijke simulatie (uitgedrukt in % van het debiet bij uniforme verdeling)

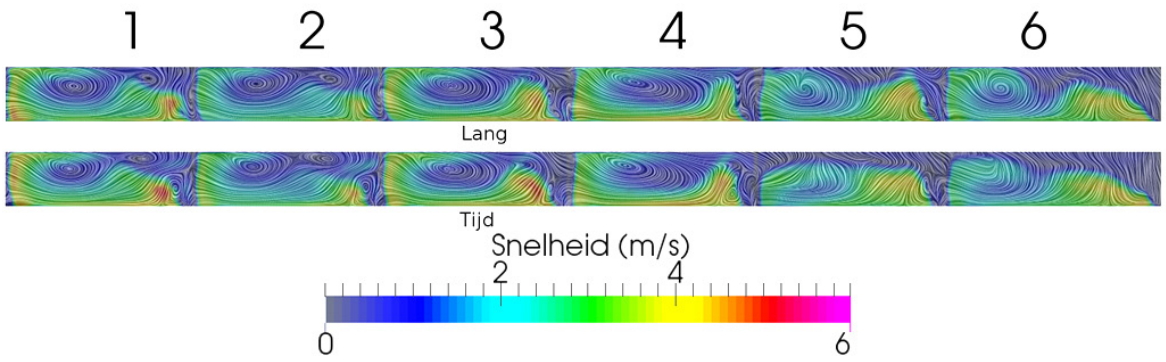
opening nr.	steady state simulatie	tijdsafhankelijke simulatie
1	94	99
2	78	78
3	103	99
4	103	103
5	112	112
6	111	109

Figuur 54 – Lange omloopriool conditie 2 – stroming op 0.75 m boven de kolkbodem



links: steady state simulatie / rechts: tijdsafhankelijke simulatie

Figuur 55 – Lange omloopriool conditie 2 – stroming uit dagvlak uitstroomopeningen



boven: steady state simulatie - onder: tijdsafhankelijke simulatie

De debietverdeling doorheen de uitstroomopeningen is gelijkaardig bij de steady state simulatie en de tijdsafhankelijke simulatie. Ook het over 30 s gemiddeld stromingspatroon uit de tijdsafhankelijke simulatie komt goed overeen met dit van de steady state simulatie. De kleinere neer aan de binnenzijde van de 90° bocht en de bredere jets in de kolk worden vermoedelijk verklaard door het feit dat het een tijdsgemiddelde waarde betreft.

7.6 Besluit

Om het complexe stromingspatroon in de uitstroomconstructie te simuleren werden steady-state CFD-simulaties uitgevoerd gebruik makend van de software OpenFOAM. Voor deze simulaties werd het gedeelte van de omloopriool tussen de hefschuiven en de uitstroomconstructie, de uitstroomconstructie zelf en een deel van de sluiskolk beschouwd. Hierbij werden twee condities gesimuleerd, i.e. een eerste conditie met een laag debiet, beperkte hefhoogte van de hefschuiven en lage waterstand in de sluiskolk en een tweede conditie bij maximaal debiet en volledig geopende hefschuiven. De simulaties werden beperkt tot het vullen van de kolk omdat hierbij de grootste verstoring in de kolk optreedt en de debietverdeling over de uitstroomopeningen vermoedelijk minder uniform is.

Uit de CFD simulaties volgt bij volledig geopende hefschuiven een vrij goede debietverdeling over de openingen van de uitstroomconstructie, zowel voor de lange als voor de korte omloopriool. Bij gedeeltelijk geopende hefschuiven zorgt de gedeeltelijke opening van de hefschuif voor een niet uniforme aanstroming naar de uitstroomconstructie met een minder goede debietverdeling over de openingen van de uitstroomconstructie tot gevolg. De hydraulische voorkeursoplossing zou zijn om voor alle hefschuifhoogtes een uniforme debietsverdeling over de uitstroomopeningen te creëren. Het is echter constructief niet mogelijk om de hefschuiven hiervoor op een voldoende afstand van de uitstroomconstructie te plaatsen. Bemerk ook dat een dergelijk aanstromingspatroon zich ook voordoet in de korte omloopriolen van de overige Antwerpse zeesluizen. Hierom wordt een variant met geforceerde energiedissipatie afwaarts van de hefschuiven niet verder onderzocht, maar wordt enkel een variant met een gewijzigde hoogte van de overstortmuur gesimuleerd voor de lange omloopriool. De resultaten van de CFD-simulatie voor deze variant tonen een beperkte verbetering van de debietverdeling over de uitstroomopeningen bij conditie 2 maar een minder goede debietverdeling bij conditie 1 (met zelfs negatieve debieten voor uitstroomopening nr. 1 en nr. 2). Om deze reden wordt deze variant niet weerhouden voor het ontwerp.

Op basis van de CFD-modellering werd ook de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie bepaald en vergeleken met deze bepaald op basis van terreinmetingen in de Berendrechtsluis. Bij de conditie met gedeeltelijk geopende hefschuiven volgen uit de CFD-modellering lagere waarden voor de verliescoëfficiënt dan deze die bepaald werden op basis van terreinmetingen in de Berendrechtsluis. Bij de volledig geopende hefschuif werd voor de korte omloopriool een goede overeenkomst vastgesteld tussen de verliescoëfficiënt uit de CFD-simulaties en deze bepaald uit terreinmetingen in de Berendrechtsluis. Voor de lange omloopriool wordt voor deze conditie ongeveer dezelfde verliescoëfficiënt berekend als voor de korte omloopriool, wat beduidend lager is dan de waarden afgeleid uit de terreinmeting.

Uit de CFD-simulaties volgt een uitgesproken driedimensionaal stromingspatroon in de uitstroomconstructie. Het gehelde plafond van de uitstroomopeningen zorgt voor een naar de kolkbodem toe gericht uitstroming. De hoogste snelheden doen zich hierdoor voor boven de lokaal verdiepte kolkbodem. In de sluiskolk ontstaat een neer (in verticale zin), waarbij de stroming uit de uitstroomopeningen tegen de bodem blijft in de lokaal verdiepte kolkbodem, om daarna ter plaatse van de as van de sluiskolk naar het oppervlak geleid te worden en vervolgens gericht te worden naar de sluiskolkmuur. Alhoewel de tussenschoepen in de uitstroomconstructie naar de sluisdeur van het betreffende hoofd gericht zijn, wordt voor de meest afwaartse uitstroomopeningen een stroming loodrecht op de sluiskolkmuur berekend. Enkel bij de meest opwaartse openingen is de stroming enigszins in de richting van de sluisdeur gericht. Uit de CFD-simulaties volgt een inzinking van het wateroppervlak in de sluiskolk tegen de kolkmuur en een opstuwing van het wateroppervlak ter plaatse van de as van de sluiskolk. Bij conditie 2 strekt deze inzakking van het wateroppervlak zich tot 30 m afwaarts van de uitstroomconstructie uit. Hiervoor werd geen verklaring gevonden.

Aan de binnenzijde van de 90° bocht voor de uitstroomconstructie in de lange omloopriool doet zich (in de steady-state simulaties) loslating van de stroming voor. Om de stromingsfluctuaties van deze loslating te bestuderen is ook een tijdsafhankelijke simulatie uitgevoerd voor de stroming door de lange omloopriool bij conditie 2. De variatie in de tijd van het stromingspatroon afwaarts van de bocht in de lange omloopriool toont het ontwikkelen van wervels na het loslaatpunt dewelke zich naar het einde van de uitstroomconstructie toe voortbewegen. De vergelijking van de debietsverdeling over de uitstroomopeningen tussen (het tijdsgemiddelde van) de tijdsafhankelijke simulaties en de steady-state simulatie leert dat voor beide simulaties nagenoeg eenzelfde debietsverdeling berekend wordt.

Op basis van de resultaten van de uitgevoerde CFD-simulaties wordt besloten om geen wijzigingen aan te brengen aan de initiële geometrie van de uitstroomconstructie.

Het complexe uitermate driedimensionaal stromingspatroon afwaarts van de overstortmuur in de uitstroomopeningen laat besluiten dat mogelijks nog enige hydraulische optimalisatie van de uitstroomconstructie kan uitgevoerd worden. Tijdens de simulaties werd voor de kolk as een symmetrie vlak gedefinieerd. Merk op dat de stroming in de kolk bij de lange en korte omloopriool niet volledig identiek is. Het ware interessant om een bijkomende simulaties met beide omloopriolen uit te voeren. Het stromingspatroon in de kolk toont een helicoïdaal stromingspatroon waarbij de bodemnabije stroming uit de uitstroomconstructie via het symmetrievlak naar het oppervlak geleid wordt en vervolgens via het wateroppervlak terug naar de kolkmuur. Bij de aanwezigheid van een schip in de kolk ter hoogte van de uitstroomconstructie is deze terugstroom via het wateroppervlak niet meer mogelijk. Om deze reden zou het aangewezen zijn om CFD-simulaties uit te voeren waarbij een schip in de kolk aanwezig is.

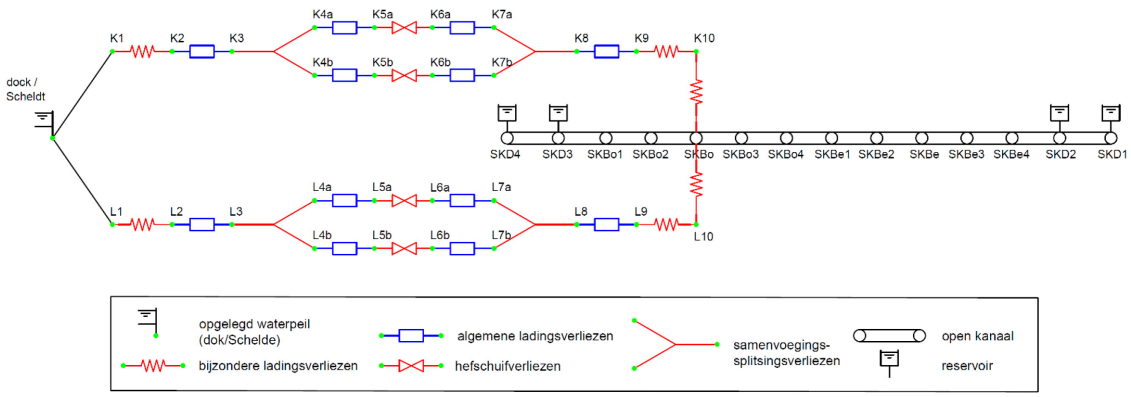
8 LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie

Het in hoofdstuk 5 toegepaste hydraulisch netwerkmodel voor de simulaties is opgesteld op basis van de initiële geometrie van de omloopriolen. Na het uitvoeren van de simulaties werd de geometrie van de omloopriolen verder uitgewerkt, zie hoofdstuk 6 en werd de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie bij vullen bepaald uit de CFD-modellering, zie hoofdstuk 7. Op basis van deze resultaten wordt in paragraaf 8.1 het hydraulisch netwerkmodel bijgewerkt. Met dit aangepaste hydraulisch netwerkmodel worden nieuwe simulaties uitgevoerd, zie paragraaf 8.2. Het besluit wordt gegeven in paragraaf 8.3.

8.1 Hydraulisch netwerkmodel

Het hydraulisch netwerkmodel van de kolk wordt vooreerst uitgebreid met de lokale verdieping ter plaatse van de uitstroomconstructie. Daarna is de lengte van de leidingen aangepast op basis van de meest recente plannen (zie paragraaf 4.4). Op basis van deze plannen worden de bijzondere ladingsverliezen opnieuw bepaald. Het op deze wijze aangepaste netwerkmodel wordt gegeven in Figuur 56. De bijzondere ladingsverliezen en de lengte van de leidingen wordt gegeven in Tabel 29 respectievelijk Tabel 30 voor de korte omloopriool respectievelijk de lange omloopriool. Ter vergelijking wordt in deze twee tabellen ook de waarde vermeld die gehanteerd werd in het initiële hydraulische netwerkmodel. Doordat de inlaten in het bovenhoofd hoger geplaatst zijn dan deze in het benedenhoofd geeft dit beperkte verschillen voor de lengte van de leidingen en de hoeken van de overgangen in het verticale vlak. Om die reden wordt voor de gewijzigde geometrie een afzonderlijk netwerkmodel opgesteld voor het bovenhoofd en voor het benedenhoofd.

Figuur 56 – Hydraulisch netwerkmodel vernieuwde Royerssluis voor nivelleren via bovenhoofd



Tabel 29 – Hydraulisch netwerkmodel korte omloopriolen vernieuwde Royerssluis

knoop		type component	beschrijving	LOCKSIM model initiële geometrie	LOCKSIM model gewijzigde geometrie	
op-waarts	af-waarts				BOHO	BEHO
1	2	bijzondere	inlaat verliezen en bochten voor splitsing	ξ+ = 1.0 / ξ- = 1.8	ξ+ = 1.28 / ξ- = 2.08	ξ+ = 0.82 / ξ- = 1.62
2	3	algemene	lengte leiding van inlaat tot splitsing	L = 15.6 m	L = 14.2 m	L = 13.9 m
3	4	splitsing	verliezen splitsen (of samenvoegen)	default ≈ 0	default ≈ 0	default ≈ 0
4	5	algemene	lengte leiding tussen splitsing en hefschuif	L = 15.8 m	L = 18.1 m	L = 17.3 m
5	6	hefschuif	hefschuifverliezen in functie van opening	ξ(t)	ξ(t)	ξ(t)
6	7	algemene	lengte leiding tussen hefschuif en samenvoeging	L = 15.8 m	L = 15.9 m	L = 15.9 m
7	8	samen-voeging	verliezen samenvoegen (of splitsen)	default ≈ 0	default ≈ 0	default ≈ 0
8	9	algemene	lengte leiding na samenvoeging t.e.m. halve lengte uitstroomconstructie	L = 18.4 m	L = 30.4 m	L = 30.4 m
9	10	bijzondere	verliezen bochten tot uitstroomconstructie	ξ = 0.0	ξ = 0.0	ξ = 0.0
10	SKBO/ SKBE	bijzondere	verliezen uitstroomconstructie	ξ+ = 1.70 ξ- = 3.1	ξ+ = 1.79 ξ- = 3.1	ξ+ = 1.79 ξ- = 3.1

Tabel 30 – Hydraulisch netwerkmodel lange omloopriolen vernieuwde Royerssluis

knoop		type component	beschrijving	LOCKSIM model v1	LOCKSIM model v2	
op-waarts	af-waarts				BOHO	BEHO
1	2	bijzondere	inlaat verliezen en bochten voor splitsing	ξ+ = 1.0 / ξ- = 1.8	ξ+ = 1.33 / ξ- = 2.13	ξ+ = 1.01 / ξ- = 1.81
2	3	algemene	lengte leiding van inlaat tot splitsing	L = 65.1m	L = 109.7 m	L = 108.8 m
3	4	splitsing	verliezen splitsen (of samenvoegen)	default ≈ 0	default ≈ 0	default ≈ 0
4	5	algemene	lengte leiding tussen splitsing en hefschuif	L = 15.8 m	L = 17.3 m	L = 17.3 m
5	6	hefschuif	hefschuifverliezen in functie van opening	ξ(t)	ξ(t)	ξ(t)
6	7	algemene	lengte leiding tussen hefschuif en samenvoeging	L = 15.8 m	L = 16.0 m	L = 16.0 m
7	8	samen-voeging	verliezen samenvoegen (of splitsen)	default ≈ 0	default ≈ 0	default ≈ 0
8	9	algemene	lengte leiding na samenvoeging t.e.m. halve lengte uitstroomconstructie	L = 71.6 m	L = 25.5 m	L = 25.5 m
9	10	bijzondere	verliezen bochten tot uitstroomconstructie	ξ = 0.4	ξ = 0.28	ξ = 0.28
10	SKBO/ SKBE	bijzondere	verliezen uitstroomconstructie	ξ+ = 2.6 ξ- = 2.2	ξ+ = 1.84 ξ- = 2.2	ξ+ = 1.84 ξ- = 2.2

Merk in Tabel 29 en Tabel 30 op:

- Ten opzichte van het initiële hydraulisch netwerkmodel uit hoofdstuk 5 is de locatie van de hefschuiven in de lange omloopriool verschoven naar net opwaarts van de uitstroomconstructie. Dit zorgt voor een aanpassing van de lengte van de leidingen voor en na de hefschuiven.
- De inlaten in het bovenhoofd zijn hoger geplaatst dan in het benedenhoofd (zie paragraaf 6.2). De overgang van het bodempeil van de omloopriool ter hoogte van de inlaat naar het bodempeil van de rest van de omloopriool gebeurt voor het bovenhoofd onder een grotere hoek. Deze grotere hoek resulteert in iets grotere hydraulische verliezen voor het bovenhoofd in vergelijking met het benedenhoofd.
- Bij de korte omloopriool wordt voor de doorstroomsectie van het gedeelte tussen de inlaat en de splitsing in twee deelsecties een sectie 22 m^2 (B x H= 5.5 m x 4.0 m) toegepast, zie paragraaf 6.2.1. Voor de overige secties wordt in de omloopriolen een doorstroomsectie van 16 m^2 toegepast en ter hoogte van de hefschuiven een doorstroomsectie van 8 m^2. De overgang van een sectie 22 m^2 ter hoogte van de inlaat naar een sectie 2 keer 8 m^2 ter hoogte van de hefschuiven zal voor verliezen zorgen. De default samenvoegingsverliezen van LOCKSIM verdisconteren ook de bijkomende verliezen ten gevolge van een sectiewijziging.

- De verliezen van de uitstroomconstructie bij de positieve stroomrichting worden overgenomen uit de CFD studie, zie paragraaf 7.3. Bij de lange omloopriool zorgt dit voor een afname van de verliezen ten opzichte van het initiële netwerkmodel. Voor de negatieve stroomrichting worden de verliezen uit het initiële netwerkmodel behouden (vermits er geen lediging gesimuleerd werd met de CFD-modellering).

Merk op dat een knoop in het hydraulisch netwerkmodel één bepaald peil heeft. Hierdoor dient voor de lokale bodemverdieping in de kolk een knoop net voor en net na de overgang gedefinieerd te worden. In de omgeving van de uitstroomconstructie van het bovenhoofd worden bijgevolg volgende knopen gedefinieerd.

- SKBo1 Net opwaarts van de lokale bodemverdieping (bodempeil TAW – 6.41 m)
- SKBo2 Opwaarts uiteinde lokale bodemverdieping (bodempeil TAW – 7.66 m)
- SKBo Center lokale bodemverdieping (bodempeil TAW – 7.66 m)
- SKBo3 Afwaarts uiteinde lokale bodemverdieping (bodempeil TAW – 7.66 m)
- SKBo4 Net afwaarts van de lokale bodemverdieping (bodempeil TAW – 6.41 m)

Analoog worden in de omgeving van de uitstroomconstructie van het benedenhoofd 5 knopen gedefinieerd. De lengte van de stukken open kanaal tussen twee knopen wordt gegeven in Tabel 13.

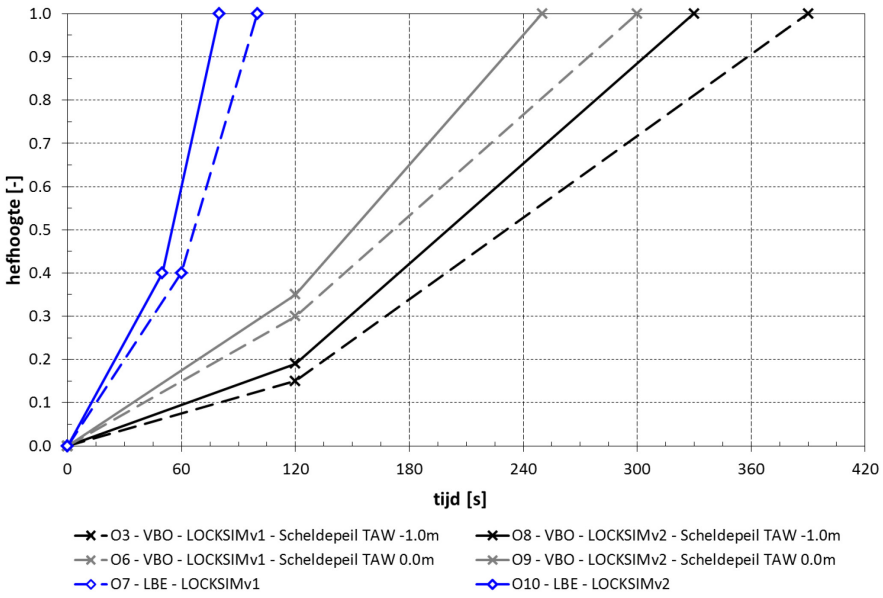
Tabel 31 – Hydraulisch netwerkmodel omloopriolen vernieuwde Royerssluis – Lengte secties in de sluiskolk.

knoop		lengte open kanaal [m]
opwaarts	afwaarts	
SKD4	SKD3	25.0
SKD3	SKBo1	5.3
SKBo1	SKBo2	3.1
SKBo2	SKBo	19.1
SKBo	SKBo3	19.1
SKBo3	SKBo4	3.1
SKBo4	SKBe1	101.0
SKBe1	SKBe2	3.1
SKBe2	SKBe	19.1
SKBe	SKBe3	19.1
SKBe3	SKBe4	3.1
SKBe4	SKD2	5.3
SKD2	SKD1	25.0

8.2 Simulaties

De openingswet opgesteld door middel van de LOCKSIM simulaties van de initiële geometrie (zie hoofdstuk 5) wordt verder geoptimaliseerd om een minimale nivelleertijd te bekomen met het respecteren van het criterium voor de langse waterspiegelhelling op het maatgevend schip in de sluiskolk. De toegepaste openingswetten hebben een eerste trage openingsfase en vervolgens een snelle openingsfase. Voor ledigen via het benedenhoofd wordt één openingswet toegepast (geoptimaliseerd op een Scheldepeil TAW – 1.00 m). Voor vullen via het bovenhoofd wordt, analoog als in paragraaf 5.2, een openingswet toegepast voor een Scheldepeil lager dan TAW + 0.00 m (geoptimaliseerd voor een Scheldepeil TAW – 1.00 m) en een openingswet voor Scheldepeilen hoger dan TAW + 0.00 m (openingswet geoptimaliseerd voor een Scheldepeil TAW + 0.00 m). Figuur 57 vergelijkt de openingswetten toegepast in dit hoofdstuk met deze toegepast in hoofdstuk 5.

Figuur 57 – Openingswetten LOCKSIM simulaties initiële geometrie (v1; streepjeslijn) en LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie (v2; volle lijn)



De bijkomende LOCKSIM simulatie van de gewijzigde geometrie worden samengevat in Tabel 32.

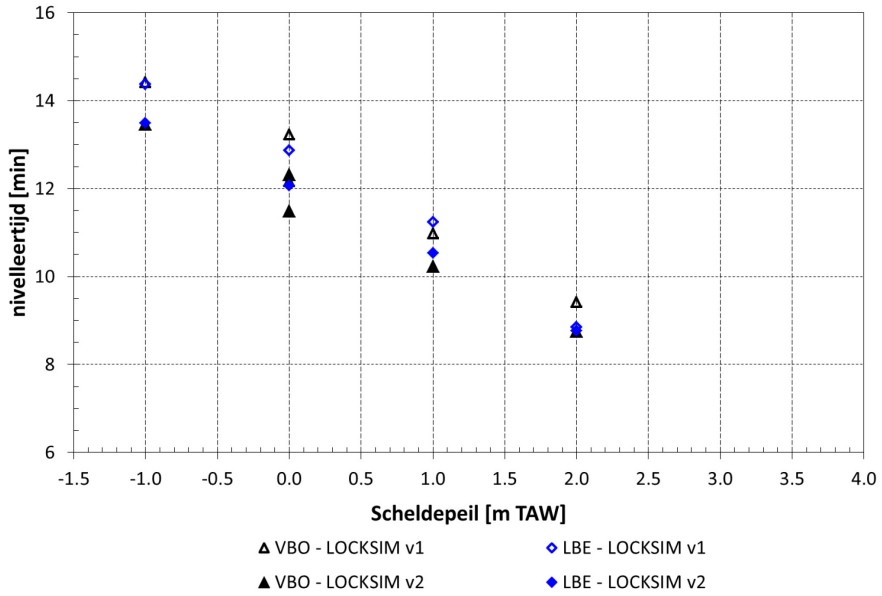
Tabel 32 – Hydraulisch netwerk simulaties gewijzigde geometrie

simulatie nr.	initiele simulatie	hoofd[15]	type	Peil		verval	configuratie	afstand boeg tot deur	openingswet
				Schelde [m TAW]	Dok [m TAW]	[m]		[m]	nr.
N22	N4	BO	vullen	- 1.00	+ 4.40	5.40	S1	5.0	8
N23	N12	BO	vullen	0.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	9
N24	N13	BO	vullen	1.00	+ 4.40	3.40	S1	5.0	9
N25	N14	BO	vullen	2.00	+ 4.40	2.40	S1	5.0	9
N26	N15	BE	ledigen	-1.00	+ 4.40	5.40	S1	5.0	10
N27	N16	BE	ledigen	0.00	+ 4.40	4.40	S1	5.0	10
N28	N17	BE	ledigen	1.00	+ 4.40	3.40	S1	5.0	10
N29	N18	BE	ledigen	2.00	+ 4.40	2.40	S1	5.0	10

De variatie van de berekende nivelleertijd in functie van het Scheldepeil wordt gegeven in Figuur 58. De nivelleertijd, maximale stijgsnelheid of daalsnelheid en de extrema van de end-to-end langse waterspiegelhelling en langse waterspiegelhelling over het schip worden voor vullen respectievelijk ledigen gegeven in Tabel 33 respectievelijk Tabel 34.

[15] BO = bovenhoofd ; BE = benedenhoofd

Figuur 58 – Nivelleertijd in functie van Scheldepeil LOCKSIM simulaties v2
dokpeil = extreem hoog dokpeil TAW + 4.40 m



Tabel 33 – Resultaten simulaties vullen bovenhoofd
LOCKSIM simulaties initiële geometrie (v1) en LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie (v2)

Schelde-peil	dokpeil	verval	nivelleertijd		stijgsnelheid		extr. langse waterspiegelhelling			
							end-to-end		schip	
			v1	v2	v1	v2	v1	v2	v1	v2
[m TAW]	[m TAW]	[m]	[min]	[min]	[mm/s]	[mm/s]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
-1	4.4	5.4	14.4	13.5	11.4	12.1	0.47	0.50	0.58	0.59
0	4.4	4.4	12.1	11.5	10.5	11.1	0.50	0.45	0.60	0.52
1	4.4	3.4	10.8	10.2	9.0	9.6	0.32	0.31	0.38	0.37
2	4.4	2.4	9.2	8.8	7.2	7.7	0.20	0.19	0.23	0.22

Tabel 34 – Resultaten simulaties ledigen benedenhoofd
LOCKSIM simulaties initiële geometrie (v1) en LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie (v2)

Schelde-peil	dokpeil	verval	nivelleertijd		daalsnelheid		extr. langse waterspiegelhelling			
							end-to-end		schip	
			v1	v2	v1	v2	v1	v2	v1	v2
[m TAW]	[m TAW]	[m]	[min]	[min]	[mm/s]	[mm/s]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
-1	4.4	5.4	14.4	13.5	11.3	11.9	0.48	0.51	0.54	0.58
0	4.4	4.4	12.9	12.1	10.1	10.7	0.43	0.46	0.49	0.52
1	4.4	3.4	11.2	10.5	9.0	9.3	0.37	0.40	0.42	0.45
2	4.4	2.4	8.8	8.8	7.7	7.7	0.30	0.33	0.35	0.37

Merk in Figuur 57, Figuur 58, Tabel 33 en Tabel 34 op:

- Uit de LOCKSIM simulaties van de gewijzigde geometrie volgt een snellere openingswet van de hefschuiven dan uit de LOCKSIM simulaties van de initiële geometrie. Een mogelijke verklaring hiervoor is de lokale verdieping van de kolkbodem.
- Omwille van de snellere openingswet en de kleinere verliezen voor de lange omloopriool bij de LOCKSIM simulaties met de gewijzigde geometrie neemt de vultijd bij het maatgevend verval van 5.4 m met bijna 1.0 min af tot 13.5 min. Dit is hoger dan het initiële criterium van 12 min maar lager dan het versoepelde criterium van 15.0 min (zie paragraaf 3.1). De nivelleertijd bij ledigen neemt ook af met bijna 1.0 min tot 13.5 min bij het maatgevend verval van 5.4 m.
- Bij vullen via het bovenhoofd wordt bij Scheldepeilen hoger dan TAW + 0.00 m een snellere openingswet toegepast, waardoor de kolk gevuld wordt in 11.5 min (bij een Scheldepeil TAW + 0.00 m). Bij ledigen wordt bij dit Scheldepeil een nivelleertijd van 12.1 min bekomen met een zelfde openingswet als bij het maatgevend verval.
- De maximale stijg- en daalsnelheid bedraagt 12.0 mm/s. Dit is lager dan het criterium van 17 mm/s voor vullen met vaste bolders (zie paragraaf 3.2).
- De openingswet wordt zo gedimensioneerd dat bij een gegeven verval voldaan wordt aan het criterium van 0.60 ‰ voor de langse waterspiegelhelling/langskracht op het schip. Bij kleinere vervallen en eenzelfde openingswet neemt de langse waterspiegelhelling/langskracht op het schip af.

Om de invloed van de verdieping op de optredende langse waterspiegelhelling na te gaan wordt simulatie N22 herhaald zonder verdieping. Beide simulaties worden vervolgens uitgevoerd zonder schip in de kolk. De resultaten worden weergeven in Tabel 35.

Tabel 35 – Resultaten vulling via bovenhoofd
Scheldepeil TAW – 1.00m, Dokpeil TAW + 4.40 m

simulatie nr.	kolkbodem t.h.v. uitstroomconstructie	schip	langse waterspiegelhelling			
			end-to-end		schip	
			max.	min.	max.	min.
			[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
N22	verdieping	maatgevende scheepscombinatie	0.50	-0.47	0.59	-0.56
N43	geen verdieping		0.56	-0.57	0.66	-0.68
N42	verdieping	zonder schip in de kolk	0.19	-0.11	n.v.t.	n.v.t.
N44	geen verdieping		0.21	-0.15	n.v.t.	n.v.t.

Uit Tabel 35 volgt dat het weglaten van de verdieping resulteert in een toename van de langse waterspiegelhelling over het schip met een waarde tot 0.12 ‰.

8.3 Besluit

Het hydraulisch netwerkmodel uit hoofdstuk 5 werd bijgewerkt aan de hand van de meest recente geometrie (versie 2/12/2014) en de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie bij vullen werd gewijzigd op basis van CFD simulaties (hoofdstuk 7).

Met dit aangepaste netwerkmodel zijn de simulaties voor vullen via het bovenhoofd en ledigen via het benedenhoofd met de maatgevende scheepscombinatie in de kolk en een openingswet bestaande uit twee hefsnelheden uit hoofdstuk 5 herhaald. Hierbij wordt opgemerkt dat de lokale bodemverdieping in de kolk zorgt voor een afname van de langse waterspiegelhelling in de kolk. Hierdoor is het mogelijk om een snellere openingswet in te stellen. Hierbij wordt de kolk bij het maatgevend verval van 5.4 m en de maatgevende scheepscombinatie in de kolk gevuld in 13.5 min, wat een reductie is met 1.0 min ten opzichte van de simulaties uit hoofdstuk 5. Bij het toepassen van een aangepaste openingswet bij Scheldepeilen hoger dan TAW + 0.00 m wordt de kolk gevuld in 11.5 min. Het ledigen van de kolk bij het maatgevend verval van 5.4 m duurt 13.5 min. Het ledigen naar een Scheldepeil TAW + 0.00 m (verval: 4.4 m) gebeurt in 12.1 min. Bij Scheldepeilen hoger dan TAW + 0.00 m (vervallen lager dan 4.4 m) wordt voldaan aan het initiële criterium van 12.0 min voor de nivelleertijd. Bij het maatgevend verval van 5.4 m (een Scheldepeil van TAW – 1.00 m) wordt voldaan aan het versoepelde criterium voor de nivelleertijd van 15.0 min.

9 Besluit

De Afdeling Maritieme Toegang (contactpersoon: ir. W. De Cock) heeft aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd om het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem uit te voeren voor de vernieuwde Royerssluis.

De vernieuwde Royerssluis heeft een lengte van 250 m (tussen de buitenste roldeuren) en een breedte van 36 m. Het bodempeil van de kolk ligt op TAW – 6.41 m. De maatgevende scheepscombinatie bestaat uit een duwkonvooi VIb en een duwkonvooi Vb naast elkaar aangemeerd in de kolk. Het maximaal verval voor het ontwerp van het hydraulisch nivelleersysteem bedraagt 5.40 m, wat overeenkomt met een Scheldepeil TAW - 1.00 m en een dokpeil TAW + 4.40 m.

Voor het nivelleersysteem wordt gekozen voor een nivelleersysteem met korte omloopriolen in de sluishoofden, analoog als voor de overige zeesluizen in de haven van Antwerpen (vanaf de Boudewijnsluis tot en met de Kieldrechtsluis).

Initieel werd voor de nivelleertijd bij het maximaal verval van 5.4 m en de maatgevende scheepscombinatie in de kolk een nivelleertijd van 12.0 min vooropgesteld. Later werd deze waarde bijgesteld naar een maximaal toelaatbare nivelleertijd van 15.0 min. Het criterium voor de maximale stijg- en daalsnelheid werd overgenomen uit Ontwerp van Schutsluizen (2000) en bedraagt 17.0 mm/s. De maximale langse waterspiegelhelling tussen boeg en hek van het maatgevend schip (i.e. een om modeltechnische redenen tot één schip samengevoegde scheepscombinatie) bedraagt 0.60 ‰. Dit komt overeen met het in Nederland gehanteerde criterium voor een duwkonvooi VIb.

Eerst werd, in overleg met het studiebureau SBE dat instaat voor het constructieve ontwerp van de nieuwe sluis, een **initiële geometrie van het nivelleersysteem** uitgewerkt. Hiervoor werd de benodigde doorstroomsectie van de omloopriolen bepaald op basis van analytische formuleringen. Hieruit volgt een totale doorstroomsectie voor de korte en de lange omloopriolen van 31.2 m², wat resulteert in omloopriolen met een breedte van 4.0 m en een hoogte van 4.0 m (een totale sectie van 32 m²). Voor het bepalen van het aantal openingen en de afmetingen van de openingen van de uitstroomconstructie van de omloopriolen in de sluiskolk werd een vergelijking uitgevoerd met de nivelleersystemen van de bestaande Antwerpse zeesluizen. Op basis van deze vergelijking werden 6 openingen met een breedte van 4.0 m en een hoogte van 1.5 m voorgesteld voor de initiële geometrie. De overige gedeeltes van de initiële geometrie werden door het studiebureau analoog uitgewerkt als het nivelleersysteem voor de Berendrechtsluis, enkel zijn de hefschuiven van de lange omloopriool juist voor de uitstroomconstructie geplaatst (i.p.v. aan het uiteinde van de deurkamers).

Een **eerste reeks hydraulische netwerk simulaties** werd uitgevoerd voor vullen en ledigen van de vernieuwde Royerssluis met een initiële geometrie voor de omloopriolen. Deze simulaties zijn uitgevoerd met LOCKSIM. Uit de simulaties volgt dat door middel van een geoptimaliseerde openingswet bestaande uit twee hefsnelheden de kolk bij het maximaal verval van 5.4 m gevuld kan worden in 14.4 min; wat lager is dan het (gewijzigde) criterium van 15.0 min. Door het toepassen van een afzonderlijke openingswet voor Scheldepeilen hoger dan TAW + 0.00 m (i.e. vervallen lager dan 4.4 m) kan de vultijd bij een verval van 4.4 m gereduceerd worden tot 12.2 min, wat juist hoger is dan het initiële criterium van 12.0 min. Voor lagere vervallen zullen bij toepassen van dezelfde openingswet kleinere nivelleertijden bekomen worden. De verliezen van het nivelleersysteem zijn voor ledigen groter dan voor vullen. Doordat de langse waterspiegelhellingen bij ledigen kleiner zijn kunnen de schuiven sneller opgetrokken worden. Bij het maximaal verval bedraagt de nivelleertijd voor ledigen 14.4 min, wat overeenkomt met de nivelleertijd bij vullen van de kolk bij het maximaal verval.

Daarna zijn volgende **wijzigingen aan de initiële geometrie** van de omloopriolen onderzocht:

1. Verlaging van de sluiskolkbodem ter plaatse van de uitstroomconstructie van de omloopriolen:

In de initiële geometrie bevindt het plafondpeil van de uitstroomopeningen zich 1.50 m boven de sluiskolkbodem (die zich op TAW – 6.41 m situeert). Bij een Scheldepeil TAW – 1.00 m en de maatgevende scheepscombinatie met diepgang 4.5 m in de sluiskolk, bevindt de kiel van het schip zich lager dan het plafond van de uitstroomopeningen, wat aanleiding kan geven tot grote dwarskrachten op het schip in de kolk. Om die reden is het plafondpeil van de uitstroomopeningen en het peil van de kiel van het schip voor de vernieuwde Royerssluis vergeleken met het nivelleersysteem voor de duwvaartsluizen op het Albertkanaal, de schaalmodelproeven voor het nivelleersysteem van de Boudewijnsluis en de nivelleringen die zich in de Boudewijnsluis voordoen. Uit deze vergelijking volgt dat het plafondpeil van de openingen zich bij voorkeur lager bevindt dan de kiel van het schip. Om die reden werd besloten om ter plaatse van de uitstroomopeningen een lokale verdieping van de kolkbodem te voorzien met 1.25 m, zodat de kiel van het schip bij het maatgevend Scheldepeil van TAW – 1.00 m zich nog 0.66 m boven het plafond van de uitstroom openingen bevindt.

2. Positionering van de inlaat van de omloopriolen:

   De inlaat van de omloopriolen wordt bij voorkeur zo hoog mogelijk geplaatst om instroom van sediment in de omloopriolen te minimaliseren, maar dit wordt gelimiteerd door het risico op luchtaanzuiging en wervelvorming. Hiervoor is een toetsing uitgevoerd aan de criteria voor luchtaanzuiging en wervelvorming uit de literatuur en is de positie van de inlaat vergeleken met de inlaat voor de omloopriolen van de Berendrechtsluis, waarvoor bij GHA geen problemen bekend zijn voor wat betreft luchtaanzuiging en wervelvorming. Op basis hiervan werd besloten om in het bovenhoofd het bodempeil van de inlaat op TAW – 1.50 m aan te leggen, terwijl het plafondpeil hierbij op TAW + 2.50 m ligt. Aan het benedenhoofd wordt het bodempeil van de inlaat op TAW – 5.50 m voorzien en het plafondpeil op TAW – 1.50 m, waarbij de marge ten opzichte van het maatgevend Scheldepeil van TAW – 1.00 m hierdoor beperkt is tot 0.50 m. Bemerk hierbij dat de bodem van de inlaat slechts 0.91 m boven de kolkbodem uitkomt. Dit wordt toelaatbaar geacht omdat bij het benedenhoofd aangenomen wordt dat het sediment voldoende in suspensie gebracht wordt door schroefstraalwerking van in- en uitvarende schepen bij een laag Scheldepeil. Ook is het gemiddelde Scheldepeil lager dan het dokpeil waardoor de inlaat van het benedenhoofd een groter gedeelte van de tijd als uitlaat zal werken dan als inlaat.

3. Controle luchtaanzuiging en cavitatie ter plaatse van de hefschuif:

   Door het versnellen van het water onder de hefschuif zal een drukval ontstaan. Ten gevolge van deze drukval zou luchtaanzuiging of cavitatie kunnen optreden. Toetsing aan de criteria voor luchtaanzuiging en cavitatie leert dat bij een bodempeil van de omloopriolen op TAW – 7.66 m, i.e. het bodempeil van de lokale verdieping in de kolkbodem, voldaan is aan deze criteria.

Om het complexe stromingspatroon in de uitstroomconstructie te simuleren werden **steady-state CFD-simulaties** uitgevoerd gebruik makend van de software OpenFOAM. De simulaties werden uitgevoerd voor het gedeelte van de omloopriool tussen de hefschuiven en de uitstroomconstructie, de uitstroomconstructie zelf en een deel van de sluiskolk. Voor deze simulaties werden twee condities beschouwd, namelijk een conditie met laag debiet, beperkte hefhoogte van de hefschuif en een beperkte waterstand in de sluiskolk en een conditie met hoog debiet en volledig geopende hefschuiven. De simulaties werden beperkt tot het vullen van de kolk omdat hierbij de grootste verstoring in de kolk optreedt en de debietverdeling over de uitstroomopeningen vermoedelijk minder uniform is.

Uit de CFD simulaties voor het hoge debiet volgt een vrij goede debietverdeling over de openingen van de uitstroomconstructie, zowel voor de lange als voor de korte omloopriool. Bij het lage debiet zorgen de gedeeltelijk geopende hefschuiven voor een niet uniforme aanstroming naar de uitstroomconstructie, met een minder goede debietverdeling over de openingen van de uitstroomconstructie tot gevolg. De hydraulische voorkeursoplossing zou zijn om voor alle hefschuifhoogtes een uniforme debietsverdeling over de uitstroomopeningen te creëren. Het is echter constructief niet mogelijk om de hefschuiven hiervoor op een voldoende afstand van de uitstroomconstructie te plaatsen. Bemerk ook dat een dergelijk aanstromingspatroon zich ook voordoet in de korte omloopriolen van de overige Antwerpse zeesluizen.

Hierom wordt een variant met geforceerde energiedissipatie afwaarts van de hefschuiven niet verder onderzocht, maar wordt enkel een variant met een gewijzigde hoogte van de overstortmuur gesimuleerd voor de lange omloopriool. De resultaten van de CFD-simulatie voor deze variant tonen een beperkte verbetering van de debietverdeling over de uitstroomopeningen bij het hoge debiet maar een minder goede debietverdeling bij het lage debiet (met zelfs negatieve debieten voor uitstroomopeningen nr. 1 en nr. 2). Om deze reden werd deze variant niet weerhouden voor het ontwerp.

Uit de CFD-simulaties volgt een uitgesproken driedimensionaal stromingspatroon in de uitstroomconstructie. Het gehelde plafond van de uitstroomopeningen zorgt voor een naar de kolkbodem toe gericht uitstroming. De hoogste snelheden doen zich hierdoor voor boven de lokaal verdiepte kolkbodem. In de sluiskolk ontstaat een neer (in verticale zin), waarbij de stroming uit de uitstroomopeningen tegen de bodem blijft in de lokaal verdiepte kolkbodem, om daarna ter plaatse van de as van de sluiskolk naar het oppervlak geleid te worden en vervolgens gericht te worden naar de sluiskolkmuur. Alhoewel de tussenschoepen in de uitstroomconstructie naar de sluisdeur van het betreffende hoofd gericht zijn, wordt voor de meest afwaartse uitstroomopeningen een stroming loodrecht op de sluiskolkmuur berekend. Enkel bij de meest opwaartse openingen is de stroming enigszins in de richting van de sluisdeur gericht. Uit de CFD-simulaties volgt een inzinking van het wateroppervlak in de sluiskolk tegen de kolkmuur en een opstuwing van het wateroppervlak ter plaatse van de as van de sluiskolk. Bij het hoge debiet strekt deze inzakking van het wateroppervlak zich tot 30 m afwaarts van de uitstroomconstructie uit. Hiervoor werd geen verklaring gevonden.

Aan de binnenzijde van de 90° bocht voor de uitstroomconstructie in de lange omloopriool doet zich (in de steady-state simulaties) loslating van de stroming voor. Om de stromingsfluctuaties van deze loslating te bestuderen is ook een tijdsafhankelijke simulatie uitgevoerd voor de stroming door de lange omloopriool bij het hoge debiet. De variatie in de tijd van het stromingspatroon afwaarts van de bocht in de lange omloopriool toont het ontwikkelen van wervels na het loslaatpunt dewelke zich naar het einde van de uitstroomconstructie toe voortbewegen. De vergelijking van de debietsverdeling over de uitstroomopeningen tussen (het tijdsgemiddelde van) de tijdsafhankelijke simulaties en de steady-state simulatie leert dat voor beide simulaties nagenoeg eenzelfde debietsverdeling over de openingen van de uitstroomconstructie berekend wordt.

Op basis van de resultaten van de uitgevoerde CFD-simulaties wordt besloten om geen wijzigingen aan te brengen aan de initiële geometrie van de uitstroomconstructie.

Het initiële hydraulisch netwerkmodel werd bijgewerkt aan de hand van de meest recente geometrie en de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie bij vullen werd gewijzigd op basis van de verliescoëfficiënt berekend uit de CFD simulaties. Vervolgens werd een **tweede reeks hydraulische netwerksimulaties** uitgevoerd. Met dit aangepaste netwerkmodel zijn de simulaties voor vullen via het bovenhoofd en ledigen via het benedenhoofd met de maatgevende scheepscombinatie in de kolk en een openingswet bestaande uit twee hefsnelheden uit de eerste reeks hydraulische netwerksimulaties herhaald. Hierbij wordt opgemerkt dat de lokale bodemverdieping in de kolk zorgt voor een afname van de langse waterspiegelhelling in de kolk. Hierdoor is het mogelijk om een snellere openingswet in te stellen. Hierbij wordt de kolk bij het maximaal verval van 5.4 m en de maatgevende scheepscombinatie in de kolk gevuld in 13.5 min, wat een reductie is met 1.0 min ten opzichte van de simulaties uit hoofdstuk 5. Bij het toepassen van een aangepaste openingswet bij Scheldepeilen hoger dan TAW + 0.00 m, wordt de kolk gevuld in 11.5 min. Het ledigen van de kolk bij het maximaal verval van 5.4 m duurt 13.5 min. Het ledigen naar een Scheldepeil TAW + 0.00 m (verval: 4.4 m) gebeurt in 12.1 min. Bij Scheldepeilen hoger dan TAW + 0.00 m (vervallen lager dan 4.4 m) wordt voldaan aan het initiële criterium van 12.0 min voor de nivelleertijd. Bij het maximaal verval van 5.4 m (een Scheldepeil van TAW – 1.00 m) wordt voldaan aan het versoepelde criterium voor de nivelleertijd van 15.0 min.

Bij deze besluiten worden volgende **opmerkingen/aanbevelingen** geformuleerd:

- In deze studie zijn enkel simulaties uitgevoerd met een Scheldepeil lager dan het dokpeil. Enerzijds is het maximale verval hoger voor de situatie met een Scheldepeil lager dan het dokpeil. Anderzijds is de waterdiepte in de kolk kleiner voor de situatie met een Scheldepeil lager dan het dokpeil. Dit maakt dat deze situatie maatgevend is voor de optredende langskrachten in de kolk en de nivelleertijd.
- Het in deze studie toegepaste programma LOCKSIM simuleert enkel de langse waterbewegingen in de kolk ten gevolge van het nivelleren. Met dit programma is het niet mogelijk om dwarskrachten of momenten op het schip te simuleren.
- Bij het nivelleren van de maatgevende scheepscombinatie bedraagt de blokkering van de natte sectie bij het minimaal kolkpeil 80 %. Ten gevolge van in- of uitvaren van één van beide duwkonvooien of het openen van een roldeur onder restverval kunnen ook grote krachten ontstaan. Deze krachten kunnen niet begroot worden met het in deze studie toegepaste programma.
- Het complexe en uitermate driedimensionaal stromingspatroon afwaarts van de overstortmuur in de uitstroomopeningen laat besluiten dat mogelijks nog enige hydraulische optimalisatie van de uitstroomconstructie kan uitgevoerd worden. Daarnaast is het interessant om CFD-simulaties uit te voeren waarbij beide omloopriolen beschouwd worden. Het stromingspatroon in de kolk toont een helicoïdaal stromingspatroon, waarbij de bodemnabije stroming uit de uitstroomconstructie via het gedefinieerde symmetrievlak naar het oppervlak geleid wordt en vervolgens via het wateroppervlak terug naar de kolkmuur. Bij de aanwezigheid van een schip in de kolk ter hoogte van de uitstroomconstructie is deze terugstroom via het wateroppervlak niet meer mogelijk. Om deze reden is het aangewezen om CFD-simulaties uit te voeren waarbij ook een schip in de kolk aanwezig is.
- Omwille van de onzekerheden met betrekking tot het gebruikte simulatieprogramma en het toegepaste criterium voor de langskracht op het schip, verdient het aanbeveling om na ingebruikname van de sluis na te gaan of zich geen noemenswaardige problemen voordoen met schepen in de sluiskolk bij toepassing van openingswetten uit deze studie. Eventueel is het dan ook mogelijk om na ingebruikname van de sluis de openingswet nog verder te optimaliseren.
- Bij ingebruikname van de nieuwe sluis is het aanbevolen om, met het oog op het verder optimaliseren van de openingswet van de schuiven, nivelleerkrommen – waaruit de nivelleertijd afgeleid wordt – en waterspiegelhellingen, die een maat zijn voor de hydrostatische krachten op een schip, op te meten.
- Rekening houdend met een mogelijke optimalisatie van de openingswet na ingebruikname wordt aanbevolen een voldoende flexibele elektromechanische of hydraulische aansturing van het nivelleersysteem te voorzien. Dit maakt het mogelijk om na ingebruikname van de sluis nog een optimalisatie van de openingswet door te voeren.

10 Referenties

Actiflow. (2014). CFD-studie naar de stroming in de nieuwe Royerssluis: gridgevoeligheidsstudie. versie 1.2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Actiflow. (2015). CFD-studie naar stroming door de omloopriolen van de nieuwe Royerssluis: eindrapportage. versie 1.1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

De Broe, W. (2003). Controlling sediment accumulation behind the locks of Zandvliet and Berendrecht. *Bull. Perm. Int. Assoc. Navig. Congr. = Bull. l'Association Int. Perm. des Congrès Navig.* 112: 41

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

De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Cui, J.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2008). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 3. Verslag van bijkomende meetcampagne Berendrechtsluis. *WL Rapporten*, 760_03A. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2007). Tweede sluis Waaslandhaven: opmaak numeriek modelinstrumentarium voor vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten*, 760/03A-2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2010a). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 4. Aanpassing numeriek modelinstrumentarium voor vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten*, 760_03a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2010b). Tweede sluis Waaslandhaven: deelrapport 5. Evaluatie van hydraulische performantie ontwerp vul- en ledigingssysteem. *WL Rapporten*, 760_03a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

European conference of ministers of transport (CEMT). (1992). RESOLUTION No. 92/2 ON NEW CLASSIFICATION OF INLAND WATERWAYS [CEMT/CM(92)6/FINAL]

Idel'Cik, I.E. (1969). Mémento des pertes de charge: coéfficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement. *Collection du centre de recherches et d'essais de Chatou*, 13. Eyrolles: Paris. 494 pp.

InCom Working Group 106. (2009). Innovations in navigation lock design. PIANC = AIPCN. 208 pp.

Lamoen, J. (1950). Modelproeven voor het vullen en ledigen van de kolk der Boudewijnsluis (troskrachten, aanslibbingen, golven). *WL Rapporten*, 90. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Meersschaut, Y. (1999). Ringvaart rond Gent. Nieuwe sluis te Evergem. Hydrodynamische krachten op schepen bij vullen en ledigen van de sluiskolk

Miller, D.S. (1990). Internal Flow Systems, 2nd edition, Gulf Publishing Co.: Houston, Texas.

Miller, D.S. (2008). Internal flow systems. Miller Innovations: Bedford. ISBN 978-0-9562002-0-4

Munson, B.R.; Young, D.F.; Okiishi, T.H. (1990). Fundamentals of fluid mechanics. Wiley: New York. ISBN 0-471-85526-X

Naudascher, E. (1991). Hydrodynamic forces. *Hydraulic Structures Design Manual: Hydraulic Design Considerations*, 3. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-6191-993-2

Novak, P.; Moffat, A.I.B.; Nalluri, C.; Narayanan, R. (2007). Hydraulic structures. E & FN Spon: London. ISBN 978-0-415-38626-5

SBE. (2013a). MKBA Royerssluis Antwerpen - Doorsnedes scenario 2 - Eerste uitgave. Plan dd. 22-04-2013

SBE. (2013b). MKBA Royerssluis Antwerpen - Grondplan scenario 2 - Eerste uitgave Plan dd. 15-05-2013

SBE. (2014a). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Grondplan sluis met wegenis Plan dd. 04-04-2014.

SBE. (2014b). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Korte omloopriool Benedenhoofd planzicht en sneden Plan dd. 02-04-2014.

SBE. (2014c). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Korte omloopriool Benedenhoofd planzicht en sneden Plan dd. 03-04-2014.

SBE. (2014d). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Lange omloopriool Benedenhoofd planzicht en sneden - Plan dd. 02-04-2014.

SBE. (2014e). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Principeaanzicht saswand Plan dd. 02-04-2014.

SBE. (2014f). Aanbestedingsdossier Royerssluis Antwerpen - Voorstel positie kiosken hefschuiven Plan dd. 03-04-2014.

SBE. (2014g). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Doorsnedes deurkamer bovenhoofd - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2014h). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Korte omloopriool Bovenhoofd planzicht en sneden - plan dd. 11-06-2014

SBE. (2014i). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Korte omloopriool bovenhoofd planzicht en sneden - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2014j). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool benedenhoofd planzicht en snede A - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2014k). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool benedenhoofd planzicht en snede B - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2014l). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool bovenhoofd planzicht en snede A - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2014m). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool bovenhoofd planzicht en snede B - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2014n). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Lange omloopriool Bovenhoofd planzicht en sneden - plan dd. 11-06-2014

SBE. (2014o). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis - Principe aanzichten saswand - plan dd. 11-06-2014

SBE. (2014p). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis -Doorsnedes deurkamer benedenhoofd - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2014q). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis -Korte omloopriool benedenhoofd planzicht en sneden - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2014r). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis -Principeaanzichten saswand - plan dd. 2-12-2014

SBE. (2015). Bestek nr. 16EF/2011/31 Leveren van gespecialiseerde en geintegreerde diensten bij het ontwerp en de uitvoering van investeringsprojecten - Renovatie Royerssluis -Deurkamer planzicht en doorsnede op + 8.250 - plan dd. 6-01-2015

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 mei 2003*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Smets, E.; Sterling, A. (1961). Nieuwe zeesluis te Zandvliet: verslag der modelproeven. *WL Rapporten*, 186_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Smets, E.; Sterling, A. (1962). Nieuwe zeesluis te Zandvliet: aanvullend verslag der modelproeven. Bijkomende proeven aangaande het behoud of het weglaten van de overstortmuur in de omloopriolen. *WL Rapporten*, 186_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Stichting Postacademisch Onderwijs. (2006). Hydraulische aspecten van waterbouwkundige constructies [CURSUS]: Delft

Taverniers, E.; Vereecken, H.; Mostaert, F. (2011). MONEOS - jaarboek monitoring WL 2010: Overzicht monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals door WL in 2010 in het Zeescheldebekken gemeten. *WL Rapporten*, 833_07. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

US Army Corps of Engineers. (1975). Hydraulic design of lock culvert valves: engineer manual EM 1110-2-1610: Washington D.C. 59 pp.

US Army Corps of Engineers. (1995). Planning and Design of Navigation Locks. EM 1110-2-2602. 130 pp.

US Army Corps of Engineers. (2006). Hydraulic design of of navigation locks: engineer manual EM 1110-2-1604: Washington D.C. 196 pp.

Vaes, G.; Bouteligier, R.; Luyckx, G.; Willems, P.; Berlamont, J. (2004). Toelichting bij de Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringssystemen: Leuven, Belgium

Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2013). Haven van Antwerpen - Royerssluis: voorontwerp nivelleersysteem vernieuwde Royerssluis. *WL Rapporten*, 12_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verwilligen, J.; Eloot, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2012). Ontwerp voorhaven vernieuwde Royerssluis: simulatiestudie. *WL Rapporten*, 807_07. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vlaamse Overheid - MOW. (2012). Haven Antwerpen; Renovatie Royerssluis; Voorstel wegenis met rotonde oostkant. Plan AMT/A/4100 C dd. 12/10/2012

Bijlage A – Gevoeligheidsanalyse LOCKSIM simulatie

In deze bijlage wordt de gevoeligheid van de LOCKSIM simulaties ten opzichte van een wijziging van enkele voor de berekening gebruikte parameters nagegaan. De simulaties waarop de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd zijn worden gegeven in Tabel 36. Merk op dat dit een initiële simulatie uit hoofdstuk 5 (simulatie N4) betreft en de bijhorende simulatie met de gewijzigde geometrie uit hoofdstuk 8 (simulatie N22).

Tabel 36 – Gebruikte simulaties voor gevoeligheidsanalyse

simulatie nr.	Geometrie	type	peil		verval	openingswet nr.
			Schelde [m TAW]	dok [m TAW]	[m]	
N4	initiële geometrie (hoofdstuk 5)	vullen	- 1.00	+ 4.40	5.40	3
N22	gewijzigde geometrie (hoofdstuk 8)	vullen	- 1.00	+ 4.40	5.40	8

De in de gevoeligheidsanalyse gewijzigde parameters met hun standaard, lagere waarde en hogere waarde worden gegeven in Tabel 37

Tabel 37 – Gewijzigde parameters gevoeligheidsanalyse

	standaard	lagere waarde		hogere waarde	
		waarde	afkorting simulatie	waarde	afkorting simulatie
Tijdstap	1 s	0.1 s	dt/10	2 s	dt*2
Max lengte discretisatiestap “open kanaal” component	< 7 m	< 0.7 m	dx/10	< 14 m	dt*2
Maximale fout voor beëindigen iteratie:	Debiet (Dq_max) = 0.001 m^3/s Piëzometrische hoogte (Dh_max) = 0.0001 m, Lengte (Dx_max) = 0.0001 m	Debiet (Dq_max) = 0.0001 m^3/s, Piëzometrische hoogte (Dh_max) = 0.00001 m, Lengte (Dx_max) = 0.00001 m	Dmax/10	Debiet (Dq_max) = 0.01 m^3/s, Piëzometrische hoogte (Dh_max) = 0.001 m, Lengte (Dx_max) = 0.001 m	Dmax*10

Per gewijzigde parameter wordt een simulatie uitgevoerd. De invloed van de gewijzigde parameter ten opzichte van de standaard simulatie op de nivelleertijd, de maximale en minimale langse end-to-end waterspiegelhelling en de maximale en minimale helling over het schip wordt weergegeven in Tabel 38.

Tabel 38 – Resultaten gevoeligheidsanalyse op nivelleertijd,
end-to-end langse waterspiegelhelling een langse waterspiegelhelling over schip

simulatie	parameter gevoelig-heids-analyse	nivelleertijd		end-to-end langse waterspiegelhelling				langse waterspiegel-helling schip			
		tijd	Δ	max.	Δ	min.	Δ	max.	Δ	min.	Δ
		[min]	[min]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
N4 initiële geometrie (hoofdstuk 5)	standaard	14.4	0.0	0.471	0.000	-0.467	0.000	0.583	0.000	-0.558	0.000
	dt/10	14.4	0.0	0.474	0.003	-0.478	-0.011	0.586	0.003	-0.563	-0.005
	dt*2	14.4	0.0	0.470	-0.001	-0.457	0.010	0.581	-0.002	-0.556	0.002
	dx/10	14.4	0.0	0.472	0.001	-0.465	0.002	0.584	0.001	-0.556	0.002
	dx*2	14.4	0.0	0.473	0.002	-0.467	0.000	0.586	0.003	-0.564	-0.006
	dmax/10	14.4	0.0	0.471	0.000	-0.467	0.000	0.583	0.000	-0.558	0.000
	dmax *10	14.4	0.0	0.471	0.000	-0.467	0.000	0.583	0.000	-0.558	0.000
N22 gewijzigde geometrie (hoofdstuk 8)	standaard	13.5	0.0	0.498	0.000	-0.465	0.000	0.587	0.000	-0.564	0.000
	dt/10	13.5	0.0	0.500	0.002	-0.472	-0.007	0.588	0.001	-0.577	-0.013
	dt*2	13.5	0.0	0.496	-0.002	-0.458	0.007	0.587	0.000	-0.554	0.010
	dx/10	13.5	0.0	0.498	0.000	-0.463	0.002	0.587	0.000	-0.561	0.003
	dx*2	13.5	0.0	0.499	0.001	-0.463	0.002	0.587	0.000	-0.560	0.004
	dmax/10	13.5	0.0	0.498	0.000	-0.465	0.000	0.587	0.000	-0.564	0.000
	dmax*10	13.5	0.0	0.498	0.000	-0.465	0.000	0.587	0.000	-0.564	0.000

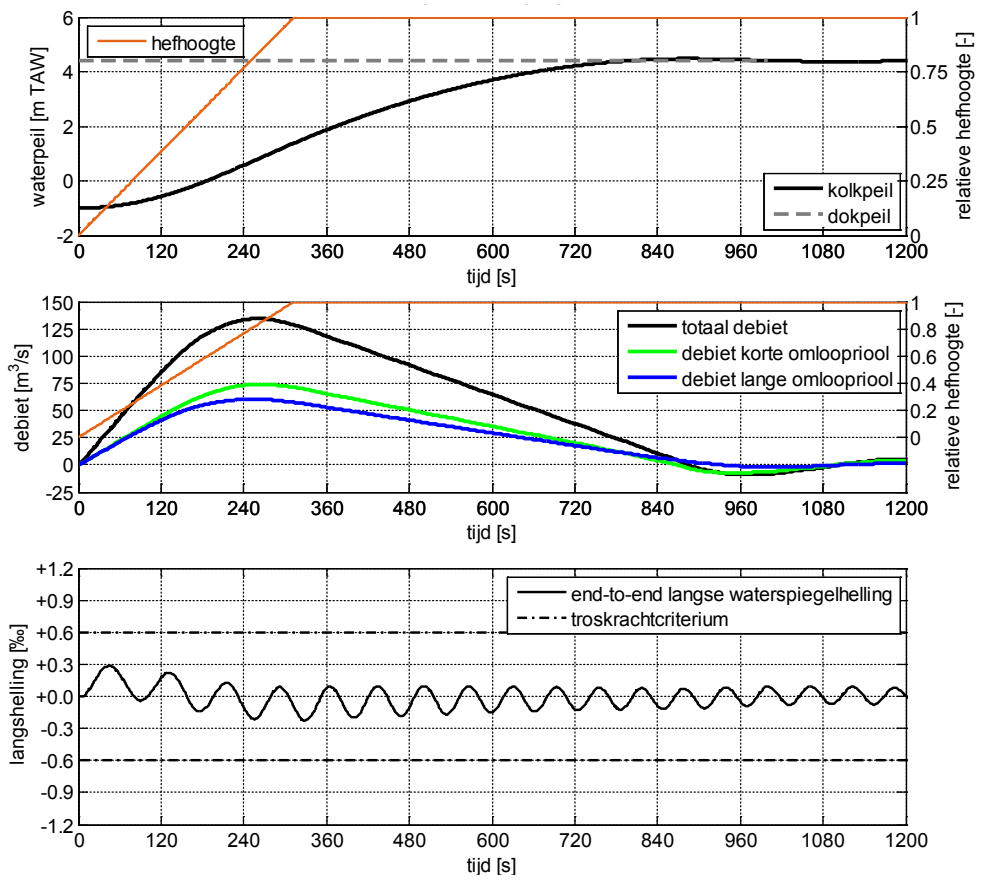
Merk in Tabel 38 op:

- De wijziging van de parameters heeft geen merkbare invloed op de nivelleertijd.
- De wijziging van de parameters heeft geen merkbaar andere invloed voor simulatie N4 ten opzichte van simulatie N22.
- Het verkleinen van de tijdstap zorgt voor een beperkte toename van het negatieve extrema (-0.005 ‰ tot – 0.013 ‰) van de langse waterspiegelhelling. Het vergroten van de tijdstap zorgt voor een beperktere afname van het negatieve extrema (0.002 ‰ tot 0.010 ‰) van de langse waterspiegelhelling. Het wijzigen van de tijdstap heeft zo goed als geen invloed op de positieve extrema van de langse waterspiegelhelling.
- Het vergroten of verkleinen van de maximale discretisatiestap zorgt voor een wijziging van het extreme van de langshelling waterspiegelhelling van -0.006 ‰ tot 0.002 ‰.
- Het wijzigen van de maximale fout voor het beëindigen van de iteraties heeft geen invloed op de extrema van de langse waterspiegelhelling.

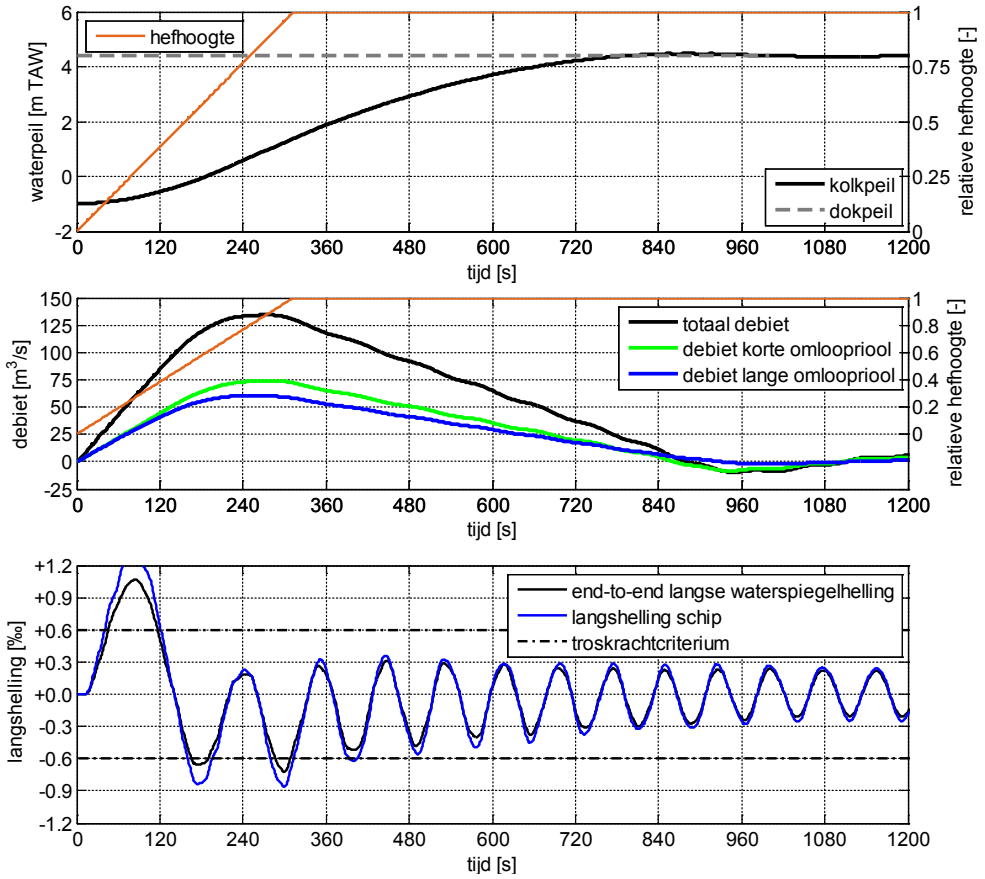
Bijlage B – Simulaties hydraulisch netwerkmodel

LOCKSIM simulaties initiële geometrie

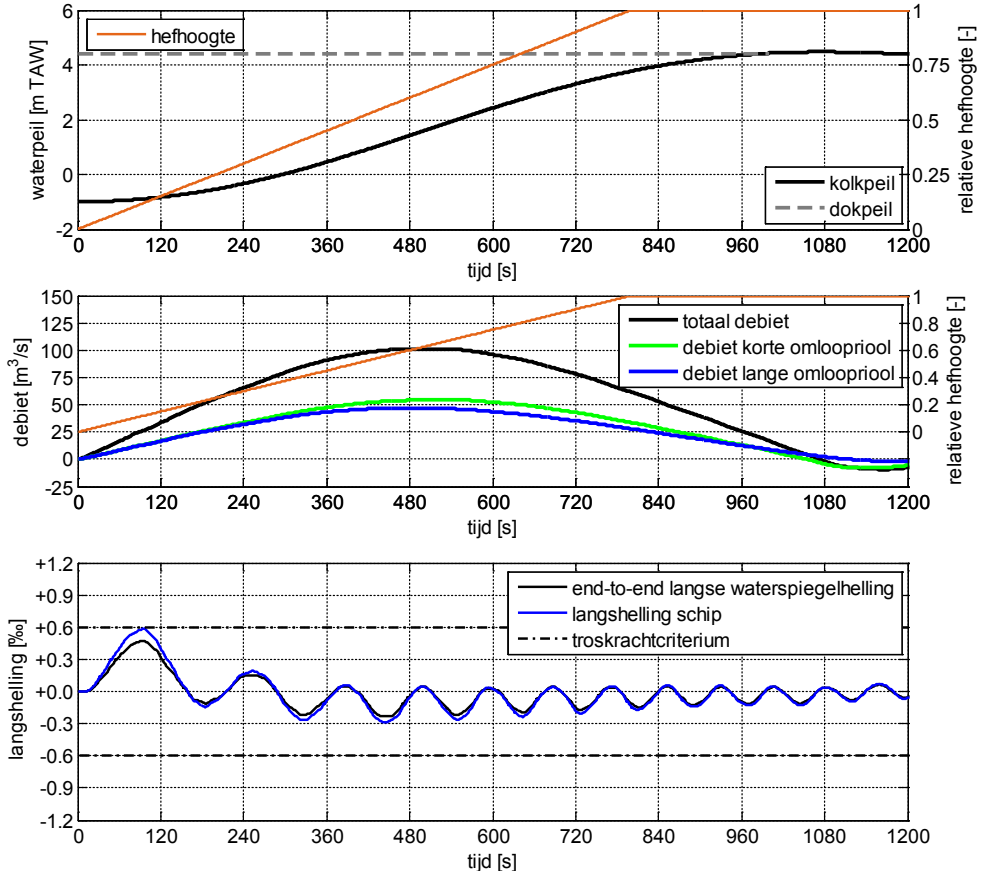
Figuur 59 – Simulatie N1



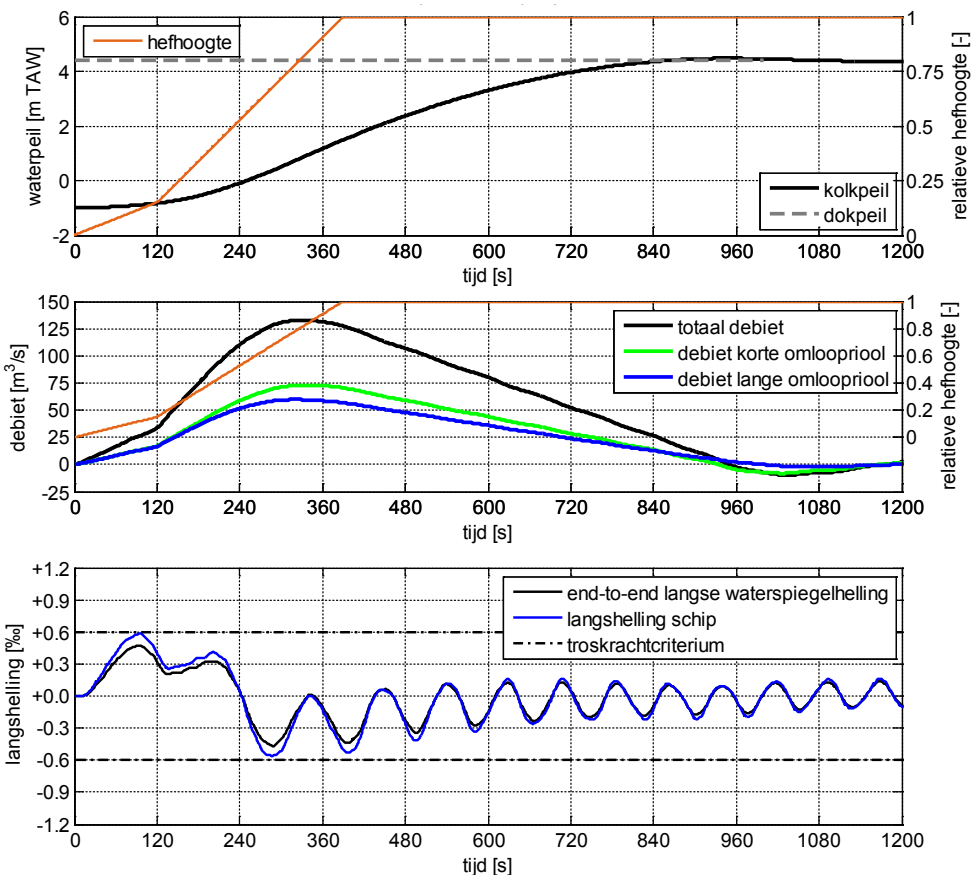
Figuur 60 – Simulatie N2



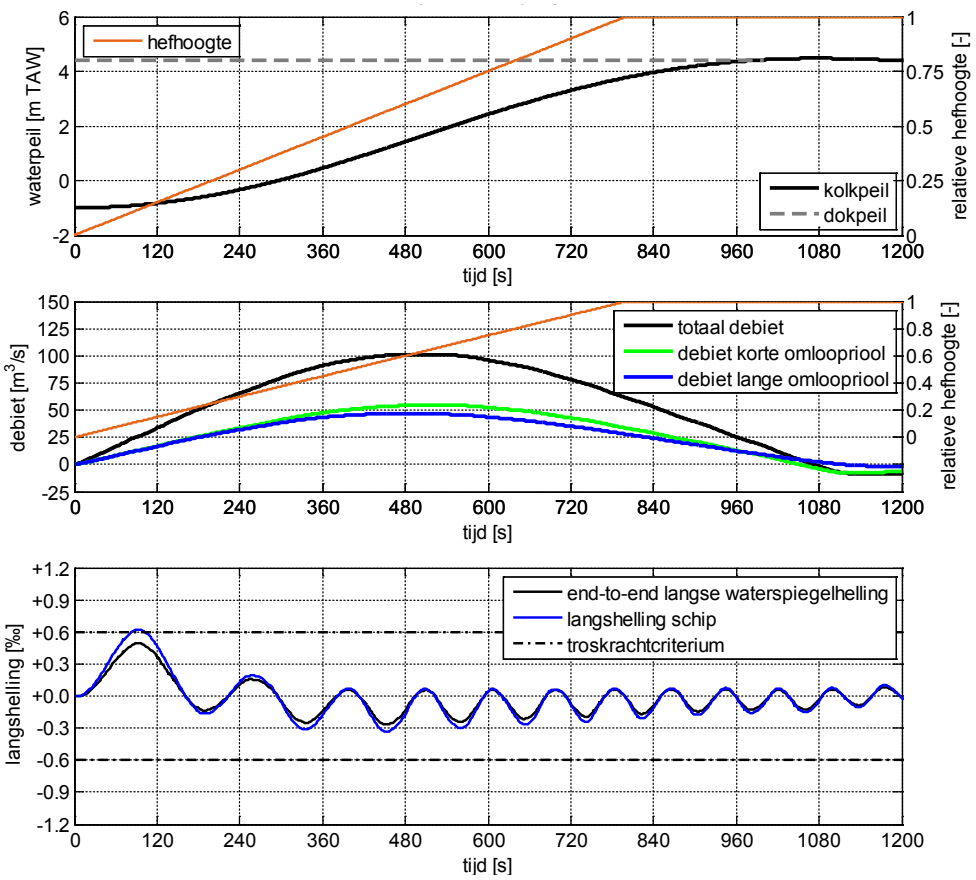
Figuur 61 – Simulatie N3



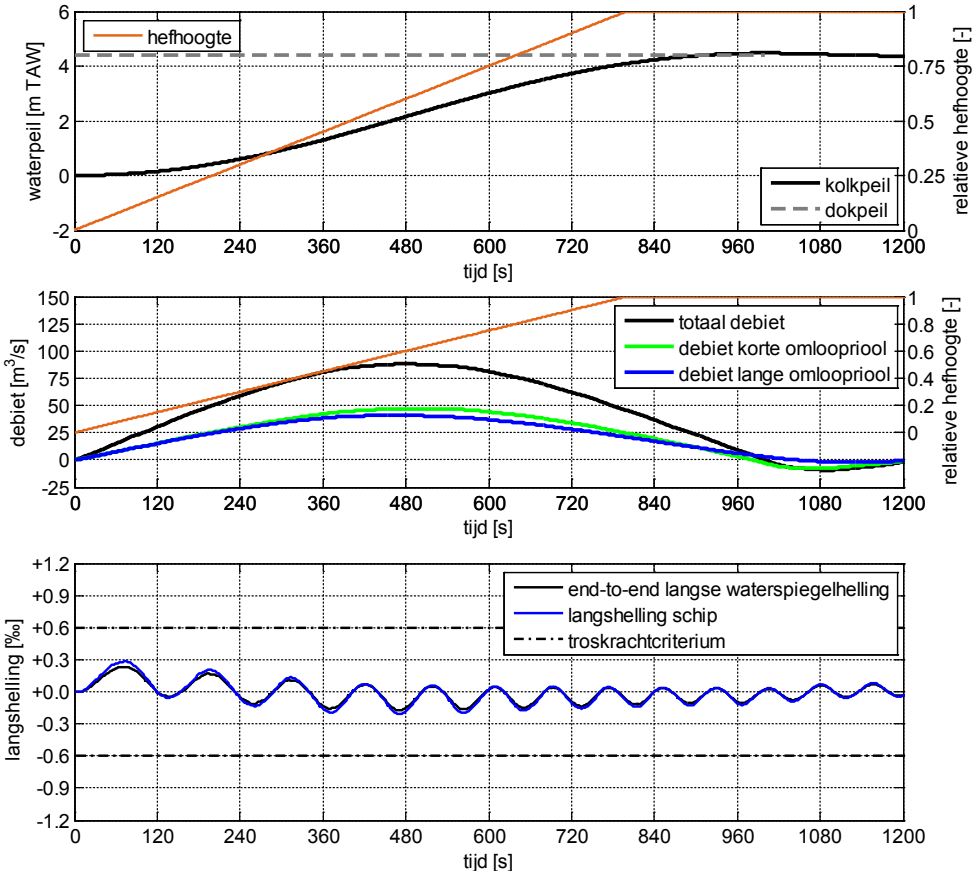
Figuur 62 – Simulatie N4



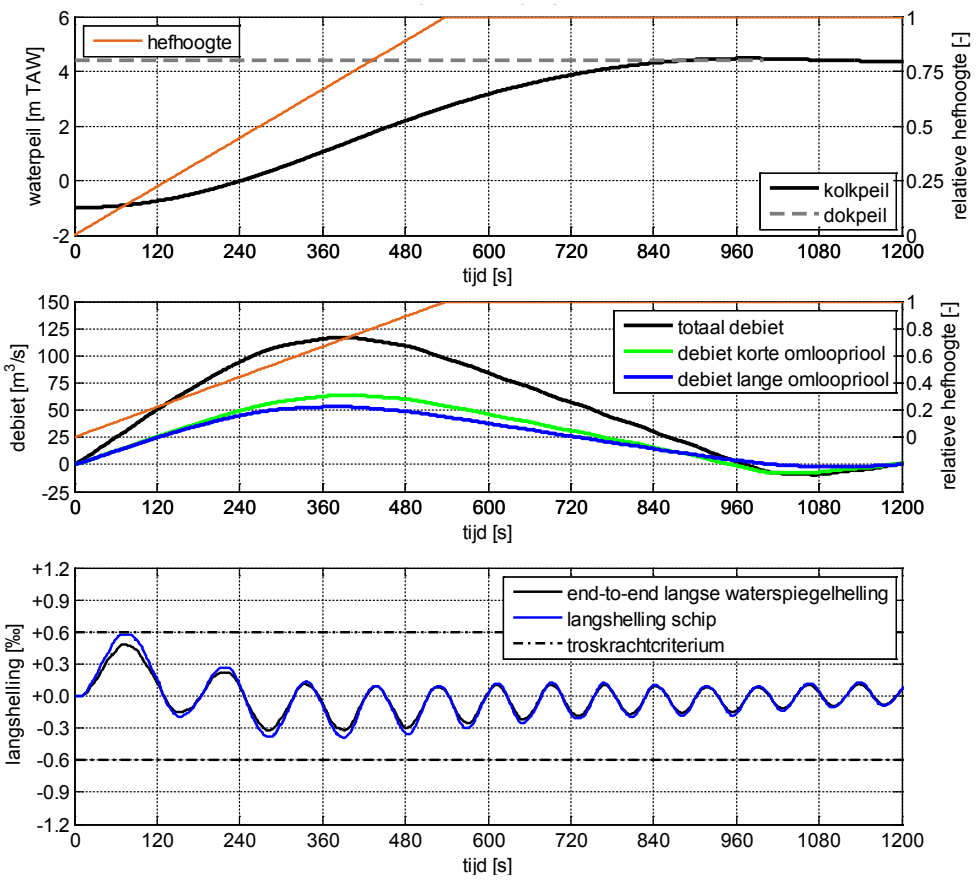
Figuur 63 – Simulatie N5



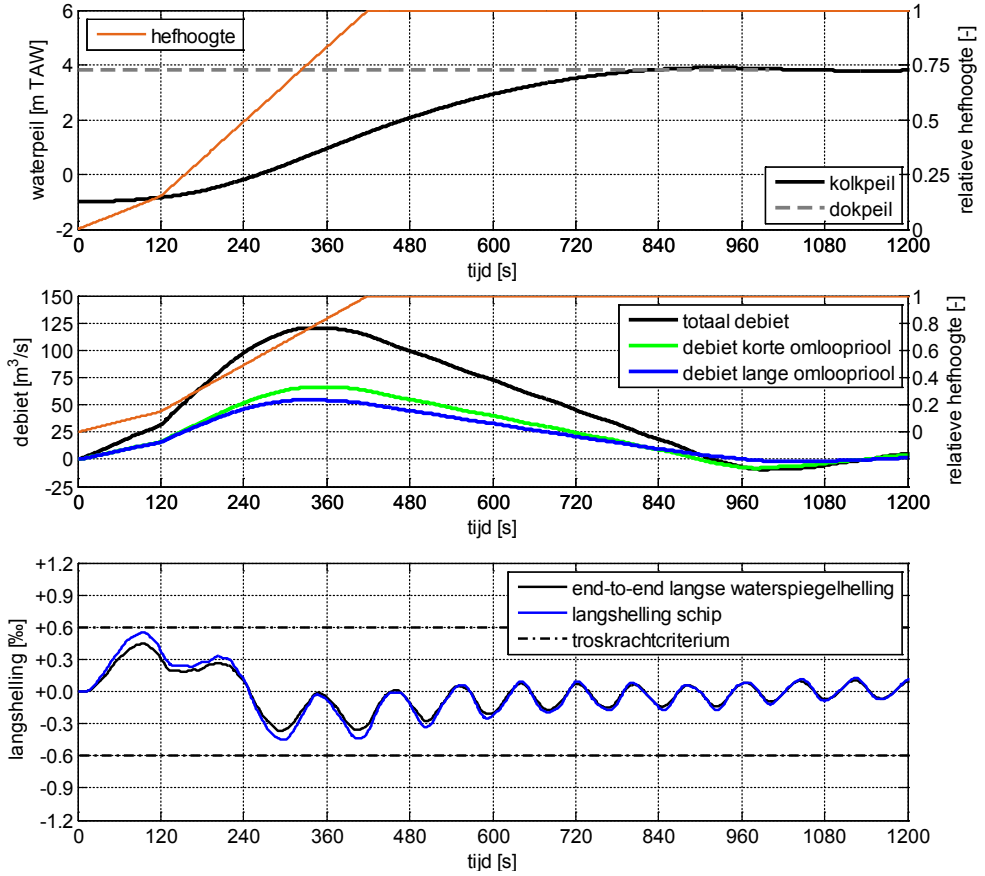
Figuur 64 – Simulatie N6



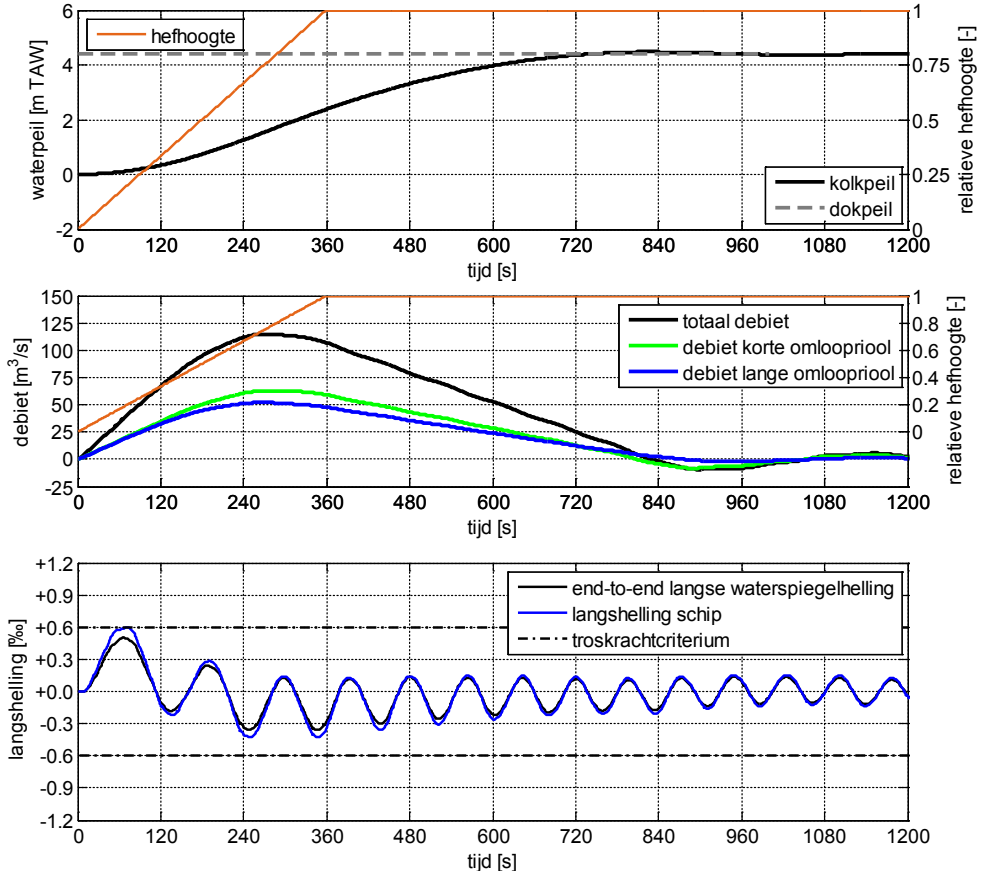
Figuur 65 – Simulatie N7



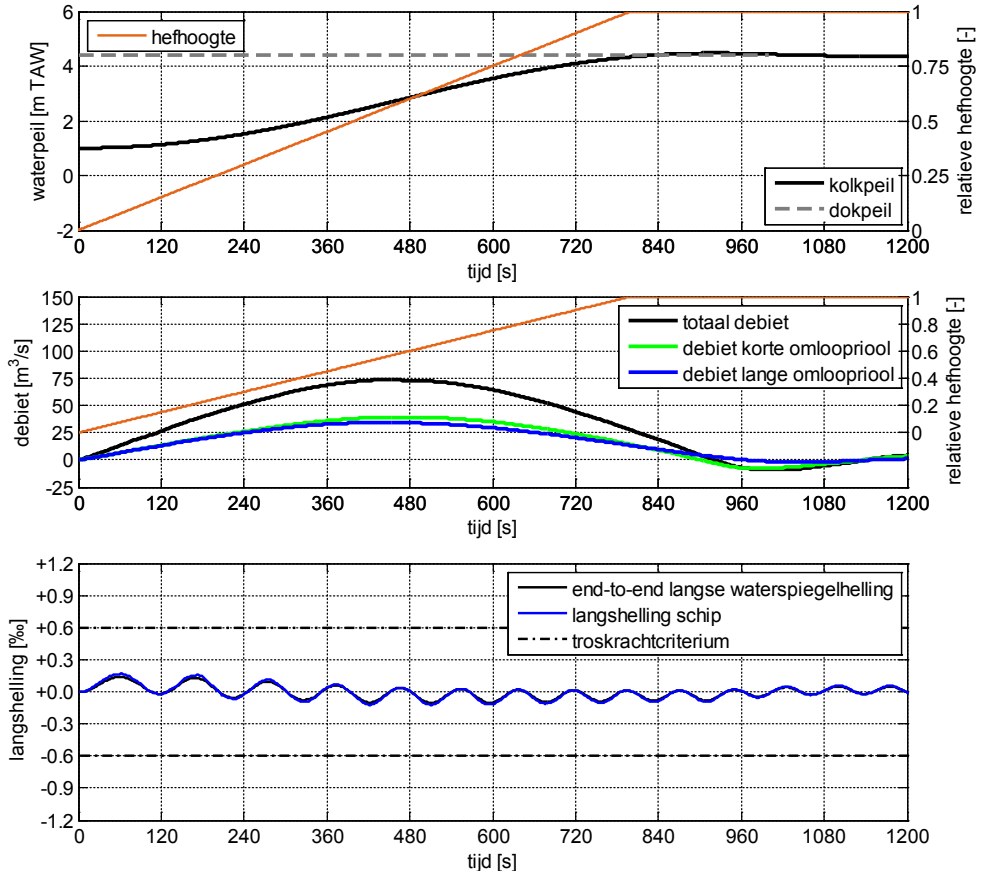
Figuur 66 – Simulatie N8



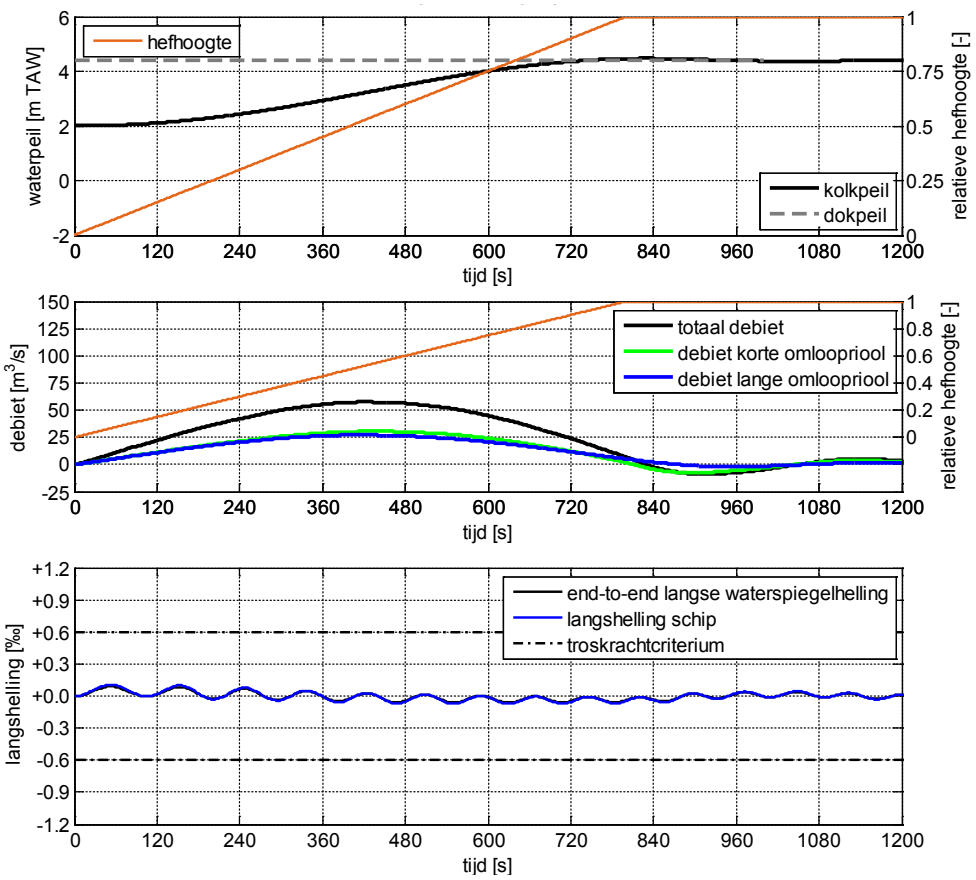
Figuur 67 – Simulatie N9



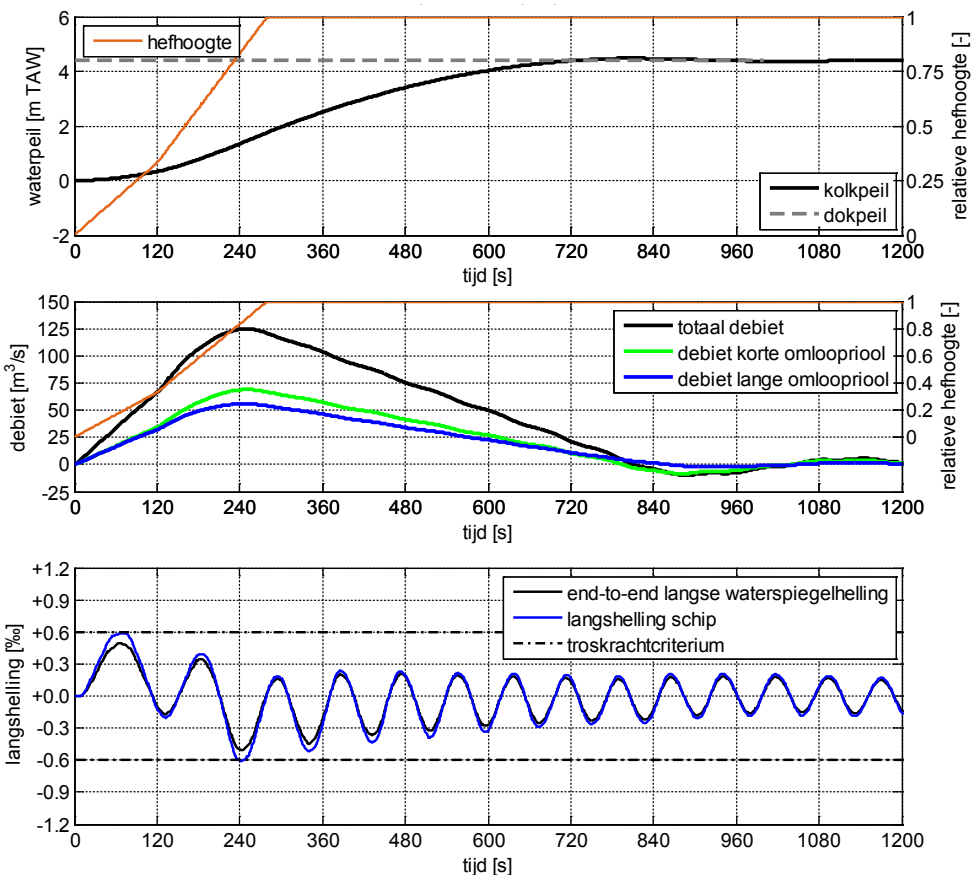
Figuur 68 – Simulatie N10



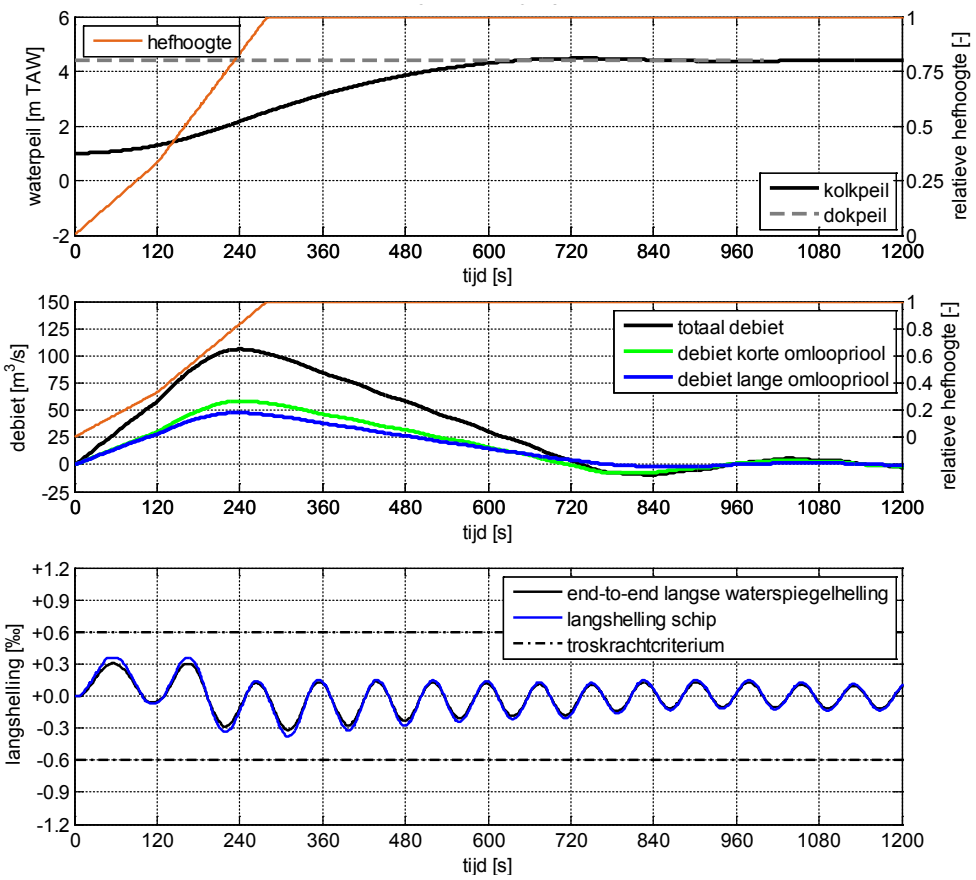
Figuur 69 – Simulatie N11



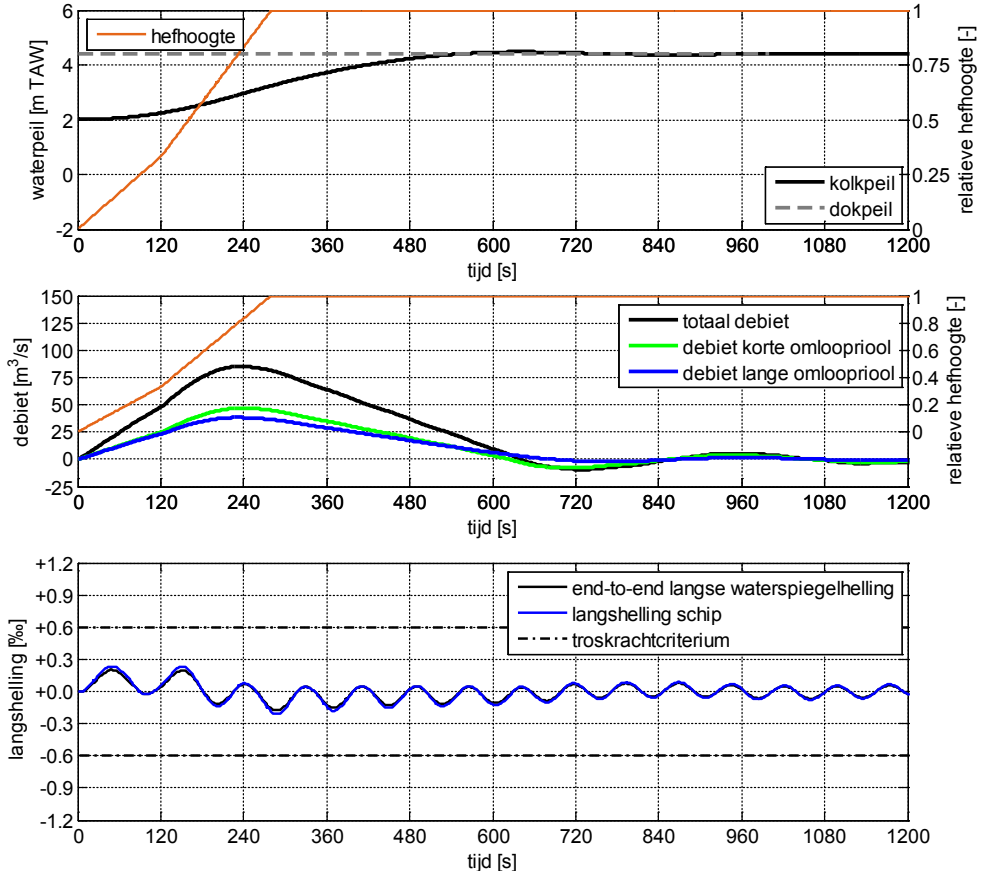
Figuur 70 – Simulatie N12



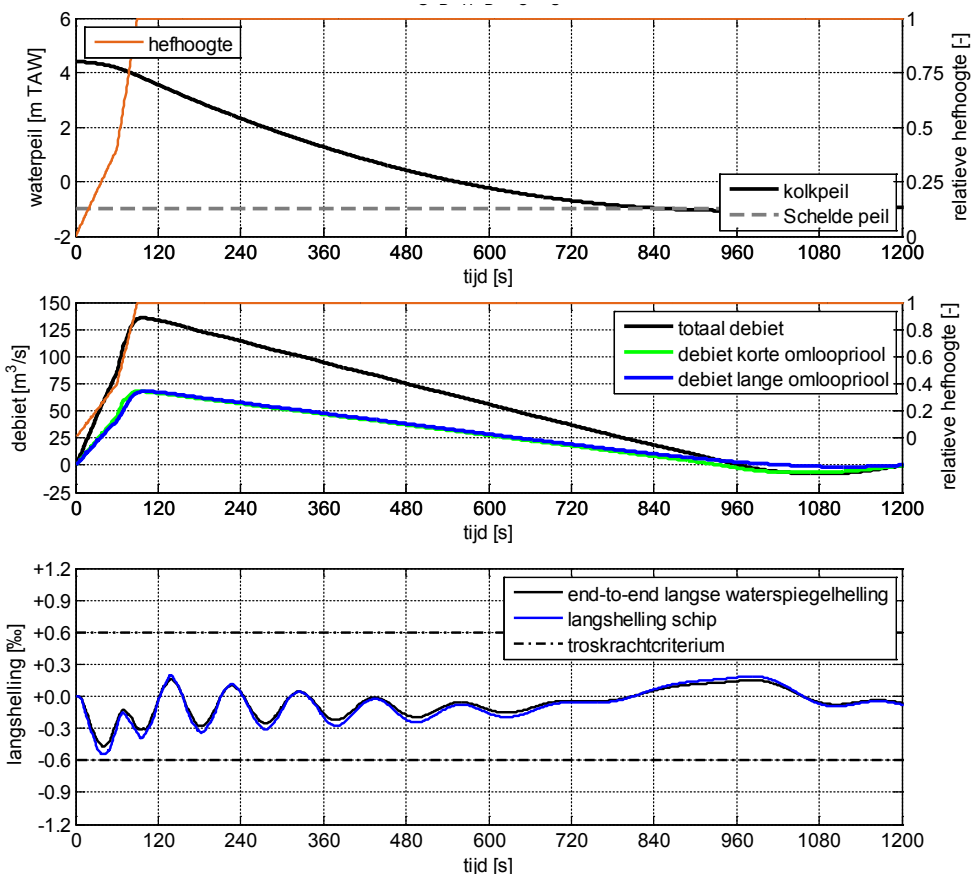
Figuur 71 – Simulatie N13



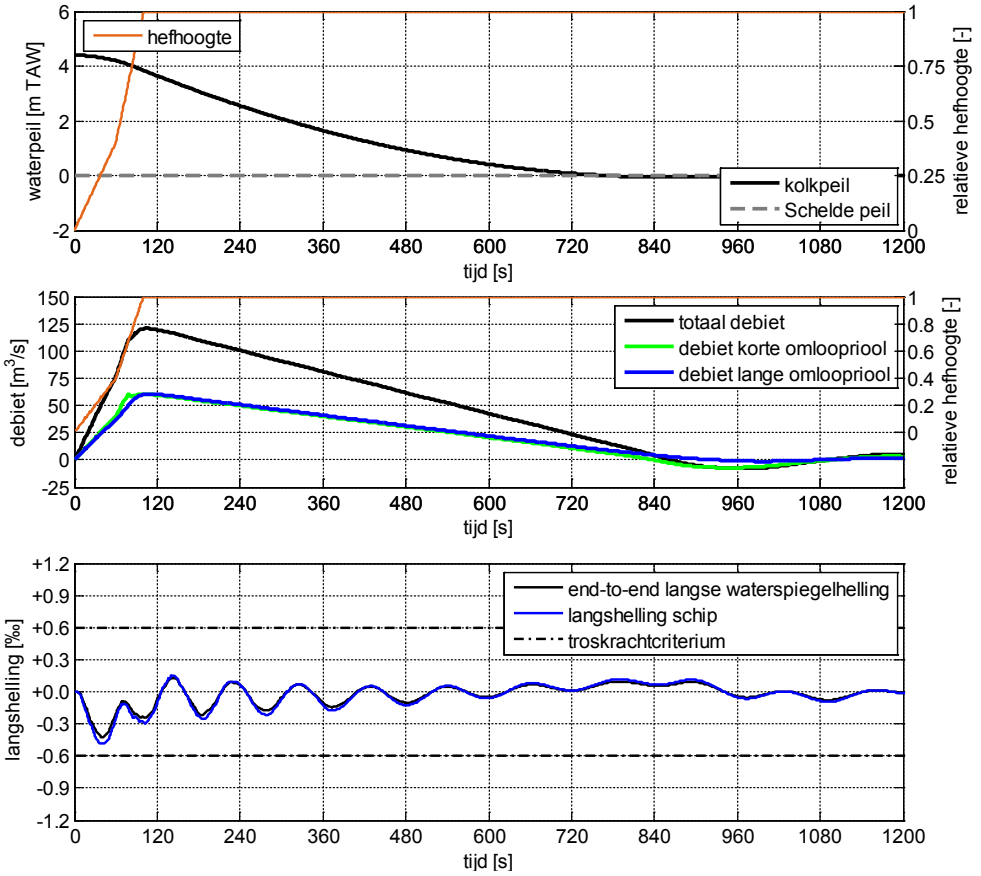
Figuur 72 – Simulatie N14



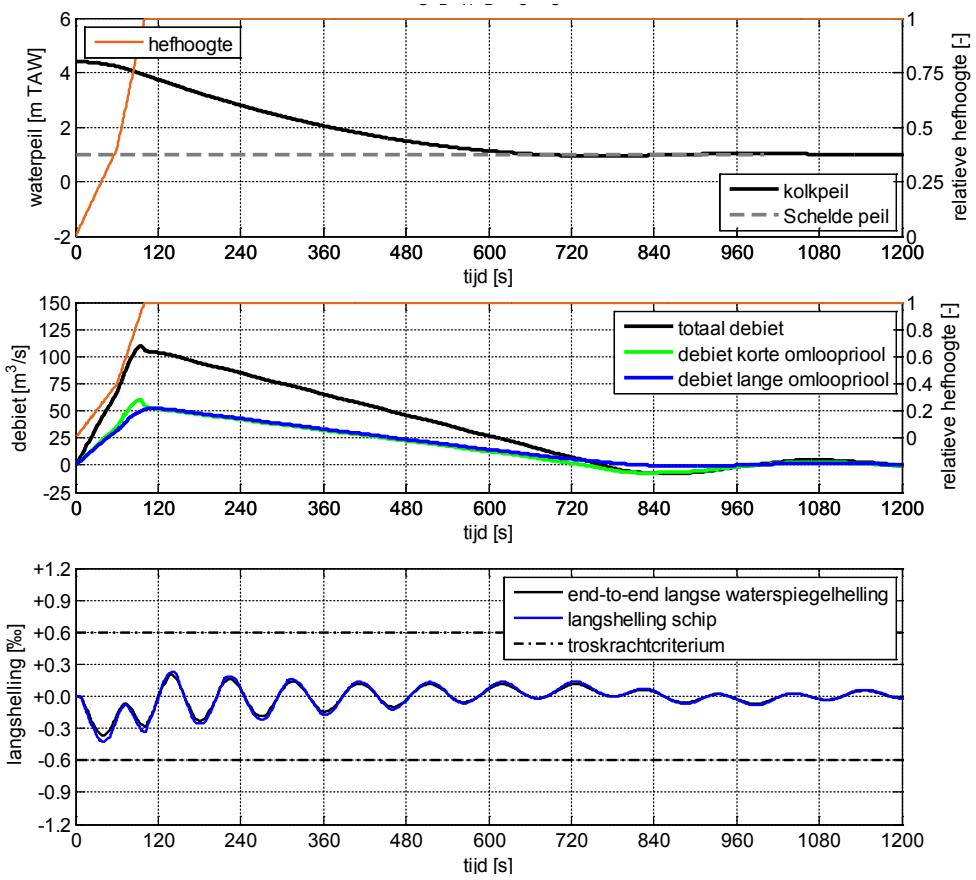
Figuur 73 – Simulatie N15



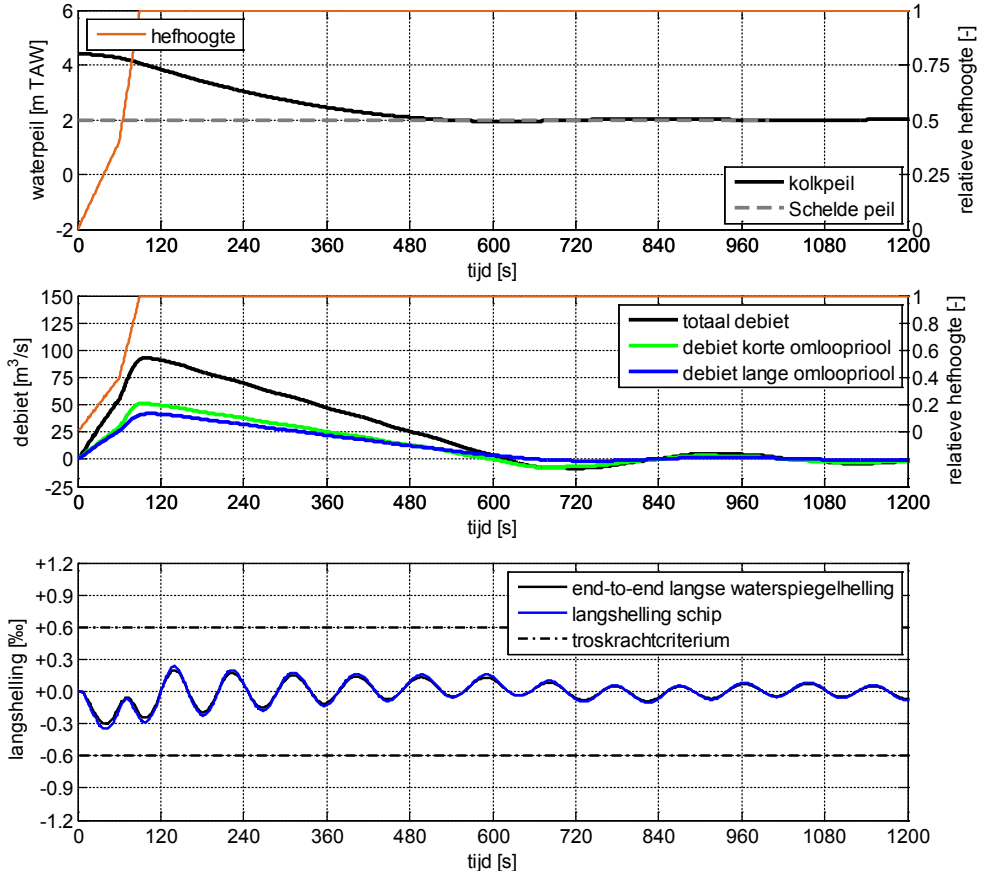
Figuur 74 – Simulatie N16



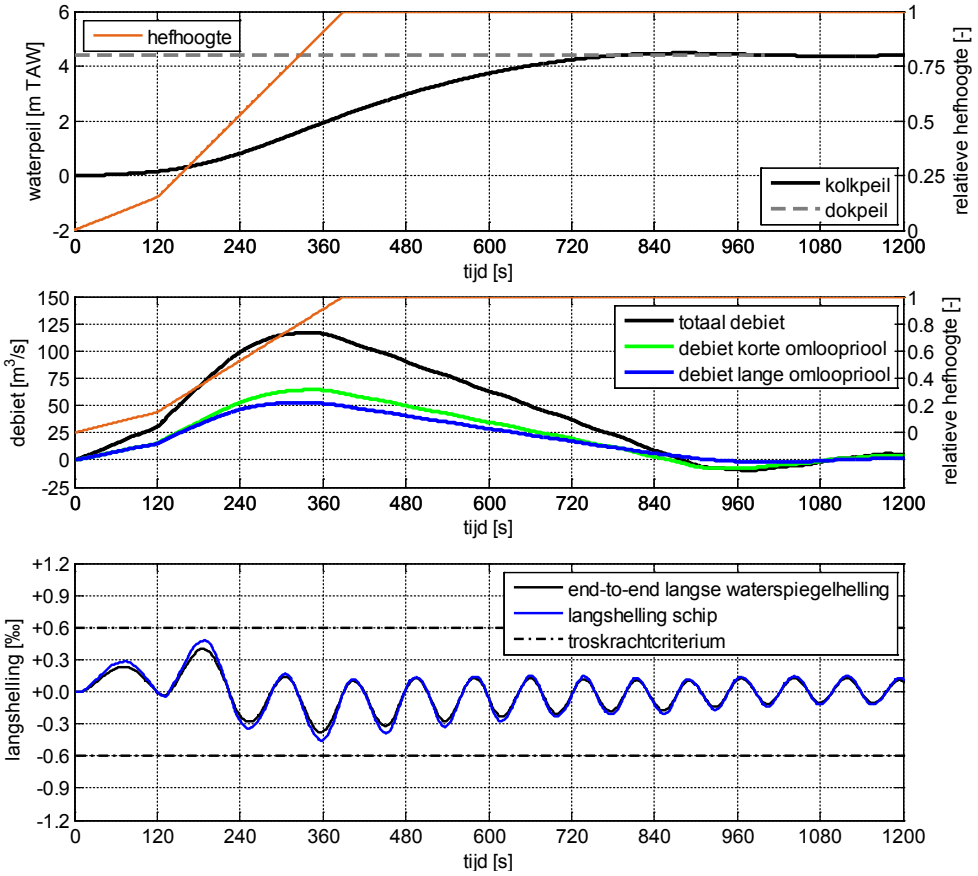
Figuur 75 – Simulatie N17



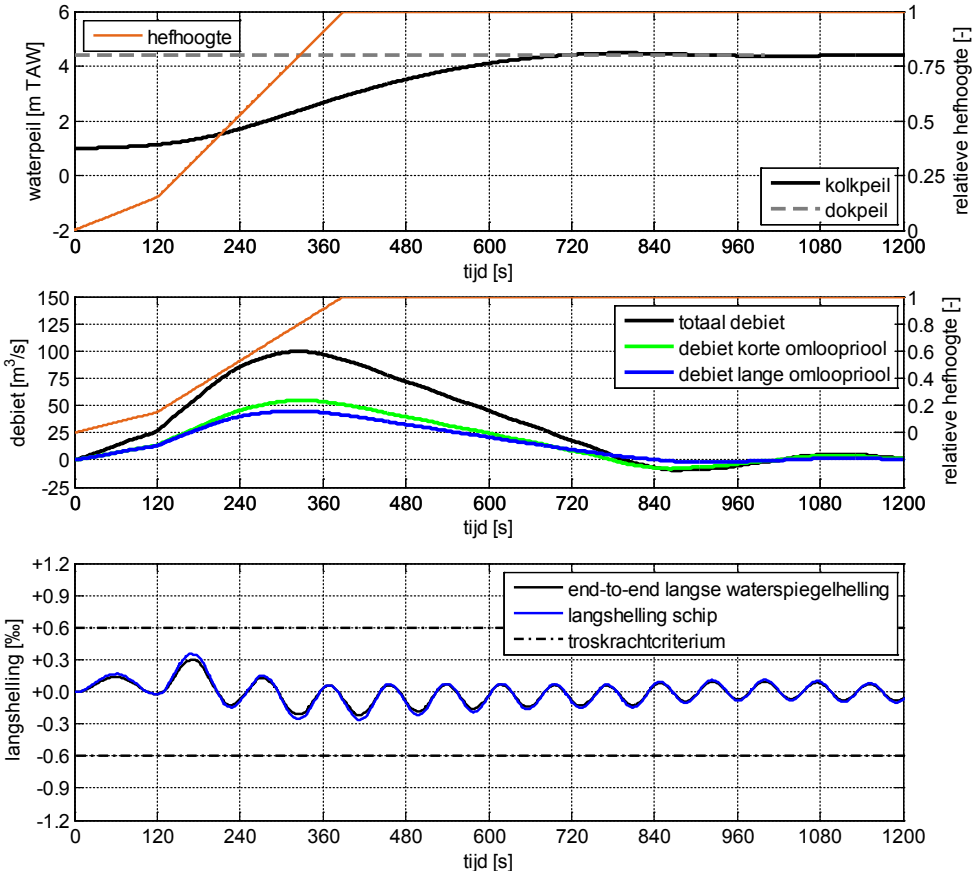
Figuur 76 – Simulatie N18



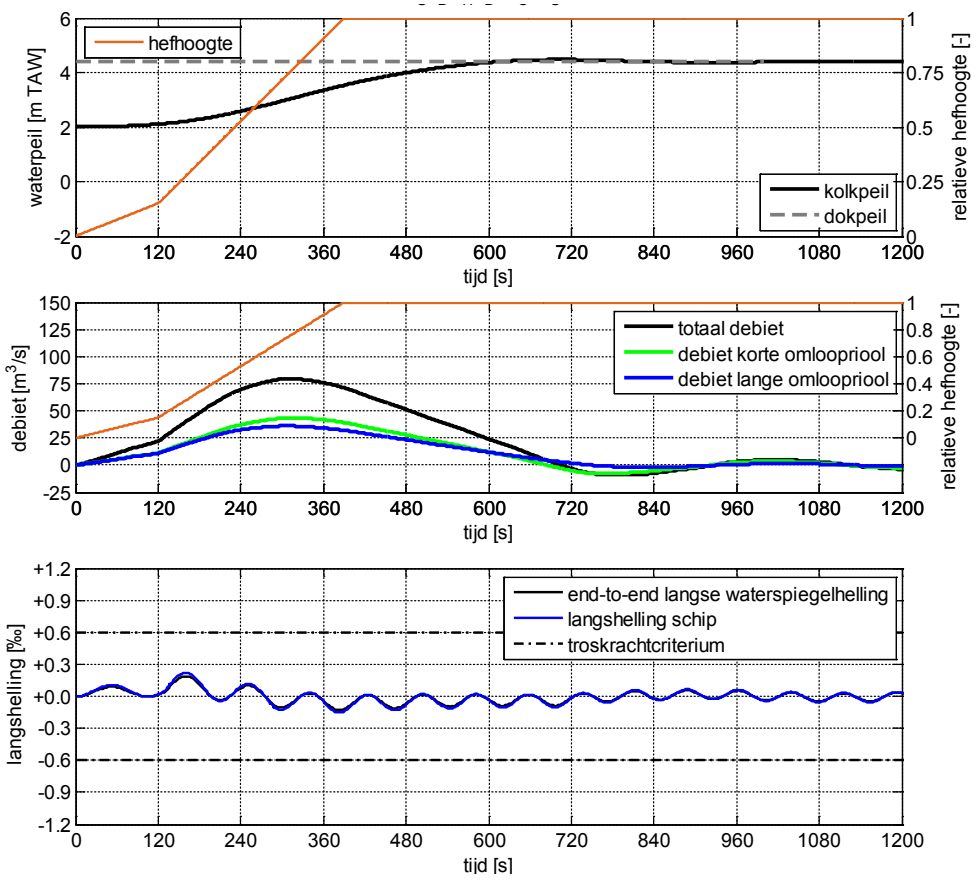
Figuur 77 – Simulatie N19



Figuur 78 – Simulatie N20

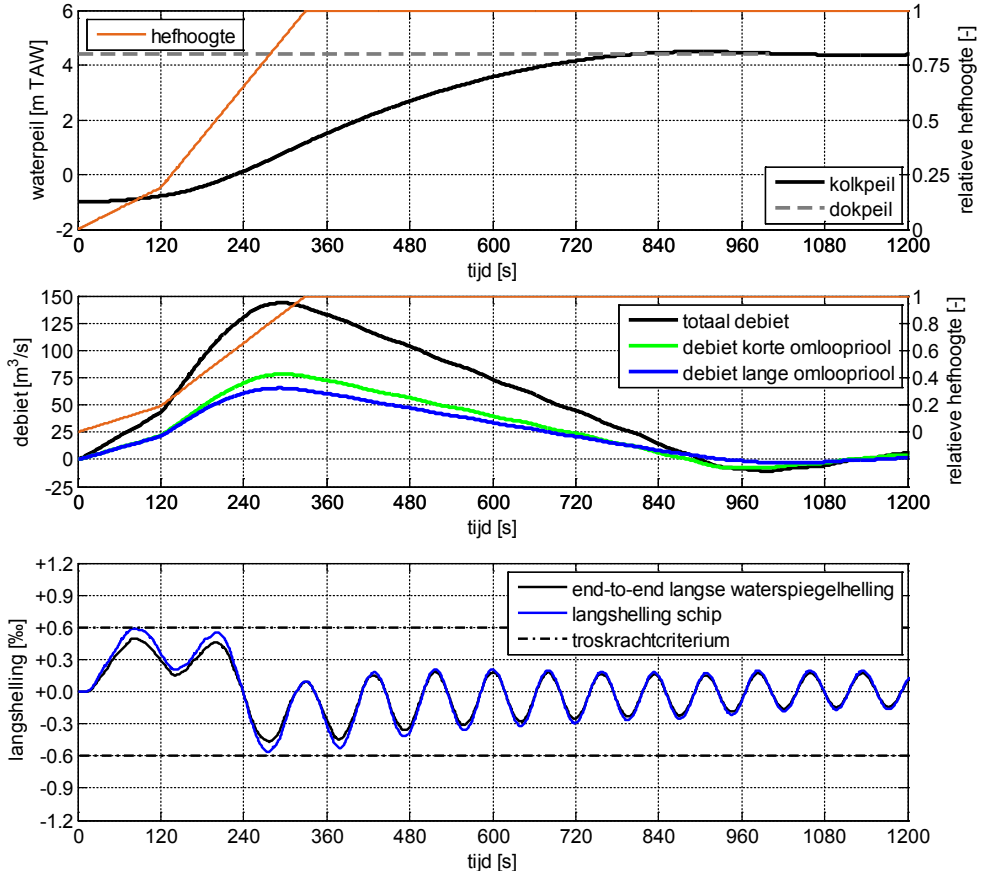


Figuur 79 – Simulatie N21

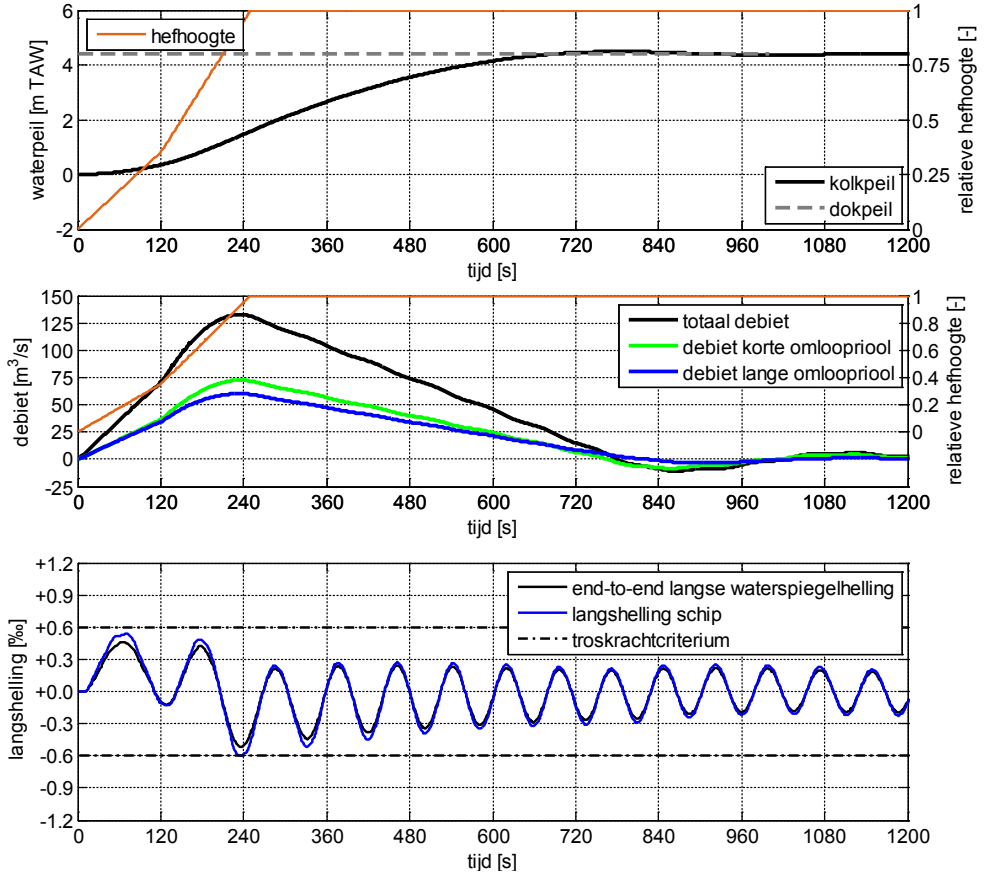


LOCKSIM simulaties gewijzigde geometrie

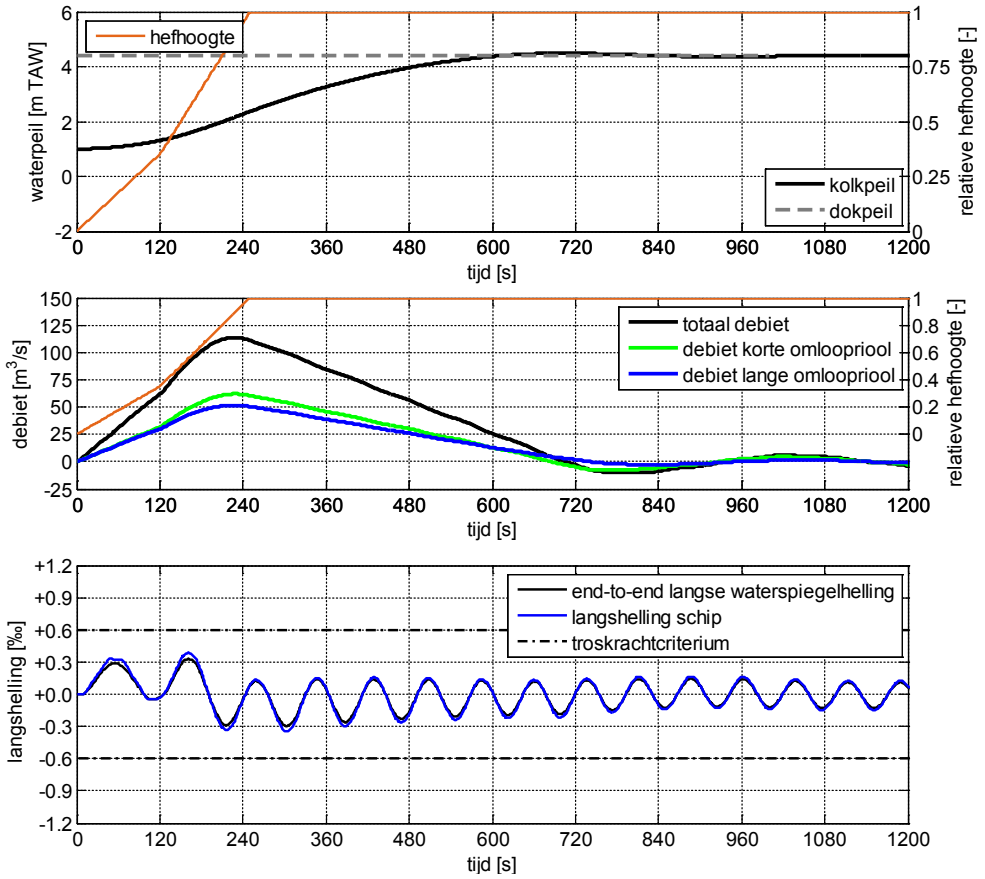
Figuur 80 – Simulatie N22



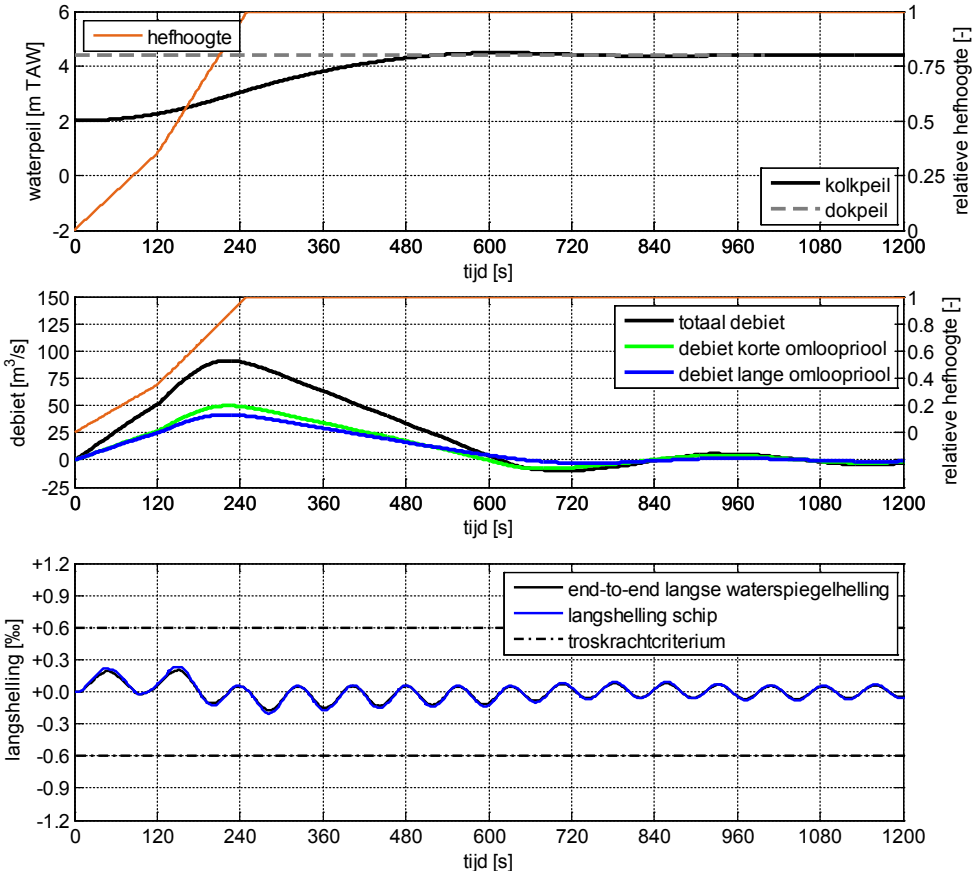
Figuur 81 – Simulatie N23



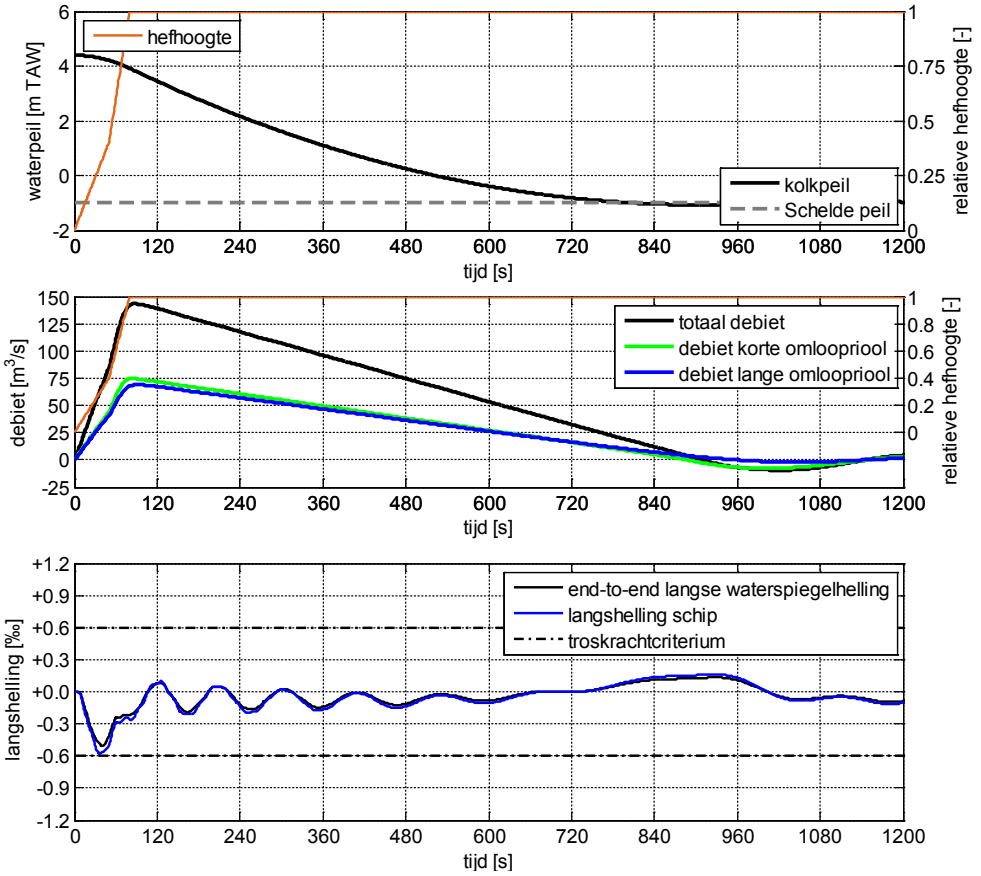
Figuur 82 – Simulatie N24



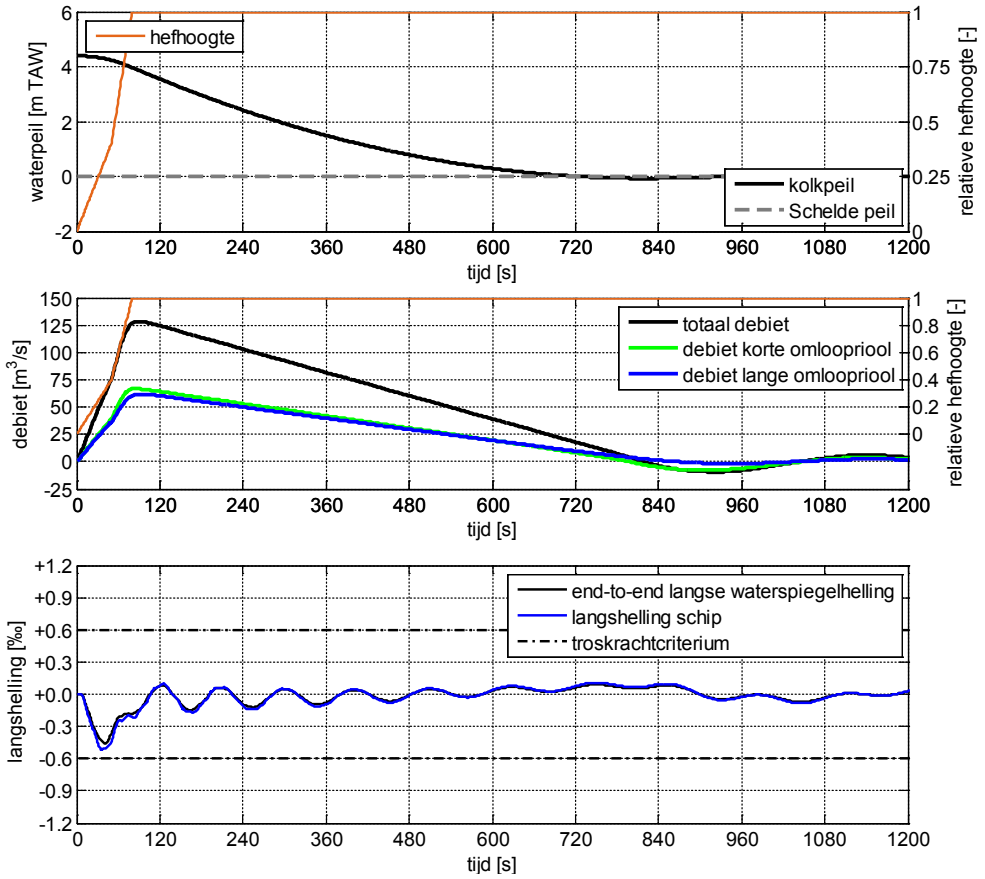
Figuur 83 – Simulatie N25



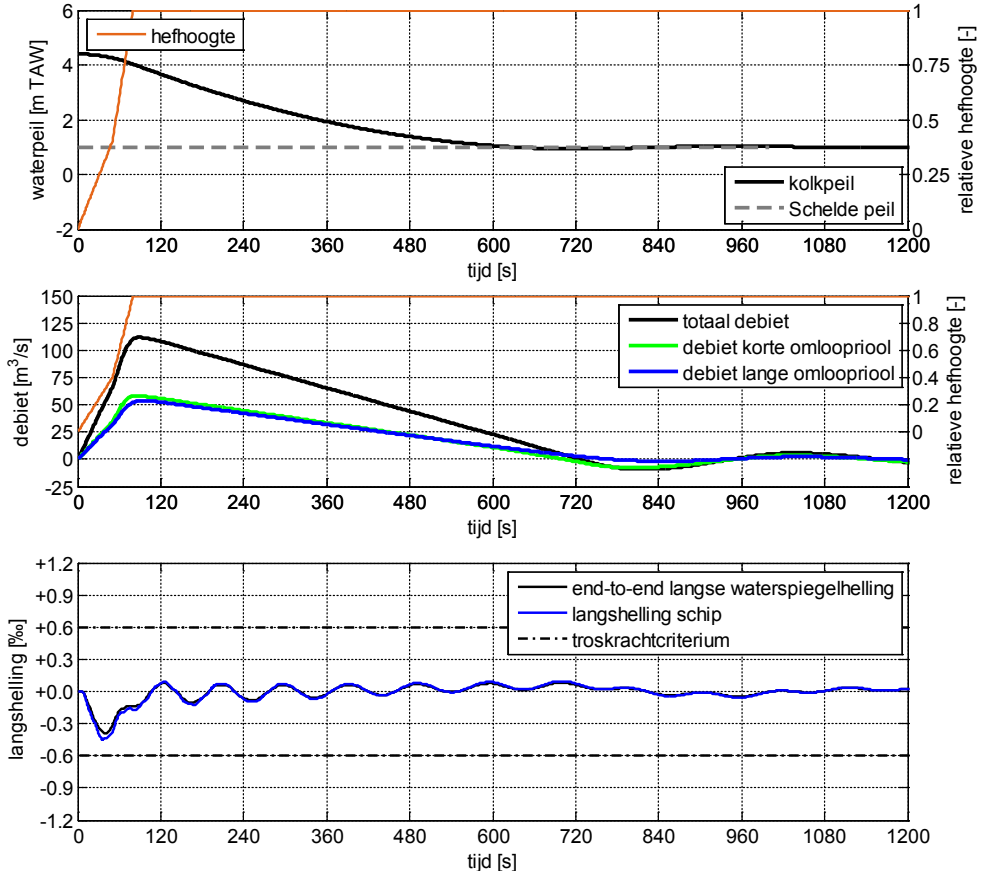
Figuur 84 – Simulatie N26



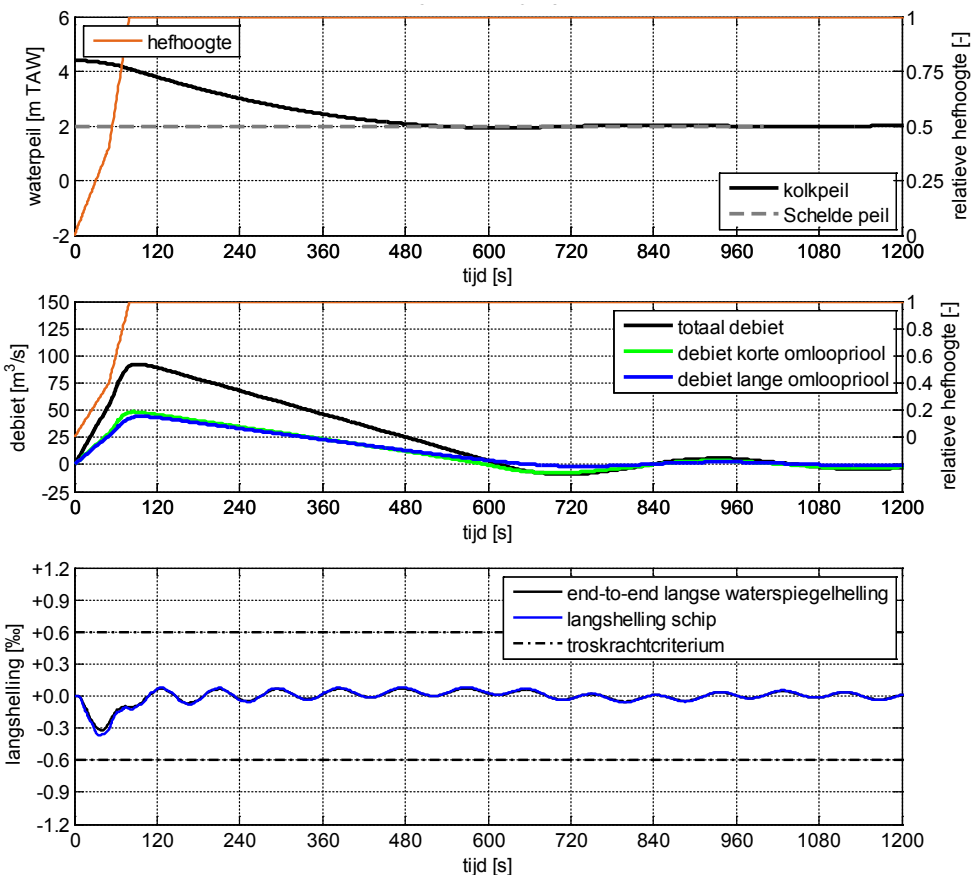
Figuur 85 – Simulatie N27



Figuur 86 – Simulatie N28

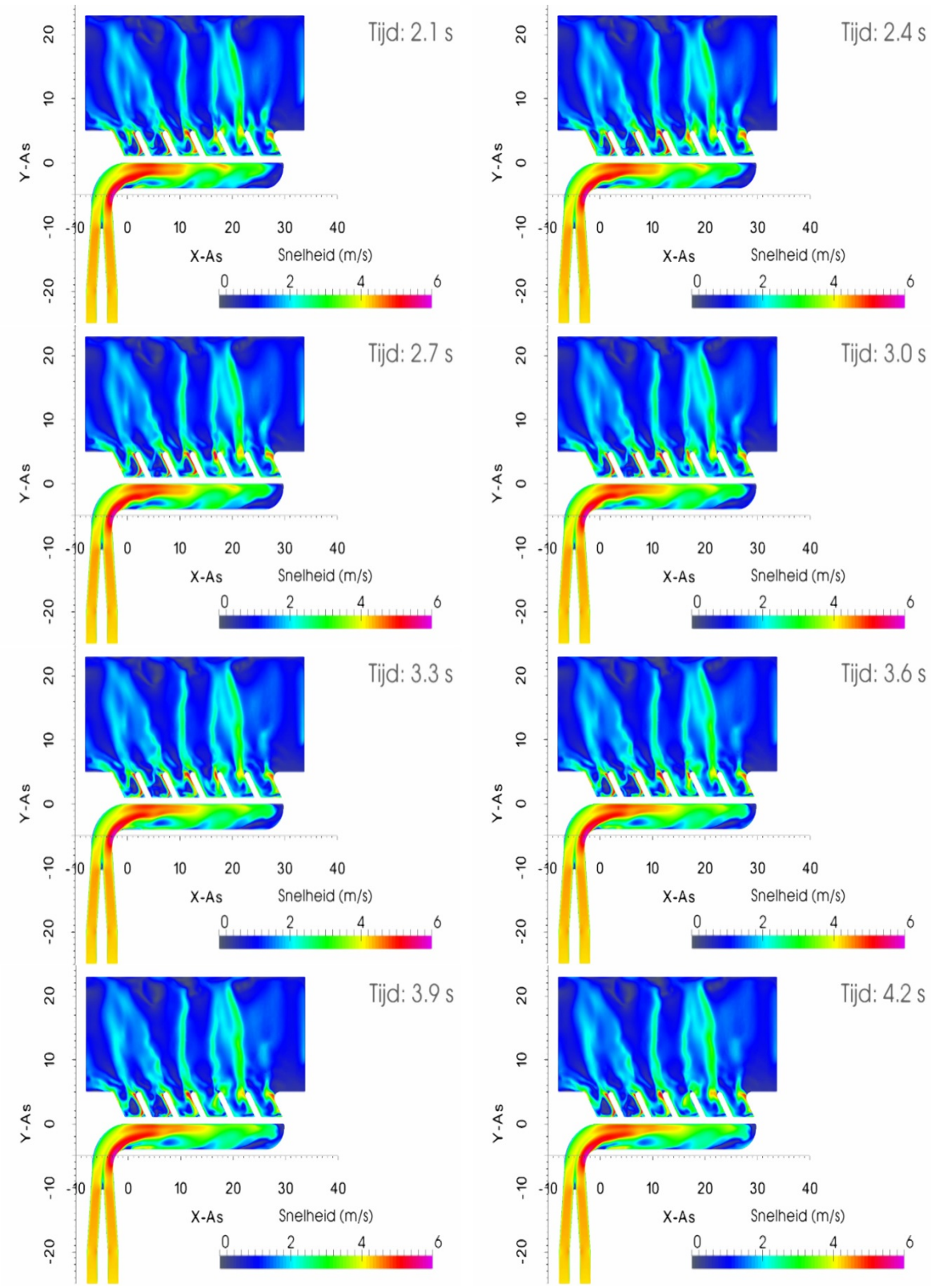


Figuur 87 – Simulatie N29

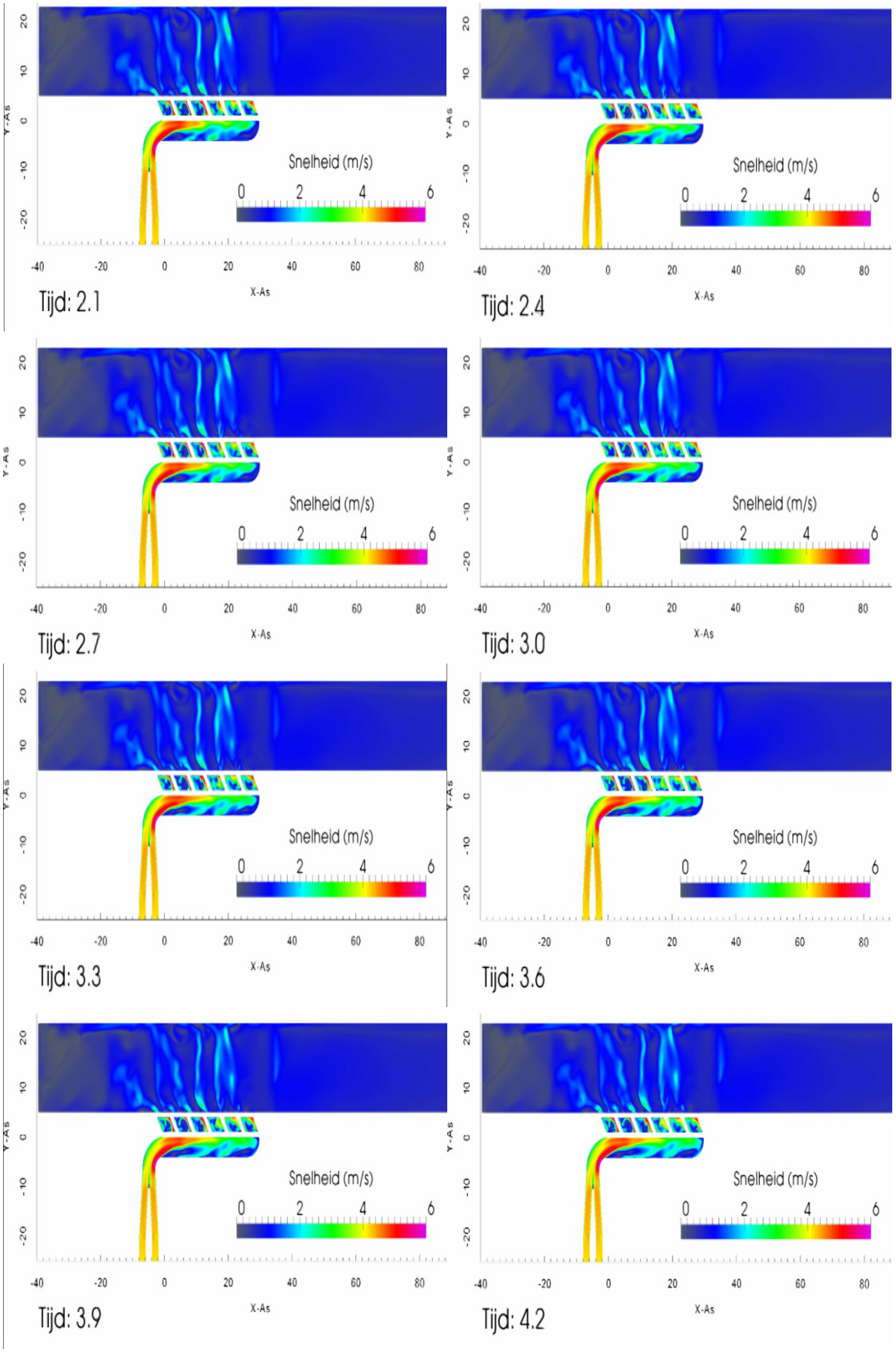


Bijlage C – Illustratie tijdsafhankelijke CFD simulatie

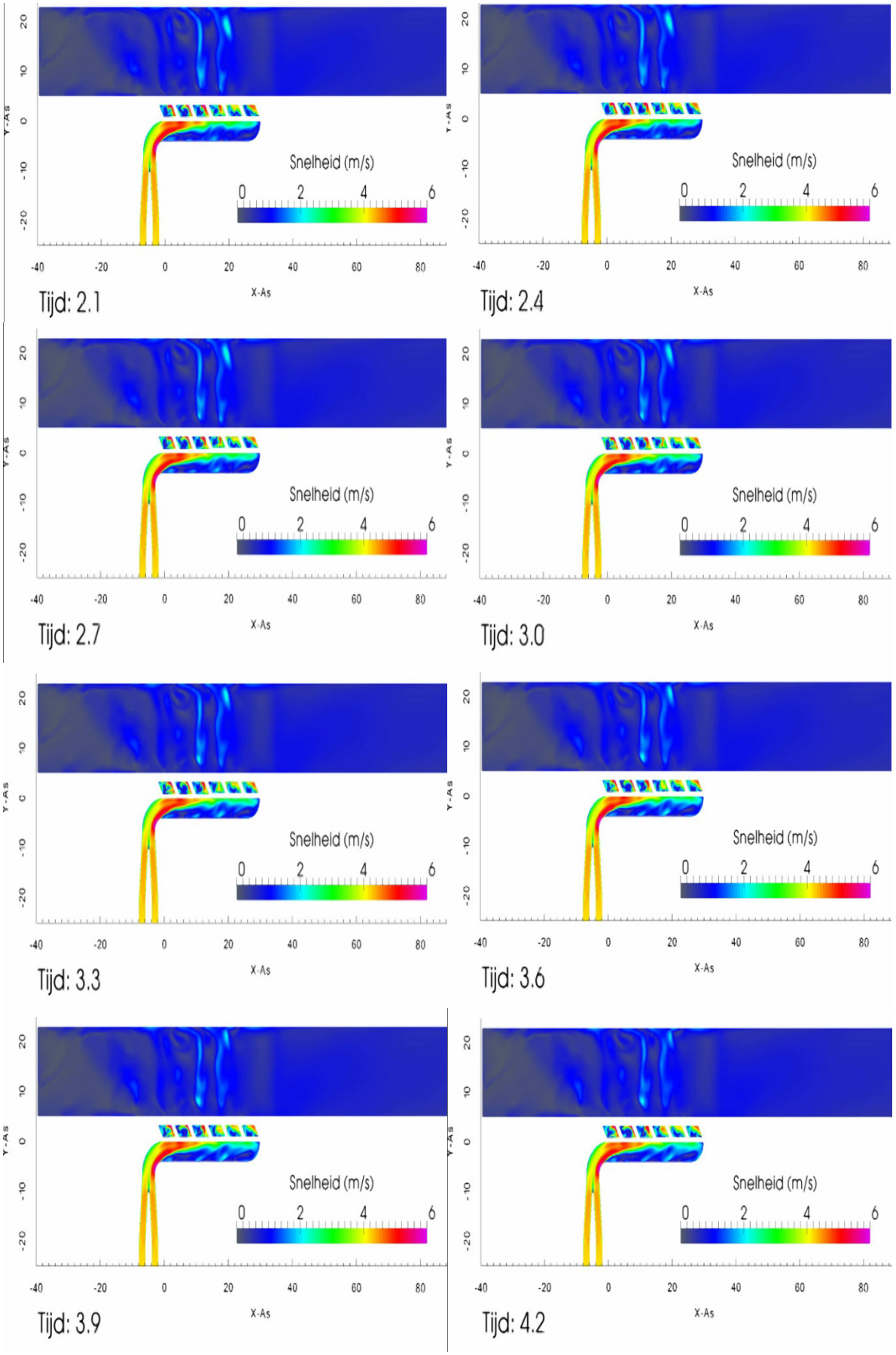
Snelheid op 0.75 m boven bodem:



Snelheid op 1.50 m boven bodem:



Snelheid op 2.50 m boven bodem:



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