



Vlaanderen
is wetenschap



19_039_1
WL rapporten

Haven van Antwerpen – Kieldrechtsluis

Validatie hydraulisch netwerkmodel
met betrekking tot overvullen en overledigen

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Haven Antwerpen - Kioldrechtsluis

Validatie hydraulisch netwerkmodel
met betrekking tot overvullen en overledigen

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

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2019
D/2019/3241/220

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2019). Haven Antwerpen - Kioldrechtsluis: Validatie hydraulisch netwerkmodel met betrekking tot overvullen en overledigen. Versie 4.0. WL Rapporten, 19_039_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2019R19_039_1
Keywords (3-5):	Maritime lock, measurements, filling, emptying, overtravel, hawser forces		
Tekst (p.):	17	Bijlagen (p.):	9
Vertrouwelijk:	☒ Ja	Vrijgegeven vanaf:	02/05/2022
		Uitzondering:	☒ Vlaamse overheid

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2019-10-08 14:50:41 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Kristof Verelst</i>
Projectleider:	Vercruysse, J.	Getekend door: Jeroen Vercruysse (Signature) Getekend op: 2019-10-11 07:37:48 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Jeroen Vercruysse</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-10-08 15:58:24 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	--

Abstract

Bij het vullen van een sluis met omloopriolen zal na het bereiken van het eindpeil, ten gevolge inertie, de kolk overvullen bij vullen respectievelijk overledigen bij ledigen. Na de eerste overvulling/overlediging treedt een uitdempend golfpatroon op waarbij het peil van de kolk fluctueert rond het eindpeil. Het openen van de roldeuren bij een restverval heeft enerzijds een mogelijk nadelige invloed op de duurzaamheid van de deur en kan anderzijds leiden tot het ontstaan van translatiegolven in de kolk met ongewenste krachten op de schepen tot gevolg.

Bij de ingebruikname van de Kieldrechtsluis, in de haven van Antwerpen, werd opgemerkt dat de deuren geopend worden met restverval. Het Waterbouwkundig Laboratorium heeft het hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis in de haven van Antwerpen. Om het overvullen/overledigen tijdens het openen van de deuren te kwantificeren werden in 2016 en 2017 metingen uitgevoerd. Bij het merendeel van de geregistreeerde nivelleringen werden de deuren geopend tijdens de eerste periode van overvulling/overlediging. Voor het valideren van het hydraulisch netwerkmodel van de Kieldrechtsluis op vlak van overvullen/overledigen zijn metingen nodig waarbij het overvullen/overledigen niet verstoord wordt. Tijdens een geplande onderhoudsperiode van de Kieldrechtsluis in april 2019 heeft HA tien testnivelleringen uitgevoerd met het oog op de validatie van het hydraulisch netwerkmodel op vlak van overvullen/overledigen. Deze reeks bevatte zowel eenzijdige nivelleringen als tweezijdige nivelleringen zowel met het bovenhoofd als met het benedenhoofd, waarbij de overvulling/overlediging niet verstoord werd. Dit rapport beschrijft de validatie van het hydraulisch netwerkmodel op vlak van overvullen/overledigen aan de hand van de in april 2019 uitgevoerde testnivelleringen.

Voorafgaand de validatie van het hydraulisch netwerkmodel op vlak van overvulling/overlediging werd een nieuwe kalibratie uitgevoerd van de hydraulische verliezen. Hiervoor werden de in april 2019 uitgevoerde eenzijdige nivelleringen gebruikt. Uit de kalibratie van het hydraulisch netwerkmodel volgde dat de verliezen voor vullen met het bovenhoofd toegenomen zijn ten opzichte van de in 2017 uitgevoerde kalibratie, o.b.v. de in 2017 opgemeten nivelleringen, en overeenstemmen met de verliezen uit het oorspronkelijk netwerkmodel gebruikt voor het hydraulisch ontwerp. Voor ledigen met het korte omloopriool van het benedenhoofd zijn de verschillen beperkt. De vastgestelde afwijking op de verliezen voor ledigen met het lange omloopriool van het benedenhoofd zijn mogelijks toe te schrijven aan het buiten dienst zijn van een hefschuif tijdens de in 2019 uitgevoerde testnivelleringen.

Met betrekking tot het simuleren van het overvullen/overledigen wordt opgemerkt dat de simulaties de piekwaarde van de eerste overvulling/overlediging overschatten. De overeenkomst tussen de metingen en de simulaties is beter voor overvullen dan voor overledigen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de overvulling groter is dan de overlediging waardoor de relatieve afwijking op de peilmeting en de relatieve invloed van niet meegenomen factoren in de simulaties afneemt.

Uit de analyse van het restverval volgt dat op het peil van de Waaslandhaven, Deurganckdok fluctuaties kunnen optreden die van dezelfde grootte zijn als de overvulling/overlediging. Voor de eenzijdige vulling met het lange omloopriool werd de grootste piekwaarde van 0.12 m opgemeten. Voor de overige eenzijdige nivelleringen bedraagt de piekwaarde tussen 0.05 m en 0.07 m. Voor de tweezijdige vulling via het bovenhoofd wordt een piekwaarde 0.09 m opgemeten. Voor de tweezijdige vulling met de aangepaste openingswet wordt deze piekwaarde gereduceerd tot 0.05 m. Bemerk dat deze analyse volgt uit slechts één meting de standaard openingswet en één meting met de aangepaste openingswet. Om de aangepaste openingswet voor het bovenhoofd te beoordelen dient een tijdreeks over meerdere dagen met de normale openingswet en een tijdreeks met de aangepaste openingswet opgenomen tijdens het normale gebruik van de sluis met verschillende sluisbedienaars vergeleken te worden.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Gegevens	2
2.1 Geometrie Kieldrechtsluis	2
2.2 Hydraulisch netwerkmodel	3
2.3 Uitgevoerde testnivellerings	5
3 Validatie overvullen/overledigen	7
3.1 Kalibratie.....	7
3.2 Validatie overvulling/overlediging.....	9
3.2.1 Eenzijdige nivellerings	9
3.2.2 Tweezijdige nivellerings met standaard openingswet.....	12
3.2.3 Tweezijdige nivellering met aangepaste openingswet	13
3.2.4 Afwijking op piekwaarde overvulling/overlediging	14
4 Conclusies	15
5 Referenties	17
Bijlage 1 Kalibratie verliescoëfficiënten	B1
5.1 Korte omloopriool	B2
5.1.1 Vullen.....	B2
5.1.2 Ledigen	B3
5.2 Lange omloopriool.....	B3
5.2.1 Vullen	B3
5.2.2 Ledigen	B4
Bijlage 2 Simulaties	B5

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Door HA uitgevoerde testnivelleringen	6
Tabel 2 – Kalibratie verliezen uitstroomconstructie	8
Tabel 3 – Toegepaste verliezen uitstroomconstructie o.b.v. kalibratie 2019	9
Tabel 4 – Vergelijking opgemeten en gesimuleerde piekwaarde overvulling/overlediging	14

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Illustratie nivelleersysteem Kieldrechtsluis	2
Figuur 2 – Hydraulisch netwerkmodel Benedenhoofd Kieldrechtsluis	4
Figuur 3 – Validatie overvulling/overlediging – eenzijdige nivelleringen met korte omloopriool.....	10
Figuur 4 – Validatie overvulling/overlediging – eenzijdige nivelleringen met lange omloopriool.....	10
Figuur 5 – Validatie overvulling/overlediging – eenzijdige nivelleringen met korte omloopriool – invloed dokpeil	11
Figuur 6 – Validatie overvulling/overlediging – vullen bovenhoofd met standaard openingswet	12
Figuur 7 – Validatie overvulling/overlediging – ledigen benedenhoofd met standaard openingswet.....	12
Figuur 8 – Validatie overvulling/overlediging – vullen bovenhoofd met aangepaste openingswet.....	13

1 Inleiding

De Kieldrechtsluis, gelegen op de linkeroever in de haven van Antwerpen, verbindt de Waaslandhaven met het Deurganckdok. De sluis heeft een lengte 500 m, een breedte 68 m en een bodempeil op -17.8 m TAW. Het niveleersysteem is gebaseerd op dat van de Berendrechtsluis. Zowel in het bovenhoofd als in het benedenhoofd worden korte omloopriolen, i.e. een afzonderlijk stelsel omloopriolen voor het bovenhoofd en het benedenhoofd, toegepast. De sluis heeft per hoofd 2 deuren van het type roldeur. De Kieldrechtsluis werd in juni 2016 door het Havenbedrijf Antwerpen (HA) in gebruik genomen. Na de ingebruikname van de Kieldrechtsluis werd opgemerkt dat de deuren geopend worden met restverval. Door de inertie van het water in de omloopriolen staat het water niet stil op het ogenblik dat het eindpeil de eerste keer bereikt wordt. Om dit overvullen respectievelijk overledigen te onderzoeken heeft het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) op vraag van afdeling Maritieme Toegang (aMT) in het verleden volgende twee adviezen uitgevoerd:

In kader van het eerste advies heeft WL op 19/10/2016 en 20/10/2016 een meetcampagne uitgevoerd in de Kieldrechtsluis. Uit deze metingen volgde dat bij het merendeel van de opgemeten nivelleringsdeuren geopend werden tijdens de eerste periode van overvullen respectievelijk overledigen. Een opgemeten vulling via het bovenhoofd en een lediging via het benedenhoofd werden gesimuleerd met het in het kader van het ontwerp van de Kieldrechtsluis opgestelde hydraulisch netwerkmodel (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a). Uit de simulatie volgde voor ledigen een goede overeenkomst met de nivelleerkromme. Voor vullen overschatte het hydraulisch netwerkmodel de werkelijke hydraulische ladingsverliezen waardoor de gesimuleerde nivelleerkromme naliep op de opgemeten nivelleerkromme. Deze studie werd gerapporteerd in Vercruysse *et al.* (2017b).

In kader van een tweede advies werden door HA op 30/03/2017 een reeks testnivelleringscampagnes uitgevoerd. Deze bestonden uit eenzijdige nivelleringscampagnes en tweezijdige nivelleringscampagnes. Door onvoorziene omstandigheden moest de proevenreeks ingekort worden waardoor de metingen slechts in beperkte mate gebruikt konden worden voor validatie van het hydraulisch netwerkmodel op vlak van overvullen en overledigen. Op basis van de eenzijdige nivelleringscampagnes werd een kalibratie uitgevoerd van de ladingsverliezen van het hydraulisch netwerkmodel. Door middel van het uitvoeren van simulaties met dit hydraulisch netwerkmodel werden vervolgens alternatieve openingswetten opgesteld waarbij door het sluiten van hefschuiven naar het einde van de nivellering toe getracht werd om een optimale combinatie te vinden tussen reductie van de overvulling/overlediging en toename van de nivelleertijd. Deze studie werd gerapporteerd in Vercruysse *et al.* (2017a). Op basis van deze simulaties werd door HA een openingswet weerhouden waarbij de hefschuiven in het lange omloopriool gesloten worden op het ogenblik dat het restverval tussen het kolkpeil en eindpeil 0.35 m bedraagt. Omdat het voor de sturing van de hefschuiven niet wenselijk is dat een beweging onderbroken wordt, wordt de aangepaste openingswet niet toegepast bij een initieel peilverschil kleiner dan 1.0 m.

Dit advies behandelt de validatie van het hydraulisch netwerkmodel op vlak van overvullen en overledigen gebruik makend van nieuwe testnivelleringscampagnes. Door geplande werkzaamheden was de Kieldrechtsluis in april 2019 langere tijd buiten dienst. Op 23/04/2019 heeft HA een reeks testnivelleringscampagnes uitgevoerd. Hierbij werden zowel eenzijdige als tweezijdige nivelleringscampagnes uitgevoerd waarbij geruime tijd gewacht wordt voor het openen van de roldeuren en sluiten van de hefschuiven.

Het advies is als volgt opgebouwd. De geometrie van de Kieldrechtsluis, het gebruikte hydraulisch netwerkmodel en de uitgevoerde testnivelleringscampagnes worden besproken in hoofdstuk 2. De herkalibratie van de ladingsverliezen van het hydraulisch netwerkmodel en vervolgens de validatie van het hydraulisch netwerkmodel op vlak van overvulling/overlediging wordt behandeld in hoofdstuk 3. De conclusies worden geformuleerd in hoofdstuk 4.

2 Gegevens

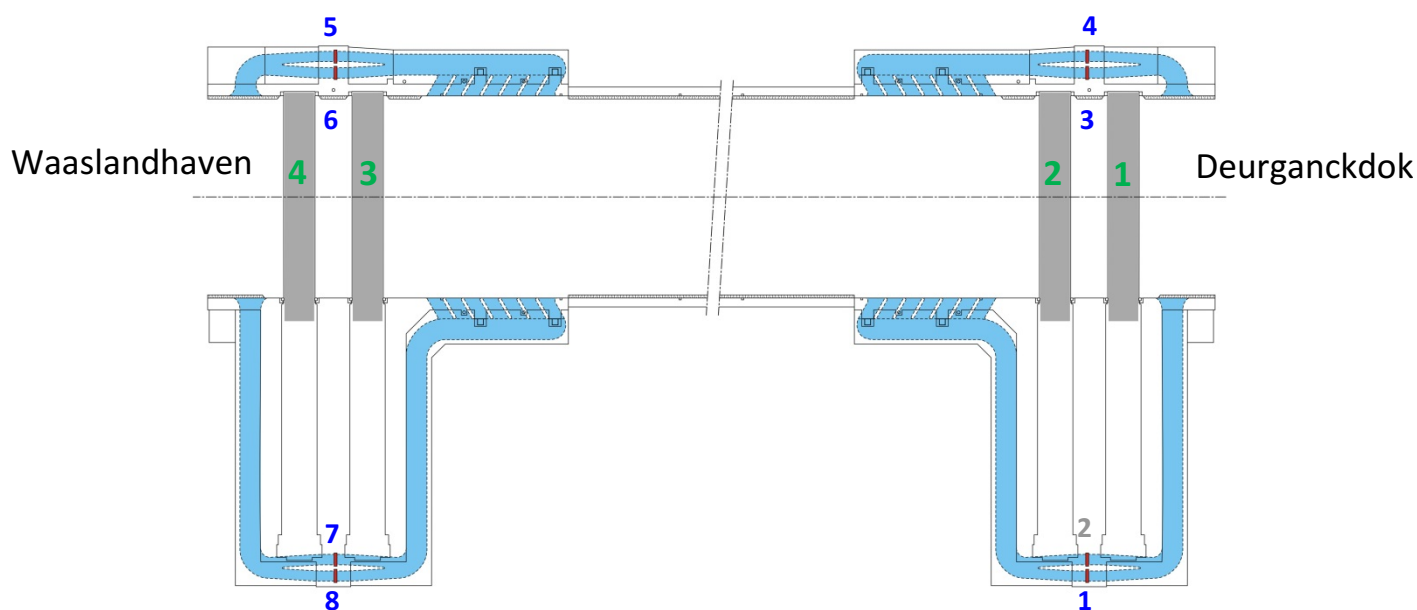
De geometrie van de Kieldrechtsluis wordt beschreven in paragraaf 2.1. In het kader van het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld, zie paragraaf 2.2. De op 23/04/2019 uitgevoerde testnivelleringsen worden beschreven in paragraaf 2.3.

Bemerk dat paragrafen 2.1 en 2.2 overgenomen zijn uit rapport Vercruysse *et al.* (2017a).

2.1 Geometrie Kieldrechtsluis

De Kieldrechtsluis verbindt de Waaslandhaven (streefpeil +3.50 m TAW) met het Deurganckdok (peil afhankelijk van het getijde). De sluis heeft een lengte tussen de buitenste roldeuren van 500 m en een kolkbreedte van 68 m. Het bodempeil van de kolk ligt op -17.8 m TAW. Een illustratie van het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis wordt gegeven in Figuur 1. Het nivelleren van de sluis kolk via het bovenhoofd respectievelijk het benedenhoofd gebeurt door middel van een nivelleersysteem met korte omloopriolen (sectie 7.0 m x 7.0 m). Op een verschil in peil van de inlaat aan dok, respectievelijk Deurganckdok na is het nivelleersysteem van het bovenhoofd (zijde Waaslandhaven) en het benedenhoofd (zijde Deurganckdok) identiek. Bemerk dat aan de zijde van de roldeuren de omloopriolen omheen de deuren worden geleid waardoor de omloopriolen een verschil in lengte hebben. In het vervolg van dit rapport wordt de term lange omloopriool gebruikt voor de omloopriool die omheen de deurkamers loopt en korte omloopriool voor de omloopriool die niet omheen de deurkamers loopt. Dit is in tegenstelling met de literatuur waar de term lange omloopriool gebruikt wordt voor een nivelleersysteem waarbij de riolen van het boven- en benedenhoofd verbonden zijn. Ter hoogte van de schuiven wordt het riool gesplitst in twee. De uitstroming in de kolk gebeurt door middel van een uitstroomconstructie die als doel heeft de uitgaande stroming te spreiden en loodrecht op de kolk-as te richten. Figuur 1 bevat de door HA gehanteerde nummering van de schuiven en deuren. Deze nummering wordt overgenomen in dit rapport. Voor meer details over het nivelleersysteem wordt onder andere verwezen naar de WL-rapporten opgesteld in het kader van het ontwerp van de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2007, 2008, 2010a; b; De Mulder & Vercruysse, 2007).

Figuur 1 – Illustratie nivelleersysteem Kieldrechtsluis



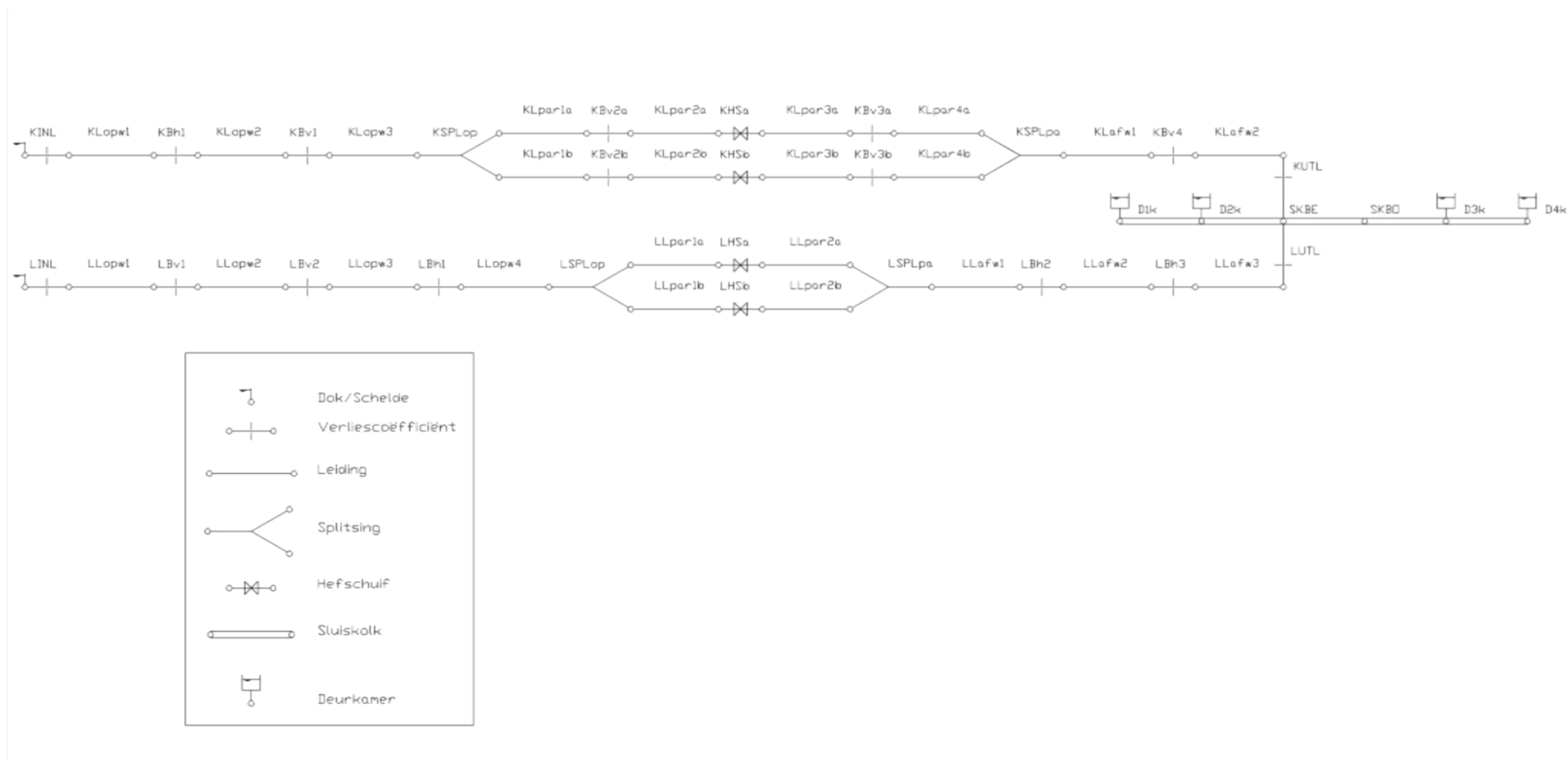
Nummeringen deuren: groen, nummering hefschuiven in dienst: blauw, nummering hefschuif buiten dienst (23/04/2019): grijs

2.2 Hydraulisch netwerkmodel

In het kader van het ontwerp van de Kieldrechtsluis werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld (De Mulder *et al.*, 2007, 2010a). Het schema van dit hydraulisch netwerkmodel wordt gegeven in Figuur 2. Dit hydraulisch netwerkmodel wordt gesimuleerd met het programma LOCKSIM¹ (Schohl G.A., 1998). Het hydraulisch netwerkmodel van de sluis bestaat uit een combinatie van leiding componenten, lokale verliescomponenten en componenten met vrij wateroppervlak. De algemene leiding componenten bevatten de verliezen ten gevolge van wandwrijving en de invloed van de massatraagheid van het water in de omloopriolen. De lokale verliescomponenten bevatten de lokale hydraulische verliezen (inlaat, hefschuif, bochten, splitsing en samenvoeging en uitstroomconstructie). Voor de ladingsverliezen van de inlaat, bochten en hefschuif zijn waarden uit de literatuur gebruikt. Voor de splitsings- en samenvoegingsverliezen zijn de default verliezen uit LOCKSIM toegepast. De verliezen ten gevolge van wandruwheid worden in LOCKSIM berekend door middel van een expliciete benadering van de White-Colebrook formulering. Door de complexiteit van de uitstroomconstructie kon hier geen waarde uit de literatuur toegepast worden. Voor het bepalen van de verliezen van de uitstroomconstructie werden metingen uitgevoerd in de Berendrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2008; De Mulder & Vercruysse, 2007). Op een aantal bochten in het verticaal vlak na is het nivelleersysteem van de Berendrechtsluis identiek aan het nivelleersysteem van de Kieldrechtsluis. Van de Berendrechtsluis werd een soortgelijk hydraulisch netwerkmodel opgesteld. De verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie van de Berendrechtsluis werd vervolgens gekalibreerd door middel van opgemeten éénzijdige vullingen en ledigingen. Door eenzijdige nivellerings te gebruiken kunnen de verliezen van de uitstroomconstructie voor het lange en korte omloopriool afzonderlijk gekalibreerd worden. Door het op deze wijze kalibreren van de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie wordt de onder- en overschatting van de overige bijzondere en de algemene ladingsverliezen verdisconteerd in de verliezen van de uitstroomconstructie. De op deze wijze bekomen verliezen van de uitstroomconstructie van de Berendrechtsluis zijn vervolgens overgenomen in het hydraulisch netwerkmodel gebruikt voor het ontwerp van de Kieldrechtsluis.

¹ Het programma LOCKSIM werd ter beschikking gesteld van het WL door de ontwikkelaar Dr. G. Schohl (Tennessee Valley Authority, USA). LOCKSIM wordt courant gebruikt voor sluismodellering door de USACE (U.S. Army Corps of Engineers). Voor deze studie werd LOCKSIM v 1.21 gebruikt. Dit betreft dezelfde versie van LOCKSIM als gebruikt in De Mulder *et al.*, (2010a; b).

Figuur 2 – Hydraulisch netwerkmodel Benedenhoofd Kieldrechtsluis



Bron: De Mulder *et al.* (2007)

2.3 Uitgevoerde testnivelleringsen

WL heeft in 2016 een terreinmeting uitgevoerd in de Kieldrechtsluis (Vercruysse *et al.*, 2017b). Hierbij werden Divers² gebruikt om het waterpeil op 6 plaatsen in de sluisolk en aan zijde Deurganckdok en Waaslandhaven op te meten. Deze metingen werden vergeleken met de door HA uitgevoerde peilmetingen in de kolk en aan zijde Waaslandhaven en zijde Deurganckdok. Uit de vergelijking volgde dat de door HA uitgevoerde peilmetingen bruikbaar zijn voor het karakteriseren van het nivelleren van het kolkpeil en voor het karakteriseren van de overvulling en overlediging. Hierom werd besloten om voor de in 2017 en de in 2019 uitgevoerde testnivelleringsen gebruik te maken van de door HA geregistreerde peilen.

In april 2019 was de Kieldrechtsluis gedurende langere periode buiten dienst voor werkzaamheden. De testnivelleringsen werden allen uitgevoerd bij een Scheldepeil lager dan het peil in de Waaslandhaven, waardoor met het bovenhoofd enkel gevuld wordt en met het benedenhoofd enkel geledigd wordt. Om een maximaal aantal nivelleringsen te kunnen uitvoeren werd een dag gekozen met springtij waarbij het laagwater optrad rond de middag. In overleg met HA werd gekozen om de metingen uit te voeren op 23/04/2019. De uitgevoerde testnivelleringsen worden gegeven in Tabel 1. Deze nivelleringsen werden alle uitgevoerd met deurcombinatie 23. Dit betreffen de binnenste deuren. Door een symmetrische deurcombinatie te gebruiken wordt de peilmeting van HA in het centrum van de kolk uitgevoerd waardoor deze niet beïnvloed wordt door translatiegolven in de kolk. Tijdens de testnivelleringsen waren alle schuiven in het bovenhoofd in dienst, in het benedenhoofd was schuif nr. 2 in het lange omloopriool buiten dienst. Bij nivellering nr. 6 werd de aangepaste openingswet toegepast, i.e. de schuiven in het lange omloopriool worden gesloten vanaf het ogenblik dat het resterval tussen het kolkpeil en het eindpeil 0.35 m bedraagt. Voor de overige nivelleringsen werd steeds de standaard openingswet toegepast waarbij de schuiven open blijven. De roldeuren worden niet geopend tijdens de testnivelleringsen, met uitzondering van een kortstondige opening om te controleren of er geen verschil optreedt tussen het kolkpeil en het peil in de Waaslandhaven respectievelijk het Deurganckdok. De schuiven worden pas gesloten wanneer overgegaan wordt naar de volgende testnivellering.

² Autonoom loggende druksensoren type CTD Divers producent Schlumberger.

Tabel 1 – Door HA uitgevoerde testnivellerings

nr.	startijdstip	hoofd	gebruikte schuiven		openings-wet	startpeil	eindpeil	nivelleertijd
			kort	lang				
[-]	[uu:mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m TAW]	[m TAW]	[s]
1	09:55	BE	34	1	standaard	3.57	2.88	373
2	10:21	BO	56	/	standaard	2.54	3.55	521
3	11:10	BE	34	1	standaard	3.55	1.42	647
4	11:42	BO	56	/	standaard	1.16	3.54	798
5	12:39	BE	/	1	standaard	3.54	0.07	1716
6	14:01	BO	56	78	aangepast	-0.12	3.49	571
7	14:36	BE	34	/	standaard	3.51	1.00	960
8	16:00	BO	/	78	standaard	1.53	3.50	875
9	16:26	BE	34	1	standaard	3.47	2.41	403
10	16:55	BO	56	78	standaard	2.73	3.48	269

BO = BOvenhoofd / BE = BEnedenhoofd

/ geen schuiven gebruikt in de betreffende riool

Door HA worden volgende gegevens aangereikt:

- peilmeting kolk, Deurganckdok en Waaslandhaven,
- positie schuiven,
- positie deuren.

Op deze meetgegevens wordt volgende verwerking doorgevoerd:

- Berekening van het debiet door de omloopriolen uit de variatie van het kolkpeil in de tijd en het kolkoppervlak ($S = 32994 \text{ m}^2$ bij deurcombinatie 23 (De Mulder *et al.*, 2010b)). Om kleine fluctuaties op de peilmeting uit te dempen wordt hiervoor eerst een zwevend gemiddelde over 15 s op het kolkpeil toegepast.
- De schuiven openen tot 7.7 m. Omdat de rioolhoogte beperkt is tot 7.0 m wordt voor de simulaties de openingswet beperkt tot een rioolhoogte 7.0 m bereikt wordt.
- Berekening van het restverval. Het tijdstap waarop het restverval de eerste keer doorheen nul gaat wordt gebruikt om het einde van de nivellering en het begin van de overvulling/overlediging te bepalen.
- Bepalen van de globale verliescoëfficiënt volgens volgende formule: $\xi_T = \Delta H \cdot \frac{2gA^2}{Q^2}$, met ξ_T = globale verliescoëfficiënt [-], ΔH = restverval [m], g = zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s^2 , A = rioolsectie = $24.5 \text{ m}^2 \times \# \text{ hefschuiven in gebruik [m}^2]$, Q debiet volgend uit variatie kolkpeil en kolkoppervlak [m^3/s]. Bemerk dat deze formule geen rekening houdt met de bijkomende verliezen wanneer de hefschuiven nog niet volledig geopend zijn. Omdat geen rekening gehouden wordt met inertie in de omloopriolen worden de verliezen overschat bij het versnellen van water en onderschat bij het vertragen van het water in de riool.
- Voor het eindpeil in de simulaties met het hydraulisch netwerkmodel wordt een tijdreeks van het opgemeten eindpeil met stapgrootte 10 s ingegeven. Hiervoor wordt op het opgemeten peil van de Waaslandhaven respectievelijk Deurganckdok een zwevend gemiddelde over 10 s toegepast waarna de waarden op een veelvoud van 10 s weggeschreven worden.

3 Validatie overvullen/overledigen

Voorafgaand de validatie van het hydraulisch netwerkmodel voor overvullen/overledigen wordt een nieuwe kalibratie van de hydraulische verliezen uitgevoerd. Deze wordt beschreven in paragraaf 3.1. Vervolgens wordt in paragraaf 3.2 een validatie uitgevoerd van de overvulling/overlediging.

3.1 Kalibratie

Uit een eerste snelle validatie van de testnivellerings met het in 2017 gekalibreerde hydraulisch netwerkmodel volgde dat de verliezen voor vullen onderschat werden. Hierop werd besloten om een nieuwe kalibratie uit te voeren. Voor de kalibratie van de verliezen in positieve en negatieve stroomrichting worden volgende eenzijdige nivellerings gebruikt:

- Korte omloopriool:
 - o positieve stroomrichting (vullen): nivellering nr. 2 en nr. 4,
 - o negatieve stroomrichting (ledigen): nivellering nr. 7.
- Lange omloopriool:
 - o positieve stroomrichting (vullen): nivellering nr. 8,
 - o negatieve stroomrichting (ledigen): nivellering nr. 5.

Bemerk hierbij dat voor het kalibreren van de verliezen voor het lange omloopriool in de negatieve stroomrichting een schutting gebruikt wordt met slechts één hefschuif in dienst (nivellering nr. 5). Het kalibreren van de verliezen op een simulatie met slechts één schuif in dienst is mogelijk niet representatief voor de normale conditie omwille van volgende redenen:

- Ter hoogte van de buiten dienst zijnde schuif is de stroomsectie beperkt tot 24.5 m². Na de splitsing wordt de stroming terug uitgespreid over de volledige rioolsectie 49 m². Het uitspreiden van de stroming naar de volledige sectie leidt tot bijkomende verliezen die slechts benaderend worden meegenomen in het hydraulisch netwerkmodel.
- Om een gegeven correctie op het ladingsverlies ter hoogte van de vernauwde sectie door te voeren dient een 4 keer hogere correctie toegepast te worden op de verliescoëfficiënt van de uitstroomconstructie:

$$\Delta H = \Delta \xi_{HS} \cdot \frac{Q^2}{2g \left(\frac{A}{2}\right)^2} = \Delta \xi_{Uitsr} \cdot \frac{Q^2}{2g(A)^2} \Rightarrow \Delta \xi_{Uitsr} = 4 * \Delta \xi_{HS}$$

Voor de kalibratie van het hydraulisch netwerkmodel wordt de globale verliescoëfficiënt van de simulatie vergeleken met deze uit de beschouwde terreinmetingen. In bijlage 1 wordt voor de eenzijdige nivellerings de vergelijking gegeven tussen het hydraulisch netwerkmodel na kalibratie en de metingen. De na kalibratie toegepaste verliescoëfficiënt op de uitstroomconstructie wordt gegeven in Tabel 2. Bemerk dat in deze tabel ook de verliezen van de uitstroomconstructie uit het hydraulisch netwerkmodel gegeven worden voor het ontwerp van de Kieldrechtsluis (De Mulder *et al.*, 2010b) en deze volgend uit de in 2017 uitgevoerde kalibratie (Vercruysse *et al.*, 2017a).

Tabel 2 – Kalibratie verliezen uitstroomconstructie

	korte omloopriool			lange omloopriool		
	vòòr kalibratie	kalibratie 2017	Kalibratie 2019	vòòr kalibratie	kalibratie 2017	Kalibratie 2019
positieve stroomrichting (vullen)	1.7	0.8	1.6	2.6	1.3	2.8
negatieve stroomrichting (ledigen)	3.1	2.7	3.2	2.2	2.2	3.4*

* Op basis van een nivellering met slechts één hefschuif in dienst.

Uit Tabel 2 volgt dat voor de positieve stroomrichting de verliezen van de uitstroomconstructie quasi gelijk zijn met het model dat gebruikt werd voor het hydraulisch ontwerp van de Kieldrechtsluis. Ten opzichte van de in 2017 uitgevoerde kalibratie zijn de verliezen toegenomen. Voor de negatieve stroomrichting is het verlies van de uitstroomconstructie in het korte omloopriool quasi gelijk met het verlies vòòr kalibratie en beperkt hoger ten opzichte van de in 2017 uitgevoerde kalibratie. Voor het lange omloopriool is er wel een aanzienlijke toename van de verliescoëfficiënt voor de negatieve stroomrichting. Dit is mogelijk te verklaren door het buiten dienst zijn van één hefschuif op de dag van de meting. De verliescoëfficiënt van het lange omloopriool in negatieve stroomrichting vòòr kalibratie is gelijk aan deze volgend uit de in 2017 uitgevoerde kalibratie.

Bij het simuleren van een in 2016 opgemeten vulling en lediging met het hydraulisch netwerkmodel gebruikt voor het ontwerp van de sluis werd opgemerkt dat voor vullen de verliezen overschat werden terwijl voor ledigen de overeenkomst goed was (Vercruysse *et al.*, 2017b). Deze vaststelling ligt in lijn met de in 2017 doorgevoerde aanpassing aan de verliezen van de uitstroomconstructie. Een verklaring voor de toename van de hydraulische verliezen tussen 2016/2017 en 2019 werd niet gevonden. Doordat het verschil enkel bij vullen met het bovenhoofd is waargenomen is het weinig waarschijnlijk dat de oorzaak te wijten is aan het toepassen van een foutieve deurcombinatie in de simulaties. Aanbevolen wordt om ook ledigen bovenhoofd en vullen benedenhoofd te analyseren. Op deze wijze kan achterhaald worden of de toename van de hydraulische verliezen zich ook voordoet bij ledigen bovenhoofd of bij vullen benedenhoofd.

Voor het hydraulisch netwerkmodel worden de verliescoëfficiënten uit Tabel 3 toegepast. Omwille van de mogelijke afwijking door het kalibreren van het hydraulisch netwerkmodel bij één hefschuif buiten dienst wordt gekozen om voor het lange omloopriool in het bovenhoofd voor de negatieve stroomrichting de verliescoëfficiënt volgend uit de in 2017 uitgevoerde kalibratie te behouden. Bij toekomstige simulaties met dit hydraulisch netwerkmodel van het benedenhoofd met beide schuiven in dienst wordt aangeraden om ook in de negatieve stroomrichting voor het lange omloopriool de verliescoëfficiënt volgend uit de in 2017 uitgevoerde kalibratie over te nemen.

Tabel 3 – Toegepaste verliezen uitstroomconstructie o.b.v. kalibratie 2019

hoofd	stroomrichting	verliescoëfficiënt omloopriool ξ_{uitstr}	
		kort	lang
bovenhoofd	positief	1.6	2.8
	negatief	3.2	2.2
benedenhoofd	positief	1.6	2.8
	negatief	3.2	3.4*

* Bij het buiten dienst zijn van één hefschuif. Bij het in dienst zijn van beide hefschuiven $\xi_{uitstr}=2.2$

3.2 Validatie overvulling/overlediging

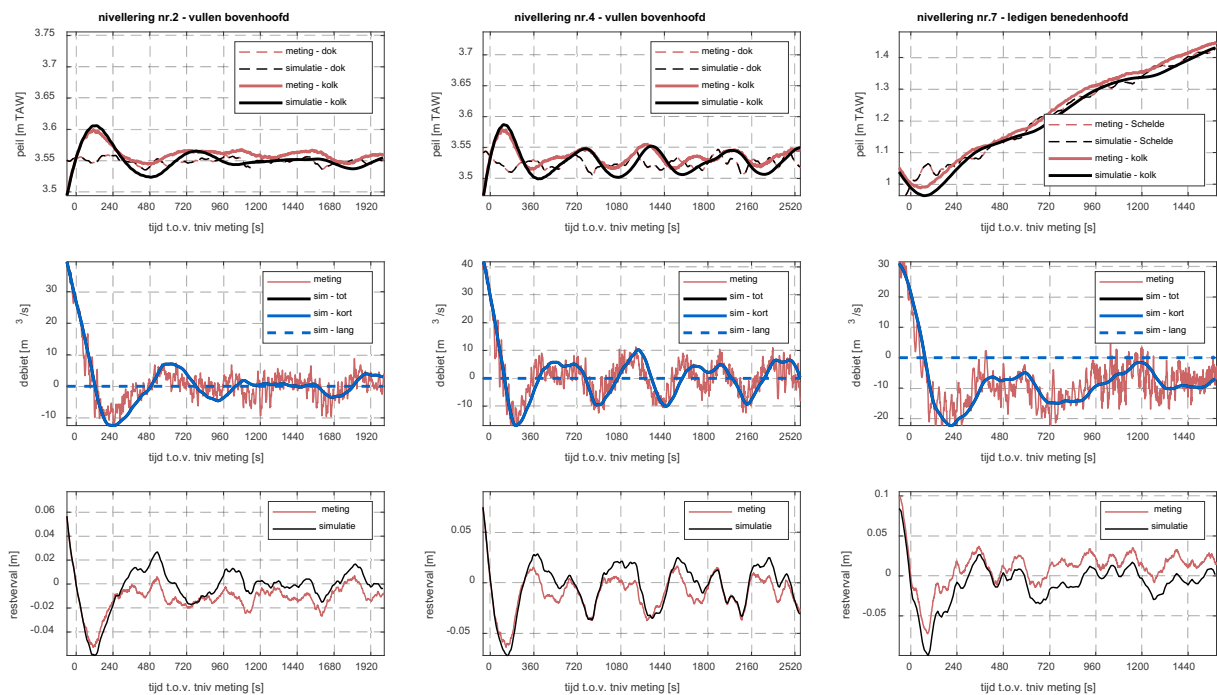
Na het herkalibreren van de verliezen van het hydraulisch netwerkmodel wordt in deze paragraaf een validatie uitgevoerd van de gesimuleerde overvullingen/overledigingen. Achtereenvolgens wordt een validatie uitgevoerd van de eenzijdige nivelleringen (paragraaf 3.2.1), de tweezijdige nivelleringen met standaard openingswet (paragraaf 3.2.2) en de tweezijdige nivellering met aangepaste openingswet (paragraaf 3.2.3). Tot slot wordt voor de metingen en simulaties de piekwaarde van het restverval tijdens de eerste overvulling/overlediging vergeleken (paragraaf 3.2.4).

De vergelijking in dit hoofdstuk is beperkt tot overvulling/overlediging. In Bijlage 2 worden uitgebreide figuren gegeven waarbij ook het vullen/ledigen van de kolk vergeleken wordt. Voor de figuren van overvulling/overlediging wordt de tijd-as zo gedefinieerd dat 0 s overeenkomt met het tijdstip dat het opgemeten restverval de eerste keer doorheen nul gaat. Doordat na de herkalibratie de opgemeten en gesimuleerde nivelleerkromme vrijwel samenvallen wordt voor de gesimuleerde overvulling/overlediging hetzelfde, uit metingen, afgeleide tijdstip gebruikt voor het verschuiven van de tijd-as.

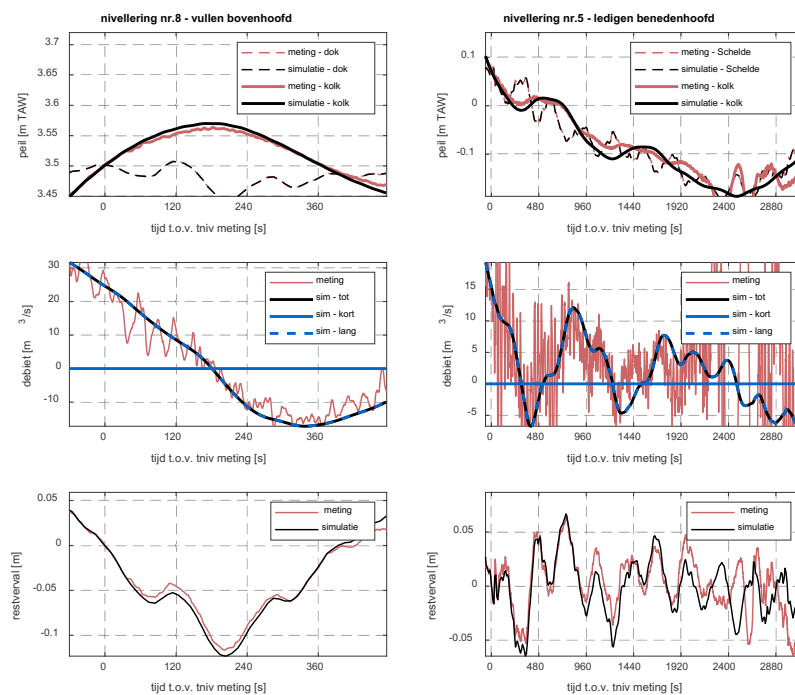
3.2.1 Eenzijdige nivelleringen

De overvulling/overlediging voor de eenzijdige nivelleringen worden vergeleken in Figuur 3 voor het korte omloopriool en in Figuur 4 voor het lange omloopriool. Bemerkt in de figuren dat zowel het peil in de Waaslandhaven als het peil in het Deurganckdok gekenmerkt worden door fluctuaties. Het opgemeten peil tegen 2 Hz wordt in de simulaties benaderd door een zwevend gemiddelde van het opgemeten peil met tijdstap 10 s.

Figuur 3 – Validatie overvulling/overlediging – eenzijdige nivelleringen met korte omloopriool



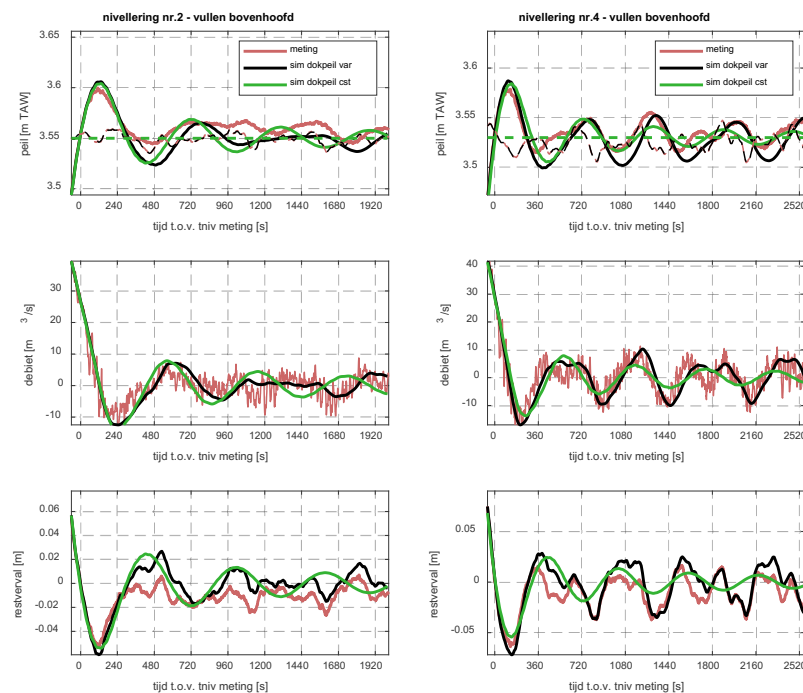
Figuur 4 – Validatie overvulling/overlediging – eenzijdige nivelleringen met lange omloopriool



Bemerk uit Figuur 3 en Figuur 4 dat er een goede overeenkomst is tussen het numeriek model en de metingen voor de piekwaarde van de eerste overvulling bij nivelleren met het korte en nivelleren met het lange omloopriool en de piekwaarde van de eerste overlediging bij nivelleren met het lange omloopriool. Bij nivelleren met het korte omloopriool wordt opgemerkt dat de piekwaarde van de eerste overlediging uit de terreinmeting wat overschat wordt door het numeriek model. Hierbij dient ook opgemerkt te worden dat de grootte van de overvulling/overlediging relatief beperkt is waardoor een beperkte afwijking van 1 à 2 centimeter op het opgemeten restverval al aanzienlijk is. Bij vullen, respectievelijk ledigen met het korte omloopriool lijkt het restverval volgend uit de metingen een negatieve, respectievelijk positieve, offset van 1 - 2 cm te vertonen. Bij de nivelleringen met het lange omloopriool treedt bij ledigen geen waarneembare offset op het restverval op en voor vullen is de opgemeten periode te kort om na te gaan of er mogelijk een offset optreedt. Voor de nivelleringen waarbij een duidelijk sinusoidaal patroon opgemeten werd (meting nr. 4 en nr. 5) is er ook op vlak van periode een vrije goede overeenkomst tussen de metingen en simulaties. Voor nivellering nr. 5 wordt het restverval in belangrijke mate bepaald door de fluctuaties van het eindpeil. Het overnemen van het eindpeil in de simulaties verklaart hier ook de goede overeenkomst op vlak van debiet en restverval.

Om de invloed van het fluctuerende eindpeil op de resultaten na te gaan worden de eenzijdige vullingen met korte omloopriool (meting nr. 2 en nr.4) opnieuw uitgevoerd met een constant dokpeil, zie Figuur 5. Hieruit volgt dat de invloed van het al dan niet meenemen van een variabel dokpeil beperkt is op de eerste piekwaarde van het kolkpeil, debiet en restverval. Op het hierop volgende verloop van overvullingen en ondervullingen is er merkbaar meer verschil, zowel wat amplitude als periode betreft.

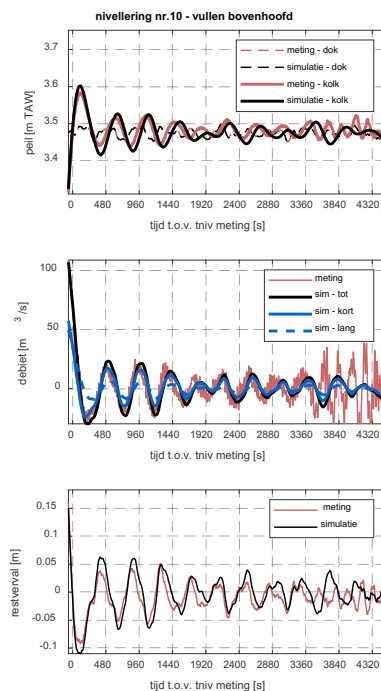
Figuur 5 – Validatie overvulling/overlediging – eenzijdige nivelleringen met korte omloopriool – invloed dokpeil



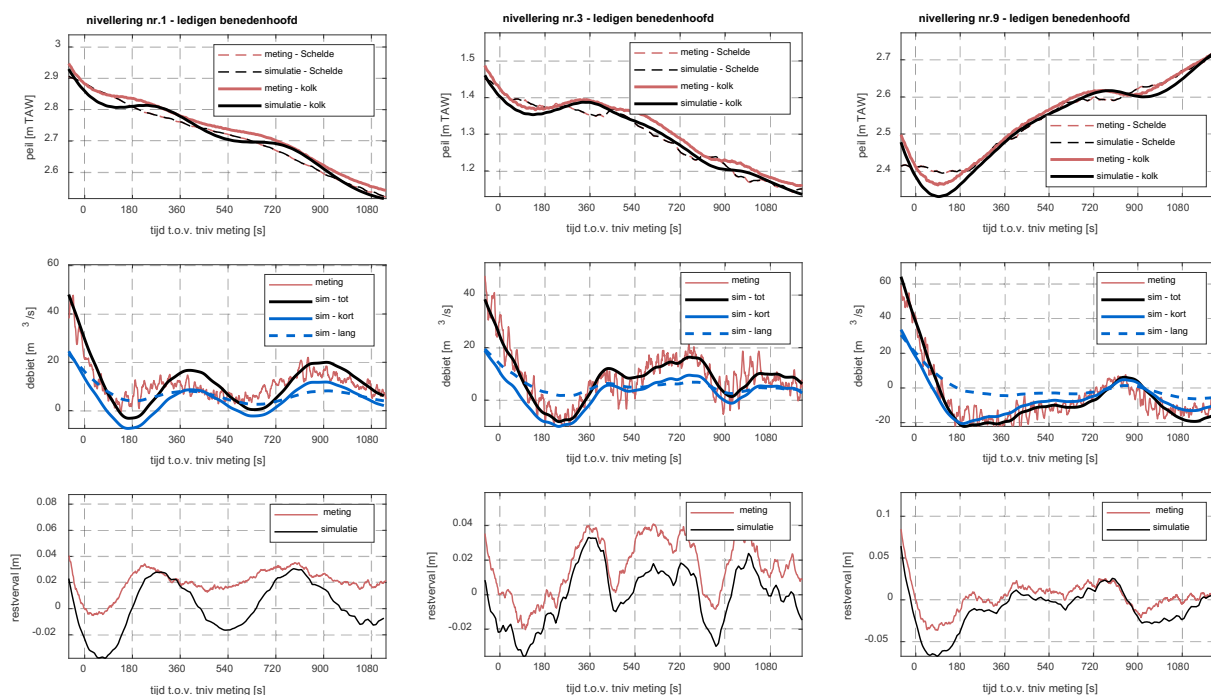
3.2.2 Tweezijdige nivelleringen met standaard openingswet

Gedurende de proeven werd één tweezijdige vulling met het bovenhoofd en drie tweezijdige ledigingen met het benedenhoofd uitgevoerd met de standaard openingswet. De gesimuleerde en gemeten resultaten worden vergeleken in Figuur 6 voor vullen bovenhoofd en in Figuur 7 voor ledigen benedenhoofd.

Figuur 6 – Validatie overvulling/overlediging – vullen bovenhoofd met standaard openingswet



Figuur 7 – Validatie overvulling/overlediging – ledigen benedenhoofd met standaard openingswet



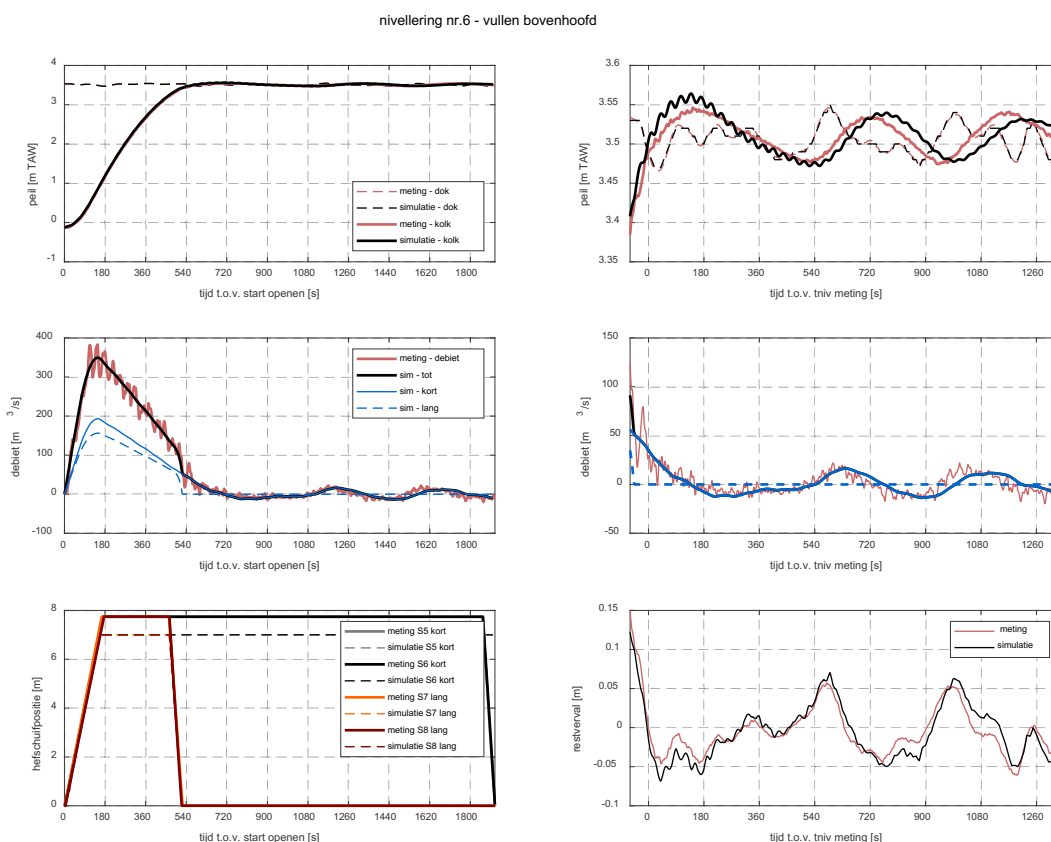
Bemerk dat voor vullen bovenhoofd de overeenkomst tussen de metingen en de simulaties goed is, zowel op vlak van kolkpeil, debiet en restverval. De periode van de gesimuleerde overvulling/overlediging lijkt beperkt groter te zijn dan de periode van de opgemeten overvulling/overlediging. Bij de eenzijdige vullingen met het korte omloopriool werd in paragraaf 3.2.1 een offset van ca. 2 cm waargenomen op het restverval. Na toepassen van een geruimd gemiddelde over een periode van ca. twee fluctuaties op het opgemeten restverval wordt voor nivellering nr. 10 een offset van ca. 0.5 cm tot 1 cm uitgekomen. Voor ledigingen benedenhoofd nr. 1 en nr. 3 bedraagt de offset op het opgemeten restverval ca. 0.02 m terwijl voor lediging benedenhoofd nr. 9 er geen merkbare offset optreedt op het restverval. Voor ledigingen benedenhoofd nr. 1 en nr. 9 overschat de simulatie de opgemeten overlediging. Voor nivellering nr. 3 lijkt, rekening houdend met de beperkte piekwaarde en de vermoedelijke offset op het opgemeten restverval, de overeenkomst goed.

Bemerk dat voor ledigen de piekwaarden merkbaar kleiner zijn dan voor vullen. Door de toename van de relatieve invloed van een meetfout of andere niet in de simulaties meegenomen factor zal de onzekerheid op de simulaties voor ledigen merkbaar groter zijn dan deze voor vullen.

3.2.3 Tweezijdige nivellering met aangepaste openingswet

Voor vullen bovenhoofd werd één meting uitgevoerd met de aangepaste openingswet. De vergelijking tussen meting en simulatie wordt gegeven in Figuur 8. Om de invloed van het sluiten van de hefschuiven in het lange omloopriool te tonen wordt hier de uitgebreide figuur gegeven.

Figuur 8 – Validatie overvulling/overlediging – vullen bovenhoofd met aangepaste openingswet



Bemerk dat ook hier de overeenkomst tussen de opgemeten en gesimuleerde vulkromme zeer goed is. De overvulling lijkt iets overschat te worden door de simulatie en de gesimuleerde periode van de fluctuaties lijkt iets groter te zijn dan de opgemeten. Deze vaststellingen zijn analoog met de vaststellingen voor vullen

met de standaard openingswet. In tegenstelling tot de eenzijdige vullingen met het korte omloopriool wordt hier geen offset op het opgemeten restverval opgemerkt. Ook wordt opgemerkt dat op de peilmeting van het Deurganckdok fluctuaties optreden die van dezelfde grootteorde zijn als deze van de overvulling.

3.2.4 Afwijking op piekwaarde overvulling/overlediging

In deze paragraaf wordt de piekwaarde van overvulling/overlediging bepaald als de minimale waarde van het restverval tijdens de eerste overvulling respectievelijk overlediging. Bemerkt hierbij dat het restverval in voorgaande paragrafen bij het overschrijden (bij vullen) respectievelijk onderschrijden (bij ledigen) van het eindpeil wisselt van teken en zo negatief wordt. In deze paragraaf wordt de piekwaarde positief gedefinieerd. De piekwaarde volgende uit de metingen en simulaties wordt per type nivellering gegeven in Tabel 4.

Tabel 4 – Vergelijking opgemeten en gesimuleerde piekwaarde overvulling/overlediging

type	hoofd	vullen/ ledigen	omloopriool	nr.	meting	simulatie	afwijking	
					[m]	[m]	absoluut ^[1]	relatief ^[2]
eenzijdig	bovenhoofd	vullen	kort	2	0.053	0.060	0.007	12
			kort	4	0.064	0.072	0.008	13
			lang	8	0.117	0.123	0.007	6
	benedenhoofd	ledigen	kort	7	0.072	0.099	0.027	38
			lang 1 schuif	5	0.053	0.065	0.012	22
standaard	bovenhoofd	vullen	kort + lang	10	0.092	0.110	0.018	20
	benedenhoofd	ledigen	kort + lang 1 schuif	1	0.005	0.038	0.033	623 ^[3]
			kort + lang 1 schuif	3	0.020	0.036	0.016	78
			kort + lang 1 schuif	9	0.036	0.068	0.031	86
aangepast	bovenhoofd	vullen	kort + lang	6	0.047	0.068	0.022	47

[1] Absolute afwijking = $P_{\text{simulatie}} - P_{\text{meting}}$

[2] Relatieve afwijking = $P_{\text{simulatie}} / P_{\text{meting}} - 1$

[3] Grotere relatieve afwijking wordt verklaard door zeer lage piekwaarde van de overvulling/overlediging uit de meting

Uit Tabel 4 volgt dat de gesimuleerde piekwaarde steeds hoger is dan de gemeten piekwaarde. De relatieve afwijking van de simulaties ten opzichte van de meting is het grootste bij de tweezijdige ledigingen via het benedenhoofd, de gesimuleerde piekwaarde is hier 78 % tot 623 % groter dan de opgemeten piekwaarde. Bemerkt dat voor de tweezijdige ledigingen met het benedenhoofd de kleinste piekwaarden werden opgemeten waardoor voor een gegeven absolute afwijking de relatieve afwijking het hoogste wordt. Voor de vulling met de aangepaste openingswet is de gesimuleerde piekwaarde 47 % hoger dan de opgemeten piekwaarde. Voor de overige metingen is de afwijking beperkt tussen 6 % en 38 %. Het verschil tussen de metingen en de simulaties in absolute waarde is beperkt tot 0.01 m à 0.03 m. Bemerkt dat dit een klein verschil is om op te meten door middel van twee peilmetingen.

De grootste piekwaarde, 0.12 m, wordt opgemeten bij de eenzijdige vulling via het bovenhoofd met het lange omloopriool. Voor de overige eenzijdige nivelleringen wordt een piekwaarde tussen 0.05 m en 0.07 m opgemeten. De kleinste piekwaarden worden opgemeten voor de ledigingen met het benedenhoofd met de standaard openingswet, en 1 schuif in het lange omloopriool buiten dienst, nl. 0.005 m tot 0.036 m. Voor de vulling met beide omloopriolen en de standaard openingswet volgt een opgemeten piekwaarde 0.092 m. Bij de aangepaste openingswet wordt dit met 50 % (meting) tot 40 % (simulatie) gereduceerd. Deze reductie komt overeen met de reductie van 50 % volgende uit de ontwerpstudie voor de aangepaste openingswet (Vercruysse *et al.*, 2017a).

4 Conclusies

Bij het vullen van een sluis met omloopriolen zal na het bereiken van het eindpeil, ten gevolge inertie, de kolk overvullen bij vullen respectievelijk overledigen bij ledigen. Na de eerste overvulling/overlediging treedt een uitdempend golfpatroon op waarbij het peil van de kolk fluctueert rond het eindpeil. Het openen van de roldeuren bij een restverval heeft enerzijds een mogelijk nadelige invloed op de duurzaamheid van de deur en kan anderzijds leiden tot ongewenste krachten op de schepen in de kolk.

Bij de ingebruikname van de Kieldrechtsluis, in de haven van Antwerpen, werd opgemerkt dat de deuren geopend worden met restverval. Om te kwantificeren bij welk restverval de deuren geopend werden heeft afdeling Waterbouwkundig Laboratorium (WL) in 2016, op vraag van afdeling Maritieme Toegang (aMT), een meetcampagne uitgevoerd in de Kieldrechtsluis. Doordat tijdens deze meetcampagne de deuren vroegtijdig geopend werden konden de opgemeten nivellerings niet gebruikt worden om het, in kader van het hydraulisch ontwerp van de Kieldrechtsluis opgestelde, hydraulisch netwerkmodel te valideren op vlak van overvullen/overledigen. Wel werd opgemerkt dat het hydraulisch netwerkmodel van de Kieldrechtsluis de verliezen bij vullen met het bovenhoofd overschat. In 2017 werd door Havenbedrijf Antwerpen (HA) een reeks testnivellerings uitgevoerd. Door middel van de uitgevoerde eenzijdige nivellerings werd het model van de Kieldrechtsluis opnieuw gekalibreerd. Door middel van de uitgevoerde tweezijdige nivellerings was het de bedoeling om de overvulling/overlediging te valideren. Door onvoorziene omstandigheden diende de reeks ingekort te worden waardoor ook hier slechts beperkte validatiegegevens beschikbaar zijn voor de validatie van het hydraulisch netwerkmodel op vlak van overvulling/overlediging. Hieropvolgend werden simulaties uitgevoerd waarbij door middel van het geheel of gedeeltelijk sluiten van schuiven de overvulling/overlediging gereduceerd werd. Uit deze studie volgde een aangepaste openingswet die door HA begin 2018 geïmplementeerd werd voor nivellerings met een initieel peilverschil groter dan 1.0 m en alle schuiven in het betreffende hoofd in dienst.

Tijdens een geplande onderhoudsperiode van de Kieldrechtsluis in april 2019 geeft HA tien testnivellerings uitgevoerd. Hierbij werden zowel eenzijdige nivellerings als tweezijdige nivellerings zowel met het bovenhoofd als met het benedenhoofd uitgevoerd. Ook werd een vulling via het bovenhoofd uitgevoerd met de aangepaste openingswet. Dit rapport beschrijft de validatie van het hydraulisch netwerkmodel van de Kieldrechtsluis op vlak van overvullen/overledigen aan de hand van de in april 2019 uitgevoerde testnivellerings.

Uit het toepassen van het in 2017 gekalibreerd hydraulische netwerkmodel volgde dat de verliezen bij vullen met het bovenhoofd onderschat werden. Hierop werd een nieuwe kalibratie van het hydraulische netwerkmodel uitgevoerd waaruit volgde dat voor vullen de verliezen merklijk hoger zijn dan deze volgend uit de in 2017 uitgevoerde kalibratie en quasi overeenkomen met de verliezen uit het initiële hydraulische netwerkmodel dat opgesteld geweest is voor het hydraulisch ontwerp van de Kieldrechtsluis. Voor ledigen met het korte omloopriool van het benedenhoofd wordt opgemerkt dat het verlies beperkt hoger is dan volgt uit de in 2017 uitgevoerde kalibratie en hetzelfde is als het verlies van het initiële model. Voor ledigen met het lange omloopriool van het benedenhoofd zijn de verliezen hoger dan volgt uit de in 2017 uitgevoerde kalibratie en hoger dan deze van het initiële hydraulisch netwerkmodel. Dit kan mogelijks verklaard worden doordat tijdens de testnivellerings een schuif in het lange omloopriool van het benedenhoofd buiten dienst was. Hierom wordt besloten om voor de in dit rapport uitgevoerde simulaties met het lange omloopriool in het bovenhoofd de negatieve verliescoëfficiënt uit de in 2017 uitgevoerde kalibratie te behouden.

Uit de analyse van het restverval volgt dat het peil van de Waaslandhaven en het peil van het Deurganckdok fluctuaties vertonen die van dezelfde grootte zijn als de overvulling, overlediging. Voor vullen bovenhoofd met het korte omloopriool werden ter vergelijking ook twee simulaties uitgevoerd met een constant eindpeil. Hieruit volgde dat de invloed op de piekwaarde van de eerste overvulling beperkt was, maar dat het verdere verloop sterk beïnvloed wordt door het peil van de Waaslandhaven. De grootste piekwaarde, 0.12 m, wordt opgemeten bij de eenzijdige vulling via het bovenhoofd met het lange omloopriool. Voor de overige eenzijdige nivelleringen wordt een piekwaarde tussen 0.05 m en 0.07 m opgemeten. De kleinste piekwaarden worden opgemeten voor de ledigingen met het benedenhoofd met de standaard openingswet, en 1 schuif in het lange omloopriool buiten dienst, nl. 0.005 m tot 0.036 m. Voor de vulling met beide omloopriolen en de standaard openingswet volgt een opgemeten piekwaarde 0.092 m. Bij de aangepaste openingswet wordt dit met 50 % (meting) tot 40 % (simulatie) gereduceerd. Deze reductie komt overeen met de reductie van 50 % volgende uit de ontwerpstudie voor de aangepaste openingswet. Bemerk dat deze analyse volgt uit slechts één meting met de aangepaste openingswet en één meting de standaard openingswet. Om de aangepaste openingswet voor het bovenhoofd te beoordelen dient een tijdreeks over meerdere dagen met de normale openingswet en met de aangepaste openingswet opgenomen tijdens het normale gebruik van de sluis met verschillende sluismeesters vergeleken te worden.

Met betrekking tot het simuleren van het overvullen/overledigen wordt opgemerkt dat de simulaties de piekwaarde van de eerste overvulling/overlediging overschatten. De relatieve afwijking van de simulatie ten opzichte van de meting bedraagt voor de meeste simulaties 6 tot 38%. Voor vullen met het bovenhoofd en de aangepaste openingswet neemt de afwijking toe tot 47 %. Maar voornamelijk voor ledigen met het benedenhoofd worden grote afwijkingen opgemerkt van 78 tot 623 %. De grote afwijkingen bij ledigen kunnen vermoedelijk deels verklaard worden door de kleinere piekwaarden waardoor voor een gegeven absolute afwijking de relatieve afwijking merkkelijk groter is in vergelijking met vullen. Hierbij dient ook opgemerkt te worden dat het absolute verschil tussen de metingen en de simulaties beperkt is tot 1 a 3 cm, wat een beperkt verschil is om op te meten tussen twee peilmetingen.

Algeheel wordt besloten dat het hydraulische netwerkmodel goed in staat is om het overvullen te simuleren. Voor de simulaties met overlediging is er een grotere onnauwkeurigheid op de gesimuleerde piekwaarde.

5 Referenties

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

Schohl G.A. (1998). User's Manual for LOCKSIM – Hydraulic simulation of navigation lock filling and emptying systems

Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2017a). Haven van Antwerpen: Kieldrechtsluis: simulaties reduceren overvulling en overlediging. Version 7.. *WL Rapporten, 17_059_1*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2017b). Haven Antwerpen - Kieldrechtsluis: meting overvulling en overlediging. Versie 4.0. *WL Rapporten, 16_106_1*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Bijlage 1 Kalibratie verliescoëfficiënten

In deze bijlage worden voor de in paragraaf 3.1 beschreven kalibratie van de verliescoëfficiënten de resultaten van het gekalibreerde hydraulisch netwerkmodel vergeleken met de metingen. De figuren vergelijken het kolkpeil, debiet, de hefschuifpositie en globale verliescoëfficiënt. Bemerk hierin dat het berekende kolkpeil quasi samenvalt met dit uit de metingen. Het debiet uit de metingen wordt afgeleid uit de stijgsnelheid van het kolkpeil en het veronderstelde kolkoppervlak. Door lokale schommelingen van de waterspiegel in de kolk kan het kolkpeil en de in de tijd afgeleide hiervan fluctuaties vertonen. Aangenomen wordt dat de fluctuaties van het debiet uit de meting veroorzaakt worden door de meetmethode. Zonder deze fluctuaties wordt opgemerkt dat er ook op vlak van debiet een goede overeenkomst is tussen de simulaties en de metingen. De openingswet van de hefschuiven in de simulaties wordt overgenomen van de metingen en wordt hierom enkel ter controle en voor de interpretatie van de figuren gegeven. In de metingen worden de hefschuiven opgetrokken tot ca. 8 m. Doordat de omloopriolen een hoogte van 7.0 m hebben heeft deze bovenste meter geen hydraulische invloed en moet dus niet meegenomen worden in de simulaties.

De globale verliescoëfficiënt wordt als volgt berekend:

$$\xi_G = 2g \cdot \frac{1}{|\Delta H|} \cdot \frac{A^2}{Q^2}$$

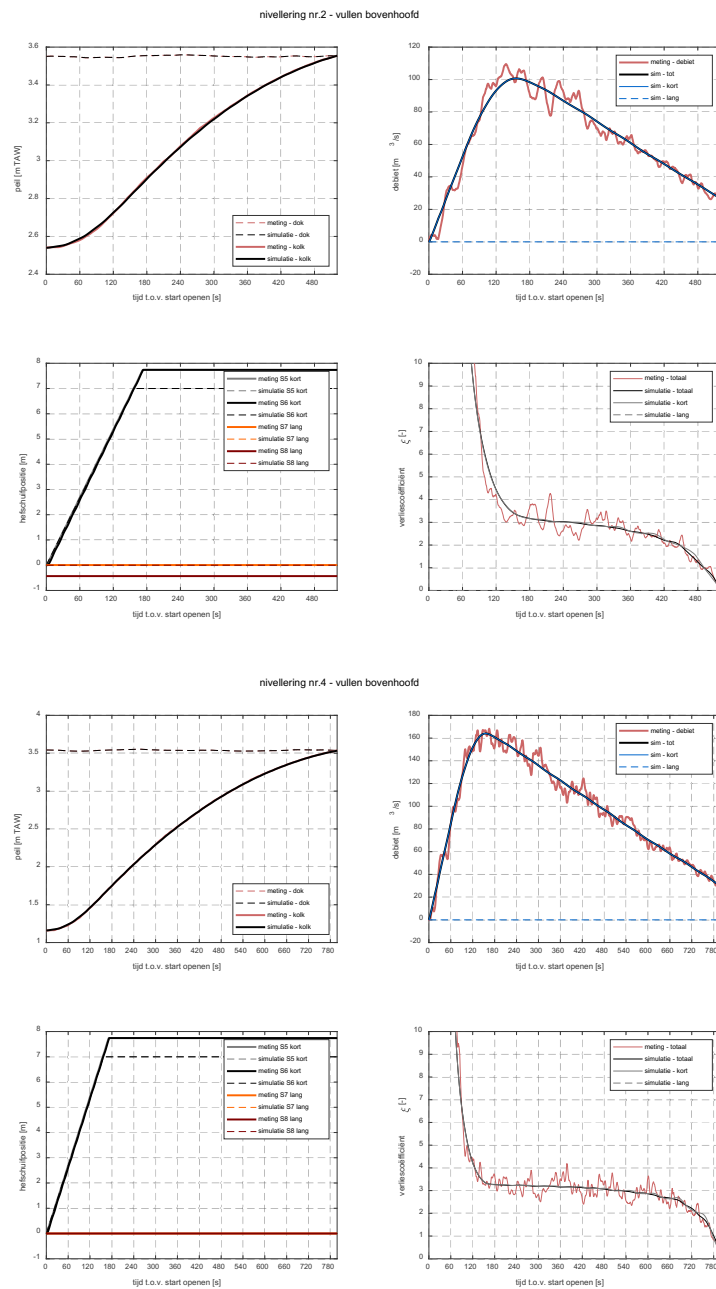
Met:

- | | | |
|--------------|--|---------------------|
| • ξ_G | Globale verliescoëfficiënt | [-] |
| • g | Zwaartekrachtsversnelling = 9.81 m/s ² | [m/s ²] |
| • ΔH | Ogenblikkelijk verval | [m] |
| • A | Rioolsectie = 49 m ² (ook voor nivellering nr. 5 met 1 hefschuif in dienst) | [m ²] |
| • Q | Debiet volgens uit simulatie of uit meting | [m ³ /s] |

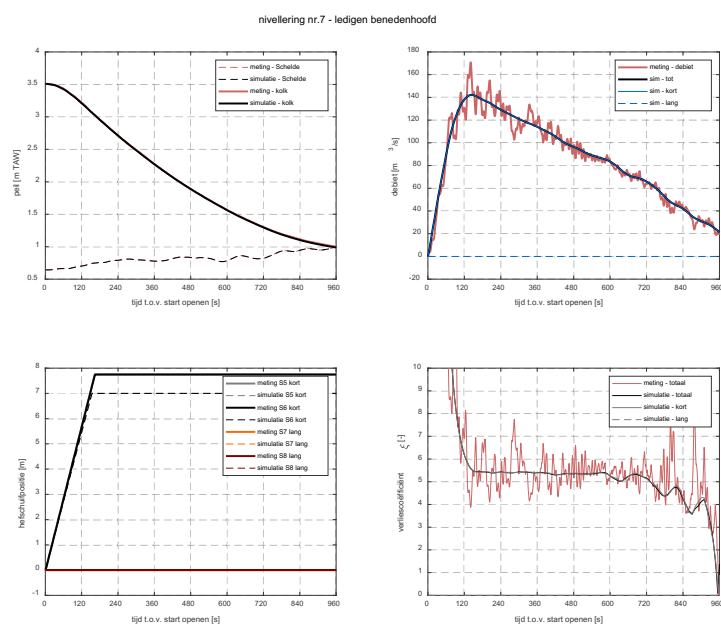
Bemerk dat hierin ook de verliezen zitten die te wijten zijn aan de positie van de hefschuif en dat de op deze wijze bepaalde verliescoëfficiënt ook beïnvloed wordt door inertie. Bij het versnellen van de stroming in de omloopriolen zal ten gevolge van de inertie de verliescoëfficiënt overschat worden. Bij het vertragen van de stroming in de omloopriolen zal ten gevolge van inertie de verliescoëfficiënt onderschat worden. Op het moment van maximum debiet heeft de inertie geen invloed. De invloed van de hefschuif en inertie zijn ook waar te nemen in het verloop van de verliescoëfficiënt. De zeer hoge verliescoëfficiënt tijdens het openen van de hefschuiven zijn toe te schrijven aan de hefschuifverliezen die op dat moment dominant zijn. De afname van de verliescoëfficiënt naar 0 bij het bereiken van het eindpeil is toe te schrijven aan inertie.

5.1 Korte omloopriool

5.1.1 Vullen

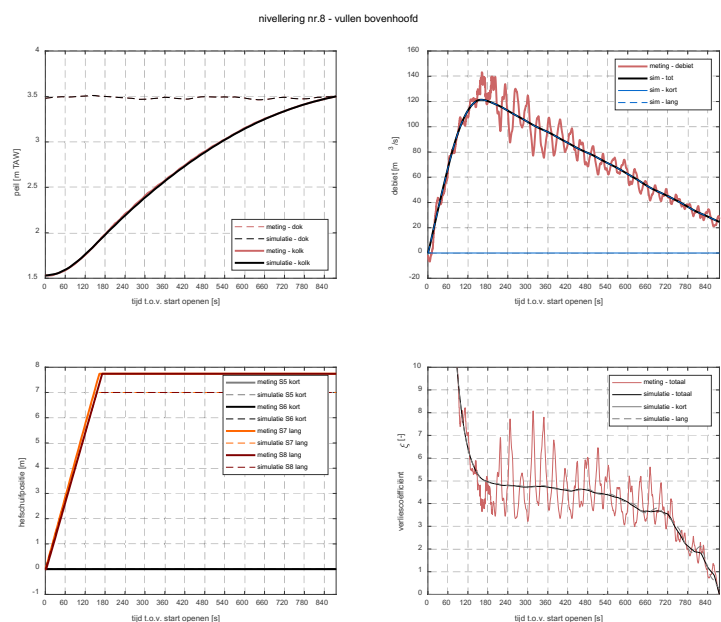


5.1.2 Ledigen



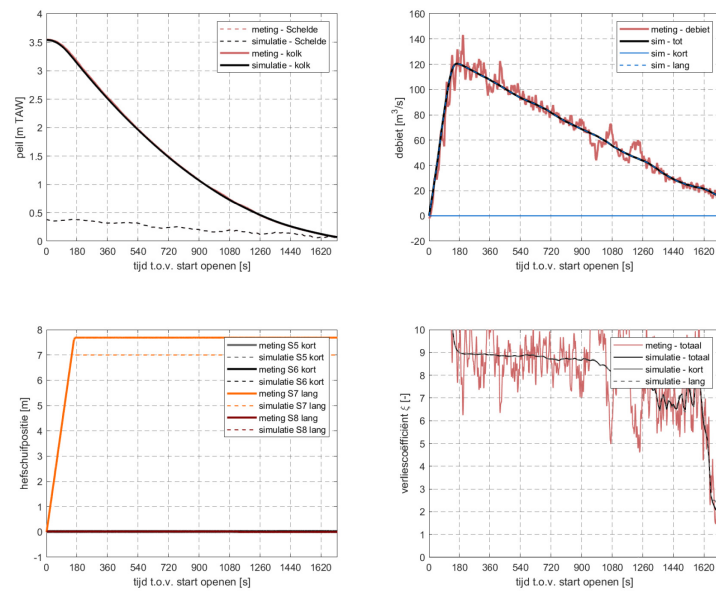
5.2 Lange omloopriool

5.2.1 Vullen



5.2.2 Ledigen

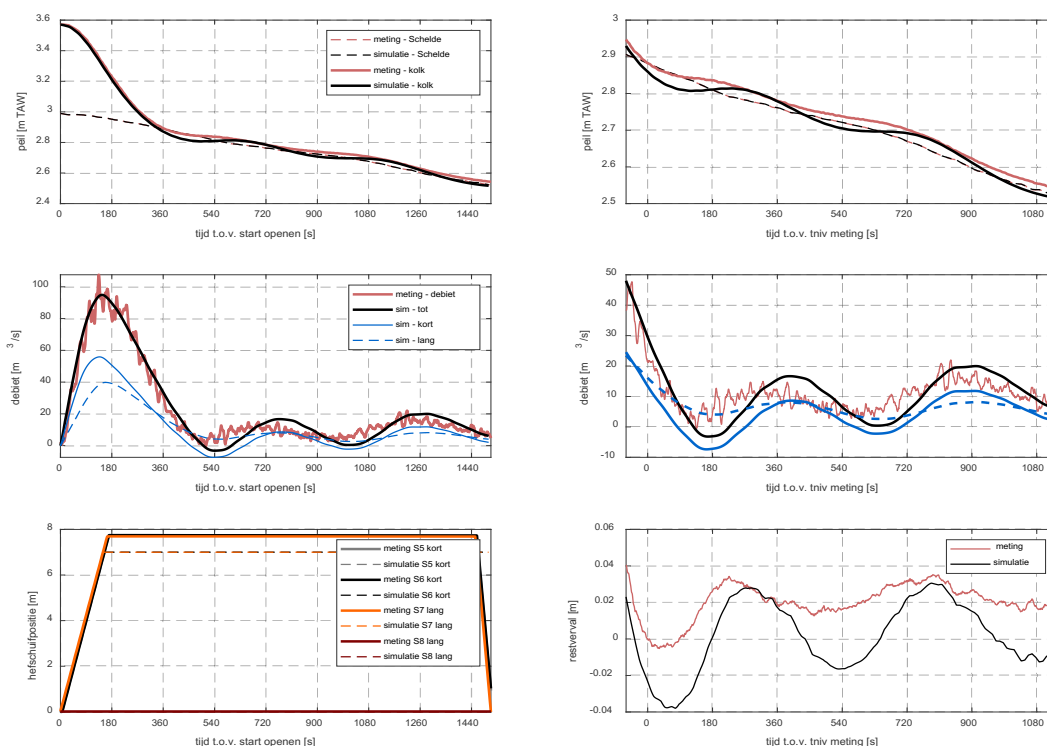
nivellering nr.5 - ledigen benedenhoofd



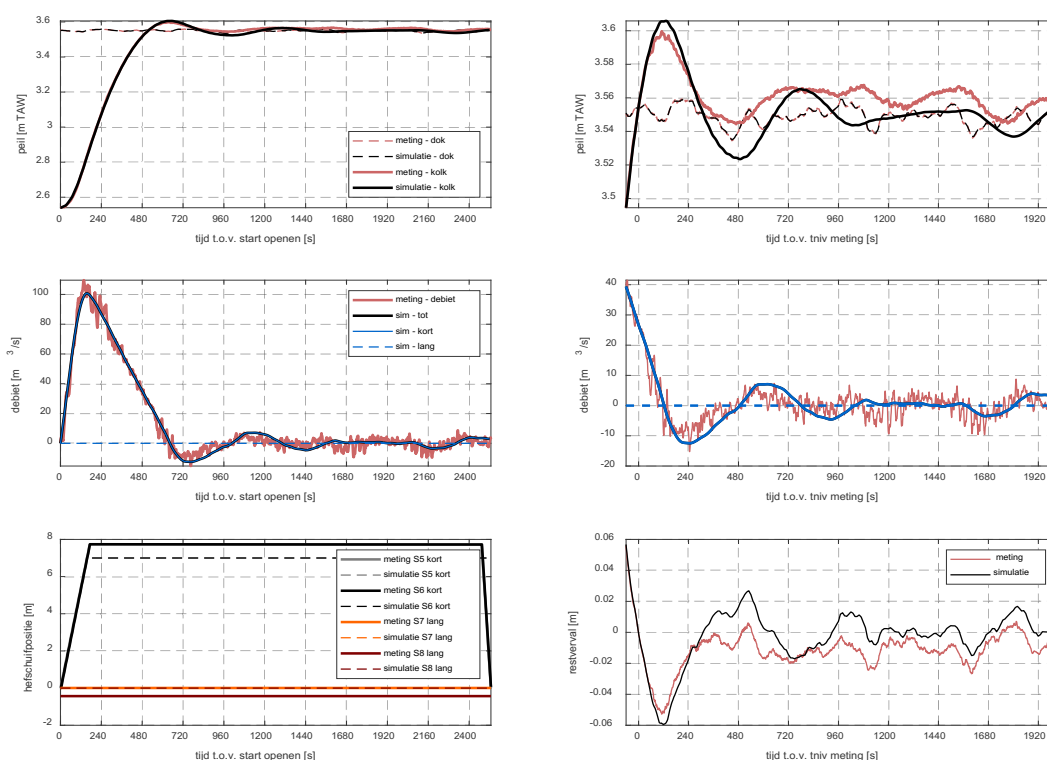
Bijlage 2 Simulaties

In paragraaf 3.2 worden de figuren beperkt tot overvullen/overledigen. In deze bijlage wordt een uitgebreide versie van deze figuren gegeven waarop ook het kolkpeil, debiet en schuifpositie gegeven wordt vanaf start nivellering tot einde meting.

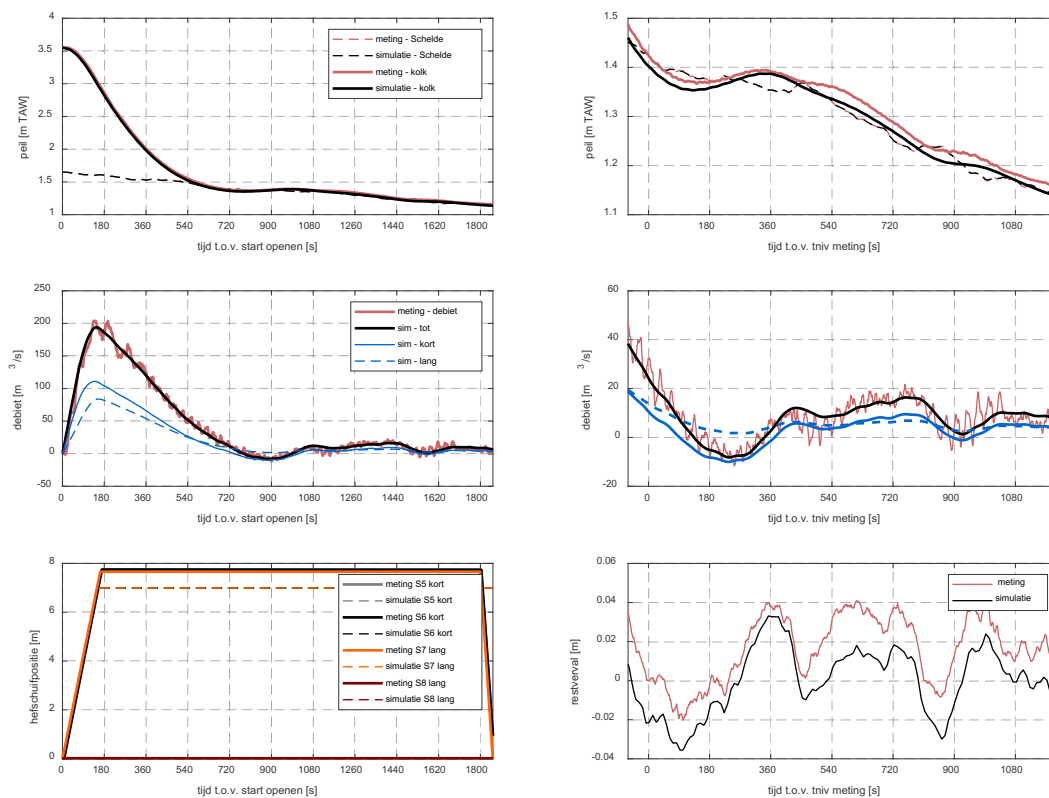
nivellering nr.1 - ledigen benedenhoofd



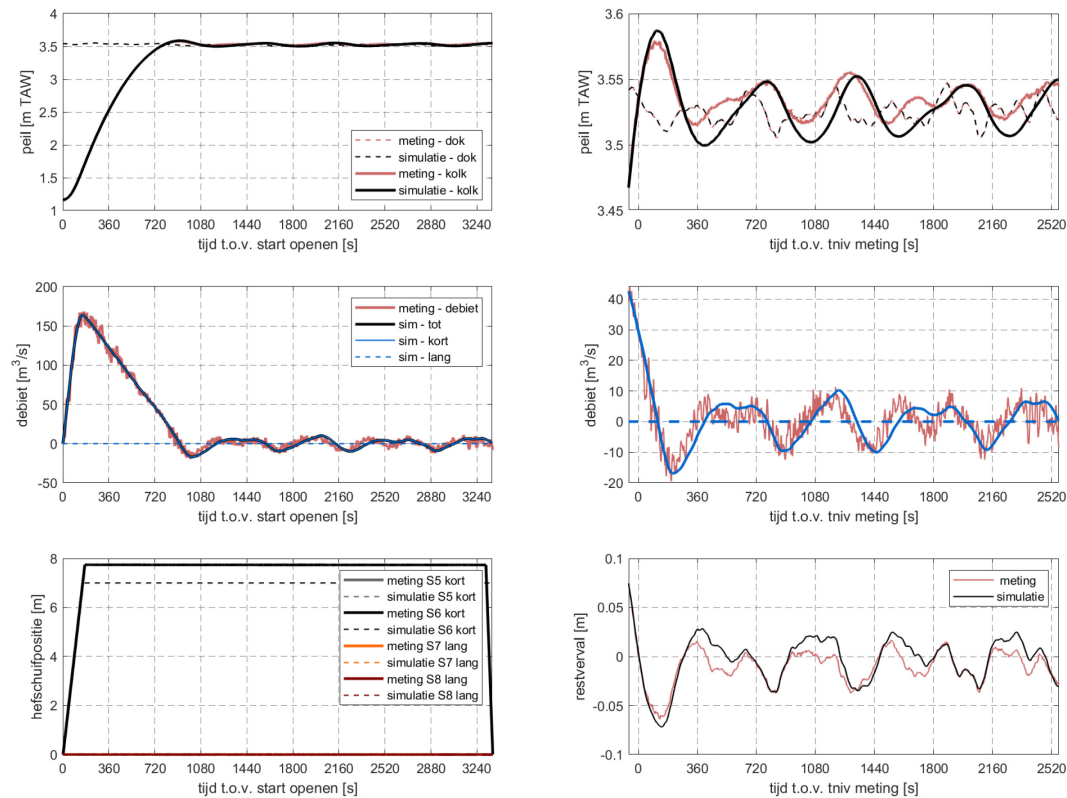
nivellering nr.2 - vullen bovenhoofd



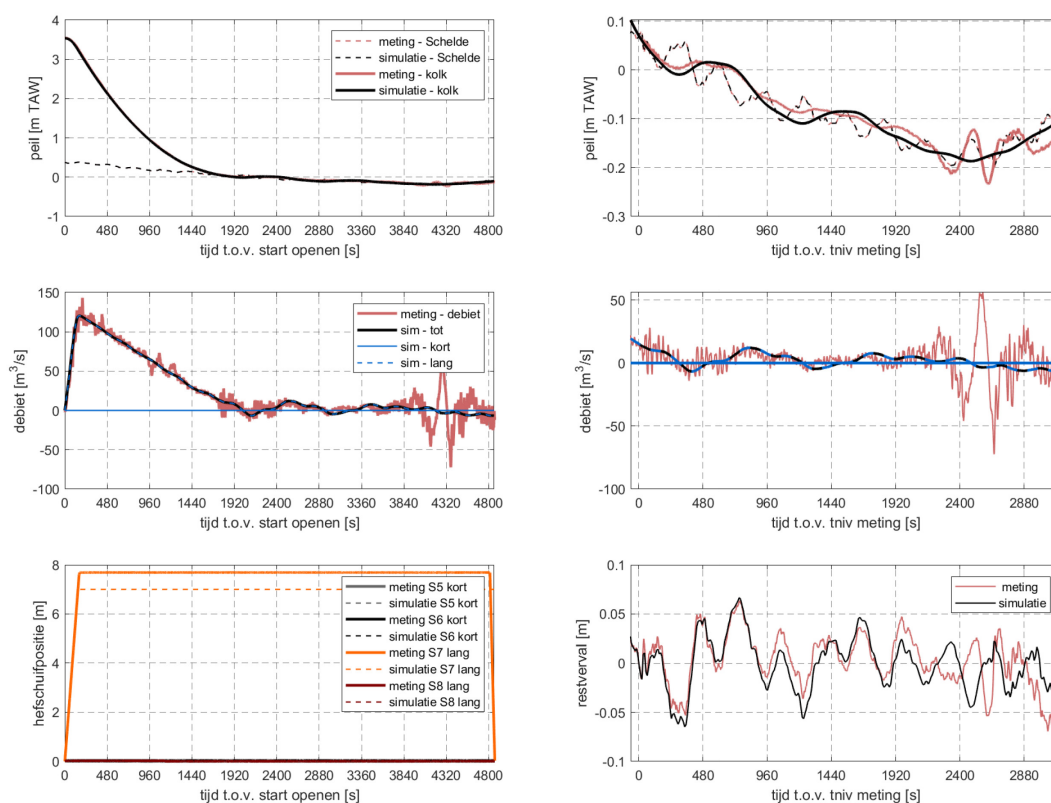
nivellering nr.3 - ledigen benedenhoofd



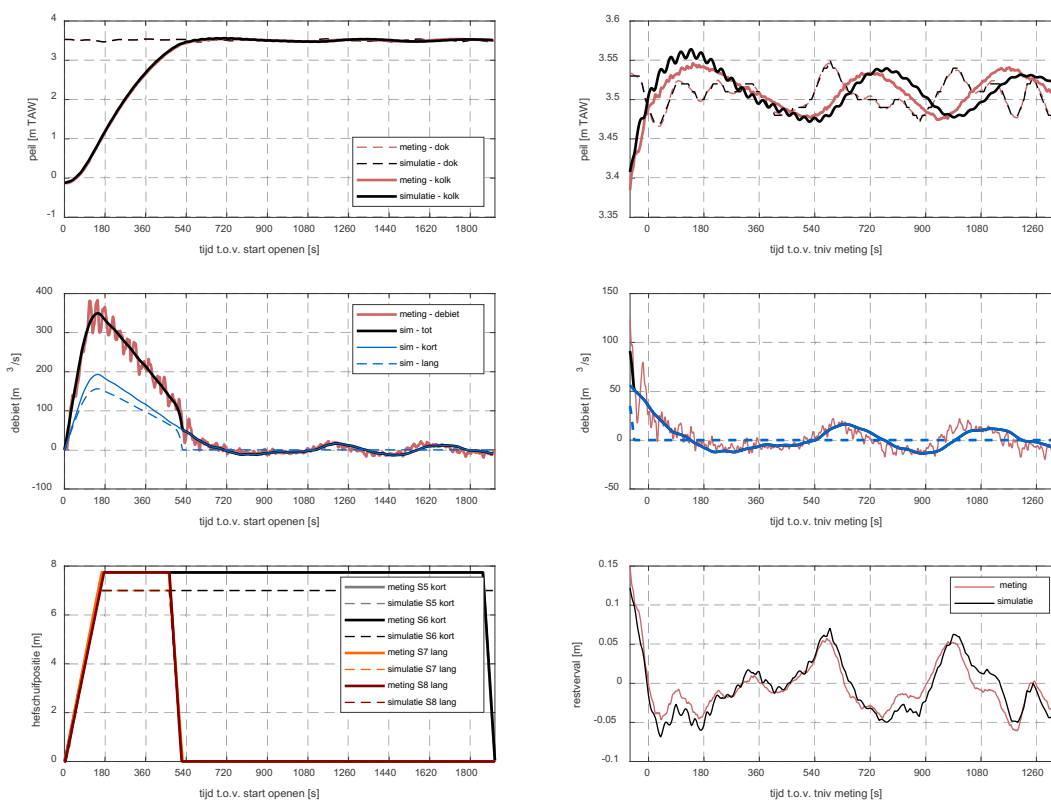
nivellering nr.4 - vullen bovenhoofd



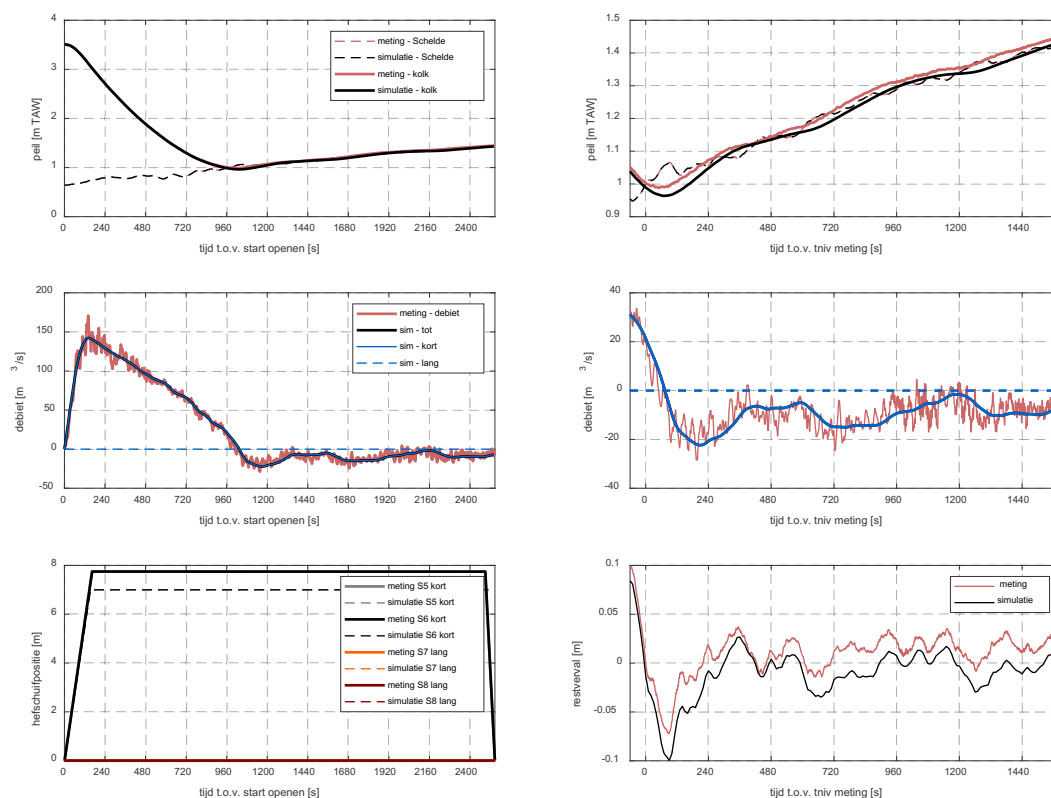
nivellering nr.5 - ledigen benedenhoofd



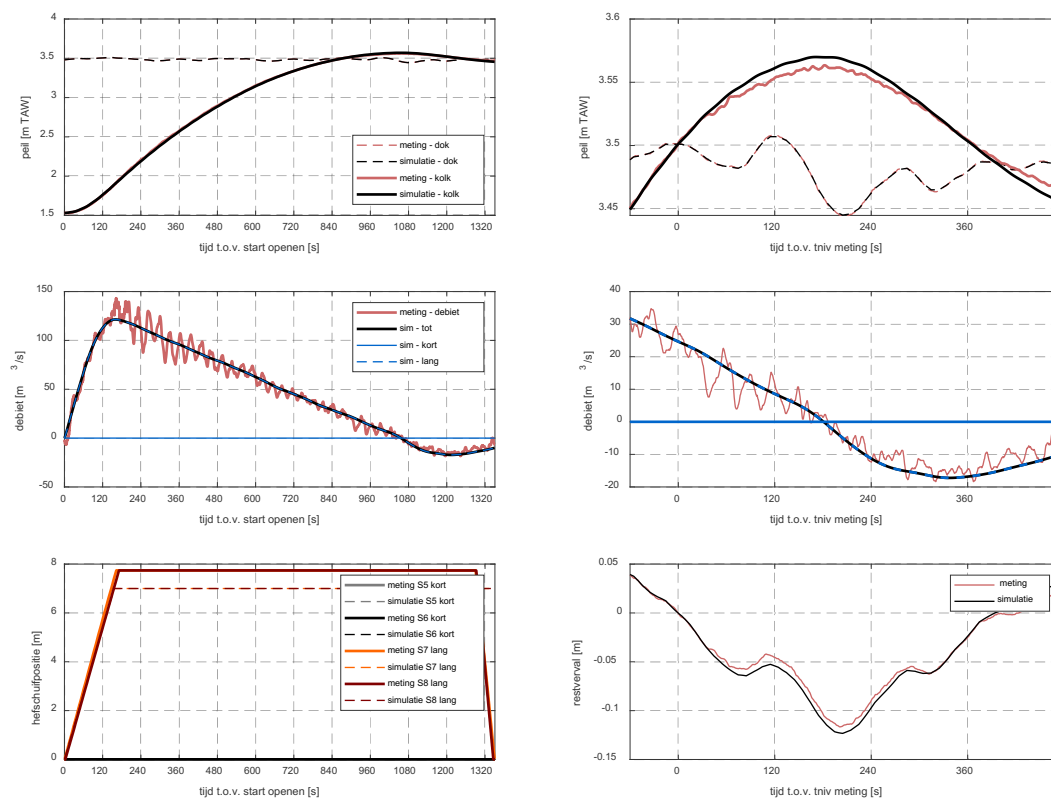
nivellering nr.6 - vullen bovenhoofd



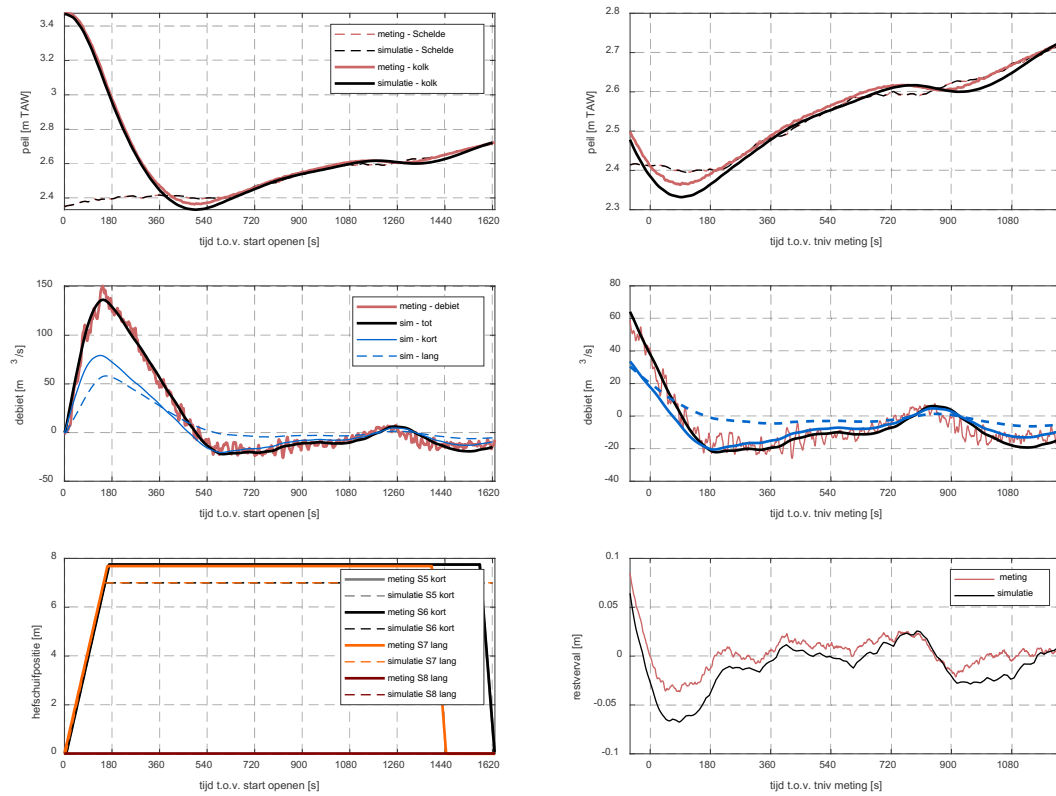
nivellering nr.7 - ledigen benedenhoofd



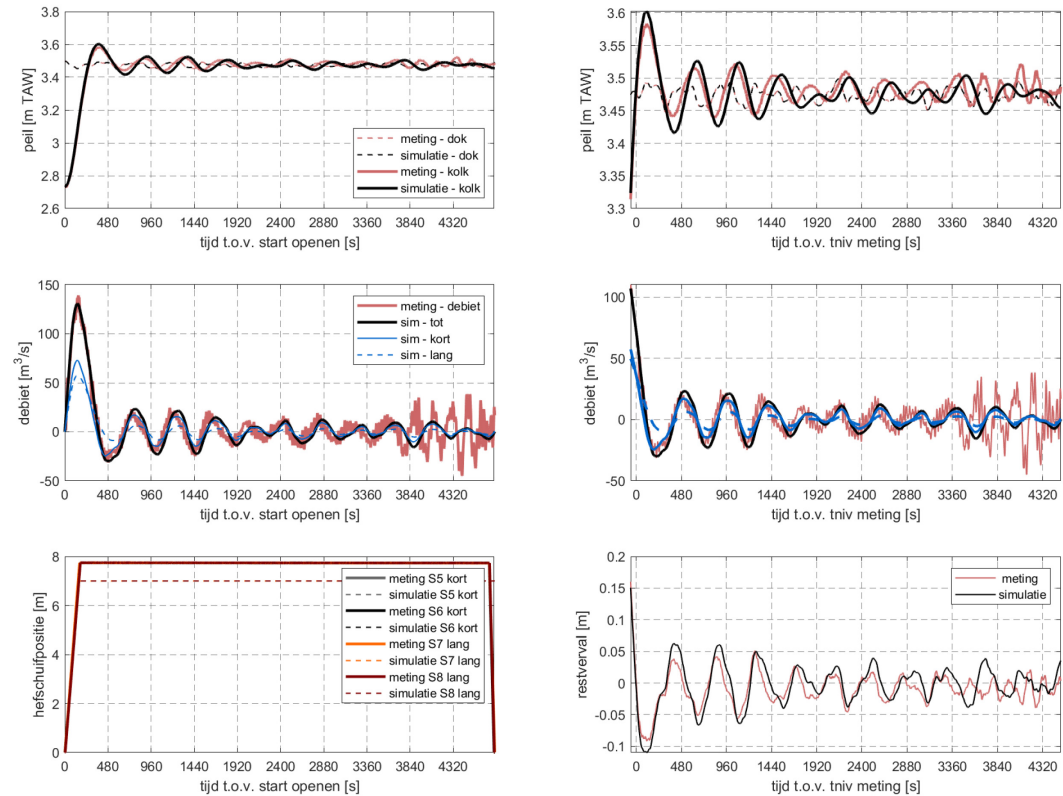
nivellering nr.8 - vullen bovenhoofd



nivellering nr.9 - ledigen benedenhoofd



nivellering nr.10 - vullen bovenhoofd



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