Vlaanderen
is wetenschap

20_096_1
WL rapporten

Renovatie sluis Ooigem op het kanaal Roeselare Leie

Opstellen openingswet hefschuiven

DEPARTEMENT
MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Renovatie sluis Ooigem op het kanaal Roeselare Leie

Opstellen openingswet hefschuiven

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Timmermans, R.

Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaanderen is wetenschap

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

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 2022
D/2021/3241/120

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Timmermans, R. (2022). Renovatie sluis Ooigem op het kanaal Roeselare Leie: Opstellen openingswet hefschuiven. Versie 3.0. WL Rapporten, 20_096_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Xperta - EBS	Ref.:	WL2022R20_096_1
Trefwoorden (3-5):	navigation lock, measurements, filling, emptying, hawser forces		
Kennisdomeinen:	Sluizen > Nivelleersysteem > In situ metingen Sluizen > Nivelleersysteem > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	36	Bijlagen (p.):	12
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruysse, J.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.; Timmermans, R.	Getekend door:Kristof Verelst (Signature) Getekend op:2022-05-13 15:17:54 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed Kristof Verelst Getekend door:Robin Timmermans (Sign Getekend op:2022-05-16 08:46:07 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed Robin Timmermans
Projectleider:	Vercruysse, J.	Getekend door:Jeroen Vercruysse (Signa Getekend op:2022-05-13 15:21:06 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed Jeroen Vercruysse

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sig Getekend op:2022-05-15 11:56:43 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed Abdelkarim Bellafkih

Abstract

De sluis te Ooigem verbindt het kanaal Roeselare Leie met de Leie. In kader van de renovatie van deze sluis vraag afdeling Expertise Beton en Staal aan het Waterbouwkundig Laboratorium of de openingswet van de schuiven geoptimaliseerd kan worden.

WL heeft hiervoor een in situ meting uitgevoerd vòòr renovatie van de sluis. Tijdens deze in situ meting werden de nivelleerkromme, de langse waterspiegelhellingen tijdens nivelleren en de openingswet opgemeten voor een 4 vullingen en 4 ledigingen. Uit de meetresultaten volgt dat de hefhoogte van de hefschuiven beperkt is tot de halve rioolhoogte, zowel voor de schuiven in het bovenhoofd als voor de schuiven in het benedenhoofd. Voor de langse waterspiegelhelling lijkt het schip in de kolk een belangrijke invloed te hebben op de mate van demping van de waterspiegelhellingen.

Voor het optimaliseren van de openingswet werd een hydraulisch netwerkmodel opgesteld. De ladingsverliezen van dit netwerkmodel worden gekalibreerd op basis van de meetresultaten. Hierna wordt een validatie uitgevoerd van de langse waterspiegelhelling. Uit deze validatie volgt dat de piekwaarden van de langse waterspiegelhelling bij vullen onderschat worden maar dat de overeenkomst bij ledigen goed is. Ook wordt opgemerkt dat, op één nivellering na, het model de demping van de langse waterspiegelhellingen onderschat.

Vanuit het beperken van de krachten op de schepen in de kolk wordt bij voorkeur een openingswet toegepast waarbij de schuiven bij het begin van de nivellering traag geopend worden. Bij beperkte hefhoogtes is er echter een risico op zelfexcitatie van de schuiven. Op basis van de geometrie van de onderrand van de hefschuiven wordt door middel van literatuurformules het bereik waarbinnen er een risico op zelfexcitatie bestaat geraamd op de eerste 0.08 m a 0.12 m.

Door middel van simulaties met het hydraulisch netwerkmodel worden geoptimaliseerde openingswetten opgesteld. Om het risico op zelfexcitatie te beperken bestaan deze geoptimaliseerde openingswetten uit een eerste snelle openingsstap met hierop volgend een tweede fase met een trage constante hefsnelheid. Om de krachten op het schip in de kolk te beperken wordt bij vullen een wachttijd ingelast tussen de eerste en tweede fase. Uit de simulaties volgt dat bij een eerste snelle openingsstap van 0.12 m bij vullen en 0.25 m bij ledigen de extrema van de langskracht ca. overeenkomen met het opgelegde criterium. Bij behoud van het optrekken van de schuiven tot de halve rioolhoogte wordt zo een reductie van de nivelleertijd met 2.5 min uitgekomen voor vullen en ledigen.

Inhoudstafel

Abstract III
Inhoudstafel V
Lijst van de tabellen VI
Lijst van de figuren VII
1 Inleiding 1
2 Gegevens 2
2.1 Sluis 2
2.2 Analyse waterpeilen 5
2.3 Metingen 6
3 Criteria 12
4 Terreinmeting 16/04/2021 13
4.1 Openingswet hefschuiven 13
4.2 Nivelleerkromme en langse waterspiegelhelling 14
5 Hydraulisch netwerkmodel 18
5.1 Hydraulisch netwerkmodel 18
5.2 Kalibratie ladingsverliezen 20
5.3 Validatie langshellingen 21
6 Risico op zelfexcitatie van de hefschuif 24
7 Optimalisatie openingswet 28
8 Conclusies 33
9 Aanbevelingen 35
10 Referenties 36
Bijlage 1 Plan sluis Ooigem B1
Bijlage 2 Nauwkeurigheid langse waterspiegelhelling B3
Bijlage 3 Opgemeten nivelleringen B5
Bijlage 4 Simulaties voor kalibratie en validatie B9

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Kolklengte 2
Tabel 2 – Peilen kolkbodem en streefpeilen 3
Tabel 3 – Percentielen van de continue peilmetingen op de Leie, het kanaal Roeselare Leie en het verval ... 6
Tabel 4 – Technische specificaties druksensoren 7
Tabel 5 – Verschutte schepen 11
Tabel 6 – Toegepaste criteria lanskracht 12
Tabel 7 – Opgemeten openingswet hefschuiven 14
Tabel 8 – Nivelleertijd en extremum van de stijgsnelheid en langshelling van de opgemeten nivelleringen 17
Tabel 9 – Hydraulisch netwerkmodel sectie, lengte omloopriolen en bijzondere ladingsverliezen 19
Tabel 10 – Hydraulisch netwerkmodel componenten kolk 19
Tabel 11 – Validatie hydraulisch netwerkmodel 22
Tabel 12 – Toegepaste openingswetten 29
Tabel 13 – Hefsnelheden openingswet 29
Tabel 14 – Optimalisatie openingswet – resultaat simulaties openen hefschuiven tot halve hoogte 31
Tabel 15 – Optimalisatie openingswet- resultaat simulaties openen hefschuiven tot volledige hoogte 32
Tabel 16 – Voorstel hefsnelheid schuiven bovenhoofd en benedenhoofd 34

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Sluis Ooigem - nivelleersysteem bovenhoofd doorsnede en planzicht 4
Figuur 2 – Sluis Ooigem - planzicht..... 5
Figuur 3 – Kansdichtheid van de continue peilmetingen op de Leie, het kanaal Roeselare Leie en het verval 5
Figuur 4 – Meetopstelling waterstanden 7
Figuur 5 – Locatie instrumenten..... 8
Figuur 6 – Diver metingen na omzetting naar m TAW 9
Figuur 7 – Beeld opname indicator stang..... 10
Figuur 8 – Openingswet hefschuiven 13
Figuur 9 – Overzichtsfiguur opgemeten vullingen 15
Figuur 10 – Overzichtsfiguur opgemeten ledigingen 16
Figuur 11 – Hydraulisch netwerkmodel..... 18
Figuur 12 – Gekalibreerde verliescoëfficiënt..... 20
Figuur 13 – Nivelleerkromme en debiet voor en na kalibratie 21
Figuur 14 – Validatie langse waterspiegelhellingen 23
Figuur 15 – Doorsnede rubberen dichtingslip onderzijde wagonschuif 24
Figuur 16 – In Ontwerp van Schutsluizen aanbevolen afschuining ten opzichte van loslaatpunt..... 25
Figuur 17 – Zelfexcitatie trillingen hefschuif t.g.v. stroming door 'toegevoegde watermassa' 26
Figuur 18 – Optimalisatie openingswet- resultaat simulaties openen hefschuiven tot halve hoogte..... 30
Figuur 19 – Optimalisatie openingswet – invloed hefhoogte eerste openingsstap op langskracht bij vullen 30
Figuur 20 – Optimalisatie openingswet- resultaat simulaties openen hefschuiven tot volledige hoogte..... 32
Figuur 21 – Nauwkeurigheid langse waterspiegelhelling..... B4

1 Inleiding

De Vlaamse Waterweg plant een renovatie van de sluis te Ooigem, die het kanaal Roeselare-Leie verbindt met de Leie. Bij deze renovatie zal onder andere de aandrijving van de hefschuiven vernieuwd worden. Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS; contactpersoon Githa van Gorp) ondersteunt de Vlaamse Waterweg (dVW; contactpersoon Bart Callaert) bij het opmaken van het bestek voor de renovatie. Voor het bepalen van de openingswet van de hefschuiven vraagt EBS advies aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL).

De sluis van Ooigem heeft een lengte 115 m tussen de valmuur en de deurnis van het benedenhoofd en een breedte 12.5 m. Het maatgevend schip betreft een schip CEMT-klasse Va met lengte 110 m, breedte 11.50 m en diepgang 2.80 m. De sluis heeft een middenhoofd waarmee het mogelijk is om enkel de op- of afwaartse deelkolk te nivelleren. Het middenhoofd is momenteel echter niet operationeel en wordt ook niet opgenomen in de renovatie. Het nivelleersysteem bestaat voor de drie hoofden (boven, midden- en bedenhoofd) uit symmetrische korte omloopriolen.

Het opstellen van een nieuwe openingswet zal uitgevoerd worden door middel van simulaties met een hydraulisch netwerkmodel. Voorafgaand het opstellen van het hydraulisch netwerkmodel heeft WL op 16/04/2021 in situ metingen uitgevoerd. Tijdens deze metingen zijn de actuele openingswet, de nivelleerkromme en de optredende langse waterspiegelhellingen in de kolk bepaald. Aan de hand van de opgemeten nivelleringen is eerst een kalibratie uitgevoerd van de ladingsverliezen van het hydraulisch netwerkmodel. Met het gekalibreerde hydraulisch netwerkmodel is vervolgens een validatie uitgevoerd van de gesimuleerde langse waterspiegelhellingen. Met dit gekalibreerde en gevalideerde hydraulisch netwerkmodel zijn door middel van simulaties nieuwe geoptimaliseerde openingswetten voor boven- en benedenhoofd opgesteld.

Onderhavig rapport is als volgt opgebouwd. De gegevens worden samengevat in hoofdstuk 2. De gehanteerde criteria voor de beoordeling van de simulaties worden gegeven in hoofdstuk 3. Het resultaat van de metingen wordt beschreven in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt de opmaak van het hydraulische netwerkmodel en de hierop volgende de kalibratie en validatie besproken. In hoofdstuk 6 wordt nagegaan binnen welke bereik van de hefschuif er een risico is voor zelfexcitatie. Aan de hand van simulaties met het gekalibreerde en gevalideerde hydraulisch netwerkmodel en de aanbevelingen vanuit hoofdstuk 6 m.b.t. zelfexcitatie wordt in hoofdstuk 7 de openingswet voor boven- en benedenhoofd geoptimaliseerd. De conclusies worden tot slot samengevat in hoofdstuk 8. Aanbevelingen worden geformuleerd in hoofdstuk 9.

2 Gegevens

De geometrie van het nivelleersysteem en de kolk van de sluis te Ooigem wordt gegeven in paragraaf 2.1. Een analyse van de continue peilmetingen en vergelijking met de streefpeilen wordt uitgevoerd in paragraaf 2.2. De op 16/04/2021 uitgevoerde metingen van het kolkpeil, de langse waterspiegelhelling en de hefschuiven worden besproken in paragraaf 2.3.

2.1 Sluis

Voor de sluis te Ooigem zijn volgende plannen ter beschikking gesteld:

- (Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie, 1969a) Kanaal Roeselare - Leie Bouwen van een nieuw sluis te Ooigem Betonplan. pp.1
- (Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie, 1969c) Kanaal Roeselare - Leie Bouwen van een nieuw sluis te Ooigem Schuif. pp.1
- (Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie, 1969b) - Kanaal Roeselare - Leie Bouwen van een nieuw sluis te Ooigem Wijziging aan schuif sluis Ooigem. pp.1

De kolkbreedte bedraagt 12.5 m. De uit het betonplan afgeleide kolklengtes worden gegeven in Tabel 1 en de peilen in Tabel 2. Bemerk in Tabel 1 dat per kolk (volledig of opwaartse en afwaartse deelkolk) twee lengtes gegeven worden. De eerste betreft de uiterste kolklengte van deur tot deur. De uiterste kolklengte wordt bepaald van deurscharnier tot deurscharnier. De invloed van de valmuur, die bij begin nivellering boven water uitsteekt, en de dikte van de deur worden hierbij verwaarloosd. De tweede kolklengte wordt bepaald als de afstand tussen de valmuur voor het bovenhoofd en de deurnissen voor het midden- en benedenhoofd. Met de opwaartse kolkhelft kunnen schepen tot CEMT-klasse I genivelleerd worden, voor de afwaartse kolkhelft kunnen schepen tot CEMT-klasse II genivelleerd schip worden.

Tabel 1 – Kolklengte

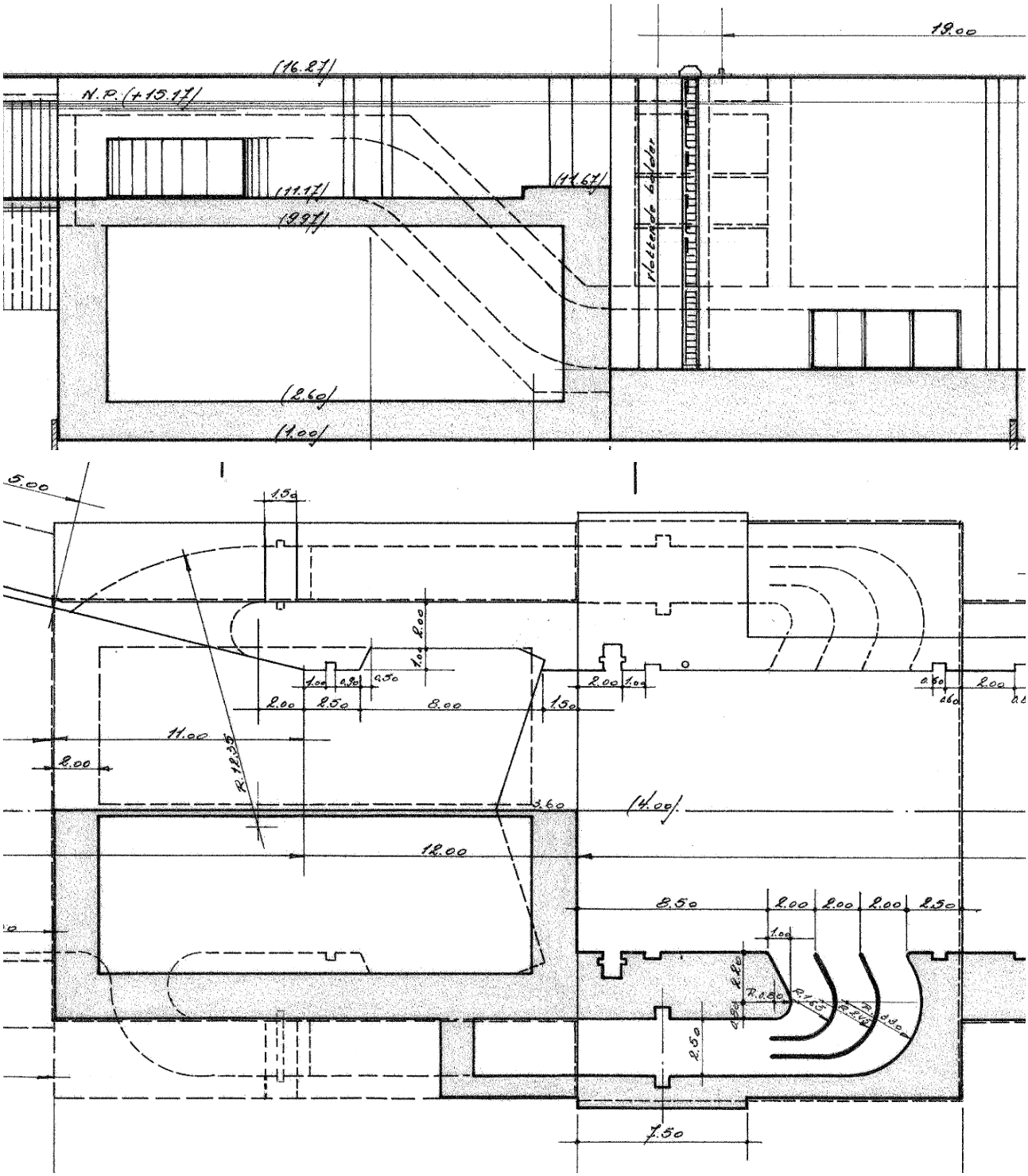
	uiterst	tussen valmuur (opwaarts) en deurnissen	maatgevend schip
volledige kolk	125.0 m	115.0 m	CEMT Va
opwaartse kolkhelft	55.0 m	45.0 m	CEMT I
afwaartse kolkhelft	68.5 m	60.0 m	CEMT II

Tabel 2 – Peilen kolkbodem en streefpeilen

Drempelpeil benedenhoofd	4.50 m TAW
Bodempeil kolk	4.00 m TAW
Drempelpeil bovenhoofd	11.67 m TAW
Afwaarts streefpeil	8.00 m TAW
Opwaarts streefpeil *	15.45 m TAW
Verval bij streefpeilen	7.45 m TAW

* Uit het betonplan van de sluis (Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie, 1969a) volgt een streefpeil 15.17 m TAW voor het kanaal Roeselare Leie. Door dVW (mail Dré Maes dd. 30/07/2021) wordt voor het kanaal een streefpeil 15.45 m TAW opgegeven.

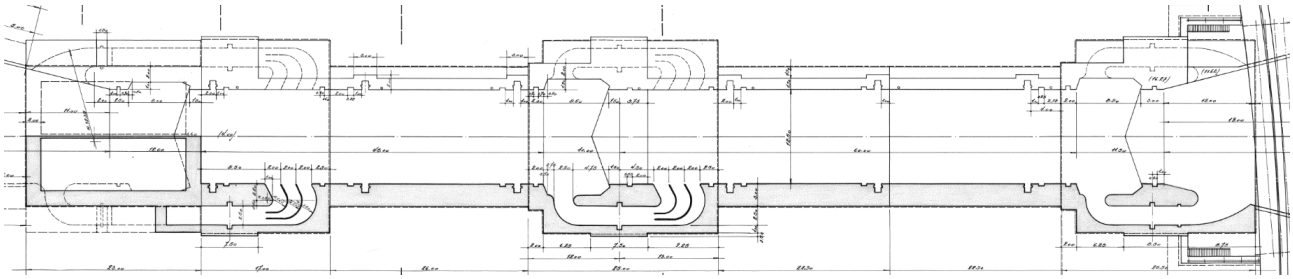
Een detail van het bovenhoofd, overgenomen uit het betonplan, wordt gegeven in Figuur 1. Bemerk hierin dat het nivelleersysteem bestaat uit korte omloopriolen. Zowel de riool aan linkeroever als de riool aan rechteroever heeft een sectie 2.5 m x 2.5 m. Het vloerpeil van de inlaten sluit aan op het vloerpeil van het bovenhoofd. De riolen worden door middel van een gehelde overgang verlaagd tussen de inlaat en de hefschuif. Na de verlaging komt het vloerpeil van de riool overeen met het bodempeil van de kolk. Door middel van een uitstroomconstructie met schoepen wordt de stroming gespreid en loodrecht op de kolk-as gericht.



overgenomen uit Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie (1969a)

Figuur 1 – Sluis Ooigem - nivelleersysteem bovenhoofd doorsnede en planzicht

Een planzicht van de volledig sluis wordt gegeven in Figuur 2. Bemerk hierin dat het nivelleersysteem van het midden en benedenhoofd analoog is met de in Figuur 1 gegeven geometrie van het bovenhoofd. Doordat de riolen van het midden- en benedenhoofd niet meer verlaagd moeten worden zijn deze korter. Ook wordt opgemerkt dat voor de riolen in het benedenhoofd geen schoepen geplaatst zijn in de uitstroomconstructie.



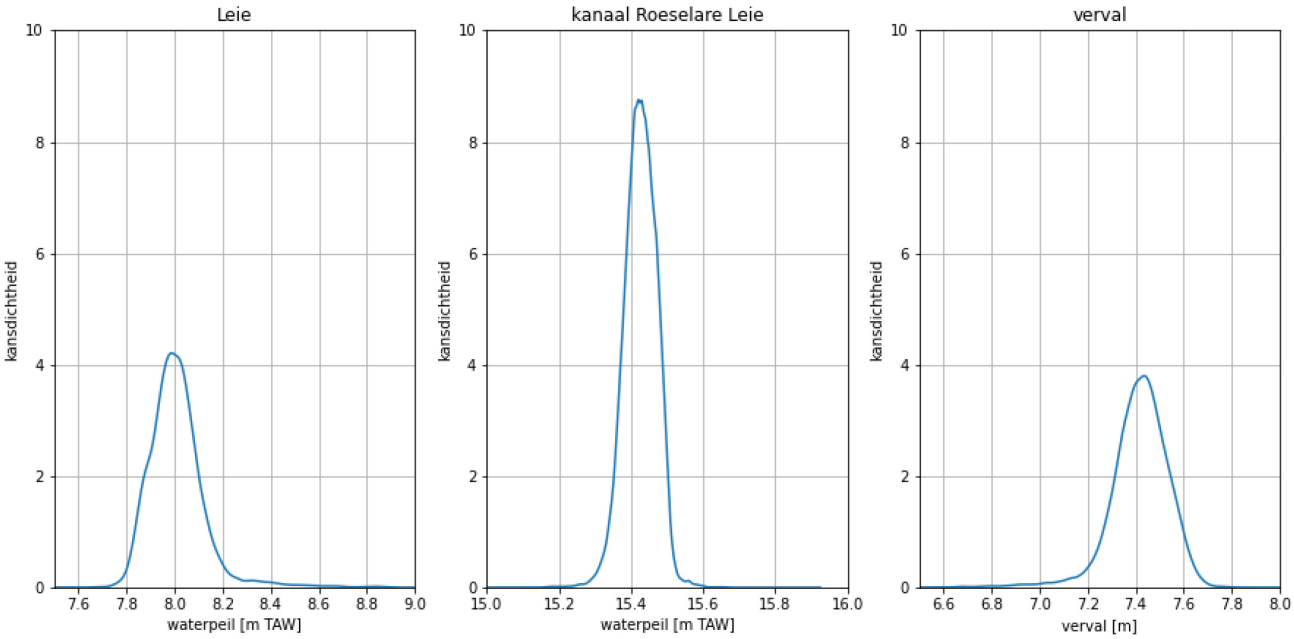
overgenomen uit Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie (1969a)

Figuur 2 – Sluis Ooigem - planzicht

2.2 Analyse waterpeilen

Voor de simulaties ter optimalisatie van de openingswet worden de waterpeilen afgeleid uit de continue waterpeilmetingen. De dichtstbijzijnde meting op het kanaal Roeselare-Leie betreft de meting te Izegem (ca. 9.5 km) opwaarts de sluis. Op de Leie ligt de continue meetpost Desselgem ca. 900 m opwaarts de sluis. Voor de continue peilmeting te Izegem is data beschikbaar sinds 1/7/2017. De analyse wordt hierom uitgevoerd vanaf 1/7/2017 tot 1/5/2021. Via de webservices van het HIC wordt de momentane data met een tijdstap van 1 uur voor beide meetposten opgevraagd. Het verval wordt bepaald als het verschil tussen beide meetposten. Van deze data wordt in

Figuur 3 de kansdichtheid gevisualiseerd.



De kansdichtheid werd bepaald aan de hand van de Kernel Density Estimation functie uit de Pandas Toolbox in Python.

Figuur 3 – Kansdichtheid van de continue peilmetingen op de Leie, het kanaal Roeselare Leie en het verval

De percentielen worden gegeven in Tabel 3.

Tabel 3 – Percentielen van de continue peilmetingen op de Leie, het kanaal Roeselare Leie en het verval

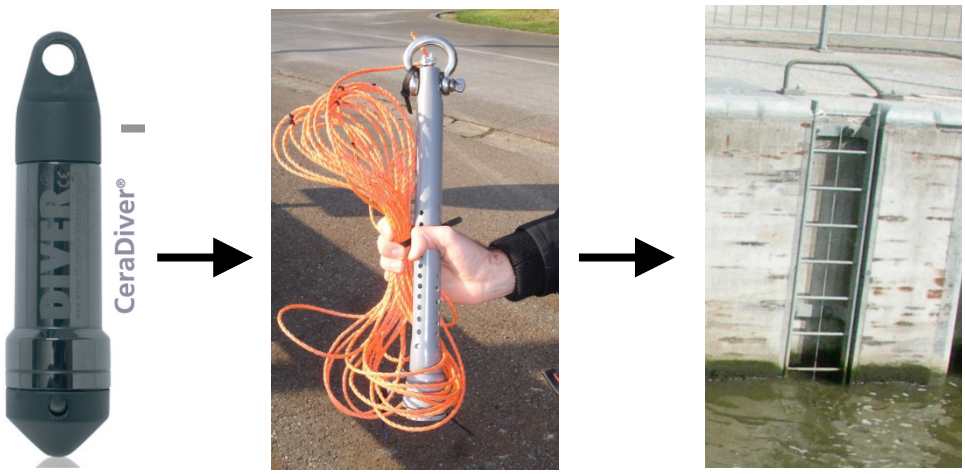
percentiel	# dagen / jaar	Leie [m TAW]	Kanaal Roeselare Leie [m TAW]	Verval [m]
0.001	0.4	7.74	15.22	6.67
0.01	3.7	7.81	15.31	6.97
0.05	18.3	7.85	15.35	7.22
0.50	182.5	8.00	15.43	7.43
0.95	346.8	8.19	15.49	7.59
0.99	361.4	8.49	15.52	7.65
0.999	364.6	8.84	15.59	7.74

Uit de analyse van de continue peilmetingen, gegeven in Figuur 3 en Tabel 3, volgt

- voor de Leie valt het mediaan peil samen met het streefpeil van 8.0 m TAW. De afwijking naar onder toe is beperkt tot ca. 0.25 m. De afwijking naar boven toe is, logischerwijs, hoger. Voor de simulaties is een laag peil op de Leie maatgevend. Voor het peil van de Leie bij de simulaties ter optimalisatie van de openingswet wordt 7.81 m TAW gekozen. Dit betreft een waarde die 3.5 dagen/jaar onderschreden wordt.
- Voor het kanaal Roeselare Leie bedraagt het mediaan waterpeil +15.43 m TAW. Dit is ca. 2 cm lager dan het streefpeil (+15.45 m TAW). Binnen de range van een 0.01 percentiel tot het 0.99 percentiel bedraagt de afwijking ca. +/- 10 cm. Voor het uitvoeren van de simulaties wordt gekozen voor het streefpeil op het kanaal.
- Het mediaan verval bedraagt 7.43 m, dit is 2 cm lager dan het verval 7.45 m horend bij het streefpeil. Bij de voor de simulaties beschouwde peilen op de Leie en het kanaal Roeselare Leie bedraagt het verval 7.64 m (15.45 m TAW – 7.81 m TAW). Deze waarde is juist lager dan de waarde voor het 99 % percentiel.

2.3 Metingen

Tijdens de terreinmeting zijn door WL de waterstanden op verschillende locaties in de sluiskolk opgemeten door middel van in de laddernissen geplaatste druksensoren. Deze druksensoren zijn van het type TD-Diver® (producent Schlumberger). Deze toestellen (Figuur 4, links) worden gemonteerd in een plastieken beschermbuis met ballast (Figuur 4, midden) waarna de meetopstelling in een laddernis (Figuur 4, rechts) wordt neergelaten. De technische specificaties van de druksensoren zijn gegeven in Tabel 4.



Figuur 4 – Meetopstelling waterstanden

Tabel 4 – Technische specificaties druksensoren

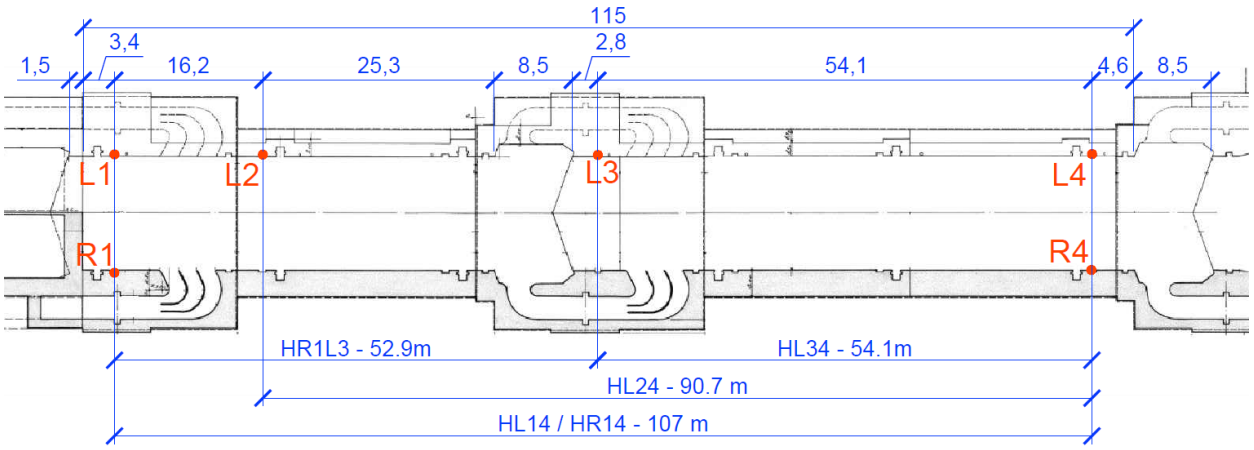
type	meetbereik	nauwkeurigheid over meetbereik		geheugen-capaciteit
	[m]	[%]	[mm]	[# metingen]
TD-Diver	10.00	± 0.05 FS[1]	± 5.0	48000

Het sample interval van deze toestellen kan gekozen worden in de range 0.5 s tot 99 uur. Voor de metingen beschreven in dit rapport werd een waarde van 1 s ingesteld. Tijdens de installatie worden de toestellen gesynchroniseerd met UTC. Voor de rapportage wordt standaardwintertijd gehanteerd (UTC+1).

De TD-Divers® registreren de som van de waterdruk van de bovenliggende waterkolom en de luchtdruk. Om deze totaaldrukken te kunnen vertalen naar waterdrukken werd met een apart meettoestel – een BaroDiver® van de firma Schlumberger – ook nog de luchtdruk tijdens de terreinmeting opgemeten. Uit de waterdruk kan in de postprocessing de hoogte van de lokale waterkolom worden afgeleid met behulp van de hydrostatische drukwet.

De locatie van de druksensoren wordt getoond in Figuur 5. De naamgeving van de meetlocaties bestaat uit een letter ‘L’ of ‘R’ (‘L’ voor een meetlocatie aan linkeroever en ‘R’ voor een meetlocatie aan rechteroever) gevolgd door een nummer. Op basis van het peilverschil tussen twee druksensoren wordt de tussenliggende langse waterspiegelhellingen bepaald. De naamgeving van deze langse waterspiegelhelling bestaat uit de letter ‘H’ (voor helling) gevolgd door de letter ‘L’ of ‘R’ (‘L’ voor een meetlocatie aan linkeroever en ‘R’ voor een meetlocatie aan rechteroever) en gevolgd door de nummers van de druksensoren waartussen de helling wordt berekend.

[1] FS = Full Scale, De relatieve nauwkeurigheid van de druksensoren wordt uitgedrukt ten opzichte van het volledige meetbereik (10.0m).

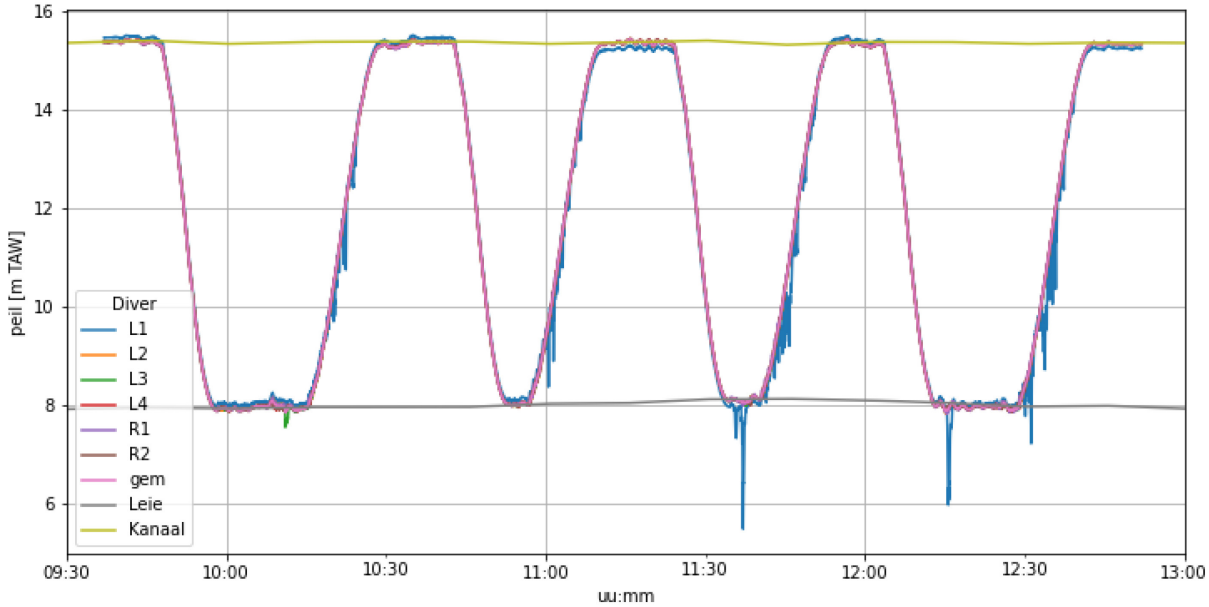


Figuur 5 – Locatie instrumenten

De verwerking van de meetdata gebeurt als volgt:

1. De exacte diepte van de druksensoren in de laddernissen is niet gekend.
    - Als eerste stap zijn de druksensoren ten opzichte van elkaar gerefereerd. Hiervoor wordt de volledige periode geselecteerd waarbinnen alle druksensoren geplaatst zijn. Voor deze periode werd het gemiddelde van de ingezette Divers gelijkgesteld.
    - Hierop werd een gemiddeld kolkpeil bepaald als het gemiddelde over de Divers.
    - Voor de eerste periode waarin het kolkpeil laag stond en waarbij nog geen verstoring opgemerkt werd t.g.v. het invaren van een schip (van 9:58 tot 10:08) werd het gemiddeld kolkpeil gelijkgesteld met de gemiddelde waarde van de continue meting te Desselgem. De hiervoor toegepaste offset werd vervolgens ook op de individuele metingen toegepast. Doordat voor de continue meting slechts data met een tijdstap van 15 min beschikbaar is werd deze door middel van interpolatie verfijnd naar een tijdstap 1 s, analoog met de tijdstap van de Divers. Bemerk dat dit een zeer benaderende methode betreft.
    - Uit de hierop volgende controle voor de overige lage kolkpeilen en de vergelijking met de hoge kolkpeilen met het opwaarts peil volgde dat de overeenkomst tussen het naar TAW omgezette kolkpeil en de continue peilmetingen goed is.
2. De stijg-/daalsnelheid van het kolkpeil wordt afgeleid van het gemiddeld kolkpeil. Om de fluctuaties te reduceren wordt een niet gewogen geruimd gemiddeld over 5 s toegepast op de stijg-/daalsnelheid. De hieruit volgende stijg-/daalsnelheid wordt nog gekenmerkt door enige fluctuatie, te wijten aan ruis op de metingen en de waterspiegelhellingen in de kolk.
3. De langse waterspiegelhelling wordt berekend door het waterstandsverschil tussen twee druksensoren te delen door de (langse) tussenafstand van de respectievelijke laddernissen waarin de betreffende druksensoren geplaatst zijn. De langse waterspiegelhelling is een dimensieloos getal, dat meestal wordt uitgedrukt in promille. In dit rapport wordt de volgende tekenconventie gehanteerd: een langse waterspiegelhelling is positief als de ermee overeenkomstige hydrostatische kracht een schip wegduwt van het voor de nivellering gebruikte “hoofd” (i.e. naargelang het geval: het bovenhoofd of het benedenhoofd van de sluis).
4. Het begin en einde van nivelleren wordt grafisch bepaald aan de hand van de stijg-/daalsnelheid van het kolkpeil.

Een vergelijking van de naar TAW omgezette metingen van het kolkpeil met de continue metingen wordt gegeven in Figuur 6. Bemerk hierin dat druksensor L1 sterk afwijkt en hierom niet meegenomen wordt voor de berekening van het gemiddeld kolkpeil en de langse waterspiegelhelling. De vermoedelijke verklaring voor de afwijking van L1 is dat de buis met de druksensor onderaan uit de laddernis werd getrokken tijdens het vullen van de kolk.



Figuur 6 – Diver metingen na omzetting naar m TAW

De openingswet van de hefschuiven werd benaderend opgemeten door middel van een video opname van een indicator die mee met de hefschuif beweegt. Voorbeeld zie Figuur 7. De afstand tussen de onderzijde van de indicator en de bovenzijde van de bovenste geleidingsring werd op de opnames afgemeten. Als referentiewaarde werd met een vouwmeter de afstand tussen de bovenzijde van de ring en de onderzijde van de flens opgemeten. De verwerking gebeurt als volgt:

- uit de opnames wordt het start- en eindtijdstip per openingsstap afgeleid.
- een opnamebeeld net voor het begin van een openingsstap en een opnamebeeld net na het einde van een openingsstap werd in een autocad tekening geïmporteerd.
- in autocad werd zowel de uitslag van de indicatorstang als de referentieafstand opgemeten uit de opname. In een spreadsheet wordt vervolgens de uitslag van de indicatorstang verschaald op basis van de referentieafstand.
- zowel de tijd als de uitslag van de indicatorstang werden vervolgens gerefereerd ten opzichte van de tijd en de uitslag van de indicatorstang net voorgaand de eerste openingsstap.

Tussen beide metingen van een tussenliggende rustperiode werden verschillen tot ca. 4 cm gevonden. Gekozen werd om voor de metingen een gemiddelde te hanteren. Bemerk dat de op deze wijze bepaalde openingswet beschouwd dient te worden als een benadering. Zowel op vlak van de gebruikte camera, de opname methodiek als de verwerking zijn er optimalisaties te bedenken die de nauwkeurigheid sterk verbeteren. Niettegenstaande de benaderende opmetingsmethode worden de metingen als bruikbaar beschouwd voor de interpretatie van de metingen en als input voor de simulaties.

Figuur 7 – Beeld opname indicator stang

Een overzicht van de opgemeten schepen tijdens de nivellering wordt gegeven in Tabel 5. De lengte en breedte van de schepen werden opgevraagd bij de sluismeester. Op basis van de lengte en breedte werd een CEMT-classificatie toegekend. Tijdens de meetcampagne werden foto's genomen. Op basis van deze foto's werd bepaald of de schepen geladen of niet geladen waren. Vervolgens wordt de typische diepgang per CEMT classificatie voor respectievelijk een geladen en een niet geladen schip overgenomen Richtlijnen Vaarwegen (Koedijk, 2020). Dit met uitzondering van de tweede nivellering waar de diepgang gebaseerd is op een foto van een diepteaanduiding op de romp. De locatie van het schip in de kolk, en hiermee de afstand ten opzichte van het voor nivelleren gebruikt sluishoofd, werd benaderend bepaald door op opnames de locatie van de boeg te refereren aan de laddernissen.

Tabel 5 – Verschutte schepen

Volgnummer	Type	start	Scheepsklasse	L	B	lading	diepgang (raming)	Afstand tov voor nivelleren gebruikte hoofd **
1	L	9:48	CEMT IV	85	9.5	leeg	1.60	25.0
2	V	10:15	CEMT Va	86	10.5	geladen	2.80*	11.3
3	L	10:43	CEMT III	80	8.1	leeg	1.50	28.1
4	V	10:56	Leeg					/
5	L	11:24	CEMT Va	110	11.44	leeg	1.80	13.0
6	V	11:40	Leeg					
7	L	12:03	CEMT Va	110	11.45	leeg	1.80	11.0
8	V	12:29	CEMT III	55	7.2	geladen	2.60	32.9

* op basis van maatstreep op boeg
** ten opzichte van scharnierpunt deur

3 Criteria

Bemerk dat de sluis te Ooigem vòòr en na renovatie uitgerust is met drijvende bolders. Hierdoor dient geen criterium opgelegd te worden op de maximale stijg- daalsnelheid. De criteria voor de langskracht van toepassing voor ledigen of vullen met drijvende bolders wordt gegeven in Tabel 6.

Tabel 6 – Toegepaste criteria lanskracht

		CEMT-klasse Va	CEMT-klasse IV	CEMT-klasse III	recreatievaart
criterium	[‰]	1.15	1.50	2.00	3.00
bron	-	(Beem *et al.*, 2000)	(Beem *et al.*, 2000)	(Beem *et al.*, 2000)/ (Vrijburcht, 1992)	(Beem *et al.*, 2000)

4 Terreinmeting 16/04/2021

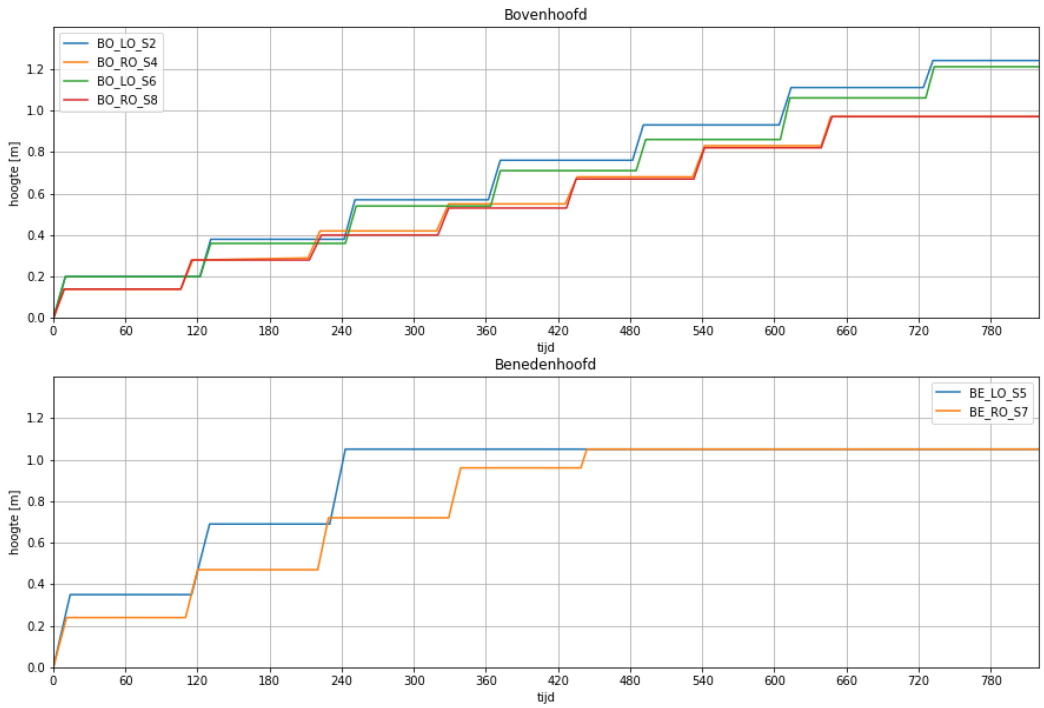
Onderhavig hoofdstuk bespreekt het resultaat van de op 16/04/2021 uitgevoerde meting. De opgemeten openingswet van de hefschuiven in de omloopriolen wordt besproken in paragraaf 4.1. De opgemeten nivelleerkromme en langse waterspiegelhellingen worden besproken in paragraaf4.2.

Per opgemeten nivellering wordt in bijlage 3 een grafiek gegeven met de opgemeten nivelleerkromme, de stijg- of daalsnelheid van het waterpeil in de kolk, de openingswet van de hefschuiven voor het betreffende hoofd en de opgemeten langse waterspiegelhellingen.

4.1 Openingswet hefschuiven

De openingswet werd opgemeten tijdens 6 van de 8 nivelleringen. Van deze 6 nivelleringen ontbrak van 2 metingen de eerste fase. Per hefschuif is er één volledig meting. Zoals reeds in paragraaf 2.3 aangegeven, werd de openingswet opgemeten met een zekere onnauwkeurigheid.

In Figuur 8 worden de opgemeten openingswetten gegeven. Voor de hefschuiven waarbij de eerste fase ontbrak (BO_LO_S6 resp. BO_RO_S4) werd deze overgenomen van de meting waarbij de openingswet volledig werd geregistreerd (BO_LO_S2 en BO_RO_S8). Voor de vergelijking met de opgemeten waterspiegelhellingen en met de uitgevoerde simulaties wordt per schuif de openingswet gekozen die volledig opgenomen werd. Dit betreft BO_LO_S2 en BO_RO_S8 voor het bovenhoofd en BE_LO_S5 en BE_RO_S7 voor het benedenhoofd. Deze openingswetten worden gegeven in Tabel 7.



Figuur 8 – Openingswet hefschuiven

Tabel 7 – Opgemeten openingswet hefschuiven

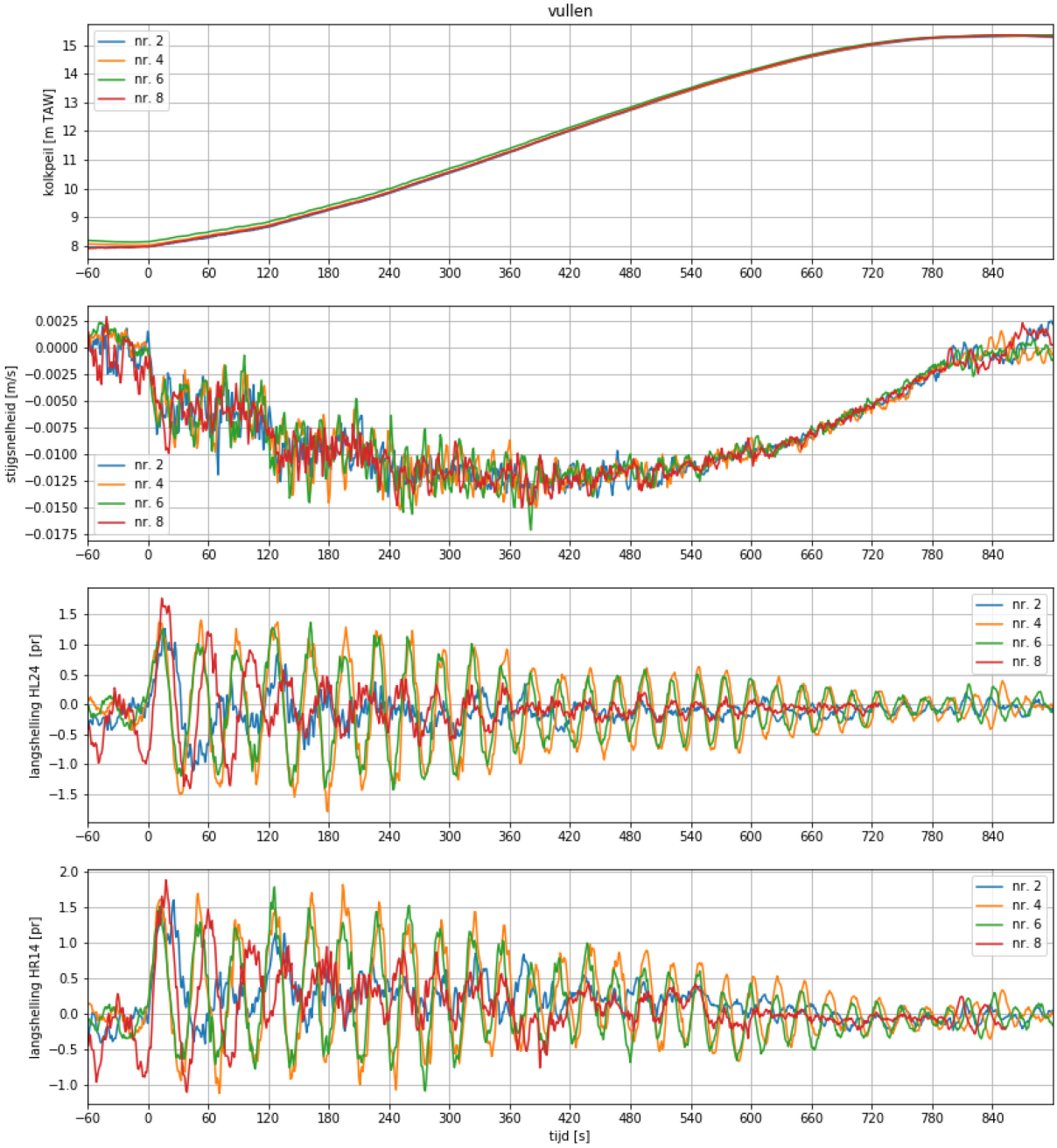
bovenhoofd						benedenhoofd					
linkeroever			rechteroever			linkeroever			rechteroever		
tijd [s]	positie [m]	$\Delta_{positie}$ [m]	tijd [s]	positie [m]	$\Delta_{positie}$ [m]	tijd [s]	positie [m]	Δpositie [m]	tijd [s]	positie [m]	$\Delta_{positie}$ [m]
0	0.00		0	0.00		0	0.00		0	0.00	
10	0.20	0.20	9	0.14	0.14	14	0.35	0.35	10	0.24	0.24
122	0.20	0.00	106	0.14	0.00	115	0.35	0.00	122	0.24	0.00
131	0.38	0.18	115	0.28	0.14	130	0.69	0.34	131	0.47	0.23
242	0.38	0.00	213	0.28	0.00	230	0.69	0.00	242	0.47	0.00
251	0.57	0.19	223	0.40	0.12	243	1.05	0.36	251	0.72	0.25
362	0.57	0.00	320	0.40	0.01				362	0.72	0.00
372	0.76	0.19	329	0.53	0.13				372	0.96	0.24
482	0.76	0.00	427	0.53	0.00				482	0.96	0.00
491	0.93	0.17	435	0.67	0.14				491	1.05	0.09
604	0.93	0.00	533	0.67	0.00						
614	1.11	0.18	542	0.82	0.15						
724	1.11	0.00	639	0.82	0.00						
732	1.24	0.13	648	0.97	0.15						

Uit de opgemeten openingswet volgt:

- Zowel de schuiven in het bovenhoofd als de schuiven in het benedenhoofd openen niet volledig. De riolen hebben een hoogte 2.50 m. De benaderend opgemeten hefhoogte bedraagt 1.24 m en 0.97 m in het bovenhoofd en 1.05 m in het benedenhoofd.
- De schuiven in het benedenhoofd worden sneller geopend door het reduceren van het aantal openingsstappen en het vergroten van de hefhoogte per openingsstap.
- zowel voor het bovenhoofd- als het benedenhoofd is er een verschil tussen de opening van de schuiven in linker- en rechteroever.

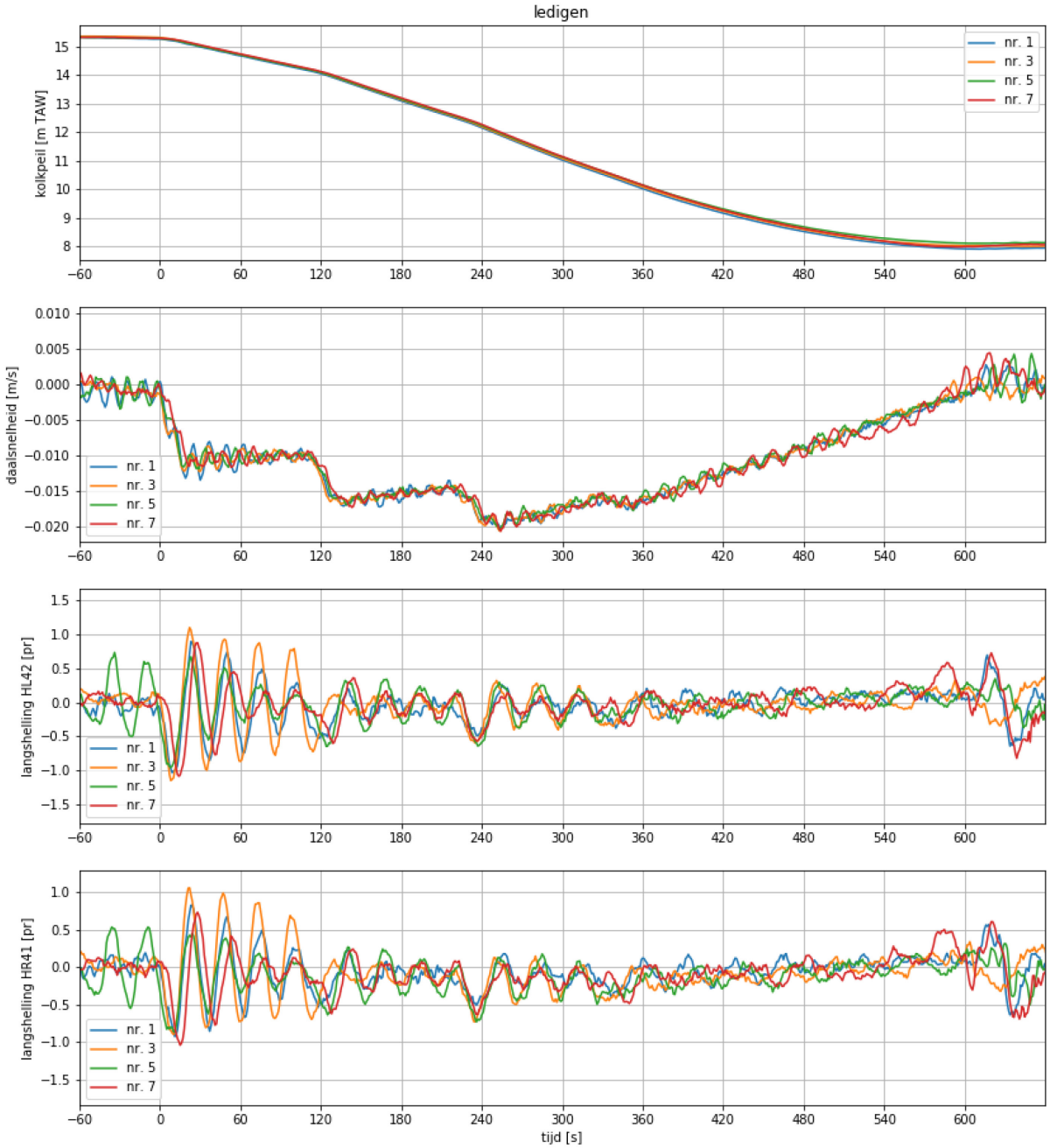
4.2 Nivelleerkromme en langse waterspiegelhelling

De variatie in de tijd van nivelleerkromme, de stijg- en daalsnelheid en de twee uiterste langse waterspiegelhellingen zijn voor elke opgemeten nivellering samen voorgesteld in Figuur 9 voor vullen en in Figuur 10 voor ledigen.



Figuur 9 – Overzichtsfiguur opgemeten vullingen

De 4 opgemeten vullingen vallen zowel op vlak van nivelleerkromme als op vlak van verloop van de stijgsnelheid in de tijd zo goed als samen. Uit paragraaf 2.1 volgde dat de openingswet voor vullen bestaat uit 7 stappen. De eerste 3 à 4 van deze stappen zijn te herkennen in het verloop van de stijgsnelheid. Voor de langse waterspiegelhellingen wordt opgemerkt dat deze na de eerste piek sterker uitdempen voor de twee nivelleringen met schip (nivellering nr. 2 en nr. 8) in vergelijking met de nivelleringen zonder schip (nivellering nr. 4 en nr. 6). Voor nivellering nr. 2 waarbij een CEMT IV schip genivelleerd is deze demping al merkbaar na de eerste piekwaarde. Voor de nivellering met het kleinere CEMT II schip is de demping minder uitgesproken.



Figuur 10 – Overzichtsfiguur opgemeten ledigingen

De 4 opgemeten ledigingen vallen zowel op vlak van nivelleerkromme als op vlak van verloop van de daalsnelheid in de tijd zo goed als samen. Ook hier is de openingswet duidelijk herkenbaar in het verloop van de daalsnelheid van het kolkpeil in de tijd. De grootste waterspiegelhellingen komen voor na de eerste openingsstap. De toename van de langse waterspiegelhelling na de volgende openingsstappen is veel kleiner. Ook hier wordt een verschil opgemerkt in de mate van demping na de eerste piek. Bij de vullingen was dit verschil groter en duidelijk toe te schrijven aan het al dan niet aanwezig zijn van een schip in de kolk. Alle 4 de ledigingen zijn met een, niet geladen, schip in de kolk uitgevoerd. De demping volgend op de eerste golf is het meest uitgesproken voor nivellering nr. 5 en nr. 7 en het minst uitgesproken voor nivellering nr. 3. Wanneer dit vergeleken wordt met de CEMT-classificatie volgt dat, analoog als bij vullen, de demping toeneemt bij een toename van de scheepsklasse.

Voor elk van deze nivelleringen geeft Tabel 8 een overzicht van het start- en eindtijdstip, de nivelleertijd, de maximale stijgsnelheid, het verval en de extrema van de langse waterspiegelhellingen.

Tabel 8 – Nivelleertijd en extremum van de stijgsnelheid en langshelling van de opgemeten nivelleringen

Nr.	type	verschut schip	start	einde	nivelleertijd		verval [m]	dhdt_extr [m/s]	Extremum langshelling*			
					[s]	[min]			HR14 [‰]	HL24 [‰]	HR1L3 [‰]	HL34 [‰]
1	L	CEMT IV (L= 85 m; niet geladen)	09:47:52	09:58:04	612	10.2	7.38	-0.020	0.92	1.03	1.12	1.60
2	V	CEMT Va (L=86 m; geladen)	10:15:17	10:28:41	804	13.4	7.32	0.015	1.61	1.27	2.90	-1.67
3	L	CEMT III (L= 80 m; niet geladen)	10:42:48	10:52:39	591	9.9	7.30	-0.021	-1.06	1.15	-1.47	1.66
4	V	/	10:56:52	11:10:50	838	14.0	7.31	0.015	1.82	-1.80	2.93	-2.65
5	L	CEMT Va (L= 110 m; niet geladen)	11:24:09	11:34:25	616	10.3	7.20	-0.021	0.87	0.96	0.82	1.54
6	V	/	11:40:25	11:53:44	799	13.3	7.18	0.017	1.79	-1.43	3.31	-2.09
7	L	CEMT Va (L= 110 m; niet geladen)	12:03:25	12:13:25	600	10.0	7.32	-0.021	1.04	1.09	0.94	1.38
8	V	CEMT III (L=55 m; geladen)	12:28:51	12:42:20	809	13.5	7.33	0.015	1.89	1.77	2.35	2.39

* Groen voldoet aan het criterium voor de langskracht / Rood voldoet niet aan het criterium voor de langskracht

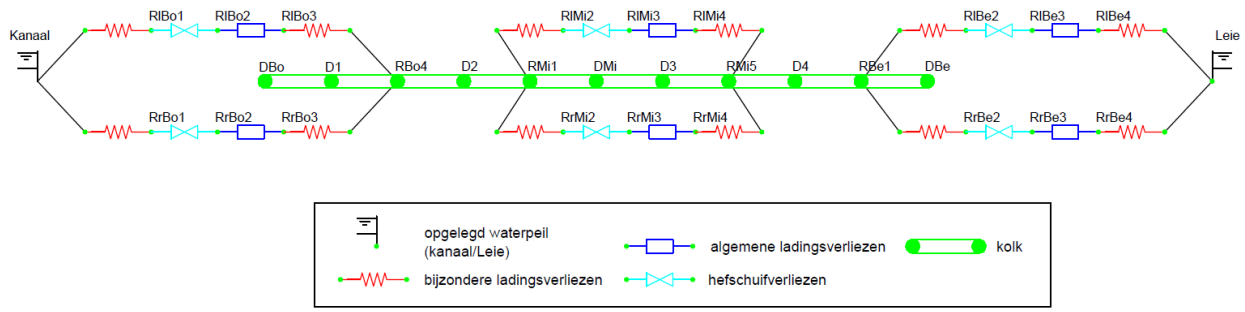
Bemerk in Tabel 8 dat de nivelleertijd ca. 13.5 min bedraagt voor vullen en ca. 10.0 min voor ledigen. Het extremum van de stijg-/daalsnelheid bedraagt ca. 1.5 cm/s voor vullen en ca. 2.0 cm/s voor ledigen. Het extremum van de langse waterspiegelhelling wordt vergeleken met de criteria uit Tabel 6 voor het in de kolk gelegen schip tijdens de nivellering. Bij overschrijding resp. onderschrijding van het criterium wordt het betreffende vakje rood resp. groen gekleurd. Voor een CEMT Va, met een lengte 110 m, is enkel de uiterste langshelling HR14 relevant, voor een CEMT III, IV en Va, met een lengte tussen 80 m en 86 m, wordt vergeleken met langshelling HR14 en HL24 en voor de nivellering met het CEMT IIIschip, met lengte 55 m, de langse waterspiegelhellingen HR1L3 en HL34 relevant. Bemerk dat voor ledigen steeds voldaan wordt aan de criteria voor de langse waterspiegelhelling. Voor vullen wordt het criterium met 40 % (1.61 ‰ t.o.v. 1.15 ‰) overschreden voor het CEMT Va schip en met 20 % (2.39 ‰ t.o.v. 2.00 ‰) voor het CEMT III schip.

5 Hydraulisch netwerkmodel

Van de sluis te Ooigem wordt een hydraulisch netwerkmodel opgesteld. Dit netwerkmodel wordt beschreven in paragraaf 5.1. Aan de hand van de in hoofdstuk 4 beschreven metingen zijn eerst de hydraulische ladingsverliezen van het model gekalibreerd, zie paragraaf 5.2. Na kalibratie van de ladingsverliezen is een validatie uitgevoerd van de gesimuleerde langse waterspiegelhellingen, zie paragraaf 5.3.

5.1 Hydraulisch netwerkmodel

Het schema van het hydraulisch netwerkmodel wordt gegeven in Figuur 11.



Figuur 11 – Hydraulisch netwerkmodel

De verschillende componenten betreffen

- Een constant peil voor het kanaal Roeselare Leie en voor de Leie.
- Algemene ladingsverliezen. Deze component neemt zowel wrijvingsverliezen als inertie in de riolen in rekening. Voor de wrijving wordt gerekend met een wandruwheid 3 mm, wat een representatieve waarde is voor oud beton.
- Bijzondere ladingsverliezen. Deze component bevat de lokale ladingsverliezen ten gevolge van inlaten, bochten en uitlaten. Aan de inlaat wordt een verliescoëfficiënt 0.5 toegekend, aan de uitstroomconstructie een verliescoëfficiënt 1.5. Voor het bovenhoofd wordt een bijkomende verliescoëfficiënt 0.5 toegekend aan de uitstroomconstructie omwille van de twee bochten in het verticale vlak.
- Hefschuifverliezen. Deze component heeft dezelfde sectie als de omloopriool. De invloed van een gedeeltelijk geopende hefschuif wordt opgenomen in de opgegeven hydraulische verliescoëfficiënt in functie van de hoogte. De verliezen van de hefschuif betreffen een door middel van inter- en extrapolatie verfijnde reeks uit Idel'Cik (1969). Bij de simulaties in het kader van de validatie en de kalibratie wordt de hefhoogte in functie van de tijd overgenomen uit de metingen, zie paragraaf 4.1. De kalibratie van het model wordt uitgevoerd door het toepassen van een coëfficiënt op de hefschuifverliezen uit Idel'Cik (1969), zie paragraaf 5.2.
- De kolk betreft een sectie met een vrij oppervlak waarin de 1D Saint Venant ondiep water vergelijkingen opgelost worden. Het bodempeil van de kolk wordt op +4.00 m TAW gelegd. De verhoging ten gevolge van de valmuur aan het bovenhoofd en de opstaande drempel van de

middendeur wordt verwaarloosd. De kolkbreedte bedraagt 12.5 m. De aanwezigheid van een schip wordt benaderend in rekening gebracht door het reduceren van de dwarssectie en het vergroten van de natte sectie. Per sectie dient één wandruwheid opgegeven te worden. Gekozen wordt om zowel voor de kolkwand als voor het schip een wandruwheid 3 mm op te geven. Voor het schip zal dit een overschatting betreffen. De lengte van de componenten van de kolk wordt gegeven in Tabel 10. Bij de aanwezigheid van een schip wordt hier een knooppunt voor de boeg en het hek tussengevoegd. De secties van de componenten tussen boeg en hek wordt aangepast naar een sectie met schip. Voor de simulaties van de metingen met schip wordt de positie, lengte, breedte en diepgang uit Tabel 5 gebruikt.

Tabel 9 – Hydraulisch netwerkmodel sectie, lengte omloopriolen en bijzondere ladingsverliezen

		bovenhoofd	middenhoofd	benedenhoofd
breedte	[m]	2.5	2.5	2.5
hoogte	[m]	2.5	2.5	2.5
sectie	[m^2]	6.25	6.25	6.25
hydraulische diameter	[m]	2.5	2.5	2.5
verliescoëfficiënt inlaat	[-]	0.5	0.5	0.5
leiding wandruwheid	[m]	0.003	0.003	0.003
lengte	[m]	37.8	20.9	19.6
verliescoëfficiënt uitlaat	[-]	2.0	1.5	1.5

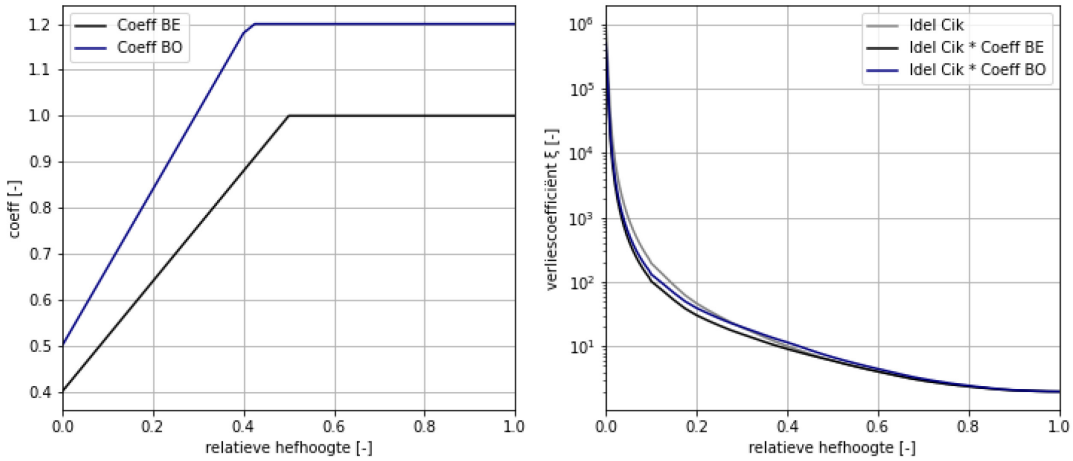
Tabel 10 – Hydraulisch netwerkmodel componenten kolk

Knooppunt 1	Knooppunt 2	Lengte [m]
Dbo	D1	4.9
D1	RBo4	8.1
RBo4	D2	7.8
D2	RMi1	28.3
RMi1	DMi	5.9
DMi	D3	2.8
D3	RMi4	6.2
RMi4	D4	47.9
D4	RBe1	7.1
RBe1	DBe	6.0
totaal		125.0

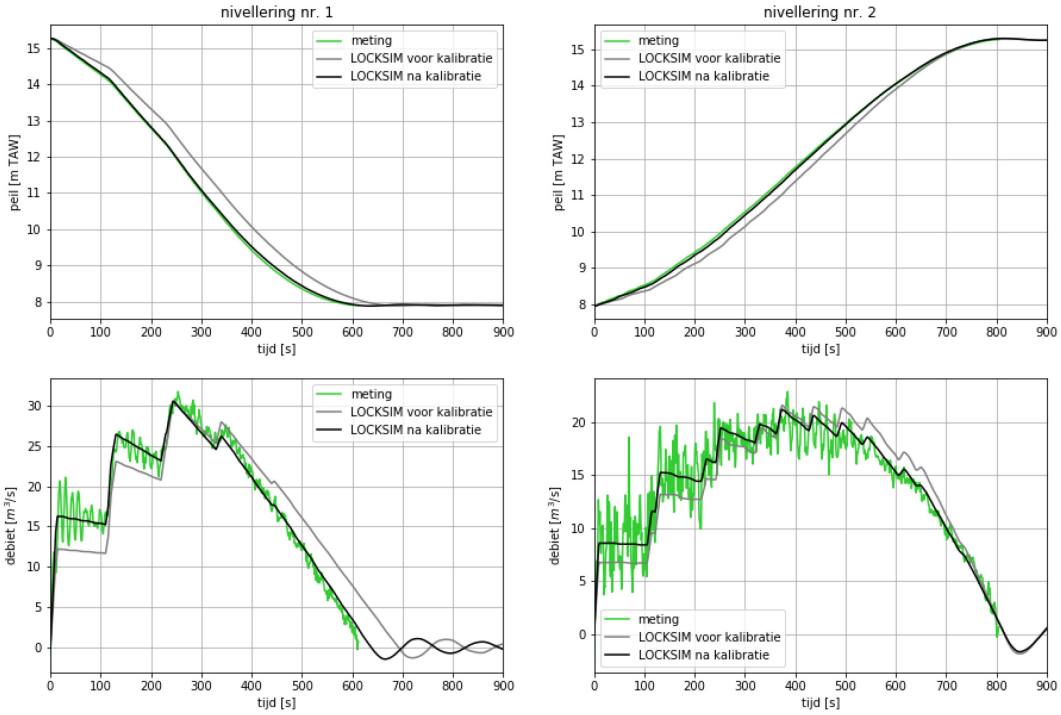
5.2 Kalibratie ladingsverliezen

De kalibratie van de hydraulische ladingsverliezen wordt uitgevoerd op de eerste opgemeten vulling en lediging. Bij een eenvoudige kalibratie wordt de hydraulische verliescoëfficiënt van één component, bv. de uitlaat, verhoogd of verlaagd met een constante waarde. Doordat de hefschuif bij einde nivellering slechts ca. 50 % geopend is zijn de verliezen ten gevolge van de hefschuiven nog dominant. Om deze reden wordt de verliescoëfficiënt van de hefschuiven gebruikt als afregelparameter. Hiervoor wordt een coëfficiënt toegepast op de verliescoëfficiënt uit Idel'Cik. Deze coëfficiënt wordt iteratief aangepast tot er een goede overeenkomst is tussen het debiet volgend uit de meting en het gesimuleerde debiet. De toegepaste coëfficiënt in functie van de opening en de gewijzigde verliescoëfficiënt worden gegeven in Figuur 12. De nivelleerkromme en variatie in de tijd van het debiet voor nivellering nr. 1 en nivellering nr. 2 voor en na kalibratie worden gegeven in Figuur 13. Bemerk dat de op deze wijze aangepaste verliescoëfficiënt zorgt voor een goede overeenkomst tussen de opgemeten en gesimuleerde nivelleerkromme en verloop van het debiet in de tijd maar dat deze met de nodige voorzichtigheid toegepast dient te worden:

- de nauwkeurigheid van de op deze wijze bepaalde verliescoëfficiënt is in sterke mate afhankelijk van de nauwkeurigheid van de positiebepaling van de hefschuiven. Deze positiebepaling is echter zeer benaderend opgemeten waardoor ook de verliescoëfficiënt van de hefschuiven gekenmerkt wordt door een grote onzekerheid.
- de openingswet bestaat uit verschillende stappen. De afregeling gebeurde hierdoor op de tussenstappen. Hierdoor is de kalibratie niet van toepassing voor hefhoogtes kleiner dan de eerste openingsstap. Ook is de kalibratie niet van toepassing voor een hogere hefhoogte dan de maximale hefhoogte tijdens de metingen. Om deze reden wordt de coëfficiënt ook constant gehouden vanaf een hefhoogte 0.4 voor het bovenhoofd en 0.5 voor het benedenhoofd.



Figuur 12 – Gekalibreerde verliescoëfficiënt



Figuur 13 – Nivelleerkromme en debiet voor en na kalibratie

5.3 Validatie langshellingen

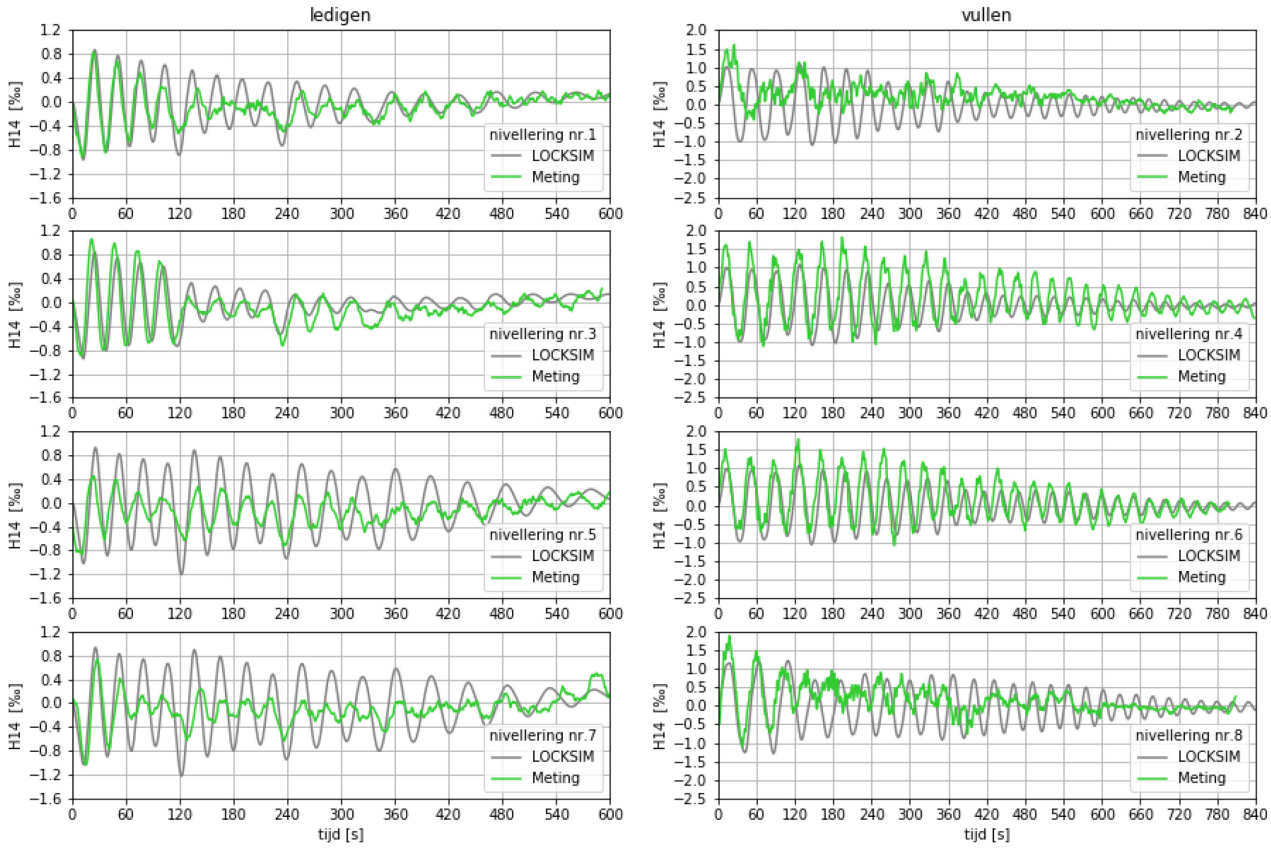
Na kalibratie van de ladingsverliezen wordt een validatie uitgevoerd van de langse waterspiegelhellingen. Hiervoor worden de 8 opgemeten nivelleringen gesimuleerd. Een vergelijking tussen de opgemeten en de gesimuleerde nivelleertijd, stijgsnelheid en extremum van de end-to-end langse waterspiegelhelling wordt gegeven in Tabel 11. Het verloop van de opgemeten en gesimuleerde langse end-to-end waterspiegelhellingen wordt gegeven in Figuur 14. Per nivellering wordt in Bijlage 4 een figuur gegeven waarin de opgemeten en gesimuleerde nivelleerkromme, stijgsnelheid en langse waterspiegelhelling vergeleken worden.

Tabel 11 – Validatie hydraulisch netwerkmodel

Nivellering nr.	type	nivelleertijd			stijgsnelheid			End-to-end langse waterspiegelhelling H14		
		meting	simulatie	Δ*	meting	simulatie	Δ*	meting	simulatie	Δ*
		[s]	[s]	[-]	[m/s]	[m/s]	[-]	[‰]	[‰]	[-]
1	L	612	609	0%	0.020	0.020	0%	0.92	-0.97	5%
2	V	804	781	-3%	0.015	0.014	-4%	1.61	1.10	-32%
3	L	591	607	3%	0.021	0.020	-4%	-1.06	-0.95	-11%
4	V	838	784	-6%	0.015	0.014	-8%	1.82	1.09	-40%
5	L	616	607	-1%	0.021	0.020	-2%	0.87	-1.21	39%
6	V	799	780	-2%	0.017	0.014	-18%	1.79	1.08	-40%
7	L	600	611	2%	0.021	0.020	-2%	1.04	-1.22	18%
8	V	809	780	-4%	0.015	0.015	-4%	1.89	-1.29	-32%

*Δ = (simulatie – meting) / meting

Dat overeenkomst op vlak van nivelleertijd na kalibratie is zeer goed. Het extremum van de stijgsnelheid en dus ook het extremum van het debiet lijkt iets onderschat te worden door de simulaties. Dit is te wijten aan de aanwezigheid van fluctuaties op de uit de nivelleerkromme afgeleide stijg- en daalsnelheid. Uit de visuele vergelijking van de figuren, zie bijlage 4, valt op dat ook voor de stijgsnelheid de overeenkomst zeer goed is. Wat betreft het extremum van de end-to-end langse waterspiegelhelling is er een onderschatting met 30 % tot 40 % voor vullen. Voor ledigen bedraagt de uit de figuren afgeleide afwijking op het extremum van de eerste piekwaarden +/- 12 % wat als zeer goed wordt bevonden. De grotere afwijking van 39 % respectievelijk 18 % tijdens nivellering nr. 5 respectievelijk nr. 7 treedt op na 120 s en is het gevolg van het versterken van de schutgolf in de simulaties ten gevolge van een openingstap van de hefschuiven.

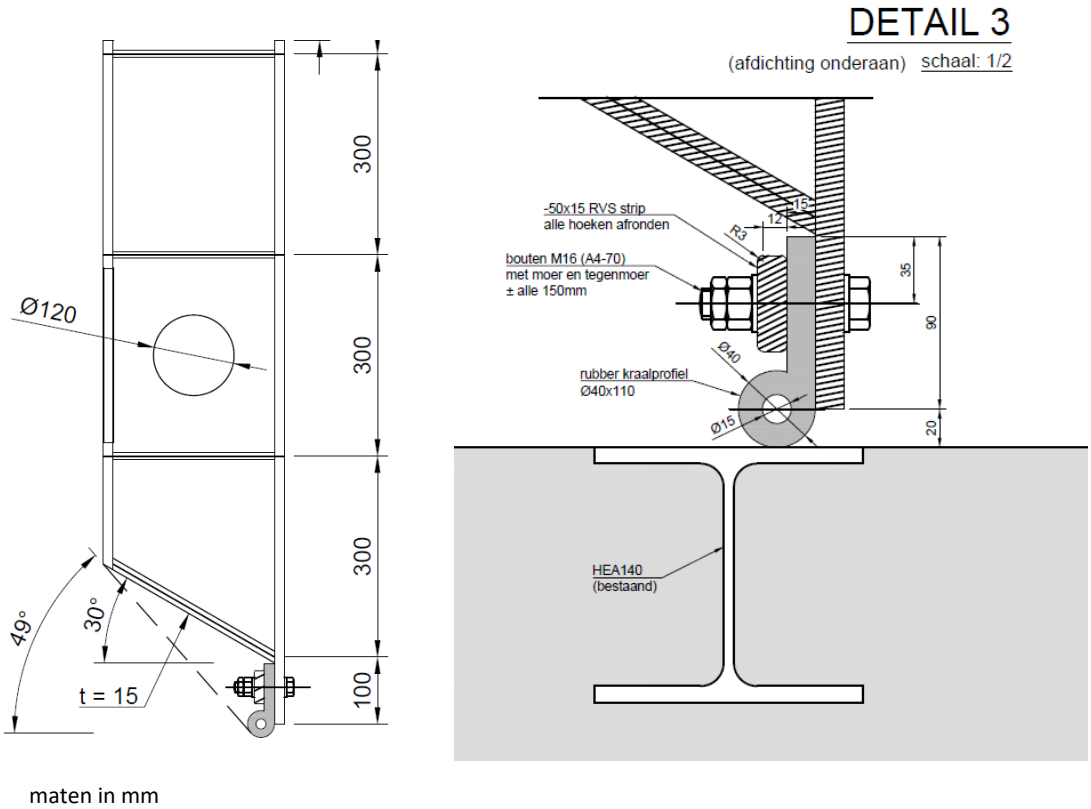


Figuur 14 – Validatie langse waterspiegelhellingen

Voor de ledigingen wordt opgemerkt dat voor nivellering nr. 1 en nr. 3 de overeenkomst tussen de metingen en simulaties zeer goed is. Bij nivelleringen nr. 5 en nr. 7 is de overeenkomst van de eerste negatieve piek goed. Bij nivellering nr. 5 wordt de langse waterspiegelhelling sterker gedempt na de eerste positieve piek en bij nivellering nr. 7 wordt dit opgemerkt volgend op de tweede negatieve piek. Voor de vullingen wordt opgemerkt dat de eerste piekwaarde consequent onderschat wordt. Deze onderschatting komt overeen met de uit Tabel 11 volgende onderschatting van het extremum met 30% tot 40 %. Volgend hierop wordt een merkelijk verschil opgemerkt tussen de simulaties met schip (nivellering nr. 2 en 8) en de simulaties zonder schip (nivellering nr. 4 en 6). Voor de simulaties zonder schip is er een goede gelijkenis van het patroon tussen de metingen en simulaties. Voor de nivelleringen met schip werd in de metingen een aanzienlijke verstoring van de langse waterspiegelhelling en hiermee demping opgemerkt. Bij de simulaties van de nivelleringen met schip wordt enkel voor nivellering nr. 3 de demping niet onderschat. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat bij het toepassen van een getrapte openingswet de in de kolk aanwezige langse waterspiegelhelling zowel versterkt als gedempt kan worden ten gevolge van een openingsstap. De gevoeligheid hiervoor kan onderzocht worden door voor een gegeven nivellering een aantal simulaties uit te voeren waarbij een openingsstap systematisch in de tijd wordt verschoven.

6 Risico op zelfexcitatie van de hefschuif

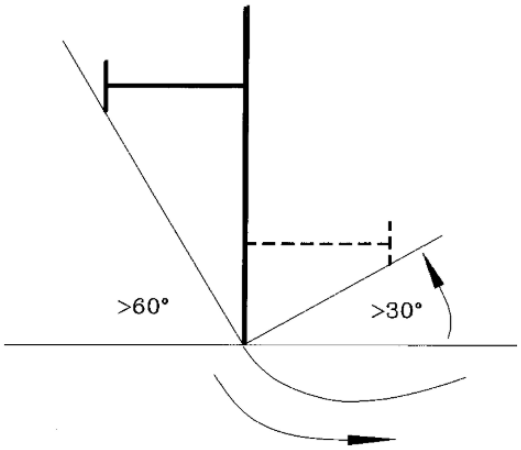
Een doorsnede en detail van de onderzijde van de hefschuif wordt gegeven in Figuur 15. De afdichting en het loslaatpunt bevinden zich aan de afwaartse zijde van de hefschuif. Bemerk dat deze set-up voor een naar beneden gerichte aanzuigkracht zorgt bij stroming van op- naar afwaarts. De dichting wordt voorzien door middel van een rubberen dichtingsprofiel, een zogenaamd muzieknootprofiel.



Figuur 15 – Doorsnede rubberen dichtingslip onderzijde wagonschuif

Bij hefschuiven dient voorkomen te worden dat na het loslaatpunt de stroming terug aanhecht omdat dit resulteert in trillingen. Het loslaatpunt betreft hier de afwaarts geplaatste rubberen dichting waardoor dus voorkomen dient te worden dat opwaarts van de dichting al loslating optreed. Ontwerp van schutsluizen (Beem *et al.*, 2000) geeft hierom richtlijnen voor de hoek van de raaklijn tussen het loslaatpunt en de op- en afwaartse structuur van de hefschuif, zie Figuur 16. Opwaarts het loslaatpunt wordt aanbevolen om in een 60° naar boven gerichte hoek ten opzichte van de horizontale geen structurele elementen te plaatsen. Deze hoek werd bepaald uit proeven met een opwaartse afschuining 30° en 60° (Kolkman & Jongeling, 1996). Uit deze proeven volgde dat bij een afschuining 30° instabiliteiten voorkwamen die niet werden vastgesteld bij een afschuining 60°. Om fluctuaties ten gevolge van het opnieuw aanhechten van stroming te voorkomen wordt in Ryszard & Paulus (2019) aanbevolen om ten opzichte van het loslaatpunt zowel naar opwaarts als naar afwaarts een naar boven gerichte afschuining van 45° toe te passen. Bemerk dat de opwaarts gerichte afschuining hier 49° bedraagt en dus voldoet aan de aanbeveling gegeven in Ryszard & Paulu (2019) en hoger is dan de afschuining van 30° waarbij in Kolkman & Jongeling (2007) aangegeven wordt dat deze leidt tot instabiliteit.

De dichting onderaan de schuif wordt voorzien door middel van een zogenaamd muzieknootprofiel. In Kolkman & Jongeling (1996) wordt een dergelijk profiel afgeraden voor de dichting onderaan een schuif. Dit zowel omwille van het ontbreken van een scherp loslaatpunt als omwille van de elasticiteit van het profiel. Het risico bestaat dat zelfexcitatie optreedt waarbij een verschuiving van het loslaatpunt en een uitbuiging van het profiel elkaar versterken. Kolkman & Jongeling (1996) vermeld dat uit onderzoek met verschillende configuraties met muzieknootprofielen voor de dichting van de onderrand van een hefschuif volgde dat deze alle resulteerden in trillingen.

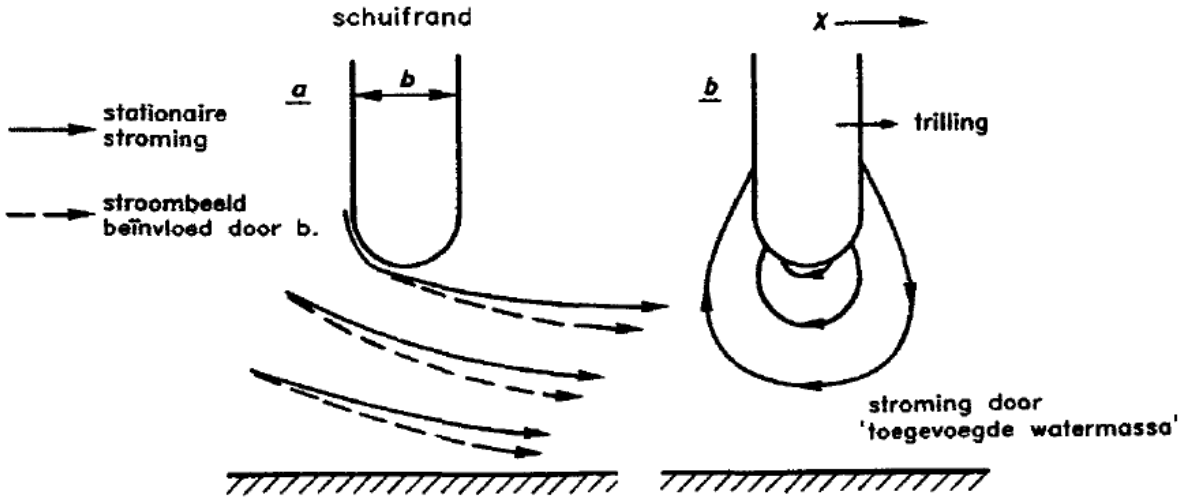


(Beem *et al.*, 2000)

Figuur 16 – In Ontwerp van Schutsluizen aanbevolen afschuining ten opzichte van loslaatpunt

Vòòr renovatie worden de schuiven van de sluis te Ooigem gedurende het nivelleren trapsgewijs geopend tot halve hefhoogte op het einde van de nivellering. Bemerk hierbij dat over de volledige duurtijd van de nivellering de stroming ter hoogte van de schuiven ingesnoerd wordt. Het stromingspatroon afwaarts de schuiven is hierdoor turbulent alsook kan stromingsinstabiliteit voorkomen afwaarts de schuiven. Ook wordt bij het mechanisch ontwerp van de schuif hiermee rekening gehouden door er op te letten dat de trillingsfrequentie van de schuif een factor 3 hoger ligt dan de verwachte trillingsfrequentie ten gevolge van de onderstroming.

Bij kleinere hefschuifhoogtes is er een risico op een proces van zelfexcitatie waarbij een trilling van de schuif en een verschuivend loslaatpunt elkaar versterken. Dit fenomeen wordt uitgebreid beschreven in Kolkman & Jongeling (1996). Zie Figuur 17. In eerste instantie treedt continue stroming met een vast loslaatpunt op, dit betreft de volle lijnen in Figuur 17 links. Wanneer de schuif of de dichting vervolgens een plotse uitwijking maakt naar afwaarts toe zal ten gevolge van het hierdoor ontstane drukonevenwicht een stroming naar opwaarts toe optreden. In Figuur 17 rechts geïllustreerd als de ‘stroming door de toegevoegde watermassa’ in stilstaand water. Deze stroming resulteert in een opwaartse verschuiving van het loslaatpunt. Het opwaarts verschuiven van het loslaatpunt wijzigt de stroomlijnen en verhoogd hierbij de contractie, weergegeven door de onderbroken lijnen in Figuur 17 links. Door de toename van de contractie neemt vervolgens de afvoercoëfficiënt en dus ook het debiet af. Ten gevolge van de stromingstraagheid in de riool zorgt dit aan opwaartse zijde voor een druktoename en aan afwaartse zijde voor een drukafname. Wanneer het verschuiven van het loslaatpunt van de stroming en het trillen van de schuif elkaar versterken is er sprake van zelfexcitatie.



(Kolkman & Jongeling, 1996)

Figuur 17 – Zelfexcitatie trillingen hefschuif t.g.v. stroming door 'toegevoegde watermassa'

Uit Kolkman & Jongeling (1996) volgt dat het kritiek gebied voor zelfexcitatie voorkomt bij een specifiek Strouhal nummer tussen 0.1 en 1.4. Dit specifiek Strouhal nummer wordt als volgt berekend:

$$S = \frac{f.b}{\sqrt{2g.\Delta H}}.$$

Met:

- S Strouhal nummer: 0.1 tot 1.4 [-]
- f Frequentie fenomeen [Hz]
- b Dikte van de onderrand ≈ diameter rubber = 0.04 m [m]
- g Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s^2 [m/s^2]
- ΔH Verval = 7.45 m bij begin nivellering [m]

Uit bovenstaande volgt dat de frequentie van de trillingen zich in de range 30.2 Hz tot 423 Hz bevinden. Dergelijke hoge trillingsfrequenties kunnen niet opgevangen worden door de constructie stijver te maken. De enige oplossing is om de schuif zo snel mogelijk uit de gevarenzone te trekken. Door EBS wordt voor een ontwerp met een muzieknootdichting als richtwaarde een eerste snelle openingsstap van 20 % gehanteerd. Bemerk dat bij een rioolhoogte 2.50 m dit overeenkomt met een hefhoogte 0.50 m. Vòòr renovatie bedraagt de hefhoogte van de eerste stap voor het bovenhoofd 0.14 m voor rechteroever en 0.20 m voor linkeroever, wat overeenkomt met een relatieve hefhoogte 6 % tot 8 %. Uit de opgemeten langse waterspiegelhellingen in de kolk, zie paragraaf 4.2, volgt dat deze eerste openingsstap al maatgevend is en zorgt voor een overschrijding van de toelaatbare langskracht op schepen. In de aangereikte voorbeelden uit Kolkman & Jongeling (1996) wordt opgemerkt dat zelfexcitatie niet meer voorkomt bij een hefhoogte hoger dan2 à 3 keer de randdikte. Bij een randdikte 0.040 m (diameter dichtingsrubber) hoort een hefhoogte 0.08 m tot 0.12 m.

In hoofdstuk 7 wordt een optimalisatie van de openingswet onderzocht. Voor nivelleren met het bovenhoofd volgt uit paragraaf 4.2 dat de huidige eerste openingsstap van 0.14 m op linkeroever en 0.20 m op rechteroever voor een aanzienlijke langse waterspiegelhelling in de kolk zorgt. Anderzijds volgt uit bovenstaande analyse dat bij een hefhoogte tot 0.08 m a 0.12 m er een risico is op zelf excitatie. Om deze reden worden voor de optimalisatie van de openingswet van het bovenhoofd voor de eerste openingstap drie hefhoogtes beschouwd: 0.08 m, 0.12 m en 0.16 m. Bij het benedenhoofd bedraagt de hoogte van de eerste openingsstap vòòr renovatie 0.35 m (linkeroever) en 0.24 m (rechteroever). Uit paragraaf 4.2 volgt

dat bij ledigen de eerste openingsstap nog niet zorgt voor een overschrijding van het criterium voor de langskracht. Voor de geoptimaliseerde openingswet voor het benedenhoofd wordt hierom een eerste snelle openingsstap van 0.25 m toegepast.

Bij een vermoeden van trillingen na ingebruikname heeft het aanbeveling om een optimalisatie uit te voeren waarbij een compromis gezocht wordt tussen het voldoende snel heffen van de schuiven en de krachten op de verschutte schepen. Voorbeelden van meettechnieken voor het opmeten van vibraties kunnen gevonden worden in Ishii et al. (2018) en Kolkman & Jongeling (2007).

7 Optimalisatie openingswet

Voor het opstellen van de geoptimaliseerde openingswet worden simulaties met het maatgevend schip, een CEMT-klasse Va, in de kolk uitgevoerd. Het schip wordt gecentreerd tussen de valmuur en de deurnis van de puntdeur in het benedenhoofd. Bemerk dat voor de krachten tijdens nivelleren een laag afwaarts peil in combinatie met een hoog verval maatgevend is. Uit de analyse van de continue peilmetingen in paragraaf 2.2 volgt hiervoor een peil +7.81 m TAW voor de Leie en een peil +15.45 m TAW voor het kanaal Roeselare Leie. Deze peilen worden beschouwd voor de simulaties in dit hoofdstuk.

De eerste gesimuleerde openingswet betreft de huidige openingswet, O1. Hieropvolgend wordt een optimalisatie van de openingswet onderzocht. Vòòr renovatie wordt de hefhoogte van boven- en benedenhoofd beperkt tot halve rioolhoogte. Dit wordt ook toegepast voor de eerste reeks geoptimaliseerde openingswetten. Om zo snel mogelijk uit de zone met risico op zelfexcitatie te raken wordt aangeraden om een eerste snelle openingsstap toe te passen, zie hoofdstuk 6. De minimale hoogte van deze eerste openingsstap werd in hoofdstuk 6 bepaald op 0.08 m tot 0.12 m. Bemerk dat dit minder is dan de hefhoogte 0.20 m (linkeroever) en 0.14 m (rechteroever) van de eerste openingsstap die vòòr renovatie toegepast wordt. Om deze reden worden voor het bovenhoofd verschillende hefhoogtes beschouwd voor de eerste openingsstap. Dit betreft openingswet O2 met een eerste openingstap van 0.16 m, openingswet O3 met een eerste openingsstap van 0.12 m en openingswet O4 met een eerste openingstap 0.08 m. Bij ledigen kunnen de schuiven sneller geopend worden dan voor vullen. Vòòr renovatie bedraagt de hefhoogte van de eerste openingstap 0.35 m (linkeroever) en 0.24 m (rechteroever). Ook hier volgt uit de simulaties dat deze eerste fase bepalend is. Voor ledigen wordt hierom gekozen om een eerste snelle openingsstap tot 0.25 m toe te passen, dit betreft openingswet O5. Volgend op deze eerste snelle openingsstap wordt overgaan op een trage continue hefsnelheid. Voor vullen wordt hierbij een pauze ingelast om het criterium van de langskracht na deze eerste fase niet te overschrijden. Om na te gaan wat de reductie in nivelleertijd bedraagt bij het volledig openen van de schuiven wordt bij een openingswet voor vullen (O3) en de openingswet voor ledigen (O5) de schuiven verder opengetrokken tot volledige hoogte van de riool met behoud van hefsnelheid. Dit betreft openingswet O6 voor vullen en openingswet O7 voor ledigen. Bemerk dat bij voorgaande openingswetten de nivellering versneld zal worden alsook het maximum debiet zal toenemen. Deze debietstoename zal de schutgolf op het kanaal Roeselare-Leie versterken. Hierom wordt bijkomend voor vullen een openingswet O8 opgesteld waarbij het maximum debiet ca. behouden blijft.

De openingswetten worden voorgesteld in Tabel 12. De hefsnelheden horende bij de eerste en tweede fase van de geoptimaliseerde openingswetten worden gegeven in Tabel 13. Bemerk hierbij dat voor de eerste fase vooral de hefhoogte bepalend is terwijl voor de tweede fase de hefsnelheid bepalend is.

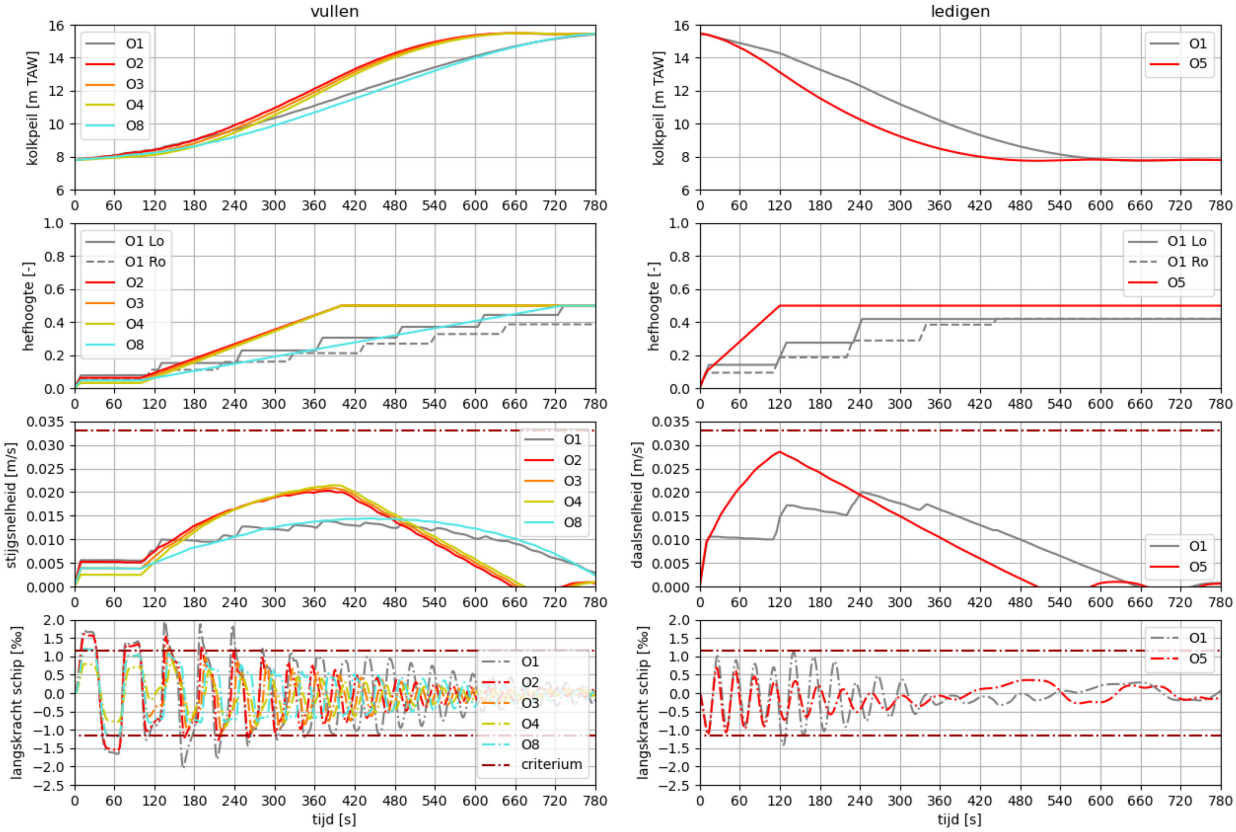
Tabel 12 – Toegepaste openingswetten

Openingswet	hoofd	eindhefhoogte	openingswet	beschrijving
O1	bovenhoofd & benedenhoofd	1.25m	Obv de metingen zie Tabel 7	Openingswet vòòr renovatie
O2	bovenhoofd	1.25m	10s/0.16m 100s/0.16m 400s/1.25m	eerste snelle openingsstap tot 0.16 m
O3	bovenhoofd	1.25m	10s/0.08m 40s/0.08m 400s/1.25m	eerste snelle openingsstap tot 0.12 m
O4	bovenhoofd	1.25m	10s/0.08m 100s/0.08m 400s/1.25m	eerste snelle openingsstap tot 0.08 m
O5	benedenhoofd	1.25m	10s/0.25m 120s/1.25m	Eerste snelle openingsstap tot 0.25m
O6	bovenhoofd	2.50m	10s/0.12m 100s/0.12m 732s/2.50m	O3 tot volledige hefhoogte
O7	benedenhoofd	2.50m	10s/0.25m 257.7s/2.5m	O5 tot volledige hefhoogte
O8	bovenhoofd	1.25m	10s/0.12m 100s/0.12m 730s/1.25m	Beperken schutgolf

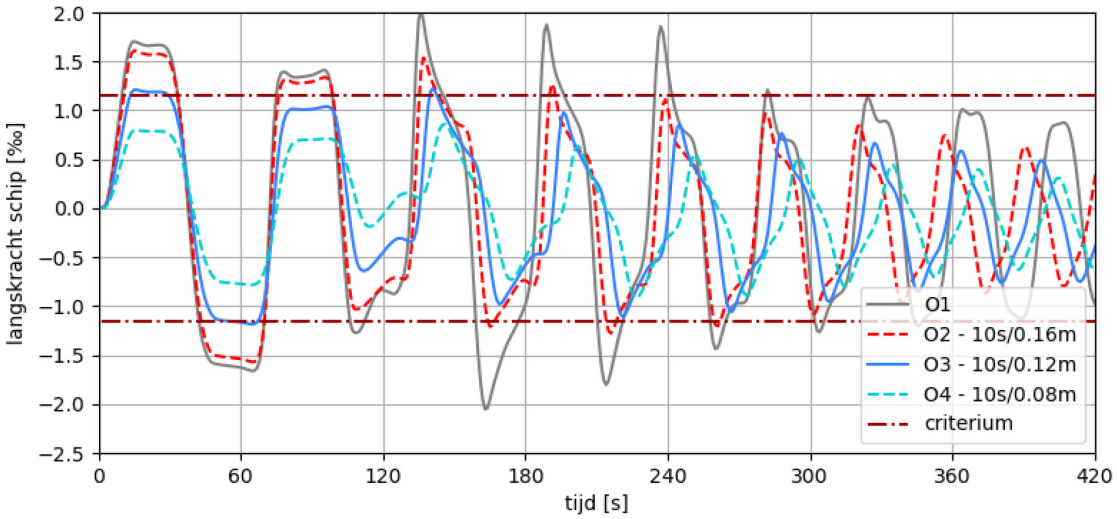
Tabel 13 – Hefsnelheden openingswet

	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
fase 1	0.0160 m/s	0.0120 m/s	0.0080 m/s	0.0250 m/s	0.0120 m/s	0.0250 m/s	0.0120 m/s
fase 2	0.0036 m/s	0.0038 m/s	0.0039 m/s	0.0091 m/s	0.0038 m/s	0.0091 m/s	0.0018 m/s

Een overzicht van de resultaten voor de simulaties waarbij de schuiven geopend worden tot halve rioolhoogte wordt gegeven in Figuur 18. Voor vullen wordt in Figuur 19 een detail gegeven waarbij de invloed van de grootte van de eerste openingsstap op de langskracht vergeleken wordt. De resultaten worden samengevat in Tabel 14.



Figuur 18 – Optimalisatie openingswet- resultaat simulaties openen hefschuiven tot halve hoogte



Figuur 19 – Optimalisatie openingswet – invloed hefhoogte eerste openingsstap op langskracht bij vullen

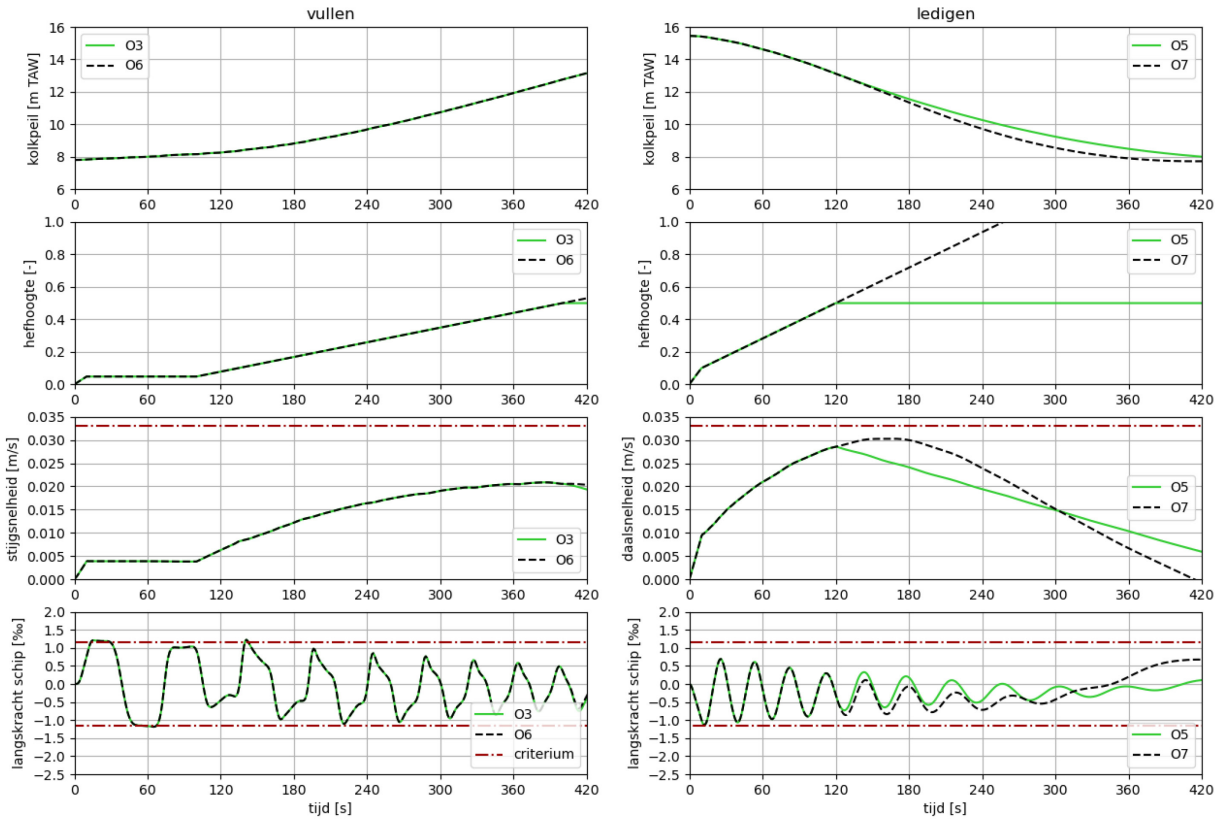
Tabel 14 – Optimalisatie openingswet – resultaat simulaties openen hefschuiven tot halve hoogte

openingswet	nivelleertijd			Stijg- daalsnelheid		langkracht		
	[s]	[min]	Δ [min]	[m/s]	Δ [-]	[‰]	[‰]	Δextr. [-]
vullen								
O1	794	13.2	/	0.014	/	-2.05	2.03	/
O2	624	10.4	-2.8	0.020	46%	-1.57	1.61	-22%
O3	633	10.6	-2.7	0.021	50%	-1.19	1.22	-40%
O4	642	10.7	-2.5	0.021	55%	-0.91	0.86	-55%
O8	778	13.0	-0.3	0.014	4%	-1.19	1.21	-41%
ledigen								
O1	621	10.4	/	0.020	/	-1.42	1.12	/
O5	470	7.8	-2.5	0.029	42%	-1.14	0.69	-20%

Uit de simulaties met de openingswet vòòr renovatie volgt een nivelleertijd 13.2 min voor vullen en 10.4 min voor ledigen. Het extremum van de optredende langskracht bedraagt hierbij 2.05 ‰ bij vullen en 1.42 ‰ bij ledigen. Dit betreft een overschrijding van het criterium van de langskracht (1.15 ‰ voor een CEMT Va) met 79 % bij vullen en met 23 % bij ledigen. Bij het toepassen van een eerste snelle openingsstap volgt uit Figuur 19 dat de grootte van de eerste openingsstap bepalend is voor de langskracht. Bij een eerste openingsstap van 0.16 m (openingswet O2) bij vullen bedraagt het extremum van de langskracht 1.57 ‰ wat een overschrijding van het criterium met 40 % betreft. Bij het reduceren van de grootte van de eerste openingsstap tot 0.12 m (openingswet O3) bedraagt het extremum van de langskracht 1.22 ‰, wat vrijwel overeenkomt met het criterium. Het verder reduceren van de grootte van de eerste openingsstap tot 0.08 m (openingswet O4) zorgt voor een verdere reductie van de langskracht. Voor ledigen waarbij een grootte van de eerste openingsstap 0.25 m werd toegepast bij de geoptimaliseerde openingswet O5 komt het extremum van de langskracht overeen met het criterium. Voor de verdere vergelijking wordt voor vullen openingswet O3 en voor ledigen openingswet O5 verder beschouwd.

Zowel voor vullen als voor ledigen wordt de nivelleertijd met ca. 2.5 min gereduceerd door het toepassen van de geoptimaliseerde openingswet. Bij toepassen van de openingswet O3 voor vullen neemt de nivelleertijd af van 13.2 min tot 10.7 mijn. Bij toepassen van de openingswet O5 voor ledigen neemt de nivelleertijd af van 10.4 min tot 7.8 min. Na optimalisatie van de openingswet wordt een extremum van de stijgsnelheid van 0.021 m/s bekomen en een extremum van de daalsnelheid van 0.029 m/s. Deze extrema blijven onder het criterium van 0.033 m/s voor een sluis zonder drijvende bolders. Doordat de sluis van Ooigem ook na renovatie over drijvende bolders beschikt is er geen criterium van toepassing voor de stijg- en daalsnelheid. Bemerk dat deze geoptimaliseerde openingswetten door de toename van het maximum debiet tijdens nivelleren zorgen voor een versterking van de schutgolf op het kanaal Roeselare-Leie ten opzichte van de situatie vòòr renovatie. Hierom wordt ook een geoptimaliseerde openingsset O8 opgesteld waarbij de hefsnelheid zo ingesteld werd dat het maximum debiet quasi niet toeneemt na renovatie. Doordat ook bij deze openingswet O8 werd gewerkt met een eerste snelle openingsstap 0.12 m komt het extremum van de langskracht vrijwel overeen met openingswet O3. De nivelleertijd valt vrijwel samen met de nivelleertijd vòòr renovatie.

Om na te gaan wat de invloed is van het volledig trekken van de hefschuiven op de nivelleertijd wordt een aanvullende simulatie gedaan waarbij vertrekkende van openingswet O3 voor vullen en openingswet O5 voor ledigen de schuiven met behoud van hefsnelheid volledig opgetrokken worden. Dit betreft openingswet O6 voor vullen en openingswet O7 voor ledigen. De resultaten worden geven in Figuur 20 en Tabel 15.



Figuur 20 – Optimalisatie openingswet- resultaat simulaties openen hefschuiven tot volledige hoogte

Tabel 15 – Optimalisatie openingswet- resultaat simulaties openen hefschuiven tot volledige hoogte

openingswet	nivelleertijd			stijg/- daalsnelheid		langkracht		
	[s]	[min]	Δ [min]	[m/s]	Δ [-]	[‰]	[‰]	Δextr. [-]
vullen								
O3	633	10.6	/	0.021	/	-1.19	1.22	/
O6	581	9.7	-0.9	0.021	0%	-1.19	1.22	0%
ledigen								
O5	470	7.8	/	0.029	/	-1.14	0.69	/
O7	378	6.3	-1.5	0.030	6%	-1.14	0.69	0%

Uit de simulaties volgt dat het volledig openen van de hefschuiven zorgt voor een bijkomende reductie van de nivelleertijd met bijna 1.0 min voor vullen en 1.5 min voor ledigen. Er is geen toename van het extremum van de langskracht en bij ledigen is er een beperkte toename van het extremum van de daalsnelheid en dus ook debiet.

8 Conclusies

Op 16/04/2021 heeft WL een in situ meting uitgevoerd in de sluis te Ooigem vòòr renovatie. Hierbij werden het kolkpeil, de langse waterspiegelhellingen in de kolk en de openingswet van de hefschuiven opgemeten. Uit deze metingen volgt dat de schuiven van het boven- en benedenhoofd geopend worden in stappen en dat de uiteindelijke hefhoogte beperkt is tot de halve hoogte van de riool. De schuiven in het bovenhoofd worden trager geopend dan in het benedenhoofd en voor het bovenhoofd valt het einde van de openingswet samen met het einde van de nivellering. Wat de nivelleerkromme en stijg-/daalsnelheid betreffen vallen de opgemeten vullingen respectievelijk ledigingen zo goed als samen. Bij de opgemeten langse waterspiegelhelling valt op dat er de eerste piek een goede overeenkomst vertoont tussen de verschillende vullingen respectievelijk ledigingen maar dat de demping van de langse waterspiegelhellingen hierna verschillend is.

Voor de optimalisatie van de openingswet is een hydraulisch netwerkmodel opgesteld dat gesimuleerd wordt met behulp van het programma LOCKSIM. Allereerst zijn de ladingsverliezen van dit model gekalibreerd. Doordat de schuiven tot halve hoogte geopend worden is de kalibratie uitgevoerd op de verliezen van de hefschuiven en dient opgemerkt te worden dat de verliezen van het model niet gekalibreerd zijn voor een hefhoogte boven de halve rioolhoogte. Vervolgens is met de gekalibreerde ladingsverliezen een validatiesimulatie uitgevoerd van de langse waterspiegelhellingen. Hiervoor zijn de opgemeten nivelleringen met het al dan niet aanwezige schip in de kolk gesimuleerd. Voor de vullingen wordt opgemerkt dat de waarde van de eerste piek van de waterspiegelhellingen met 30% tot 40 % onderschat is in de simulaties. Voor ledigen bedraagt de afwijking op de eerste piekwaarden +/- 12 % wat als zeer goed wordt beschouwd. Wel wordt opgemerkt dat bij de aanwezigheid van een schip in de kolk op één enkele nivellering na de demping van de langse waterspiegelhellingen in de numerieke simulaties lager is dan de demping van de waterspiegelhellingen bij de metingen.

Vanuit oogpunt van de krachten op de genivelleerde schepen heeft het de voorkeur om de schuiven te openen met een trage continue hefsnelheid en om plotse openingsstappen, zeker bij begin van de nivellering te vermijden. Vullen van de sluis is hiervoor nog gevoeliger dan ledigen van de sluis. Dit is echter in tegenstelling tot de aanbeveling om een eerste snelle openingsstap toe te passen om zo snel mogelijk uit het bereik met risico op zelfexcitatie te komen. Door EBS wordt voor een ontwerp met een muzieknootdichting als richtwaarde een eerste snelle openingsstap van 20 % gehanteerd. Bemerk dat dit overeenkomt met 0.50 m wat aanzienlijk hoger is dan de op dit moment toegepaste eerste openingsstap voor het bovenhoofd (0.20 m linkeroever en 0.14 m rechteroever) en het benedenhoofd (0.35 m linkeroever en 0.24 m rechteroever). Op basis van de literatuur wordt het bereik waarbinnen er risico op zelfexcitatie bestaat geraamd op de eerste 0.08 m a 0. 12 m.

Met het gekalibreerde en gevalideerde model zijn vervolgens simulaties uitgevoerd voor het opstellen van een geoptimaliseerde openingswet. Deze simulaties zijn uitgevoerd met het maatgevend schip, een CEMT Va, centraal in de kolk. Bij deze openingswetten wordt gekozen om een eerste snelle openingsstap toe te passen om zo snel mogelijk uit het bereik met risico op zelfexcitatie te komen. Deze eerste openingsstap wordt gevolgd door een periode met een trage continue hefsnelheid van de schuiven. Voor vullen wordt bij de verschillende gedefinieerde geoptimaliseerde openingswetten een hoogte van de eerste openingsstap van respectievelijk 0.16 m, 0.12 m en 0.08 m beschouwd. Om een overschrijding van het criterium van de langskracht te voorkomen na de eerste openingsstap wordt tussen de eerste en tweede fase een wachttijd van ca. 100 s aangehouden. Voor ledigen werd een eerste snelle openingstap van 0.25 m beschouwd met hierop aansluitend, zonder wachttijd, de tweede fase. Uit de simulaties met de openingswet vòòr renovatie volgt een overschrijding van het criterium van de langskracht met 80 % voor vullen en met 23 % voor ledigen. De nivelleertijd bedraagt 13.2 min voor vullen en 10.4 min voor ledigen. Uit de simulaties volgt dat de hoogte van de eerste openingsstap bepalend is voor de optredende langskracht in de kolk. Bij een eerste snelle openingsstap met hoogte 0.12 m voor het bovenhoofd en met hoogte 0.25 m voor het benedenhoofd komt

het extremum van de langskracht ongeveer overeen met het opgelegde criterium voor een schip CEMT Va. Met de geoptimaliseerde openingswet en het heffen van de schuiven tot halve rioolhoogte wordt een reductie van de nivelleertijd met 2.5 min bekomen (zowel bij vullen als bij ledigen). Wanneer de hefschuiven volledig getrokken wordt een bijkomende reductie van 0.9 min voor vullen en 1.5 min voor ledigen bekomen. Het volledig trekken van de hefschuiven zorgt niet voor een toename van het extremum van de langskracht en voor een beperkte toename van het maximum debiet bij ledigen. Bemerk dat het versnellen van de openingswet zorgt voor een versterking van de schutgolf op het kanaal Roeselare-Leie. Hierom werd een bijkomende openingswet opgesteld waarbij het extremum van de stijgsnelheid en dus het debiet ongeveer behouden blijft.

De hefsnelheden van de toegepaste openingswetten voor boven- en benedenhoofd worden samengevat in onderstaande tabel. Voor de eerste fase is de hefhoogte bepalend is en voor de tweede fase de hefsnelheid. Bemerk dat deze openingswetten opgesteld zijn door middel van simulaties en dat aanbevolen wordt om voldoende regelmogelijkheid in te bouwen zodat deze op basis van in-situ metingen verder geoptimaliseerd kunnen worden.

Tabel 16 – Voorstel hefsnelheid schuiven bovenhoofd en benedenhoofd

	bovenhoofd		benedenhoofd
	Reductie nivelleertijd	Behoud max debiet	reductie nivelleertijd
fase 1	0.0120 m/s	0.0120 m/s	0.0250 m/s
fase 2	0.0038 m/s	0.0018 m/s	0.0091 m/s

9 Aanbevelingen

Bemerk dat de in dit rapport voorgestelde openingswetten opgesteld zijn op basis van simulaties. Deze simulaties zijn behept met een zekere onzekerheid. Om deze reden verdient het aanbeveling om na ingebruikname nieuwe metingen uit te voeren van de langse waterspiegelhellingen of van de bewegingen van het schip in de kolk tijdens nivelleren.

Bij optimalisatie van de openingswet verdient het aanbeveling om meteen ook trillingen op de hefschuif mee te nemen. Ten gevolge van de voorgestelde reductie van de eerste openingsstap is er een toename van het risico op zelfexcitatie van de schuif bij kleine hefhoogtes. Door middel van een trillingmeting kunnen verschillende hoogte van de eerste openingsstap onderling vergeleken worden. Bemerk evenwel dat een toename van de eerste openingsstap zal resulteren in een toename van de langskracht waardoor beide metingen samen uitgevoerd dienen te worden.

Bij schrijven van dit rapport loopt bij dVW een testtraject naar autonoom schutten. Bij autonoom schutten wordt een schip niet vastgelegd met trossen. Het is nog niet gekend wat de maximum toelaatbare waterbewegingen zijn voor autonoom schutten. Naar verwachting zijn deze lager dan de op dit moment gehanteerde criteria uit de literatuur. Wanneer in de toekomst autonoom schutten overwogen wordt kan dus de vraag komen om de waterbewegingen in de kolk te reduceren. Hiervoor zal de hefsnelheid van de eerste openingsstap van de schuiven gereduceerd moet worden waarbij het risico op zelfexcitatie toeneemt.

Aangezien door dVW aangegeven wordt dat de hefhoogte in de huidige situatie mogelijk beperkt is omwille van de schutgolf op het kanaal, verdient het de aanbeveling om bij een versnelling van de nivellering een meetcampagne uit te voeren van de schutgolven op het kanaal. Door tijdelijke waterhoogtemetingen op het kanaal te combineren met een meetprogramma waarbij een aantal verschillende openingswetten ingesteld worden kan de optredende schutgolf bij een gegeven openingswet opgemeten worden. WL heeft in het verleden een soortgelijke meetcampagne uitgevoerd op het Albertkanaal (Vercruysse *et al.*, 2016).

10 Referenties

Beem, R.C.A.; Boogaard, A.; Glerum, A.; de Graaf, M.A.; Henneberque, S.D.; Hiddinga, P.H.; Kranenburg, D.; van der Meer, M.T.J.; Nagtegaal, G.; Van der Paverd, M.; Smink, L.M.C.; Vrijburcht, A.; Weijers, J. (2000). Ontwerp van schutsluizen: deel 1. Bouwdienst Rijkswaterstaat: Utrecht. ISBN 90-369-3305-6

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.

Ishii, N.; Anami, K.; Knisely, C.K. (2018). Dynamic Stability of Hydraulic Gates and Engineering for Flood Prevention. Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global). 677 pp.

Koedijk, O.C. (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020. ISBN 9789090334233

Kolkman, P.A.; Jongeling, T.H.G. (1996). Dynamisch gedrag van waterbouwkundige constructies Deel A constructies in stroming. 263 pp.

Kolkman, P.A.; Jongeling, T.H.G. (2007). Dynamic behaviour of hydraulic structures Part A structures in flowing fluid. *Delft Hydraul.*: 304. Available at: http://repository.tudelft.nl/view/hydro/uuid:057be929-11e8-4da0-93cd-7df8c59d1d4d/

Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie. (1969a). Kanaal Roeselare - Leie Bouwen van een nieuw sluis te Ooigem Betonplan. pp.1

Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie. (1969b). Kanaal Roeselare - Leie Bouwen van een nieuw sluis te Ooigem Schuif. pp.1

Ministerie van Openbare Werken Bruggen en Wegen Dienst van het stroomgebied der Schelde 2e Directie. (1969c). Kanaal Roeselare - Leie Bouwen van een nieuw sluis te Ooigem Wijziging aan schuif sluis Ooigem. pp.1

Ryszard, D.; Paulus, T. (2019). Lock Gates and Other Closures in Hydraulic Projects. Elsevier Inc. ISBN 978-0-12-809264-4

vanEssen Instruments. (2018). Product Manual TD-Diver™ & Baro-Diver® – DI8xx Series, 0. ISBN 0755298055. 29 pp.

Vercruysse, J.B.; Suzuki, T.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Albertkanaal: opmeten schutgolf in de panden Wijnegem-Antwerpen en Olen-Wijnegem. *WL Rapporten*, 14_175. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

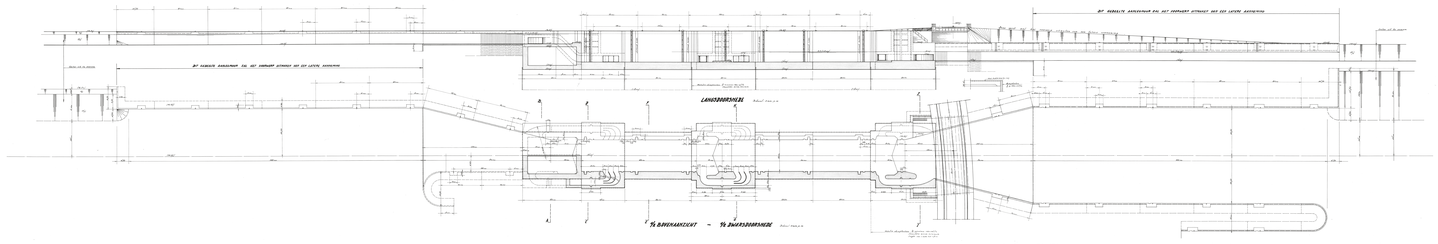
Bijlage 1 Plan sluis Ooigem

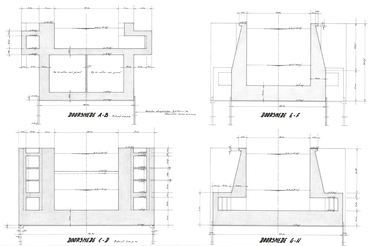
MINISTERIE VAN
OPENBARE WERKEN
DIENST DER WATERWEGEN EN WERKEN
DIENST DER WATERWEGEN
AFDELING DER BINNENVAARTWEGEN
N° 1865
PLAAT Nr. 3

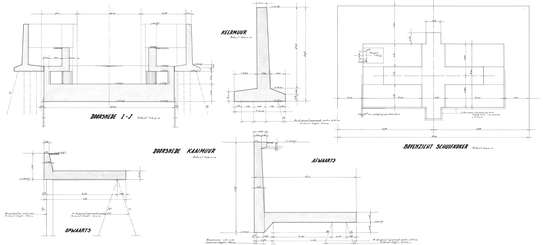
KANAAL ROESELARE - LEIE

BOUWEN VAN EEN NIEUW SLUIS TE GENT

BATIMPLAN







Bijlage 2
Nauwkeurigheid langse waterspiegelhelling

De gebruikte druksensoren meten het peil met een absolute fout van 5 mm. De fout op de langse waterspiegelhelling ten gevolge van de meetnauwkeurigheid van de druksensoren kan als volgt bepaald worden:

De (ogenblikkelijke waarde van de) langse waterspiegelhelling S wordt bepaald als de verhouding tussen het (ogenblikkelijk) waterstandsverschil H en de tussenafstand ℓ van twee druksensoren: $S = H / \ell$.

Zij ΔS de absolute fout op S, dan wordt de relatieve fout op S gedefinieerd als: $\delta S = \frac{\Delta S}{S}$

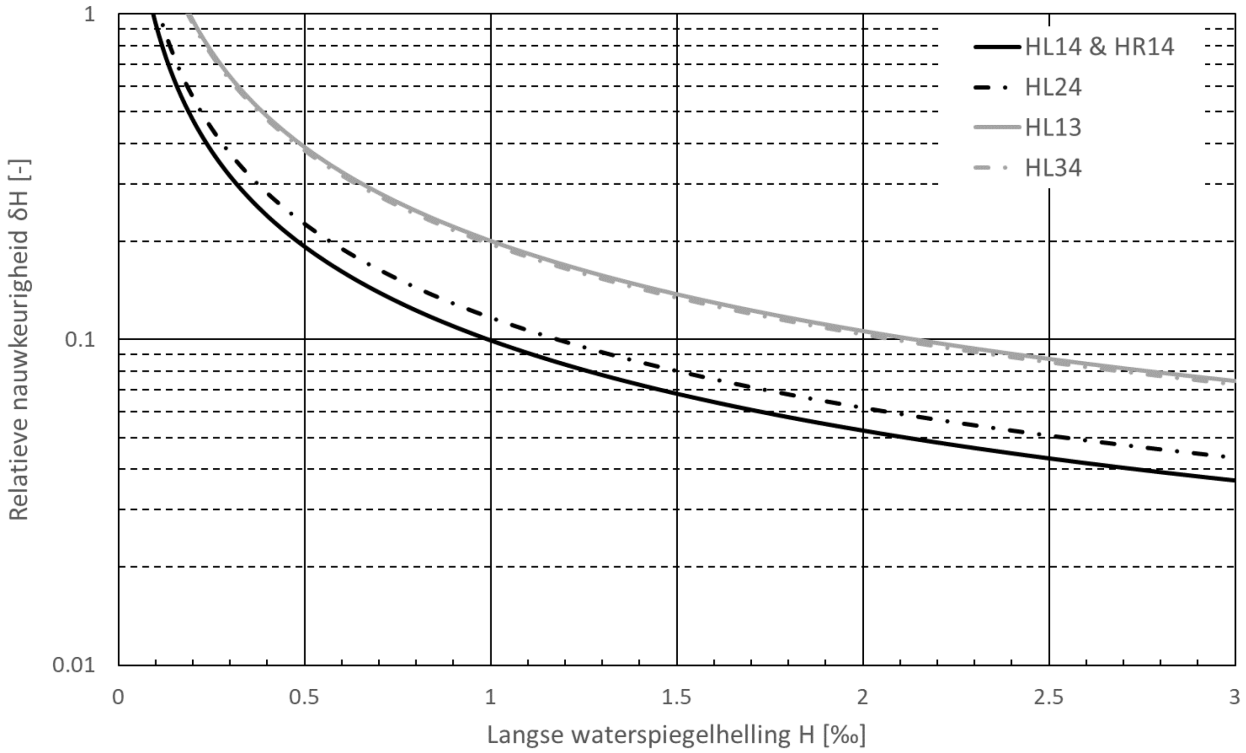
Volgens de foutentheorie wordt de relatieve fout op een quotiënt (S=H/ ℓ) gegeven door de som van de relatieve fouten op teller (H) en noemer (ℓ):

$$\delta S = \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

Het waterstandsverschil H wordt bepaald uit het verschil tussen twee gemeten waterstanden. Volgens de foutentheorie is de absolute fout op een verschil gelijk aan de som van de absolute fouten op de termen. Bijgevolg wordt de absolute fout ΔH op het waterstandsverschil gegeven door twee maal de meetnauwkeurigheid van een TD Diver (zie vanEssen Instruments (2018)): ΔH = 2 x 5 mm.

De tussenafstand ℓ van twee druksensoren wordt bepaald uit de op plan afgemeten afstand (as-op-as) van de nissen waarin de meters geplaatst werden, zie Figuur 4. Als raming van de absolute fout Δℓ op de tussenafstand, wordt één keer de breedte van een nis genomen: Δℓ = 0.6 m.

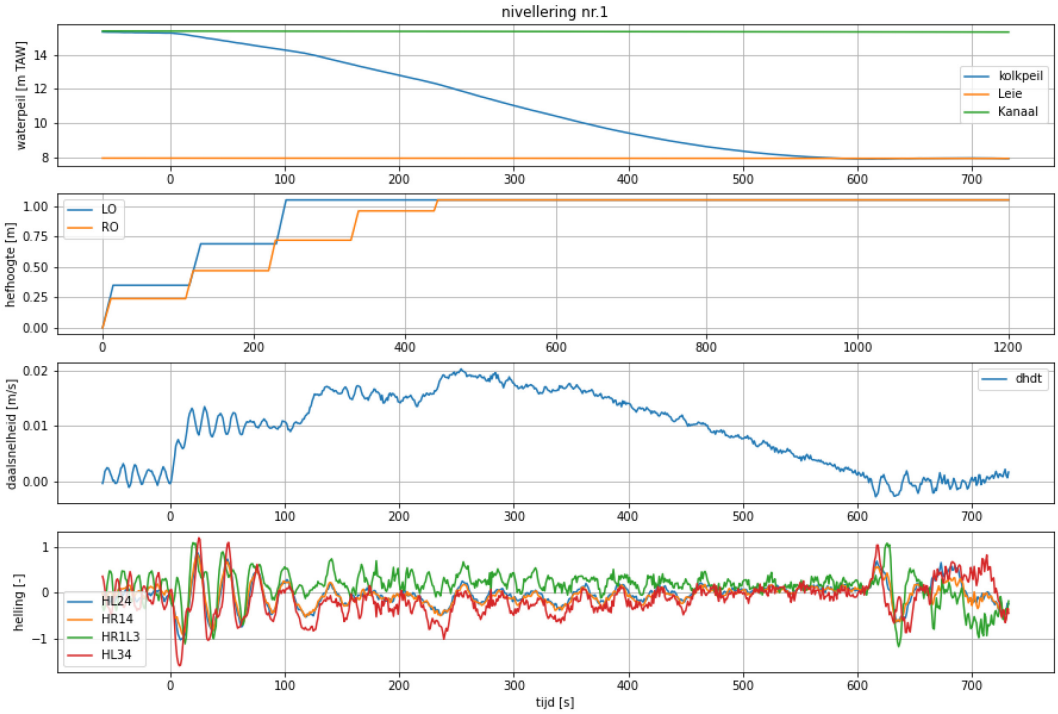
In Figuur 21 wordt op basis van de voorgaande formules en ramingen de relatieve nauwkeurigheid δS uitgezet in functie van de grootte van de langse waterspiegelhelling S.

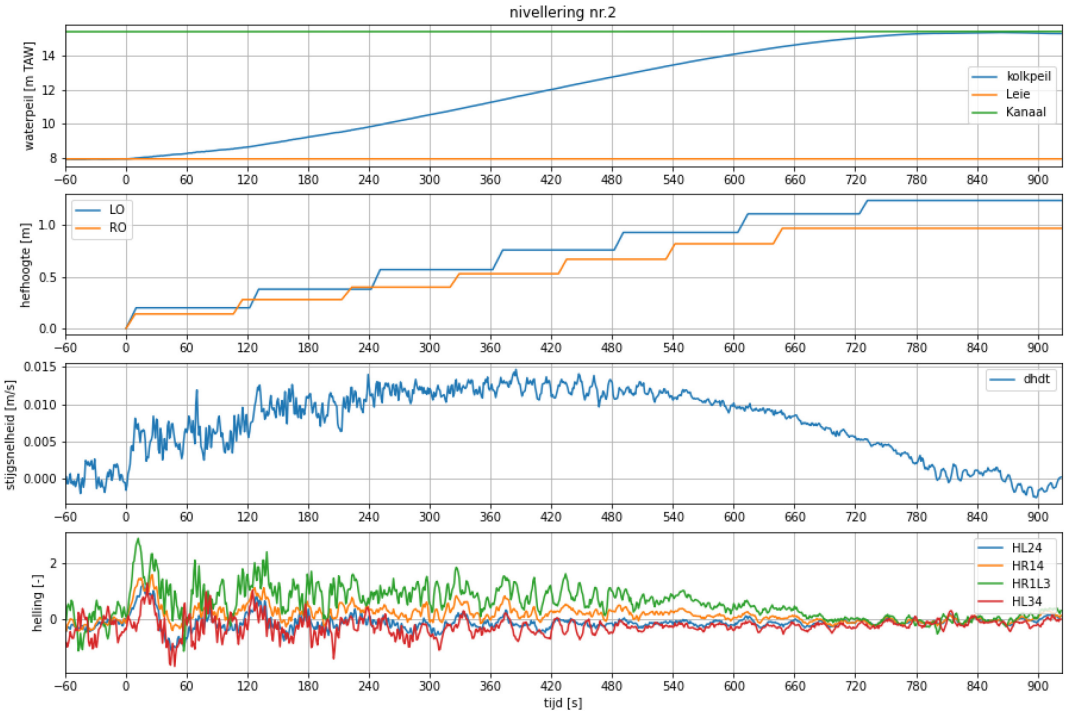


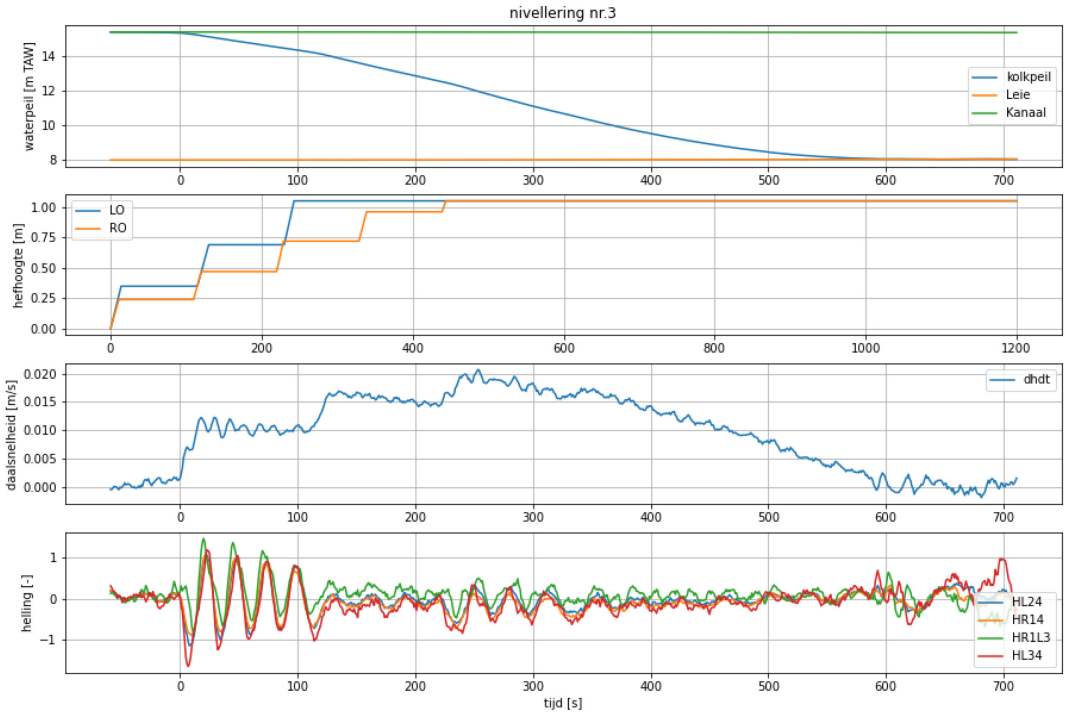
Figuur 21 – Nauwkeurigheid langse waterspiegelhelling

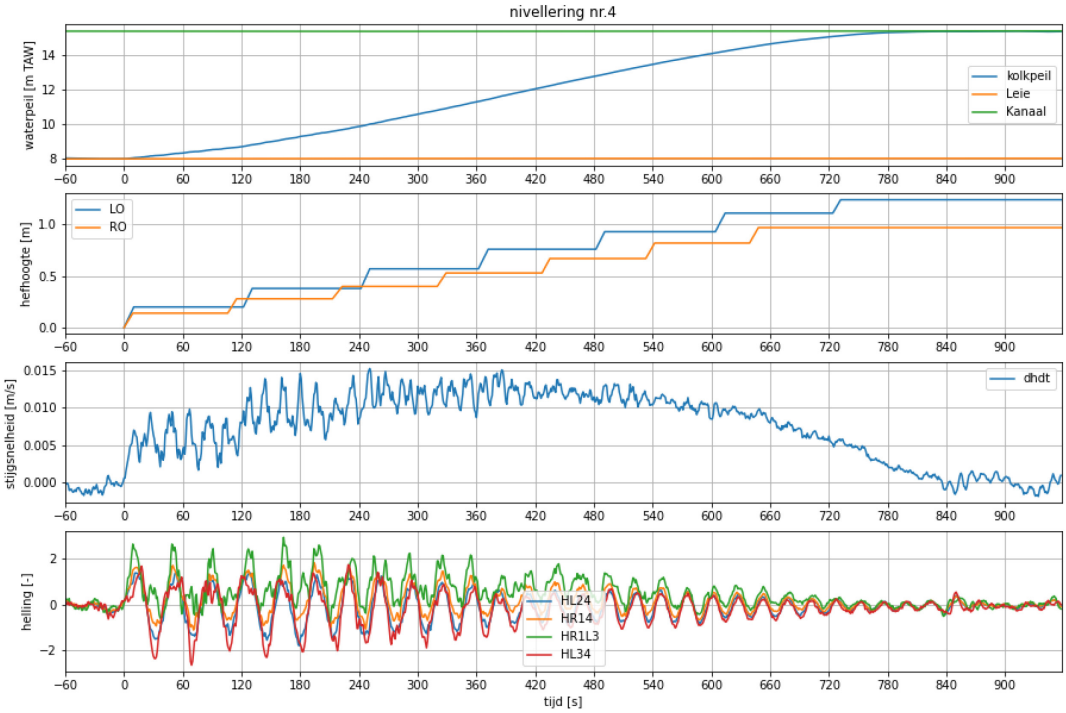
Uit Figuur 21 volgt dat hoe groter de optredende langse waterspiegelhelling, hoe relatief nauwkeuriger deze bepaald kan worden. Ook neemt de nauwkeurigheid toe met de afstand tussen de twee meetpunten. Voor de analyse is voornamelijk de end-to-end langse waterspiegelhelling bepalend omdat deze representatief is voor het maatgevend schip. Voor een end-to-end langse waterspiegelhelling met een waarde 1.15 ‰, i.e. het criterium voor de langskracht van een schip CEMT klasse Va, bedraagt de relatieve meetfout 9 %.

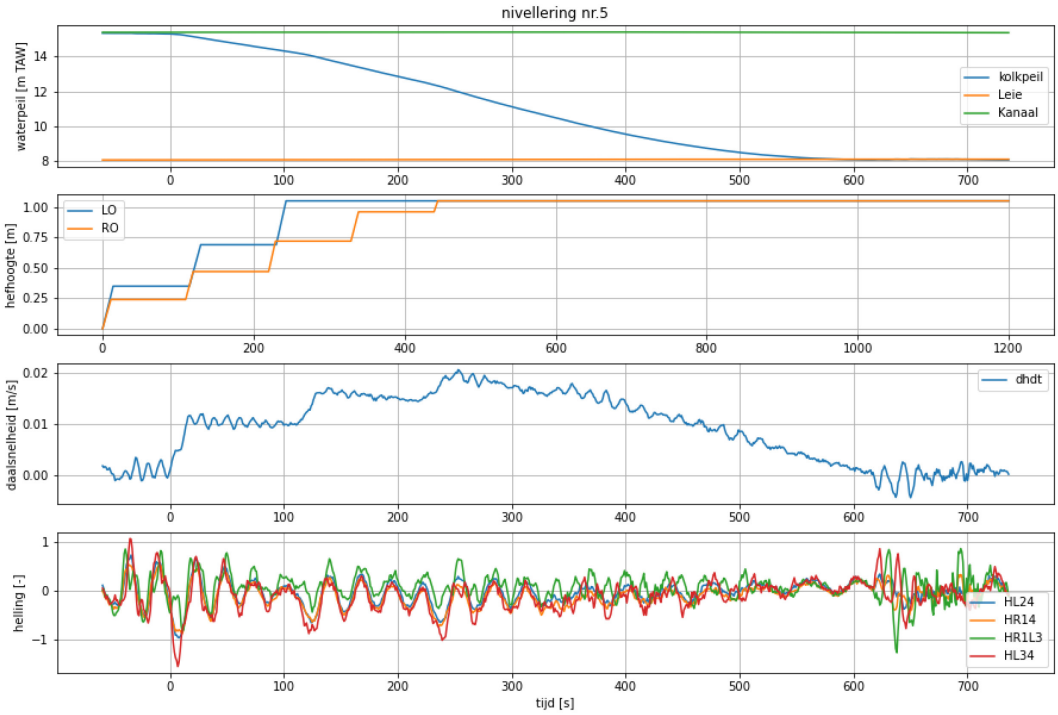
Bijlage 3 Opgemeten nivelleringen

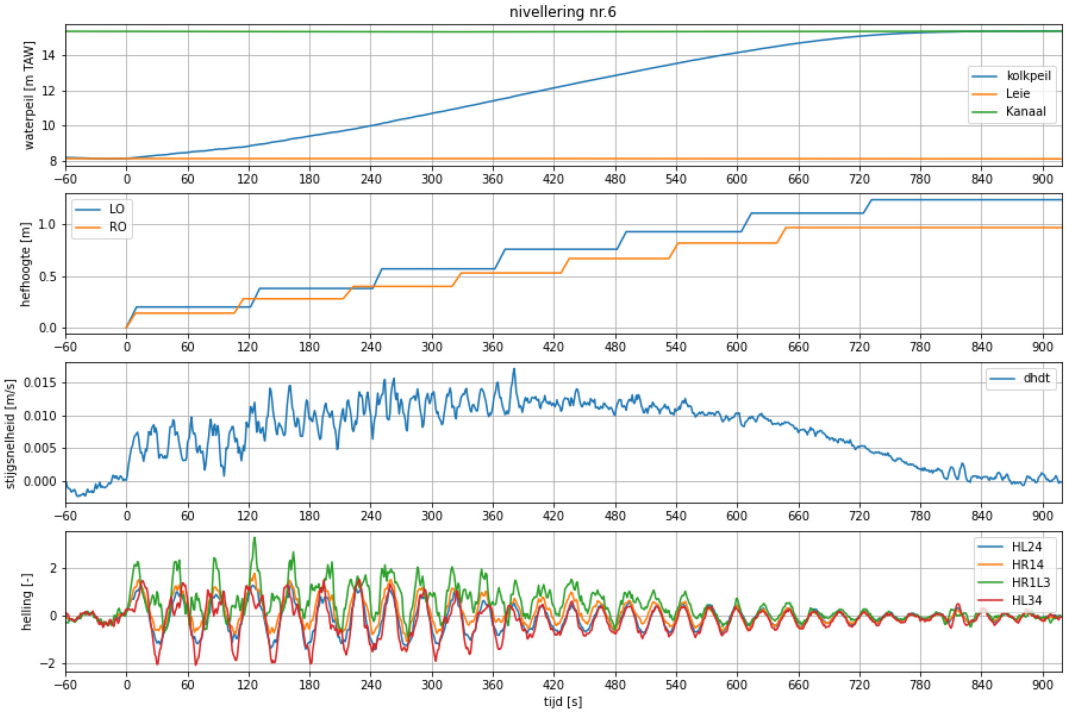


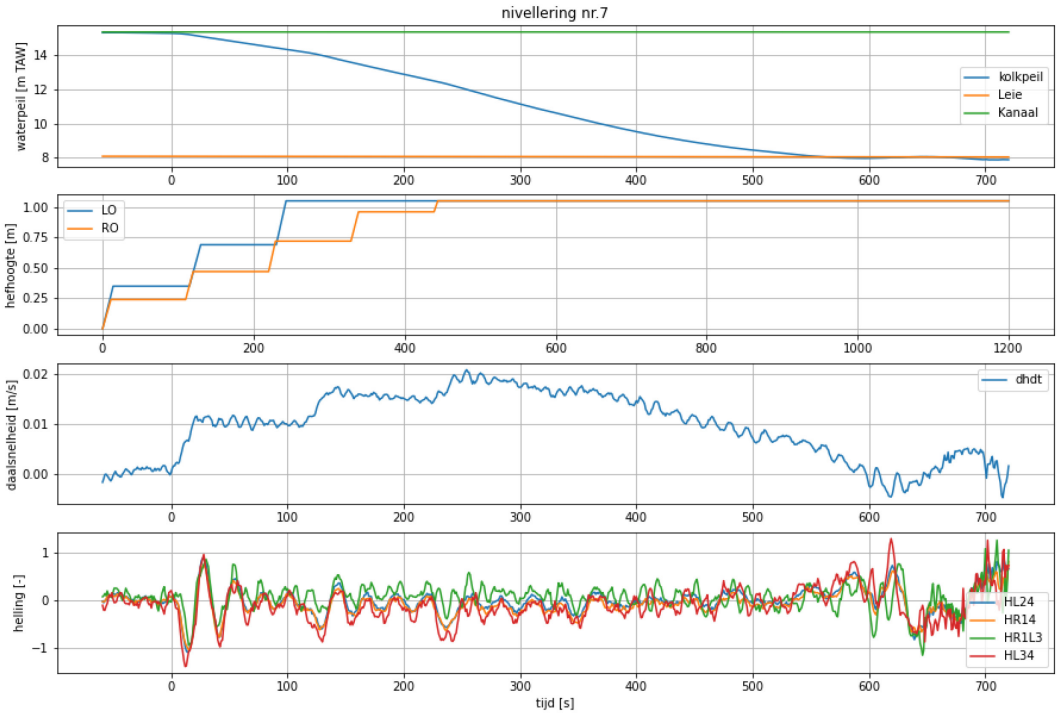


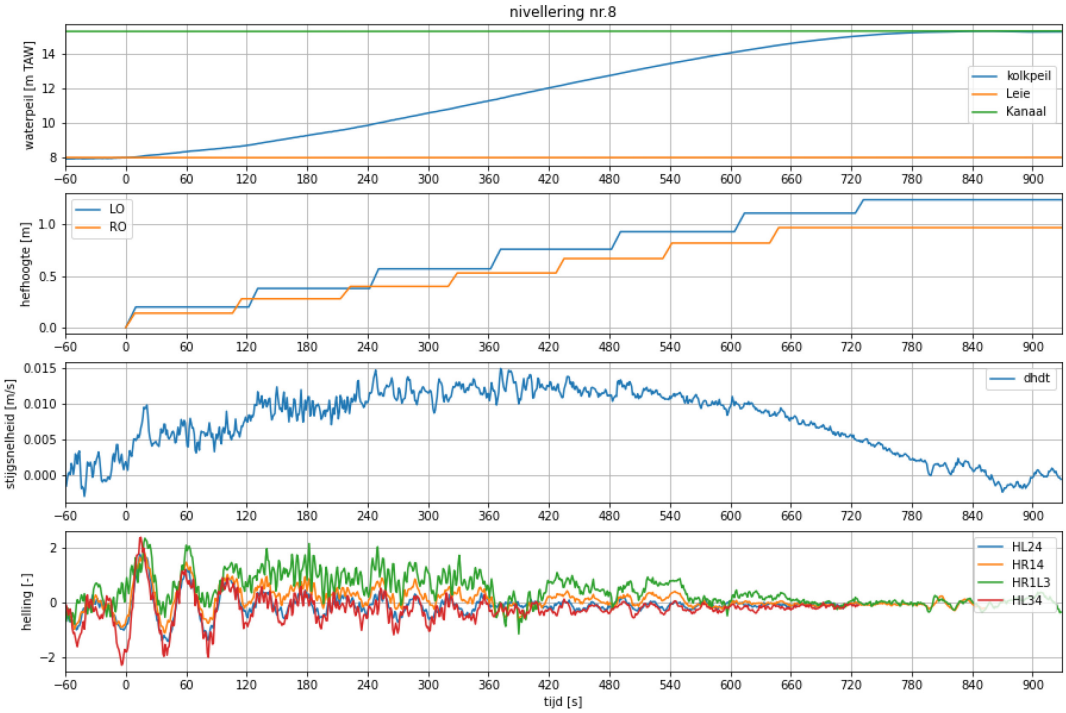

nivellering nr.3
waterpeil [m TAW]
kolkpeil
Leie
Kanaal
hefhoogte [m]
LO
RO
daalsnelheid [m/s]
dhdt
helling [-]
HL24
HR14
HR1L3
HL34
tijd [s]


nivellering nr.4
waterpeil [m TAW]
kolkpeil
Leie
Kanaal
hefhoogte [m]
LO
RO
stijgsnelheid [m/s]
dhdt
helling [-]
HL24
HR14
HR1L3
HL34
tijd [s]

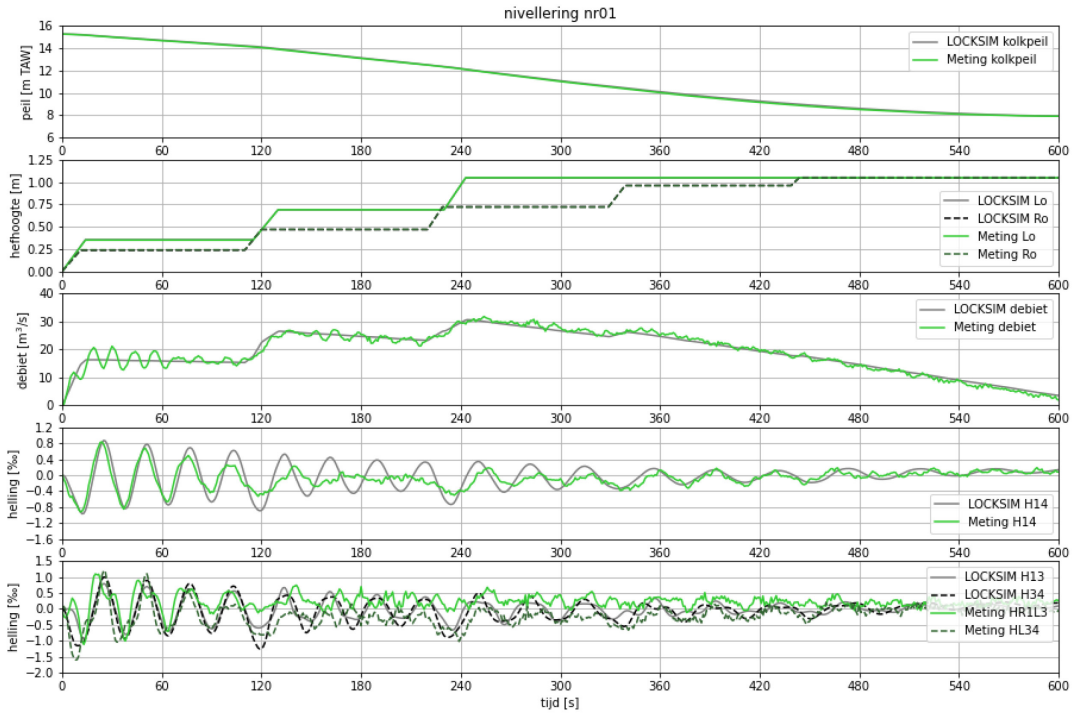

nivellering nr.5
waterpeil [m TAW]
kolkpeil
Leie
Kanaal
hefhoogte [m]
LO
RO
daalsnelheid [m/s]
dhdt
helling [-]
HL24
HR14
HR1L3
HL34
tijd [s]

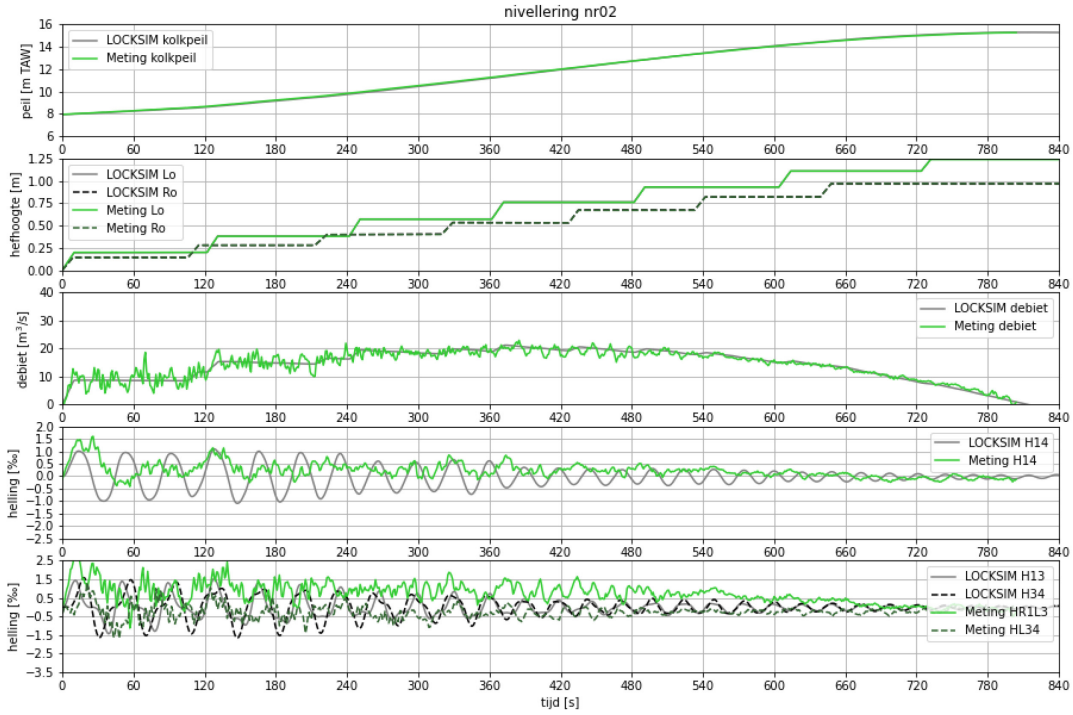

nivellering nr.6
waterpeil [m TAW]
kolkpeil
Leie
Kanaal
hefhoogte [m]
LO
RO
stijgsnelheid [m/s]
dhdt
helling [-]
HL24
HR14
HR1L3
HL34
tijd [s]

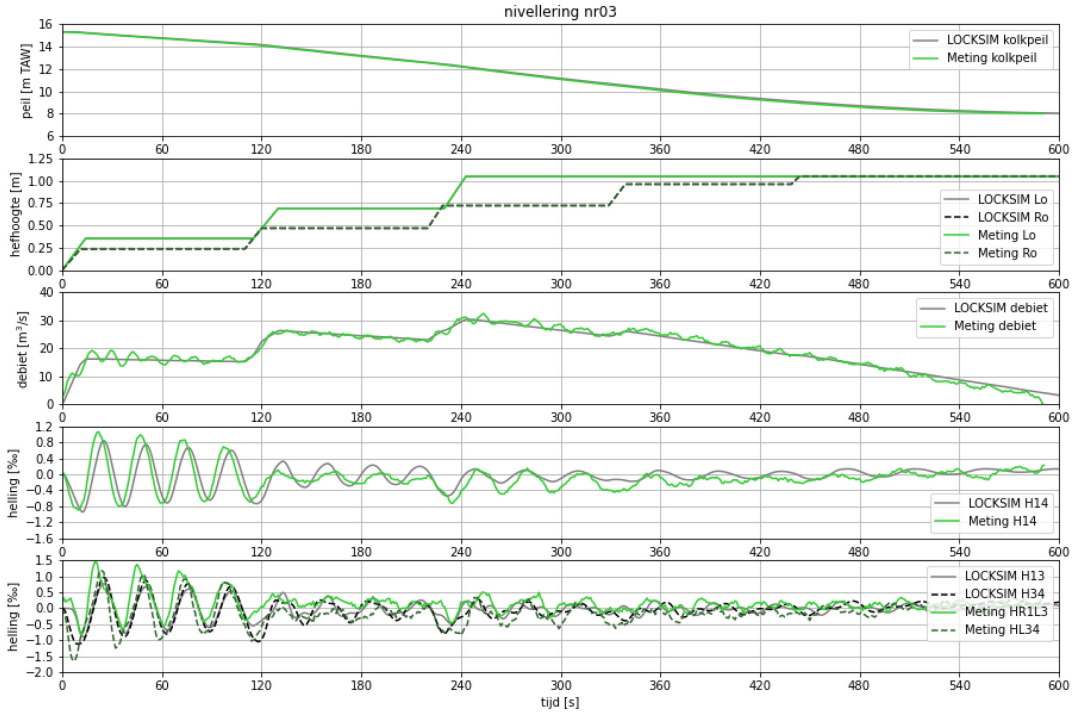

nivellering nr.7
waterpeil [m TAW]
kolkpeil
Leie
Kanaal
hefhoogte [m]
LO
RO
daalsnelheid [m/s]
dhdt
helling [-]
HL24
HR14
HR1L3
HL34
tijd [s]

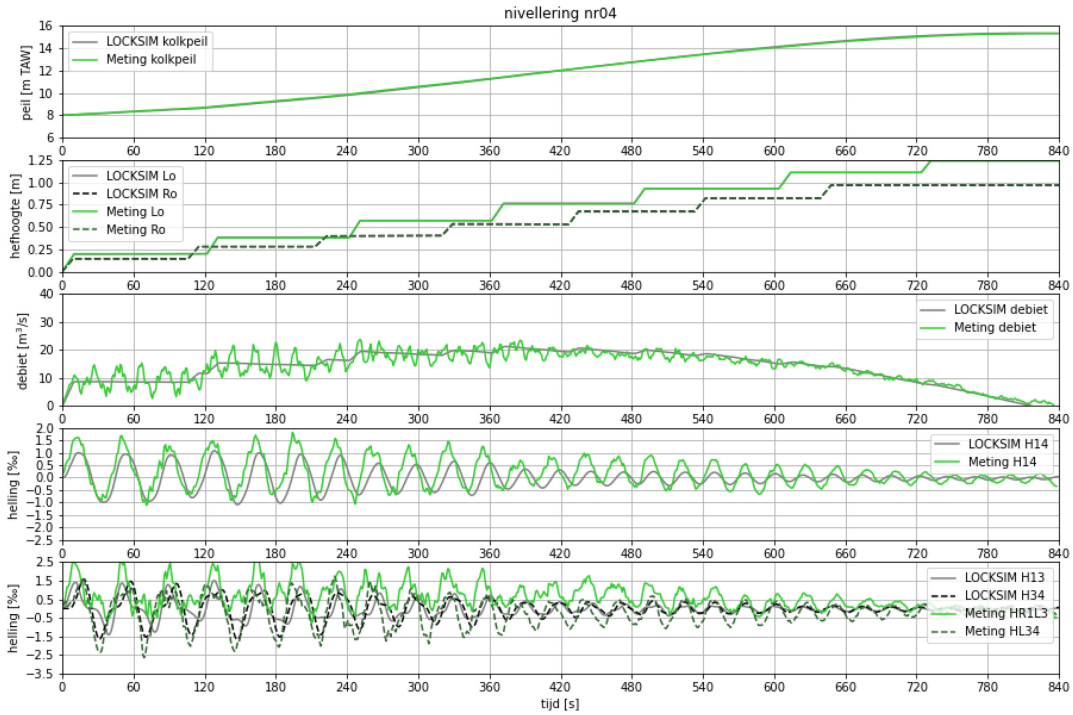

nivellering nr.8
waterpeil [m TAW]
kolkpeil
Leie
Kanaal
hefhoogte [m]
LO
RO
stijgsnelheid [m/s]
dhdt
helling [-]
HL24
HR14
HR1L3
HL34
tijd [s]

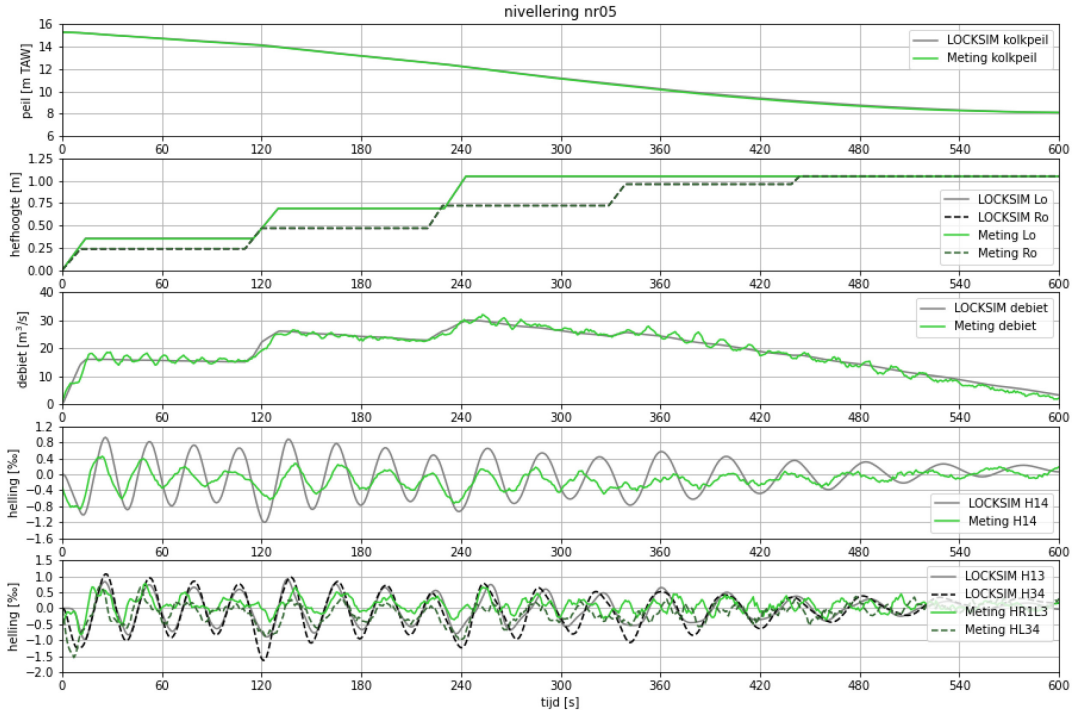
Bijlage 4 Simulaties voor kalibratie en validatie

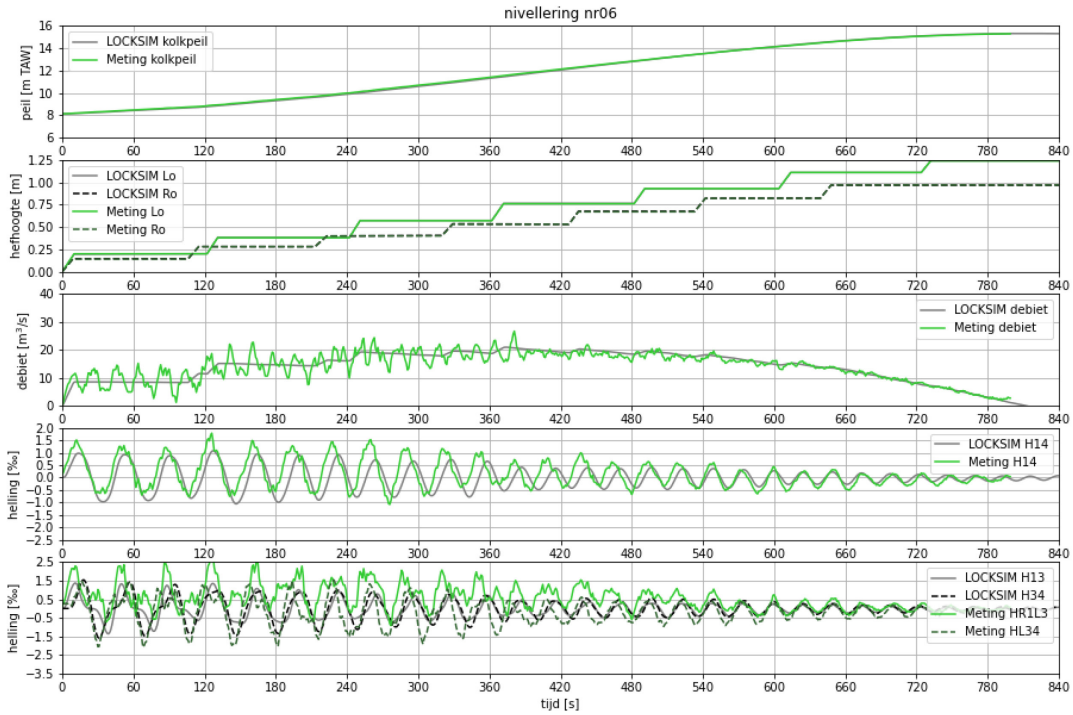


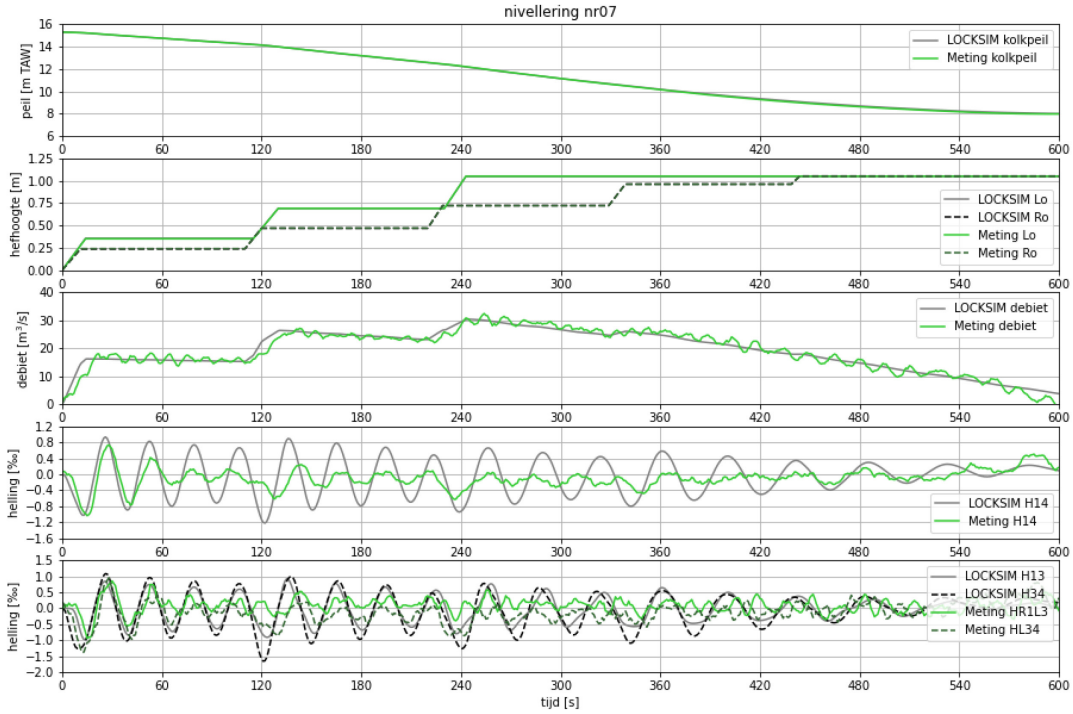


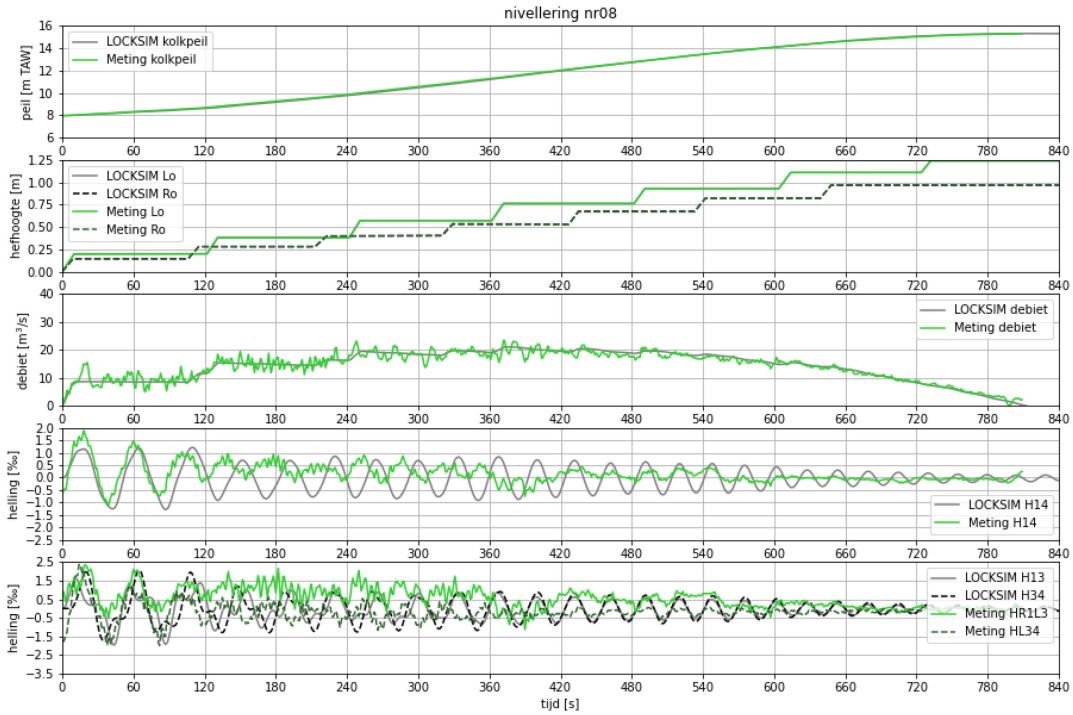

nivellering nr03
peil [m TAW]
LOCKSIM kolkpeil
Meting kolkpeil
hefhoogte [m]
LOCKSIM Lo
LOCKSIM Ro
Meting Lo
Meting Ro
debiet [m³/s]
LOCKSIM debiet
Meting debiet
helling [‰]
LOCKSIM H14
Meting H14
helling [‰]
LOCKSIM H13
LOCKSIM H34
Meting HR1L3
Meting HL34
tijd [s]


nivellering nr04
peil [m TAW]
LOCKSIM kolkpeil
Meting kolkpeil
hefhoogte [m]
LOCKSIM Lo
LOCKSIM Ro
Meting Lo
Meting Ro
debiet [m³/s]
LOCKSIM debiet
Meting debiet
helling [‰]
LOCKSIM H14
Meting H14
helling [‰]
LOCKSIM H13
LOCKSIM H34
Meting HR1L3
Meting HL34
tijd [s]


nivellering nr05
peil [m TAW]
LOCKSIM kolkpeil
Meting kolkpeil
hefhoogte [m]
LOCKSIM Lo
LOCKSIM Ro
Meting Lo
Meting Ro
debiet [m³/s]
LOCKSIM debiet
Meting debiet
helling [‰]
LOCKSIM H14
Meting H14
helling [‰]
LOCKSIM H13
LOCKSIM H34
Meting HR1L3
Meting HL34
tijd [s]


nivellering nr06
peil [m TAW]
LOCKSIM kolkpeil
Meting kolkpeil
hefhoogte [m]
LOCKSIM Lo
LOCKSIM Ro
Meting Lo
Meting Ro
debiet [m³/s]
LOCKSIM debiet
Meting debiet
helling [‰]
LOCKSIM H14
Meting H14
helling [‰]
LOCKSIM H13
LOCKSIM H34
Meting HR1L3
Meting HL34
tijd [s]


nivellering nr07
peil [m TAW]
LOCKSIM kolkpeil
Meting kolkpeil
hefhoogte [m]
LOCKSIM Lo
LOCKSIM Ro
Meting Lo
Meting Ro
debiet [m³/s]
LOCKSIM debiet
Meting debiet
helling [‰]
LOCKSIM H14
Meting H14
helling [‰]
LOCKSIM H13
LOCKSIM H34
Meting HR1L3
Meting HL34
tijd [s]


nivellering nr08
peil [m TAW]
LOCKSIM kolkpeil
Meting kolkpeil
hefhoogte [m]
LOCKSIM Lo
LOCKSIM Ro
Meting Lo
Meting Ro
debiet [m³/s]
LOCKSIM debiet
Meting debiet
helling [‰]
LOCKSIM H14
Meting H14
helling [‰]
LOCKSIM H13
LOCKSIM H34
Meting HR1L3
Meting HL34
tijd [s]

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