



Vlaanderen
is wetenschap



19_084_1
WL rapporten

Ontwikkeling meetopstelling voor het opmeten van scheepsbewegingen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Ontwikkeling meetopstelling voor het opmeten van scheepsbewegingen

Vercruysse, J.; Verelst, K.; Lopez Castaño, S.; Wolput, B.; Depreiter, D.; Schrijvers, S.

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 2024
 D/2024/3241/290

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruyse, J.; Verelst, K.; Lopez Castaño, S.; Wolput, B.; Depreiter, D.; Schrijvers, S. (2024). Ontwikkeling meetopstelling voor het opmeten van scheepsbewegingen. Versie 4.0. WL Rapporten, 19_084_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2024R19_084_1
Trefwoorden (3-5):	navigation lock, measurements, validation, hawser forces		
Kennisdomeinen:	Sluizen > Nivelleersysteem > In situ metingen		
Tekst (p.):	47	Bijlagen (p.):	4
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruyse, J.; Verelst, K.; Lopez Castaño, S.; Wolput, B.; Depreiter, D.; Schrijvers, S.
------------	--

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.;	Getekend door:Kristof Verelst (Signature) Getekend op:2024-12-02 10:20:21 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Vercruyse, J.;	Getekend door:Jeroen Vercruyse (Signa) Getekend op:2024-11-28 11:38:30 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op:2024-11-28 15:12:21 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

Abstract

Sluizen vormen een essentiële schakel in het Vlaamse waterwegennetwerk. Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) voert studies uit om het vul- en ledigingsproces van binnen- en zeevaartsluizen in Vlaanderen te optimaliseren. Hierbij wordt gestreefd naar een veilige en zo snel mogelijke nivellering met een zo economisch mogelijk ontwerp. Een schip dat genivelleerd wordt in een sluiskolk zal ten gevolge van het in- of uitstromende water namelijk krachten ondervinden die afgedragen worden via zijn trossen. Zowel de krachten in de trossen als de verplaatsingen van het schip in de kolk mogen niet te groot worden tijdens nivelleren. Om deze reden is het belangrijk om een goed inzicht te verkrijgen in zowel de krachten die het schip ondervindt als in de verplaatsingen van het schip in de kolk.

WL heeft reeds ruime ervaring opgedaan met het uitvoeren van in situ metingen van het vullen en ledigen van sluizen. Echter werd vastgesteld dat de hierbij toegepaste technieken bepaalde tekortkomingen hebben. Om deze reden ziet WL de behoefte voor een nieuwe meetopstelling om op een snelle, efficiënte doch betrouwbare wijze in situ nivelleringen te valideren. Gelet op de technische uitdagingen van de hiervoor benodigde meetopstelling werd in samenwerking met het Programma Innovatieve Overheidsopdrachten van VLAIO een onderzoekstraject opgestart.

Dit onderzoekstraject resulteerde in twee Proof-of-Concept's (PoC's) van potentiële meetopstellingen. Een eerste PoC betrof een volledige contactloze meettechniek op basis van fotogrammetrie. Een tweede PoC betrof een meetmethodiek met beperkt niet menselijk contact waarbij 4 hoge precisie totaalstations de positie van 4 prisma's volgden die door middel van drones op het schip geïmponeerd werden. De PoC's werden in samenwerking met de Vlaamse Waterweg in najaar 2023 uitgevoerd in de CEMT klasse IV sluis te Viersel. Tijdens beide PoC's werden referentiemetingen uitgevoerd door WL in samenwerking met de cel Fotogrammetrie – Topografie van de afdeling Algemene Technische Ondersteuning. De uitvoering van beide PoC's verliep vlot en uit de vergelijking met de referentiemetingen volgde de kwaliteit van beide meetopstellingen. Daarbovenop toonde de PoC met de fotogrammetrische opstelling aan dat een volledig contactloze meetmethodiek haalbaar is.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Bestaande validatiemeettechnieken	2
3 Voortraject.....	5
3.1 Behoeftanalyse.....	5
3.2 Technologiescouting en marktconsultatie.....	7
3.3 Aankoopstrategie	8
4 Beschrijving PoC	9
4.1 Aanbesteding	9
4.2 Beschrijving PoC.....	10
4.2.1 Sluis Viersel	10
4.2.2 Schip.....	11
4.2.3 Assenstelsel	14
4.3 Referentiemeting	15
4.3.1 Meetopstelling.....	15
4.3.2 Verwerking.....	19
5 PoC perceel 1 fotogrammetrische opstelling	22
5.1 Beschrijving fotogrammetrische opstelling	22
5.2 Vergelijking metingen	27
5.3 Conclusies.....	32
6 PoC perceel 3 meetopstelling met beperkt niet-menselijk contact.....	34
6.1 Beschrijving meetopstelling	34
6.2 Vergelijking metingen	37
6.3 Conclusies.....	43
7 Conclusies	45
8 Referenties	47
9 Bijlage 1 Behoeftanalyse	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Vereiste meetnauwkeurigheid.....	6
Tabel 2 – Extremum van de stijg/- daalsnelheid voor enkele Vlaamse sluizen.....	7
Tabel 3 – Ingezette schepen PoC.....	12
Tabel 4 – Specificatie Sherborne T233	17
Tabel 5 – Inschatting meetfout load cell	18
Tabel 6 – PoC Apixa - specificaties ingezette camera.....	22
Tabel 7 – Verwerkte nivellering PoC Apixa.....	27
Tabel 8 – Verwerkte nivellering PoC Iv-Infra.....	37

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Meetopstelling WL voor opmeten langse waterspiegellening tijdens sluisnivelleringen	2
Figuur 2 – Voorstelling 6 DOF meetopstelling registratie vaartrajecten.....	3
Figuur 3 – Vergelijking langse waterspiegellening met pitch schip.....	4
Figuur 4 – Doorsnede en bovenaanzicht bovenhoofd sluis Viersel	10
Figuur 5 – Deuren bovenhoofd en benedenhoofd sluis Viersel.....	11
Figuur 6 – Zulu1 gepositioneerd in kolk tijdens POC Iv-Infra	12
Figuur 7 – Voorstellen configuratie trossen tijden PoC Apixa en Iv-infra	13
Figuur 8 – oorsprong lokaal assenstelsel sluis.....	14
Figuur 9 – Oorsprong en oriëntatie lokaal assenstelsel schip	14
Figuur 10 – Opstelling totaal stations.....	16
Figuur 11 – Opstelling inclinometer gemonteerd op Zulu I tijdens uitvoeren PoC Iv-Infra	17
Figuur 12 – Krachtenopnemer bevestigd tussen meettouw en bolder	18
Figuur 13 – Illustratie coördinatenstelsels	20
Figuur 14 – Verwerking inclinometer – illustratie invloed toegepaste low pass filter in het frequentiedomein..	21
Figuur 15 – Verwerking inclinometer – illustratie invloed toegepaste low pass filter in het tijdsdomein	21
Figuur 16 – Overzicht opstelling	23
Figuur 17 – Stereovisie opstelling.....	24
Figuur 18 – Voorbeeld camera beelden (nivellering nr. 2).....	25
Figuur 19 – PoC Apixa - Voorbeeld opgevolgde features op boeg schip.....	26
Figuur 20 – PoC Apixa – vergelijking Z-positie center schip	27
Figuur 21 – PoC Apixa - vergelijking X, Y en Yaw	28
Figuur 22 – PoC Apixa – vergelijking pitch schip	29
Figuur 23 – PoC Apixa– waarschijnlijkheidsverdeling verschil in hoogte boeg en hek	30
Figuur 24 – PoC Apixa – vergelijking roll schip	31
Figuur 25 – PoC Apixa – vergelijking frequentie analyse pitch en roll	32
Figuur 26 – PoC Iv-Infra – opstelling totaalstations	35
Figuur 27 – PoC Iv-Infra – positionering drones op schip.....	36
Figuur 28 – PoC Iv-Infra – vergelijking Z-positie center schip	38
Figuur 29 – PoC Iv-Infra – vergelijking X, Y en Yaw.....	39
Figuur 30 – PoC Iv-Infra – vergelijking pitch schip.....	40
Figuur 31 – PoC Iv-Infra – waarschijnlijkheidsverdeling verschil in hoogte boeg en hek.....	41

Figuur 32 – PoC Iv-Infra – vergelijking roll schip 42

Figuur 33 – PoC Iv-Infra – Vergelijking frequentie analyse pitch en roll 43

1 Inleiding

Sluizen vormen een essentiële schakel in het Vlaamse waterwegennetwerk. Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) voert studies uit om het vul- en ledigingsproces van binnen- en zeevaartsluizen in Vlaanderen te optimaliseren. Hierbij wordt gestreefd naar een veilige en zo snel mogelijke nivellering met een zo economisch mogelijk ontwerp. Een schip dat genivelleerd wordt in een sluisolk zal ten gevolge van het in- of uitstromende water namelijk krachten ondervinden die afgedragen worden via zijn trossen. Zowel de krachten in de trossen als de verplaatsingen van het schip in de kolk mogen niet te groot worden tijdens nivelleren. Om deze reden is het belangrijk om een goed inzicht te verkrijgen in zowel de krachten die het schip ondervindt als in de verplaatsingen die het schip maakt.

WL heeft reeds ruime ervaring opgedaan met het uitvoeren van in situ metingen van het vullen en ledigen van sluizen. Echter werd vastgesteld dat de hierbij toegepaste technieken bepaalde tekortkomingen hebben. Om deze reden ziet WL de behoefte voor een nieuwe meetopstelling om op een snelle, efficiënte doch betrouwbare wijze in situ nivelleringen te valideren. Gelet op de technische uitdagingen van de hiervoor benodigde meetopstelling werd in samenwerking met het Programma Innovatieve Overheidsopdrachten van VLAIO een onderzoekstraject opgestart. Dit onderzoekstraject resulteerde in twee Proof-of-Concept's (verder: PoC's) van potentiële meetopstellingen.

Dit rapport beschrijft de in kader van dit traject opgedane inzichten tot en met de PoC metingen. Een overzicht van de bestaande meetopstelling voor in situ opmetingen van sluisnivelleringen wordt gegeven in hoofdstuk 2. In het kader van het PIO-traject werd door een studiebureau een behoefteanalyse, een technologiescouting en een marktconsultatie uitgevoerd waarna een aankoopstrategie werd opgesteld. Dit wordt beschreven in hoofdstuk 3. De aanbesteding, de voorgeschreven PoC's en de door de aanbestedende overheid uitgevoerde referentiemetingen tijdens de PoC worden beschreven in hoofdstuk 4.

De aanbesteding omvatte drie percelen waarbij in het eerste perceel een fotogrammetrische techniek beschouwd werd, in het tweede perceel een volledig contactloze, vrij te kiezen techniek en het derde perceel een techniek met beperkt, niet-menselijk contact. Het eerste en het derde perceel van deze aanbesteding werden gegund. De evaluatie van de PoC met betrekking tot de fotogrammetrische techniek is beschreven in hoofdstuk 5, deze van de PoC met betrekking tot de meettechniek met beperkt niet-menselijk contact in hoofdstuk 6. De conclusies en aanbevelingen worden geformuleerd in hoofdstuk 7.

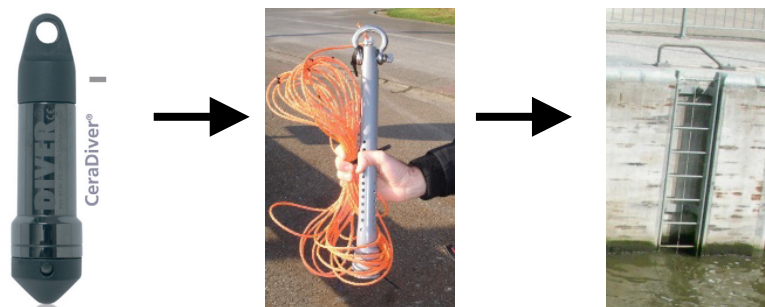
2 Bestaande validatiemeettechnieken

Voor ontwerp van een nivelleersysteem kan gebruik gemaakt worden van vereenvoudigde numerieke modellen (Verelst *et al.*, 2018), schaalmodelonderzoek of 3D CFD-modellering (Thorenz & Schulze, 2021). Het PIANC-rapport WG 106 (InCom Working Group 106, 2009) geeft een beschrijving en vergelijking van deze technieken. Bij ingebruikname van een nieuwe of een gerenoveerde sluis is de validatie momenteel veelal beperkt tot een controle van de nivelleertijd en een evaluatie van de bevindingen van de schippers tijdens de eerste schuttingen. Alhoewel in ontwerpfase de toegelaten kracht een belangrijke parameter is die invloed heeft op nivelleertijd en op ontwerpkeuzes, wordt de optredende kracht bij ingebruikname niet standaard getoetst.

De kracht die een schip ondervindt tijdens nivelleren kan aan de hand van volgende drie methodes gevalideerd worden:

- Het rechtstreeks opmeten van de kracht in de trossen door het plaatsen van een krachtopnemer tussen de bolder en de tros.
- Het opmeten van de pitch en roll van het schip en bij uitbreiding de verplaatsingen van het schip in de 6 vrijheidsgraden, i.e. de zogenaamde 6DOF. De pitch en roll zijn een goede maat voor de totale hydrostatische kracht die het schip ondervindt ten gevolge van het nivelleren.
- Het opmeten van de langse waterspiegelhelling in de kolk tussen boeg en hek van het schip. Deze waterspiegelhelling is een maat voor de hydrostatische kracht die een schip in de langsrichting ondervindt ten gevolge van het nivelleren.

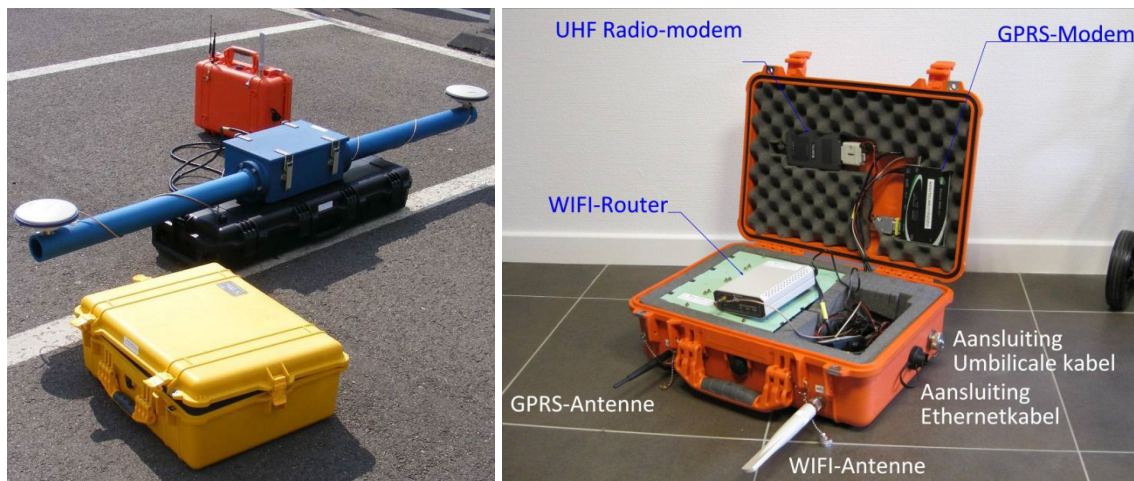
Door WL werden in het verleden de langse waterspiegelhellingen opgemeten dewelke een goede maat zijn voor de optredende hydrostatische langskrachten op de schepen in de sluis kolk. Hiervoor werden autonoom loggende druksensoren van het type Diver© ingezet die door middel van koorden verzwaard met ballast achterin de laddernissen werden opgehangen. Alhoewel de theoretische nauwkeurigheid beperkt is, werden veelal betrouwbare resultaten bekomen met een goede overeenkomst tussen metingen op linker- en rechteroever en een goede reproduceerbaarheid overheen de nivelleringen. Een belangrijk voordeel van de opstelling is dat deze snel en efficiënt ingezet kan worden. Een belangrijk nadeel is dat er een risico bestaat dat de koorden aangezogen worden en zo schade kunnen veroorzaken aan de aandrijving van de schepen in de kolk. Een voorstelling van deze opstelling wordt gegeven in Figuur 1.



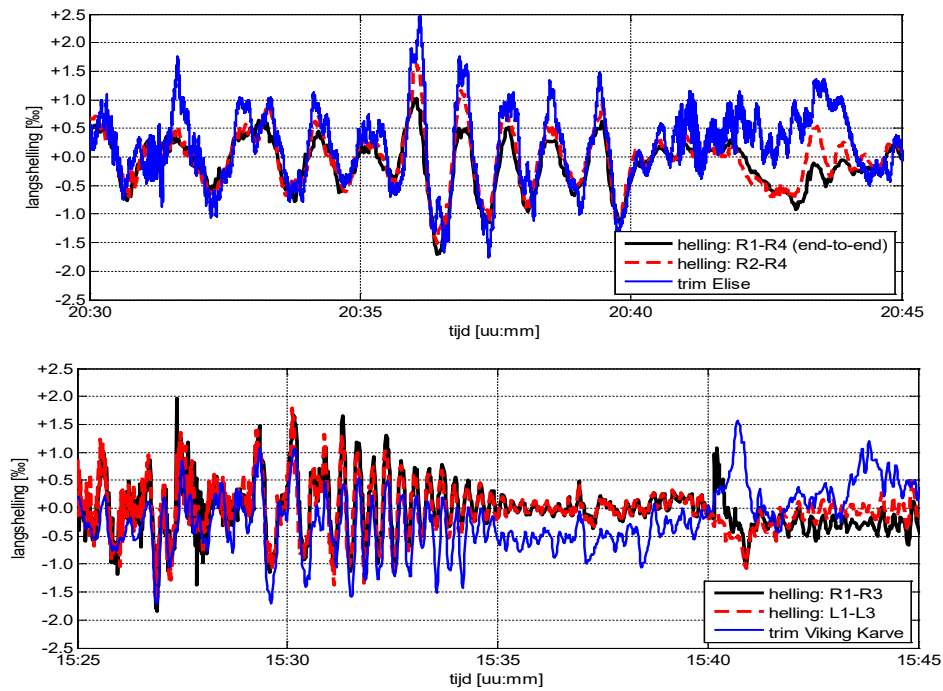
Figuur 1 – Meetopstelling WL voor opmeten langse waterspiegelhelling tijdens sluisnivelleringen

In maart 2010 werd in samenwerking met Direction des Recherches Hydrauliques, afdeling van Service Public de Wallonie (SPW) een gezamenlijke meetcampagne uitgevoerd in de sluis te Rosselies (De Mulder *et al.*, 2010). Tijdens deze meting werd door SPW de waterspiegelhelling opgemeten door middel van zeer nauwkeurige puls gesynchroniseerde drukmetingen bevestigd aan de kolkwand en werden de bewegingen van de vlinderkleppen opgemeten. De bewegingen van het schip in de kolk werden opgemeten door middel van een prisma op boeg en hek gevolgd door twee totaalstations, een RTK GPS meting op boeg en hek en een inclinometer op het schip. Door WL werd de meetopstelling met autonoom loggende druksensoren, zie Figuur 1, ingezet. Voor de opmeting van de beweging van het schip werden goede resultaten bekomen met de RTK GPS-meting en de meting met de totaalstations. De ingezette inclinometer bleek minder geschikt voor dynamische metingen. Een goede overeenkomst werd vastgesteld tussen de opgemeten pitch van het schip en de langse waterspiegelhelling.

Om verder inzicht te verkrijgen in de relatie tussen langse waterspiegelhelling en pitch van het schip heeft het WL metingen uitgevoerd in de sluis te Lembeek op het kanaal Charleroi-Brussel (Vercruyssen *et al.*, 2015) en in de oude sluis te Sint-Baafs-Vijve op de Leie (Vercruyssen *et al.*, 2014b). Hierbij werd naast de opmeting van de waterspiegelhelling met Divers de meetopstelling van WL voor het opmeten van de scheepsbewegingen tijdens vaarttrajecten ingezet, zie Figuur 2. Ook uit deze metingen volgde dat de langse waterspiegelhelling en de pitch van het schip vergelijkbaar maar niet identiek zijn, zie Figuur 3.



Figuur 2 – Voorstelling 6 DOF meetopstelling registratie vaarttrajecten



Boven meting Sint-Baafs-Vijve dd. 3/4/2013 / onder meting Lembeek dd. 20/03/2014

Figuur 3 – Vergelijking langse waterspiegelhelling met pitch schip

Bij de Westsluis te Terneuzen (Schouten, 2019) en de nieuwe sluis te IJmuiden werden de krachten in de trossen opgemeten. Hiervoor werd op het sluisplatform tussen tros en bolder een krachtopnemer geplaatst. WL heeft soortgelijke metingen uitgevoerd op de CEMT klasse II sluisen op het kanaal Leuven-Dijle in kader van een onderzoeksproject m.b.t. onbemand schutten. Een nadeel van het opmeten van de kracht in de trossen is dat de criteria uit literatuur en het hydraulisch ontwerp van nivelleersystemen gebaseerd zijn op langs- en dwarskracht. Om een vergelijking met het ontwerp en met de criteria mogelijk te maken dienen de langs- en dwarskracht die aangrijpen op het schip afgeleid te worden uit een troskrachtmodellering die naast de opgemeten kracht ook de richting en de elasticiteit van de trossen en de versnellingen van het schip in rekening neemt. Het installeren van een krachtopnemer hindert de normale werking van een sluis en is complex in binnenvaartsluisen met groot verval waarbij met drijvende bolders of haalkommen wordt gewerkt.

Uit bovenstaande volgt dat de validatie van de krachten die een schip ondervindt tijdens het nivelleren van een sluis kan gebeuren aan de hand van meting van de langse waterspiegelhellingen in de kolk, meting van de bewegingen en rotaties van het schip of een rechtstreekse opmeting van de krachten in de trossen van het schip. Concrete ervaring bestaat met elk van deze technieken, maar uit bovenstaande blijkt dat elke techniek wel één of meerdere tekortkomingen heeft. Op basis van de ervaring en de expertise van WL wordt de opmeting van de pitch en roll van het schip en bij uitbreiding de volledige 6 vrijheidsgraden van het schip in de tijd als het meest beloftevolle principe beschouwd voor de ontwikkeling van een nieuwe meettechniek.

3 Voortraject

De ontwikkeling van een meetopstelling voor de in situ opmeting van sluis nivelleringen wordt ondersteund vanuit het PIO-programma. Als eerste fase werd vanuit het PIO-programma een externe consultant aangesteld voor het uitvoeren van een voorstudie. De voorstudie werd uitgevoerd door het consultancybureau Verhaert en omvatte achtereenvolgens:

- Het opstellen van een behoefteanalyse, zie paragraaf 3.1;
- Het uitvoeren van een technologiescouting met hierop volgend een markconsultatie, zie paragraaf 3.2;
- Het voorstellen van een aankoopstrategie, zie paragraaf 3.3.

3.1 Behoeftanalyse

In kader van de behoefteanalyse werd een rondvraag uitgevoerd bij nationale en internationale sluisexperts. Uit deze rondvraag volgde dat het principe om sluisnivelleringen te valideren op basis van een opmeting van de 6 vrijheidsgraden van het schip toepasbaar is en dat er op het moment van de rondvraag hiervoor nog geen kant-en-klare opstelling bestond. Vervolgens werden aan de hand van een werksessie met sluisexperts van de Vlaamse Waterweg, de sectie Elektromechanica van afdeling Expertise Beton en Staal en WL use cases opgesteld. Deze worden samengevat in bijlage 1. Deze use cases beschrijven goed de noden en werden ook overgenomen bij het opstellen van de aanbesteding voor de PoC's.

Samengevat kan de behoefte als volgt omschreven worden:

Ontwikkeling van een mobiele meetopstelling om op afstand op een efficiënte, veilige en nauwkeurige wijze vanaf de kolkwand de verplaatsingen en rotaties van een schip in de kolk tijdens een nivellering op te meten.

'Efficiënt, veilig en nauwkeurig' worden verder als volgt geconcretiseerd:

- Efficiënt:
 - 1 dagsmetingen,
 - mobilisatie & demobilisatie < 2 uur,
 - 1 schip per nivellering, ca. 10 schepen/dag.
- Veilig:
 - geen menselijk contact en bij voorkeur contactloos,
 - in overeenstemming met de vereisten → zie behoefteanalyse in bijlage 1.
- Nauwkeurig:
 - 6 vrijheidsgraden,
 - nauwkeurigheid op basis van langshelling, zie Tabel 1,
 - frequentie 1 Hz
 - duurtijd per meetstap < 0.1 s ,

Bij ontwerp van vul- en ledigingsystemen wordt de toegelaten langs- en dwarskracht uitgedrukt in verhouding tot de onderwaterverplaatsing van het schip. Voor binnenvaartschepen volgt WL hierin veelal de criteria uit Ontwerp van Schutsluizen (Beem et al., 2000) aangevuld met het criterium voor een CEMT Vb schip uit Stichting Postacademisch Onderwijs (2006). Bemerkt dat de toegelaten langskracht hierbij voor beroepsvaart weergegeven wordt in functie van de CEMT classificatie. Hoe groter het schip hoe kleiner de toegelaten, relatieve, langskracht. Zoals gemotiveerd in hoofdstuk 2 wordt de amplitude en de richting van de pitch van het schip beschouwd als een goede maat voor de kracht die het schip ondervindt. De langskracht ten opzichte van onderwaterverplaatsing wordt hierbij benaderend gelijkgesteld aan het hoogteverschil over boeg en hek gedeeld door de lengte van het schip.

Op basis hiervan wordt in Tabel 1 vertrekkende van de maximaal toegelaten langskracht per CEMT klasse het hoogteverschil tussen boeg en hek bij maximaal optredende pitch/langskracht bepaald. In de volgende kolommen wordt, uitgaand van een gewenste bandbreedte van 10 %, de benodigde meetnauwkeurigheid bepaald van het hoogteverschil overheen boeg en hek en de benodigde meetnauwkeurigheid van een punt aan boeg en aan hek van het schip. Uit deze analyse volgt een vooropgestelde nauwkeurigheid van een individueel meetpunt tussen +/-1.5 mm en +/- 3.5mm.

Tabel 1 – Vereiste meetnauwkeurigheid

CEMT-klasse	Schip lengte [m]	Max. langskracht [%]*	ΔZ boeg-hek [cm]	Bandbreedte nauwkeurigheid [-]	Nauwkeurigheid Δz [-]	Nauwkeurigheid Δz [cm]	Nauwkeurigheid boeg, hek [cm]
Vb	185	0.75	13.9	0.1	+/- 0.05	+/- 0.70	+/- 0.35
Va	110	0.85	9.4	0.1	+/- 0.05	+/- 0.47	+/- 0.24
IV	85	1.10	9.4	0.1	+/- 0.05	+/- 0.47	+/- 0.24
III	80	1.50	12	0.1	+/- 0.05	+/- 0.60	+/- 0.30
II	55	1.50	8.3	0.1	+/- 0.05	+/- 0.42	+/- 0.21
I	38.5	1.50	5.8	0.1	+/- 0.05	+/- 0.29	+/- 0.15
Recreatie vaartuig	12	3.00	3.6	0.2	+/- 0.10	+/- 0.36	+/- 0.18

*Ontwerp van schutsluizen (Beem et al., 2000) / cursus (Stichting Postacademisch Onderwijs, 2006)

Bemerkt dat de langse waterspiegelhelling of de pitch van het schip zich voordoet bovenop een gemiddelde kolkpeilvariatie, i.e. een stijgend kolkpeil bij vullen of een dalend kolkpeil bij ledigen van de sluis. Enkele kenmerkende extrema van de stijgsnelheid van het waterpeil in een sluis tijdens nivelleren worden gegeven in Tabel 2. De eerste twee waarden hierin zijn overgenomen uit het handboek Ontwerp van Schutsluizen, de overige waarden zijn overgenomen uit door WL uitgevoerde metingen of ontwerpen.

Uit deze waarden volgt dat een extremum van de stijg/- daalsnelheid tot een 33 mm/s realistisch is. Bij de sluis te Zemst wordt zelfs een extremum tot 66 mm/s opgemeten. Bemerkt hierbij dat bij een duurtijd van een opmeting van 1 s het kolkpeil op het moment van maximum stijgsnelheid al met 10 mm tot 33 mm en in één case zelf met 66 mm gestegen kan zijn. De duurtijd van een meting en ook de toegelaten fout op de synchronisatie dient bijgevolg lager dan een seconde te zijn. Voor de behoefteanalyse werd besloten om de tijdsduur per meetstap te beperken tot 0.1 s. Bij een meetstap 0.1 s bedraagt de verschuiving overheen de meetduur op het moment van de maximale stijgsnelheid 1.0 tot 3.3 mm en in één case 6.6 mm.

Tabel 2 – Extremum van de stijg/- daalsnelheid voor enkele Vlaamse sluisen

Sluis	Extr. Stijg/-daalsnelheid [mm/s]	bron
Handboek ontwerp van schutsluizen - realistische waarde	17	(Beem <i>et al.</i> , 2000)t
Handboek ontwerp van schutsluizen - bovengrens zonder drijvende bolders	33	
Zemst vullen opwaartse kolk	66	(Vercruyssen <i>et al.</i> , 2009)
Noordersas Genk vullen (34	(Vercruyssen <i>et al.</i> , 2012)
Noordersas Hasselt vullen	25	(Vercruyssen <i>et al.</i> , 2012)
Lembeek vullen	25	(Vercruyssen <i>et al.</i> , 2015)
Lembeek ledigen	30	
Zemst vullen afwaartse kolk	17	(Vercruyssen <i>et al.</i> , 2016)
Ontwerp nieuwe sluis Sint Baafs Vijve	10	(Vercruyssen <i>et al.</i> , 2014a)
Ontwerp nieuwe sluis Aalst	10	(Vercruyssen <i>et al.</i> , 2018)

3.2 Technologiescouting en marktconsultatie

Volgend op de behoefteanalyse werd door Verhaert een technologiescouting uitgevoerd. Op basis van de inzichten van de technologiescouting werd een gerichte marktconsultatie uitgevoerd. Op deze marktconsultatie werden vertrekkend van een aantal potentiële geschikte technieken een aantal hypothesen waarover nog onzekerheid was voorgelegd aan de deelnemers. De deelnemers waren gespecialiseerde bedrijven en onderzoekinstellingen met een achtergrond in fotogrammetrische metingen, LiDAR en topografische metingen alsook universiteiten die bezig zijn met de ontwikkeling van nieuwe technieken. De opgedane kennis is gerapporteerd in (Robberecht, D. ; Coeman, 2021). In deze paragraaf wordt kort een samenvattende conclusie gegeven van de uitkomst van de technologiescouting en de marktconsultatie.

Tijdens het uitvoeren van de technologiescouting werd besloten om een onderscheid te maken in volledig contactloze technieken en technieken met beperkt, niet-menselijk contact. Voor de volledige contactloze technieken werden fotogrammetrie en LiDAR beschouwd. Het belangrijkste struikelpunt voor een klassieke terreestriële LiDAR-opstelling betreft de maximale opgelegde duurtijd per meetstap van 0.1 s. Uit navraag volgde dat het niet mogelijk is om een terreestriële LiDAR zo te modificeren dat deze slechts binnen beperkt bereik en hierdoor met een hogere frequentie meet. Een voordeel van fotogrammetrie is dat de duurtijd van een individuele meting beperkt is door de sluitertijd van de camera en hierdoor altijd voldoet aan de voorwaarde dat de tijdstap lager is dan 0.1 s. Een bezorgdheid is het grote bereik zowel in kijkhoek als in scherpstelling waardoor de vrees bestaat dat er met een array van camera's gewerkt dient te worden waarbij de gebruikte camera's wijzigen tijdens het vullen en ledigen van een sluis.

Om deze reden werd ook een fotogrammetrische opstelling met drones beschouwd. Een voordeel van drones is dat er meer vrijheid is naar locatie van de camera's en dat gedurende de nivellering de locatie van de camera's mee kan evolueren met de nivellering. Een nadeel is dat doordat de locatie niet vast ligt en dat voorafgaand elke fotogrammetrische bepaling opnieuw het centerpunt en rotatie van de camera's bepaald dient te worden, wat uitgevoerd kan worden op basis van automatisch getrackte features of op basis van een puntenwolkttransformatie. Voor het automatiseren van deze stap wordt verwezen naar machine learning en artificiële intelligentie (AI). Een andere potentiële volledige contactloze techniek die in de fase van de technologiescouting onderzocht werd, betreft het richten van een laserpunt op het schip waarvan de locatie met een of meerdere camera's in de tijd opgevolgd wordt. Hiervan werd een onderzoeksproject gevonden maar nog geen doorontwikkelde toepassing. Deze techniek werd hierom als te immatuur bevonden om expliciet op te nemen in de aanbesteding. Ook een onderzoeksproject van UA met sonar kwam aan bod. Met betrekking tot de volledig contactloze technieken werd voornamelijk de ontwikkelingskost voor het opstellen van een robuuste verwerking als een risico beschouwd.

Om deze redenen werd al tijdens de technologiescouting geopteerd om ook technieken met beperkt, niet-menselijk contact mee te nemen als een b-optie. De onderzochte technieken betreffen:

- Het opvolgen van prisma's in de tijd aan de hand van een landmeetkundig totaalstation of door middel van een Faro laser tracker. Voor het positioneren van de prisma's werden zowel drones overwogen als de optie om deze voorafgaand aan de schippers te bezorgen.
- Het aan boord brengen van een IMU (Inertial Measurement Unit) die zowel de hoeken als de versnellingen opmeet. Met betrekking tot de nauwkeurigheid van de locatie, dewelke bepaald wordt als een integratie overheen de versnellingen, is er onzekerheid naar de te behalen nauwkeurigheid.
- Het opstellen van een lokaal GNSS-systeem waarbij de positie van 'emitters' op het schip in de tijd opgevolgd wordt.

De marktconsultatie besluit dat in het geval van een volledig contactloze techniek de kans op slagen van een fotogrammetrische opstelling het grootste is. Voor de opmeting met beperkt, niet-menselijk contact wordt gedacht aan, maar niet beperkt, tot systemen op basis van inertie.

3.3 Aankoopstrategie

Uit de technologiescouting en de marktconsultatie volgde dat er geen kant-en-klaar beschikbare meetopstelling bestaat. Bij het opstellen van de aankoopstrategie is om die reden gekozen om eerst door middel van Proof of Concepts meer inzicht te krijgen in de technische haalbaarheid en de ontwikkelingskost. Door Verhaert werd een aankoopstrategie opgesteld bestaande uit 2 voorkeurpercelen en 2 percelen die uitgevoerd kunnen worden naargelang budget beschikbaar is.

De voorkeurpercelen zijn LiDAR en een vaste fotogrammetrische opstelling. De overige uit te voeren percelen in functie van het beschikbaar budget zijn een vrij te kiezen opstelling zonder fysiek contact en een opstelling met beperkt, niet-fysiek contact.

4 Beschrijving PoC

Volgend op het uitgevoerde voortraject werd besloten om door middel van een aanbesteding commerciële partijen PoC's te laten uitvoeren om meer inzicht te krijgen in de haalbaarheid van verschillende potentiële technieken.

De aanbesteding wordt besproken in paragraaf 4.1. De beschrijving van de sluis en het schip voor de PoC wordt gegeven in paragraaf 4.2. De ingezette referentie meetopstelling wordt beschreven in paragraaf 4.3.

4.1 Aanbesteding

De aanbesteding van de PoC werd uitgevoerd onder bestek WL_2021_04. Deze aanbesteding werd gepubliceerd in de zomer van 2022 als een mededingingsprocedure met onderhandeling. De aanbesteding werd opgedeeld in drie percelen waarbij voor elk perceel een verschillende meettechniek werd opgelegd:

- Perceel 1: Volledig contactloze meting op basis van fotogrammetrie.
- Perceel 2: Volledig contactloze meting met een vrij te kiezen techniek waarbij fotogrammetrie niet de hoofdtechniek betreft.
- Perceel 3: Zo contactloos mogelijke meting (beperkt niet-menselijk contact is toegelaten) met een vrij te kiezen techniek.

Uit de marktconsultatie volgde dat de realiseerbaarheid het grootste werd ingeschat voor een fotogrammetrische opstelling, hierom werd besloten om deze techniek op te leggen binnen perceel 1. Voor Perceel 2 werd gedacht aan LiDAR of een oplossing die naar voren was gekomen tijdens de voorstudie. Uit de marktconsultatie volgde dat de automatisatie van de verwerking van de volledig contactloze meettechnieken als complex en zeer kostelijk werd ingeschat. Om deze reden werd ook een perceel 3 opgesteld waarbij beperkt, niet-menselijk contact toegelaten is. Hierbij werd gedacht aan het gebruik van drones om prisma's, en versnellingsmeter en inclinometers of zelfs lokale GNSS-toestellen aan boord te brengen.

Voor perceel 3 werd opgelegd dat aan alle in de behoefteanalyse beschreven vereisten, zie paragraaf 3.1, voldaan moest worden met uitzondering van de opsteltijd. Voor perceel 1 en 2 diende aangegeven te worden op welke punten afgeweken werd ten opzichte van de behoefteanalyse.

De opdracht bevatte een vast deel en een voorwaardelijk deel. Binnen het vast deel van de opdracht diende de kwaliteit van de opstelling aangetoond te worden door middel van een voorafgaandelijke test. Hiernaast dient een draaiboek opgesteld te worden voor de uiteindelijke PoC. Het voorwaardelijk deel van de opdracht betreft het uitvoeren van de echte PoC in de sluis te Viersel. Bij het succesvol afronden van het vast deel van de opdracht werd ook het voorwaardelijk deel van de opdracht gegund.

Perceel 1 werd gegund aan Apixa en perceel 3 gegund aan Iv-Infra, Perceel 2 werd niet toegewezen.

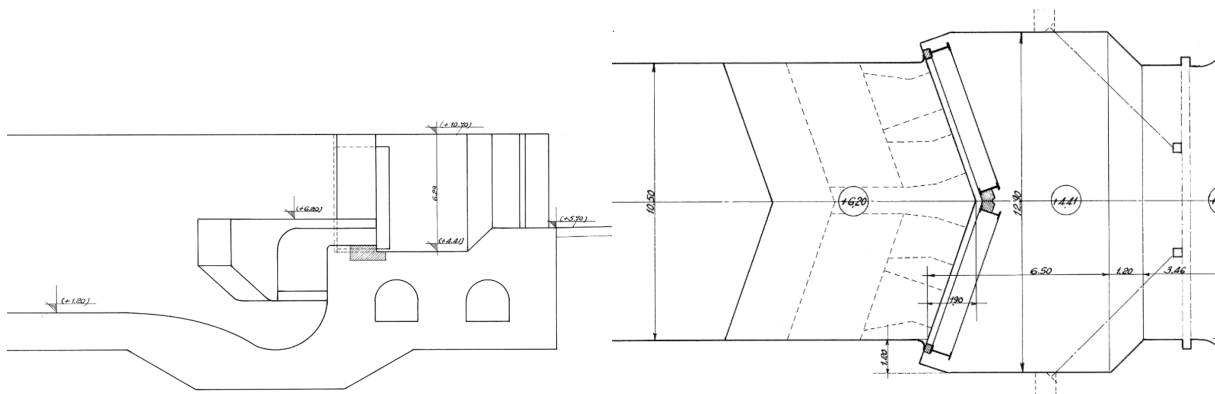
De opstelling, meetresultaten en de conclusies worden voor de PoC van Apixa met de fotogrammetrische techniek worden beschreven in hoofdstuk 5 en voor de PoC van Iv-Infra met een niet volledig contactloze techniek in hoofdstuk 6.

4.2 Beschrijving PoC

De PoC werd uitgevoerd in de CEMT klasse IV sluis te Viersel met een pallet schip van Blueline Logistics in de kolk. Een beschrijving van de sluis te Viersel is gegeven in paragraaf 4.2.1, een voorstelling van het ingezette schip voor de PoC's wordt gegeven in paragraaf 4.2.2. Het gehanteerde assenstelsel wordt verduidelijkt in paragraaf 4.2.3.

4.2.1 Sluis Viersel

De sluis te Viersel betreft een CEMT klasse IV sluis die de verbinding maakt tussen het Albertkanaal en het Netekanaal. De toegelaten schepen hebben een maximale lengte van 81.3 m bij een maximale breedte van 10.3 m en maximale diepgang van 2.8 m. Het verval over de sluis te Viersel bedraagt ca. 5 m. Via het bovenhoofd wordt de kolk gevuld via openingen onderin de deuren waarna het water via een woelkom de kolk instroomt. Via het benedenhoofd wordt de kolk geleidigd door middel van 4 openingen in de deur. Een zij- en bovenaanzicht van het nivelleersysteem van het bovenhoofd wordt gegeven in Figuur 4. Een vooraanzicht en doorsnede van de deuren in benedenhoofd, bovenhoofd en een doorsnede van de in de deuren ingebouwde segmentschuiven wordt gegeven in Figuur 5. In overleg met De Vlaamse Waterweg werd gekozen voor de sluis te Viersel omwille van de representatieve doch niet extreme kolkafmetingen en verval, de beperkte passage en de waterbeschikbaarheid.



(Ministerie van Openbare Werken - Bruggen en Wegen - Dienst der Zeeschelde, 1962)

Figuur 4 – Doorsnede en bovenaanzicht bovenhoofd sluis Viersel



Figuur 6 – Zulu1 gepositioneerd in kolk tijdens PoC Iv-Infra

Tijdens de PoC van Apixa werd een beperkte hoeveelheid ballastwater ingenomen, tijdens de PoC van Iv-Infra werd geen ballastwater ingenomen. De afmetingen van de Zulu 1 en Zulu 2 en de onderwaterverplaatsing tijdens de PoC's worden gegeven in Tabel 3.

Tabel 3 – Ingezette schepen PoC

PoC	schip	afmetingen	ballast?	onderwaterverplaatsing
Apixa	Zulu 2	50 m x 6.6 m	Beperkt geballast	83 m ³
Iv-Infra	Zulu 1	50 m x 6.6 m	Niet geballast	47 m ³

Het schip werd voorafgaand de metingen aangemeerd aan de wachtkade op het Netekanaal nabij de sluis. Na installatie van de meetopstelling werd het schip de kolk ingevaren met de boeg gericht naar het bovenhoofd. Het schip werd voor beide PoC's aangemeerd aan de rechterkolkwand. De oriëntatie van het schip werd behouden tijdens het vullen en ledigen. Het afschutten gebeurde hierdoor met het schip opwaarts varend georiënteerd. Tijdens beide PoC's moest het schip eenmaal uit de kolk voor een reguliere passage. Hierbij werd uitgevaren aan het bovenhoofd en vervolgens achteruit terug ingevaren zodat de boeg gericht bleef naar het bovenhoofd.

Een illustratie van de trossen tijdens beide PoC's wordt gegeven in Figuur 7. Tijdens de PoC van Apixa bevond het schip zich centraal in de kolk op een optimale positie voor de cameraopstelling. Ook na het terug invaren in de kolk werd de locatie aangehouden. Aan de boeg is één tros naar bovenhoofd toe gericht en één tros naar benedenhoofd toe gericht. De tros aan het hek is naar het benedenhoofd gericht en wordt op spanning gehouden door een winch. De tros aan de boeg werd niet gemanipuleerd tijdens het nivelleren.

Tijdens de PoC van Iv-Infra werd aan het hek één tros naar het bovenhoofd toe gericht en werd aan de boeg één tros naar het benedenhoofd toe gericht. De eerste twee schuttingen werd het schip dichter naar het bovenhoofd toe aangemeerd. De hierop volgende twee schuttingen bevond het schip zich centraal in de kolk. Een opname van de tros aan boeg bij de eerste nivelleringen wordt gegeven in Figuur 7 rechtsboven. Bij de centrale positie van het schip in de kolk werd dezelfde bolder aangehouden en de tros verlengd. Een opname van de tros aan hek wordt gegeven in Figuur 7 rechtsonder. Tijdens de PoC van Iv-Infra werd de winch niet gebruikt maar werd de tros aan het hek manueel bediend tijdens de nivellering. Bemerkt dat omwille van het beperkte gewicht van het schip, het schip bij ledigen bij momenten in de tros kwam te hangen zoals ook te zien is op de opname. Bij het verplaatsen van het schip naar het center van de kolk werd de tros aan hek één bolder naar het benedenhoofd toe opgeschoven.

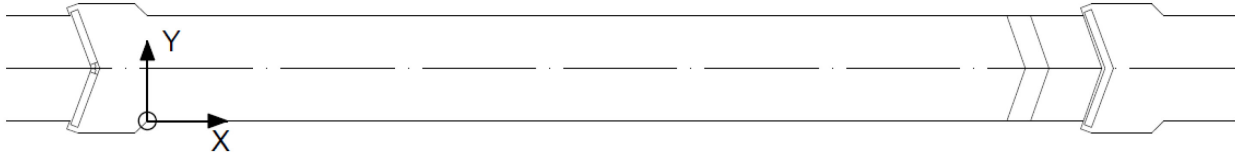


Linksboven: PoC Apixa / rechtsboven: PoC Iv-Infra vooraan in de kolk
 Linksonder: PoC Apixa aanmeren met winch / Rechtsonder: PoC Iv-Infra aanmeren zonder winch

Figuur 7 – Voorstellen configuratie trossen tijdens PoC Apixa en Iv-infra

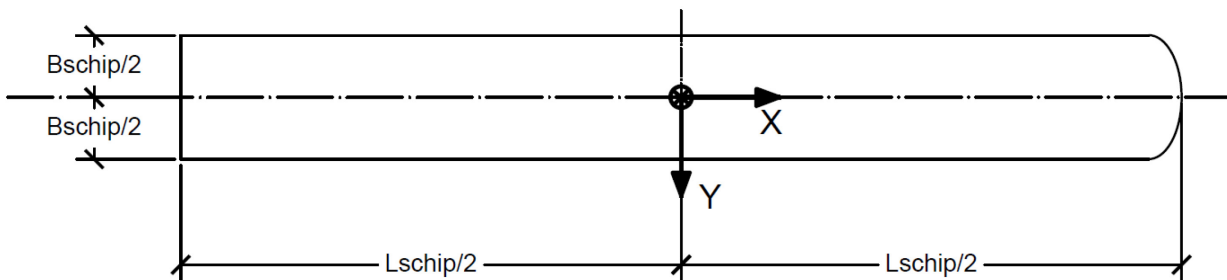
4.2.3 Assenstelsel

Het assenstelsel van de sluiskolk wordt gegeven in Figuur 1. De x-as is volgens dit assenstelsel positief naar het bovenhoofd toe. De y-as is positief van linker- naar rechteroever. De Z-as wordt uitgedrukt in meter TAW.



Figuur 8 – oorsprong lokaal assenstelsel sluis

Het assenstel van het schip wordt gegeven in Figuur 9. Het nulpunt van het schip wordt op halve lengte en halve breedte van het schip geplaatst. In hoogte wordt het nulpunt op de waterlijn gepositioneerd. De oriëntatie van de X-as is positief naar de boeg van het schip toe. In overeenstemming met de nautische conventie wordt de z-as verticaal omlaag gericht. Bij gebruik van een rechtsdraaiend assenstelsel is de Y-as positief naar stuurboord toe gericht. Volgens deze conventie is bij het optreden van een positieve pitch de boeg hoger dan het hek, en bij het optreden van een positieve roll komt bakboord hoger te liggen dan stuurboord.



Figuur 9 – Oorsprong en oriëntatie lokaal assenstelsel schip

De verplaatsingen in X en Y richting, alsook de rotaties rond de drie assen worden in dit rapport weergegeven ten opzichte van de positie bij start nivelleren. De positie in de Z richting wordt uitgedrukt in meter TAW.

Tijdens beide PoC's werd met de boeg naar het bovenhoofd toe gericht aangemeerd, i.e. de normale vaarrichting bij vullen van de kolk. Deze conventie wordt zowel voor de vullingen als voor de ledigingen aangehouden. Bemerkt dat in werkelijkheid bij ledigen het schip in de tegenovergestelde richting in de kolk aangemeerd zal liggen en het assenstelsel hierbij verdraaid zou moeten worden.

4.3 Referentiemeting

Naast de metingen van de PoC's werden door WL in samenwerking met de cel Fotogrammetrie – Topografie van de afdeling Algemene Technische Ondersteuning (ATO) ook referentiemetingen van de positie en rotaties van het schip uitgevoerd. De hiervoor ingezette meetopstellingen worden beschreven in paragraaf 4.3.1 en de uitgevoerde verwerking wordt besproken in paragraaf 4.3.2.

4.3.1 Meetopstelling

De positie en rotaties van het schip in de tijd werden door ATO opgemeten met behulp van drie totaalstations die elk een op het schip geplaatst prisma in de tijd opvolgen. Hiervoor werden volgende toestellen ingezet:

- Leica TS30 (resolutie 0.5"),
- Leica TS15 (resolutie 1"),
- Leica TPS1201 resolutie 1").

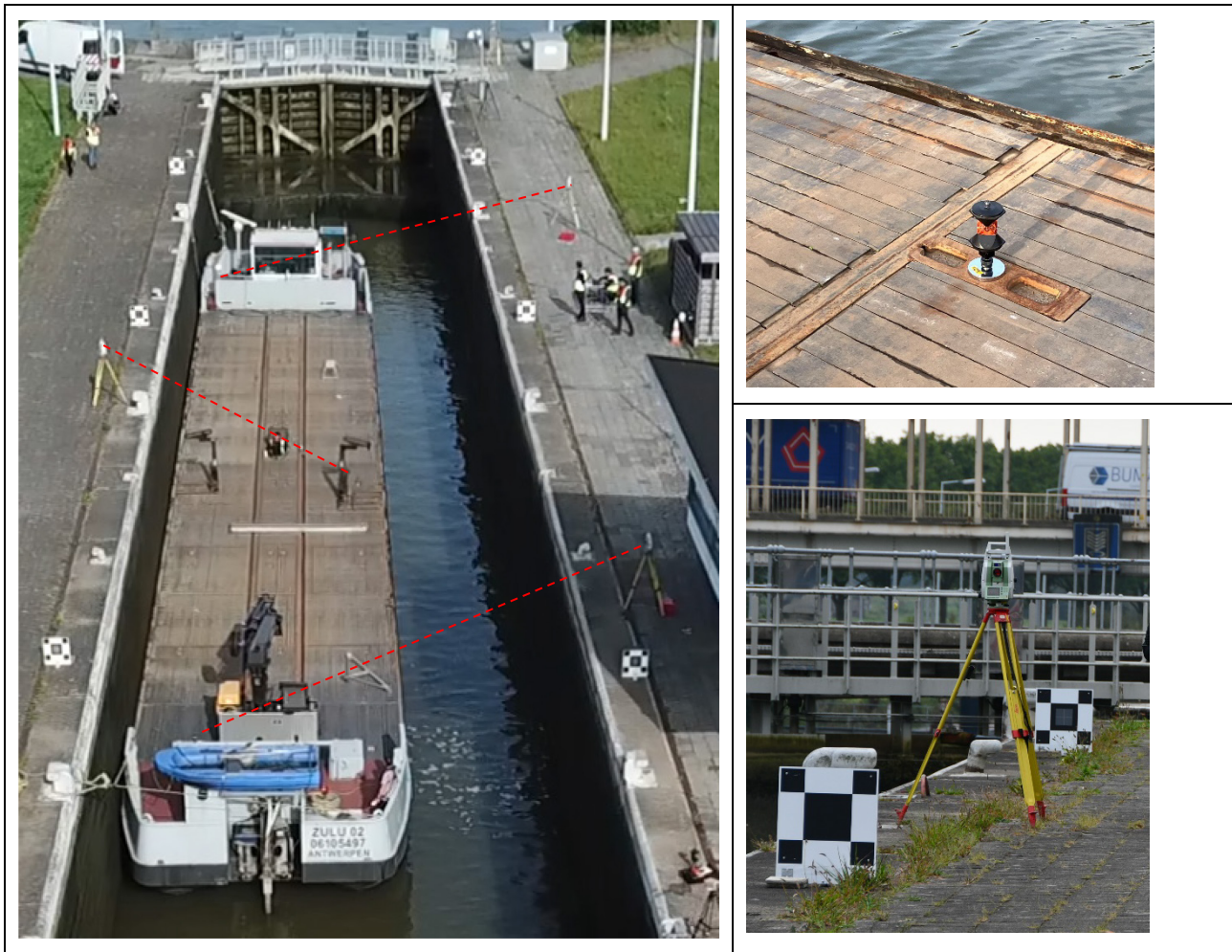
Bemerk dat dit twee theodolieten betreffen met een hoekresolutie van één seconde en één theodoliet met een hoekresolutie van een halve seconde.

Voor aanvang van beide PoC's lag het schip aangemeerd aan de wachtkade op het Netekanaal. Op deze locatie werden de drie prisma's bevestigd op het schip waarna een totaalstation op het schip werd geplaatst. De automatische horizonbepaling van dit totaalstation werd uitgezet zodat er geen fout optreedt ten gevolge van een beweging van het schip. Voor het opstellen van de transformatie tussen de locatie van de drie prisma's en de locatie en de richtingen van het schip werd met dit totaalstation het volgende opgemeten:

- De locatie van de drie prisma's.
- De positie van het center van de bolders op het schip.
- Enkele visueel bereikbare punten op boeg en hek van het schip.
- Zowel op bakboordzijde als op stuurboordzijde werden op de rand van het dek 4 punten ingemeten. Ter plaatse van deze 8 punten werd ook de afstand tot de waterspiegel opgemeten met behulp van een vouwmeter.

Het opstellen van de transformatie op basis van deze metingen wordt verduidelijkt in paragraaf 4.3.2.

Voor de uiteindelijke metingen worden de drie totaalstations op het sluisplatform ingezet. De positionering van deze totaalstations werd uitgevoerd met het schip bij laag peil in de kolk. De locatie van de prisma's op het schip en de totaalstations op het sluisplatform tijdens de PoC van Apixa wordt gegeven in Figuur 10. Bemerk dat het inmeten van de prisma's gebeurt vanaf de tegenoverliggende oever. Het toestel op rechteroever werd iets dichterbij de kolkwand gepositioneerd, enerzijds omdat het prisma hier op dekhoogte is gezet, zie Figuur 10 rechtsboven en anderzijds omdat dit punt dichterbij de kolk-as toe ligt. De drie prisma's bleven gedurende de volledige schutting in beeld. Tijdens de metingen volgen de drie totaalstations elk automatisch de positie van het toegewezen prisma met een frequentie van 1 Hz. Omwille van de goede ervaring bij de eerste PoC werd de opstelling behouden voor de tweede PoC.



links opstelling drie totaal stations met de zichtlijnen naar de respectievelijke prisma's
rechtsboven prisma op magnetische voet / rechtsonder totaal station

Figuur 10 – Opstelling totaal stations

Voor het opmeten van de helling van het schip werd bijkomend een twee-assige hoge precisie inclinometer type Sherborne T233 met een bereik +/- 3° ingezet, zie Tabel 4 voor specificaties. De met de inclinometer opgemeten helling werd via een acquisitie module gelogd door middel van een Ockel minicomputer. De inclinometer, data-acquisitiemodule en minicomputer werden gevoed via een batterij. De ingestelde meetfrequentie bedroeg 10 Hz. Een voorstelling van de inclinometer tijdens de PoC van Iv-Infra wordt gegeven in Figuur 11. De inclinometer wordt bevestigd op een PVC plaatje dat via een bolscharnier gemonteerd is op een vloerplaat. Deze vloerplaat wordt door middel van drie magneten vast op de metalen profielen van het dek geplaatst. Om te voorkomen dat de inclinometer buiten bereik gaat, wordt de inclinometer na installatie waterpas gezet met het bolscharnier. Een opname van de opstelling op het schip wordt gegeven in Figuur 11.

Tabel 4 – Specificatie Sherborne T233

	Hoek	Tan (hoek)
	[°]	[%]
bereik +/-	3.00	52.41
resolutie	0.00006	0.001
Non-linearity	0.0030	0.052
Non-Repeatability	0.0012	0.021



Figuur 11 – Opstelling inclinometer gemonteerd op Zulu I tijdens uitvoeren PoC Iv-Infra

Voor het opmeten van de krachten in de trossen werden twee S-type krachtopnemers van Zemic met een meetbereik 100 kN ingezet. De nauwkeurigheid van deze krachtopnemers bedraagt +/- 0.5 kN. Uit een bijgevoegd kalibratiecertificaat opgesteld op 5/10/2023 volgde voor beide sensoren een afwijking -0.06 kN tot +0.16 kN over het volledige meetbereik en een afwijking tot -0.04 kN bij 5% van het meetbereik. In Tabel 5 wordt de afwijking gegeven ten opzichte van de onderwaterverplaatsing van het schip. Deze toestellen logden via een Almemo 2590-4AS datalogger. Ook van beide Almemo uitleesunits werd een kalibratiecertificaat meegegeven. Voorafgaand aan het uitvoeren van de metingen werden de toestellen via het display gesynchroniseerd aan de hand van een mobiele telefoon met internetverbinding. De meetfrequentie bedroeg 1Hz. De krachtencellen werden geplaatst tussen de afmeerlijnen en de bolders op het sluisplatform, zie Figuur 12.

Tabel 5 – Inschatting meetfout load cell

/	PoC Apixa	PoC Iv-infra	
maximale opmeetbare kracht (FS)	100000	100000	N
5% van de maximaal opmeetbare kracht	5000	5000	N
1‰ gewichtsdeplacement schip	814	461	N
uit kalibratie certificaat volgende meetafwijking bij 5% FS	40	40	N
relatieve meetafwijking t.o.v. 1‰ gewichtsdeplacement	0.05	0.09	-



Figuur 12 – Krachtenopnemer bevestigd tussen meettouw en bolder

Om een goed vergelijking mogelijk te maken is het belangrijk dat de metingen onderling gesynchroniseerd zijn. Voor de synchronisatie tijdens de PoC van Apixa werd door WL een lokaal wifi netwerk opgesteld met een NTP server. Zowel de sturingscomputer van de fotogrammetrische opstelling als de mini computer van de inclinometingen werden geconnecteerd met deze NTP server. De totaalstations werden net voorgaand de meting gesynchroniseerd door middel van een GNSS verbinding. Voor de synchronisatie van de totaalstation metingen met de inclino opmeting werd na afloop van de metingen nog een test uitgevoerd waarbij door een totaalstation de bewegingen van een prisma verbonden met de inclinometer in tijd werden opgemeten. Tijdens de PoC van Iv-Infra werden de totaal stations van ATO, de totaal stations van Iv-Infra en de inclinometer gesynchroniseerd door het synchroon opmeten van een zeer geleidelijke beweging. Om een nauwkeurige synchronisatie toe te laten werd deze oefening uitgevoerd met een frequentie gelijk aan 5 Hz.

4.3.2 Verwerking

Uit de metingen met het totaalstation worden de bewegingen in de 6 vrijheidsgraden, de zogenaamde 6 DOF, van het schip afgeleid volgens de conventies geformuleerd in paragraaf 4.2.3.

In een eerste fase is de positie van de drie prisma's bepaald in het virtuele assenstelsel van het schip.

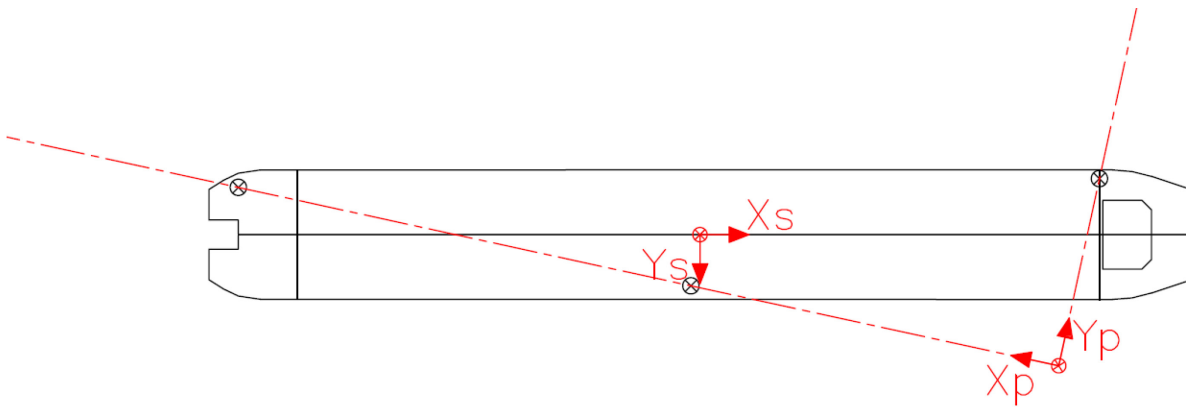
Het bepalen van deze posities gebeurt aan de hand van de opmeting met het totaalstation op het schip toen het schip voorafgaand de PoC aangemeerd lag aan de wachtkade. Voor de bepaling van deze positie wordt volgende methodiek toegepast:

- Nabij elk van de 4 hoekpunten van de Zulu 1 en Zulu 2 zijn 3 bolders voor het bevestigen van trossen aanwezig. Het center van deze bolders werd ingemeten met het totaalstation gepositioneerd op het schip. Uit deze metingen werd centerpunt van het schip in het vlak van de bolders bepaald.
- Op basis van de 8 punten opgemeten op de rand van het dek, 4 aan stuurboordzijde en 4 aan bakboordzijde wordt een vlak bepaald. Het centerpunt van de bolders wordt loodrecht op het vlak van het dek geprojecteerd.
- De richting van de X-as wordt afgelijnd uit de 4 opmetingen van de rand aan stuurboordzijde en de 4 opmetingen van de rand aan bakboordzijde. Conform de conventies beschreven in paragraaf 4.2.3 wordt de X-as positief gedefinieerd gericht naar de boeg van het schip en de Y-as positief gedefinieerd van bakboord naar stuurboord.
- Ter plaatse van de 8 meetpunten op de rand van het dek werd ook de vrijboord, i.e. de afstand tot het wateroppervlak, opgemeten met een vouwmeter. Op basis hiervan wordt een tweede vlak gedefinieerd dat het wateroppervlak voorstelt. Daarna wordt het eerder bepaalde centerpunt op het niveau van het dek geprojecteerd op de waterlijn. Deze projectie wordt loodrecht op het vlak van het dek uitgevoerd. Het op deze wijze bekomen snijpunt met de waterlijn wordt het uiteindelijke centerpunt van het schip.
- Vervolgens wordt een transformatiematrix opgesteld om de locatie van de prisma's opgemeten in het lokale assenstelsel van het totaalstation om te rekenen naar de locatie ten opzichte van het center van het schip. Op deze wijze wordt de locatie van de drie prisma's bekomen ten opzichte van het gedefinieerde virtuele assenstelsel van het schip.

Vertrekkende van de coördinaten van de prisma's in het virtuele assenstelsel van het schip wordt een nieuw assenstelsel gedefinieerd:

- De X-as wordt gedefinieerd als de lijn tussen twee prisma's.
- Vanop deze X-as wordt een loodrechte getrokken naar het derde prisma, op deze wijze wordt ook het centerpunt en de Y-as vastgelegd.
- Door het definiëren van een rechtsdraaiend assenstelsel wordt ook de richting van de Z-as gedefinieerd.

Vervolgens wordt op basis van de coördinaten van de prisma's in het virtuele assenstelsel van het schip en de coördinaten van de prisma's in het nieuw gedefinieerd assenstelsel een transformatiematrix opgesteld. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 13. Het assenstelsel gedefinieerd door de vectoren X_s en Y_s betreft het virtuele assenstelsel van het schip. Het assenstelsel gedefinieerd door de vectoren X_p en Y_p betreft het assenstelsel dat bepaald werd uit de posities van de prisma's op het schip.

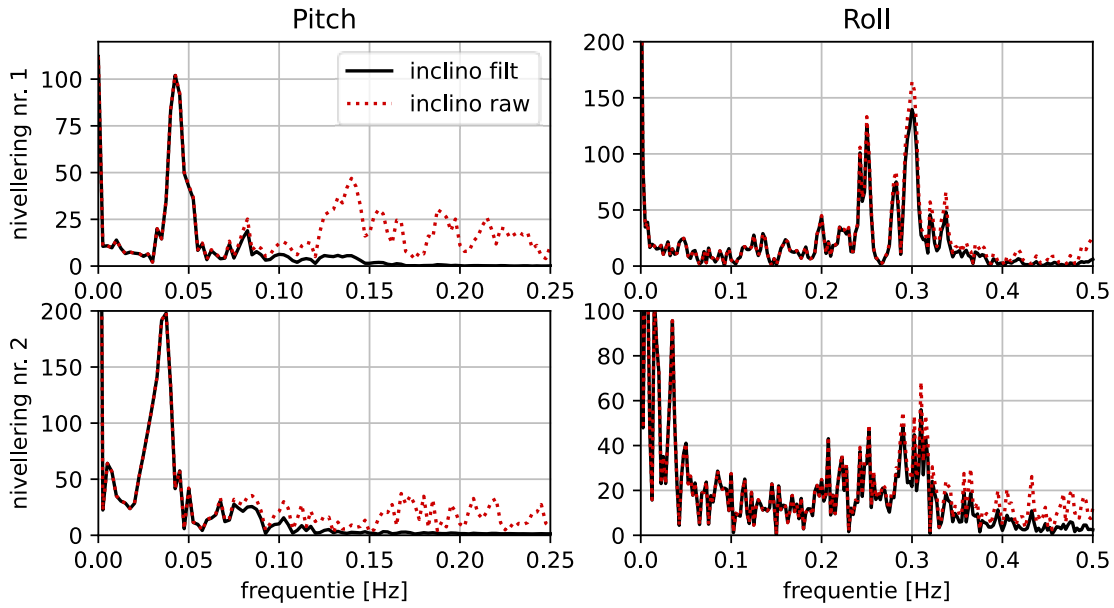


Figuur 13 – Illustratie coördinatenstelsels

Tijdens de metingen worden bij elke meetstap de coördinaten van de drie prisma's in het assenstelsel van de sluis kolk opgemeten. Vertrekkende van de coördinaten van de prisma's wordt een nieuw assenstelsel opgemaakt zoals hierboven beschreven. Door toepassen van de hierboven bepaalde transformatiematrix kan de positie van het center van het schip en de rotaties van het schip rond dit center bepaald worden.

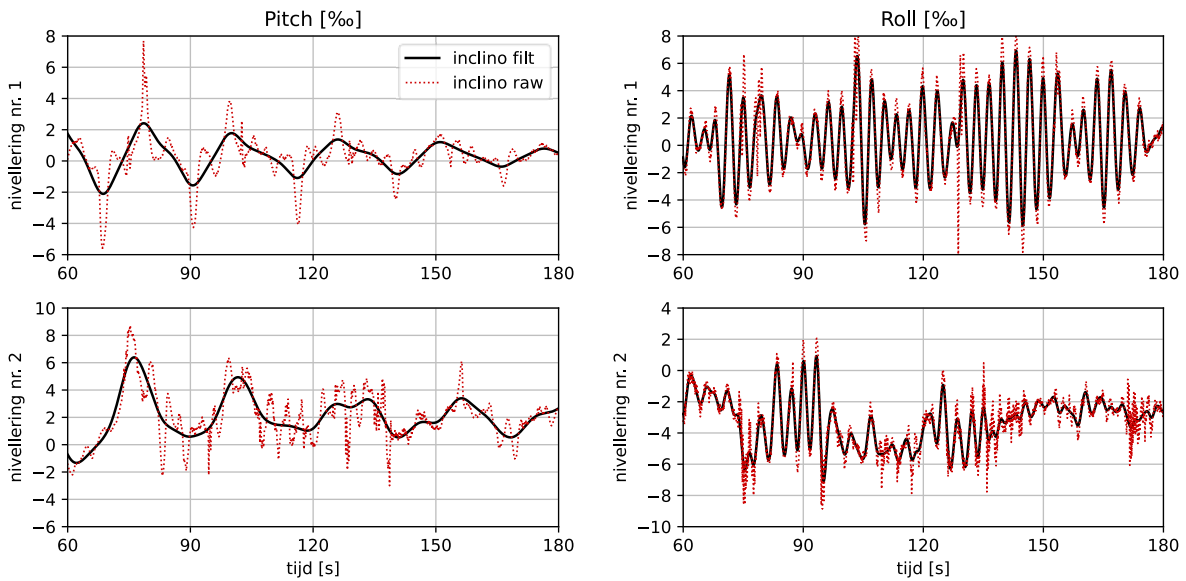
Bij uitvoeren van de PoC van Apixa werden de totaalstations gesynchroniseerd aan de hand van een RTK GNSS verbinding. Bij de PoC van Iv-Infra was het de bedoeling om de totaalstations op dezelfde wijze te synchroniseren maar is dit helaas niet gelukt. Wel werd voorafgaand aan de metingen een uitgebreide synchronisatieoefening uitgevoerd waarbij de drie totaalstations samen de verplaatsingen van een prisma in de tijd met een meetfrequentie van 5 Hz registreerden. Op basis hiervan werd accuraat de onderlinge verschuiving in tijd tussen de totaalstations vastgesteld. Bemerkt dat de eigenlijke metingen met een frequentie van 1 Hz werden uitgevoerd terwijl voor de synchronisatie een nauwkeurigheid kleiner dan één seconde vereist is. Door de correctie van de tijdsassen met een nauwkeurigheid kleiner dan één seconde werden de metingen niet meer synchroon uitgevoerd. Dit werd opgelost door voorafgaand de verwerking de totaalstation metingen te interpoleren naar een tijdas met een frequentie van 5Hz. Uit de metingen volgt dat dit aanvaardbaar is voor de pitch waarvan de periode in de orde 22-27 s ligt. Voor de roll waarbij de periode in de orde 3 s ligt is dit natuurlijk niet toegelaten. Bemerkt dat bij een zeer sterke roll beweging op deze wijze ook een niet toegelaten meetfout ontstaat op de pitch.

Bij verwerking van de inclinometing werd vastgesteld dat de meting gekenmerkt wordt door een verstoring met een hogere frequentie in vergelijking met de verwerkte PoC metingen en de topografische referentiemeting. Deze verstoring is nadrukkelijker aanwezig bij ledigen dan bij vullen. De vermoedelijke verklaring hiervoor is een plotse impact of wrijving van het schip tegen de kolkwand. Bemerkt dat bewust een inclinometer werd gekozen die ongevoelig zou moeten zijn voor vibraties en trillingen. Het is hierom niet duidelijk of deze verstoringen met hoge frequentie veroorzaakt worden door een eerder meettechnische of een eerder fysieke achtergrond. Op basis van het uit de metingen afgeleide power density spectrum werd besloten om de frequenties die niet meer waar te nemen zijn in de opmeting van de PoC en in de topografische referentiemeting weg te filteren door middel van een zogenaamde low pass filter. Concreet werd gekozen voor een Butterworth filter van de tweede orde. Voor de pitch werd een cutoff frequentie van 0.1 Hz (periode 10 s) toegepast en voor de roll werd een cutoff frequentie van 0.4 Hz (periode 2.5 s) toegepast. Ter illustratie wordt in Figuur 14 en Figuur 15 voor de eerste twee verwerkte nivelleringsen van de PoC van Apixa het frequentiespectrum voor de pitch en roll vergeleken met en zonder filter.



Eerste en tweede nivellering PoC Apixa

Figuur 14 – Verwerking inclinometer – illustratie invloed toegepaste low pass filter in het frequentiedomein



Eerste en tweede nivellering PoC Apixa zoom 60 s tot 180 s

Figuur 15 – Verwerking inclinometer – illustratie invloed toegepaste low pass filter in het tijdsdomein

5 PoC perceel 1 fotogrammetrische opstelling

Op 11 oktober 2023 werd door Apixa een PoC uitgevoerd met een fotogrammetrische opstelling. De ingezette fotogrammetrische opstelling wordt besproken in paragraaf 5.1. De meetresultaten worden in paragraaf 5.2 gepresenteerd en vergeleken met de referentiemetingen. De conclusies worden geformuleerd in paragraaf 5.3.

5.1 Beschrijving fotogrammetrische opstelling

De fotogrammetrische opstelling bestond uit een opstelling met twee stereoparen. Eén stereopaar werd geplaatst nabij het bovenhoofd en gericht naar de boeg van het schip en één stereopaar werd geplaatst nabij het benedenhoofd en gericht naar het hek van het schip. Beide opstellingen zijn identiek en bestaan uit twee hoge resolutie monochroom camera's met een lens met vast brandpuntsafstand op een afstand 1.50 m ten opzichte van elkaar, zie Tabel 6 voor specificaties. De stereo kalibratie van elk stereopaar werd uitgevoerd voorafgaand de PoC. Door middel van opnames van een Charuco bord overheen het beeldbereik werd per stereopaar de stereokalibratie uitgevoerd. Deze kalibratie is essentieel voor de kwaliteit van de metingen en een kleine manipulatie van een van beide camera's tussen de kalibratie en het uitvoeren van de metingen zal de kalibratie tenietdoen. Om zekerheid in te bouwen werd door Apixa meteen volgend op de metingen nog een set opnames gemaakt met het Charuco bord. Uit de processing volgde dat de initieel opgestelde kalibratie voor beide stereoparen voldeed.

Tabel 6 – PoC Apixa - specificaties ingezette camera

Type	GiGE*
Resolutie	5120x5120 pixels
Type	monochroom
Pixel diepte	8-12 bit
Ingestelde framerate	1 fps

*GiGE = Interface standaard voor camera's waarbij de data transfer via een ethernet kabel gebeurt.

De aansturing werd voorzien vanuit een laptop die zich tussen beide stereoparen in centraal op het sluisplatform bevond. Elke camera werd vanuit deze centrale laptop verbonden met een cat6 Ethernet kabel en een kabel die een puls en voeding bevat. De puls voor de 4 camera's werd voorzien vanuit een 'trigger box'.

De conversie van het assenstelsel van de stereoparen naar het globaal assenstelsel van de kolk wordt volgens twee methodieken uitgevoerd:

- Aan weerszijden van de kolkwand werden drie rechtopstaande dambordpatronen geplaatst. Voor het uitlijnen en positionering werd een Leica X40 disto toestel gebruikt. Deze checkerborden zijn zichtbaar voor beide stereovisie opstellingen wat het mogelijk maakt om het lokale assenstelsel van de beide stereovisie opstellingen te transformeren naar het globale assenstelsel.
- Als alternatief werd een tweede kalibratie uitgevoerd waarbij door een persoon met eenzelfde type dambordpatroon langsheen de sluis werd gewandeld. De locatie van het checkerboard wordt softwarematig gedetecteerd en opgemeten in het lokale coördinatensysteem van elke stereovisie opstelling. Op basis van een optimalisatie algoritme wordt de meest geschikte transformatie opgesteld.

Een voorstelling van de volledige opstelling met het schip Zulu 2 bij laag peil in de kolk wordt gegeven in Figuur 16. Een detail beeld van een stereopaar en de checkerboards wordt gegeven in Figuur 17. Een opname van een van beide camera's van het stereopaar aan boegzijde en van een van beide camera's van het stereopaar aan hekszijde van het schip bij hoog en bij laag peil in de kolk wordt gegeven in Figuur 18.



Figuur 16 – Overzicht opstelling



Links: stereopaar; rechtsboven vast dambordpatroon; rechtsonder kalibratie met bewegende dambordpatroon

Figuur 17 – Stereovisie opstelling



links: hoog water in sluisolk, rechts: laag water in sluisolk; boven: beeld van het stereopaar ter plaatse van boeg van het schip; onder: beeld van het stereopaar ter plaatse van het hek van het schip

Figuur 18 – Voorbeeld camera beelden (nivellering nr. 2)

Omstreeks 09:00 werd aangevangen met het opstellen van de metingen. Het opstellen van de stereoparen en de vaste checkerboards nam tot ca. 12:00 in beslag. Bemerkt dat onder meer het uitlijnen van de 6 checkerboards tijdsintensief was. Voor toekomstige metingen zou de positie van de checkerboards per sluis voorafgaand uitgezet kunnen worden aan de hand van klinknagels door landmeetkundigen. Uit de verwerking volgde dat zowel de kalibratie met de 6 statische checkerboards als de dynamische kalibratie tot goede resultaten leidden. Het voordeel van de dynamische kalibratie is dat deze sneller uitgevoerd wordt en dat er geen checkerboards geplaatst moeten worden. Voordeel van de vaste checkerboards bij een voorafgaande inmeting door landmeetkundigen is dat de metingen rechtstreeks in het assenstelsel van de kolk uitgevoerd kunnen worden.

Voorafgaand elke opmeting werden de instellingen van de camera's geoptimaliseerd. Doordat het tijdens de metingen partieel bewolkt was wijzigden de lichtcondities tijdens de metingen. Ook het verschil in lichtintensiteit op bepaalde onderdelen van het schip bij laagpeil en hoogpeil in de kolk bemoeilijkten de opnames.

Door de sturingscomputer van de camera via een wifi netwerkverbinding te laten maken met een lokale NTP-server werd de tijdsynchronisatie voorzien met de inclinometer van WL. Bemerkt dat na de eerste meting echter een probleem optrad met de laptop waarop de NTP-server draaide. De shift tijdens de andere metingen zou echter beperkt moeten zijn tot de drift van de systemen overheen de verdere duur van de metingen. Dit wordt minimaal beschouwd. De metingen met de totaalstations zijn gesynchroniseerd aan de hand van hun GNSS-verbinding. Op basis van de meting van de pitch werd visueel een tijdverschuiving van 1 minuut bepaald voor de drie nivelleringsen.

Per stereopaar werden op de eerste afbeelding manueel een 500 features geselecteerd, zie Figuur 19. Deze features werden geselecteerd op basis van een uitgesproken textuur. De verdere verwerking gebeurde grotendeels geautomatiseerd. De geselecteerde features werden hierbij in de tijd gevolgd. Door toepassing van de Bundle Adjustment (BA) techniek werd de nauwkeurigheid verhoogd. De gedetecteerde punten waren gelegen op boeg, hek en één zijde van het schip. Op basis van de puntenwolk bij aanvang van de meting werd de 6 DOF van het schip, het centerpunt en de drie richtingen, bepaald. Waarna vervolgens op basis van de evolutie van de opgemeten punten in de tijd de 6 DOF van het centerpunt in de tijd werd opgevolgd.



Figuur 19 – PoC Apixa - Voorbeeld opgevolgde features op boeg schip

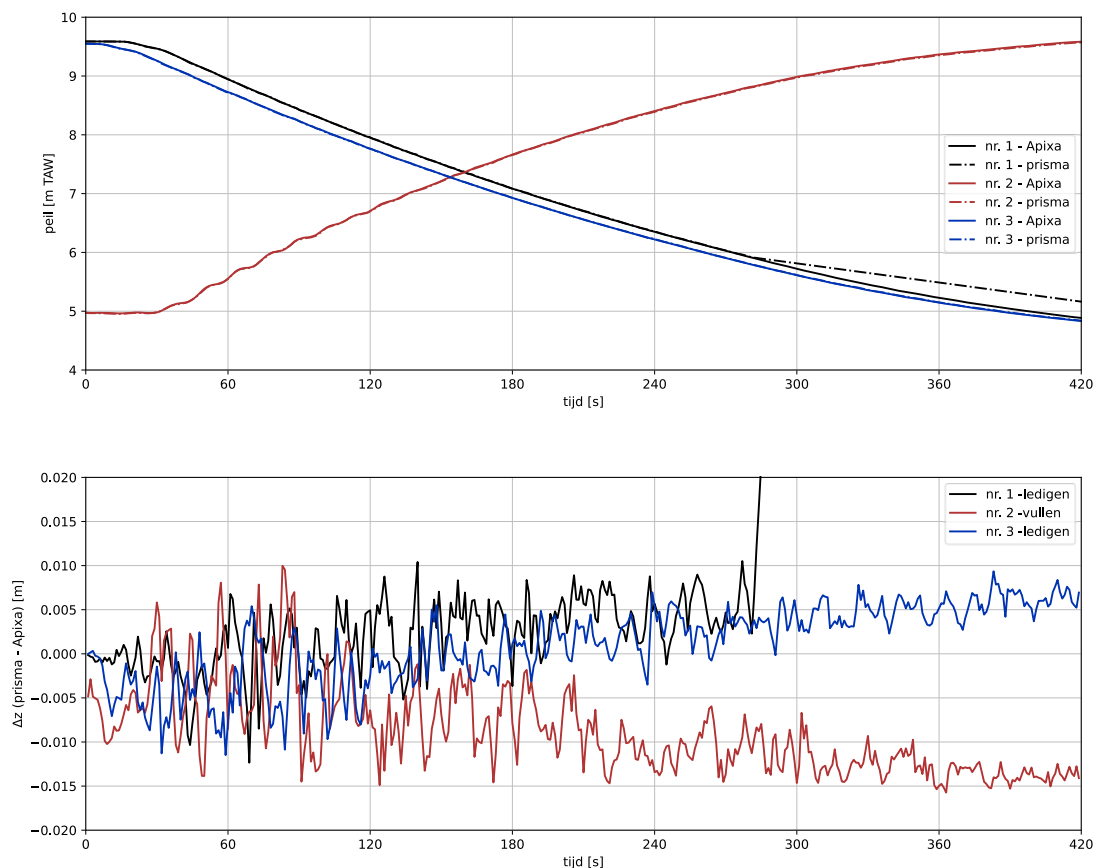
5.2 Vergelijking metingen

Door Apixa werden twee ledigen en een vulling verwerkt, zie Tabel 7.

Tabel 7 – Verwerkte nivellering PoC Apixa

volgnummer	start tijdstip [2]	type
nr. 1	13:23:50	ledigen
nr. 2	13:44:10	vullen
nr. 3	13:58:58	ledigen

Het verloop van de Z positie van het schip in de tijd voor de drie opgemeten nivelleringen wordt gegeven in Figuur 20. Bemerkt dat tijdens nivellering nr. 1 op 285 s de opmeting van één van de drie totaalstations wegviel. De afwijking tussen de meting van Apixa en de meting met de totaalstations door WL wordt weergegeven in de onderste figuur en bevindt zich in de range -0.015 m tot + 0.010 m.

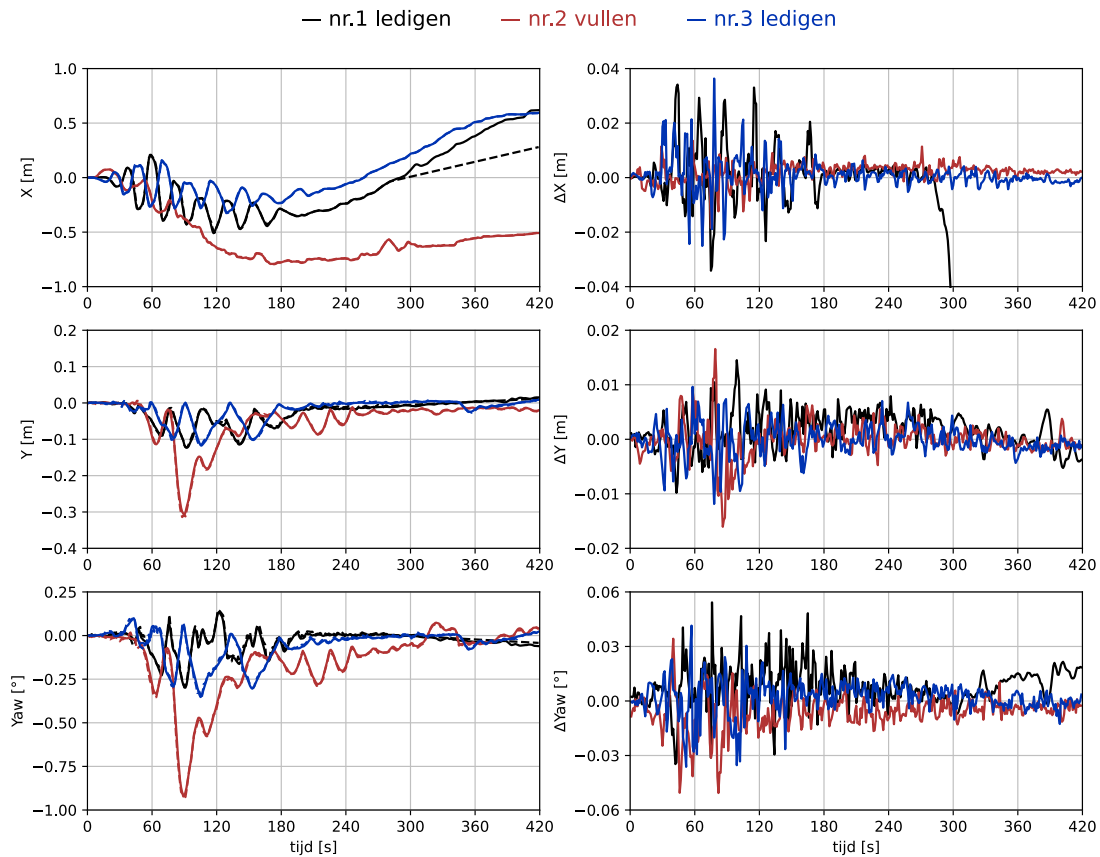


boven: vergelijking peil / onder: verschil

Bij nivellering nr. 1 – op 285 s viel één van de totaalstations van de referentie topografische opmeting uit

Figuur 20 – PoC Apixa – vergelijking Z-positie center schip

De verplaatsing van het schip in het horizontaal vlak en de yaw worden gegeven in Figuur 21. De linkerfiguren geven de opgemeten waarden, de rechterfiguren het verschil tussen de metingen van Apixa en de referentiemetingen. De verschillen tussen de metingen van Apixa en de referentiemetingen in X en Y richting zijn minimaal met voor de X richting enkele uitschieters tot +/- 0.03 m en voor de Y richting enkele uitschieters tot +/- 0.015 m. Voor de Yaw doen zich bij de verschillen uitschieters voor tot +/- 0.05° wat over de lengte van 50 m van het schip overeenkomt met een verplaatsing van +/- 0.04 m.

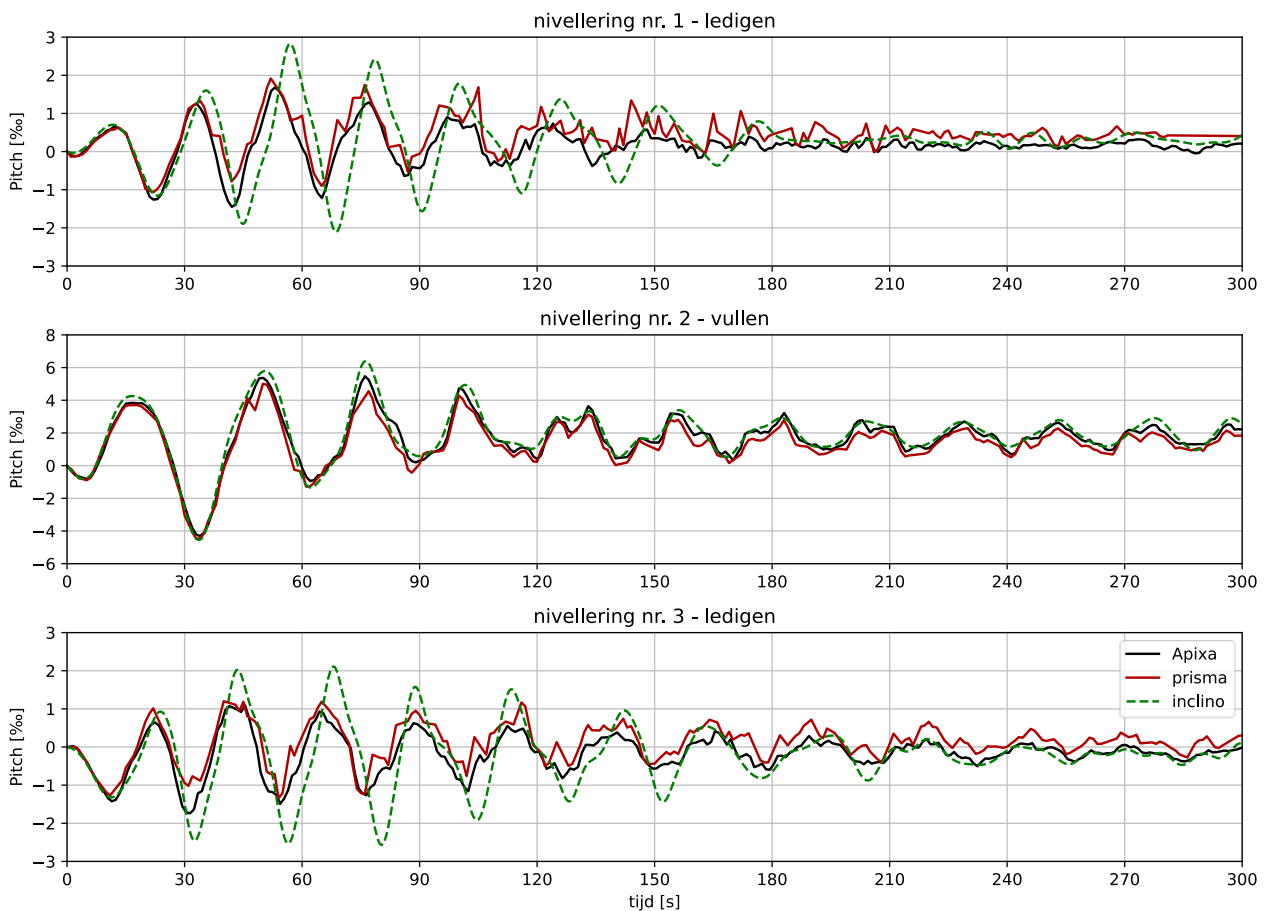


Figuren links: volle lijn = fotogrammetrische opmeting Apixa / streeplijn =topografische opmeting

Figuur 21 – PoC Apixa - vergelijking X, Y en Yaw

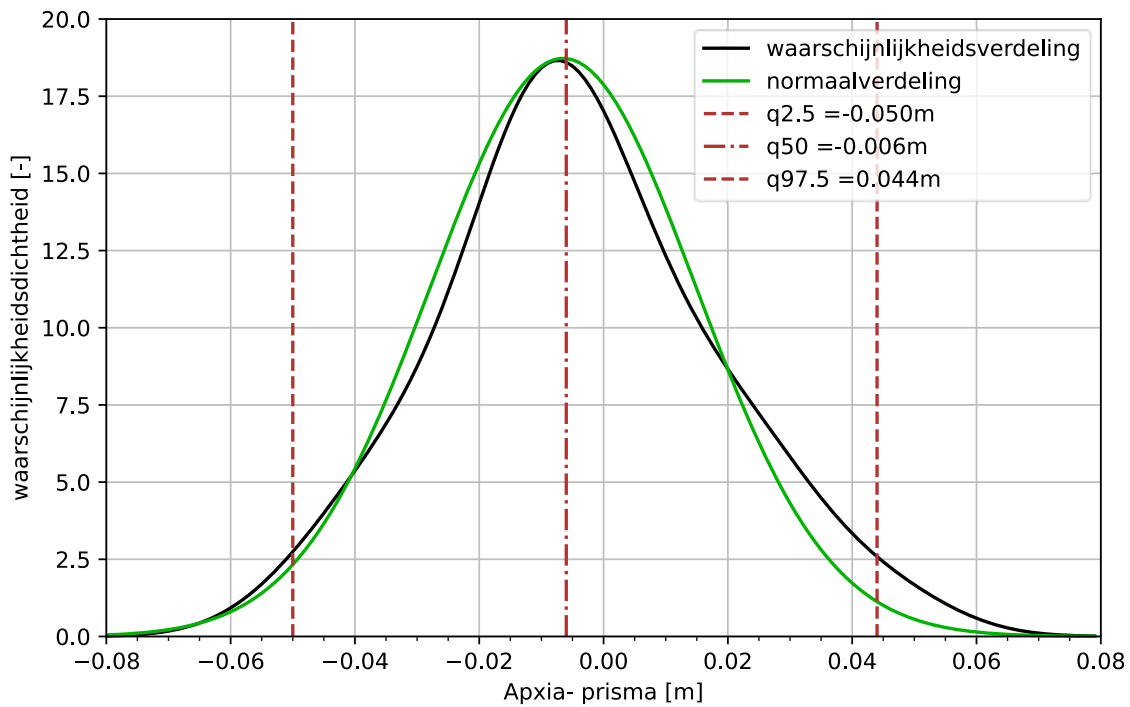
Het verloop van de opgemeten pitch in de tijd wordt gegeven in Figuur 22. Voor de twee ledigingen loopt de pitch op tot 1 à 2 ‰. Bij een scheeps lengte 50 m komt dit overeen met een verschil in hoogte tussen boeg en hek van 0.05 m à 0.10 m. Voor de vulling loopt het verschil op tot 4 à 6 ‰, wat overeenkomt met een verschil in hoogte tussen boeg en hek van 0.20 m à 0.30 m. Wat hierbij opvalt is dat het verloop van alle metingen gelijkaardig is en dat de onderlinge overeenkomst tussen de fotogrammetrische en topografische opmeting beter is dan de overeenkomst met de resultaten van de opmeting met de inclinometer. Tussen de fotogrammetrische en topografische opmeting is er een zeer goede overeenkomst op vlak van verloop en extrema.

Enkel bij het tweede negatieve extremum van de twee ledigingen valt op dat de fotogrammetrische meting een merkelijke hogere helling opmeet dan de topografische opmeting. Bij dit tweede negatieve extremum bedraagt de afwijking tussen beide metingen ca. 0.7 ‰ wat overeenkomt met een verschil in hoogte van 0.035 m. De pitch opgemeten met de inclinometer leek verstoord te worden zie paragraaf 4.3.2. Dit fenomeen was merkelijk sterker bij ledigen dan bij vullen. Door toepassen van een low pass filter werd getracht om deze verstoring weg te filteren. Er lijkt echter nog altijd een afwijking op te treden op de inclinometer metingen die vooral bij ledigen opvalt.



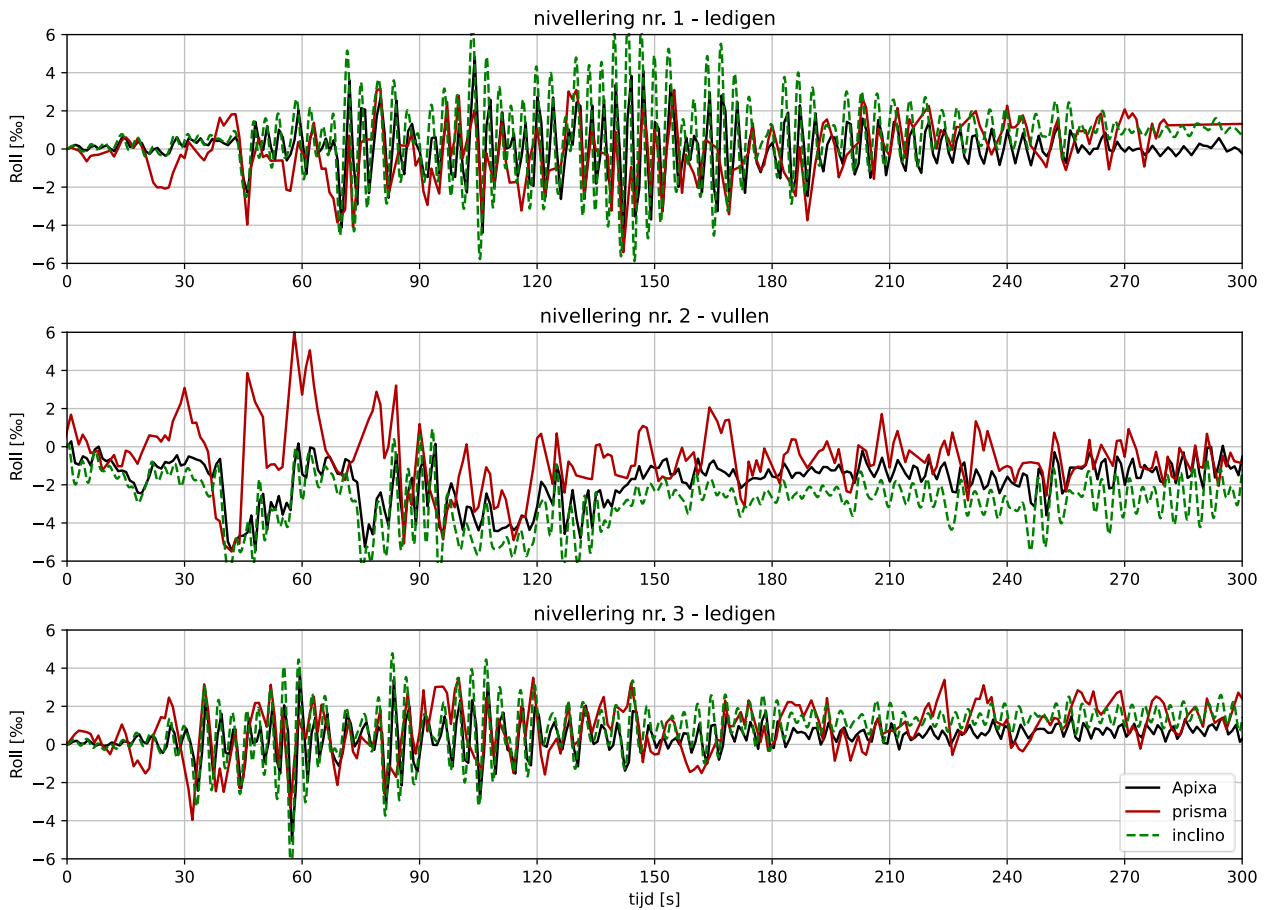
Figuur 22 – PoC Apixa – vergelijking pitch schip

Voor elk van de 3 verwerkte nivelleringen worden zowel voor de pitch bepaald uit de fotogrammetrische opmeting van Apixa als voor de pitch bepaald uit de topografische referentieopmeting, de waarden van de eerste 10 opeenvolgende extrema afgeleid. De waarden van deze extrema worden daarna omgerekend naar het verschil in hoogte tussen boeg en hek. Op basis hiervan wordt vervolgens het verschil tussen beide metingen bepaald. Op deze wijze wordt voor in totaal 30 extrema het verschil berekend. Figuur 23 toont voor deze 30 verschillen de waarschijnlijkheidsverdeling. Ter vergelijking wordt ook een normaalverdeling geplott. Uit de figuur volgt dat er een goede overeenkomst is met de normaalverdeling. Uit deze figuur volgt dat het mediaan verschil tussen beide meetreeksen beperkt is tot een -0.006 m. De standaarddeviatie bedraagt een 0.021 m. Het 95 % waarschijnlijkheidsinterval ligt tussen -0.050 m en 0.044 m.



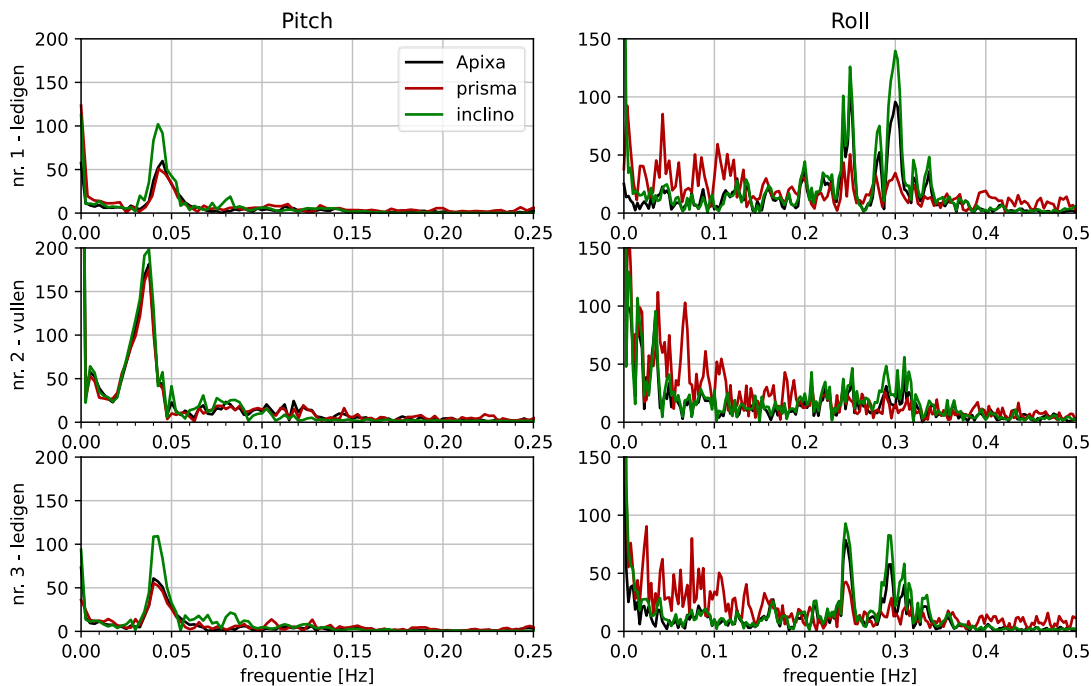
Figuur 23 – PoC Apixa– waarschijnlijkheidsverdeling verschil in hoogte boeg en hek

Het verloop van de opgemeten roll in de tijd wordt gegeven in Figuur 24. De amplitude loopt op tot 6 ‰ wat bij een scheepsbreedte 6.6 m overeenkomt met een verschil +/- 4 cm tussen stuur en bakboord. Bij de twee ledigingen is de roll beperkt tot schommelingen omheen het centerpunt. Bij de vulling van de kolk is er wel een duidelijke trend te zien waarbij zich een negatieve roll voordoet wat overeenkomt met een inzinking aan bakboordzijde, i.e. de zijde waar het schip aangemeerd ligt. De periode van de roll bedraagt 3 tot 4 s. Om deze correct op te meten dient echter met een hogere frequentie dan 1 Hz gemeten te worden. Bemerk dat er een vrij goede overeenkomst is tussen de fotogrammetrische opmeting en de inclino opmeting. De topografische opmeting is eerder onregelmatig. Aan het einde van de tweede lediging valt op dat de drie metingen een gelijke geleidelijke toename van de roll vertonen. Bij de opgemeten vulling valt op dat de overeenkomst tussen de fotogrammetrische opmeting en de meting met de inclinometer goed is over het volledige verloop. De topografische opmeting vertoont de eerste 180 s een afwijkend verloop, om vervolgens samen te vallen met de fotogrammetrische opmeting. Een mogelijk verklaring is dat de topografische opmeting hier tegen zijn limieten aanbotst gelet op de beperkte scheepsbreedte. Bemerk hierbij ook dat de topografische opmeting nauwkeuriger is bij een hoog peil in de kolk dan bij een laag peil. De verklaring hiervoor is dat de totaalstations nauwkeuriger zijn in het uitvoeren van hoekmetingen dan in het uitvoeren van afstandsmetingen. Bij een hoger peil in kolk zal bij een gegeven wijziging in hoogte van het peil van het prisma de wijziging in hoek groter zijn dan bij een laag peil in de kolk.



Figuur 24 – PoC Apixa – vergelijking roll schip

Een frequentiespectrum van de met de drie meettechnieken opgemeten pitch en roll wordt voor de 3 beschouwde nivelleringen gegeven in Figuur 25. Voor de pitch is er een duidelijke piek rond 0.037 tot 0.045 Hz wat overeenkomt met een periode tussen 22 s en 27 s. Het verloop is hierbij gelijk voor de drie metingen. Het verloop van frequentiespectrum voor roll is voor alle nivelleringen hetzelfde voor de inclinometing en de meting van Apixa. Enkel bij de topografische opmeting worden iets meer variaties met lage frequenties opgemeten dan bij de twee overige metingen.



Figuur 25 – PoC Apixa – vergelijking frequentie analyse pitch en roll

5.3 Conclusies

Door Apixa werden 3 volledige nivelleringen verwerkt, 2 ledigen en 1 vulling. De resultaten van deze metingen werden door WL vergeleken met de uitgevoerde referentiemetingen.

Uit deze vergelijking volgt het volgende:

- Op vlak van pitch vallen de fotogrammetrische en topografische opmeting vrijwel samen. Enkel op de amplitude van de eerste negatieve pieken bij ledigen wordt een merkelijke afwijking vastgesteld.
- De amplitude van het signaal van de inclino opmeting is na toepassen van de low pass filter, zie paragraaf 4.3.2, nog merklijk groter dan de amplitude opgemeten met de fotogrammetrische opmeting en deze opgemeten met de topografische opmeting. Het is niet duidelijk of deze afwijking een meettechnische verklaring heeft.
- Uit een vergelijking van de opgemeten extrema voor de 4 nivelleringen volgde voor het verschil in hoogte tussen boeg en hek van het schip een mediaan afwijking tussen de opmeting van Apixa en deze van de referentie topografische meting van 0.006 m met een standaarddeviatie van 0.021 m.
- Op vlak van roll wordt vastgesteld dat bij vullen zich een duidelijke kanteling van het schip voordeed en dat er een goede overeenkomst vastgesteld werd tussen de fotogrammetrische en inclino opmeting. De topografische opmeting vertoont op vlak van roll een merkelijke afwijking.
- Bij ledigen schommelde het schip rond het nulpunt met een periode 3 à 4 s. Om deze schommeling nauwkeurig te kunnen opmeten is een hogere meetfrequentie nodig.

De door Apixa ingezette opstelling betrof een experimentele opstelling. Bij opstellen van de aanbesteding werd niet ingeschat dat het binnen de proof of concept haalbaar was volledige nivelleringen op te meten en te verwerken. De PoC van Apixa toont echter aan dat technologie en zeker verwerking verder staan dan op voorhand ingeschat werd. Zowel op vlak van meetopstelling als op vlak van de processing zijn er haalbare verbeteropties om van PoC stadium te gaan naar een werkende opstelling. Volgende verbeteropties zijn gedefinieerd:

- Bij een verdere ontwikkeling dient een specifiek frame uitgewerkt te worden voor de stereovisie-opstellingen, zodat de opstelling robuuster staat, de kans op verstoring van de kalibratie bij een impact verkleint en de opstelling bestand is tegen matige neerslag en wind. Ook is het interessant om te bekijken of de opstellingen draadloos verbonden kunnen worden met de sturingscomputer. Hiervoor is een voeding op batterij en een draadloze verbinding nodig voor overdracht van beelden en synchronisatie.
- Een uitgewerkte methodiek voor het plaatsen van de markers. Dit kan uitgevoerd worden op basis van vooraf ingemeten referentiepunten of op basis van de dynamische kalibratie die op dat moment ook een transformatie dient te bevatten naar het assenstelsel van de sluisloek.
- Een ontwikkeld softwareprogramma voor het uitvoeren van de metingen waarin o.a. controles en automatische aanpassing van de camera's ingewerkt zijn zodat de metingen niet uitgevoerd hoeven te worden door stereovisie experts.
- Een verdere automatisatie van de scripts voor de verwerking van de metingen.

Op basis van bovenstaande wordt de PoC van de fotogrammetrische opstelling geëvalueerd als succesvol en beloftevol.

6 PoC perceel 3 meetopstelling met beperkt niet-menselijk contact

Op 8 november 2023 werd door Iv-Infra een PoC uitgevoerd met een opstelling met totaalstations die de positie van door middel van drones op het schip gepositioneerde prisma's opmeten. De ingezette opstelling wordt besproken in paragraaf 6.1. De meetresultaten worden in paragraaf 6.2 gepresenteerd en vergeleken met de referentiemetingen. De conclusies worden geformuleerd in paragraaf 6.3.

6.1 Beschrijving meetopstelling

De meetopstelling van Iv-Infra bestond uit 4 hoge precisie totaalstations die elk vanaf het sluisplatform de bewegingen van een prisma op het schip in de tijd opvolgen. Deze 4 prisma's werden bevestigd op een drone die voorafgaand de nivellering op het schip werd gepositioneerd.

De ingezette totaalstations zijn van het type Leica TDRA6000, TS30 en TS60. Deze toestellen hebben een resolutie van 0.5'' en een afstandsmeter met een absolute nauwkeurigheid van $\pm 1\text{mm}$ en een relatieve nauwkeurigheid $\leq 1\text{mm}$. Dergelijke toestellen betreffen sterk gespecialiseerde toestellen die voornamelijk in de industriële landmeetkunde worden toegepast. Bemerkt dat bij de ingezette referentiemeetopstelling, zie paragraaf 4.3, slechts één van de totaalstations een resolutie 0.5'' had, de overige twee toestellen hadden een resolutie 1''.

De 4 totaalstations worden twee aan twee aan beide zijden van de kolk ter hoogte van het center gepositioneerd. Om veiligheidsredenen wordt een veiligheidsafstand van 2.0 m tot de kolkwand aangehouden. Om ervoor te zorgen dat bij deze afstand de prisma's ten allen tijde in het zicht blijven, worden de totaalstations op een hoogte van ca. 3.0 m boven het sluisplatform geplaatst.

Elk totaalstation volgt hierbij de bewegingen van een 360° mini prisma in de tijd. Deze mini prisma's worden horizontaal boven op een drone bevestigd (type DJI Mavic 3E, DJI Mavic 3 Pro, DJI Mavic 3T en Phantom 4Pro V 2). Om een zo groot mogelijke basis te bekomen voor de metingen werden de drones op de 4 hoeken van het dek gepositioneerd. Als test werd de Phantom 4 ook op het dak van de stuurcabine geland. Deze drone weigerde echter om vervolgens nog op te stijgen. De drones werden ingezet met de beveiligingsinstellingen ingeschakeld, waardoor het niet mogelijk was om de drone te laten landen nabij een obstakel. Voor de toepassing bij een klassiek binnenvaartschip dient de haalbaarheid van het positioneren van een drone op de uiteinden van het schip en binnen zicht van de totaalstations verder onderzocht te worden. Overheen de 5 opgemeten nivelleringen werden de drones drie keer gepositioneerd, waarvan twee keer bij hoog peil in de kolk en één keer bij laag peil in de kolk.

Voor de bepaling van het center van het schip werden de contouren van het schip na plaatsing van de drones reflectorloos ingemeten. Deze inmeting werd herhaald volgend op elke nieuwe positionering van de drones.

Voor aanvang van de metingen werden de 4 totaalstations gesynchroniseerd door de bewegingen van een prisma in de tijd op te volgen. Tijdens de meting viel de synchronisatie van 1 totaalstation uit. Om deze reden werden de metingen verwerkt op basis van 3 totaalstations in plaats van 4. Aanbevolen wordt om voorgaand elke meting en na afloop een synchronisatie oefening uit te voeren.

De verwerking van de metingen gebeurde deels manueel in Excel met ondersteuning van Visual Basic. AutoCAD werd gebruikt ter verificatie. Door Iv-Infra wordt aangegeven dat deze verwerking tijdrovend is. Hierbij wordt opgemerkt dat door WL een deels geautomatiseerde verwerking van resultaten met metingen met totaalstations werd opgesteld in het kader van de verwerking van de referentiemetingen, zie paragraaf 4.3.2.

De opstelling van de totaalstations wordt weergegeven in Figuur 26, de opstelling van de drones wordt weergegeven in Figuur 27.



boven: portiek totaalstation met tussenliggend platform voor bediening
 onder: portieken gepositioneerd aan weerszijden sluisplatform

Figuur 26 – PoC Iv-Infra – opstelling totaalstations



linksboven 360° miniprisma gemonteerd op drone / rechtsboven landingszone drones
onder de groene cirkels duiden de landingslocaties van de drones aan

Figuur 27 – PoC Iv-Infra – positionering drones op schip

Het opstellen en vervolgens uitvoeren van de metingen verliep vlot. Om ca. 8u15 werd aangevangen met de synchronisatie van de totaalstations en om ca. 11u00 was alles opgesteld. Iv-Infra was met een ervaren crew van 5 personen aanwezig en 1 externe drone piloot. De onverwachte gebeurtenissen betroffen een herstart van een totaalstation waardoor deze zijn tijdsynchronisatie verloor en het blokkeren van een drone. Uiteindelijk konden de resultaten nog verwerkt worden doordat slechts 3 meetpunten nodig zijn voor bepaling van de 6 vrijheidsgraden van een schip. Het gebruik van het vierde totaalstation was omwille van redundantie.

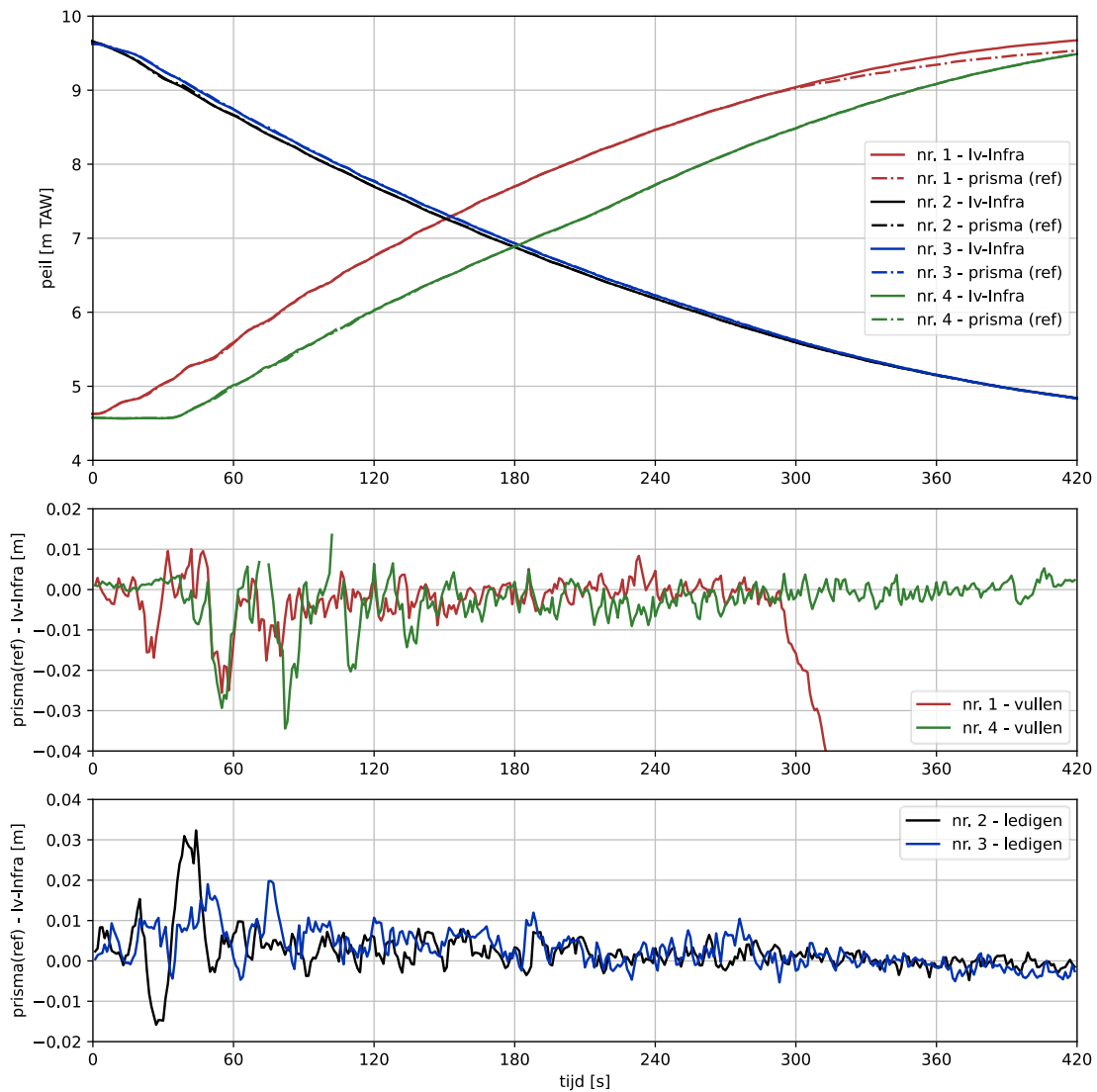
6.2 Vergelijking metingen

In totaal werden 5 nivelleringen opgemeten waarvan er 4 verwerkt werden. De verwerkte nivelleringen worden gegeven in Tabel 8.

Tabel 8 – Verwerkte nivellering PoC lv-Infra

volgnummer	start tijdstip	type
nr. 1	11:00:48	vullen
nr. 2	11:29:00	ledigen
nr. 3	12:13:28	ledigen
nr. 4	12:22:05	vullen

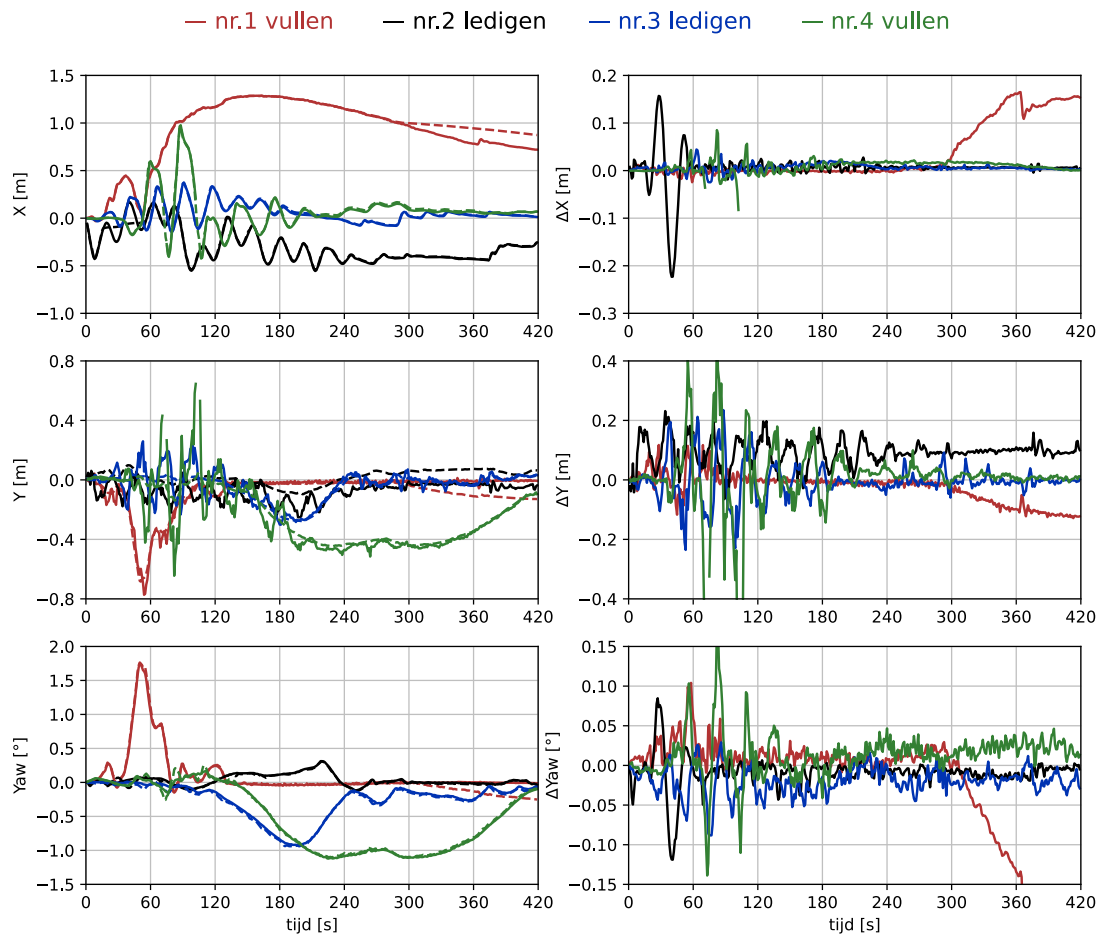
Voor de vier opgemeten nivelleringen wordt het verloop van de Z positie van het center van het schip in de tijd en de afwijking tussen de meting van lv-Infra en de referentiemeting topografische opstelling wat betreft het verschil in Z positie gegeven in Figuur 28. Bemerkt dat tijdens de eerste nivellering op 285 s een van de totaalstations van de referentiemeting wegvalt. De getoonde waarden betreffen geïnterpoleerde waarden. Uit de figuur met het verschil in Z positie tussen beide metingen volgt dat het verschil oploopt tot 3 cm bij begin nivelleren om vervolgens uit te dempen tot een verschil +/- 1 cm.



boven vergelijking peil / midden verschil bij vullen / onder verschil bij ledigen

Figuur 28 – PoC lv-Infra – vergelijking Z-positie center schip

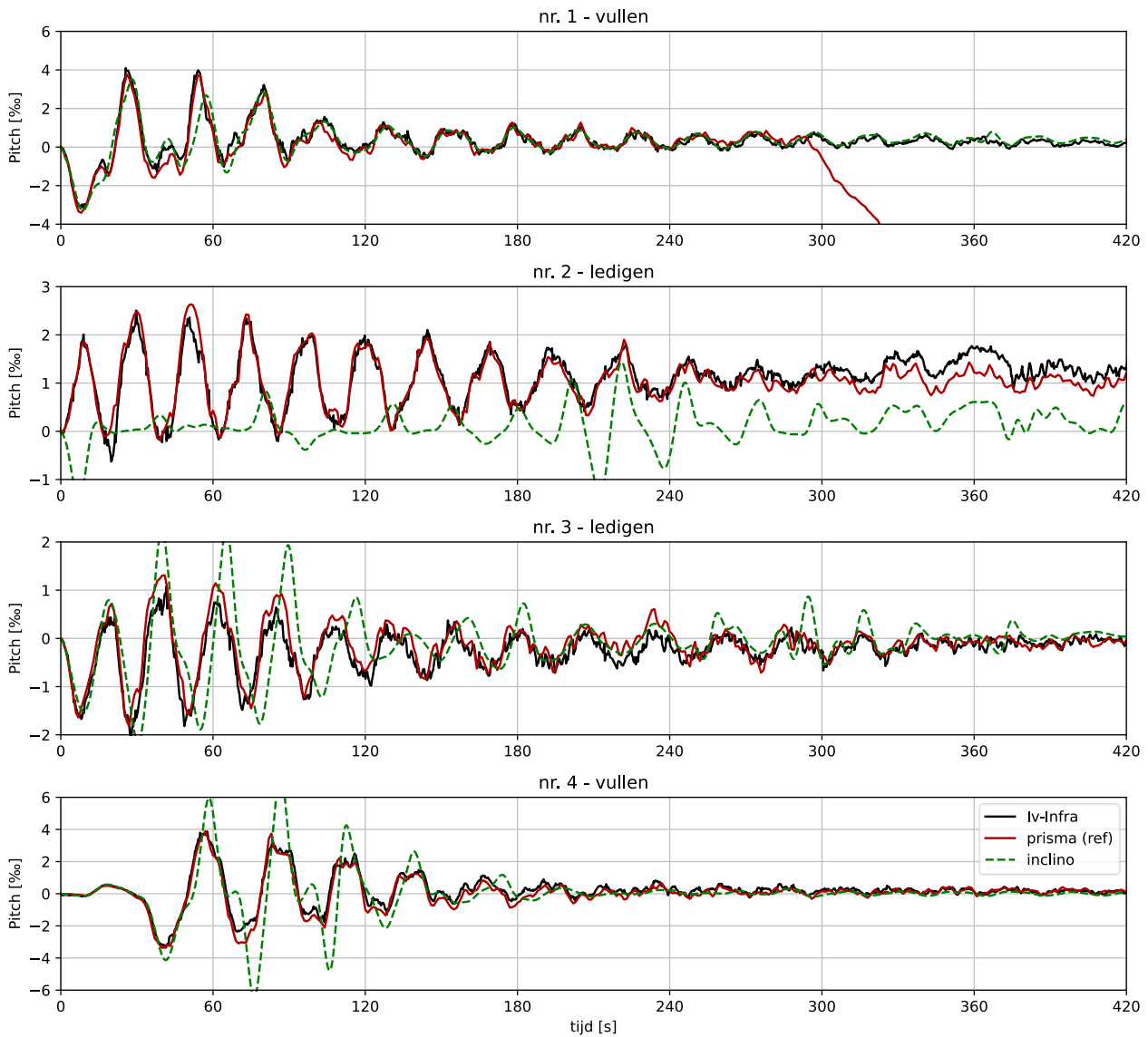
De verplaatsing in het horizontaal vlak en de yaw worden gegeven in Figuur 29. De linkerfiguren geven de opgemeten waarden, de rechterfiguren het verschil tussen de metingen van lv-Infra en de referentiemeting. Bemerkt dat voor de langsrichting het verschil tussen de metingen van lv-Infra en de referentiemeting voor één nivellering oploopt tot een 0.22 m, terwijl voor de overige het verschil minimaal is. Voor de Y verplaatsing loopt het verschil op tot +/- 0.2 m en voor een enkele nivellering zelfs tot +/-0.4 m. De verklaring voor deze verschillen in de dwarsverplaatsing zijn niet gekend. De verschillen zijn ook te groot om toe te schrijven aan een verschil in hoogtebepaling van het centerpunt van het schip. Voor de Yaw loopt het verschil tussen de metingen van lv-Infra en de referentiemeting op tot een +/- 0.10°, over een scheepslengte 50 m komt dit overeen met een verplaatsing van 0.09 m.



Figuren links volle lijn = lv Infra ; streeplijn =topo

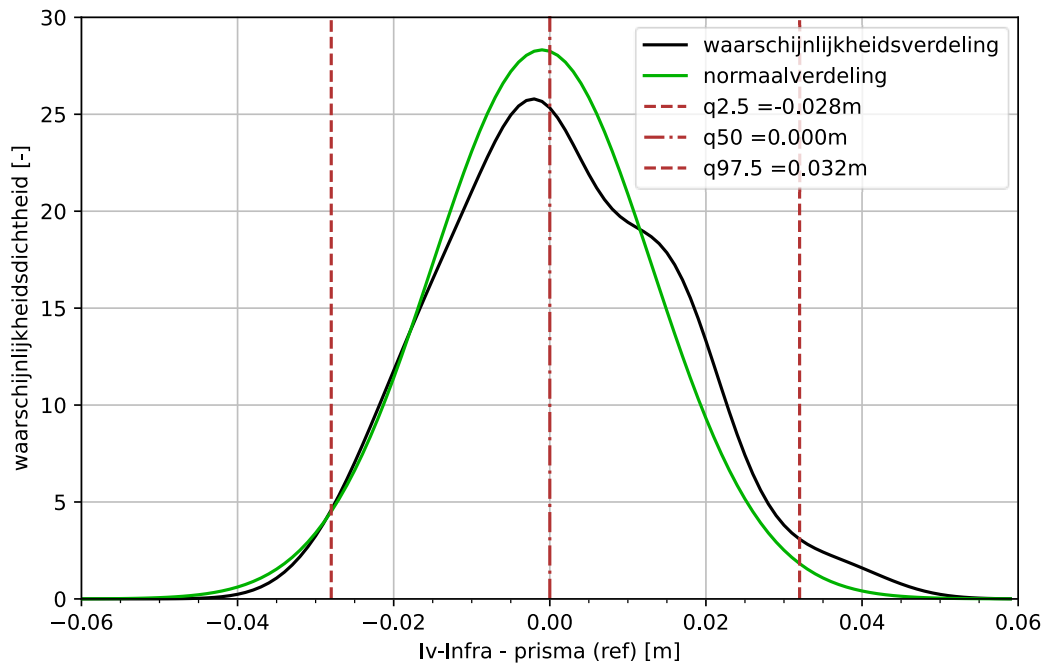
Figuur 29 – PoC lv-Infra – vergelijking X, Y en Yaw

De variatie in de tijd van de opgemeten pitch van het schip opgemeten door lv-Infra en opgemeten door WL wordt gegeven in Figuur 30. Bemerkt dat er een goede overeenkomst is tussen de uit beide metingen afgeleide pitch van het schip. De referentiemetingen vertonen een meer smooth verloop dan de metingen van lv-Infra. Dit wordt verklaard doordat de totaalstations van lv-Infra registreerden aan een frequentie van 5 Hz ten opzichte van de meetfrequentie van 1 Hz die bij de referentiemetingen werd toegepast. Door een probleem met synchronisatie dienden de topografische referentiemetingen in post processing tot op 0.2 s gesynchroniseerd te worden. Hiervoor werden de referentiemetingen geïnterpoleerd op een tijdsas met een frequentie van 5 Hz. Ook dit kan resulteren in een smoothing van de metingen. Het resultaat van de inclino opmeting is wisselend. Bij de eerste nivellering wordt een goede overeenkomst vastgesteld tussen de pitch afgeleid uit de inclino opmetingen en deze afgeleid uit de beide topografische metingen. Bij de tweede nivellering wijkt de pitch afgeleid uit de inclino-opmeting sterk af van deze afgeleid uit de topografische metingen. Bij de twee laatste nivelleringen is het verloop van de pitch afgeleid uit de inclino-opmeting gelijk aan deze afgeleid uit de topografische opmeting maar is de amplitude van de inclino-opmeting hoger.



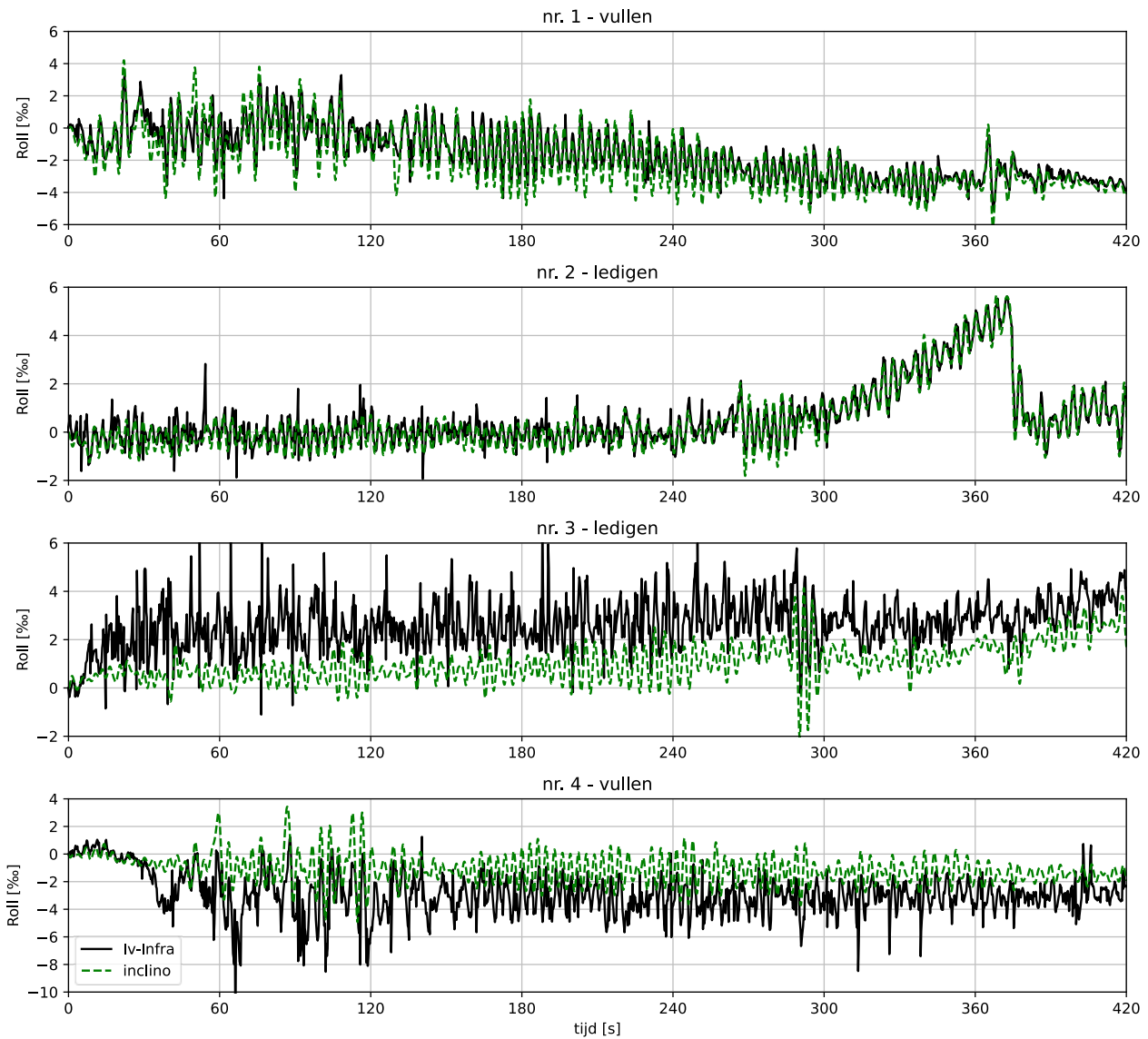
Figuur 30 – PoC lv-Infra – vergelijking pitch schip

Voor elk van de 4 verwerkte nivelleringsen worden zowel voor de pitch bepaald uit metingen van lv-Infra als voor de pitch bepaald uit de topografische referentiemetingen, de waarden van de eerste 10 opeenvolgende extrema afgeleid. De waarden van deze extrema worden daarna omgerekend naar het verschil in hoogte tussen boeg en hek. Op basis hiervan wordt vervolgens het verschil tussen beide metingen bepaald. Op deze wijze wordt voor in totaal 40 extrema het verschil berekend. Figuur 31 toont voor deze 40 verschillen de waarschijnlijkheidsverdeling. Ter vergelijking wordt ook de normaalverdeling geplotted. Hieruit volgt dat de waarschijnlijkheidsverdeling van de verschillen tussen beide metingen relatief goed overeenkomt met de normaalverdeling. Uit deze figuur volgt dat het mediaan verschil tussen beide meetreeksen beperkt is tot een 0 mm. De standaarddeviatie bedraagt een 0.014 m. Het 95 % waarschijnlijkheidsinterval ligt tussen -0.028 m en 0.032 m.



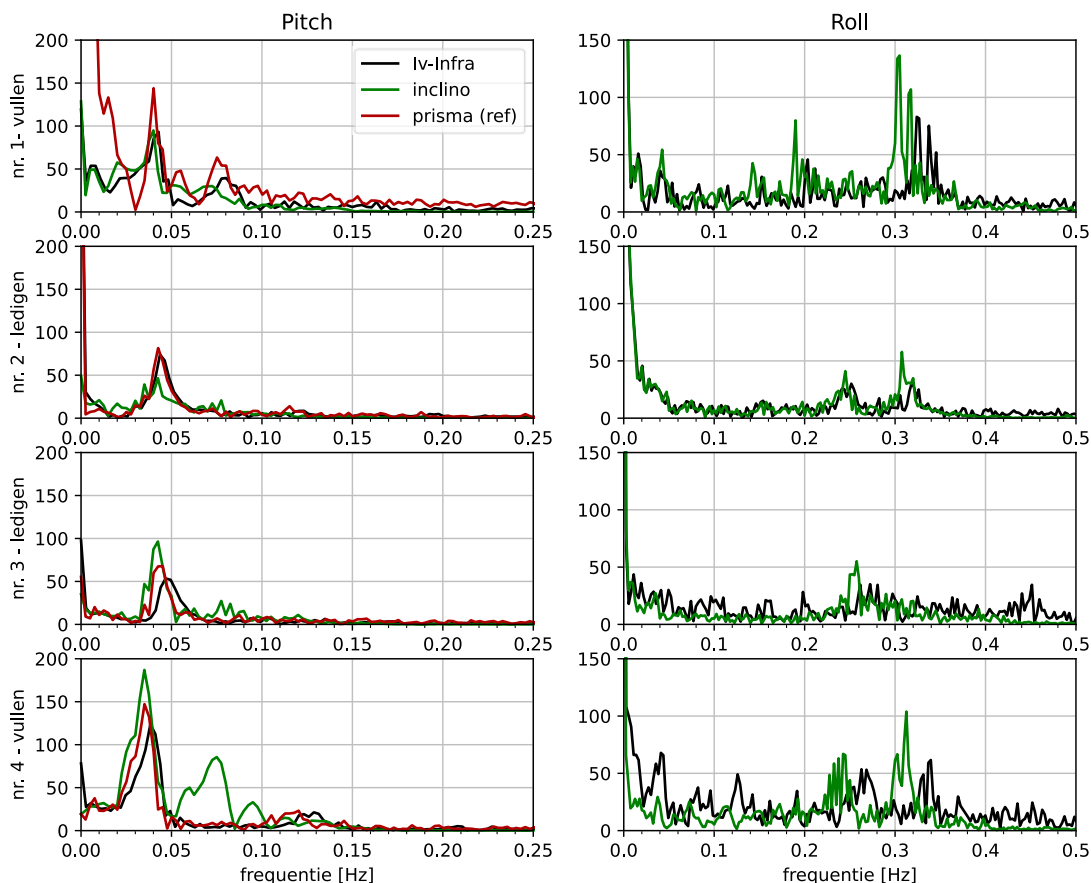
Figuur 31 – PoC lv-Infra – waarschijnlijkheidsverdeling verschil in hoogte boeg en hek

De variatie in de tijd van de opgemeten roll wordt gegeven in Figuur 32. Bemerkt dat de referentieopmeting met de totaalstations niet weergegeven wordt. Het uitvoeren van de referentiemetingen met een frequentie van 1Hz in combinatie met de interpolatie tijdens de verwerking naar 5Hz en de hogere frequentie van de roll beweging maakt dat uit de referentiemeting met de totaalstations geen zinnige waarden volgen. Bij de eerste twee nivelleringen (een vulling en een lediging) wordt een goede overeenkomst vastgesteld tussen de roll opgemeten door lv-Infra en de roll opgemeten met de inclinometer. Bemerkt dat bij de eerste lediging (nivellering nr. 2) het schip in de tros kwam te hangen, waardoor de roll sterk toeneemt tussen 300 s en 360 s. Bij de laatste twee nivelleringen wordt door de inclinometer een beduidend lagere roll opgemeten dan deze opgemeten door lv-Infra.



Figuur 32 – PoC lv-Infra – vergelijking roll schip

Voor de 4 beschouwde nivellerings wordt het frequentiespectrum van pitch en roll bepaald uit de 3 verschillende beschouwde meettechnieken gegeven in Figuur 33. Bij de pitch wordt een duidelijk extremum waargenomen tussen 0.037 Hz en 0.045 Hz wat overeenkomt met een periode van 22 s à 27 s. Wat betreft de pitch is de overeenkomst tussen de drie beschouwde meettechnieken vrij goed bij de twee ledigingen. Bij de tweede vulling (nivellering nr. 4) worden bij de pitch afgeleid uit de metingen met de inclinometer nog enkele variaties met hogere frequentie waargenomen. Wat de roll betreft wordt voor de eerste twee nivellerings een goede overeenkomst bekomen tussen het frequentiespectrum afgeleid uit de metingen van lv-Infra en het frequentiespectrum afgeleid uit de opmetingen met de inclinometer.



Figuur 33 – PoC Iv-Infra – Vergelijking frequentie analyse pitch en roll

6.3 Conclusies

Door Iv-Infra werden 4 volledige nivelleringen verwerkt, 2 ledigen en 2 vullingen. De resultaten van deze metingen werden vergeleken met de referentiemetingen.

Uit deze vergelijking volgt het volgende:

- De overeenkomst tussen de door Iv-Infra uitgevoerde meting en de referentieopmeting met de totaalstations is zeer goed op vlak van positie, yaw en pitch. De resultaten van de referentieopstelling met de totaalstations zijn iets smoother wat verklaard kan worden door de lagere meetfrequentie (1Hz ipv 5Hz) en de toegepaste interpolatie om de tijdassen te synchroniseren.
- Uit een vergelijking van de opgemeten extrema voor de 4 nivelleringen volgde voor het verschil in hoogte tussen boeg en hek van het schip een mediaan afwijking tussen de opmeting van Iv-Infra en deze van de referentie topografische meting van 0.000 m met een standaarddeviatie van 0.014 m.
- Op vlak van roll was er voor de eerste twee opgemeten nivelleringen een redelijke overeenkomst tussen de opmeting van Iv-Infra en de inclinometer.

Het opstellen ging vlot met dank aan het ervaren en uitgebreide team van Iv-Infra. Voor de metingen werden hoge precisie totaalstations ingezet maar klassieke landmeetkundige totaalstations volstaan vermoedelijk ook. Omdat totaalstations niet ontworpen zijn voor het uitvoeren van continue gesynchroniseerde metingen werd hier een specifieke meting voor uitgevoerd. Tijdens het uitvoeren van de metingen verloor een van de totaalstations van Iv-Infra t.g.v. een herstart zijn synchronisatie en kon hierdoor niet verder gebruikt worden.

Het systeem met de mini-prisma's dewelke horizontaal gemonteerd werden op drones werkte goed op het Zulu-schip. Het laten landen van de 4 drones nam slechts een aantal minuten in beslag. Enkel bij een poging om één van de drones te laten landen op de stuurcabine van het schip trad een storing op. Hierbij wordt opgemerkt dat de drones zo ingesteld waren dat deze een veilige zone rondom zich nodig hadden om te kunnen landen. Het ingezette Zulu-schip was hiervoor ideaal omwille van het grote vrije dek waarop perfect horizontaal, goed in zicht en op voldoende afstand tot objecten geland kon worden. Bij een beroepsvaartuig treden mogelijk problemen op met het in zicht houden van de prisma's bij het landen achter een reling of openstaande luiken, met de benodigde afstand tot objecten en met een goede vlakke ondergrond. Bij het landen op een gangpad dient er ook op gelet te worden dat de drone de bemensing van het schip en specifiek het bedienen van de trossen niet hindert alsook dat de drone niet omvergelopen kan worden. De 4 prisma's moeten namelijk voldoende gespreid worden over de volledige oppervlakte van het schip om nauwkeurig de rotaties van het schip op te meten. Voornamelijk het opmeten van de roll beweging wordt gelet op de beperkte scheepsbreedte als een risico beschouwd.

Op basis van bovenstaande wordt de PoC van de meetopstelling met beperkt, niet menselijk contact als succesvol geëvalueerd. De voornaamste bemerkingen zijn dat een opstelling bestaande uit 4 of 3 totaalstations en 4 of 3 drones eerder omslachtig is en of de drones in het geval van een klassiek beroepsvaartuig goed gepositioneerd kunnen worden. Bij toepassen van een opstelling met totaalstations zou overwogen kunnen worden of dit beperkt kan worden tot 1 of 2 totaalstations waarbij het aantal op te meten variabelen wordt beperkt of waarbij op de drones sensoren ingezet worden.

7 Conclusies

Sluizen vormen een essentiële schakel in het Vlaamse Waterwegennetwerk. Het Waterbouwkundig Laboratorium voert studies uit om het vul- en ledigingsproces van binnen- en zeevaartsluizen in Vlaanderen te optimaliseren. Hierbij wordt gestreefd naar een veilige en zo snel mogelijke nivellering met een zo economisch mogelijk ontwerp. Voor het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem van sluizen wordt binnen WL veelal gebruik gemaakt van een combinatie van sterk vereenvoudigde 1D-modellering ondersteund door in situ metingen. De in situ metingen kunnen enerzijds gebruikt worden voor kalibratie en validatie van de numerieke modellen in ontwerpfasen en anderzijds ter validatie en optimalisatie van het nivelleersysteem van bestaande sluizen of bij ingebruikname van nieuwe sluizen.

De gekende meetprincipes voor het in situ opmeten van sluisnivelleringsen hebben echter elk hun tekortmetingen op vlak van veiligheid, nauwkeurigheid en/of efficiëntie. Om deze reden ziet WL de nood aan een nieuwe meetopstelling. Concreet wordt gezocht naar een opstelling voor het uitvoeren van 1 daags in situ metingen. Gekozen wordt om niet rechtstreeks de kracht in de trossen op te meten maar de pitch en roll van het schip in de sluis. De pitch en respectievelijk de roll van een schip zijn namelijk een goede maat voor de langskracht respectievelijk de dwarskracht die een schip ten gevolge van de hydrodynamische krachten tijdens een nivellering ondervindt. Om deze metingen efficiënt te laten verlopen dienen de metingen uitgevoerd te worden zonder het betreden van het schip. Omdat de bewegingen van pitch en roll echter beperkt zijn tot 0.75 á 1.5 % over de lengte respectievelijk breedte dient de opmeting zeer precies te zijn. Bij een opgelegde toelaatbare fout van +/- 5 % op de pitch bedraagt de toegelaten meetafwijking van een punt op de boeg of het hek van het schip 0.5 cm. Een ander belangrijk aandachtspunt is dat een helling opgemeten wordt bovenop een stijging of daling van het kolkpeil die tot 0.030 m/s kan bedragen. De meetduur per individuele meting dient hierom beperkt te worden tot 0.1 s.

Omwille van de technische uitdagingen bij de ontwikkeling van deze nieuwe meetopstelling werd ondersteuning gezocht bij het Programma Innovatie Overheidsopdrachten (PIO). Binnen de PIO ondersteuning werd een consultancy-opdracht toegekend aan het studiebureau Verhaert. Dit consultancybureau heeft vooreerst een techscouting en vervolgens een markconsultatie uitgevoerd. Hieruit volgde dat er geen kant-en-klare oplossing bestaat maar dat er wel mogelijkheden zijn, waarna besloten werd om verder te gaan met Proof of Concepts.

In 2022 werd voor deze Proof of Concepts (PoC) een aanbesteding gepubliceerd. Het perceel met de fotogrammetrische opstelling werd gegund aan het computervisie bedrijf Apixa en bestond uit het opmeten van de bewegingen van een schip in de kolk door middel van twee stereoparen. Het perceel met de opstelling met beperkt niet-menselijk contact werd gegund aan Iv-Infra en bestond uit het opmeten van de bewegingen van 4 prisma's door middel van 4 hoge precisie totaalstations. De prisma's werden hierbij met behulp van drones op het dek van het schip gepositioneerd. Beide partijen toonden door middel van een voorafgaande test de kwaliteit van hun opstelling aan. De uiteindelijke PoC werd uitgevoerd op een ingehuurd schip in de sluis te Viersel. In samenwerking met de afdeling Algemene Technische Ondersteuning werden referentiemetingen uitgevoerd. Door WL werd een meting met een hoge precisie inclinometer uitgevoerd, door ATO werden de posities van 3 prisma's op het schip in de tijd geregistreerd aan de hand van 3 totaalstations. Bemerkt hierbij dat de opstelling met totaalstations uit de referentiemeting gelijkend is met de opstelling uit de PoC van Iv-Infra.

Beide PoC's werden in 2023 succesvol uitgevoerd. Binnen de PoC van Apixa werden resultaten opgeleverd van drie nivelleringsen (twee ledigingen en één vulling van de sluis) en binnen de PoC van Iv-Infra werden resultaten opgeleverd van vier nivelleringsen (twee ledigingen en twee vullingen van de sluis). Voor de beoordeling van de nauwkeurigheid werd besloten om in eerste fase de pitch te evalueren omdat deze een maat betreft voor de langskracht. Zowel bij de PoC van Apixa als bij de PoC van Iv-Infra volgde een zeer goede overeenkomst met de pitch opgemeten met de totaalstations uit de referentiemeting.

De vergelijkbaarheid met de pitch opgemeten met de inclinometer wisselt van nivellering tot nivellering van zeer gelijkend, over eenzelfde periode met hogere amplitudes bij de meting met de inclinometer tot afwijkend. Bij aanvang van de PoC's werd ingeschat dat de meting met de inclinometer de meest betrouwbare meting zou betreffen. Het is hierom niet mogelijk om de meetfout te kwantificeren. Voor de pitch van het schip afgeleid uit de beide PoC's en deze afgeleid uit de topografische opmeting werd een analyse uitgevoerd van de verschillen in de waarden van de extrema. De mediaan van deze verschillen bedroeg 0.006 m voor de PoC van Apixa en 0.000 m voor de PoC van Iv-Infra. De standaarddeviatie van deze verschillen bedroeg 0.021 m voor de PoC van Apixa en 0.014 m voor de PoC van Iv-Infra.

De door Apixa ingezette opstelling betrof een specifiek voor dit project ontworpen experimentele opstelling. Bij het opstellen van de aanbesteding werd niet ingeschat dat binnen de PoC volledige nivelleringen opgemeten en verwerkt konden worden. De PoC van Apixa toont echter aan dat de technologie en de verwerking van de data verder staat dan op voorhand ingeschat werd. Zowel op vlak van meetopstelling als op vlak van de processing zijn er haalbare verbeteropties om van PoC stadium te gaan naar een werkende opstelling.

De voornaamste bemerkingen op de PoC van Iv-Infra zijn dat de opstelling met 4 of 3 totaalstations en 4 of 3 drones eerder omslachtig is en of de drones in het geval van een klassiek beroepsvaartuig goed gepositioneerd kunnen worden.

Samengevat wordt besloten dat de PoC's aantonen dat de technologie voldoende ver ontwikkeld is om over te gaan naar de ontwikkeling van een operationele opstelling. Een dergelijke opstelling kan gebruikt worden voor: validatie en optimalisatie van sluisontwerpen, veiligheidsbeoordelingen, update van de criteria in combinatie met troskrachtmodellering, nieuwe en toekomstige uitdagingen zoals sluisbediening vanop afstand en onbemand varen en de validatie van nieuwe en toekomstige modellen.

8 Referenties

- Beem, R.C.A.; Boogaard, A.; Glerum, A.; de Graaf, M.A.; Henneberque, S.D.; Hiddinga, P.H.; Kranenburg, D.; van der Meer, M.T.J.; Nagtegaal, G.; Van der Paverd, M.; Smink, L.M.C.; Vrijburcht, A.; Weijers, J.** (2000). *Ontwerp van schutsluizen: deel 1*. Bouwdienst Rijkswaterstaat: Utrecht. ISBN 90-369-3305-6
- De Mulder, T.; Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2010). Collaboration LRH Châtelet / WL Borgerhout: In situ measurements dd. 03/03/2010 in lock at Roselies on Lower Sambre. *WL Rapporten*, 737_11. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- InCom Working Group 106.** (2009). Innovations in navigation lock design. PIANC = AIPCN. 208 pp.
- Ministerie van Openbare Werken - Bruggen en Wegen - Dienst der Zeeschelde.** (1962). Netekanaal Vierselsluis Herstellingswerken Deuren - c4 3362. 1 pp.
- Robberecht, D. ; Coeman, B.** (2021). Positiebepaling van schepen in binnenvaartsluizen eindrapport. 37 pp.
- Schouten, M.** (2019). Hoge dwarskrachten in de Nieuwe Sluis : wordt het realiteit ? Een onderzoek naar optredende dwarskrachten tijdens het nivelleren in de Wetsluis: 34
- Stichting Postacademisch Onderwijs.** (2006). *Hydraulische aspecten van waterbouwkundige constructies [CURSUS]*: Delft
- Thorenz, C.; Schulze, L.** (2021). Numerical Investigations of Ship Forces During Lockage. *J. Coast. Hydraul. Struct. 1*: 1–27
- Vercruyse, J.B.; De Mulder, T.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2009). Zeekanaal Brussel Schelde: renovatie middendeuren sluis Zemst. Verslag terreinmetingen voor renovatie. *WL Rapporten*, 760_04c. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014a). Ondersteuning ontwerp klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve: Deelrapport 3 – Ontwerp nivelleersysteem. Versie 7.0. *WL Rapporten*, 12_142. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België. IV, 30 + 8 p. bijlagen pp.
- Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F.** (2018). Dender - Nieuwe sluis Aalst: opstellen openingswet nivelleersysteem. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 18_002_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=300196>
- Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2012). Albertkanaal - noordersas Genk: advies vervanging cilinderschuif. *WL Adviezen*, 12_111. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Zeekanaal Brussel Schelde – sluis Zemst: verslag terreinmeting vulling afwaartse kolk. *WL Adviezen*, 15_061. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014b). Meetvaart binnenschip MT Elise op traject Evergem-Kuurne: deelrapport 1. Metingen sluis Sint Baafs Vijve. *WL Rapporten*, 13_003. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vercruyse, J.B.; Verelst, K.; Vos, S.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2015). Kanaal Brussel Charleroi: optimalisatie openingswet sluizen. *WL Rapporten*, 13_143. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; Vercruyse, J.B.; De Mulder, T.** (2018). Comparison of software for the computation of longitudinal forces on a ship in a lock chamber during levelling with openings in the lock gate., *in*: (2018). *International symposium on Hydraulic Structures 2018*

9 Bijlage 1 Behoeftanalyse

Onderstaande behoeftanalyse incl. beschrijving werd integraal overgenomen uit het door Verhaert opgestelde eindrapport (Robberecht, D. ; Coeman, 2021).

De use cases zijn als volgt opgemaakt:

- 1) Story name (Journey): Deze zijn onderverdeeld in categorieën zodat ze makkelijk gegroepeerd zijn.
 - a. De opstelling: hoe het systeem opgesteld moet worden met de daarbij horende zaken
 - b. De nauwkeurigheid en bereik: omvat de al dan niet technische specificaties waaraan het systeem moet voldoen
 - c. Data: wat het systeem moet capteren en aanleveren.
- 2) Given: is een persoon (gebruiker) voor wiens standpunt de use case is opgemaakt. Volgende gebruikers worden aangehaald:
 - a. Operator: bedient het systeem, zet het op en stelt het in
 - b. Ingenieurs: zullen de data bewerken
 - c. Onderzoekers: analyseren de data
 - d. Sluisbeheerder: zal het onderzoeksresultaat raadplegen
- 3) When: de job-to-be-done, wat de gebruiker wenst te behalen.
- 4) Then: de beschrijving van het voordeel dat getracht wordt behaald.
- 5) Acceptatie criteria: Eventueel de bijkomende randvoorwaarden waaraan de use case moet voldoen.

Story name (journey)	As an/a (given)	I want to ... (when)	So that ... (then)	Acceptance criteria
Opstelling	Operator	moeten het systeem mobiel kunnen gebruiken	zodat de opsteltijd beperkt is	max 1u
Opstelling	Operator	moeten het systeem mobiel kunnen gebruiken	zodat langs verschillende sluizen opmetingen kunnen plaatsvinden met hetzelfde systeem	Toestemming betreden plaats, footprint theodoliet, mag geen stremming veroorzaken, tenzij de hoogte van het systeem ten minste 12m hoogte (zodat de schepen eronder kunnen)
Opstelling	Operator	De constructie mag (niet=outperformer) over de sluis kolk hangen		
Opstelling	Operator	Stellen het systeem op een stabiele manier op, bv een tripod.	zodat de installatie stabiel is vrij van trillingen of verschuivingen of wind	Stabiele ondergrond <=2m kolkwand
opstelling	operator	het systeem moet weerresistent zijn	zodat het lichte weersbuien kan weerstaan	een lichte bui, water resistent. IP: 5
opstelling	operator	mag de opstelling niet te dicht bij de bolders van de sluis opzetten	zodat de veiligheidsregels worden nageleefd	1-2 meter rond de bolder
opstelling	operator	moet de referentiepunten kunnen bepalen - post processing	zodat het gehele proces gemeten wordt van aanmeren tot terug vertrekken	
Autonomie	Operator	moeten een ganse dag metingen kunnen uitvoeren	zodat voldoende (10) schepen worden opgemeten	afhankelijk van de traffic en aantal versassingen
Autonomie	Operator	beschikken over een contactloos systeem	zodat het niet nodig is het schip in persoon te betreden	
Autonomie	Operator	beschikken over een contactloos systeem	zodat er geen toestemming nodig is van de schipper	zodat er geen fysiek contact met het schip nodig is
Autonomie	Operator	beschikken over een systeem dat continu meet tijdens het nivelleren		gemiddeld 12 minuten - (5 min tot ca. 25 min)
Nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	het systeem meet de zes vrijheidsgraden, waar de langshelling de basis is en het nauwkeurigste moet zijn		
Nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	het systeem is zeer nauwkeurig waarbij de schiplengte een maximale toegelaten pitch (= langshelling) kent in (per duizend procent) per CEMT-klasse en dus een max langshellingshoek opmeet van	Zodat we de langshellingen van een beroepsvaartuig met een nauwkeurigheid van 10% kunnen bepalen.	Criterion end- to-end langshelling: 5.8 cm voor een CEMT I met lengte 38.5 m tot 13.9 cm voor een CEMT VbB met lengte 185 m. --> Totale nauwkeurigheid meting 10% van deze waarden. 10 % = 5% boven en onder. Op boeg en hek samen * (tabel met stijgsnelheden)

		Y centimeter (bv 185m -> 13,9cm helling end-to-end)		van enkele sluisen is te vinden in bijlage).
Nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	het systeem is zeer nauwkeurig waarbij de schiplengte een maximale toegelaten pitch kent in (per duizend procent) per CEMT-klasse en dus een max langshellings hoek opmeet van Y centimeter (bv 185m -> 13,9cm helling end-to-end)	Zodat we de langshellings van een recreatievaartuig met een nauwkeurigheid van 20% kunnen bepalen.	Criterion end-to-end langshelling 3.6 cm voor een recreatievaartuig met lengte 12 m.
Nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	Het systeem moet toepasbaar zijn op een groot aantal sluisvarianten	Zodat sluisen met een beperkte breedte (ca. 5.0 m) tot sluisen met een grotere breedte van 25.0 m kunnen opgemeten worden en sluisen met een beperkt verval (<3m) tot sluisen met een groot verval tot 10 m kunnen opgemeten worden.	
Nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	Bij gebruik van camerabeelden mogen geen mensen, nummerplaten of andere persoonsgegevens herkenbaar in beeld komen	zodat de privacywetgeving wordt gerespecteerd	alle persoonsgegevens mogen niet in ruwe data zichtbaar zijn
Nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	kunnen de piloottesten benchmarken dmv metingen met prisma's en theodolieten	om de nauwkeurigheid van het beoogde concept te valideren	
Nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	het systeem meet het nivelleringsproces met een frequentie van X seconden	zodat de optredende schommelingen met een voldoende resolutie opmeten worden	1 tot 3 s
Nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	de meetduur per meetstap bedraagt < X s	zodat de meting correct kan verlopen. Zodat de bijkomende fout in de opgemeten waterhoogte door het stijgen of dalen van het kolkpeil op de meting beperkt blijft. De maximale stijgsnelheid bedraagt 66 mm/s. Bij een meetduur van 0.1 s zal het schip 7 mm in hoogte verplaatsen of verlagen tijdens de meting. * (tabel met stijgsnelheden van enkele sluisen is te vinden in bijlage).	< 0.1 s
nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	het referentiepunt moet niet vooraf bepaald worden	indien dit tijdens de post processing bepaald kan worden	
nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	moet voor de post processing ten minstens een paar referentiepunten gedurende het gehele proces kunnen opvolgen	zodat de meting correct kan verlopen	zo zijn er minstens 3 meetpunten nodig. 4e voor validatie zou rivaal zijn
nauwkeurigheid en bereik	operator	moet tijdens de meting een soort kwaliteitscontrole kunnen uitvoeren op de meting	om te weten zodat de meting correct verloopt	

Ontwikkeling meetopstelling voor het opmeten van scheepsbewegingen -

nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	een meetsysteem dat niet gestoord wordt door verschillende variabelen (mensen, slecht weer, machines, ...)	om alle situaties in te schatten en niet enkel degene die mogelijk zijn	mag niet verstoord worden door mensen op het schip
nauwkeurigheid en bereik	ingenieur	positie schip in sluis (locatie schip in sluis) adhv referentiepunten in/rond de sluis	is belangrijk om het nivelleringsproces beter te verstaan (jetcomponent/effect : kracht te dicht bij deur)	tot op 10 cm
Data	Onderzoeker	moeten de data van de meting niet real-time analyseren	zodat de data nog voorbereid kan worden voor de analyse	
Data	Onderzoeker	moeten de output van de meting kunnen lezen in een grafiek (x-as = tijd; y-as = hellingsgraad) of mag een ASCII file zijn (bijvoorbeeld csv) waarbij bijvoorbeeld de eerste kolom de tijd bevat, de volgende kolommen de waarde van de gemeten hellingen en verplaatsingen.	de analyse makkelijk kan opgevolgd worden	
nauwkeurigheid en bereik*	Onderzoeker	De data dient gesynchroniseerd te zijn met UTC.	Dit zodat de data van de metingen gecombineerd kan worden met andere data zoals peilen en schuifstanden.	< 1s

*Dit betreft een toevoeging op de uit het rapport overgenomen behoefte analyse

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