

Vervolgonderzoek meerwaarde CoVadem-metgegevens in het havengebied Rotterdam



Vervolgonderzoek meerwaarde CoVadem-metgegevens in het havengebied Rotterdam

Auteur(s)

Iris Niesten

Rolien van der Mark

Partners

Havenbedrijf Rotterdam

CoVadem BV

MARIN

SmartPort, ROTTERDAM

Vervolgonderzoek meerwaarde CoVadem-meetgegevens in het havengebied Rotterdam

Opdrachtgever	TKI Deltatechnologie p/a Vereniging van Waterbouwers
Contactpersoon	
Referenties	TKI DEL081
Trefwoorden	CoVadem, Haven Rotterdam, dieptemetingen, monitoring

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	23-03-2020
Projectnummer	11202575-000
Document ID	11202575-000-ZWS-0006
Pagina's	54
Status	definitief

Auteur(s)

	Iris Niesten	
	Rolien van der Mark	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Iris Niesten	Thijs van Kessel	Gerard Blom	
1.0	Rolien van der Mark	Thijs van Kessel	Gerard Blom	



TKI

Samenvatting

Het onderhoud van het Rotterdamse Havengebied gaat gepaard met baggerwerk om de havenbekkens en vaarwegen op diepte te houden. Het onderhoudswerk wordt hierbij gestuurd door bodempeilingen. Dankzij de hoge meetfrequentie kunnen CoVadem-data (www.covadem.org) een meerwaarde hebben voor monitoring en systeembegrip van het havengebied. Vanuit deze achtergrond is in 2017 onder TKI Deltatechnologie met medefinanciering van SmartPort een eerste verkenning uitgevoerd naar de mogelijke meerwaarde van CoVadem-data voor de Rotterdamse haven door een consortium van Deltares, MARIN en Havenbedrijf Rotterdam (HbR). In deze studie is een aantal aspecten geïdentificeerd die de nauwkeurigheid van CoVadem-data in het havengebied beïnvloeden. Het voorliggende rapport betreft een vervolgonderzoek: de in 2017 geïdentificeerde aanknopingspunten zijn verder uitgewerkt, en nieuwe invloeden onderzocht.

Uit een onderzoek waarin de nauwkeurigheid van CoVadem-metingen is geanalyseerd over langere tracks vanuit het rivierengebied naar het havengebied, blijkt dat de afwijking van de CoVadem-bodemligging ten opzichte van een referentiemeting veelal langzaam toeneemt richting benedenstrooms. De grootte van de afwijking en het patroon verschillen echter per geanalyseerde track.

Gebaseerd op deze “langsprofielen” is een aantal factoren geïdentificeerd die de CoVadem-data mogelijk beïnvloeden. Deze factoren hebben effect op verschillende onderdelen in het afleiden van de CoVadem-bodemligging, namelijk de kielspelingsmeting, de berekening van waterdiepte en bodemligging en het bepalen van de locatie van de meting. Een aantal effecten die direct de meting beïnvloeden, zoals de instellingen van het echolood in combinatie met een sliblaag op de bodem, is mogelijk niet te corrigeren.

Voor een aantal invloeden is een correctie voorgesteld en met succes gevalideerd. Uit onderzoek blijkt echter dat het momenteel nog niet mogelijk is om een korte-termijn bodemtrend af te leiden uit de CoVadem-data. De hoeveelheid ruis in de data is groter dan eventuele bodemveranderingen in het beschouwde gebied, waardoor deze niet zichtbaar zijn. Het verschil tussen twee gemiddelde bodemliggingen in tijd lijkt wel een veelbelovende indicator om de bodemverandering over een tijdschaal van weken te beoordelen. Er is echter nog veel ruis zichtbaar. Ten behoeve van vervolgonderzoek is daarom een tabel opgesteld met alle geïdentificeerde effecten en een prioritering om hiervoor ofwel te corrigeren, ofwel verder te onderzoeken. De prioritering is gebaseerd op een combinatie van grootte van het effect (baten), eenvoud en kosten van een voorgestelde correctie (kosten), en de nauwkeurigheid van de voorgestelde correctie.

Om de CoVadem-data van meerwaarde te laten zijn in het havengebied, wordt aanbevolen om in ieder geval de voorgestelde correcties te implementeren voor operationele toepassing. Enkele mogelijke oorzaken van meetfouten behoeven meer onderzoek.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Onderzoeksvraag	7
1.3	Organisatie en Projectteam	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Van kielspeling naar waterdiepte en bodemligging	9
2.1	Inleiding	9
2.2	CoVadem-data	9
2.3	Omrekening naar bodemligging	9
2.3.1	Van kielspeling naar waterdiepte	9
2.3.2	Bepalen locatie van de meting	10
2.3.3	Van waterdiepte naar bodemligging	10
2.4	Aannames in de omrekening naar waterdiepte	11
2.5	Gebruikte databronnen	12
2.6	Controle van CoVadem variabelen	13
3	Effecten en correcties	14
3.1	Inleiding	14
3.2	Analyse langs-tracks van de Waal tot het havengebied	14
3.3	Externe factoren havengebied	17
3.3.1	Inleiding	17
3.3.2	Variërende waterstanden	18
3.3.3	Variërende stroomsnelheid en -richting	18
3.3.4	Dichtheidseffecten: aanwezigheid van zout en temperatuurvariaties	18
3.3.5	Grotere diepte	19
3.3.6	Aanwezigheid van slib	20
3.3.7	Overige onzekerheden	20
3.4	Correcties	21
3.4.1	Inleiding	21
3.4.2	Stroomsnelheid en -richting	21
3.4.3	Zoutgehalte en watertemperatuur	21
3.4.4	Grote diepte	22
3.4.5	Aanwezigheid van slib	22
4	Validatie van voorgestelde correcties	24
4.1	Inleiding	24
4.2	Toepassing op Surveyor-data	24
4.2.1	Aanpak	24
4.2.2	Resultaten en conclusies	25
4.3	Toepassing op de Maeslantkering en Brienoordbrug	27
4.3.1	Aanpak	27
4.3.2	Resultaten	29
5	Zichtbaarheid bodemtrends	35
5.1	Inleiding	35
5.2	Rationale en analyse	35

5.2.1	Stap 1	35
5.2.2	Stap 2	37
5.3	Conclusie	38
6	Overzicht invloeden en prioritering vervolgonderzoek	39
6.1	Inleiding	39
6.2	Tabel vervolgonderzoek	39
6.3	Opmerkingen en motivatie bij tabel	41
6.4	Concluderend	44
7	Conclusies en doorkijk vervolg	45
7.1	Conclusies en aanbevelingen	45
7.2	Doorkijk voor vervolg	46
	Referenties	47
A	Vergelijking Surveyors	48
A.1	Parkhaven 10-09-2018	48
A.2	Merwehaven 05-12-2018	49
A.3	Botlek + 3 ^e Petroleumhaven 04-10-2018	50
A.4	Botlekhaven centrale geul 11-12-2019	51
B	Correcties voor zout en temperatuur bij de Brienoordbrug (juni)	52

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het onderhoud van het Rotterdamse Havengebied gaat gepaard met baggerwerk om de havenbekkens en vaarwegen op diepte te houden. Het onderhoudswerk wordt hierbij gestuurd door bodempeilingen (surveys). Wanneer uit een survey blijkt dat de bodem lokaal boven een bepaalde garantiewaarde is gekomen, wordt er gebaggerd. Een vroeg signaal van bodemveranderingen zou kunnen helpen anticiperen wanneer de bodem boven een bepaalde streefwaarde komt zodat er eerder gebaggerd kan worden, ofwel helpen bepalen wanneer er weer een bodemsurvey uitgevoerd moet worden. Dankzij de hoge meetfrequentie kunnen CoVadem-data¹ hiervoor zeer bruikbaar zijn. Daarnaast kunnen CoVadem-data bijdragen aan ontwikkelen van systeemkennis, door geobserveerde aanslibbing en erosie te koppelen aan kortdurende events zoals een storm of hoge rivierafvoeren.

Vanuit deze achtergrond is in 2017 onder TKI Deltatechnologie en met medefinanciering van SmartPort een eerste verkenning uitgevoerd naar de mogelijke meerwaarde van CoVadem-data voor de Rotterdamse haven door een consortium van Deltares, MARIN en Havenbedrijf Rotterdam (HbR) (DEL059)². Met ondersteuning van het Havenbedrijf Rotterdam (in kind) en SmartPort is toen een aantal aspecten met betrekking tot de CoVadem-data uitgewerkt, waaronder de nauwkeurigheid en beschikbaarheid van de data in de haven, de mogelijke identificatie van bodemtrends en het monitoren van emissies. Ook is onder dit project een aantal RPA patrouilleschepen van het HbR uitgerust met een CoVadem-box. Met deze eerste verkenning is inzicht verkregen welk onderzoek in een vervolgtraject uitgevoerd moet worden om de CoVadem-data van meerwaarde te laten zijn voor HbR. Het voorliggende rapport betreft dit vervolgonderzoek: de in 2017 geïdentificeerde aanknopingspunten zijn verder uitgewerkt.

1.2 Onderzoeksvraag

Het huidige onderzoek heeft als doel om de meerwaarde van CoVadem-data voor gebruik in het havengebied te vergroten, dan wel in kaart te brengen. De hoofdvraag van dit onderzoek is:

- *Hoe kan de meerwaarde van CoVadem-data voor gebruik in het Havengebied van Rotterdam verbeterd worden?*

Tijdens de verkenning in 2017 is al een voorzet gedaan voor het identificeren van verbeterpunten. Deze punten zijn in het huidige rapport uitgewerkt en gevalideerd. Waar nodig zijn ook nieuwe verbeterpunten geïdentificeerd. De deelvragen zijn als volgt gedefinieerd:

- Is er een correctie mogelijk voor de invloed van dichtheid-gerelateerde effecten op de kielspelingsmeting?
- Welke effecten beïnvloeden de CoVadem-bodemligging nog meer in het havengebied?
- Is er een correctie mogelijk voor deze effecten?
- Kunnen er na correctie voor de genoemde verbeterpunten bodemtrends worden afgeleid uit de CoVadem-data?

¹ www.covadem.org

² <https://www.tkideltatechnologie.nl/project/del059-1120209-covadem-voor-havenbedrijf-rotterdam/>. Producten uit DEL059:

1. Niesten, I. & R. van der Mark (2018). Verkenning naar de bruikbaarheid van CoVadem meetgegevens voor Havenbedrijf Rotterdam. Deltares-rapport met kenmerk 11201209-001-ZWS-0002.
2. Meshkati Shahmirzadi, M.E. & T. van Kessel (2018). Sedimentation in Achtste Petroleumhaven, Botlekhaven and Waalhaven within the first 6 months of 2017. Deltares-memo met kenmerk 11201209-003-ZWS-001.
3. Wirdum Van, M. & R. van der Mark (2018). Uitrusten van HbR patrouilleschepen met een CoVadem-box. Memo met kenmerk 11201209-002-ZWS-0001.
4. Cottleer, A. (2017). CoVadem Eindrapport Onderdeel Emissies TKI HbR. MARIN-rapport.

1.3 Organisatie en Projectteam

Het huidige project (TKI Deltatechnologie DEL081) heeft de titel “Vervolgonderzoek meerwaarde CoVadem in de haven”, en wordt deels gefinancierd met TKI-toeslag en deels met financiering van SmartPort. Het samenwerkingsproject wordt uitgevoerd door de volgende partners:

- Deltares (penvoerder)
- MARIN
- Havenbedrijf Rotterdam
- CoVadem Services B.V.
- SmartPort

De volgende medewerkers hebben een bijdrage geleverd aan dit onderzoek:

Deltares: Iris Niesten, Remi van der Wijk, Rolien van der Mark, Thijs van Kessel

MARIN: Anke Cotteleer, Kor Molenmaker, Arno Bons

Havenbedrijf Rotterdam: Herman Meijer, Willem Snoek

CoVadem: Meeuwis van Wirdum, Desiré Savelkoul

SmartPort: Dirk Koppenol

Het voorliggende rapport is een gezamenlijk product. De methode, conclusies en aanbevelingen zijn tot stand gekomen tijdens enkele sprintsessies (Deltares en MARIN) en regelmatige overlegsessies waarbij alle partijen aanwezig waren. De hierin besproken punten zijn vervolgens verder uitgewerkt door Deltares.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de “CoVadem-methodiek” beschreven en uitgelegd hoe de bodemligging berekend wordt vanuit een gemeten kielspeling. Deze informatie is van belang voor het begrijpen van fouten en correcties in de uiteindelijke bodemligging. In paragraaf 3.2 wordt middels een analyse van berekende bodemligging over lange vaartracks van de bovenrivier naar het havengebied een extra stap gemaakt in het identificeren van externe factoren die de CoVadem-meting of -berekening in het havengebied beïnvloeden. Deze factoren zijn verder uitgewerkt in paragraaf 3.3, waarna in hoofdstuk 3.4 wordt ingegaan op mogelijke manieren om voor deze invloeden te corrigeren. De gevonden correcties worden gevalideerd in hoofdstuk 4, met casestudies op survey-data en CoVadem-data nabij vaste meetpunten. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 onderzocht of bodemtrends kunnen worden afgeleid uit de CoVadem-data. Hoofdstuk 6 geeft een voorzet op eventueel vervolgonderzoek. Tijdens een gezamenlijke sessie zijn de externe factoren samengevat in een tabel, waarbij met een prioritering is aangegeven welke onderdelen als eerste verder uitgewerkt moeten worden. Tot slot wordt in hoofdstuk 7 afgesloten met de conclusies en verdere aanbevelingen.

2 Van kielspeling naar waterdiepte en bodemligging

2.1 Inleiding

In de “CoVadem-methodiek” wordt gebruik gemaakt van de dieptemetingen van de dieptemeter (echolood), die standaard aan boord van een binnenvaartschip aanwezig is. Het echolood van een binnenvaartschip meet echter niet direct de waterdiepte, maar slechts de afstand tussen het echolood en de bodem (kielspeling). Voor een overzicht van de gebruikte definities wordt verwezen naar Figuur 2.1. Er is dus nog een aantal berekeningen en aannames nodig om tot een bodemligging te komen. In dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op de methode waarmee een bodemligging (of waterdiepte) berekend wordt uit de CoVadem-data. Begrip van deze methode en de onderliggende aannames is van belang om de data later te kunnen corrigeren voor eventuele invloeden. In paragraaf 2.2 wordt uitgelegd welke metingen en data beschikbaar zijn van de CoVadem-vloot. In paragraaf 2.3 wordt uitgelegd hoe deze data worden omgerekend naar een bodemligging en in paragraaf 2.4 welke aannames hierbij worden gedaan. Tot slot wordt er in hoofdstuk 2.5 een overzicht gegeven van de gebruikte databronnen in dit onderzoek.

2.2 CoVadem-data

Binnen de CoVadem-data wordt onderscheid gemaakt tussen scheepsvaste waarden en meetvariabelen.

De vaste variabelen die in deze studie worden gebruikt zijn:

- Horizontale afstand tussen de gps en het echolood,
- Verticale positie echolood: er is aangenomen dat het echolood zich in het vlak van de onderkant van het schip bevindt.

Variabelen die worden gemeten tijdens het varen:

- Kielspeling (gemeten door echolood),
- Belading / diepgang bij stilliggen,
- Positie (gemeten door gps aan boord).

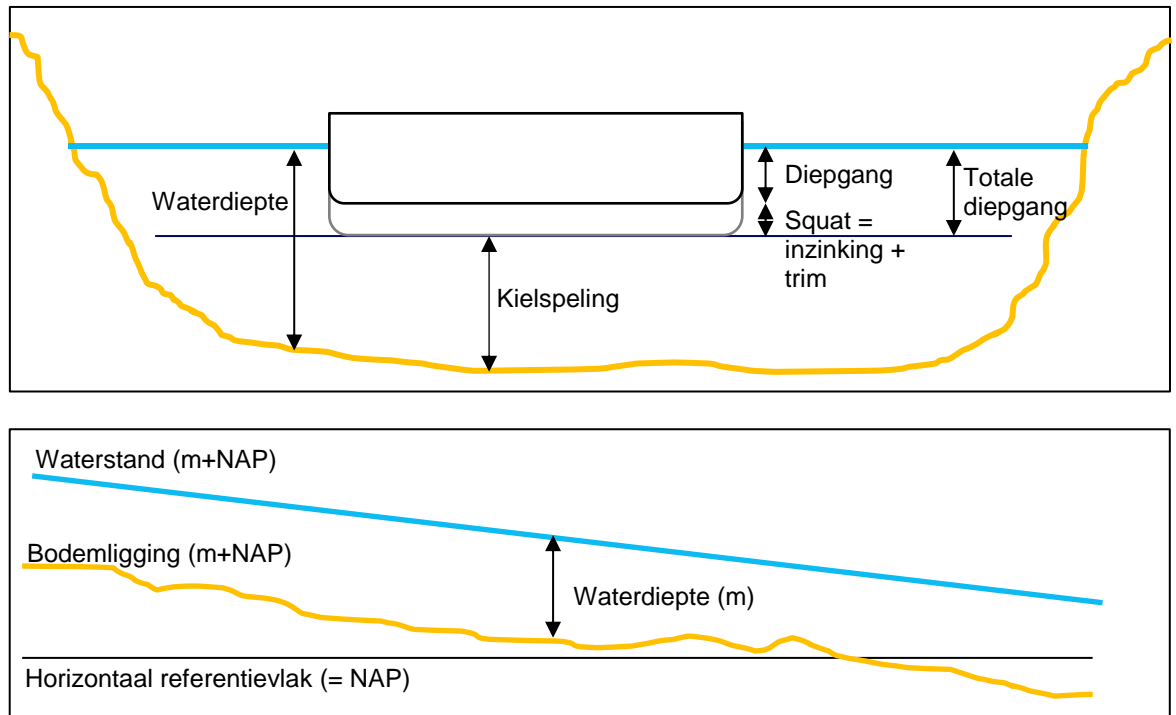
De richting van het schip wordt niet gemeten. De koers van het schip wordt afgeleid uit de gps-informatie.

2.3 Omrekening naar bodemligging

2.3.1 Van kielspeling naar waterdiepte

Bij de omrekening van kielspeling naar waterdiepte (en vervolgens bodemligging) bestaat de eerste stap uit het bepalen van de diepgang (zie ook Figuur 2.1). De totale / actuele diepgang tijdens het varen is een optelsom van een aantal vaste en variabele waardes. De diepgang bij stilliggen wordt gemeten met een beladingsmeter en via een algoritme vastgezet aan het begin van een track, aangenomen dat de belading niet verandert tijdens het varen. Wanneer het schip gaat varen, zinkt het nog eens verder in. Dit effect wordt “squat” genoemd en is afhankelijk van de snelheid van het schip ten opzichte van het water (i.e. de vaarsnelheid over de grond plus of min de stroomsnelheid van het water voor varen tegen de stroming in of met de stroming mee). De vaarsnelheid over de grond wordt bepaald door de gps aan boord van het schip. Door de berekende squat op te tellen bij de diepgang bij stilliggen wordt de actuele diepgang verkregen.

De waterdiepte wordt vervolgens berekend door de gemeten kielspeling en de actuele scheepsdiepgang ter plaatse van het echolood bij elkaar op te tellen.



Figuur 2.1 Overzicht van gebruikte definities in de omrekening van kielspeling naar bodemligging.

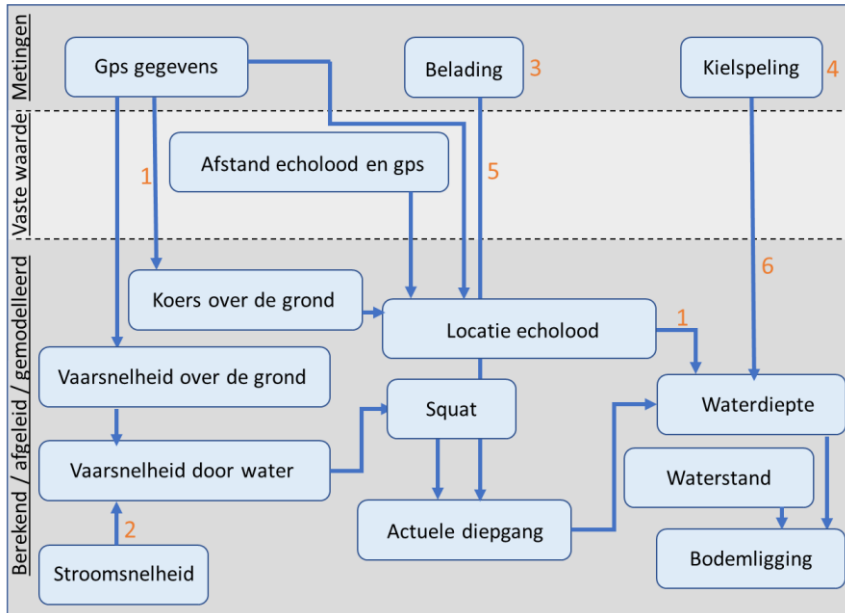
2.3.2 Bepalen locatie van de meting

De horizontale positie van de meting wordt bepaald uit de gps-coördinaten op hetzelfde moment. Op de meeste schepen bevindt het echolood zich echter niet op dezelfde locatie als de gps. De horizontale afstand tussen de gps en echolood is daarom ingemeten en wordt gebruikt om de locatie van de gps om te rekenen naar de locatie van het echolood. De nauwkeurigheid van de gps wordt uitgedrukt met de parameter hdop; data met hoge hdop-waarden kunnen worden weggefilterd.

Ter verduidelijking zijn de benodigde parameters om van een kielspelingsmeting tot een waterdiepte te komen samengevat in Figuur 2.2.

2.3.3 Van waterdiepte naar bodemligging

Tot slot wordt de waterstand op de locatie van het echolood en ten tijde van de meting gebruikt om de waterdiepte om te rekenen naar een bodemligging. Deze waterstand is nooit direct beschikbaar, maar is afkomstig van een modelberekening of een meting. In het laatste geval wordt meestal ruimtelijk en temporeel geïnterpoleerd tussen twee waterstandsstations. Voor de analyses die worden beschreven in dit rapport, selecteren we vaak bewust CoVadem-meetgegevens die dicht bij een waterstandsstation zijn verzameld, zodat interpolatie niet nodig is.



Figuur 2.2 Verwerking van CoVadem-meetgegevens. De oranje nummers verwijzen naar de aannames die in de tekst worden toegelicht (paragraaf 2.4).

2.4 Aannames in de omrekening naar waterdiepte

In de berekening van gemeten kielspeling naar waterdiepte (vorige paragraaf) wordt een aantal aannames gedaan. De belangrijkste zijn:

- 1 Drifthoek is nul.** Voor het vaststellen van de locatie van het echolood wordt de koers uit de gps gebruikt. Ook voor het vaststellen van de vaarsnelheid wordt de snelheid zoals bepaald door de gps gebruikt. Dit houdt in dat er vanuit wordt gegaan dat het schip altijd precies in lijn ligt met de koers (drifthoek is nul). Uiteraard gaat dit niet altijd op: bij aan- en afmeren, in scherpe bochten en tijdens andere manoeuvres heeft het schip een drifthoek. Dit heeft twee belangrijke consequenties. De eerste is dat de locatie van de dieptemeting soms vertekend wordt weergegeven. Aangezien de positieberekening foutgevoeliger is wanneer een schip een lage snelheid heeft, speelt dit vooral tijdens aan- en afmeren en wordt dan zichtbaar in meettracks die bijvoorbeeld over de oever lijken te lopen. Verder heeft ook de drifthoek invloed op de squat. Dit effect wordt niet meegenomen, omdat het nog niet mogelijk is om de drifthoek te bepalen uit de CoVadem-data. Vanwege deze onzekerheden wordt op dit moment bij lage vaarsnelheden (< 0.5 m/s) de positie van de gps niet omgerekend naar het echolood.
- 2 Stroomsnelheid = 0.75 m/s in westelijke richting.** Voor de berekening van de dynamische inzinking is niet de vaarsnelheid over de grond, maar de *snelheid door het water* van belang. Dat wil zeggen: als het schip een vaarsnelheid over de grond van 1 m/s heeft, en het water stroomt met dezelfde snelheid dezelfde kant op, dan is de snelheid ten opzichte van het water gelijk aan nul. Omdat de stroomsnelheid ter plaatse van de meting bijna nooit bekend is (en uit een hydraulisch model zou moeten komen), gaat de CoVadem-methode uit van een stroomsnelheid van 0.75 m/s in westelijke richting. Op de Nederlandse rivieren is dit een vrij realistische aanname. In het havengebied gaat getij echter een rol spelen, en kan het water zowel in westelijke als in oostelijke richting stromen. Daarnaast hebben enkele vaarwegen een noord-zuid oriëntatie en is de stromingsrichting in havenbekkens moeilijk te bepalen. Dit heeft invloed op de berekening van de squat.
- 3 Dichtheid water.** De dichtheid van het water is van invloed op de diepgang van het schip. De beladingsmeter is geïkht bij zoet water en de diepgang is in zout water kleiner. Het effect van temperatuur op de dichtheid is voor de benodigde nauwkeurigheid verwaarloosbaar klein.

- 4 **Het water heeft een zoutgehalte van 0 ppt en een temperatuur van 20 °C.** De geluidssnelheid door water varieert met temperatuur, zoutgehalte en druk. Daarmee wordt de kielspelingsmeting direct beïnvloed door deze eigenschappen. De echoloden van de meeste binnenvaartschepen zijn gekalibreerd op zoet water met een temperatuur van 20 °C.
- 5 **Belading verandert niet tijdens de vaart:** De diepgang wordt eenmalig vastgezet aan het begin van een "track"³, en deze diepgang wordt constant gehouden zolang het schip aan het varen is. Deze aanname kan onjuist zijn tijdens lange tracks wanneer de hoeveelheid brandstof significant afneemt.
- 6 **Bewegingen van het schip.** Tot slot kan de actuele kielspeling ter plaatse van het echolood tijdens het varen nog veranderen als gevolg van bijvoorbeeld dompen, stampen en slingeren. Deze effecten worden niet meegenomen in de standaard berekening van de diepgang door CoVadem.

Bovenstaande punten zijn aannames die worden gedaan om de waterdiepte en bodemligging te kunnen berekenen uit de kielspelingsmeting. Deze aannames kunnen de nauwkeurigheid van de waterdiepte beïnvloeden. Daarnaast worden er nog onnauwkeurigheden geïntroduceerd door meetfouten (gps, echolood, beladingsmeter) en kan de analyse bemoeilijkt worden door een gebrek aan nauwkeurige referentiedata (bodemligging en waterstanden). Deze punten worden verder besproken in hoofdstuk 3.

2.5 Gebruikte databronnen

In dit project is gebruik gemaakt van verschillende databronnen om te CoVadem-data te bewerken en valideren. Hieronder wordt een algemeen overzicht van de gebruikte data gegeven. Voor ieder onderdeel zal in dit rapport worden aangegeven welke van deze bronnen gebruikt zijn. Een overzicht van alle vaste meetpunten is ook gegeven in Figuur 2.3.

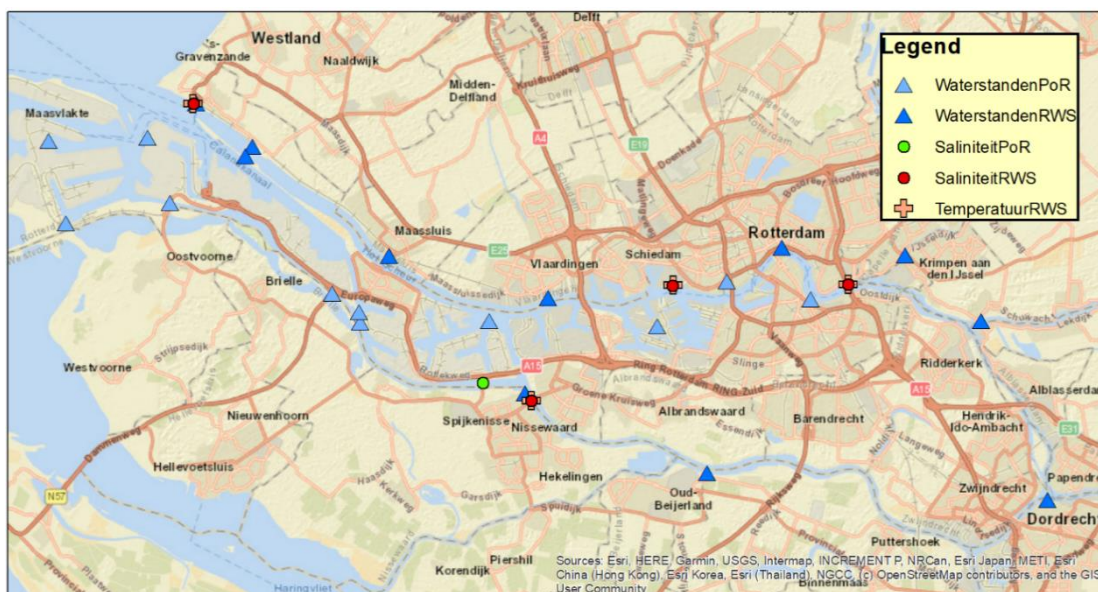
- **CoVadem-data:** Voor verschillende deelonderzoeken zijn verschillende periodes aan CoVadem-data gedownload. Standaard bevatten de CoVadem-data de (reeds gecorrigeerde) lat/lon-coördinaten, een kielspeling, een waterdiepte, een tijd van meten en een shipID en trackID. Het tijdstip van meten heeft een verschillende tijdzone per schip: schepen met shipID 1 t/m 15 en met shipID 62 en 70 meten in lokale tijd. De overige schepen meten in UTC. De data bevatten ook de metingen van de RPA-patrouilleschepen van HbR. In 2018 zijn enkele van deze schepen⁴ uitgerust met een CoVadem-box, waardoor zij naast de reguliere bodempeilingen voor HbR ook kielspelingsdata verzamelen voor de CoVadem-database.
- **Waterstandsmetingen:** Waterstandsmetingen zijn afkomstig van zowel de LMW-stations van Rijkswaterstaat⁵ als het meetnet van HbR. De tijd van deze metingen is gegeven in UTC+1.
- **Modelwaterstanden:** Voor een enkele analyse zijn gemodelleerde waterstanden uit een 1D-model gebruikt, omdat deze een hogere ruimtelijke en temporele dichtheid hebben.
- **Saliniteitsmetingen:** zijn afkomstig van zowel Rijkswaterstaat als HbR. In verband met mogelijke gelaagdheid worden saliniteitsmetingen meestal uitgevoerd op verschillende dieptes. Deze zijn aangegeven in de betreffende hoofdstukken.
- **Temperatuurmetingen:** zijn afkomstig van RWS. De watertemperatuur wordt gemeten op dezelfde locaties en dieptes als saliniteit.
- **Multibeam-metingen HbR:** Als referentiebodem ter vergelijking met berekende CoVadem-bodemligging, worden meestal multibeam-metingen gebruikt. De multibeam-metingen van HbR hebben een horizontale resolutie van 1x1 m en zijn verticaal gerefereerd aan NAP. Voor verschillende analyses zijn verschillende multibeam-data gebruikt. De metingen van HbR zijn voornamelijk beschikbaar in havenbekkens.

³ Het begin en einde van een track wordt bepaald door de gemiddelde snelheid van een schip gedurende een meetperiode. Als de gemiddelde snelheid kleiner is dan 1 m/s, wordt dit geregistreerd als "idle period", en worden de beladingsgegevens opgeslagen.

⁴ Op dit moment zijn de volgende 5 vaartuigen van het HbR actief: RPA 8, RPA 13, RPA 16, Surveyor 1, Surveyor 2.

⁵ www.waterinfo.rws.nl

- **Multibeam-metingen RWS:** dekken voornamelijk de hoofdvaarwegen. Evenals de metingen van HbR hebben RWS-multibeam-data een horizontale resolutie van 1x1 m en zijn ze verticaal gerefereerd aan NAP.



Figuur 2.3 Overzicht van meetpunten in het havengebied. PoR = Port of Rotterdam; RWS = Rijkswaterstaat.

2.6 Controle van CoVadem variabelen

Voor het berekenen van de waterdiepte is het belangrijk dat door de sensoren realistische waarden wordt gemeten (met name kielspeling, belading, positie van het schip). Om te kunnen controleren of de sensoren een (realistische) waarde meten, is er een dashboard ontwikkeld, zodat HbR de status van de metende patrouilleschepen kan controleren. Dit dashboard geeft een overzicht van de meest recente metingen voor alle sensoren op het schip. Het dashboard geeft antwoord op de vraag: welke sensoren op het schip zijn operationeel en welke meetwaarden worden afgegeven?

Het dashboard wordt gebruikt voor de controle van de meetwaarden, zo direct mogelijk bij de bron (de sensor aan boord van het schip). Regelmatige controle van deze meetwaarde in het dashboard voorkomt dat er gedurende langere periode geen waterdiepte wordt berekend. Het dashboard is beschikbaar via <https://dashboard.covadem.org/> en is beveiligd met een gebruikersnaam en wachtwoord.

Sensors

Type	Shipname	Samples	Failures	Availability (%)	Updated	Configuration
covadembox	RPA 8	374	0	100.0	2020-01-02 00:12:26	working
gps	RPA 8	374	0	100.0	2020-01-02 00:12:26	working
gpshdop	RPA 8	374	2	99.0	2020-01-02 00:12:26	working
loading	RPA 8	374	374	0.0	2020-01-02 00:12:26	unavailable
echosounder	RPA 8	374	374	0.0	2020-01-02 00:12:26	unavailable
fuelflow	RPA 8	374	0	100.0	2020-01-02 00:12:26	working

Figuur 2.4 Voorbeeld overzicht van de werking van de aanwezige sensoren op de RPA 8.

3 Effecten en correcties

3.1 Inleiding

Uit eerder onderzoek op de Nederlandse rivieren is gebleken dat CoVadem-data een representatief beeld kunnen geven op de rivieren (Van der Mark et al., 2015). In het havengebied blijkt dit echter niet altijd het geval te zijn (Niesten & Van der Mark, 2018). Hier is een mismatch zichtbaar tussen de CoVadem-bodemligging en multibeam-bodemligging (gebruikt als referentie). In de laatstgenoemde studie zijn echter vooral korte tracks geanalyseerd die zowel hun startpunt als hun eindpunt in het havengebied hadden. Om na te gaan waar CoVadem-data beginnen af te wijken van de referentiebodem, is er binnen dit project een studie uitgevoerd waarbij tracks werden gevolgd vanaf de rivier de Waal tot in het havengebied (paragraaf 3.2). Naar aanleiding van deze analyse is een aantal externe factoren gedefinieerd die de CoVadem-data beïnvloeden in het havengebied, maar niet op de rivieren. Deze zijn uitgewerkt in paragraaf 3.3. In hoofdstuk 3.4 wordt verder ingegaan op manieren om voor deze invloeden te corrigeren.

3.2 Analyse langs-tracks van de Waal tot het havengebied

In Lambert (2018) is een studie uitgevoerd waarin de CoVadem-metingen van individuele schepen vergeleken zijn met multibeam-data. Omdat eerder is gebleken dat CoVadem-data behoorlijk goed bruikbaar is op de rivier, zijn in deze studie schepen “gevolgd” tijdens hun reis van de rivier de Waal (Zaltbommel) tot in het havengebied (Vlaardingen), of omgekeerd, met als doel om te kijken wanneer CoVadem-data gaan afwijken van multibeam-data en of er een duidelijke bias zichtbaar is. Voor deze studie zijn de volgende databronnen gebruikt:

- CoVadem kielspeling (omgerekend tot bodemligging) in april en mei 2017.
- Multibeam-data RWS tussen april en oktober 2017⁶.
- Waterstandsdata uit het 1D-model *sobek-rmm* van RWS. Er is gekozen om voor waterstandsdata modeluitvoer te gebruiken, omdat het landelijk meetnet waterstandsdata (LMW) in het getijgebied niet genoeg dekkend is om CoVadem-data nauwkeurig te verwerken. Het genoemde model heeft op de LMW-stations een bias van maximaal 5 cm (Niesten & Visser, 2017).

Voor het verwerken van de CoVadem-data is geen gebruik gemaakt van correcties, i.e. de ruwe data uit de CoVadem-database is gebruikt zonder te corrigeren voor verwachte afwijkingen in squat of kielspeling door bijvoorbeeld dichtheidseffecten. Tracks zijn gefilterd op basis van twee criteria:

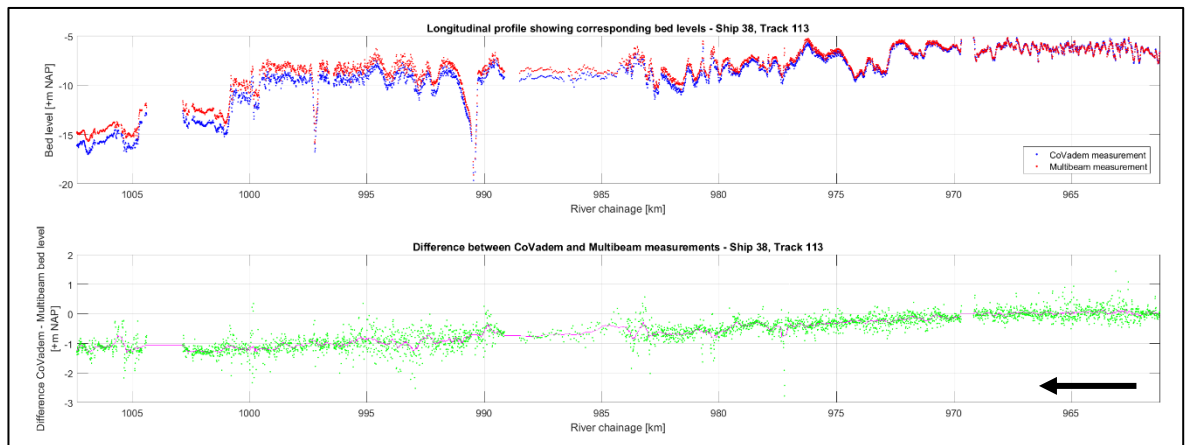
- Ruimtelijke dekking: alleen ononderbroken tracks die de gehele vaarroute tussen Zaltbommel en Vlaardingen volgen zijn gebruikt voor de analyse.
- Gemeten kielspeling: tracks met onrealistische bodemligging zijn niet meegenomen in de analyse (afwijking > 10 m ten opzichte van multibeam).

De tracks zijn vervolgens individueel geanalyseerd door voor iedere track het verschil tussen de CoVadem-bodem en referentiebodem (multibeam) te berekenen langs de volledige track. De resulterende verschilplots kunnen worden onderverdeeld in vier trends:

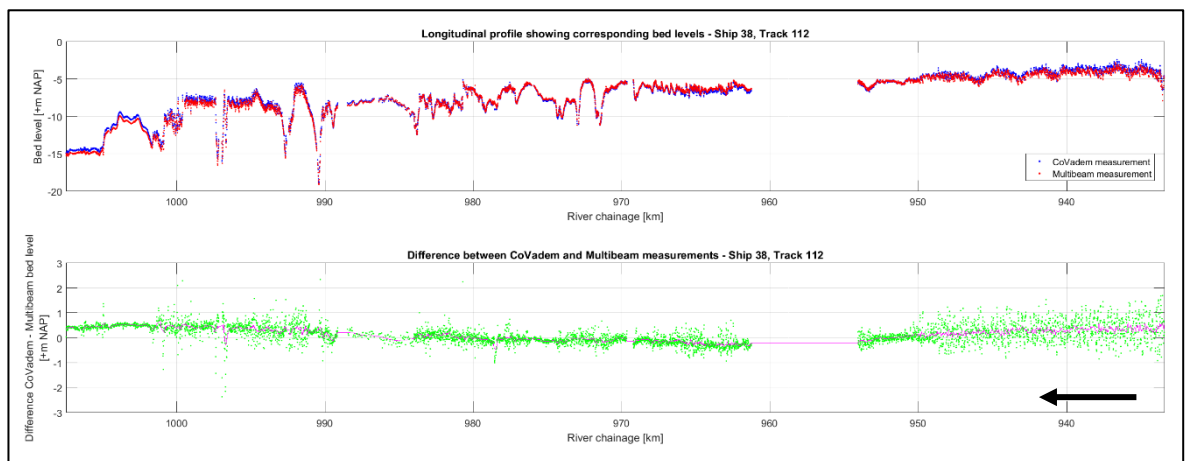
- 1 Tracks waarin het verschil tussen CoVadem en multibeam klein is op de Waal, en het absolute verschil toeneemt richting het havengebied. Een voorbeeld van dit type is gegeven in Figuur 3.1.
- 2 Tracks waarin een positief verschil tussen multibeam en CoVadem zichtbaar is op de Waal, het verschil afneemt richting het havengebied en negatief wordt verder benedenstrooms.
- 3 Tracks waarin het verschil tussen CoVadem en multibeam over de gehele reis klein en ongeveer constant is.

⁶ Omdat het volledige analyse-traject lang was (~80 km), zijn de multibeam-data aangeleverd in trajecten. De meeste data was ingewonnen tussen april en juni 2017; één van de datasets op de Nieuwe Maas was ingewonnen in oktober 2017. Voor een volledig dataoverzicht wordt verwezen naar het onderzoeksrapport van Lambert (2018).

4 Tracks waarin het verschil tussen CoVadem en multibeam een golfvorm vertoont over de lengte van de track, ofwel meerdere keren toeneemt en afneemt. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.1 Voorbeeld van een verschilplot tussen CoVadem-bodemligging en multibeam-bodemligging (Type 1). Het bovenste panel geeft de gemeten bodemligging door CoVadem (blauw) en de referentiebodempling (rood) weer langs de track tussen Vuren (rivierkilometer 960) en Schiedam (rivierkilometer 1005). Het onderste panel geeft in groen het verschil tussen de individuele CoVadem-meetpunten en multibeam, en in paars het lopend gemiddelde hiervan (met een venster van 200 m). In dit geval vaart het schip stroomafwaarts (aangeduid met de pijl).



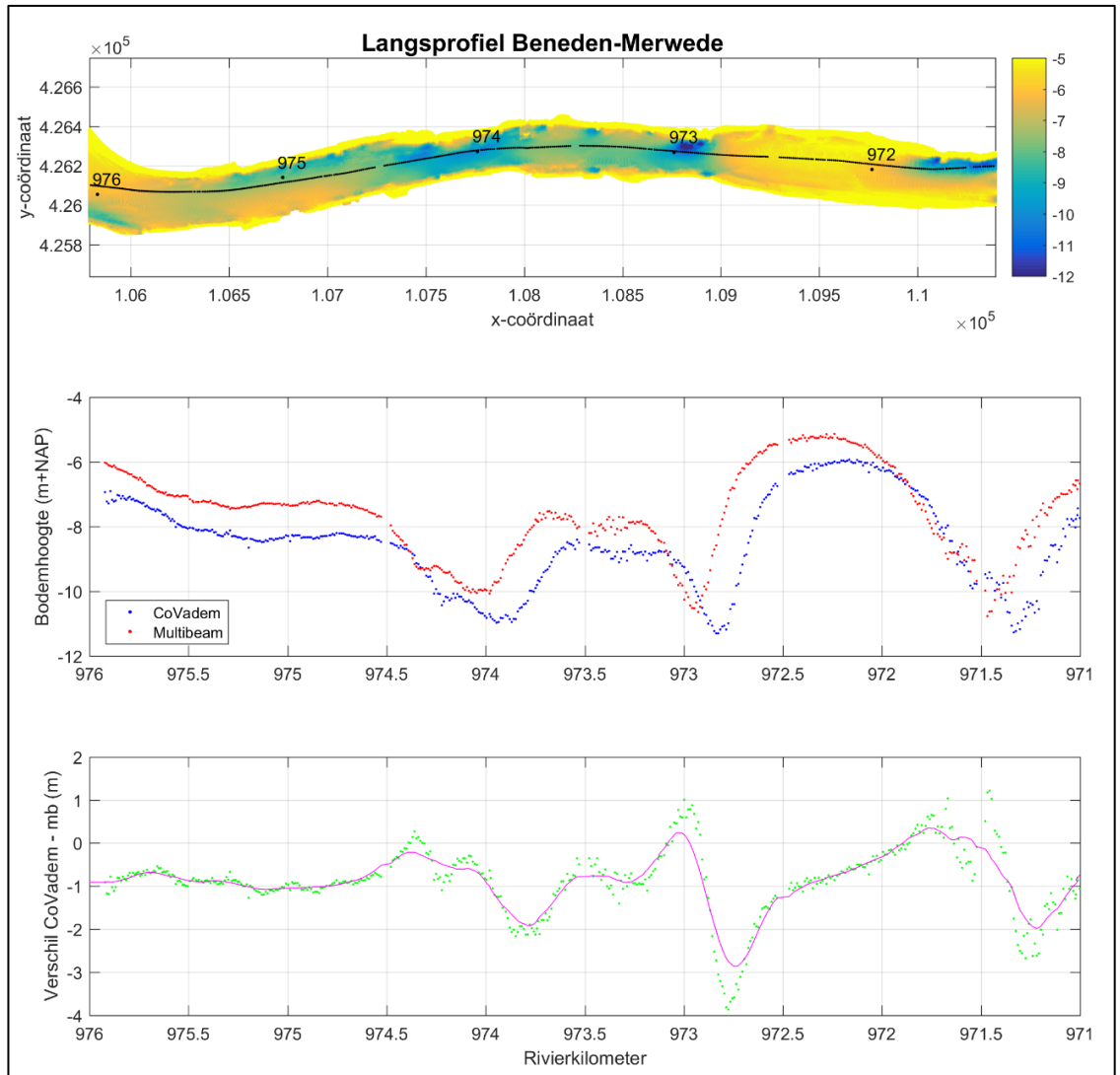
Figuur 3.2 Voorbeeld van een verschilplot tussen CoVadem-bodemligging en multibeam-bodemligging (Type 4). Het schip vaart stroomafwaarts van Zaltbommel (rivierkilometer 935) naar Schiedam (rivierkilometer 1005). Tussen rivierkilometer 954 en 961 zijn geen multibeam-data beschikbaar.

Het oorspronkelijke doel van deze verschilanalyse was om te kijken of er sprake is van een “omslagpunt”, een punt in het rivierengebied vanaf waar de gemeten bodem begint af te wijken van de referentiebodempling. In de meeste geanalyseerde tracks zijn de toe- en afname van verschillen echter geleidelijk: er is geen sprong zichtbaar in het langspiegelprofiel. In een eerdere studie (Niesten et al., 2017) is geconstateerd dat sommige tracks een min of meer constante afwijking (bias) vertonen in vergelijking met de referentiebodempling.

Nu er langere tracks zijn geanalyseerd, blijkt dat de bias inderdaad constant kan zijn over enkele kilometers (Figuur 3.3) maar toch kan variëren over een langere afstand. In Figuur 3.3 is een track te zien waarin de CoVadem-bodem steeds 1 meter dieper ligt dan de referentiebodem. Enkele kilometers bovenstrooms is deze bias veel kleiner: tussen 10 en 20 cm. Net als in andere geanalyseerde tracks (Figuur 3.1 en Figuur 3.2) is er geen duidelijke sprong zichtbaar maar groeit de bias geleidelijk.

Naast de verticale afwijking lijkt er in Figuur 3.3 een horizontale verschuiving tussen de twee bodems zichtbaar. Dit zou verklaard kunnen worden door bodemveranderingen in de tijd tussen de multibeam-survey en de opname van de CoVadem-track. Vanwege de grootte van de veranderingen is dit echter niet erg waarschijnlijk (de CoVadem-meting is ongeveer drie weken na de multibeam-meting gedaan), en zou de oorzaak ook kunnen liggen in een foute positionering van de kielspelingsmeting. Bovenstrooms is echter geen horizontale verschuiving zichtbaar. Wat de oorzaak is van de horizontale verschuiving in de CoVadem-data op deze locatie (geen bocht dus flinke drift is onwaarschijnlijk) is dus niet duidelijk.

Wat verder opvalt is dat de ruimtelijke variatie in de langsprofielen veelal goed wordt gereproduceerd met CoVadem. De bodemvormen die we in de multibeam-data zien (zowel rivierduinen als erosiekuilen en contractvakken) zijn kleiner dan de schaal waarop de bias van de CoVadem-metingen toe- of afneemt en daardoor goed zichtbaar. Voorbeelden in Figuur 3.1 en Figuur 3.2 zijn de erosiekuilen bij Feijenoord (rkm 997) of het begin van de Nieuwe Maas (rkm 991). Ook de trapjeslijn in de Nieuwe Maas is vaak terug te vinden in de CoVadem-data. Dit doet vermoeden dat de CoVadem-data ook in het havengebied tot op zekere hoogte bruikbaar is, en dat gecorrigeerd kan worden voor invloeden die wel spelen in het havengebied, maar niet op de rivier. In de volgende paragraaf worden deze invloeden verder uitgewerkt.



Figuur 3.3 Detail van een gevaren track op de Beneden-Merwede. Bovenste panel: referentiebodem met de gevaren CoVadem-track in zwart. De zwarte getallen geven de rivierkilometers aan, corresponderend met de rivierkilometers op de x-as in het middelste panel (berekende bodemhoogte door CoVadem in blauw en referentiebodem in rood) en het onderste panel (verschil in bodemhoogte tussen CoVadem en multibeam in groen en het lopend gemiddelde daarvan in paars).

3.3 Externe factoren havengebied

3.3.1 Inleiding

In de analyse van de langsprofielen is opgemerkt dat het verschil tussen CoVadem en multibeam op de rivieren klein is (orde grootte 20 cm), maar dat richting het havengebied vaak een bias ontstaat. Deze bias verschilt per track en kan ook tijdens een track geleidelijk veranderen (de bias kan toe- of afnemen met maximaal enkele meters over een horizontale lengte van enkele kilometers). Om uit te zoeken wat hiervan de oorzaak is, zijn de volgende factoren gedefinieerd die de meting wel kunnen beïnvloeden in het havengebied, maar niet op de rivieren:

- Getij-gerelateerde effecten:
 - Variërende waterstanden
 - Variërende stroomsnelheid en -richting
- Aanwezigheid van zout
- Grotere diepte in het havengebied
- Aanwezigheid van slib

Hieronder wordt op deze factoren nader ingegaan. Wat een directe vergelijking tussen CoVadem-data en multibeam-data lastig maakt, is dat er tussen de multibeam-meting en de CoVadem-meting vaak een periode van een aantal dagen tot weken zit. Omdat de bodem in sommige delen van het havengebied toch bepaald dynamisch is, is het in zo'n geval de vraag of de multibeam-data wel één op één als referentiebodembodem gebruikt kan worden.

3.3.2 Variërende waterstanden

Uit de analyse van langprofielen is onder andere het belang van goede waterstanden naar voren gekomen. Op de rivieren worden waterstanden tussen meetstations (in Nederland zijn dit trajecten van ~30 km) geïnterpoleerd in ruimte en tijd, en vervolgens gekoppeld aan de CoVadem-dieptemeting op basis van positie en meettijd. Op de rivieren is de tijd-interpolatie verwaarloosbaar: de rivierwaterstand in Nederland varieert met maximaal 1 m per dag. Op de rivier bij Werkendam is het getij echter al zichtbaar. Verder benedenstrooms in het havengebied bedraagt het verschil tussen hoog- en laagwater meer dan 1.5 m. Dit betekent dat een kleine fout in het gebruikte tijdstip al een grote fout in waterstand kan opleveren. In een eerder stadium van de langstrack-analyse is bijvoorbeeld geconstateerd dat het niet corrigeren van CoVadem-data (of waterstandsdata) voor meten in een andere tijdzone, grote fouten oplevert in de omrekening van diepte naar bodemligging.

Ook ruimtelijke variatie in waterstanden speelt een rol in het veroorzaken van onnauwkeurigheden. Hoewel het waterstandsmetnet van HbR een hogere ruimtelijke dichtheid heeft, en is uitgerold om waterstanden over het gehele havengebied zo goed mogelijk te representeren, kan het linken van CoVadem-data aan het dichtstbijzijnde waterstandsmetpunt nog steeds een fout opleveren. De grootte van deze fout is moeilijk in te schatten. De meetnauwkeurigheid van de waterstandstations langs de hoofdvaarwegen is orde 1.5 cm (persoonlijke communicatie Herman Meijer tijdens voortgangsoverleg 4 februari 2019). Dit is dus de fout ter plaatse van het waterstandstation, niet de fout die daarnaast nog ontstaat doordat het schip op een andere locatie in de buurt van het meetstation vaart. De waterstand ter plaatse van het schip kan afwijken van de gemeten waterstand bij het station, het vermoeden is bijvoorbeeld dat seiches en resonantie ook voor waterstandsvariëaties kunnen zorgen in met name havenbekkens.

3.3.3 Variërende stroomsnelheid en -richting

De dynamische inzinking (of squat) wordt mede⁷ bepaald door de relatieve snelheid van het schip, dus de vaarsnelheid ten opzichte van de stroomsnelheid van het water, waarbij een hogere relatieve stroomsnelheid resulteert in een grotere squat. De squat is hierbij afhankelijk van de relatieve vaarsnelheid in het kwadraat. In de huidige squat-berekeningen wordt uitgegaan van een constante stroomsnelheid van 0.75 m/s in westelijke richting. Dit is een redelijke aanname op de rivieren. In het havengebied is echter sprake van wisselende stroomrichtingen door getij en lopen bovendien niet alle takken van oost naar west. De grootste fout wordt daarom verwacht bij vloed, wanneer het water in oostelijke richting stroomt. Daarnaast dient rekening te worden gehouden met veranderende stromingsrichtingen in de havenbekkens zelf en complexe stromingspatronen bij rivierkruisingen. Bij de berekening van de dynamische inzinking wordt door CoVadem gebruik gemaakt van de formule van Ankudinov (Briggs, 2009). De methode is in meer detail beschreven in Niesten en Van der Mark (2018).

3.3.4 Dichtheidseffecten: aanwezigheid van zout en temperatuurvariëaties

Een echolood berekent de diepte tot de bodem op basis van de terugkeertijd van een uitgezonden geluidspuls. De snelheid van geluid door water (en andere media) varieert echter met de dichtheid, temperatuur en druk. De dichtheid van water in het havengebied wordt grotendeels bepaald door de aanwezigheid van zout en temperatuurverschillen.

⁷ Squat wordt ook beïnvloed door zoutgehalte en waterdiepte.

Een temperatuurverandering van 1 °C leidt tot een verschil in geluidssnelheid van 4.5 m/s. De geluidssnelheid in zoet water kan met 30 m/s verschillen van de geluidssnelheid in zout water (15 ppt). De druk van water neemt toe met de diepte, maar dit effect wordt verwaarloosbaar geacht voor dieptes in het havengebied (maximaal 20 m). Het totaaleffect van zoutgehalte, temperatuur en waterdruk op de geluidssnelheid kan bepaald worden met de formule van Coppens (Kinsler et al., 1982):

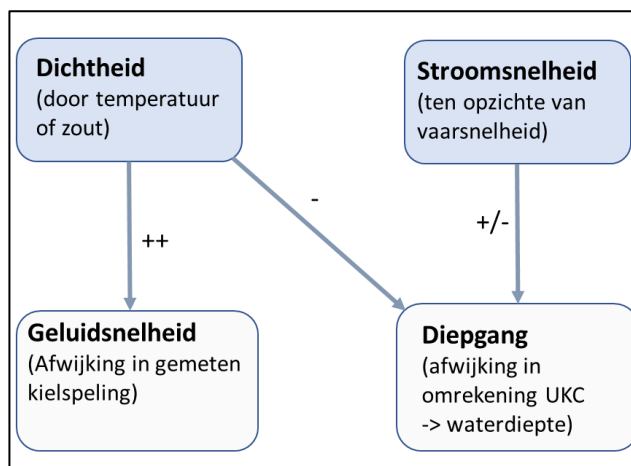
$$C = 1449.05 + (4.57T - 0.0521T^2 + 0.00023T^3) + (1.333 - 0.0126T + 0.00009T^2)(S - 35) + 16.3Z + 0.16Z^2 \quad (3.2.1)$$

Met

- C de geluidssnelheid in m/s
- T de watertemperatuur in °C
- S de saliniteit in ppt
- Z de diepte in km

De echoloden van de meeste CoVadem-schepen zijn gekalibreerd op een watertemperatuur van 20 °C en een zoutgehalte van 0 ppm. Uitgaande van een watertemperatuur van 5 °C en een zoutgehalte van 35 ppm, kan het verschil in gemeten diepte meerdere decimeters bedragen op een totale diepte van 15 m⁸.

Naast de kielspelingsmeting, heeft de dichtheid van het water nog invloed op de diepgang van het schip. De diepgang van het schip wordt gemeten door druksensoren. Bij water met een hogere dichtheid, wordt dezelfde waterdruk gemeten bij een kleinere diepgang. De totale diepte wordt dan dus overschat. Figuur 3.4 geeft de besproken invloeden schematisch weer. De invloed van temperatuur op waterdichtheid is klein; we nemen daarom aan dat de diepgang (en squat) voornamelijk beïnvloed worden door het zoutgehalte.



Figuur 3.4 Schematische weergave van de manier waarop dichtheid van water en de stroomsnelheid invloed hebben op de gemeten diepte.

3.3.5 Grotere diepte

De gemiddelde diepte in vaarwegen en havenbekkens in het havengebied is aanzienlijk groter dan op de rivier. In het havengebied zijn gemiddelde dieptes 10 – 15 m, maar ook dieptes van 20 m komen voor. Op de rivieren is de waterdiepte regelmatig maar 3 – 5 m. Transducers zoals toegepast in de binnenvaart meten daarom vaak met een vrij laag vermogen (rond 20 W). Op grotere diepte en in troebel water is wellicht een groter vermogen nodig; een te laag vermogen zorgt dan voor

⁸ De sound velocity profilers van HbR gebruiken de zogenaamde UNESCO methode. Tussen 5 en 20 graden watertemperatuur zit 51 m/s verschil in geluidssnelheid (1472-1523 m/s). Op 15 m waterkolom geeft dit een verschil van 52 cm.

meer ruis en/of ontbreken van een echosignaal. Bovendien zorgt de grotere diepte ervoor dat alle eerder besproken meetfouten worden uitvergroet. Waar een afwijkende geluidssnelheid op de rivier kan leiden tot een meetfout van enkele centimeters, kan de meetfout bij een grotere diepte oplopen tot decimeters.

Een grotere diepte heeft wel een positief effect op de squat-berekening. Bij grotere diepte is de blockage factor (de mate waarin het schip het natte oppervlak van een waterweg blokkeert) van een schip, en daarmee de squat, kleiner. Een foute inschatting van de stroomsnelheid heeft dan ook een kleiner effect.

3.3.6 **Aanwezigheid van slib**

In Niesten en Van der Mark (2018) is al besproken dat de frequentie van een echolood bepaalt in hoeverre de geluidspuls doordringt in een zachte bodem. De dikte van de sliblaag kan oplopen tot decimeters en lokaal enkele meters (in bijvoorbeeld een slibput); de dikte is ook afhankelijk van welke definitie wordt gehanteerd / welke dichtheden er beschouwd worden. Een kenmerk van metingen met een hoge frequentie, is dat het signaal snel gedempt wordt door aanwezigheid van slib in de waterkolom. Geluidspulsen met een lage frequentie dringen verder door in de sliblaag. Navraag heeft uitgewezen dat de meeste CoVadem-schepen meten met een frequentie van 200 kHz. De multibeam-peilingen van het HbR maken gebruik van wisselende frequenties: genoemd is 200-400 kHz. Uit de metadata van de RWS-multibeam-data (zie hoofdstuk 3.2) wordt afgeleid dat op de Nieuwe Waterweg zelfs is gemeten met een frequentie van 455 kHz (Reson, 2002)⁹. Verder is bekend dat HbR voor de gebruikelijke surveys in slibrijke gebieden gebruik maakt van hoge-frequentie multibeam-data om de grens tussen water en (zacht) sediment te bepalen. Om ook onder de sliblaag te meten en de hoogte van de harde bodem te bepalen, wordt gebruik gemaakt van seismische meetinstrumenten met een lagere frequentie (rond 30 kHz).

In gebieden met een zachte bodem of hoge sedimentconcentraties, is het vaak niet voldoende om gebruik te maken van een vaste geluidsfrequentie (Stema-systems, 2015). De sterkte van het terugkerende signaal wordt dan beïnvloed door een ruimtelijk variërende sedimentconcentratie, de dikte van de zachte sliblaag op de bodem, waterdiepte en gelaagdheid. Ook een laag vermogen van de transducer zou de metingen boven een zachte bodem sterk kunnen beïnvloeden. Een laag vermogen zou een deel van de “spikes” in de CoVadem-data kunnen verklaren zoals geobserveerd in Niesten en Van der Mark (2018).

3.3.7 **Overige onzekerheden**

De genoemde foutenbronnen hebben een effect van enkele centimeters tot decimeters. Er zijn echter ook CoVadem-data waarin een afwijking van meerdere meters ten opzichte van de multibeam-data wordt geobserveerd. Een verklaring hiervoor is nog niet gevonden, zodat er ook niet voor gecorrigeerd kan worden. Er wordt aangeraden om verder uit te zoeken wat de oorzaak van deze grote meetfouten kan zijn en te investeren in filtertechnieken om de algehele kwaliteit van de CoVadem-data te verbeteren.

Een ander effect dat de kielspelingsmeting nog kan beïnvloeden, zijn luchtbellens in de waterkolom. Luchtbellens kunnen veroorzaakt worden door bijvoorbeeld passerende schepen, of door de eigen schroeven tijdens het manoeuvreren. Luchtbellens kunnen resulteren in een ontbrekende of foute echo, waardoor de kielspelingsmeting grote sprongen kan vertonen. Het precieze effect is niet geheel duidelijk en bovendien niet te corrigeren, maar het is van belang om deze metingen uit te filteren.

⁹ Dit geldt niet voor de Beneden-Merwede, Noord en Nieuwe Maas. Deze zijn ingemeten met een frequentie van 240 kHz.

3.4 Correcties

3.4.1 Inleiding

Voor slechts een deel van de genoemde foutenbronnen (vorige paragraaf) kan gecorrigeerd worden door aanpassing van de berekening van waterdiepte en bodemligging uit CoVadem-data. Fouten die veroorzaakt worden door foute instellingen van de meetapparatuur (slib, grote waterdiepte) kunnen alleen opgelost worden door de instellingen van de apparatuur aan te passen. De onnauwkeurigheid van gebruikte waterstanden kan alleen verholpen worden door het gebruik van meer of andere databronnen. Voor fouten die veroorzaakt worden door onjuiste aannames in de meting of berekening, kan gecorrigeerd worden. Ook in dat geval speelt de mate van beschikbaarheid van “betere” data (hogere dichtheid en/of hogere nauwkeurigheid) echter een rol: voor het gebruik van een verkeerde stroomsnelheid of waterdichtheid kan alleen gecorrigeerd worden als er stromingsdata of dichtheidsdata beschikbaar is. In deze paragraaf worden dergelijke correcties beschreven, inclusief suggesties voor andere/aanvullende databronnen.

3.4.2 Stroomsnelheid en -richting

De aangenomen constante stroomsnelheid heeft invloed op de squat-berekening. Deze procedure is al eerder beschreven in Niesten en Van der Mark (2018) en wordt voor de volledigheid hier deels herhaald. Bij de berekening van de dynamische inzinking en vertrimming wordt door CoVadem gebruik gemaakt van de formules van Ankudinov (Briggs, 2009). De maximale inzinking wordt hiermee berekend als functie van de “midden-inzinking” en de vertrimming, waarbij de inzinking (S_m) wordt berekend met:

$$S_m = (1 + K_p^S) P_{Hu} P_{F_{nh}} P_{+h/T} P_{Ch1} \quad (3.3.1)$$

Om de invloed van stroomsnelheid te bepalen is voornamelijk de “snelheidsparameter”, $P_{f_{nh}}$, van belang. De snelheidsparameter wordt bepaald volgens:

$$P_{f_{nh}} = F_{nh}^2 / \sqrt{1 - F_{nh}^2} \quad (3.3.2)$$

waarin F_{nh} het Froude-diepte getal is. Het Froude-diepte getal wordt vaker gebruikt in de hydrodynamica van scheepstoepassingen, en is gedefinieerd als:

$$F_{nh} = V_s / \sqrt{gh} \quad (3.3.3)$$

waarin V_s de relatieve vaarsnelheid is, g is de valversnelling en h de waterdiepte. De waterdiepte komt ook terug in de andere termen in vergelijking (3.3.1). De squat-berekening van de CoVadem-schepen is dus een iteratief proces, omdat de waterdiepte onbekend is. De relatieve vaarsnelheid is de snelheid van het schip ten opzichte van de stroomsnelheid van het water. Door gebruik te maken van de werkelijke stroomsnelheid in plaats van de constante waarde van 0.75 m/s en deze in te vullen in vergelijking (3.3.3), wordt een betere voorspelling van de dynamische inzinking verkregen. Dit is eerder geprobeerd in Niesten en Van der Mark (2018), maar alleen in havenbekkens, waar geen stroomsnelheden worden gemeten. Op locaties waar stroomsnelheid beschikbaar is (op doorgaande vaarwegen) vanuit bijvoorbeeld OSR of via metingen, moet het mogelijk zijn een nauwkeurigere inschatting van de dynamische inzinking te verkrijgen.

3.4.3 Zoutgehalte en watertemperatuur

Om te corrigeren voor watereigenschappen die de geluidssnelheid beïnvloeden, zijn de werkelijke en aangenomen watertemperatuur en het werkelijke en aangenomen zoutgehalte nodig. Door aangenomen watertemperatuur en zoutgehalte in te vullen in de formules van Coppens (Kinsler et al., 1982), zie ook hoofdstuk 3.3.4, volgt een aangenomen geluidssnelheid door water van 1482.4 m/s. Met deze geluidssnelheid en de gemeten kielspeling, kan de gemeten echotijd afgeleid worden. Indien er zout- en temperatuurdata beschikbaar is, kan vervolgens de werkelijke

geluidssnelheid berekend worden en in combinatie met de echotijd (gedeeld door 2, voor heen en terug) kan een gecorrigeerde kielspeling berekend worden. Voor deze correctie voldoen in principe een gemiddelde zoutconcentratie en temperatuur over de waterkolom. Gelaagdheid is van belang voor het zoutgehalte (mate van gelaagdheid varieert in ruimte en tijd), maar de invloed van gelaagdheid op de voorgestelde correctie zou weinig invloed moeten hebben (een klein energieverlies door reflectie daargelaten). Daarnaast is geconcludeerd dat de horizontale variatie in geluidssnelheid over het havengebied veel groter is dan de verticale variatie in de waterkolom (zie ook Figuur 4.1 voor twee geluidssnelheidsprofielen in zoet water en zout water).

Behalve door de geluidssnelheid, wordt de diepgang beïnvloed door de waterdichtheid. De diepgang wordt gemeten met een druksensor. De gemeten druk kan als volgt worden omgerekend naar een diepte:

$$D_{sensor} = \frac{p}{\rho_w g} \quad (3.3.4)$$

Waarin p de gemeten druk is (Pa), ρ_w de dichtheid van het water (kg/m³) en g de valversnelling (9.81 m/s²). Bij een drukmeting van 20.307 Pa (behorende bij een diepgang van ongeveer 2 m), resulteert de aanname dat de waterdichtheid gelijk is aan 1000 kg/m³ in plaats van 1035 kg/m³ in een verschil in diepgang van ongeveer 7 cm. Hiervoor is te corrigeren door de werkelijke waterdichtheid te gebruiken in de diepgangberekening. Er kan gebruik worden gemaakt van de (geïnterpoleerde) data van de zout- en temperatuurstations van HbR en RWS, of van OSR-resultaten. Een andere optie is om voor verschillende condities (getijfase, wind en rivierafvoer) een karakteristiek zout- en temperatuurveld te berekenen en dit toe te passen in de CoVadem-berekening.

3.4.4 Grote diepte

Voor het effect van grote diepte op de meting kan niet op deze manier gecorrigeerd worden, omdat dit veroorzaakt wordt door de instellingen van de meetapparatuur. Dit in tegenstelling tot de hiervoor genoemde factoren: deze leiden tot fouten in de berekening, en kunnen daarom verbeterd worden door een correctie toe te passen op de CoVadem-data. De enige manier om de kielspelingsmeting voor grotere dieptes te verbeteren, is om de instellingen van het echolood aan te passen. Dit is nu niet wenselijk, omdat CoVadem handmatige (niet-geautomatiseerde) acties wil vermijden. Eventueel kan de sterkte van het terugkeersignaal van het echolood worden gebruikt als kwaliteitsindicator voor de kielspelingsmeting.

3.4.5 Aanwezigheid van slib

Ook voor het effect van slib op de meting kan niet direct gecorrigeerd worden, omdat dit veroorzaakt wordt door de instellingen van de meetapparatuur. In principe zijn er drie categorieën te onderscheiden als het gaat om het effect van slib:

- 1 Het gebruik van een laag vermogen of hoge frequentie resulteert in geen of een slecht echosignaal, wat een fout introduceert in de meting. Deze fout is zichtbaar in de data als spikes of als een “fuzzy” signaal.
- 2 De ontvanger van het echolood krijgt een duidelijke echo terug, maar door het gebruik van een andere meetfrequentie dringt het geluidssignaal (minder) ver door en verschilt de waargenomen diepte van de multibeam-diepte. Strikt genomen is dit geen meetfout, maar de CoVadem-metingen zijn lastiger te duiden doordat een directie vergelijking met multibeam niet mogelijk is.
- 3 In het geval van sliblagen waarin de dichtheid geleidelijk toeneemt met de diepte, is er sprake van een inherente onzekerheid in de definitie van de bodemligging. Hiervoor heeft PIANC het concept *nautische diepte* gedefinieerd als “de diepte waarop de fysieke eigenschappen van de bodem een kritische grens bereiken waarbij contact met de kiel van het schip schade veroorzaakt of onacceptabele effecten heeft op de controle en manoeuvreerbaarheid van het schip” (Mulder & Sloots, 2008). Dit begrip is op meerdere manieren uit te leggen. De definitie die in de haven van Rotterdam wordt gehanteerd is “de diepte waarop een dichtheid van 1200 g/L wordt bereikt”.

Het laatste punt is een meer fundamentele vraag en niet op te lossen binnen CoVadem, daar het concept van nautische diepte op meerdere manieren kan worden gedefinieerd. De effecten in punten 1 en 2 kunnen worden verholpen: om de metingen in slibrijke gebieden te verbeteren (punt 1) of beter te kunnen duiden (punt 2), zouden de meetfrequentie en/of -vermogen van het echolood aangepast moeten worden.

4 Validatie van voorgestelde correcties

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een validatie gedaan van de voorgestelde correcties voor dichtheidseffecten (zout en temperatuur). Validaties zijn uitgevoerd op CoVadem-data in verschillende havenbekkens (Surveyor-data in paragraaf 4.2), en in de Nieuwe Maas bij de Brienoordbrug en de Nieuwe Waterweg bij de Maeslantkering (paragraaf 4.3). In de desbetreffende secties wordt nader toegelicht waarom deze locaties zijn gekozen.

4.2 Toepassing op Surveyor-data

4.2.1 Aanpak

Tussen het inwinnen van CoVadem-data en de multibeam-data die als referentie worden gebruikt, verstrijkt vaak een bepaalde periode. In 2018 zijn er enkele schepen van het HbR toegevoegd aan de CoVadem-vloot waaronder twee RPA-schepen die regelmatig multibeam-surveys uitvoeren. Om het effect van bodemverandering tussen de twee metingen weg te kunnen strepen, is daarom onderzocht in hoeverre de CoVadem-metingen van een surveyor tijdens een multibeam-meting gebruikt kunnen worden.

Voor de vergelijking tussen CoVadem-data en multibeam-data dient opgemerkt te worden dat:

- Een multibeam-survey geen gebruik maakt van dezelfde waterstanden als CoVadem. Voor een multibeam-survey wordt de positionering (zowel horizontaal als verticaal) afgeleid van nauwkeurige GPS-data. Er wordt dus geen diepte omgerekend naar bodemligging; in plaats daarvan wordt direct de bodemhoogte bepaald¹⁰. De onzekerheid in waterstanden in de verwerking van CoVadem-data blijft dus een rol spelen in de vergelijking tussen CoVadem- en multibeam-data.
- De correctie voor zout en temperatuur zoals gedemonstreerd in paragraaf 3.4, wordt niet toegepast op multibeam-data. Direct voor het inwinnen van de multibeam-data wordt een geluidssnelheidsprofiel bepaald (soms wordt deze zelfs tijdens de survey nog aangepast als het vermoeden bestaat dat metingen afwijken). Een voorbeeld van een dergelijk profiel is gegeven in Figuur 4.1. Deze profielen worden gebruikt om terugkeertijden om te zetten naar gemeten diepte. Helaas worden deze profielen vaak niet opgeslagen, en worden de Surveyor CoVadem-data dus gecorrigeerd voor zout en temperatuur zoals beschreven in paragraaf 3.4.
- De surveyor-schepen hebben geen beladingsmeter aan boord, maar hebben ook geen lading en variabele diepgang. Er is uitgegaan van een vaste diepgang van 1.6 m.
- Helaas wordt de standaard echolood aan boord van de surveyors vaak uitgezet tijdens een multibeam-opname. De reden hiervoor is waarschijnlijk dat de (lagere-frequentie) echolood de multibeam-meting verstoort. Hierdoor was er op het moment van vergelijken weinig data beschikbaar.

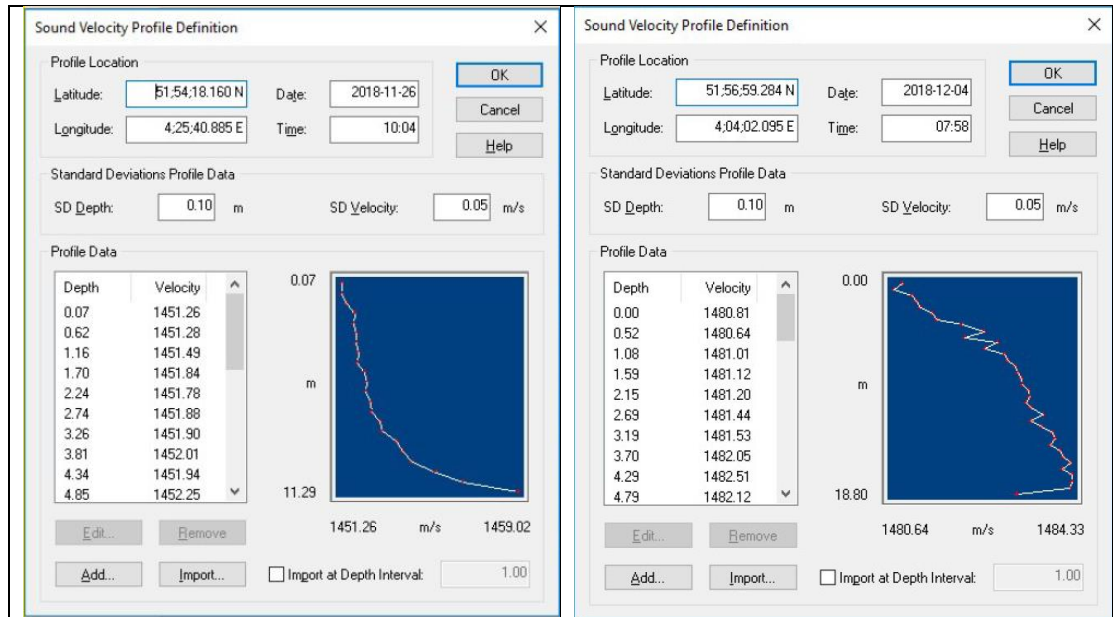
Voor de vergelijking tussen surveyor CoVadem- en surveyor multibeam-data zijn in totaal zeven multibeam-surveys bekeken in de periode september – december 2018, waarvan bekend was dat het echolood tegelijkertijd aanstond (er kwam positiedata binnen in het CoVadem-systeem binnen het tijdvak waarin de survey was uitgevoerd):

1 Parkhaven	10-09-2018	Waterstandsmeter Parkhaven
2 Botlek	04-10-2018	Waterstandsmeter Geulhaven
3 3 ^e Petroleumhaven	04-10-2018	Waterstandsmeter Geulhaven
4 Merwehaven	05-12-2018	Waterstandsmeter 1 ^e Eemhaven

¹⁰ Voor zover bekend wordt de hoogte van de multibeam-transducer niet opgeslagen.

5 Botlek	11-12-2018	Waterstandsmeter Geulhaven
6 3 ^e Petroleumhaven	11-12-2018	Waterstandsmeter Geulhaven
7 Prinses Amaliahaven	11-12-2018	Waterstandsmeter Amaliahaven

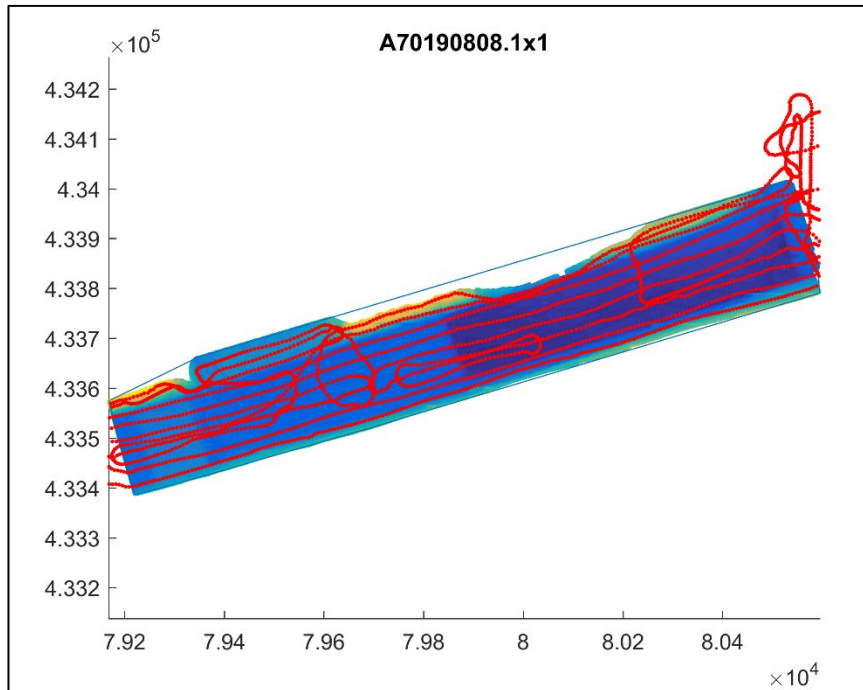
Hierbij is er bewust voor gekozen om onderscheid te maken tussen surveys in september en surveys in december, om de temperatuurcorrectie te valideren. Daarbij liggen de Parkhaven en de Merwehaven nog in grotendeels zoetwatergebied, terwijl de Botlek-, 3e Petroleum- en Prinses Amaliahaven hogere zoutwaardes bevatten. Hoewel er geen zoutmetingen beschikbaar waren dicht bij de survey-data, kan het interessant zijn om te bekijken of de metingen in zout water een aantoonbaar grotere afwijking vertonen dan in zoet water. Voor de temperatuurcorrectie is gebruik gemaakt van metingen bij Hoek van Holland en Lekhaven.



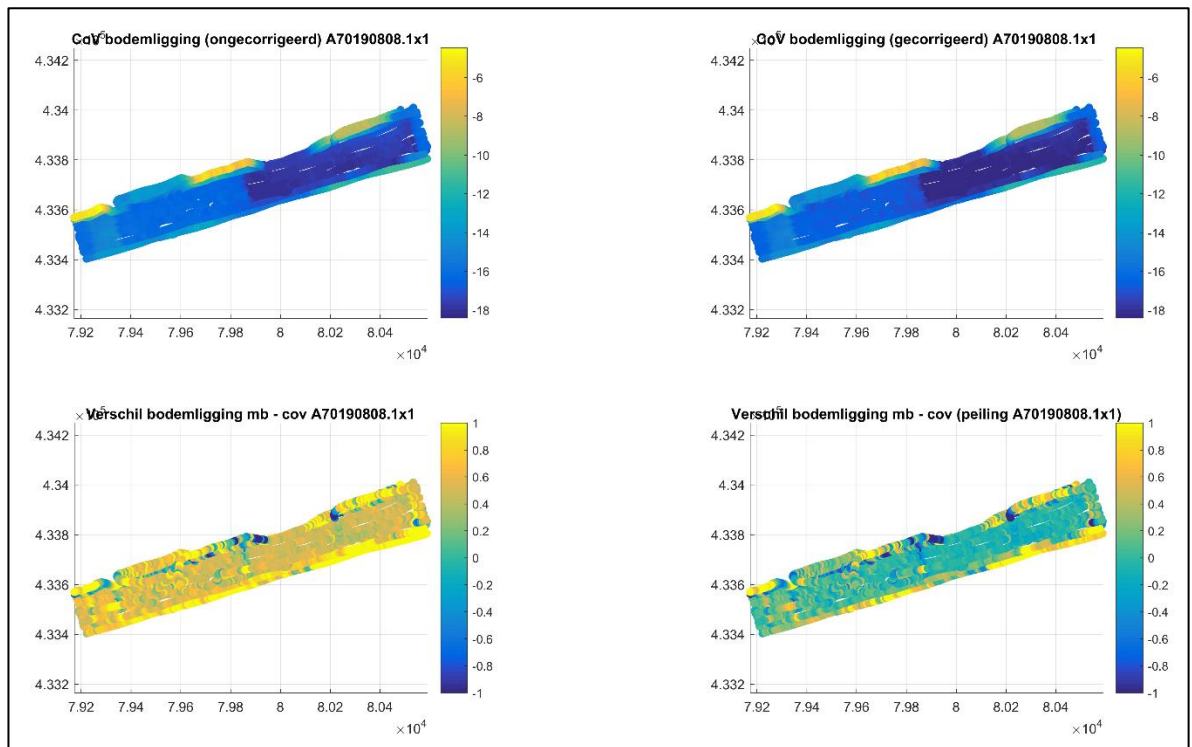
Figuur 4.1 Twee voorbeelden van geluidssnelheid-profielen opgenomen in de Lekhaven op 26-11-2018 (links) en in de Amazonehaven op 4-12-2018 (rechts).

4.2.2 Resultaten en conclusies

In deze paragraaf worden de metingen van 11-12-2018 in de Botlekhaven nader geanalyseerd. De overige resultaten zijn opgenomen in bijlage A. De gevaren track tijdens de Botlek-meting is weergegeven in Figuur 4.2. De ongecorrigeerde CoVadem-data heeft een afwijking tot 0.8 m (zie Figuur 4.3 linksonder). Na toepassing van de temperatuurcorrectie zoals genoemd in hoofdstuk 3.4 is de afwijking met 0.2 m aanzienlijk kleiner. De gemeten temperatuur ligt gedurende de meting rond 7.1 – 7.3 °C. Het verschil met de kalibratietemperatuur van het echolood (20 °C) is daarom vrij groot. Dit bevestigt naast de goede werking van de voorgestelde temperatuurcorrectie, dat het effect van een andere temperatuur op de kielspelingsmeting inderdaad kan oplopen tot enkele decimeters.



Figuur 4.2 Gevaren track tijdens de multibeam-survey in Botlekhaven (11-12-2018).



Figuur 4.3 Temperatuurcorrectie toegepast tijdens de multibeam-survey in Botlekhaven (11-12-2018). De plots bovenaan geven de CoVadem-bodemligging weer zonder (links) en met (rechts) temperatuurcorrectie. De plots onderaan het verschil tussen multibeam-bodemligging en ongecorrigeerde (links) en gecorrigeerde (rechts) CoVadem-bodemligging.

Ook de meting in de 3^e Petroleumhaven op 11-12-2018, die in feite deel uitmaakt van dezelfde survey, kon op deze manier gecorrigeerd worden (resultaten in bijlage A.4). Het verschil tussen multibeam- en CoVadem-bodemligging neemt na de temperatuurcorrectie af van 0.5 m naar 0.1 m in de 3^e Petroleumhaven. Een opvallende track is die in de Parkhaven (bijlage A.1). De CoVadem-bodemligging vertoont hier een flinke sprong en neemt hier plotseling af van -6 naar -17 m+NAP, en gedurende de rest van de survey blijft de CoVadem-bodemligging veel te diep. Nog altijd is niet bekend wat hier de oorzaak van is. Duidelijk is wel dat de sprong afkomstig is uit de ruwe kielspelingsmeting en niet is geïntroduceerd met de omrekening naar waterdiepte (toevoeging diepgangdata) of de omrekening naar bodemligging (toevoeging waterstandsdata).

De andere surveys waren helaas helemaal niet bruikbaar: de afwijkingen van deze metingen waren, net als in een deel van de Parkhaven zo groot, dat een correctie voor temperatuur geen oplossing biedt. Hier moet een andere oorzaak de reden voor de afwijking in bodemligging zijn, zoals een te laag vermogen waardoor de bodem niet wordt bereikt, of een verstoord echoloodsignaal (bijvoorbeeld boven steile gladde hellingen kan een echolood niet goed meten, zo is in het MARIN-lab geconstateerd). De surveys in de Prinses Amaliahaven (11-12-2018) en 3^e Petroleumhaven (4-10-2018) zijn niet meegenomen, omdat de CoVadem-tracks gedurende deze survey geen kielspelingsdata leverden.

Uit de analyse van de surveyor-data kan een aantal conclusies worden getrokken:

- 1 Voor een verkeerde aanname van de geluidssnelheid kan gecorrigeerd worden door de werkelijke geluidssnelheid tijdens een CoVadem-meting te berekenen met waargenomen temperatuur- en saliniteitsdata. Het effect van een dergelijke correctie kan oplopen tot decimeters.
- 2 In de CoVadem-data komen afwijkingen van meerdere meters ten opzichte van de multibeam-data voor. In enkele gevallen (Merwehaven, Botlekhaven in december) geldt dit voor de gehele dataset. In het geval van de Parkhaven ligt een deel van de CoVadem-bodemligging dicht bij de multibeam-bodemligging, en hebben de overige CoVadem-data een afwijking van meerdere meters. Wat de oorzaak is van deze afwijkingen is nog altijd niet duidelijk (zie ook sectie 3.3.7). Er wordt aangeraden om de oorzaak van deze afwijkingen verder te onderzoeken en in de tussentijd uit de CoVadem-database te verwijderen.
- 3 Voor de multibeam-peilingen worden aanvullende data verzameld, zoals de hoogte van de multibeam en geluidssnelheidsprofielen. Omdat deze meestal niet opgeslagen worden, zijn deze data vooralsnog niet gebruikt voor de berekening van de bodemligging uit CoVadem-data. Er wordt aanbevolen om deze data voorlopig wel op te slaan, zodat de onzekerheid van de gebruikte waterstanden en het effect van een variërende geluidssnelheid op de CoVadem-bodemligging in kaart kan worden gebracht.

4.3 Toepassing op de Maeslantkering en Brienoordbrug

4.3.1 Aanpak

Eerder is al genoemd dat het gebruik van multibeam-data als referentiebodem het risico met zich mee brengt dat er bodemveranderingen hebben plaatsgevonden tussen de twee metingen. Naast het gebruik van gelijktijdige metingen (vorige paragraaf), kan dit risico vermeden worden door CoVadem-data te analyseren op een locatie waar de bodemligging stabiel is. Eén van deze locaties in het havengebied is de drempel van de Maeslantkering. Een bijkomend voordeel van deze locatie is dat er waterstandsmetingen beschikbaar zijn direct achter de Maeslantkering, en dat zout- en temperatuurwaarden worden gemeten bij Hoek van Holland, slechts enkele kilometers benedenstrooms van de kering (zie Figuur 4.4). Een andere locatie waar bekend is dat de bodemligging relatief stabiel is, is het gebied rondom de bocht bij Rotterdam in de Nieuwe Maas (zie Figuur 4.5). Ook hier zijn waterstandsmetingen en zout- en temperatuurmetingen beschikbaar. Op beide locaties zijn de zout- en temperatuurmetingen op verschillende dieptes beschikbaar: op -2.5, -4.5 en -9.0 m+NAP achter de Maeslantkering en op -2.5 en -6.5 m+NAP bij de

Brienoordbrug. Op beide locaties is ervoor gekozen om gebruik te maken van de diepste meting. Bij de Maeslantkering ligt deze meting ongeveer halverwege de waterkolom en wordt daarom beschouwd als het meest representatief voor de gemiddelde zout- en temperatuurwaarden. Bij de Brienoordbrug wordt, conform de verwachting, weinig verschil geobserveerd tussen de metingen op -2.5 en -6.5 m diepte.

Op beide locaties is gekeken in hoeverre de voorgestelde correctie voor zoutgehalte en temperatuur de CoVadem-data verbetert, i.e. dichter bij de multibeam-data komt te liggen. Hierbij moet het gebied rondom de Brienoordbrug vooral beschouwd worden als validatiecase voor de temperatuurcorrectie, omdat er nauwelijks zout water doordringt zo ver bovenstrooms. Op de Maeslantkering worden beide correcties toegepast. De methodiek staat beschreven in paragraaf 3.4. Voor beide locaties zijn twee periodes van een week geanalyseerd: 20 t/m 27 januari 2018 en 11 t/m 18 juni 2018.



Figuur 4.4 Overzicht van meetstations in de buurt van de Maeslantkering. De Maeslantkering zelf is aangegeven rechts onderin de afbeelding (bron: www.waterinfo.rws.nl).

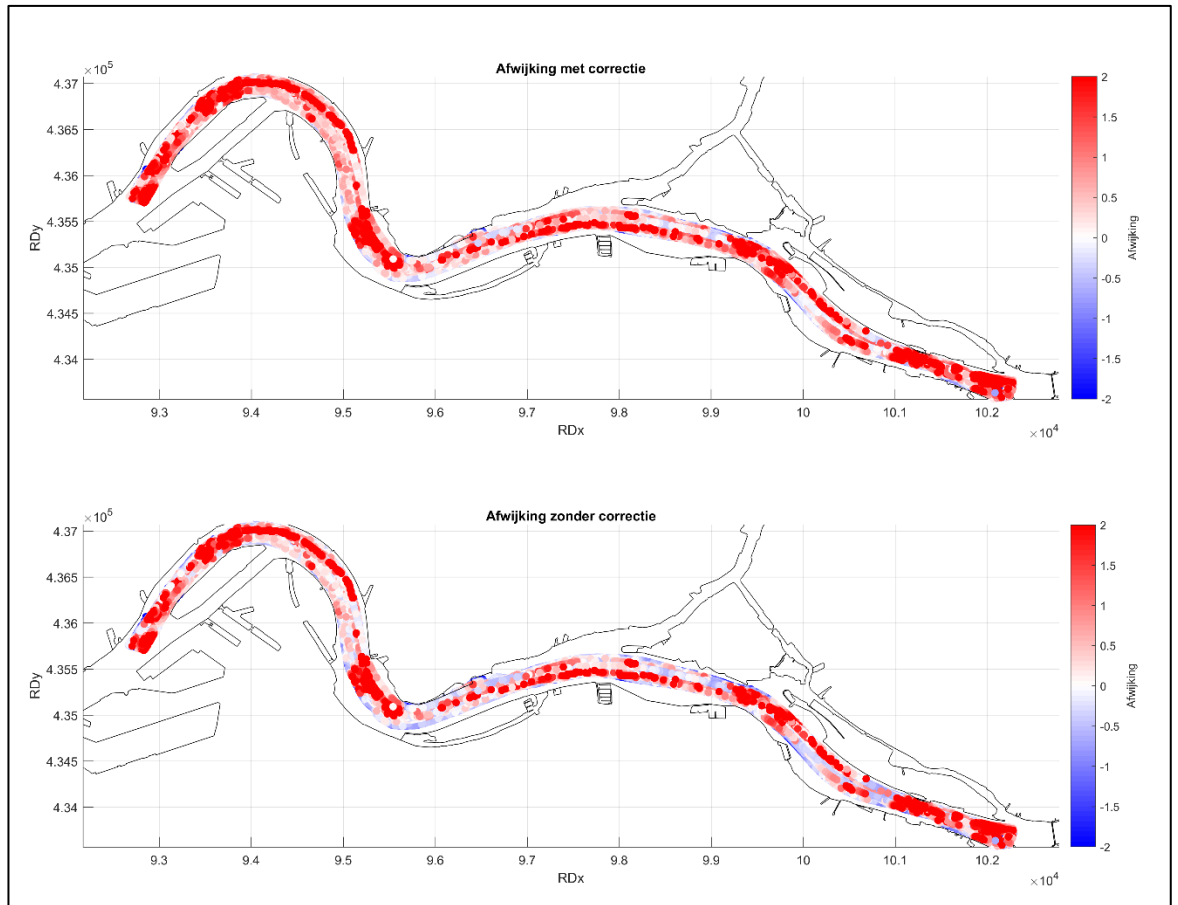


Figuur 4.5 Overzicht van meetstations in de buurt van Brienenoordbrug (bron: www.waterinfo.rws.nl).

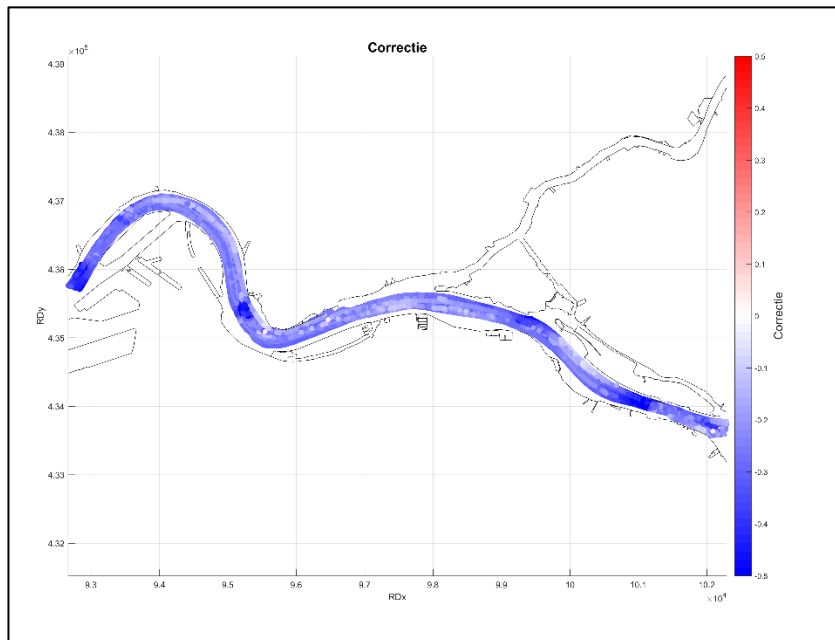
4.3.2 Resultaten

Het resultaat van de correctie toegepast bij de Brienenoordbrug in januari staat weergegeven in Figuur 4.6 en Figuur 4.7. De overige resultaten van de Brienenoordbrug in juni staan in bijlage B. In de resultaten van de Maeslantkering is uiteindelijk geen onderscheid gemaakt tussen zomer en winter (temperatuur), vanwege de lage databeschikbaarheid.

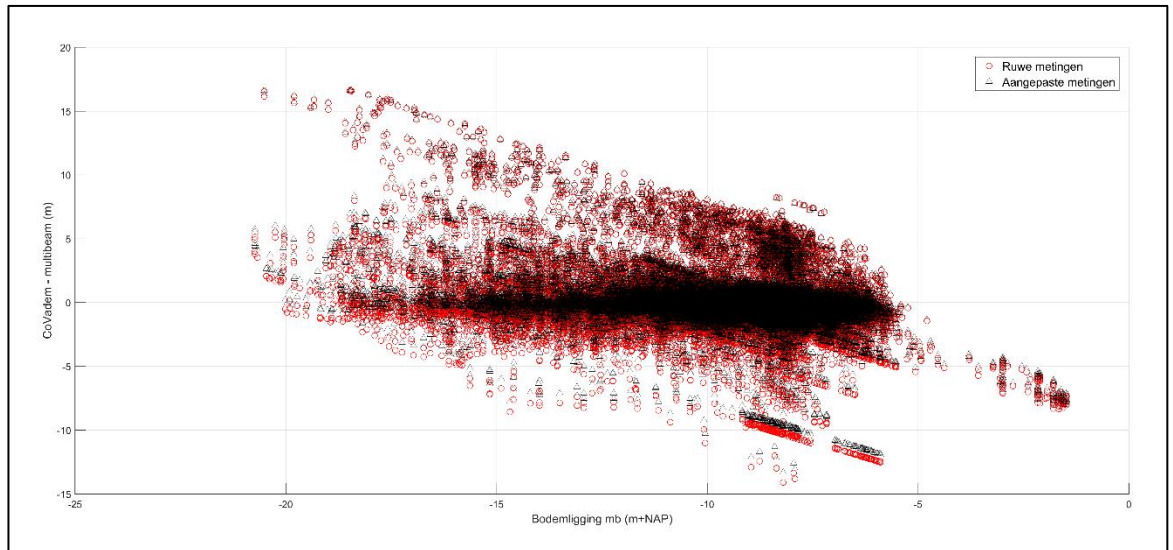
Wat onmiddellijk opvalt is dat de temperatuurcorrectie bij de Brienenoordbrug een groot verschil (orde grootte decimeters, zie Figuur 4.7 en Figuur 4.8) maakt en de CoVadem-data dichter bij de multibeam-data brengt. Tegelijkertijd heeft een aanzienlijk deel van de data echter een afwijking van meer dan 2 m; er is dus duidelijk meer aan de hand dan alleen een effect op de meting van temperatuur en zout. Zoals verwacht is het effect van de correctie in juni (opgenomen in bijlage B) kleiner, omdat de watertemperatuur dan gemiddeld 22 °C is en daarmee dichter bij de kalibratietemperatuur van het echolood ligt. Ook in juni zijn er grotere afwijkingen zichtbaar die niet verklaard kunnen worden met het effect van watertemperatuur en zoutgehalte alleen. Bij de Maeslantkering (Figuur 4.9 en Figuur 4.10) is een vergelijkbaar patroon te zien.



Figuur 4.6 *Temperatuur en zoutcorrectie toegepast op het gebied rondom de Brienoordbrug. Boven: Verschil tussen bodemligging CoVadem – bodemligging multibeam met correctie. Onder: Verschil tussen bodemligging CoVadem – bodemligging multibeam zonder correctie.*



Figuur 4.7 *Grootte van de correctie op de CoVadem-data bij de Brienoordbrug in januari. Deze plot geeft het verschil tussen de twee subplots in Figuur 4.6.*



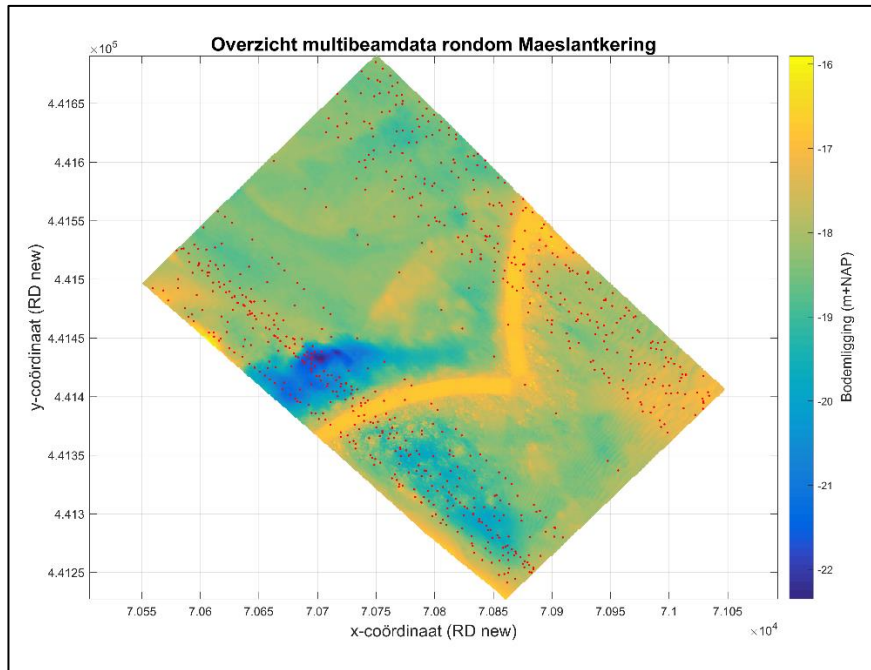
Figuur 4.8 Verschil tussen de CoVadem bodemligging en multibeam bodemligging, uitgezet tegen de referentie bodemligging. Zwart: gecorrigeerd voor zout en temperatuur. Rood: Niet gecorrigeerd.

Voor de analyse bij de Maeslantkering was het oorspronkelijk de bedoeling om de twee periodes in januari en juni apart de beschouwen. Na uifilteren van onrealistische kielspelingen bleven er echter zo weinig data over, dat het weinig zinvol was om de datasets te scheiden. Figuur 4.9 laat de overgebleven CoVadem-tracks zien in de twee weken in januari en juni. Behalve het samennemen van de twee periodes, is ook besloten om alle (gefilterde) CoVadem-data om het kunstwerk heen te gebruiken in plaats van alleen de metingen bovenop de drempel. Het geanalyseerde gebied is aangegeven met behulp van de multibeam-bodemdata in Figuur 4.9. Dit houdt in dat het argument voor de locatiekeuze, te weten een locatie met vaste bodem om bodemveranderingen tussen de opnamedatum van CoVadem en multibeam (juli 2017) uit te sluiten, hier niet opgaat.

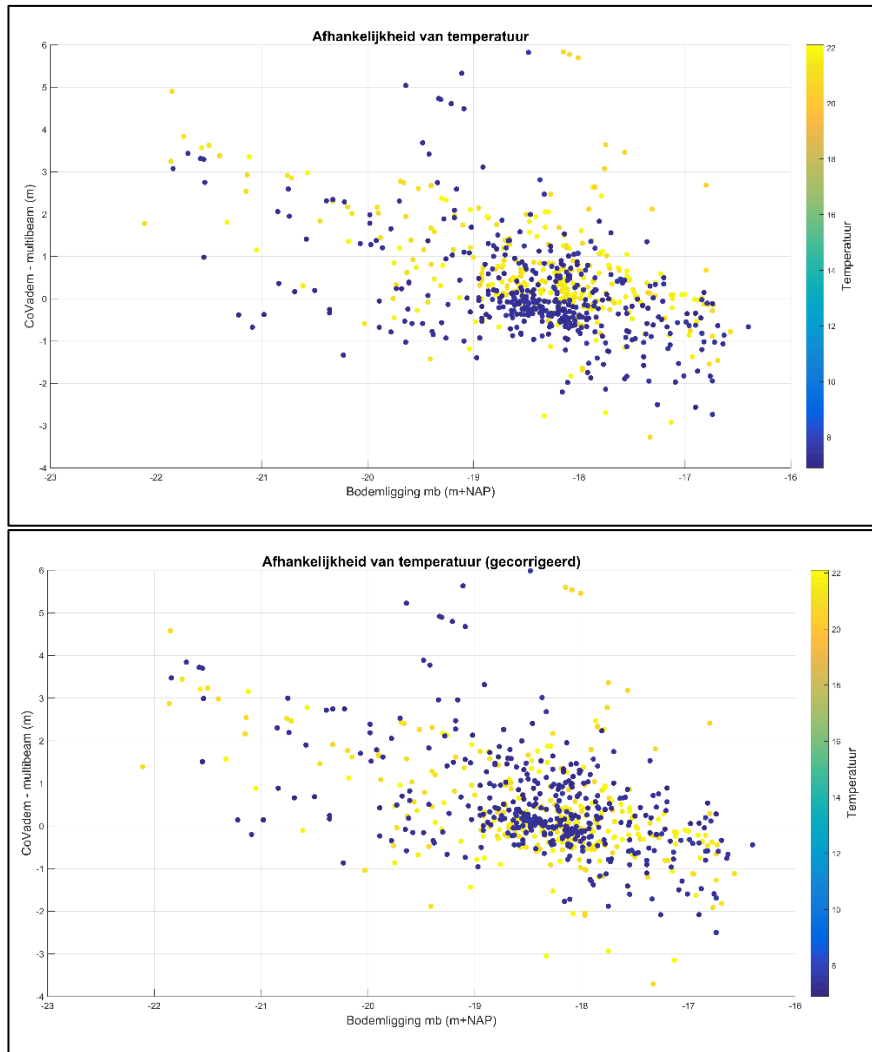
Niettemin zijn er interessante resultaten te zien:

- In Figuur 4.10 is het verschil tussen CoVadem- en multibeam-bodemligging uitgezet tegen de werkelijke bodemligging. Hier is te zien dat de correctie een deel van de puntenwolk dichter naar een verschil van nul brengt. Dit is het deel dat in januari is gemeten, bij een watertemperatuur van ongeveer 7 °C.
- Ook voor de correctie voor saliniteit is een dergelijke plot gemaakt, maar hier valt nauwelijks een conclusie uit te trekken. De reden is dat de data zoveel ruis vertonen, dat er nauwelijks een verband tussen saliniteit en meetfout te zien is (Figuur 4.11). In de data is slechts een lichte trend zichtbaar waarin het verschil tussen CoVadem en multibeam toeneemt met een toenemend zoutgehalte. Omdat het hier maar om enkele tracks gaat (verticale clusters in Figuur 4.11), kan een duidelijke correlatie tussen meetfout en zoutgehalte niet uit deze data worden afgeleid.

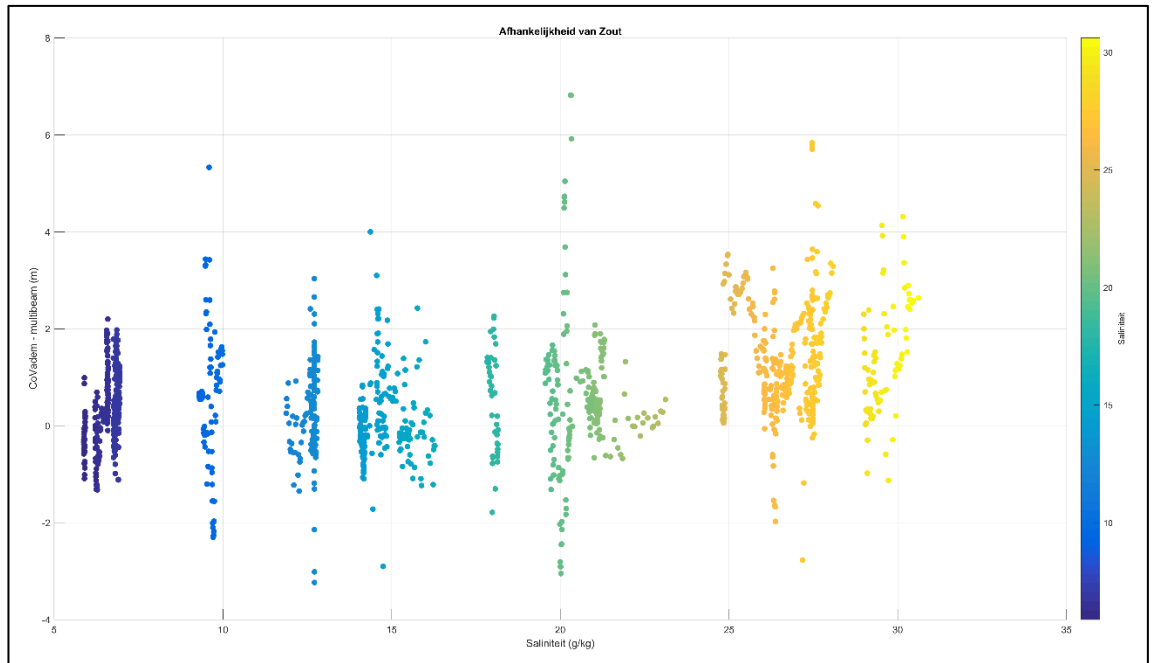
Wat verder opvalt in zowel de data bij de Brienoordbrug als de Maeslantkering, is dat er wel een correlatie lijkt te zijn tussen de afwijking met multibeam-data en de diepte. Bij een grotere diepte neemt de meetfout toe. Een sluitende verklaring hiervoor is nog niet gevonden. Mogelijk is het standaard vermogen van de echoloden te klein voor nauwkeurige metingen op grotere diepte (zie ook hoofdstuk 3.3.5).



Figuur 4.9 Overzicht van CoVadem-tracks over de Maeslantkering (in rood de locaties van de metingen) na uitfilteren van onrealistische kielspelingsmetingen. De drempel van de kering is zichtbaar in de twee “boogvormen” met een hoogte van ongeveer 17 m-NAP. De achtergrond geeft de bodemhoogte volgens de multibeam aan.



Figuur 4.10 Verschil tussen CoVadem bodemligging en multibeam-bodemligging, uitgezet tegen de referentie (multibeam) bodemligging. Boven: zonder temperatuurcorrectie en onder: met temperatuurcorrectie. De kleuren van de individuele metingen geven de watertemperatuur tijdens de meting aan. In januari was het water ongeveer 7 °C (blauw) en in juni bijna 22 °C (geel).



Figuur 4.11 Verskil tussen CoVadem en multibeam-bodemligging, uitgezet tegen zoutgehalte (saliniteit) tijdens de meting. De kleurschaal geeft hetzelfde aan als de x-as, namelijk saliniteit in g/kg.

5 Zichtbaarheid bodemtrends

5.1 Inleiding

De CoVadem-bodemligging bevat nog veel en grote afwijkingen ten opzichte van multibeam metingen. Echter, omdat het wel om heel veel meetdata gaat, is de verwachting dat daar toch wellicht bodemtrends uit te halen zijn. In dit geval wordt niet naar individuele metingen of individuele tracks gekeken, maar worden alle beschikbare data over een langere periode samen genomen om te zien of er bodemtrends af te leiden zijn.

5.2 Rationale en analyse

5.2.1 Stap 1

In de voorgaande hoofdstukken zijn correcties voor invloeden van zout en temperatuur voorgesteld waarmee de CoVadem-data dichter bij de werkelijkheid komen te liggen. De resultaten hiervan zijn positief, maar om dit voor alle CoVadem-data toe te kunnen passen is een dicht meetnet of voorspelinstrument voor zout en temperatuur nodig. Daarom is in eerste instantie besloten om te starten met een CoVadem-dataset, die niet is gefilterd en niet gecorrigeerd zoals in voorgaande hoofdstukken is gepresenteerd.

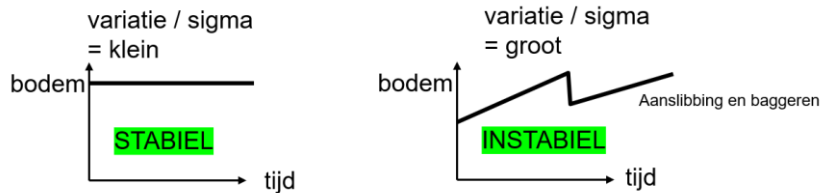
We weten dat bijvoorbeeld zoutgehalte ruimtelijk varieert, en dat daarmee de fout in de CoVadem-data ruimtelijk varieert. Door een klein gebied te beschouwen waarbinnen die ruimtelijke variatie klein/verwaarloosbaar is, is het bij een onderlinge vergelijking geen probleem om te werken met een ongecorrigeerde set. Het gaat er in deze analyse namelijk vooral om om data onderling te vergelijken ten behoeve van trends, en niet om de absolute bodemligging exact te krijgen. Het gebied dat we in beschouwing nemen is de Waalhaven. Van deze haven weten we waar aanslibbing optreedt en waar er nu en dan gebaggerd wordt, en waar de bodem helemaal niet verandert in de tijd.

Op locaties waar de bodem heel stabiel is, verwachten we in de tijd weinig variatie in bodemligging. Op locaties waar de bodem aanslibt en waar gebaggerd wordt, zou in de tijd meer variatie in bodemligging moeten zijn (Figuur 5.1). Voor een CoVadem-dataset wordt gekeken of deze verwachting ook zichtbaar is.

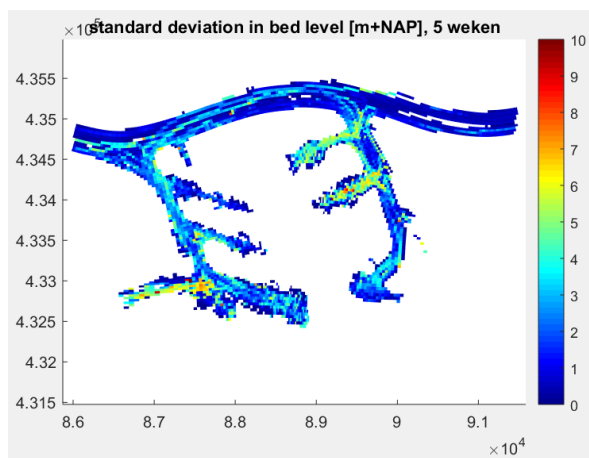
Voor het verwerken van de data (unieke, individuele meetpunten, steeds op andere locaties en andere tijdstippen) wordt gebruik gemaakt van een fijn rooster. Dit heeft voordelen, omdat data op roosters eenvoudig van elkaar afgetrokken kunnen worden (ten behoeve van trendbepaling of vergelijking tussen situatie a en b), en omdat een individuele meting afwijkend kan zijn maar door verwerking van een groter aantal meetpunten krijgen we waarschijnlijk alsnog een goed beeld van bijvoorbeeld de gemiddelde bodem op een locatie. Uitschieters worden hiermee weggemiddeld.

De standaardafwijking van alle bodemligging-waarden binnen een rooster cel is bepaald als maat voor variatie in de tijd. Ook het gemiddelde is bepaald. Hierbij moet een keuze gemaakt worden voor een tijdsvenster (over alle meetpunten binnen die periode wordt de standaardafwijking bepaald). Het proces van aanslibbing kost tijd, dus het tijdsvenster moet niet te kort zijn om deze bodemontwikkeling tot uitdrukking te laten komen. Een te kort tijdsvenster zal ook tot gevolg hebben dat voor grote delen van de haven geen standaardafwijking bepaald kan worden, omdat niet elke dag overal een binnenvaartschip vaart. Er is gekozen om voor meerdere tijdsvensters de standaardafwijking te bepalen, te weten 1 week, 2 weken, 3 weken, enzovoorts, tot en met 8 weken.

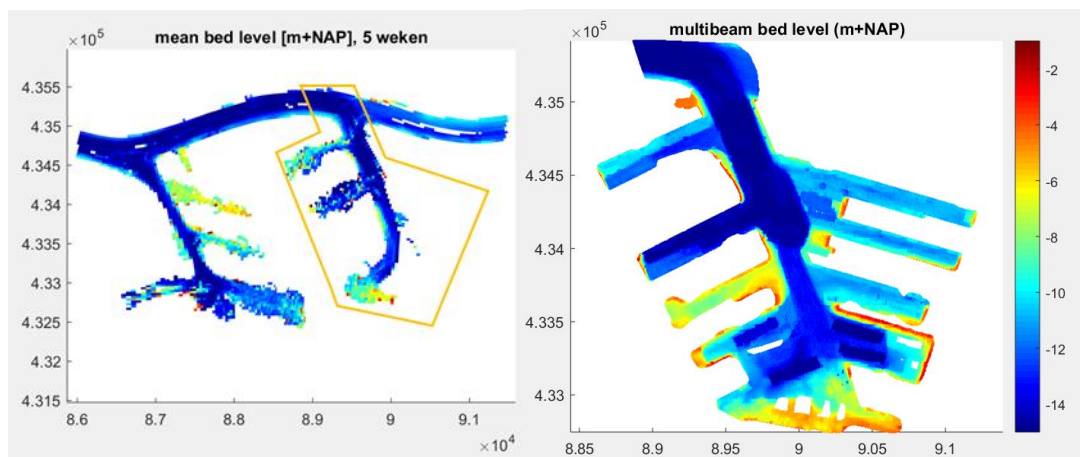
Het resulterende beeld is voor alle tijdsvensters ongeveer gelijk. Bij een tijdsvenster van 1 week zijn er inderdaad gaten zichtbaar, vanaf 4 weken tot 8 weken is er geen verschil zichtbaar. Figuur 5.2 toont het resultaat voor een venster van 5 weken. Uit de figuur kunnen we concluderen dat de variatie tussen tracks vele malen groter is dan de variatie in bodemontwikkeling. Daarmee zegt de standaardafwijking dus niets over de bodemontwikkeling. Individuele tracks zijn zichtbaar die afwijkend zijn ten opzichte van andere tracks en die de standaardafwijking beïnvloeden. Uit dit figuur valt niet af te lezen waar de haven stabiel is dan elders. Wel kunnen we concluderen dat het gemiddelde beeld in bodemligging visueel aardig goed overeen komt met de multibeam-meting (Figuur 5.3). Dit gegeven gebruiken we bij de volgende stap.



Figuur 5.1 Variatie in bodemligging is klein of groot bij stabiele of instabiele bodem.



Figuur 5.2 Variatie in de Waalhaven, bepaald uit CoVadem data. Standaardafwijking bepaald per roostercel en voor een tijdsvenster van 5 weken (2 apr - 7 mei 2017). Over alle CoVadem meetpunten binnen een cel en binnen het venster van 5 weken is de standaardafwijking bepaald.



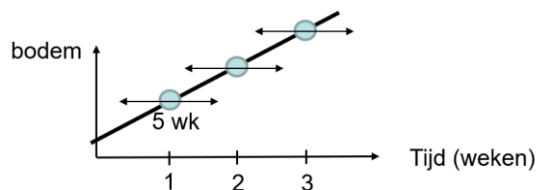
Figuur 5.3 Bodemligging in de Waalhaven, bepaald uit CoVadem data (links) en volgens een multibeam-meting uit mei en juni 2017 (rechts). De oranje contour links geeft de uitsnede van het rechter figuur aan. Het Gemiddelde is bepaald per roostercel en voor een tijdsvenster van 5 weken (2 apr - 7 mei 2017). Over alle CoVadem meetpunten binnen een cel en binnen het venster van 5 weken is het gemiddelde bepaald.

5.2.2 Stap 2

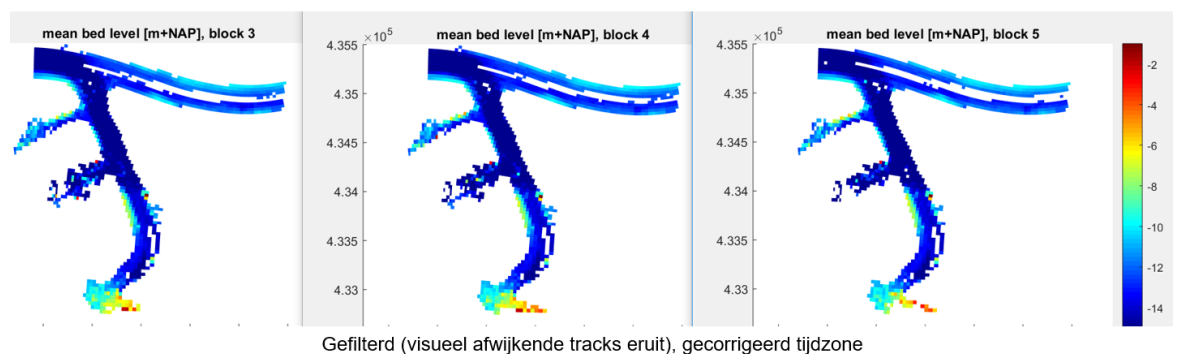
De variatie binnen de metingen is groot, en daarom hebben we een andere aanpak geprobeerd. Eerst hebben we de “hele foute tracks” eruit gehaald, die duidelijk afweken van de werkelijkheid, omdat die de analyse negatief beïnvloeden. In deze specifieke casus is daar geen automatische routine voor gebruikt, maar is handmatig voor ieder schip (ship-id) in de database gekeken of die veel uitschieters bevatte.

Omdat het gemiddelde beeld aardig goed overeen komt met de multibeam, hebben we een lopend gemiddelde toegepast waarbij het tijdsvenster van 5 weken steeds een stukje (1 week is toegepast) verschuift in de tijd (Figuur 5.4). Er zijn op deze manier voor de Waalhaven 9 gemiddelde bodemliggingen bepaald met een interval van 1 week. Figuur 5.5 toont ter illustratie 3 van deze achtereenvolgende gemiddelde bodemliggingen.

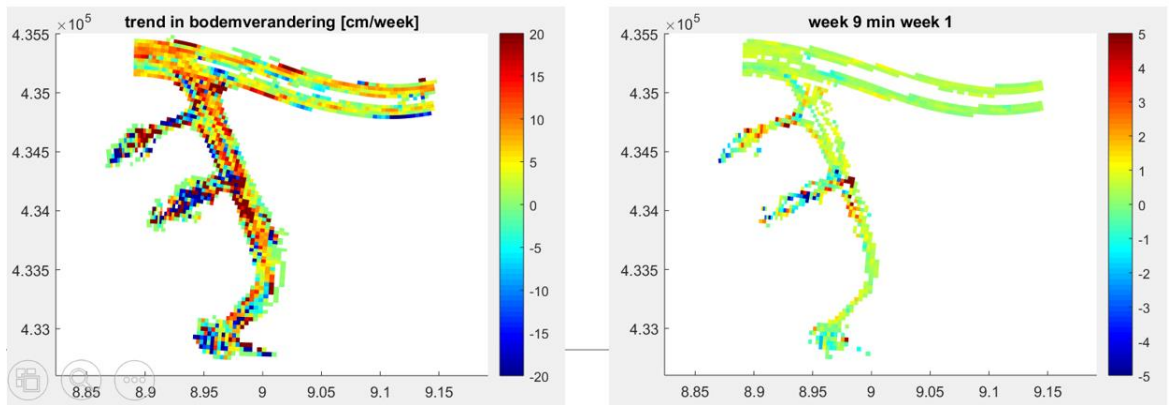
Vervolgens is op twee manieren geprobeerd om uit de reeks van gemiddelde bodemliggingen af te leiden of er een trend waarneembaar is. Bij een stabiele bodem is de richtingscoëfficiënt (helling van de lijn in Figuur 5.4) ordegrrootte nul, bij een niet stabiele bodem is deze positief of negatief (aanslibbing of erosie/baggeronderhoud). Daarom is (1) de richtingscoëfficiënt over de reeks van 9 weken bepaald, en (2) het verschil tussen week 9 en week 1 bepaald. Het resultaat is zichtbaar in Figuur 5.6. De richtingscoëfficiënt geeft een onduidelijk beeld, is zowel positief als negatief en hieruit valt niet op te maken of een gebied dynamisch dan wel stabiel is. Het verschil tussen twee bodemliggingen geeft een betrouwbaarder beeld. De haven is grotendeels geel/groen, wat we ook verwachten op basis van kennis uit het veld. Onze voorzichtige conclusie is dat het verschil tussen twee gemiddelde bodemliggingen (met voldoende groot interval; hier 9 weken) een indicator kan zijn voor de dynamiek. Nadere uitwerking is nodig: de grootte van het interval, andere gebieden, automatische routine voor het verwijderen van foutieve tracks, bijvoorbeeld aan de hand van de bekende waarden voor de onderhoudsdiepte per onderhoudsvak (NGD-vakken).



Figuur 5.4 Trend in bodem zichtbaar door bepaling van gemiddelde beelden in de tijd.



Figuur 5.5 Gemiddelde bodemligging voor 3 momenten in de tijd, interval van 1 week.



Figuur 5.6 Trend in gemiddelde bodemligging op basis van reeks van 9 weken. (links) richtingscoëfficiënt, (rechts) verschil tussen week 1 en week 9.

5.3 Conclusie

Op basis van de analyse naar bodemtrends aan de hand van CoVadem data uit de Waalhaven, komen we tot de volgende bevindingen:

- Het idee “er is heel veel data en de slechte data vallen weg tussen de grotere hoeveelheid goede data” gaat, in ieder geval voor de Waalhaven, nog niet op. Eén foutieve track beïnvloedt de gemiddelde bodemligging enorm. Met de ambitie van CoVadem om op korte termijn op te schalen naar een vloot van 250 schepen, zal dit straks mogelijk wel opgaan.
- De standaardafwijking is geen geschikte maat gebleken voor variabiliteit in bodemligging, aangezien de variatie binnen de CoVadem bodemhoogte-metingen momenteel groter is dan de variatie in werkelijke bodemligging.
- Het verschil tussen twee kaartbeelden met gemiddelde bodemligging kan een indicator zijn voor de dynamiek.

6 Overzicht invloeden en prioritering vervolgonderzoek

6.1 Inleiding

Als voorzet voor eventueel vervolgonderzoek is een tabel opgesteld met mogelijke stappen om de meerwaarde van CoVadem-data in het havengebied te vergroten. Dit is een gezamenlijk onderdeel van het project geweest, waaraan alle partijen middels een overlegsessie hebben bijgedragen. In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk (6.2) wordt de tabel zelf gepresenteerd. In hoofdstuk 6.3 worden de gemaakte keuzes kort gemotiveerd. Hierbij zal vaak worden verwezen naar de voorgaande hoofdstukken voor de meer inhoudelijke toelichting.

6.2 Tabel vervolgonderzoek

Alle genoemde effecten in de tabel zijn al eerder beschreven in hoofdstuk 3. Om het geheel overzichtelijker te maken zijn de effecten opgedeeld in vier hoofdcategorieën, namelijk meetfouten in de meting van kielspeling, fouten in de berekening van de inzinking van het schip, fouten in de positiebepaling van de meting en afhankelijkheid van externe data. In de eerste drie categorieën is nog onderscheid te maken tussen 1) fouten bij het verwerken van de gemeten data en 2) fouten bij het inwinnen van de data. Fouten in de eerste categorie kunnen verbeterd worden door een correctie toe te passen op de ingewonnen data. Fouten in de tweede categorie kunnen alleen gecorrigeerd worden door de meetmethode aan te passen. Voor alle deze gevallen is een inschatting gemaakt van (kolommen):

- De orde grootte van het effect. Dit is een schatting van het *maximale* verschil dat het genoemde effect kan veroorzaken.
- De beschikbaarheid van een theoretische oplossing: geeft aan in hoeverre er gecorrigeerd kan worden *indien alle benodigde data beschikbaar is*. Fouten in het verwerken van de data zijn veelal goed te corrigeren. Voor fouten die gemaakt zijn bij het inwinnen van data (invloed slib, verkeerde instelling echolood) is een correctie vaak lastiger.
- Databeschikbaarheid voor het testen van een voorgestelde correctie: voor een correctie is vaak aanvullende data nodig (zoutgehalte, scheepsbeweging van passerende schepen). Deze kolom geeft aan in hoeverre de vereiste data voor het *testen van een correctie* beschikbaar is. Dergelijke data kunnen ook inzicht bieden in de grootte van een effect wanneer er nog niet gecorrigeerd is.
- Databeschikbaarheid voor operationele correctie: wanneer een correctie is gevalideerd met een positief resultaat, dient de correctie operationeel te worden toegepast op de CoVadem-data. Hiervoor zijn data nodig met een hogere ruimtelijke en temporele dichtheid dan voor alleen het valideren van de correctie. Deze kolom geeft aan in hoeverre de data voor *operationele toepassing* beschikbaar is.
- Filtermogelijkheden: deze kolom geeft aan in hoeverre slechte data uit te filteren is wanneer een correctiemogelijkheid nog niet voorhanden of geïmplementeerd is. Filteren op basis van een afwijking ten opzichte van een referentie-bodemligging (multibeam) wordt hier buiten beschouwing gelaten.
- Financiële aspecten: geeft aan of de *voorgestelde correctie* duur is of niet. Het aantal eurotekens verwijst niet naar een specifiek bedrag, maar is vastgesteld in overleg met alle partijen gezamenlijk. In het algemeen geldt dat het inbouwen van een correctie in de berekening relatief goedkoop is (enkele manuren), maar dat wanneer er extra meetapparatuur geïnstalleerd moet worden, de prijs snel oploopt omdat dit dan voor de gehele CoVadem-vloot geldt.
- Prioritering: op basis van alle voorgaande kolommen is vervolgens een prioritering vastgesteld voor het verder onderzoeken van een effect of toepassen van een correctie.

De prioritering is in feite een product van alle voorgaande overwegingen: wanneer een effect groot is (en er dus veel te winnen valt bij een correctie) en daarbij de databeschikbaarheid goed is, heeft het oplossen van (of corrigeren voor) het effect een hoge prioriteit (waarde = 1). De verklaring van de overige cijfers is opgenomen onder de tabel.

Tabel 6.1 Overzicht van invloeden op de CoVadem-data en prioritering van oplossen ervan.

Omschrijving	Maximale grootte effect	Beschikbaarheid theoretische oplossing	Beschikbaarheid data voor testen methodiek	Beschikbaarheid data voor operationele correctie	Filtermogelijkheden slechte data	Financiële aspecten	Prioritering
Meting kielspeling / meetfouten echolood							
Aanwezigheid zout	0.3 - 0.5 m	1	1	2	3	€	1
Wisselende watertemperatuur	1 m	1	1	2	3	€	1
Interferentie andere akoestische instrumenten (passerende schepen)	0.01 m	3	3	3	3	-	3
Zachte bodem / hoge sedimentconcentratie	O(dm)	3	3	3	2	€€€	2
Effect laag vermogen van echoloden	O(m)	3	2	3	3	€€€	2
Bepaling inzinking							
Schip ligt minder diep in zout water	0.1 m	1	1	2	3	€	2
Schip ligt minder diep in koud water	O(cm)	1	1	2	3	€	3
Squat verandert met stroomsnelheid	0.1 m	1	2	3	3	€	3
Belading verandert tijdens een trip door brandstofverbruik	O(cm)	2	1	2	3	€€	3
Effect passerende schepen op de diepgang	0.05 - 0.1 m	3	3	3	3	€€€	3
Bepaling positie							
Positiebepaling rekent met een drifthoek gelijk aan nul	O(m)	1	1	3	2	€€€	1
Effect dompen, stampen, slingeren (verticaal)	tot 0.2 m	1	3	3	3	€€€	2
Meetfouten GPS	O(m)	1	3	3	1	€€€	3
Gebruik "externe" data							
Nauwkeurigheid waterstanden in havenbekkens	tot 0.1 m	1	3	3	3	€€€	3
Overige meetfouten	O(m)	-	-	-	2	-	1

Tabel 6.2 Verklaring van ingevulde cijfers in Tabel 6.1.

Waarde	Oplosbaarheid	Databeschikbaarheid	Filtermogelijkheden
1	Theoretische oplossing beschikbaar	Goed	Goed
2	Onzekerheden in oplossing	Medium of met lage dichtheid	Medium of te grof
3	Geen correctie mogelijk	Slecht	Slecht

6.3 Opmerkingen en motivatie bij tabel

In deze paragraaf worden kort de gemaakte keuzes in de tabel toegelicht. Voor de meer inhoudelijke achtergrond wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

Aanwezigheid zout (effect op kielspelingsmeting):

De grootte van het effect van saliniteit is berekend met de formule van Coppens (hoofdstuk 3.3.4), uitgaande van een hoge saliniteit van 30 ppm en een waterdiepte van 15 m. Het effect van zout op de kielspelingsmeting is dus groot. Een correctie met de formule van Coppens is positief getest met behulp van de saliniteitsmetingen van RWS, en makkelijk op te nemen in de operationele berekening van bodemligging. In combinatie met slechte filtermogelijkheden (alle data in gebieden waar zout aanwezig is kan worden gefilterd, maar dat zou betekenen dat er geen data overblijven in het gehele benedenstroomse havengebied), krijgt implementeren van een correctie voor zout, een hoge prioriteit. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de databeschikbaarheid voor een operationele oplossing lager is. Om dit op te lossen, kan gedacht worden aan het interpoleren van de zoutmetingen, koppeling aan het (tevens operationele) OSR-model of het definiëren van karakteristieke zoutvelden voor verschillende getijfasen en/of rivierafvoeren. Het vermoeden is echter dat de huidige modellen nog te onnauwkeurig zijn voor het verkrijgen van operationeel ruimtelijk betrouwbare zout en temperatuur info. Wellicht dat het recent gehonoreerde project "SALTISolutions: Salt intrusion through open water in urbanizing deltas" ons de komende tijd daarin verder gaat helpen.

Temperatuurvariaties (effect op kielspelingsmeting):

Dit effect is vergelijkbaar met het effect van zout op de kielspelingsmeting. Wederom kan de grootte van het effect beschouwd worden als een maximale afwijking, gebaseerd op een diepte van 15 m en een temperatuur van 4 °C. Net als voor het saliniteitseffect, kan er makkelijk gecorrigeerd worden voor het effect van watertemperatuur op de geluidssnelheid door gebruik van de formule van Coppens. Zout- en temperatuurmetingen worden vaak op dezelfde locatie uitgevoerd, wat inhoudt dat voor operationele toepassing dezelfde databron kan worden gebruikt als voor de zoutcorrectie.

Interferentie passerende schepen:

De afwijking veroorzaakt door interferentie van andere akoestische instrumenten wordt verondersteld klein te zijn met een orde grootte van centimeters. Met name door de relatief lage meetfrequentie (200 kHz), zal er weinig verstoring plaatsvinden door andere geluidsbronnen. Om deze reden, en omdat er geen data beschikbaar is over passerende schepen en de gebruikte meetfrequenties, heeft dit oplossen van effect de laagste prioriteit.

Effect zachte bodem:

De frequentie van een akoestisch instrument kan grote invloed hebben op de gemeten diepte wanneer er een zachte bodemlaag aanwezig is. Een geluidssignaal met een hogere frequentie dempt sneller uit, waardoor het signaal niet doordringt tot in de zachte bodem. Een signaal met lagere frequentie zal verder doordringen en de grenslaag tussen zachte en harde bodem meten. Het exacte effect op de CoVadem-metingen is zeer moeilijk vast te stellen. We weten dat de meeste echoloden meten met een frequentie van 200 kHz. Dit is te hoog om door te dringen in een sliblaag met hoge dichtheid.

De multibeam-surveys van het HbR worden uitgevoerd met een frequentie van 220 kHz; in het geval van RWS-peilingen zijn zelfs frequenties van 455 kHz gebruikt. Alle peilingen (inclusief CoVadem) meten dus de “bovenkant” van een eventuele sliblaag. Hoe ver het signaal, uitgaande van een bepaalde frequentie, exact doordringt is echter ook nog afhankelijk van de dichtheid van (en dichtheidsgradiënt in) een sliblaag en het vermogen van het echolood, en is dus moeilijk vast te stellen. Op basis van de genoemde frequenties wordt geschat dat het verschil tussen CoVadem en multibeam-peilingen, veroorzaakt door gebruik van een andere meetfrequentie, maximaal een decimeter is. Hoewel er geen correctie voorhanden is (behalve het aanpassen van de frequentie of gebruik van andere meetapparatuur in het havengebied, en dit is onevenredig duur) en data hieromtrent nauwelijks beschikbaar is, krijgt dit effect toch een prioriteit van 2. Hiermee wordt voornamelijk bedoeld op het verder in beeld brengen hoe groot het hierdoor veroorzaakte verschil tussen CoVadem en multibeam nu eigenlijk is. Daarna kan een beslissing worden gemaakt of, en hoe, hiermee omgegaan kan worden. Momenteel heeft het aanpassen van de echolood-instellingen in het havengebied niet de voorkeur.

Effect laag vermogen echolood bij grotere diepte:

Behalve de frequentie is het vermogen van een echolood van belang. Over het ingestelde vermogen van de CoVadem-echoloden is zeer weinig bekend. Echter, omdat de binnenvaartschepen normaal gesproken uitgaan van een kleinere diepte, en het exact meten van grote dieptes voor hen van kleiner belang is, wordt er vermoed dat CoVadem-schepen met een laag vermogen meten. In gebieden met een waterdiepte van 15 m kan dit een groot effect hebben op de kielspelingsmeting. Er zijn dan ook veel CoVadem-tracks waarin de kielspelingsmeting deels mist (nodata) of rare sprongen vertoont over korte afstand. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door een te laag vermogen. Een oplossing of correctie is er niet echt, behalve het anders instellen van het echolood. Dit zou zelfs automatisch aangestuurd kunnen worden. Net als voor het effect van meetfrequentie wordt er wel aangeraden verder uit te zoeken welk vermogen de CoVadem-echoloden gebruiken, en wat nu precies het effect hiervan op de kielspelingsmeting is. Daarnaast wordt aangeraden om de sterkte van het terugkeersignaal op te slaan in de CoVadem-database en te gebruiken als kwaliteitsindicator, waarbij een zwakke echo duidt op een hogere onzekerheid in de dieptemeting.

Effect zout en temperatuur op diepgang:

Het effect van zout en temperatuur op de diepgang kan berekend worden door de dichtheid van het water te vervangen (zie ook hoofdstuk 3.3.4). Bij een aangenomen diepgang van 4 m (vrij groot voor een binnenvaartschip), is het maximale verschil in diepgang ruim een decimeter door dichtheidsverschillen. Het grootste deel hiervan wordt veroorzaakt door het effect van zout op dichtheid. Het effect van temperatuur is een orde grootte kleiner. Ook in de squat-berekening speelt dit effect mee, maar over het algemeen is dit effect een orde grootte kleiner dan het effect op de diepgang, zeker bij grotere waterdieptes. De prioriteit om deze twee effecten te corrigeren is dus niet erg hoog. Wel wordt aangeraden om een dergelijke correctie direct mee te nemen wanneer zout- en temperatuurdata worden opgenomen in de CoVadem-database om de kielspelingsmeting te corrigeren voor zout- en temperatuurwisselingen.

Effect stroomsnelheid op squat-berekening

Het gebruik van een verkeerde stroomrichting (2 m/s in plaats van -2 m/s) kan een verschil opleveren van enkele decimeters in de squat-berekening. Dit geldt echter vooral voor ondiep water, en is daarom minder relevant in het havengebied. Bovendien is het erg complex om nauwkeurige stromingsvelden te bepalen in het havengebied. Interpolatie van de aanwezige stromingsmeters is niet mogelijk vanwege de grote ruimtelijke en temporele variatie in het gebied. Ook modelleren van stromingsvelden levert niet altijd resultaten op die nauwkeurig genoeg zijn voor operationele correctie van de CoVadem-data.

Met name in havenbekkens en op kruisingen kan het afleiden van dit 3D-stromingsbeeld complex zijn. Mogelijk kan een benadering van de stroomsnelheid en -richting worden afgeleid uit het brandstofverbruik van het schip (zie ook hoofdstuk 3.4.2). Vanwege het kleine effect, heeft verbetering van de squat-berekening met “de juiste” stroomsnelheid een lage prioriteit.

Verandering diepgang door brandstofverbruik

Omdat de brandstof maar een klein deel van de totale belading vormt, is het effect van brandstofverbruik op de diepgang klein. Bovendien wordt de belading telkens als de vaarsnelheid kleiner dan 0,5 m/s is, opnieuw vastgesteld. Het precieze effect van brandstofverbruik zou makkelijk vast te stellen zijn, door deze gegevens over een lange reis op te slaan. Daarmee kan het effect op de diepgang dan bepaald worden. Vanwege het (verwachte) kleine effect heeft dit echter een lage prioriteit.

Effect passerende schepen op diepgang

Als een schip gepasseerd wordt door een ander schip, wordt de totale waterverplaatsing en daarmee de onderdruk groter, en zinkt een schip verder in. Het precieze effect hiervan is moeilijk vast te stellen omdat het afhangt van de geometrie (breedte en diepte) van de vaarweg, grootte en snelheid van het passerende schip en de snelheid van het metende schip zelf. Met name de data over passerende schepen is niet beschikbaar. Een oplossing, ook om de grootte van het effect vast te stellen, zou zijn om het metende schip uit te rusten met een motion sensor. Voor operationeel gebruik is dit een erg dure oplossing, omdat dan alle CoVadem-schepen zouden moeten worden uitgerust met dergelijke meetapparatuur.

De volgende drie fouten zijn van een andere aard dan de voorgaande: in plaats van een fout in de dieptebepaling wordt hier bedoeld op fouten in de (horizontale of verticale) plaatsbepaling van het echolood. Een foutieve horizontale plaatsbepaling leidt ertoe dat een gemeten kielspeling wordt gekoppeld aan de verkeerde x,y-coördinaten. Afhankelijk van de bodemgradiënt kan dit een behoorlijke fout opleveren in de uiteindelijke bodemligging.

Aanname drifthoek is gelijk aan nul

De GPS-coördinaten worden omgerekend naar een echolood-locatie. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de drifthoek gelijk is aan nul. Met name tijdens manoeuvreren is dit geen geldige aanname, terwijl juist de data bij aanlegplaatsen van meerwaarde kunnen zijn voor HbR. Als oplossing kan er gedacht worden aan het gebruik van een GPS-kompas ter vervanging van de huidige berekening van de locatie van het echolood. Enkele CoVadem-schepen hebben al een GPS-kompas aan boord, waardoor de meerwaarde hiervan makkelijk kan worden getest. Voor operationeel gebruik zou op alle CoVadem-schepen een GPS-kompas geïnstalleerd moeten worden.

Effect dompen, stampen en slingeren

Naast verticaal en horizontaal, kan een schip bewegen rondom zijn horizontale breedte-as (stampen) en lengte-as (slingeren). Ook kan een schip als gevolg van golfslag en stroming, op en neer bewegen (bovenop het effect van inzinking). Deze bewegingen zijn niet meegenomen in de verticale plaatsbepaling van het echolood. Geschat wordt dat deze effecten een fout van maximaal enkele decimeters veroorzaken, maar een precieze inschatting voor het havengebied is moeilijk te maken. Een oplossing zou zijn om op enkele schepen een motion sensor te installeren om het effect beter in beeld te brengen. Zoals genoemd onder "Effect van passerende schepen op diepgang", is dit een dure oplossing voor operationeel gebruik. De installatie op enkele schepen kan echter beide effecten in kaart brengen en is daarom van grote toegevoegde waarde.

Meetfouten gps

Hiermee wordt bedoeld op gps-fouten die bijvoorbeeld worden veroorzaakt doordat een schip onder een brug door vaart. In principe is hier niet voor te corrigeren, maar zijn dergelijke fouten wel uit te filteren op basis van de hdop. Oplossen van dit effect heeft daarom een lage prioriteit, hoewel installatie van een gps-kompas voor het oplossen van andere invloeden ook hier uitkomst kan bieden.

Nauwkeurigheid gebruikte waterstanden

Nauwkeurige waterstanden zijn noodzakelijk in de omrekening van waterdiepte naar bodemligging. De waterstandsmeetstations van HbR hebben een meetnauwkeurigheid van 1.5 cm en zijn aangelegd om het havengebied zo goed mogelijk te dekken. Ruimtelijke interpolatie van deze puntmetingen kan echter een fout opleveren, en in havenbekkens veroorzaken seiches nog eens extra onzekerheid in de gebruikte waterstanden. Al met al wordt de maximale fout geschat op 10 cm. Het wordt aanbevolen om uit te zoeken in welke havenbekkens dit speelt. Daarnaast kan gebruik van een motion sensor een uitkomst bieden.

Overige meetfouten

Alle hiervoor genoemde oorzaken van meetfouten hebben een effect van centimeters of decimeters. Veel CoVadem-data vertonen echter een afwijking van meters ten opzichte van de multibeam-data. De oorzaak hiervan is niet bekend (mogelijkheden zijn invloed van luchtbellen onder het echolood en het lage vermogen in combinatie met de grote diepte, maar dit zijn slechts ideeën). Omdat het om afwijkingen van meters gaat, heeft het uitzoeken van de oorzaak hiervan hoge prioriteit. Als de oorzaak bekend is, wordt het uifilteren van deze data mogelijk makkelijker. Tot die tijd kunnen data bijvoorbeeld uitgefilterd worden op basis van het verschil met de contractbodem. Als dit verschil groter is dan een meter, is het zeer waarschijnlijk geen betrouwbare meting.

6.4 Concluderend

In een gezamenlijke sessie is een prioriteiten-tabel opgesteld met invloeden waarvoor gecorrigeerd moet worden om de meerwaarde van CoVadem-data in het havengebied te vergroten. De grootste prioriteit hebben correcties voor de aanwezigheid van zout en watertemperatuur, omdat deze correctie makkelijk toepasbaar is en een grote verbetering zou betekenen. Daarnaast is tijdens de sessie de wens geuit om de horizontale plaatsbepaling van de CoVadem-metingen te verbeteren. Hiervoor zouden op enkele schepen een GPS-kompas (reeds aanwezig op een aantal metende schepen) en een bewegingssensor aanvullende data kunnen verzamelen. Hiermee kan de grootte van meerdere effecten tegelijk bepaald worden, waarna besloten kan worden om deze apparatuur op meer schepen te installeren. Tot slot worden aangeraden om voor alle metende schepen een overzicht te maken met de meetfrequentie en ingestelde vermogen van het echolood, om zo beter zicht te krijgen op meetfouten door echolood-instellingen. Ook zouden metadata van de transducer (bijvoorbeeld sterkte van het echosignaal) inzicht kunnen bieden in de kwaliteit van metingen op grotere diepte of boven een sliblaag.

7 Conclusies en doorkijk vervolg

7.1 Conclusies en aanbevelingen

Het hoofddoel van voorliggende studie was om uit te zoeken hoe de meerwaarde van CoVadem-data in het havengebied van Rotterdam vergroot kan worden. Er is een aantal factoren geïdentificeerd die de CoVadem-meting of -berekening beïnvloeden. Eén van de belangrijkste factoren is de invloed van wisselende saliniteit en watertemperatuur op de geluidssnelheid door water, en daarmee op de kielspelingsmeting. Zeker in gebieden met een grote waterdiepte kan de fout die hierdoor veroorzaakt wordt, oplopen van enkele decimeters tot een meter. Voor dit effect is een correctie voorgesteld die met succes is gevalideerd. Om de meerwaarde van CoVadem-data in het havengebied te vergroten, zal deze correctie operationeel moeten worden toegepast. Het is echter nog de vraag welke databron hiervoor kan worden gebruikt voor voldoende ruimtelijke dekking. Hiervoor zijn enkele suggesties gedaan.

Effecten waarvoor nog niet gecorrigeerd kan worden, zijn meetfouten veroorzaakt door de meetinstellingen van het echolood in combinatie met de aanwezigheid van een sliblaag onderin de waterkolom en een grote waterdiepte. De belangrijkste instellingen zijn de meetfrequentie en het ingestelde vermogen van het echolood. Er is nog niet vastgesteld wat het exacte effect op de gemeten waterdiepte is, maar het vermoeden is dat dit kan oplopen tot decimeters of zelfs meters. Er wordt sterk aanbevolen om hier verder onderzoek naar te doen. Zonder duidelijkheid over het effect hiervan is verdere verbetering van de CoVadem-data in het havengebied niet zinvol. Hiervoor kan de metadata van de kielspelingsmetingen van meerwaarde zijn: de sterkte van een terugkeersignaal kan een indicator zijn voor de kwaliteit van de metingen. Indien mogelijk wordt daarom aanbevolen om ook deze data op te nemen in de CoVadem-database.

Ten behoeve van eventueel vervolgonderzoek is een prioritering opgesteld voor het corrigeren, of verder onderzoeken van alle gevonden effecten. De prioritering is een product van de moeite (kosten) om een correctie te implementeren met daarin meegenomen of er data beschikbaar zijn, en de verbetering (baten) die een correctie oplevert. Daarnaast is meegenomen in hoeverre een correctie beschikbaar is, en hoe betrouwbaar deze is. Voor effecten waarvoor geen correctie beschikbaar is, is aangegeven of verder onderzoek nodig wordt geacht. Voor de meetfouten veroorzaakt door aanwezigheid van slib en een grote waterdiepte is dit het geval. Verder heeft het implementeren van de gevalideerde correctie van de geluidssnelheid afhankelijk van de watertemperatuur en zoutgehalte een hoge prioriteit. Ook is geconstateerd dat de CoVadem-data soms grote afwijkingen (orde grootte meters) ten opzichte van de multibeam-data vertonen, die niet verklaard worden met de genoemde effecten. Het is belangrijk om de oorzaak van deze afwijkingen verder te onderzoeken (indien mogelijk gerelateerd aan de metadata van het echolood, zie vorige punt) om het uitsluiten ervan te vergemakkelijken. Filtertechnieken zouden moeten voortkomen uit begrip van de fouten, maar totdat alle fouten in kaart zijn gebracht zouden metingen met een afwijking van meters ten opzichte van een referentiebodem (bijvoorbeeld contractbodem) kunnen worden uitgefilterd. Dit vergroot de meerwaarde van de data en de mogelijkheid om bodemtrends af te leiden uit CoVadem-data.

Behalve het afleiden van een absolute bodemligging, kan de meerwaarde van CoVadem-data namelijk liggen in het afleiden van bodemtrends. Uit dit onderzoek is gebleken dat een standaardafwijking geen goede maat is om de dynamiek van de bodem af te leiden. Een betere indicator is het verschil tussen een gemiddelde bodemligging op verschillende tijdstippen, omdat een enkele track een vertekend beeld kan geven.

Door het gemiddelde te nemen van de CoVadem-bodemligging over een langere periode (5 weken) en dit te vergelijken met de gemiddelde bodemligging op een latere tijdstip, kan mogelijk een trend worden afgeleid. Om een beter beeld te geven dient de CoVadem-data echter wel nog gecorrigeerd te worden voor de genoemde invloeden.

Tot slot verdient de verwerking van de surveyor-data nog een aantal aanbevelingen ten behoeve van verder onderzoek. De multibeam-data die tegelijkertijd met CoVadem-data worden ingewonnen bevatten, behalve de bodemligging zelf, waardevolle informatie voor een vergelijking met de CoVadem-data. Deze informatie wordt momenteel niet standaard opgeslagen, maar zou wel meer inzicht kunnen geven in de oorzaken van de afwijkingen tussen Covadem- en multibeam-data. Er wordt daarom aanbevolen om 1) opgenomen geluidssnelheidsprofielen en 2) verticale positie van de multibeam op te slaan. Hiermee kan inzicht worden verkregen in het effect van 1) een onjuiste aanname van de geluidssnelheid door water en 2) de onnauwkeurigheid van de gebruikte waterstanden voor CoVadem.

7.2 Doorkijk voor vervolg

Met het oog op de toekomst zou het nuttig zou zijn om een aantal praktijkexperimenten te kunnen doen, waarbij wordt gekeken of door het tijdelijk plaatsen van een bewegingssensor / referentieapparatuur op een beperkt aantal schepen nog tot goede inzichten kan worden gekomen. Hiermee kan worden onderzocht of en hoe een procedure kan worden opgesteld voor een praktische, kostenefficiënte inmeting van metende schepen.

Verder is er de wens om in de toekomst te kijken hoe het varend kalibreren op basis van bekende externe bronnen (bijvoorbeeld op basis van sluisdrempels en vaste punten) praktisch het beste kan worden ingericht. Daarbij plaatsen we wel de kanttekening dat je idealiter pas zou moeten werken naar varend kalibreren als je weet waar elke meetfout vandaan komt. Als de meetfout is te corrigeren met systeemkennis heeft dat de voorkeur boven varend kalibreren.

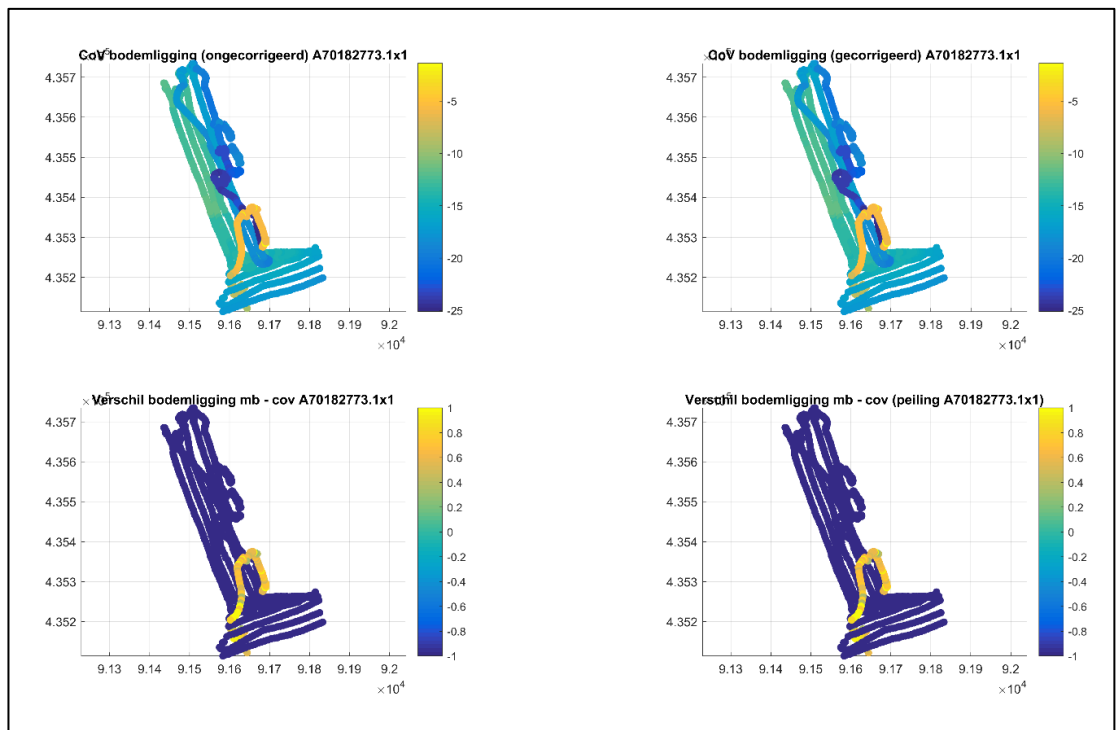
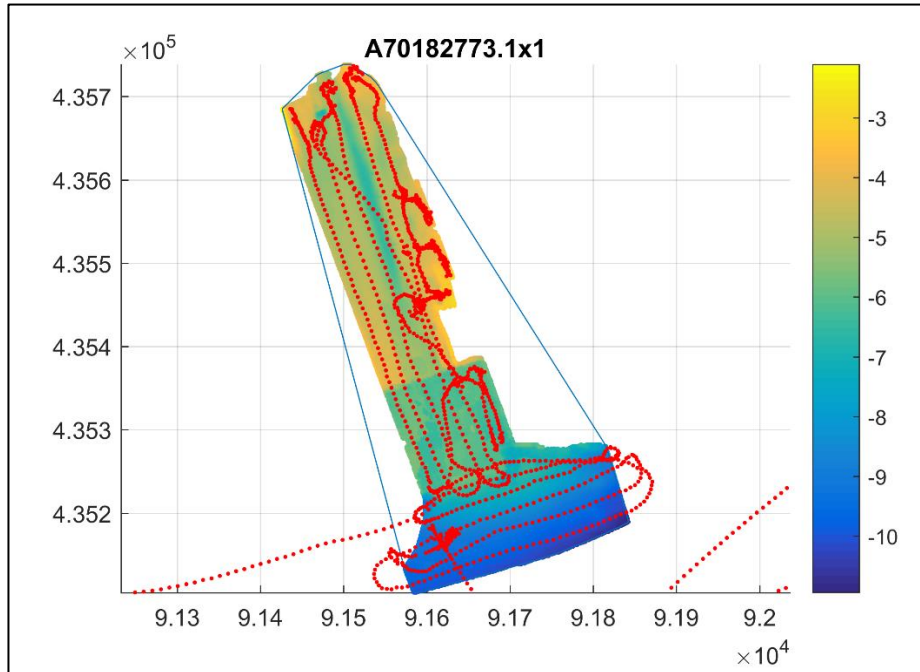
Referenties

- Briggs, M. (2009). Ankudinov ship squat predictions - Part I: Theory, parameters and FORTRAN programs. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Kinsler, L., A. Frey, A. Coppens and J. Sanders (1982). Fundamentals of acoustics. Wiley and Sons, Toronto.
- Lambert, I (2018). *Added value of CoVadem data for the Port of Rotterdam*. MSc Thesis TU-Delft – Deltares.
- Mark van der, C.F., T. Vijverberg en W. Ottevanger (2015). *Validation of actual depth measurements by inland vessels*. Conference abstract, Smart Rivers 2015.
- Mulder D. en M. Sloots (2008). *Slibdiktebepaling ten behoeve van de nautische diepte. Met het SILAS-systeem en de DensiTune*. RWS-rapportage met kenmerk IDI-2008-DPM-017.
- Niessen, I en R. van der Mark (2018). *Verkenning naar de bruikbaarheid van CoVadem meetgegevens voor Havenbedrijf Rotterdam*. Deltares rapport met kenmerk 11201209-001-ZWS-0002.
- Niessen, I en T. Visser. *Jaarsom 2017; SOBEK-RE en SOBEK3*. Deltares rapport met kenmerk 11202220-006-ZWS-0006.
- Reson (2002). SeaBat 8125 Operator's Manual, version 3.01. Via https://www.oceanscan.net/gallery/PDFs/8125_OpMan_301.pdf.
- Stema-systems (2015). High resolution seismics in mud environments. Via https://stema-systems.nl/wp-content/uploads/2015/08/Applicat_Silas_softmud.pdf.

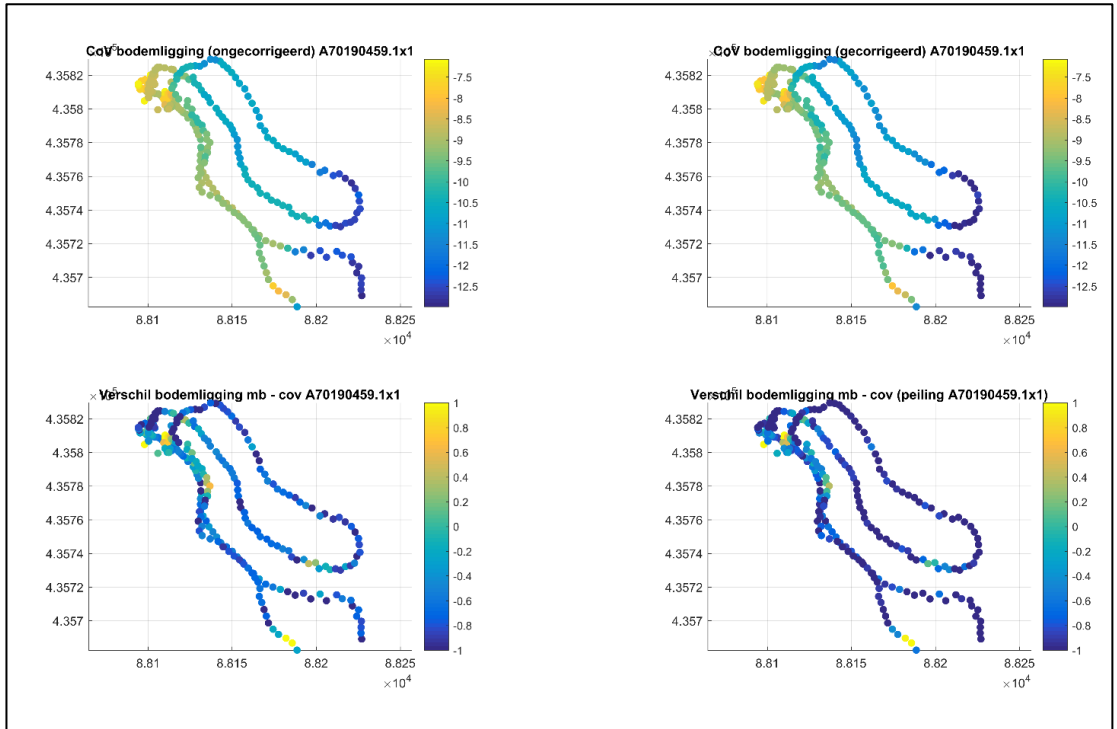
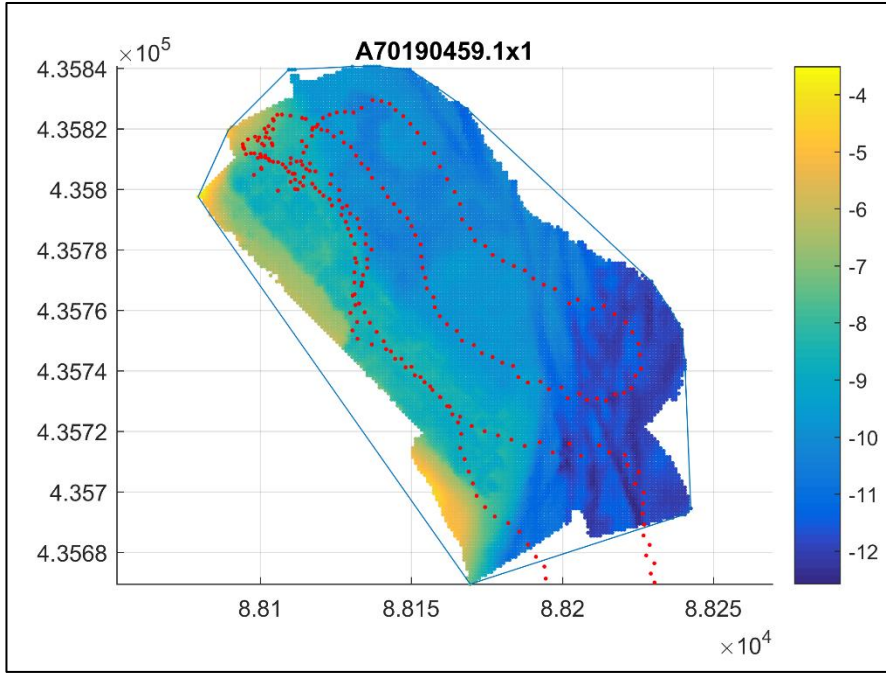
A Vergelijking Surveyors

Alleen multibeam-surveys tijdens welke ook CoVadem-kielspelingsmetingen zijn opgeslagen, zijn hier weergegeven.

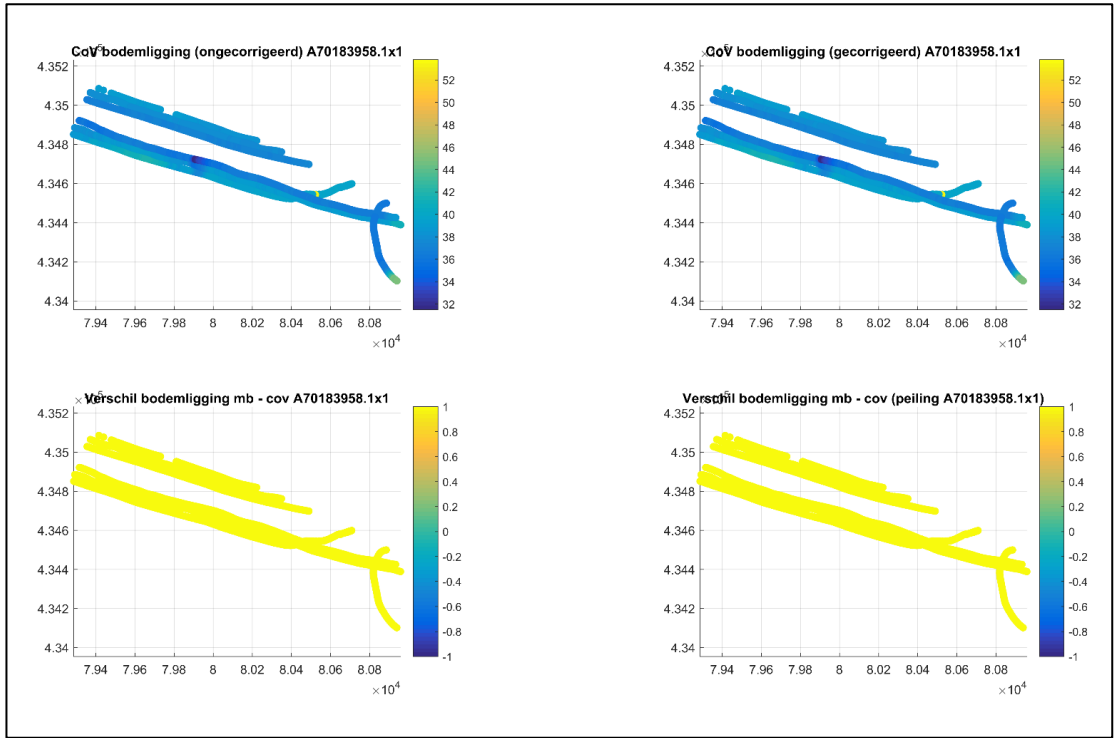
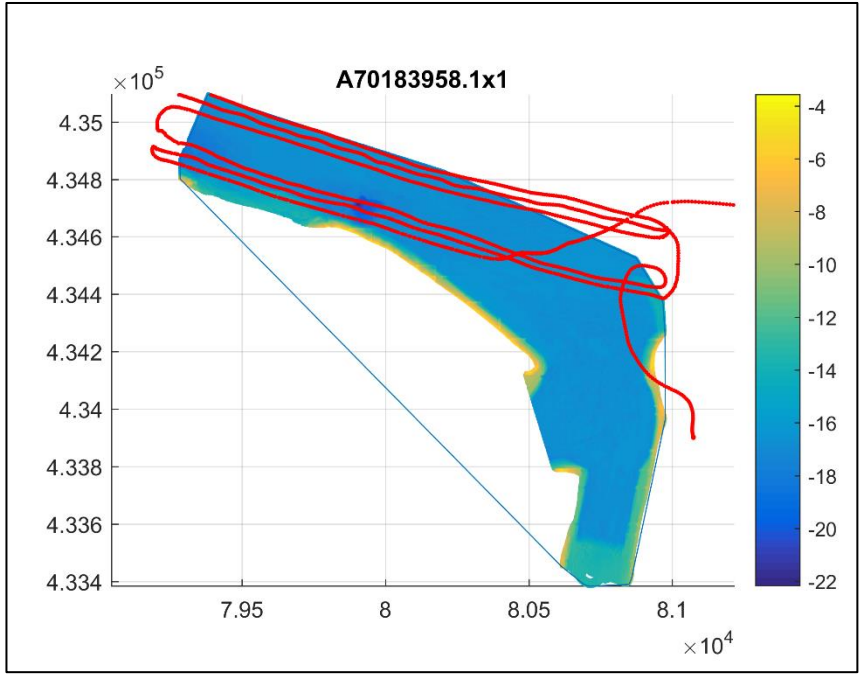
A.1 Parkhaven 10-09-2018



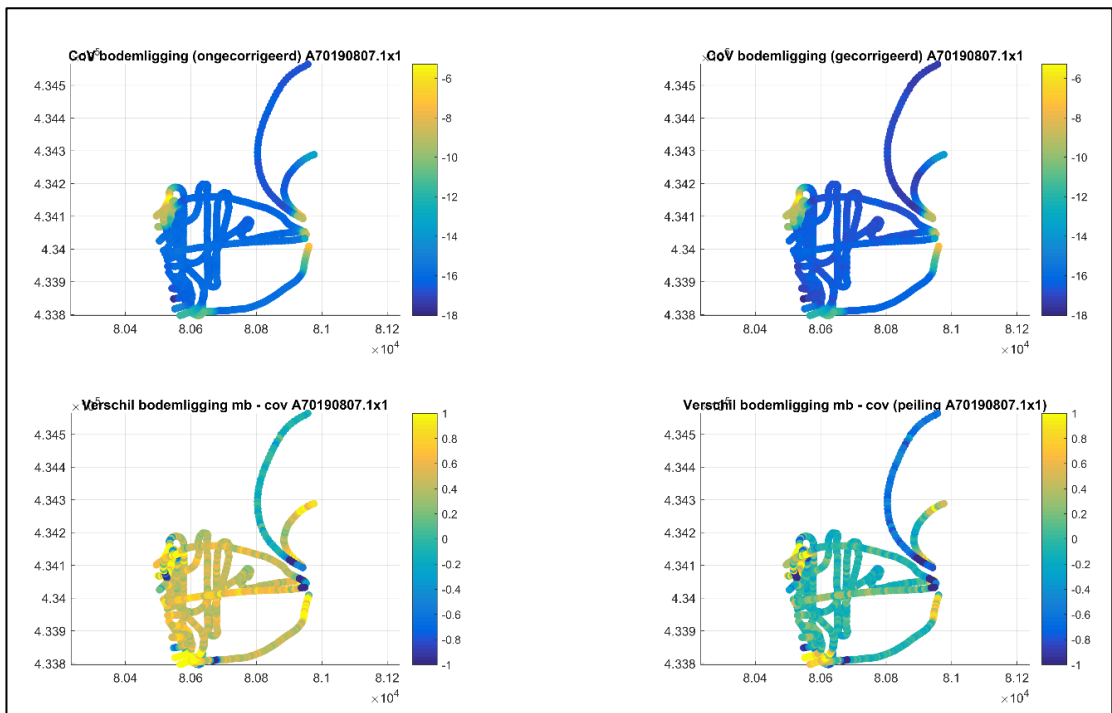
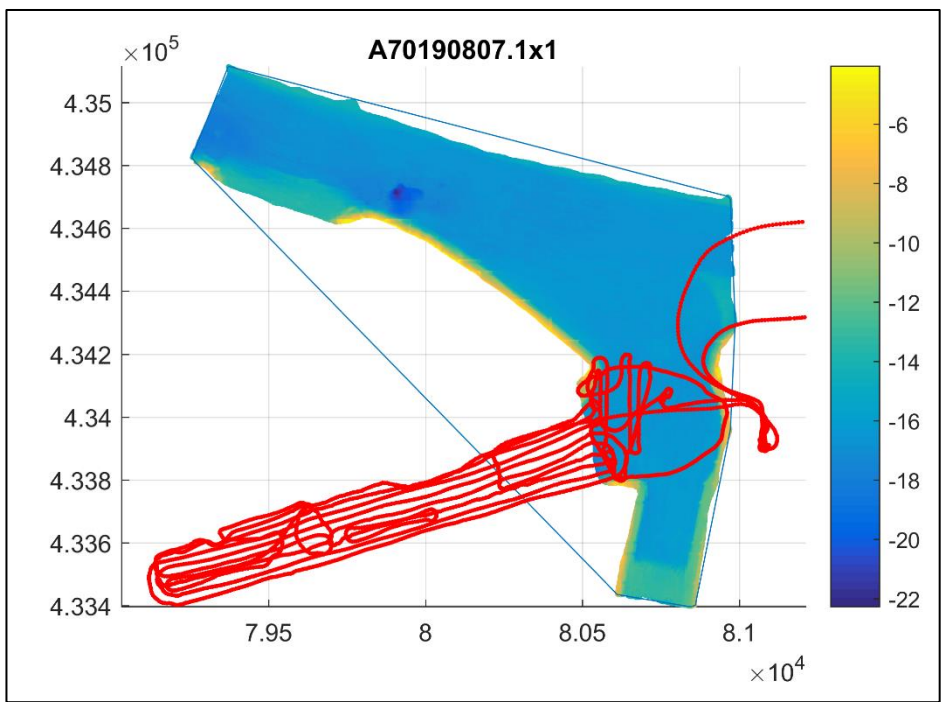
A.2 Merwehaven 05-12-2018



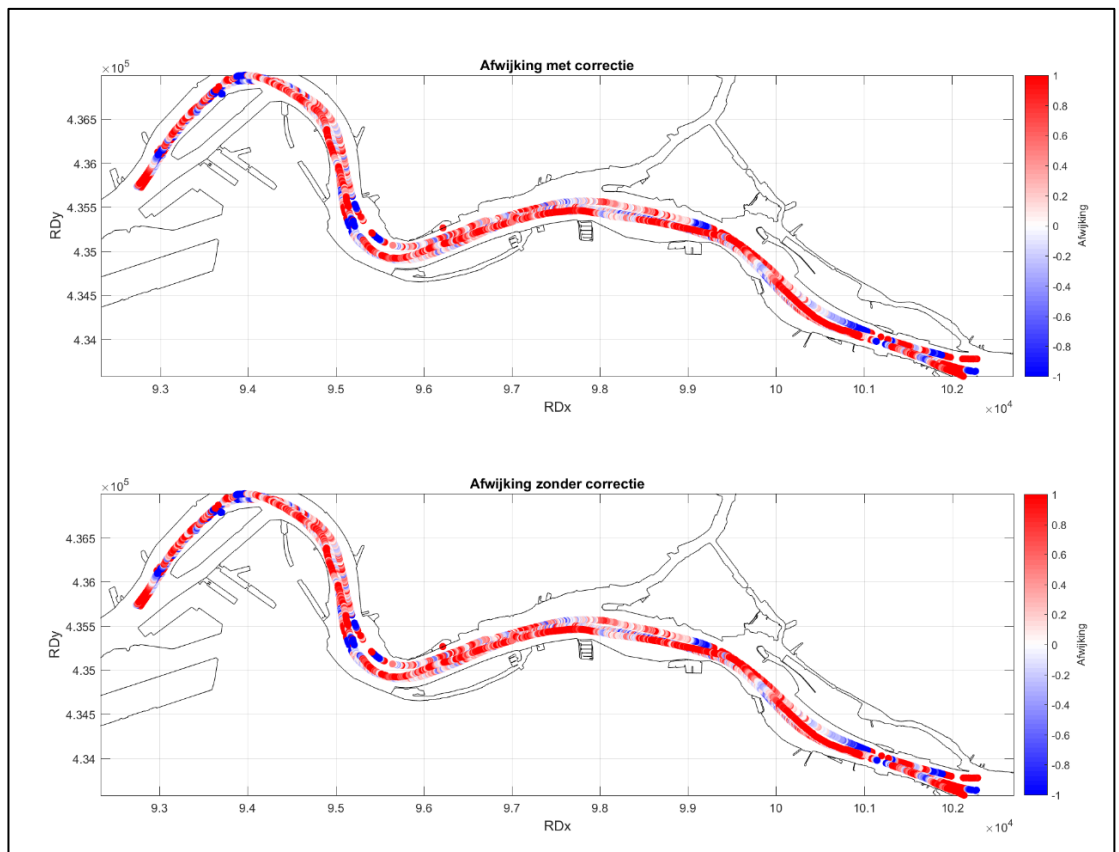
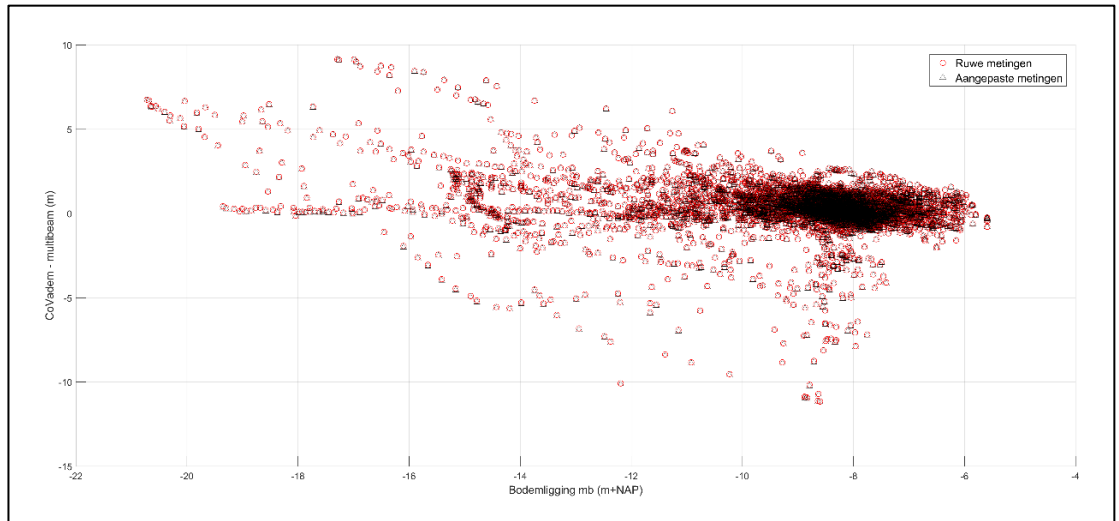
A.3 Botlek + 3^e Petroleumhaven 04-10-2018

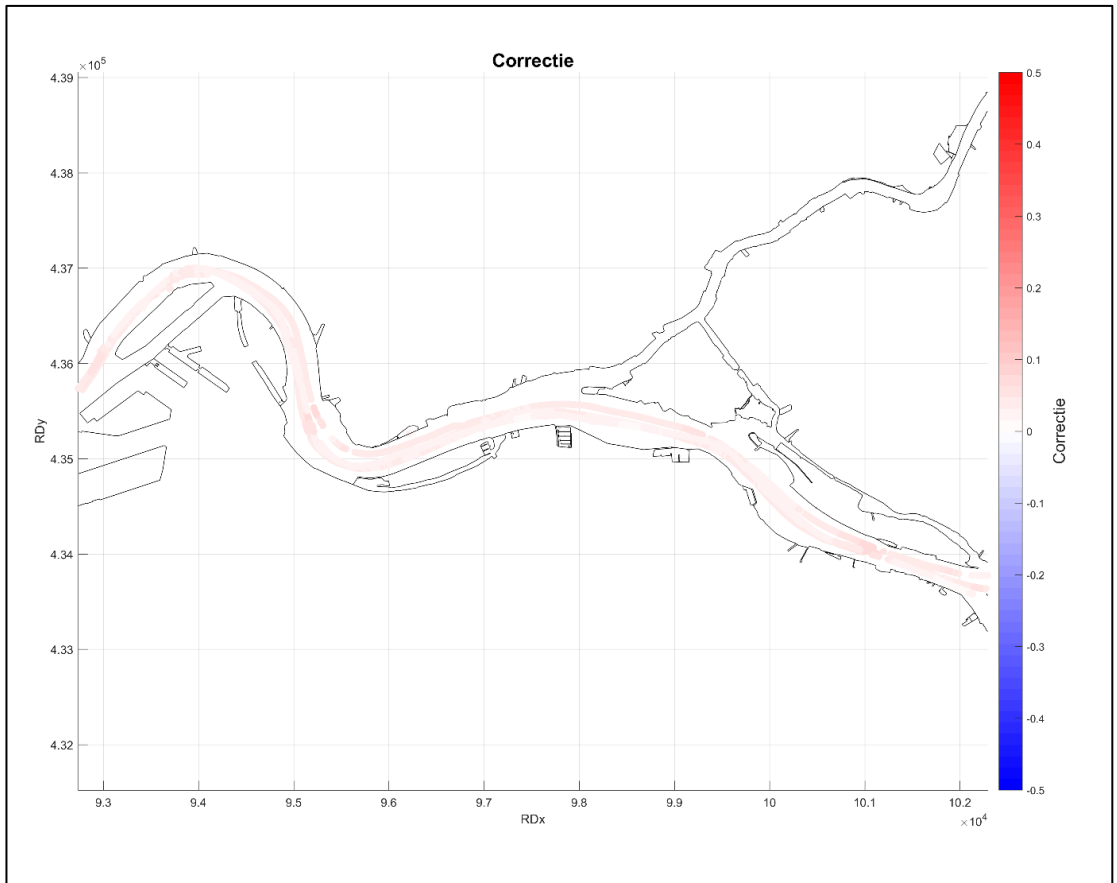


A.4 Botlekhaven centrale geul 11-12-2019



B Correcties voor zout en temperatuur bij de Brienoordbrug (juni)





Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl