

**Bepalen van stroomsnelheid
nabij de bodem uit metingen
bij de Oosterscheldekering**



Bepalen van stroomsnelheid nabij de bodem uit metingen bij de Oosterscheldekering

Frans Buschman

1230041-004

Titel

Bepalen van stroomsnelheid nabij de bodem uit metingen bij de Oosterscheldekering

Opdrachtgever Arjan Sieben (Rijkswaterstaat WVL)	Project 1230041-004	Kenmerk 1230041-004-ZWS-0002	Pagina's 39
---	-------------------------------	--	-----------------------

Trefwoorden



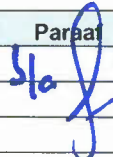
Stroming, ADCP, morfologisch model, sediment transport, Rijn- en Maasmonding.

Samenvatting

De stroomsnelheid in de onderste 15% van de waterkolom is van belang, omdat deze bepalend is voor erosie en sedimentatie. Met stroomsnelheidsmetingen wenst Rijkswaterstaat morfologische modellen in de Rijn- en Maasmonding te valideren. Omdat Rijkswaterstaat standaard metingen met een *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) uitvoert vanaf schepen, is bepaald of snelheidsprofielen gemeten vanaf een schip voldoende nauwkeurig zijn voor het bepalen van de stroomsnelheid bij de bodem. Verondersteld is dat voor dit doel de stroomsnelheid niet meer dan 10% mag afwijken van de werkelijkheid. In een ontgrondingskuil 1 km oostelijk van de Oosterscheldekering zijn metingen vanaf een schip en vanaf een frame op de bodem beschikbaar tijdens een vloedperiode. Uit de frame metingen is een tijdsgemiddelde stroomsnelheid bepaald en de spreiding in die periode. Om de variaties door meetruis, kleinschalige en grootschalige turbulentie uit te middelen bleek een periode van 17 minuten nodig. Omdat de passage van het schip door het gebied rond het frame slechts 15 s was, kon geen uitgemiddeld snelheidsprofiel worden bepaald voor de metingen vanaf het schip. De forse verschillen tot 0,5 m/s tussen de twee profielen in de onderste 15% van de waterkolom kunnen verklaard worden doordat de metingen vanaf het schip worden beïnvloed door turbulentie. Op basis van deze verschillen is het waarschijnlijk dat de stroomsnelheid bij de bodem uit metingen vanaf het schip bij de Oosterscheldekering meer dan 10% afwijkt van de werkelijkheid. De verwachting is dat ook in ontgrondingskuilen in de Rijn- en Maasmonding de stroomsnelheid in de onderste 15% van de waterkolom niet met een nauwkeurigheid van 10% kan worden bepaald. Alternatieve meetmethoden voor het meten van de stroomsnelheid zijn aanbevolen in Buschman (2015). Een ander alternatief is dat de bodemsnelheid direct wordt bepaald op basis van *bottom tracking* metingen met een ADCP in combinatie met een nauwkeurig GPS vanaf een schip.

Referenties

Onderdeel van KPP rivierkundig onderzoek 2016.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	jan 2017	Frans Buschman		Rinus Schroevers		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Kader	1
1.2 Aanleiding en voorgeschiedenis	1
1.3 Doel	2
1.4 Betrokkenen	2
2 Beschikbare metingen en verwerking	3
2.1 Situatieschets bij de Oosterscheldekering	3
2.2 Overzicht gegevens	4
2.2.1 Stroommetingen	4
2.2.2 Waterstand	6
2.3 Meetinstellingen stroommetingen	8
2.4 Inschatting van meetnauwkeurigheid	9
2.5 Uitgangspunten bij verwerking van de metingen	11
2.6 Verwerkingsmethode van metingen	11
3 Resultaten	13
3.1 Stroomsnelheden vanaf frame MP0303	13
3.1.1 Uitmiddelen van turbulentie	13
3.1.2 Variatie in profielen	16
3.1.3 Extrapolatie naar de bodem	17
3.2 Stroomsnelheden gemeten vanaf het schip	19
3.3 Vergelijking schip- en framemetingen	24
4 Discussie	27
4.1 Algemeen	27
4.2 Vergelijking frame-metingen en metingen vanaf het schip	27
4.3 Betekenis voor Rijn- en Maasmonding	28
5 Conclusie en aanbevelingen	31
5.1 Conclusie	31
5.2 Aanbevelingen	31
6 Referenties	33
Bijlage(n)	
A Vergelijking van stroomsnelheden op momenten met minder grote stroomsnelheden	A-1

1 Inleiding

1.1 Kader

Dit rapport is een product van KPP (Kennis Primaire Processen) rivierkundig onderzoek van Rijkswaterstaat. Dit KPP onderzoeksprogramma heeft als doel de Nederlandse rivierkundige kennis op peil te houden. Praktijkgerichte vragen uit planstudies, realisaties en beheer sturen de kennisontwikkeling. Daarbij wordt gericht gezocht naar oplossingen die binnen ongeveer drie jaar na vraagstelling toegepast kunnen worden. Deze studie valt binnen het thema 'Verbeterde monitoring van rivieren' van KPP rivierkundig onderzoek.

1.2 Aanleiding en voorgeschiedenis

De aanleiding voor dit onderzoek is dat Rijkswaterstaat morfologische modeluitkomsten wenst te valideren met metingen. Omdat erosie en sedimentatie voor een belangrijk deel bepaald worden door de stroming in het onderste deel van de waterkolom, is inzicht in de stroomsnelheid in de onderste 15% van de waterkolom van belang. Rijkswaterstaat voert geregeld metingen uit vanaf een schip met een 'Acoustic Doppler Current Profile' (ADCP) om stroomsnelheid te meten met als doel om daaruit debiet te bepalen. Rijkswaterstaat wenst de zelfde schipmetingen te gebruiken om morfologische ontwikkelingen te begrijpen en morfologische modellen te valideren, wanneer deze metingen daarvoor voldoende nauwkeurig zijn.

In rivieren zonder getij-invloed wordt vaak aangenomen dat de grenslaag is ontwikkeld en het snelheidsprofiel logaritmisch is. Het meten van een deel van het profiel is na middeling over turbulente waterbeweging voldoende om de stroomsnelheid bij de bodem te bepalen. In rivieren met getij-invloed kan het profiel afwijken van logaritmisch door gelaagdheid en doordat de grenslaag nog niet is ontwikkeld na kentering. Hierdoor kan het gebeuren dat de stroomsnelheid in de onderste 15% afwijkt van wat verwacht zou mogen worden bij een logaritmisch profiel. Bij metingen bij splitsingspunten in de Rijn- en Maasmonding monding is waargenomen door Rijkswaterstaat en door Buschman (2015) dat de stroomsnelheid hoger is bij de bodem dan erboven. Daarmee zou berekende erosie en sedimentatie duidelijk verschillen in vergelijking met wanneer een logaritmisch profiel was aangenomen.

In 2015 is in het kader van KPP rivierkundig onderzoek de bruikbaarheid van ADCP metingen vanaf een schip geëvalueerd (Buschman, 2015). Om bruikbaar te zijn voor het valideren van een morfologisch model van de Rijn- en Maasmonding (Sloff et al. 2012), is gesteld dat de stroomsnelheidsmetingen in de onderste laag representatief moet zijn voor een afstand langs de rivier van 10-100 m en dat turbulentie moet zijn uitgemiddeld. Op basis van deze stroomsnelheid kunnen correctiefactoren worden gevalideerd, die in het model gebruikt worden om de sediment transport capaciteit te bepalen (Ottevanger en van der Mark, 2015). Bij zee hebben deze correctiefactoren een waarde tot 2. Een tweede doel van de analyse van ADCP metingen vanaf een schip is inzicht te bieden in pieken in bodemschuifspanningen, vooral bij instabiele bodemstukken. De nauwkeurigheid van de metingen die nodig is om het morfologisch model te kunnen valideren is verondersteld op 10%.

Met de uitgevoerde analyse van ADCP metingen vanaf een schip kon niet worden vastgesteld of aan deze nauwkeurigheidseis is voldaan. Bij deze metingen wordt in de onderste 10-15 % van het profiel stroomsnelheid niet (nauwkeurig) gemeten. De gemeten stroomsnelheden in de laag juist hierboven (tot 20%) hebben een grotere onzekerheid dan de gemeten stroomsnelheden hoger in de waterkolom vanwege de grotere bundelspreiding. Er werd geconcludeerd dat aanvullende snelheidsmetingen bij de bodem nodig zijn als referentie om te kunnen bepalen of de nauwkeurigheid van stroming in de onderste 15% van de waterkolom binnen de 10% valt.

Voordat bepaald wordt of een nieuwe meetcampagne wordt opgezet, wenst Rijkswaterstaat een aanvullende analyse van bestaande metingen bij de Oosterschelde kering. Er zijn in de periode tussen januari 2014 – april 2015 ADCP snelheidsmetingen uitgevoerd in het kader van onderzoek naar de stabiliteit van de bodembescherming dichterbij de keringen. Er zijn ADCP metingen vanaf een varend schip uitgevoerd, terwijl ook 2 weken lang 4 ADCP's in frames op de bodem waren gestationeerd langs de as van een ontgrondingskuil (Broekema et al., 2016).

1.3 Doel

Doel van dit deelproject is om te bepalen of ADCP metingen vanaf een schip voldoende nauwkeurig zijn voor het valideren van een morfologisch model op basis van metingen bij de Oosterschelde kering. Verondersteld wordt hierbij dat de stroomsnelheid uit metingen vanaf een schip gemiddeld over de onderste 15% van de waterkolom op een ruimteschaal die past bij het morfologisch model (10-100 m) gemiddeld over de piekperiode van het getij niet meer dan 10% mogen afwijken van de werkelijkheid. Voor dit doel worden metingen vanuit een frame op de bodem geanalyseerd om karakteristieken van de stroming te bepalen.

1.4 Betrokkenen

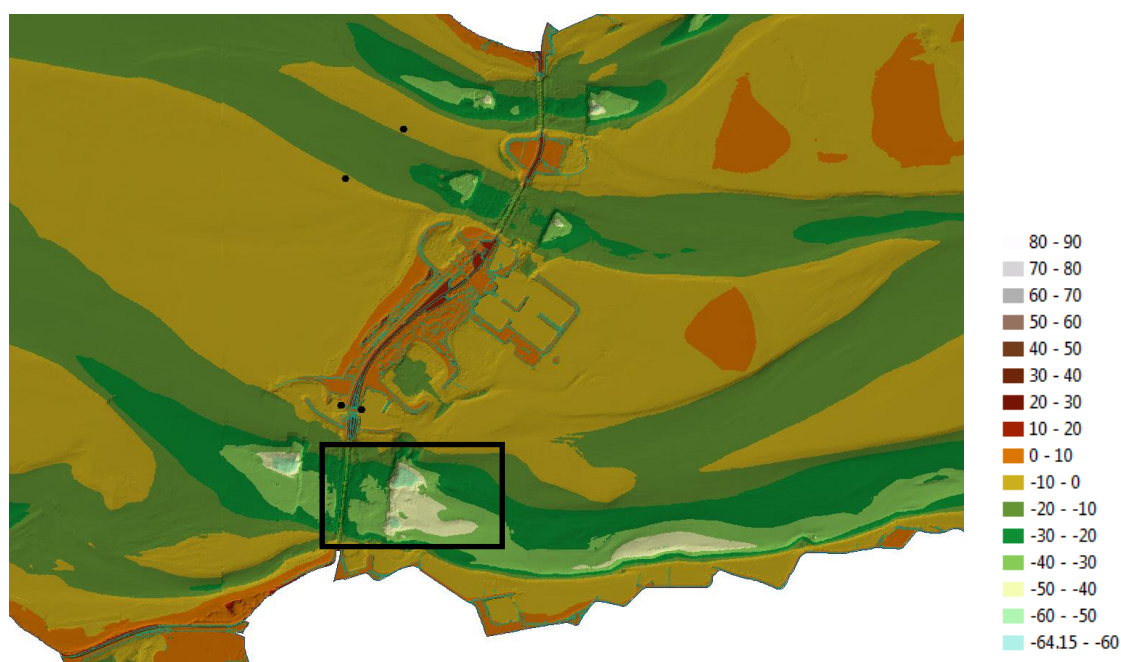
- Arjan Sieben (opdrachtgever RWS)
- Stephanie de Maaijer (datadeskundige RWS)
- Bert Go (datadeskundige RWS)
- Yorick Broekema (TU Delft)
- Frans Buschman (deelprojectleider en projectleider Deltares)
- Rinus Schroevers (reviewer Deltares)

2 Beschikbare metingen en verwerking

2.1 Situatieschets bij de Oosterscheldekering

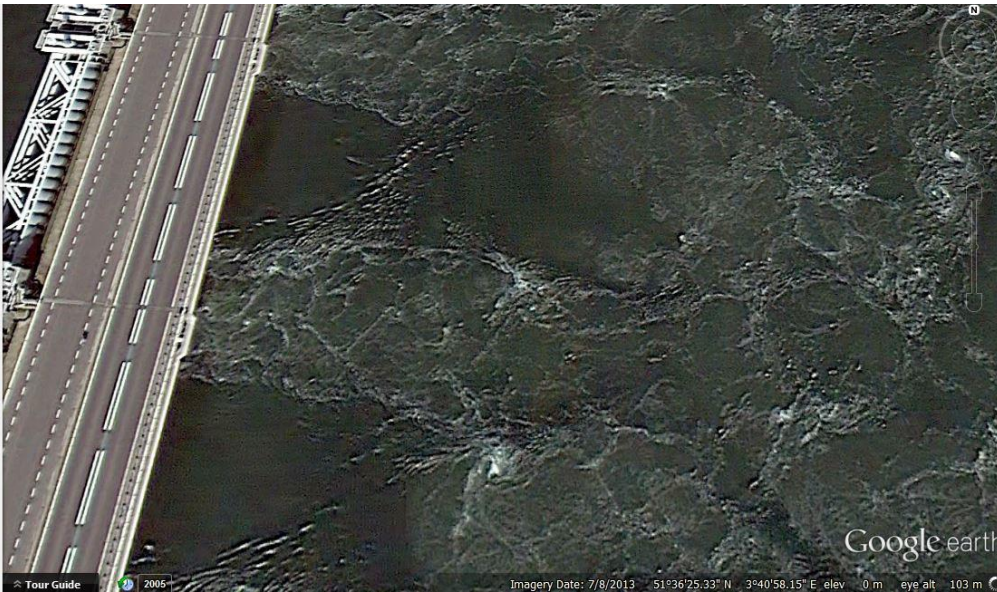
De Oosterscheldekering is een afsluitbare stormvloedkering. Ongeveer drie van de negen kilometer is afsluitbaar. Bij de afsluitbare openingen zijn geulen aanwezig in de Oosterschelde en aan de zeezijde (Figuur 2.1). Rond de Oosterscheldekering liggen matten en blokken om de bodem te beschermen tegen erosie. Aan de randen van die matten ontstaan van nature ontgrondingskuilen door stroming. Dit was in het oorspronkelijke ontwerp reeds voorzien. In 2012 is geconstateerd dat de hellingen van deze kuilen te steil waren geworden waardoor schade is ontstaan aan de bodembescherming. Vervolgens zijn tot en met 2014 bestorvingen uitgevoerd om de schade te herstellen (www.rijkswaterstaat.nl).

De overgang van bodembescherming naar ontgrondingskuil is te zien in Figuur 2.1 op ongeveer 600 m ten oosten van de kering. Tijdens de metingen is gevonden dat de bodemhoogte bij deze overgang 20 m afneemt over een horizontale afstand van 10 m. Dat betekent dat de helling steiler is dan 1:1. Met zulke hellingen is het mogelijk dat loslating van de stroming plaats vindt, waardoor grootschalige wervels ontstaan.



Figuur 2.1 De Oosterscheldekering (stippellijn) en bodemligging eromheen in 2012 (Baseline informatie voor Zuidwestelijke Delta model voor 2012); De zwarte rechthoek geeft de meetlocatie aan.

Bij vloed gaat water vanaf zee door de openingen van de Oosterscheldekering naar de Oosterschelde. Doordat het water langs de pilaren van de kering stroomt, ontstaat extra turbulentie (Figuur 2.2). Dit wordt 'grid turbulentie' genoemd (Broekema et al., 2016). Bovendien is ter hoogte van de kering het doorstroomprofiel kleiner dan eromheen. Daarmee ontstaan grote stroomsnelheden dichtbij de kering.



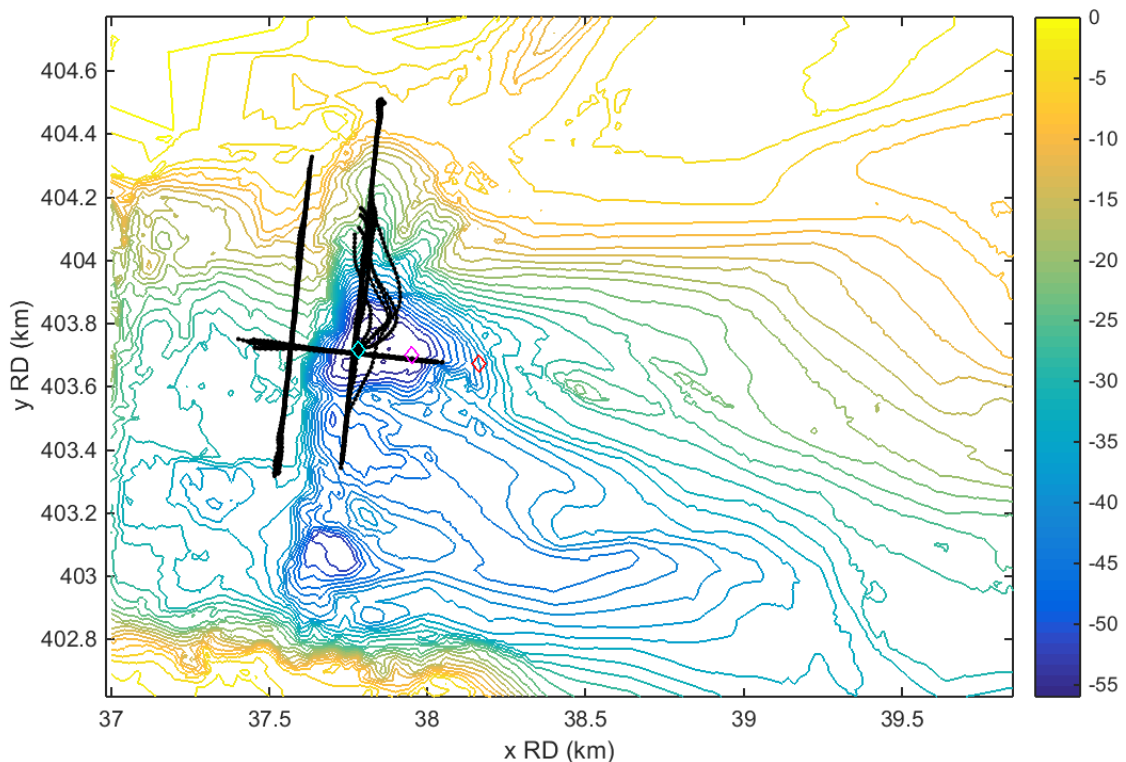
Figuur 2.2 Turbulentie opgewekt door de Oosterscheldekering: luchtfoto van twee openingen in de kering

2.2 Overzicht gegevens

2.2.1 Stroommetingen

Rijkswaterstaat heeft gegevens van stroommetingen aangeleverd die zijn gemeten bij Roompot. Zowel aan de oostkant en de westkant van de Oosterscheldekering zijn metingen uitgevoerd in 2014. Aanleiding voor de metingen was schade aan de bodembescherming. Het is niet bekend of de laatste bestortingen van 2014 voor het herstel van de schade al waren uitgevoerd ten tijde van de metingen. Broekema et al. (2016) heeft al gerapporteerd over deze metingen.

Op basis van deze studie is het doel uitspraken te doen over ontgrondingskuilen in de Rijn- en Maasmonding, waar het effect van golven op de metingen vanaf het schip beperkt zijn. Omdat er minder golven zijn aan de oostkant van de kering, zijn alleen de metingen ten oosten van de Oosterscheldekering geanalyseerd. De locaties van 3 frames en de transects van het schip ten oosten van de kering staan weergegeven in Figuur 2.3. Stroomsnelheden uit frame MP0303 zijn geanalyseerd en vergeleken met de metingen vanaf het schip. Deze locatie is uitgekozen, omdat MP0303 het verst van de bodembescherming is verwijderd. Het frame MP0302 ligt dichterbij de rand van de ontgrondingskuil, waardoor het meer onder invloed staat van de grootschalige wervels die ontstaan door loslating van de helling steiler dan 1:1. In ontgrondingskuilen in de Rijn- en Maasmonding zijn dergelijke steile hellingen niet bekend. De afstand van frame MP0303 tot de kering is ongeveer 1 km.



Figuur 2.3 Locaties van vaste metingen (diamanten: $b=MP0302$, $p=MP0303$ en $r=MP0304$) en metingen vanaf het schip (zwart) ten oosten van Oosterscheldekering en ten zuiden van Neeltje Jans met op de achtergrond bodemhoogtecontouren ($m+NAP$).

Ten oosten van de Oosterscheldekering zijn de metingen vanaf een schip uitgevoerd tijdens de meetperioden van frames MP0302, MP0303 en MP0304 (tussen 23 januari en 23 februari 2014, zie Tabel 2.1 en Tabel 2.2). Er zijn alleen metingen vanaf een schip gedaan tijdens vloed of kentering, omdat tijdens eb niet veilig gemeten kan worden. Er bestaat kans dat het schip de kering ingetrokken wordt door de hoge stroomsnelheden. Door de hoge mate van turbulentie die wordt veroorzaakt door de kering (*grid turbulence*) tijdens vloed en die niet representatief is voor de Rijn- en Maasmonding, was in eerste instantie gepland alleen metingen tijdens eb te gebruiken. Metingen tijdens eb (of vloed aan de westzijde van de kering) zijn er dus niet. Om deze reden zijn toch metingen tijdens vloed geanalyseerd.

De meetresultaten zijn aangeleverd in ASCII formaat. Alleen de verwerkte metingen konden beschikbaar worden gesteld, waarin de stroomsnelheidsvector is weergegeven in oostwaarts, noordwaartse (en voor metingen vanaf een schip opwaartse) stroomsnelheid. Doordat de ruwe snelheidsmeting per bundel niet beschikbaar is, kon de methode van Vermeulen et al. (2014) om de stroomsnelheid ook bij steile bodemhellingen (bij de rand van ontgrondingskuilen) tot dichterbij de bodem en nauwkeuriger te kunnen bepalen niet worden toegepast.

Tabel 2.1 Aangeleverde bestanden van metingen vanaf een schip

Wat	Filenaam	Periode	Opmerking
Rpo 2013		Verschilt van vaste metingen	oostkant
Rpo 20140204	2131S1401001t.000 – 2131S1401048t.000	20140204 12:23- 20140204 18:21	Oostkant, Grotendeels vloed
Rpw 20141128	2031s1401001t.000- 2031s1401054t.000	20141128 6:53 - 20141128 13: 28	Westkant, Grotendeels eb

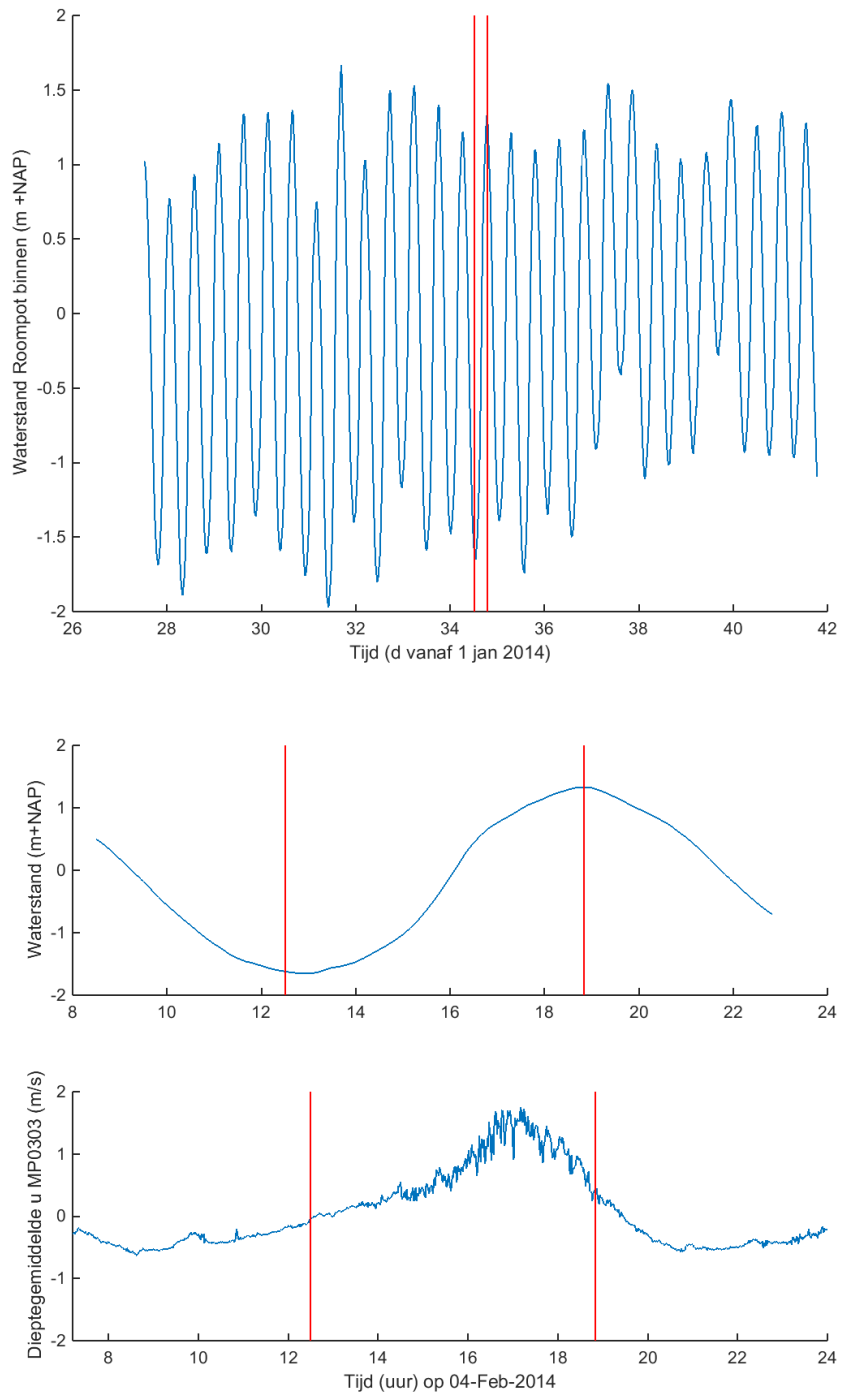
Tabel 2.2 Aangeleverde bestanden van metingen vanuit frames

Filenaam	X,Y (m)	Z (m)	Periode
OSK_MP0301_201401.asc-	Xrd=037615 Yrd=403738	NAP -22,4	20140122 13:31:03.48 – ~20140125 Geen overlap met transects
OSK_MP0302_201401.asc	Xrd=037780 Yrd=403718	NAP-55.00	20140122 12:30:46.30- ~20140225
OSK_MP0303_201401.asc	Xrd=037950 Yrd=403700	NAP -52	20140123 13:02:02.86 - ~20140223
OSK_MP0304_201401.asc	Xrd=038164 Yrd=403674	NAP-37.40	Start: 20140123 12:55:25.25 - ~20140222
OSK_MP0601_201411.asc	Xrd=036366 Yrd=403870	NAP -27.9	20141111 18:00:00.00 - ~ 20141211
OSK_MP0602_201411.asc	Westelijk van OSK		20141111 18:00:00.00 - ~ 20141211
OSK_MP0603_201411.asc	“		20141111 18:00:00.00 - ~ 20141211
OSK_MP0604_201411.asc	“		20141111 18:00:00.00 - ~ 20141211

2.2.2 Waterstand

De waterstand wordt gemeten ten noorden van Roompot (geul aan de zuidkant van de Oosterschelde). De waterstand bij Roompot-binnen is weergegeven in Figuur 2.4. Deze waterstand is gebruikt om de meethoogte ten opzichte van NAP te bepalen van de ADCP metingen vanaf het schip.

De bovenste plot in Figuur 2.4 geeft aan dat de meting is uitgevoerd tussen spring- en doottijd in. De stroomsnelheid gemiddeld over het gedeelte van de verticaal met metingen toont dat de stroomsnelheid op de piek groter dan 1,5 m/s is. Dit zijn stroomsnelheden die groot zijn en niet op veel locaties in de Rijn- en Maasmonding voor zullen komen.



Figuur 2.4 Waterstand bij Roompot-binnen voor een springtij doottij cyclus (boven), voor de periode van 6 uur met overlap (midden) en stroomsnelheid in oostelijke richting gemiddeld over de bemeeten diepte voor de periode van 6 uur met overlap (onder)

2.3 Meetinstellingen stroommetingen

Een ADCP meet stroomsnelheid door het sturen van een geluidssignaal en het bepalen van de Doppler verschuiving van een meting (*ping*). Een gemiddelde over een aantal metingen wordt intern in de ADCP bepaald en daarna opgeslagen per *ensemble*. Wanneer de stroomsnelheid wordt gemiddeld over meer *pings* per *ensemble* is de nauwkeurigheid hoger. De metingen met ADCP's vanuit de frames zijn uitgevoerd met de instellingen van Tabel 2.3. De instellingen voor de ADCP aan het schip zijn uitgevoerd met de instellingen van Tabel 2.4. Voor sommige instellingen zijn hier aannamen gemaakt, omdat ze niet zijn aangeleverd. De meetperiode (tijd per *ensemble*) van de twee ADCP's verschilt: vanaf het frame is gemiddeld intern de ADCP over 60 s en vanaf het schip is gemiddeld over 4,6 s. Door dit verschil en de variatie in de stroming zal de gemeten stroomsnelheid verschillen, zelfs al zou precies hetzelfde meetvolume worden bemeten.

Tabel 2.3 De meetinstellingen van de ADCP in de frames ten oosten van de Oosterscheldekering

Instelling	Waarde	Opmerking
Type ADCP	Broadband; Workhorse Monitor	Fabrikant Teledyne RD instruments; <i>Aanname: workhorse monitor wordt veel gebruikt door RWS</i>
ADCP frequentie	614 kHz	
Bundelhoek	20 gr	<i>Aangenomen voor dit type ADCP's</i>
Tijd per ensemble	60 s	
Aantal pings per ensemble	15	4 s per ping ingesteld
Hoogte bin	1 m	
Onzekerheid Per ping Per ensemble	7 cm/s 2 cm/s	Afgeleid uit specificaties van fabrikant
Bereik	2,09 – 71,09 m vanaf ADCP	Alleen MP0304 heeft minder cellen (wel 15 pings/ens)
Mode	1	<i>Aangenomen, gezien grote bereik en hoge stroomsnelheden</i>
Plaatsingshoogte	-54,3 m	

Tabel 2.4 De meetinstellingen van de ADCP op het schip

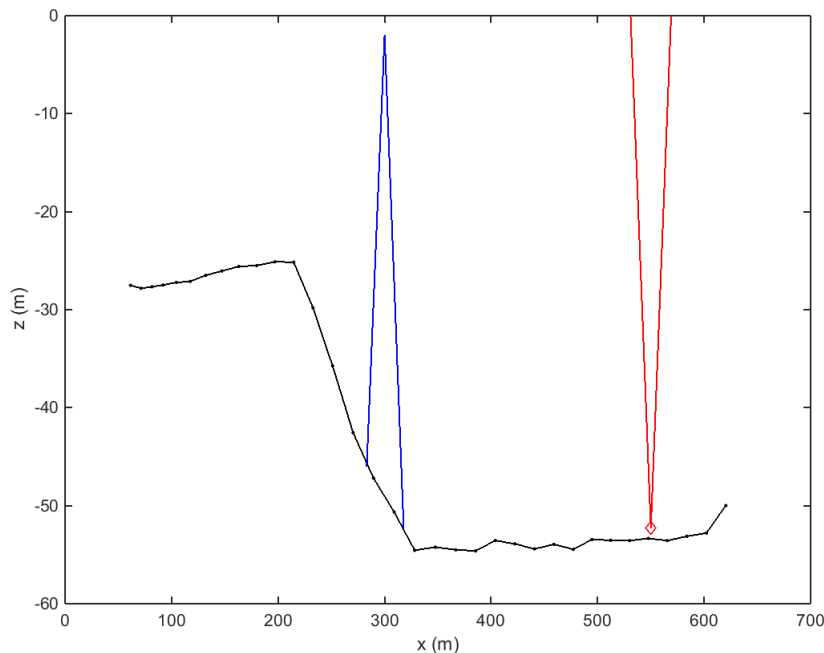
Instelling	Waarde	Opmerking
Type ADCP	Broadband; Workhorse Monitor	Fabrikant Teledyne RD instruments; <i>Aanname: workhorse monitor wordt veel gebruikt door RWS</i>
ADCP frequentie	614 kHz	<i>Aangenomen gezien grote bereik</i>
Bundelhoek	20 gr	<i>Aangenomen voor dit type ADCP's</i>
Tijd per ensemble	4,6 s	Gebaseerd op tijden van ensembles rond MP0303
Aantal pings per ensemble	2	<i>Aangenomen, omdat dit past in 4,6 s in combinatie met bottom tracking</i>
Hoogte bin	1 m	
Onzekerheid Per ping Per ensemble	7 cm/s 5 cm/s	
Bereik	2,61 – 63,61 m vanaf ADCP	
Referentie	Bottom tracking	Er is geen (RTK) GPS data aanwezig
Mode	1	<i>Aangenomen, gezien grote bereik en hoge stroomsnelheden</i>

2.4 Inschatting van meetnauwkeurigheid

De stroomsnelheden gemeten vanuit frames wordt in deze studie gebruikt als referentie. Metingen vanuit het frame dichtbij de bodem zijn nauwkeuriger om de volgende redenen: (1) de bundels van de ADCP uit het frame liggen bij de bodem nog dicht bij elkaar, (2) de metingen vanuit het frame beginnen dichterbij de bodem en (3) de snelheid van het water ten opzichte van de ADCP is kleiner is dan bij de metingen van het schip. Afgezien van omgevingsfactoren zoals veranderende bodemligging, fluctuaties in turbulentie en de mate waarin de aanname van uniformiteit van stroming in de vier bundels daarbij geldt, kan de nauwkeurigheid worden geschat op basis van de ADCP instellingen (tabellen in sectie 2.3).

Nauwkeurigheid bestaat uit juistheid en precisie. Als schatting voor de precisie van een gemeten stroomsnelheid geeft de fabrikant de standaardafwijking per ping. Voor deze instellingen is de standaardafwijking per ping 7 cm/s voor beide ADCP's (Teledyne RDI infosheet voor Workhorse monitor bij een binafstand van 1 m). De standaardafwijking per ensemble (per ensemble wordt de stroomsnelheid opgeslagen) neemt af met de wortel van het aantal pings. Aannemend dat de standaardafwijking niet afhangt van de vaarsnelheid, wordt deze voor de metingen vanaf het schip 5 cm/s (2 pings) en voor de metingen vanuit het frame 2 cm/s (15 pings). Door middeling over ensembles kan de standaardafwijking verder worden verkleind.

Deze schattingen van de nauwkeurigheid op basis van de meting alleen geven aan dat de beschikbare stroomsnelheden vanuit frames nauwkeuriger zijn. Dat mag ook verwacht worden gezien de langere middeltijd intern in de ADCP. Daarbij is nog niet meegenomen dat voor snelheidsmetingen in de onderste 15% van de waterkolom de breedte van de laag (*bin*) waarin de stroomsnelheid uniform wordt verondersteld kleiner is voor de metingen vanuit een frame vanwege bundelspreiding (Figuur 2.5). Omdat de aanname van uniformiteit in werkelijkheid minder goed is met toenemend volume per *bin*, zijn de metingen vanuit frames ook om deze reden nauwkeuriger. De metingen vanuit frames geven daarmee een nauwkeurige weergave van de stroming ter plaatse van het frame in de onderste 15% van de waterkolom. Aannemend dat de variatie in stroomsnelheid 30 m rondom het frame klein is, zijn de metingen vanuit het frame een goede referentie in de onderste 15% van de waterkolom voor de metingen vanaf het schip.



Figuur 2.5 Schets van ADCP bundels vanaf het frame MP0303 (rood) en vanaf een schip op de rand van de ontgrondingskuil (blauw). Op -50 m+NAP ligt het centrum van de tegenoverliggende bundels ongeveer 36 m uit elkaar.

2.5 Uitgangspunten bij verwerking van de metingen

In dit rapport worden stroomsnelheidsmetingen met een ADCP vanaf een schip vergeleken met stroomsnelheden uit een frame. De volgende uitgangspunten zijn hierbij gehanteerd:

1. De stroomsnelheid en -richting is uniform in de 4 bundels van de ADCP's, zelfs wanneer de as van de bundels 36 m uit elkaar liggen.
2. Over ADCP metingen vanuit frame:
 - a. Aangenomen is dat de stroomsnelheid 30 m rondom het frame uniform is in de onderste 15% van de waterkolom, zodat de metingen vanuit het frame een goede referentie zijn voor de metingen vanaf het schip.
 - b. Er zijn alleen horizontale snelheden beschikbaar. Er wordt aangenomen dat deze horizontale stroomsnelheden gecorrigeerd zijn voor een eventuele scheefstand van de ADCP.
 - c. De diepten van de ADCP's in de frames was opgegeven vooraf aan de plaatsing. Deze diepte is vergeleken met de diepte van de vooraf opgegeven locatie uit ADCP metingen vanaf het schip en met de Baseline diepten uit 2012 (Figuur 2.1). Hieruit volgde dat het frame MP0303 2,3 m dieper moet hebben gelegen dan vooraf opgegeven. Aangenomen is dat de bodemhoogte in 2012 hetzelfde was als in 2014 tijdens de ADCP metingen.
3. Voor ADCP metingen vanaf een schip:
 - a. Pitch, rol en stampen is goed gecorrigeerd intern in de ADCP (er is bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de hoogte van golven voor het bepalen van de nauwkeurigheid)
 - b. De afstanden .Bin en .Depth in de meetdata geven de afstand weer ten opzichte van het wateroppervlak.
 - c. De beschikbare verticale snelheid is gemiddeld 0 cm/s verondersteld en wordt niet gebruikt in de analyse. De stroomsnelheid naar het oosten en noorden zijn dus niet gecorrigeerd voor eventuele scheefstand van de ADCP.

2.6 Verwerkingsmethode van metingen

De stroomsnelheid naar het oosten en naar het noorden is bepaald uit de magnitude en richting van de stroming. Stroomsnelheden boven 94% van de bemeten diepte voor de ADCP's vanuit het frame en stroomsnelheden in de onderste 6% van de waterkolom zijn verwijderd, omdat in deze zones gemeten stroomsnelheden onnauwkeurig zijn vanwege zijlobinterferentie. Snelheden in deze zones met zijlobinterferentie worden één keer getoond om aan te geven dat ze niet betrouwbaar zijn.

Stroomsnelheden zijn gemiddeld over een aantal metingen (*ensembles*) om meetruis en turbulentie uit te middelen. Op momenten dat het schip een frame passeert zijn stroomsnelheden gemeten vanuit het frame en vanaf het schip geanalyseerd en vergeleken.

3 Resultaten

3.1 Stroomsnelheden vanaf frame MP0303

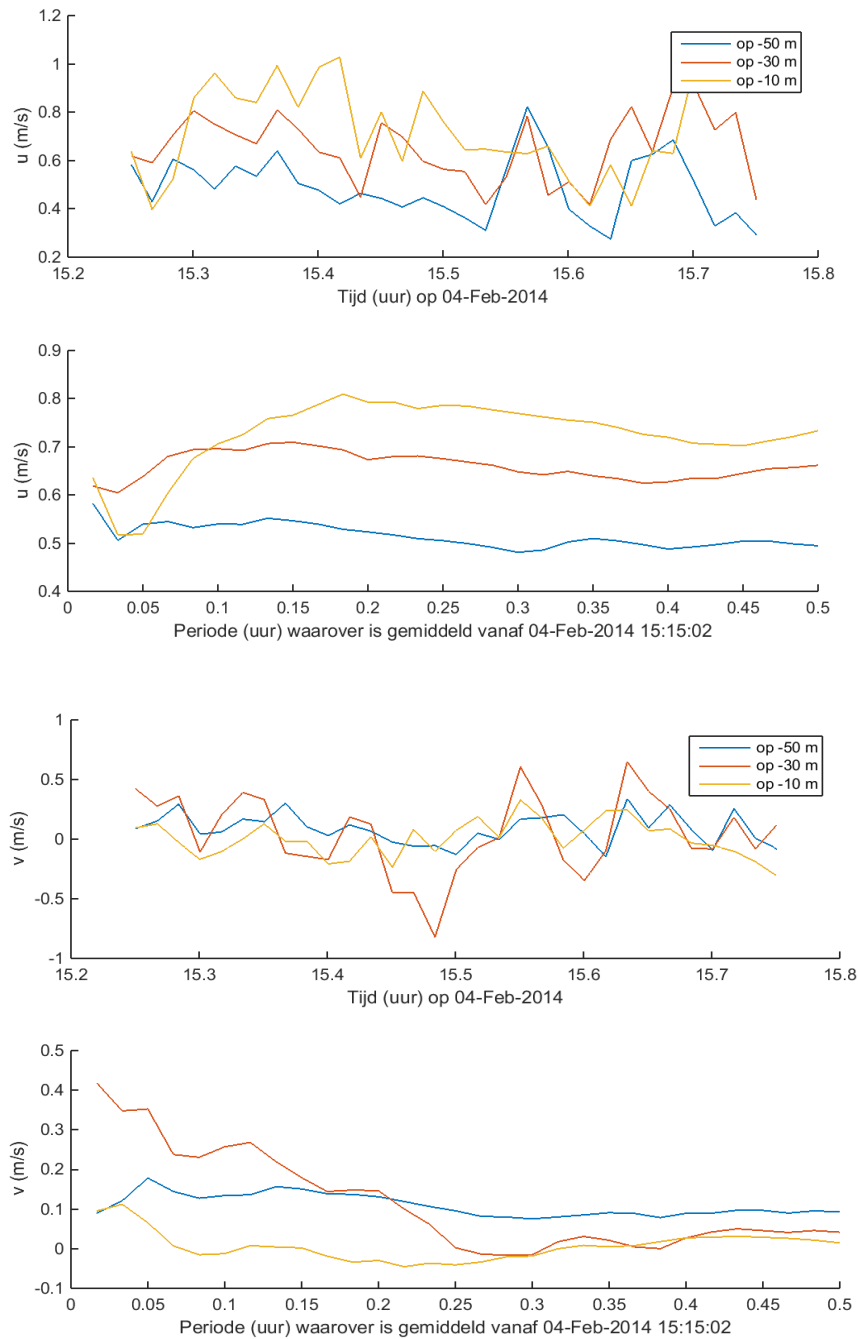
3.1.1 Uitmiddelen van turbulentie

Voor het gebruik als referentie zijn er keuzen te maken over hoe de stroomsnelheden uit de ADCP in het frame op de bodem gebruikt worden. Er is vastgesteld dat de stroomsnelheden vanaf de eerste *bin* (de meetcel het dichtst bij de bodem) een realistische schatting van stroomsnelheid geven. Daarmee kan de gemeten stroomsnelheid vanaf 2,7 m boven de bodem worden gebruikt ter validatie van de ADCP metingen vanaf het schip. Een volgende keuze is hoeveel ensembles worden gemiddeld om een zo nauwkeurig mogelijk snelheidsprofiel te krijgen zonder dat de veranderingen binnen de middelperiode door getijvariatie te groot worden.

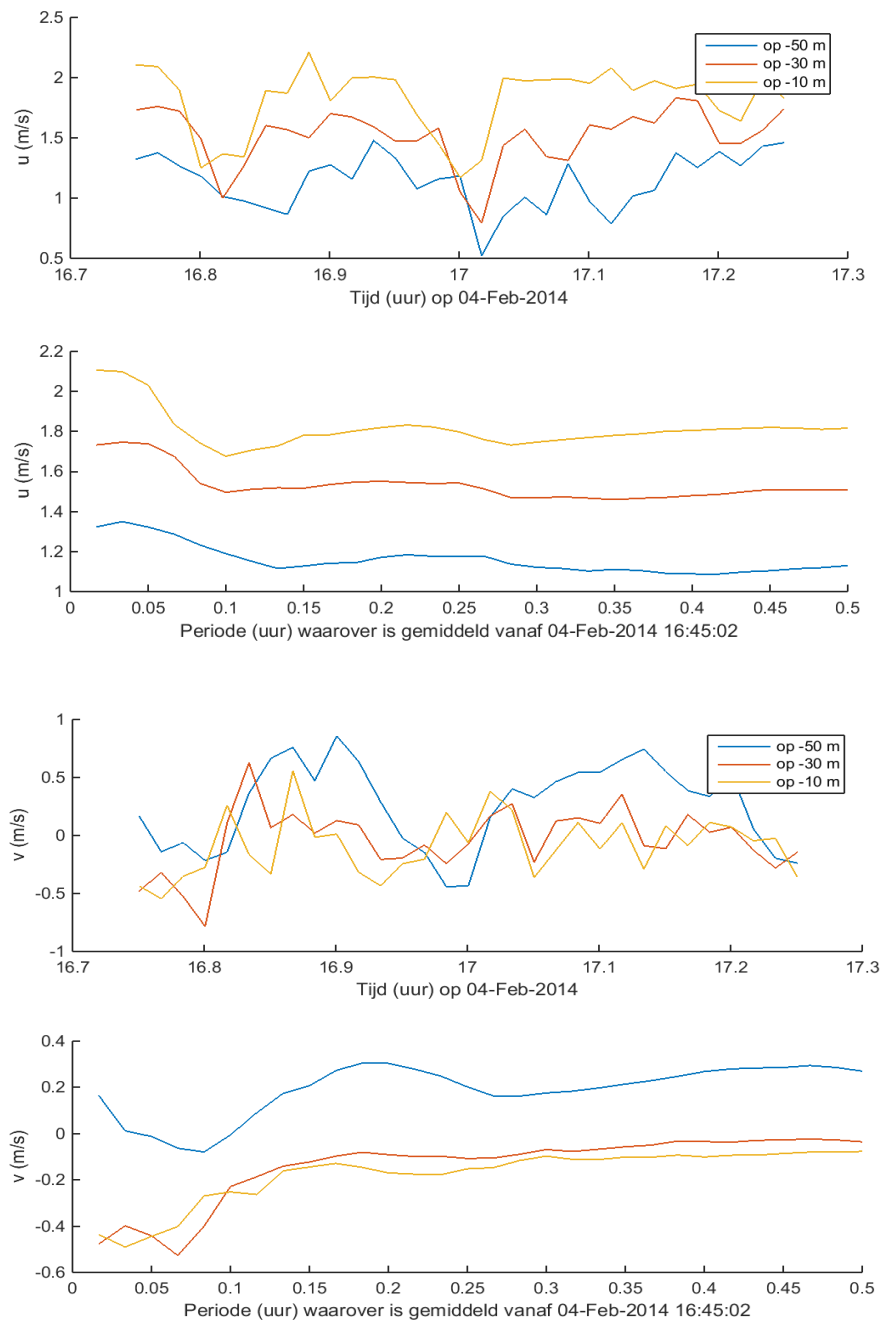
De stroomsnelheid in de metingen varieert door meetruis, kleinschalige turbulentie en grootschalige turbulentie (Muste et al., 2004). Deze variaties dienen uitgemiddeld te worden om een representatief snelheidsprofiel te krijgen. Nezu en Nakagawa (1993) geven aan dat de diepte verdeeld kan worden in een laag van 15% van de waterkolom bij de bodem (de 'wall'), een overgangszone daarboven tot 60% van de waterkolom en een vrije oppervlakte zone voor de resterende 40% van de waterkolom nabij het wateroppervlak. In ieder van deze zones (op -50, -30 en -10 m + NAP) is bepaald hoe lang gemiddeld moet worden om variaties uit te middelen (Figuur 3.1 en Figuur 3.2). De tweede en vierde plots in deze figuren tonen de stroomsnelheid gemiddeld over 1 tot en met 30 *ensembles*.

Figuur 3.1 en Figuur 3.2 tonen niet alleen stroomsnelheid in de hoofdstroomrichting (naar het oosten), maar ook de stroomsnelheid naar het noorden. Deze beide componenten zijn afzonderlijk geanalyseerd in plaats van de magnitude van de stroming, omdat de stroomrichting tientallen graden kan variëren zowel in de verticaal als in de tijd. Twee tijdstippen worden getoond, waarvoor de stroomsnelheid gemiddeld over het profiel niet te veel toe- of afneemt door getijvariatie (onderste plot Figuur 2.4). Vanaf 15:15-15:45 is de vloedstroming relatief voor deze locatie zwak (Figuur 3.1) en tussen 16:45-17:15 vindt de piekstromingsnelheid plaats (Figuur 2.4). Voor beide perioden varieert het voortschrijdend gemiddelde behoorlijk tot in elk geval 0.1 uur (6 minuten) en wordt het voortschrijdend gemiddelde constant vanaf 0.2-0.3 uur. Om deze reden wordt geconcludeerd dat gemiddeld moet worden over 0.3 uur (17 minuten) om een representatief snelheidsprofiel te verkrijgen.

Dit middelingsinterval van 17 minuten is groot ten opzichte van het benodigde middelingsinterval wat nodig is op andere locaties, waar vaak 10 minuten voldoende is (Muste et al, 2004b, Szupiany et al., 2007). Een verklaring hiervoor zijn de grootschalige wervels die worden gegenereerd bij de pijlers van de Oosterscheldekering. Mogelijk speelt ook loslating van de stroming bij de overgang van de bodembescherming naar de helling steiler dan 1:1 een rol.



Figuur 3.1 Stroomsnelheid in oostelijke richting op 3 diepten gedurende een half uur vanaf 4 februari 15:15 (boven), het voortschrijdend gemiddelde hiervan (tweede plot); en hetzelfde voor de stroomsnelheid in noordelijke richting (derde en vierde plot)



Figuur 3.2 Stroomsnelheid in oostelijke richting op 3 diepten gedurende een half uur vanaf 4 februari 16:45 (boven), voortschrijdend gemiddelde hiervan (tweede plot); en hetzelfde voor de stroomsnelheid in noordelijke richting (derde en vierde plot).

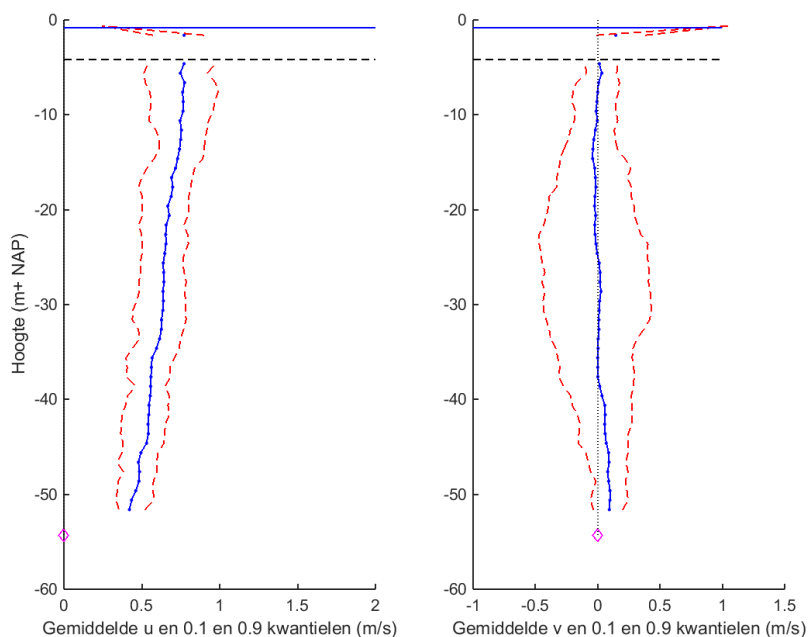
3.1.2 Variatie in profielen

Om de afhankelijkheid van de variatie met de diepte te bepalen is het gemiddelde snelheidsprofiel en de variatie daaromheen bepaald voor dezelfde perioden. De variatie is weergegeven als het 0.1 en 0.9 kwantiel, waartussen 80% van de gemeten stroomsnelheden liggen.

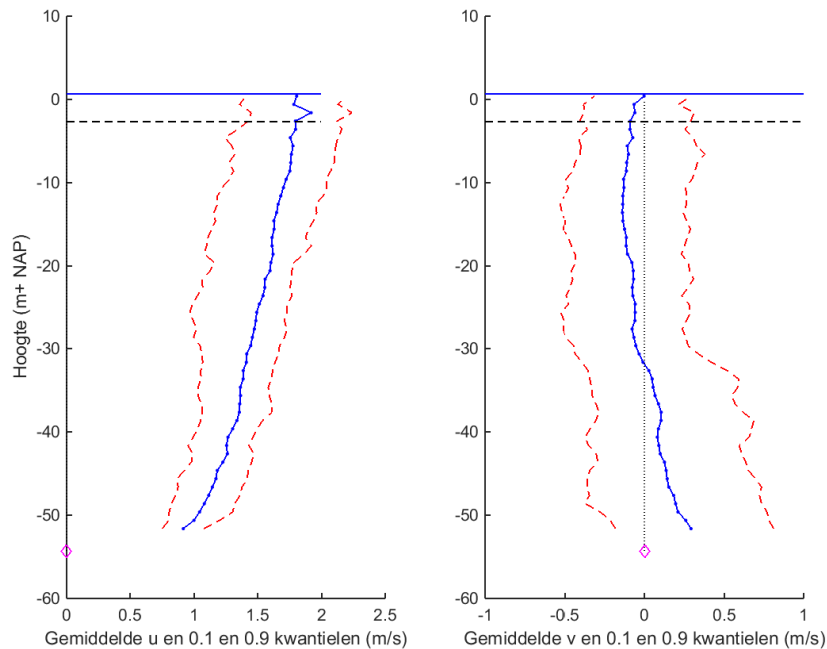
Figuur 3.3 toont dat voor de periode met zwakke vloedstroming voor iedere hoogte 80% van de metingen in oostelijke richting niet meer dan 0.5 m/s van elkaar liggen. Tijdens maximale vloed neemt deze variatie toe van de bodem tot het wateroppervlak en is de spreiding maximaal 1 m/s (Figuur 3.4). Deze grotere variatie kan verklaard worden door een grotere turbulentie-intensiteit passend bij de grotere stroomsnelheden, waarbij mogelijk grotere wervels die ontstaan bij de kering passeren langs de locatie van het frame. Voor beide perioden is een trend waar te nemen dat de spreiding toeneemt naar het wateroppervlak. Een logische verklaring hiervoor is dat de bundels verder uit elkaar liggen hoger in de waterkolom, waardoor de aanname van uniforme stroming minder goed opgaat.

Wat betreft de stroomsnelheid naar het noorden is de variatie voor beide momenten groter of vergelijkbaar als voor snelheid naar het oosten. Het valt op dat de variatie voor de snelheid naar het noorden in het midden van de waterkolom duidelijk groter is rond 15:30 (Figuur 3.3).

Over de hele diepte is het snelheidsprofiel (blauwe lijn) vrijwel glad, behalve bij het wateroppervlak. In de bovenste 6% ontbreken metingen (Figuur 3.3) of zijn onrealistische variaties te zien (Figuur 3.4). Standaard worden metingen in deze zone verwijderd. Vanwege de onregelmatigheid in de twee meetcellen direct onder de zwarte gestreepte lijn (Figuur 3.3) zijn voor hierna volgende analyses de metingen in de 10% nabij het wateroppervlak verwijderd. Daarmee wordt verzekerd dat getoonde stroomsnelheden niet zijn beïnvloed door zijlobinterferentie.



Figuur 3.3 Het snelheidsprofiel gemiddeld over de periode van 15:15-15:45 richting oosten (links) en richting noorden (rechts); de paarse diamant is het frame, de blauwe horizontale lijn het wateroppervlak, de zwarte gestreepte lijn markeert de bovenste 6% aan en de rode lijnen zijn het 0.1 en 0.9 kwantiel.



Figuur 3.4 Het snelheidsprofiel gemiddeld over de periode van 16:45:17:15 richting oosten (links) en richting noorden (rechts); de paarse diamant is het frame, de blauwe horizontale lijn het wateroppervlak, de zwarte gestreepte lijn markeert de bovenste 6% aan en de rode lijnen zijn het 0.1 en 0.9 kwantiel.

3.1.3 Extrapolatie naar de bodem

Er zijn meerdere methoden beschikbaar om stroomsnelheden te extrapoleren naar de bodem. Volgens de theoretisch onderbouwde *law of the wall* is de stroomsnelheid (u) een logaritmische functie van de hoogte boven de bodem (z):

$$u = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

met u^* de *shear velocity*, k de von Karman constante met waarde 0.4 en z_0 de dikte van de laminaire grenslaag (maat voor de hydraulische ruwheid). u^* is over het algemeen in de orde van 1/10 van de gemiddelde stroomsnelheid. Deze *law of the wall* is geldig bij de bodem, maar wordt vaak toegepast voor het hele snelheidsprofiel omdat het een goede benadering geeft. De u^* en z_0 kunnen worden bepaald wanneer de stroomsnelheid op meerdere hoogten bekend is. Nadelen van deze methode voor toepassing bij ADCP metingen zijn dat voor het bepalen van u^* en z_0 meerdere oplossingen mogelijk zijn en dat het fitten van u^* en z_0 gevoelig is voor fluctuaties in het snelheidsprofiel.

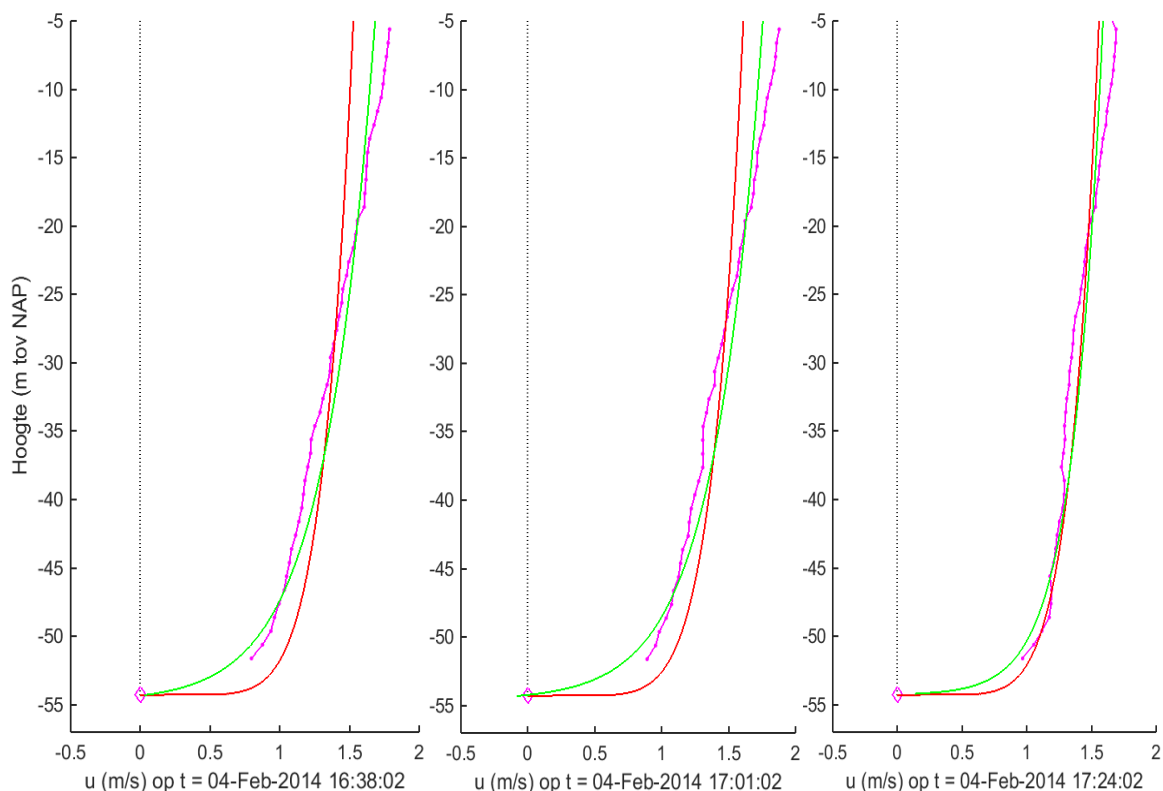
Om deze reden wordt vaak de meer robuuste methode toegepast van het fitten van een *power law*:

$$u = u_{max} \left(\frac{z}{h} \right)^{1/7}$$

met u_{max} de te bepalen maximale snelheid bij het wateroppervlak, h de diepte en de exponent van $1/7$, welke volgens Muste et al. (2004a) het vaakst passend is. Een waarde van $1/6$ wordt ook gebruikt voor de exponent. Met deze beide exponenten kunnen snelheidsprofielen worden gefit die dichtbij theoretisch onderbouwde logaritmische profielen liggen.

Figuur 3.5 geeft voor de drie eerder getoonde momenten voorbeelden van de twee methoden om stroomsnelheid naar de bodem te extrapoleren op basis van de metingen in de gehele waterkolom. Het valt op dat de gemeten stroomsnelheid meer toeneemt bij het wateroppervlak dan volgens de fits. De snelheidsprofielen zijn over de hele diepte steil. Bij de eerste twee momenten ligt de logaritmische fit gemiddeld dichterbij het gemeten snelheidsprofiel. Voor deze momenten past een $1/6$ *power law* beter (niet getoond). Om 17:24 ligt juist de $1/7$ *power law* fit het dichtst bij het gemeten snelheidsprofiel, zeker dichtbij de bodem. Deze voorbeelden geven aan dat het lastig is om met één fit op verschillende momenten snelheidsprofielen te extrapoleren naar de bodem.

Voor de logaritmische fits staan de resultaten voor u^* en z_0 weergegeven in Tabel 3.1. Het valt op dat, ondanks dat de stroomsnelheid gemiddeld over de diepte vergelijkbaar is, vooral de waarde voor z_0 flink varieert. De verwachting is dat z_0 ongeveer hetzelfde blijft in de tijd. Dit geeft de gevoeligheid van de logaritmische fit aan. Dat is een reden om bij ADCP toepassingen een *power law* te fitten.



Figuur 3.5 Gemeten snelheidsprofiel in oostelijke richting gemiddeld over 17 ensembles (paars) en extrapolatie naar de bodem met een 1/7 'power law' (rood) en met de 'law of the wall' (groen) voor drie tijden rond maximaal vloed

Tabel 3.1 De coëfficiënten van de law of the wall fit

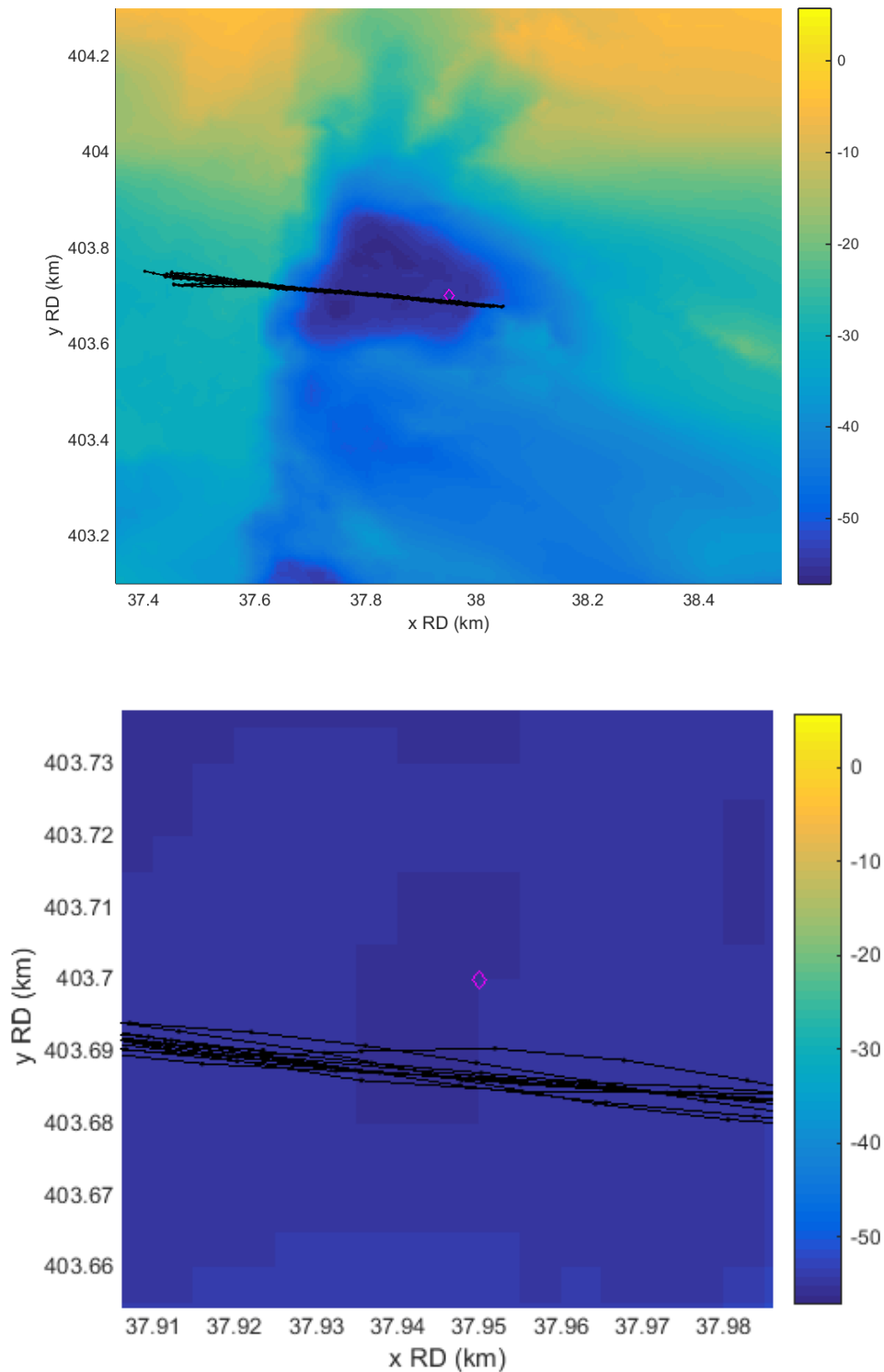
Tijd op 4-2-14	u^* (m/s)	z_0 (m)
16:38	0.14	0.46
17:01	0.14	0.39
17:24	0.09	0.05

3.2 Stroomsnelheden gemeten vanaf het schip

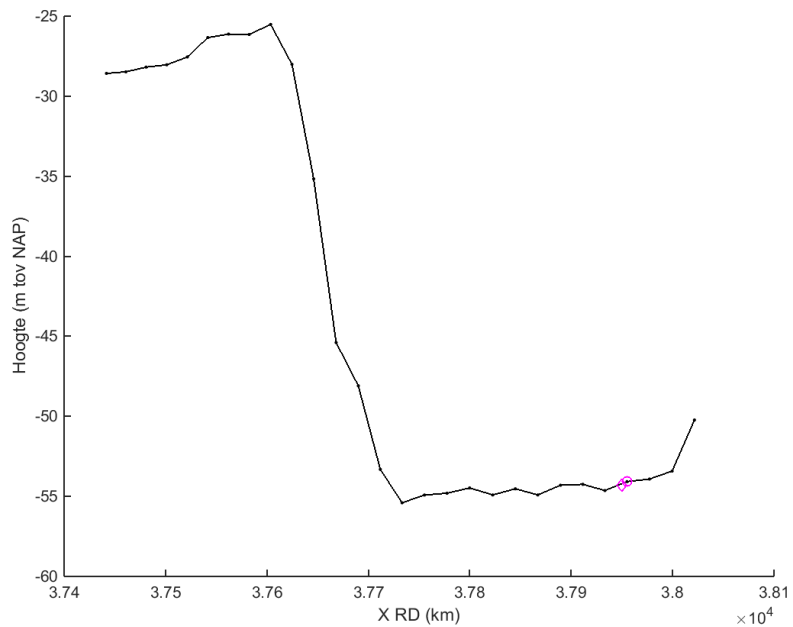
Om te bepalen hoeveel *ensembles* het best gemiddeld kunnen worden voor vergelijking met de metingen uit frames, worden eerst de locaties van de transects vergeleken. Figuur 3.6 toont de meetlocaties vanaf het schip. De vaarweg van het schip lag consistent 10-15 m ten zuiden van het frame. De afstand tussen punten waar een ensemble is gemeten is 15-20 m. Deze afstand is redelijk constant, waaruit blijkt dat het schip met een constante snelheid van ongeveer 3,5 m/s voer. Wanneer wordt aangenomen dat de stroming uniform is 30 m rondom het frame, zouden 3 *ensembles* gebruikt kunnen worden om een gemiddeld profiel te bepalen.

Figuur 3.8 toont de stroomsnelheidsmetingen zo dicht mogelijk bij het frame (groene lijn) en gemiddelde profielen voor passages van het schip langs het frame bij de grootste stroomsnelheden (maximaal vloed). Voor een transect zoals getoond in Figuur 3.6 (boven) toont Figuur 3.7 de bodemvariatie. De helling bij de bodembescherming is maximaal ongeveer 2:1, wat erg steil is voor een ontgrondingskuil en bovendien over een groot hoogteverschil van 20 m.

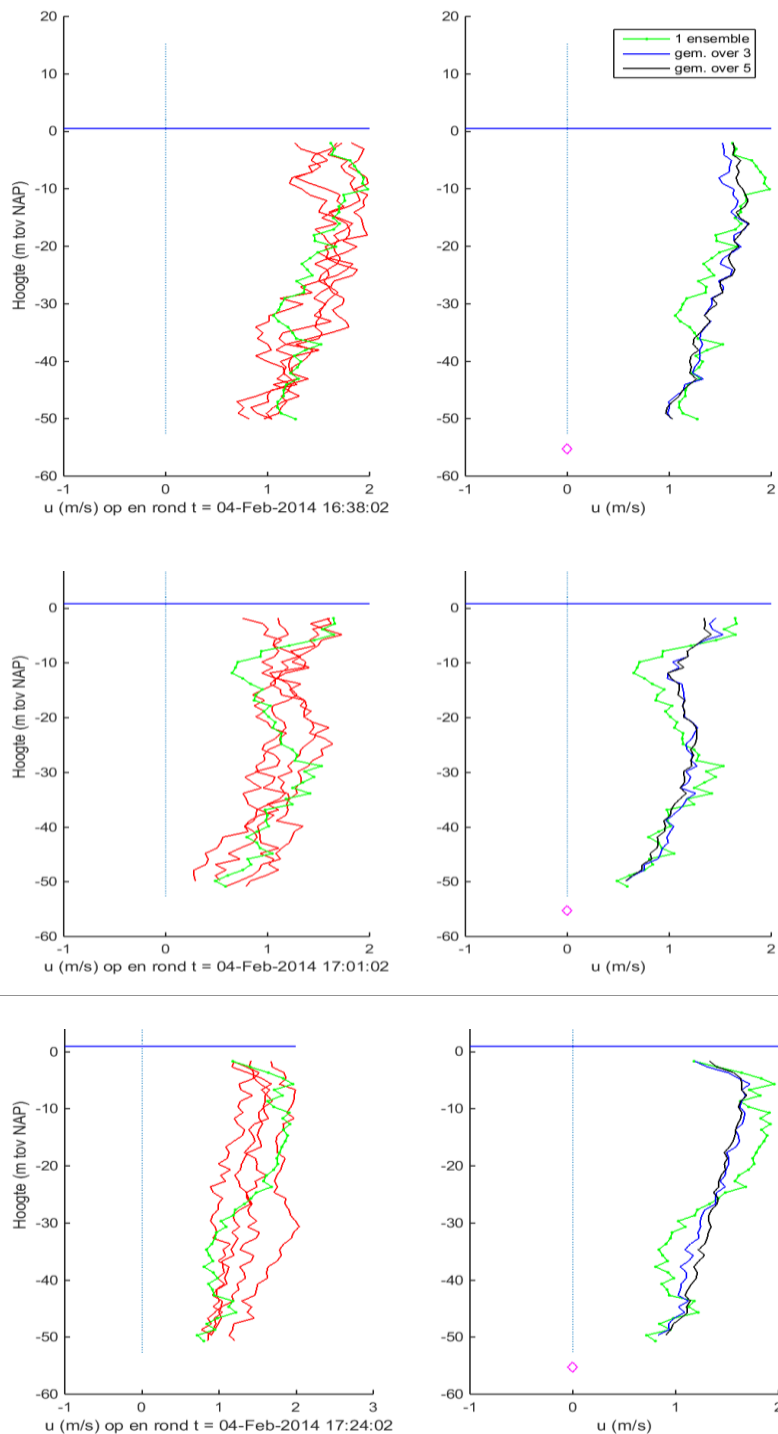
In een snelheidsprofiel uit een enkel *ensemble* is de meetruis over de hele diepte zichtbaar (Figuur 3.8). Bij de profielen gemiddeld over 3 *ensembles* is dat duidelijk minder, terwijl bij middeling over 5 *ensembles* ook nog steeds onregelmatigheden zichtbaar zijn. De keuze is gevallen op middelen over 3 *ensembles*, omdat dit een duidelijk gladder snelheidsprofiel oplevert en omdat 3 *ensembles* binnen ongeveer 30 m van het frame liggen. Door de driedimensionale stroming in de ontgrondingskuil is gekozen om alleen metingen binnen deze 30 m te gebruiken, omdat daarbuiten snelheidsprofielen waarschijnlijk verschillen van het profiel bij het frame. Bij middeling over 3 *ensembles* is de standaardafwijking door de meetruis ongeveer 3 cm/s volgens de fabrikant.



Figuur 3.6 Bodemhoogte (m +NAP; kleur) en de gevaarstransecten (zwarte lijnen met punten op ensemblelocatie) ten oosten van de Oosterscheldekering in Roompot (boven) en een detail bij het frame (onder).



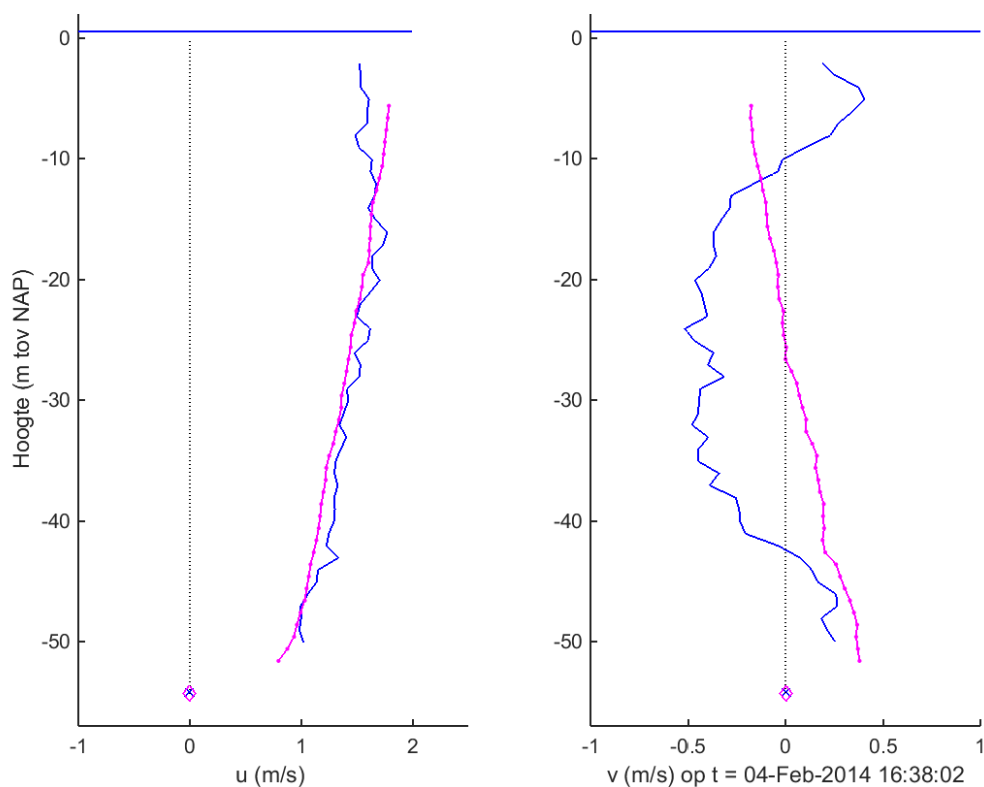
Figuur 3.7 Diepteprofiel langs een transect; bij de drempel naar de bodembescherming neemt de bodemhoogte met 20 m toe over een horizontale afstand van ongeveer 10 m (2:1)



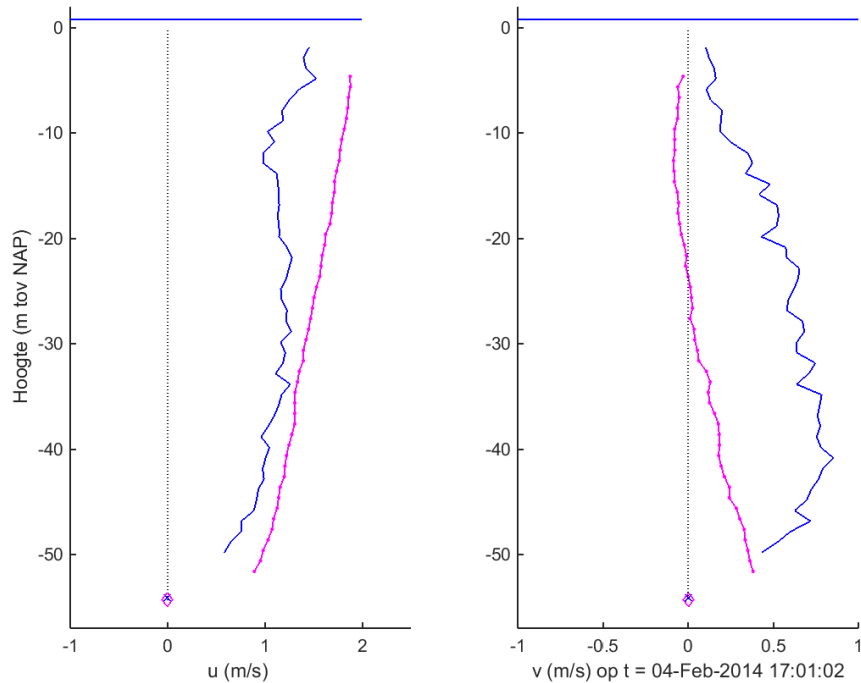
Figuur 3.8 Stroomsnelheid in oostelijke richting bepaald uit metingen vanaf een schip op drie momenten samenvallend met een passage van het schip bij frame MP0303 (groene lijn) en gemeten profielen in vier ensembles rondom het moment van passage (rood) [links] en profielen gemiddeld over een verschillend aantal gemeten profielen rondom het moment van passage van het schip [rechts]

3.3 Vergelijking schip- en framemetingen

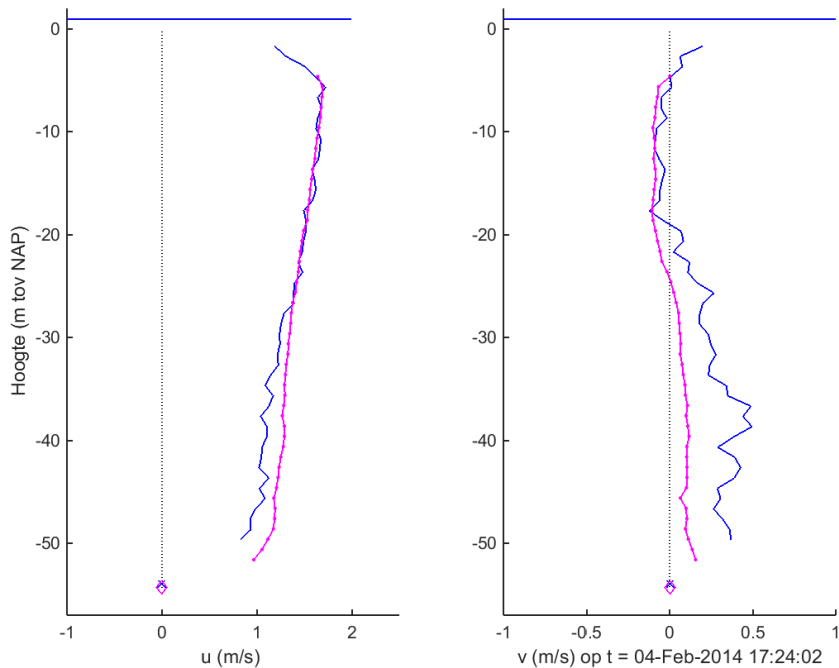
De stroomsnelheid gemeten vanuit het frame en vanaf het schip (15 s gemiddelde) zijn vergeleken voor de momenten dat het schip is gepasseerd bij frame MP0303. De frame metingen zijn gemiddeld over de 8 minuten voor, een minuut tijdens passage van het schip en 8 minuten na passage van het schip, dus over 17 minuten. Resultaten van stroomsnelheid naar het oosten (u) en naar het noorden (v) zijn voor dezelfde momenten als eerder weergegeven in Figuur 3.9, Figuur 3.10 en Figuur 3.11. Voor overige passages van het schip langs het frame zijn de figuren opgenomen in bijlage A.



Figuur 3.9 Stroomsnelheid om 16:38 vanuit frame (paars) en vanaf het schip (blauw) in oostelijke richting [links] en in noordelijke richting [rechts] voor het hele profiel



Figuur 3.10 Stroomsnelheid om 17:01 vanuit frame (paars) en vanaf het schip (blauw) in oostelijke richting [links] en in noordelijke richting [rechts] voor het hele profiel



Figuur 3.11 Stroomsnelheid om 17:24 vanuit frame (paars) en vanaf het schip (blauw) in oostelijke richting [links] en in noordelijke richting [rechts] voor het hele profiel

Voor de passages tijdens maximaal vloed (Figuur 3.9, Figuur 3.10 en Figuur 3.11) is te zien dat er generiek overeenkomsten zijn tussen de twee snelheidsprofielen naar het oosten, maar er zijn ook verschillen tot 1 m/s waar te nemen. Dit zijn aanzienlijke verschillen. Het profiel bepaald vanuit het frame is glad door de middeling over een 68 keer zo lange periode, terwijl bij het profiel vanaf het schip de ruis of turbulentie niet is uitgemiddeld.

Voor de stroomsnelheid naar het noorden zijn de verschillen in Figuur 3.9, Figuur 3.10 en Figuur 3.11 groter dan voor die naar het oosten. De verschillen zijn vaak 0,5 m/s en lopen soms op tot 1 m/s. Bovenal zijn de trends in gemeten stroomsnelheid naar het noorden behoorlijk verschillend (rechts in Figuur 3.9, Figuur 3.10). Bij de bodem zijn de verschillen maximaal 0,5 m/s.

Een logische verklaring voor deze aanzienlijke verschillen is dat bij de metingen vanaf het schip in elk geval de grootschalige turbulentie niet is uitgemiddeld. In Figuur 3.4 wordt de variatie van metingen vanaf het frame getoond. Een dergelijke figuur zou ook voor metingen vanaf een schip gemaakt kunnen worden, wanneer het schip stil ligt. Hoewel door middeling over drie *ensembles* de variatie afneemt, is deze met 3 cm/s nog altijd groter dan de 2 cm/s die bepaald voor de metingen vanuit het frame. De spreiding van de stroomsnelheden op basis van metingen vanaf het schip zal daarmee naar verwachting groter zijn dan in Figuur 3.3 en Figuur 3.4 op die tijden. Dit betekent dat de aanzienlijke verschillen tot 1 m/s verklaard kunnen worden door een toevallige fout. Alleen op basis van stil liggende metingen vanaf een schip of vele passages in korte tijd kan ook uit de metingen vanaf het schip een representatief snelheidsprofiel bepaald worden.

4 Discussie

4.1 Algemeen

In de 6 uur overlappende meetperiode tijdens vloed stroomde het water via de Oosterscheldekering naar de ontgrondingskuil waar het frame was gepositioneerd. Door passage langs de pilaren van de kering en contractie is de stroming meer turbulent geworden dan aan de zee kant. Hierdoor is de stroming bij het frame (1 km stroomafwaarts) extra turbulent en zijn hier grootschalige wervels te verwachten. De tijd en ruimte schaal van deze grootschalige wervels beïnvloedt de gemeten stroomsnelheden bij de bodem.

In werkelijkheid zal de stroming 30 m rond het frame niet uniform zijn. In de ontgrondingskuil vinden complexe 3D stromingspatronen plaats. Bij vloed passeert de stroming bij de bodem de bodembescherming, duikt vervolgens langs een helling steiler dan 1:1 naar beneden, stroomt dan langs het frame nabij het laagste punt van deze ontgrondingskuil en vervolgens is de stroming bij de bodem weer omhoog gericht. Gezien de steile helling is het waarschijnlijk dat loslating van de stroming plaats vindt, waardoor grootschalige wervels aanwezig zijn. Deze 3D stromingspatronen komen generiek in ontgrondingskuilen voor. Hierdoor wordt bij iedere aanname van uniformiteit een fout gemaakt.

Omdat de bundels van de ADCP in het frame nabij de bodem dicht bij elkaar liggen dan voor de ADCP vanaf het schip (maximaal 4 m op 5 m boven het frame ten opzichte van 30 m) is de fout voor de frame-metingen bij de bodem het kleinst. Dit wordt bevestigd door de licht toenemende spreiding in snelheidsprofielen naar het oosten gemiddeld over een half uur (Figuur 3.3 en Figuur 3.4). Afgezien van de fout door niet-uniformiteit tussen de bundels, zijn de snelheden bepaald met een ADCP vanaf een schip bij deze diepte direct representatief voor de ruimteschaal relevant voor morfologische modellen met cellen van 10-100 m.

De vorm van het gemiddelde snelheidsprofiel naar het oosten is voor enkele profielen tijdens maximale stroomsnelheden gefit aan de meer theoretische *law of the wall* en de meer praktische *power law*. Beide fits resulteren bij sommige profielen in een klein verschil met het gemeten profiel over de verticaal, terwijl voor andere momenten verschillen over de verticaal wat groter zijn. Vanwege de robuustheid van de *power law* fit, is die methode waarschijnlijk het meest geschikt om stroomsnelheden te extrapoleren naar de bodem.

4.2 Vergelijking frame-metingen en metingen vanaf het schip

Het is niet goed mogelijk gebleken de frame-metingen en metingen vanaf het schip te vergelijken. De metingen vanaf het schip zijn slechts om de ongeveer 20 minuten uitgevoerd en passage door het gebied rond het frame duurde slechts kort (15 s). Ook was de horizontale locatie 20 m verschillend. Op basis van de metingen vanaf het schip gedurende 15 s was het niet mogelijk een representatief snelheidsprofiel te bepalen, waarbij meetruis, kleinschalige en grootschalige turbulentie was uitgemiddeld.

Stroomsnelheden in hoofdstroomrichting (oostelijke richting) hadden absoluut een minder groot verschil dan stroomsnelheden in noordelijke richting. De snelheidsprofielen in oostelijke richting lijken meer op een logaritmisch profiel dan in de noordelijke richting. Dit zijn aanwijzingen dat de stroming in noordelijke richting meer wordt beïnvloed door grootschalige wervels en de topografie van de ontgrondingskuil.

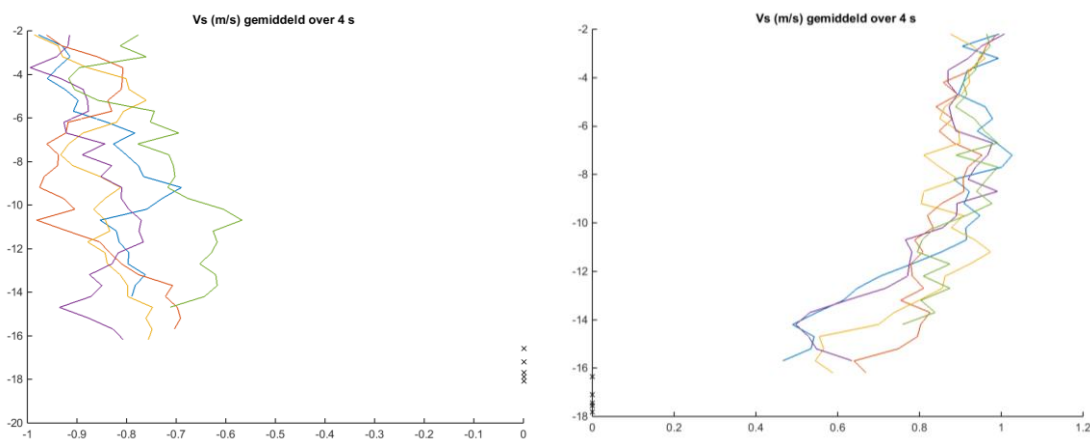
De stroomsnelheidsmetingen in de onderste 15% van de waterkolom worden bepaald over een verschillend volume. Voor de frame-metingen liggen de bundels binnen een horizontale afstand van 8 m, terwijl het schip zich verplaatste over ongeveer 30 m tijdens 15 s en de bundels meer gespreid zijn op deze diepte (Figuur 2.5). Hoewel de bodemhoogte over dit gedeelte niet veel variatie vertoont, zal het stromingspatroon in deze ontgrondingskuil wel variatie vertonen.

4.3 Betekenis voor Rijn- en Maasmonding

Deze studie heeft als doel om inzicht te geven in de bruikbaarheid van metingen met een ADCP vanaf een schip om stroomsnelheid bij de bodem in ontgrondingskuilen te bepalen, en om pieken in bodemschuifspanning te kunnen voorspellen. Verschillende ontgrondingskuilen in de Rijn- en Maasmonding groeien en kunnen leiden tot een gevaar voor de veiligheid. Sommige van deze ontgrondingskuilen liggen direct naast kunstwerken (Huismans et al., 2004), net als de ontgrondingskuil waarin het frame is geplaatst. De maximale diepte van de ontgrondingskuilen in de Rijn- en Maasmonding zijn allemaal kleiner dan de diepte van 55 m in de kuil met het frame bij de Oosterscheldekering. Hierdoor zal de diepte waarover gemeten wordt kleiner zijn en kunnen minder meetcellen worden gebruikt om de stroomsnelheid in de onderste 15% van de waterkolom te bepalen.

Voor metingen in de grootste ontgrondingskuil bij de Oosterscheldekering met een diepte van ongeveer 55 m lijkt het voldoende om alleen de onderste 6% van de metingen te verwijderen. Op ondiepere locaties in de Rijn- en Maasmonding vond Buschman (2015) dat 10-15 % verwijderd moest worden bij de bodem. De kleinere diepte bij ontgrondingskuilen in de Rijn- en Maasmonding leidt naar verwachting tot een grotere fout gemaakt door de extrapolatie. Doordat de meting wordt uitgevoerd in minder (of kleinere) *bins*, neemt de nauwkeurigheid verder af.

Om de mate van turbulentie te vergelijken met die in de Rijn- en Maasmonding zijn in Figuur 4.1 (zelfde gegevens als gemiddeld gepresenteerd in figuur 3.5 in Buschman (2015)) opeenvolgende snelheidsprofielen weergegeven in de Oude Maas gemiddeld over een vergelijkbare periode (4 s) als bij de Oosterscheldekering. De bandbreedte in de 15% bodemlaag is ongeveer 0,3 m/s voor piek eb en voor piek vloed, wat ongeveer 40 % is van de stroomsnelheid gemiddeld over die laag. Bij de Oosterscheldekering is de bandbreedte van de stroming in de hoofdstroomrichting 0,5-1,0 m/s tijdens vloed (Figuur 3.8), wat ongeveer 50-100 % is van de stroomsnelheid gemiddeld over de 15% bodemlaag.



Figuur 4.1 Snelheidsprofielen gemeten in de vaargeul van de Oude Maas bij splitsing met de Dordtsche Kil gemiddeld over 3 ensembles (4 s) tijdens vloed [links] en eb [rechts]

De variatie door meetruis zou groter moeten zijn in de Oude Maas door de kleinere gehanteerde meetcellen (0,5 m) en het kleinere meetvolume waarover is gemiddeld. Voor de kuil bij de Oosterschelde is het meetvolume groot (in 4 van de onderste 15% of 7 m bij de bodem zijn metingen beschikbaar), terwijl in het voorbeeld van de Oude Maas alleen in een waterlaag van 1,3 m metingen beschikbaar zijn. Toch is de bandbreedte relatief dus juist kleiner in de Oude Maas dan bij de Oosterscheldekering. Een verklaring hiervoor is dat de meting in de Oude Maas bij een splitsing is uitgevoerd en niet in een ontgrondingskuil of dichtbij een kering waar turbulentie wordt gegenereerd.

Een andere factor die bepalend is voor de nauwkeurigheid is de vaarsnelheid. Bij de Oosterscheldekering was deze 3,5 m/s. Wanneer deze verkleind kan worden in de Rijn- en Maasmonding, wordt de nauwkeurigheid groter. Hierdoor neemt het aantal metingen (*ensembles*) toe dat gemiddeld kan worden om te komen tot een representatieve stroomsnelheid bij de bodem in een ontgrondingskuil te bepalen. Om praktische redenen kan niet te zacht worden gevaren. Daardoor zal maximaal tweemaal zoveel metingen beschikbaar zijn. Ook dat aantal is waarschijnlijk onvoldoende om stroomsnelheid bij de bodem te bepalen, waarbij meetruis, kleinschalige en grootschalige turbulentie zijn uitgemiddeld. Alleen op basis van stil liggende metingen vanaf een schip of vele passages in korte tijd kan ook uit de metingen vanaf het schip een representatief snelheidsprofiel bepaald worden.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Conclusie

De beschikbare horizontale stroomsnelheden gemeten vanaf een frame in een ontgrondingskuil van 55 m diep bij de Oosterscheldekering zijn geanalyseerd. De stroomrichting verandert met tientallen graden in de verticaal en in de tijd. De periode waarover gemiddeld moet worden om variatie door meetruis, kleinschalige en grootschalige turbulentie uit te middelen is 17 minuten voor zowel stroming naar het oosten (hoofdstroomrichting) als naar het noorden.

De snelheidsprofielen gemeten vanuit het frame zijn gemiddeld over deze 17 minuten en vergeleken met snelheidsprofielen gemeten vanaf een schip. Doordat een passage van het schip in het gebied rondom het frame slechts 15 s duurt, kon alleen over 15 s worden gemiddeld. Dat is te kort om de variaties door meetruis en turbulentie uit te middelen. In elk geval is de grootschalige turbulentie nog niet uitgemiddeld. Dit is een verklaring voor de forse verschillen tussen frame en scheepsmeting tot maximaal 0,5 m/s bij de bodem (ongeveer 50% van stroomsnelheid bij de bodem). Op basis van deze forse verschillen wordt geconcludeerd dat, onafhankelijk van de methode waarmee de stroomsnelheid wordt geëxtrapoleerd naar de bodem, een stroomsnelheid gemiddeld over de onderste 15% van de waterkolom waarschijnlijk een grotere afwijking dan 10 % heeft van de werkelijke stroomsnelheid voor de metingen vanaf een schip bij de Oosterscheldekering.

In de Rijn- en Maasmonding zijn de ontgrondingskuilen minder diep en daarmee het meetvolume kleiner dan bij de Oosterscheldekering. De intensiteit van de turbulentie is mogelijk kleiner dan in de ontgrondingskuil bij de Oosterscheldekering, waardoor minder lang gemiddeld hoeft te worden. De verwachting is dat ook in ontgrondingskuilen in de Rijn- en Maasmonding de stroomsnelheid in de onderste 15% van de waterkolom niet met een nauwkeurigheid van 10% kan worden bepaald. De korte periode van een passage van het schip langs een locatie is te beperkt om grootschalige turbulentie uit te middelen. Alleen op basis van stil liggende metingen vanaf een schip, of eventueel met vele passages in korte tijd, kan uit metingen vanaf een schip een representatief snelheidsprofiel bij de bodem bepaald worden.

5.2 Aanbevelingen

Het advies is een meting bij een ontgrondingskuil in de Rijn- en Maasmonding buiten de invloedssfeer van een constructie uit te voeren, waarbij tegelijkertijd alternatieve metingen worden gedaan om de stroomsnelheid bij de bodem te bepalen. Voor aanbevelingen over het bepalen van de stroomsnelheid in de onderste laag uit (alternatieve) metingen vanaf een varend schip, een stil liggend schip of frames op de bodem wordt verwezen naar Buschman (2015). Een concrete aanvulling is dat in het verleden een Autonome Meetfaciliteit (AMF) is gebruikt voor het monitoren van sediment transport en bodem morfologie. Dit meetframe is beschikbaar bij Deltares. Het frame is standaard uitgerust met twee zandtransportmeters vlak bij de bodem (2 puntstroomsnelheidmeters die ook zand concentratie meten) en kan verder worden aangevuld met de benodigde apparatuur.

Voor de metingen bij de Oosterscheldekering was de vaarsnelheid 3,5 m/s en zijn de ruwe metingen niet beschikbaar. Hoewel er praktische beperkingen zijn, wordt de meting nauwkeuriger als langzamer gevaren wordt. Niet alleen neemt daarmee de meetonzekerheid af door lagere snelheden ten opzichte van de ADCP, ook worden meer metingen op een zelfde traject gedaan, welke gemiddeld kunnen worden om de onzekerheid te beperken. Door ruwe ADCP meetgegevens op te slaan en beschikbaar te stellen kunnen methoden toegepast worden ook boven steile taluds tot dichtbij de bodem gemeten kan worden (Vermeulen et al., 2014). Uit ruwe metingen kan ook de verticale snelheidscomponent worden bepaald, welke in de verwerkte frame-metingen op 0 is verondersteld. Zeker bij metingen uit een frame kunnen deze snelheden voldoende nauwkeurig worden bepaald. Verticale snelheden tonen het werkelijke 3D stromingsprofiel en geven daarmee nuttige extra informatie.

Om de representativiteit op langere tijdschalen (voor het morfologisch model op 1-10 jaar) en ruimteschalen (10-100 m) te onderzoeken zijn analyses tijdens eb en vloed voor zowel spring- als doortij gewenst. Ook zou het goed zijn om nog andere locaties bij de Oosterscheldekering te analyseren (er zijn metingen bij meer ontgrondingskuilen). Het meest direct is uiteraard een vergelijking van metingen in een ontgrondingskuil van de Rijn- en Maasmonding.

Voor deze studie wordt verondersteld dat de stroomsnelheid bij de bodem nodig is om in te schatten wat de erosie en sedimentatie zal zijn. Het is ook mogelijk om het sediment transport bij de bodem (*bed load transport*) direct te meten met een ADCP vanaf een schip door systematische afwijkingen in *bottom tracking* te bepalen met een nauwkeurig (Real-Time Kinematic) GPS. Rennie et al. (2002) vonden voor kiezel-bodems goede overeenkomst. Voor zandbodems is de uitdaging het bepalen van de afhankelijkheid van de korrelgroottesortering en de dikte van de actieve laag. Jamieson et al. (2011) tonen op basis van metingen met een stil liggend en een varend schip aan dat bodemsnelheid goed geschat kan worden tot bodemsnelheden van 0,6 m/s in een rivier met een zandbodem. De patronen van bodemsnelheid uit de transects konden worden verklaard uit de aanwezige bodemvormen. Voor de Nederlandse rivieren kan deze techniek worden toegepast bij bijvoorbeeld afvoermetingen. Mogelijk zijn er ADCP metingen vanaf een schip in de Rijn- Maasmonding beschikbaar met een RTK GPS (niet gebruikt bij de Oosterscheldekering-metingen) waaruit het bodemtransport geschat kan worden en vergeleken kan worden met metingen van bijvoorbeeld een sedimentval.

6 Referenties

- Y.B. Broekema, R.J. Labeur en W.S.J. Uijtewaal, Observations of Flow and Turbulence at the Eastern Scheldt Storm Surge Barrier, abstract 2016.
- F.A. Buschman, Hydraulische condities bij de bodem in de Rijn- en Maasmonding, rapport, Deltares kenmerk 1220038-002-ZWS-0001, 2015.
- Y. Huismans, T. O'Mahoney, G. van Velzen en G. Hoffmans, Analyse ontgrondingskuilen Rijn- Maasmonding: Onderdeel van "Advies beheer rivierbodem RMM", Deltares kenmerk 1208925-000-ZWS-0017, 2014.
- E.C. Jamieson, C. D. Rennie, R. B. Jacobson and R. D. Townsend, Evaluation of ADCP Apparent Bed Load Velocity in a Large Sand-Bed River: Moving versus Stationary Boat Conditions, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 1372011, doi [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000373](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000373), 2011.
- Muste, M., K. Yu and M. Spasojevic, Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements, *Flow Measurement and instrumentation*, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2003.09.001, 2004a.
- Muste, M., K. Yu, T. Pratt and D. Abraham, Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II: fixed-vessel measurements, *Flow Measurement and instrumentation*, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2003.09.002, 2004b.
- I. Nezu, H. Nakagawa, *Turbulence in Open-Channel Flows*, A. A. Balkema, Rotterdam, 1993.
- W. Ottevanger en R. van der Mark (Deltares), Morfodynamische modellering Rijn- Maasmonding, 2015.
- Rijkswaterstaat.nl, <https://www.rijkswaterstaat.nl/over-ons/nieuws/nieuwsarchief/p2013/11/Werkzaamheden-bij-Oosterscheldekering.aspx>, d.d. 28 november 2016.
- Sloff, K., R. van der Sligte, Y. Huismans, H. Fuhrhop, Morphological model of the Rhine-Meuse delta KPP Rivierkunde 2012 - Stabiele keringen. Deltares rapport 1205961-001, 2012.
- Vermeulen, B., M. G. Sassi and A. J. F. Hoitink, Improved flow velocity estimates from moving-boat ADCP measurements, *Water Resources Research*, doi 10.1002/2013WR015152, 2014.
- R. N. Szupiany, M.L. Amsler, J.L. Best and D.R. Parsons, Comparison of Fixed- and Moving-Vessel Flow Measurements with an aDp in a Large River, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, DOI: 10.1061/ASCE0733-94292007133:121299, 2007.

A Vergelijking van stroomsnelheden op momenten met minder grote stroomsnelheden

