

Slibtransport door het Marsdiep op basis van veerbootmetingen (project nr. RKW-1700)



Prepared for The RWS National Institute for Coastal and Marine Management by The
Royal Netherlands Institute for Sea Research

2009/06/15

Janine Nauw (jnauw@nioz.nl) & Herman Ridderinkhof (rid@nioz.nl)



The Royal Netherlands Institute for Sea Research
Landsdiep 4, 1797 SZ 't Horntje (Texel), The Netherlands

Slibtransport door het Marsdiep op basis van veerbootmetingen (project nr. RKW-1700)

Introductie	2
Methode	2
Bepaling instrumentafhankelijke calibratieconstante	2
Randvoorwaarde	6
Iteratieve methode.....	7
Bepaling van calibratieconstanten	11
Ankerstations in 1998 en 1999.....	12
Ankerstations vanaf 2002.....	13
Calibratie ADCPs Navicula en Schulpengat	13
Calibratie van de snelheden gemeten door de ADCP onder de Schulpengat	19
Debieten en fluxen van totaal gesuspendeerd sediment.....	25
“Fluxen” van voedingsstoffen in 2006 tot en met half 2008 op de locatie van het ankerstation.....	33
Kleinste kwadraten harmonische analyse	42

Introductie

Sinds 1998 wordt er met een acoustic Doppler current profiler (ADCP) onder de Schulpengat en sinds kort onder de Dr. Wagemaker stroomsnelheden en richting en de intensiteit van de akoestische terugkaatsing gemeten tijdens iedere overtocht. Met behulp van een theoretisch model kan met de intensiteit van de akoestische terugkaatsing de concentratie gesuspendeerd materiaal worden bepaald (Merckelbach, 2006). De flux van gesuspendeerd sediment kan dan worden bepaald door de stroomsnelheid met de concentratie te vermenigvuldigen en te integreren over de diepte en breedte van de geul. Om de waarde van de parameters in het theoretische model van Merckelbach te kunnen bepalen zijn er sinds het begin van de veerbootmetingen regelmatig calibratie en validatie vaartochten (voor anker) uitgevoerd. Tijdens deze ankerstations in het Marsdiep werden iedere 20 minuten verticale profielen genomen van temperatuur, zout en optische terugkaatsing. De optische terugkaatsing is een maat voor de concentratie gesuspendeerd materiaal en aan boord werden monsters geanalyseerd voor calibratie van deze relatie. Tijdens het ankerstation werd voortdurend de stroomsnelheid en –richting en de intensiteit van de akoestische terugkaatsing geregistreerd met een ADCP onder de Navicula of aan de stuurboordzijde onder aan een paal. Daarnaast zijn er sinds 2006 ook concentraties van opgeloste voedingsstoffen en later ook de particuliere voedingsstoffen gemeten om een indruk te kunnen geven van de voedingstoffenflux naar de Waddenzee.

In dit eindrapport wordt de methode beschreven die toegepast wordt om de concentratie gesuspendeerde sediment te bepalen voor de periode 1998 tot en met half 2008. Verder worden de fluxen van voedingsstoffen bepaald voor de ankerstations van 2006 tot en met 2008.

Methode

Bepaling instrumentafhankelijke calibratieconstante

In Merckelbach (2006) wordt een theoretisch model beschreven waarmee de concentratie van gesuspendeerd sediment kan worden bepaald aan de hand van de intensiteit van de akoestische terugkaatsing. Hierin wordt beschreven dat er in het Marsdiep twee regimes heersen: het incoherente en het coherente regime. Het incoherente regime treedt op als de intensiteit van de turbulentie klein is en dat is in de regel bij lage snelheden. In dit regime is er een lineair verband tussen de concentratie en het oppervlak van terugkaatsing, σ , gerelateerd aan de gecorrigeerde intensiteit van de

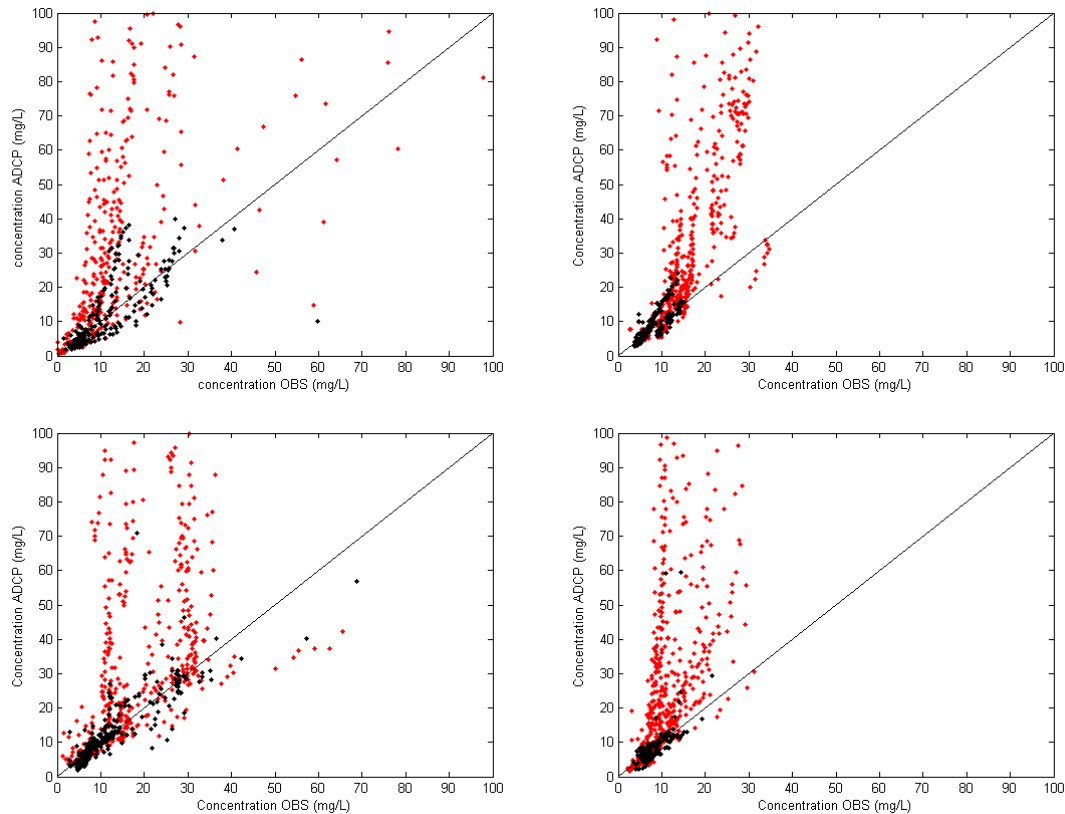
akoestische terugkaatsing via: $I=10^{-10} \log \sigma$. Als snelheden groter worden en de intensiteit van de turbulentie belangrijker dan gaat het systeem over naar het coherente regime. In dit regime is er een relatie tussen σ en de gradiënt van de concentratie in het kwadraat. In formulevorm:

$$\sigma \sim k_t c \quad k \geq \frac{k_\eta}{2\gamma}$$

$$\sigma \sim k_t \left(\frac{dc}{dz} \right)^2 \quad k < \frac{k_\eta}{2\gamma}$$

1

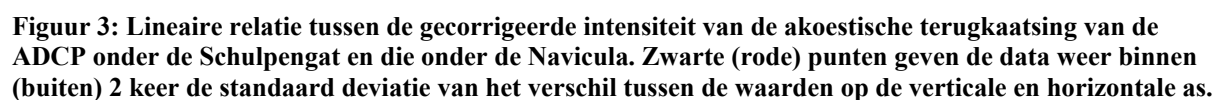
Hierin is c de concentratie, k_t de instrument afhankelijke calibratie constante, k de golfgetal van het gebruikte geluid, k_η het Kolmogorov golfgetal en γ een tunings parameter; deze bepaald waar de overgang is tussen de twee regimes en heeft een waarde van ongeveer 1. Voor meer details over het model verwijzen wij naar het artikel van Merckelbach (2006). De termen incoherent en coherent zijn misschien wat onduidelijk, daarom gebruiken we in de rest van dit rapport respectievelijk de termen lineair of klassiek en turbulent. De overgang tussen beide regimes is op het punt dat de golflengte van het geluid van dezelfde grootte wordt als de Kolmogorov golflengte. Door een parameterisatie te gebruiken van de dissipatie snelheid, is er een verband tussen de regimeovergang en de dieptegemiddelde snelheid te vinden. Die dieptegemiddelde snelheid is ongeveer 0.85 m/s. Allereerst wordt de instrumentafhankelijke calibratie constante, k_t , van de Navicula bepaald. Hiervoor worden alleen de profielen gebruikt waarvoor geldt dat de dieptegemiddelde snelheden kleiner is dan 0.5 m/s, zodat we zeker weten dat alle data zich in het lineaire regime bevindt, zodat de instrumentafhankelijke constante, k_t , bepaald kan worden door gebruik te maken van vergelijking (1a). De gecorrigeerde intensiteit van de akoestische terugkaatsing, I , wordt gemiddeld over een periode van 5 minuten voor tot 5 minuten na het tijdstip waarvoor een verticaal profiel van de concentratie, c , beschikbaar is. De concentratie wordt dan geïnterpoleerd op hetzelfde verticale grid als die van de gecorrigeerde intensiteit van de akoestische terugkaatsing en de richtingscoëfficiënt uit de lineaire regressie kan dan gebruikt worden om de calibratie constante te bepalen met behulp van vergelijking 1a. De resultaten van deze lineaire regressie staan weergegeven in Figuur 1 (alleen zwarte datapunten) voor de calibratie vaartochten die gedaan zijn op 24-04-2003, 17-09 2003, 3-11-2003 en 20-4-2004 en Tabel 2. De zwarte (rode) punten geven de data weer waarvoor geldt dat de dieptegemiddelde snelheid kleiner (groter) is dan 0.5 m/s. Duidelijk is dat de concentratie erg wordt overschat als een datapunt eigenlijk in het turbulente regime zit (rode datapunten) en toch de vergelijking voor het lineaire regime wordt gebruikt (vergelijking 1a).



Figuur 1: Concentratie bepaald aan de hand van de akoestische terugkaatsing met de formule in het lineaire regime tegen de werkelijke concentratie bepaald uit de optische terugkaatsing. Zwarte (rode) puntjes geven de data weer waarvoor geldt dat de dieptegemiddelde snelheid kleiner (groter) is dan 0.5 m/s. De zwarte lijn is het resultaat van de lineaire regressie.

Vervolgens wordt de instrumentafhankelijke calibratie constante bepaald van de Schulpengat nadat de data geprocesst is en gegrid, zoals beschreven in Buijsman en Ridderinkhof (2007). Echter wij gebruiken 50 gridpunten in plaats van 18 (Figuur 2), omdat we een grotere variatie verwachten in de horizontale slibverdeling dan in de horizontale stromingsverdeling. De intensiteit van de akoestische terugkaatsing van de ADCP van de Navicula wordt vergeleken met die van de Schulpengat voor de periode die de Schulpengat nodig heeft om de gridcell waarin de navicula zich bevindt te doorkruisen. Data van de Navicula en van de Schulpengat worden gemiddeld over die periode en de intensiteiten (gecorrigeerd voor spreiding en absorptie) lineair aan elkaar gerelateerd (Figuur 3).

Het gemiddelde verschil tussen de twee intensiteiten, ΔI , geeft een correctiefactor, $10^{\Delta I/10}$, waarmee de calibratie constante van ADCP onder de Navicula moet worden vermenigvuldigd om de calibratie constante van de ADCP onder de Schulpengat te verkrijgen. De data die meer dan 2 standaard deviatie verwijderd is van het verschil tussen de data op de verticale en de horizontale as wordt verwijderd alvorens de correctiefactor te bepalen. Dit is een pragmatische aanpak om de data te verwijderen waarvoor het aannemelijk lijkt dat de data van beide schepen in een verschillend regime zitten. In theorie is het namelijk mogelijk dat de snelheden bij beide schepen verschillend zijn (ze liggen ten slotte enkele honderden meters uit elkaar). De instrumentafhankelijke constante van de ADCP staan in Tabel 2.



Randvoorwaarde

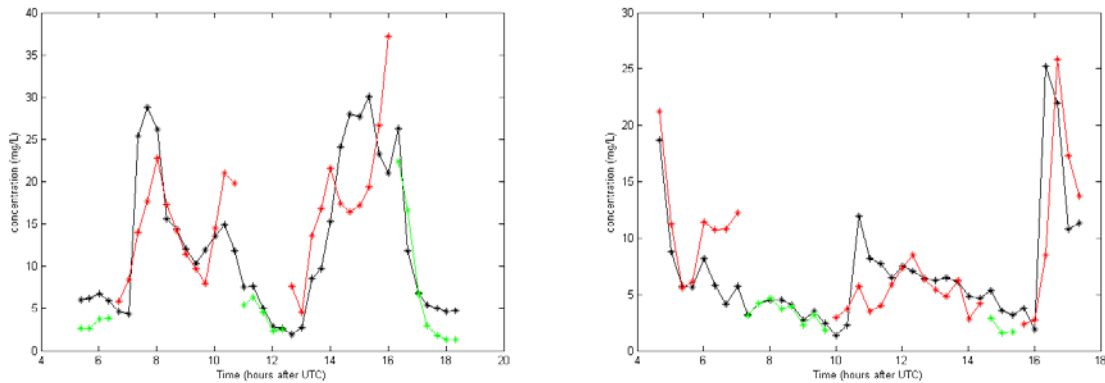
Als alle data van de gehele waterkollom in het turbulente regime zitten, geeft de vergelijking (1b) alleen de verticale gradiënt van de concentratie. Om daarmee het verticale profiel van de concentratie te bepalen is de waarde van de concentratie op een bepaalde diepte nodig, oftewel een randvoorwaarde. Een uitdrukking kan gevonden worden voor die concentratie door de aan te nemen dat het energie spectrum van beide regimes op elkaar moet aansluiten bij een golfgetal dat exact gelijk is aan het Kolmogorov golfgetal (zie Nauw et al. 2009 voor een uitgebreide afleiding).

$$\frac{du_*}{dt} = \alpha \left(\frac{\bar{U}}{20} - u_* \right)$$

$$c_3 \sim \sigma_3 \quad u_* \leq u_{*,c} \quad 2$$

$$c_3 \sim \left(\frac{u_*}{\lambda u_{*,c}} \right)^{-3.75} \sigma_3 \quad u_* > u_{*,c}$$

Hierin is u_* de wrijvingsnelheid. Deze is afgeleid van de verticaal gemiddelde snelheid, U , en heeft een tijdsvertraging, α , van 15 minuten; $u_{*,c} = 0.65/20 = 0.0325$ m/s, de kritische wrijvingsnelheid. De tijdsvertraging is ingebouwd, omdat uit de praktijk blijkt dat het enige tijd duurt voordat de turbulentie opzet nadat een bepaalde snelheid is bereikt. Deze vergelijking wordt toegepast op de derde bin vanaf het oppervlak, omdat uit de praktijk blijkt dat het voor deze bin het beste werkt. Deze vergelijking werkt het beste zo hoog mogelijk in de water kollom, alleen de metingen in de bovenste bins zijn minder betrouwbaar. Figuur 4 laat de gemeten TSM concentratie zien en de concentratie bepaald voor de derde bin vanaf het oppervlak. De resultaten laten zien dat de bepaling voor de concentratie in het klassieke lineaire regime (groen) goed overeenkomt met de werkelijk gemeten waarden. De waardes voor de calibratie constante, λ , zijn bepaald door data in het turbulente regime te fitten aan vergelijking 2(c). De resultaten staan in Tabel 2. De fits tussen de werkelijk gemeten concentratie en de concentratie bepaald met vergelijking 3 is meestal niet erg goed. Toch zijn de waarden voor λ vergelijkbaar. Dit komt waarschijnlijk doordat de fit wordt bepaald voor relatief weinig punten; 1 uitschieter kan dan al een enorme daling veroorzaken in R^2 . Figuur 4 laat de resultaten zien voor de randvoorwaarde voor de data van ankerstations as27 en as28. De afwijkingen tussen de werkelijk gemeten waarden en de randvoorwaarde bepaald met vergelijking 3 lijkt soms erg hoog, maar toch is het algemene beeld met hogere concentraties gedurende het turbulente regime en lagere concentraties tijdens het klassieke regime goed. De waarden van λ voor de meest betrouwbare ankerstations vanaf 2003 variëren tussen 1.1 en 1.6 met een gemiddelde van 1.36. Deze waarde wordt daarom als constant beschouwd in de bepaling van de randvoorwaarde nabij het oppervlak.



Figuur 4: De gemeten TSM-concentratie (zwart), de concentratie in het klassieke lineaire regime (groen) en de concentratie in het turbulente regime (rood) met behulp van vergelijking 2 in de derde bin vanaf het oppervlak tijdens as27 (2003-11-05) en as28 (2004-20-04).

Iteratieve methode

Om de concentratie te bepalen met behulp van de akoestische terugkaatsing is het essentieel om te weten in welk van de twee regimes het systeem zich bevindt. In de methode beschreven in Merckelbach (2006) wordt er een bepaalde kritische intensiteit van de turbulentie gekozen, waarboven het systeem zich in het turbulente regime bevindt. Bij deze methode wordt een parameterisatie gebruikt voor de dissipatie snelheid. In een aantal gevallen leidt dit echter tot een foutief gekozen regime, waardoor de resulterende concentratie ver over- of onderschat wordt. Dit is te zien in Figuur 1 links in het midden, waarbij de concentratie van de ADCP van de zwarte (rode) punten is bepaald in het lineaire (turbulente) regime met behulp van vergelijking 1a (1b). De concentratie bepaald met de ADCP als functie van de diepte en de tijd staat in Figuur 6 links onderaan, terwijl de werkelijke concentratie rechtsboven is weergegeven. Duidelijk is dat de hoge concentraties aan het begin van de tijdseries bij de bodem niet worden opgepikt door de directe methode en dat de concentratie op 10:00 UTC veel te hoog uitvalt. Aangezien de snelheden op deze tijdstippen al vrij hoog zijn, zal dat waarschijnlijk een groot effect hebben op de bepaling van de flux.

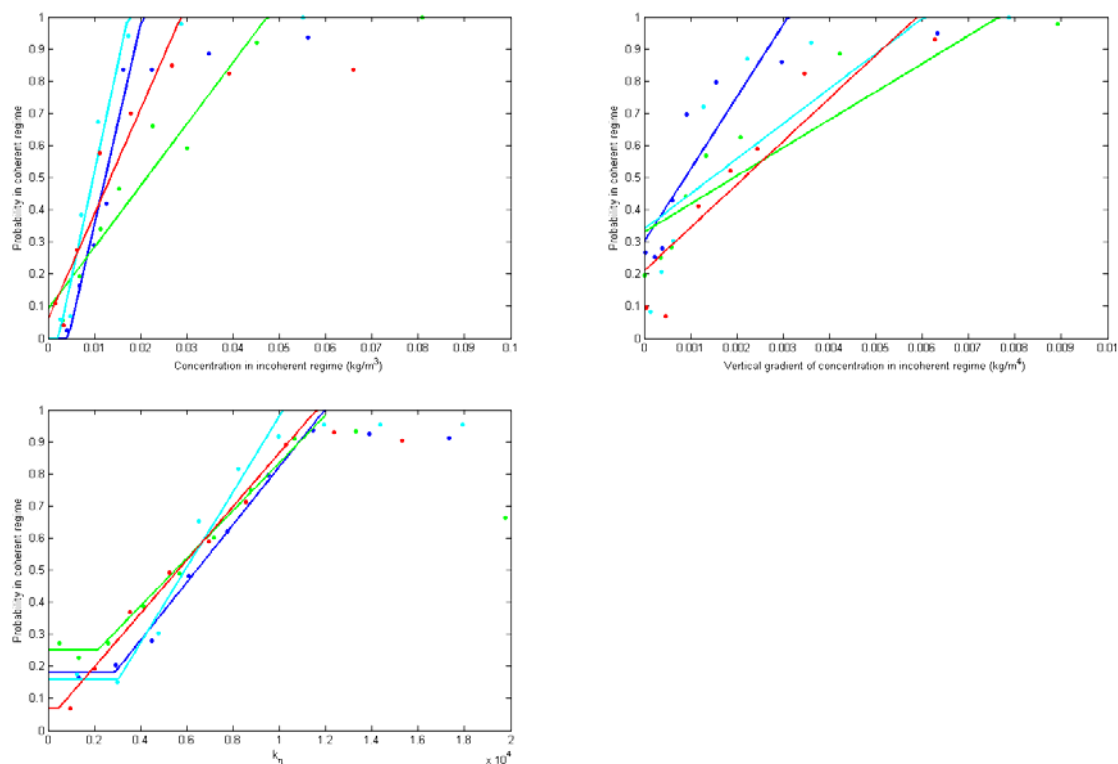
Daarom wordt voor verschillende parameters de waarschijnlijkheid bepaald dat het systeem zich in het turbulente regime bevindt. Deze parameters zijn de klassieke concentratie, c_c' , en de verticale gradiënt van de klassieke concentratie, dc_c'/dz en het Kolmogorov golfgetal, k_η , een maat voor de intensiteit van de turbulentie. Om de klassieke concentratie, c_c' , te bepalen wordt aangenomen dat er alle data in het lineaire regime zitten en wordt dus vergelijking (1a) toegepast op alle data. Daarna wordt de verticale afgeleide genomen van deze klassieke concentratie en dat geeft dc_c'/dz .

De waarschijnlijkheid wordt bepaald met de calibratiedata en er wordt aangenomen dat het systeem zich in het turbulente regime bevindt als de concentratie uit de akoestische terugkaatsing bepaald voor het lineaire klassieke regime, c_c' , meer dan 1 mg/L hoger is dan de werkelijke concentratie. De resultaten en de lineaire fits staan weergegeven in Figuur 5 voor 4 verschillende ankerstations en Tabel 4 geeft de constanten van de lineaire fits voor alle ankerstations. Voor alle drie figuren in Figuur 5 is het duidelijk dat de waarschijnlijkheid dat de data zich in het turbulente regime bevindt voor grote waarden op de horizontale as. Als de klassieke concentratie, c_c' , (onwaarschijnlijk) hoog wordt zal de data zich zeer waarschijnlijk in het turbulente regime bevinden, $p=1$. Maar ook als de verticale gradiënt van de klassieke concentratie, dc_c'/dz , hoog wordt, dus als er grote concentratieverschillen optreden tussen twee boven elkaar liggende bins, is de waarschijnlijkheid dat de data in het turbulente regime zit ook 1. Voor hoge waarden van het Kolmogorov golfgetal, k_η , doordat de horizontale snelheden hoog zijn en daardoor veel turbulentie gecreëerd wordt. Zelfs voor

kleine waarden van het Kolmogorov golfgetal blijkt de waarschijnlijkheid dat de data zich in het klassieke regime bevindt niet 1 te worden (p wordt niet nul). Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat er een parameterisatie gebruikt wordt voor de dissipatie snelheid van turbulente kinetische energie die geheel is gebaseerd op de horizontale snelheden, terwijl de verticale stratificatie waarschijnlijk ook een rol speelt. Uit diverse testen met de calibratie data blijkt, dat de drie functies voor waarschijnlijkheid het beste als volgt gecombineerd kunnen worden:

$$p = p(c_c', \frac{dc_c'}{dz}, k_\eta) = 0.8p_{c_c'} + 0.15p_{dc_c'/dz} + 0.05p_{k_\eta} \quad 3$$

De waarschijnlijkheid, p , is een functie van de plaats (horizontaal en verticaal) en de tijd. Verder is $p_{c_c'}$ de waarschijnlijkheid dat een datapunt in het turbulente regime zit als functie van de klassieke lineaire concentratie, c_c' ; $p_{dc_c'/dz}$ de waarschijnlijkheid gebaseerd op de verticale gradiënt van de klassieke lineaire concentratie, dc_c'/dz en p_{k_η} de waarschijnlijkheid gebaseerd op het Kolmogorov golfgetal. Uit de getallen voor de drie functies blijkt dat de waarde van de klassieke lineaire concentratie, c_c' , de meeste informatie geeft. Dit komt omdat het gebruik van het klassieke regime altijd een ruime overschatting geeft van de concentratie als de data in zich werkelijkheid in het turbulente regime bevinden. Dit was duidelijk te zien in Figuur 1 (rode punten).



Figuur 5: Punten geven de waarschijnlijkheid aan dat het systeem zich in het turbulente regime bevindt gebaseerd op (a) de klassieke concentratie (b) de verticale gradiënt van die concentratie en (c) het Kolmogorov golfgetal. De getrokken lijnen geven de lineaire fit weer voor die punten die op een rechte lijn lijken te liggen. Rood is de data voor 24-04-2003, blauw voor 17-09-2003, groen voor 3-11-2003 en zeegroen 20-04-2004.

Om met de functie voor de waarschijnlijkheid de concentratie te bepalen wordt voor iedere gridcel het volgende iteratieve proces gehanteerd:

Met behulp van vergelijking 1 volgen twee eerste aannames voor de concentratie, c_c' en c_t' , voor iedere bin, i , met uitzondering van de derde bin. Voor die bin gebruiken we vergelijking 3.

$$c_c'(i) \sim \sigma(i)$$

$$c_t'(i) - c(i-1) \sim -\sqrt{\sigma(i)}\Delta z$$

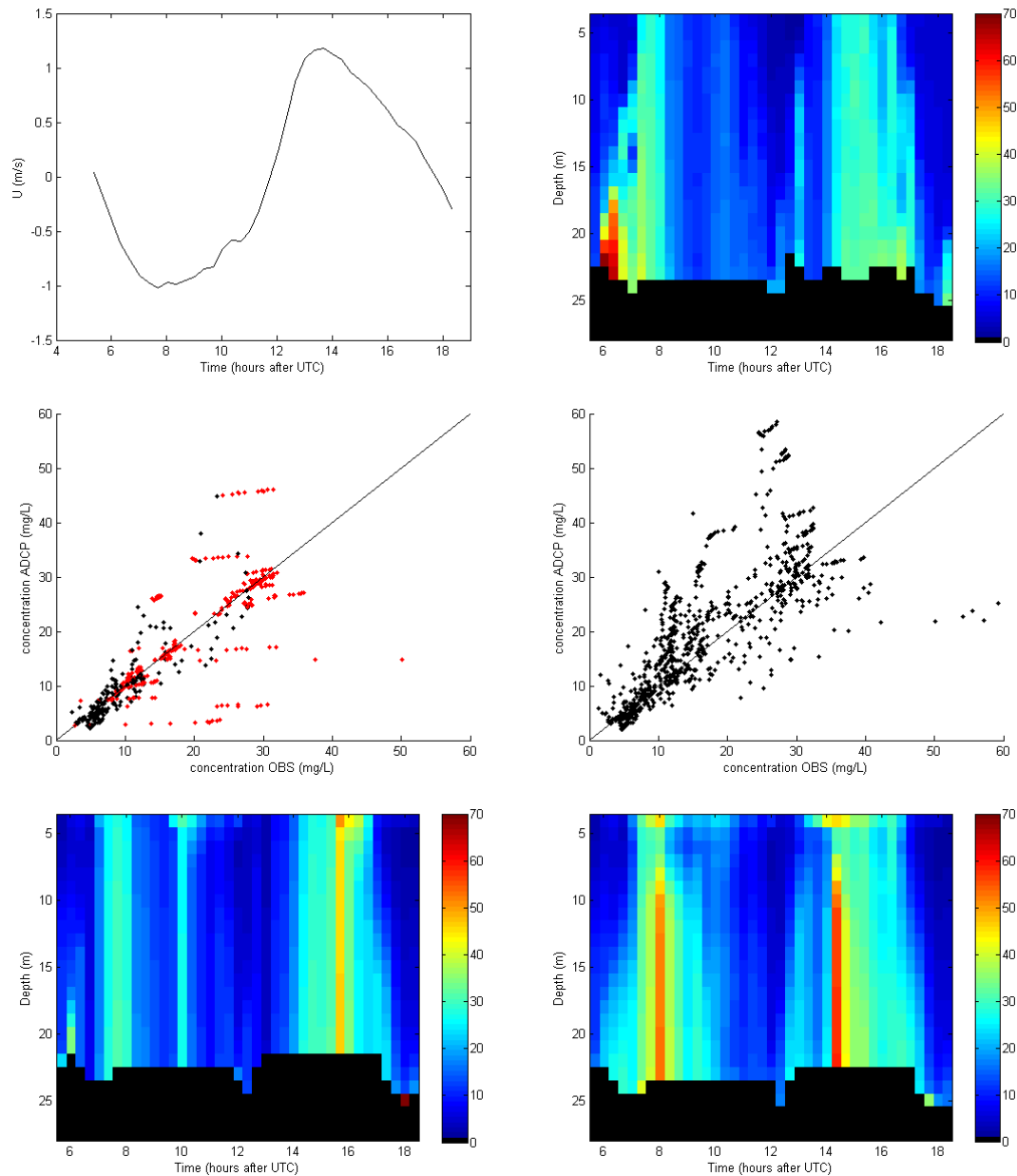
4

Hierin is $c(i-1)$ de concentratie in de bin boven bin i en Δz de afstand tussen de bins. Vervolgens wordt de waarschijnlijkheid, p , bepaald dat het systeem zich in het turbulente regime bevindt met behulp van vergelijking 2. Dan volgt de concentratie in bin i uit:

$$c(i) = (1 - p)c_c'(i) + pc_t'(i)$$

5

Het rechter figuur in het midden in Figuur 6 laat de vergelijking zien tussen de concentratie bepaald met het iteratieve proces en de werkelijke concentratie. De spreiding rond de lijn van perfecte overeenkomst is groter dan die in het linker figuur, waarbij de methode van Merckelbach (2006) is toegepast. Maar er zijn niet meer zulke grote afwijkingen naar boven en naar beneden te bespeuren. Het figuur rechts onderaan Figuur 6 laat het tijds- en diepteverloop zien van de concentratie bepaald met het iteratieve proces. De structuur lijkt goed overeen te komen met die van de werkelijk gemeten concentraties rechtsboven, maar laat ook wat steekjes vallen, zoals bij 8:00 en 14:20 uur UTC.



Figuur 6: Bovenste rij: Diepte gemiddelde snelheid als functie van de tijd en TSM concentratie bepaald met optische terugkaatsing als functie van de tijd en de diepte. Middelste rij: Concentratie ADCP zoals bepaald met de directe methode, waarbij zwart (rood) bepaald is in het lineaire (turbulente) regime versus gemeten concentratie. Concentratie ADCP met de iteratieve methode versus de gemeten concentratie. Onderste rij: Concentratie ADCP met directe methode en iteratieve methode als functie van de diepte en de tijd.

Bepaling van calibratieconstanten

In het project voor slibmetingen in het Marsdiep wordt gebruik gemaakt van calibratievaartochten oftewel ankerstations met de Navicula. Tijdens deze calibraties wordt het schip voor anker gelegd en wordt er gedurende ongeveer 13 uur metingen van diverse fysische parameters uitgevoerd. De volgende grootheden worden (in ieder geval) gemeten:

- Profielen van stroomsnelheid en richting met behulp van een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)
- Profielen van de echo-intensiteit met dezelfde ADCP
- Profielen van temperatuur en zoutgehalte, aangevuld met transmissiviteit en/of optische terugkaatsing
- Slibconcentraties op meerdere diepten

Deze calibratievaartochten vinden enkele malen per jaar plaats sinds 1998. In sommige gevallen is door omstandigheden een deel van de data verloren gegaan. In Tabel 1 staan die ankerstations waarvoor in ieder geval de data, zoals gegeven is in de lijst hierboven, beschikbaar is.

Tabel 1: In deze tabel staan in opeenvolgende kolumnen: de naam van het ankerstation, de datum waarop een 13-urige meting is uitgevoerd, informatie over de ADCP metingen, of slibconcentraties met behulp van transmissiviteit of optische terugkaatsing zijn gemeten, de kwaliteit van de ADCP data en interval waarop ADCP data is verkregen en in de laatste kolom staat eventueel een opmerking die van belang kan zijn voor het bepalen van de kwaliteit van de gehele dataset gemeten tijdens een ankerstation.

station#	datum	ADCP	TRANS/OBS	kwaliteit ADCP	interval (s)	opmerking
as2	1998-02-19	verankering 17 t/m 19 feb	trans	oke	60	Geen simultaanmetingen CTD en TSM
as3	1998-04-28	verankering 27 t/m 28 apr	trans	slecht	60	
as4	1998-06-20	verankering 18 t/m 19 jun	trans	oke	60	
as5	1998-09-10	verankering 9 okt	trans	oke	60	
as7	1999-02-17	verankering 8 jan t/m 16 mrt	trans	slecht	600	
as8	1999-03-17	verankering 17 mrt t/m 27 apr	trans	slecht	600	
as9	1999-04-08	verankering 17 mrt t/m 27 apr	trans	slecht	600	
as11	1999-07-13	verankering 13 t/m 15 jul	trans	oke	60 en 600	
as12	1999-09-21	verankering 21 sep t/m 15 nov	trans	alleen 21 sep oke	600	
as13	1999-11-16	verankering 15 nov	trans	oke	60	
as18	2002-04-23	schip/paal	obs	slecht	1	
as20	2002-05-28	paal	obs	oke	1	
as21	2002-10-30	paal	obs	niet optimaal	1	
as24	2003-04-24	paal/schip	obs	oke	1	
as26	2003-09-17	paal/schip	obs	oke	1	
as27	2003-11-05	paal/schip	obs	oke	1	
as28	2004-04-20	paal/schip	obs	oke	1	Enkele onderbrekingen in de ADCP data
as29	2004-06-03	paal/schip	obs	oke	1	
as40	2005-05-23	paal/schip	obs	niet optimaal	1	Er ontbreekt een groot deel van de ADCP data
as43	2005-10-20	schip	obs	oke	1	
as44	2005-11-23	schip	obs	oke	1	
as45	2006-03-07	schip	obs	oke	1	
as46	2006-06-12	schip	obs	oke	1	
as47	2006-09-07	schip	obs	niet optimaal	1	Er ontbreekt ADCP data; veel last van bellen
as48	2006-12-13	paal	obs	oke	1	Enkele onderbrekingen in de ADCP data
as49	2007-04-06	paal	obs	oke	1	
as50	2007-06-27	paal	obs	oke	1	
as51	2007-09-28	paal	obs	oke	1	
as52	2007-11-23	paal	obs	oke	1	
as53	2008-04-25	paal	obs	oke	1	Er ontbreekt een deel van de CTD data
as54	2008-06-20	paal	obs	oke	1	

Grofweg kunnen de ankerstations in twee groepen verdeeld worden. Tijdens de ankerstations in 1998 en 1999 zijn verticale profielen van de transmissiviteit gemeten, terwijl er tijdens de ankerstations vanaf 2002 (ook) profielen van de optische terugkaatsing zijn bepaald. Ook werd er tijdens de ankerstations in 1998 en 1999 gebruik gemaakt van een ADCP die op de bodem verankerd was en profielen nam met een interval variërend tussen 1 en 10 minuten, terwijl er vanaf 2002 werd gewerkt met een ADCP gemonteerd aan een arm naast het schip of onder de boeg van het schip die met veel

hogere frequentie van ongeveer 1 Hz profielen bepaalde. De kwaliteit van de data van de ADCP onder de boeg van het schip is minder hoog dan die van de ADCP aan de arm naast het schip, omdat luchtbellen onder het schip het signaal van de ADCP verstoren. Daarom zijn sinds eind 2006 alleen metingen gedaan met een ADCP bevestigd aan de arm naast het schip. Voor een aantal ankerstations (as18 en as24 tot en met as40) valt niet meer te herleiden of deze gemeten zijn met de ADCP aan de arm of onder de boeg en dat is in de tabel weergegeven met “schip/paal” in de derde kolom.

In 2003 is er een nieuwe procedure gestart om verticale profielen van de slibconcentraties te bepalen. Voor die tijd werd er geschat op welke diepte een monster werd genomen en de slibconcentratie werd rechtstreeks vergeleken met de transmissiviteit of optische terugkaatsing uit het gemeten profiel op dezelfde diepte. Vanaf 2003 werd de optische terugkaatsing van het monster bepaald in een donkere kamer aan boord van schip. Op 12/04/2007 en 23/06/2008 is er een calibratie uitgevoerd tussen de OBS in de donkere kamer en die aan het CTD frame en de resultaten van de calibraties zijn beschreven in de cruiserapporten AS49 en AS50 (Nauw and Ridderinkhof, 2007 en 2008). De calibratie werd uitgevoerd door de OBS uit de donkere kamer te monteren aan het CTD frame zodanig dat beide OBS-en van dezelfde watermassa de optische terugkaatsing bepaalden. Metingen werden verricht op een frequentie van 24 Hz voor een periode van ruim 2 uur vlak na kentering in het Marsdiep, zodat er een grote range van sediment concentraties werd gemeten met lokale eigenschappen (zoals korrelgrootte en –verdeling). De data van beide OBS-en werd achteraf gemiddeld over 1 seconde om uitschieters te verwijderen en het onderlinge lineaire verband werd bepaald.

Ankerstations in 1998 en 1999

Uit de rapporten van 1998 en 1999 valt op te maken dat de transmissiviteit niet een goede maat is om de concentratieprofielen mee te bepalen aangezien er een omgekeerde relatie is tussen die twee. Hierdoor is er een plafond waarde van de concentratie waarvoor geldt dat de transmissiviteit gelijk is aan nul en kunnen dus hoge waarden van de concentratie niet worden bepaald.

Ook zijn er nog enkele subgroepen te onderscheiden. Tijdens het ankerstation as2 zijn geen simultaan metingen gedaan van profielen van de transmissiviteit en concentratiemetingen op bepaalde diepten. Daarom kunnen er geen verticale profielen gemaakt worden van de concentratie en kunnen deze metingen eigenlijk niet gebruikt worden voor calibratie.

Voor de ankerstations as3, as4 en as5 bestaat er onduidelijkheid over de dag waarop de ADCP data zijn genomen. Als tijdsaanduiding wordt dagen in het jaar 1998 gebruikt en waarschijnlijk is 1 januari dag nul, terwijl het gebruikelijker is om 1 januari als dag 1 te kiezen. Daarnaast is de CTD-data niet een heel goede referentie, omdat het lijkt of in die data lokale tijd is gebruikt, terwijl de monsters voor de concentratiebepaling gemerkt zijn in UTC en ook de ADCP data in UTC zou moeten zijn. Verder is de ADCP data in as3 onbetrouwbaar, aangezien de 4 echo-intensiteiten over 40 gridcellen zijn verdeeld en de snelheden over 50 gridcellen. De diepte van de cellen wordt vastgelegd aan de hand van een bin-diepte, maar de totale diepte zou gelijk moeten zijn voor de echo-intensiteiten en de snelheden. In de data van as5 lijkt er geen (lineair) verband te zijn tussen de transmissiviteit en de TSM concentratie. Om dit op te lossen is het lineaire verband uit as13 genomen.

De ADCP data op de dagen van ankerstations as7, as8 en as9 lijkt onbruikbaar, omdat de ADCP zodanig is ingesteld dat die de metingen in de bovenste lagen onbetrouwbaar zijn. Echter, het is niet duidelijk welk deel van de waterkolom wel bruikbaar is.

De ankerstations as11 en as13 kunnen wel gebruikt worden voor calibratie met die kanttekening dat de verticale profielen van de concentratie niet betrouwbaar zijn, vanwege het gebruik van transmissiviteit om de concentratie te bepalen.

Uit een vergelijking tussen de ADCP data gemeten tijdens as11, blijkt dat een interval van 10 minuten in de ADCP data veel te groot is om een calibratie uit te voeren. Tijdens ankerstation as12 is er alleen gemeten met een interval van 10 minuten.

Kortom, met de data van as11 en as13 (uit 1999) kan een calibratieconstante van de ADCP in de verankering bepaald worden met een niet al te hoge nauwkeurigheid aangezien transmissiviteit is gebruikt als maat voor de concentratie. En met wat puzzelwerk is het misschien mogelijk om de tijdsaanduidingen in de diverse datatypes in de ankerstations as4 en as5 (uit 1998) gelijk te krijgen zodanig dat deze ook te gebruiken zijn.

Ankerstations vanaf 2002

Vanaf station as18 (2002) is er gebruik gemaakt van een vessel mounted ADCP aan een arm (paal) naast het schip of onder het schip in combinatie met metingen van verticale profielen van de optische terugkaatsing (OBS). Door de hogere meetfrequentie (van 1 keer per minuut naar 1 keer per seconde) is het mogelijk om te middelen over een paar minuten rond de bepaling van het verticale profiel met behulp van de CTD. Verder is er een sterk lineair verband tussen de slibconcentratie en de optische terugkaatsing, als er niet teveel grotere (zand)korrels in suspensie zijn. Daardoor is het vanaf 2002 mogelijk om een vrij goed verticaal profiel van de concentratie te vergelijken met een verticaal profiel van de echo-intensiteit (gecorrigeerd voor spreiding en absorptie) op hetzelfde moment. Waarbij het laatste een gemiddelde is over een aantal profielen, zodanig dat outliers weggemiddeld zijn. Van alle stations na 2002 is alleen de data van as18 niet bruikbaar, omdat er destijds problemen waren met aansluiting van de ADCP. Halverwege de vaartocht is dit gerepareerd, maar door een slechte calibratie van het kompas is deze data niet betrouwbaar. Tijdens het ankerstation as53 ontstond er sluiting in de kabel van de CTD, na enige tijd is dit weer gerepareerd, maar daardoor zijn er 'slechts' 31 in plaats van de geplande 40 profielen genomen. Dit bleek echter voldoende om een goede calibratie mee uit te voeren.

Calibratie ADCPs Navicula en Schulpengat

Voordat de calibratieconstante van de ADCP onder de Schulpengat bepaald kan worden moet eerst de calibratieconstante van de ADCP bepaald worden die gebruikt werd bij de calibratievaartochten met de Navicula. Dit wordt gedaan door het lineaire verband te zoeken tussen de echo-intensiteit gecorrigeerd voor geometrische spreiding en attenuatie en de gemeten TSM concentratie. In de eerste kolom van Tabel 2 staan de 'namen' van de ankerstations, de datum waarop de zijn genomen, de calibratie constante, k_t , de afwijking van de concentratie, c_0 , en de R^2 waarde van de fit. Kortom, k_t is de richtingcoëfficiënt van het lineaire verband tussen de echo-intensiteit en de concentratie en c_0 de afwijking van de lijn door het nulpunt. Dit laatste getal moest ingevoerd worden om een lineair verband te krijgen, maar heeft ook een duidelijke oorzaak. Met het filteren wordt ten eerste niet alle materiaal meegenomen (de kleinste deeltjes gaan door het filter heen) en ten tweede zou er een afwijking kunnen ontstaan door slecht naspoelen, zodat er teveel zout op het filter achterblijft. Bij ankerstation as45 gaf een vergelijking met een andere methode een gemiddeld concentratie verschil van 7 mg/L; een getal dat toevalligerwijs erg goed overeenkomt met $c_0 = -5.9$ mg/L. Echter als de absolute waarde van c_0 groot is, is dat meestal een teken dat het lineaire verband niet erg goed is (te zien aan een lage R^2).

Tabel 2: Calibratie constanten van de ADCPs van de Navicula, k_t en c_0 ; calibratieconstanten γ en λ uit vergelijking 1 en 3 en de Schulpengat, k_t . De R^2 geeft betrouwbaarheid van de lineaire fit.

Ankerstation	datum	k_t (Navicula)	c_0	R^2	γ	R^2	λ	R^2	k_t (ferry)	R^2
as4	1998-06-20	3.18E-12	-13.78	0.03	0.55	-0.02			8.33E-12	0.54
as5	1998-09-10	2.64E-11	0.67	0.03	0.78	-0.01			9.15E-11	0.68
as7	1999-02-17	5.56E-11	6.21	0.03	0.75	-0.04				
as8	1999-03-17	1.67E-10	-18.40	0.05	0.89	-0.11				
as9	1999-04-08	3.16E-11	-26.09	0.10	0.62	0.15	1.63	-0.06		
as11	1999-07-13	3.34E-11	22.83	0.08	0.66	0.15	1.59	-0.10	3.16E-10	0.61
as13	1999-11-16	2.48E-11	9.08	0.46	1.06	-0.02	1.03	-0.52		
as20	2002-05-28	1.12E-10	22.68	0.04	0.78	0.12	1.28	-0.12	1.50E-10	0.89
as21	2002-10-30	4.80E-11	-1.59	0.27	1.46	0.62	1.51	0.16	4.44E-11	0.29
as24	24-04-2003	1.31E-11	-4.55	0.75	0.83	0.56	1.41	0.28	1.42E-10	0.83
as26	17-09-2003	2.32E-11	-2.88	0.54	0.92	0.76	1.36	0.27	1.92E-10	0.74
as27	05-11-2003	1.81E-11	-4.32	0.84	0.67	0.47	1.23	0.61	1.26E-10	0.84
as28	20-04-2004	1.29E-11	-1.41	0.65	0.85	0.27	1.38	0.47	1.78E-10	0.86
as29	03-06-2004	9.84E-11	-0.13	0.91	0.81	0.12	1.43	0.15		
as40	23-05-2005	4.32E-10	-8.12	0.81	0.61	0.25	1.06	-0.22	9.80E-09	0.71
as43	20-10-2005	2.00E-11	0.00		0.84	0.00	1.64	0.14	8.50E-10	0.79
as44	23-11-2005	2.10E-11	-5.88	0.85	1.23	0.02	1.28	0.62	1.02E-09	0.49
as45	07-03-2006	4.53E-11	-10.86	0.65	0.99	0.50	1.61	0.34		
as46	12-06-2006	4.74E-11	0.52	0.28	1.16	0.03	1.44	-0.10		
as47	07-09-2006	1.93E-10	2.87	0.47	0.56	0.61	1.32	-0.08		
as48	13-12-2006	2.16E-11	-14.40	0.63	0.89	0.13	1.31	0.44	1.57E-10	0.70
as49	06-04-2007	2.16E-11	-0.08	0.90	0.98	0.04	1.59	0.24		
as50	26-06-2007	3.89E-11	-0.38	0.53	0.92	0.06	1.07	-0.04		
as51	28-09-2007	1.90E-11	-6.96	0.77	0.85	0.03	1.30	-0.05	9.71E-10	0.67
as52	23-11-2007	3.64E-11	-11.25	0.84	0.82	-0.01	1.46	0.03	4.31E-09	0.53
as53	25-04-2008	2.45E-11	3.58	0.84	0.86	0.04	1.41	0.45	2.57E-09	0.27
as54	20-06-2008	1.61E-11	-2.23	0.53	0.78	0.01	1.21	0.13		

Zoals hierboven beschreven was het voor sommige ankerstations niet mogelijk om een calibratieconstante te bepalen, die zijn open gelaten. Om te laten zien dat data met een interval van 10 minuten niet voldoende is voor het bepalen van een calibratieconstante zijn de constanten toch weergegeven voor stations 7, 8 en 9. Aan de R^2 waarde is duidelijk te zien dat deze constanten geen enkele betekenis hebben. Voor ankerstation as18 is de ADCP data te slecht om een constante te bepalen en de R^2 waarden van de lineaire fit van as20 en as21 laten ook te wensen over.

Daarnaast zijn er nog drie andere groepen aangegeven in het linker gedeelte van Tabel 2: ankerstations as24 t/m as40, as43 t/m as47 en as48 t/m as50. Voor de eerste groep is het niet meer te achterhalen welke ADCP daarvoor gebruikt is; voor de tweede groep is de ADCP gebruikt die onder de boeg van de Navicula is gemonteerd en voor de derde is een andere ADCP naast het schip gemonteerd aan een arm. Het artikel van L. Merckelbach (2006) beschrijft de parameters waarvan de calibratieconstante van de ADCP afhankelijk is. Daarom was de verwachting dat alle calibratieconstanten voor elke ADCP hetzelfde zouden zijn. Echter binnen de laatste groep lijkt de calibratieconstante niet erg constant te zijn. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat een deel van de variatie verklaard zou kunnen worden door variaties in de korrelgrootteverdeling. Deze laatste is van invloed op de echo-intensiteit en is bepaald tijdens ankerstation as27 en voor alle stations vanaf as46. Tijdens ieder ankerstation zijn er ieder uur nabij de bodem en vlak onder het oppervlak monsters genomen voor de bepaling van de korrelgrootteverdeling. Deze zijn gebruikt om de parameters te bepalen in de vergelijkingen voor de concentratie (Merckelbach, 2006). In de analyses van de korrelgrootteverdeling was tijdens geen enkel ankerstation een duidelijke getijvariatie te zien en er zijn slechts kleine verschillen tussen bodem- en oppervlaktemonsters (zie cruiserapporten van ankerstation as46 t/m as54). Daarom is er voor ieder ankerstation het gemiddelde bepaald van de

constanten in de vergelijkingen die afhankelijk zijn van de korrelgrootteverdeling; zie Tabel 3 voor de waarden en Merckelbach (2006) voor de afleiding van de constanten. Tabel 3 laat relatief grote variaties zien in de waarden van de constanten as_0 , as_6as_3 en $as_6as_3as_3$ in de ankerstations as_{27} , as_{46} , as_{47} en as_{48} . De waarden voor de rest van de ankerstations zijn redelijk constant. De meest waarschijnlijke reden hiervoor is dat de methode enigszins gewijzigd is vanaf ankerstation as_{49} . De korrelgrootteverdeling van ieder monster wordt bepaald met behulp van laserdiffractie in een Beckman Coulter LSTM. Dit instrument is echter voor iets andere doeleinden ontwikkeld, namelijk voor het meten van de korrelgrootteverdeling van grote hoeveelheden droog zand en slib. Deze worden in delen toegevoegd aan gedestilleerd water totdat de optische terugkaatsing van het mengsel tussen de 7 en 13 % ligt.

Voor dit onderzoek worden watermonsters uit het Marsdiep enkele dagen opgeslagen om het gesuspenderde materiaal uit te laten zakken. De monsters staan gedurende die periode in een koelkast om te voorkomen dat biologische processen de verdeling kunnen beïnvloeden. De sedimentconcentratie wordt daarna verhoogd door het monster in te dikken tot ongeveer 100 ml. Tijdens de eerste vier ankerstations zijn literflessen geheel gevuld met de watermonsters en kwam de optische terugkaatsing soms veel hoger uit dan 13 %. Vanaf ankerstation as_{49} is het te nemen volume bepaald aan de hand van de gemeten optische terugkaatsing in de donkere kamer aan boord zodanig dat de optische terugkaatsing van het ingedikte monster ongeveer 7 tot 13 % werd. Toch is er besloten om de gemiddelde waarde van alle ankerstations te gebruiken in de bepaling van de constanten in Tabel 2 en de uiteindelijke bepaling van de SPM concentratie. Ten eerste, omdat het niet zeker is dat wijziging in de methode de oorzaak is en ten tweede, omdat eventuele veranderingen in de korrelgrootteverdeling tussen de verschillende ankerstations niet is geregistreerd. Variaties in de korrelgrootteverdeling kunnen enigszins de verschillen in de calibratieconstanten van de ADCP onder de Navicula uit Tabel 2 verklaren. Uit de vergelijkingen in Merckelbach (2006) blijkt dat de waarde van k_t/as_6as_3 constant moet zijn en de spreiding in dit quotiënt is een fractie minder dan de spreiding in k_t zelf.

Tabel 3: Constanten die afhankelijk zijn van de korrelgrootteverdeling.

ankerstation	as_0	as_6as_3	$as_6as_3as_3$
a_{27}	1.98E-07	1.52E-13	1.49E+04
a_{46}	1.34E-07	2.67E-13	4.79E+04
a_{47}	1.51E-07	1.96E-13	5.96E+04
a_{48}	4.49E-07	1.14E-13	1.33E+04
a_{49}	6.48E-07	1.40E-13	5.51E+03
a_{50}	6.22E-07	1.53E-13	5.40E+03
a_{51}	6.00E-07	1.45E-13	6.53E+03
a_{52}	6.14E-07	1.48E-13	6.57E+03
a_{53}	6.27E-07	1.89E-13	5.20E+03
a_{54}	5.05E-07	1.70E-13	5.58E+03
average	4.55E-07	1.67E-13	1.70E+04

Uit het lineaire verband tussen de gecorrigeerde echo-intensiteiten van de ADCP bij/aan de Navicula en die van de Schulpengat op hetzelfde moment en dezelfde diepte wordt de calibratieconstante van de ADCP op de veerboot bepaald. Vanaf ankerstation as_{20} wordt de data van de ADCP van de Navicula gemiddeld over de periode dat de Schulpengat nodig heeft om het gridpunt, waarin de Navicula zich bevindt, te doorkruisen. De data van de Schulpengat wordt over dezelfde periode gemiddeld. Voor de eerdere data wordt een vergelijking gemaakt tussen de het gemiddelde profiel van de Schulpengat voor de tijd waarin hij zich in hetzelfde gridcel als de Navicula bevindt en het profiel van de Navicula dat zich het dichtst bij de tijd van passage van de Schulpengat bevindt en worden er geen outliers uit de data van de Navicula weggemiddeld, wat duidelijk te zien is in het

verschil in de R^2 waarden van de ankerstations tot en met 1999 en vanaf 2002 (meest rechtse kolom in Tabel 2). De data tot en met 1999 heeft een meetinterval van 1 minuut, hier wordt dus geen middeling op toegepast, omdat het doorgaans minder dan een minuut duurt voor de Schulpengat om een gridcel te kruisen. Vanaf 2002 wordt er wel gemiddeld, omdat er bijna iedere seconde een profiel wordt genomen.

Het rechter deel van Tabel 2 met de resultaten voor de calibratie van de Schulpengat is in drie groepen verdeeld. Bij de eerste groep (tot en met 2002) werd er gebruik gemaakt van een 1.5 MHz Nortek; begin 2003 is die vervangen door een 1.0 MHz Nortek, die eind 2006 opnieuw vervangen moest worden door eenzelfde type. Van 8 januari tot en met 27 april (tijdens as7, as8 en as9) is een reeks data beschikbaar met een meetinterval van 10 minuten. De Schulpengat heeft ongeveer 20 minuten nodig voor een overtocht, dus is het onwaarschijnlijk dat er binnen een geringe tijd van passeren van de Schulpengat een verticaal profiel van de verankerde ADCP beschikbaar is. Aangezien er grote noord-zuid verschillen zijn gemeten in de slibconcentratie is het zinloos om die data te gebruiken om een calibratieconstante van de Schulpengat te bepalen, zelfs al zou de calibratieconstante van de verankerde ADCP nauwkeurig zijn en de data betrouwbaar tot en met het zee oppervlak. Daarnaast was de ADCP ten tijde van ankerstation as13 helaas uitgevallen. In deze periode zijn er in totaal vijf calibratieconstanten te bepalen, waarvan de nauwkeurigheid sterk te wensen overlaat. Voor de jaren 1998 tot en met 2002 is een constante (gemiddelde) calibratieconstante van $1.2 \cdot 10^{-10}$ gebruikt, maar die keuze heeft dus weinig fysische of statische onderbouwing.

De calibratieconstanten in 2003 en 2004 zijn vergelijkbaar. Het gemiddelde van de constanten voor de ADCP onder de Schulpengat van as24, as26, as27 en as28 is $k_t = 1.6 \cdot 10^{-10}$. Daarna volgen twee vergelijkbare waarden voor ankerstations as43 en as44, met een gemiddelde calibratieconstante van $k_t = 9.4 \cdot 10^{-10}$. (De waarde voor de calibratieconstante bij as40 lijkt niet betrouwbaar, vanwege de hoge absolute waarde van c_0 en de afwijkende waarde voor de k_t van de Navicula vergeleken met de waarden daarboven en wordt daarom buiten beschouwing gelaten.) Deze is ongeveer 6 keer zo groot als die voor de periode daarvoor. Inspectie van de data in de periode 10 maart tot en met 1 april 2005 laat zien dat er een onverklaarbare sprong plaats vindt op 20-03-2005 als de calibratieconstante, $k_t = 1.6 \cdot 10^{-10}$, constant is gedurende de hele periode. De ruwe data laten op 20-03-2005 een zeer sterke daling zien in de intensiteit gemeten door één van de drie transducers op alle dieptes op het moment dat de veerboot de haven verlaat. Hoewel het niet duidelijk is wat er toen precies is gebeurd, is het mogelijk dat de ADCP sinds die dag beschadigd is geweest, hetzij aan de buitenkant door een aanvaring, of aan de binnenkant door slijtage van de onderdelen of elektronica. Daarom wordt er voor van begin 2003 tot en met 19-03-2005 een waarde voor de calibratieconstante genomen van $k_t = 1.6 \cdot 10^{-10}$ en vanaf 20-03-2005 is deze $k_t = 9.4 \cdot 10^{-10}$.

Begin 2006 is de veerboot Dr. Wagemaker in de vaart genomen. Sindsdien fungeert de Schulpengat als extra boot en wordt op drukke dagen ingezet. Er is geprobeerd om de ankerstations te plannen op dagen dat de Schulpengat ook in de vaart was. Toch is er niet bij ieder ankerstation data beschikbaar door uiteenlopende oorzaken. Voor de derde periode (2006 tot half 2008) zijn er slechts 4 calibratieconstanten beschikbaar, die in waarde erg toenemen: de constante van as51 is bijna 10 keer zo groot als die van as48. De calibratieconstanten van as52 en as53 zijn vergelijkbaar, maar wel 4 keer zo groot als die van as51. Voor de analyse van de veerbootdata zijn de volgende waarden voor de calibratieconstante gebruikt: Tot 1-7-2006 is er vanuit gegaan dat de calibratieconstante onveranderd bleef ten opzichte van eind 2005, nl. $k_t = 9.4 \cdot 10^{-10}$. In de periode daarna zijn er geen metingen, omdat de ADCP niet meer functioneerde, totdat op 1-10-2006 de nieuwe ADCP is gestart. Omdat de Schulpengat sinds 2006 slechts maximaal enkele dagen per week vaart, is het niet mogelijk om op dezelfde manier als in 2005 te bepalen op welke datum de calibratieconstante veranderd, daarom worden vanaf dan min of meer arbitraire data gekozen. Tot 31-

12-2006 wordt een calibratieconstante van $k_t=1.6 \cdot 10^{-10}$ (van as48) gebruikt, van 1-1-2007 tot 17-8-2007 is $k_t=9.7 \cdot 10^{-10}$ (as51) van 18-8-2007 tot 24-4-2008 is $k_t=2.6 \cdot 10^{-9}$ (gemiddelde van as51 en as52) en van 24-4-2008 tot 31-6-2008 is $k_t=2.6 \cdot 10^{-9}$ (as53), wat toevallig hetzelfde is als voor de periode daarvoor. Het is ook mogelijk dat de calibratieconstante geleidelijk veranderd, bijvoorbeeld door aangroei, of door langzame variaties in de korrelgrootteverdeling, maar de periodes tussen de verschillende calibratiemetingen zijn veel te groot om daar uitspraken over te kunnen doen. Dit blijkt mede uit de calibratieconstante van de ADCP onder de Navicula, die is veel constanter (vergelijk de waarden in Tabel 2, waarvoor geldt dat de R^2 groter is dan 0.6 en absolute waarde van c_0 klein is). Dit instrument wordt alleen tijdens een ankerstation gebruikt, na afloop schoongespoeld en binnen opgeslagen en heeft dus onder andere weinig last van aangroei en/of slijtage.

Vervolgens moet het systeem nog gecalibreerd worden voor het omslagpunt tussen de twee regimes. Dit wordt bepaald door de waarde van γ in vergelijking 1. De waarden van k_t en c_0 uit de calibratie van de ADCP onder de Navicula worden gebruikt om de concentraties te bepalen met behulp van vergelijking 1. De waarde van γ wordt gevarieerd van 0.6 tot en met 1.4 in stappen van 0.01 en er wordt bepaald voor welke waarde de afwijking tussen de werkelijk gemeten concentraties en de bepaalde concentraties het kleinst is. Echter om vergelijking 1b toe te kunnen passen moet er op een bepaalde diepte in de water kolom een waarde voor de concentratie beschikbaar zijn. Door de parameterisatie is het bovenste gedeelte van de water kolom altijd het minst turbulent. Als de hele water kolom echter in het turbulente regime zit, wordt de werkelijk gemeten concentratie toegepast in de tweede gridcell van boven, zodat met behulp van vergelijking 1b de concentraties in de rest van de water kolom bepaald kunnen worden. De meest optimale waarde voor γ wordt voor zoveel mogelijk ankerstations bepaald (zie Tabel 2). Voor de bepaling van de gemiddelde waarde kijken we echter alleen naar de waarden van de ankerstations in 2003 tot en met 2008, omdat de data in die periode het meest betrouwbaar is. De waarden variëren behoorlijk tussen 0.6 en 1.3 en het gemiddelde is 0.87. Er is geen reden om aan te nemen dat de waarde van het omslagpunt tussen de regimes verandert gedurende de meetperiode of dat deze afhankelijk is van het instrument (onder de Navicula of onder de veerboot). Daarom wordt $\gamma=0.87$ als constant genomen in de bepaling van het omslagpunt van het klassieke naar het turbulente regime in de directe methode.

In Tabel 4 staan de constanten in de functies van de waarschijnlijkheid bepaald voor ieder ankerstation. Ook hier zijn weer grote variaties te zien in de waardes voor verschillende ankerstations. Er lijkt echter geen seizoensafhankelijkheid te zijn. Voor de bepaling van de concentratie met de iteratieve methode worden daarom de gemiddelde waarden van de constanten bepaald voor de periode vanaf 2003. Dit levert de volgende vergelijkingen voor de waarschijnlijkheid, als functie van de concentratie in het klassieke regime, c_c' , de verticale afgeleide van deze waarde, dc_c'/dz en het Kolmogorov golfgetal, k_η .

$$p_{c'} = 42.6c_c' - 0.04$$

$$p_{dc'/dz} = 1.46 \cdot 10^2 \frac{dc_c'}{dz} + 0.29 \quad 6$$

$$\begin{cases} p_{k_\eta} = 0.25 & k_\eta \leq 2.8 \cdot 10^3 \\ p_{k_\eta} = 8.89 \cdot 10^{-5} k_\eta - 0.16 & k_\eta > 2.8 \cdot 10^3 \end{cases}$$

Hierin geldt uiteraard dat waarschijnlijkheid 1 is voor resultaten hoger dan 1 en 0 voor negatieve waarden van de waarschijnlijkheid.

Tabel 4: Constanten in functies voor de waarschijnlijkheid.

Ankerstation	datum	c		dc/dz		kt		min. waarde
		Richt. Coeff.	nulpunt	Richt. Coeff.	nulpunt	Richt. Coeff.	nulpunt	
as2	1998-02-19							
as3	1998-04-28							
as4	1998-06-20	62.9	0.07	4.38E+02	-0.03	1.05E-04	-0.56	0.31
as5	1998-09-10	2.2	0.17	5.99E+00	0.17	1.50E-04	-1.09	0.30
as7	1999-02-17	13.0	-0.39	5.03E+01	0.00			
as8	1999-03-17	41.0	-0.36	1.41E+02	0.19			
as9	1999-04-08	3.8	-0.40	8.57E+01	0.20			
as11	1999-07-13	23.3	0.02	1.23E+02	0.18	1.35E-04	-0.67	0.03
as12	1999-09-21							
as13	1999-11-16	36.4	-0.50	1.04E+02	0.02			
as18	2002-04-23							
as20	2002-05-28	9.0	-0.24	1.40E+01	0.34	1.91E-04	-0.80	0.11
as21	2002-10-30	9.9	-0.05	8.79E+01	0.07	2.45E-05	-0.05	0.14
as24	24-04-2003	32.7	0.06	1.34E+02	0.21	1.14E-04	-0.26	0.03
as26	17-09-2003	62.3	-0.27	2.25E+02	0.30	8.55E-05	-0.15	0.11
as27	05-11-2003	19.2	0.09	8.73E+01	0.33	6.77E-05	0.07	0.23
as28	20-04-2004	66.5	-0.15	1.09E+02	0.34	1.60E-04	-0.56	0.16
as29	03-06-2004	38.1	-0.02	1.92E+02	0.16	8.54E-05	-0.25	0.13
as31	27-10-2004							
as40	23-05-2005	46.2	0.07	1.67E+02	0.32	8.42E-05	0.02	0.36
as43	20-10-2005	59.2	-0.33	8.28E+01	0.23	1.07E-04	-0.41	0.13
as44	23-11-2005	16.8	-0.05	1.31E+02	0.07	5.92E-05	0.12	0.23
as45	07-03-2006	29.4	-0.51	1.02E+02	0.09	4.16E-05	0.01	0.30
as46	12-06-2006	202.2	-0.16	4.48E+02	0.11	1.08E-04	-0.56	0.16
as47	07-09-2006	58.9	-0.40	3.39E+01	0.42	4.77E-05	-0.07	0.44
as48	13-12-2006	22.7	-0.13	1.05E+02	0.21	1.22E-04	-0.66	0.29
as49	06-04-2007	9.9	0.13	8.50E+00	0.48	5.47E-05	0.13	0.40
as50	26-06-2007	33.6	-0.11	4.35E+01	0.47	8.16E-05	0.04	0.22
as51	28-09-2007	18.9	0.12	2.62E+01	0.56	5.94E-05	0.17	0.38
as52	23-11-2007	9.1	0.07	2.23E+01	0.45	1.00E-04	-0.04	0.22
as53	25-04-2008	7.8	0.22	1.10E+01	0.41	2.90E-05	0.17	0.44
as54	20-06-2008	104.4	-0.18	2.19E+02	0.30	1.19E-04	-0.36	0.04

Calibratie van de snelheden gemeten door de ADCP onder de Schulpengat

De snelheden gemeten door de ADCP onder de Schulpengat hebben een bepaalde afwijking door de beweging van het schip, de uitlijning en eventueel een fout in de hoek van montage. Dit kan gecorrigeerd worden met behulp van de methode beschreven in Joyce (1989), die aanneemt dat er gecorrigeerd moet worden voor een hoek α en een schalingsfactor β volgens de volgende formule:

$$u_w = u_s + (1 + \beta)(u_d \cos \alpha - v_d \sin \alpha)$$

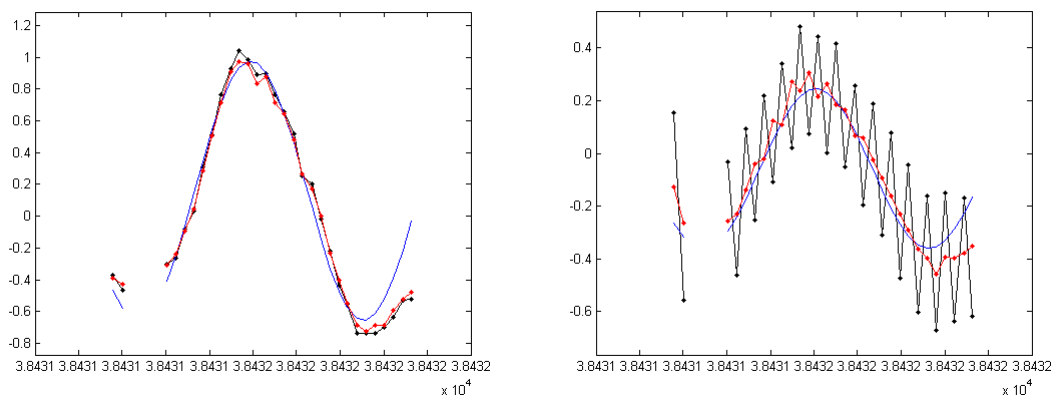
7

$$v_w = v_s + (1 + \beta)(u_d \sin \alpha + v_d \cos \alpha)$$

Hierin is (u_w, v_w) de vector van de 'echte' watersnelheid, (u_s, v_s) de vector van de scheepssnelheid, en (u_d, v_d) de snelheidsvector zoals die door de ADCP is gemeten. Die laatste vector bevat dus nog de scheepssnelheid. Een fout in de hoek, α , heeft dus voornamelijk effect op de snelheid in de langsrichting van het schip en de schalingsfactor is met name belangrijk voor de snelheden loodrecht op het schip. Het effect is duidelijk te zien in de transect gemiddelde niet-gecorrigeerde oostwaartse en noordwaartse watersnelheden voor een bepaalde dag in Figuur 7 (zwarte lijn); zie vooral het zigzag-effect in de noordwaartse snelheid.

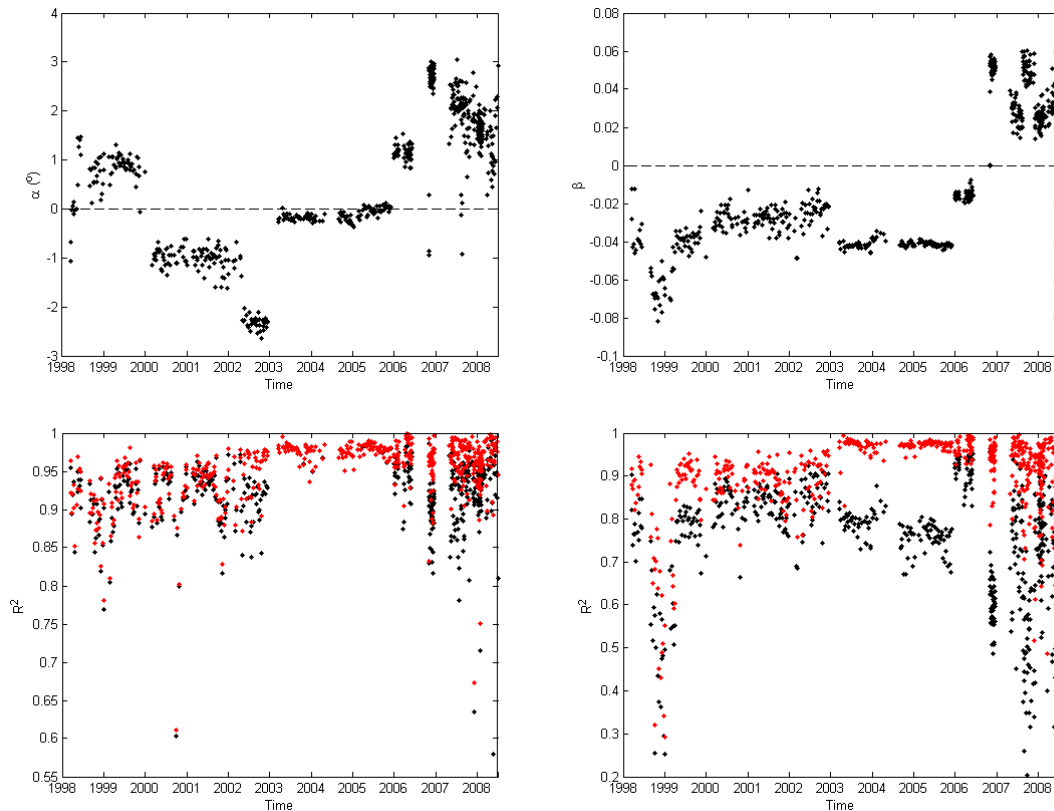
In Joyce (1989) wordt een aanname gemaakt dat de snelheden op hetzelfde transect tijdens de heen en terug reis hetzelfde moeten zijn. De stromingen in het Marsdiep zijn getij gedreven en veranderen dus erg sterk. Daarom passen wij de methode van Joyce als volgt aan: eerst wordt er per week (1998 tot en met 2005) of per dag (2006 tot en met 2008) een kleinste kwadraten harmonische fit (zie Appendix A

Kleinste kwadraten harmonische analyse voor korte uitleg) toegepast op de transect gemiddelde oostwaartse en noordwaartse snelheden, in het voorbeeld in Figuur 7 zijn die aangegeven door de blauwe lijnen. Vervolgens wordt er bepaald voor welke combinatie van α en β het verschil tussen het resultaat (in rood) in de blauwe lijn het kleinst is. Duidelijk is te zien dat helaas niet de hele zigzag wordt verwijderd met deze methode.



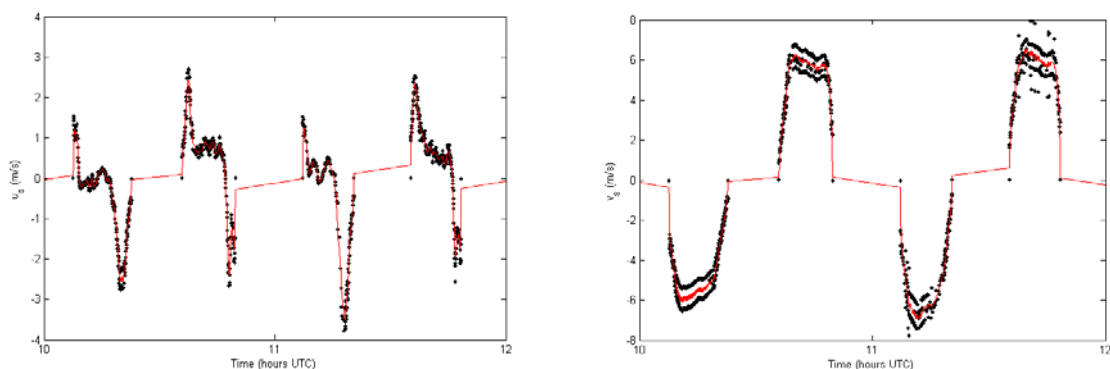
Figuur 7: De zwarte lijn is de originele tijdserie van de transect gemiddelde oostwaartse (links) and noordwaartse (rechts) component van de snelheid. De blauwe lijn is de fit met een kleinste kwadraten harmonische analyse. En de rode lijn is de fit voor de meest optimale waarden van α en β .

Voor de data van 1998 tot en met 2005 is de harmonische fit toegepast op een hele week data en vanaf 2006 op iedere dag. In de laatste periode voer de Schulpengat niet meer iedere dag van de week. Het dus weinig zinvol om te zeggen dat de analyse nog steeds per week wordt uitgevoerd, terwijl er soms maar 1 of 2 dagen van die week gemeten is.



Figuur 8: Boven: hoek α en schalingsfactor β als functie van de tijd. Onder: R^2 van de harmonische fit voor (zwart) en na correctie (rood) voor de oostwaartse (links) en noordwaartse (rechts) component van de stroming.

In Figuur 8 zijn duidelijk verschillende periodes te ontdekken aan de hand van de waardes berekend voor α en β . Meestal vallen grote veranderingen in deze waardes samen met het vervangen van de ADCP, maar niet altijd. De onderste twee figuren laten de kwaliteit van de fit zien aan de hand van de R^2 waarde. Er zijn 3 periodes te onderscheiden: 1998 tot en met 2002; 2003 tot en met 2005 en 2006 tot en met 2008. In de eerste periode is het verschil tussen de R^2 voor en na correctie erg klein. Dit komt waarschijnlijk omdat dGPS wordt gebruikt om de snelheid van het schip te bepalen en dat die snelheid wederom wordt gebruikt om de snelheden gemeten met de ADCP te corrigeren voor scheepssnelheid. Deze snelheid is niet erg nauwkeurig zoals te zien is in Figuur 9 (zwart). Tussen opeenvolgende snelheidsbepalingen zit soms meer dan 1 m/s. Voor de bepaling van α en β wordt daarom ook het lopend gemiddelde van de snelheid (rood) gebruikt.



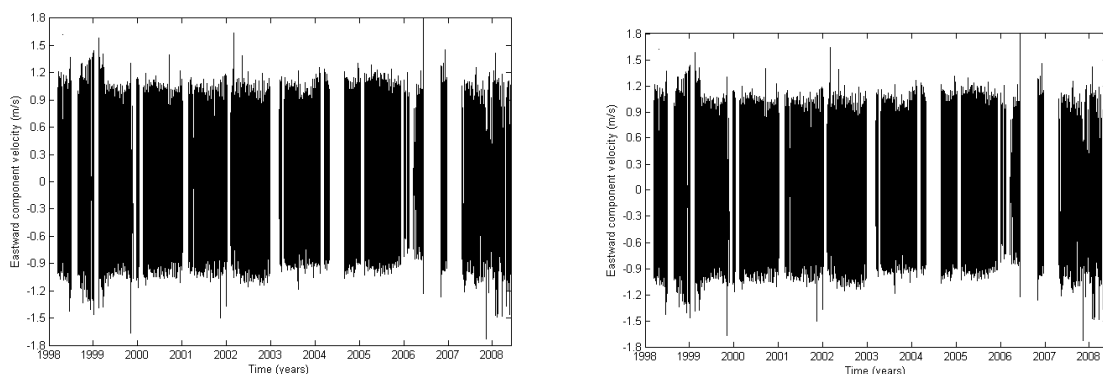
Figuur 9: Scheepsnelheid (zwart) en lopend gemiddelde (rood) voor de oostwaartse (links) en noordwaartse (rechts) component van de stroming op 09-06-2002.

De tweede periode laat weinig verbetering zien in de fit voor de oostwaartse snelheid, maar de R^2 is al erg hoog van de fit. De fit voor de noordwaartse snelheid laat een grote verbetering zien na correctie. Hierbij valt op te merken dat de hoek, α , over deze gehele periode erg dicht bij nul ligt en dat de snelheid loodrecht op het schip nauwelijks gecorrigeerd hoeft te worden een groot deel van deze snelheid wordt bepaald door de oostwaartse snelheid. Verder wordt er in deze periode gebruik gemaakt van de zogenaamde 'bottom tracking'. Met deze instelling van de ADCP wordt de snelheid van de bodem geregistreerd en die wordt gebruikt om de gemeten snelheid mee te corrigeren voor de scheepsnelheid. De schalingsfactor β is niet gelijk aan nul gedurende deze periode, maar wel erg constant. De ADCP is kennelijk niet helemaal horizontaal uitgelijnd geweest gedurende die periode. In de laatste periode zit weer meer variatie in opeenvolgende waarden bepaald voor α en β en dat lijkt gerelateerd te zijn aan het feit dat de methode voor iedere dag afzonderlijk toegepast wordt, maar nog steeds is te zien dat de fit erg sterk verbeterd na afloop van correctie voor α en β , omdat ook in deze periode gebruik werd gemaakt van 'bottom tracking'.

Tabel 5: Hoekafwijking α en schalingsfactor β voor de verschillende periodes bepaald uit de data van Figuur 8.

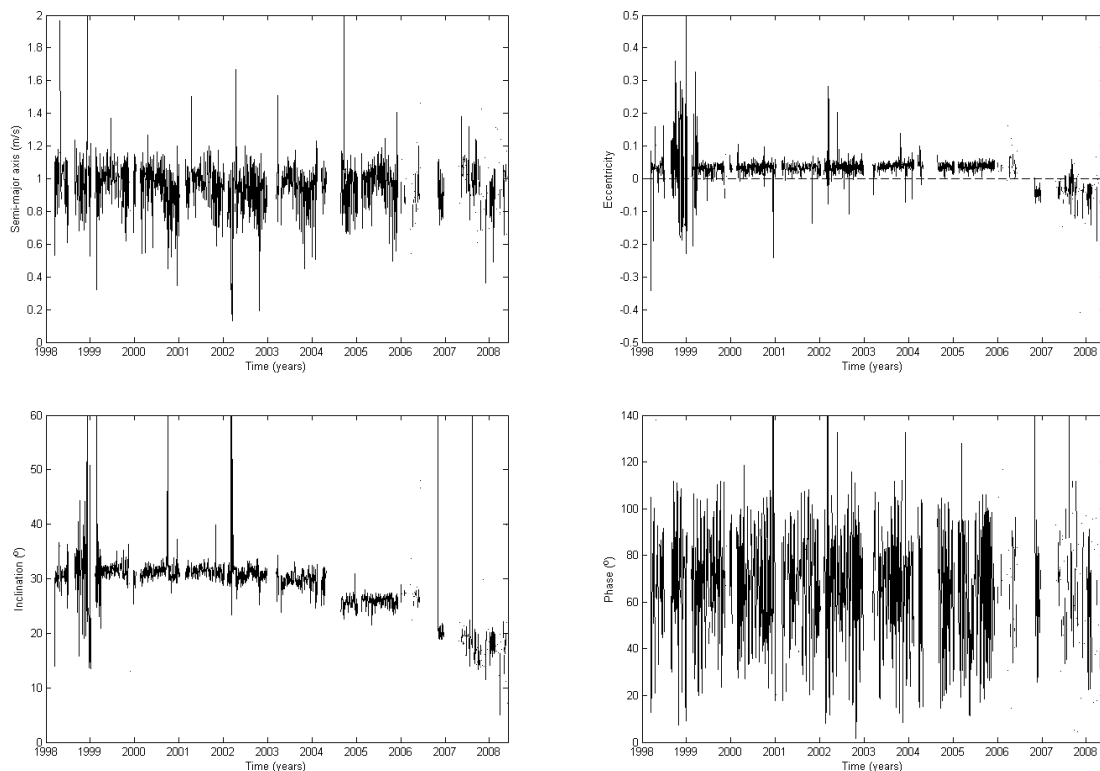
Van	Tot	α (°)	β
1998-03-07	1998-06-22	0.39	-0.035
1998-06-23	1999-03-21	0.72	-0.064
1999-03-22	1999-12-31	0.89	-0.039
2000-02-24	2002-04-25	-1.00	-0.029
2002-04-26	2002-12-20	-2.30	-0.023
2003-03-15	2003-12-31	-0.17	-0.042
2004-03-29	2005-12-07	-0.09	-0.041
2006-01-01	2006-06-03	1.61	-0.015
2006-11-05	2006-12-21	2.74	0.052
2007-05-28	2007-08-15	2.20	0.027
2007-08-24	2007-12-02	1.87	0.049
2007-12-03	2008-07-04	1.55	0.026

Na correctie voor α en β ziet de tijdserie van de gemiddelde oostwaartse en noordwaartse snelheid er uit zoals in Figuur 10. In eerste oogopslag laat dit figuur een vrij constante amplitude zien van de oostwaartse en noordwaartse snelheid in de periode net na het begin van het jaar 1999 tot en aan het jaar 2007. In de periode daarvoor lijkt de amplitude een beetje te groot in beide gevallen en de periode 2007/2008 lijkt ook afwijkend te zijn. De eerste periode kan te wijten zijn aan opstartproblemen en de in de laatste periode zijn er nogal wat problemen ondervonden met het instrument.



Figuur 10: Gemiddelde oostwaartse (links) en noordwaartse snelheid na correctie voor α en β uit Tabel 5.

Om beter inzicht te krijgen in de dag tot dag variaties wordt er voor iedere dag apart een kleinste kwadraten harmonische analyse toegepast met 1 component, namelijk het M2 getij op zowel de oostwaartse en noordwaartse component van de snelheid. Daarna kan met behulp van de amplitudes en de fases de parameters van de getij-ellips bepaald worden, namelijk de halve lange as, de excentriciteit, de inclinatie en de fase. Deze staan weergegeven in Figuur 11. De halve lange as laat zien dat de absolute waarden van de maximale snelheid (de “speed” in het Engels) voor iedere periode een zelfde soort variatie laat zien om het gemiddelde van 96 cm/s. Ingezoomd laat het duidelijk de springtij-doodtij cyclus zien. De excentriciteit is de halve korte as gedeeld door de halve lange as en laat dus zien in hoeverre de ellips afwijkt van een rechte lijn ($\epsilon=0$) of een cirkel ($\epsilon=1$ of $\epsilon=-1$). Het teken van de excentriciteit staat voor de richting van de draaiing, positief is tegen de klok in en negatief met de klok mee. Duidelijk is te zien dat de excentriciteit erg constant is en bijna nul voor de periode vanaf 1999 tot en met half 2006. Daarvoor laat de excentriciteit vrij grote sprongen zien rondom die waarde, wat erop lijkt te duiden dat deze data niet heel betrouwbaar is. Vanaf half 2006 wordt het teken van de excentriciteit ineens negatief. Het is niet waarschijnlijk dat de draaiing van de getij-ellips ineens omkeert van teken en duidt dus op een fout in de metingen. De inclinatie is de hoek tussen de west-oost richting en de lange as van de getij-ellips en geeft dus de dominante stroomrichting. Ook hier zijn sterke (onnatuurlijke) variaties te zien in 1998 en begin 1999. Daarna is de inclinatie ongeveer 30 graden tot en met begin 2004. Daarna verandert de inclinatie vrij abrupt naar ongeveer 26 graden en dat duurt tot en met half 2006, waarna de hoek verder zakt naar ongeveer 18 graden. De fase laat niet meer zien dan hoek die de snelheid maakt met de west-oost richting op tijdstip $t=0$.



Figuur 11: De halve lange as, excentriciteit, inclinatie en fase van de getij-ellips voor de snelheid op iedere dag afzonderlijk.

Er moet duidelijk nog gecorrigeerd worden voor een hoek ten opzichte van het instrument. En deze hoek is zoals te zien in Figuur 11 voor iedere verschillende ADCP anders. Om de juiste hoek te bepalen van de dominante stroming wordt de data van de veerboot vergeleken met de data van de Navicula op de dagen van de calibratiemetingen. Eerst wordt de data van de veerboot geprojecteerd

op een grid van 50 punten tussen Den Helder en Texel. Vervolgens wordt de stromingsrichting en absolute snelheid ("speed") vergeleken op het moment dat de veerboot door het gridpunt vaart waar de Navicula zich in bevindt.

$$S_{fer} = rc \cdot S_{nav}$$

$$\Delta = \Delta_{nav} - \Delta_{fer}$$

8

Hierin in $S=(u^2+v^2)^{1/2}$ de absolute snelheid ("speed") en Δ het verschil in de hoek van de dominante stroming voor de data van de Navicula en die van de veerboot. De schalingsfactor, rc, en Δ worden bepaald voor de calibratievaartochten in 2003, 2004 en 2005, omdat gedurende die periode de meest betrouwbare data is verzameld. Tabel 6 laat de waarden zien van de correctiefactoren in vergelijking 7. De schalingsfactor, rc, geeft aan dat de absolute snelheid zoals bepaald door de veerboot overschat is ten opzichte van die van de Navicula tijdens de eerste vijf calibratie en onderschat in de laatste. De standaarddeviatie, σ , is ongeveer 0.03 voor alle calibraties. Dit lijkt niet overeen te komen met de resultaten van Figuur 11, waarin te zien is dat de waarde van de halve lange as (oftewel de "speed") niet significant veranderd in de periode 2003-2005. De hoek van de dominante stroming wordt volgens Tabel 6 overschat tijdens de eerste vier calibraties met een gemiddelde van 4.2° en onderschat tijdens de laatste twee calibratie met een gemiddelde van 3.8°. Als we deze correctie zouden toepassen zou de inclinatie in het tweede deel van 2004 en in 2005 met 3.8° worden verhoogd en in 2003 en het eerste deel van 2004 met 4.2° worden verlaagd. Dit zou betekenen dan het verschil van ongeveer 5° in de inclinatie in Figuur 11 met ongeveer 3° wordt overgecompenseerd. De relatief grote standaarddeviatie van meer dan 2° samen met de grote variatie tussen de verschillende calibraties binnen de eerste en tweede periode is waarschijnlijk de oorzaak hiervan. Aangezien de correcties voor de hoeken in beide periodes ongeveer even groot, maar tegengesteld zijn, nemen we aan dat het gemiddelde van de inclinatie van 29.8° over de eerste periode en 26.0° over de tweede periode, namelijk 27.9° de correcte inclinatie is (**Error! Reference source not found.**).

Tabel 6: Waarden van de parameters in vergelijking 7 op het moment van de calibratievaartochten in 2003, 2004 en 2005.

	rc	σ	Δ	Σ
2003-04-24	0.89	0.03	-2.30	2.07
2003-09-17	0.80	0.03	-1.72	2.40
2003-11-05	0.95	0.03	-7.01	2.80
2004-04-20	0.93	0.03	-5.64	2.02
2005-10-20	0.98	0.03	1.80	2.22
2005-11-23	1.04	0.04	5.82	2.41

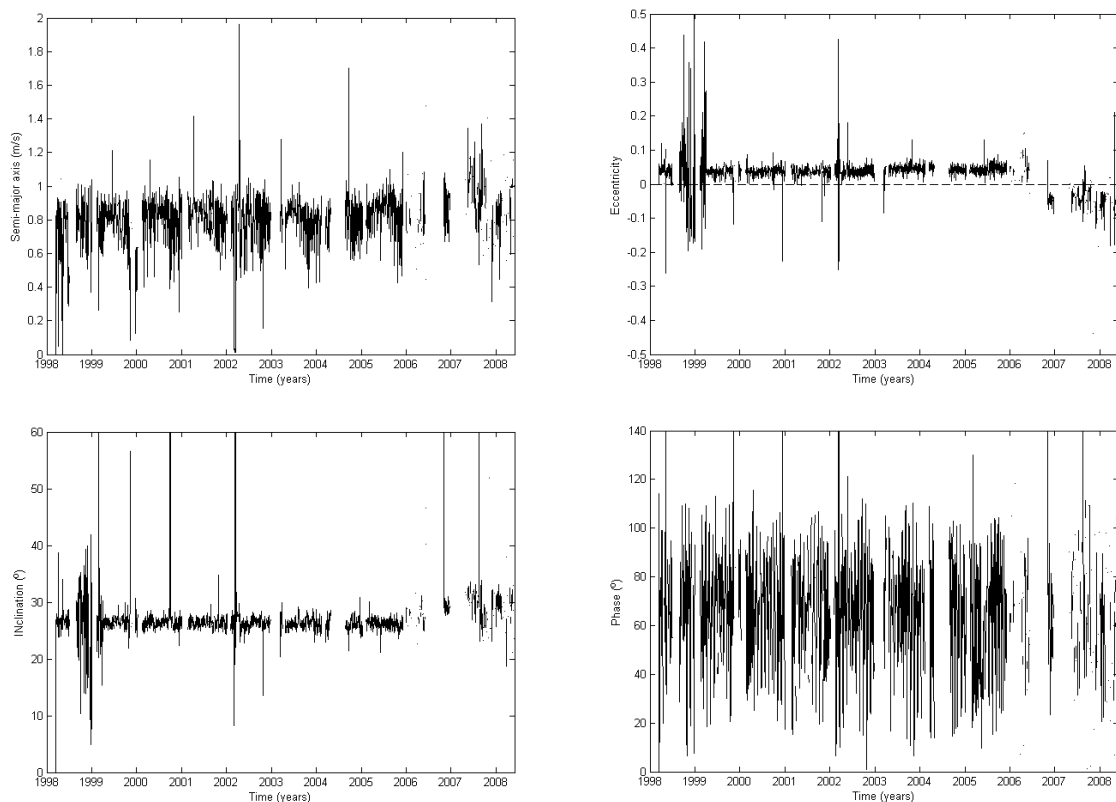
Voor alle andere periodes is ook de gemiddelde inclinatie en "speed" bepaald (Tabel 7). De inclinatie is ongeveer 30° voor de periode tot en met half 2004, daarna is hij 26° tot en met eng 2005, waarna hij nog verder zakt to 20° in 2006 en zelfs 18° vanaf 2007. Ook valt op dat over het algemeen de "speed" enigszins afneemt van bijna 1 m/s tot ongeveer 90 cm/s.

Tabel 7: Inclinatie en "Speed" voor de verschillende periodes in Figuur 11.

Van	Tot	Inclinatie (°)	"speed" (m/s)
05-01-1998	24-07-1998	30.49	0.99
24-07-1998	09-02-1999	31.11	0.98
09-02-1999	06-12-1999	31.36	0.99
06-12-1999	25-01-2000	29.82	0.96
25-01-2000	09-01-2001	31.23	0.97

09-01-2001	19-01-2002	31.37	0.98
19-01-2002	29-01-2003	30.76	0.93
29-01-2003	12-06-2004	29.76	0.96
12-06-2004	02-07-2006	26.04	0.97
02-07-2006	18-01-2007	20.13	0.91
18-01-2007	01-06-2008	17.76	0.94

De data wordt eerste geprojecteerd op het grid zoals weergegeven is in Figuur 2. Daarna wordt de “speed” en de hoek waarin de snelheid gericht is bepaald voor alle gridpunten alle dieptes. Zowel de speed als de hoek worden dan vervolgens gecorrigeerd met behulp van de waarden in Tabel 7. De gemiddelde snelheid in oostwaartse en noordwaartse richting wordt bepaald voor ieder transect en voor iedere dag wordt opnieuw de halve lange as, de excentriciteit, de inclinatie en de fase uitgerekend (Figuur 12). De maximale absolute snelheid laat nu een behoorlijk constant beeld zien tot en met begin 2006, waarna het lijkt alsof hij weer te groot wordt vergeleken met de de jaren daarvoor. De excentriciteit laat weer hetzelfde beeld zien als in Figuur 11, omdat er niets gewijzigd is aan de rotatie van de ellips. De inclinatie is daarentegen is nu constant tot en met begin 2006, waarna er weer grote fluctuaties te zien zijn en de inclinatie een paar graden te groot is. De fase is weer vergelijkbaar aan die in Figuur 11.



Figuur 12: De halve lange as, excentriciteit, inclinatie en fase van de getij-ellips voor de snelheid op iedere dag afzonderlijk na correctie voor de hoek en grootte van de “speed” zoals weergegeven in vergelijking 7 en Tabel 7.

Debieten en fluxen van totaal gesuspendeerd sediment

De correcties, zoals beschreven in de vorige paragrafen zijn toegepast alvorens de debieten en fluxen van gesuspendeerd sediment te berekenen. Verder zijn zowel de directe methode van L. Merckelbach als de iteratieve methode gebruikt om de sedimentconcentratie te bepalen. Beide processen om de TSM concentraties te berekenen geeft wel nog enkele outliers.

Debieten en fluxen van gesuspendeerd materiaal worden bepaald door:

$$debiet(t) = \iint u(y, z, t) dydz$$

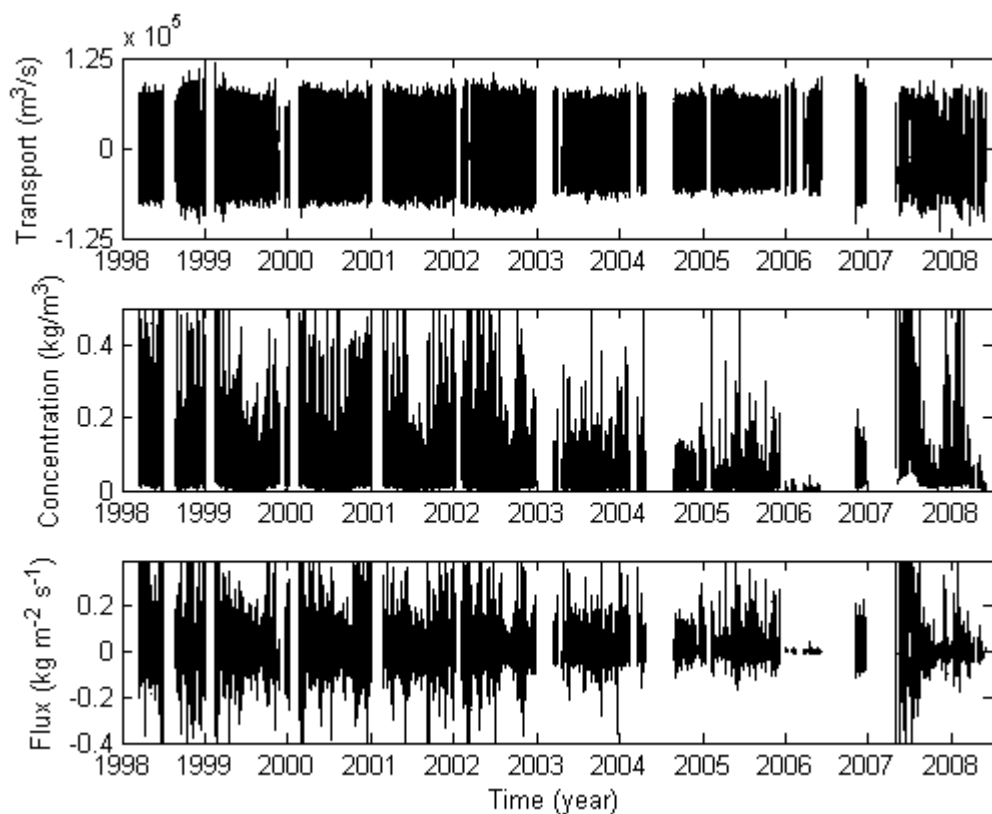
$$flux(t) = \iint u(y, z, t) c(y, z, t) dydz$$

9

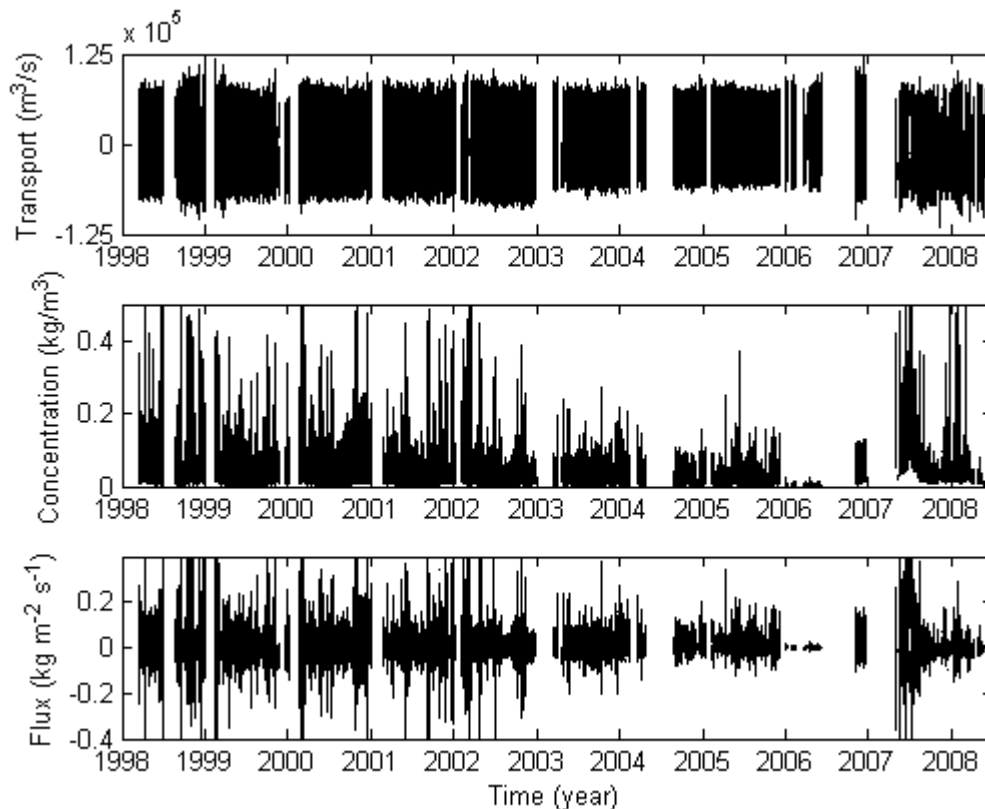
Waarbij $u(y, z, t)$ en $c(y, z, t)$ de oostwaartse snelheid en de concentratie zijn als functie van de afstand tot Den Helder, y , en de diepte, z . De tijd, t , is gelijk aan het gemiddelde tijdstip van een transect. Snelheden en concentraties zijn niet bekend in de bovenste 6 meter (de eerste bin zit op 6.3 meter diepte). Bovendien zijn de metingen in de bovenste bins niet zo betrouwbaar. Daarom voor zowel de snelheden als de TSM concentratie aangenomen dat die constant zijn met de diepte vanaf het oppervlak tot en met de derde bin van boven. Daarbij onderschatten we waarschijnlijk de snelheden, terwijl de concentraties overschat worden. In de uiteindelijke flux, waarbij deze waarden worden vermenigvuldigd, zal dat elkaar dus waarschijnlijk opheffen. Uitschieters in de flux worden verwijderd als ze meer dan 3 standaard deviatie afwijken van het gemiddelde binnen een window-lengte van 25 naast elkaar liggende punten. De corresponderende TSM concentratie en transport worden dan ook verwijderd. Door deze aanpak wordt 8% van de data verwijderd in de serie die bepaald is met behulp van de directe methode en 6% in het geval van de iteratieve methode. Dat laat zien dat er minder uitschieters zijn met de iteratieve methode. De fluxen die bepaald zijn met concentraties volgens de directe en de iteratieve methode zijn vergelijkbaar (zie Figuur 13 en Figuur 14). De debieten laten variaties zien tussen $-1.16 \cdot 10^5$ and $1.18 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$. Maar er zijn nog wel onverklaarbare verschillen te zien tussen de diverse periodes. Wat het meest opvalt is de stap in de minimale waarde tussen 2002 en 2003 en weer terug eind 2007. Dit was niet te corrigeren met de correctie methode voor de snelheid, omdat dit het gevolg is van de residuele stroming. Verderop zal hier verder op ingegaan worden. Ook de TSM concentraties laten variaties zien van periode tot periode. In het eerste deel tot en met 2002 lijkt de TSM concentratie vrij veel uitschieters te vertonen. Begin 2006 lijkt de concentratie veel te klein. In die periode is de calibratieconstante k_t geschat op basis van de periode daarvoor, omdat er helaas in die periode geen calibratiemetingen beschikbaar zijn. Het lijkt er echter op dat er voor die periode een te kleine constante is gekozen. De gemiddelde concentratie in de periode 2003-2005 lijkt ook relatief laag vergeleken bij de andere periodes. Toch is de data in deze periode het meest betrouwbaar, omdat er in die periode vrij veel calibraties zijn gedaan, die ook nog eens vergelijkbare resultaten opleverden voor de calibratieconstante k_t . De directe methode leidt tot iets hogere waarden voor de concentratie dan de iteratieve methode. Bij de directe methode is de overschatting van de concentratie veel hoger als een datapunt eigenlijk in het turbulente regime zit en toch het klassieke regime wordt aangenomen dan andersom. Bij de iteratieve methode lijken afwijkingen in beide richtingen even groot te zijn (zie Figuur 6).

Tabel 8: Gemiddelde TSM concentratie en standaard afwijking voor de verschillende periodes zichtbaar in Figuur 13 en Figuur 14 in mg/l.

	Directe methode	Iteratieve methode
1998-2002	77 ± 84	53 ± 57
2003-2005	30 ± 37	28 ± 26
Begin 2006	4.5 ± 3.7	5.1 ± 3.4
Eind 2006	52 ± 30	48 ± 27
2007-2008	81 ± 109	70 ± 87



Figuur 13: Debiet, transectgemiddelde slibconcentratie en slibflux bepaald met behulp van de directe methode.



Figuur 14: Zelfde als Figuur 13 maar dan bepaald met behulp van de iteratieve methode.

Tabel 9 laat de lange termijn en de jaargemiddelden zien van het debiet, de gemiddelde concentratie en de TSM flux. Deze waarden zijn bepaald door een harmonische analyse (zie appendix en Buijsman en Ridderinkhof, 2007) toe te passen op de reeksen voor het debiet, de kanaalgemiddelde concentratie en de flux. Voor de lange termijn en de jaren 1998 tot en met 2006 zijn in totaal 144 frequenties meegenomen van hoogfrequent (meerdere malen per dag) tot jaarlijkse variabiliteit (zie Tabel 16). Voor de jaren 2006, 2007 en 2008 kunnen maar 137 frequenties worden meegenomen. De 7 meest laag-frequente componenten zijn niet meegenomen, omdat die niet opgelost kunnen worden vanwege de grote gaten in de data in die drie jaren.

Het lange termijn gemiddelde debiet is negatief in de jaren 1998 tot en met 2002 dat betekend van de Waddenzee naar de Noordzee gericht (export), zoals ook gevonden in Buijsman en Ridderinkhof (2007). Vervolgens is het 4 jaar (2003-2006) positief en dus van de Noordzee naar de Waddenzee gericht (import). Vervolgens is er weer export tijdens 2007 en 2008. Hoewel de waarde in 2007 wel erg afwijkt van alle andere jaren.

Tabel 9: Lange termijn (1998-2008 en 2003-2005) en jaargemiddelden van het debiet, de gemiddelde concentratie en de TSM flux. * Let op, de jaren 2006, 2007 en 2008 hebben een te lage datadichtheid voor een betrouwbare bepaling van het residuele debiet, de ‘gemiddelde’ concentratie en de TSM flux.

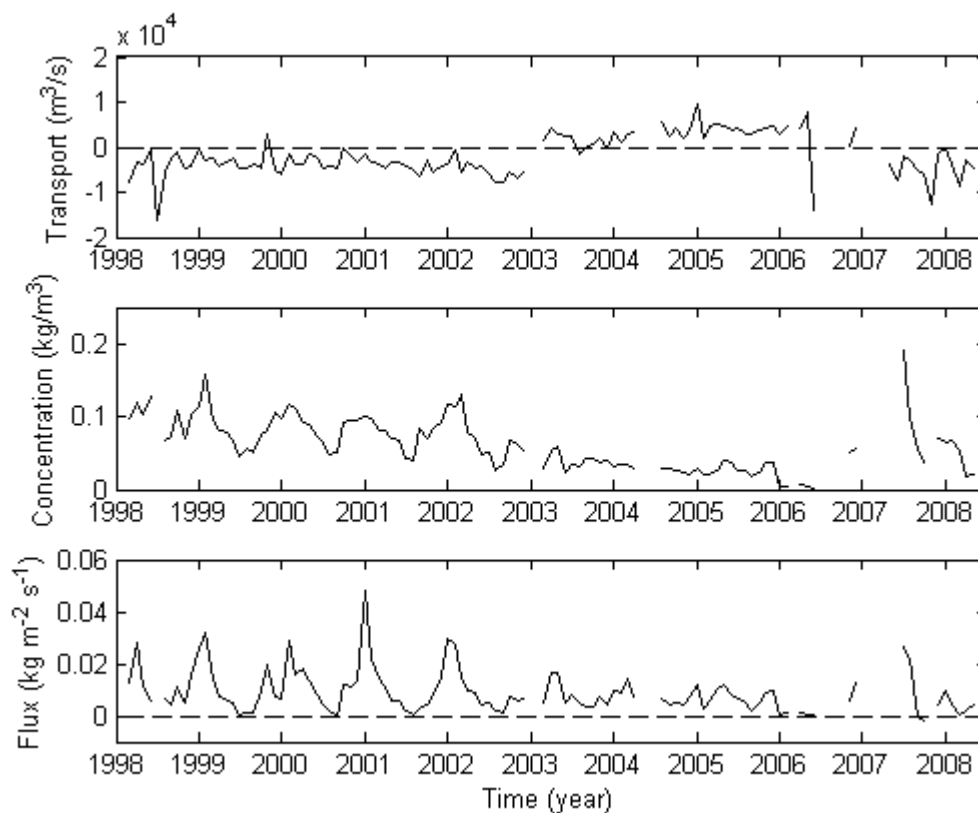
	Directe methode			Iteratieve methode		
	Debiet ($10^3 \text{ m}^3/\text{s}$)	TSM conc. (mg/l)	TSM flux ($10^{-3} \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Debiet ($10^3 \text{ m}^3/\text{s}$)	TSM conc. (mg/l)	TSM flux ($10^{-3} \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1998-2008	-1.89	65.3	7.94	-1.74	44.9	3.51
2003-2005	2.52	30.4	7.72	2.68	27.0	5.14
1998	-5.21	104.0	10.03	-5.14	60.2	2.52
1999	-4.81	82.2	8.86	-4.75	55.1	2.86
2000	-3.35	91.6	8.19	-3.18	60.3	3.11
2001	-4.33	75.4	8.84	-4.23	48.2	2.04
2002	-5.51	78.8	9.05	-5.37	50.2	2.98
2003	0.96	36.3	8.05	1.09	32.0	5.10
2004	3.02	20.5	3.52	3.12	18.7	1.88
2005	3.91	28.8	9.10	4.07	25.3	6.60
2006*	3.62	42.6	7.31	3.78	38.8	6.71
2007*	-9.74	84.6	-52.65	-10.08	81.6	-15.75
2008*	-4.16	57.9	6.46	-4.35	47.0	7.04

Tot en met 2002 is de residuele concentratie boven de 45 mg/L en van 2003 tot en met 2006 onder de 45 mg/L. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door te hoge concentraties in de eerste 4 jaar van de reeks als gevolg van de wat minder betrouwbare calibratieconstanten. De lange termijn residuele flux is $7.94 \cdot 10^{-3}$ ($3.51 \cdot 10^{-3}$) $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$, wat overeenkomt met 16 (7.2) miljoen ton slib/jaar voor de resultaten behaald met de directe (iteratieve) methode. Hierbij is aangenomen dat de gemiddelde dwarsdoorsnede van het Marsdiep $6.5 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ bedraagt. Overigens lijken de richting en grootte van het residuele watertransport weinig effect te hebben op de TSM flux en is er ook weinig invloed te zien van variaties in de lange termijn gemiddelde concentratie. Dit laat duidelijk zien dat er andere processen verantwoordelijk zijn voor de residuele slibflux dan voor het residuele debiet.

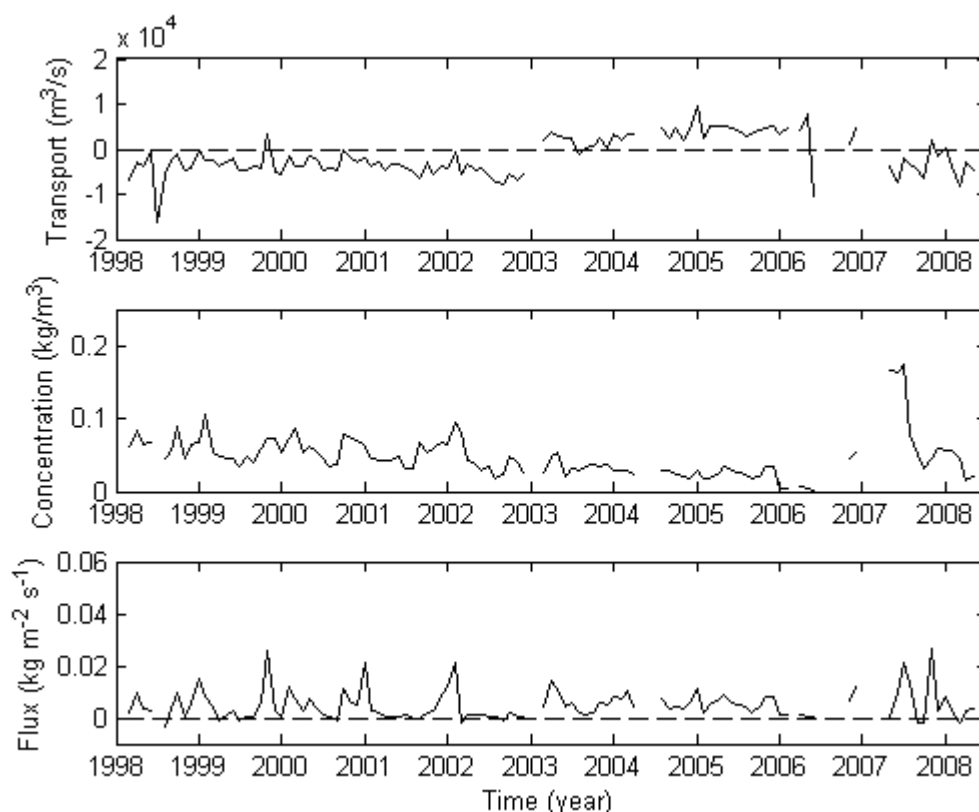
Om de maandgemiddelden van het debiet, de concentratie en de flux te bepalen is een harmonische analyse toegepast op de data met de 10 belangrijkste componenten (namelijk M2, S2, N2, μ_2 , K2, L2, M4, M6, 2MS6, O1) en is het residu bepaald. Dit residu is een betere maat voor de maandgemiddelde waarde dan gewoonweg alle datamiddelen, omdat de data niet evenredig over iedere maand verdeeld is. De resultaten staan in Figuur 15 en Figuur 16 voor de analyse of de data verkregen met de directe en iteratieve methode, respectievelijk. Het residuele debiet is over het algemeen negatief in de periode 1998-2002 (dus van de Waddenzee naar de Noordzee). Het residuele debiet is $-3.9 \cdot 10^3 \pm 2.6 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is vergelijkbaar met de waarde verkregen door Buijsman and Ridderinkhof (2007). Vervolgens is het residuele debiet positief vanaf 2003 en weer negatief in 2007 en 2008. Van 2003 tot en met 2005 is het residuele debiet $+3.1 \cdot 10^3 \pm 2.0 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. In 2006, 2007 en 2008 zijn de variaties erg groot. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een te kleine datadichtheid in die periode. Verder lijkt er geen seizoensafhankelijkheid te zijn in het debiet. De amplitude van het getij zelf is ongeveer $6 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$. Dus het residu is dus slechts een fractie van deze waarde. Kleine fouten in de bepaling van de snelheid kunnen daarom grote effecten hebben op het residuele debiet. Het verschil tussen de periodes zou daarom verklaard kunnen worden door kleine meetfouten.

In de gemiddelde concentratie valt een regime veranderingen op tussen de jaren 1998 tot en met 2002 en vanaf 2003 tot en met 2005 en vervolgens weer in 2007 en 2008. In de eerste periode is er een duidelijke seizoensvariatie te zien met hoge concentraties in de winter en lage in de zomer. In de zomer is de gemiddelde concentratie ongeveer 50 (35) mg/L in de data verkregen met de directe

(iteratieve) methode, terwijl hij in de winter meer dan 2 keer zo hoog is. Dit kan verklaard worden door de aanwezigheid van meer stormen in het winterseizoen die turbulentie veroorzaken waarbij slib wordt opgewoeld van de bodem en in suspensie komt. Echter de jaren 2003 tot en met 2005 laten dit verschijnsel niet of nauwelijks zien. In deze periode is de concentratie min of meer constant met een gemiddelde van 32 ± 9 (29 ± 8) mg/l in de data verkregen met de directe (iteratieve) methode. Het zou kunnen doordat er in die jaren weinig stormen waren in de winter, maar dat is een onderwerp voor verder onderzoek. De reden dat de residuele concentratie in de eerste 5 jaar gemiddelde hoger is dan in de 3 daarop volgende jaren is waarschijnlijk door een te hoge waarde voor de calibratieconstante in de eerste 5 jaar. De resultaten met de iteratieve methode geven iets lagere residuele concentraties dan de resultaten met de directe methode. Ook zijn de pieken tijdens de wintermaanden iets minder duidelijk. Voor de rest zijn de resultaten voor beide methoden vergelijkbaar. Het lijkt er wederom op dat de data in de laatste drie jaren een te kleine dichtheid heeft om uitspraken te kunnen doen over gemiddelden en seizoensvariatie gedurende de periode.



Figuur 15: Maandgemiddeld debiet, concentratie en TSM flux van de data verkregen met de directe methode.



Figuur 16: Zelfde als Figuur 15, maar dan van de data verkregen met de iteratieve methode.

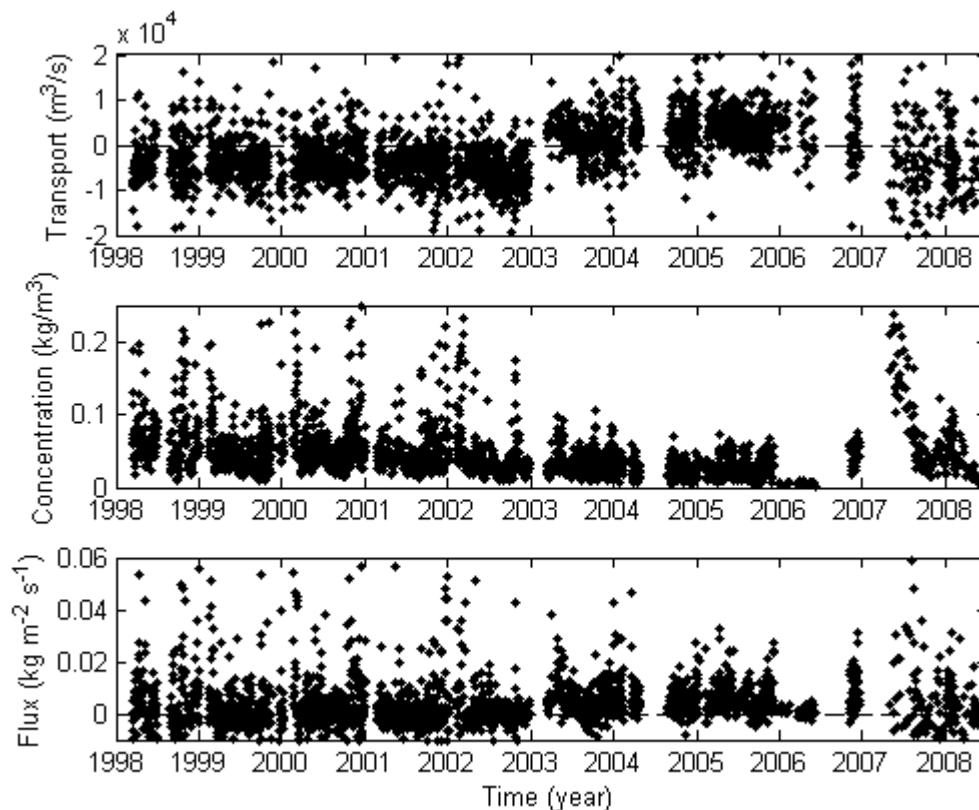
Ondanks dat het debiet negatief kan zijn (watertransport van de Waddenzee naar de Noordzee), is toch de TSM flux bijna altijd positief en dus in de richting van de Waddenzee. De flux laat net als de concentratie hogere waarden zien in de maanden rond de jaarwisselingen vergeleken met de rest van het jaar met pieken van ongeveer $3 \cdot 10^{-2}$ ($2 \cdot 10^{-2}$) $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor de data verkregen met de directe (iteratieve) methode. Ook de flux is lager in het geval van data verkregen met de iteratieve methode. De flux is ook iets vaker net negatief en is meestal bijna nul in de zomermaanden, terwijl er wel pieken zichtbaar zijn in de wintermaanden. Kennelijk zijn de processen in de winter belangrijk voor de totale flux over het gehele jaar.

Getijgemiddelden van de waarden bepalen is eigenlijk niet mogelijk, vanwege dezelfde reden als het niet zinvol is om alle waarden binnen een maand te middelen en dat een maandgemiddelde te noemen. De data is nu eenmaal niet gelijk verdeeld over een maand (of over een dag). Daarom is in plaats daarvan het residu per dag bepaald voor alle waarnemingen met behulp van een harmonische analyse als er op minimaal 6 verschillende tijdstippen een meetgegeven is. De dominante bijdrage aan het debiet en de flux komt van het M2 getij (dubbeldagse component), terwijl de concentratie 4 pieken per dag laat zien, namelijk zowel tijdens vloed als tijdens eb. De dominante bijdrage in de concentratie is dus op de periode van het M4 getij. Daarom wordt voor het debiet en de flux het residu bepaald ten opzichte van een oscillatie met de M2-periode en voor de concentratie wordt de M4-component toegepast. De resultaten in Figuur 17 en Figuur 18 laten grote dag-tot-dag variaties zien, maar het gemiddelde laat hetzelfde beeld zien als de maandgemiddelden in Figuur 14 en Figuur 15.

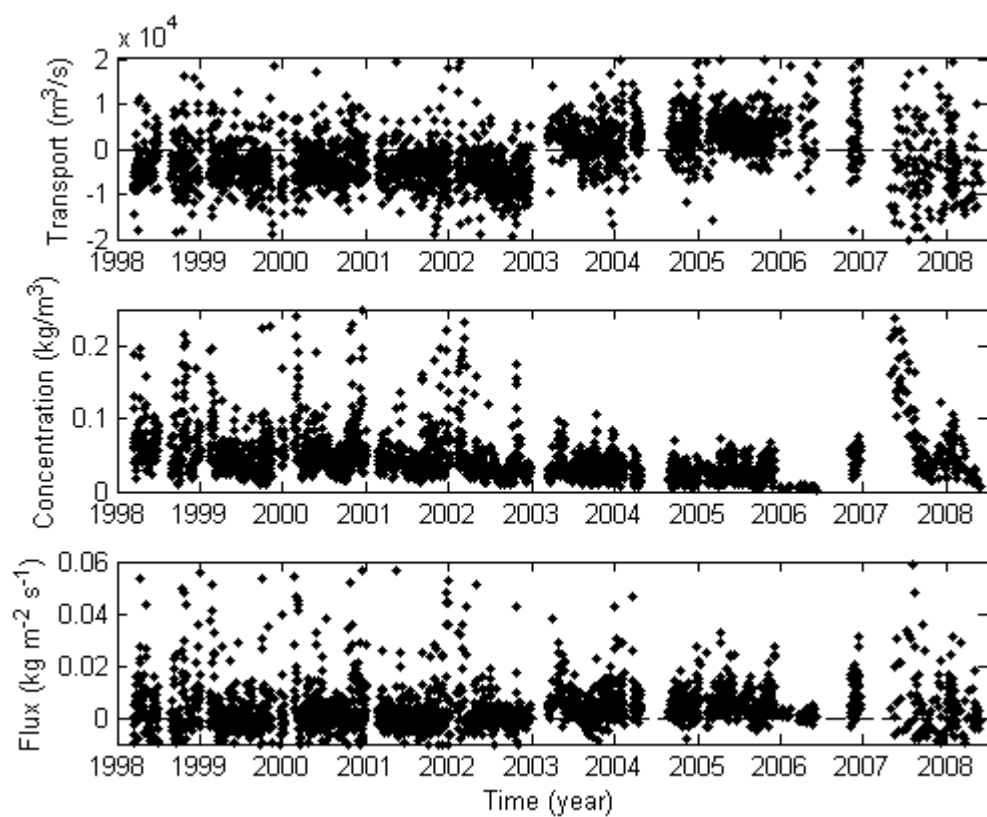
Het residuele debiet is $-4.1 \cdot 10^3 \pm 6.6 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ in de eerste periode, $+2.5 \cdot 10^3 \pm 5.5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ in de tweede periode en $-1.5 \cdot 10^3 \pm 9.7 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ in de laatste periode, waarbij de relatief grote standaard deviatie duidelijk reflecteert dat het daggemiddelde debiet zowel positief als negatief kan zijn. De gemiddelde concentratie is 75 ± 38 (52 ± 33) mg/l in de eerste periode, gevolgd door 30 ± 18 (28 ± 16) mg/l in 2003-2005 en 52 ± 43 (48 ± 39) mg/l in de periode vanaf 2006 voor de data verkregen met de

directe (iteratieve) methode. Deze figuren geven eigenlijk hetzelfde beeld als die van de maandelijks gemiddelden, waarbij de uitschieters in de concentratie rond de jaarwisselingen erg opvallend zijn.

De TSM fluxen zijn $7.9 \cdot 10^{-3} \pm 11.9 \cdot 10^{-3}$ ($3.2 \cdot 10^{-3} \pm 9.8 \cdot 10^{-3}$) $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ in de periode tot en met 2002; $6.1 \cdot 10^{-3} \pm 7.4 \cdot 10^{-3}$ ($5.4 \cdot 10^{-3} \pm 6.3 \cdot 10^{-3}$) $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ in 2003/2004/2005 en $6.5 \cdot 10^{-3} \pm 10.7 \cdot 10^{-3}$ ($5.2 \cdot 10^{-3} \pm 10.0 \cdot 10^{-3}$) $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ in de laatste periode. De standaarddeviatie is in alle gevallen van dezelfde grootte is als het gemiddelde, maar gedurende alle periodes is de gemiddelde flux van de Noordzee naar de Waddenzee gericht. Over het getij gemiddeld kan er export van sediment zijn terwijl er gemiddeld een import heerst. Dit fenomeen is wel eens een keer geobserveerd tijdens een 13-uurs metingen (AS51 op 28 september 2007) waarin de TSM concentraties tijdens de eb fase van het getij hoger waren dan tijdens vloed. Ook valt op dat de pieken in de concentratie en de flux gedurende de winterperioden wordt bepaald door slechts enkele dagen waarop de daggemiddelde concentratie relatief hoog. Dit suggereert dat kortdurende fenomenen, zoals stormen, van groot belang zijn voor het verhogen van de concentratie in de waterkolom, daarmee een grote flux van sediment van de Noordzee naar de Waddenzee veroorzaken en daardoor belangrijk zijn in het bepalen van de seizoens- en zelfs jaargemiddelde flux.



Figuur 17: Getijgemiddeld debiet, concentratie en TSM flux voor de data verkregen met de directe methode.



Figuur 18: Zelfde als Figuur 17, maar dan voor de data verkregen met de iteratieve methode.

“Fluxen” van voedingsstoffen in 2006 tot en met half 2008 op de locatie van het ankerstation

De fluxen van voedingsstoffen worden bepaald voor dagen dat er tijdens calibratie vaartochten monsters zijn genomen voor de analyse van opgeloste en/of particulaire voedingsstoffen. De flux wordt bepaald door aan te nemen dat het monster nabij het oppervlak op 1 m diepte is genomen en het monster bij de bodem op 1 m boven de bodem. Er wordt verder aangenomen dat het profiel van de concentratie een lineair verband heeft met de diepte. De concentraties worden dan geïnterpoleerd op die diepten waarvoor er stroomsnelheden beschikbaar zijn, gemeten met de ADCP onder/naast de Navicula. De flux van een voedingsstof wordt bepaald door de concentratie te vermenigvuldigen met de momentane snelheid in de oost-west richting. Na integratie over de diepte levert dit de momentane flux op de positie van de Navicula, oftewel:

$$flux(t) = \int u(z,t)c(z,t)dz \quad 10$$

Echter, het woord “flux” is hier niet helemaal op zijn plaats, aangezien het niet over de verplaatsing van een bepaalde hoeveelheid per tijdseenheid gaat, maar over een verplaatsing per tijdseenheid per meter (zie het verschil tussen vergelijkingen 9b en 10). In de rest van dit hoofdstuk wordt er dus eigenlijk “flux per meter” bedoeld met “flux”.

De getijgemiddelde flux wordt vervolgens bepaald door te middelen over 38 stations. Dit is gelijk aan 1 periode van het M2-getij, omdat er iedere 20 minuten een meting wordt verricht. Als er een totaal op 39 (40) stations is gemeten dan levert dat dus 2 (3) bepalingen op van de flux. Deze worden gemiddelde tot de uiteindelijke fluxen, die zijn weergegeven in Tabel 10. In Tabel 11 staan fluxen van afgeleide voedingsstoffen gebaseerd op de data in Tabel 10. De standaardafwijking tussen de 2 (3) bepalingen is een maat voor de sluitfout (Tabel 12 en Tabel 13). (De sluitfout bij getijmiddelling is de fout die ontstaat doordat het getij niet helemaal cyclisch is en/of omdat de periode waarover gemiddeld wordt niet overeenkomt met de getijperiode.) De bijbehorende relatieve variaties staan weergegeven in Tabel 14 en Tabel 15. Figuur 19 en Figuur 20 laten de fluxen als functie van de dag in het jaar en in de appendix staan de figuren voor de variatie in de flux per ankerstation.

Over het algemeen is er een uitvoer van voedingsstoffen van de Waddenzee naar de Noordzee. Op 13 december 2006 laten alle opgeloste voedingsstoffen een invoer zien en op 6 april 2007 is er een invoer van ammonia en PON. Verder is er op 28-09-2007 een invoer van PON en POC en tijdens de tochten in 2008 een invoer van fosfaat en PON op 25-04-2008 en POC op 20-06-2008.

Het lijkt erop dat er over het algemeen een uitvoer is van stoffen van de Waddenzee naar de Noordzee. In de wintermaanden lijkt die uitvoer het grootst, maar helaas zijn er geen metingen beschikbaar in januari en februari om deze conclusie te ondersteunen. In het vroege voorjaar wordt NO_x uit de bodem geoxideerd tot nitraat (mineralisatie). In de wintermaanden is er geen primaire productie omdat er een tekort is aan licht voor fotosynthese. De Waddenzee heeft een kleiner volume dan de Noordzee, hierdoor zijn de concentraties van NH₄ en NO_x hoger in de Waddenzee dan in de Noordzee. De Waddenzee wordt daarmee een bron van voedingsstoffen. Na de voorjaarsbloei wordt ammonia belangrijk. Het anorganische materiaal is dan op en er vindt recycling plaats. Ammonia wordt omgezet in NO_x, maar wordt meteen verbruikt. Daardoor is er zowel in de Waddenzee als de Noordzee een tekort aan voedingsstoffen in de zomer en vindt er nauwelijks uitwisseling plaats. In het najaar of vroege winter vindt remineralisatie plaats, hierbij wordt organisch materiaal omgezet in anorganisch materiaal. Dit proces is temperatuurafhankelijk en neemt af met de temperatuur. Aangezien de Noordzee dan kouder is dan de Waddenzee zal dit proces in de Noordzee eerder

stoppen. Echter in de Noordzee heeft dit minder effect op de concentratie van anorganische stoffen dan in de Waddenzee, vanwege het volumeverschil. Dit kan dus zowel een import als een export van anorganische voedingsstoffen betekenen. Dat is te zien aan de waarden voor 13-12-2006 en 23-11-2007; tijdens het eerste ankerstation was er een import van voedingsstoffen en tijdens de tweede een export.

Tabel 10: Getijgemiddelde fluxen per meter van de gemeten variabelen: fosfaat (PO_4), ammonium (NH_4), NO_x (=nitraat (NO_3)+nitriet), nitriet (NO_2), totaal opgelost stikstof (TDN) en fosfor (TDP) in $10^{-3} \mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$ en particulier organisch stikstof (PON) en koolstof (POC) in $10^{-3} \text{mg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ voor alle ankerstations in 2006 tot half 2008. *Let op, dit zijn fluxen per meter, vandaar de eenheid in μmol of mg per seconde per meter. Negatieve waarden duiden op een flux van de Waddenzee naar de Noordzee.*

ankerstation	datum	PO_4	NH_4	NO_x	NO_2	TDN	TDP	PON	POC
as45	07-03-2006	-1.85	-22.10	-112.11	-108.30	-175.26	-2.06		
as46	12-06-2006	-0.07	-1.51	-4.65	-0.41	-12.13	-0.62		
as47	07-09-2006	-1.15	-2.04	-7.93	-0.54	-34.22	-2.04	-0.21	-0.95
as48	13-12-2006	3.68	1.31	18.34	0.55	21.75	0.76	-0.10	-1.19
as49	06-04-2007	-0.04	0.19	-38.61	-0.29	-60.84	-0.54	0.04	-3.66
as50	26-06-2007	-0.30	-5.01	-0.62	-0.19	-36.76	-0.42	-0.30	-2.18
as51	28-09-2007	-0.63	-4.01	-3.63	-0.46	-9.88	-1.00	0.07	0.25
as52	23-11-2007	-3.24	-25.50	-80.25	-2.58	-147.09	-3.69	-0.26	-1.94
as53	25-04-2008	0.09	-1.18	-49.35	-0.78	-67.11	-1.10	0.40	-25.88
as54	20-06-2008	0.01	-0.59	-0.22	-0.07	-4.03	-0.11	-0.34	0.09

Tabel 11: Getijgemiddelde fluxen per meter van afgeleide variabelen: opgelost inorganisch fosfaat (DIP), opgelost inorganisch nitraat (DIN), opgelost organisch fosfaat (DOP) en opgelost organisch nitraat (DON) in $10^{-3} \mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$ voor alle ankerstations in 2006 tot half 2008. Verder is gegeven de verhouding tussen organisch en totaal fosfor (DOP/TDP) en organisch en totaal nitraat (DON/TDN). *Let op, dit zijn fluxen per meter, vandaar de eenheid in μmol per seconde per meter.*

ankerstation	datum	DIP	DIN	DOP	DON	DOP/TDP	DON/TDN
as45	07-03-2006	-1.85	-134.21	-0.21	-41.05	0.10	0.23
as46	12-06-2006	-0.07	-6.16	-0.55	-5.97	0.89	0.49
as47	07-09-2006	-1.15	-9.97	-0.89	-24.25	0.43	0.71
as48	13-12-2006	3.68	19.65	-2.92	2.10	-3.83	0.10
as49	06-04-2007	-0.04	-38.42	-0.50	-22.42	0.93	0.37
as50	26-06-2007	-0.30	-5.63	-0.11	-31.13	0.27	0.85
as51	28-09-2007	-0.63	-7.65	-0.38	-2.24	0.37	0.23
as52	23-11-2007	-3.24	-105.75	-0.44	-41.34	0.12	0.28
as53	25-04-2008	0.09	-50.53	-1.19	-16.58	1.08	0.25
as54	20-06-2008	0.01	-0.81	-0.12	-3.22	1.06	0.80

Tabel 12: Variaties in de getijgemiddelde fluxen per meter in Tabel 10 in dezelfde eenheden.

ankerstation	datum	PO_4	NH_4	NO_x	NO_2	TDN	TDP	PON	POC
as45	07-03-2006	0.03	0.30	1.35	1.29	1.98	0.04		
as46	12-06-2006	0.01	0.16	0.27	0.01	2.01	0.03		
as47	07-09-2006	0.11	0.37	1.92	0.06	3.39	0.15	0.03	0.15
as48	13-12-2006	0.15	0.21	4.15	0.11	6.69	0.19	0.02	0.17
as49	06-04-2007	0.01	0.11	11.22	0.09	14.63	0.06	0.07	0.70
as50	26-06-2007	0.01	0.10	0.05	0.01	0.87	0.02	0.02	0.16
as51	28-09-2007	0.03	0.01	0.36	0.02	2.96	0.06	0.02	0.14
as52	23-11-2007	0.28	2.35	6.98	0.23	12.44	0.31	0.03	0.42
as53	25-04-2008	0.00	0.22	2.39	0.04	3.98	0.03	0.02	0.14
as54	20-06-2008	0.01	0.32	0.26	0.03	1.76	0.02	0.02	0.17

Tabel 13: Variaties in de getijgemiddelde fluxen per meter van afgeleide variabelen in Tabel 11 in dezelfde eenheden.

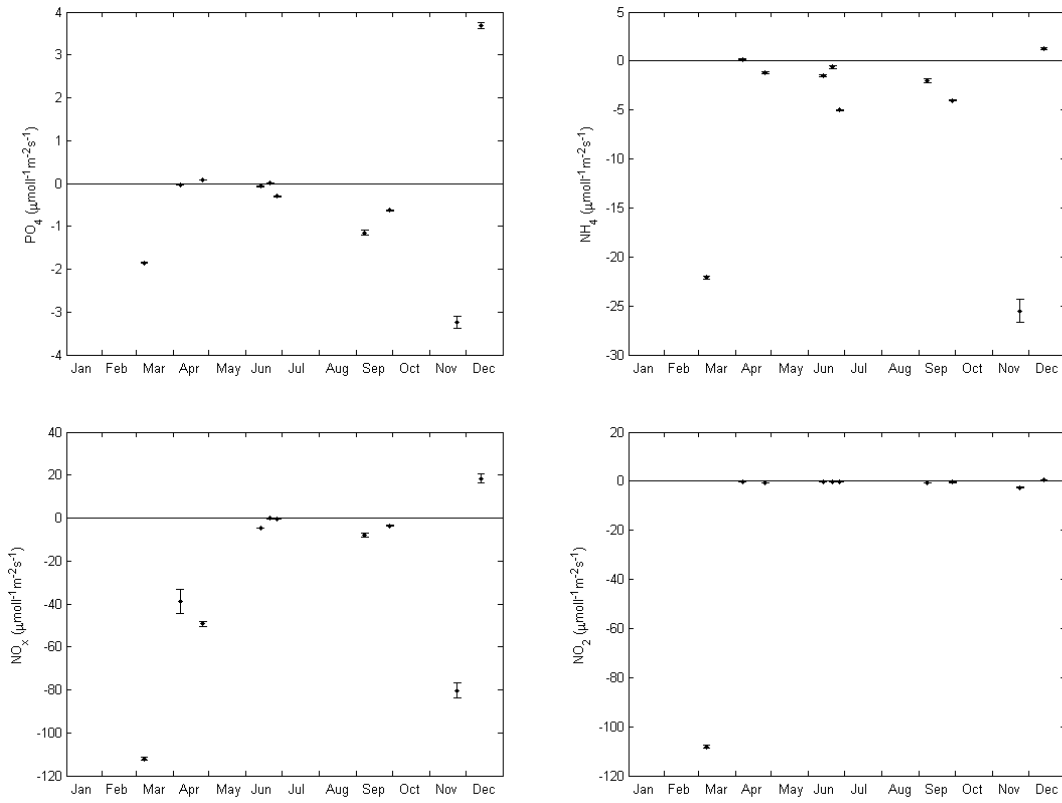
ankerstation	datum	DIP	DIN	DOP	DON	DOP/TDP	DON/TDN
as45	07-03-2006	0.03	1.38	0.05	2.41	0.10	0.01
as46	12-06-2006	0.01	0.31	0.03	2.04	0.89	0.19
as47	07-09-2006	0.11	1.95	0.19	3.92	0.44	0.13
as48	13-12-2006	0.15	4.16	0.24	7.87	3.95	0.36
as49	06-04-2007	0.01	11.22	0.06	18.43	0.93	0.32
as50	26-06-2007	0.01	0.11	0.02	0.88	0.27	0.03
as51	28-09-2007	0.03	0.36	0.07	2.98	0.38	0.31
as52	23-11-2007	0.28	7.37	0.41	14.46	0.12	0.10
as53	25-04-2008	0.00	2.40	0.03	4.64	1.08	0.07
as54	20-06-2008	0.01	0.41	0.02	1.81	1.07	0.57

Tabel 14: Relatieve variaties (%) in de getijgemiddelde fluxen per meter bepaald uit de waarden in Tabel 10 en Tabel 12.

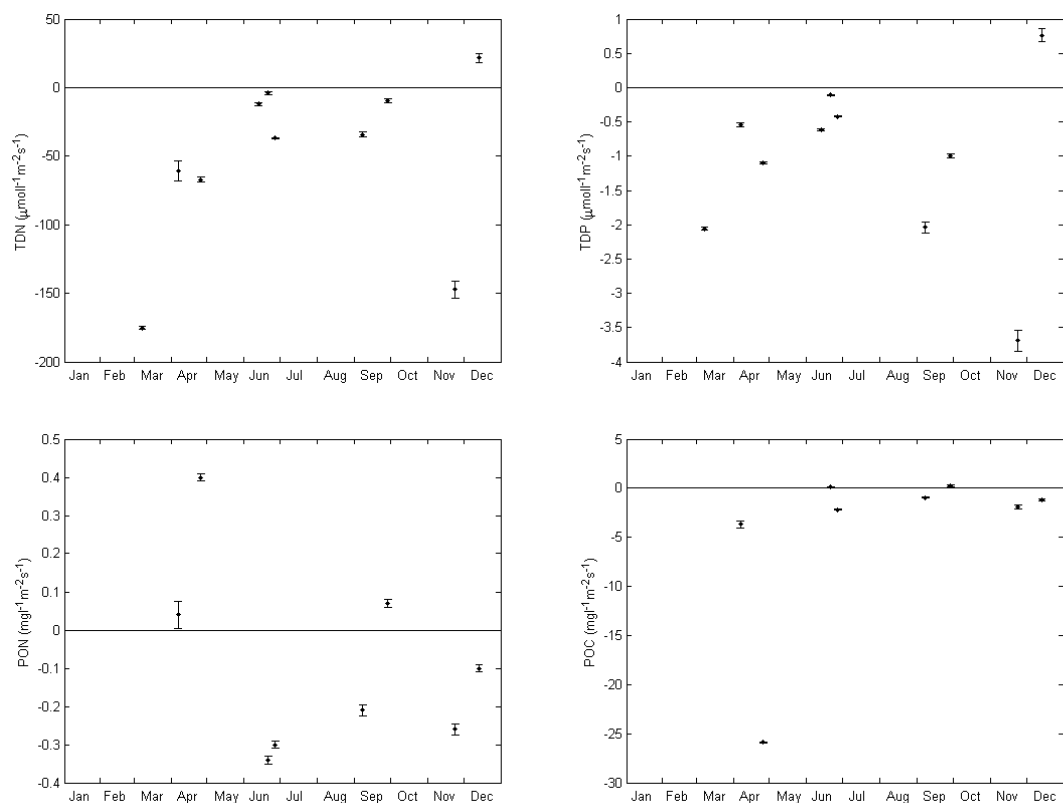
ankerstation	datum	PO ₄	NH ₄	NO _x	NO ₂	TDN	TDP	PON	POC
as45	07-03-2006	2	1	1	1	1	2		
as46	12-06-2006	21	10	6	3	17	5		
as47	07-09-2006	10	18	24	10	10	7	12	15
as48	13-12-2006	4	16	23	20	31	24	19	14
as49	06-04-2007	26	56	29	30	24	12	184	19
as50	26-06-2007	2	2	9	3	2	4	7	7
as51	28-09-2007	5	0	10	4	30	6	25	58
as52	23-11-2007	9	9	9	9	8	8	13	22
as53	25-04-2008	3	18	5	5	6	3	4	1
as54	20-06-2008	179	54	117	44	44	15	7	187

Tabel 15: Relatieve variaties (%) in de getijgemiddelde fluxen per meter van afgeleide variabelen uit de waarden in Tabel 11 en Tabel 13.

ankerstation	datum	DIP	DIN	DOP	DON	DOP/TDP	DON/TDN
as45	07-03-2006	2	1	23	6	100	6
as46	12-06-2006	21	5	6	34	100	38
as47	07-09-2006	10	20	21	16	100	19
as48	13-12-2006	4	21	8	375	103	376
as49	06-04-2007	26	29	13	82	101	86
as50	26-06-2007	2	2	17	3	100	4
as51	28-09-2007	5	5	18	133	100	137
as52	23-11-2007	9	7	93	35	100	36
as53	25-04-2008	3	5	3	28	100	29
as54	20-06-2008	179	51	17	56	101	71



Figuur 19: Getijgemiddelde fluxen van fosfaat (PO_4), ammonium (NH_4), NO_x (=nitraat (NO_3)+nitriet), nitriet (NO_2) in $\mu\text{mol l}^{-1} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ voor alle ankerstations in 2006 tot half 2008 tegen de dag van het jaar.



Figuur 20: Getijgemiddelde fluxen van totaal opgelost stikstof (TDN) en fosfor (TDP) in $\mu\text{mol l}^{-1} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ en particulier organisch stikstof (PON) en koolstof (POC) in $\text{mg l}^{-1} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ voor alle ankerstations in 2006 tot half 2008.

Conclusies

Dit eindrapport is een beschrijving en analyse van de gegevens verzameld met de veerboot Schulpengat en de Navicula. Met behulp van een iteratieve methode gebaseerd op het werk van L. Merckelbach hebben wij hier laten zien dat het mogelijk is concentratie van gesuspendeerd materiaal te bepalen uit de intensiteit van de akoestische terugkaatsing. Om de methode te gebruiken is onder andere de instrument afhankelijke calibratie constante nodig. Die hebben wij bepaald met behulp van speciale calibratie vaartochten met de Navicula. De waarden van de instrument afhankelijke constante is bepaald voor alle vaartochten en laat zien dat die van de ADCP onder de Navicula niet erg varieert, in tegenstelling tot die van de ADCP onder de Schulpengat. Het lijkt erop dat de constante van de ADCP onder de Navicula werkelijk constant is, omdat die niet voortdurend onderhevig is aan de invloeden van de zee, terwijl die onder de Schulpengat waarschijnlijk blootgesteld wordt aan aangroei en te maken heeft met slijtage door voortdurend gebruik of beschadigd raakt. Daarnaast kunnen variaties in de korrelgrootteverdeling van het slib een rol spelen.

De lange termijn residuele slibflux door het Marsdiep gebaseerd op alle data van de Schulpengat van 1998 tot en met half 2008 is $7.94 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ met de directe methode en $3.51 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ met de iteratieve methode in de richting van de Waddenzee. Dit komt overeen met een hoeveelheid van 7-16 miljoen ton per jaar. De data tussen 2003 en 2005 is het meest betrouwbaar, omdat er destijds goede calibratiemetingen uitgevoerd zijn en de data van de Schulpengat ook nog eens een hoge kwaliteit en dichtheid had. Als T0 waarde voor de slibflux door het Marsdiep naar de Waddenzee zou ik een waarde van de residuele slibflux van tussen de $5.14 \cdot 10^{-3}$ en $7.72 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ willen geven op basis van de resultaten voor de periode 2003 tot en met 2005. Dit komt overeen met ongeveer 11-16 miljoen ton slib/jaar.

Verder zijn er “fluxen per meter” van voedingsstoffen bepaald voor die calibratie vaartochten waarbij de concentraties gemeten zijn op de locatie van de Navicula. Uit de rapporten van de calibratie vaartochten blijkt dat er in sommige gevallen een groot verschil is tussen concentraties aan het oppervlak en nabij de bodem. Voor de bepaling van de totale “flux per meter” is een enkele bepaling nabij het oppervlak dus onvoldoende. Er is een poging gedaan om de seizoens- en maandelijks variaties in kaart te brengen door de data te plotten tegen de dag in het jaar. Een aantal variaties is te verklaren door chemische processen die seizoensafhankelijk zijn, maar er is meer onderzoek nodig om bijvoorbeeld verschillen tussen fluxen uit dezelfde maand van verschillende jaren te kunnen verklaren.

Vooruitblik naar T1-metingen

In dit eindrapport zijn de data gebruikt die met ADCP onder de Schulpengat zijn gemeten, omdat gebleken is dat de data van de Dr. Wagemaker tot eind 2008 van onvoldoende kwaliteit waren. In dit rapport is getoond dat de data van de Schulpengat voldoende is om een uitspraak te doen over de residuele slibflux; zelfs als deze slechts enkele dagen per week in de vaart is. Het is zeker dat de Schulpengat de komende jaren ingezet zal worden als tweede boot en dus regelmatig zal varen; dat is tenminste 1 dag per week in het laagseizoen en meerdere dagen per week in het hoogseizoen.

Een mogelijke oorzaak voor de slechtere kwaliteit van de data van de ADCP onder de Dr. Wagemaker is dat zij erg veel last heeft van de luchtbellen die veroorzaakt worden door de voortstuwing. De ADCP zat net niet helemaal in het midden van het schip. De Dr. Wagemaker wordt voortgestuwd met vier motoren, die in paren aan beide kanten van de veerboot geplaatst zijn. Hierdoor zat de ADCP voor zowel de transecten naar Texel als naar Den Helder in een stroom met turbulent water afkomstig uit één van de motoren. Echter door de asymmetrie van zijn positie was de data richting Den Helder slechter dan die richting Texel (zie het rapport van Groeskamp). Er is daarom besloten om de ADCP te verplaatsen en daarnaast nog een tweede ADCP aan te schaffen. De ADCPs zijn tussen de boeg en een motorpaar geplaatst aan de achterkant van de zwaarden. De eerste resultaten laten zien dat de data van de ADCP aan de voorkant van het schip (en dat varieert dus tussen de transecten van Texel naar Den Helder en van Den Helder naar Texel) een vergelijkbare kwaliteit heeft als die van de Schulpengat en dat slechts een heel klein deel van de data van de ADCP aan de achterkant niet bruikbaar is. Dit houdt in dat we voor de toekomst verwachten, dat er ruimschoots voldoende data van goede kwaliteit beschikbaar zal komen om een T1 bepaling te kunnen maken van de residuele flux.

In dit rapport is het belang van calibratiemetingen duidelijk naar voren gebracht. Het is niet eenvoudig, maar wel heel goed mogelijk om de slibconcentratie te bepalen aan de hand van de intensiteit van de akoestische terugkaatsing. Dit verband is namelijk afhankelijk van een heel aantal (fysische) parameters die niet allemaal constant verondersteld kunnen worden. De instrumentafhankelijke calibratieconstante is in de praktijk niet constant en dit komt waarschijnlijk door vervuiling van het instrument. Het systeem is ook afhankelijk van de korrelgrootteverdeling en daarom kunnen processen als zandsuppletie, baggeren, of de aanleg van de tweede Maasvlakte daar mogelijk invloed op hebben. Het is dus essentieel dat er in de toekomst regelmatig (ongeveer vier keer per jaar) calibratiemetingen uitgevoerd worden anders is het onmogelijk om met de data van de intensiteit van de akoestische terugkaatsing een betrouwbare slibconcentratie te bepalen.

Uit de bepaling van de nutriëntenconcentratie blijkt dat er soms grote variaties optreden tussen de concentratie nabij het oppervlak en de bodem, waardoor het onmogelijk is om op basis van alleen oppervlakte metingen een uitspraak te doen over de flux. Hierdoor is ook de vraag gerezen of metingen op een centraal punt in het Marsdiep, zoals die uitgevoerd zijn in dit project, representatief zijn voor de nutriëntenconcentratie in het gehele Marsdiep. Vanwege de onduidelijkheden over mogelijke horizontale variaties in de nutriëntenconcentratie is niet de flux, maar "flux per meter" bepaald in dit en het tussentijds datarapport. Het is daarom aan te bevelen om onderzoek te doen naar de horizontale variaties in het Marsdiep, omdat er mogelijk verschillen zijn tussen de concentraties nabij Den Helder, in het centrale deel van het Marsdiep en nabij Texel. Dergelijke variaties zijn ook opgevallen in de saliniteit en temperatuur nabij het oppervlak die ook geregistreerd worden bij een overtocht met de veerboot en het is dus zeer waarschijnlijk dat dergelijke variaties ook in de nutriëntenconcentratie optreedt. Bij een dergelijk onderzoek kan men denken aan een 13-uurs metingen waarbij transecten gevaren worden tussen Den Helder en Texel terwijl op drie punten en meerdere dieptes gemonsterd wordt voor nutriëntenconcentraties en waarbij simultaan snelheidsmetingen worden uitgevoerd. Ook kan gekeken worden naar het verband tussen de

concentraties in het centrale deel van het Marsdiep, zoals die gemeten worden tijdens een 13-uurs ankerstation en metingen die gedaan worden vanaf de steiger van het NIOZ op Texel. Bij deze steiger wordt 50 keer per jaar gemonsterd tijdens hoog water.

Lijst van referenties:

- Buijsman, M.C. and Ridderinkhof, H. (2007) Long-term ferry-ADCP observations of tidal currents in the Marsdiep inlet, *Journal of Sea Research* 57, 237-256
- Merckelbach, L. M. (2006) A model for high-frequency acoustic Doppler current profiler backscatter from suspended sediment in strong currents, *Continental Shelf Research* 26, 1316-1335
- Nauw, J.J., Merckelbach, L. M. and Ridderinkhof, H. (2009) Ferry-based observations of the suspended sediment concentrations in the Texel inlet using acoustics, in preparation.

Lijst van rapporten:

- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2006) Measurement plan for calibration and validation of ferry observations in the Texel inlet.
- Nauw, J. en Ridderinkhof, H. (2007): Tussentijds datarapport.
- Nauw, J. en Ridderinkhof (2008) Vergelijking tussen de data van de ADCP onder de veerboten Dr. Wagemaker, Schulpengat en onderzoeksschip *Navicula* op 28-09-2007 (C01)
- Groeskamp, S. (2009) Dokter Wagemaker ADCP Analyse, Rapport Rijkswaterstaat 08-01-09.
-
- Buijsman, M.; Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2006). *Navicula* cruise report 2005/10/20 (AS43).
- Buijsman, M.; Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2006). *Navicula* cruise report 2005/11/23 (AS44).
- Buijsman, M.; Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2006). *Navicula* cruise report 2006/03/07 (AS45).
- Nauw, J.; Buijsman, M. and Ridderinkhof, H. (2006). *Navicula* cruise report 2006/06/12 (AS46).
- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2007). *Navicula* cruise report 2006/09/07 (AS47).
- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2007). *Navicula* cruise report 2006/12/13 (AS48).
- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2007). *Navicula* cruise report 2007/04/06 (AS49).
- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2007). *Navicula* cruise report 2007/06/27 (AS50).
- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2008). *Navicula* cruise report 2007/09/28 (AS51).
- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2008). *Navicula* cruise report 2007/11/23 (AS52).
- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2008). *Navicula* cruise report 2008/04/25 (AS53).
- Nauw, J. and Ridderinkhof, H. (2008). *Navicula* cruise report 2008/06/20 (AS54).

Appendix A

Kleinste kwadraten harmonische analyse

Een kleinste kwadraten harmonische analyse (Buijsman and Ridderinkhof, 2007) kan toegepast worden op tijdseries om te bepalen welk deel van het signaal door het getij verklaard kan worden en welk deel niet, dit laatste wordt ook wel het residu genoemd. Deze methode werkt ook op tijdseries, waarbij de intervallen tussen twee metingen niet constant zijn. Dit geldt ook voor de veerbootdata, want het interval tussen twee overtochten is dan misschien wel min-of-meer gelijk, maar er wordt (over het algemeen) alleen maar overdag gemeten.

In de analyse wordt de optimale fit bepaald voor een gemeten waarde, bijvoorbeeld f_i , voor $i=1,2,3,\dots,N$ verschillende metingen. De beste harmonische fit kan beschreven door:

$$\hat{f}_i = F_0 + \sum_{j=1}^M [a_j \cos(\omega_j t_i) + b_j \sin(\omega_j t_i)] \quad 11$$

Wat equivalent is aan:

$$\hat{f}_i = F_0 + \sum_{j=1}^M [F_j \cos(\omega_j t_i - \phi_j)] \quad 12$$

In deze vergelijkingen is F_0 het residu, ω_j de frequentie van de j -de getijcomponent, a_j en b_j de getijcomponenten en t_i de tijdstippen waarop een meting f_i is gedaan. De amplitude en fase van de j -de getijcomponent, F_j en ϕ_j in vergelijking 8 verhouden zich als volgt tot de getijcomponenten a_j en b_j in vergelijking 7:

$$F_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \quad 13$$
$$\phi_j = \arctan\left(\frac{b_j}{a_j}\right)$$

De waarden van de componenten a_j en b_j wordt bepaald door het kwadraat van het verschil tussen de metingen en de fit te minimaliseren, oftewel:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - f_i)^2}{\partial a_j} = 0 \quad 14$$
$$\frac{\partial \sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - f_i)^2}{\partial b_j} = 0$$

Dit levert $2 \times M$ vergelijkingen op met $2 \times M$ onbekenden, die algebraïsch opgelost kunnen worden. De kwaliteit van de fit wordt bepaald door de determinatiecoëfficiënt R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \langle f \rangle)^2}{\sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - \langle f \rangle)^2} \quad 15$$

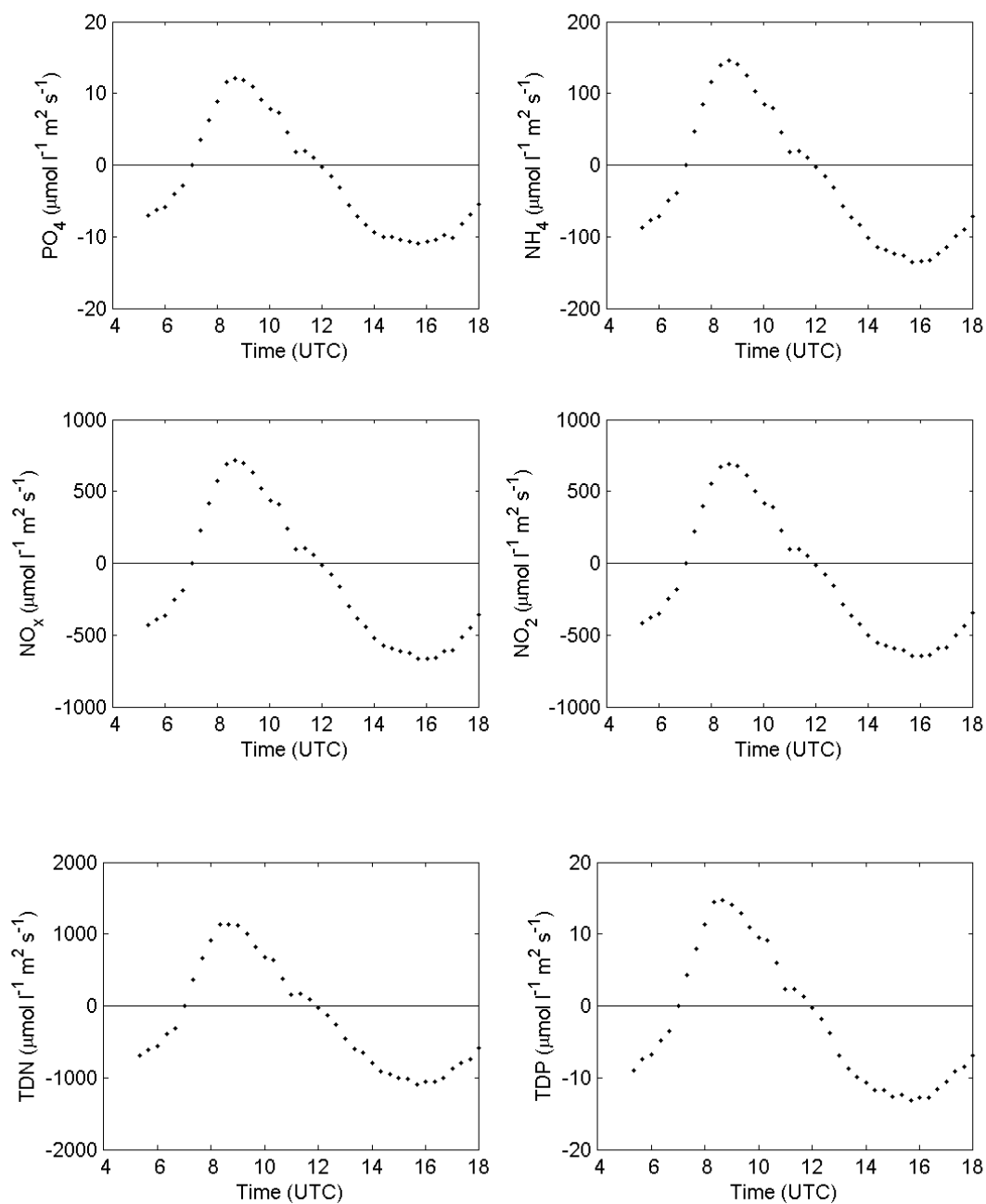
Hierbij betekent $\langle f \rangle$ het gemiddelde van de metingen, f .

Bij bepalingen van de harmonische fit worden in totaal maximaal 144 getijcomponenten gebruikt (Tabel 16).

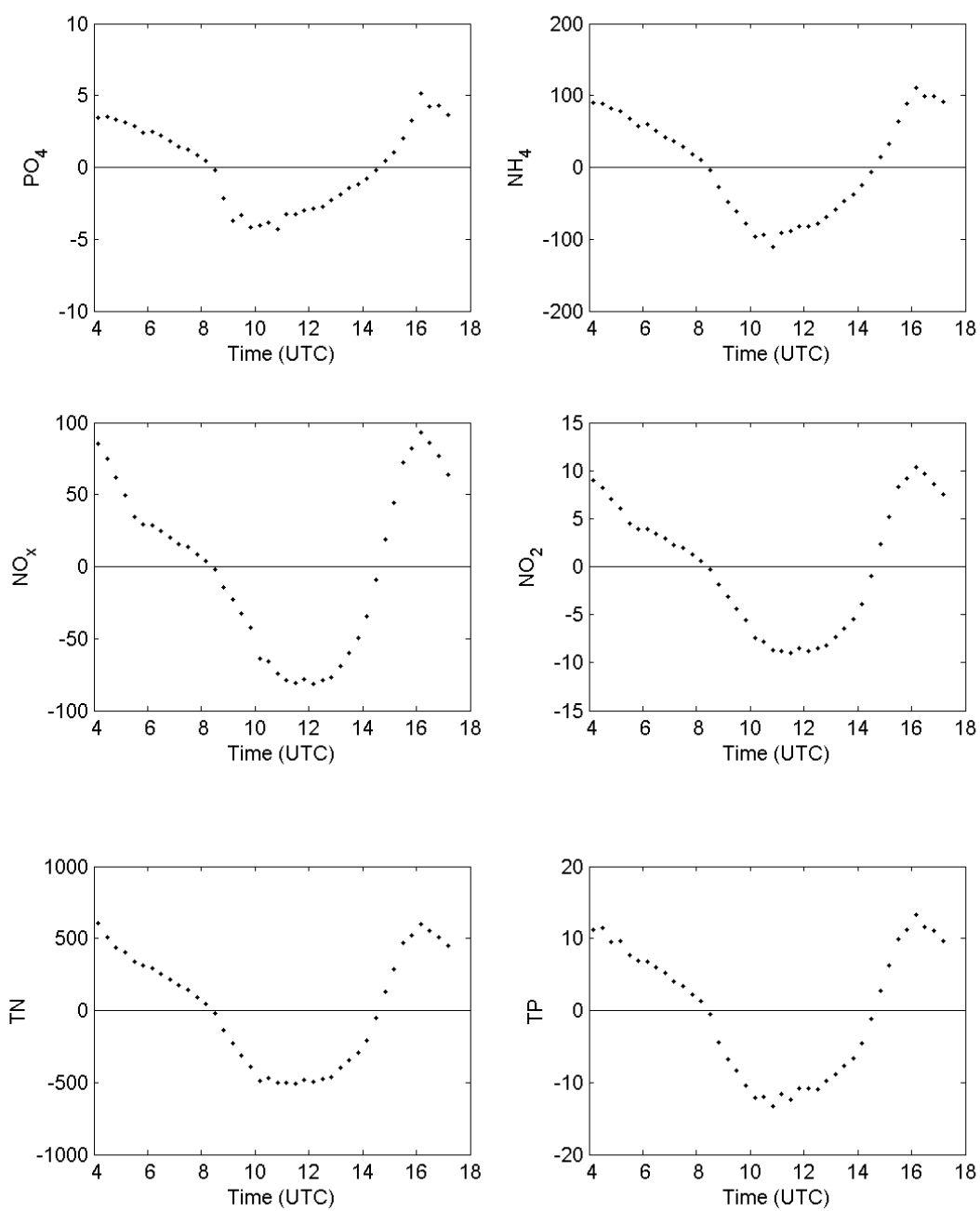
Tabel 16: Namen en frequenties van 144 getijcomponenten.

Naam	radialen/dag	naam	radialen/dag	Naam	radialen/dag
Sa	1.72E-02	2SN(MK)2	12.30	2M of v6	36.22
Ssa	3.44E-02	λ 2	12.34	3MSK6	36.39
Msm	1.98E-01	L2 of 2MN2	12.37	M6	36.42
Mm	2.28E-01	T2	12.55	MSN6	36.62
Msf	4.26E-01	S2	12.57	2ML6	36.65
Mf	4.60E-01	R2	12.58	MK of v6	36.68
A7	6.88E-01	K2	12.60	2MS6	36.85
α 1	5.19	ζ of MSN2	12.79	2MK6	36.88
2Q1	5.38	η of KJ2	12.83	MSL6	37.08
σ 1	5.41	2KM(SN)2	12.86	SNK6	37.08
Q1	5.61	2SM2	12.99	2SM6	37.27
P1	5.64	SKM2	13.03	MSK6	37.31
O1	5.84	NO3	17.75	S6	37.70
τ 1	5.87	2MK3	17.98	2MNO7	42.03
β 1	6.04	2MP3	18.02	2NMK7	42.27
M1 of NO1	6.07	M3	18.21	M7	42.49
χ 1	6.10	SO3	18.41	2MSO7	42.69
π 1	6.25	MK3	18.44	3MK7	42.72
P1	6.27	S3	18.85	MSKO7	43.15
S1	6.28	SK3	18.87	2(MN)8	48.11
K1	6.30	4MS4	23.43	3MN8	48.34
ψ 1	6.32	2MNS4	23.63	4MLS8	48.37
ϕ 1	6.33	N4	23.83	M8	48.56
θ 1	6.50	3MS4	23.86	2MSN8	48.76
J1	6.53	MN4	24.05	3ML8	48.79
2PO1	6.69	2MLS4	24.08	2MNK8	48.80
SO1	6.73	2MSK4	24.25	3MS8	48.99
OO1	6.76	M4	24.28	3MK8	49.02
ν 1 of KQ1	6.99	SN4	24.48	2MSL8	49.22
3MKS2	11.26	ML4	24.51	2(MS)8	49.41
2NS2	11.26	MS4	24.71	2MSK8	49.45
3MS2	11.29	MK4	24.74	2M2NK9	54.41
OQ2	11.46	SL4	24.94	3MNK9	54.64
ε 2 of MNS2	11.49	S4	25.13	4MK9	54.86
2ML2S2	11.52	SK4	25.17	3MSK9	55.29
2MS2K2	11.65	MNO5	29.89	4MN10	60.48
NLK2 of 2MK2	11.68	2MO5	30.12	M10	60.70
2N2	11.68	3MP5	30.16	3MNS10	60.90
μ 2 of 2MS2	11.72	MNK5	30.35	4MS10	61.13
N2	11.91	2MP5	30.55	2(MS)N10	61.33
ν 2	11.94	2MK5	30.58	3MSL10	61.36
MKL2S2	11.98	MSK5	31.01	3M2S10	61.56
OP2	12.11	3KM5	31.04	4MSK11	67.43
MPS2	12.12	2SK5	31.43	M12	72.84
M2	12.14	2NMLS6	35.77	4MNS12	73.04
MSP2	12.16	2NM6	35.97	5MS12	73.27
MKS2	12.18	2MNLS6	36.00	4MSL12	73.50
M2(KS)2	12.21	2MN6	36.19	4M2S12	73.70

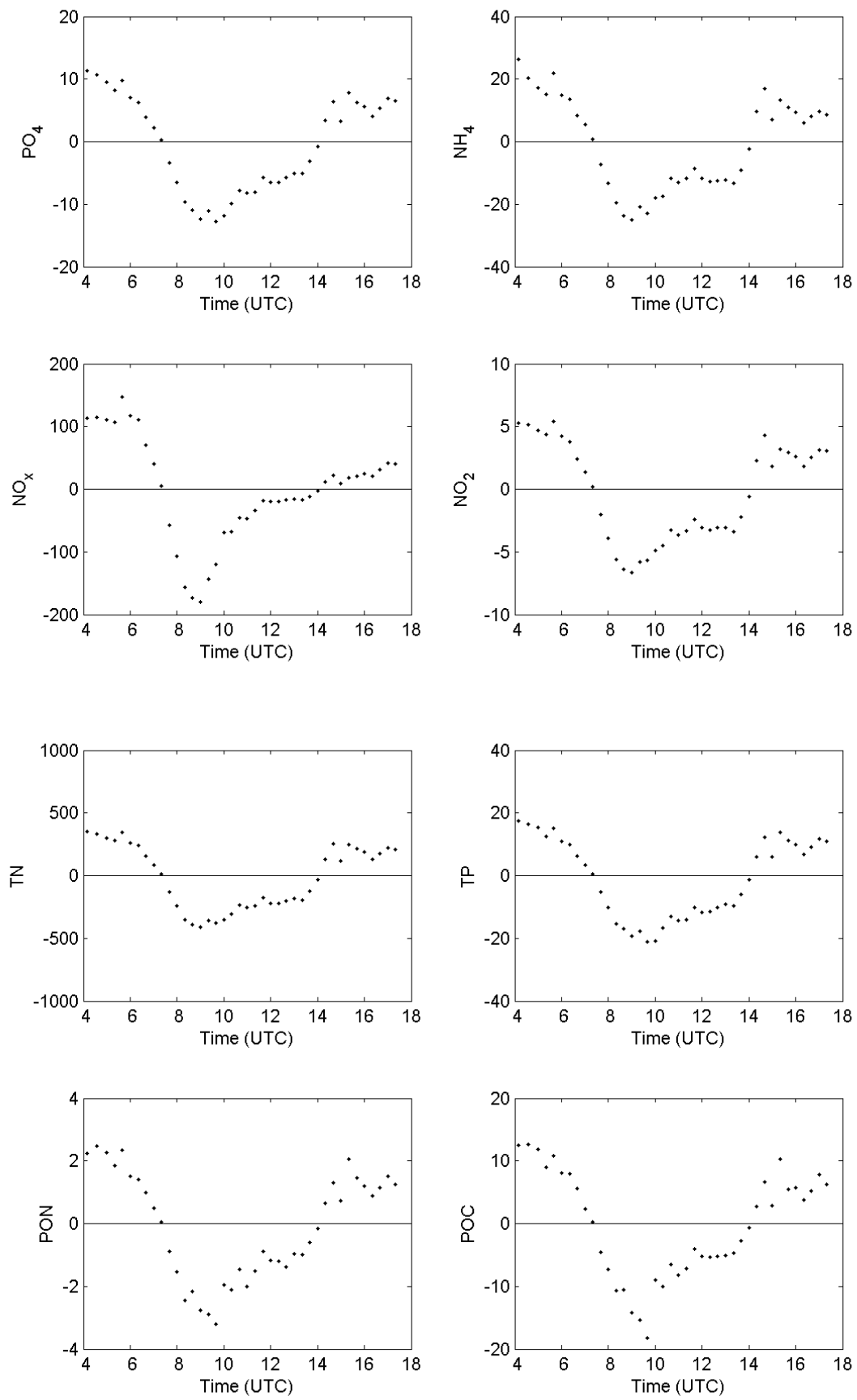
Appendix B: Figuren van nutriëntenfluxen



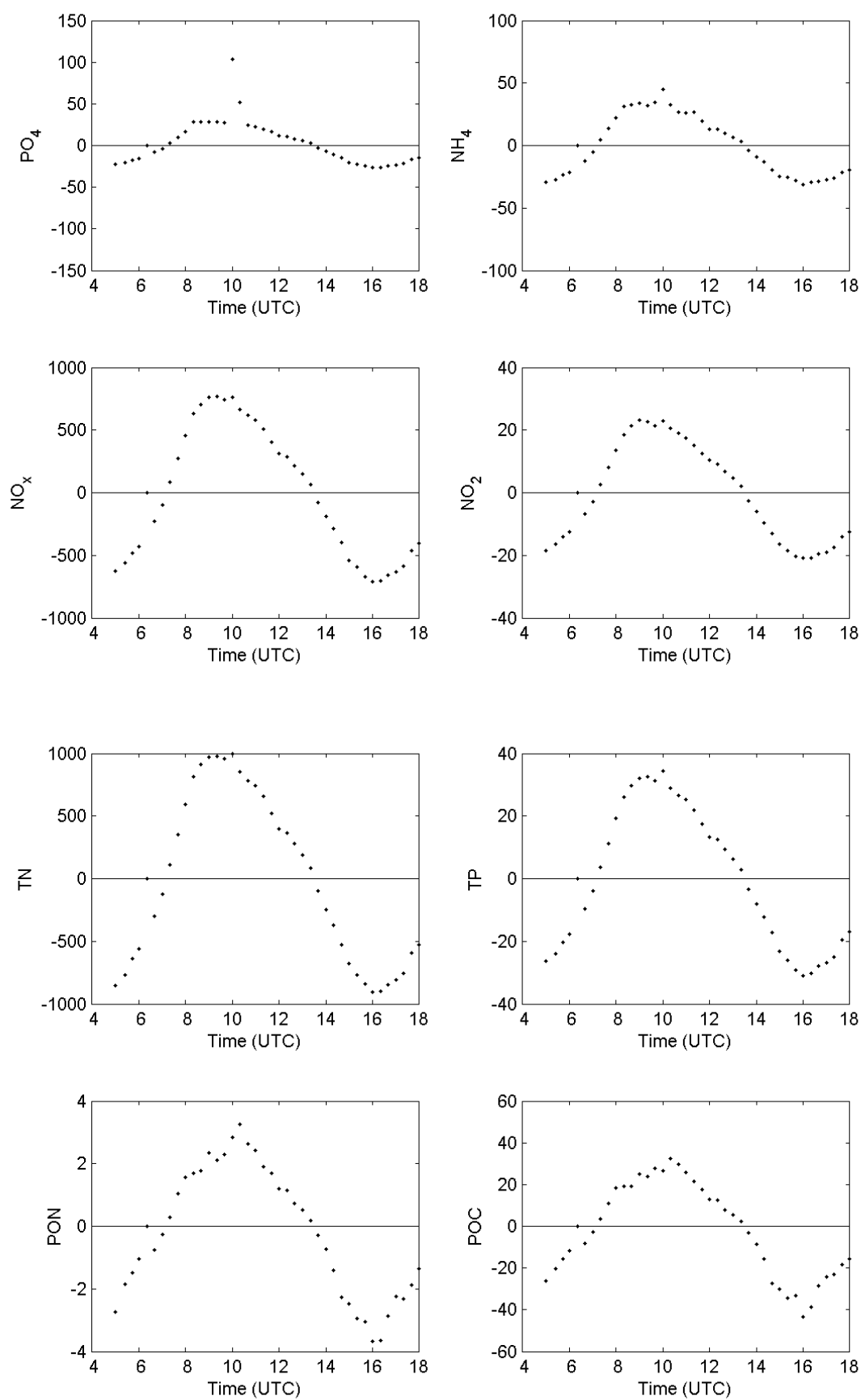
Figuur 21: Fluxen van fosfaat, ammonium, NO_x , nitriet, totaal opgelost stikstof en totaal opgelost fosfaat voor ankerstation as45.



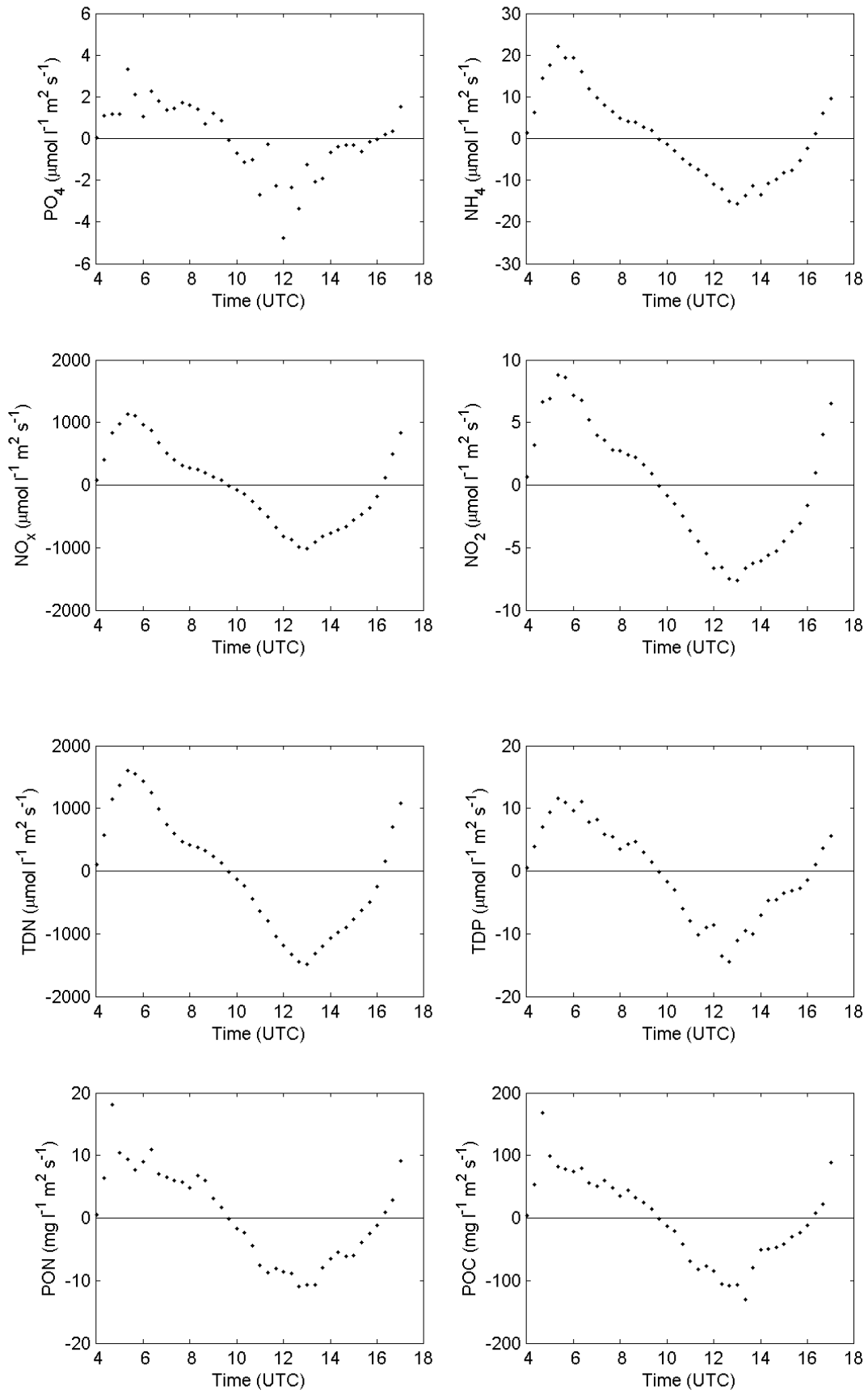
Figuur 22: Zelfde als Figuur 21 maar dan voor ankerstation as46.



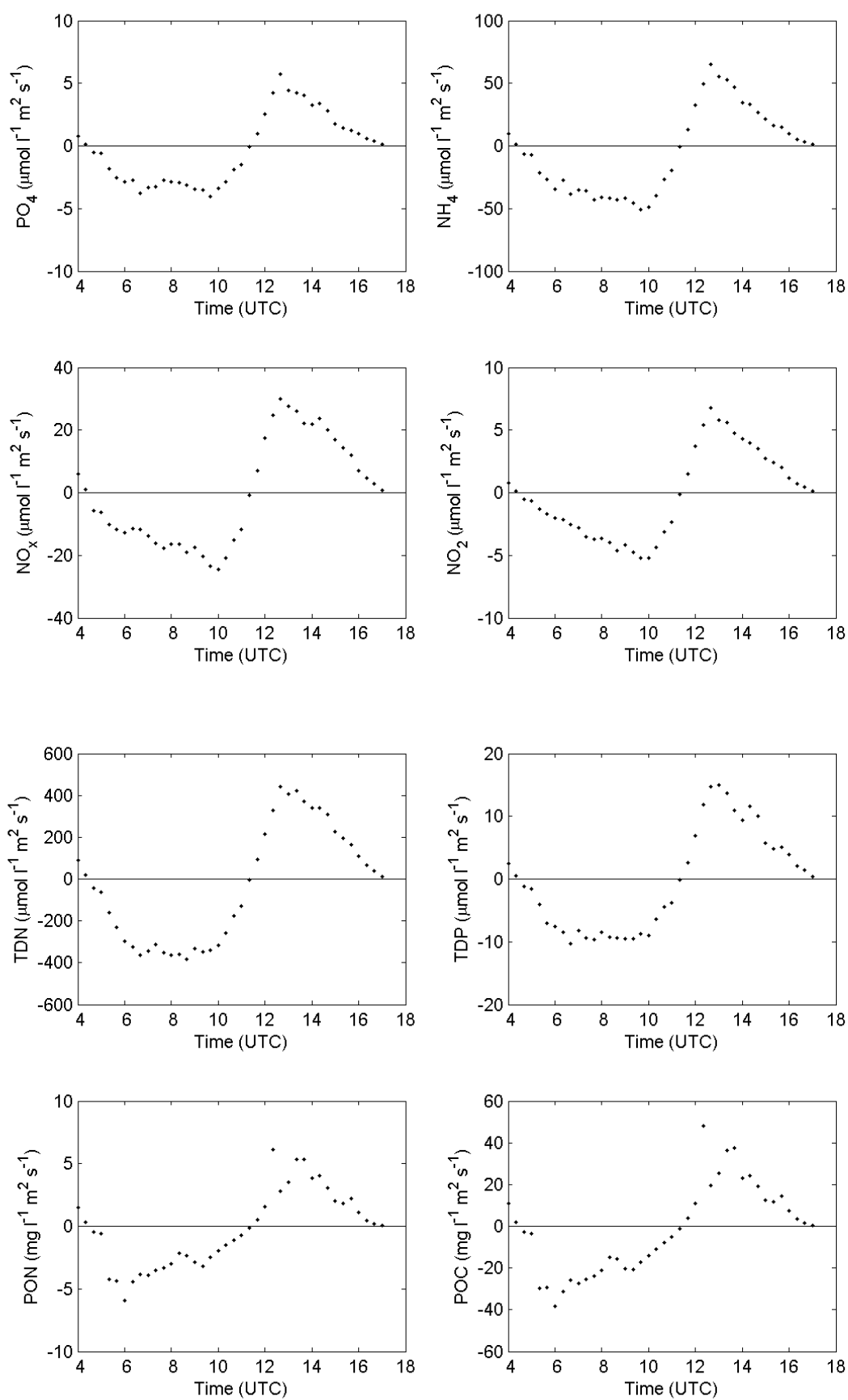
Figuur 23: Fluxen van fosfaat, ammonium, NO_x , nitriet, totaal opgelost stikstof, totaal opgelost fosfaat, particulier organisch stikstof en particulier organisch koolstof voor ankerstation as47.



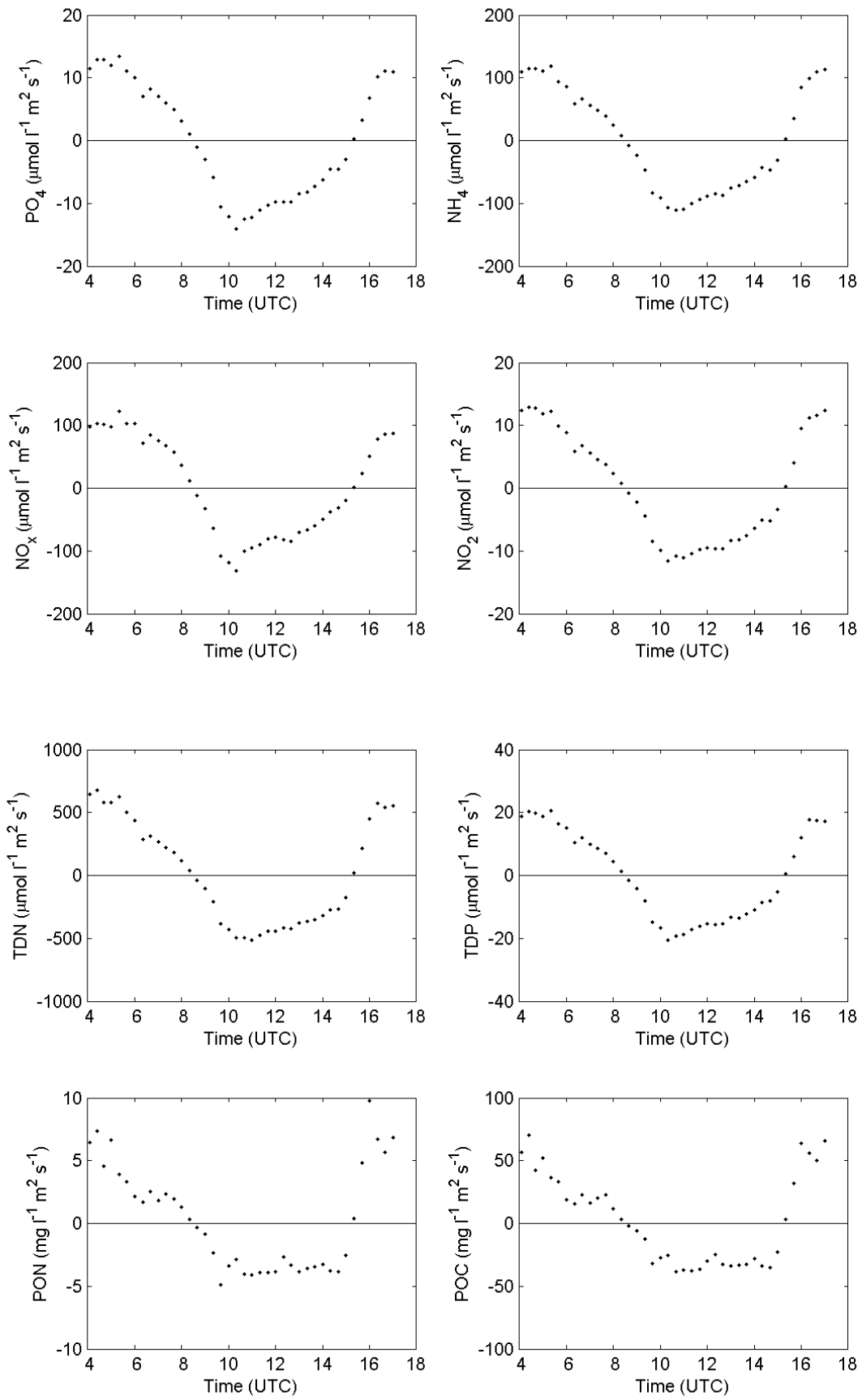
Figuur 24: Zelfde als Figuur 23, maar dan voor ankerstation as48.



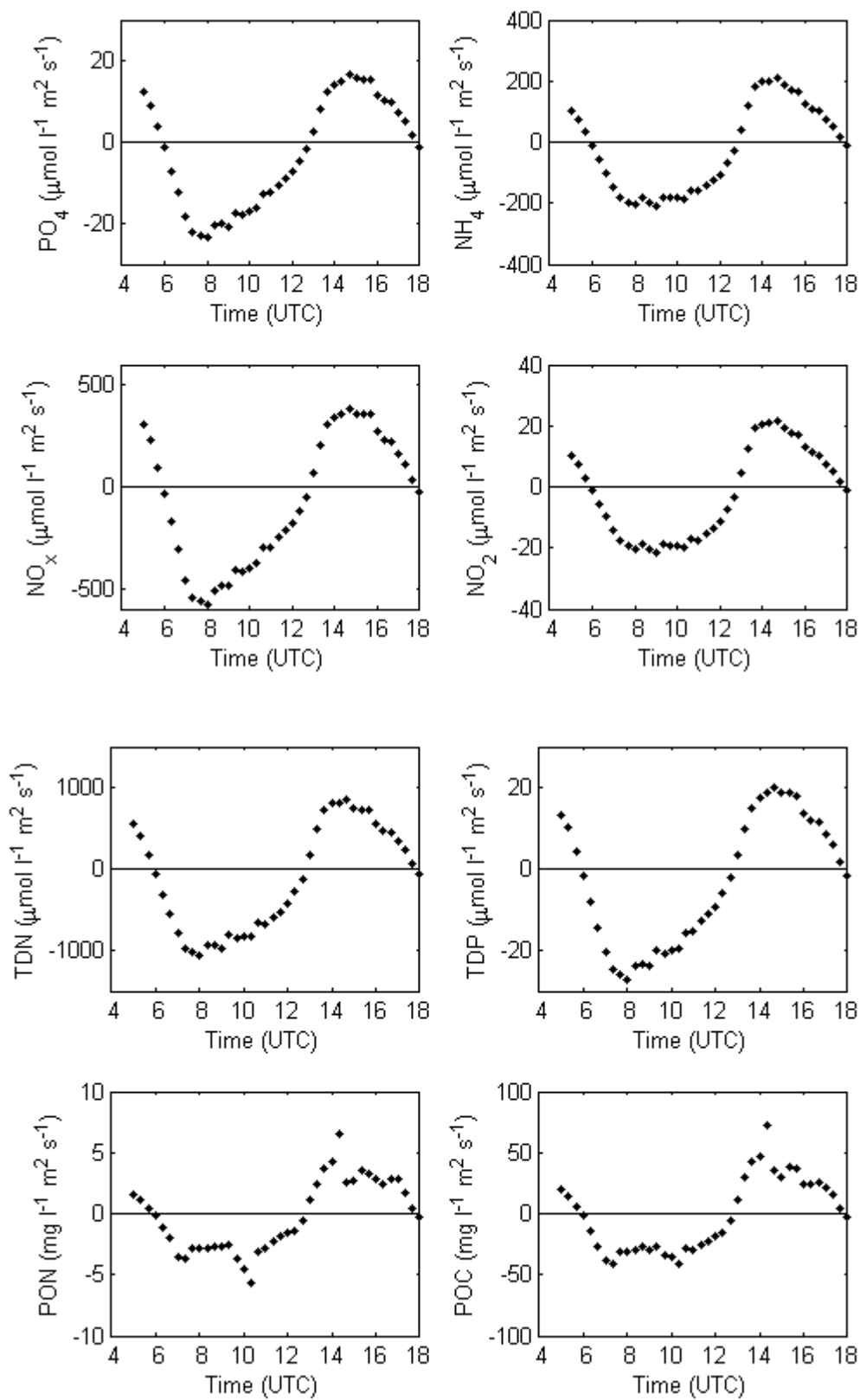
Figuur 25: Zelfde als Figuur 23, maar dan voor ankerstation as49.



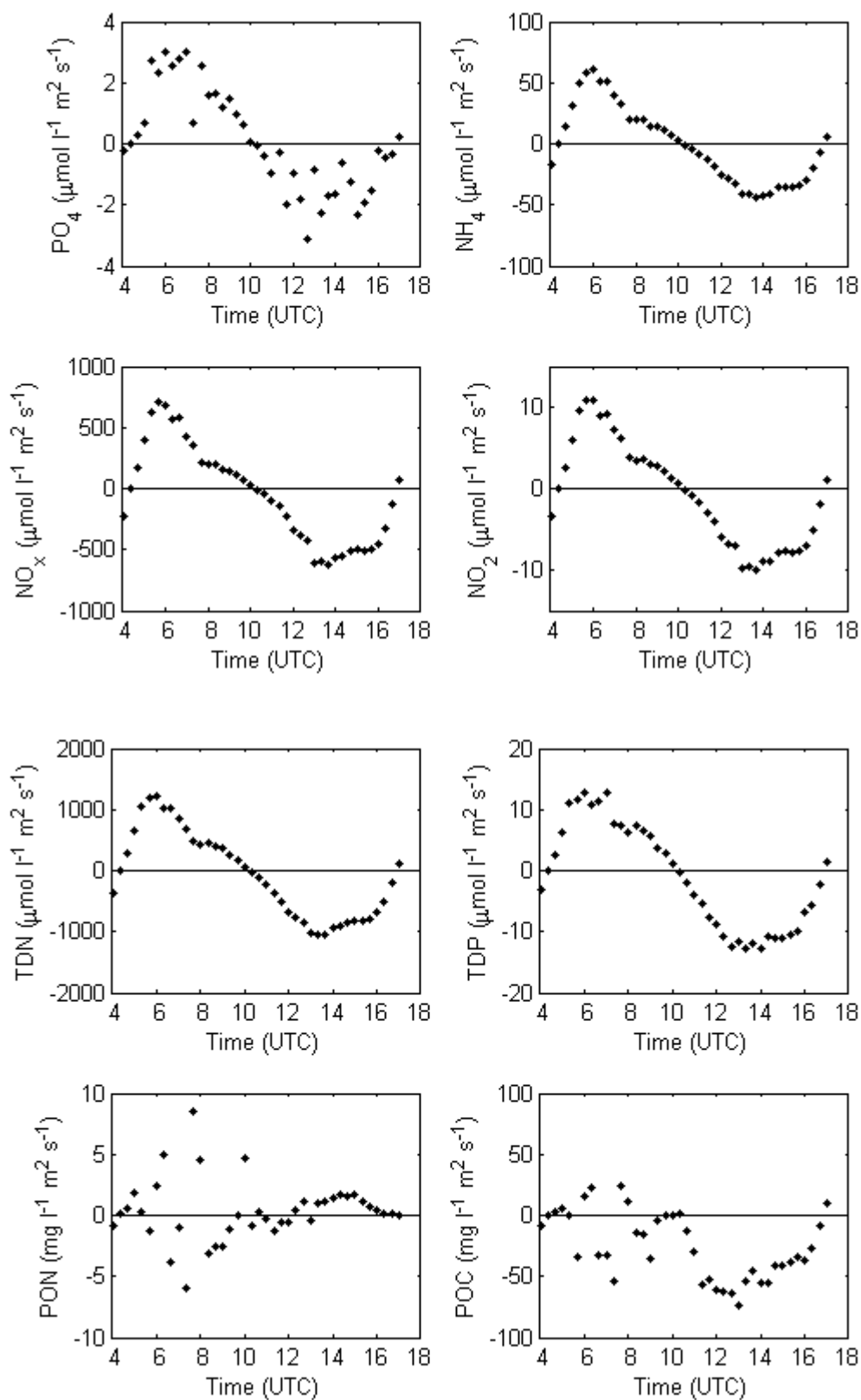
Figuur 26: Zelfde als Figuur 23, maar dan voor ankerstation as50.



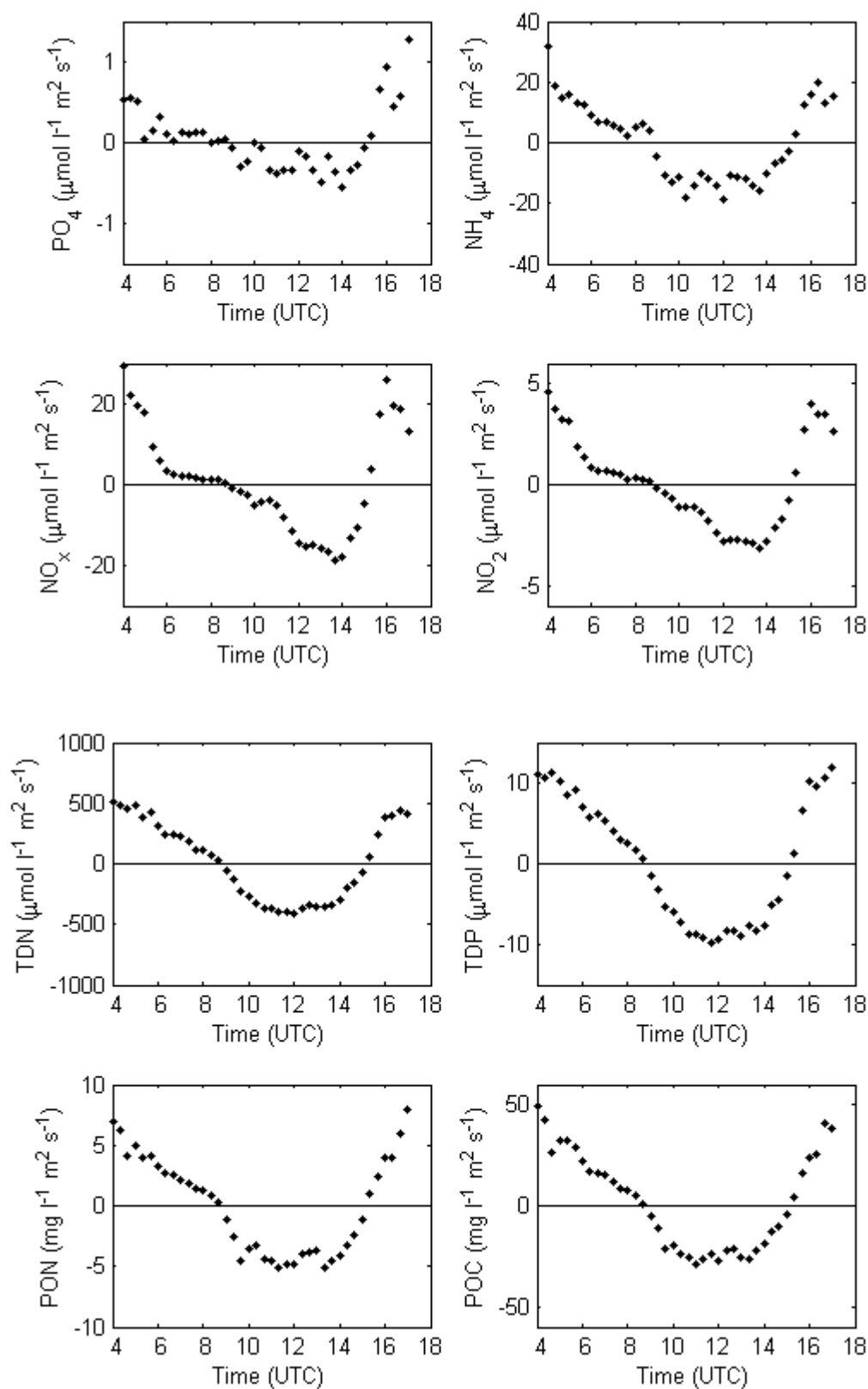
Figuur 27: Zelfde als Figuur 23, maar dan voor ankerstation as51.



Figuur 28: Zelfde als Figuur 23, maar dan voor ankerstation as52.



Figuur 29: Zelfde als Figuur 23, maar dan voor ankerstation as53.



Figuur 30: Zelfde als Figuur 23, maar dan voor ankerstation as54.