

Gedegen, innovatieve en verbindende monitoring
van het waddengebied

MEETPLAN FLUXEN VAN ZWEVEND SLIB

Theo Gerkema¹
Janine Nauw¹
Maximiliano Sassi²
Matias Duran-Matute³

¹ NIOZ-FYS
² RMS, London
³ TU Eindhoven

INHOUDSOPGAVE

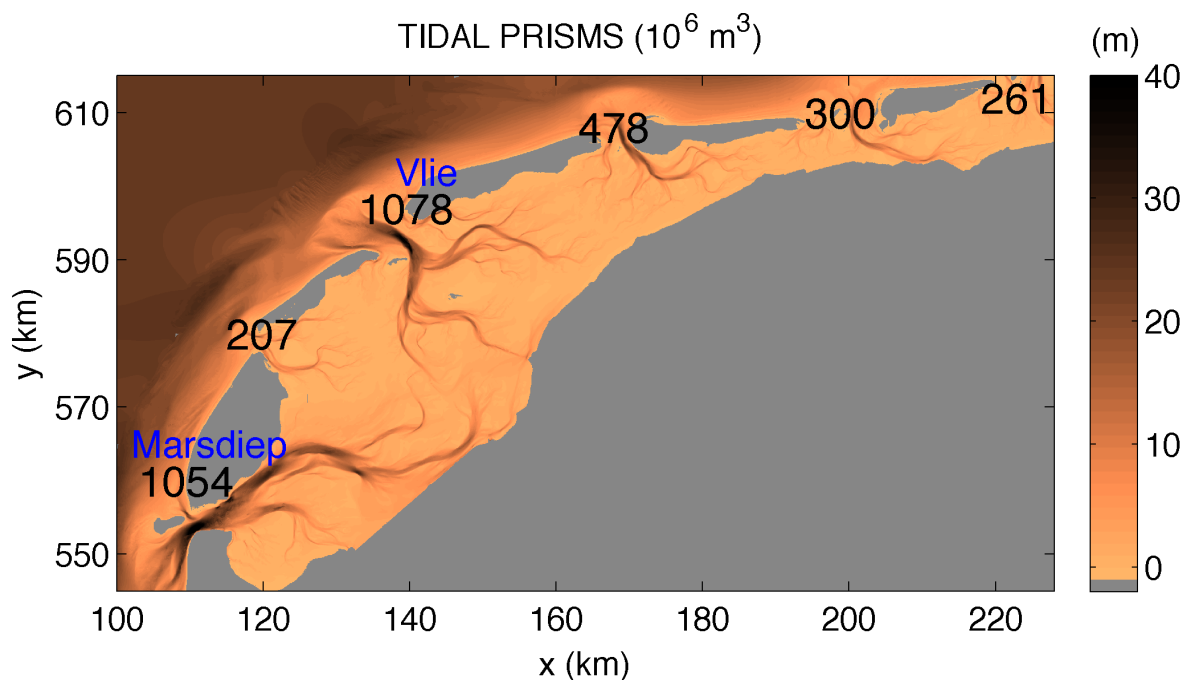
1	INLEIDING	3
2	RESULTATEN UIT HET PACE PROJECT	5
3	VOORBIJ SNAPSHOTS... ..	7
4	MEETPLAN.....	9
	4.1 Keuze van de locaties	9
	4.2 Vereiste diepte van de locaties	12
	4.3 Onderhoud van de Instrumenten	12
	4.4 Lander	12
	4.5 Instrumenten	13
	4.6 Uitwerking meetgegevens.....	14
5	DANKBETUIGING	15
6	REFERENTIES	16
7	AFKORTINGEN	17

1 INLEIDING

Kennis van de sedimenthuishouding van de Waddenzee vormt een oud 'probleem'; al een halve eeuw geleden beschreef Van Straaten hoe de balans bepaald wordt door processen op zeer uiteenlopende tijdschalen (Van Straaten, 1964, 1975), waarvan het uiteindelijke netto effect moeilijk te bepalen is. In dit meetplan beperken we ons tot gesuspendeerd sediment en sluiten het als over de bodem getransporteerde zand uit. Hierbij is het wel goed op te merken dat het tijdens het Holoceen verzamelde sediment in de Waddenzee voornamelijk bestaat uit zand (ongeveer 80%, tegenover 20% slib, Beets & Van der Spek, 2000), zodat het transport van fijn gesuspendeerd sediment slechts een deel bedraagt van het totale transport.

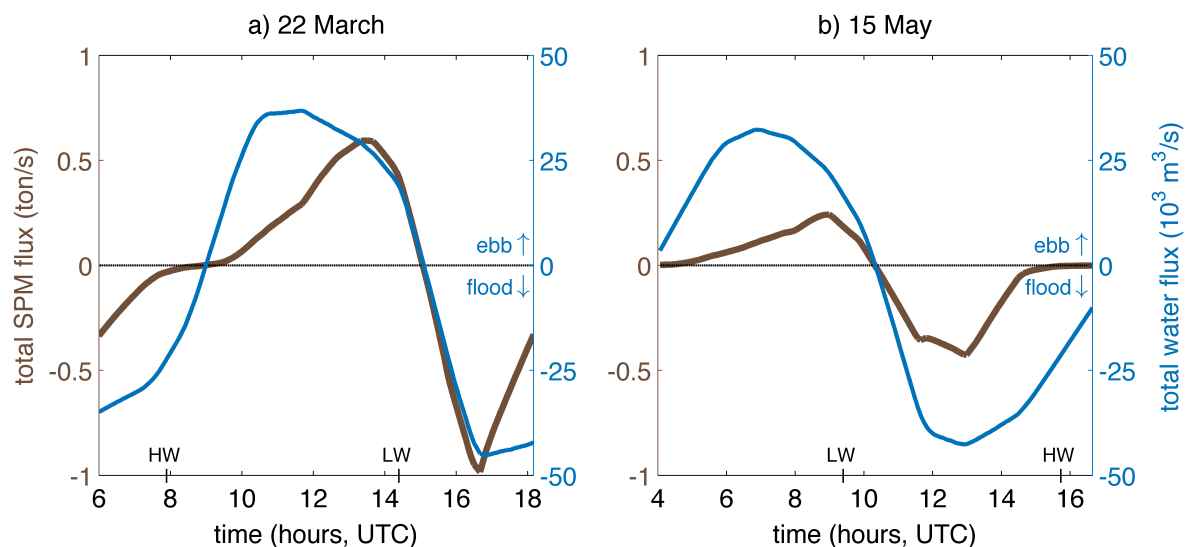
Allereerst worden binnen een getijcyclus grote hoeveelheden gesuspendeerd sediment door de zeegaten in- en uitgevoerd. Voor de hoofdgeul van het Vlie, bijvoorbeeld, gaat om een *bruto* hoeveelheid in de orde van 5 kiloton in beide fasen van het getij (dat wil zeggen import met vloed en export met eb); deze schatting is gebaseerd op twee “13h” meetcampagnes in het zeegat met R/V Navicula in 2012 (Gerkema et al., 2014). Op basis van de metingen aan boord van de TESO (Texels Eigen Stoomboot Onderneming) veerboot en schattingen van Suspended Particulate Matter (SPM) transport gebaseerd op backscatter uit Akoestische Doppler Stromings Profielmeters (ADCP), is geconcludeerd dat de transporten door het Marsdiep groter zijn dan die van het Vlie en komt de typische ordegrootte van het *netto* transport voor het Marsdiep op 10 kiloton per getij (Nauw et al., 2014).

In termen van getijprisma (de hoeveelheid water die uit- en ingevoerd wordt met eb en vloed) zijn het Marsdiep en het Vlie veruit de belangrijkste zeegaten (Figuur 1).



Figuur 1. Getijprisma van de zeegaten in het Nederlandse deel van de Waddenzee, waarden ontleend aan Tabel 2.1 van Louters & Gerritsen (1994).

Het netto effect van de uit- en invoer met eb en vloed is, zowel voor water zelf als voor het daarin gesuspendeerd sediment, zeer gering in verhouding tot de bruto hoeveelheden. In het geval van de eerder genoemde “13h” metingen in het Vlie, valt de netto hoeveelheid getransporteerde sediment zelfs binnen de meetfout, en is dus principieel onbepaald. Zelfs wanneer men deze grootte wel zou kunnen bepalen, zegt een enkele “13h” meting nog niets over de lange-termijn balans, gezien de variatie tussen getijcycli onderling, zoals al blijkt uit vergelijking van de twee “13h” metingen in het Vlie (**Figuur 2**). De meest plausibele verklaring is het verschil in windrichting en -kracht op de verschillende dagen.



Figuur 2. Resultaat van metingen in de hoofdgeul van het Vlie, in 2012 (Gerkema et al., 2014).

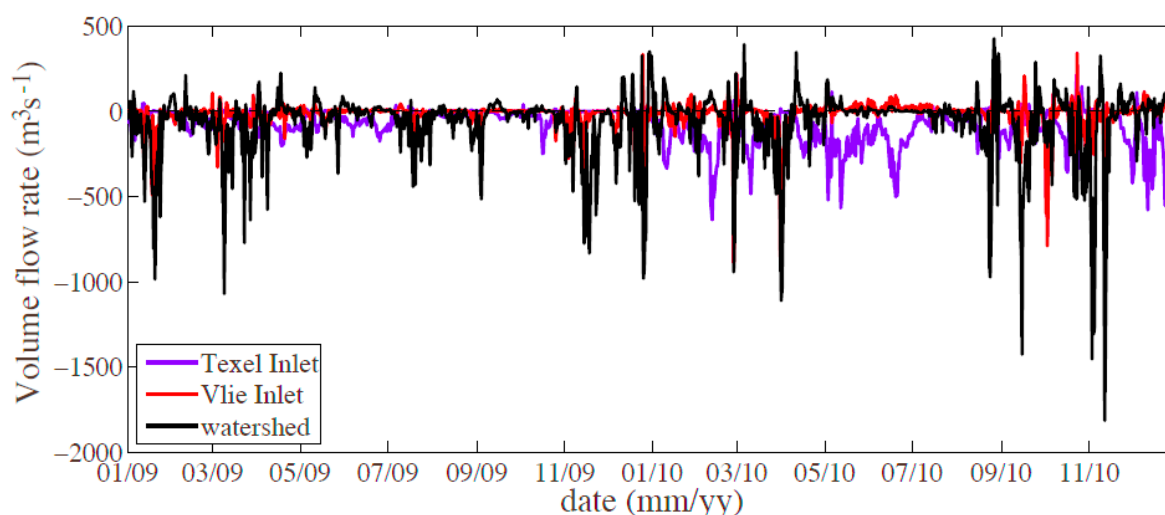
2 RESULTATEN UIT HET PACE PROJECT

In het bilaterale ZKO/BMBF 'PACE' project (een samenwerkingsproject tussen IOW, HZG, NIOZ en Deltares) is een modelopzet gemaakt voor de gehele Waddenzee met realistische forcering (getijden, windopzet, zoetwaterfluxen etc), voor de jaren 2009-2011 m.b.v. het General Estuarine Transport Model/ General Ocean Turbulence Model (GETM/GOTM). Hiermee is voor het eerst een synoptisch beeld verkregen van de transporten van zoetwater in de Waddenzee en met name de grote variabiliteit hierin. Ook zijn berekeningen voor transport van gesuspendeerd sediment uitgevoerd.

Het inzicht in de transporten van zoetwater en sediment in de Waddenzee is op twee punten ingrijpend gewijzigd door de uitkomsten van het PACE project.

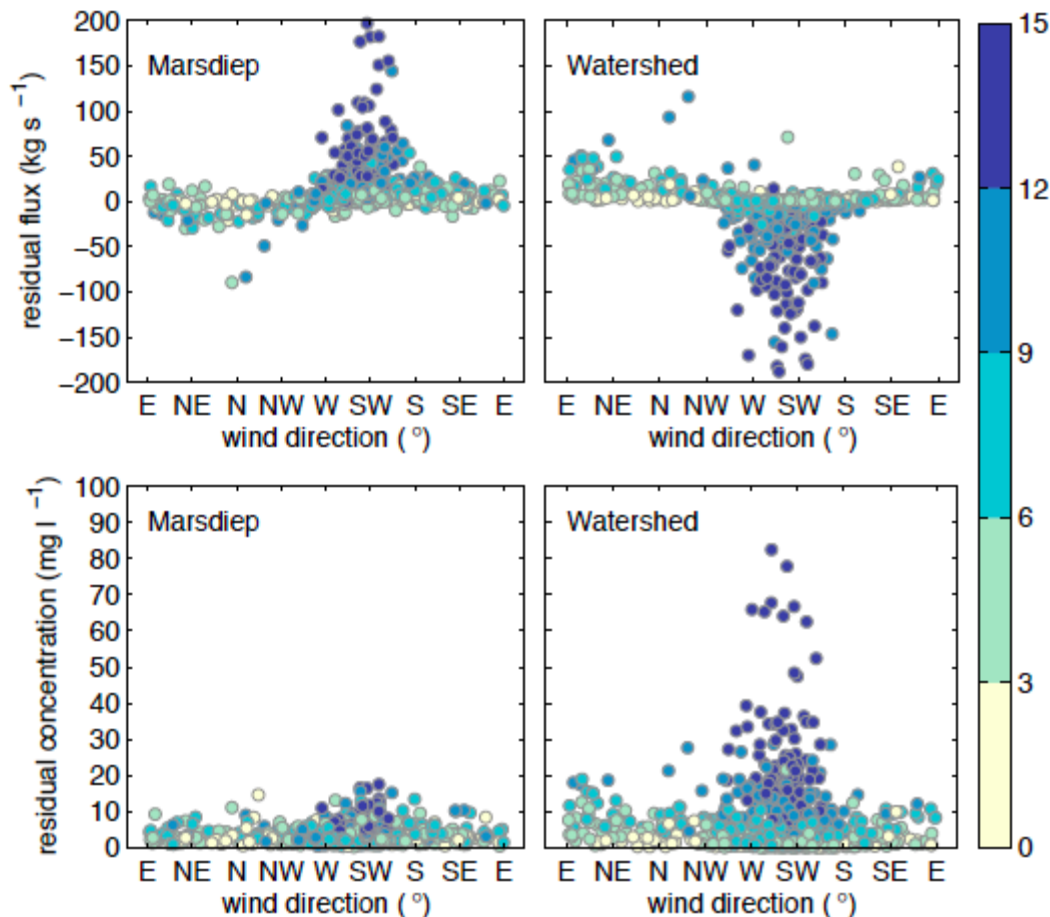
Ten eerste blijkt het belang van de 'grote' zeegaten (Marsdiep en Vlie) heel verschillend te zijn en blijkt de grootte van het getijprisma geenszins bepalend te zijn voor de netto transporten. Het Vlie blijkt een zeer geringe rol te spelen in de netto export van zoetwater uit de Waddenzee. Verrassend groot is daarentegen de rol van het wantij ten zuiden van Terschelling. Hoewel het getijprisma daar twee ordes van grootte kleiner is dan die van het Vlie, verlaat maar liefst 40% van het zoetwater uit de sluis van Kornwerderzand de westelijke Waddenzee via het wantij, tegenover een export van slechts 10% door het Vlie (Duran-Matute et al., 2014). Kwalitatief hetzelfde beeld komt naar voren uit berekeningen voor transport van gesuspendeerd sediment, hoewel de onzekerheden in de modellering hiervan groot zijn (Sassi et al., 2015).

Het tweede inzicht dat uit de modelresultaten naar voren komt is het sterk episodische karakter van de transporten. Met name op het wantij wordt het jaargemiddelde transport (van zoetwater of sediment) geheel bepaald door enkele events (zie extreme minima in de zwarte lijn in Figuur 3).



Figuur 3. Netto (dwz getij-geïntegreerde fluxen) van zoetwater afkomstig uit Kornwerderzand door het Marsdiep, Vlie en over het wantij bij Terschelling. Modelberekeningen voor de jaren 2009 en 2010 (Duran-Matute et al., 2014).

Hierbij is de respons zeer gevoelig voor de windrichting: de transporten zijn groot voor een krachtige wind uit bepaalde richtingen, maar vrijwel verwaarloosbaar voor andere windrichtingen. Dit vindt men voor (zoet)water transporten, maar ook voor de sediment flux (zie **Figuur 4**), waarbij een grote anti-korrelatie opvalt tussen het zoetwatertransport door het Marsdiep en het wantij bij Terschelling. Dat wil zeggen, wanneer het transport van zoet water door het Marsdiep hoog is, is het transport laag over het wantij en vice versa.



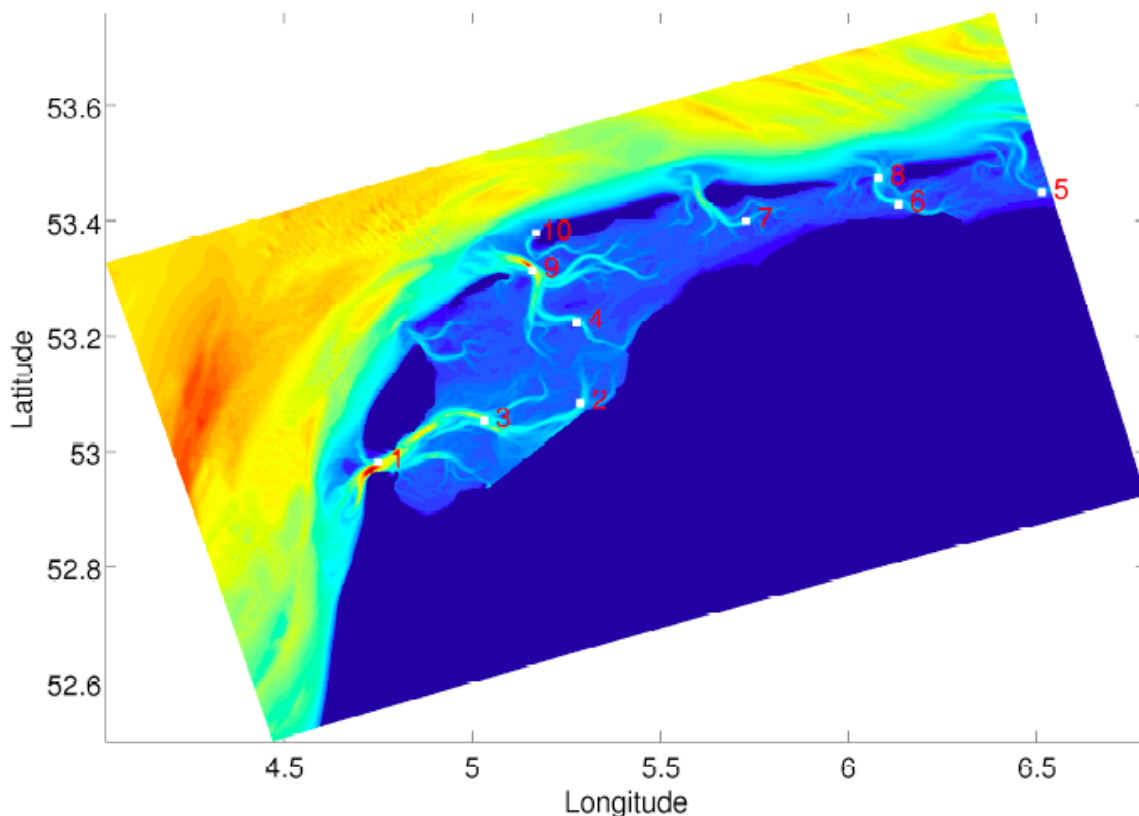
Figuur 4. Residueel transport van gesuspenseerd sediment (bovenste panels) voor het Marsdiep en het wantij bij Terschelling, afhankelijk van de windrichting en sterkte (de laatste in kleur, in m/s). De onderste panels geven de getijgemiddelde concentratie. Resultaten van modelberekeningen (Sassi et al., 2015).

De hoofdconclusie voor het monitoringprogramma is dus het belang van episodische transporten over het wantij, en daaruit volgend het belang van continue metingen. Meet men slechts incidenteel, dan zal men de episoden grotendeels missen, terwijl deze bepalend zijn voor het lange-termijn gemiddelde transport!

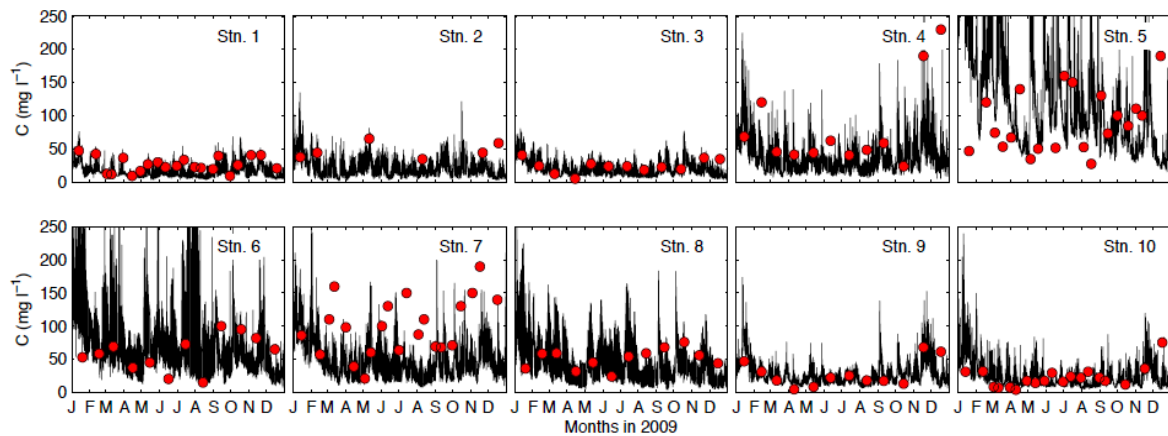
3 VOORBIJ SNAPSHOTS...

Concentraties van gesuspendeerd sediment worden op vaste locaties gemeten in het MWTL programma van Rijkswaterstaat. Het betreft oppervlakte monsters, die in de meeste gevallen ongeveer eens per twee weken of eens per maand genomen worden. Hoewel deze sampling ontoereikend is om de bovengenoemde events te omvatten, leveren ze toch enig inzicht in de temporele en ruimtelijke variabiliteit.

In het PACE project zijn data van tien stations gebruikt om het model te testen (**Figuur 5**). Hiervan bevinden stations 1-4 en 9-10 zich in de westelijke Waddenzee (Marsdiep/Vlie basins) en de overige (5-8) in de oostelijke Waddenzee. In dit deel bevinden zich relatief meer wadplaten, wat weerspiegeld wordt in hogere concentraties (**Figuur 6**).



Figuur 5. Locaties van MWTL meetlocaties gebruikt voor de vergelijking met modelwaarden (Sassi et al., 2015).



Figuur 6. Vergelijking MWTL meetwaarden (rode punten) met modelresultaten, voor concentraties in 2009 op de in Figuur 4 weergegeven locaties (Sassi et al., 2015).

Met name vallen de grote fluctuaties in de meetwaarden op stations 4 tot en met 8 op. Ook de modelwaarden fluctueren hier sterk. Bij dergelijke fluctuaties is het duidelijk dat snapshots ontoereikend zijn om een betrouwbare schatting te krijgen van de jaargemiddelde transporten.

4 MEETPLAN

4.1 Keuze van de locaties

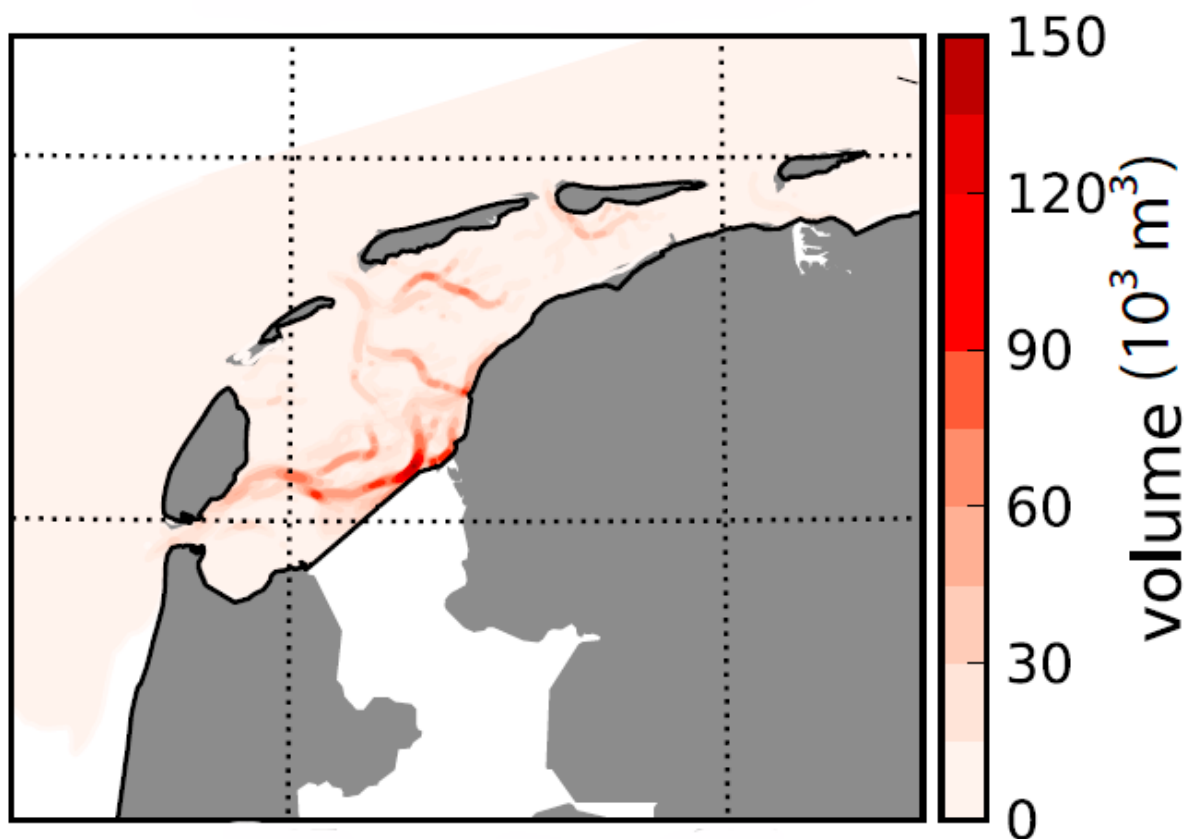
Het zeegat Marsdiep wordt al min-of-meer continu bemonsterd door de TESO-veerboot metingen. Uit de resultaten van het PACE project blijkt dat het Vlie, hoewel qua getijprisma even groot, van gering belang is voor netto transporten van zoetwater en sediment. Daarentegen blijkt het wantij bij Terschelling een belangrijke doorgangsroute te zijn tijdens zuidwestelijke stormen, waarbij hoge waterstanden en sterke noordoostwaartse transporten op kunnen treden. Meetgegevens zijn hier echter niet beschikbaar.

Prioriteit heeft het daarom om continue meetreeksen te verkrijgen op het wantij bij Terschelling, maar ook op wantijen bij Ameland en Schiermonnikoog. Hiermee kan de uitwisseling tussen de bekkens in kaart gebracht worden, wat ook een essentiële test vormt voor numerieke modellen.

Om praktische redenen (bereikbaarheid per schip) verdient het de voorkeur in de uiteinden van geulen richting wantij te meten. Hier vinden ook de transporten richting wantij (of er vanaf) plaats.

Of men aan de west- of oostzijde van een wantij meet is in principe om het even. Het is echter wel handiger de zijde te kiezen waar het geringste aantal geulen richting wantij gaan, omdat men dan met minder meetlocaties toe kan.

Voor het wantij bij Terschelling is de westelijke 'aanvliegroute' het handigste. Men kan dan volstaan met metingen in de uitloper van Oostmeep en het uiteinde van Kimstergat. De dominantie van deze geulen is ook duidelijk in modelberekeningen van zoetwatertransport (**Figuur 7**).

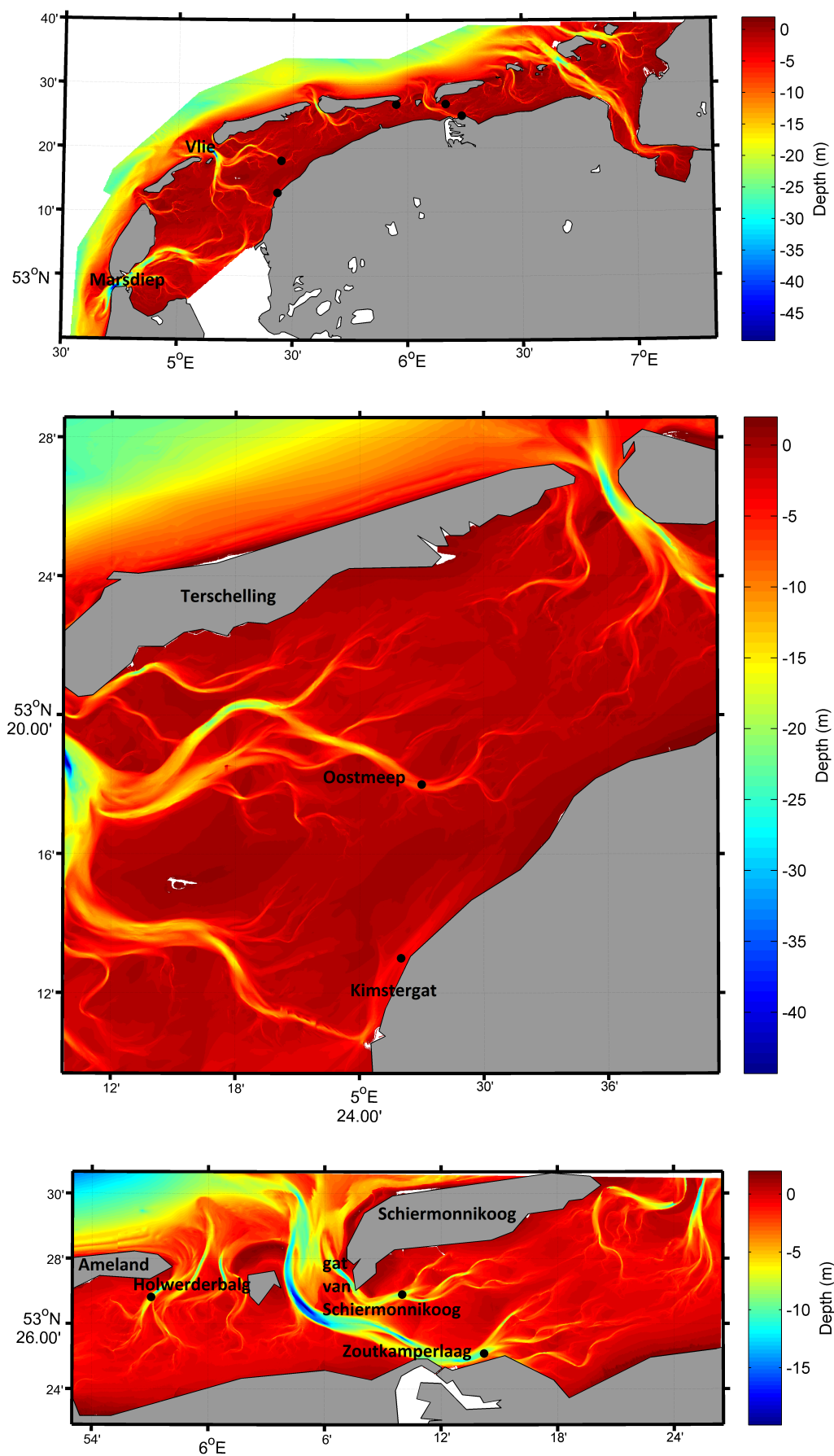


Figuur 7. Gemiddeld volume zoetwater per gridcel ($200 \times 200 \text{ m}^2$) volgens uit modelberekeningen van het zoetwatertransport vanuit de sluis van Kornwerderzand voor de maand april 2009 (Duran-Matute et al., 2014).

Voor het wantij bij Ameland is de oostzijde handiger. Hier mondt in hoofdzaak alleen de noordelijke geul (Holwerderbalg) uit op het wantij. De uitloper van deze geul ligt ongeveer halverwege het eiland en het vaste land.

Voor het wantij bij Schiermonnikoog ligt de westzijde meer voor de hand, namelijk de noordelijke uitloper van het gat van Schiermonnikoog en een zuidelijke uitloper van de Zoutkamperlaag.

In totaal kan men dus met een vijftal meetlocaties een goed beeld krijgen van de variabiliteit van de transporten over het wantij en zelfs van de totale transporten die plaatsvinden.



Figuur 8. Voorgestelde locaties in monitoring meetplan.

4.2 Vereiste diepte van de locaties

Het heeft niet veel zin op locaties te meten die zo ondiep zijn dat er slechts sporadisch transporten plaatsvinden. Voor locaties waar daarentegen altijd transporten plaatsvinden komen we op een vereiste diepte van 2.6 m (t.o.v. NAP). Deze waarde komt als volgt tot stand. De lander (een platform met meetinstrumenten op de bodem, zie ook 4.4) zelf is ongeveer 60 cm hoog. Volgens modelberekeningen in het kader van PACE is in de geulen rond het wantij bij Terschelling de getijgemiddelde waterstand bij krachtige oostenwind (13 m/s) ongeveer 70 cm beneden NAP (Duran-Matute et al., 2015). Extreme laagwaters (astronomisch getij) bij Harlingen zijn ongeveer 130 cm beneden NAP. Wind en getij combinerend, moeten we dus rekening houden met extreme laagwaters van 200 cm beneden NAP. De lander moet dus op een diepte van 260 cm onder NAP staan om ook in die situatie nog geheel ondergedompeld te zijn. De bereikbaarheid is voor schepen als de R/V Navicula (diepgang: 1.1 m) dan in de meeste omstandigheden (zelfs bij 'normale' laagwaters) geen probleem.

Een andere optie is om te accepteren dat er bij krachtige oostenwind niet gemeten wordt; in dat geval valt het wantij immers toch goeddeels droog en zullen er hoegenaamd geen transporten plaatsvinden. In dat geval kan men een ondiepere meetlocatie kiezen, 190 cm beneden NAP. Anderzijds kan het soms wenselijk zijn om een diepere locatie te kiezen, namelijk wanneer er op het ondieper deel van het geulsysteem veel vertakkingen plaatsvinden van de hoofdgeul.

4.3 Onderhoud van de Instrumenten

Regelmatig onderhoud is nodig om de instrumenten schoon te maken (d.w.z. aangroei te verwijderen), batterijen te vervangen en om de instrumenten uit te lezen. De ervaring (bijv. van een lander bij Egmond) leert dat het voldoende is ongeveer eens per maand te servicen.

Heeft men meerdere meetlocaties die bezocht moeten worden, dan is het handig een extra set instrumenten te hebben die schoon en met nieuwe batterijen zijn toegerust. Op de eerste locatie kunnen deze dan de oude instrumenten vervangen. Deze laatste kunnen vervolgens, terwijl men naar de volgende locatie vaart, worden schoongemaakt en voorzien van nieuwe batterijen. En zo voort. Hiermee kan een aanzienlijke tijdswinst worden geboekt. Het is belangrijk zich te realiseren dat man-uren en vaartijd uiteindelijk de grootste kostenpost zijn bij dit soort monitoring.

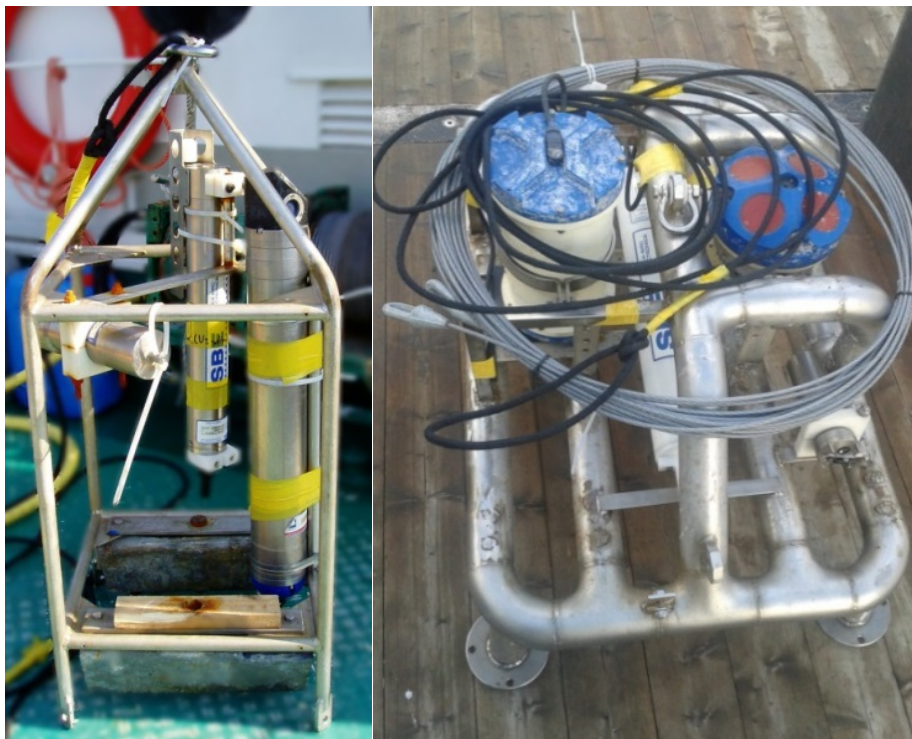
Tijdens servicing kunnen ook watermonsters worden genomen bij bodem en oppervlak om het sediment verder te analyseren op slibconcentratie, organisch gehalte en korrelgrootte verdeling.

4.4 Lander

Een lander van ongeveer 60 cm hoogte is voldoende om de benodigde instrumenten te plaatsen (zie hieronder). Omdat de stromingen in de geul, zeker bij extreme wind, sterk kunnen zijn, verdient het aanbeveling een paal door de lander 'uit te spuiten', teneinde omvallen te voorkomen. Verder heeft de lander een markeringsboei aan het oppervlak. Deze boei kan ook voorzien worden van

instrumenten, m.n. een ALEC om ook sedimentconcentraties bij het oppervlak te bepalen.

Voor de veiligheid van passerende schepen (en het behoud van de lander) is betonning rond de lander nodig, te plaatsen door Rijkswaterstaat.



Figuur 9. Voorbeelden van kleine landers; links met Aquadopp, ALEC and CTD; rechts met ADCP, SeaGauge en ALEC.

4.5 Instrumenten

Elke lander zou met de volgende instrumenten kunnen worden uitgerust.

- Nortek Aquadopp ADV (elke 10 minuten meten gedurende een burst interval van 2 minuten op 1Hz). Op één diepte (hoog op de lander).
- Akoestische Doppler Stromings Profielmeters (ADCP), 1000 of 1200 kHz, die om de 10 tot 15 minuten een ensemble gemiddeld profiel bepaald uit minimaal 10 verschillende profielen.
- Turbidity en fluorescentie met ALEC Compact CLWs, deze heeft een wisser en maakt zichzelf schoon. Turbiditeit en fluorescentie veranderen mogelijk sneller dan het getij, dus een kleiner meetinterval van 5 minuten is hier op zijn plaats.
- Optische sensoren, OBS (gekalibreerd in adhv in-situ bepaalde SPM en chlorofyl-A concentraties) met een meetinterval van 5 minuten.
- Temperatuur en saliniteitsmetingen met Seabird SM37 CTD, waarbij iedere 5 minuten een ensemble gemiddelde worden bepaald van tenminste 10 metingen.
- SeaGauge Druksensor (elk half uur burst van 5-min gemiddelde), t.b.v. metingen van de golfkarakteristieken.

De landers zelf worden aan de onderkant verzwaaard voor de stabiliteit. Verder worden ze voorzien van een drijver t.b.v. het oppikken. Eventueel kan ervoor gekozen worden om de drijver ook te voorzien van een ALEC of OBS, zodat naast SPM concentraties nabij de bodem ook gegevens zijn van de SPM concentraties nabij het oppervlak. Een lander die een ADCP bevat (zoals in Fig. 7 rechts) moet aan de onderkant voorzien worden van een kevlar kabel (geen rvs wegens corrosie!), die verbonden moet worden aan een gewicht. Dit gewicht kan dan van een oppikboei worden voorzien. Op deze manier voorkom je dat de lijn van de oppikboei interfereert met de akoestische beams van de ADCP.

4.6 Uitwerking meetgegevens

Met behulp van de OBSen en ALECs wordt de concentratie van SPM op verschillende hoogten bepaald. Met cubic-spline interpolatie kan dan een verticaal profiel worden verkregen. Voor de snelheid kan, uitgaande van de ADV (of ADCP) metingen, kan een logaritmisch profiel worden aangenomen. Door het product van beide te nemen, krijgt men het instantane transport elke 15 minuten. Dit geldt uiteraard alleen voor de positie van de lander. Met de aanname dat de dieptegemiddelde transporten (in de langsrichting) uniform zijn in de dwarsrichting, kan dan het transport door de geul worden geschat. Deze aanname kan getest worden tijdens servicing door profielen te nemen vanaf het onderzoeksschip op verschillende posities dwars op de geul.

5 DANKBETUIGING

We bedanken Eric Wagmaakers voor waardevolle discussies over de technische aspecten van het gebruik van de lander.

6 REFERENTIES

- Beets, D.J. & van der Spek, A.J.F., 2000. The Holocene evolution of the barrier and the backbarrier basins of Belgium and the Netherlands as a function of late Weichselian morphology, relative sea level rise and sediment supply. *Netherlands Journal of Geosciences* 79, 3-16.
- Duran-Matute, M., Gerkema, T., de Boer, G.J., Nauw, J.J., & Gräwe, U., 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Sci.* 10, 611–632.
- Duran-Matute, M., Gerkema, T. & Sassi, M.G., 2015. Anisotropic response to wind forcing of the residual circulation in a multiple-inlet system: the case of the western Dutch Wadden Sea. *J. Geophys. Res.*, submitted.
- Gerkema, T., Nauw, J.J. & van der Hout, C.M., 2014. Measurements on the transport of suspended particulate matter in the Vlie Inlet. *Netherlands Journal of Geosciences*, 93, 95-105.
- Louters, T. & Gerritsen, F., 1994. Het mysterie van de wadden: hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging. Rijkswaterstaat (Den Haag), Report RIKZ-94.040, 70 pagina's.
- Nauw, J.J., Merckelbach, L.M., Ridderinkhof, H. & van Aken, H.M., 2014. Long-term ferry-based observations of the suspended sediment fluxes through the Marsdiep inlet using acoustic Doppler current profilers, *J. Sea Res.* 87, 17–29.
- Sassi, M.G., Duran-Matute, M., van Kessel, T. & Gerkema, T., 2015. Variability of residual fluxes of suspended sediment in a multiple tidal-inlet system: the Dutch Wadden Sea. *Ocean Dyn.*, submitted. [Noot: deze publicatie is onder submittie en de hieruit ontleende figuren mogen niet gereproduceerd worden zonder voorafgaande toestemming van de auteur.]
- Van Straaten, L.M.J.U., 1964. De bodem der Waddenzee. In: *Het Waddenboek*, Abrahamse, J., Buwalda, J.D. & van Straaten, L.M.J.U., Eds., 1964. Thieme (Zutphen), 75-151.
- Van Straaten, L.M.J.U., 1975. De sedimenthuishouding in de Waddenzee. In: *Symposium Waddenonderzoek*, Swennen, C., de Wilde, P.A.W.J. & Haeck, J., Eds., 1975. Mededeling nr. 1 van de Werkgroep Waddengebied (Stichting-Veth, Arnhem), 5-20.

7 AFKORTINGEN

ADCP	Akoestische Doppler Stromings Profielmeter
ADV	Akoestische Doppler Stromingsmeter
ALEC	Merknaam
BMBF	Bunderministerium für Bildung und Forschung (Het Duitse federale Ministerie van Onderwijs en Onderzoek)
CLW	Chlorofyl/Turbiditeit/Temperatuur
CTD	Conductiviteit, Temperatuur, Diepte
GETM	General Estuarine Transport Model
GOTM	General Ocean Turbulence Model
HZG	Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung
IOW	Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde
NAP	Normaal Amsterdams Peil
NIOZ	Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee
OBS	Optische Terugkaatsing Sensor
PACE	Acronym van het proposal: “The future of the Wadden Sea sediment fluxes: still keeping pace with sea level rise?”
R/V	Research Vessel (Onderzoeksschip)
RMS	Risk Management Solutions
RVS	Roest Vrij Staal
SeaGauge	Waterhoogtemeter
SPM	Suspend Particulate Matter (fijn gesuspendeerd materiaal)
TESO	Texels Eigen Stoomboot Onderneming
TU	Technische Universiteit
ZKO	Zee en Kust Onderzoek