

Dispersiemechanismen in de Rijn-Maasmonding

**Verkenning van de verhouding tussen zout-
transportprocessen middels zoutfluxdecompositie**



Dispersiemechanismen in de Rijn- Maasmonding

**Verkenning van de verhouding tussen zout-
transportprocessen middels zoutfluxdecompositie**

Wouter Kranenburg
Theo van der Kaaij

Titel
 Dispersiemechanismen in de Rijn-Maasmonding

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	11203735-004	11203735-004-ZWS-0006	35




Trefwoorden
 Zoutindringing, Rijn-Maasmonding (RMM), dispersie

Samenvatting
 Zoutindringing via de Nieuwe Waterweg (NWW) vormt een bedreiging voor de zoetwaterbeschikbaarheid in de Rijn-Maasmonding. In een open verbinding met zee kan zout tot voorbij de horizontale getijslaglengte een delta-systeem binnendringen door de dichtheidsgedreven estuariene uitwisselingsstroming (*estuarine circulation*), maar daarnaast ook door getij-gerelateerde dispersiemechanismen (*tidal dispersion*) veroorzaakt door bijvoorbeeld havenbekkens en vertakkingen. In voorliggende studie wordt de verhouding tussen deze zout-dispersiemechanismen in de Rijn-Maasmonding verkend, met het oog op het identificeren van effectieve bronmaatregelen tegen verzilting.

Voor deze verkenning is gebruik gemaakt van zoutfluxdecompositie. Hierbij zijn 3D-modelresultaten voor saliniteit en stroming voor diverse locaties langs de NWW en Nieuwe Maas zodanig opgesplitst in componenten dat hiermee de zoutfluxbijdrage kon worden bepaald van de (getij-gemiddelde en diepte-gemiddelde) netto stroming, de (getij-gemiddelde, maar diepte-afhankelijke) uitwisselingsstroming, de (met het getij variërende, maar diepte-gemiddelde) getijstroming en de over het getij variërende verticale schering in de getijstroming.

In de analyse van de zoutfluxbijdrages is gevonden dat in de Nieuwe Waterweg de uitwisselingsstroming-gerelateerde fluxbijdrage het grootste deel van de tijd dominant is over de getij-gerelateerde fluxbijdrage. Verderop in de Nieuwe Maas is de bijdrage van de uitwisselingsstroming nagenoeg afwezig en is juist de getij-gerelateerde fluxbijdrage het grootste deel van de tijd dominant. Daarnaast is gevonden dat tijdens opzet-events de bijdrage van de uitwisselingsstroming ook in de Nieuwe Waterweg sterk afneemt en dat op die momenten het transport van zout de Rijn-Maasmonding in veroorzaakt wordt door een tijdelijke omkering van de netto stroming.

De belangrijkste implicaties van deze bevindingen zijn dat maatregelen die de verticale menging op de Nieuwe Waterweg weten te bevorderen, en daarmee de stratificatie en de sterkte van de uitwisselingsstroming zullen verminderen, zeer waarschijnlijk een groot deel van de tijd effectieve bronmaatregelen tegen verzilting zullen zijn. Dit soort maatregelen zal echter waarschijnlijk weinig tot geen invloed hebben op de inwaartse zoutflux tijdens opzet-events, of alleen indirect door invloed op zoutindringing voorafgaand aan het opzet-event. De voornaamste aanbeveling is daarom om preciezer te bepalen wat de kritische momenten voor zoutindringing zijn en welke fluxbijdragen bij die gelegenheden zorgen voor de hoge saliniteit.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	dec. 2019	Dr.ir. W.M. Kranenburg		Dr.ir. T. van Kessel		Dr.ir. A.G. Segeren	

Status
 definitief

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel	2
1.3	Aanpak	2
1.4	Leeswijzer	2
1.5	Organisatorische informatie	2
2	Methode	3
2.1	Theoretische kader	3
2.1.1	Zoutindringingsmechanismen	3
2.1.2	Zoutfluxdecompositie	4
2.2	Gebruikte gegevens	6
2.2.1	Interessegebied en observatiepunten	6
2.2.2	Opzet modelsimulaties	7
2.2.3	Gegevensbewerking	7
3	Omgevingscondities en systeemreactie	9
3.1	Externe forcering: rivierafvoer, getij, opzet	9
3.1.1	Rivierafvoer	9
3.1.2	Getij	9
3.1.3	Opzet	9
3.2	Systeemreactie: saliniteit	11
3.2.1	Saliniteit Brienoord	11
3.2.2	Intermezzo: van metingen naar modelresultaten	11
3.2.3	Saliniteitsdecompositie	13
3.2.4	Verloop dieptegemiddelde, getijgemiddelde saliniteit	13
3.2.5	Verloop getijgemiddelde stratificatie	16
3.3	Systeemreactie: stroming	16
3.3.1	Stromingsdecompositie	16
3.3.2	Verloop dieptegemiddelde, getijgemiddelde stroomsnelheid	16
3.3.3	Verloop getijgemiddelde schering (estuariene circulatiestroming)	16
4	Analyse zoutfluxen	19
4.1	Zoutfluxen als functie van tijd	19
4.1.1	Totale zoutflux	19
4.1.2	Zoutflux gerelateerd aan de uitwisselingsstroming	19
4.1.3	Zoutflux gerelateerd aan het getij	20
4.1.4	Zoutflux gerelateerd aan de netto stroming	20
4.2	Overzicht van zoutfluxen als functie van plaats en tijd	20
5	Discussie	27
5.1	Evaluatie methode	27
5.1.1	Gebruik OSR-model	27
5.1.2	Relatie fluxtermen en processen	27
5.1.3	Verwaarlozing laterale verschillen	28
5.1.4	Effectieve Dispersie	28
5.2	Mogelijke implicaties bevindingen	29

5.2.1	Implicaties voor maatregelen	29
5.2.2	Implicaties voor modelstudies	30
6	Conclusies en aanbevelingen	31
6.1	Conclusies	31
6.2	Aanbevelingen	31
7	Referenties	33
	Rapporten Deltares	33
	Artikelen en boeken	34
 Bijlage(n)		
A	Verificatie som van de zoutfluxcomponenten	35

1 Introductie

1.1 Achtergrond

Zoutindringing via de Nieuwe Waterweg (NWW) leidt regelmatig tot verhoging van de chlorideconcentraties in de Rijn-Maasmonding (RMM), waardoor zoetwaterbeschikbaarheid voor drinkwater en industrie wordt bedreigd. De mate van zoutindringing is afhankelijk van het getij, de afvoer op de rivieren, wind(opzet) en de geometrie van het systeem. Het is de verwachting dat zoutindringing in de RMM door veranderingen aan het systeem (bijvoorbeeld de verdieping van de NWW) en door klimaatverandering (in het bijzonder zeespiegelstijging en verandering van de rivierafvoeren) in de komende tijd verder zal toenemen. Met het oog daarop wordt onderzoek gedaan naar maatregelen tegen zoutindringing, zowel op korte als lange termijn. Eén type maatregelen richt zich op de bron van het zout, de instroom van zout via de NWW.

In een open verbinding met zee kan zout via diverse mechanismen een delta-systeem binnenkomen. Er kan bijvoorbeeld gelaagdheid en een estuariene uitwisselingsstroming (*estuarine exchange flow*) ontstaan door het dichtheidsverschil tussen zout en zoet water, vergelijkbaar met de uitwisselingsstroming bij een sluis op de zoet-zout scheiding (*lock exchange flow*), waardoor zout langs de bodem naar binnen kan dringen. Zout kan echter ook binnendringen door direct aan het getij-gerelateerde dispersiemechanismen, waarbij bijvoorbeeld zout water wordt opgeslagen in een havenbekken of afslaat naar een andere tak en niet meer in fase met de terugstroming uit het systeem uitstroomt.

De meeste onderzoeken van de laatste jaren naar verziltingbeperkende maatregelen aan de bron, zoals bellenpluimen (Friocourt et al., 2012, 2013a, 2013b), gaten in de langsdam tussen Nieuwe Waterweg en Hartelkanaal (Kranenburg et al., 2015c; Kranenburg en Groenenboom, 2016), bellenboten, pompschepen (Groenenboom en Veenstra, 2017; Groenenboom, 2018; Groenenboom en Kranenburg, 2018), en 'strategisch baggeren' (Van der Heijden, 2018; Groenenboom et al., 2019) richtten zich met name op het verminderen van zoutindringing door het bevorderen van verticale menging. Deze maatregelen grijpen dus in op de gelaagdheid, en de dispersiemechanismen gerelateerd aan de gelaagdheid en uitwisselingsstroming.

Het staat vast dat uitwisselingsstroming-gerelateerde dispersiemechanismen de dominante dispersiemechanismen zijn in een rechte goot met gelaagde stroming onder invloed van getij en rivierafvoer (gebaseerd op Richter, 1973). Dat betekent echter niet automatisch dat dat ook het geval is in de Rijn-Maasmonding, met de vele havenbekkens en vertakkingen en invloed van opzet. Om gericht effectieve bronmaatregelen te identificeren en te onderzoeken, is het van belang vast te stellen wat het dominante mechanisme is voor zoutindringing via de Nieuwe Waterweg onder kritische condities. Als vast gesteld kan worden dat gelaagdheid- en uitwisselingsstroming-gerelateerde dispersiemechanismen het belangrijkste zijn voor zoutindringing, is dat een ondersteuning voor voortgaand onderzoek naar bronmaatregelen ter vermindering van zoutindringing door bevordering van verticale menging. Mocht juist blijken dat andere mechanismen ook belangrijk zijn, of zelfs dominant, dan kan dat aanleiding zijn om (ook) in een andere richting te zoeken voor maatregelen om de zoutindringing in de Rijn-Maasmonding significant te verminderen.

1.2 Doel

Doel van dit project is om de verhouding te verkennen tussen zouttransport door uitwisselingsstroming-gerelateerde dispersiemechanismen en zouttransport door getij-gerelateerde dispersie-mechanismen bij zoutindringing in de Rijn-Maasmonding.

1.3 Aanpak

Voor deze verkenning naar de verhouding tussen dispersiemechanismen in de Rijn-Maasmonding wordt gebruik gemaakt van resultaten van simulaties met het Operationeel Stromingsmodel Rotterdam (OSR-model), uitgevoerd binnen eerdere projecten. Voor diverse observatiepunten in de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas wordt informatie uit de simulaties gehaald over verticale profielen van snelheid en saliniteit, en de ontwikkeling daarvan in de tijd. Uit deze informatie wordt de totale (getij-gemiddelde) zoutflux berekend. Met een methode vergelijkbaar met de decompositie toegepast in de 'zoutfluxontrafelaar' (Kranenburg et al., 2016a) wordt de totale zoutflux opgesplitst in afvoer-gerelateerde, uitwisselingsstroming-gerelateerde en getij-gerelateerde zoutfluxen. Dit geeft een beeld van de verhouding tussen de uitwisselingsstroming-gerelateerde en getij-gerelateerde dispersiemechanismen, en hoe deze varieert in ruimte en tijd onder invloed van veranderende rivierafvoer, getijamplitude en opzet op zee.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgezet: In hoofdstuk 2 wordt de in deze studie gebruikte methode verder toegelicht. Daarbij wordt dieper ingegaan op de mechanismen van zoutindringing, de aanpak van fluxdecompositie, en hoe dit kan helpen dominante processen te identificeren. Ook de herkomst van de in deze studie gebruikte (model)data wordt besproken. De (model)data zelf worden besproken in hoofdstuk 3, waarin voor de periode geselecteerd voor nadere analyse de omgevingscondities en de reactie van het systeem daarop in beeld worden gebracht. Dit betreft 'observaties' met betrekking tot de externe forceringen rivierafvoer, getij en windopzet en de systeemreactie in termen van saliniteit, stratificatie, estuariumlengte (lengte van het overgangsgebied van zout naar zoet), stroomsnelheden en stroomschering. Hoofdstuk 4 beschrijft de daadwerkelijke analyse van de zoutfluxen, waarbij de fluxanalyse eerst stap voor stap wordt uitgevoerd voor één locatie en vervolgens een ruimtelijke beeld van de resultaten wordt getoond. Hoofdstuk 5 evalueert de gebruikte methodiek en bediscussieert de mogelijke implicaties van de resultaten. De conclusies en aanbevelingen zijn samengevat in hoofdstuk 6.

1.5 Organisatorische informatie

Deze verkenning is uitgevoerd door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat (RWS-WVL) en maakt deel uit van KPP Verzilting 2019, onderdeel Rijn-Maasmonding.

2 Methode

De analyse zoals uitgevoerd in deze studie vertoont overeenkomsten met een analyse van dispersie in de North River, MA, USA, zoals uitgevoerd door W.M. Kranenburg tijdens postdoctoraal onderzoek aan het Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) (Kranenburg et al., to be published). In verband daarmee zijn delen van de methodebeschrijving in het Engels.

2.1 Theoretische kader

2.1.1 Zoutindringingsmechanismen

In een open verbinding met zee kan zout via diverse mechanismen een delta-systeem binnenkomen. Er kan bijvoorbeeld gelaagdheid en een estuariene uitwisselingsstroming (*estuarine exchange flow*) ontstaan door het dichtheidsverschil tussen zout en zoet water, vergelijkbaar met de uitwisselingsstroming bij een sluis op de zoet-zout scheiding (*lock exchange flow*), waardoor zout langs de bodem naar binnen kan dringen. Zout kan echter ook binnendringen door direct aan het getij-gerelateerde dispersiemechanismen, waarbij bijvoorbeeld zout water wordt opgeslagen in een havenbekken of afslaat naar een andere tak en niet meer in fase met de terugstroming uit het systeem uitstroomt.

Een bekend mechanisme van zoutindringing in oppervlaktewater met een open verbinding met zee is de dichtheidsgedreven uitwisselingsstroming (*gravitational circulation*) (Hansen and Rattray, 1965). Dit is een estuariene uitwisselingsstroming (*estuarine circulation*) die ontstaat door het dichtheidsverschil tussen zout en zoet water waardoor zout langs de bodem naar binnen kan dringen. Zout kan echter ook naar binnen dringen door mechanismen als *tidal trapping* (Okubo, 1973; Fischer et al., 1979; MacVean and Stacey, 2011) en *tidal pumping* (Fischer et al., 1979). *Tidal trapping* is tijdelijke 'opslag' van water in bijvoorbeeld havenbekkens en zijrivieren, *tidal pumping* gaat over netto stromingen door eb-vloed asymmetrie in de ruimtelijke structuur van de stroming door bijvoorbeeld bathymetrische verschillen. Deze beide mechanismen leiden doorgaans ook tot rivier-opwaarts zouttransport. De diverse mechanismen zijn beschreven en uit elkaar getrokken door onder andere Lerczak et al. (2006) en Ralston et al. (2010), waarbij de tidal trapping en tidal pumping mechanismen tot uiting komen in correlaties tussen de getijstroming en de saliniteitsvariatie. Zijn getijstroming en saliniteitsvariatie precies 90° uit fase, dan gaat er net zoveel zout naar binnen met de vloed als naar buiten met de eb en is de bijdrage van dit mechanisme aan de getijgemiddelde zoutflux nul. Naast deze inwaartse fluxen is er in een estuarium ook sprake van een uitwaartse flux ten gevolge van de rivierafvoer.

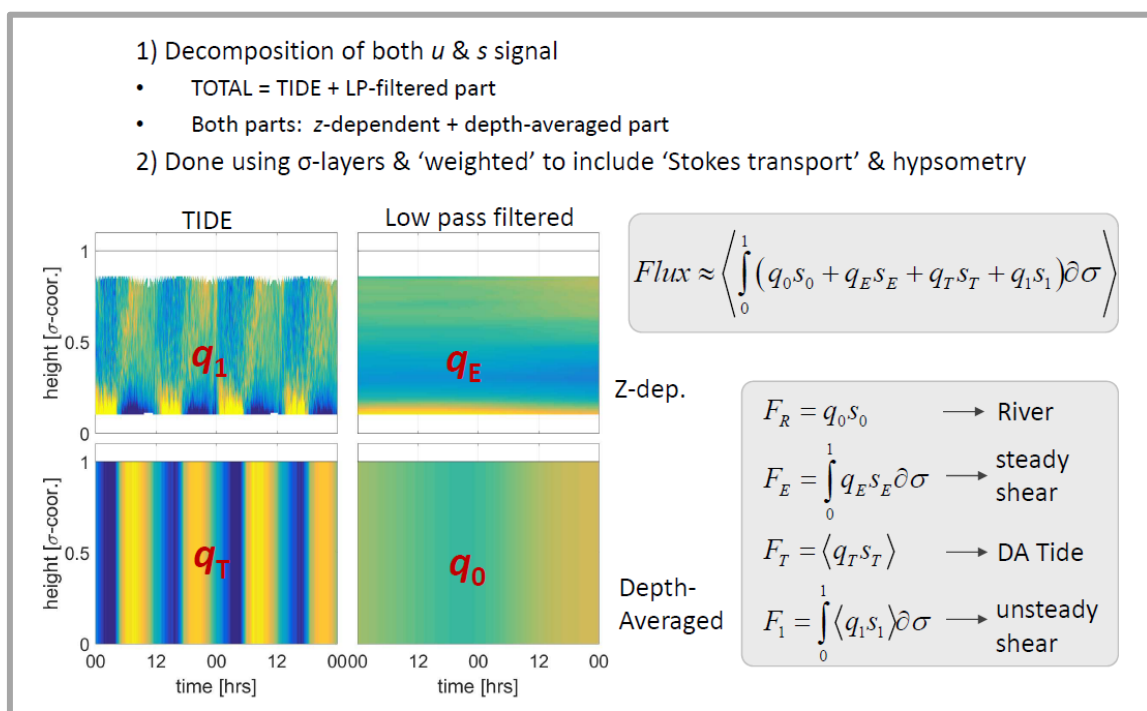
De ontwikkeling van de (getijgemiddelde) zoutindringing in een estuarium over de tijd is het resultaat van veranderingen in de balans tussen de diverse inwaartse en uitwaartse fluxen van zout. De mechanismen en bijbehorende fluxen zijn zich voortdurend aan het aanpassen aan veranderingen in de forcering. Dat betekent dat de balans tussen de bijdragen verandert en daarmee de toestand van het systeem, waardoor vervolgens de bijdragen weer veranderen en het systeem op zoek gaat naar een nieuw evenwicht. Zo leidt bijvoorbeeld een toename van de rivierafvoer tot een toename van de uitwaartse flux, waardoor de zoutindringing wordt teruggedrongen. Daarmee wordt als het ware de overgang van zout naar zoet in elkaar geduwd. Dit levert een versterking van de horizontale saliniteitsgradiënt, waardoor op zijn beurt de uitwisselingsstroming en ook de stratificatie wordt versterkt (Geyer and MacCready, 2014). Dit levert een vergroting van de inwaartse zoutflux. Op deze wijze ontstaat er een nieuwe

situatie, in dit geval één waarbij het gebied met de overgang van zout naar zoet meer zeewaarts komt te liggen, maar waarschijnlijk uiteindelijk wel langer zal worden.

Gebruik makend van kentallen en classificatie van estuaria in de literatuur (zie bijvoorbeeld Geyer and MacCready, 2014), kan de Nieuwe Waterweg worden geclassificeerd als een *partially-mixed* estuarium, dat wil zeggen een systeem dat soms gestratificeerd is en soms verticaal is doorgemengd, afhankelijk van de forceringscondities. Voor zo'n systeem kan – in het algemeen gesproken – de zoutindringingslengte sterk variëren over de tijd, en logischerwijs dus ook de verhouding tussen de verschillende zouttransportprocessen.

2.1.2 Zoutfluxdecompositie

Zoutfluxdecompositie is een methodiek om de totale zoutflux op te splitsen in verschillende componenten, op zo'n manier dat het daarmee mogelijk wordt de bijdrage van verschillende mechanismen te identificeren. Eerder heeft Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat een 'zoutfluxontrafelaar' ontwikkeld naar het voorbeeld van Lerczak et al. (2006). Daarbij is toen de totale zoutflux door een dwarsdoorsnede opgesplitst in 16 componenten, rekening houdend met verticale variaties, laterale variaties en tijdsvariaties (Kranenburg et al., 2016a, 2016b). Voor deze verkenning naar dispersiemechanismen in de Rijn-Maasmond met nadruk op de verhouding tussen uitwisselingsstroming-gerelateerde en getijstroming-gerelateerde fluxen in de Nieuwe Waterweg worden de laterale variaties buiten beschouwing gelaten en wordt gebruik gemaakt van een iets eenvoudigere decompositie in vier componenten.



Figuur 1: Samenvatting methodiek zoutfluxdecompositie zoals toegepast in deze studie.

De hier toegepaste decompositie werkt als volgt: allereerst worden zowel de resultaten voor saliniteit als die voor stroming opgesplitst in een getij-gemiddelde en een met het getij variërende component. Dat gebeurt door toepassing van een Low Pass Filter (hier is het Godin filter toegepast). Vervolgens worden beide componenten weer opgesplitst in een diepte gemiddelde component en een diepte-afhankelijk deel. De vier stromingscomponenten die zo ontstaan worden vermenigvuldigd met de vier bijbehorende saliniteitscomponenten. De

producten hiervan worden geïntegreerd over de diepte en gebruik makend van hetzelfde Low Pass Filter gemiddeld over de tijd. Hiermee ontstaan vier fluxcomponenten die (nagenoeg) samenvallen de fluxbijdrage van de (getij-gemiddelde en diepte-gemiddelde) netto stroming (F_0), de (getij-gemiddelde, maar diepte-afhankelijke) uitwisselingsstroming (F_E), de (met het getij variërende, maar diepte-gemiddelde) getijstroming (F_T) en de over het getij variërende verticale schering in de getijstroming (F_1). De methodiek is samengevat in onderstaande figuur en formules.

Bij toepassing van deze methodiek en interpretatie van de resultaten gelden een aantal aandachtspunten:

- De analyse wordt uitgevoerd gebruikmakend van σ -coördinaten
- De stromingsdecompositie wordt toegepast via de volumeflux per σ -laag (en niet direct op de stroomsnelheid zelf)
- Op deze wijze wordt rekening gehouden met de invloed van correlaties tussen de stroomsnelheid en de waterstand. Deze correlatie levert 'Stokes transport', wat nog wordt versterkt door de hypsometrie (vloed heeft een zekere mate van correlatie met hogere waterstanden en grotere breedtes. Het correct meenemen van dat laatste bleek essentieel om tot goede resultaten te komen).
- Stokes drift en compensatie daarvan komen terecht in de low-pass filtered stromingsbijdragen. Daarmee zijn de 'netto stroming' en de bijdrage daarvan aan de zoutflux niet exact gelijk aan de (bijdrage) van de rivierafvoer.
- Met de vermenigvuldiging van bij elkaar behorende componenten (en daaropvolgende tijds- en dieptemiddeling) worden bijdrages van kruisproducten dus niet meegenomen. Dat is terecht, want deze zullen zeer klein zijn. Er zijn echter situaties waarin ze niet precies nul zullen zijn (bijvoorbeeld bij grote verandering van 'getijgemiddelde' snelheid of saliniteit). In dat geval is de som van de fluxbijdragen niet exact gelijk aan de totale flux.
- Dit kan worden gecontroleerd door de som van de afzonderlijke fluxcomponenten te vergelijken met de totale flux berekend via vermenigvuldiging van het onontbonden saliniteits- en stromingssignaal gevolgd door diepte- en getijmiddeling. Deze controle is in deze studie ook toegepast en wordt besproken en getoond in paragraaf 4.1.1 en Bijlage A.

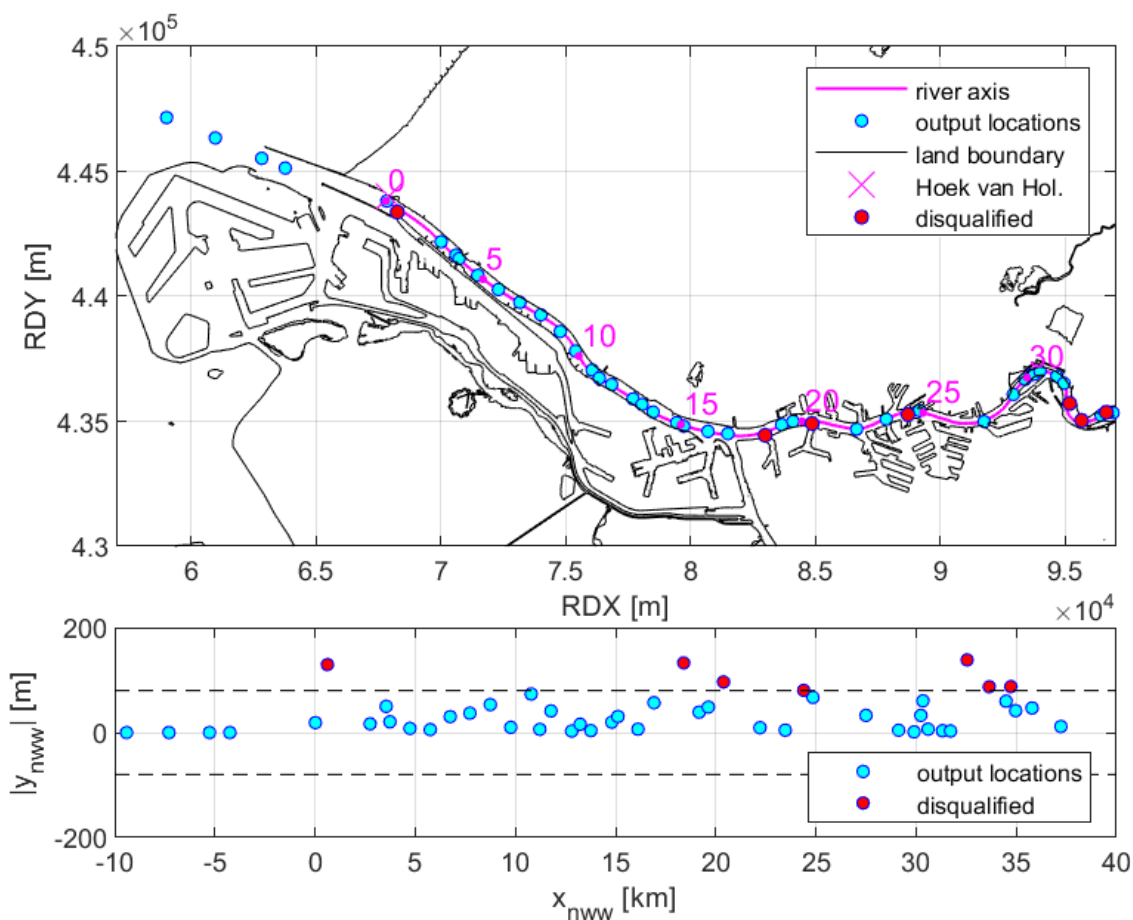
In deze studie wordt de decompositie toegepast voor een reeks locaties in de Rijn-Maasmonding. Door de middeling over diepte en getij zijn de vier fluxcomponenten per locatie slechts een functie van de tijd (variërend op een tijdschaal langer dan het getij), en kunnen ze elk voor het hele systeem worden weergegeven als functie van de tijd en van de afstand vanaf de monding. Om voor de analyse ook het onderliggende gedrag van saliniteits- en stromingscomponenten voor meerdere locaties en een langere periode overzichtelijk in kaart te kunnen brengen, is het nodig de vier componenten elk ook weer te kunnen geven met een enkele diepte-onafhankelijke en getijgemiddelde parameter, als functie van de locatie en langzaam variërend in de tijd. Dit is eenvoudig voor de dieptegemiddelde en getijgemiddelde saliniteit of stroming, die verder zonder bewerking weergegeven kan worden als functie van plaats en tijd. De getijgemiddelde stratificatie en getijgemiddelde uitwisselingsstroming kan op die manier weergegeven worden door gebruik te maken van bijvoorbeeld het (saliniteits- of snelheids)verschil tussen oppervlakte en bodem of – meer wetenschappelijk verantwoord – de variantie (*variance*) of de Potential Energy Anomaly (de energie die nodig is om een verticaal profiel volledig door te mengen). Voor de dieptegemiddelde maar getij-afhankelijke (saliniteits- en stromings-)fluctuatie kan een langzaam in de tijd fluctuerende amplitude worden gebruikt. Voor de variatie in de stratificatie en schering binnen het getij moet dan ook een amplitude worden gedefinieerd, zoals bijvoorbeeld de amplitude van de variatie van de Potential Energy

Anomaly over het getij. In de analyse zal voor een aantal saliniteits- en stromingscomponenten het verloop in ruimte en tijd met behulp van bovenstaande bestudeerd worden.

2.2 Gebruikte gegevens

2.2.1 Interessegebied en observatiepunten

Zout water kan de Rijn-Maasmonding binnendringen via de Nieuwe Waterweg. Bij kritische condities voor verzilting raken ook de Nieuwe Maas en Oude Maas in meer of mindere mate verzilt, en kan het zout ook de Hollandsche IJssel en het Spui bereiken. In deze studie naar dispersiemechanismen met het oog op *bronmaatregelen* richten we ons in het bijzonder op de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas. Hierbij wordt gebruik gemaakt van, reeds uit een eerder project beschikbare, 3D modelresultaten voor stroomsnelheden en saliniteit in de RMM. Deze resultaten zijn afkomstig van de referentiesom in de studie “Verkenning naar het effect van verondieping van de Oude Maas op zoutindringing in de RMM” (Huismans, 2019). Voor deze som is destijds – reeds met het oog op een studie als deze – een aantal uitvoerlocaties (‘observatiepunten’) aan het model toegevoegd. Voor de toegevoegde en reeds aanwezige uitvoerlocaties is informatie aanwezig waarmee de fluxdecompositie kan worden opgezet. De relevante locaties zijn weergegeven in onderstaande figuur, samen met hun projectie op de rivieras ($x_{nww} = 0$ km bij Hoek van Holland).



Figuur 2: Kaart van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas met rivieras en modeluitvoerlocaties. De lichtblauwe uitvoerlocaties zijn gebruikt in de analyse, de paarse zijn buiten beschouwing gelaten (te ver verwijderd van rivieras om als representatief voor een crossectie te worden beschouwd).

2.2.2 Opzet modelsimulaties

De modelsimulatie waaruit de gebruikte informatie over stroming en saliniteit afkomstig is, is een berekening met het Operationeel Stromingsmodel Rotterdam (OSR-model). Het OSR-model is een 3D stromingsmodel van de Rijn-Maasmonding genest in een 2D stromingsmodel van een groter gebied. Het 2D model wordt geforceerd met rivierdebieten bij Tiel, Lith en Hagestein, en informatie over getij op de Noordzee. Opzet door wind wordt in het model betrokken door data-assimilatie aan de hand van waterstandsmetingen in een aantal locaties aan/voor de Nederlandse kust. Hierbij wordt de forcering van het 2D model aangepast waardoor niet alleen meer de getij-invloed, maar ook de wind-invloed in de forcering wordt meegenomen. Bij de nesting wordt informatie over waterstanden, stroming en saliniteit uit het 2D model overgedragen aan het 3D model, waarna het 3D model stroming en saliniteit, inclusief verticale schering en stratificatie, uitrekent voor het binnengebied. De prestaties van het OSR-model bij de voorspelling van saliniteit en gelaagdheid zijn niet perfect; zo heeft het model (net als overigens veel andere 3D modelsystemen en modelschematisaties) de neiging stratificatie enigszins te onderschatten. Maar het model is momenteel het beste beschikbare 3D model van de Rijn-Maasmonding. Zie voor een evaluatie van het OSR-model voor zoutindringing Kranenburg (2015a, 2015b) en Kranenburg en Schueder (2016).

De simulatie waaruit de gebruikte informatie afkomstig is¹, is een simulatie voor de periode 11 augustus tot 11 november 2003. In deze periode is tot ongeveer 8 oktober de Rijnafvoer bij Lobith onder of nabij de 1000 m³/s, volgt rond 15 oktober een afvoerpiek van ongeveer 1800 m³/s, en daalt de afvoer daarna weer naar ongeveer 1200 m³/s. De omstandigheden tijdens de testperiode worden nader besproken in hoofdstuk 3.

2.2.3 Gegevensbewerking

Om de fluxdecompositie toe te kunnen passen op de gegevens uit de modelsimulatie zijn de volgende stappen uitgevoerd:

- Projectie van de uitvoerlocaties op de rivieras. Hiermee wordt aan elke locatie een afstand ten opzichte van Hoek van Holland toegekend, waardoor het mogelijk wordt langsdorsneden te genereren en horizontale gradiënten te bepalen.
- Selectie van uitvoerlocaties te gebruiken voor analyse. Uitvoerlocaties die te ver van de rivieras liggen (maar bijvoorbeeld juist in een haveningang), worden niet meegenomen in de visualisaties en analyse, zie Figuur 2.
- Omzetten van de stroomsnelheden van snelheden in oostelijke en noordelijke richting naar snelheden in primaire en secundaire stroomrichting, met de lokale richting van de rivieras als benadering voor de primaire stromingsrichting (verbeteroptie: primaire stromingsrichting bepalen vanuit de stromingsinformatie zelf).
- Interpolaties / extrapolaties: ten behoeve van visualisaties naast snelheden en saliniteit in het centrum van roostercellen ook snelheid en saliniteit op boven- en onderranden bepalen.

Low-pass filtering. Hiermee wordt onderscheid aangebracht tussen getijafhankelijke en getijgemiddelde stroming en saliniteit. Resultaten zijn bestudeerd voor verschillende wijzen van filtering. De meeste getoonde resultaten zijn verkregen met behulp van het Godin filter (Godin, 1972; Walters and Heston, 1981). Voor waterstanden is om onderscheid aan te brengen tussen getij en windopzet ook gebruik gemaakt van uitgebreide harmonische analyse middels 'ttide'-programmatuur.

¹ Referentiesom uit Huismans (2019), terug te vinden bij Deltares op: p:\11202241-verzilting2018\009_VerondiepingOMS\04_Model\04_NSC_Fijn_2018\berekeningen\NSCf001\

3 Omgevingscondities en systeemreactie

3.1 Externe forcering: rivierafvoer, getij, opzet

3.1.1 Rivierafvoer

Figuur 3 toont in het bovenste panel de gemeten rivierafvoer in de periode augustus – december 2003. Hieraan is te zien dat vanaf 11 augustus (start modeluitvoer) tot ongeveer 8 oktober de Rijnafvoer bij Lobith onder of nabij de 1000 m³/s is. Deze periode wordt gevolgd door een afvoerpiek van ongeveer 1800 m³/s rond 15 oktober. Daarna is de afvoer tot 11 november (einde modeluitvoer) ongeveer 1200 m³/s. Merk op dat het debiet bij Lobith niet gelijk is aan het debiet dat daadwerkelijk door de Nieuwe Waterweg wordt afgevoerd: naast Rijnwater wordt ook Maaswater afgevoerd via de Nieuwe Waterweg. Daarnaast worden bij hogere Rijnafvoeren de Haringvlietsluizen geopend (beginnend met een enkele sluis op een kleine kier vanaf $Q_{\text{Lobith}} = 1110 \text{ m}^3/\text{s}$, en twee sluisdeuren vanaf $Q_{\text{Lobith}} = 1790 \text{ m}^3/\text{s}$), waardoor een gedeelte via het Haringvliet wordt afgevoerd.

Een rivierafvoer bij Lobith van minder dan 1200 m³/s wordt bestempeld als laag en minder dan 1000 m³/s als zeer laag. In het bijzonder wanneer dit optreedt in combinatie met opzet op zee kan onder deze omstandigheden zout ver de Rijn-Maasmonding binnendringen

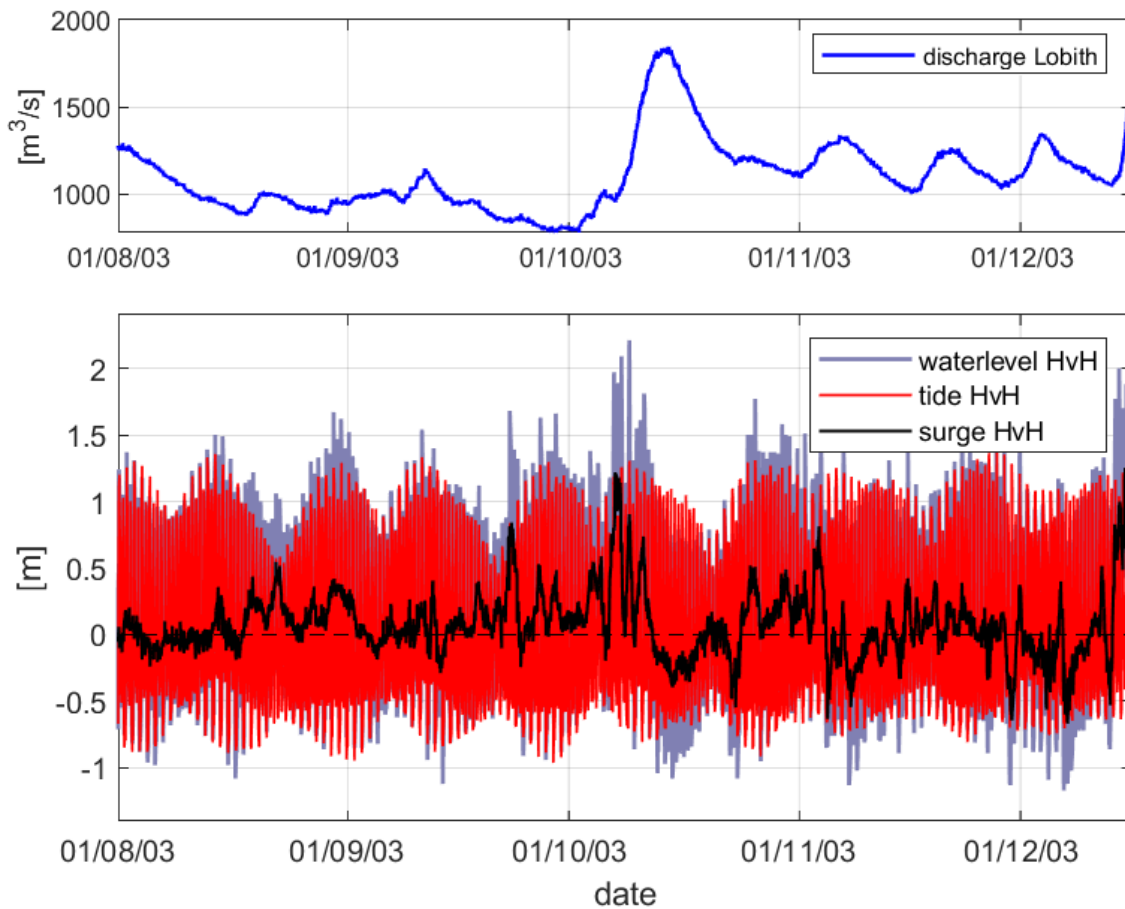
3.1.2 Getij

Figuur 3 toont ook de waterstanden bij Hoek van Holland, en de uitsplitsing daarvan in getijgedreven en windgedreven waterstandsuitwijking, verkregen via harmonische analyse. In de getijgerelateerde waterstand is duidelijk de springtij – doottij cyclus, met een periode van 14 dagen, terug te vinden. Het verschil tussen maximale en minimale waterstand tijdens springtij kan oplopen tot zo'n 2.2 m. Tijdens doottij is dit soms maar 1.0 m. Verder valt op dat achtereenvolgende hoogwaters (en laagwaters) sterk kunnen verschillen.

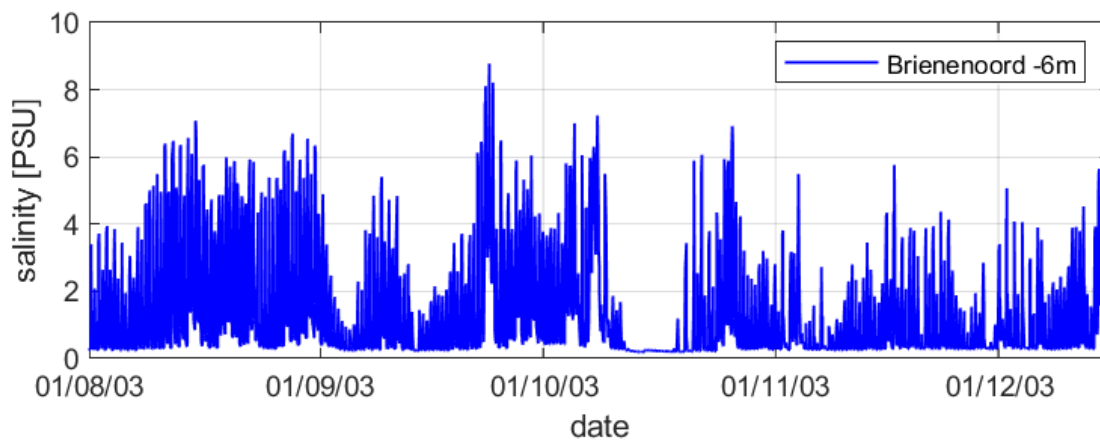
In laboratoriumproeven naar zoutindringing - min of meer gebaseerd op de situatie in de Rijn-Maasmonding met een lange rechte goot als weergave van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas (Richter, 1973) – is gevonden dat de zoutindringing kan toenemen van springtij naar doottij. Dit is ook gevonden voor reële systemen als de Hudson (Geyer et al., 2000). Dit wordt verklaard door de vermindering van de (getij)energie beschikbaar voor menging, waardoor tijdens doottij de stratificatie sterker is. Hierdoor wordt ook de stratificatie- en uitwisselingsstroming-gerelateerde dispersie sterker. Anderzijds nemen alle direct aan het getij-gerelateerde transportprocessen af met afname van de getijamplitude (Okubo, 1973; Fischer et al., 1979), waardoor zoutindringing ook kan afnemen. De vraag welke rol getij precies speelt bij zoutindringing raakt dus sterk aan de vraag welk dispersiemechanisme dominant is. Voor de Rijn-Maasmonding is in de werkelijkheid het verband tussen getijamplitude en zoutindringing niet eenduidig vastgesteld.

3.1.3 Opzet

De windopzet bij Hoek van Holland laat een sterke variatie over de tijd zien. Een aantal keren komt de opzet boven de 0.5 m uit, zoals bijvoorbeeld rond 20 september, 6 oktober en 3 november. Het is bekend dat in periodes van lage rivierafvoer, opzet een grote invloed heeft op de zoutindringing. Naar verwachting komt dit vooral doordat tijdens opzet (vooral aan het begin) de hoeveelheid water die instroomt tijdens vloed groter is dan de uitstroom tijdens eb, waarmee niet alleen de hoeveelheid water, maar ook de hoeveelheid zout in het systeem toeneemt.



Figuur 3: (boven) Gemeten Rijnaflow bij Lobith; (onder) gemeten waterstand bij Hoek van Holland (grijs), uitgesplitst in astronomisch getij (rood) en windopzet (zwart). Alle voor de periode augustus tot december 2003.



Figuur 4: Gemeten saliniteit bij Brienoordbrug op NAP -6 m voor de periode augustus tot december 2003.

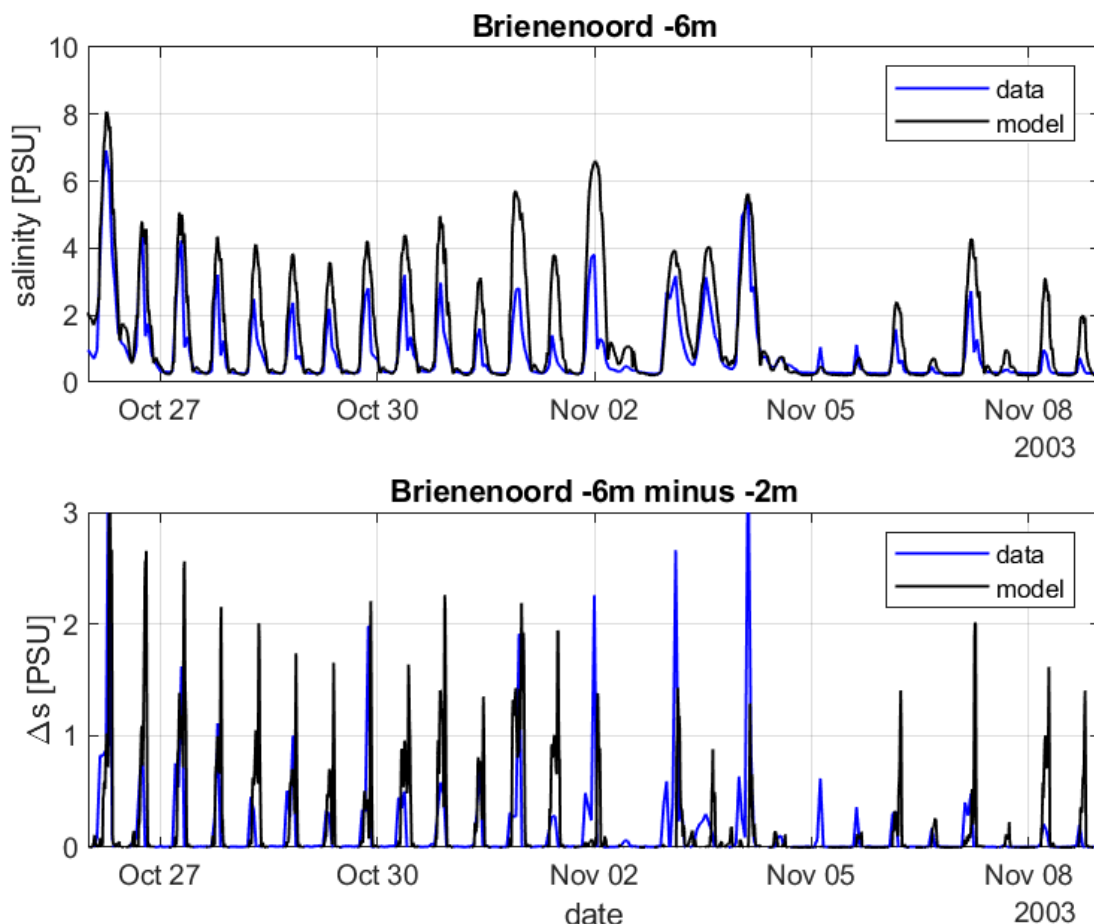
3.2 Systeemreactie: saliniteit

3.2.1 Saliniteit Brienoord

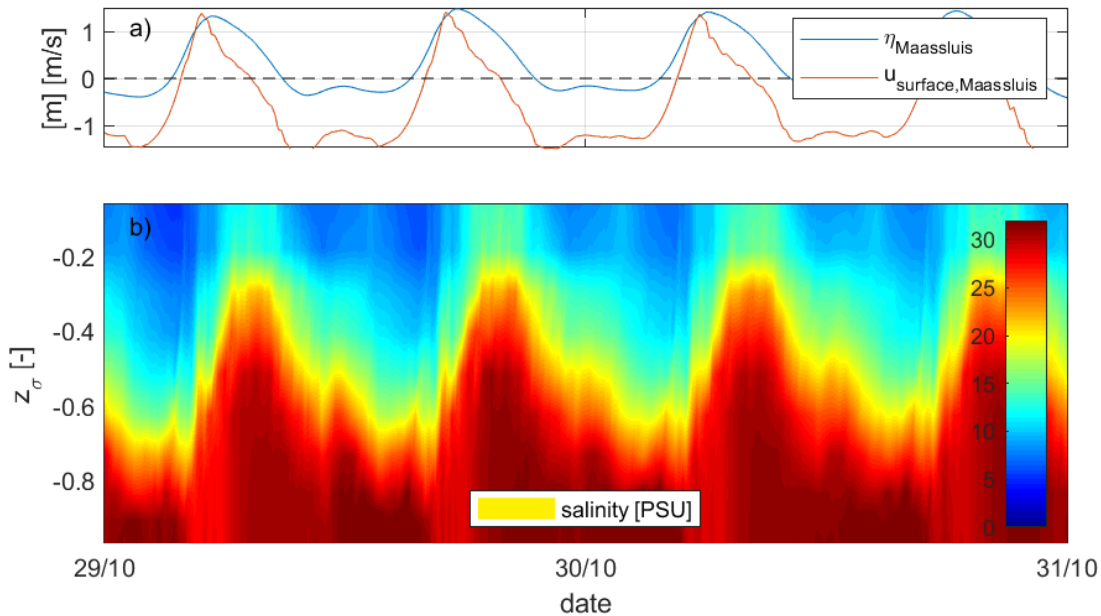
In reactie op de externe forcering door rivierafvoer, getij en opzet veranderen de condities in het systeem. De meest relevante systeemparemeters zijn waterstand, stroming en saliniteit. Figuur 4 toont de gemeten saliniteit bij meetlocatie Brienoordbrug op NAP -6 m. De figuur laat zien dat in de interesseperiode alleen tussen ongeveer 10 en 16 oktober het zout niet tot voorbij Brienoord komt. Dit moment valt samen met de piek in de rivierafvoer en met een negatieve opzet. Daarnaast is er een aantal keren waar te nemen dat de saliniteit voor een periode langer dan een getijperiode niet terugkeert naar de achtergrondswaarde ('permanente verzilting'). Dit valt doorgaans samen met een piek in de opzet. Zonder op deze plek de relatie tussen saliniteit en afvoer, opzet, en getij te preciseren of te kwantificeren, valt wel op te merken dat de relatie met de getijamplitude minder duidelijk is.

3.2.2 Intermezzo: van metingen naar modelresultaten

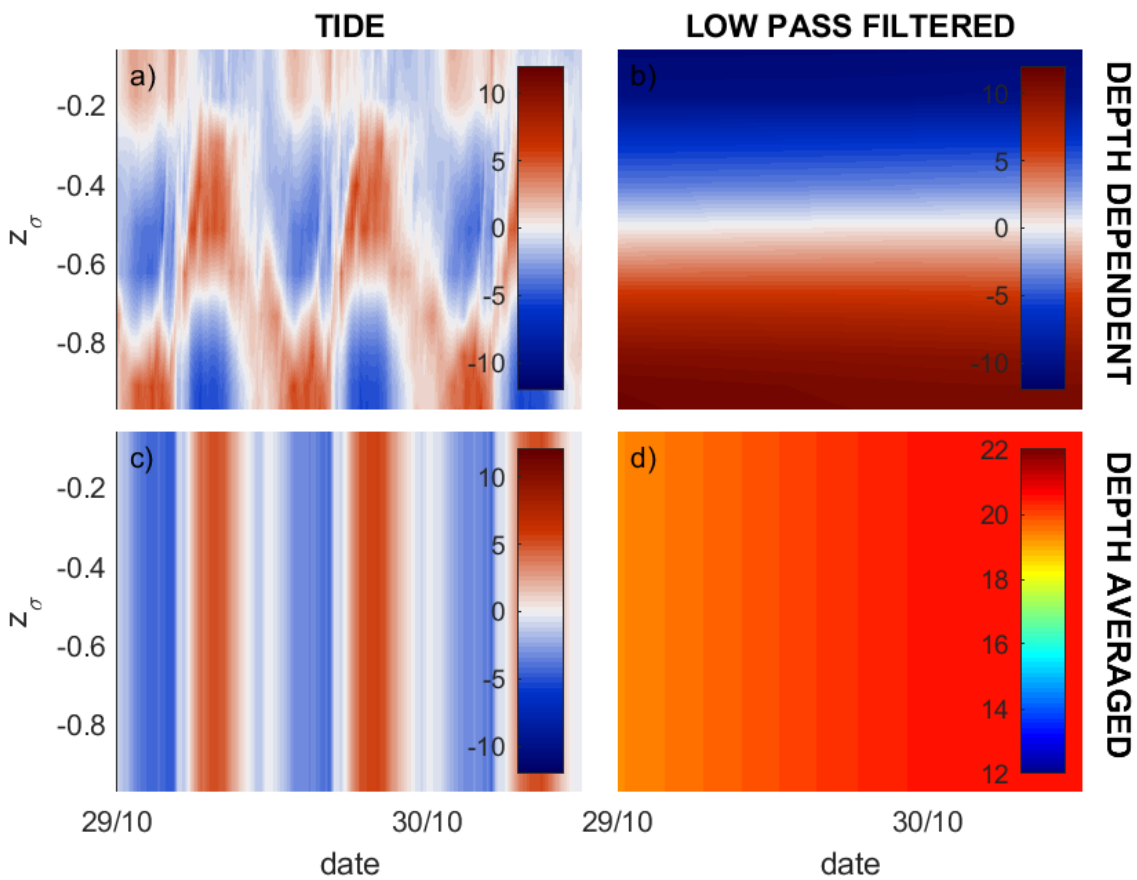
Alvorens in het vervolg van deze studie modelresultaten te gebruiken voor de fluxanalyse, vergelijken we hier kort de systeemreactie volgens het model met die volgens de data. Deze mini-validatie wordt uitgevoerd aan de hand van de metingen en modelresultaten voor saliniteit bij Brienoordbrug (Figuur 5).



Figuur 5: Data-modelvergelijking voor systeemreactie in termen van saliniteit bij Brienoordbrug. Bovenste figuur: saliniteit bij Brienoordbrug op NAP -6 m. Onderste figuur: verschil in saliniteit tussen NAP -6 m en NAP -2m.



Figuur 6: a) Gemodelleerde waterstand Maassluis als functie van tijd; b) gemodelleerde saliniteit als functie van tijd en diepte, periode 29/10-31/10, locatie Maassluis.



Figuur 7: Decompositie van de (gemodelleerde) saliniteit. Linker kolom: getijafhankelijke componenten; rechter kolom: getijgemiddelde componenten. Bovenste rij: over de diepte variërende componenten, dieptegemiddelde componenten. Weergave voor periode 29/10, 00:00 tot 30/10, 12:00; locatie Maassluis.

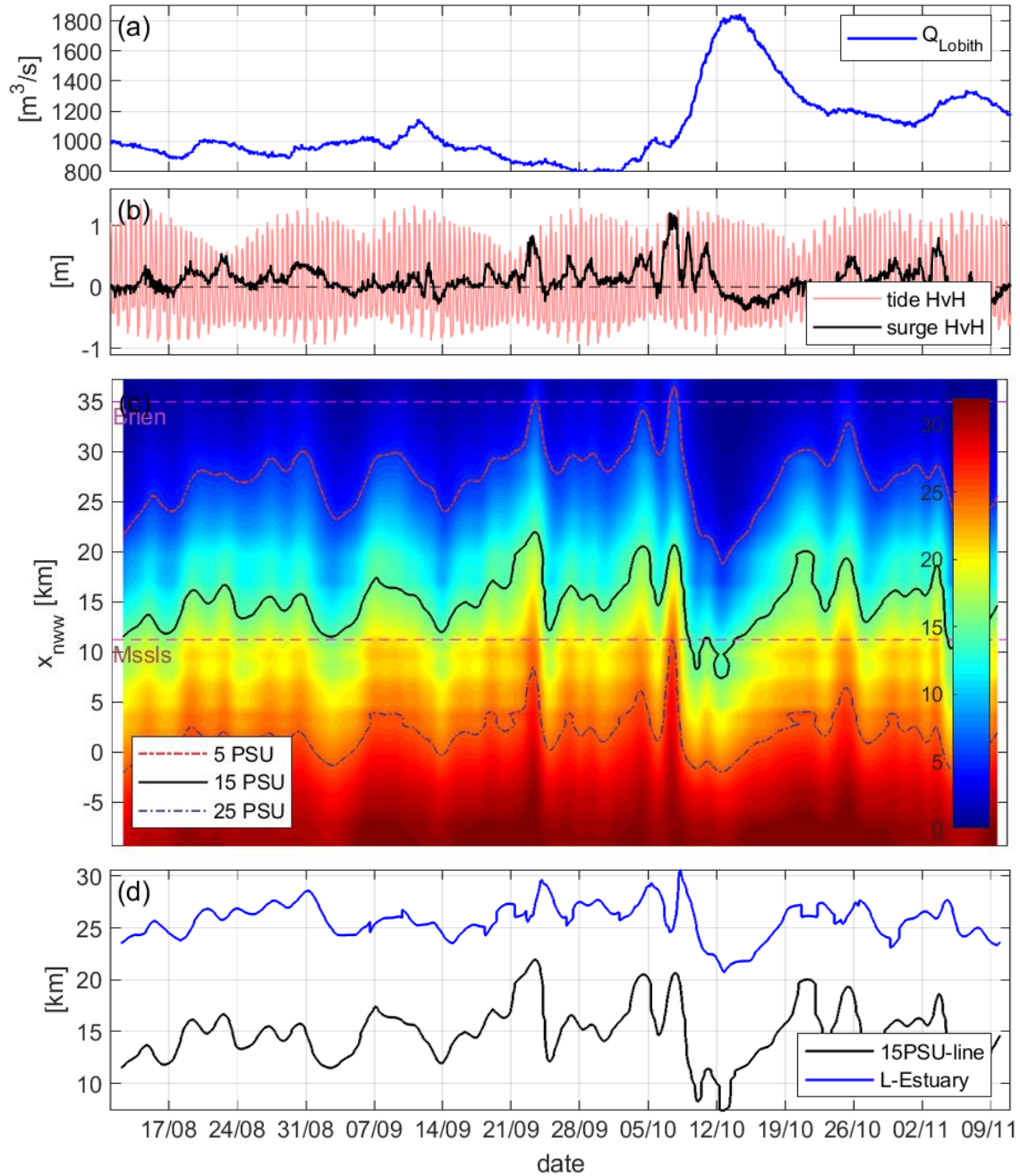
De vergelijking laat zien dat het model de maximale saliniteit tijdens een getij weliswaar vaak enigszins overschat, maar de minimale saliniteit goed weergeeft. Daarmee worden de events van permanente verzilting bij de Brienoordbrug vrij goed opgemerkt. Ook de momenten van nagenoeg volledige afwezigheid van verzilting (bv. rond 5 november) worden goed weergegeven. Wat betreft stratificatie – hier weergegeven als het verschil tussen de saliniteit op NAP -6 m en -2 m – is er vaak een korte periode binnen het getij dat de stratificatie door het model significant wordt overschat, maar over het algemeen is de stratificatie van de goede orde. (De hier gevonden overschatting is overigens niet in lijn met eerdere bevindingen in de OSR-evaluatiestudies, waar – sterk gegeneraliseerd – op grond van vergelijking van verticale profielen in NWW, Nieuwe Maas en Oude Maas juist werd geconstateerd dat het model de stratificatie vaak enigszins onderschat. Dit verschil heeft mogelijk te maken met de locatie van deze data-model vergelijking). Dit gezegd hebbende wordt met deze weergave van bovengenoemde kenmerken het model bruikbaar geacht voor deze verkennende studie naar fluxbijdragen, en wordt in de hierop volgende paragrafen gebruik gemaakt van modelresultaten.

3.2.3 Saliniteitsdecompositie

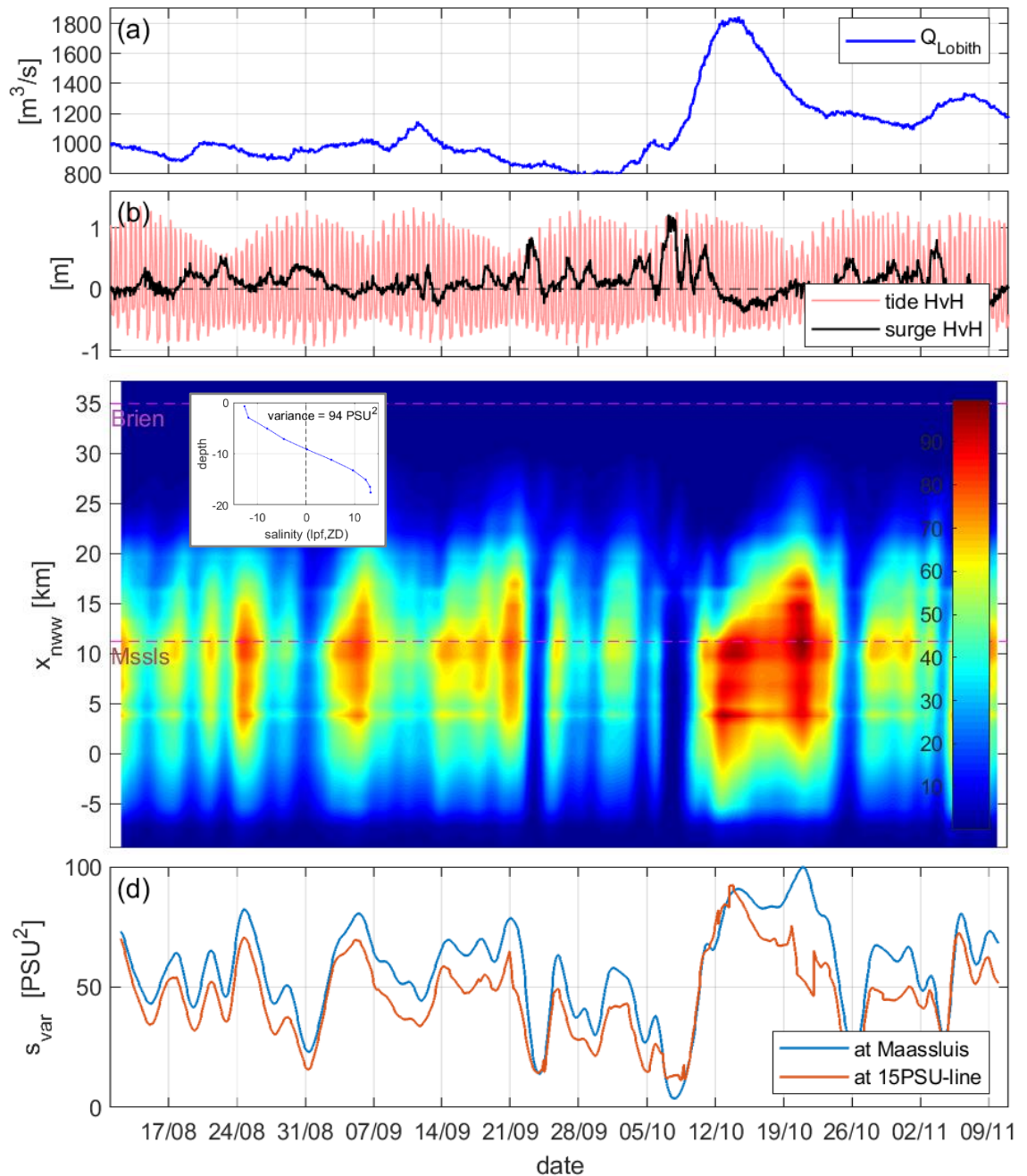
In lijn met de methodiek uiteengezet in paragraaf 2.1.2 zijn de modelresultaten voor saliniteit opgesplitst in getijgemiddelde ('low pass filtered') en getijafhankelijke resultaten. Die zijn vervolgens beide weer opgesplitst in dieptegemiddelde en diepteafhankelijke componenten. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 6 en Figuur 7. De figuren laten zien dat de saliniteit zoals getoond in Figuur 6b als volgt kan worden beschouwd: in de ruimte en tijd gemiddeld is de saliniteit in deze periode zo'n 20 PSU (Figuur 7d). Er is echter een stevige (getijgemiddelde) stratificatie, waardoor de saliniteit boven zo'n 10 PSU lager en onderin zo'n 10 PSU hoger is dan gemiddeld (Figuur 7b). Daarnaast fluctueert de dieptegemiddelde saliniteit door het getij in de tijd met een amplitude van zo'n 6 PSU (Figuur 7c), en varieert ook de stratificatie in de tijd: tijdens vloed neemt de stratificatie af (Figuur 7a, onderin blauw, bovenin rood) en tijdens eb juist toe. De som van deze gedragingen is de totale saliniteit. Merk ten slotte op dat de over getij en diepte gemiddelde saliniteit (Figuur 7d) in de weergegeven periode ook langzaam aan het toenemen is. Terugkijkend is dit ook waar te nemen in Figuur 6b: zowel de minima als de maxima nemen tijdens de getoonde periode enigszins toe.

3.2.4 Verloop dieptegemiddelde, getijgemiddelde saliniteit

Om de systeemreactie verder in kaart te brengen, wordt nu de diepte- en getijgemiddelde saliniteit nader bestudeerd voor de volledige simulatieperiode (Figuur 8). Deze parameter is relevant omdat deze de geleidelijke ontwikkeling van de zoutindringing in reactie op veranderingen in de forcering in beeld brengt, en daarmee het effect van een veranderende balans tussen processen. In de figuur zijn ook de contouren aangegeven voor diepte- en getijgemiddelde saliniteit gelijk aan 5, 15 en 25 PSU. Het estuarium definiërend als het overgangsgebied van zout naar zoet, kunnen we de positie van de 15 PSU contour beschouwen als het 'centrum van het estuarium' en de afstand tussen de 25 en 5 PSU contour als een maat voor de estuariumlengte. We zien in de figuur dat de positie van alle contouren (en dus ook van het centrum van het estuarium) sterk samenhangt met de opzet op zee: de drie hoogste pieken in de zoutindringing vallen alle samen met pieken in de opzet – zij het niet de drie hoogste. Het minimum in de zoutindringing valt samen de maximale rivierafvoer. Vanuit de overweging dat springtij zorgt voor meer menging, en daarmee in een *partially-mixed* estuarium voor minder stratificatie- en uitwisselingsstroming-gerelateerde dispersie (Geyer and MacCready, 2014), is de verwachting dat de estuariumlengte afneemt met toenemende getijamplitude. De afstand tussen de 25 en 5 PSU contour blijkt echter toch vooral een afhankelijkheid te vertonen van de forcering vergelijkbaar met de zoutindringingslengte zelf, zij het wat minder sterk. De verwachting dat hierin de invloed van de getijamplitude duidelijker naar voren zou komen, wordt dus niet duidelijk bewaarheid.



Figuur 8: Getij- en dieptegemiddelde saliniteit. a) rivierdebiet; b) getij en opzet; c) getij- en dieptegemiddelde saliniteit als functie van plaats en tijd. Contour aangegeven voor 5, 15 en 25 PSU. Stippellijnen zijn locatie Maassluis Rivier en Brienenoordbrug; d) positie van de 15 PSU contour samen met de afstand tussen de 25 en 5 PSU contour als maat voor de lengte van het estuarium.



Figuur 9: Stratificatie. a) rivierdebiet; b) getij en opzet; c) salinity variance: de variantie van de getijgemiddelde maar diepte-variërende saliniteitscomponent als maat voor de stratificatie (eenheid PSU²). Stippellijnen zijn locatie Maassluis Rivier en Brienoordbrug; Inzet: het profiel van de getijgemiddelde, diepte-variërende saliniteitscomponent bij Maassluis Rivier op 20/10 00:00, met bijbehorende variantie; d) salinity variance (vertikale variantie van de saliniteit) op locatie Maassluis Rivier en ter plaatse van de 15 PSU contour.

3.2.5 Verloop getijgemiddelde stratificatie

De getijgemiddelde stratificatie (zie Figuur 9) varieert sterk over het estuarium. De maximale stratificatie is doorgaans rond de locatie Maassluis Rivier. De maximale stratificatie treedt op tijdens de piek in de rivierafvoer. Hogere waarden voor stratificatie vallen kort na minima in estuariumlengte / zoutindringing (14/10, 5/9, 16/9). Tijdens de hogere opzet-events verdwijnt de stratificatie plotseling nagenoeg volledig, niet alleen bij Maassluis, maar ook verder van de monding. Naast invloed van de rivierafvoer en de opzet, lijkt voor de stratificatie ook de getij-invoerd waarneembaar: voor min of meer gelijkblijvende overige omstandigheden is de stratificatie tijdens doodtij groter dan tijdens springtij.

3.3 **Stroomreactie: stroming**

3.3.1 Stromingsdecompositie

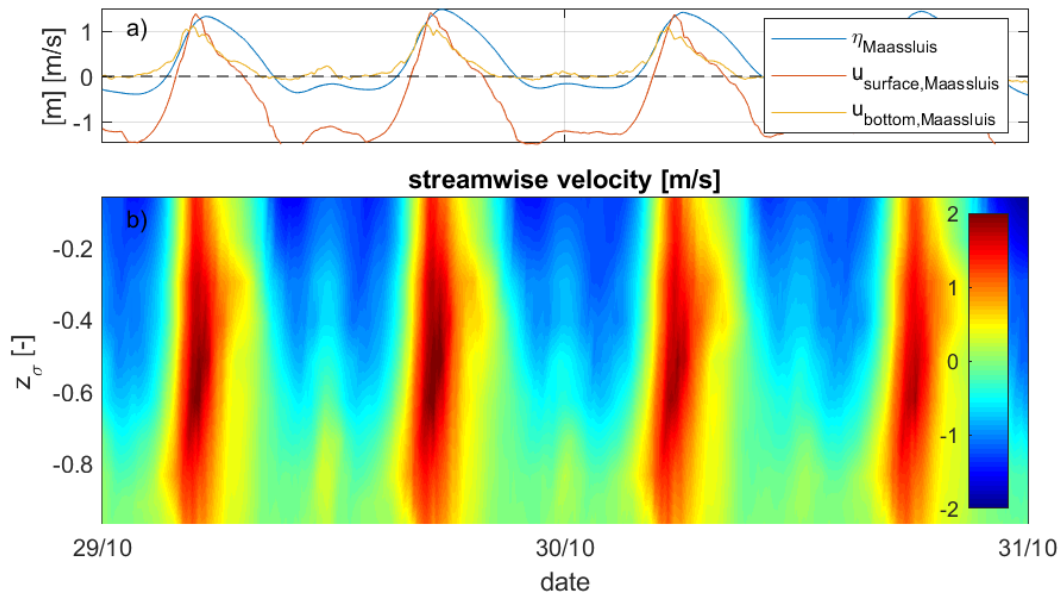
Ook de modelresultaten voor stroomsnelheid zijn opgesplitst in getijgemiddelde en getijafhankelijke resultaten die vervolgens beide weer zijn opgesplitst in dieptegemiddelde en diepteafhankelijke componenten (Figuur 10 en Figuur 11). De decompositie, getoond voor de periode 29/10 00:00 tot 30/10 12:00, laat zien dat de diepte- en getijgemiddelde stroomsnelheid in deze periode iets boven de 0.1 m/s in ebrichting is (Figuur 11d). De dieptegemiddelde getijstroming heeft een amplitude van meer dan 1.0 m/s (Figuur 11c). Daarnaast is er sprake van schering: bij eb is de getijstroming nabij de bodem minder negatief dan bovenaan, terwijl bij vloed de stroming onderaan minder inwaarts is dan bovenin (Figuur 11a). Bovendien is er een getijgemiddelde schering die onderin naar binnen is gericht (Figuur 11b). Deze is van dezelfde orde als de schering in de getijstroom. Dit betekent feitelijk dat er tijdens vloed nauwelijks sprake is van stroomschering, terwijl er tijdens eb een sterke schering optreedt. Dat is precies wat zichtbaar is in Figuur 10a: tijdens vloed zijn de snelheid in de bovenste en onderste laag nagenoeg gelijk, terwijl deze tijdens eb sterk verschillen. De schering is zelfs zo sterk dat er in deze periode tijdens eb nauwelijks sprake is van uitgaande stroming nabij de bodem.

3.3.2 Verloop dieptegemiddelde, getijgemiddelde stroomsnelheid

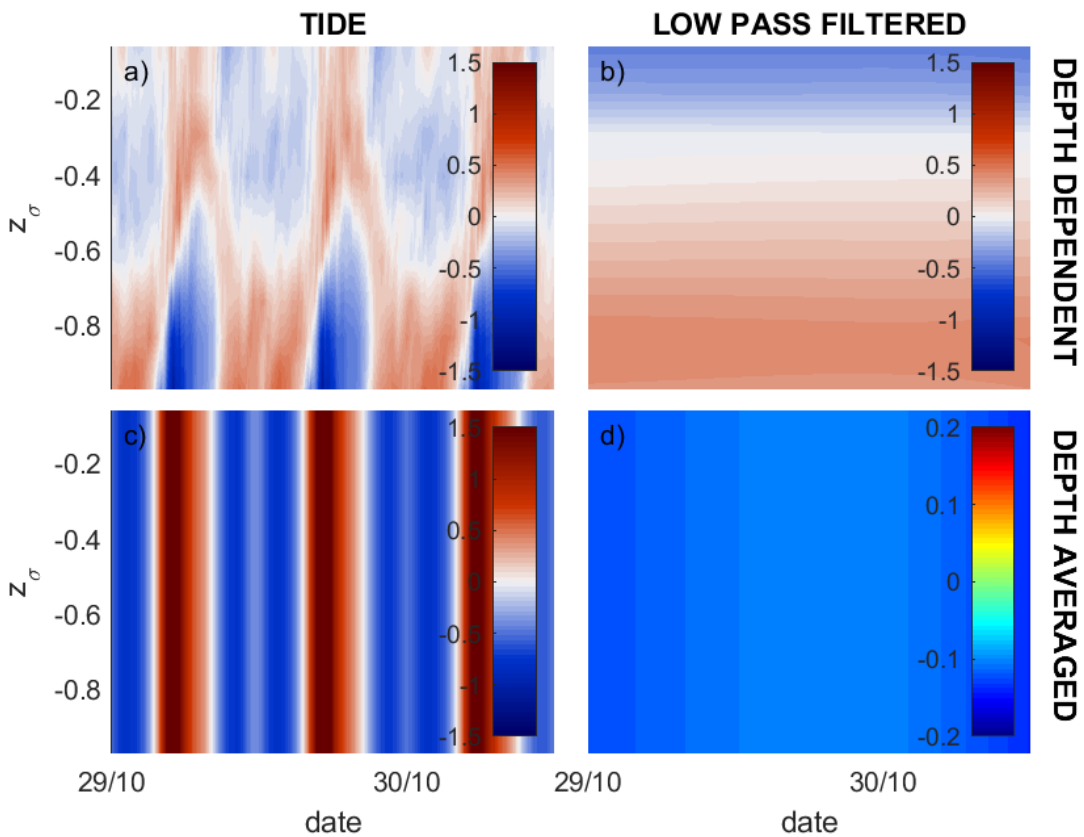
De netto stroming is ook in beeld gebracht als functie van plaats en tijd (Figuur 12c). Hieraan is te zien dat de netto stroming het grootste deel van de tijd zoals verwacht naar buiten is gericht. Tijdens de momenten met hoge opzet is de stroming echter over het hele onderzochte gebied naar binnen gericht, doorgaans gevolgd door een periode met sterker dan gemiddelde naar buiten gerichte stroming. Feitelijk wordt de rivierafvoer tijdelijk geblokkeerd. Verder is te zien dat rond de 20 km afstand van de monding de snelheden structureel meer naar binnen zijn gericht dan in de rest van het domein. Dit is waarschijnlijk een niet-representatief resultaat dat door de projectie of de plaats van de uitvoerlocatie (bijvoorbeeld dicht bij een havenmonding) een vertekend beeld geeft.

3.3.3 Verloop getijgemiddelde schering (estuariene circulatiestroming)

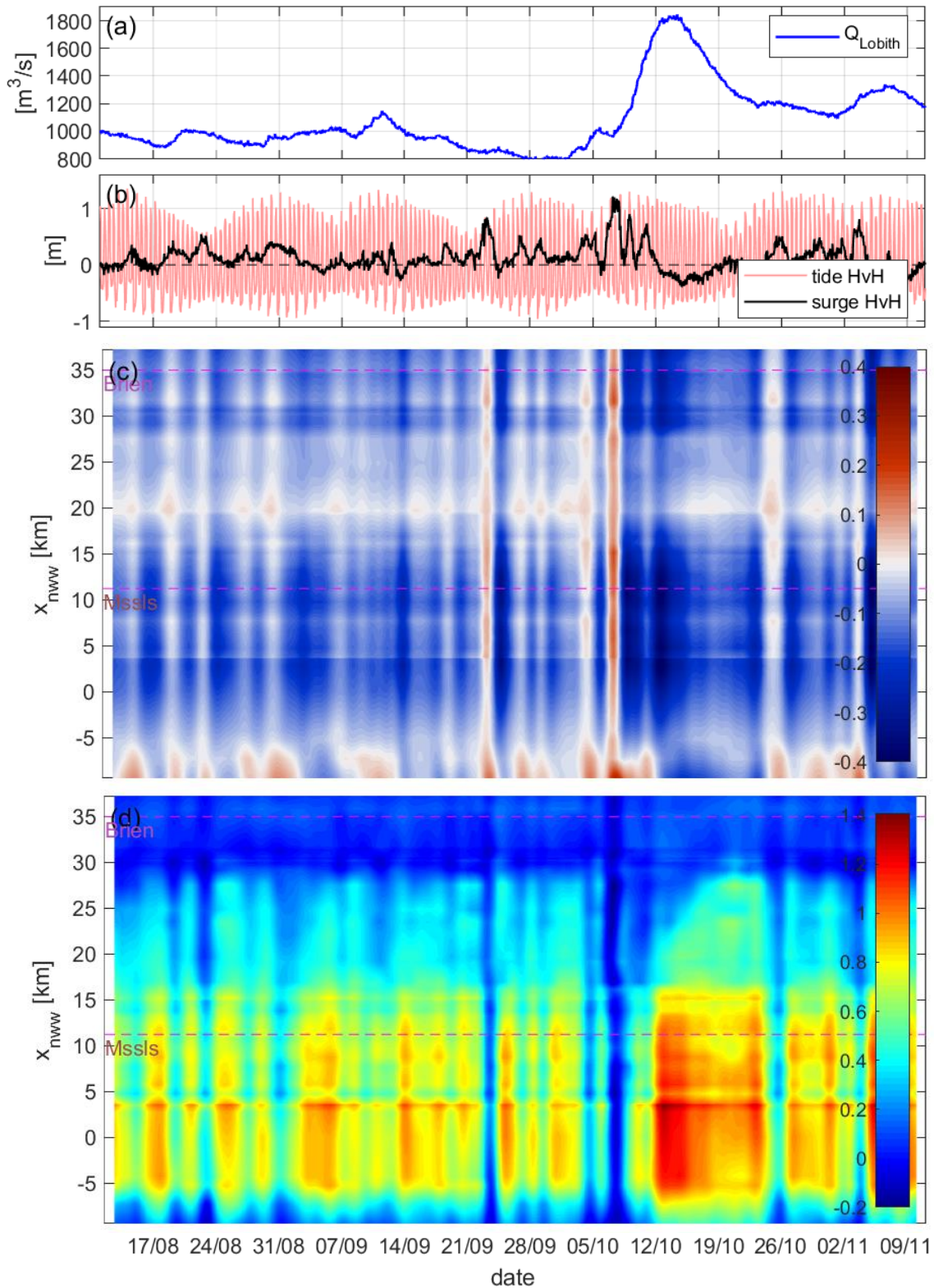
Om de getijgemiddelde schering in beeld te brengen, is in Figuur 12d het verschil tussen de snelheid nabij de bodem en de snelheid nabij het oppervlak getoond. De belangrijkste observaties zijn dat de sterkste estuariene circulatie (zoals verwacht) samenvalt met de piek in de rivierafvoer, en dat de circulatie volledig verdwijnt bij een hoge windopzet.



Figuur 10: a) Waterstand Maassluis en stroming nabij oppervlakte en bodem als functie van tijd; b) stroomsnelheid als functie van tijd en diepte, periode 29/10-31/10, locatie Maassluis (allen modelresultaten, positief is vloedrichting).



Figuur 11: Decompositie van de (gemodelleerde) stroomsnelheid. Linker kolom: getijafhankelijke componenten; rechter kolom: getijgemiddelde componenten. Bovenste rij: over de diepte variërende componenten, dieptegemiddelde componenten. Weergave voor periode 29/10, 00:00 tot 30/10, 12:00; locatie Maassluis.



Figuur 12: Netto stroming en estuariene circulatie. a) rivierdebiet; b) getij en opzet; c) getij- en dieptegemiddelde stroming; d) verschil tussen snelheid aan bodem en snelheid aan oppervlak als maat voor de sterkte van de estuariene circulatie.

4 Analyse zoutfluxen

4.1 Zoutfluxen als functie van tijd

Vanuit de vier afzonderlijke componenten van saliniteit en stroming zijn de afzonderlijke fluxbijdrages bepaald. Ook de totale flux is bepaald, zowel door sommatie van de afzonderlijke componenten als door directe berekening vanuit het onontbonden saliniteits- en stromingssignaal. De diverse fluxbijdrages zijn weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14. Figuur 13 toont tijdseries van de fluxbijdrages en de totale flux voor verschillende locaties langs de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas met toenemende afstand vanaf de monding. In Figuur 14 zijn de diverse fluxbijdrages in afzonderlijke figuren weergegeven als functie van tijd en plaats voor het gehele bestudeerde gebied. Hierna volgen eerst enkele opmerkingen over de totale zoutflux. Daarna worden de afzonderlijke componenten nader besproken.

4.1.1 Totale zoutflux

In een eerste controle van de resultaten is nagegaan of de som van de afzonderlijke zoutfluxcomponenten goed overeenkomt met de totale zoutflux zoals gevonden door directe berekening vanuit het onontbonden saliniteits- en stromingssignaal. Deze resultaten blijken niet exact gelijk, maar wel goed vergelijkbaar (zie Bijlage A, Figuur 15). Dit wijst erop dat de verwaarlozing van de kruisproducten, een van de aandachtspunten in paragraaf 2.1.2, terecht is, en dat de methode zoals hier toegepast bruikbaar is om de diverse bijdragen aan de totale zoutflux te onderzoeken.

Een tweede belangrijke controle van de resultaten betreft het gedrag van de totale zoutflux gemiddeld over een langere periode. Het systeem is voortdurend zout aan het importeren en weer aan het exporteren. Maar ten langsten is er geen sprake van grote accumulatie of verlies van zout. Dat betekent dat de totale zoutflux rond de nul hoort te slingeren en gemiddeld over een langere periode ongeveer nul zal moeten zijn (al moet daarvoor strikt genomen ook de toevoer van zout via rivierwater met een zekere achtergrondconcentratie in de beschouwing worden meegenomen. Die is hier buiten beschouwing gelaten). Dat gedrag is zichtbaar voor de totale flux in Figuur 13 (blauwe lijn). Het lange termijn gemiddelde is zeker nog niet voor alle locaties exact nul. Dat kan verklaard worden doordat de in de analyse gebruikte punten / verticale profielen lang niet altijd een perfecte representatie zijn van wat er over de breedte van een dwarsdoorsnede gebeurt. Maar er is een goede benadering van een lange termijn gemiddelde van nul, en de totale flux slingert voor alle locaties om de nul-lijn. Wel bleek het meenemen van hypsometrie-effecten (namelijk dat de breedte hoger in de waterkolom groter is dan onderin) hiervoor essentieel.

Een andere manier om de resultaten te controleren zou zijn om na te gaan of de totale zoutflux op een bepaalde locatie ongeveer overeenkomt met de toename van de zoutvoorraad landwaarts van deze locatie. Die controle is hier niet toegepast, met name omdat de Oude Maas niet in de analyse is meegenomen, terwijl een deel van geïmporteerd zout daar terecht komt. Wel laten de resultaten voor de zoutflux zien dat deze sterk afneemt met toename van de afstand vanaf de monding, van rond de 2×10^4 PSU*m³/s nabij Maassluis Rivier en 1×10^4 PSU*m³/s nabij Botlek Rivier tot 1×10^3 PSU*m³/s bij de Boompjes en 4×10^2 PSU*m³/s bij Brienoordbrug.

4.1.2 Zoutflux gerelateerd aan de uitwisselingsstroming

De aan de uitwisselingsstroming (*estuarine circulation*) gerelateerde zoutflux is weergegeven in Figuur 13 met de paarse lijn. De resultaten laten zien dat voor de locaties op de Nieuwe

Waterweg (km-1023, Maassluis, Botlek) deze component het grootste deel van de tijd de grootste bijdrage levert aan de import van zout. Verder landinwaarts is deze bijdrage nagenoeg afwezig. Dat zijn belangrijke observaties, want dit betekent dat uitwisselingsstroming- en stratificatie-gerelateerde dispersie nauwelijks een rol speelt in het landinwaartse deel van de Rijn-Maasmonding, maar het grootste deel van de tijd dominant is op de Nieuwe Waterweg. Wel valt op dat deze bijdrage ook op de Nieuwe Waterweg op een aantal momenten nagenoeg verdwijnt, of in elk geval sterk reduceert (7/10, 4/10, 23/9, 26/10, 31/8). Deze momenten vallen samen met (of volgen direct op) pieken in de inwaarts gerichte totale zoutflux. Dit is opvallend, want dit betekent dat hoewel de uitwisselingsstroming het grootste deel van de tijd het dominante importerende mechanisme is, dit mechanisme niet verantwoordelijk is voor de grootste pieken in de inwaartse zoutflux. Dus juist op het moment van maximale (momentane) inwaartse zoutflux en verre zoutindringing is dit mechanisme minder belangrijk.

4.1.3 Zoutflux gerelateerd aan het getij

De zoutflux gerelateerd aan de dieptegemiddelde getijstroming, weergegeven in Figuur 13 met de gele lijn, blijkt duidelijk het grootste deel van de tijd de dominante naar binnen gerichte bijdrage op de Nieuwe Maas (locaties Boompjes Rivier en Brienenoordbrug). Bij de Botlek blijkt deze bijdrage bijzonder klein. Meer zeewaarts op de Nieuwe Waterweg is deze component duidelijk niet dominant, maar kan deze toch een significante bijdrage leveren. Met name bij locatie km-1023 is deze bijdrage een groot deel van de tijd ongeveer half zo groot als de uitwisselingsstroming-gerelateerde bijdrage. De bijdrage gerelateerd aan de schering binnen het getij (oranje lijn) is duidelijk de kleinste bijdrage en, behalve wellicht het meest westelijk in de Nieuwe Waterweg, te verwaarlozen.

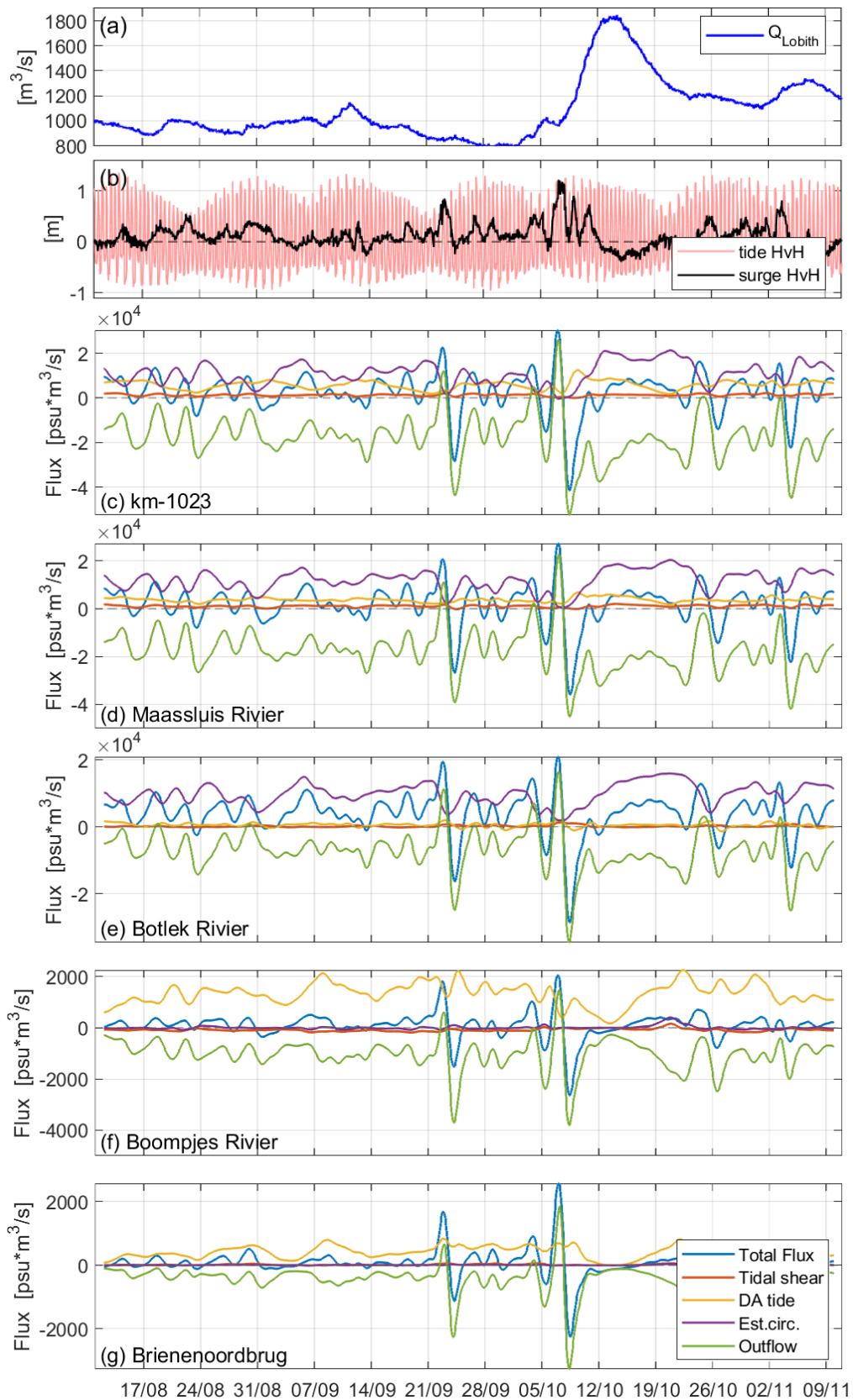
4.1.4 Zoutflux gerelateerd aan de netto stroming

Bovenstaande componenten waren naar binnen gerichte bijdrages. Het enige exporterende mechanisme is de netto stroming. Deze component (groen, 'Outflow' in Figuur 13) blijkt inderdaad voor alle locaties het grootste deel van de tijd zout naar buiten te transporteren. Wat hier echter opvalt is dat deze bijdrage meer en heftiger fluctueert in de tijd vergeleken met de importerende bijdragen, maar vooral dat deze bijdrage op een aantal momenten verandert in een importerende bijdrage. Deze bijdragen vallen samen met de pieken in de windopzet.

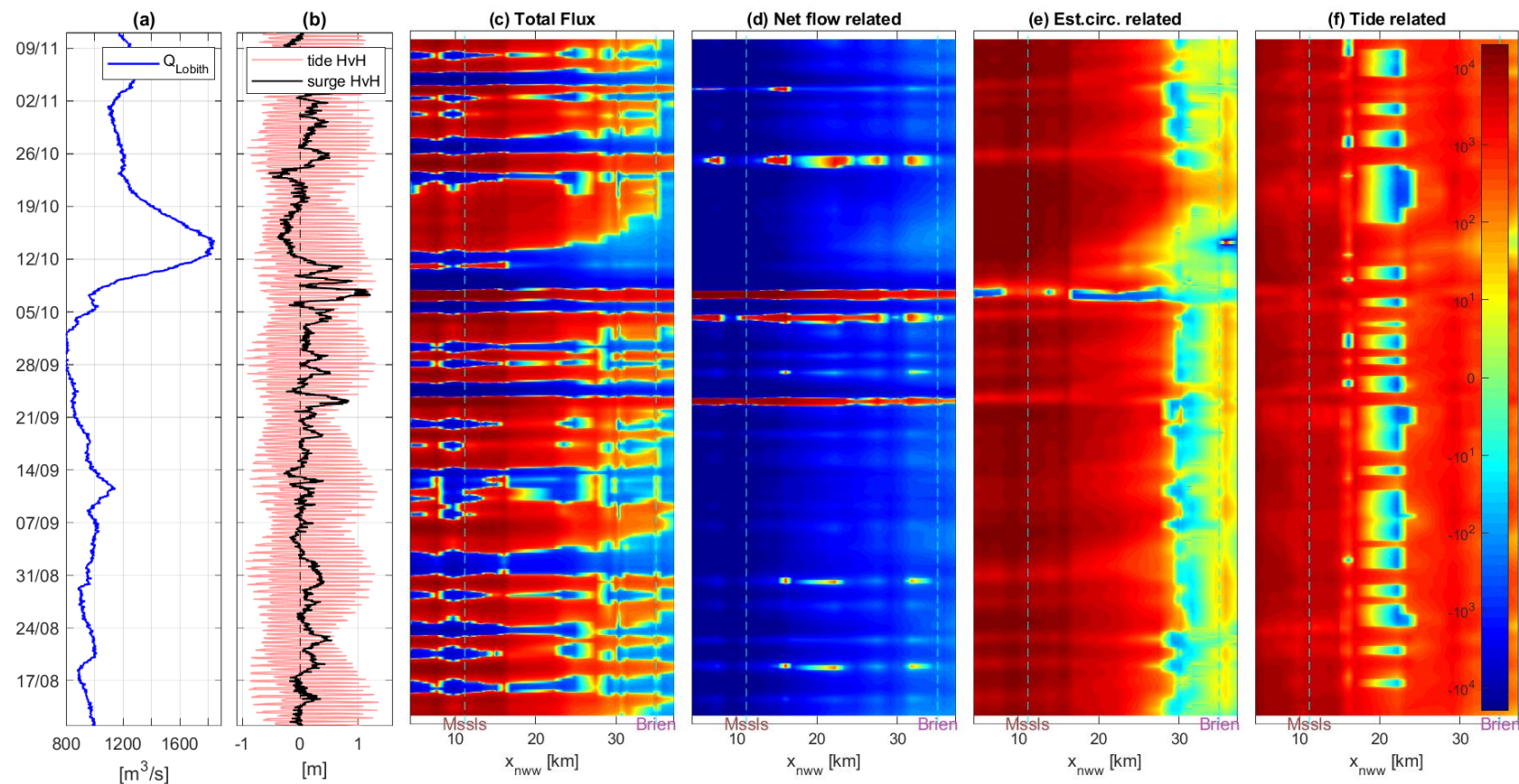
Dit betekent dat op deze momenten niet slechts de rivierafvoer wordt tegengehouden en de totale zoutflux naar binnen is gericht omdat het hiermee samenhangende exporterende mechanisme tijdelijk afwezig is terwijl de importerende mechanismen actief blijven. Het 'normale' importerende mechanisme van de uitwisselingsstroming valt op dit moment juist ook weg, en de netto stroming zelf draait om en wordt het dominante importerende mechanisme. Samenvattend gezegd: de opzet zorgt niet slechts voor opstuwning, maar voor een daadwerkelijk naar binnen gerichte (diepte- en getijgemiddelde) stroming, waarmee gewoonweg zout water naar binnen wordt gepompt. De door opzet gedreven inwaartse netto stroming wordt altijd gevolgd door een – grotere – naar buiten gerichte stroming met bijbehorende zoutflux. Na afloop van de piek herstelt de 'normale' situatie zich weer met inwaarts transport door uitwisselingsstroming of getijstroming-gerelateerde fluxen en naar buiten gericht transport door de netto afvoer.

4.2 Overzicht van zoutfluxen als functie van plaats en tijd

In Figuur 14 zijn als aanvulling op de voorgaande weergave de diverse fluxbijdrages in afzonderlijke figuren weergegeven als functie van tijd en plaats voor het gehele bestudeerde gebied (logaritmische weergave). De figuur laat duidelijk zien dat de uitwisselingsstroming-gerelateerde fluxbijdrage groot is nabij de monding en rond de nul vanaf zo'n 25 km vanaf de monding.



Figuur 13: Fluxcomponenten. a) rivierdebiet; b) getij en opzet; c)-g) verloop fluxcomponenten in de tijd voor locaties met toenemende afstand vanaf de monding.



Figuur 14: Zoutfluxcomponenten. a) rivierdebiet; b) getij en opzet; c) de totale (diepte- en getijgemiddelde) zoutflux als functie van tijd en afstand tot de monding; d) de netto stroming gerelateerde zoutflux; e) de getijgemiddelde schering (i.e. estuariene circulatie) gerelateerde zoutflux; f) de getij-gerelateerde zoutflux (bijdrage dieptegemiddelde getijstrooming en getijschering samen); Logaritmische schaal. Warme kleuren: naar binnen gericht.

De getij-gerelateerde fluxbijdrage is zowel nabij de monding als in het oostelijk deel naar binnen gericht. Rond de 21 km bevindt zich een band waarin regelmatig naar buiten gerichte fluxen zijn berekend. Dit resultaat kunnen we nog niet goed verklaren, maar heeft mogelijk te maken met verschijnselen rond de splitsing Nieuwe Waterweg - Nieuwe Maas - Oude Maas. De belangrijkste waarneming is echter dat in de Nieuwe Waterweg de bijdrage van de getij-gerelateerde flux zo'n 30%-50% is van die van de uitwisselingsstroming.

De aan de netto stroming gerelateerde bijdrage laat het grootste deel van de tijd een over het hele domein naar buiten gerichte fluxbijdrage zien, die slechts wordt onderbroken door een aantal korte periodes met significante, naar binnen gerichte fluxbijdrages. Deze periodes vallen samen met de pieken in de opzet, en het is goed te zien dat in deze periodes de uitwisselingsstroming-gerelateerde fluxbijdrage sterk afneemt. Rond 7/10 wordt deze zelfs negatief.

Dit figuur bevestigt dus het beeld uit Figuur 12:

- In de Nieuwe Waterweg is fluxbijdrage van de uitwisselingsstroming dominant over de getij-gerelateerde fluxbijdrage.
- In het oosten is de bijdrage van de getijstroming dominant en is de bijdrage van de uitwisselingsstroming nagenoeg geheel afwezig.
- Bij pieken in de opzet kan de bijdrage van de netto stroming tijdelijk van richting veranderen en de dominante bijdrage aan de inwaartse zoutflux worden.
- Op deze momenten neemt ook uitwisselingsstroming-gerelateerde bijdrage sterk af.

5 Discussie

Alvorens de betekenis van de bevindingen uit hoofdstuk 4 voor maatregelen tegen zoutindringing te bediscussiëren, evalueren we kort de gevolgde methodiek.

5.1 Evaluatie methode

5.1.1 Gebruik OSR-model

In deze studie is gebruik gemaakt van modelresultaten afkomstig van simulaties met het OSR-model. Dit model is geen perfecte weergave van de werkelijkheid, en de bevindingen van deze studie zijn daarom niet zondermeer van toepassing in de werkelijkheid. Een overweging daarbij is dat uit modevaluaties bekend is dat het model (net als overigens veel andere 3D modelsystemen en modelschematisaties) de neiging heeft stratificatie enigszins te onderschatten. Dit is vastgesteld in de OSR-evaluatiestudies op grond van vergelijking met verticale saliniteitsprofielen in de NWW, Nieuwe Maas en Oude Maas (Kranenburg, 2015a, 2015b; Kranenburg en Schueder, 2015). De vraag is wat dit betekent voor de bevindingen uit hoofdstuk 4. Het is de verwachting dat, als zelfs in een model dat de neiging heeft stratificatie enigszins te onderschatten, de bijdrage van de stratificatie- en uitwisselingsstroming-gerelateerde bijdrage in de Nieuwe Waterweg dominant is over de getij-gerelateerde bijdrage, dit in werkelijkheid alleen maar meer het geval zal zijn. Om dezelfde reden moeten we echter rekening houden met de mogelijkheid dat in het bijzonder ten tijde van de opzet-events de bijdrage van de uitwisselingsstroming ten opzichte van die van de netto stroming wordt onderschat. Overigens is ook de eerdere bevinding dat het model de neiging heeft de stratificatie te onderschatten, een zeer gegeneraliseerde beschrijving, en varieert ook het verschil tussen model en werkelijkheid over de tijd, over de plaats en over de evaluatiesimulaties. Dat blijkt bijvoorbeeld al uit het feit dat in Figuur 5 de stratificatie juist ook regelmatig wordt overschat. Om deze reden is het op dit moment niet mogelijk een algemene kwantitatieve foutenmarge te definiëren. Er is echter ook geen reden om op grond van de modelbeperkingen te twijfelen aan de kern van de bevindingen.

5.1.2 Relatie fluxtermen en processen

In hoofdstuk 2 is de samenhang tussen de fluxtermen en de diverse transportmechanismen beschreven. Een centraal element in de methode is de opsplitsing tussen getijgemiddelde en getij-afhankelijke termen/processen, waarvoor gebruik is gemaakt van een low-pass filter. In de analyse komt naar voren dat de invloed van opzet-events op de zoutfluxbijdragen groot is. In de gebruikte methodiek komt deze invloed primair tot uiting in de getij- en dieptegemiddelde stromingscomponent en bijbehorende fluxterm. Het nadeel hiervan is dat effecten van windopzet en effecten van veranderende rivierafvoer niet in afzonderlijke fluxbijdragen naar voren komen, en daardoor moeilijk afzonderlijk zijn te kwantificeren. Gezien de grote rol van de opzet is dit wel gewenst.

Opzet-events hebben doorgaans een duur van een dag of twee. Veranderingen in de rivierafvoer vinden eerder plaats over een tijdsduur van orde een week. Dat biedt aanknopingspunten om onderscheid aan te brengen. Geen van beide signalen zijn echter nette periodieke signalen, waardoor een volgende toepassing van het Godin-filter met een langere periode als low-pass grens of selectie van een aantal fouriercomponenten geen afdoende oplossing zijn. Een alternatief zou kunnen zijn om een aan de rivierafvoer bij Lobith gerelateerd signaal voor de afvoer over de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg van het resultaat voor netto stroming af te trekken en de rest als opzeteffect te beschouwen. Daarmee is alleen nog niet

duidelijk hoe de huidige diepte- en getijgemiddelde saliniteitscomponent moet worden opgesplitst. Dat is wel noodzakelijk om de bijbehorende fluxbijdrages te bepalen. Het wordt aanbevolen om bij nadere uitwerkingen van deze verkenning een manier te zoeken om de fluxbijdrage van opzet-events en rivierafvoer beter te kunnen onderscheiden.

Als opmerking in de kantlijn merken we hier ook op dat er in het gefilterde signaal voor waterstanden in het systeem fluctuaties lijken te zitten met een periode van 2 à 3 dagen. De herkomst hiervan is nog onbekend (dit komt niet overeen met schattingen van de eigenperiode van het systeem).

5.1.3 Verwaarlozing laterale verschillen

In deze studie is de methodiek van zoutfluxdecompositie toegepast op (model)informatie over verticale profielen van stroming en saliniteit min of meer langs de centerline van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas (dus als functie van x , z en t). Daarbij worden de profielen representatief geacht voor de hele dwarsdoorsnede. Op deze wijze wordt dus volledig voorbijgegaan aan de invloed van laterale variatie van stroming en saliniteit. Deze keuze is gemaakt op grond van het inzicht dat de verticale variatie van de getijgemiddelde stroming en getijgemiddelde saliniteit in de NWW veel groter is dan de laterale variatie, en de veronderstelling dat hierom de zoutfluxbijdrage van de laatste veel kleiner zal zijn. Hierbij speelt een rol dat de NWW sterk lijkt op een rechte bak die goed 2DV gemodelleerd zou kunnen worden. Dit in tegenstelling tot bredere of bochtigere estuaria, waarin circulaties in het horizontale vlak of door bochtstroming geïnduceerde laterale verschillen op zullen treden. We zien al in de resultaten van deze analyse dat deze aanpak nabij splitsingspunten niet heel goed lijkt te werken. Daarnaast is bekend dat vrij significante laterale faseverschillen op kunnen treden in de stroming, wat gepaard gaat met laterale verschillen in de stroomsnelheid. In een meer complete analyse kunnen ook de fluxbijdragen gerelateerd aan laterale verschillen worden meegenomen (zoals ook beschreven in Lerczak et al., 2006, en Kranenburg et al., 2016a). Hiervoor zal het nodig zijn informatie over de hele dwarsdoorsnede uit de modelresultaten te trekken. De verwachting is dat laterale verschillen in de getijstroming een naar binnen gerichte bijdrage aan de zoutflux zullen leveren.

5.1.4 Effectieve Dispersie

De fluxdecompositie maakt het mogelijk de bijdragen van netto stroming, uitwisselingsstroming, getijstroming en scheringsvariëaties binnen het getij aan de totale zoutflux te kwantificeren. De analyse kan nog worden uitgebreid met een volgende stap in de methodiek waarin de fluxbijdragen van de importerende mechanismen worden vertaald in effectieve dispersiecoëfficiënten (*Effective Dispersion Coefficients*). Dit kan door gebruik te maken van de aanname van 'gradient diffusion', waarbij de bijdrage van processen die zelf tijds- of diepteafhankelijk zijn, worden uitgedrukt als functie van de getij- en dieptegemiddelde saliniteit(sgradiënt). In formulevorm:

$$F = AK \frac{\partial \langle S \rangle}{\partial x} \quad \rightarrow \quad K = \frac{F}{A} \left(\frac{\partial \langle S \rangle}{\partial x} \right)^{-1}$$

Hierbij is F de fluxbijdrage van het betreffende proces, A het oppervlak van de dwarsdoorsnede, $\langle S \rangle$ de tijds- en dieptegemiddelde saliniteit en K de bijbehorende dispersiecoëfficiënt.

De toegevoegde waarde van deze stap is dat hiermee niet alleen onderzocht kan worden hoe de bijdrages zich tot elkaar verhouden, maar dat hiermee beter zichtbaar kan worden gemaakt hoe de 'dispersie' zich verhoudt tot de getijamplitude, opzet en rivierafvoer. Een sterk positief

verband tussen effectieve dispersie en getijamplitude duidt op dominantie van getij-gerelateerde dispersiemechanismen. Een sterke correlatie met de rivierafvoer duidt op uitwisselingsstroming- en stratificatie-gerelateerde mechanismen. De aard van deze verbanden geeft indicaties over de onderliggende mechanismen (Okubo, 1973). Deze stap is succesvol toegepast in Kranenburg et al. (to be submitted) voor de North River, MA, USA.

Daarnaast kan met deze stap een verbinding gelegd worden tussen 3D-modelresultaten en 1D-modellering: de zoutfluxen gerelateerd aan (zowel getijgemiddelde als tijdsafhankelijke) snelheidsschering en stratificatie worden binnen het concept van een 1D model niet opgelost, maar de bijdrage van de uitwisselingsstroming wordt doorgaans beschreven met een dispersieformulering. Resultaten van deze stap voor parameterafhankelijkheden en kwantitatieve waarden van dispersie gerelateerd aan de uitwisselingsstroming zouden gebruikt kunnen worden voor verificatie van momenteel in 1D modellering toegepaste formuleringen en gebruikte waarden. Ook zouden langs deze weg formuleringen of waarden gezocht kunnen worden voor 1D modeltoepassingen buiten de range waarvoor de huidige modellen zijn gevalideerd. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat in deze methodiek gebruik gemaakt wordt van de gradiënt van de diepte- en getijgemiddelde saliniteit, terwijl voor het berekenen van dispersie in bijvoorbeeld SOBEX gebruik gemaakt wordt van de gradiënt van een dieptegemiddelde maar tijdsafhankelijke (getijgemiddelde plus variatie over het getij) saliniteit. Die laatste gradiënt lijkt weliswaar sterk op de eerste, maar is daaraan niet gelijk, waardoor ook de dispersiecoëfficiënten kunnen verschillen.

5.2 Mogelijke implicaties bevindingen

5.2.1 Implicaties voor maatregelen

De vraag 'welke fluxbijdrage is dominant' komt voort uit de zoektocht naar effectieve bronmaatregelen tegen verzilting. Een effectieve bronmaatregel vermindert zoutindringing door in te grijpen op het dominante importmechanisme. Er is gevonden dat in de Nieuwe Waterweg het grootste deel van de tijd de uitwisselingsstroming-gerelateerde fluxbijdrage dominant is over de getij-gerelateerde fluxbijdrage. Dat is een aanwijzing dat maatregelen die de verticale menging weten te bevorderen, en daarmee de stratificatie en de sterkte van de uitwisselingsstroming zullen verminderen, een groot deel van de tijd effectieve bronmaatregelen ter vermindering van de zoutindringing kunnen zijn. Daarbij is gevonden dat de maximale stratificatie doorgaans gevonden wordt nabij Maassluis, wat betekent dat zo'n maatregel het meest effectief is wanneer deze in deze omgeving wordt ingezet.

Tegelijkertijd is in deze studie de grote invloed van de windopzet-events bevestigd en is gevonden dat tijdens opzet-events de inwaartse zoutflux feitelijk veroorzaakt wordt door een tijdelijke omkering van de netto stroming, en dat de bijdrage van de uitwisselingsstroming tijdens die events juist sterk afneemt. Dat betekent mogelijk dat verticale menging bevorderende maatregelen weliswaar een groot deel van de tijd de zoutindringing kunnen verminderen, maar waarschijnlijk weinig tot geen invloed zullen hebben op de inwaartse zoutflux tijdens een opzet-event. Dit lijkt in lijn met eerdere bevindingen over bellenpluimen als verziltingbeperkende maatregel: inzet van bellenpluimen bij Maassluis werd zeer effectief bevonden om zoutindringing verder bovenstrooms te reduceren, behalve tijdens perioden met opzet (Friocourt et al., 2013). Opzet-events zijn juist momenten met grote zoutindringing. Daarom wordt aanbevolen om scherper in beeld te brengen wat nou eigenlijk precies de meest kritische condities zijn, en hoe voor die situaties de zoutindringing tot stand is gekomen: is de ongewenste (langdurige) overschrijding van een norm het gevolg van een gestage influx van zout, of eerder van een korte, opzet gerelateerde, sterke influx van zout die niet afdoende wordt gecompenseerd in de daarop volgende dagen waardoor zout achterblijft en voor langdurige

normoverschrijding zorgt? En hoewel tijdens het opzet-event de bijdrage van de uitwisselingsstroming-gerelateerde zoutflux aan het inwaartse transport nagenoeg verdwijnt, heeft deze wel een rol in de voorgeschiedenis die de uitgangssituatie bij aanvang van het opzet-event bepaalt. Zodoende kan meer verticale menging voorafgaand aan de opzet mogelijk de invloed van de stromingsomkering tijdens de opzet beperken. Daarbij is het goed te bedenken dat de daadwerkelijke zoutindringing en saliniteit in het systeem niet het resultaat is van de som van de fluxen op dat moment, maar van de cumulatieve som van de fluxen over de tijd (de 'som van de geschiedenis').

Daarnaast is het de moeite waard te overwegen hoe bevordering van verticale menging verder door zal werken op de systeemreactie en daarna weer op de fluxen. De verwachting is dat – gedurende de tijd dat de uitwisselingsstroming-gerelateerde fluxbijdrage dominant is – bevordering van verticale menging zal leiden tot een afname van de stratificatie en van de uitwisselingsstroming. De fluxbijdrage zal hierdoor minder worden. Omdat de netto stroming (in ieder geval in eerste instantie) nog op gelijke wijze bijdraagt, zal de zoutindringing verminderen. Het gevolg hiervan is dat de lengte van het estuarium afneemt, en daarmee de gradiënt van de diepte- en getijgemiddelde saliniteit in langsrichting ($d\langle S \rangle / dx$) toeneemt. Een sterkere gradiënt betekent juist dat stratificatie makkelijker gegenereerd kan worden: hoe sterker de saliniteitsgradiënt, des te minder verticale schering nodig is om stratificatie tot stand te brengen ($dS/dx * dU/dz \rightarrow dS/dz$). En stratificatie werkt weer bevorderend voor de schering en de uitwisselingsstroming-gerelateerde zoutflux. Oftewel: de maatregel roept een tegenwerkende kracht op, die op een gegeven moment zal zorgen voor een plafond aan de effectiviteit van de maatregel. Een dergelijke negatieve terugkoppeling zal er ook zijn ten aanzien van de getij-gerelateerde zoutflux: ook die wordt sterker naarmate de saliniteitsgradiënt langs het estuarium toeneemt.

5.2.2 Implicaties voor modelstudies

De bevinding dat de uitwisselingsstroming-gerelateerde fluxbijdrage een groot deel van de tijd de dominante bijdrage is aan de import van zout, onderstreept het belang van het goed kunnen voorspellen van de veranderingen in deze bijdrage onder invloed van veranderingen in het systeem of in de forcering van het systeem. Dit is van belang zowel voor studies naar impacts van infrastructurele ingrepen als voor studies naar de gevoeligheid van het systeem voor zeespiegelstijging en veranderende rivierafvoeren. Om deze bijdrage door een model zelf uit te laten rekenen (dus zonder parametrisatie voor deze bijdrage), is tenminste een 2DV model nodig, waarin stroming en saliniteit worden uitgerekend als functie x , z en t . Merk op dat voor het nauwkeurig en proces-gebaseerd voorspellen van de stroming en saliniteit rondom splitsingspunten en openingen van havenbekkens, in het bijzonder wanneer dichtheidsverschillen en rol spelen, een 3D model noodzakelijk is.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In een open verbinding met zee kan zout via diverse mechanismen een delta-systeem binnenkomen. Bekende importerende mechanismen zijn de estuariene uitwisselingsstroming (*estuarine circulation*) en getij-gerelateerde dispersie (*tidal dispersion*) door bijvoorbeeld havenbekkens, vertakkingen of circulaties in het horizontale vlak. Hoe ver zout daadwerkelijk indringt, wordt bepaald door de optelsom van deze mechanismen en het normaliter uitspoelende effect van de netto stroming. Met het oog op maatregelen ter beperking van zoutindringing is in deze studie de verhouding verkend tussen uitwisselingsstroming-gerelateerde en getij-gerelateerde fluxbijdrages in de Rijn-Maasmonding. Dit is gedaan door modelresultaten voor saliniteit en stroming voor diverse locaties langs de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas op te splitsen in getijgemiddelde en over het getij variërende componenten en die ook weer op te splitsen in dieptegemiddelde en over de diepte variërende componenten. De vier stromingscomponenten zijn vermenigvuldigd met de bijbehorende saliniteitscomponenten, geïntegreerd over de diepte en gemiddeld over het getij, waarmee de fluxbijdrage van de (getij-gemiddelde en diepte-gemiddelde) netto stroming, de (getij-gemiddelde, maar diepte-afhankelijke) uitwisselingsstroming, de (met het getij variërende, maar diepte-gemiddelde) getijstroming en de met het getij variërende schering zijn bepaald.

De belangrijkste bevindingen van deze analyse zijn:

- 1) In de Nieuwe Waterweg is de uitwisselingsstroming-gerelateerde fluxbijdrage het grootste deel van de tijd dominant over de getij-gerelateerde fluxbijdrage;
- 2) Verderop in de Nieuwe Maas is de bijdrage van de uitwisselingsstroming nagenoeg afwezig en is de getij-gerelateerde fluxbijdrage het grootste deel van de tijd dominant;
- 3) Tijdens opzet-events neemt de bijdrage van de uitwisselingsstroming ook in de Nieuwe Waterweg sterk af en wordt de zoutindringing feitelijk veroorzaakt door een tijdelijke omkering van de netto stroming.

De belangrijkste implicaties van deze bevindingen zijn naar verwachting:

- a) dat maatregelen die de verticale menging op de Nieuwe Waterweg weten te bevorderen, en daarmee de stratificatie en de sterkte van de uitwisselingsstroming zullen verminderen, een groot deel van de tijd effectieve bronmaatregelen ter vermindering van de zoutindringing zullen zijn;
- b) maar dat verticale menging bevorderende maatregelen weinig tot geen invloed zullen hebben op de inwaartse zoufluxen tijdens periodes met opzet, of alleen indirect door invloed op zoutindringing voorafgaand aan het opzet-event.

6.2 Aanbevelingen

De voornaamste aanbevelingen vanuit deze studie zijn om:

- Scherper in beeld te brengen wat de meest kritische momenten voor zoutindringing zijn, en vast te stellen hoe de zoutindringing onder die condities tot stand is gekomen: is dat middels gestage aanvoer door estuariene circulatie of middels kortstondige, opzet gerelateerd omkering van de netto stroming?
- Een methode te zoeken om de fluxbijdrage van opzet-events en die van de rivierafvoer (die nu beide terecht komen in de bijdrage van de diepte- en getijgemiddelde stroming) beter te kunnen onderscheiden en afzonderlijk te kunnen kwantificeren.

7 Referenties

Rapporten Deltares

- Friocourt, Y.F. Kaaij, T. van der Uittenbogaard, R.E. Plieger, R. Verploegh, D. (2012). *Inzetbaarheid van luchtbellenschermen voor het beperken van de zoutindringing in de Rijn-Maasmonding: locatieonderzoek en noodzakelijke grootte van het entrainmentdebiet*. Deltares, rapport 1205285-000-ZKS-0012, sep. 2012.
- Friocourt, Y.F. Uittenbogaard, R.E. Cornelisse, J.M. Balkema, S. (2013). *Luchtbellenpluimen in de Nieuwe Waterweg: eindrapportage schaalonderzoek*. Deltares, rapport 1206501-000-ZKS-0021, dec. 2013
- Friocourt, Y.F. Uittenbogaard, R.E. Verploegh, D. (2013). *Luchtbellenpluimen in de Nieuwe Waterweg: rapportage verre-veld scenarioberekeningen*. Deltares, rapport 1206501-000-ZKS-0024, dec. 2013.
- Groenenboom, J. & Kranenburg, W.M. (2016). *Beperking Zoutindringing Nieuwe Waterweg, Onderdeel KPP CIP 2016*. Deltares, rapport 1230049-002-BGS-0001.
- Groenenboom, J., Veenstra, J. (2017). *Beperking Zoutindringing Nieuwe Waterweg, CIP 2017: Studie naar de effecten van openingen in de Splitsingsdam, pompschepen en bellenboten*. Deltares, rapport 11200544-003-BGS-0002, nov. 2017,
- Groenenboom, J. (2018). *Onderzoek naar bronmaatregelen in de Nieuwe Waterweg; Aanvullende werkzaamheden CIP2017*. Deltares, rapport 11202492-002-ZKS-0002, 2018.
- Groenenboom, J., Kranenburg, W.M. (2018). *Afsluitend document: CIP Deltares – Beperking Zoutindringing Nieuwe Waterweg*, Deltares memo 11202492-002-ZKS-0003, nov. 2018.
- Groenenboom, J., Kranenburg, W.M. Laan, S.C. Kester, J.A.T.M. van. (2019). *Strategisch baggeren: onderdeel van KPP CIP 2019*, Deltares rapport, nov. 2019.
- Heijden, J.J.C. van der (2018). *Strategical Dredging Measures; CIP 2018: Effects of strategical dredging measures on salt water intrusion in the Nieuwe Waterweg*. Deltares, Stageverslag, onderdeel project 11202197.
- Huisman, Y. en Plieger, R (2019). *Verdieping Oude Maas als potentiële maatregel tegen verzilting: een verkenning: onderdeel van KPP verzilting*, Deltares, rapport 11202241-003-ZWS-0003, juni 2019.
- Kranenburg, W.M. (2015a). *Evaluatie van het OSR-model voor zoutindringing in de Rijn-Maasmonding (I)*, Deltares, rapport 1209459-000-ZKS-002, feb. 2015.
- Kranenburg, W.M. (2015b). *Evaluatie van het OSR-model voor zoutindringing in de Rijn-Maasmonding (II)*, Deltares, rapport 1220070-000-ZKS-000, juni 2015.

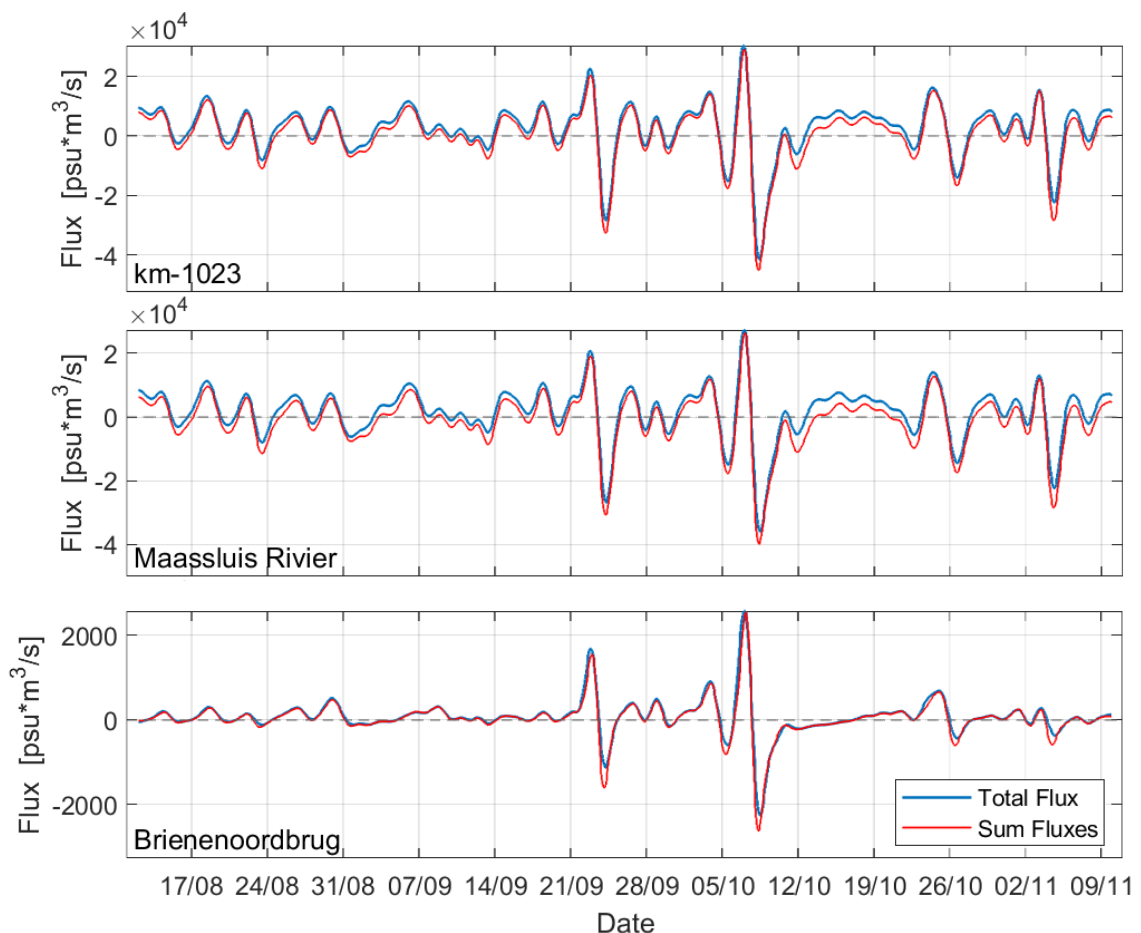
- Kranenburg, W.M. (2015c). *Verkenning Beperking Zoutindringing Nieuwe Waterweg, onderdeel KPP CIP 2015*. Deltares, rapport 1220046.005, nov. 2015.
- Kranenburg, W.M. and R. Schueder (2015). *OSR-simulaties voor zoutindringing in de Rijn-Maasmonding zomer 2003*, Deltares, rapport 1220070-000-ZKS-002, dec. 2015.
- Kranenburg, W.M. T. van der Kaaij, H.F.P. van den Boogaard, D. Verploegh, Y.M. Dijkstra, R.E. Uittenbogaard (2016a). Ontwikkeling 'Zoutfluxontrafelaar' (fase 1): Pilot voor een diagnostische tool voor bepaling van zoutfluxcomponenten en dispersiecoëfficiënten uit 3D-modelresultaten, Deltares, rapport1220070-000-ZKS-0032, feb. 2016.

Artikelen en boeken

- Fischer, H., List, E., Koh, R., Imberger, J., & Brooks, N. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press.
- Geyer, W. R., & MacCready, P. (2014). The estuarine circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46(1), 175–197. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141302>.
- Geyer, W.R., Trowbridge J.H., Bowen M.M. 2000. The dynamics of a partially mixed estuary. *J. Phys. Oceanogr.* 30, 2035–2048.
- Hansen, D.V., Rattray, M. (1965). Gravitational circulation in straits and estuaries. *J. Mar. Res.* 23:104–122.
- Kranenburg, W.M., T. van der Kaaij, H.F.P. van den Boogaard, R.E. Uittenbogaard, Y.M. Dijkstra (2016b). Unravelling salt fluxes. A tool to determine flux components and dispersion rates from 3D models. In: Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change: Proceedings of 4th IAHR Europe Congress, Liege, Belgium, July 2016.
- Kranenburg, W.M., Geyer, W.R., Ralston, D.K. (). Dominance of tidal dispersion in an intermittently stratified estuary. *To be submitted*.
- Lerczak, J.A., Geyer, W.R., Chant, R.J. (2006). Mechanisms driving the time-dependent salt flux in a partially stratified estuary. *J. Phys. Oceanogr.* 36:2296–2311.
- MacVean, L.J. and Stacey, M.T. (2011). Estuarine dispersion from tidal trapping: a new analytical framework. *Estuaries and Coasts*, v.34(1), doi: 10.1007/s12237-01 0-9298-x.
- Okubo, A. 1973. Effect of shoreline irregularities on streamwise dispersion in estuaries and other embayments. *Netherlands Journal of Sea Research*, 6(1–2): 213–224.
- Ralston, D. K., W. R. Geyer, and J. A. Lerczak (2010), Structure, variability, and salt flux in a strongly forced saltwedge estuary, *J. Geophys. Res.*, 115, C06005, doi:10.1029/2009JC005806
- Rigter, B.P. (1973). Minimum Length of Salt Intrusion in Estuaries, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 1973, Vol. 99, Issue 9, Pg. 1475-1496

A Verificatie som van de zoutfluxcomponenten

Vergelijking van de som van de afzonderlijke zoutfluxcomponenten met de totale zoutflux zoals gevonden door directe berekening vanuit het onontbonden saliniteits- en stromingssignaal laat zien dat de verschillen tussen beide beperkt zijn. Dit is een indicatie dat de vier fluxtermen bepaald uit vermenigvuldiging van de vier stromingscomponenten met de bijbehorende saliniteitscomponenten het overgrote deel van de totale zoutflux voor hun rekening nemen. De verschillen zijn het grootst ten tijde van de grootste pieken in de zoutflux, die samenvallen met opzet-events en omkering van de netto stroming. Het is ook te verwachten dat de (verwaarloosde) bijdrage van de kruistermen juist het grootst is ten tijde van deze relatief snelle en grote verandering in de netto stroming.



Figuur 15: Vergelijking totale zoutflux en som van de fluxcomponenten. Hierbij is de totale flux direct berekend uit de modelresultaten voor stroming en saliniteit en de som van de fluxcomponenten de som van de flux gerelateerd aan de netto stroming, de uitwisselingsstroming, de dieptegemiddelde getijstroming en de tijdsafhankelijke schering in de getijstroom, bepaald via vermenigvuldiging van bij elkaar horende stromings- en saliniteitscomponenten.